



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας Εργαστήριο Μηχανολογικού Σχεδιασμού Καθηγητής : Π.Ν. Μπότσαρης		Democritus University of Thrace School of Engineering Department of Production Engin. & Management Faculty of Materials, Processes and Engineering Laboratory of Mechanical Design Professor.: P.N. Botsaris
--	---	---

Ανάλυση Λειτουργίας Συστήματος με Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας Μεγάλης Κλίμακας και Αξιολόγηση της Επίδρασής του στη Βιωσιμότητα μιας Τοπικής Ενεργειακής Κοινότητας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΠΑΠΑΤΣΟΥΝΗΣ ΑΔΑΜΑΝΤΙΟΣ

Διπλ. Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΠΑΝΤΕΛΕΗΜΩΝ Ν. ΜΠΟΤΣΑΡΗΣ

Καθηγητής Δ.Π.Θ.

ΞΑΝΘΗ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2023



Ανάλυση Λειτουργίας Συστήματος με Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας Μεγάλης Κλίμακας και Αξιολόγηση της Επίδρασής του στη Βιωσιμότητα μιας Τοπικής Ενεργειακής Κοινότητας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παπατσούνης Αδαμάντιος

Διπλ. Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής:

Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελεήμων Ν. Μποτσάρης, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Μέλος 2: Στέφανος Κατσαβούνης, Αναπ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Μέλος 3: Ζήνωνας Βλαχοστέργιος, Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής:

Μέλος 4: Γεώργιος Γκαϊντατζής, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Μέλος 5: Αθανάσιος Βαβάτσικος, Επίκ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Μέλος 6: Δημήτριος Δημητρίου, Καθηγητής, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Μέλος 7: Μαρία Φουντή, Καθηγήτρια, Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Η παρούσα διδακτορική διατριβή υποβλήθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης για την απόκτηση του διδακτορικού τίτλου στις Επιστήμες της Μηχανικής

Ξάνθη, 2023



Analysis of Operation of a Large-Scale Energy System with Thermal Energy Storage Exploitation and Evaluation of its Im- pact on the Viability of a Local Energy Community

DOCTORAL THESIS

Papatsounis Adamantios

M.Eng. Production and Management Engineer

COMMITTEE OF EXAMINERS

Members of the Advisory Committee:

Supervisor: Panteleimon N. Botsaris, Professor, Department of Production and Management Engineering, Democritus University of Thrace

Member 2: Stefanos Katsavounis, Subs. Professor, Department of Production and Management Engineering, Democritus University of Thrace

Member 3: Zinonas Vlachostergios, Ass. Professor, Department of Production and Management Engineering, Democritus University of Thrace

Members of the Committee of Examiners:

Member 4: Georgios Gaitajis, Professor, Department of Production and Management Engineering, Democritus University of Thrace

Member 5: Athanasios Vavatsikos, Ass. Professor, Department of Production and Management Engineering, Democritus University of Thrace

Member 6: Dimitrios Dimitriou, Professor, Department of Economic Sciences, Democritus University of Thrace

Member 7: Maria Founti, Professor, Mechanical Engineering, National Technical University of Athens

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Engineering, Department of Production and Management Engineering, Democritus University of Thrace

Xanthi, 2023

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας

Εργαστήριο Μηχανολογικού Σχεδιασμού

Καθηγητής : Π.Ν. Μπότσαρης



Democritus University of Thrace

School of Engineering

Department of Production Engin. & Management

Faculty of Materials, Processes and Engineering

Laboratory of Mechanical Design

Professor.: P.N. Botsaris

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας Εργαστήριο Μηχανολογικού Σχεδιασμού Καθηγητής : Π.Ν. Μπότσαρης		Democritus University of Thrace School of Engineering Department of Production Engin. & Management Faculty of Materials, Processes and Engineering Laboratory of Mechanical Design Professor.: P.N. Botsaris
--	---	---

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Σχολή: Πολυτεχνική Σχολή Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης

Τμήμα: Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Ονοματεπώνυμο (Ελληνικά): Παπατσούνης Αδαμάντιος

Ονοματεπώνυμο (Αγγλικά): Papatsounis Adamantios

Όνομα Πατρός: Γεώργιος

Τίτλος διατριβής στην ελληνική: Ανάλυση λειτουργίας συστήματος με αποθήκευση θερμικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας και αξιολόγηση της επίδρασής του στη βιωσιμότητα μιας τοπικής ενεργειακής κοινότητας

Τίτλος διατριβής στην αγγλική: Analysis of operation of a large-scale energy system with thermal energy storage exploitation and evaluation of its im-pact on the viability of a local energy community

Ημερομηνία υποστήριξης διδακτορικής διατριβής: 04/04/2023

Επιβλέπων Καθηγητής και Μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής

1. Επιβλέπων Καθηγητής: Παντελεήμων Ν. Μπότσαρης, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (Επιβλέπων)
2. Στέφανος Κατσαβούνης, Αναπ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
3. Ζήνωνας Βλαχοστέργιος, Επικ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

Εξεταστική Επιτροπή:

1. Μέλος 4: Γεώργιος Γκαϊντατζής, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
2. Μέλος 5: Αθανάσιος Βαβάτσικος, Επικ. Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
3. Μέλος 6: Δημήτριος Δημητρίου, Καθηγητής, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
4. Μέλος 7: Μαρία Φουντή, Καθηγήτρια, Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης Πολυτεχνική Σχολή Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης Τομέας Υλικών, Διεργασιών και Μηχανολογίας Εργαστήριο Μηχανολογικού Σχεδιασμού Καθηγητής : Π.Ν. Μπότσαρης		Democritus University of Thrace School of Engineering Department of Production Engin. & Management Faculty of Materials, Processes and Engineering Laboratory of Mechanical Design Professor.: P.N. Botsaris
--	---	---

Τίτλος ειδικότητας που αποκτήθηκε: Δρ. Μηχανολογίας

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ (Επιστημονικό Πεδίο στα Ελληνικά)

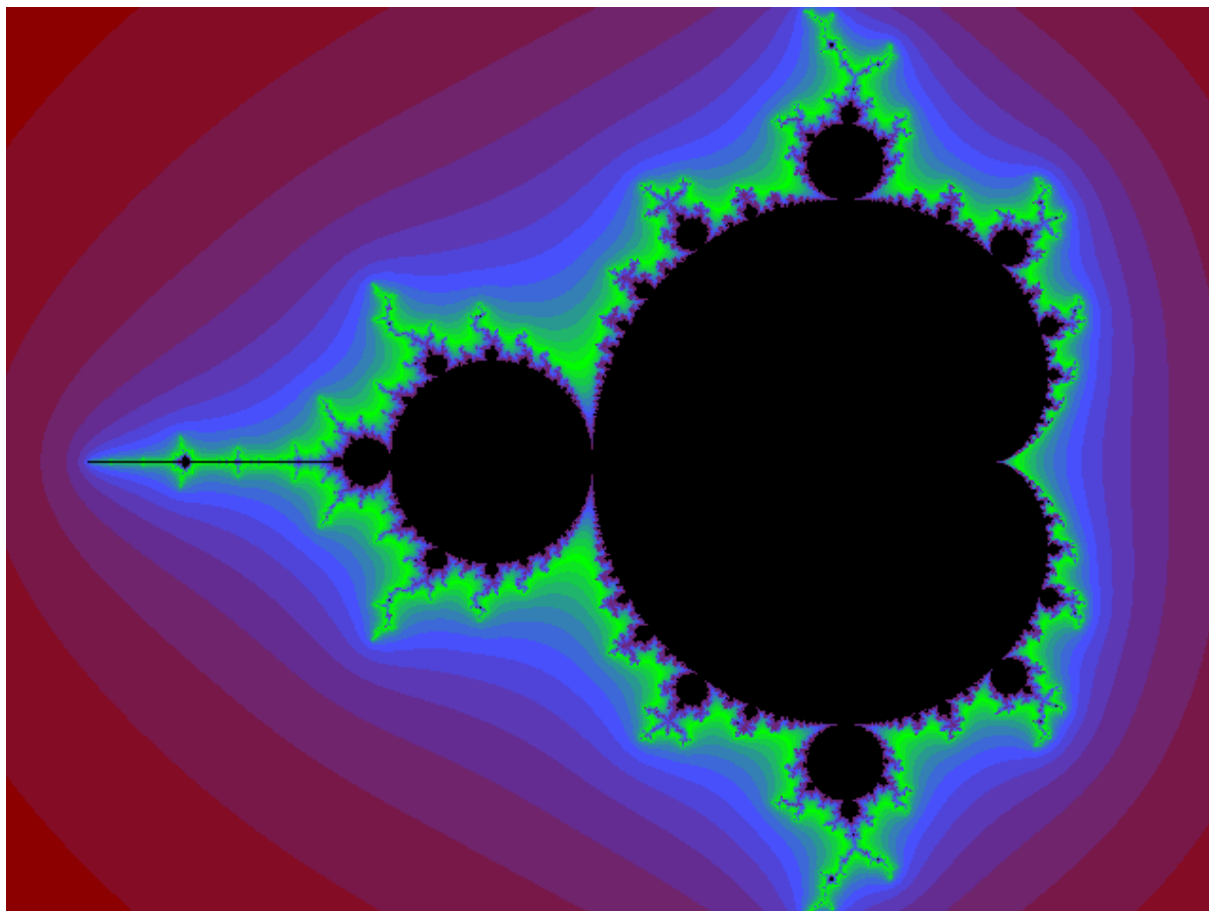
1. Θερμική ενέργεια
2. Διαχείριση, αποθήκευση και διανομή
3. Συστημική μηχανική

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ (Επιστημονικό Πεδίο στα Αγγλικά)

1. Thermal energy
2. Management, storage, and distribution
3. System's engineering

Υπογραφή Συγγραφέα:

Υπογραφή Γραμματείας Τμήματος Δ.Π.Θ.



Χάος και αρμονία των δυναμικών συστημάτων στο σύνολο Μάντελμπροτ (θεωρία του Χάους).

Πρόλογος

Η ενεργειακή κρίση των ημερών ενέτεινε φαινόμενα ενεργειακής ασφάλειας, ενεργειακής φτώχειας και ενεργειακής εξάρτησης. Τα ευαίσθητα γεωπολιτικά ζητήματα, όπως το θερμό επεισόδιο μεταξύ Ρωσίας και Ουκρανίας προκάλεσαν παροδική αύξηση των τιμών ενέργειας (ηλεκτρικής και θερμικής) έως και τρεις φορές περισσότερο από τις ισχύουσες πριν την κρίση. Η ευμεταβλητότητα της κοινωνίας σε σύνθετα κοινωνικό-πολιτικά ζητήματα οφείλεται εν μέρει στην εξάρτηση της σύγχρονης κοινωνίας από τους ορυκτούς πόρους και στις διακρατικές σχέσεις μεταφοράς τους. Μία λύση που μελετάται με αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον είναι η αποκέντρωση της παραγωγής και διαχείρισης της ενέργειας, από κεντρικά μοντέλα όπως π.χ. η Δ.Ε.Η. σε κατακεντρωμένα μοντέλα όπως αυτά των ενεργειακών κοινοτήτων (ΕΚ). Οι ΕΚ αποτελούν σύνθετη ερευνητική επιδίωξη καθώς «δραστηριοποιούνται γύρω από την παραγωγή, διανομή και διαχείριση ενέργειας καθώς και γύρω από τον συμψηφισμό, αποθήκευση ή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης μέσω παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες παρέχοντας λοιπές υπηρεσίες ενέργειας στα μέλη ή τους μετόχους τους». Ήδη η διαθέσιμη βιβλιογραφία αναδεικνύει την σημασία και την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού τους και της ενσωμάτωσής τους στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη, με κύριο άξονα εστίασης τον σχηματισμό ηλεκτρικών ΕΚ.

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί σήμερα το 25% της τελικής καταναλισκόμενης ενέργειας στον κτιριακό τομέα ενώ το υπόλοιπο 75% αντιστοιχεί στην κάλυψη αναγκών θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης. Η σύγχρονη βιβλιογραφία αναδεικνύει την σημαντικότητα της θερμικής και ψυκτικής ενέργειας και την έλλειψη συστηματικών εργαλείων σχεδιασμού ΕΚ που καλύπτουν τις ανάγκες τους σε θερμικό και ψυκτικό επίπεδο. Ο ενεργειακός εκδημοκρατισμός και η ενδυνάμωση της κοινωνίας των πολιτών — που ανάγονται από καταναλωτές σε παραγωγαναλωτές (prosumers) — πραγματοποιείται τόσο με διάφορα μέτρα όπως π.χ. επενδύσεις σε νέα δίκτυα διανομής ενέργειας όσο και με τη χρήση εργαλείων λήψης αποφάσεων προσφέροντας νέες δυνατότητες αλλά και προοπτικές στην ενεργειακή μετάβαση. Αυτό είναι και το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, όπου προτείνεται ένα ολιστικό, ενιαίο και μαθηματικώς ορισμένο εργαλείο σχεδιασμού κάλυψης των θερμικών αναγκών ΕΚ. Σκοπός είναι η εισαγωγή ενός καινοτόμου εργαλείου που στηρίζεται σε ανθρωποκεντρικά, ενεργειακά, συστηματικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια, αποφεύγοντας φαινόμενα υπερδιαστασιολόγησης και δαπάνης πόρων. Με το προτεινόμενο εργαλείο επιδιώκεται η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας ΕΚ (δυνητικής/υφιστάμενης) με τη μεγαλύτερη δυνατή διείσδυση του τοπικού διαθέσιμου ανανεώσιμου ενεργειακού δυναμικού, προσφέροντας βιώσιμη και αξιόπιστη ενέργεια στους χρήστες και αυξάνοντας την ενεργειακή τους ασφάλεια.

Με την αποδελτίωση της βιβλιογραφίας της τελευταίας δεκαετίας, εντοπίστηκε η συστηματική έλλειψη αναφοράς σε τοπική παραγωγή θερμικής και ψυκτικής ενέργειας σε ενεργειακούς συνασπισμούς όπως οι ΕΚ. Στο πλαίσιο αυτό και με γνώμονα την σημαντικότητα της ένταξης θερμικών ΕΚ στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη, διαρθρώθηκε και ο τίτλος της διατριβής «Ανάλυση λειτουργίας συστήματος με αποθήκευση θερμικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας και αξιολόγηση της επίδρασής του στη βιωσιμότητα μιας τοπικής ενεργειακής κοινότητας». Το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα που προκύπτει από τον τίτλο της διατριβής και επιχειρείται να απαντηθεί κατά την υλοποίησή της είναι: «Πως επιδρούν οι διαφορετικές τεχνολογίες κάλυψης θερμικής ενέργειας στην ενεργειακή μετάβαση και πώς μεταβάλλουν τη βιωσιμότητα των τοπικών ΕΚ (Local Energy Communities-LECs);». Η απάντηση του ερευνητικού αυτού ερωτήματος, κατά την άποψη του συγγραφέα, είναι διεπιστημονική καθώς θίγει τεχνολογικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά ζητήματα. Σκοπός επομένως της παρούσας διατριβής είναι αφενός η διερεύνηση της δυνατότητας ενσωμάτωσης των θερμικών ΕΚ στο μεταβαλλόμενο ενεργειακό τοπίο και αφετέρου η δημιουργία κατάλληλου μέσου/εργαλείου για την προώθηση του σκοπού αυτού.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός, παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή ένα ιεραρχικό και δομημένο εργαλείο το οποίο χωρίζεται σε τρία διακριτά σχεδιαστικά επίπεδα. Το εργαλείο αυτό ονομάστηκε «Μεθοδολογία Ιεραρχικού Δομημένου Σχεδιασμού (ΜΙΔΣ) – Hierarchically-Dependent Layering Methodology (HDLM) και εφαρμόζεται σε μελέτη περίπτωσης συγκροτήματος κατοικιών που βρίσκεται στα Κιμμέρια, Ξάνθης στην Ελλάδα. Το 1^ο Επίπεδο της προαναφερόμενης μεθοδολογίας (HDLM) αφορά στον προσδιορισμό των αναγκών των παραγωγαναλωτών και της κατηγοριοποίησής τους σε ένα ενεργειακό προφίλ κατανάλωσης (Χαμηλής, Μέτριας και Υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης). Η πραγματοποίηση αυτής της κατηγοριοποίησης στο 1^ο αυτό Επίπεδο προσεγγίζεται με την εισαγωγή ενός μαθηματικού υβριδισμού δύο υφιστάμενων μεθόδων κατηγοριοποίησης χρηστών ενέργειας, της ποιοτικής μεθόδου RenewIslands και της ποσοτικής Kaya Identity Methodology.

Στο 1^ο Επίπεδο ο χρήστης του εργαλείου επιλέγει αρχικά την κατηγορία στην οποία ανήκουν οι παραγωγαναλωτές της περίπτωσης που μελετά (βάσει της ενεργειακής τους έντασης) —ποιοτικό τμήμα της μεθοδολογίας— ενώ στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός της ετήσιας κατανάλωσης τους σε θερμική και ψυκτική ενέργεια —ποσοτικό τμήμα. Στη συνέχεια ομαδοποιούνται οι παραγωγαναλωτές βάσει της ετήσιας κατανάλωσής τους μέσω της μεθόδου ομαδοποίησης k-means clustering. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η υβριδοποίηση των μεθόδων, τα ποσοτικά δεδομένα ετήσιας κατανάλωσης θερμικής ενέργειας κανονικοποιούνται και αποδίδονται σε ασαφή τριγωνικά σύνολα. Τα σύνολα αυτά είναι τρία, όσες και οι κατηγορίες της ποιοτικής μεθόδου RenewIslands (Χαμηλή, Μέτρια και Υψηλή ενεργειακή κατανάλωση) και ανάλογα με το σύνολο στο οποίο παρατηρείται μέγιστη συγκέντρωση δεδομένων, επιλέγεται και η κατηγορία στην οποία ανήκουν οι παραγωγαναλωτές της ΕΚ.

Στο 2^ο Επίπεδο σχεδιασμού, σκοπός είναι η κατασκευή του συστήματος που θα καλύψει τις ανάγκες που εντοπίστηκαν στο 1^ο Επίπεδο. Για την επίτευξη της δημιουργίας ενός υβριδικού συστήματος, συνδυάζονται διαφορετικές τεχνολογίες εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη αναγκών (παραγωγή, αποθήκευση και διανομή) και εισάγεται η προσέγγιση σχεδιασμού μέσω υπερδομών (γράφοι διαδικασίας που περιλαμβάνουν όλους τους δυνατούς συνδυασμούς διασύνδεσης των διατάξεων του συστήματος). Αρχικά πραγματοποιείται διερεύνηση των δυνητικών τεχνολογιών εκμετάλλευσης ανανεώσιμου πρωτογενούς δυναμικού της εκάστοτε περιοχής και επιλέγονται οι καταλληλότερες βάσει κριτηρίων. Από ένα σύνολο κριτηρίων που εντοπίστηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία, επιλέχθηκαν εκείνα που εξυπηρετούν τους σκοπούς της παρούσας διατριβής.

Η κατάταξη των κριτηρίων που επιλέχθηκαν πραγματοποιήθηκε με χρήση πολυκριτήριας μεθόδου. Τα κριτήρια τα οποία τελικώς επιλέχθηκαν είναι η διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενεργειακού δυναμικού, η τεχνολογική ωριμότητα των τεχνολογιών εκμετάλλευσής του, η αξιοπιστία τους, το σταθμισμένο κόστος της παραγόμενης ενέργειας και η απαιτούμενη εδαφοκάλυψη. Ιεραρχώντας ως σημαντικότερα κριτήρια την διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενεργειακού δυναμικού και την τεχνολογική ωριμότητα των τεχνολογιών εκμετάλλευσης, επιλέχθηκαν για τη μελέτη περίπτωσης ως προτεινόμενες τεχνολογίες οι επίπεδοι ηλιοθερμικοί συλλέκτες, ο λέβητας βιομάζας, οι αντλίες θερμότητας νερού-νερού ανοικτού τύπου, ο ψύκτης απορρόφησης θερμότητας και το νερό ως μέσο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας ενώ χρησιμοποιήθηκε δίκτυο τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης για τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας προς τους παραγωγαναλωτές.

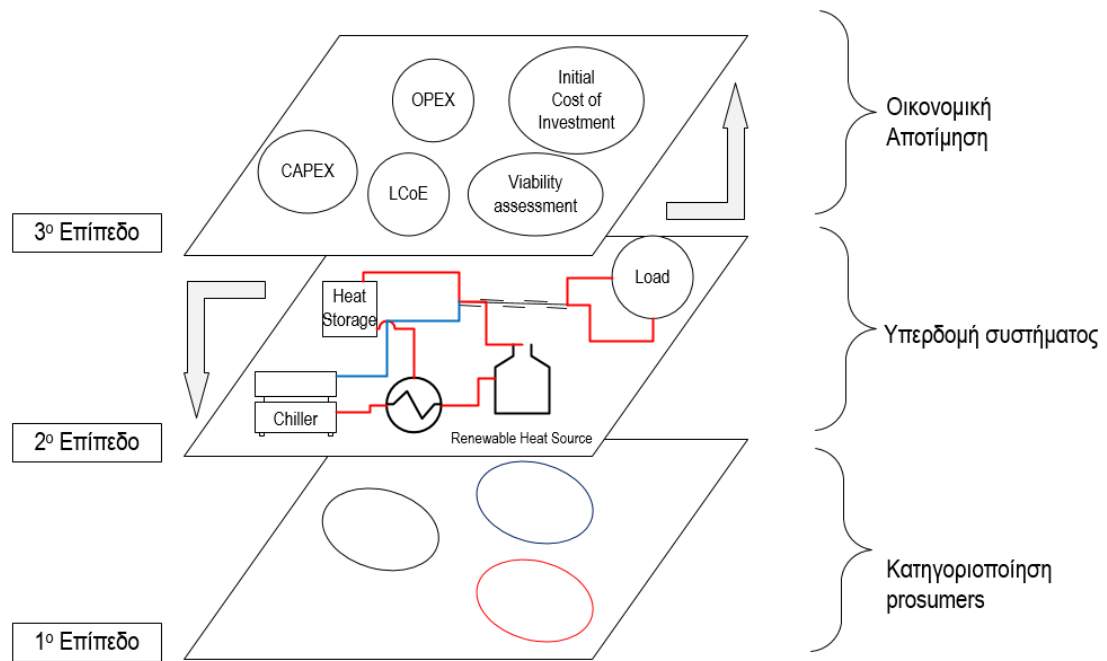
Για την κατασκευή του συστήματος – υπερδομής που σχεδιάζεται στο 2^ο Επίπεδο, μετά την επιλογή κατάλληλων τεχνολογιών πραγματοποιείται αποτύπωση τους σε πίνακες αληθείας, που αποτελεί και στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής. Οι πίνακες αληθείας χρησιμοποιούνται προκειμένου να εντοπιστεί ο υβριδικός συνδυασμός των τεχνολογιών αυτών, βάσει των επιλογών του χρήστη. Ο μετασχηματισμός των πινάκων αληθείας μέσω χαρτών Karnaugh και της μεθόδου Quine-McClauskey καταλήγει στην πρόταση ενός καινοτόμου υβριδικού συνδυασμού των επιλεγμένων τεχνολογιών. Το υδραυλικό ισοδύναμο του υβριδικού συνδυασμού α-

ποδίδεται μέσω λογικών πυλών ως γράφος διαδικασίας και αποτελεί ακόμα ένα στοιχείο πρωτοτυπίας της διατριβής. Η πρόταση αυτή αποτελεί πρωτοτυπία της διατριβής διότι ως αποτελέσματα του 2^{ου} Επιπέδου προκύπτουν τόσο η διαστασιολόγηση ενός υβριδικού συστήματος κάλυψης αναγκών όσο και η υδραυλική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος. Με το πέρας και της διαστασιολόγησης των επιλεγμένων τεχνολογιών στην τελική προτεινόμενη διάταξη, γίνεται η μετάβαση προς το 3^ο Επίπεδο, όπου πραγματοποιείται ο έλεγχος της οικονομικής βιωσιμότητας του προτεινόμενου συστήματος με δυνατότητα επιστροφής στο 2^ο Επίπεδο, εφόσον δεν πληρούνται οικονομικά κριτήρια.

Για την οικονομική αποτίμηση χρησιμοποιούνται δείκτες όπως το αρχικό κόστος επένδυσης (Capital Expenditures – CAPEX), το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Operational Expenditures – OPEX), το σταθμισμένο κόστος ενέργειας (Levelized Cost of Energy – LCoE), οι αποσβέσεις του συστήματος (Return of Investment – ROI), ο χρόνος μέχρι την απόσβεση (Payback Period – PP) και η καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value – NPV). Η αποτίμηση των δεικτών αυτών από το εργαλείο και ο έλεγχος της βιωσιμότητας του προτεινόμενου συστήματος εντός των προκαθορισμένων από τον χρήστη ορίων, τροφοδοτεί ή όχι τη δυνατότητα επιστροφής στο 2^ο Επίπεδο και στον επαναπροσδιορισμό των παραμέτρων του.

Το προτεινόμενο εργαλείο σχεδιασμού αποτελεί έναν μαθηματικό φορμαλισμό κύριων τάσεων σχεδιασμού και διαστασιολόγησης, που παρακάμπτει εμπόδια όπως αυξημένη υπολογιστική ισχύ, για βασικό αρχικό σενάριο, αγορά εμπορικής άδειας κ.α. Αυτά είναι ζητήματα που εντοπίζονται στα υφιστάμενα εργαλεία σχεδιασμού συστημάτων ενέργειας, τα οποία αρχικά δεν αναφέρονται εν πολλοίς στη θερμική και ψυκτική ενέργεια (προσανατολισμός σε ηλεκτρικά μεγέθη), δεν κάνουν εκτεταμένη χρήση μέσων αποθήκευσης θερμικής/ψυκτικής ενέργειας και δεν αναφέρονται κατεχοχήν σε ΕΚ. Η πρόταση της παρούσας διατριβής, το ιεραρχικό αυτό εργαλείο σχεδιασμού (HDLM), δύναται να εξυπηρετήσει ως ένα μέσο επιτάχυνσης της ενσωμάτωσης των θερμικών ΕΚ στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη με την ελπίδα να συνεισφέρει στον εκδημοκρατισμό της ενέργειας και την αποκέντρωση της από κεντρικούς διαχειριστές και παρόχους.

Η δομή της διατριβής απαρτίζεται από επτά κεφάλαια στα οποία αναπτύσσονται οι βασικοί στόχοι και τα στοιχεία καινοτομίας της διατριβής (Εισαγωγή - 1^ο Κεφάλαιο), βιβλιογραφική ανασκόπηση (2^ο Κεφάλαιο), βιβλιομετρική ανάλυση της βιβλιογραφίας (3^ο Κεφάλαιο), αποδελτίωση των διαθέσιμων εμπορικών λογισμικών και μαθηματικών μοντέλων στον τομέα του σχεδιασμού ενεργειακών συστημάτων θερμικής και ψυκτικής ενέργειας (4^ο Κεφάλαιο), αναλυτική μαθηματική αποτύπωση του προτεινόμενου εργαλείου (5^ο Κεφάλαιο), εφαρμογή του σε μελέτη περίπτωσης και τα αποτελέσματα της (6^ο Κεφάλαιο) και τέλος συμπεράσματα και προτάσεις που προκύπτουν από την εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής για την περαιτέρω ανάπτυξη του υπό εξέταση θέματος (Συμπεράσματα - Προτάσεις).



Σε αυτούς που έμειναν ακόμα και όταν το να μείνουν δεν ήταν επιλογή..

Ευχαριστίες

Πολλά έχουν γραφτεί κατά τα χρόνια για την πορεία, την ουσία και την δυσκολία εκπόνησης και συγγραφής διδακτορικών διατριβών. Αυτό που παραμένει αναλλοίωτο στο χρόνο είναι η προσωπική πινελιά που προσδίδει τον διαχρονικό χαρακτήρα του εκάστοτε διδακτορικού. Ο δρόμος του διδακτορικού είναι ευχάριστα μοναχικός με τη διαρκή ανάγκη για δεκανίκια διαφορετικών μορφών, που είτε προσφέρονται είτε στερούνται με τη διακριτική ευχέρια του Επιβλέποντα. Αρχίζοντας όμως από την αρχή, γράφω πλέον το κομμάτι που ονειρευόμουν από την αρχή της διδακτορικής μου διατριβής. Σίγουρα η αρχή μου δεν είναι το Πανεπιστήμιο, αλλά οι δικοί μου άνθρωποι, η οικογένεια μου. Το πρώτο και μεγαλύτερο ευχαριστώ, ένα ευχαριστώ που όσο και να το εκθειάσεις πάλι παραμένει μικρό, είναι το ευχαριστώ στην οικογένεια μου. Από τα βάθη του υπερεγώ μου, από την κορυφή της ανυπέρβλητης αγάπης που σας έχω, Μάνα, Πατέρα, Ειρήνη σας ευχαριστώ για τις αρχές, τα μαθήματα, τον χαρακτήρα και τη ζωή που μου προσφέρατε. Κάνατε το καλύτερο δυνατό με ότι είχατε και δεν είχατε και αυτό είναι περισσότερο από ό,τι κάνουν οι περισσότεροι άνθρωποι σε ολόκληρη ζωή.

Η συνέχεια του παρόντος εδαφίου θα μπορούσε να αποτελεί ένα αυτούσιο κεφάλαιο της διατριβής που ακολουθεί. Είναι η ένδειξη αγάπης και σεβασμού μου στον Επιβλέποντα και Μέντορα μου, τον Καθηγητή μου, Παντελή Μπότσαρη. Τα πάντα στη ζωή είναι οι άνθρωποι γύρω μας και αυτός ο άνθρωπος ίσως ήταν η επιτομή της προσωπικής, επαγγελματικής και συναισθηματικής μου εξέλιξης για τα τελευταία τρία και πλέον χρόνια. Υπήρξατε βράχος όταν ήταν απαραίτητο, φίλος όταν είχα ανάγκη, μέντορας όταν χρειάστηκα συμβουλές. Με αφήσατε να τρέξω ελεύθερος στα ερευνητικά μονοπάτια που με συγκινούσαν – ίσως κάποιες φορές και παραπάνω από ό,τι θα θέλατε. Παραθέτοντας τον Μ. Αυρίλιο «...ο καθένας αξίζει, όσο αξίζουν εκείνα για τα οποία έχει φροντίσει». Εσείς έχετε φροντίσει για πολλούς, για πολλά και για ουσιαστικά πράγματα στη ζωή με ανιδιοτέλεια και ειλικρινή προσφορά. Το ευχαριστώ αυτό πηγαινει λοιπόν στον άνθρωπο που στάθηκε δίπλα μου περισσότερο από κάθε άλλο στο ταξίδι αυτό, σας ευχαριστώ πολύ κύριε.

Μπορώ να θυμηθώ τώρα ότι παρέλειψα να γράψω εδάφιο Ευχαριστιών στην προπτυχιακή μου διπλωματική εργασία – πράγμα που μετανοiώνω ως σήμερα. Δεν είναι αργά όμως για να αποδώσω τον φόρο τιμής που του αναλογεί, την αγάπη και την εκτίμηση μου στον δεύτερο μέντορα μου, τον συνεπιβλέποντα του διδακτορικού μου, Αναπ. Καθηγητή Στέφανο Κατσαβούνη. Αποτελεί έναν από τους ανθρώπους που αγαπώ και εκτιμώ βαθύτατα από την πρώτη μέρα μου στην Πολυτεχνική της Ξάνθης, ήταν και η πρώτη μου επιλογή για Επιβλέπων διπλωματικής. Χωρίς να είναι κοινή γνώση, ήταν αυτός που μου σύστησε τον κ. Μπότσαρη ως καλύτερη εναλλακτική διπλωματική καθώς πίστευε ότι θα ταίριαζε περισσότερο με τα ενδιαφέροντα μου αλλά και την κλίση μου. Έχω γνωρίσει πολλούς καθηγητές σε αυτή τη ζωή λίγους όμως παιδαγωγούς, εσείς είστε ένας από αυτούς. Κάνατε αυτό που ήταν καλύτερο για μένα, με βοηθήσατε σε όλη τη πορεία τόσο των προπτυχιακών όσο και των μεταπτυχιακών επιδιώξεών μου, μου διδάξατε πολλά για την επιστήμη, το κρασί και τη ζωή. «Να παίρνεις χωρίς έπαρση, να παραχωρείς χωρίς δυσκολία», στο απόφθεγμα αυτό, στο μυαλό μου έρχεστε εσείς. Σας ευχαριστώ πολύ για όλα.

Το εδάφιο αυτό θα ήταν ατελές αν δεν συμπεριελάμβανα τους συνεργάτες μου στην πορεία της διατριβής. Είχα την τιμή να γίνω μέλος σε ένα εργαστήριο Μηχανολογίας, ή μάλλον σε ένα εργαστήριο ανθρώπων. Δεν ξέρω αν φταίει η πάστα του Επικεφαλής του εργαστηρίου, αλλά οι άνθρωποι που γνώρισα και συνεργάστηκα εκεί, αποτελούν εκτός από άριστους συναδέλφους, εξαιρετικούς μου φίλους πλέον. Βούλα, Αλέξανδρε, Λευτέρη, Κώστα, με μύησατε στον κόσμο των μηχανικών, μου μάθατε περισσότερα από πίστευα ποτέ ότι μπορεί να μάθω, με βοηθήσατε συναισθηματικά, ψυχικά και επαγγελματικά περισσότερο από οποιονδήποτε άλλο. Ιδιαίτερη μνεία στη συγκεκριμένη περίπτωση πρέπει να αποδοθεί σε έναν άνθρωπο που εκτιμώ και θαυμάζω βαθύτατα, την Δρ. Χάιδω

Κυρίτση. Χάιδω είσαι η κινητήριος δύναμη πολλών μηχανισμών εντός και εκτός εργαστηρίου, ένας εξαιρετικός άνθρωπος και ο λόγος ίσως που έκανα αυτό το διδακτορικό. Επιπρόσθετη μνεία στην κα. Δημητριάδου. Με βοήθησες να γίνω καλύτερος άνθρωπος και επαγγελματία. Σας ευχαριστώ για όλα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου. Σταθήκατε σε όλα, παντού και πάντα. Στάθη, Γιώργο, Γιάννη και πάλι Γιάννη, Φαίδρα. Χωρίς την καθοδήγηση, συνεισφορά και αγάπη σας δεν θα ήμουν ο άνθρωπος που είμαι σήμερα. Σας ευχαριστώ εκ βάθους καρδιάς.

«Όχι αργός και αναβλητικός στις πράξεις, στις κουβέντες σου μην ανακατώνεις τα πράγματα, μην χάνεσαι μες τις εντυπώσεις. Κοντολογίς, μήτε να συρρικνώνεται η ψυχή σου μήτε να διαχέεται μήτε να σε απορροφούν του βίου οι ασχολίες.» Μ. Αυρήλιος.

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2. 1: Συλλέκτης σωλήνα κενού με μονό σωλήνα και τον απορροφητή εμφωλιασμένο σε αυτόν [59].....	12
Εικόνα 2. 2: Τύποι συγκεντρωτικών κατόπτρων, τα α. και β. παρουσιάζουν μη κάτοπτρα με μη ανακλαστική απεικόνιση ενώ τα γ. και δ. Απεικονίζουν κάτοπτρα ανακλαστικής απεικόνισης [60].....	13
Εικόνα 2. 3: Ιδανικός κύκλος συμπίεσης ατμού T-s.	17
Εικόνα 3. 1: Βιβλιογραφική ερώτηση στις βάσεις δεδομένων που αφορά το νομικό πλαίσιο των τοπικών ΕΚ – 1110 αποτελέσματα [1]. 47	
Εικόνα 3. 2: Βιβλιογραφική ερώτηση στις βάσεις δεδομένων που αφορά υφιστάμενο ερευνητικό έργο πάνω σε θερμικές και ψυκτικές ΕΚ – 27 αποτελέσματα [1].	48
Εικόνα 3. 3: Βιβλιογραφική ερώτηση στις βάσεις δεδομένων που αφορά την πιθανότητα ενσωμάτωσης τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής θερμικής/ψυκτικής ενέργειας στις ΕΚ – 108 αποτελέσματα [1].....	48
Εικόνα 3. 4: Αποτέλεσμα βιβλιογραφικής ανάλυσης με τη χρήση του VOS Viewer για το EY1 [1].	49
Εικόνα 3. 5: Αποτέλεσμα βιβλιογραφικής ανάλυσης με τη χρήση του VOS Viewer για το EY2 [1].	50
Εικόνα 3. 6: Αποτέλεσμα βιβλιογραφικής ανάλυσης με τη χρήση του VOS Viewer για το EY3 [1].	51
Εικόνα 3. 7: Εξέλιξη και αλληλεπίδραση διαφορετικών ερευνητικών πεδίων στον τομέα της θερμικής αποθήκευσης ενέργειας.	52
Εικόνα 3. 8: Συσχέτιση μεταξύ τοπικής παραγωγής και εκμετάλλευσης θερμικής ενέργειας και του τοπικού χαρακτήρα αυτής στο πλαίσιο ΕΚ.	53
Εικόνα 3. 9: Σημαντικότεροι συγγραφείς στον τομέα των θερμικών/ψυκτικών τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων καθώς και στον τομέα της τοπικής παραγωγής, εκμετάλλευσης και αποθήκευσης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας (Litmaps®).....	54
Εικόνα 3. 10: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Krajacic et al. [3].	55
Εικόνα 3. 11: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Krajacic et al. [4].	55
Εικόνα 3. 12: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Lund et al. [5].	55
Εικόνα 3. 13: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Lund et al. [6].	56
Εικόνα 3. 14: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Pebeg et al. [7].	56
Εικόνα 3. 15: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Krajacic et al. [8].	56

Εικόνα 3. 16: Εμπορικό στάδιο των τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας [1].	57
Εικόνα 3. 17: Ετήσιος αριθμός ερευνητικών εργασιών με θέμα τις τεχνολογίες αποθήκευσης που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3. 16 από το 2014-2021.	58
Εικόνα 4. 1 Αρχιτεκτονική σχεδιασμού ενεργειακών κοινοτήτων bottom-up [1].	63
Εικόνα 4. 2: Τυπική αρχιτεκτονική εργαλείων δημιουργίας ενεργειακών κοινοτήτων φιλοσοφίας bottom-up.	66
Εικόνα 4. 3: Τυπικό διάγραμμα διακύμανσης ετήσιου φορτίου θέρμανσης μεγάλου κτιριακού συγκροτήματος κατοικιών.	74
Εικόνα 4. 4: Αρχιτεκτονική σχεδιασμού προτεινόμενου εργαλείου - HDLM (bottom-up) με τα στάδια τα οποία περιλαμβάνει.	76
Εικόνα 5. 1: Διάγραμμα ροής διαδικασίας υλοποίησης αλγορίθμου του 1 ^{ου} Επιπέδου της HDLM.	82
Εικόνα 5. 2: Οι 8 σημαντικότεροι μέθοδοι ομαδοποίησης (clustering) δεδομένων, ταξινομημένοι βάσει των βασικών στοιχείων της αρχιτεκτονικής τους.	87
Εικόνα 5. 3: Σημείο «αγκώνα» στην επιλογή βέλτιστου αριθμού clusters.	87
Εικόνα 5. 4 :Διάγραμμα ροής αλγορίθμου 2 ^{ου} Επιπέδου.	92
Εικόνα 5. 5: Ποιοτική κατηγοριοποίηση μεθόδων πολυκριτήριων αναλύσεων.	93
Εικόνα 5. 6: Τυπικός Πίνακας Συνδεσιμότητας που χρησιμοποιείται στη κατασκευή υπερδομών.	95
Εικόνα 5. 7: Μεθοδολογία Quine-McCluskey για τη βελτιστοποίηση πίνακα αληθείας.	96
Εικόνα 5. 8: Γράφος μονής ροής αποτελούμενος από δύο διαδικασίες για τη σύνθεση του αποτελέσματος.	97
Εικόνα 5. 9: Απεικόνιση υπερδομής που αναπαριστά διαδικασία παραγωγής πολλαπλών προϊόντων από πολλαπλά υλικά. Προϊόντα τα K, F, A, B, C, E, L, M.	99
Εικόνα 5. 10: Παράδειγμα γράφου μέγιστης παραγωγής συστήματος κάλυψης θερμικών και ψυκτικών αναγκών.	100
Εικόνα 5. 11: Παράδειγμα γράφου διαδικασίας, όπως προκύπτει από τον αντίστοιχο μετά τη βελτιστοποίηση, ως προς Quine-McCluskey, του αντίστοιχου πίνακα αληθείας.	100
Εικόνα 5. 12: Απόδοση υδραυλικών ανάλογων των λογικών πυλών Ή και ΚΑΙ.	101
Εικόνα 5. 13: Πίνακας του Rohrer για την απόδοση των λογικών πυλών (Bool) στα υδραυλικά-πνευματικά ανάλογά τους [17].	102
Εικόνα 5. 14: Κάλυψη αναγκών από συστήματα ΘΨΚ και ZNX στις κτιριακές δομές βάσει TOTE [3].	103
Εικόνα 5. 15: Οικονομική βελτιστοποίηση ηλιακού κλάσματος ως προς το κόστος το οριακό κόστος συστήματος. Αντιπαραβάλλεται το κόστος του συμβατικού αντίστοιχου συστήματος.	108
Εικόνα 6. 1: Δορυφορική άποψη των φοιτητικών εστιών της μελέτης περίπτωσης των Κιμμερίων, Ξάνθης.	117
Εικόνα 6. 2: Αρχιτεκτονικές όψεις ενός τυπικού κτιρίου των φοιτητικών εστιών.	118
Εικόνα 6. 3: Πλάγια όψη ενός τυπικού κτιρίου όπου απεικονίζεται η όδευση του δικτύου κεντρικής θέρμανσης (από τον κεντρικό συλλέκτη – κάτω, προς τα δωμάτια του κτιρίου.	119

Εικόνα 6. 4: Εύρεση βέλτιστου αριθμού cluster για το κανονικοποιημένο δείγμα της μελέτης περίπτωσης (διάγραμμα αγκώνα).	122
Εικόνα 6. 5: Κατηγοριοποίηση των κανονικοποιημένων δεδομένων στους clusters.	123
Εικόνα 6. 6: Εύρεση στατιστικής κατανομής του δείγματος του Πίνακα 6. 5 [7].	124
Εικόνα 6. 7: Ασαφή τριγωνικά σύνολα για τη μελέτη περίπτωσης.	125
Εικόνα 6. 8: Αιολικό δυναμικό του ελλαδικού χώρου σύμφωνα με τα δεδομένα της ΠΑΕ [12].	126
Εικόνα 6. 9: Ηλιακό δυναμικό ελλαδικού χώρου σύμφωνα με τα δεδομένα του Πανεπιστημίου Πατρών [14]. ...	127
Εικόνα 6. 10: Δυναμικό βιομάζας στον ελλαδικό χώρο σύμφωνα με το ΚΑΠΕ [15].	128
Εικόνα 6. 11: Γεωθερμικό δυναμικό στον Ελλαδικό χώρο σύμφωνα με τα δεδομένα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου [16].	129
Εικόνα 6. 12: Αποτελέσματα της AHP ως προς τα βάρη των κριτηρίων επιλογής τεχνολογιών [2].	131
Εικόνα 6. 13: Ανοιγμένος γράφος διαδικασίας (P-graph) που συμπεριλαμβάνει τις επιλεχθείσες τεχνολογίες και τις λογικές πύλες όπως προκύπτουν από την Εξ. 2 για το σενάριο κάλυψης του φορτίου θέρμανσης.	139
Εικόνα 6. 14: Ανοιγμένος γράφος διαδικασίας (P-graph) που συμπεριλαμβάνει τις επιλεχθείσες τεχνολογίες και τις λογικές πύλες όπως προκύπτουν από την Εξ. 3 για το σενάριο κάλυψης του φορτίου ψύξης.	139
Εικόνα 6. 15: Ολοκληρωμένη υδραυλική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος κάλυψης αναγκών θέρμανσης της μελέτης περίπτωσης της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.	141
Εικόνα 6. 16: Ολοκληρωμένη υδραυλική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος κάλυψης αναγκών ψύξης της μελέτης περίπτωσης της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.	142
Εικόνα 6. 17: Μεταβολή του βαθμού απόδοσης – COP ψύκτη απορρόφησης θερμότητας υπό διαφορετικά σενάρια φορτίου [47].	144
Εικόνα 6. 18: Τελική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος κάλυψης των θερμικών αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.	145
Εικόνα 6. 19: Τελική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος κάλυψης των θερμικών αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.	146
Εικόνα 6. 20: Διάγραμμα Sankey που απεικονίζει ποιο ποσοστό επί του συνολικού, καταλαμβάνει το CAPEX της εκάστοτε τεχνολογίας.	148
Εικόνα 6. 21: Διάγραμμα Sankey που απεικονίζει ποιο ποσοστό επί του συνολικού, καταλαμβάνει το OPEX της εκάστοτε τεχνολογίας.	149
Εικόνα 6. 22: Διάγραμμα Sankey για ολική απώλεια εξέργειας στο προτεινόμενο σύστημα κάλυψης αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.	150
Εικόνα 6. 23: Διάγραμμα Sankey που απεικονίζει ποιο ποσοστό επί του συνολικού, καταλαμβάνει το LCoE θέρμανσης, της εκάστοτε τεχνολογίας.	151
Εικόνα 6. 24: Διάγραμμα Sankey που απεικονίζει ποιο ποσοστό επί του συνολικού, καταλαμβάνει το LCoE ψύξης, της εκάστοτε τεχνολογίας.	151

Εικόνα 6. 25: Μονογραμμική απεικόνιση της προτεινόμενης όδευσης του δικτύου τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης για την περίπτωση της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων Ξάνθης	179
---	-----

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2. 1: Θερμικές ιδιότητες συνήθων υλικών [86].	23
Πίνακας 2. 2: Θερμότητα σύντηξης μερικών ανόργανων υλικών [86].	24
Πίνακας 2. 3: Στερεή αλλαγή φάσης και εντροπία τήξης για συγκεκριμένα ανόργανα υλικά [86].	25
Πίνακας 2. 4: Θερμότητα σύντηξης μερικών οργανικών υλικών [86].	25
Πίνακας 2. 5: Θερμότητα σύντηξης ορισμένων λιπαρών οξέων [86].	25
Πίνακας 2. 6: Μερικά πρωτότυπα μέσα θερμοχημικής αποθήκευσης [90].	26
Πίνακας 2. 7: Εργασίες με την μεγαλύτερη επιρροή (βάσει citation count) πάνω στην παραγωγή, διανομή και αποθήκευση θερμικής και ψυκτικής ενέργειας σε ενεργειακές κοινότητες	27
Πίνακας 3. 1: Κριτήρια αναζήτησης στις βιβλιογραφικές βάσεις εργασιών των Scopus και Google Scholar	47
Πίνακας 4. 1: Συγκεντρωτικός πίνακας ευρέως χρησιμοποιούμενων εμπορικών λογισμικών για το σχεδιασμό και τη λειτουργία τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων	69
Πίνακας 5. 1: Ερωτηματολόγιο μεθοδολογίας RenewIslands	83
Πίνακας 5. 2: Ερωτηματολόγιο πρωτογενούς δυναμικού για τη δυνητική κοινότητα στη RenewIslands	83
Πίνακας 5. 3: Τυπικός πίνακας αληθείας δύο μεταβλητών μονής εξόδου	95
Πίνακας 5. 4: Αντιστοίχιση λογικών μεταβλητών με τα δυαδικά ανάλογά τους	96
Πίνακας 5. 5: Μέσος ολικός εποχικός βαθμός απόδοσης αντλιών θερμότητας βάσει TOTEE [3]	104
Πίνακας 6. 1: Κτιριοδομικά χαρακτηριστικά μελέτης περίπτωσης ΕΚ Κιμμερίων, Ξάνθης [7]	115
Πίνακας 6. 2: Συντελεστές θερμοπερατότητας ανά δομικό στοιχείο για την κλιματική ζώνη Γ	116
Πίνακας 6. 3: Μελέτη θερμικών απωλειών κτιρίων μελέτης περίπτωσης	120
Πίνακας 6. 4: Εφαρμογή της μεθόδου KIM στη μελέτη περίπτωσης για υπολογισμό της ετήσιας θερμικής και ψυκτικής ενεργειακής κατανάλωσης	120
Πίνακας 6. 5: Συμπλήρωση ερωτηματολογίου RenewIslands για την μελέτη περίπτωσης	121
Πίνακας 6. 6: Κανονικοποίηση των τιμών του Πίνακα 6. 4	122
Πίνακας 6. 7: Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης πρωτογενούς δυναμικού για την περιοχή της μελέτης περίπτωσης	130
Πίνακας 6. 8: Κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας κάλυψης αναγκών	130
Πίνακας 6. 9: Πίνακας συνέπειας της μεθόδου AHP. Τα κριτήρια και οι αριθμητικές τιμές τους έχουν εξαχθεί από [18–21]	131
Πίνακας 6. 10: Ποιοτικοί και ποσοτικοί δείκτες αποδοτικότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των αντίστοιχων τεχνολογιών τους [18,19,22–29]	133

Πίνακας 6. 11: Σύνολο διαθέσιμων εμπορικών τεχνολογιών προς επιλογή για την εξυπηρέτηση φορτίων στη μελέτη περίπτωσης.....	134
Πίνακας 6. 12: Επιλεγμένες τεχνολογίες για την κάλυψη των αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.	136
Πίνακας 6. 13: Πίνακας αληθείας για τη μελέτη περίπτωσης των Κιμμερίων Ξάνθης, που απεικονίζει τις επιλεγμένες τεχνολογίες και των υβριδικό τους συνδυασμό προς την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων.	137
Πίνακας 6. 14: Χάρτης Karnaugh βάσει του Πίνακα 6. 12. για την κάλυψη του φορτίου θέρμανσης.	138
Πίνακας 6. 15: Χάρτης Karnaugh βάσει του Πίνακα 6. 12. για την κάλυψη του φορτίου ψύξης.	138
Πίνακας 6. 16: Σταθμισμένο κόστος τεχνολογιών ανά εγκατεστημένη μονάδα ισχύος (kW) [50–52].	147
Πίνακας 6. 17: CAPEX προτεινόμενου σεναρίου για την κάλυψη των αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.	147
Πίνακας 6. 18: Ανάλυση σταθμισμένου κόστους λειτουργικών εξόδων ανά επιλεγμένη τεχνολογία για την κάλυψη των αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης [52–56].	148
Πίνακας 6. 19: Κόστος εγκατάστασης συμβατικού συστήματος κάλυψης των ανάλογων αναγκών για την δυνητική ΕΚ των Κιμμερίων Ξάνθης.	152
Πίνακας 6. 20: Λειτουργικά κόστη συμβατικού συστήματος κάλυψης των ανάλογων αναγκών για την δυνητική ΕΚ των Κιμμερίων Ξάνθης.	152
Πίνακας 6. 21: Χρηματοροή προτεινόμενου και συμβατικού συστήματος για τα 10 πρώτα χρόνια λειτουργίας.	153
Πίνακας 6. 22: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προτεινόμενης μεθόδου HDLM στα τρία επίπεδα σχεδιασμού.....	154

Περίληψη

Ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχή ενεργειακή μετάβαση και την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη είναι η συμμετοχή των πολιτών. Οι τοπικές ενεργειακές κοινότητες (ΕΚ), οι οποίες είναι ενεργειακοί συνασπισμοί πολιτών με στόχο τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος στον κτιριακό τομέα, τυγχάνουν αυξανόμενης προσοχής την τελευταία δεκαετία. Αυτό συμβαίνει επειδή ο κτιριακός τομέας αντιπροσωπεύει σχεδόν το ήμισυ της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως (40%), με το 25% αυτής να καλύπτει ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας. Το υπόλοιπο ηχηρό 75% του, χρησιμοποιείται για κατανάλωση θερμικής και ψυκτικής ενέργειας καθώς και κάλυψη αναγκών ζεστού νερού χρήσης.

Ωστόσο, η κύρια εστίαση της βιβλιογραφίας παγκοσμίως μέχρι σήμερα είναι ρητά εστιασμένη στις ηλεκτρικές ΕΚ (electrical local energy communities – ELECs), παρά το γεγονός ότι η σημαντική αύξηση των τιμών του φυσικού αερίου και του πετρελαίου, δημιουργεί αστάθεια στις τιμές θέρμανσης και ψύξης. Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής παρέχεται αρχικά τόσο μία ολοκληρωμένη επισκόπηση του ερευνητικού πεδίου σχετικά με τις θερμικές ΕΚ (thermal local energy communities – TLECs) χρησιμοποιώντας λεπτομερείς ανασκοπήσεις βιβλιογραφίας και βιβλιομετρική ανάλυση (λογισμικό VOS viewer – 2^ο και 3^ο Κεφάλαιο) όσο και ένα συστηματικό εργαλείο σχεδιασμού θερμικών ΕΚ (5^ο Κεφάλαιο). Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής επισκόπησης καταδεικνύουν συλλογική έλλειψη βιβλιογραφίας στον τομέα των ΕΚ θερμικής/ψυκτικής ενέργειας, παρά την εντεινόμενη συμμετοχή τους στην ενεργειακή μετάβαση. Παρατηρείται επίσης σημαντική έλλειψη οδηγιών, ερευνητικού υποβάθρου και εφαρμογών, εθνικών πρωτοβουλιών και εργαλείων σχεδιασμού ειδικά για τη δημιουργία, ανάπτυξη και συντήρηση TLECs (4^ο Κεφάλαιο) που ενσωματώνουν συστήματα παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής θερμικής/ψυκτικής ενέργειας.

Στο πλαίσιο έλλειψης συστηματικού εργαλείου σχεδιασμού ΕΚ, η παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνει ένα ολιστικό, ενιαίο, μαθηματικώς ορισμένο και ανθρωποκεντρικά προσανατολισμένο εργαλείο σχεδιασμού. Το προτεινόμενο εργαλείο χωρίζεται σε τρία επίπεδα, το 1^ο Επίπεδο προτείνει μια υβριδική προσέγγιση για την ταξινόμηση των παραγωγαναλωτών (καταναλωτές που παράγουν και καταναλώνουν ενέργεια) αναβαθμίζοντας υφιστάμενες μεθοδολογίες (RenewIslands, Kaya Identity) με χρήση αλγορίθμων ομαδοποίησης, στατιστικών κατανομών και ασαφών συνόλων. Εφαρμόζοντας το προτεινόμενο εργαλείο, παρουσιάζεται μια μελέτη περίπτωσης σχεδιασμού μίας πλήρως λειτουργικής ΕΚ στα Κιμμέρια, Ξάνθης (6^ο Κεφάλαιο).

Το 2^ο και το 3^ο Επίπεδο αναφέρονται στη διαστασιολόγηση και οικονομική αξιολόγηση του κατανεμημένου ενεργειακού συστήματος που θα καλύψει τις θερμικές και ψυκτικές ανάγκες του 1^{ου} Επιπέδου. Το 2^ο Επίπεδο εξυπηρετεί στο σχεδιασμό υπερδομής της ΕΚ, όπου μέσω της χρήσης πινάκων αληθείας διερευνώνται υβριδικοί συνδυασμοί επιλεγμένου εξοπλισμού, η αλληλεπίδρασή τους για ανταπόκριση στα φορτία θέρμανσης και ψύξης, ο τελικός σχηματισμός της υπερδομής και η παράθεση του υδραυλικού ισοδυνάμου της. Στο 3^ο Επίπεδο γίνεται η οικονομική αξιολόγηση της προτεινόμενης υπερδομής. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις συμβατικές λύσεις, οι οποίες τείνουν να υπερεκτιμούν τον απαραίτητο εξοπλισμό, οδηγώντας σε εκτεταμένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.

Λέξεις-Κλειδιά: θερμική ενέργεια; κατανεμημένα συστήματα ενέργειας; ΕΚ; υπερδομές; πίνακες αληθείας; υδραυλικές λογικές πύλες; τεχνο-οικονομική αξιολόγηση

Abstract

One of the most crucial factors for energy transition and the incorporation of renewable energy sources into the existing energy map is citizen engagement. Local energy communities (LECs), cooperative-based coalitions aimed at reducing the carbon footprint of the residential building sector, have received increasing attention in the past decade. This is because residential buildings account for almost half of the total energy consumed worldwide. A resounding 75% is used for thermal energy consumption, heating and cooling, and bathing.

The scope of this study is to provide an overview of the research field regarding Thermal LECs, using both a thorough literature review as well as bibliometric analysis (VOS viewer and Litmaps software), in order to validate the findings of the review (Chapters 2 and 3). The results indicate a collective scarcity of literature in the field of thermal/cooling energy communities, despite their proven value to the energy transition. However, the main focus of the literature worldwide is explicitly on electrical LECs, despite the significant increase in natural gas and oil prices, which creates instability in the heating and cooling prices. A substantial lack of directives, research background, state initiatives, and tools specifically designed for creating and maintaining LECs (Chapter 4) which incorporate thermal/cooling energy production, storage and distribution systems, was also observed.

This doctoral dissertation presents a collective three-layered tool for decision-making for potential TLECs (Chapter 5). The 1st layer proposes a unified approach to classifying energy prosumers (consumers who produce and consume energy) using conventional methodologies (RenewIslands, Kaya Identity). A case study is presented to design a fully operating LEC in Kimmeria, Greece, in which both the traditional methods of classifying users are applied and the proposed methodology, in comparison (Chapter 6).

The 2nd and 3rd layers refer to the dimensioning and economic assessment of the distributed energy system that will cover the thermal and cooling needs of the 1st layer. The 2nd layer is the superstructure design of the TLEC, where a map approach is introduced and explores several combinations of the selected equipment, how they will interact to meet the heating and cooling loads, and how they will form the superstructure. The 3rd is the economic assessment of the proposed scenario. The results indicate a significant improvement to the conventional solutions, which tend to overestimate the needed equipment, leading to extensive installation and operational costs. The application of the proposed mathematical tool (HDLM) is presented in Chapters 5 and 6, while the last Chapter of this doctoral dissertation is the Conclusions and Suggestions for Further study.

Keywords: thermal energy; distributed energy systems; lecs; superstructures; hydraulic logic gates; techno-economic assessment

Περιεχόμενα Διατριβής

Πρόλογος	9
Ευχαριστίες	13
Ευρετήριο Εικόνων	i
Ευρετήριο Πινάκων	v
Περίληψη	vii
Abstract	viii
Εισαγωγή	1
1.1 Υπόβαθρο	1
1.2 Κίνητρο και αντικείμενο διατριβής	3
1.3 Στόχοι έρευνας και στοιχεία καινοτομίας:	4
1.4 Δομή διδακτορικής διατριβής	6
Βιβλιογραφία	7
Κεφάλαιο 2: Ενεργειακές Κοινότητες - Επισκόπηση Βιβλιογραφίας	9
Εισαγωγή	9
2.1 Ενεργειακές κοινότητες	10
2.2 Τεχνολογίες Παραγωγής, Διανομής και Αποθήκευσης Θερμικής / Ψυκτικής Ενέργειας	11
2.2.1 Ηλιοθερμικοί Συλλέκτες	11
2.2.2 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας	14
2.2.3 Λέβητες Βιομάζας	19
2.2.4 Δίκτυα Διανομής ΘΨΕ	20
2.2.5 Τεχνολογίες Αποθήκευσης Θερμότητας	22
2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση συστημάτων κάλυψης αναγκών ΕΚ	26
Σύνοψη	37
Βιβλιογραφία	38
Κεφάλαιο 3: Βιβλιομετρική Ανάλυση	46
Εισαγωγή	46
3.1 Κριτήρια Έρευνας	46
3.2 Βιβλιομετρική Ανάλυση μέσω VOS Viewer	49
3.3 Χαρτογράφηση Βιβλιογραφίας	54
Σύνοψη	58
Βιβλιογραφία	59
Κεφάλαιο 4: Ποιοτική Επισκόπηση Υφιστάμενων Εργαλείων	61
Εισαγωγή	62
4.1 Εμπορικά Λογισμικά – Bottom up προσέγγιση	62
4.1.1 MARKAL/TIMES	63
4.1.2 DER_CAM	63
4.1.3 H2RES	64

4.1.4 EnergyPlan.....	64
4.1.5 E-GIS.....	64
4.1.6 SUNtool	64
4.1.7 TRNSYS	65
4.1.8 EnergyPlus	65
4.1.9 ESP-r	65
4.1.10 DeST	65
4.2 Πιστοποιήσεις Ενεργειακής Επάρκειας Κοινοτήτων - Top-down προσέγγιση.....	70
4.2.1 BREEAM Communities (BRE Environmental Assessment Method)	70
4.2.2 LEED-ND (Leadership in Environmental and Energy Design – Neighborhood Development rating system)	70
4.3 Μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης.....	71
4.4 Μεθοδολογία Ιεραρχικού Δομημένου Σχεδιασμού (ΜΙΔΣ) - Hierarchically-Dependent Layering Methodology» (HDLM)	73
4.4.1 Πρώτο επίπεδο σχεδιασμού (1st Layer) – Χαρτογράφηση αναγκών παραγωγαναλωτών.....	73
4.4.2 Δεύτερο επίπεδο σχεδιασμού (2nd Layer) – Σχεδιασμός υπερσυστήματος.....	74
4.4.3 Τρίτο επίπεδο σχεδιασμού (3rd Layer) – Οικονομική αποτίμηση υπερσυστήματος.....	75
Σύνοψη	75
Βιβλιογραφία	76
Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία Ιεραρχικού Δομημένου Σχεδιασμού (ΜΙΔΣ) – Hierarchically-Dependent Layering Methodology (HDLM)	80
Εισαγωγή	80
5.1 HDLM – 1 ^ο Επίπεδο: Ομαδοποίηση και Κατηγοριοποίηση Παραγωγαναλωτών.....	81
5.1.1 RenewIslands.....	83
5.1.2 Kaya Identity Methodology (KIM).....	84
5.1.3 Συνδυασμός υφιστάμενων μεθόδων	84
5.2 HDLM – 2 ^ο Επίπεδο: Σχεδιασμός Υπερδομής Κάλυψης Ενεργειακών Αναγκών	90
5.2.1 Πολυκριτήρια Ανάλυση	91
5.2.2 Επιλογή τεχνολογίας.....	94
5.2.3 Πίνακας αληθείας – Μέθοδος Quine McCluskey.....	94
5.2.4 Πίνακας Μέγιστης Παραγωγής – Γράφος Διαδικασίας	97
5.2.4 Λογικές πύλες και υδραυλικά ανάλογα.....	101
5.2.5 Διαστασιολόγηση εξοπλισμού	102
5.3 HDLM – 3 ^ο Επίπεδο: Οικονομική Αποτίμηση Προτεινόμενου Συστήματος.....	107
5.3.1 Κόστος Αρχικού Κεφαλαίου (Capital Expenditures – CAPEX).....	109
5.3.2 Αποσβέσεις (Discount Rate).....	109
5.3.3 Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας (Operational Expenditures – OPEX).....	109
5.3.4 Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (Levelized Cost of Energy – LCoE).....	110

5.3.5. Ρυθμός Απόσβεσης της Επένδυσης (Return of Investment – ROI)	110
5.3.6 Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV)	110
5.3.7 Περίοδος Απόσβεσης (Payback Period – PP)	110
Σύνοψη	111
Βιβλιογραφία	111
Κεφάλαιο 6: Μελέτη Περίπτωσης Ενεργειακής Κοινότητας Κιμμερίων, Ξάνθης	113
Εισαγωγή	113
6.1 Χαρακτηριστικά μελέτης περίπτωσης Κιμμερίων Ξάνθης	114
6.1.1 Συνθήκες λειτουργίας κτιρίων βάσει TOTEE/ΚΕνΑΚ	114
6.1.2 Κτιριοδομική μελέτη – Μελέτη θερμικών απωλειών	115
6.1.3 Εφαρμογή υβριδικού μοντέλου στη μελέτη περίπτωσης	120
6.2 Σχεδιασμός ΕΚ με την χρήση της μεθοδολογίας HDLM – 1 ^ο Επίπεδο	121
6.2.1 Κατηγοριοποίηση κτιρίων μελέτης περίπτωσης	121
6.2.2 Εντοπισμός στατιστικής κατανομής	123
6.2.3 Ασαφή τριγωνικά σύνολα της μελέτης περίπτωσης	124
6.3 Σχεδιασμός ΕΚ με την χρήση της μεθοδολογίας HDLM – 2 ^ο Επίπεδο	125
6.3.1 Αποδελτίωση πρωτογενούς δυναμικού περιοχής μελέτης περίπτωσης	125
6.3.2 Επιλογή τεχνολογιών για εκμετάλλευση πρωτογενούς δυναμικού	129
6.3.3 Πίνακας αληθείας – Μέθοδος Quinne McCluskey	136
6.3.4 Διαστασιολόγηση συστήματος κάλυψης αναγκών θέρμανσης και ψύξης	143
6.4 Σχεδιασμός ΕΚ με την χρήση της μεθοδολογίας HDLM – 3 ^ο Επίπεδο	146
6.4.1 Δείκτες απόδοσης (KPIs) προτεινόμενου συστήματος	146
Σύνοψη	154
Βιβλιογραφία	156
Συμπεράσματα-Προτάσεις	161
Σύνοψη Διατριβής	161
Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα	163
Ερευνητική συνεισφορά διατριβής	170
Επιστημονική συνεισφορά	170
Κοινωνική συνεισφορά	171
Περιορισμοί και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	171
Περιορισμοί και προτάσεις 1 ^{ου} Επιπέδου HDLM	172
Περιορισμοί και προτάσεις 2 ^{ου} Επιπέδου HDLM	172
Περιορισμοί και προτάσεις 3 ^{ου} Επιπέδου HDLM	173
Γενικοί περιορισμοί και προτάσεις	174
Σύνοψη και τελευταία σχόλια	174

Παράρτημα I (Προκαταρκτική μελέτη Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας – ΚΑΠΕ για την περίπτωση των Κιμμερίων, Ξάνθης).....	177
Παράρτημα II.....	178
Παράρτημα III.....	177
Παράρτημα IV: Σύντομο Βιογραφικό Υποψηφίου στο πεδίο των δημοσιεύσεων (αρχείο ORCID)	177

Περιεχόμενα

1.1 Υπόβαθρο.....	1
1.2 Κίνητρο και αντικείμενο διατριβής.....	3
1.3 Στόχοι έρευνας και στοιχεία καινοτομίας:	4
1.4 Δομή διδακτορικής διατριβής	6
Βιβλιογραφία	7

1.1 Υπόβαθρο

Τα τελευταία 50 χρόνια, το σύνθετο ενεργειακό/περιβαλλοντικό πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα, είναι εντονότερο από ποτέ. Οι εκπομπές ρύπων βρίσκονται σε σταθερά υψηλά ποσοστά με αποτέλεσμα την βαθμιαία αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη. Μία από τις κύριες αιτίες είναι η προσκόλληση της ανθρωπότητας στα ορυκτά καύσιμα, μέσω των οποίων παράγεται η ενέργεια που χρειάζεται ο πλανήτης. Συνθήκες ορόσημα για τη διαχείριση της περιβαλλοντικής αυτής κρίσης τείνουν να θέτουν μακροπρόθεσμους στόχους μείωσης και εξάλειψης των εκπομπών αερίων που ενισχύουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Μια από τις σημαντικότερες συνθήκες στο θέμα αυτό είναι η Συνθήκη του Παρισιού (2015) που προτείνει την διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη [1].

Στη Συνθήκη του Παρισιού 196 κράτη δεσμεύτηκαν στην διατήρηση της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη σε 1,5 °C ετησίως. Για την υλοποίηση αυτού του στόχου, κρίθηκε αναγκαία η εκμετάλλευση του πρωτογενούς ενεργειακού δυναμικού των χωρών και υπογραμμίστηκε η ανάγκη για πλήρη ενεργειακή μετάβαση προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Προκειμένου να προσεγγιστεί το ενεργειακό ζήτημα, κατακερματίστηκαν οι τομείς με τη μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση, που ήταν και αυτοί που θα δεχόντουσαν τις μεγαλύτερες αλλαγές σε αυτό το νέο ενεργειακό σκηνικό. Οι μεταφορές (16,2%), τα τρόφιμα (18,4%), η βιομηχανία (24,2%) και ο κτιριακός τομέας (40%) είναι οι σημαντικότεροι τομείς της οικονομίας με το μεγαλύτερο ανθρακικό αποτύπωμα [2]. Ο κτιριακός τομέας, ένας από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας, χρησιμοποιεί ηλεκτρική, θερμική και ψυκτική ενέργεια, με τη θερμική και ψυκτική να αποτελεί το 75% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας στον τομέα αυτό [3, 4].

Τα φαινόμενα που εντείνουν την χρήση θερμικής ενέργειας, είναι i) η καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος που προκαλεί φαινόμενα παγετού ή καύσωνα με παρατεταμένη διάρκεια και με αυξημένη συχνότητα και ii) η παγκόσμια αλλαγή του κοινωνικού σκηνικού με την πλειοψηφία του κόσμου να αποτελείται από ανθρώπους άνω των 65 ετών [2, 5]. Το φαινόμενο γνωστό ως «Grey Wave» συνεπάγεται μείωση σαφώς του διαθέσιμου εργατικού δυναμικού, αλλά συμβάλλει και στην αύξηση της μέσης κατανάλωσης θερμικής ενέργειας σε κατοικίες, σε ποσοστά έως και 8% [5]. Η αύξηση αυτή σε συνδυασμό με την συστηματική επιδείνωση των ακραίων καιρικών

φαινομένων εντείνουν το φαινόμενο της ενεργειακής φτώχειας (energy poverty), που είναι και ο κύριος λόγος επαναπροσδιορισμού του παγκόσμιου κτιριακού ενεργειακού χάρτη προς βιώσιμη, συλλογική, πράσινη ενέργεια [6].

Η σημαντικότητα της ενεργειακής μετάβασης του κτιριακού τομέα επομένως, κρίνεται αναγκαία και μείζονος σημασίας. Για την κάλυψη του σημαντικότερου συντελεστή ενέργειας, της θερμικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται κυρίως ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, αέριο, άνθρακας) που έχουν υψηλό ανθρακικό αποτύπωμα και αντίκεινται στη συμφωνία της Συνθήκης [7]. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι ρύποι που προέρχονται από τον κτιριακό τομέα, έχουν επανέλθει στο προσκήνιο εναλλακτικές μορφές θέρμανσης και ψύξης. Η ηλιακή ενέργεια πρωτοστατεί με τεχνολογίες μετατροπής της σε ωφέλιμη θερμική ή ψυκτική, π.χ. συλλέκτες (παραβολικούς, επίπεδους, συγκεντρωτικούς κ.α.), τις τεχνολογίες απορρόφησης ή προσρόφησης ηλιακής θερμικής ή απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας προς παραγωγή ψυκτικής ενέργειας. Η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί επίσης μια ευρέως αξιοποιήσιμη μορφή θερμότητας, ενώ προστάθειες ενσωμάτωσης συστημάτων θέρμανσης που τροφοδοτούνται από πράσινη ηλεκτρική ενέργεια έρχονται στο προσκήνιο. Η αλλαγή όμως από ένα αδιάλειπτο σύστημα παραγωγής θερμότητας (λέβητες ορυκτών καυσίμων, λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής), προς ένα που χαρακτηρίζεται από υψηλή διαλειπτότητα (ηλιοθερμικά πεδία, γεωθερμικά συστήματα, συνδυασμένα συστήματα θέρμανσης-ηλεκτρισμού), απαιτεί σημαντικές τεχνικές, κοινωνικές και οικονομικές προσαρμογές.

Αρχικά, το διάστημα της ημέρας που είναι διαθέσιμη η ηλιακή ενέργεια είναι διαλειπτό, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ποικίλει από περιοχή σε περιοχή ενώ τα φορτία θέρμανσης διαφοροποιούνται ανάλογα με την περιοχή και την κατανάλωση. Για την εξομάλυνση αυτού του φαινομένου, χρησιμοποιούνται μονάδες αποθήκευσης θερμότητας καθώς και ευφυή συστήματα δυναμικής ανταπόκρισης στη ζήτηση. Οι μονάδες αποθήκευσης θερμότητας απαρτίζονται από τεχνολογίες αποθήκευσης που χωρίζονται σε αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας. Αυτές βρίσκονται στο επίκεντρο του ερευνητικού ενδιαφέροντος, όχι τόσο για χρήσεις βραχυπρόθεσμης αλλά κυρίως για μακροπρόθεσμης και εποχικής αποθήκευσης [8]. Τέτοιες τεχνολογίες είναι η θερμοχημική αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας (thermochemical storage materials – TCMs), η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με υλικά αλλαγής φάσης (phase-change materials) καθώς και τα συστήματα αποθήκευσης ζεστού νερού ή αισθητής θερμότητας (sensible thermal energy storage – STES) (βλ. Κεφάλαιο 2 – Ενότητα 2.2.5) [9].

Στη συνέχεια, το κόστος θέρμανσης και ψύξης μεμονωμένων κατοικιών είναι, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, προσωρινά αυξημένο. Οι τεχνολογίες τόσο παραγωγής όσο και αποθήκευσης θερμότητας είναι ακόμα σε πρόωρα στάδια διείσδυσης στην αγορά και η τιμή αγοράς, εγκατάστασης και συντήρησής τους παραμένει υψηλή. Περισσότερο κεντροποιημένα μοντέλα εξελίσσονται, όπως αυτά των δικτύων διανομής θερμότητας ή αλλιώς δικτύων τηλεθέρμανσης ή τηλεψύξης (district heating and cooling grids). Τέτοια δίκτυα λειτουργούν ήδη από το 1930 ανά τον κόσμο, κάνοντας τότε χρήση υπέρθερμου ατμού μεταφερόμενου σε σωλήνες σκυροδέματος προς περιορισμένο αριθμό κατοικιών. Από το 2021, διανύουμε την 4^η Γενιά συστημάτων τηλεθέρμανσης, που πλέον μεγάλης κλίμακας ηλιοθερμικά αλλά και γεωθερμικά πεδία, απορριπτόμενη θερμότητα από βιομηχανία, πλεονάζουσα ηλεκτρική από φωτοβολταϊκά ή ανεμογεννήτριες συμπαραγάγουν και προμηθεύουν θερμότητα σε κοινότητες μεγάλης κλίμακας [10]. Χώρες με στρατηγικές πράσινης ανάπτυξης (Δανία, Νορβηγία, Σουηδία κ.α.) έχουν εντάξει στους άμεσους στόχους τους την υιοθέτηση δικτύων τηλεθέρμανσης για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών τους φορτίων [11]. Αναφορές για τη μετάβαση στην 5^η Γενιά τέτοιων συστημάτων εξετάζονται ήδη σε ερευνητικό επίπεδο (βλ. Κεφάλαιο 2 – Ενότητα 2.2.4) [12, 13].

Ωστόσο, η ενεργειακή μετάβαση δεν μπορεί να επέλθει μόνο από την αλλαγή της προέλευσης και της διανομής της ενέργειας. Η αλλαγή της ενεργειακής συμπεριφοράς του καταναλωτή κρίνεται εξίσου σημαντική καθώς η μετάβαση σε πράσινη ενέργεια απαιτεί καλύτερη αξιοποίηση πόρων. Στον σύγχρονο παγκόσμιο ενεργειακό χάρτη, οι καταναλωτές μπορούν να συμμετέχουν στην διαχείριση της ενέργειας τους είτε καταναλώνοντας οι ίδιοι

την ενέργεια που παράγουν τοπικά, είτε διοχετεύοντας την στο δίκτυο. Οι καταναλωτές αυτοί ονομάζονται παραγωγαναλωτές (prosumers) επειδή ταυτόχρονα παράγουν (produce) και καταναλώνουν ενέργεια (consume) ενέργεια [14]. Παράλληλα με τον όρο “prosumers” γίνεται εκτεταμένη αναφορά στη βιβλιογραφία στον όρο «τοπικές ενεργειακές κοινότητες (ΕΚ)» (local energy communities – LECs). Οι “LECs” είναι τοπικοί συνασπισμοί που διαρθρώνουν οι “prosumers” με σκοπό την καλύτερη διαχείριση των πόρων τους, την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ τους καθώς και την συνολική συμπεριφορά τους έναντι στο υφιστάμενο κεντρικό εθνικό δίκτυο (ενεργειακές κοινότητες – ΕΚ) [14].

Η καινοτομία του νέου αυτού χαρακτήρα του ενεργειακού χάρτη όμως, βρίσκεται ακόμα σε πρώιμα στάδια. Ο όρος “LEC” ταυτίζεται στην διεθνή βιβλιογραφία με ηλεκτρικές ενεργειακές κοινότητες (Electrical LECs – ELECs), αγνοώντας σε σημαντικό βαθμό την αναγκαιότητα και συνεισφορά της θερμικής ενέργειας [15]. Οι εργασίες που αναφέρουν τις τοπικές θερμικές ΕΚ (Thermal LECs – TLECs) είναι ελάχιστες και το σύνολο αυτών εντοπίζεται γύρω από τον τομέα του σχεδιασμού και λειτουργίας δικτύων τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης [15, 16]. Πιθανές αιτίες που δικαιολογούν την προηγούμενη παρατήρηση μπορεί να είναι η χαμηλή τιμή των συμβατικών καυσίμων κατά την προ κρίση εποχή, η μεγάλη τεχνολογική ωριμότητα των υφιστάμενων τεχνολογιών εκμετάλλευσης τους καθώς και οι πολλές μεγάλες επενδύσεις από εταιρείες εξόρυξης τους σε όλο τον κόσμο. Τέλος, στην διεθνή βιβλιογραφία σημειώνεται ότι οι οικονομικοί και νομικοί παράγοντες που αφορούν στον σχεδιασμό, την λειτουργία, την διατήρηση και την επέκταση τέτοιων κοινοτήτων απαιτούν περαιτέρω έρευνα. Αλλαγές στο πολιτικό σκηνικό που αφορούν την ενσωμάτωση των ΕΚ στον ενεργειακό χάρτη βρίσκονται σε εξέλιξη σε όλο τον κόσμο [17]. Οι αλλαγές αυτές βρίσκονται σε ώριμα στάδια και στην χώρα μας όπου έχει αναγνωριστεί η σημαντικότητα της συνεισφοράς των “ELECs” και “TLECs” στην επίτευξη του στόχου για μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος μέχρι το 2030 ενώ έχει θεσμοθετηθεί η δυνατότητα ιδιοπαραγωγής και ιδιοεκμετάλλευσης της ενέργειας τοπικά από ΕΚ με τον νόμο 4513/2018 [18].

1.2 Κίνητρο και αντικείμενο διατριβής

Η στρατηγική προς την απανθρακοποίηση της ενέργειας του πλανήτη, έχει πλέον ταυτιστεί τόσο με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όσο και με την αποκεντρωμένη διαχείρισή της. Τα φαινόμενα ενεργειακής φτώχειας, υπερθέρμανσης του πλανήτη, διαρκούς διακύμανσης των τιμών των ορυκτών καυσίμων αλλά και του γρήρασκοντα πληθυσμού, αποσταθεροποιούν το παγκόσμιο ενεργειακό γίγνεσθαι. Έτσι, καθίσταται σαφές ότι πρέπει να επέλθει σημαντική μεταβολή στην υφιστάμενη ενεργειακή διαχείριση. Ο κτιριακός τομέας αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους καταναλωτές ενέργειας και επιπλέον έναν εξαιρετικά σημαντικό παράγοντα στο δρόμο για την ενεργειακή μετάβαση. Για την ελαχιστοποίηση του ανθρακικού αποτυπώματος των κατοικιών και κατ’ επέκταση των καταναλωτών, μια προσέγγιση είναι η διάθρωση τοπικών ενεργειακών συνασπισμών που χρησιμοποιούν καινοτόμα συστήματα παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και διαχείρισης της ενέργειας —οι τοπικές ΕΚ. Οι ΕΚ έχουν ανέλθει στο επίκεντρο του ερευνητικού, νομοθετικού αλλά και τεχνολογικού προσκηνίου εξαιτίας αφενός της ευελιξίας που προσδίδουν στον ενεργειακό χάρτη και αφετέρου λόγω του σημαντικότητας ιδεώδους που αντιπροσωπεύουν, δηλαδή αυτού του εκδημοκρατισμού της ενέργειας και της «ενδυνάμωσης» του πολίτη.

Η γενικότερη ιδέα είναι ότι τα προβλήματα της αποκεντρωμένης συμβατικής παραγωγής θέρμανσης και ψύξης είναι αρκετά κοστοβόρα και συμβάλλουν σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επιπροσθέτως, η διακύμανση των τιμών των ορυκτών καυσίμων εντείνει ακόμα περισσότερο τα φαινόμενα ενεργειακής φτώχειας καθώς όλο και περισσότεροι πολίτες δεν μπορούν να εξασφαλίσουν επαρκή θέρμανση και ψύξη στις κατοικίες τους και να προφυλαχθούν από τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Η χρήση ξυλολεβήτων ακόμα και στις μέρες μας

αποτελεί καθεστηκυία τάξη στο μεγαλύτερο μέρος της χώρας μας [19]. Μοναδικές περιπτώσεις φθηνής και αξιόπιστης ενέργειας στην χώρα μας, αποτελούν οι περιπτώσεις τηλεθέρμανσης του νομού Κοζάνης που εξαιτίας των λιγνιτικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, παρέχουν θερμό ρευστό στους κατοίκους. Στον αντίποδα, η Δανία παρέχει στο μεγαλύτερο ποσοστό των πολιτών της θερμική και ψυκτική ενέργεια, μέσω δικτύων τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης, που προέρχεται κυρίως από ανανεώσιμες πηγές (κυρίως από γεωθερμικά πεδία).

Μελέτες έχουν καταδείξει, την συνεισφορά του σχηματισμού τοπικών ΕΚ, στην εξάλειψη των προαναφερθέντων φαινομένων. Οι πολίτες μπορούν να δημιουργούν κοινότητες όπου για παράδειγμα θα επιμερίζονται ένα αρχικό κόστος επένδυσης εξοπλισμού παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής ενέργειας, για το οποίο θα είναι υπεύθυνοι αυτοί χωρίς μεσάζοντες και εξωτερικούς παρόχους. Ο εξοπλισμός αυτός θα είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να εξυπηρετεί τα φορτία της κοινότητας, να αποθηκεύει πιθανό πλεόνασμα και να το αναδιανέμει στους “prosumers” όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας (λόγω διαλειπτότητας πρωτογενών πηγών ενέργειας). Αυτό το μοντέλο ενεργειακού συστήματος είναι ιδιαίτερα εξυπηρετικό σε περιπτώσεις απομακρυσμένων περιοχών όπως νησιών ή ηπειρωτικών περιοχών της ενδοχώρας. Η επένδυση σε εξοπλισμό μπορεί να τυγχάνει κρατικής επιδότησης είτε να αποτελεί εξ’ ολοκλήρου ίδια κεφάλαια των πολιτών. Το κέρδος της κοινότητας επέρχεται με την αποπληρωμή του αποκτηθέντος εξοπλισμού όπου τα κέρδη διαμοιράζονται στους συμμετέχοντες/μέτοχους της ΕΚ σε ποσοστά ανάλογα της συμμετοχής τους στην αρχική επένδυση.

Το παραπάνω σχήμα, αποτελεί ακρογωνιαίό λίθο του εκδημοκρατισμού της κοινωνίας στο θέμα της ενέργειας, σχήμα στο οποίο οι πολίτες θα είναι αυτοурγοί της δικής τους ενεργειακής ευμάρειας. Οι κοινότητες θα αποτελούν πηγή εισοδήματος για τους συμμετέχοντες αλλά θα συνεισφέρουν και ουσιαστικά στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, ενεργειακής φτώχειας κ.τ.λ. [20, 21]. Σημείο μείζονος σημασίας όμως, αποτελεί ο σχηματισμός τέτοιων συνασπισμών [15, 22]. Στη διαθέσιμη βιβλιογραφία εντοπίζεται συστηματική έλλειψη εργαλείων σχεδιασμού ΕΚ τόσο τεχνικού όσο και νομοθετικού περιεχομένου αλλά και χρηματοδοτικών σχημάτων για την προώθηση και τη δημιουργία τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων. Υπάρχουν αναγνωρισμένα λογισμικά προσομοίωσης και οικονομικής αποτύπωσης σχηματισμών συγκεντρωτικού εξοπλισμού παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, που συνεισφέρουν κυρίως σε πρώιμες εκτιμήσεις σχεδιασμού και απόδοσης των ΕΚ, χωρίς όμως τις διαστάσεις που απαιτούνται για την ενεργειακή μετάβαση (βλ. Κεφάλαιο 4).

Το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η αξιολόγηση λειτουργίας τέτοιων τοπικών ενεργειακών συνασπισμών θερμικής και ψυκτικής ενέργειας. Σκοπός είναι να διερευνηθεί η βιωσιμότητά τους μέσω του καινοτόμου σχεδιασμού και διαστασιολόγησης του απαραίτητου εξοπλισμού (HDLM – βλ. 5^ο Κεφάλαιο), του προσδιορισμού των χαρακτηριστικών των καταναλωτών τους και της χρηματοοικονομικής τους συμπεριφοράς. Κατά την ικανοποίηση του ερευνητικού αυτού σκοπού αφενός δημιουργήθηκε ένα αναλυτικό μαθηματικό εργαλείο κάλυψης των ενεργειακών αναγκών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία υβριδικών συστημάτων παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής θερμικής/ψυκτικής ενέργειας και αφετέρου εφαρμόστηκε το προτεινόμενο εργαλείο σε μελέτη περίπτωσης προς αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του. Η ανάπτυξη αυτού του εργαλείου φιλοδοξεί να διευκολύνει τον χρήστη (π.χ. μηχανικό) στη λήψη απόφασης, σχεδιασμού και ανάπτυξης τεχνικών συστημάτων αλλά και να διαμορφώσει ένα εννοιολογικό πλαίσιο για τη θεσμοθέτηση αντίστοιχων ενεργειακών συνασπισμών.

1.3 Στόχοι έρευνας και στοιχεία καινοτομίας:

Τα πρωτότυπα στοιχεία της παρούσας διατριβής είναι τα ακόλουθα:

- Μελέτη διαφορετικών τύπων καταναλωτών ενέργειας και ομαδοποίησή τους χρησιμοποιώντας ποιοτικά και ποσοτικά μοντέλα προσδιορισμού. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν οι αντίστοιχοι κώδικες σε MatLab που κατατάσσουν τους καταναλωτές σε ομάδες και δημιουργήθηκε μία πρώτη προσέγγιση του πολυβάθμιου προβλήματος της δημιουργίας μιας τοπικής ενεργειακής κοινότητας (επιπεδοποίηση προβλήματος – layering). Γίνεται χρήση συνδυασμού υφιστάμενων μεθόδων δημιουργίας τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων (RenewIslands και Kaya Identity Methodology) σε αντιπαραβολή με το προτεινόμενο, στο πλαίσιο της διατριβής, μαθηματικό μοντέλο (Hierarchically-Dependent Layering Methodology - HDLM) προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου (βλ. 6^ο Κεφάλαιο). Επίσης, γίνεται χρήση εργαλείων εντοπισμού κατάλληλης στατιστικής κατανομής στα δείγματα καταναλωτών, χρησιμοποιώντας ροπές υψηλής τάξης για την ενσωμάτωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών των καταναλωτών σε ποσοτικά. Η μετάβαση αυτή πραγματοποιείται με τη χρήση ασαφών τριγωνικών συνόλων. Συνοπτικά, αυτή η πρώτη αποτύπωση αποτελεί και το 1^ο Επίπεδο σχεδιασμού στο προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο (1st Layer – βλ. Κεφάλαιο 5, Ενότητα 5.1).
- Χρήση της μεθόδου των υπερδομών (superstructures) για τον σχεδιασμό του συστήματος που θα εξυπηρετήσει τα υπολογισμένα φορτία του 1^{ου} Επιπέδου και ανάπτυξη των μαθηματικών εξισώσεων από τις οποίες θα προκύψει ο υβριδικός συνδυασμός των επιλεγμένων τεχνολογιών κάλυψης των θερμικών και ψυκτικών αναγκών. Οι εξισώσεις αυτές προκύπτουν μέσω πινάκων αληθείας από όπου διαρθρώνονται και οι ανάλογες υπερδομές. Τέλος προτείνεται το υδραυλικό ανάλογο της προτεινόμενης διάταξης του συστήματος μέσω παράθεσης των λογικών πυλών του πίνακα αληθείας, στα υδραυλικά ανάλογά τους (2nd Layer – βλ. Κεφάλαιο 5, Ενότητα 5.2).
- Ανάλυση διεθνούς βιβλιογραφίας μέσω του πρίσματος αναλυτικών εργαλείων χαρτογράφησης και οπτικοποίησης. Συγκεκριμένα έγινε χρήση του λογισμικού VOS Viewer και Litmaps, που εξυπηρετούν τον αναλυτικότερο προσδιορισμό των ερευνητικών τάσεων στη διεθνή βιβλιογραφία καθώς και τον εντοπισμό των δυνητικών ερευνητικών κενών και παραλείψεων.
- Πραγματοποίηση χρηματοοικονομικής αποτίμησης των σεναρίων που καλύπτουν τις ανάγκες της κοινότητας με χρήση χρηματοοικονομικών δεικτών αλλά και δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs) (3rd Layer- βλ. Κεφάλαιο 5, Ενότητα 5.3).

Συνοπτικά, η ερευνητική προσπάθεια του παρόντος διδακτορικού, προσεγγίζει ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα του 21^{ου} αιώνα σε ότι αφορά το θέμα της ενέργειας. Στοχοθετεί την σημαντικότερη παράμετρο του εν εξελίξει ενεργειακού χάρτη, την θερμική και ψυκτική ενέργεια σε αποκεντρωμένα συστήματα τοπικών ΕΚ. Για το σκοπό αυτό, αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μαθηματικό εργαλείο που με κεντρικό άξονα τον παραγωγαναλωτή σχεδιάζει το τεχνολογικό περίγραμμα της τοπικής ΕΚ, τον συνδυασμό δηλαδή κατάλληλων τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης. Το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα που πλαισιώνει τον τίτλο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι το εξής:

«Πως επιδρούν οι διαφορετικές τεχνολογίες κάλυψης θερμικής ενέργειας στην ενεργειακή μετάβαση και πώς μεταβάλλουν την βιωσιμότητα των τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων (LECs);»

Τα ερευνητικά υποερωτήματα που προκύπτουν από το κεντρικό και φιλοδοξούν να το απαντήσουν είναι τα ακόλουθα:

1. Ερευνητικό υποερώτημα 1: Πώς ορίζεται το ενεργειακό προφίλ των χρηστών θερμικής ενέργειας, ποια είναι τα εξυπηρετούμενα φορτία και ποιες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψή τους;
2. Ερευνητικό υποερώτημα 2: Ποιες είναι οι κυριότερες τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής, σε ποιο στάδιο βρίσκονται και ποιες είναι οι δυνατότητες ενσωμάτωσής τους στον υφιστάμενο ενεργειακό χώρο;
3. Ερευνητικό υποερώτημα 3: Πώς μπορεί να σχεδιαστεί μια ΕΚ, ποια είναι τα διαθέσιμα εργαλεία σχεδιασμού, πώς μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους οι θερμικές ΕΚ;
4. Ερευνητικό υποερώτημα 4: Πώς μπορεί να γίνει βιώσιμη μια θερμική ΕΚ, ποιοι είναι οι δείκτες που αποτιμούν την βιωσιμότητα και πώς η αποθήκευση ενέργειας επιδρά στη βιωσιμότητα των ΕΚ;

1.4 Δομή διδακτορικής διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από επτά κεφάλαια, με το παρόν (Εισαγωγή) να αποτελεί το πρώτο εξ αυτών. Το 2^ο Κεφάλαιο ασχολείται με την επισκόπηση της διαθέσιμης διεθνούς βιβλιογραφίας. Πρώτα, εξετάστηκαν οι τεχνολογίες παραγωγής και αποθήκευσης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας καθώς και οι τεχνολογίες διανομής (district networks). Αναλύονται οι τεχνολογίες παραγωγής σε επίπεδο ανανεώσιμων πηγών, όπως οι ηλιακοί συλλέκτες, τα γεωθερμικά συστήματα αλλά και οι λέβητες βιομάζας. Έπειτα, αναλύεται η διεθνής τάση των τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων και τα πλαίσια που ορίζουν στον παγκόσμιο ενεργειακό ιστό.

Το 3^ο Κεφάλαιο αποτελεί την βιβλιομετρική ανάλυση της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Όπως προαναφέρθηκε, έγινε χρήση λογισμικών βιβλιομετρικής ανάλυσης (VOS Viewer και Litmaps) και αποδελτιώθηκε η βιβλιογραφία που αναλύθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού ήταν η διερεύνηση εκτεταμένου όγκου βιβλιογραφικών αναφορών στη θεματική των τοπικών ΕΚ, της δυνατότητας κάλυψης των αναγκών τους τοπικά, της συνεισφοράς που μπορούν να έχουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στις ανάγκες αυτές, στην επίδραση του νομικού πλαισίου στον σχηματισμό τους αλλά και σε ερευνητικά κενά που έχουν εντοπιστεί στη θεματική αυτή.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση των διαθέσιμων εργαλείων σχεδιασμού τοπικών ΕΚ, είτε σε επίπεδο εμπορικών λογισμικών, είτε σε επίπεδο μαθηματικών μοντέλων βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται επιγραμματικά τα διαθέσιμα εργαλεία σχεδιασμού τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων και το πώς αυτά αγνοούν εν μέρει σημαντικούς σχεδιαστικούς παράγοντες, όπως ο υβριδικός συνδυασμός εξοπλισμού για ευελιξία και ενεργειακή ασφάλεια. Δίνεται τέλος, το περίγραμμα και η σκοπιμότητα του ιεραρχικού μαθηματικού μοντέλου που αναπτύχθηκε (HDLM) στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και η διαφοροποίησή του με υφιστάμενα εργαλεία.

Στο 5^ο Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου. Περιγράφονται και παρουσιάζονται οι μαθηματικοί ορισμοί της υβριδοποίησης δύο υφιστάμενων μεθόδων κατηγοριοποίησης των χρηστών θερμικής ενέργειας, για τον ακριβέστερο προσδιορισμό των αναγκών τους (1^ο Επίπεδο – βλ. Κεφάλαιο 5, Ενότητα 5.1). Έπειτα πραγματοποιείται η μετάβαση από το 1^ο στο 2^ο Επίπεδο σχεδιασμού, όπου με χρήση του διαθέσιμου πρωτογενούς δυναμικού ενέργειας, διαρθρώνεται το υβριδικό σύστημα που θα καλύψει τις υπολογισμένες ανάγκες του 1^{ου} Επιπέδου (2^ο Επίπεδο – βλ. Κεφάλαιο 5, Ενότητα 5.2). Στο 3^ο και τελευταίο Επίπεδο πραγματοποιείται η οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου σεναρίου του 2^{ου} Επιπέδου και γίνεται σύγκριση οικονομικής απόδοσης με το ανάλογο συμβατικό σύστημα κάλυψης θερμικών και ψυκτικών αναγκών (3^ο Επίπεδο – βλ. Κεφάλαιο 5, Ενότητα 5.3).

Το 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζει την εφαρμογή του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου στη μελέτη περίπτωσης της ενεργειακής κοινότητας των Κιμμερίων, Ξάνθης. Εφαρμόζεται το πολυεπίπεδο μαθηματικό μοντέλο και παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα. Κατηγοριοποιούνται οι χρήστες ενέργειας της μελέτης περίπτωσης (φοιτητές πανεπιστημιακών εστιών) βάσει της ετήσιας ενεργειακής τους κατανάλωσης (1^ο Επίπεδο) και προτείνεται το κατάλληλο υβριδικό σύστημα κάλυψης των θερμικών και ψυκτικών τους αναγκών (2^ο Επίπεδο). Τέλος, γίνεται οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου συστήματος για έλεγχο της βιωσιμότητάς του σε σχέση με το υφιστάμενο σύστημα θέρμανσης και ψύξης.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, Συμπεράσματα - Προτάσεις, συνοψίζεται η παρούσα διδακτορική διατριβή και αναδεικνύονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και συνεισφορά της. Παρατίθενται επίσης, τα συμπεράσματα αυτής της ερευνητικής προσπάθειας με προτάσεις για μελλοντική ενασχόληση και ερευνητική επιδίωξη.

Βιβλιογραφία

1. Agreement, P. (2015, December). Paris agreement. In Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change (21st Session, 2015: Paris). Retrived December (Vol. 4, p. 2017).
2. Hannah Ritchie and Max Roser (2020) - "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: 'https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions'
3. Persson, U., Möller, B., & Werner, S. (2014). Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions. *Energy Policy*, 74(C), 663–681. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.015>
4. de Rosa, M., Bianco, V., Scarpa, F., & Tagliafico, L. A. (2014). Heating and cooling building energy demand evaluation; a simplified model and a modified degree days approach. *Applied Energy*, 128, 217–229. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.04.067>
5. Research for Energy Consumption in Housing Settlements 2011-2012
6. Rehman, A., Ma, H., Ahmad, M., Irfan, M., Traore, O., & Chandio, A. A. (2021). Towards environmental Sustainability: Devolving the influence of carbon dioxide emission to population growth, climate change, Forestry, livestock and crops production in Pakistan. *Ecological Indicators*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107460>
7. Cao, X., Dai, X., & Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and Buildings*, 128, 198–213. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.06.089>
8. Saloux, E., & Candanedo, J. A. (2021). Model-based predictive control to minimize primary energy use in a solar district heating system with seasonal thermal energy storage. *Applied Energy*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116840>
9. Dincer, I.; Ezan, M.A. Heat Storage: A Unique Solution for Energy Systems; Springer, 2018.
- [10] REScoop.eu. Energy Communities under the Clean Energy Package, 2020.
11. Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.02.089>

12. Allen, A., Henze, G., Baker, K., & Pavlak, G. (2020). Evaluation of low-exergy heating and cooling systems and topology optimization for deep energy savings at the urban district level. *Energy Conversion and Management*, 222, 113106. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.113106>
13. Weinand, J. M., Scheller, F., & McKenna, R. (2020). Reviewing energy system modelling of decentralized energy autonomy. *Energy*, 203, 117817. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.117817>
14. Sanduleac, M.; Ciornei, I.; Albu, M.; Toma, L.; Sturzeanu, M.; Martins, J.F. Resilient prosumer scenario in a changing regulatory environment—the UniRCon solution. *Energies* 2017, 10, 1941.
15. Fouladvand, J.; Mouter, N.; Ghorbani, A.; Herder, P. Formation and Continuation of Thermal Energy Community Systems: An Explorative Agent-Based Model for the Netherlands. *Energies* 2020, 13, 2829–2829.
16. G. Papatsounis, A.; N. Botsaris, P.; Katsavounis, S. Thermal/Cooling Energy on Local Energy Communities: A critical review. *Energies* 2022, 1, 0. <https://dx.doi.org/>
17. Sokolowski, M.M. European law on the energy communities: A long way to a direct legal framework. *European Energy and Environmental Law Review* 2018, 27.
18. Douvitsa, I. (2018). The new law on energy communities in Greece. *Cooperativismo e economía social*, (40).
19. Greenpeace. Αλλάζοντας τα δεδομένα στον κτιριακό τομέα με σύμμαχο τον ήλιο, 2015.
20. Plaza, C., Gil, J., de Chezelles, F., & Strang, K. A. (2018). Distributed Solar Self-Consumption and Blockchain Solar Energy Exchanges on the Public Grid Within an Energy Community. *Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2018*. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC.2018.8494534>
21. Feng, C., Wen, F., You, S., Li, Z., Shahnian, F., & Shahidehpour, M. (2020). Coalitional Game-Based Transactive Energy Management in Local Energy Communities. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(3), 1729–1740. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2957537>
22. Perger, T. (2020). Fair Energy Sharing in Local Communities: Dynamic Participation of Prosumers. *International Conference on the European Energy Market, EEM, 2020-Sept.* <https://doi.org/10.1109/EEM49802.2020.9221933>

Κεφάλαιο 2: Ενεργειακές Κοινότητες - Επισκόπηση Βιβλιογραφίας

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	9
2.1 Ενεργειακές κοινότητες.....	10
2.2 Τεχνολογίες Παραγωγής, Διανομής και Αποθήκευσης Θερμικής / Ψυκτικής Ενέργειας	11
2.2.1 Ηλιοθερμικοί Συλλέκτες	11
2.2.2 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.....	14
2.2.3 Λέβητες Βιομάζας.....	19
2.2.4 Δίκτυα Διανομής ΘΨΕ	20
2.2.5 Τεχνολογίες Αποθήκευσης Θερμότητας	22
2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση συστημάτων κάλυψης αναγκών ΕΚ.....	26
Σύνοψη	37
Βιβλιογραφία.....	38

Εισαγωγή

Μετά την υγειονομική κρίση του 2020-2021, η ασταθής παγκόσμια οικονομία ήρθε να αντιμετωπίσει και την ένοπλη σύρραξη μεταξύ Ρωσίας και Ουκρανίας. Η Ρωσία αποτελεί τον κύριο πάροχο φυσικού αερίου (με περισσότερο από 40%) αλλά και λοιπών ορυκτών πόρων για την ευρωζώνη [1]. Όταν η Ευρώπη κλήθηκε να διακόψει το θερμό αυτό επεισόδιο, κατέφυγε σε εμπάργκο της αγοράς προς την Ρωσία, με αποτέλεσμα και αυτή με τη σειρά της να διακόψει σταδιακά την παροχή φυσικού αερίου προς τις ιθύνουσες αγορές της ευρωζώνης. Το αποτέλεσμα αυτού ήταν η ραγδαία και πρωτοφανής άνοδος των τιμών των ορυκτών καυσίμων που είναι απαραίτητα για την κάλυψη αναγκών ενέργειας, μεταφορών και γενικότερης λειτουργίας της αγοράς.

Με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να μην είναι σε στάδιο ανάληψης του όγκου της αγοράς ενέργειας που απαιτείται για σταθεροποίηση των τιμών ενέργειας, το βάρος έπεσε στον καταναλωτή ο οποίος κλήθηκε να αγοράσει ενέργεια σε τιμές σημαντικά αυξημένες. Ανάλογη κρίση έχει αντιμετωπίσει και παλαιότερα ο πλανήτης κατά τη διάρκεια του πολέμου Γκόμ Κιπούρ το 1973, όπου η τιμή του πετρελαίου έφτασε από 3 δολ./βαρέλι στα 12. Η ερώτηση που πρέπει να τεθεί είναι η εξής: ως τότε η αξία της ποιότητας ζωής θα καθορίζεται από τις ευαίσθητες γεωπολιτικές σχέσεις σύνθετων πολιτικών καθεστώτων;

Ήδη από τη λήξη του πολέμου του Γιομ Κιπούρ, έγινε κατανοητή η αστάθεια που προκαλείται στην αγορά από την υπέρμετρη προσκόλληση σε ορυκτά καύσιμα. Οι προσπάθειες ανακούφισης του φαινομένου περιλαμβάνουν την στροφή προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μεταξύ άλλων [2]. Όμως, παρόλη την ένταξη όλο και

μεγαλύτερου ποσοστού ανανεώσιμων πηγών στον ενεργειακό χάρτη, τα συστήματα παραγωγής ενέργειας παραμένουν κεντροποιημένα, με τον κίνδυνο της επανάληψης φαινομένων εμπάργκο ενέργειας να ελλοχεύει. Ήδη από το 2012, γίνεται αυξανόμενη αναφορά, με εντατική ερευνητική προσπάθεια, γύρω από την αποκέντρωση της ενέργειας [3–8]. Η αποκέντρωση αυτή αφορά την ενδυνάμωση των πολιτών με την παραγωγή, διαχείριση και εκμετάλλευση της ενέργειας τους, η οποία θα παράγεται από συνασπισμούς που αυτοί θα δημιουργούν, τις «ενεργειακές κοινότητες (ΕΚ)» [9].

2.1 Ενεργειακές κοινότητες

Οι ενεργειακές κοινότητες αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της ενεργειακής μετάβασης, καθώς η Ευρώπη αναγνωρίζει πλέον τον ρόλο που διαδραματίζουν οι πολίτες στην επίτευξη των φιλόδοξων στόχων μείωσης των ρύπων και αύξησης της ενεργειακής ασφάλειας [6,8,10–13]. Οι ΕΚ ορίζονται ως «νομικές οντότητες που βασίζονται στην εθελοντική και ανοικτή συμμετοχή, ελέγχονται ενεργά από μετόχους ή μέλη τα οποία μπορεί να είναι φυσικά πρόσωπα, τοπικές / δημοτικές αρχές, ή μικρές και μικρομεσαίες επιχειρήσεις. Ο πρωταρχικός σκοπός μιας ΕΚ είναι να παρέχει περιβαλλοντικά, οικονομικά ή/και κοινωνικά οφέλη για τα μέλη της ή για τις τοπικές περιοχές. Μια ενεργειακή κοινότητα μπορεί να δραστηριοποιείται γύρω από την παραγωγή, διανομή και διαχείριση ενέργειας καθώς και γύρω από τον συμψηφισμό, αποθήκευση ή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης μέσω παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές καθώς και να παρέχει λοιπές υπηρεσίες ενέργειας στα μέλη ή τους μετόχους της» [9].

Οι συμμετέχοντες σε αυτούς τους συνασπισμούς, χωρίζονται σε καταναλωτές (consumers) και παραγωγαναλωτές (prosumers). Οι παραγωγαναλωτές είναι οι συμμετέχοντες οι οποίοι όχι μόνο καταναλώνουν ενέργεια, αλλά είναι υπεύθυνοι και για την παραγωγή, διανομή, παροχή και αποθήκευσή της [14]. Το επίκεντρο του ενδιαφέροντος για τις ΕΚ βρίσκεται στη διάρθρωσή τους σε αστικές και ημιαστικές περιβάλλοντα [6,13,15–21]. Ο κύριος άξονας του εγχειρήματος αυτού, έγκειται στο γεγονός ότι οι αστικές περιοχές είναι υπεύθυνες για το 70% των εκπεμπόμενων ρύπων CO₂ ή ισοδύναμων. Σε αντιδιαστολή, οι αστικές περιοχές παράγουν σχεδόν το 80% του παγκόσμιου ΑΕΠ, με αποτέλεσμα να αποτελούν πυλώνα της διεθνούς οικονομίας. Ένα ακόμα επιχείρημα υπέρ της σημασίας των αστικών περιοχών στην ενεργειακή μετάβαση, είναι το ποσοστό ανθρώπων που κατοικούν σε αυτές. Πάνω από το 50% του παγκόσμιου πληθυσμού διαμένει σε αστικές περιοχές και το ποσοστό αυτό θα ανέλθει κοντά στο 65% μέχρι το 2050 [22]. Επομένως, είναι μείζονος σημασίας η μετάβαση σε βιώσιμες ενεργειακές λύσεις, που θα έχουν ως κεντρικό άξονα τους πολίτες αστικών και ημιαστικών περιοχών.

Πληθώρα ερευνητικών προσπαθειών επικεντρώνεται γύρω από ΕΚ που είτε λειτουργούν, είτε θα μπορούσαν να λειτουργήσουν δυνητικά σε τέτοια περιβάλλοντα [11,13,15,16,18–20,23–39]. Παρά τη σημαντικότητα όμως της προσπάθειας αυτής, ο κύριος όγκος αυτών των εργασιών επικεντρώνεται γύρω από παραγωγή και διαχείριση ηλεκτρικής ενέργειας [40–44]. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί το 30% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας στον κτιριακό χάρτη των αστικών και ημιαστικών περιοχών. Το υπόλοιπο εκκωφαντικό 70% αποτελεί καταναλώσεις που αφορούν την κάλυψη θερμικών, γενικής χρήσης και ψυκτικών φορτίων [43,45–52]. Με την αύξηση του γηράσκοντα πληθυσμού (gray wave) και με την συνεισφορά του φαινομένου αυτού στην περαιτέρω αύξηση της κατανάλωσης θερμικής ενέργειας των κατοικιών αυτών σε ποσοστά κοντά στο 12%, είναι πασιφανές ότι η στοχοπροσήλωση των Ευρωπαϊκών μελών-κρατών γύρω από την αποκέντρωση της ηλεκτρικής κυρίως ενέργειας επιζητά ανακατεύθυνση [40,43,53–56].

Αυτός είναι και ο κύριος άξονας της παρούσας διδακτορικής, η διερεύνηση της δυνατότητας ενσωμάτωσης των θερμικών ΕΚ στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη. Προκειμένου να γίνει εφικτή η διάρθρωση τέτοιων συσπασισμών, απαιτούνται τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και κατανομής της τοπικά παραγόμενης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών [40,57]. Στις επόμενες ενότητες καταγράφονται οι κυριότεροι φορείς αλλαγής και οι κυριότερες τεχνολογίες που συνεισφέρουν στην ενεργειακή μετάβαση και που θα χρησιμοποιηθούν εκτενώς στο πλαίσιο της διατριβής.

2.2 Τεχνολογίες Παραγωγής, Διανομής και Αποθήκευσης Θερμικής / Ψυκτικής Ενέργειας

Με τον όρο τεχνολογίες παραγωγής θερμικής και ψυκτικής ενέργειας (ΘΨΕ) καλύπτονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται ευρέως από πιλοτικές ή λειτουργικές εφαρμογές. Αυτές είναι οι διάφοροι τύποι ηλιοθερμικών συλλεκτών, οι γεωθερμικές αντλίες, οι λέβητες βιομάζας (ως τεχνολογία μηδενικού ισοζυγίου εκπομπών CO₂), οι ψύκτες απορρόφησης καθώς και οι ψύκτες προσρόφησης θερμότητας. Σε ότι αφορά τις τεχνολογίες διανομής, γίνεται αποτύπωση των τάσεων των δικτύων διανομής ΘΨΕ (district heating and cooling grids) έτσι όπως αυτά εξελίσσονται στην 4^η και 5^η γενιά δικτύων ΘΨΕ. Σκοπός του παρόντος εδαφίου είναι να αναφέρει επιγραμματικά τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε υπερσυστήματα παραγωγής θερμικής και ψυκτικής ενέργειας, και όχι να εμβαθύνει στις αρχές λειτουργίας και στα μαθηματικά μοντέλα που τις διέπουν.

2.2.1 Ηλιοθερμικοί Συλλέκτες

Οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες κατατάσσονται στις ώριμες ανανεώσιμες τεχνολογίες, έχοντας πληθώρα τύπων να χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο ερευνητικά όσο και εμπορικά. Οι σημαντικότερες τεχνολογίες είναι οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες – flat plate collectors (ΕΗΣ), οι συλλέκτες σωλήνα κενού – evacuated tube collectors (ΣΣΚ), τα συγκεντρωτικά κάτοπτρα – concentrated collectors (ΣΚ) και οι συλλέκτες με ενσωματωμένη αποθήκευση (τυπικό παράδειγμα οι θερμοσίφωνες οικιακής χρήσης) – integral collector storage (ΣΕΑ) [58].

2.2.1.1 Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες

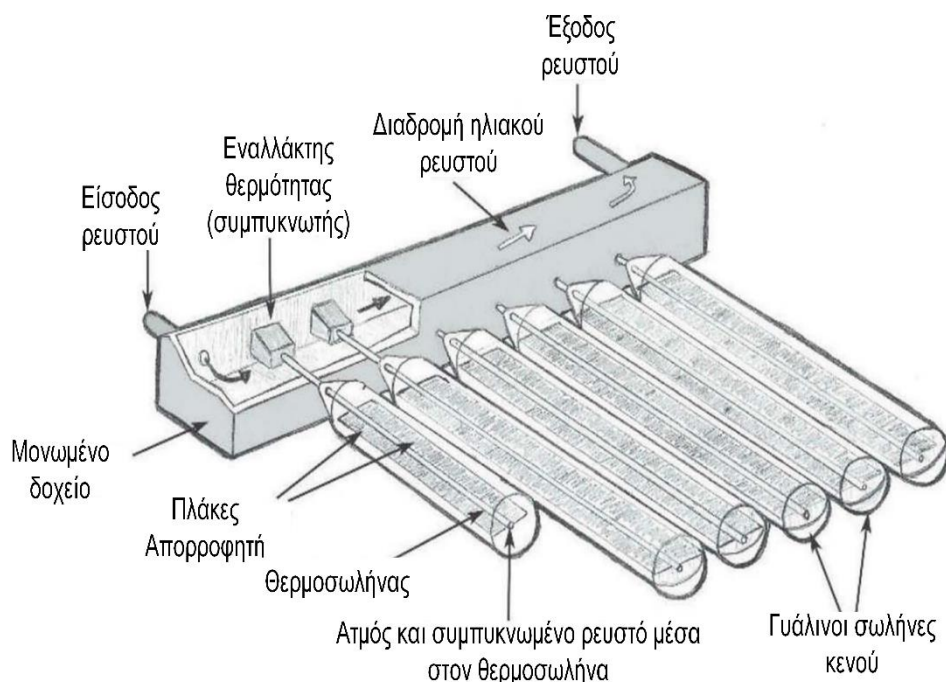
Οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες είναι οι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι συλλεκτών με εκτενές εύρος εφαρμογών. Το λειτουργικό τους όριο είναι μεταξύ 90 και 150 °C (βαθμός απόδοσης από 50 μέχρι 70%) και αποτελούνται από το πλαίσιο, τον απορροφητή, την μόνωση, την επικάλυψη και τον σκελετό υποστήριξης. Το πλαίσιο κατασκευάζεται συνήθως από εξηλασμένο αλουμίνιο για να προσφέρει στήριξη, χαμηλό βάρος και αντοχή σε καταπονήσεις όπως οι ταλαντώσεις λόγω ισχυρού ανέμου. Ο απορροφητής βρίσκεται κάτω από την γυάλινη επικάλυψη και συνήθως αποτελείται από σωλήνες χαλκού πολλαπλών διαδρομών (manifold) για να μεγιστοποιήσει τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ρέοντος ρευστού και του γυαλιού επικάλυψης [58].

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες θερμότητας γίνεται χρήση μόνωσης, τυπικά πολυουρεθάνης ή υαλοβάμβακα/πετροβάμβακα. Όσο αφορά την επικάλυψη γυαλιού, αποτελεί έναν εκ των καθοριστικών παραγόντων για την αποδοτική και μακρόχρονη λειτουργία του συλλέκτη. Ενώ στο παρελθόν έχει χρησιμοποιηθεί επικάλυψη πολυμερών πλαστικού, είχε παρατηρηθεί μειωμένη αντοχή μετά από εκτενή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία. Πλέον, η επικάλυψη είναι κυρίως από ψημένο γυαλί (tempered glass) για να ελαχιστοποιούνται τα ανακλαστικά φαινόμενα πάνω στην επιφάνεια, που μειώνουν την προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω στον απορροφητή [58].

2.2.1.2 Συλλέκτες σωλήνα κενού

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η σχετικά χαμηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται στους επίπεδους συλλέκτες λόγω απωλειών θερμότητας από το γυαλί επικάλυψης, η τεχνολογία προχώρησε σε εφαρμογές όπως αυτή των συλλεκτών σωλήνα κενού. Αυτός ο τύπος συλλέκτη αποτελείται από επάλληλους σωλήνες βοριοπυριτίου (pyrex) στους οποίους εμφωλιάζεται η πλάκα του απορροφητή ενώ έχει θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας πάνω από 150-500 °C (βαθμός απόδοσης από 30 μέχρι 50%). Μέσα στους σωλήνες δημιουργούνται συνθήκες κενού, όπου αφού έχει απομακρυνθεί ο αέρας δεν είναι πλέον εφικτή η μεταφορά θερμότητας μέσω του μηχανισμού της αγωγής. Οι βασικότερες τεχνολογίες σωληνώσεων που είναι διαθέσιμες σε ερευνητικό και εμπορικό επίπεδο είναι είτε μονού, είτε διπλού σωλήνα [58].

Σε μονού σωλήνα, ο απορροφητής τοποθετείται μέσα σ' αυτόν και περιέχει μικρή ποσότητα του ηλιακού ρευστού (το εργαζόμενο μέσο για τη μεταφορά της θερμότητας από τον συλλέκτη προς την κατανάλωση). Έτσι, η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει να διαπεράσει μόνον ένα στρώμα γυαλιού με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες. Προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα διαρροών, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη στεγανοποιητική διάταξη, η οποία κατασκευάζεται ώστε να μπορεί να φέρει τα φορτία διαστολών τόσο του σωλήνα χαλκού όσο και τις ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται. Σε διατάξεις διπλού σωλήνα, τοποθετούνται κατασκευαστικά δύο σωλήνες, ο ένας μέσα στον άλλο, με το κενό να δημιουργείται στον χώρο ανάμεσά τους. Το εργαζόμενο μέσο (ηλιακό ρευστό) που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι κάποιου είδους αλκοόλη, αμμωνία ή κάποιο άλλο ενδεικνυόμενο διάλυμα. Ο απορροφητής στην προκειμένη, μπορεί να τοποθετηθεί είτε εσωτερικά των δύο σωληνών είτε στο κενό μεταξύ τους. Στην πρώτη περίπτωση δεν απαιτείται ιδιαίτερα εξεζητημένη διάταξη στεγανοποίησης, γεγονός που αυξάνει και τον ωφέλιμο χρόνο ζωής του συλλέκτη. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται σε δύο στάδια, με αποτέλεσμα να μειώνεται συγκριτικά η απόδοσή του [58].

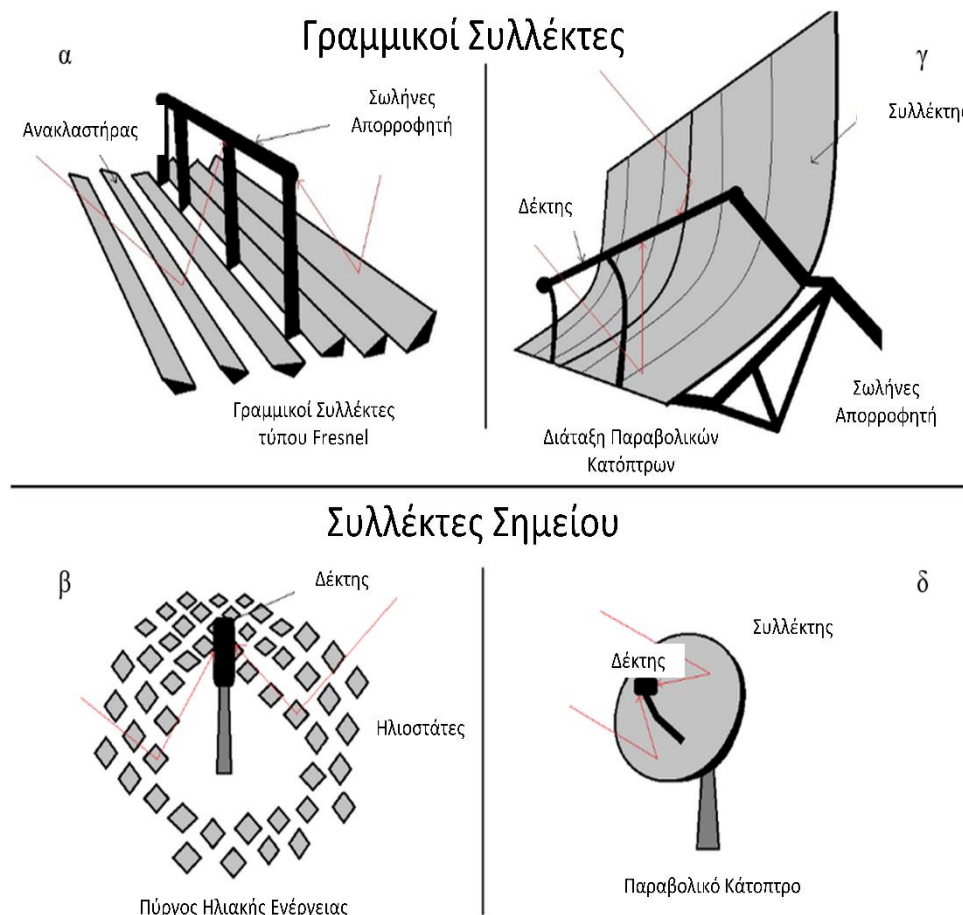


Εικόνα 2. 1: Συλλέκτης σωλήνα κενού με μονό σωλήνα και τον απορροφητή εμφωλιασμένο σε αυτόν [59].

2.2.1.3 Συγκεντρωτικά κάτοπτρα

Προκειμένου να αυξηθεί περαιτέρω το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας των ηλιακών συλλεκτών και να γίνει χρήση τους σε διατάξεις ηλεκτροπαραγωγής, σχεδιάστηκαν οι συστοιχίες συγκεντρωτικών - παραβολικών κατόπτρων (θερμοκρασιακό εύρος $>250\text{ }^{\circ}\text{C}$ και βαθμός απόδοσης από 30 μέχρι 50%). Τα συγκεντρωτικά κάτοπτρα αποτελούνται από παραβολική ανακλαστική επιφάνεια, η οποία συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα μοναδικό σημείο, όπου είναι τοποθετημένος ο απορροφητής. Σε αντίθεση με τους παραπάνω τύπους συλλεκτών, οι παραβολικοί συλλέκτες δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν την διάχυτη ακτινοβολία και επομένως πρέπει διαρκώς να στρέφονται προς τον ήλιο. Αυτό προϋποθέτει διατάξεις πλανητικών συστημάτων οδήγησης, που αυξάνουν την πολυπλοκότητα του συστήματος αλλά και το κόστος του [58].

Οι δύο βασικότεροι τύποι συγκεντρωτικών κατόπτρων είναι αυτοί με ανακλαστική και αυτοί με μη ανακλαστική καμπύλη. Η διαφορά τους έγκειται στην γεωμετρία του συλλέκτη, καθώς αυτοί με μη ανακλαστική καμπύλη είναι σαν τους επίπεδους συλλέκτες και τοποθετούνται συνήθως σε κυκλική διάταξη γύρω από τον εξωτερικά τοποθετημένο (συνήθως με τη μορφή πύργου – βλ. Εικόνα 2. 2) απορροφητή. Δεν ακολουθούν την τροχιά του ήλιου επομένως απαιτείται υψηλότερος αριθμός συλλεκτών τοποθετημένος στην κυκλική διάταξη για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση [58].



Εικόνα 2. 2: Τύποι συγκεντρωτικών κατόπτρων, τα α. και β. παρουσιάζουν κάτοπτρα με μη ανακλαστική καμπύλη ενώ τα γ. και δ. απεικονίζουν κάτοπτρα ανακλαστικής καμπύλης [60].

2.1.2.4 Συλλέκτες με ενσωματωμένη αποθήκευση

Η αναφορά στο συγκεκριμένο τύπο συλλέκτη γίνεται καθαρά λόγω του εύρους εφαρμογής. Οι συλλέκτες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται ευρέως (ηλιακοί θερμοσίφωνες) και βρίσκουν εφαρμογή στα περισσότερα γεωγραφικά μήκη του πλανήτη που ο χειμώνας είναι σχετικά ήπιος και δεν υπεισέρχονται φαινόμενα παγετού. Η βασική τεχνολογία αυτών είναι δεξαμενές τοποθετημένες σε μερικώς αδιαβατικά κουτιά, τα οποία έχουν σε κάποια από τις πλευρές τους επικάλυψη από γυαλί, που επιτρέπει την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ του περιβάλλοντος και της δεξαμενής νερού. Τα συστήματα αυτά αντιμετωπίζουν κυρίως στατικά προβλήματα καθώς όσο μεγαλύτερη η εγκατάσταση, τόσο πιο βαριά η κατασκευή με αποτέλεσμα να απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για την τοποθέτηση σε υφιστάμενες οροφές [58].

Άλλη τεχνολογία, με σημαντικά μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης, χρησιμοποιεί σωλήνες χαλκού πολλαπλών διαδρομών (παρόμοια με τους επίπεδους συλλέκτες). Με αυτό τον τρόπο, αυξάνεται η επιφάνεια συναλλαγής ενώ η δεξαμενή τοποθετείται συνήθως στο υψηλότερο σημείο του συστήματος ώστε να εκμεταλλεύεται την φυσική ροή του θερμού ρευστού. Αυτές είναι και οι τυπικές διατάξεις ηλιακού θερμοσίφωνα, όπου πολλαπλές διαδρομές σωλήνων χαλκού τοποθετούνται σε παράλληλη διάταξη (απορροφητής) κάτω από επικάλυψη γυαλιού, ενώ μονή διαδρομή οδηγεί το ηλιακό ρευστό που ρέει στις σωλήνες, στο ανώτερο σημείο —την δεξαμενή ορισμένου όγκου [58].

2.2.2 Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

Προκειμένου να αξιοποιηθεί το γεωθερμικό δυναμικό του υπεδάφους ή παρακείμενων υδροφορέων, χρησιμοποιούνται μηχανολογικές διατάξεις που ονομάζονται γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Οι διατάξεις αυτές αποτελούνται συνήθως από κάποιας μορφής γεωεναλλάκτη (κατακόρυφο ή οριζόντιο) που είτε αντλεί το ορισμένης ενθαλπίας γεωθερμικό ρευστό για κυκλοφορία μέσα στο σύστημα (ανοικτού τύπου), είτε χρησιμοποιεί κάποιο εργαζόμενο μέσο το οποίο κυκλοφορεί σε πολλαπλών διαδρομών γεωεναλλάκτη, βυθισμένο στο ορισμένης ενθαλπίας γεωθερμικό ρευστό (κλειστού τύπου). Εκτός του γεωεναλλάκτη, αποτελούνται από μια διάταξη αντλίας θερμότητας (συμπυκνωτής, συμπιεστής, εξαμιστής και εκτονωτική διάταξη) για τη πραγματοποίηση του θερμοδυναμικού κύκλου που θα προσφέρει την ωφέλιμο θερμική ή ψυκτική ενέργεια στο προς εξυπηρέτηση φορτίο [61].

Στο παρόν εδάφιο παρατίθενται οι σημαντικότερες τεχνολογίες γεωθερμικών αντλιών και μεθόδων εκμετάλλευσης του γεωθερμικού δυναμικού. Αυτές είναι οι διατάξεις εναλλακτών ανοικτού τύπου με χρήση υπογείων υδάτων (groundwater heat exchange pumps), οι διατάξεις κλειστού τύπου μονής και πολλαπλής γεώτρησης βαθύς τύπου (borehole heat exchange pumps και multi-borehole heat exchange pumps), οι διατάξεις οριζόντιου τύπου (horizontal geothermal heat exchange pumps) και οι διατάξεις επιφανειακών υδάτων ανοικτού τύπου (surface water heat exchange pumps). Σε ότι αφορά τις τεχνολογίες αντλιών που εκμεταλλεύονται αυτήν την ενέργεια, θα γίνει αναφορά σε αντλίες μηχανικής συμπίεσης ατμού (mechanical vapor compression pumps), σε θερμικά καθοδηγούμενες αντλίες – κύκλοι απορρόφησης και προσρόφησης (thermally driven pumps) και σε αντλίες οργανικού κύκλου Ράνκιν (organic Rankine cycle pumps) [61].

2.2.2.1 Εναλλάκτες ανοικτού τύπου με χρήση υπογείων υδάτων

Σε περιπτώσεις που εντοπίζεται ρευστό (νερό) ορισμένης ενθαλπίας σε υπόγεια ύδατα, τότε η εκμετάλλευση αυτού δύναται να πραγματοποιηθεί με γεωεναλλάκτη ανοικτού τύπου. Ο ανοικτός τύπος εξυπηρετεί στην απευθείας εξυπηρέτηση των φορτίων χωρίς την παρεμβολή εναλλαγής θερμότητας μέσω συναγωγής. Αν το προς

εξυπηρέτηση φορτίο ταυτίζεται με τη θερμοκρασία του υπόγειου ρευστού, τότε συνήθως με μία γεώτρηση μπορεί να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη φορτίων θέρμανσης και ψύξης, με τις κατάλληλες διατάξεις [61].

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τύπου γεωθερμικού δυναμικού, είναι ότι είναι εύκολα προσβάσιμο (ειδικά σε περιπτώσεις που υπάρχει γεώτρηση για πόσιμο νερό) και συνήθως δεν απαιτούνται πολλαπλές γεωτρήσεις. Έτσι μειώνεται η απαιτούμενη έκταση για τη διάταξη, συνθήκη ιδανική για περιοχές με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο [61]. Οι μελέτες για τον εντοπισμό και την εγκατάσταση αυτών των διατάξεων γίνονται συνήθως μέσω της δοκιμαστικής διάνοιξης πηγαδιών παρατήρησης, σε τριγωνικό σχηματισμό για να γίνει ο εντοπισμός του βάθους, της μέτρησης του δυναμικού αλλά και για να προσδιοριστεί η κατεύθυνση ροής του ρευστού [61]. Περαιτέρω λεπτομέρειες είναι εκτός της σκοπιάς της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

2.2.2.2 Εναλλάκτες κλειστού τύπου μονής και πολλαπλής γεώτρησης βαθέως τύπου

Προκειμένου να αντληθεί γεωθερμικό ρευστό σε βάθη 50 – 100 m, γίνεται χρήση συστημάτων γεωενναλακτών κλειστού τύπου, συνήθως γεωμετρίας U (U-type ή U-tube). Τα συστήματα αυτά αποτελούνται είτε από μονές είτε από πολλαπλές διαδρομές U-σωλήνων, κατασκευασμένες από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο, μέσω των οποίων γίνεται η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ ενός ρέοντος ρευστού εντός των σωληνώσεων και του περιβάλλοντος γεωθερμικού ρευστού. Με το πέρας της γεώτρησης και της τοποθέτησης των σωληνώσεων, ακολουθεί αρμολόγηση του κενού χώρου. Η αρμολόγηση γίνεται με αρμό ορισμένου ιξώδους και δυναμικής συνεκτικότητας, καθώς επηρεάζει άμεσα την εναλλαγή θερμότητας μεταξύ του γεωθερμικού ρευστού και του U-tube [61].

Σε εφαρμογές με πολλαπλές γεωτρήσεις, παρά την αυξημένη απόδοση του συστήματος εποχικά, παρατηρούνται διακυμάνσεις στη θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη διαρκή εναλλαγή θερμότητας μεταξύ του υπό εξυπηρέτηση φορτίου και του γεωθερμικού ρευστού. Οι μακροχρόνιες συνέπειες αυτής της εξαναγκασμένης μεταβολής της θερμοκρασίας του δεν είναι ακόμα γνωστές καθώς η φύση των υπογείων υδάτων καθώς και οι επιρροές τους είναι εξαιρετικά σύνθετες. Συνήθως, τα φαινόμενα αυτά απαντώνται σε οικιακές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, που παρουσιάζουν σημαντική διαφορά μεταξύ των φορτίων θέρμανσης κατά τον χειμώνα και των φορτίων ψύξης το καλοκαίρι [61].

2.2.2.3 Εναλλάκτες οριζόντιου τύπου

Η χρήση αυτού του τύπου εναλλακτών είναι ιστορικά η αρχαιότερη. Ανοικτοί σωλήνες τοποθετημένοι σε επιφανειακές γεωτρήσεις σε διάταξη σερπαντίνας ή πηνίου, είναι εφαρμόσιμοι στις περισσότερες περιοχές όπου υπάρχει η απαιτούμενη έκταση γης. Οι σωλήνες αυτοί είναι συνήθως κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο και τοποθετούνται σε ρηχές γεωτρήσεις έως 10 m, όπου η θερμοκρασία του εδάφους είναι πρακτικά αμετάβλητη καθόλη τη διάρκεια του έτους. Εξαιτίας του αβαθούς τους χαρακτήρα, το κόστος εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας τους είναι χαμηλότερο από αυτό των γεωτρήσεων κλειστού και βαθέως τύπου που προαναφέρθηκαν [61].

Πρέπει να σημειωθεί, ότι στην επιφάνεια, η θερμοκρασία του εδάφους κυμαίνεται εποχικά από 0 °C μέχρι και 18 °C στην επιφάνεια, ενώ σε βάθος μόλις 3 m η διακύμανση κυμαίνεται από 5 °C μέχρι 13 °C. Η κύρια διαφορά μεταξύ των εναλλακτών οριζόντιου τύπου και αυτών μονής ή πολλαπλής γεώτρησης έγκειται στον τρόπο τοποθέτησης. Στους εναλλάκτες οριζόντιου τύπου, παρατηρούνται διατάξεις στοιβαγμένων ζευγών U-type σωλήνων, δηλαδή ζεύγη τοποθετημένα σε διαφορετικά βάθη, με σκοπό την αύξηση της επιφάνειας συναλλαγής μεταξύ του

ρέοντος ρευστού και του εδάφους [61]. Η μηχανική τοποθέτησης αλλά και υπολογισμού της αντίστασης του εδάφους αποτελούν πυλώνες του αντικειμένου αλλά βρίσκονται εκτός της θεματικής της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

2.2.2.4 Εναλλάκτες επιφανειακών υδάτων ανοικτού τύπου

Όπως και οι προηγούμενοι τύποι εναλλακτών που αναφέρθηκαν επιγραμματικά ανωτέρω, έτσι και οι εναλλάκτες επιφανειακών υδάτων αποτελούνται από διατάξεις εναλλάκτη που βυθίζονται σε μάζα συγκεκριμένης ενθαλπίας. Αυτή η μάζα στην περίπτωση αυτή είναι κάποιος παρακείμενος όγκος νερού, θαλασσινού, λίμνης ή κάποιου ποταμού. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν διατάξεις τόσο ανοικτού όσο και κλειστού τύπου, με τη διαφορά να έγκειται στην πολυπλοκότητα της υδραυλικής εγκατάστασης. Σε παραδείγματα εναλλακτών ανοικτού τύπου με χρήση θαλασσινού νερού, παρατηρούνται σύγχρονες διατάξεις φίλτρων προ του εναλλάκτη με σκοπό την προστασία του από την είσοδο μικροοργανισμών, ψαριών ή υποθαλάσσιας βλάστησης. Αλλάζει επίσης ακόμα και η ίδια η τεχνολογία του εναλλάκτη, αφού η λειτουργία υδραυλικών κυκλωμάτων με θαλασσινό νερό αυξάνει σημαντικά τα φαινόμενα διάβρωσης. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούνται εναλλάκτες τιτανίου, που έχουν σαφώς ακριβότερη αγορά, εφαρμογή και συντήρηση σε σχέση με τους συμβατικούς [62–64].

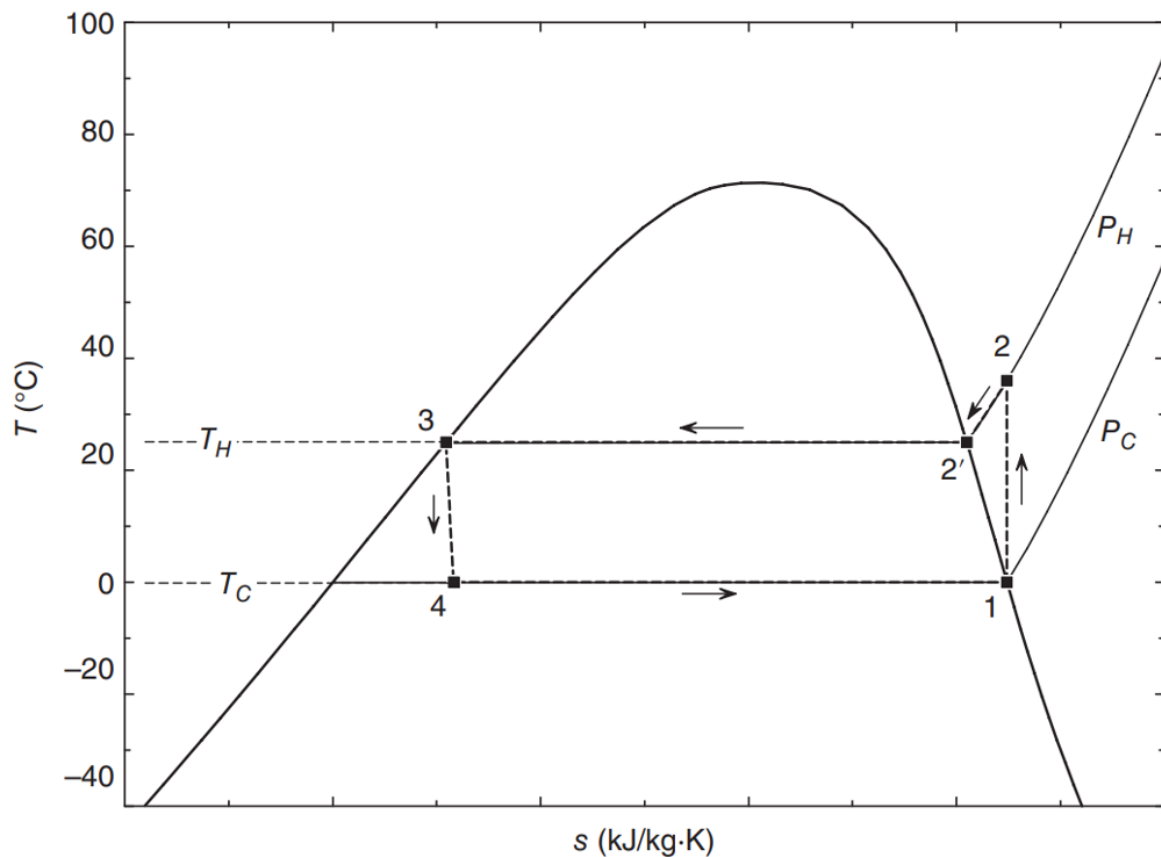
Χρήσεις εναλλακτών επιφανειακών υδάτων κλειστού τύπου εφαρμόζονται ευρέως, καθώς το κόστος τους είναι σημαντικά χαμηλότερο. Η τοποθέτηση τους γίνεται στην θερμοκλινή περιοχή (περίπου 6 m από την επιφάνεια της θάλασσας) και χρησιμοποιούνται είτε διατάξεις πηνίου είτε U-type πολλαπλών διαδρομών. Απαιτείται εξωτερική επιμετάλλωση των σωληνώσεων αυτών (τουλάχιστον των τμημάτων που βρίσκονται βυθισμένα) για να αποφευχθεί πιθανή διάβρωση από την επαφή τους με το νερό. Όσο αφορά τα τμήματα που βρίσκονται εκτός του νερού, φέρουν μόνωσης πολυουρεθάνης για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες με το περιβάλλον. Σημαντική και μη αμελητέα παράμετρος είναι η διακύμανση που προκαλείται τοπικά στα ύδατα από την διαρκή εναλλαγή θερμότητας με τις σωληνώσεις. Σε περιπτώσεις που η διακύμανση αυτή είναι άνω των 15 °C υπάρχει σοβαρή επίπτωση στη χλωρίδα και πανίδα του βυθού. Η αύξηση θερμοκρασίας αυξάνει την ανάπτυξη της υποθαλάσσιας βλάστησης που καταναλώνει το περισσότερο διαλυμένο οξυγόνο στο νερό της περιοχής. Αυτό έχει ως άμεση συνέπεια τη μείωση του πληθυσμού των μικροοργανισμών αλλά και ψαριών που δεν μπορούν να επιβιώσουν στο μικρό-οικοσύστημα αυτό. Επομένως η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη φροντίδα στις περιβαλλοντικές παραμέτρους και να αποφεύγονται εφαρμογές όπου τα προς εξυπηρέτηση φορτία είναι σημαντικά και κυμαινόμενα σε υψηλό βαθμό [61,64–67].

2.2.2.5 Αντλίες μηχανικής συμπίεσης ατμού

Οι αντλίες μηχανικής συμπίεσης ατμού αποτελούν τις πλέον διαδεδομένες διατάξεις θέρμανσης και ψύξης εσωτερικών οικιακών και βιομηχανικών χώρων. Χρησιμοποιούν κάποιο εργαζόμενο μέσο (ψυκτικό) το οποίο υποβάλλεται, σε εξαναγκασμένη κυκλοφορία, σε θερμοδυναμικό κύκλο μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η επιθυμητή θέρμανση ή ψύξη. Οι μηχανολογικοί εξοπλισμοί που υποβάλλουν το ψυκτικό σε θερμοδυναμικές μεταβολές είναι οι διατάξεις εξάτμισης, συμπίεσης, συμπύκνωσης και εκτόνωσης. Αυτοί οι θερμοδυναμικοί κύκλοι πραγματοποιούνται σε «υπό-κρίσιμο» σημείο για το ψυκτικό, καθώς δεν γίνεται υπέρβαση των κρίσιμων σημείων πίεσης και θερμοκρασίας [61].

Σε επιγραμματική ανάλυση της Εικόνα 2. 3, η μεταβολή 1-2 αποτελεί την ξηρά συμπίεση, όπου το εργαζόμενο μέσο περνά στην υπέρθερμη περιοχή, ενώ το ενδιάμεσο στάδιο 2-2' απεικονίζεται για να καταδείξει την μη ισεντροπική ψύξη του υπέρθερμου μέσου. Η διεργασία 2'-3 αναφέρεται στην ισόθερμη μεταφορά του μέσου από

τον συμπίεστή στον συμπυκνωτή, από όπου εξαγεται κορεσμένο ή ελαφρώς υπόψυκτο. Στην τελευταία διεργασία του κύκλου συμπίεσης, η διαφορά με τον ιδανικό κύκλο Carnot είναι η αντικατάσταση της ισεντροπικής εκτόνωσης με στραγγαλισμό (μείωση του όγκου του ψυκτικού) υπό σταθερή ενθαλπία [61].



Εικόνα 2. 3: Ιδανικός κύκλος συμπίεσης ατμού T-s.

Ο κύκλος που παρουσιάστηκε παραπάνω αποτελεί τον ιδανικό κύκλο συμπίεσης ατμού, που είναι αδύνατο να επιτευχθεί στην μηχανική λόγω της μη αντιστρεπτότητας πολλών εκ των διεργασιών. Όμως, οι αντλίες θερμότητας που λειτουργούν με αυτόν το θερμοδυναμικό κύκλο, μπορούν και παράγουν και θέρμανση και ψύξη, ανάλογα με την εποχή. Κατά τη λειτουργία θέρμανσης, το έδαφος/ γεωθερμικό ρευστό, όντας θερμότερο του ατμοσφαιρικού αέρα καθώς και του αέρα του προς εξυπηρέτηση χώρου, εισέρχεται στον εξατμιστή, όπου του παρέχει την απαραίτητη θερμότητα για να εξατμίσει το ψυκτικό μέσο και να περάσει στο στάδιο συμπίεσης στον συμπίεστή. Στην λειτουργία παραγωγής ψύξης το έδαφος/ γεωθερμικό ρευστό, έχοντας χαμηλότερη θερμοκρασία από τον ατμοσφαιρικό αέρα και τον προς εξυπηρέτηση χώρο, εισέρχεται στον συμπυκνωτή. Τα μαθηματικά μοντέλα, οι ιδιαιτερότητες και οι διαστασιολόγηση των επιμέρους μηχανολογικών διατάξεων του κύκλου είναι εκτός της σκοπιάς της παρούσας διδακτορικής διατριβής[61].

2.2.2.6 Θερμικώς καθοδηγούμενες αντλίες

Ενώ στους κύκλους συμπίεσης ατμού η αρχή λειτουργίας ήταν η απαγωγή θερμότητας από ένα ψυκτικό μέσο, μέσω της εξατμίσης υπό συνθήκες χαμηλής πίεσης και η πρόσδοση θερμότητας σε αυτό μέσω της συμπύκνωσης του υπό υψηλή πίεση, οι θερμικώς καθοδηγούμενες αντλίες έχουν δύο διαφορετικούς τρόπους απαγωγής και πρόσδοσης θερμότητας. Ο ένας είναι η απορρόφηση θερμότητας, όπου το ψυκτικό απορροφάται και διαλύεται, στη διάρκεια του κύκλου, από ένα ρευστό, ενώ ο άλλος είναι η προσρόφηση θερμότητας, όπου το ψυκτικό

προσροφάται από ένα στερεό κατά τη διάρκεια του κύκλου. Δεν απαιτούνται διατάξεις ηλεκτρικώς καθοδηγούμενων συμπίεσεων, όπως στους μηχανικούς κύκλους συμπίεσης ατμού.

Οι κύκλοι αυτοί έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τους κύκλους μηχανικής συμπίεσης ατμού. Αρχικά χαρακτηρίζονται από χαμηλή ιδιοκατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς δεν χρησιμοποιούν διατάξεις συμπίεστων, ενώ χρησιμοποιούνται ευρέως σε συνδυασμό με ηλιακή θερμική ενέργεια (θερμοδοχείο) για παραγωγή ψύξης (η οποία ταυτίζεται και με την περίοδο απαίτησης σε ψυκτική ενέργεια). Επίσης, τα εργαζόμενα μέσα που λειτουργούν στους κύκλους αυτούς είναι λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον συγκριτικά με τα αντίστοιχα ψυκτικά που λειτουργούν στον μηχανικό κύκλο. Σημαντικό πλεονέκτημα για τις αντλίες αυτές, αποτελεί η δυνατότητα λειτουργίας τους με θερμική ενέργεια, με διαφορετικά ενεργειακά δυναμικά, όπως είναι η ηλιακή, η γεωθερμική ή η απορριπτόμενη ενέργεια από βιομηχανικές, και άλλες, διεργασίες.

2.2.2.7 Ψύκτες Απορρόφησης Θερμότητας

Αποτελούν μια εκ των σημαντικότερων τεχνολογιών αντλιών θερμότητας για την παραγωγή ψύξης στην αγορά. Η τεχνολογία των ψυκτών απορρόφησης έχει πεδίο εφαρμογής σε δύο διαφορετικές κατηγορίες ψύξης, σε αυτές για θερμοκρασίες μικρότερες των 0 °C και σε αυτές μεγαλύτερες αυτού. Για τις εφαρμογές μικρότερων των 0 °C χρησιμοποιείται κυρίως διάλυμα αμμωνίας ενώ στην αντίθετη περίπτωση γίνεται χρήση συνήθως διαλύματος βρωμιούχου λιθίου. Στους κύκλους που χρησιμοποιούν διάλυμα βρωμιούχου λιθίου, αν και παρουσιάζονται εμπόδια όπως το σημείο πήξης του νερού και η κρυσταλοποίηση του βρωμιούχου λιθίου σε υψηλές συγκεντρώσεις, χαρακτηρίζονται γενικά από υψηλή απόδοση. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή τοξικότητα του νερού, την υψηλή λανθάνουσα θερμότητά του αλλά και στην χημική του σταθερότητα. Η συνεισφορά του διαλύματος βρωμιούχου λιθίου στην υψηλή απόδοση, έγκειται κυρίως στην χαμηλή πίεση ατμών του, στο χαμηλό ιξώδες αλλά και στην μη τοξικότητά του [61,68].

Η αρχή λειτουργίας αυτού του είδους εξοπλισμού είναι πανομοιότυπη με αυτήν των αντλιών μηχανικής συμπίεσης ατμού. Κατά τη λειτουργία, η παρεχόμενη θερμότητα από το θερμοδοχείο (ηλιακή θερμική ενέργεια, γεωθερμική ή απορριπτόμενη) εισέρχεται στον εκροφητή (γεννήτρια) όπου περιέχεται το διάλυμα νερού βρωμιούχου λιθίου. Η θερμότητα αυτή, σε συνδυασμό με τις συνθήκες κενού που επικρατούν στην δεξαμενή της γεννήτριας, εξατμίζουν το νερό αφήνοντας το βρωμιούχο λίθιο σε υψηλή περιεκτικότητα —ενδόθερμη αντίδραση (ισχυρό διάλυμα). Το εξατμισμένο ψυκτικό μέσο (νερό) εισέρχεται στον συμπυκνωτή, όπου και επιστρέφει σε υγρή κατάσταση και περνώντας από την εκτονωτική διάταξη, εισέρχεται στον εξατμιστή. Το ψυκτικό, στην φάση αυτή, εισέρχεται στον απορροφητή, ο οποίος περιέχει ασθενές διάλυμα απορροφητικού μέσου (βρωμιούχου λιθίου) και νερού (ψυκτικού). Το ψυκτικό που εισέρχεται από τον εξατμιστή, όντας υψηλότερης θερμοκρασίας, απορροφάται από το απορροφητικό μέσο στον απορροφητή, στον οποίο προκειμένου να γίνει απορρόφηση όσο το δυνατόν περισσότερης ποσότητας ψυκτικού, παρέχεται ψυχόμενο νερό από παρακείμενη διάταξη πύργου ψύξης. Η κυκλοφορία αυτού, μέσω αντλίας, επαναφέρεται στον εκροφητή, όπου και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται στις διατάξεις αυτές και στις διατάξεις διαλύματος αμμωνίας είναι η προσθήκη ενός ανορθωτή μεταξύ της γεννήτριας και του συμπυκνωτή. Αυτό συμβαίνει για τον περαιτέρω διαχωρισμό του νερού και της αμμωνίας ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός παγοφραγμών στο υδραυλικό κύκλωμα [61].

Σε ότι αφορά τους ψύκτες απορρόφησης που έχουν δυνατότητα λειτουργίας μικρότερη των 0 °C, χρησιμοποιούν διάλυμα αμμωνίας όπως προαναφέρθηκε. Η διαφορά μεταξύ των δύο διαλυμάτων, βρωμιούχου λιθίου και αμμωνίας είναι σημαντική. Το διάλυμα αμμωνίας μπορεί να λειτουργήσει μέχρι και σε θερμοκρασίες έως -40 °C, ιδανικές για βιομηχανικές εφαρμογές αλλά και εφαρμογές μεταφορών ευαίσθητου φορτίου. Όμως, η αμμωνία χαρακτηρίζεται από υψηλή τοξικότητα, υπό ορισμένες συνθήκες είναι αυταναφλέξιμη και έχει υψηλή πίεση ατμών

(παρόμοια με αυτήν του μηχανικού κύκλου συμπίεσης). Αυτό προϋποθέτει ειδικές διαμορφώσεις δοχείων που αυξάνουν το κόστος κατασκευής. Επίσης, εξαιτίας της σχετικής πίεσης ατμών της αμμωνίας και του νερού, σε υψηλές πιέσεις, μένουν τυπικά αδιαχώριστα, με αποτέλεσμα να απαιτείται επιπλέον διάταξη διαχωρισμού τους, πριν την είσοδο στον συμπιεστή. Τα χαρακτηριστικά αυτά μειώνουν το βαθμό απόδοσης αυτού του εξοπλισμού [61].

2.2.2.8 Ψύκτες Προσρόφησης

Οι ψύκτες προσρόφησης ακολουθούν ίδιες θερμοδυναμικές αρχές με τους ψύκτες απορρόφησης με τη μόνη διαφορά να είναι το απορροφητικό μέσο. Στην περίπτωση της προσρόφησης, το απορροφητικό μέσο είναι στερεό αποξηραντικό και περιέχεται τόσο στην γεννήτρια όσο και στον απορροφητή. Τα αποξηραντικά που χρησιμοποιούνται στις διατάξεις αυτές είναι πορώδη υλικά, με υψηλό λόγο επιφάνειας προς όγκο. Τα πιο συνήθη αποξηραντικά είναι αυτά ενεργού άνθρακα/άλατος αμμωνίας, ζεολίτη/νερού, τζελ πυριτίου/νερού και ενεργού άνθρακα/μεθανόλης. Εξαιτίας του στερεού αποξηραντικού μέσου, δεν μπορεί να γίνει κυκλοφορία αυτού μεταξύ του εκροφητή και του απορροφητή. Έτσι, μετά από κάποιους κύκλους, αντιμετωπίζεται ο ρόλος του εκροφητή και του απορροφητή με τη συνεχή κυκλοφορία του ψυκτικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη διακύμανση της θερμοκρασίας εξόδου από τον ψύκτη. Τα υπόλοιπα στοιχεία θερμοδυναμικών φαινομένων και μεταφορών θερμότητας είναι ίδια με αυτά των ψυκτών απορρόφησης που προαναφέρθηκαν [61].

2.2.2.9 Αντλίες οργανικού κύκλου Rankine (ORC)

Περνώντας από τις θερμικώς καθοδηγούμενες αντλίες στις θερμικές αντλίες/μηχανές, οι αντλίες που λειτουργούν κατά τον κύκλο Rankine παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες με τις αντλίες μηχανικής συμπίεσης ατμού. Κατά τον οργανικό κύκλο Rankine, ένα δευτερεύον ρευστό συμμετέχει ως εργαζόμενο μέσο, συνήθως με χαμηλότερο σημείο βρασμού από το νερό. Η δημιουργία του κύκλου αυτού αποτέλεσε προσπάθεια εξυγίανσης των μη αντιστρεψιμοτήτων του ιδανικού κύκλου Carnot, καθώς η ταυτόχρονη ισόθερμη συμπίεση και εκτόνωση δεν είναι δυνατές στην πράξη. Όπως και στον κύκλο του μηχανικού κύκλου συμπίεσης, χρησιμοποιήθηκε η αλλαγή φάσης ενός εργαζόμενου μέσου, ως η αρχή αντιμετώπισης τους [61].

Η λειτουργία του οργανικού κύκλου Rankine γίνεται μεταξύ δύο πιέσεων, της πίεσης βρασμού και της πίεσης συμπύκνωσης του εργαζόμενου μέσου. Έτσι, η είσοδος του εργαζόμενου μέσου στο στρόβιλο πραγματοποιείται είτε σε φάση κορεσμού, είτε σε φάση υπέρθερμου ατμού, όπου το μέσο εκτονώνεται αδιαβατικά παράγοντας έργο. Ο στρόβιλος με τη σειρά του αποτελεί την έξοδο του συστήματος και μέσω της περιστροφής της παράγεται ηλεκτρική ενέργεια, μέσω της αρχής περιστρεφόμενων αγωγών σε μαγνητικά πεδία (ηλεκτρικές μηχανές). Το εργαζόμενο μέσο, εξέρχεται στο στρόβιλο όντας υπόψυκτο ρευστό και έτσι εισέρχεται στον συμπυκνωτή, όπου ψύχεται και συμπυκνώνεται, εναλλάσσοντας θερμότητα με ένα άλλο ρευστό (νερό – από παρακείμενη διάταξη πύργου ψύξης). Στη συνέχεια, αντλείται (εξωτερικό απαιτούμενο μηχανικό έργο) προς το θερμοδοχείο (ηλιακή θερμική ενέργεια, γεωθερμική ή απορριπτόμενη) όπου και θα κορεστεί και θα εξατμιστεί για να ξαναγίνει υπέρθερμο ρευστό και να εκτονωθεί στο στρόβιλο [61]. Περαιτέρω ανάλυση του μοντέλου λειτουργίας είναι εκτός της σκοπιάς της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

2.2.3 Λέβητες Βιομάζας

Αν και η εμπορική τους χρήση είναι πλέον διαδεδομένη, οι λέβητες βιομάζας χαρακτηρίζονται από συγκριτικά υψηλά κόστη επένδυσης και χαμηλότερες αποδόσεις από τους συμβατικούς λέβητες πετρελαίου ή αερίου.

Οι κύριοι λόγοι είναι η χαμηλή κατωτέρα θερμογόνο δύναμη του καυσίμου που χρησιμοποιούν, η ανάγκη για παρακείμενο χώρο αποθήκευσης του στερεού καυσίμου και η συντήρηση που απαιτούν, συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα παραγωγής θερμικής ενέργειας. Όμως, το ισοζύγιο των ρύπων τους είναι μηδενικό, με την καύση της οργανικής ύλης —συσσωματώματα ξύλου (πελλετ)— ο άνθρακας που δεσμεύτηκε από την ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια ζωής της ύλης, με την καύση, απελευθερώνεται εκ νέου πίσω στην ατμόσφαιρα. Έτσι αποτελούν μια βιώσιμη λύση για την ενεργειακή μετάβαση της θέρμανσης είτε οικιακής είτε βιομηχανικής κλίμακας [69,70].

Για την ομαλή λειτουργία των διατάξεων αυτών όμως, απαιτούνται συγκεκριμένες σχεδιαστικές αποφάσεις. Αυτές επικεντρώνονται αρχικά στην επιλογή της καύσιμης ύλης που θα χρησιμοποιηθεί (άχυρο, πριονίδι, απόβλητα σιτηρών). Ανάλογα με την προέλευσή της, η καύσιμη ύλη αυτή μπορεί να παράγει κατά την καύση είτε υψηλής συγκέντρωσης σε NO_x ρύπους, είτε οξειδία χλωριδίων. Προκειμένου να αποφευχθούν αυτά τα φαινόμενα, χρησιμοποιούνται κυρίως μπριγκέτες ξύλου (πελλετ) ή ροκανίδια ως καύσιμο, που περιέχουν χαμηλά ποσοστά άνθρακα κατά βάρος [69]. Ακόμα και μεταξύ αυτών όμως, οι μπριγκέτες ξύλου αποτελούν πιο πρακτική επιλογή, καθώς αποθηκεύονται ευκολότερα, μεταφέρονται στον θάλαμο καύσης με μικρότερα προβλήματα και καίγονται σε αυτόν με προβλέψιμο τρόπο, σε αντίθεση με τα ροκανίδια τα οποία απαιτούν τακτικά αφύγρυνση ενώ η καύση τους μέσα στον λέβητα είναι πρακτικά απρόβλεπτη [71].

Άλλη μία σχεδιαστική παράμετρος με σημαντικό αντίκτυπο στην ομαλή λειτουργία, είναι το είδος της διάταξης μεταφοράς του καυσίμου από τον χώρο αποθήκευσης στον χώρο καύσης. Τέτοιου είδους συστήματα είναι συνήθως οι κοχλίες μεταφοράς, οι μεταφορικές ταινίες, τα ρυμουλκούμενα ανατρεπόμενα ψαλίδια, πνευματικά συστήματα κ.α. Η επιλογή μεταξύ αυτών γίνεται με άξονα το μέγεθος της μπριγκέτας που απαιτείται για την ομαλή καύση στον εκάστοτε τύπο λέβητα. Σε ότι αφορά τον χώρο αποθήκευσης της καύσιμης ύλης, μπορεί να τοποθετηθεί είτε πάνω, είτε υπογείως είτε να είναι μερικώς κάτω από την γη, καθώς πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμος από το σύστημα μεταφοράς αλλά και από το σύστημα φορτοεκφόρτωσης. Πρέπει επίσης να ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ανάπτυξης υγρασίας στο εσωτερικό του για να μην θέσει σε κίνδυνο την ακεραιότητα του καυσίμου [69,72].

Κατά τη λειτουργία του λέβητα βιομάζας, όπως και σε όλες τις διατάξεις εσωτερικής καύσης, απαιτείται έλεγχος του λόγου αέρα/καυσίμου, για την ομαλή και αποδοτική λειτουργία του. Αν το σύστημα λειτουργεί απουσία της απαιτούμενης ποσότητας αέρα, τότε στην εξαγωγή προκύπτουν αέριοι ρύποι NO_x , που συμβάλλουν σημαντικά στην εντατικοποίηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σε περιπτώσεις που ο λόγος αέρα καυσίμου είναι μεγάλος, μειώνεται η απόδοση της καύσης πρώτον εξαιτίας αγωγής θερμότητας από τον εισερχόμενο κρύο αέρα προς τον θάλαμο καύσης, και δεύτερον λόγω της μεταβολής της στοιχειομετρικής ισορροπίας της καύσης. Όμως, και η προσθήκη περίσσιας καυσίμου οδηγεί σε εκτενή προβλήματα καθώς δεν μπορεί να καεί όλος ο εισερχόμενος όγκος καυσίμου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεταφορά του άκαυστου υλικού προς την εξαγωγή, μαζί με τις στάχτες και εκεί να δημιουργηθεί μια δεύτερη εστία φωτιάς, σαφώς επικίνδυνη για την ομαλή λειτουργία του συστήματος [69]. Περαιτέρω ανάλυση των συστημάτων αυτών είναι εκτός της σκοπιάς της διδακτορικής διατριβής.

2.2.4 Δίκτυα Διανομής ΘΨΕ

Τα είδη του εξοπλισμού που προαναφέρθηκαν, αποτελούν τεχνολογίες παραγωγής θερμικής και ψυκτικής ενέργειας, ενέργειας που αφού παραχθεί, πρέπει να φτάσει στον καταναλωτή. Τα δίκτυα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της παραχθείσας ενέργειας ονομάζονται δίκτυα τηλεθέρμανσης ή τηλεψύξης. Με τις προσπάθειες της Ευρώπης για ενεργειακή μετάβαση, άνω του 60% της απορριπτόμενης, ή παραγόμενης από ανανεώσιμες πηγές, θερμικής ενέργειας μεταφέρεται πλέον μέσω δικτύων τηλεθέρμανσης, καθώς τα δίκτυα αυτά μειώ-

νουν την τελική κατανάλωση ενέργειας έως και 15%. Αν και στις υφιστάμενες εφαρμογές τέτοιων δικτύων η ενέργεια που μεταφέρεται προέρχεται κυρίως από βιομηχανίες ή εργοστάσια μεγάλης κλίμακας, η αντιστοιχία συνολικού κόστους λειτουργίας και εγκατάστασης, απόδοσης συστήματος και λειτουργικών χαρακτηριστικών, θα χρησιμοποιηθεί στη παρούσα διατριβή με την πηγή ενέργειας να είναι κατεχοχόν ανανεώσιμες πηγές [73].

Η πορεία των δικτύων τηλεθέρμανσης, ιστορικά, έχει διανύσει πλήρως 4 γενιές και κατά το πέρας του 2022 προοικονομεί την 5^η. Στην 1^η και πιο αρχαϊκή γενιά, τα δίκτυα αποτελούνταν από σωλήνες ατμού σε αγωγούς σκυροδέματος και το νερό που κυκλοφορούσε μέσα ήταν ατμός υψηλής θερμοκρασίας, δεν ήταν δυνατός κανένας έλεγχος της θερμοκρασίας και δεν ενυπήρχαν σενάρια ψύξης (1880) [74]. Κατά την 2^η γενιά, πεπιεσμένος ατμός άνω των 100 °C κυκλοφορούσε σε σωλήνες νερού και πάλι σε αγωγούς σκυροδέματος. Οι θερμοκρασίες αυτές είχαν αρκετά μειονεκτήματα, καθώς ήταν εξαιρετικά επικίνδυνη η συντήρηση και λειτουργία τους, απαιτούσαν ογκώδεις διατάξεις αναγέννησης του ατμού, εκτεταμένες διατάξεις εναλλακτών θερμότητας τύπου κελύφους και δεν παρείχαν κανένα έλεγχο της θερμοκρασίας κυκλοφορίας και παροχής στον καταναλωτή. Έτσι, το επόμενο βήμα στα δίκτυα αυτά, η 3^η γενιά, ήταν το λιτό σκανδιναβικό μοντέλο, όπου προκατασκευασμένοι μονωμένοι σωλήνες νερού υπογειοποιούνταν και η θερμοκρασία του νερού κυκλοφορίας ήταν συνήθως μικρότερη των 100 °C. Προστέθηκαν υποσταθμοί ανύψωσης της θερμοκρασίας, ιδιαίτερα για εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των μονάδων παραγωγής και του φορτίου, καθώς και πλακοειδείς εναλλάκτες από την πλευρά της κατανάλωσης για εκμετάλλευση της ενέργειας του δικτύου [74]. Η γενιά αυτή αποτελεί την υφιστάμενη τεχνολογία τηλεθέρμανσης που χρησιμοποιείται και στην χώρα μας όπως για παράδειγμα στην περιοχή του νομού Κοζάνης. Στην γενιά αυτή δικτύων, εξαιτίας της πετρελαϊκής κρίσης του 1973, προστέθηκαν τοπικές ανεξάρτητες πηγές παραγωγής θερμότητας όπως η ηλιακή και η γεωθερμική για να διασφαλιστεί μερικώς η ενεργειακή επάρκεια των περιοχών [74].

Η επανάσταση όμως ήρθε με την 4^η γενιά δικτύων τηλεθέρμανσης. Η έννοια της τηλεψύξης ενσωματώθηκε και οι θερμοκρασίες των ρευστών που πλέον κυκλοφορούν στα δίκτυα 4^{ης} γενιάς είναι αρκετά μικρότερες των 100 °C. Οι στόχοι των δικτύων αυτών είναι να κυκλοφορούν ρευστό χαμηλής ενθαλπίας (50-60 °C), να μειώνουν τις απώλειες δικτύων, να καλύπτουν θερμικά, ψυκτικά και φορτία ζεστού νερού χρήσης (ZNX) για τους καταναλωτές, να ενσωματωθούν στα έξυπνα ολοκληρωμένα ενεργειακά δίκτυα (ηλεκτρική, θερμική και ψυκτική ενέργεια), να κάνουν χρήση πηγών ενέργειας χαμηλών εκπομπών όπως η ηλιοθερμική και η γεωθερμική και να μειώσουν κατά πολύ το κόστος της προσφερόμενης ενέργειας [74,75]. Αν και το προσδόκιμο λειτουργίας αυτής της γενιάς είναι από το 2020 έως και το 2050, ήδη σε ερευνητικό επίπεδο εξετάζεται η 5^η γενιά, όπου ενσωματώνεται στις διαδικασίες λειτουργίας και η ηλεκτρική ιδιοκατανάλωσή τους, η οποία καλύπτεται μέσω ανανεώσιμων πηγών και είναι αμφίδρομη. Η αμφίδρομη λειτουργία επιτρέπει την είσοδο των παραγωγαλωτών στον ενεργειακό χάρτη, καθώς θα μπορούν να παράγουν ενέργεια την οποία θα διοχετεύουν στο δίκτυο τηλεθέρμανσης ή τηλεψύξης και να συμμετέχουν ενεργά στην αγορά ενέργειας [75].

Τυπικό μέγεθος αποστάσεων μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, που εμφανίζονται στη διαθέσιμη βιβλιογραφία, είναι περί τα 75 km, κυρίως για τη διασφάλιση της ποιότητας της ενέργειας που φτάνει στην κατανάλωση. Στα κεντρικά αλλά και βόρεια τμήματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αυτό αντιστοιχεί σε δυνητική μεταφορά περί των 2000 GWh/έτος, ενώ στα νότια τμήματα 750 GWh/έτος για φορτία θέρμανσης και 400 GWh/έτος για φορτία ψύξης [76]. Στην Ελλάδα, κατά τη λειτουργία των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), διανέμονται περίπου 2,2 TWh/έτος απορριπτόμενης θερμικής ενέργειας μέσω δικτύων τηλεθέρμανσης. Είναι σαφές ότι η τεchnοοικονομική σημασία της ανάπτυξης τέτοιων δικτύων είναι ύψιστη, καθώς παρατηρείται μείωση της μοναδιαίας τιμής ενέργειας από 130 €/MWh_{th} σε περίπου 112 €/MWh_{th} –τιμές 2017- (σε περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση δικτύων διανομής από κεντρικό πάροχο συγκριτικά με μεμονωμένα συστήματα

παραγωγής). Σημαντικό χαρακτηριστικό της εφαρμογής των δικτύων είναι επίσης και η μείωση των ρύπων CO₂ που παρατηρείται, περί τα 250 kg CO₂/έτος [76].

Όσο αφορά τη διάταξη δικτύων ΘΨΕ, αποτελούν ένα εκτεταμένο υδραυλικό δίκτυο μονωμένων σωληνώσεων, το οποίο συνήθως είναι υπογειοποιημένο για την ελαχιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας με το περιβάλλον. Κατά την κατασκευή τους, εξακριβώνεται ο τρόπος με τον οποίο θα λαμβάνουν και αποδίδουν τη θερμική ή ψυκτική ενέργεια. Οι διαφορετικές διατάξεις διαχωρίζονται στην ύπαρξη εναλλακτών θερμότητας, εκατέρωθεν, ή όχι. Σε εγκαταστάσεις συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρικής/θερμικής ενέργειας, που αποτελούν και την πλειοψηφία των πραγματικών εφαρμογών, είναι συνήθης πρακτική η τοποθέτηση εναλλάκτη στην αρχή του δικτύου για την εκμετάλλευση της απορριπτόμενης ενέργειας (συνοπτικά αναφέρεται ότι συνήθως τοποθετούνται μετά τον ατμοστρόβιλο χαμηλής πίεσης της ατμοπαραγωγικής διάταξης), αλλά και στο τέλος πριν τον κεντρικό συλλέκτη του καταναλωτή (εφαρμογές Πτολεμαΐδα, Κοζάνη) [76]. Υπάρχουν όμως αναφορές εφαρμογής απευθείας εξυπηρέτησης του φορτίου χωρίς τη χρήση εναλλάκτη, που ενώ μειώνει το συνολικό κόστος εγκατάστασης επηρεάζει την ισορροπία του συνολικού υδραυλικού κυκλώματος (αυξημένες πτώσεις πίεσης και χαμηλή συντηρησιμότητα) [49,76,77].

Τα οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον ανά μελέτη περίπτωσης, καθώς η διαφοροποίηση μεταξύ των φορτίων θέρμανσης και ψύξης, η ανάγκη για ενσωμάτωση συστημάτων βραχυπρόθεσμης ή μακροπρόθεσμης αποθήκευσης, οδηγεί σε σημαντικές αλλαγές στην τελική μελέτη. Σημαντικές παράμετροι κατά την εκπόνηση αυτών των μελετών είναι ο ωφέλιμος χρόνος λειτουργίας των δικτύων, η διαθεσιμότητά τους, η θερμική και ψυκτική τους απόδοση και τα λειτουργικά έξοδα τους [76,78]. Τυπικές τιμές που παρουσιάζονται ευρέως στη βιβλιογραφία αναφέρουν ως μέσο ωφέλιμο χρόνο ζωής για τα δίκτυα έως και πάνω από 60 έτη ενώ οι αποδόσεις των θερμικών κα ψυκτικών δικτύων κυμαίνονται στο 90~91%. Το μοναδιαίο κόστος κατασκευής, βάσει βιβλιογραφίας επί του θέματος, είναι κοντά στα 5400 €/μονάδα με την ενέργεια προς κατανάλωση να διαμορφώνεται στα 0,26 €/kWh (τιμές 2018) [76,79].

2.2.5 Τεχνολογίες Αποθήκευσης Θερμότητας

Αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής τεχνολογίες που παράγουν και διανέμουν θερμική και ψυκτική ανανεώσιμη ενέργεια. Όμως, η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές συχνά δεν ταυτίζεται με την ζήτηση [80–85]. Για τον λόγο αυτό, η προσθήκη διατάξεων αποθήκευσης, είτε θερμικής είτε ψυκτικής ενέργειας, είναι απαραίτητη. Παρακάτω θα αναφερθούν συνοπτικά οι κυριότερες τεχνολογίες αποθήκευσης αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας, που θα χρησιμοποιηθούν εκτενώς στις εφαρμογές της παρούσας διατριβής στα επόμενα κεφάλαια.

2.2.5.1 Αισθητή Θερμότητα

Με την προσφορά θερμικής ενέργειας σε ένα υλικό, μεταβάλλεται η θερμοκρασία του (αυξάνεται όταν η προσφερόμενη ενέργεια είναι θερμική, ενώ μειώνεται όταν αυτή είναι ψυκτική). Με τη μεταβολή αυτή, το υλικό αποθηκεύει μέρος της θερμότητας αυτής, που ονομάζεται αισθητή. Η ποσότητα που αποθηκεύεται είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας του υλικού (ΔT , πριν και μετά τη προσφορά θερμότητας) και της ειδικής θερμοχωρητικότητάς του (c_p) (τυπικά εκφράζεται από την εξίσωση $Q = m \times c_p \times \Delta T$ – βλ. Κεφ. 5 Εξ. 20). Αν και οι απώλειες με το περιβάλλον είναι πρακτικά αναπόφευκτες, με χρήση κατάλληλης μόνωσης μειώνεται ο ρυθμός με τον οποίο το υλικό αποβάλλει θερμότητα, με αποτέλεσμα η αποθηκευμένη ενέργεια να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έναν σημαντικά μεγάλο χρονικό ορίζοντα [86,87]. Σε ότι αφορά την αποθήκευση αισθητής θερμότητας, ο όγκος

αποθήκευσης είναι ευθέως ανάλογος του όγκου του χρησιμοποιούμενου υλικού ενώ ο ρυθμός απώλειας θερμότητας ανάλογος της επιφάνειας συναλλαγής. Για τον λόγο αυτό είναι θεμιτό η γεωμετρία των δοχείων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας να είναι όσο το δυνατόν πιο σφαιρική [86].

Χρησιμοποιείται μια εκτενής λίστα υλικών στη διαθέσιμη βιβλιογραφία, των οποίων η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα αλλά και η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα εξετάζονται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Το νερό αποτελεί το πλέον διαδεδομένο μέσο για εφαρμογές αποθήκευσης θερμότητας σε οικιακούς και βιομηχανικούς χώρους, καθώς το κόστος του είναι χαμηλό ενώ η θερμοχωρητικότητα και ειδική θερμότητά του είναι σημαντικά μεγαλύτερες των υπόλοιπων υλικών [86,87]. Το μειονέκτημα της χρήσης νερού είναι το χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο μπορεί να αποθηκεύσει αισθητή θερμότητα (5-95 °C). Στον Πίνακα 2. 1 παρουσιάζονται τα υλικά που συναντώνται συχνότερα σε πλήθος ερευνητικών εφαρμογών.

2.2.5.2 Λανθάνουσα Θερμότητα

Αν η προσφορά θερμότητας σε ένα υλικό είναι διαρκής, τότε σε κάποιο χρονικό σημείο το υλικό θα μεταβεί από μία φάση στην επόμενη. Με τον όρο αλλαγή φάσης στη θερμοδυναμική, γίνεται αναφορά στην αλλαγή που υπόκειται η κρυσταλλική δομή του υλικού, τυπικά από στερεό σε υγρό και από υγρό σε αέριο. Κατά την αλλαγή φάσης, τα υλικά αποθηκεύουν (ή εκλύουν) θερμότητα πολύ υψηλότερου ενεργειακού περιεχομένου από ότι κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας τους (υπό σταθερό όγκο) στην ίδια φάση. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά την θέρμανση ενός υλικού, η μεταβολή της ενθαλπίας του αυξάνεται πρακτικά γραμμικά με τη προσφορά θερμότητας, όταν φτάσει όμως στο όριο αλλαγής φάσης, παρατηρείται απότομη αύξηση της ενθαλπίας, που είναι η ενθαλπία σχηματισμού. Η ενθαλπία αυτή, μπορεί να απελευθερωθεί με τη μορφή θερμότητας, αν η διαδικασία αντιστραφεί, αν δηλαδή το υλικό που έγινε από υγρό αέριο, επανέλθει στην υγρή μορφή του.

Πίνακας 2. 1: Θερμικές ιδιότητες συνήθων υλικών [86].

Υλικό	Πυκνότητα (kg/m ³)	Ειδική θερμότητα (J/kg.K)	Ογκομετρική θερμοχωρητικότητα (10 ⁻⁶ J/m ³ .K)
Πηλός	1458	879	1,28
Τούβλο	1800	837	1,51
Αμμόπετρα	2200	712	1,57
Ξύλο	700	2390	1,67
Τσιμέντο	2000	880	7,76
Γυαλί	2710	837	2,27
Αλουμίνιο	2710	896	2,43
Χάλυβας	7840	465	3,68
Μαγνητίτης	5177	752	3,69
Νερό	988	4812	4,17

Αυτό το φαινόμενο εκμεταλλεύονται τα μέσα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με τη βασικότερη προϋπόθεση να είναι η συνεκτικότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται (η διατήρηση, δηλαδή, της χημικής τους σύστασης κατά τη μετάβαση από μία φάση σε μία άλλη). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αυτού του τύπου, είναι είτε οργανικά υλικά είτε ανόργανα, και παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Ανόργανα και Οργανικά υλικά αλλαγής φάσης

Εκτός των υλικών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. 1, υπάρχουν ανόργανα υλικά τα οποία κατά την υγρή φάση μπορούν να μεταβούν ισόθερμα σε 2 ή παραπάνω φάσεις ίδιας σύστασης (ευτηκτικές αντιδράσεις). Υπάρχουν περιπτώσεις αλλαγής φάσης, εκτός από τη μετάβαση υγρό-αέριο ή στερεό-υγρό, που κατά τη στερεή φάση παρατηρείται αλλαγή. Η αλλαγή αυτή συμβαίνει σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας τήξης και παρατηρείται αλλαγή στην κρυσταλλική δομή του υλικού αλλά και στην εντροπία του. Τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε θερμοκρασίες κοντά στη θερμοκρασία αλλαγής της στερεής φάσης τους [86]. Η ολική μεταβολή της εντροπίας, δηλαδή το ποσό θερμότητας που απορροφάται από το υλικό είναι υψηλή μόνον κατά την αλλαγή της φάσης από στερεό σε υγρό, όπου παρατηρείται και η σχετική αλλαγή της κρυσταλλικής δομής του υλικού (συνήθη υλικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. 3).

Ένα εκ των σημαντικών φαινομένων που διερευνάται ενδελεχώς, καθώς έχει εφαρμογή στην αναζήτηση των καταλληλότερων υλικών λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας, είναι το φαινόμενο *paddlewheel* [88]. Κατά τη κίνηση των ατόμων του υλικού, ενώ η διεύθυνση της κίνησης αυτής είναι άτακτη, στο φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται σε ομάδες που κινούνται προς ίδιες κατευθύνσεις. Τα πιο συνήθη υλικά που τα άτομα τους χαρακτηρίζονται από τέτοια συμπεριφορά είναι τα ιόντα θειικού λιθίου. Έχει παρατηρηθεί ότι παρουσιάζουν ασυνήθιστα υψηλή ιοντική αγωγιμότητα που οφείλεται δομικά στη κίνηση των τετράεδρων μορίων SO_4 . Η κίνηση αυτή διευκολύνει τη μεταφορά των ιόντων λιθίου σε μεγάλες ενδομοριακές αποστάσεις. Έτσι, τα υλικά αυτά τυγχάνουν ευρείας ερευνητικής εφαρμογής στην αποθήκευση αυτού του τύπου, αφού η εντροπία τους είναι σαφώς υψηλότερη κατά τη στερεή φάση παρά κατά τη μετάβαση στην υγρή (Πίνακας 2. 2) [86]. Εκτός των ανόργανων υλικών, πολλά οργανικά υλικά έχουν υψηλή θερμότητα σύντηξης. Τέτοια είναι τα λιπαρά οξέα, οι παραφίνες και οι πολυγλυκόλες (Πίνακας 2. 4 και Πίνακας 2. 5).

Πίνακας 2. 2: Θερμότητα σύντηξης μερικών ανόργανων υλικών [86].

Υλικό	Σημείο τήξης (°C)	Θερμότητα σύντηξης (MJ/kg)
NH_4NO_3	170	0,12
NaNO_3	307	0,13
NaOH	318	0,15
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	561	0,12
LiCl	614	0,31
FeCl_2	670	0,34
MgCl_2	708	0,45
KCl	776	0,34
NaCl	801	0,50

Πίνακας 2. 3: Στερεή αλλαγή φάσης και εντροπία τήξης για συγκεκριμένα ανόργανα υλικά [86].

Υλικό	Θερμ. Μετάβασης (°C)	Θερμοκρασία τή- ξης (°C)	Εντροπία μετάβα- σης (J/mol.K)	Εντροπία τήξης (J/mol.K)
FeS	138	1190	4,05	21,51
AgI	148	558	14,61	11,33
Ag ₂ S	177	837	8,86	7,01
Na ₂ SO ₄	247	884	12,5	18,2
Ag ₂ SO ₄	427	660	26,66	19,19
Li ₂ SO ₄	577	860	29,2	7,9
LiNaSO ₄	518	615	31,2	μικρή

Πίνακας 2. 4: Θερμότητα σύντηξης μερικών οργανικών υλικών [86].

Υλικό	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Θερμότητα σύντηξης (kJ/kg)
Κερί παραφίνης	64	173,6
Πολυγλυκόλη E400	8	99,6
Πολυγλυκόλη E600	22	127,2
Πολυγλυκόλη E 6000	66	190,0

Πίνακας 2. 5: Θερμότητα σύντηξης ορισμένων λιπαρών οξέων [86].

Υλικό	Θερμοκρασία τήξης (°C)	Θερμότητα σύντηξης (kJ/kg)
Στεατικό οξύ	69	202,5
Παλμιτικό οξύ	64	185,4
Καπρικό οξύ	32	152,7
Καπριλικό οξύ	16	148,5

2.2.5.3 Θερμοχημική αποθήκευση

Εκτός της αποθήκευσης λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας, το σύγχρονο ερευνητικό ενδιαφέρον έχει επεκταθεί και στην αποθήκευση θερμότητας με τη χρήση συγκεκριμένων χημικών αντιδράσεων [89]. Οι προαναφερόμενες αντιδράσεις χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, στις χημικά αντιστρεπτές αντιδράσεις και στις αντιδράσεις απορρόφησης ή προσρόφησης. Η τελευταία κατηγορία διέπεται από τα φαινόμενα που παρουσιάστηκαν στις υποενότητες 2.2.2.7 Ψύκτες Απορρόφησης Θερμότητας και 2.2.2.8 Ψύκτες Προσρόφησης. Σε ότι αφορά τις αντιστρεπτές χημικές αντιδράσεις, κατά την αποθήκευση με αυτήν την τεχνολογία, η προσφερόμενη θερμική ενέργεια προκαλεί ενδόθερμη αντίδραση στη χημική ένωση του μέσου η οποία και αυτή αποθηκεύεται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Κατά την εκμετάλλευση της ενέργειας αυτής, η αντίστροφη αντίδραση λαμβάνει χώρα (εξώθερμη) με αποτέλεσμα να παρέχει θερμική ενέργεια προς το φορτίο [90].

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η σημαντική διαφορά ενεργειακής πυκνότητας που παρουσιάζει συγκριτικά με το άλλο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέσο αποθήκευσης, το νερό. Ενώ το νερό έχει ενεργειακή

πυκνότητα μόλις 200 MJ/m^3 , η θερμοχημική αποθήκευση έχει άνω των 400 MJ/m^3 . Τα σημαντικότερα μέσα (χημικές ενώσεις) χημικής αποθήκευσης που βρίσκονται είτε σε εμπορικό είτε σε ερευνητικό στάδιο παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. 6.

Πίνακας 2. 6: Μερικά πρωτότυπα μέσα θερμοχημικής αποθήκευσης [90].

Χημική ένωση	Φαινόμενο
$\text{NaOH/H}_2\text{O}$	Προσρόφηση
$\text{LiCl/H}_2\text{O}$	Απορρόφηση
$\text{MgCl}_2/\text{H}_2\text{O}$	Απορρόφηση
$\text{NaOH/H}_2\text{O}$	Απορρόφηση
Ζεολίτης (ανοικτός)	Προσρόφηση
Πυρίτιο/ H_2O	Προσρόφηση
AQSOA FAM $\text{ZnO}_2/\text{H}_2\text{O}$	Προσρόφηση

2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση συστημάτων κάλυψης αναγκών ΕΚ

Στην συνέχεια του παρόντος εδαφίου θα αναφερθούν συγκεντρωτικά οι εργασίες, με χρονολογική σειρά, που συνεισέφεραν ουσιαστικά στην ανάπτυξη της σχεδίασης συστημάτων παραγωγής και εκμετάλλευσης ενέργειας τοπικά. Οι εργασίες αυτές κάνουν ως επί το πλείστον αναφορά σε πολυενεργειακά (multi-energy) συστήματα για κάλυψη αναγκών κτιριακών δομών, που θα μπορούσαν να αποτελούν συμπράξεις όπως αυτές των ΕΚ. Σκοπός του Πίνακα 2. 7, που ακολουθεί, είναι να αποδελτιώσει τις κυριότερες ερευνητικές εργασίες στη θεματική των θερμικών ΕΚ και των τεχνολογιών που συμβάλλουν στην μετάβαση του ενεργειακού χάρτη από το υφιστάμενο κεντροποιημένο μοντέλο κάλυψης αναγκών σε ένα αποκεντρωμένο με κεντρικό άξονα τις θερμικές ΕΚ. Η αποδελτίωση αυτή σε συνδυασμό με την βιβλιομετρική ανασκόπηση που αναλύεται στο 3^ο Κεφάλαιο συνεισέφεραν στην διάρθρωση του κεντρικού ερευνητικού ερωτήματος αλλά και των ερευνητικών υποερωτημάτων που το πλαισιώνουν.

Πίνακας 2. 7: Εργασίες με την μεγαλύτερη επιρροή (βάσει citation count) πάνω στην παραγωγή, διανομή και αποθήκευση θερμικής και ψυκτικής ενέργειας σε ενεργειακές κοινότητες

Συγγραφέας (Χρονιά)	Θέμα	Τεχνολογίες	Συμπεράσματα
Lund et al. [91]	Σύστημα παροχής ανανεώσιμης ενέργειας σε κοινότητες της Δανικής επικράτειας για ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας των πολιτών.	• Ηλιοθερμικοί συλλέκτες • Απορριπτόμενη ενέργεια από βιομηχανία • Αντλίες θερμότητας • Σύστημα τηλεθέρμανσης	Γενικά: Η δημιουργίας ενός 100% αυτόνομου συστήματος που λειτουργεί με ανανεώσιμες πηγές, αποτελεί σύνθετο συστημικό πρόβλημα καθώς πρέπει να συντελέσουν διαδοχικές βελτιστοποιήσεις και συνδυασμός αρκετών παραμέτρων. Οικονομικά: Σε επίπεδο χώρας η μετάβαση αναλογεί σε 60.000.000.000 κορόνες Δανίας. Τεχνολογικά: Δεν αξιολογούνται.
Krajacic et al. [92]	Χρήση του λογισμικού H2RES για τον σχεδιασμό αυτόνομων κοινοτήτων, με κύριο άξονα περιπτώσεις νησιών.	• Ηλιοθερμικοί συλλέκτες • Κελιά καυσίμου • Αποθήκευση υδρογόνου	Γενικά: Η δημιουργία τέτοιων αποκεντρωμένων συστημάτων κάλυψης ενεργειακών αναγκών αποτελεί εξαιρετικά σύνθετο ζήτημα. Διερευνώνται αρκετά σενάρια με διαφορετικά μείγματα τεχνολογιών, χωρίς να ληφθεί ως κρίσιμη παράμετρος το κόστος του εξοπλισμού. Οικονομικά: Δίνονται στοιχεία μόνο για την ηλεκτρική kWh, που κυμαίνεται από 0,082 έως 0,129 €/kWh. Τεχνολογικά: Αναμένεται περαιτέρω εξέλιξη στην τεχνολογία των κελιών καυσίμου και αποθήκευσης υδρογόνου για να είναι βιώσιμες αυτές οι κοινότητες.
Lund et al. [74]	Προσέγγιση ορισμού της 4ης γενιάς δικτύων τηλεθέρμανσης και η συμβολή τους στην ενεργειακή μετάβαση	• Μονώσεις και διαστάσεις σωληνώσεων δικτύων τηλεθέρμανσης • Αποθήκευση θερμικής για ZNX • Ηλιοθερμικοί συλλέκτες • Εποχική αποθήκευση θερμικής • Αντλίες θερμότητας	Γενικά: Η 4η γενιά δικτύων τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης είναι η επιτομή της ενεργειακής μετάβασης στον τομέα της θερμικής ενέργειας και της δημιουργίας έξυπνων δικτύων τηλεθέρμανσης. Οικονομικά: Δεν αποτιμάται οικονομικά η μετάβαση στην 4η γενιά. Τεχνολογικά: Δεν αναφέρεται το στάδιο διείσδυσης των τεχνολογιών που αναφέρονται.

Συγγραφέας (Χρονιά)	Θέμα	Τεχνολογίες	Συμπεράσματα
Dominkovic et al. [93]	Μοντέλο γραμμικής βελτιστοποίησης της διασύνδεσης δικτύων τηλεθέρμανσης, μεταξύ υφιστάμενων σε μελέτες περίπτωσης πόλεων της Δανίας.	- Κεντρικά ψυκτικά συστήματα - Γεωθερμικές αντλίες συνδυασμένες με αντλίες απορρόφησης θερμότητας - Λέβητες βιομάζας - Αντλίες θερμότητας μεγάλης κλίμακας - Αποθήκευση αισθητής θερμότητας - Ηλιοθερμικοί συλλέκτες	Γενικά: Με την αξιοποίηση και της απορριπτόμενης ενέργειας της βιομηχανίας, η διασύνδεση ακόμα και όλων των πόλεων παρουσιάζει πολύ θελκτικά οικονομοτεχνικά αποτελέσματα. Δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ του μεγέθους διασύνδεσης (μήκος, διάμετρος σωληνώσεων) και των σημαντικών οικονομικών δεικτών. Περισσότερο σημαντική για τη βιωσιμότητα του έργου είναι η ορθή επιλογή του μείγματος τεχνολογιών που θα προσφέρουν την ενέργεια. Οικονομικά: Το επιλεγθέν σενάριο αποτιμάται ως: 33 km σωλήνωσης, με συνολικό κόστος εγκατάστασης 76.770.000 €, IRR στα 13,85% και NPV 65.180.000 €. Τεχνολογικά: Δεν αναφέρεται επίπεδο τεχνολογίας που απαιτείται για την επίτευξη του σεναρίου (<i>παρατήρηση</i>: αναφέρεται ότι, με τις τότε τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, οι αντλίες θερμότητας μεγάλης κλίμακας μπορούσαν να αντικαταστήσουν όλους τους λέβητες ορυκτών καυσίμων)
Guelpa et al. [94]	Ανασκόπηση της σημαντικότερης βιβλιογραφίας πάνω στην χρήση αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στα δίκτυα τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης	- Ηλιοθερμικοί συλλέκτες - Λέβητες βιομάζας - Αντλίες θερμότητας αέρα-νερού και υπόγειου νερού-νερού - Απορριπτόμενη θερμότητα - Θερμική που προέρχεται από παραγωγαναλωτές	Γενικά: Τα συστήματα αποθήκευσης αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της μετάβασης προς βιώσιμη θερμική ενέργεια καθώς: εξομαλύνουν τη διαλειτουργία, μειώνουν τα λειτουργικά κόστη, χαρακτηρίζονται από χαμηλά κόστη συντήρησης, διευθετούν θέματα ροής και παροχής μάζας στα δίκτυα, μειώνουν την απαιτούμενη διάμετρο σωληνώσεων των δικτύων, μειώνουν τα φορτία ηλεκτρικής κατανάλωσης τους καλοκαιρινούς μήνες. Οικονομικά: Τυπικά κόστη αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μεταξύ 0,5-3 €/kW. Τεχνολογικά: Δεν παρατίθενται αναλυτικά σχόλια περί της τεχνολογικής διεύθυνσης (<i>παρατήρηση</i>: στην περίπτωση της θερμοχημικής απο-

Συγγραφέας (Χρονιά)	Θέμα	Τεχνολογίες	Συμπεράσματα
Lund et al. [95]	Διερεύνηση του ρόλου που θα διαδραματίζουν τα συστήματα τηλεθέρμανσης στα σύγχρονα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.	- Δίκτυα τηλεθέρμανσης - Αντλίες θερμότητας με εναλλακτική γεωθερμικού ρευστού - Αντλίες θερμότητας με εναλλακτική αέρα	θήκευσης, εκτός του πρώιμου ερευνητικού σταδίου του οποίου βρίσκονται, γίνεται αναφορά σε μη καταλληλότητα χρήσης τους για μακροπρόθεσμη αποθήκευση). Γενικά: Κεντρικός άξονας της βιωσιμότητας των δικτύων είναι η πηγή τροφοδότησής τους. Σε περιπτώσεις πηγών που εξαρτώνται είτε από ηλεκτρική ενέργεια είτε από ορυκτά, οι προβολές στα οικονομοτεχνικά σενάρια του 2040 και 2060, δεν οδηγούν σε βιώσιμα αποτελέσματα. Αν και δεν γίνεται ανάλυση επί τούτου, στο τέλος αναφέρεται η θετική συνεισφορά που θα είχε ηλιοθερμικό πεδίο μεγάλης κλίμακας. Οικονομικά: Ανάλογα το μείγμα ενέργειας, το LCoE κυμαίνεται μεταξύ 0,15 -270 €/kWh. Τεχνολογικά: Δεν παρατίθενται αναλυτικά σχόλια περί της τεχνολογικής διείσδυσης
Ban et al. [96]	Συνεισφορά της αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη.	- Αποθήκευση αισθητής ψύξης - Αποθήκευση λανθάνουσας ψύξης με εύηχτα αλατατούχα διαλύματα	Γενικά: Λόγω υψηλής διακύμανσης του φορτίου ψύξης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, οι διατάξεις παραγωγής της απαιτούμενης ενέργειας τείνουν να υπερδιαστασιολογούνται. Η χρήση αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας, ιδιαίτερα αν αυτές φορτίζονται το βράδυ, φαίνεται οικονομικά εφικτή. Στην μελέτη γίνεται χρήση συμβατικών ηλεκτρικών ψυκτών (συμπιεσμένου κύκλου ατμού) και ο σχεδιασμός υποθέτει σύστημα PV για την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων του συστήματος. Οικονομικά: Δεν δίνεται οικονομική αποτίμηση της προτεινόμενης διάταξης. Τεχνολογικά: Τα CTES μπορούν να προσαρτηθούν σε πληθώρα ενεργειακών λύσεων προσφέροντας ευελιξία και μείωση μέγιστων φορτίων ηλεκτρικής ενέργειας.
Huang et al. [97]	Προσέγγιση μεθόδων για σχεδιασμό ενεργειακών κοινοτήτων με χρήση εμπορικών λογισμικών προσομοίωσης.	- Λέβητες βιομάζας - Ψύκτες απορρόφησης θερμότητας	Γενικά: Αξιολογήθηκαν τα λογισμικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό ανανεώσιμων ενεργειακών κοινοτήτων (EnergyPlan, TRNSYS, H2RES, RETScreen, E-GIS, SUNtool, Homer, EAM, DER-CAM). Τα ευρήματα της μελέτης ήταν τα εξής:

Συγγραφέας (Χρονιά)	Θέμα	Τεχνολογίες	Συμπεράσματα
		Δίκτυα τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης	1) Η υψηλή αβεβαιότητα της κατανάλωσης, ειδικά θερμικής και ψυκτικής ενέργειας, αποτελεί εμπόδιο στον σχεδιασμό στα πρώιμα στάδια. 2) Δεν συνυπολογίζεται, παρά τη σημαντικότητά της, η χρήση γης, είτε για το κτιριακό, είτε για το σύστημα παραγωγής/αποθήκευσης/διανομής της ενέργειας. 3) Τα συνήθη λογισμικά, απαιτούν ένα προσχέδιο συστήματος πάνω στο οποίο θα βελτιστοποιήσουν τη διαδικασία. Είναι δύσκολο για τους σχεδιαστές να προεπιλέξουν ποιες τεχνολογίες θα χρησιμοποιήσουν στον σχεδιασμό, χωρίς να αποκλείσουν κάποια πιθανή λύση. 4) Πολλά από τα λογισμικά στοχεύουν στην εξισορρόπηση μεταξύ προσφοράς και ζήτησης της ενέργειας. Τα ευρήματα δείχνουν ότι μια λύση που πρώτα χρησιμοποιεί το διαθέσιμο πρωτογενές ενεργειακό δυναμικό της περιοχής, κατασκευάζει το σύστημα παραγωγής ενέργειας πάνω σε αυτό, μεταφέρει την ενέργεια αυτή και την αξιοποιεί στην κατανάλωση, είναι πιο δόκιμο. Οικονομικά: Δεν παρέχονται οικονομικές αποτιμήσεις των λύσεων. Τεχνολογικά: η εργασία δεν εμβαθύνει στις επιμέρους τεχνολογίες. Γενικά: Σενάρια ενσωμάτωσης δικτύων τηλεθέρμανσης μπορούν να μειώσουν περισσότερο από 50% την κατανάλωση πρωτογενούς (βάσει τελικής χρήσης) ενέργειας. Οικονομικά: 15% μικρότερο κόστος θερμικής ενέργειας με τη χρήση δικτύων.
Xiong et al. [98]	Η μελέτη επικεντρώνεται στην συνεισφορά που θα έχουν τα δίκτυα τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης στους ενεργειακούς στόχους της Κίνας μέχρι το 2030	Καμία ανανεώσιμη τεχνολογία	

Συγγραφέας (Χρονιά)	Θέμα	Τεχνολογίες	Συμπεράσματα
Moghaddam et al. [99]	Ολοκληρωμένο μοντέλο παροχής θερμικής, ψυκτικής και ηλεκτρικής ενέργειας σε ενεργειακά κέντρα ¹	- Ψύκτες απορρόφησης θερμότητας - Αποθήκευση θερμικής ενέργειας	Τεχνολογικά: Γίνεται χρήση συμβατικών μεθόδων και όχι ανανεώσιμων τεχνολογιών. Γενικά: ο συνδυασμός αρκετών φορέων παραγωγής ενέργειας προσφέρει ταυτόχρονα ευελιξία στην παραγωγή και πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό. Οικονομικά: Δεν υπάρχουν σαφή οικονομικά στοιχεία Τεχνολογικά: Δεν αναφέρονται τεχνολογικά ζητήματα του εξοπλισμού που συμμετέχουν.
Koohi-Fayegh et al. [100]	Αξιοποίηση θερμικής αποθήκευσης και η συνεισφορά της στην κάλυψη των αναγκών ενεργειακών κοινοτήτων.	- Θερμοχημική αποθήκευση - Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας - Αποθήκευση αισθητής θερμότητας	Γενικά: Ευνοϊκός είναι ο συνδυασμός μακροπρόθεσμης και βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε ενεργειακές κοινότητες. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα περί αυτού του συνδυασμού καθώς και του συνδυασμού τεχνολογιών λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας. Επίσης, το πεδίο που αφορά τις παραμέτρους ενσωμάτωσης τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε ενεργειακές κοινότητες, χρήζει ερευνητικού ενδιαφέροντος. Οικονομικά: Δεν γίνεται οικονομική αποτίμηση των τεχνολογιών και των σεναρίων που αναφέρονται. Τεχνολογικά: Εκτός από μικρές κλίμακας εφαρμογές, η εποχική αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας απαιτεί περαιτέρω ερευνητική προσπάθεια.
Vermette et al. [101]	Η εργασία επικεντρώνεται στο σχεδιασμό αυτόνομου ενεργειακού συστήματος που συνδυάζει φωτοβολταϊκό σύστημα, ηλιοθερμικούς συλλέκτες και υπόγεια αποθήκευση θερμικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών μιας κοινότητάς.	- Επίπεδοι ηλιοθερμικοί συλλέκτες - Υπόγεια αποθήκευση θερμικής ενέργειας	Γενικά: Ο συνδυασμός επίπεδων συλλεκτών και υπόγειας αποθήκευσης, βάσει των αποτελεσμάτων της μελέτης, οδηγεί σε υποσχόμενες λύσεις καθώς μειώνει την τελική κατανάλωση ενέργειας έως και 50%, σε περιπτώσεις πυκνοκατοικημένων περιοχών. Οικονομικά: Δεν γίνεται οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου μοντέλου.

¹ Ενεργειακά κέντρα (energy hubs): Αν και συγχέονται πλέον με τις ενεργειακές κοινότητες, εξ ορισμού είναι ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής, διαχείρισης και διανομής ενέργειας (θερμικής, ψυκτικής ή ηλεκτρικής) [99].

Συγγραφέας (Χρονιά)	Θέμα	Τεχνολογίες	Συμπεράσματα
Good et al. [102]	Διερεύνηση της επίδρασης ηλεκτρικής και θερμικής αποθήκευσης ενέργειας στην ευελιξία ενεργειακών κοινοτήτων.	Αποθήκευση αισθητής ενέργειας	Τεχνολογικά: Υποστηρίζεται ότι οι επίπεδοι και οι συγκεντρωτικοί συλλέκτες συνεργάζονται με την υπόγεια αποθήκευση με υψηλές αποδόσεις, χωρίς να προσφέρονται οι αντίστοιχες τιμές. Γενικά: Αν και η μελέτη επικεντρώνεται κυρίως γύρω από την τοπική ηλεκτρική ενέργεια, οι συγγραφείς επιχειρηματολογούν υπέρ της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (αισθητής θερμότητας στην προκειμένη), ως μέσο ευελιξίας σε πολυενεργειακά (multi-energy) συστήματα. Οικονομικά: Από τα σενάρια που εξετάστηκαν, το σενάριο που συμπεριλαμβάνει θερμική αποθήκευση είναι αυτό που προκαλεί και τη μεγαλύτερη χρηματοροή. Αυτό συμβαίνει, βάσει των συμπερασμάτων των συγγραφέων, εξαιτίας της διαθεσιμότητας ενέργειας σε ώρες αιχμής, όπου η ενέργεια από συμβατικά καύσιμα είναι σημαντικά ακριβότερη. Τεχνολογικά: Δεν δίνονται τεχνολογικά στοιχεία του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε.
Comodi et al. [103]	Συνδυασμός ενεργειακών πηγών σε ενεργειακές κοινότητες που βρίσκονται σε θερμά κλίματα, για μείωση των ρύπων CO ₂ .	- Αποθήκευση θερμικής ενέργειας - Αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας - Ψύκτες απορρόφησης θερμότητας - Δίκτυα τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης	Γενικά: Το καινοτόμο μοντέλο συνδυασμού των διαφορετικών ενεργειακών πηγών εξετάζεται υπό το πρίσμα ορισμένων σεναρίων. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη σημαντικότητα της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, ως δείκτη μείωσης τελικά των ρύπων CO₂. Οικονομικά: Η χρήση αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας διαφοροποιεί τη διαστασιολόγηση των ψυκτών, μειώνοντας το ολικό κόστος εγκατάστασης και αντισταθμίζοντας μερικώς το αυξημένο κόστος εγκατάστασης του δικτύου τηλεψύξης. Τεχνολογικά: Δεν δίνονται τεχνολογικά στοιχεία του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε.
Sebestyen et al. [104]	Διερευνάται η εγκαθίδρυση μικρο-αγοράς θερμικής ενέργειας (κοινότητα) που προέρχεται από λέβητα βιομάζας.	- Λέβητες βιομάζας - Ηλιοθερμικοί συλλέκτες - Αποθήκευση θερμικής ενέργειας	Γενικά: Η λειτουργία αγορών ενέργειας μικρης κλίμακας, εκτός από την πολύμελετημένη ηλεκτρική αγορά, έχει εφαρμογή και στη θερμική. Η χρήση αποθήκευσης και ενός ευέλικτου σχήματος παραγωγής που πε-

Συγγραφέας (Χρονιά)	Θέμα	Τεχνολογίες	Συμπεράσματα
Koirala et al. [105]	Εφαρμογή καινοτόμων συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και η κοινωνικό-τεχνική επίδρασή τους σε ενεργειακές κοινότητες	Αντλίες θερμότητας	ριλαμβάνει ανανεώσιμες τεχνολογίες, μπορεί να προσφέρει πλήρη κάλυψη των αναγκών. Απαιτείται βέλτιστη διαχείριση του φορτίου της επόμενης ημέρας και της τιμολόγησης βάσει παραγωγής. Οικονομικά: Η τιμή ανά μονάδα ενέργειας για τα τρία σενάρια κυμαίνεται μεταξύ 0,03 και 0,018 €/kWh (18% φθηνότερη από το υφιστάμενο σύστημα. Τεχνολογικά: Δεν δίνονται τεχνολογικά στοιχεία του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε..
		Υπόγειο δοχείο μακροπρόθεσμης αποθήκευσης θερμικής ενέργειας	Γενικά: Προκειμένου να γίνει εφικτή η ενεργειακή μετάβαση και να καθιερωθούν οι ενεργειακές κοινότητες στον νέο αυτό ενεργειακό χάρτη, επιβάλλεται η ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Οικονομικά: η προτεινόμενη μπαταρία της Ecovat, λόγω της εξεζητημένης εγκατάστασης και των υλικών που χρησιμοποιούνται είναι ανέφικτη οικονομικά για κοινότητες (κόστος εγκατάστασης μεγάλης κλίμακας >3,5 εκατ. €). Τεχνολογικά: Η χρήση θαλασσινού νερού στην περίπτωση της μπαταρίας της DrTen, δημιούργησε προβλήματα στον σχεδιασμό αλλά και τη λειτουργία της.
Saloux et al. [106]	Ανάπτυξη στρατηγικής πρόβλεψης για την κάλυψη των αναγκών κοινότητας, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας.	- Επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες - Λέβητας βιομάζας - Αποθήκευση θερμικής ενέργειας υπογείως - Δίκτυο τηλεθέρμανσης	Γενικά: Η χρήση εποχικής αποθήκευσης μειώνει την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας όταν συνδυάζεται με δίκτυο τηλεθέρμανσης. Με κατάλληλο έλεγχο του συστήματος, οι ιδιοκαταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να μειωθούν πάνω από 40%. Μείωση παρατηρήθηκε από τους συγγραφείς και στους ρύπους, της τάξεως του 32%. Οικονομικά: Το κόστος ενέργειας μειώθηκε πάνω από 35%. Τεχνολογικά: Με τη μείωση της ταχύτητας των αντλιών που κυκλοφορούν το ηλιακό ρευστό, μπορεί να σημειωθούν υψηλότερες αποδόσεις ενέργειας. Κατά τους χειμερινούς μήνες, η ταχύτητα περιστροφής των αντλιών που εξυπηρετούν του φορτίο (από την υπόγεια αποθήκευση

Συγγραφέας (Χρονιά)	Θέμα	Τεχνολογίες	Συμπεράσματα
Acheillas et al. [107]	Προσπάθεια δημιουργίας εργαλείου στήριξης αποφάσεων για τον σχεδιασμό συστήματος τηλεθέρμανσης για την κάλυψη αναγκών κοινοτήτων.	- Δίκτυο τηλεθέρμανσης - Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας	προς τις κατοικίες), ρυθμίζεται σε υψηλότερες παροχές προκειμένου να αποφορτίζει γρηγορότερα η αποθήκευση. Γενικά: Η μελέτη επικεντρώνεται στην κατασκευή ενός ενιαίου σχεδίου δημιουργίας ενός τεχνικά, οικονομικά και κοινωνικά εφικτού συστήματος κάλυψης θερμικών αναγκών στην Ολλανδία. Για το σχέδιο αυτό, οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι δεν υπάρχει ένα καθολικό εργαλείο δημιουργίας τέτοιων συστημάτων καθώς διαφέρει η κάθε περίπτωση και το δυναμικό της κάθε περιοχής. Απαιτείται ο συνδυασμός εμπειρικών και θεωρητικών προσεγγίσεων προκειμένου να προσεγγιστεί ολιστικά το μοντέλο. Οικονομικά: Δεν αποδίδονται οικονομικά στοιχεία του συστήματος που προτείνεται. Τεχνολογικά: Σε περίπτωση επιλογής δικτύου υψηλών θερμοκρασιών (>75 °C), είναι δύσκολη η προσάρτηση ανανεώσιμων πηγών στο δίκτυο, ενώ υπάρχουν μεγάλα ποσά ανεκμετάλλευτης θερμότητας. Στην περίπτωση δικτύου χαμηλών θερμοκρασιών (<55 °C), απαιτείται επιπλέον υποστηρικτικό σύστημα λεβήτων βιομάζας για να ανορθώνει τη θερμοκρασία σε περιπτώσεις πλήρους φορτίου.
Dominkovic et al. [108]	Σύγκριση μεταξύ τηλεψύξης και ατομικών ψυκτικών διατάξεων σε ενεργειακές κοινότητες	- Αποθήκευση θερμικής ενέργειας - Αποθήκευση ψυκτικής - Ηλιοθερμικοί συλλέκτες - Ψύκτες απορρόφησης	Γενικά: Προκειμένου να είναι κοινωνικό-οικονομικά βιώσιμο σύστημα τηλεψύξης, για τη μελέτη περίπτωσης της Σιγκαπούρης, πρέπει να καλύπτει ποσοστό άνω του 30% του συνολικού ψυκτικού φορτίου. Η προσθήκη εποχικής αποθήκευσης αυξάνει περαιτέρω τη βιωσιμότητα του συστήματος. Οικονομικά: Το σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής (τηλεψύξη) κοστολογήθηκε για το επιλεγθέν ποσοστό κάλυψης (30%) κοντά στα 2,5 εκατ. €. Τα λειτουργικά κόστη ήταν αυξημένα, ~5 εκατ. €. Η διαφορά κόστους μεταξύ σεναρίου με αποθήκευση και σεναρίου χωρίς αποθήκευση είχε διαφορά μόλις 4,1%.

Συγγραφέας (Χρονιά)	Θέμα	Τεχνολογίες	Συμπεράσματα
Evvin et al. [109]	Σχεδιασμός καινοτόμου συστήματος παραγωγής ενέργειας για εφαρμογή σε βιώσιμη κοινότητα μηδενικής ενέργειας (zero energy community-ZEC).	- Αποθήκευση θερμικής ενέργειας - Ηλιοθερμικοί συλλέκτες - Ψύκτες απορρόφησης θερμότητας - Γεωθερμική αντλία θερμότητας	Τεχνολογικά: Η αποθήκευση σε υπόγειους υδροφορείς, μειώνει αρκετά τα κόστη λειτουργίας και αποδίδει συγκριτικά υψηλότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες επιλογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Γενικά: Το προτεινόμενο σύστημα αποτελεί μία άκρως λειτουργική ενεργειακή λύση καθώς καλύπτει το 100% των αναγκών της κοινότητας από ανανεώσιμες πηγές. Σημαντική σημείωση για τη μετάβαση σε ZECs είναι η αλλαγή της φιλοσοφίας των καταναλωτών προς μία τάση εξοικονόμησης ενέργειας. Το παρόν σύστημα έχει ενεργειακή απόδοση 62,5% ενώ εξεργειακή 47,3%. Απαιτείται περαιτέρω τεχνοοικονομική ανάλυση. Οικονομικά: Δεν αποδίδονται οικονομικά στοιχεία για το προτεινόμενο σύστημα. Τεχνολογικά: Οι εκτονωτικές διατάξεις στα συστήματα αυτά είναι σημαντικοί παράγοντες μείωσης της ενεργειακής απόδοσης λόγω του χαμηλού συντ. απόδοσής τους. Σε ότι αφορά τον ψύκτη απορρόφησης, είναι από τα κατεχόν μηχάνημα καταστροφής εξέργειας, με τον συμπιεστή να είναι ο φορέας της μεγαλύτερης καταστροφής. Με την αύξηση της ροής μάζας στο σύστημα αυτό όμως, αυξάνεται η απόδοσή τους. Άλλοι φορείς καταστροφής εξέργειας με σημαντικά ποσοστά είναι οι εναλλάκτες θερμότητας και η διάταξη του λέβητα βιομάζας. Γενικά: Η οικιακή ψύξη αποτελεί το 25-30% της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης ενέργειας, με αυξητική τάση την ερχόμενη δεκαετία. Πληθώρα εφαρμογών, ερευνητικών και εμπορικών, μπορεί να συντελέσει στην ενεργειακή μετάβαση του κλάδου θέρμανσης/ψύξης. Τα πρακτικότερα βάσει εμπορικής διείσδυσης υλικά είναι τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, καθώς τα υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας βρίσκονται ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης.
Yang et al. [110]	Σύνοψη τεχνολογιών αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας σε θερμοκρασίες υπό τους 0 °C. Υλικά, εφαρμογές και εξελίξεις για τις ενεργειακές κοινότητες.	Αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας με υλικά αλλαγής φάσης	

Συγγραφέας (Χρονιά)	Θέμα	Τεχνολογίες	Συμπεράσματα
			Οικονομικά: Συγκριτικά, τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι οικονομικότερα αυτών της λανθάνουσας πρακτικά σε όλο το φάσμα τους. Τεχνολογικά: Εκτενής ανασκόπηση των τεχνικών χαρακτηριστικών των υλικών λανθάνουσας και αισθητής αποθήκευσης θερμότητας για ψυκτικές εφαρμογές.

Έτσι διαμορφώνεται το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα αλλά και τα ερευνητικά υποερωτήματα όπως αυτά παρατέθηκαν στην Εισαγωγή, τα οποία διαρθρώθηκαν εν πολλοίς βάσει των στοιχείων που ανέκυψαν από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στις παραπάνω ενότητες αλλά και τον Πίνακα 2. 7. Το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα είναι:

«Πώς επιδρούν οι διαφορετικές τεχνολογίες κάλυψης θερμικής ενέργειας στη ενεργειακή μετάβαση και πώς μεταβάλλουν τη βιωσιμότητα των τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων (LECs);»

Ενώ τα ερευνητικά υποερωτήματα που το πλαισιώνουν και προσεγγίζονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή είναι:

Ερευνητικό υποερώτημα 1 (EY1): Πώς ορίζεται το ενεργειακό προφίλ των χρηστών θερμικής ενέργειας, ποια είναι τα εξυπηρετούμενα φορτία και ποιες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψή τους;

Ερευνητικό υποερώτημα 2 (EY2): Ποιες είναι οι κυριότερες τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής, σε ποιο στάδιο βρίσκονται και ποιες είναι οι δυνατότητες ενσωμάτωσής τους στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη;

Ερευνητικό υποερώτημα 3 (EY3): Πώς μπορεί να σχεδιαστεί μια ΕΚ, ποια είναι τα διαθέσιμα εργαλεία σχεδιασμού, πώς μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους οι θερμικές ΕΚ;

Ερευνητικό υποερώτημα 4 (EY4): Πώς μπορεί να γίνει βιώσιμη μια θερμική ΕΚ, ποιοι είναι οι δείκτες που επιδρούν στη βιωσιμότητα και πώς η χρήση αποθήκευσης ενέργειας επιδρά στη βιωσιμότητα των ΕΚ;

Τα κύρια συμπεράσματα του Πίνακα 2. 7 και τα ερευνητικά υποερωτήματα που διαμόρφωσαν είναι:

- Η θερμική και ψυκτική ενέργεια είναι μείζονος σημασίας για την ενεργειακή μετάβαση των ΕΚ [43,44,95,97,99,102,105,107,109] – EY1, EY4.
- Οι υφιστάμενες τεχνολογίες καύσης ορυκτών πόρων είναι οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά μη βιώσιμες [95,99,100,102,105,107] – EY1, EY4.
- Τα δίκτυα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης είναι απαραίτητα για την ενεργειακή μετάβαση καθώς αποδεδειγμένα μειώνουν την τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστά άνω του 15% [74,95,96,98,108,109] – EY2, EY3.
- Η αποθήκευση θερμικής και ψυκτικής ενέργειας σε συνδυασμό με τα δίκτυα τηλεψύξης αυξάνουν τη βιωσιμότητα και ενεργειακή αυτονομία των ΕΚ [94,96,100,105,107,109] – EY2, EY3, EY4.

Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν την ανάγκη για τοπική μετάβαση του ενεργειακού χάρτη θερμικής και ψυκτικής ενέργειας με τη χρήση τόσο μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης, όσο και με την ενσωμάτωση δικτύων τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών αναγκών. Βάσει των κατευθύνσεων αυτών καθορίστηκε ο κεντρικός άξονας έρευνας της θεματικής της παρούσας διδακτορικής διατριβής που είναι «Ανάλυση λειτουργίας συστήματος με αποθήκευση θερμικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας και αξιολόγηση της επίδρασής του στη βιωσιμότητα μιας τοπικής ενεργειακής κοινότητας».

Σύνοψη

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί την βιβλιογραφική ανασκόπηση της διδακτορικής διατριβής. Ο σκοπός του είναι η διερεύνηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας στον τομέα της θερμικής και ψυκτικής ενέργειας που παράγεται, αποθηκεύεται, διανέμεται και χρησιμοποιείται με ποικίλους τρόπους από τοπικούς συνασπισμούς, που είναι οι ΕΚ. Τα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω σημεία:

1. Η σημασία της θερμικής και ψυκτικής ενέργειας στον ενεργειακό χάρτη είναι μείζονος σημασίας.

2. Ο γηράσκων πληθυσμός όπως και η διαρκώς αυξανόμενη αστικοποίηση οδηγεί σε ένταση φαινομένων αύξησης τελικής κατανάλωσης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας.
3. Η συνεισφορά των πολιτών ως παραγωγαναλωτές κρίνεται ύψιστης σημασίας για την επιτυχή έκβαση της ενεργειακής μετάβασης.
4. Η δημιουργία τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων, όπου οι πολίτες μπορούν να παράγουν, αποθηκεύουν και διανέμουν την ενέργεια τους (παραγωγαναλωτές), είτε μεταξύ τους είτε με το κεντρικό δίκτυο, θεσμοθετείται πανευρωπαϊκά.
5. Φαινόμενα κρίσεων (οικονομικών, διακρατικών κ.α.) εντείνουν το πρόβλημα της ενεργειακής κρίσης, καθώς ο υφιστάμενος ενεργειακός χάρτης είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τα ορυκτά καύσιμα.
6. Η πρόοδος των δικτύων τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης, ιδιαίτερα στην σύγχρονη 4^η γενιά, τα καθιστά πρωταγωνιστές στην ενεργειακή μετάβαση προς ένα περισσότερο βιώσιμο δομημένο περιβάλλον.
7. Ο συνδυασμός δικτύων τηλεθέρμανσης με αποθήκευση και τοπική ιδιοπαραγωγή θερμικής και ψυκτικής ενέργειας δημιουργούν ένα μικροκλίμα αγοράς, στο οποίο παραγωγαναλωτές μπορούν να συμμετέχουν αμφίδρομα στον ενεργειακό χάρτη.
8. Αν και πολλές τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής/ψυκτικής ενέργειας βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης, τα οικονομικά στοιχεία εκτενών ερευνητικών μελετών καταδεικνύουν τη συνεισφορά αισθητής αποθήκευσης θερμότητας ως την πλέον βιώσιμη για τοπικές ενεργειακές κοινότητες.
9. Η διαλειτουργία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εξισορροπείται με τη χρήση αποθήκευσης, βελτιώνοντας τους χρόνους απόσβεσης αλλά και τα κέρδη των τοπικών κοινοτήτων.
10. Ανάλογα με την εφαρμογή, το μέγεθος και το φορτίο, πολλές τεχνολογίες ανανεώσιμης παραγωγής θερμικής και ψυκτικής ενέργειας βρίσκονται σε ώριμο στάδιο και έχουν εισχωρήσει στην αγορά ενέργειας.

Ήδη από τη μελέτη και θεσμοθέτηση των ηλεκτρικών τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων έγινε προφανής η πολυπλοκότητα σχεδιασμού και ενσωμάτωσης αυτών των θεσμών (ΕΚ) στον δυσκίνητο ενεργειακό χάρτη. Προκειμένου να αρθεί μέρος αυτής της πολυπλοκότητας και με γνώμονα την ταχύτερη θεσμοθέτηση και ενσωμάτωση των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, η παρούσα διδακτορική διατριβή φιλοδοξεί στην παρουσίαση ενός συστηματικού, ολιστικού και ενιαίου μαθηματικού μοντέλου, που διευκολύνει το σχεδιασμό των κοινοτήτων αυτών. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα πραγματοποιηθεί η βιβλιομετρική ανάλυση των συμπερασμάτων και θα γίνει επισκοπικός έλεγχος άνω των 20.000 ερευνητικών εργασιών, με μέρος αυτών να είναι οι εργασίες που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 2. 7.

Βιβλιογραφία

1. - International Energy Agency, I. *A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas*; 2022;
2. Bott, C.; Dressel, I.; Bayer, P. State-of-Technology Review of Water-Based Closed Seasonal Thermal Energy Storage Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2019**, *113*, 109241, doi:10.1016/J.RSER.2019.06.048.
3. Moroni; Antoniucci; Bisello Local Energy Communities and Distributed Generation: Contrasting Perspectives, and Inevitable Policy Trade-Offs, beyond the Apparent Global Consensus. *Sustainability* **2019**, *11*, 3493, doi:10.3390/su11123493.

4. Lezama, F.; Soares, J.; Hernandez-Leal, P.; Kaisers, M.; Pinto, T.; Vale, Z. Local Energy Markets: Paving the Path Toward Fully Transactive Energy Systems. *IEEE Transactions on Power Systems* **2019**, *34*, 4081–4088, doi:10.1109/TPWRS.2018.2833959.
5. Akorede, M.F.; Hizam, H.; Pouresmaeil, E. Distributed Energy Resources and Benefits to the Environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2010**, *14*, 724–734, doi:10.1016/J.RSER.2009.10.025.
6. de Pascali, P.; Bagaini, A. Energy Transition and Urban Planning for Local Development. A Critical Review of the Evolution of Integrated Spatial and Energy Planning. *Energies (Basel)* **2019**, *12*, doi:10.3390/en12010035.
7. Olivella-Rosell, P.; Lloret-Gallego, P.; Munné-Collado, Í.; Villafafila-Robles, R.; Sumper, A.; Ottessen, S.Ø.; Rajasekharan, J.; Bremdal, B.A. Local Flexibility Market Design for Aggregators Providing Multiple Flexibility Services at Distribution Network Level. *Energies (Basel)* **2018**, *11*, doi:10.3390/en11040822.
8. Arentsen, M.; Bellekom, S. Power to the People: Local Energy Initiatives as Seedbeds of Innovation? *Energy Sustain Soc* **2014**, *4*, doi:10.1186/2192-0567-4-2.
9. Energy Communities in the Clean Energy Package: Best Practices and Recommendations for Implementation., doi:10.2833/51076.
10. Olivella-Rosell, P.; Torbaghan, S.S.; Gibescu, M. *Coupled Local Power Markets*; 2019; ISBN 9781119434573.
11. Azarova, V.; Cohen, J.; Friedl, C.; Reichl, J. Designing Local Renewable Energy Communities to Increase Social Acceptance: Evidence from a Choice Experiment in Austria, Germany, Italy, and Switzerland. *Energy Policy* **2019**, *132*, 1176–1183, doi:10.1016/j.enpol.2019.06.067.
12. Comodi, G.; Bartolini, A.; Carducci, F.; Nagarajan, B.; Romagnoli, A. Achieving Low Carbon Local Energy Communities in Hot Climates by Exploiting Networks Synergies in Multi Energy Systems. *Appl Energy* **2019**, *256*, doi:10.1016/j.apenergy.2019.113901.
13. Perger, T. Fair Energy Sharing in Local Communities: Dynamic Participation of Prosumers. In Proceedings of the International Conference on the European Energy Market, EEM; 2020; Vol. 2020-Septe.
14. Sanduleac, M.; Ciornei, I.; Albu, M.; Toma, L.; Sturzeanu, M.; Martins, J.F. Resilient Prosumer Scenario in a Changing Regulatory Environment - The UniRCon Solution. *Energies (Basel)* **2017**, *10*, doi:10.3390/en10121941.
15. Colombo, G.; Ferrero, F.; Pirani, G.; Vesco, A. Planning Local Energy Communities to Develop Low Carbon Urban and Suburban Areas. In Proceedings of the ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference; 2014; pp. 1012–1018.
16. de La Nieta, A.A.S.; Gibescu, M.; Wang, X.; Song, M.; Jensen, E.; Saleem, A.; Bremdal, B.; Ilieva, I. Local Economic Dispatch with Local Renewable Generation and Flexible Load Management. In Proceedings of the 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, SEST 2018 - Proceedings; 2018.
17. Bellekom, S.; Arentsen, M.; van Gorkum, K. Prosumption and the Distribution and Supply of Electricity. *Energy Sustain Soc* **2016**, *6*, doi:10.1186/s13705-016-0087-7.
18. Mutani, G.; Todeschi, V.; Tartaglia, A.; Nuvoli, G. Energy Communities in Piedmont Region (IT). the Case Study in Pinerolo Territory. In Proceedings of the INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings); 2019; Vol. 2018-Octob.
19. Shrestha, A.; Bishwokarma, R.; Chapagain, A.; Banjara, S.; Aryal, S.; Mali, B.; Thapa, R.; Bista, D.; Hayes, B.P.; Papadakis, A.; et al. Peer-to-Peer Energy Trading in Micro/Mini-Grids for Local Energy Communities:

- A Review and Case Study of Nepal. *IEEE Access* **2019**, 7, 131911–131928, doi:10.1109/ACCESS.2019.2940751.
20. Ghiani, E.; Giordano, A.; Nieddu, A.; Rosetti, L.; Pilo, F. Planning of a Smart Local Energy Community: The Case of Berchidda Municipality (Italy). *Energies (Basel)* **2019**, 12, doi:10.3390/en12244629.
 21. Evrin, R.A.; Dincer, I. *A Novel Multigeneration Energy System for a Sustainable Community*; 2020; ISBN 9783030206369.
 22. Dominković, D.F.; Krajačić, G. District Cooling versus Individual Cooling in Urban Energy Systems: The Impact of District Energy Share in Cities on the Optimal Storage Sizing. *Energies (Basel)* **2019**, 12, doi:10.3390/en12030407.
 23. Foiadelli, F.; Nocerino, S.; di Somma, M.; Graditi, G. Optimal Design of DER for Economic/Environmental Sustainability of Local Energy Communities. In Proceedings of the Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2018; 2018.
 24. Plaza, C.; Gil, J.; de Chezelles, F.; Strang, K.A. Distributed Solar Self-Consumption and Blockchain Solar Energy Exchanges on the Public Grid Within an Energy Community. In Proceedings of the Proceedings - 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2018; 2018.
 25. Lynch, P.; Power, J.; Hickey, R.; Kelly, D.; Messervey, T.; Espeche, J.M.; Oualmakran, Y. Maximising Value for Local Flexibility Management in Low Voltage Distribution Networks. In Proceedings of the IEEE 2nd International Smart Cities Conference: Improving the Citizens Quality of Life, ISC2 2016 - Proceedings; 2016.
 26. Toma, A.R.; Valentin Olteanu, M.; Gheorghe, C.M.; Dumitrescu, A.-M. Electric Energy Consumption Behavior of University Students. In Proceedings of the 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE 2019; 2019.
 27. Invernizzi, G.; Vielmini, G. Challenges in Microgrid Control Systems Design. An Application Case. In Proceedings of the 2018 110th AEIT International Annual Conference, AEIT 2018; 2018.
 28. van Aubel, P.; Poll, E. Smart Metering in the Netherlands: What, How, and Why. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* **2019**, 109, 719–725, doi:10.1016/j.ijepes.2019.01.001.
 29. Alavijeh, N.M.; Alemany Benayas, C.; Steen, D.; Le, A.T. Impact of Internal Energy Exchange Cost on Integrated Community Energy Systems. In Proceedings of the iSPEC 2019 - 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference: Grid Modernization for Energy Revolution, Proceedings; 2019; pp. 2138–2143.
 30. Denysiuk, R.; Lilliu, F.; Vinyals, M.; Recupero, D.R. Multiagent System for Community Energy Management. In Proceedings of the ICAART 2020 - Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence; 2020; Vol. 1, pp. 28–39.
 31. Schwarz, S.; Flamme, H.; Gurses-Tran, G.; Cupelli, M.; Monti, A. Agent-Based Power Scheduling Framework for Interconnected Local Energy Communities Incorporating DSO Objectives. In Proceedings of the IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference); 2019; Vol. 2019-Octob, pp. 6642–6648.
 32. Denysiuk, R.; Lilliu, F.; Recupero, D.R.; Vinyals, M. Peer-to-Peer Energy Trading for Smart Energy Communities. In Proceedings of the ICAART 2020 - Proceedings of the 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence; 2020; Vol. 1, pp. 40–49.

33. Hayes, B.P.; Thakur, S.; Breslin, J.G. Co-Simulation of Electricity Distribution Networks and Peer to Peer Energy Trading Platforms. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* **2020**, *115*, doi:10.1016/j.ijepes.2019.105419.
34. Pinto, R.; Bessa, R.J.; Sumaili, J.; Matos, M.A. Distributed Multi-Period Three-Phase Optimal Power Flow Using Temporal Neighbors. *Electric Power Systems Research* **2020**, *182*, doi:10.1016/j.epsr.2020.106228.
35. Gambini, M.M.; Orozco, C.; Borghetti, A.; Tossani, F. Power Loss Reduction in the Energy Resource Scheduling of a Local Energy Community. In Proceedings of the SEST 2020 - 3rd International Conference on Smart Energy Systems and Technologies; 2020.
36. Hobert, A.; Schroeder, H.; Uhlemeyer, B.; Zdrallek, M.; Aschenbrenner, D.; Biesnebach, P.; Seeger, L. Power to Heat as Flexibility Option in Low Voltage Grids from Urban Districts. In Proceedings of the SEST 2020 - 3rd International Conference on Smart Energy Systems and Technologies; 2020.
37. Faia, R.; Soares, J.; Pinto, T.; Lezama, F.; Vale, Z.; Corchado, J.M. Optimal Model for Local Energy Community Scheduling Considering Peer to Peer Electricity Transactions. *IEEE Access* **2021**, *9*, 12420–12430, doi:10.1109/ACCESS.2021.3051004.
38. Vespermann, N.; Hamacher, T.; Kazempour, J. Access Economy for Storage in Energy Communities. *IEEE Trans Smart Grid* **2021**, doi:10.1109/TPWRS.2020.3033999.
39. Bartolini, A.; Carducci, F.; Muñoz, C.B.; Comodi, G. Energy Storage and Multi Energy Systems in Local Energy Communities with High Renewable Energy Penetration. *Renew Energy* **2020**, *159*, 595–609, doi:10.1016/j.renene.2020.05.131.
40. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Katsavounis, S. Thermal/Cooling Energy on Local Energy Communities: A Critical Review. *Energies (Basel)* **2022**, *15*.
41. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Katsavounis, S. Improved Structural Local Thermal Energy Planning Based on Prosumer Profile: Part A. *Applied Sciences* **2022**, *12*, 5355, doi:10.3390/app12115355.
42. Botsaris, P.N.; Giourka, P.; Papatsounis, A.; Dimitriadou, P.; Goitia-Zabaleta, N.; Patsonakis, C. Developing a Business Case for a Renewable Energy Community in a Public Housing Settlement in Greece—the Case of a Student Housing and Its Challenges, Prospects and Barriers. *Sustainability (Switzerland)* **2021**, *13*, doi:10.3390/su13073792.
43. Fouladvand, J.; Mouter, N.; Ghorbani, A.; Herder, P. Formation and Continuation of Thermal Energy Community Systems: An Explorative Agent-Based Model for the Netherlands. *Energies (Basel)* **2020**, *13*, doi:10.3390/en13112829.
44. Fouladvand, J.; Aranguren Rojas, M.; Hoppe, T.; Ghorbani, A. Simulating Thermal Energy Community Formation: Institutional Enablers Outplaying Technological Choice. *Appl Energy* **2022**, *306*, 117897, doi:10.1016/J.APENERGY.2021.117897.
45. Droutsas, K.G.; Kontoyiannidis, S.; Dascalaki, E.G.; Balaras, C.A. Mapping the Energy Performance of Hellenic Residential Buildings from EPC (Energy Performance Certificate) Data. *Energy* **2016**, *98*, 284–295, doi:10.1016/j.energy.2015.12.137.
46. Cao, X.; Dai, X.; Liu, J. Building Energy-Consumption Status Worldwide and the State-of-the-Art Technologies for Zero-Energy Buildings during the Past Decade. *Energy Build* **2016**, *128*, 198–213, doi:10.1016/J.ENBUILD.2016.06.089.
47. Rae, C.; Bradley, F. Energy Autonomy in Sustainable Communities—A Review of Key Issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2012**, *16*, 6497–6506, doi:10.1016/J.RSER.2012.08.002.

48. Lund, H.; Werner, S.; Wiltshire, R.; Svendsen, S.; Thorsen, J.E.; Hvelplund, F.; Mathiesen, B.V. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating Smart Thermal Grids into Future Sustainable Energy Systems. *Energy* **2014**, *68*, 1–11, doi:10.1016/J.ENERGY.2014.02.089.
49. Werner, S. International Review of District Heating and Cooling. *Energy* **2017**, *137*, 617–631, doi:10.1016/J.ENERGY.2017.04.045.
50. Serrano, S.; Ürge-Vorsatz, D.; Barreneche, C.; Palacios, A.; Cabeza, L.F. Heating and Cooling Energy Trends and Drivers in Europe. *Energy* **2017**, *119*, 425–434, doi:10.1016/J.ENERGY.2016.12.080.
51. Kallert, A.; Schmidt, D.; Bläse, T. Exergy-Based Analysis of Renewable Multi-Generation Units for Small Scale Low Temperature District Heating Supply. *Energy Procedia* **2017**, *116*, 13–25.
52. Åberg, M.; Fälting, L.; Forssell, A. Is Swedish District Heating Operating on an Integrated Market? - Differences in Pricing, Price Convergence, and Marketing Strategy between Public and Private District Heating Companies. *Energy Policy* **2016**, *90*, 222–232.
53. Bennetts, H.; Martins, L.A.; van Hoof, J.; Soebarto, V. Thermal Personalities of Older People in South Australia: A Personas-Based Approach to Develop Thermal Comfort Guidelines. *Int J Environ Res Public Health* **2020**, *17*, 1–22, doi:10.3390/ijerph17228402.
54. Forcada, N.; Gangoellis, M.; Casals, M.; Tejedor, B.; Macarulla, M.; Gaspar, K. Summer Thermal Comfort in Nursing Homes in the Mediterranean Climate. *Energy Build* **2020**, *229*, doi:10.1016/j.enbuild.2020.110442.
55. Waldock, K.A.M.; Hayes, M.; Watt, P.W.; Maxwell, N.S. The Elderly's Physiological and Perceptual Responses to Cooling during Simulated Activities of Daily Living in UK Summer Climatic Conditions. *Public Health* **2021**, *193*, 1–9, doi:10.1016/j.puhe.2021.01.016.
56. Ma, X.; Tian, Y.; Du, M.; Hong, B.; Lin, B. How to Design Comfortable Open Spaces for the Elderly? Implications of Their Thermal Perceptions in an Urban Park. *Science of the Total Environment* **2021**, *768*, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.144985.
57. Voll, P.; Klaffke, C.; Hennen, M.; Bardow, A. Automated Superstructure-Based Synthesis and Optimization of Distributed Energy Supply Systems. *Energy* **2013**, *50*, 374–388, doi:10.1016/j.energy.2012.10.045.
58. Bob Ramlow; Benjamin Nusz *Solar Water Heating: A Comprehensive Guide to Solar Water and Space Heating Systems*; Gabriola Island, Canada, 2010; ISBN 978-0-86571-668-1.
59. Calise, F.; Dentice d'Accadia, M.; Vanoli, R.; Vicidomini, M. Transient Analysis of Solar Polygeneration Systems Including Seawater Desalination: A Comparison between Linear Fresnel and Evacuated Solar Collectors. *Energy* **2019**, *172*, 647–660, doi:10.1016/j.energy.2019.02.001.
60. Wang, J.; Yan, R.; Wang, Z.; Zhang, X.; Shi, G. Thermal Performance Analysis of an Absorption Cooling System Based on Parabolic Trough Solar Collectors. *Energies (Basel)* **2018**, *11*, doi:10.3390/en1102679.
61. Andrew D. Chiasson *GEOTHERMAL HEAT PUMP AND HEAT ENGINE SYSTEMS: Theory and Practice*; West Sussex, United Kingdom, 2016; ISBN 9781118961971.
62. Spitler, J.D.; Mitchell, M.S. Surface Water Heat Pump Systems. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems* **2016**, 225–246, doi:10.1016/B978-0-08-100311-4.00008-X.
63. Zou, S.; Xie, X. Simplified Model for Coefficient of Performance Calculation of Surface Water Source Heat Pump. *Appl Therm Eng* **2017**, *112*, 201–207, doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.10.081.
64. Spitler, J.D.; Mitchell, M.S. Surface Water Heat Pump Systems. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems* **2016**, 226–246, doi:10.1016/B978-0-08-100311-4.00008-X.

65. Chen, X.; Zhang, G.; Peng, J.; Lin, X.; Liu, T. The Performance of an Open-Loop Lake Water Heat Pump System in South China. *Appl Therm Eng* **2006**, *26*, 2255–2261, doi:10.1016/J.AP-PLTHERMALENG.2006.03.009.
66. Mitchell, M.S.; Spitler, J.D. Open-Loop Direct Surface Water Cooling and Surface Water Heat Pump Systems-A Review. *HVAC and R Research* **2013**, *19*, 125–140, doi:10.1080/10789669.2012.747374.
67. Gaudard, A.; Wüest, A.; Schmid, M. Using Lakes and Rivers for Extraction and Disposal of Heat: Estimate of Regional Potentials. *Renew Energy* **2019**, *134*, 330–342, doi:10.1016/J.RENENE.2018.10.095.
68. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Lymperopoulos, K.A.; Rotas, R.; Kanellia, Z.; Iliadis, P.; Nikolopoulos, N. Operation Assessment of a Hybrid Solar-Biomass Energy System with Absorption Refrigeration Scenarios. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* **2022**, *44*, 700–717, doi:10.1080/15567036.2022.2049929.
69. Kirk J. Callum Biomass Boiler Systems for LTHW and DHW. Renewable Energy Systems and Environment, University of Strathclyde, 2011.
70. Zheng, Y.; Jenkins, B.M.; Kornbluth, K.; Træholt, C. Optimization under Uncertainty of a Biomass-Integrated Renewable Energy Microgrid with Energy Storage. *Renew Energy* **2018**, *123*, 204–217, doi:10.1016/j.renene.2018.01.120.
71. Viggiano, F.; Panepinto, D.; Genon, G. Energy from Biomass: A Contribution to GHG Limitation and Sustainability of the Local Impact Aspect. *WIT Transactions on Ecology and the Environment* **2014**, *190 VOLUME*, 1023–1034, doi:10.2495/EQ140962.
72. Volkova, A.; Hlebnikov, A.; Siirde, A. Defining of Eligible Capacity for Biomass Cogeneration Plants in Small Towns in Estonia. *Renewable Energy and Power Quality Journal* **2010**, *1*, 714–718, doi:10.24084/repqj08.447.
73. Frederiksen, Svend.; Werner, Sven. District Heating and Cooling. **2013**.
74. Lund, H.; Werner, S.; Wiltshire, R.; Svendsen, S.; Thorsen, J.E.; Hvelplund, F.; Mathiesen, B.V. 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating Smart Thermal Grids into Future Sustainable Energy Systems. *Energy* **2014**, *68*, 1–11.
75. Calise, F.; Cappiello, F.L.; Dentice d'Accadia, M.; Petrakopoulou, F.; Vicidomini, M. A Solar-Driven 5th Generation District Heating and Cooling Network with Ground-Source Heat Pumps: A Thermo-Economic Analysis. *Sustain Cities Soc* **2022**, *76*, 103438, doi:10.1016/J.SCS.2021.103438.
76. David Borge-Díez, A.C.-S.; Rosales-Asensio, E. *District Heating and Cooling Networks in the European Union*; 1st ed.; Springer: Leon, Spain, 2017; ISBN 978-3-319-57951-1.
77. Sartor, K.; Dewalef, P. Experimental Validation of Heat Transport Modelling in District Heating Networks. *Energy* **2017**, *137*, 961–968.
78. Rutz, D.; Pauschinger, T.; Dyer, G.; Østergaard, T.A.; Hummelshøj, R.; Janssen, R.; Mergner, R.; Khawaja, C.; Kazagic, A.; Winterscheid, C.; et al. Upgrading the Performance of District Heating Networks. **2018**.
79. Lund, H.; Möller, B.; Mathiesen, B. v.; Dyrelund, A. The Role of District Heating in Future Renewable Energy Systems. *Energy* **2010**, *35*, 1381–1390, doi:10.1016/J.ENERGY.2009.11.023.
80. Rathgeber, C.; Lävemann, E.; Hauer, A. Economic Top-down Evaluation of the Costs of Energy Storages- A Simple Economic Truth in Two Equations. *J Energy Storage* **2015**, doi:10.1016/j.est.2015.06.001.
81. Zhang, H.; Baeyens, J.; Cáceres, G.; Degreè, J.; Lv, Y. Thermal Energy Storage: Recent Developments and Practical Aspects. *Prog Energy Combust Sci* **2016**, *53*, 1–40, doi:10.1016/j.pecs.2015.10.003.

82. Cabeza, L.F.; Galindo, E.; Prieto, C.; Barreneche, C.; Inés Fernández, A. Key Performance Indicators in Thermal Energy Storage: Survey and Assessment. *Renew Energy* **2015**, doi:10.1016/j.renene.2015.05.019.
83. Wiegel, C. *Thermal Comfort in Sun Spaces To What Extend Can Energy Collectors and Seasonal Energy Storages Provide Thermal Comfort in Sun Spaces?*; 2017;
84. Koirala, B.P.; van Oost, E.; van der Windt, H. Innovation Dynamics of Socio-Technical Alignment in Community Energy Storage: The Cases of Drten and Ecovat. *Energies (Basel)* **2020**, *13*, doi:10.3390/en13112955.
85. Good, N.; Mancarella, P. Flexibility in Multi-Energy Communities with Electrical and Thermal Storage: A Stochastic, Robust Approach for Multi-Service Demand Response. *IEEE Trans Smart Grid* **2019**, *10*, 503–513, doi:10.1109/TSG.2017.2745559.
86. Robert A. Huggins *Energy Storage: Fundamentals, Materials and Applications*; Springer: Stanford, CA, USA, 2016; Vol. Second; ISBN 978-3-319-21238-8.
87. Zhang, H.; Baeyens, J.; Cáceres, G.; Degre, J.; Lv, Y. Thermal Energy Storage: Recent Developments and Practical Aspects. *Prog Energy Combust Sci* **2016**, *53*, 1–40.
88. Gao, Y.; Nolan, A.M.; Du, P.; Wu, Y.; Yang, C.; Chen, Q.; Mo, Y.; Bo, S.H. Classical and Emerging Characterization Techniques for Investigation of Ion Transport Mechanisms in Crystalline Fast Ionic Conductors. *Chem Rev* **2020**, *120*, 5954–6008, doi:10.1021/acs.chemrev.9b00747.
89. Lehmann, C.; Kolditz, O.; Nagel, T. *Models of Thermochemical Heat Storage*; Springer: Leipzig, Germany, 2018; Vol. 1; ISBN 978-3-319-71521-6.
90. Guelpa, E.; Verda, V. Thermal Energy Storage in District Heating and Cooling Systems: A Review. *Appl Energy* **2019**, *252*, 113474, doi:10.1016/J.APENERGY.2019.113474.
91. Lund, H.; Mathiesen, B. v. Energy System Analysis of 100% Renewable Energy Systems-The Case of Denmark in Years 2030 and 2050. *Energy* **2009**, *34*, 524–531.
92. Krajačić, G.; Duić, N.; Carvalho, M. da G. H2RES, Energy Planning Tool for Island Energy Systems – The Case of the Island of Mljet. *Int J Hydrogen Energy* **2009**, doi:10.1016/J.IJHYDENE.2008.12.054.
93. Dominković, D.F.; Bačević, I.; Sveinbjörnsson, D.; Pedersen, A.S.; Krajačić, G. On the Way towards Smart Energy Supply in Cities: The Impact of Interconnecting Geographically Distributed District Heating Grids on the Energy System. *Energy* **2017**, *137*, 941–960, doi:10.1016/J.ENERGY.2017.02.162.
94. Guelpa, E.; Verda, V. Thermal Energy Storage in District Heating and Cooling Systems: A Review. *Appl Energy* **2019**, *252*, doi:10.1016/j.apenergy.2019.113474.
95. Lund, H.; Möller, B.; Mathiesen, B. v.; Dyrelund, A. The Role of District Heating in Future Renewable Energy Systems. *Energy* **2010**, *35*, 1381–1390, doi:10.1016/J.ENERGY.2009.11.023.
96. Ban, M.; Krajačić, G.; Grozdek, M.; Ćurko, T.; Duić, N. The Role of Cool Thermal Energy Storage (CTES) in the Integration of Renewable Energy Sources (RES) and Peak Load Reduction. *Energy* **2012**, *48*, 108–117, doi:10.1016/J.ENERGY.2012.06.070.
97. Huang, Z.; Yu, H.; Peng, Z.; Zhao, M. Methods and Tools for Community Energy Planning: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2015**, *42*, 1335–1348, doi:10.1016/J.RSER.2014.11.042.
98. Xiong, W.; Wang, Y.; Mathiesen, B.V.; Lund, H.; Zhang, X. Heat Roadmap China: New Heat Strategy to Reduce Energy Consumption towards 2030. *Energy* **2015**, *81*, 274–285, doi:10.1016/J.ENERGY.2014.12.039.

99. Moghaddam, I.G.; Saniei, M.; Mashhour, E. A Comprehensive Model for Self-Scheduling an Energy Hub to Supply Cooling, Heating and Electrical Demands of a Building. *Energy* **2016**, *94*, 157–170, doi:10.1016/J.ENERGY.2015.10.137.
100. Koohi-Fayegh, S.; Rosen, M.A. Optimization of Seasonal Storage for Community-Level Energy Systems: Status and Needs. *Energy Ecol Environ* **2017**, 168–181, doi:10.1007/s40974-017-0051-1.
101. Hachem-Vermette, C.; Guarino, F.; la Rocca, V.; Cellura, M. Towards Achieving Net-Zero Energy Communities: Investigation of Design Strategies and Seasonal Solar Collection and Storage Net-Zero. *Solar Energy* **2019**, *192*, 169–185, doi:10.1016/J.SOLENER.2018.07.024.
102. Good, N.; Mancarella, P. Flexibility in Multi-Energy Communities with Electrical and Thermal Storage: A Stochastic, Robust Approach for Multi-Service Demand Response. *IEEE Trans Smart Grid* **2019**, *10*, 503–513, doi:10.1109/TSG.2017.2745559.
103. Comodi, G.; Bartolini, A.; Carducci, F.; Nagarajan, B.; Romagnoli, A. Achieving Low Carbon Local Energy Communities in Hot Climates by Exploiting Networks Synergies in Multi Energy Systems. *Appl Energy* **2019**, *256*, 113901, doi:10.1016/J.APENERGY.2019.113901.
104. Sebestyén, T.T.; Pavičević, M.; Dorotić, H.; Krajačić, G. The Establishment of a Micro-Scale Heat Market Using a Biomass-Fired District Heating System. *Energy, Sustainability and Society* **2020**, doi:10.1186/s13705-020-00257-2.
105. Koirala, B.P.; van Oost, E.; van der Windt, H. Innovation Dynamics of Socio-Technical Alignment in Community Energy Storage: The Cases of Drten and Ecovat. *Energies (Basel)* **2020**, *13*, doi:10.3390/en13112955.
106. Saloux, E.; Candanedo, J.A. Model-Based Predictive Control to Minimize Primary Energy Use in a Solar District Heating System with Seasonal Thermal Energy Storage. *Appl Energy* **2021**, *291*, 116840, doi:10.1016/J.APENERGY.2021.116840.
107. Acheilas, I.; Hooimeijer, F.; Ersoy, A. A Decision Support Tool for Implementing District Heating in Existing Cities, Focusing on Using a Geothermal Source. *Energies (Basel)* **2020**, *13*, doi:10.3390/en13112750.
108. Franjo, D.; Dominković, D.; Krajačić, G.K. District Cooling Versus Individual Cooling in Urban Energy Systems: The Impact of District Energy Share in Cities on the Optimal Storage Sizing. *Energies (Basel)* **2019**, doi:10.3390/en12030407.
109. Khanlari, A.; Salavati-Zadeh, A.; Mohammadi, M.; Najafi, S.B.N.; Esfahanian, V. Effect of Hydrogen Enrichment on Pollutant and Greenhouse Gases Formation and Exergy Efficiency of Methane MILD Combustion. In *Proceedings of the Green Energy and Technology*; Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020; pp. 403–429.
110. Yang, L.; Villalobos, U.; Akhmetov, B.; Gil, A.; Khor, J.O.; Palacios, A.; Li, Y.; Ding, Y.; Cabeza, L.F.; Tan, W.L.; et al. A Comprehensive Review on Sub-Zero Temperature Cold Thermal Energy Storage Materials, Technologies, and Applications: State of the Art and Recent Developments. *Appl Energy* **2021**, *288*, 116555, doi:10.1016/J.APENERGY.2021.116555.

Κεφάλαιο 3: Βιβλιομετρική Ανάλυση

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	46
3.1 Κριτήρια Έρευνας.....	46
3.2 Βιβλιομετρική Ανάλυση μέσω VOS Viewer	49
3.3 Χαρτογράφηση Βιβλιογραφίας.....	54
Σύνοψη	58
Βιβλιογραφία.....	59

Εισαγωγή

Με την ολοκλήρωση του προηγούμενου κεφαλαίου, ολοκληρώθηκε η συνοπτική αναφορά στις τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής ΘΨΕ που θα χρησιμοποιηθούν εκτενώς καθ' όλη την έκταση της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Εκτός των λειτουργικών χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν, καθώς και ορισμένων σημαντικών σχεδιαστικών και οικονομικών μεγεθών, είναι δόκιμο να γίνει και μια εκτενής βιβλιομετρική ανάλυση των ερευνητικών εργασιών που ασχολούνται με τα προαναφερθέντα, προκειμένου να αποσαφηνιστεί η ερευνητική τάση, οι επιστημονικές προτάσεις αλλά και τα δυνητικά βιβλιογραφικά κενά. Ο εντοπισμός των εργασιών της βιβλιομετρικής ανάλυσης έγινε βάσει εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης μέσω των εργαλείων Litmaps® και VOS Viewer [1], τα οποία δέχονται δεδομένα βιβλιογραφίας από διεθνείς βιβλιογραφικές πηγές και τα αποδελτιώνουν ανάλογα με το περιεχόμενό τους. Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί τη βιβλιομετρική ανάλυση της βιβλιογραφίας που παρουσιάστηκε εν πολλοίς στο 2^ο Κεφάλαιο, καθώς πολλές από τις αναφορές που σχολιάστηκαν εμπεριέχονται στην ανάλυση αυτή. Γίνεται διαχωρισμός της βιβλιομετρικής ανάλυσης σε δύο επίπεδα, όπου το πρώτο αποσκοπεί στον εντοπισμό των ερευνητικών σημείων ενδιαφέροντος ενώ το δεύτερο στον εντοπισμό των σημαντικότερων δημοσιευμένων εργασιών στο πεδίο/πεδία αυτό.

3.1 Κριτήρια Έρευνας

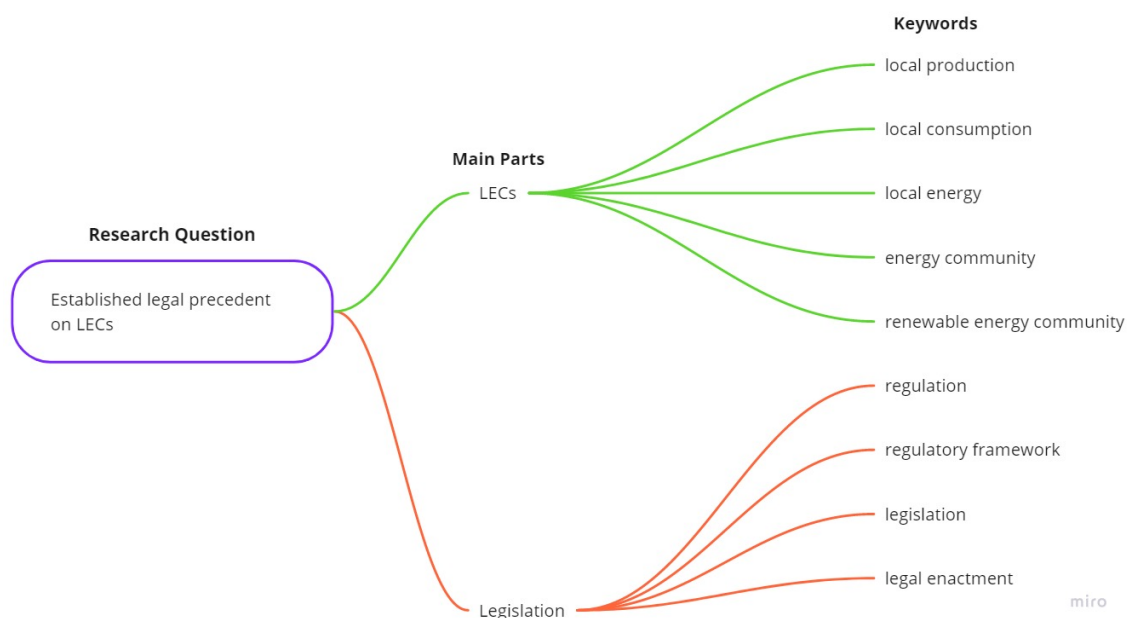
Κατά τον αρχικό προσδιορισμό του πεδίου βιβλιομετρικής ανάλυσης, είναι δόκιμο να παρουσιαστούν τα κριτήρια αναζήτησης στις διεθνείς βιβλιογραφικές βάσεις, που καθόρισαν και το εύρος και τη θεματική των αποτελεσμάτων αυτής. Ο Πίνακας 3. 1 παρουσιάζει τα κριτήρια αναζήτησης στις βάσεις αυτές, προκειμένου η έρευνα να είναι στοχευμένη και επίκαιρη. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η σχετική αναζήτηση έγινε στις βιβλιογραφικές βάσεις του Scopus και Google Scholar καθώς περιέχουν μία εκτενή λίστα ερευνητικών. Τα αποτελέσματα της αναζήτησης υπό τα ορισμένα κριτήρια, ανέδειξε 1245 εργασίες που πληρούσαν τα κριτήρια και αναλύθηκαν βιβλιομετρικά.

Πίνακας 3. 1: Κριτήρια αναζήτησης στις βιβλιογραφικές βάσεις εργασιών των Scopus και Google Scholar

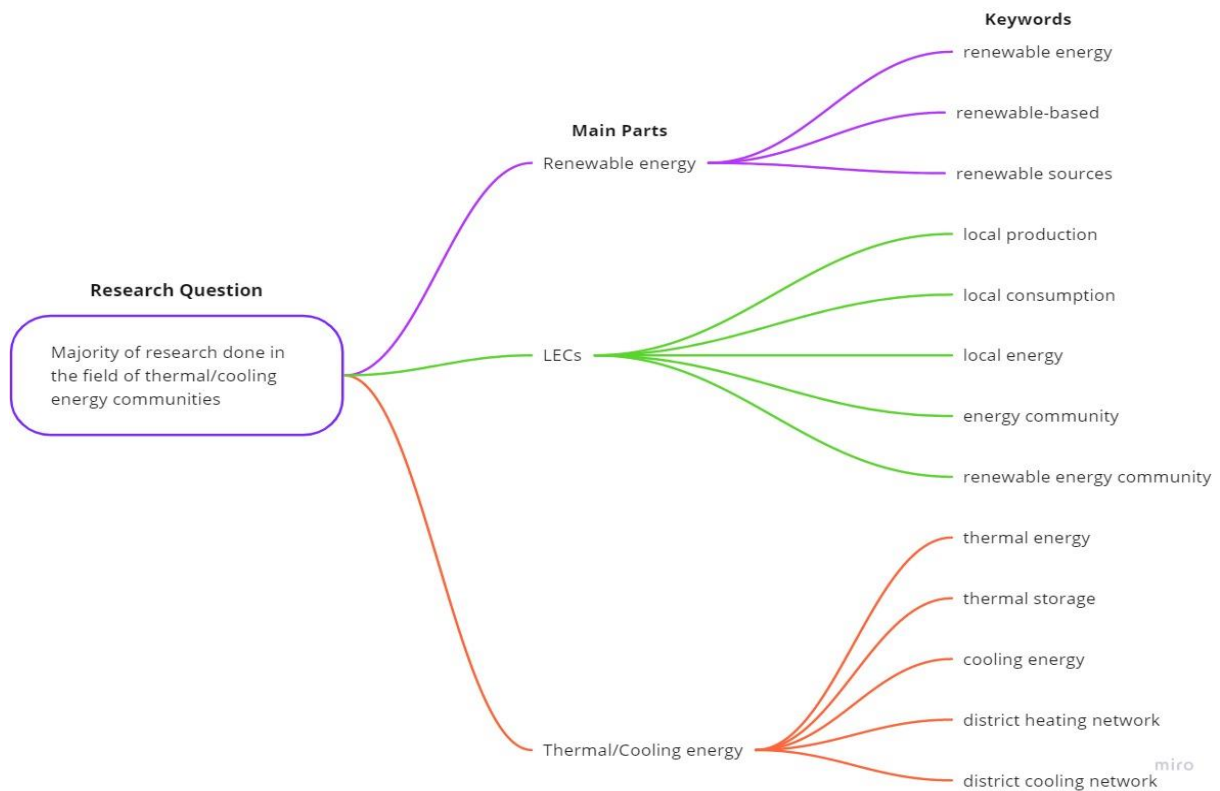
Αριθμός Κριτηρίου	Κριτήριο
1	Δημοσιεύσεις μόνο μετά το 2000 (κυρίως για τη θεματική της τεχνολογικής ανάπτυξης αλλά και νομοθεσίας)
2	Λαμβάνονται υπόψιν μόνο εργασίες με γλώσσα συγγραφής αγγλικά ή ελληνικά
3	Αποκλειστική αναφορά σε θερμική και ψυκτική ενέργεια που παράγεται τοπικά

Τα ερευνητικά ερωτήματα, όπως διαρθρώθηκαν στην Εισαγωγή, καθώς και το σύνολο των λέξεων-κλειδιών (keywords) παρουσιάζονται στις Εικόνα 3. 1, Εικόνα 3. 2 και Εικόνα 3. 3. Τα ερευνητικά ερωτήματα είναι τα εξής:

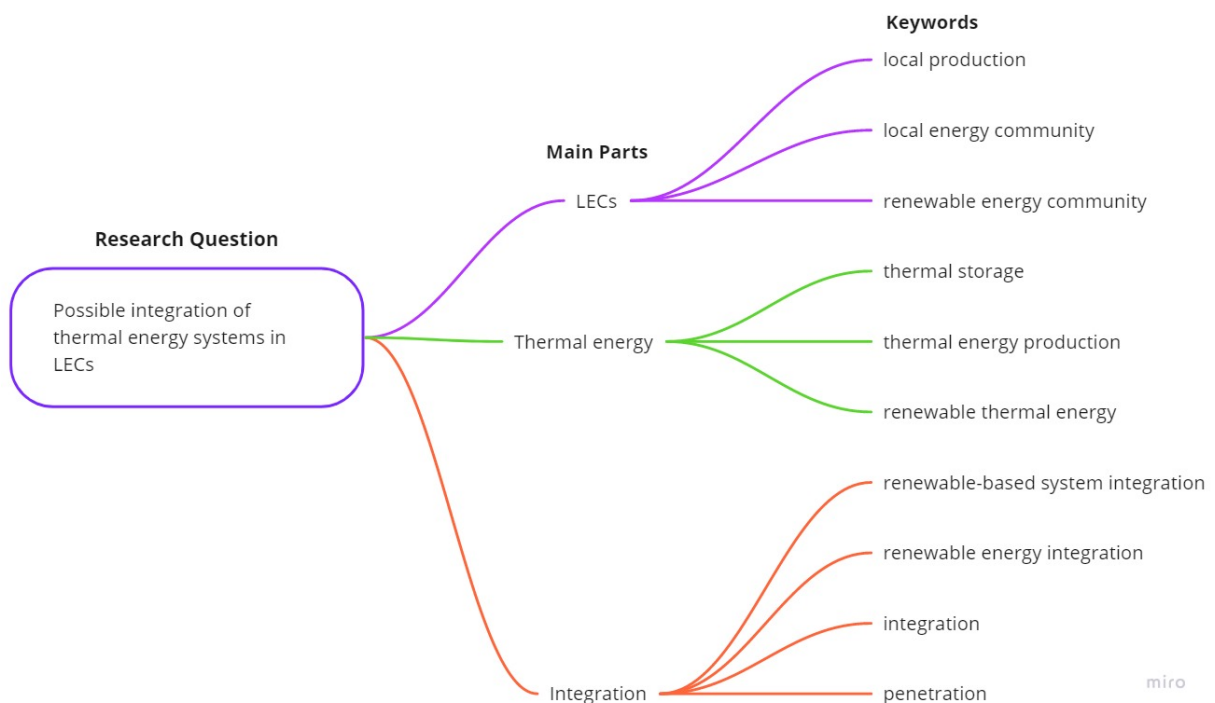
1. Ερευνητικό υποερώτημα 1 (EY1): Πώς ορίζεται ο ενεργειακό προφίλ των χρηστών θερμικής ενέργειας, ποια είναι τα εξυπηρετούμενα φορτία και ποιες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψή τους;
2. Ερευνητικό υποερώτημα 2 (EY2): Ποιες είναι οι κυριότερες τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής, σε ποιο στάδιο βρίσκονται και ποιες είναι οι δυνατότητες ενσωμάτωσής τους στον υφιστάμενο ενεργειακό χώρο;
3. Ερευνητικό υποερώτημα 3 (EY3): Πώς μπορεί να σχεδιαστεί μια ΕΚ, ποια είναι τα διαθέσιμα εργαλεία σχεδιασμού, πώς μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους οι θερμικές ΕΚ;
4. Ερευνητικό υποερώτημα 4 (EY4): Πώς μπορεί να γίνει βιώσιμη μια θερμική ΕΚ, ποιοι είναι οι δείκτες που επιδρούν στη βιωσιμότητα και πώς η χρήση αποθήκευσης ενέργειας επιδρά στη βιωσιμότητα των ΕΚ;



Εικόνα 3. 1: Βιβλιογραφική ερώτηση στις βάσεις δεδομένων που αφορά το νομικό πλαίσιο των τοπικών ΕΚ – 1110 αποτελέσματα [1].



Εικόνα 3. 2: Βιβλιογραφική ερώτηση στις βάσεις δεδομένων που αφορά υφιστάμενο ερευνητικό έργο πάνω σε θερμικές και ψυκτικές ΕΚ – 27 αποτελέσματα [1].

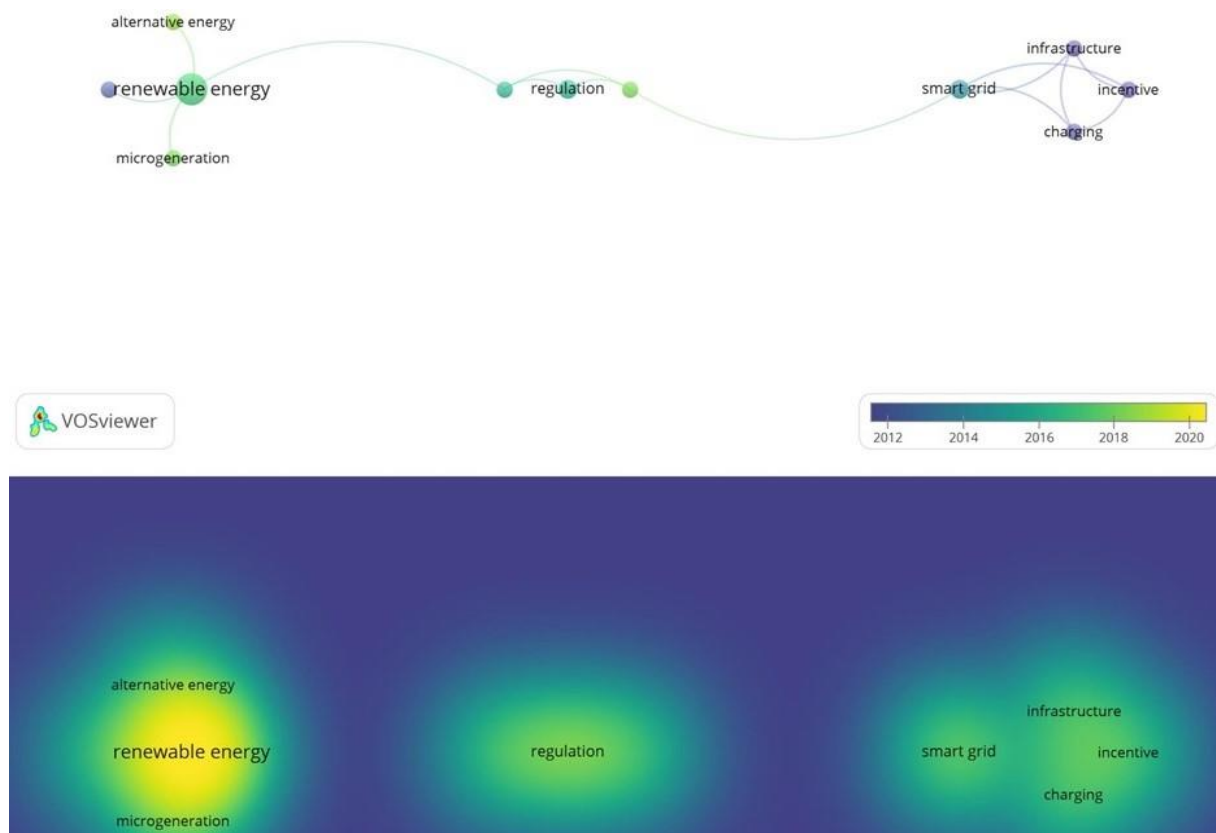


Εικόνα 3. 3: Βιβλιογραφική ερώτηση στις βάσεις δεδομένων που αφορά την πιθανότητα ενσωμάτωσης τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής θερμικής/ψυκτικής ενέργειας στις ΕΚ – 108 αποτελέσματα [1].

3.2 Βιβλιομετρική Ανάλυση μέσω VOS Viewer

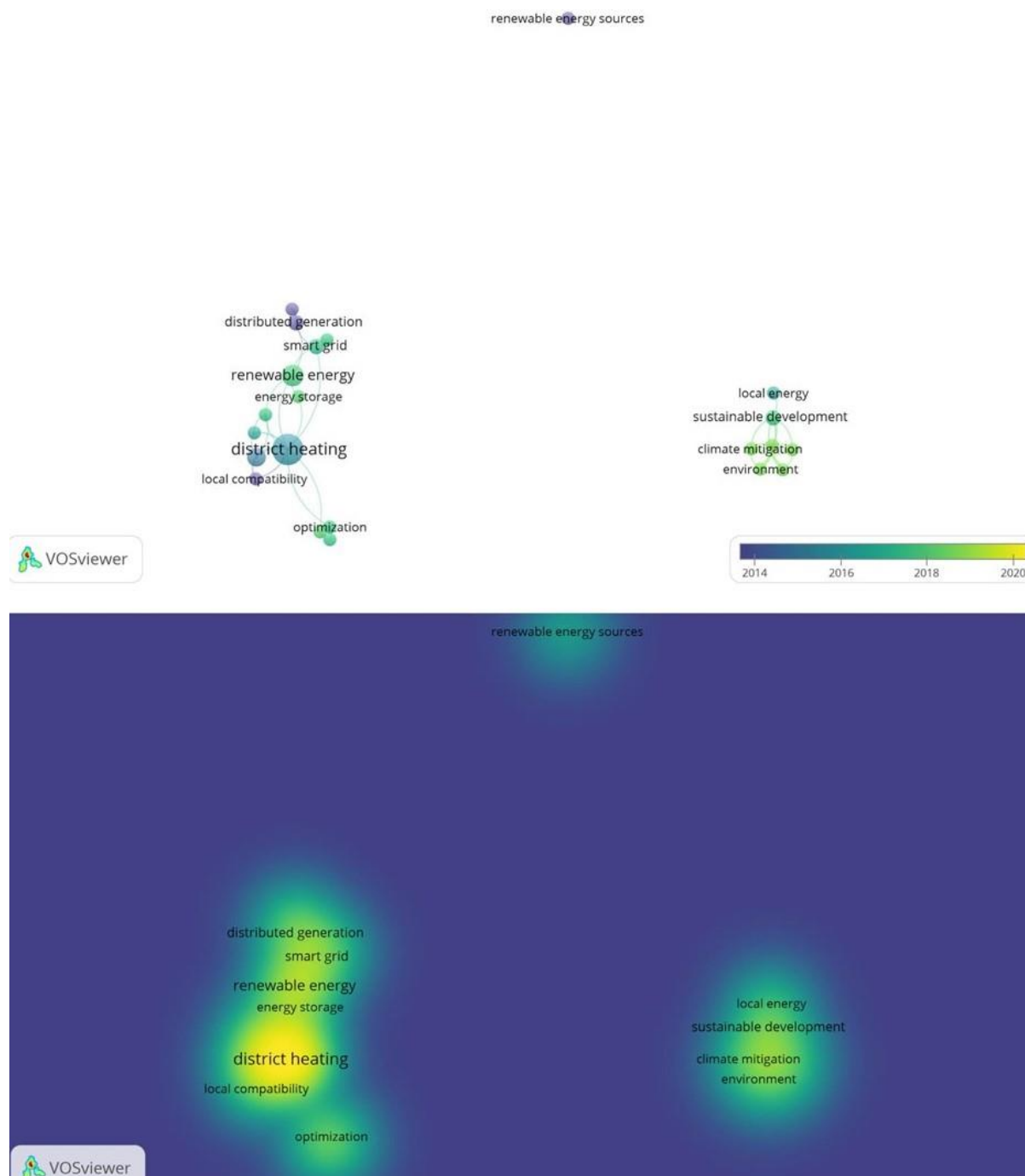
Η βιβλιογραφική ανάλυση των αποτελεσμάτων της αναζήτησης αυτής έγινε μέσω του λογισμικού VOS Viewer. Το VOS Viewer αποτελεί ένα δωρεάν εργαλείο βιβλιομετρικής ανάλυσης με είσοδο αρχεία βάσεων δεδομένων γνωστών βιβλιογραφικών βιβλιοθηκών όπως του Scopus και του Google Scholar. Η έξοδος του προγράμματος είναι τρεις διαφορετικοί τύποι χαρτών που απεικονίζουν τις «σχέσεις» μεταξύ των keywords των επιλεγμένων εργασιών. Ο πρώτος χάρτης – αποτέλεσμα της βιβλιομετρικής ανάλυσης του λογισμικού είναι ο χάρτης «Δικτύου» (Network) ο οποίος χαρτογραφεί και ομαδοποιεί σε ομάδες (clusters) τα keywords που βρίσκονται σε συχνότερη αλλά και πρόσφατη αλληλεπίδραση.

Ο δεύτερος χάρτης - αποτέλεσμα της ανάλυσης είναι ο χάρτης «Επικάλυψης» (Overlay), όπου απεικονίζεται με χρωματική διαφοροποίηση η χρονολογική διαφορά που έχει η χρήση των ομαδοποιημένων αυτών keywords, προσφέροντας μια εποπτική σκοπιά στην εξέλιξη του ερευνητικού ενδιαφέροντος. Τρίτος και τελευταίος χάρτης είναι ο «Θερμικός χάρτης», ο οποίος παρουσιάζει με αποχρώσεις στο φάσμα του ερυθρού, την συγκέντρωση ερευνητικής προσπάθειας γύρω από τα ομαδοποιημένα keywords. Έτσι, αν μια ομάδα keywords έχει σημαντικό αριθμό ερευνητικών εργασιών που αλληλοεπιδρούν (σε σχέση με τις άλλες ομάδες), τότε αυτή απεικονίζεται με ερυθρό χρώμα ενώ οι υπόλοιπες με ψυχρότερα. Για τις ανάγκες τις παρούσας διδακτορικής διατριβής, οι χάρτες Επικάλυψης και Θερμότητας προσφέρουν τις περισσότερες πληροφορίες για τη βιβλιογραφική ανάλυση και αυτοί χρησιμοποιούνται (Εικόνα 3. 4, Εικόνα 3. 5, Εικόνα 3. 6) [2]. Οι Εικόνα 3. 7, Εικόνα 3. 8 αποτελούν επέκταση της αναζήτησης στην εξέλιξη της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και στην συνεισφορά της στην τοπική εκμετάλλευση της ενέργειας, καθώς και την ύπαρξη ή μη, βιβλιογραφικού ενδιαφέροντος στο πεδίο των τοπικών θερμικών ΕΚ.



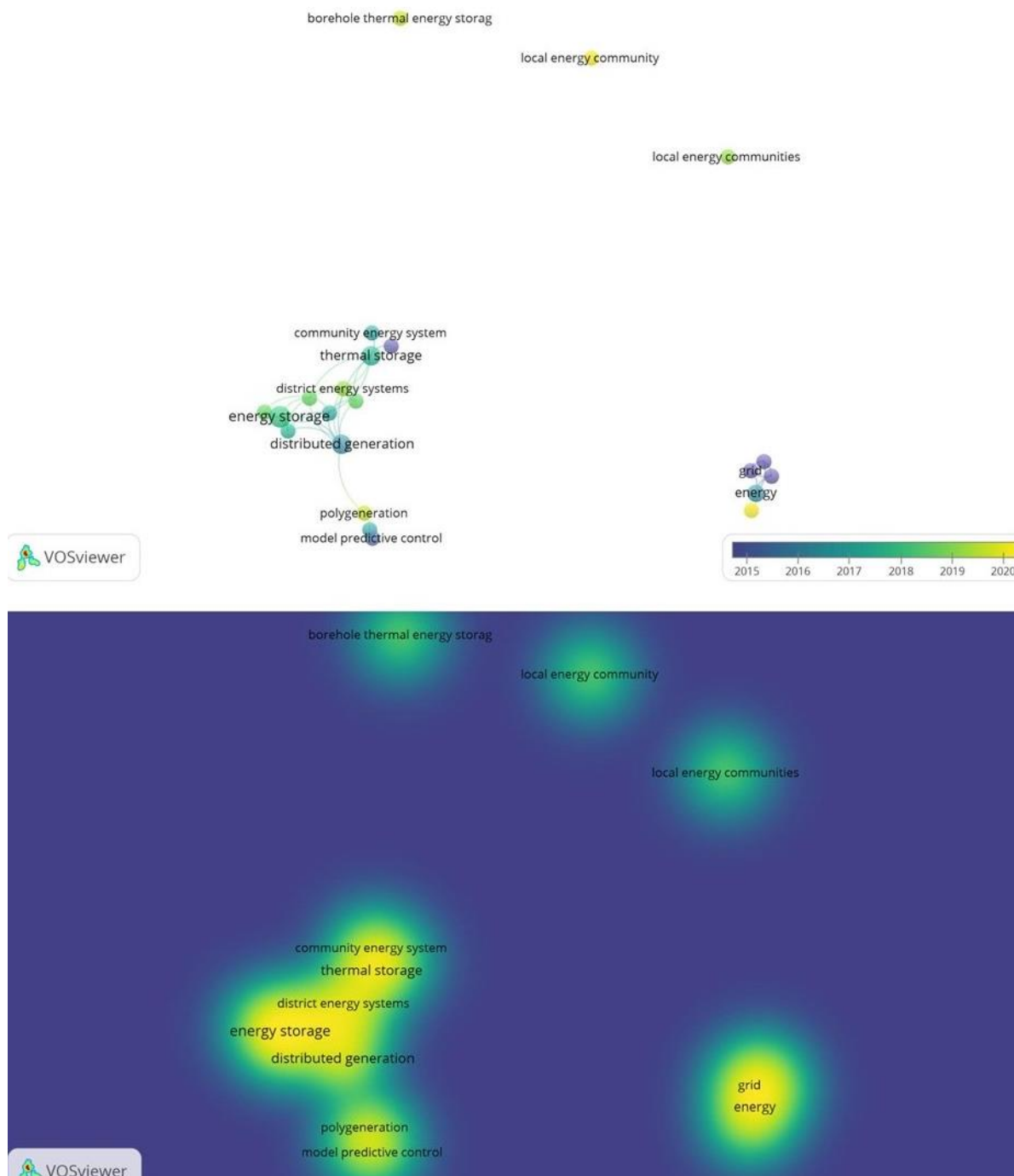
Εικόνα 3. 4: Αποτέλεσμα βιβλιογραφικής ανάλυσης με τη χρήση του VOS Viewer για το ΕΥ1 [1].

Στην Εικόνα 3. 4, παρατηρείται ότι η θεσμοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τοπική εκμετάλλευση έχει επιταχυνθεί μετά την συνθήκη του Παρισιού (2014), με κεντρικό άξονα όμως μόνον την ηλεκτρική ενέργεια και όχι τη θερμική/ψυκτική. Σε συνέχεια της αναζήτησης σε έρευνες περισσότερο επικεντρωμένες στην θερμική ενέργεια και τη διανομή της τοπικά, η Εικόνα 3. 5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της βιβλιομετρικής ανάλυσης.



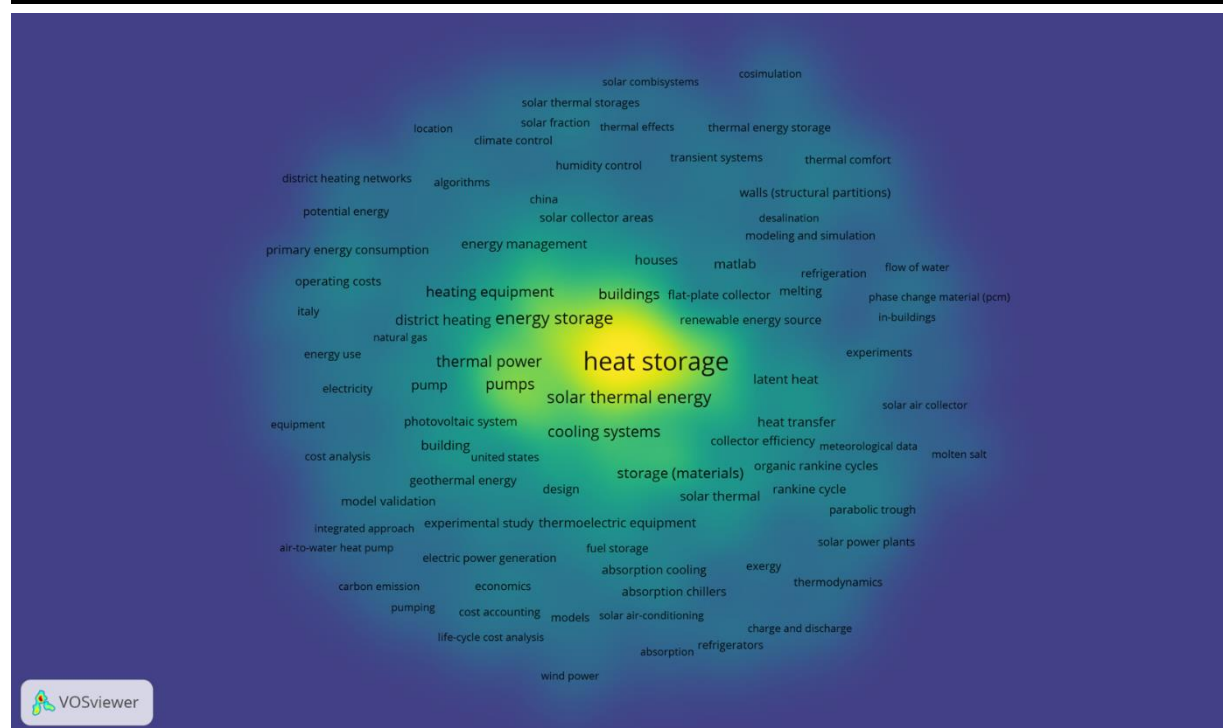
Εικόνα 3. 5: Αποτέλεσμα βιβλιογραφικής ανάλυσης με τη χρήση του VOS Viewer για το EY2 [1].

Στην Εικόνα 3. 5 απεικονίζονται τα δίκτυα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης και η συνεισφορά τους σε εφαρμογές τοπικών ΕΚ. Από την βιβλιομετρική αυτή ανάλυση δεν φαίνεται να έχει εξεταστεί εκτενώς η σχέση μεταξύ τοπικής παραγωγής ενέργειας, ανανεώσιμων πηγών και η αλληλεπίδρασή τους σε δίκτυα μεταφοράς θερμικής και ψυκτικής ενέργειας.

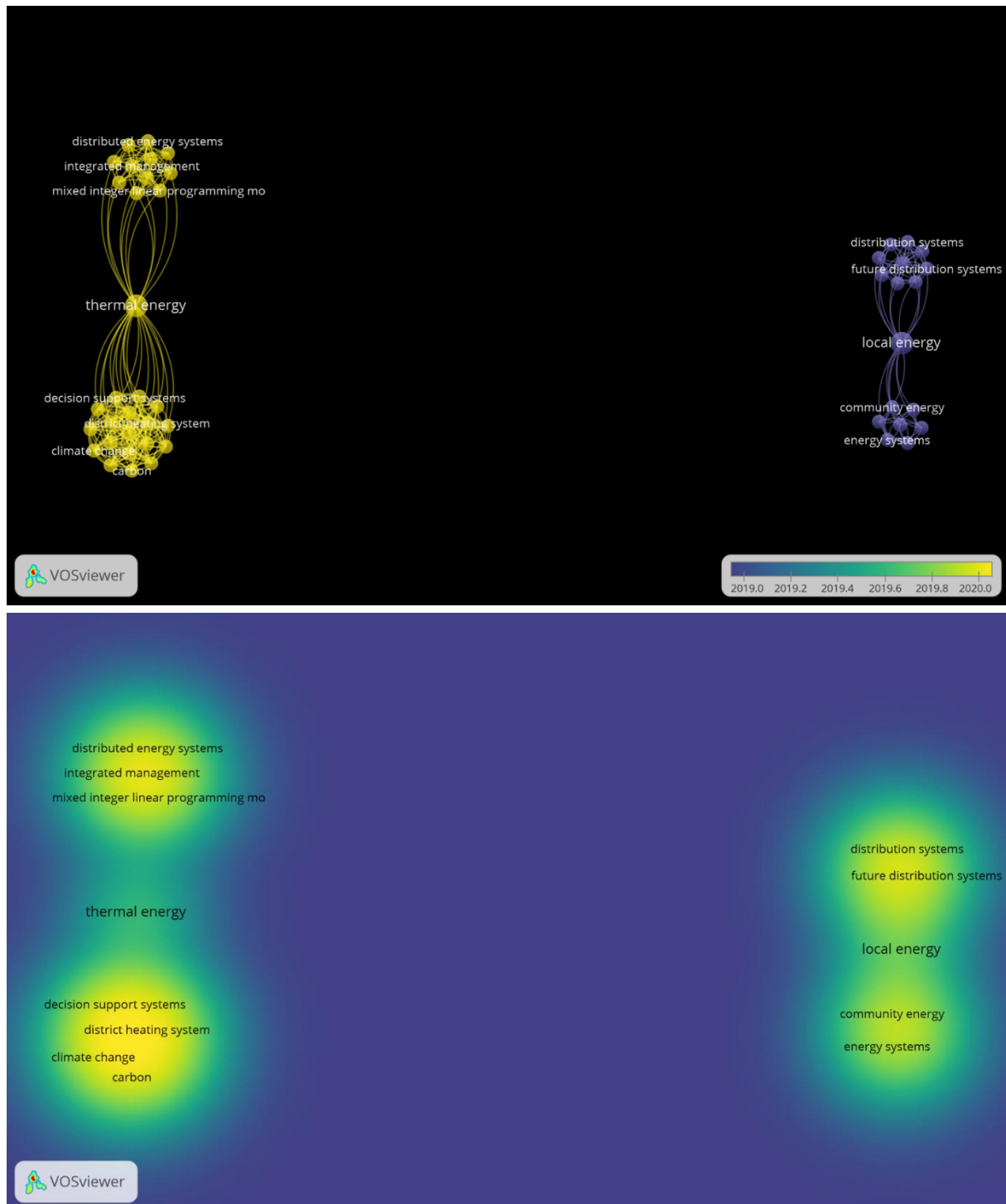


Εικόνα 3. 6: Αποτέλεσμα βιβλιογραφικής ανάλυσης με τη χρήση του VOS Viewer για το ΕΥ3 [1].

Στην Εικόνα 3. 6 φαίνεται ότι η κατακευκτική παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας δεν έχει εξεταστεί ακόμα ενδελεχώς σε επίπεδο τοπικών ΕΚ. Παρατηρείται όμως ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ τοπικών συστημάτων, αποθήκευσης ενέργειας και κατανομής αυτής, που αποτελεί και βασικό σημείο για την αναβάθμιση των τοπικών συστημάτων ενέργειας σε συστήματα τοπικών ΕΚ. Σε ότι αφορά την αποθήκευση θερμικής ενέργειας και



Η αποθήκευση θερμότητας με διαφορετικές τεχνολογίες προσανατολίζεται, όσο το ερευνητικό ενδιαφέρον πλησιάζει το παρόν, προς την ενσωμάτωση σε δίκτυα τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης αλλά και στη διερεύνηση εναλλακτικών μέσων θερμοχημικής και λανθάνουσας αποθήκευσης (Εικόνα 3. 7).

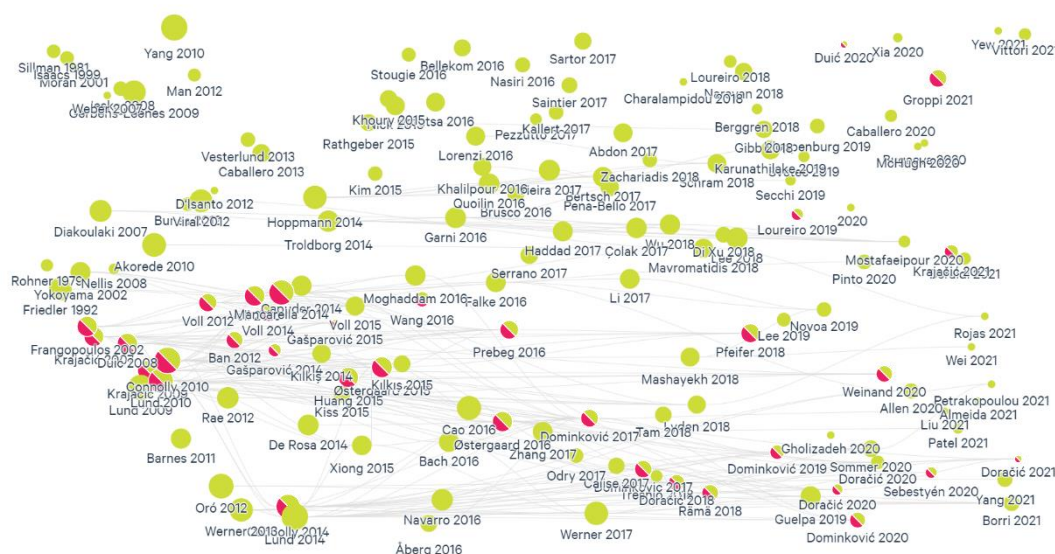


Εικόνα 3. 8: Συσχέτιση μεταξύ τοπικής παραγωγής και εκμετάλλευσης θερμικής ενέργειας και του τοπικού χαρακτήρα αυτής στο πλαίσιο ΕΚ.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. 8 η θερμική παραγωγή δεν έχει ακόμα διερευνηθεί σε σημαντικό βαθμό, βάσει των βιβλιομετρικών δεδομένων, στην αλληλεπίδρασή και ενσωμάτωσή της στις τοπικές ΕΚ. Αποτελεί όμως θέμα αυξανόμενου ερευνητικού ενδιαφέροντος όσο πλησιάζει η ανάλυση στο 2020, που ήταν και η χρονολογία εκκίνησης του παρόντος διδακτορικού.

3.3 Χαρτογράφηση Βιβλιογραφίας

Προκειμένου να εντοπιστούν οι σημαντικότερες ερευνητικές εργασίες πάνω στον τομέα, έγινε περαιτέρω διερεύνηση των αποτελεσμάτων της βιβλιομετρικής ανάλυσης που προηγήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Litmaps® που χαρτογραφεί με χρονολογική σειρά, αλλά και παρουσιάζει τη διασύνδεση μέσω αναφορών, των σημαντικότερων συγγραφέων. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3. 9, οι ομάδες (clusters) με τη μεγαλύτερη διάμετρο κύκλου, αποτελούν ερευνητικές εργασίες που έχουν το μεγαλύτερο αριθμό αναφορών (citation count) και την μεγαλύτερη επιρροή πάνω στο πεδίο. Αυτές που διαρθρώνουν τις μεγαλύτερες ομάδες, μαζί με τα σημαντικότερα και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα keywords (όπως αυτά προκύπτουν από την χρήση του VOS Viewer), φαίνονται στις Εικόνες 3.9 μέχρι 3.15.



Εικόνα 3. 9: Σημαντικότεροι συγγραφείς στον τομέα των θερμικών/ψυκτικών τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων καθώς και στον τομέα της τοπικής παραγωγής, εκμετάλλευσης και αποθήκευσης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας (Litmaps®).

Η Εικόνα 3. 9 παρουσιάζει τη συνοπτική απεικόνιση του Litmaps για τη θεματική των τοπικών θερμικών ΕΚ. Περιλαμβάνονται οι συγγραφείς καθώς και η αλληλεπίδραση που έχουν βιβλιογραφικά, τον τρόπο δηλαδή με τον οποίο διαμορφώνονται οι διασταυρωτικές αναφορές τους (crossreferences). Οι σημαντικότερες αναφορές όπως φαίνεται στην εικόνα είναι αυτές των Krajačić et al., Lund et al., και Pebeg et al.



Εικόνα 3. 10: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Krajacic et al. [3].

Με πρώτη την εργασία του Duić et al. (2008), η εργασία των Krajacic et al. πάνω στην ανάπτυξη του εργαλείου H2RES αποτέλεσε την πρώτη προσπάθεια δημιουργίας ενιαίου εργαλείου για σχεδιασμό τοπικών ΕΚ σε νησιωτικές εφαρμογές, από 100% ανανεώσιμες τεχνολογίες.



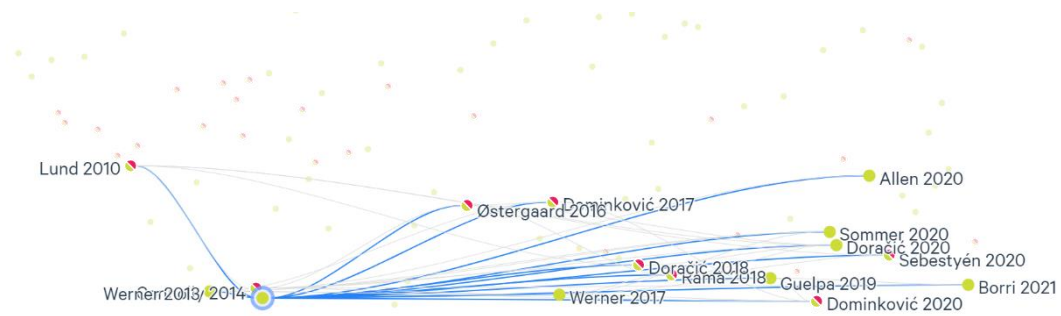
Εικόνα 3. 11: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Krajacic et al. [4].

Σε επέκταση της προηγούμενης εργασίας τους, οι Krajacic et al. διεύρυναν την επιρροή τους στο σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων για εξυπηρέτηση τοπικών φορτίων, από 100% ανανεώσιμες πηγές με παρουσίαση μελέτης περίπτωσης πραγματικής εφαρμογής (Εικόνα 3. 11).



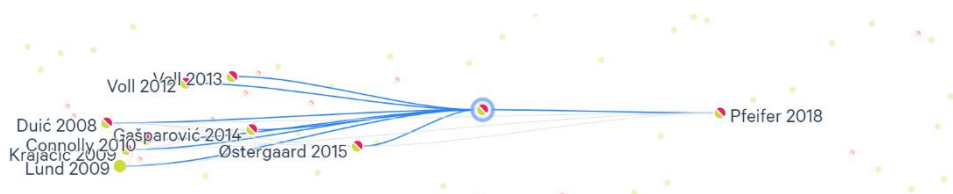
Εικόνα 3. 12: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Lund et al. [5].

Χρησιμοποιώντας μέρος της δουλειάς των Krajacic et al., ο Lund et al. κατέδειξε τη σημαντικότητα της κατανομής παραγωγής και της διανομής της μέσω δικτύων ΘΨΕ, στην ευέλικτη αποκέντρωση των τοπικών ΕΚ (Εικόνα 3. 12).



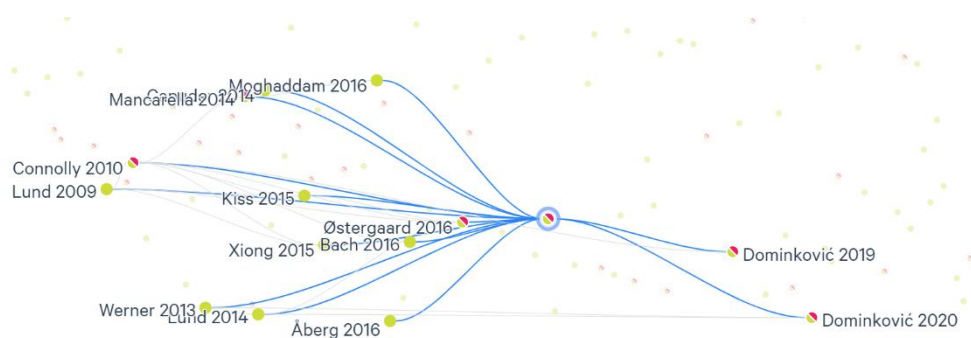
Εικόνα 3. 13: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Lund et al. [6].

Ακόμα μία εργασία των Lund et al. που απέκτησε σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον, αφορούσε την 4^η επανάσταση δικτύων ΘΨΕ και πώς αυτά θα διαμορφώσουν το μέλλον των τοπικών ΕΚ (Εικόνα 3. 13).



Εικόνα 3. 14: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Pebe et al. [7].

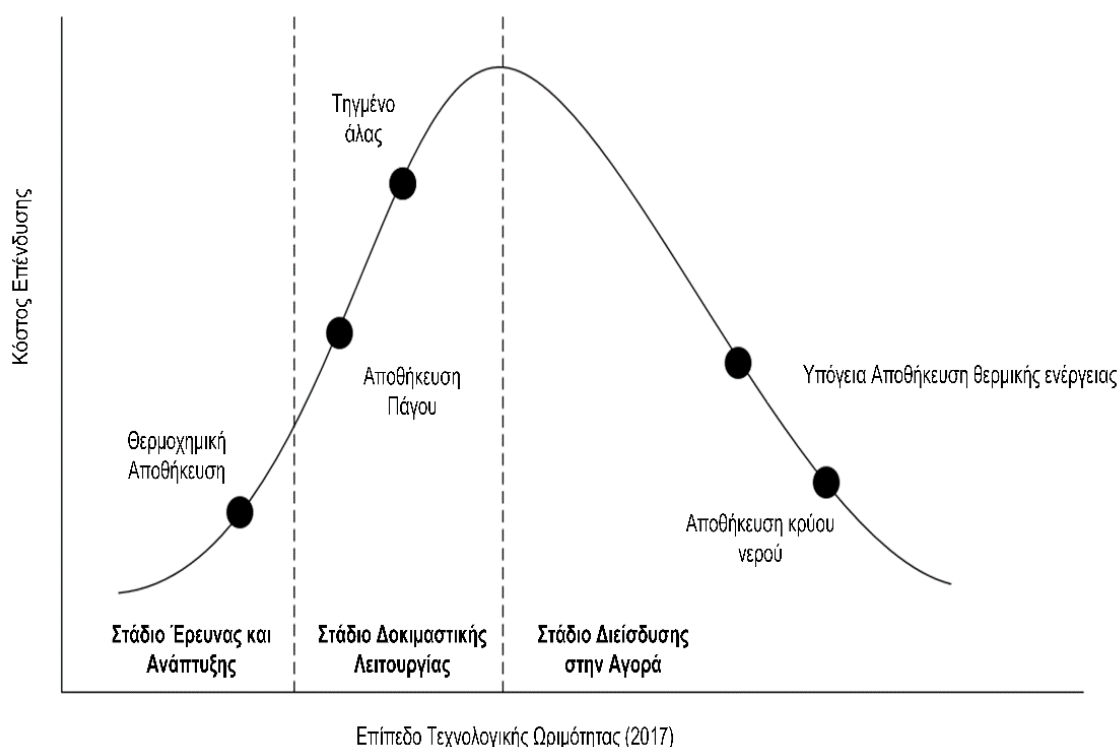
Στην Εικόνα 3. 14 φαίνεται σαν επίκεντρο η εργασία των Pebe et al., που διερεύνησαν τον αντίκτυπο του μακροπρόθεσμου προγραμματισμού ενεργειακών σεναρίων για την αξιοποίηση 100% πρωτογενούς δυναμικού από ανανεώσιμες. Η εργασία αναφέρθηκε διασταυρωτικά (cross-referenced) εκτεταμένα από την επιστημονική κοινότητα καθώς κατέδειξε την αναγκαιότητα του σχεδιασμού του συστήματος δυναμικής απόκρισης σε ενεργειακά συστήματα που καλύπτουν ανάγκες με ανανεώσιμες πηγές.



Εικόνα 3. 15: Ομάδα (cluster) με σημαντική επιρροή στο αντικείμενο των τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων, που στήθηκε πάνω στην έρευνα του Krajačić et al. [8].

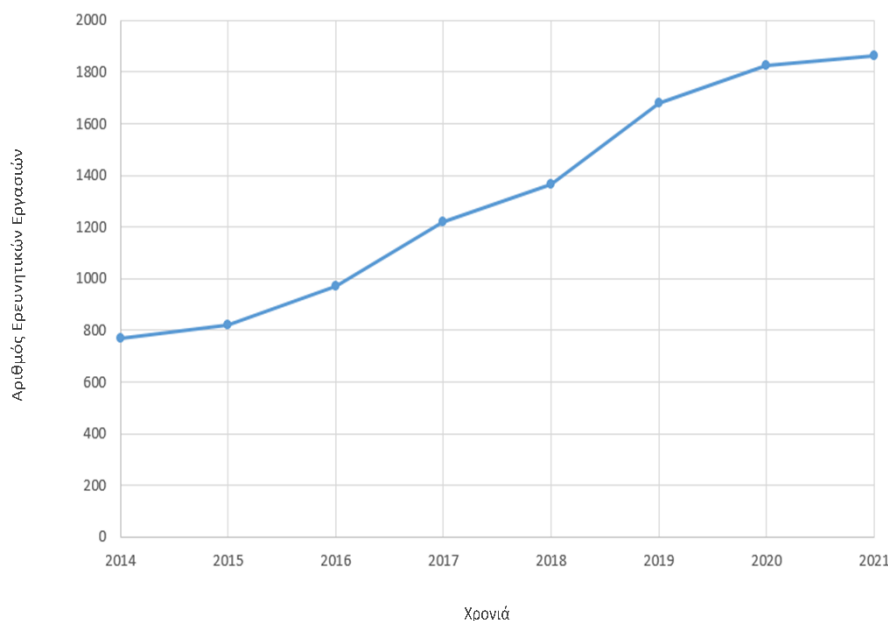
Τελευταία εργασία στην βιβλιομετρική ανάλυση που αξίζει να αναφερθεί είναι αυτή των Krajačić et al., όπου εισήγαγαν τα μοντέλα τοπικών αγορών ενέργειας, όπως αυτά χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές τοπικές ΕΚ και τα εφάρμοσαν στο πλαίσιο της τοπικής παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε ΕΚ.

Οι εργασίες αυτές, με μέρος αυτών να είναι αυτές που αναφέρθηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο, προσέφεραν το ερευνητικό πλαίσιο ανάπτυξης τοπικών θερμικών ΕΚ. Τα σημαντικά θέματα που καταδεικνύουν αποτελούν πτυχές των ΕΚ που πρέπει να αναπτυχθούν και να διερευνηθούν προκειμένου να γίνουν οι κοινότητες αυτές μέρος του υφιστάμενου ενεργειακού χάρτη και να αποτελέσουν την λύση που υπόσχονται. Τα θέματα αυτά εντοπίζονται κυρίως γύρω από την ανάπτυξη κατάλληλων τεχνολογιών για τη λειτουργία και την βιωσιμότητα των ΕΚ. Εκτός των τεχνολογιών παραγωγής (Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.2), η εξέλιξη των τεχνολογιών αποθήκευσης είναι μείζονος σημασίας για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών στον ενεργειακό χάρτη. Η Εικόνα 3. 16 παρουσιάζει το εμπορικό στάδιο των σημαντικότερων τεχνολογιών αποθήκευσης. Παρατηρείται ότι αρκετές από αυτές είναι ακόμα σε στάδιο έρευνας και ανάπτυξης, με αποτέλεσμα να μην έχει διερευνηθεί η λειτουργικότητα και συμβολή τους στην βιωσιμότητα των ΕΚ.



Εικόνα 3. 16: Εμπορικό στάδιο των τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας [1].

Όμως, πραγματοποιείται σημαντική προσπάθεια για την προώθησή τους και τον τρόπο με τον οποίο αυτές θα ενσωματωθούν στα συστήματα αυτά. Η Εικόνα 3. 17 απεικονίζει την εξέλιξη του τομέα των τεχνολογιών αποθήκευσης θερμικής/ψυκτικής ενέργειας από το 2014 μέχρι το 2021. Η αυξανόμενη ερευνητική προσπάθεια ενδεχομένως να μειώσει τον χρόνο ανάπτυξης αυτών των τεχνολογιών και να τις επιτρέψει να διεισδύσουν ταχύτερα στην αγορά ενέργειας.



Εικόνα 3. 17: Ετήσιος αριθμός ερευνητικών εργασιών με θέμα τις τεχνολογίες αποθήκευσης που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3. 16 από το 2014-2021.

Σύνοψη

Το παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιεί αναλυτικές μεθόδους αποσαφήνισης της διαθέσιμης βιβλιογραφίας με σκοπό την βαθύτερη διερεύνησή της. Οι αναλυτικές (βιβλιομετρικές) μέθοδοι αξιολόγησης και αξιοποίησης της βιβλιογραφίας αποκτούν αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς αποτελούν συνοπτικούς και οπτικούς τρόπους διερεύνησης και παρουσίασης βιβλιογραφικών αποτελεσμάτων [2,9,10]. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για να ενισχυθούν τα αποτελέσματα του 2^{ου} Κεφαλαίου ήταν η αποδελτίωση της βιβλιογραφίας μέσω των λογισμικών VOS Viewer και Litmaps®. Μέσω των λογισμικών αυτών, εντοπίστηκαν οι σημαντικότερες ερευνητικές εργασίες καθώς και οι συγγραφείς με την περισσότερη επιρροή, η έρευνα των οποίων μπορεί να προασπίσει τη χρηστικότητα και το τεχνολογικό πλαίσιο από το οποίο δυνητικά να χαραχθούν οι πολιτικές και να διαρθρωθούν χρηματοδοτικοί μηχανισμοί.

Εκτός των συμπερασμάτων, εντοπίστηκαν και ορισμένα πεδία περιορισμένης ερευνητικής δραστηριότητας, παρά τη καταφανή σημαντικότητα που έχουν για την επιτυχή ενεργειακή μετάβαση της θερμικής και ψυκτικής ενέργειας. Αυτά είναι:

1. Ο τοπικός χαρακτήρας και η διάρθρωση τοπικών ενεργειακών συστημάτων παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής βρίσκονται ακόμα σε πρώιμα στάδια. Παρατηρείται μερική έλλειψη μελετών περίπτωσης θερμικών τοπικών ΕΚ.
2. Νομοθεσία και οδηγίες σχετικά με την ενσωμάτωση των τοπικών ΕΚ σε όλα τα επίπεδα είναι μεμονωμένη και επικεντρωμένη στην ηλεκτρική παραγωγή και διανομή.
3. Απουσία εργαλείων ενσωμάτωσης και σχεδιασμού τοπικών θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων στον ενεργειακό χάρτη. Παρατηρείται ότι τα υφιστάμενα εργαλεία σχεδιασμού τέτοιων αυτόνομων ανανεώσιμων κοινοτήτων, απαιτούν ισχυρή υπολογιστική ισχύ, ενδελεχή γνώση του υπό κατασκευή συστήματος από τον χρήστη-ερευνητή-μηχανικό καθώς και μια πρώτη εκτίμηση του ποιες τεχνολογίες θα ενσωματωθούν και με ποιόν τρόπο θα διασυνδεθούν.

Τα παραπάνω σημεία είναι αλληλένδετα υπό την σκοπιά του συγγραφέα. Χωρίς εύληπτα και πλήρη εργαλεία, τα οποία να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως, είναι φυσικό να απουσιάζουν ανάλογες μελέτες περίπτωσης. Δεν μπορούν πρακτικά να δημιουργηθούν ανάλογες περιπτώσεις εξαιτίας της αυξημένης πολυπλοκότητας που παρουσιάζει ο οικονομοτεχνικός σχεδιασμός τους. Απουσία τέτοιων μελετών, υπάρχει συστηματική λήψη αποτελεσμάτων λειτουργικότητας και βιωσιμότητας με αποτέλεσμα να αποθαρρύνονται δυνητικά επενδυτικά σχέδια αλλά και οργανωμένες διαρθρώσεις εθνικών και διεθνών νομοθεσιών.

Ήδη από τη μελέτη και θεσμοθέτηση των ηλεκτρικών τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων έγινε προφανής η πολυπλοκότητα σχεδιασμού και ενσωμάτωσης αυτών των θεσμών στον δυσκίνητο ενεργειακό χάρτη. Προκειμένου να αρθεί μέρος αυτής της πολυπλοκότητας και με γνώμονα την ταχύτερη θεσμοθέτηση και ενσωμάτωση των τοπικών θερμικών ΕΚ, το παρόν Κεφάλαιο παρουσίασε κάποιες από τις εργασίες που ενίσχυσαν το ερευνητικό υπόβαθρο στον τομέα αυτό. Στη συνέχεια της διατριβής (4^ο Κεφάλαιο) θα αναφερθούν τα εργαλεία με τα οποία η ερευνητική κοινότητα προσεγγίζει τον σχεδιασμό τοπικών ΕΚ, ή των εργαλείων που έχουν τη δυνατότητα αυτή (ακόμα και αν ο κεντρικός τους σκοπός είναι διαφορετικός). Εκτός των εμπορικών λογισμικών, τα εργαλεία που θα παρουσιαστούν θα αποδελτιώνουν και τα διαθέσιμα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στον τομέα της δημιουργίας συστημάτων ΕΚ. Τέλος θα γίνει εισαγωγή του προτεινόμενου εργαλείου σχεδιασμού, που αποτελεί και τη συνεισφορά της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Βιβλιογραφία

1. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Katsavounis, S. Thermal/Cooling Energy on Local Energy Communities: A Critical Review. *Energies (Basel)* **2022**, *15*.
2. Azmi, N.N.; Hussain, A. A Bibliometric Analysis of Dropbox on Scopus Publication. *Webology* **2021**, *18*, 54–78, doi:10.14704/WEB/V18SI02/WEB18012.
3. Krajačić, G.; Duić, N. H2RES, Energy Planning Tool for Island Energy Systems – the Case of the Island of Mljet. *4th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment System* **2007**.
4. Krajačić, G.; Duić, N.; Carvalho, M. da G. H2RES, Energy Planning Tool for Island Energy Systems – The Case of the Island of Mljet. *Int J Hydrogen Energy* **2009**, doi:10.1016/J.IJHYDENE.2008.12.054.
5. Lund, H.; Mathiesen, B. v. Energy System Analysis of 100% Renewable Energy Systems-The Case of Denmark in Years 2030 and 2050. *Energy* **2009**, *34*, 524–531.
6. Lund, H.; Werner, S.; Wiltshire, R.; Svendsen, S.; Thorsen, J.E.; Hvelplund, F.; Mathiesen, B.V. 4th Generation District Heating (4GDH). Integrating Smart Thermal Grids into Future Sustainable Energy Systems. *Energy* **2014**, *68*, 1–11.
7. Prebeg, P.; Gasparovic, G.; Krajacic, G.; Duic, N. Long-Term Energy Planning of Croatian Power System Using Multi-Objective Optimization with Focus on Renewable Energy and Integration of Electric Vehicles. *Appl Energy* **2016**, *184*, 1493–1507, doi:10.1016/j.apenergy.2016.03.086.
8. Dominković, D.F.; Bačeković, I.; Sveinbjörnsson, D.; Pedersen, A.S.; Krajačić, G. On the Way towards Smart Energy Supply in Cities: The Impact of Interconnecting Geographically Distributed District Heating Grids on the Energy System. *Energy* **2017**, *137*, 941–960, doi:10.1016/J.ENERGY.2017.02.162.
9. Radu, V.; Radu, F.; Tabirca, A.I.; Saplacan, S.I.; Lile, R. Bibliometric Analysis of Fuzzy Logic Research in International Scientific Databases. *International Journal of Computers, Communications and Control* **2021**, *16*, 1–20, doi:10.15837/ijccc.2021.1.4120.

10. Borri, E.; Zsembinski, G.; Cabeza, L.F. Recent Developments of Thermal Energy Storage Applications in the Built Environment: A Bibliometric Analysis and Systematic Review. *Appl Therm Eng* **2021**, *189*, 116666, doi:10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.116666.

Κεφάλαιο 4: Ποιοτική Επισκόπηση Υφιστάμενων Εργαλείων

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	62
4.1 Εμπορικά Λογισμικά – Bottom up προσέγγιση	62
4.1.1 MARKAL/TIMES	63
4.1.2 DER_CAM.....	63
4.1.3 H2RES.....	64
4.1.4 EnergyPlan.....	64
4.1.5 E-GIS	64
4.1.6 SUNtool	64
4.1.7 TRNSYS	65
4.1.8 EnergyPlus	65
4.1.9 ESP-r	65
4.1.10 DeST	65
4.2 Πιστοποιήσεις Ενεργειακής Επάρκειας Κοινοτήτων - Top-down προσέγγιση.....	70
4.2.1 BREEAM Communities (BRE Environmental Assessment Method)	70
4.2.2 LEED-ND (Leadership in Environmental and Energy Design – Neighborhood Development rating system)	70
4.3 Μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης.....	71
4.4 Μεθοδολογία Ιεραρχικού Δομημένου Σχεδιασμού (ΜΙΔΣ)	73
4.4.1 Πρώτο επίπεδο σχεδιασμού (1st Layer) – Χαρτογράφηση αναγκών παραγωγαναλωτών.....	73
4.4.2 Δεύτερο επίπεδο σχεδιασμού (2nd Layer) – Σχεδιασμός υπερσυστήματος.....	74
4.4.3 Τρίτο επίπεδο σχεδιασμού (3rd Layer) – Οικονομική αποτίμηση υπερσυστήματος.....	75
Σύνοψη	75
Βιβλιογραφία	76

Εισαγωγή

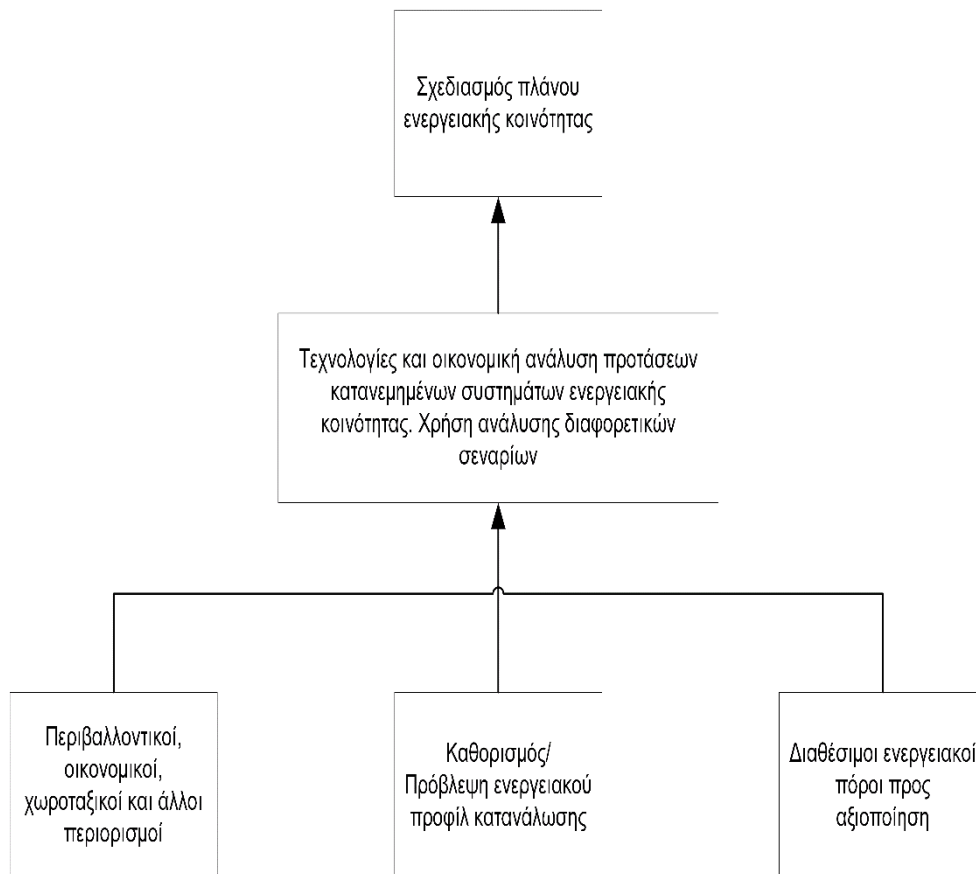
Μετά την ανασκόπηση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας και την αποδελτίωση του ερευνητικού ενδιαφέροντος, το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάλυση των υφιστάμενων εργαλείων σχεδιασμού τοπικών θερμικών ΕΚ. Όπως προαναφέρθηκε, η απουσία συστηματικών και εύχρηστων εργαλείων για τον σχεδιασμό αυτό, θεωρείται μείζονος σημασίας για την μετάβαση του κτιριακού τομέα σε κάλυψη των αναγκών με εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα εργαλεία στα οποία θα γίνει αναφορά, είναι ως επί το πλείστον εμπορικά προϊόντα και έχουν εφαρμοστεί κατά κόρον σε πληθώρα ερευνητικών εργασιών σχεδιασμού ΕΚ. Εκτός των εμπορικών αυτών προϊόντων, θα γίνει εκτενής ανασκόπηση και των μαθηματικών μοντέλων που αναπτύσσονται για τον σκοπό αυτό. Αυτά τα μοντέλα είναι συνήθως επαναληπτικές διαδικασίες βελτιστοποίησης αντικειμενικών συναρτήσεων, που έχουν ως κεντρικό άξονα την επιλογή κατάλληλου εξοπλισμού, την εξυπηρέτηση του μεγαλύτερου όγκου φορτίου από ανανεώσιμες πηγές και την μείωση του κόστους εγκατάστασης αλλά και ενέργειας [1–3].

Από τη διερεύνηση των παραπάνω εργαλείων, εμπορικών ή μη, και μαθηματικών μοντέλων γίνεται κατανοητό ότι διαφορετικά εργαλεία εξυπηρετούν στο σχεδιασμό κοινοτήτων σε διαφορετικά στάδια και με διαφορετικούς τρόπους. Σε ότι αφορά τα στάδια σχεδιασμού, ένα εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό του συστήματος παραγωγής ενέργειας, κάποιο άλλο για την διαχείριση της παραγόμενης ή αποθηκευμένης ενώ κάποιο άλλο για την ανταλλαγή της μεταξύ των παραγωγαναλωτών.

4.1 Εμπορικά λογισμικά – Bottom up προσέγγιση

Η πρακτική σχεδιασμού bottom-up (από το σχεδιασμό της βάσης – bottom, έως την κάλυψη του φορτίου – up) καλύπτει ένα ευρύ φάσμα μηχανολογικών προσεγγίσεων στον σχεδιασμό ΕΚ. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, εισάγονται δεδομένα (κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των υπό μελέτη κτηρίων, δεδομένων θερμικού και ψυκτικού φορτίου, κ.α.) και μετά από ορισμένες διαδικασίες που ακολουθούν τον πρώτο και δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, εξάγονται αποτελέσματα δυναμικών προσομοιώσεων των σχεδιαζόμενων συστημάτων. Στις διαδικασίες αυτές συνήθως εμπλέκονται οικονομικοί, τεχνικοί αλλά και περιβαλλοντικοί περιορισμοί ή συνθήκες. Ως διαδικασίες περιγράφονται μεμονωμένες ενότητες (modules) οι οποίες χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, τις ενότητες ενεργειακής ζήτησης των παραγωγαναλωτών της ΕΚ, τις ενότητες διαθέσιμων ενεργειακών πόρων και τις ενότητες στοιχείων παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής ενέργειας. Συνήθως, οι προσεγγίσεις αυτές πραγματοποιούνται με εμπορικά λογισμικά, τα οποία περιλαμβάνουν κάποιες ή όλες τις ενότητες που προαναφέρθηκαν.

Τα εμπορικά λογισμικά που χρησιμοποιούνται ευρέως στον σχεδιασμό καταναμεμημένων συστημάτων ενέργειας, έχουν αρχιτεκτονική bottom-up. Η Εικόνα 4. 1 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική bottom-up που χρησιμοποιούν τα λογισμικά αυτά καθώς αξιοποιούν πρωτογενή πληροφορία περιβαλλοντικών, οικονομικών αλλά και χωροταξικών δεδομένων προκειμένου να δομήσουν ένα τεχνολογικά και οικονομικά εφικτό σενάριο αποκεντρωμένου συστήματος ενέργειας [1]. Στην ενότητα αυτή θα σχολιαστούν επιγραμματικά και έπειτα θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά (Πίνακας 4. 1), τα σύγχρονα λογισμικά αυτής της αρχιτεκτονικής. Δεν συμπεριλήφθηκαν λογισμικά που ασχολούνται αποκλειστικά με καταναμεμημένα δίκτυα παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η φιλοσοφία σχεδιασμού διαφέρει σημαντικά. Ακολουθεί η περιγραφή των πλέον αντιπροσωπευτικών λογισμικών MARKAL, DER-CAM, H2RES, EneyPlan, E-GIS, SUNtool, TRNSYS, EnergyPlus, ESP-r και DEST.



Εικόνα 4. 1 Αρχιτεκτονική σχεδιασμού ενεργειακών κοινοτήτων bottom-up [1].

4.1.1 MARKAL/TIMES

Το MARKAL/TIMES (MARKal ALocation) αποτελεί μια μαθηματική προσέγγιση σχεδιασμού καταναμημένων συστημάτων αλλά και λειτουργίας αυτών σε πολλαπλές περιόδους. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για βιομηχανικές εγκαταστάσεις και επικεντρώνεται στον συνδυασμό πολλαπλών μη ανανεώσιμων πηγών παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Διενεργούνται υπολογισμοί ενεργειακού ισοζυγίου και δεν περιλαμβάνονται σενάρια αποθήκευσης ενέργειας, με αποτέλεσμα σε μία σημαντική μεταβολή φορτίου να προτείνεται προσθήκη επιπλέον εξοπλισμού για την κάλυψη των αναγκών του συστήματος. Σκοπός του εργαλείου είναι να διατηρεί το ισοζύγιο ενέργειας προκειμένου να προσεγγίζει συνεχώς ένα καθολικό ελάχιστο λειτουργικό κόστος, μεγιστοποιώντας το κέρδος [4]. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν [εδώ](#).

4.1.2 DER_CAM

Το DER-CAM (Distributed Energy Resources Customer Adoption Model) είναι ένα μαθηματικό εργαλείο λήψης αποφάσεων κατά τον σχεδιασμό καταναμημένων συστημάτων. Όπως και το MARKAL, χρησιμοποιεί μια καθολική αντικειμενική συνάρτηση, που τροποποιείται από τον χρήστη κατάλληλα ώστε να βελτιστοποιεί την παραγωγή ενέργειας ενώ ελέγχει διαρκώς την οικονομική σκοπιά της επένδυσης. Καλύπτει μια εκτενή λίστα ανανεώσιμων και μη πηγών ενέργειας για το σχεδιασμό του καταναμημένου συστήματος και χρησιμοποιεί γραμμική βελτιστοποίηση πολλαπλών ακεραίων μεταβλητών (Multi-Integer Linear Optimization) για την εύρεση του καθολι-

κού βέλτιστου συστήματος. Στο λογισμικό αυτό, εξαιτίας της δομής του, δεν πραγματοποιούνται ετήσιες προσομοιώσεις του προτεινόμενου συστήματος αλλά η λειτουργία ελέγχεται σε επιλεγμένες ημέρες του έτους για μείωση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος [5]. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν [εδώ](#).

4.1.3 H2RES

Το λογισμικό H2RES αποτελεί ένα συνδυασμένο μαθηματικό εργαλείο σχεδιασμού καταναμεμένων συστημάτων ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Μέσω της χαρτογράφησης των αναγκών αλλά και των υποδομών (αν υπάρχουν), το μοντέλο προτείνει σενάρια συστημάτων (με το ενδεχόμενο αποθήκευσης και ελέγχου βιωσιμότητας των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν). Τα σενάρια αυτά εξετάζονται επαναληπτικά προκειμένου να βελτιωθεί η λειτουργική, η οικονομική αλλά και η περιβαλλοντική τους βιωσιμότητα. Το λογισμικό αυτό στηρίζεται στο μοντέλο ποιοτικής χαρτογράφησης RenewIslands, το οποίο δομείται ως ένα ενιαίο ερωτηματολόγιο κλίμακας Χαμηλού, Μέτριου και Υψηλού δυναμικού, με ερωτήσεις που αφορούν τις ανάγκες, την ύπαρξη υποδομών, την διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενεργειακού δυναμικού, την διαθεσιμότητα χώρου για επιπλέον υποδομές και αποθήκευση [6,7]. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν [εδώ](#).

4.1.4 EnergyPlan

Το EnergyPlan προσομοιώνει καταναμεμένα συστήματα ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Χρησιμοποιεί ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών παραγωγής και αποθήκευσης ανανεώσιμης αποκλειστικά ενέργειας. Η δομή του περιλαμβάνει την είσοδο από τον χρήστη των επιθυμητών τεχνολογιών, της εγκατεστημένης ισχύος τους αλλά και ωριαία και ετήσια προφίλ κατανάλωσης ενέργειας, με σκοπό τη διενέργεια ετήσιων υπολογισμών οικονομικής και τεχνικής βιωσιμότητας. Απαιτείται πρότερη γνώση των συστημάτων από τον σχεδιαστή καθώς κατά την είσοδο των επιθυμητών τεχνολογιών απαιτείται προεπιλογή της εγκατεστημένης ισχύος και της απόδοσης του εξοπλισμού υπό μερικό και πλήρες φορτίο (part-load performance) [6,8–12]. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν [εδώ](#).

4.1.5 E-GIS

Το E-GIS (Environment and energy Geographical Information System) είναι λογισμικό τρισδιάστατης απεικόνισης ορισμένης τοποθεσίας μελέτης περίπτωσης, στην οποία είναι δυνατή η εκτίμηση των δυνητικών φορτίων, η ενεργειακή ένταση αυτών, αλλά και η διενέργεια σεναρίων απόκρισης φορτίου. Το συγκεκριμένο εργαλείο, χρησιμοποιείται με ενσωμάτωση του GIS όπου δίνονται χωροταξικές πληροφορίες για την τοποθεσία της κοινότητας, είτε είναι συνοικία είτε είναι ολόκληρη αστική περιοχή, και το αποτέλεσμα του είναι η οπτικοποίηση της δυνητικής κοινότητας. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις σχεδιασμού είτε του συστήματος κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, είτε πρόβλεψης του φορτίου, είτε τοποθέτησης πηγών ανανεώσιμης ενέργειας, είτε αξιοποίησης του πρωτογενούς δυναμικού [13]. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν [εδώ](#).

4.1.6 SUNtool

Ένα εργαλείο για πρώιμο σχεδιασμό βιώσιμων κοινοτήτων είναι το SUNtool (Sustainable Urban Neighborhood modeling tool). Μέσω της βελτιστοποίησης της διάταξης των κτιρίων της κοινότητας αλλά και του μικροκλιματικού σχεδιασμού, υπολογίζονται τα φορτία θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρισμού. Ο σκοπός του παρόντος

εργαλείου είναι η παρουσίαση σχεδιαστικών προτάσεων, που στηρίζονται στην αρχιτεκτονική των κτιρίων που θα συμμετάσχουν στην ενεργειακή κοινότητα. Δεν δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην δομή, την ποσότητα ή την διάταξη των πηγών που θα εξυπηρετήσουν τα φορτία των κτιρίων, παρά επικεντρώνεται στην μετατόπιση φορτίων και στο σύστημα ζήτησης-απόκρισης (demand-response) [14]. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν [εδώ](#).

4.1.7 TRNSYS

Το λογισμικό TRNSYS (TRaNsient SYstems Simulations) είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης δυναμικών συστημάτων παραγωγής, αποθήκευσης αλλά και κατανάλωσης ενέργειας. Ο σκοπός του εργαλείου είναι να εκτιμήσει τη λειτουργία ενός συστήματος, πριν αυτό χρειαστεί να κατασκευαστεί. Έτσι υπάρχουν περιθώρια αξιολόγησης της λειτουργίας του, αποτίμησης των οικονομικών του χαρακτηριστικών και ελέγχου του ποσοστού κάλυψης φορτίου. Περιλαμβάνει μία εκτενή βιβλιοθήκη με τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής ενέργειας οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν σε ένα εύχρηστο περιβάλλον για τον χρήστη και να προσομοιωθεί η λειτουργία τους για τη διάρκεια ενός έτους. Το συγκεκριμένο λογισμικό εφαρμόζεται κατά κόρον εξαιτίας της λειτουργικότητάς του, της ευκρίνειας αποτελεσμάτων που προσφέρει αλλά και της προσαρμοστικότητάς του [15,16]. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν [εδώ](#).

4.1.8 EnergyPlus

Στην κατηγορία των λογισμικών προσομοίωσης κτιριακών δομών (δυναμικών μερών ενεργειακής κοινότητας), το EnergyPlus είναι από τα πλέον χρησιμοποιούμενα. Η αρχιτεκτονική του στηρίζει την μοντελοποίηση κτιρίων για υπολογισμό των θερμικών, ψυκτικών, ηλεκτρικών φορτίων αλλά και απαιτούμενων όγκων νερού. Προσφέρει προσομοιώσεις συνδυασμών ενεργειακών πηγών και της απόκρισης που έχουν τα κτίρια σε αυτά, προβάλλοντας σαν έξοδο αναλυτικές εκθέσεις επίδοσης του σχεδιαζόμενου συστήματος. Αποτελεί επίσης ένα εύχρηστο εργαλείο σχεδιασμού ενεργειακών συστημάτων (κοινοτήτων και μη) και τα αποτελέσματά του μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλα λογισμικά σαν συνέχεια της μελέτης [17]. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν [εδώ](#).

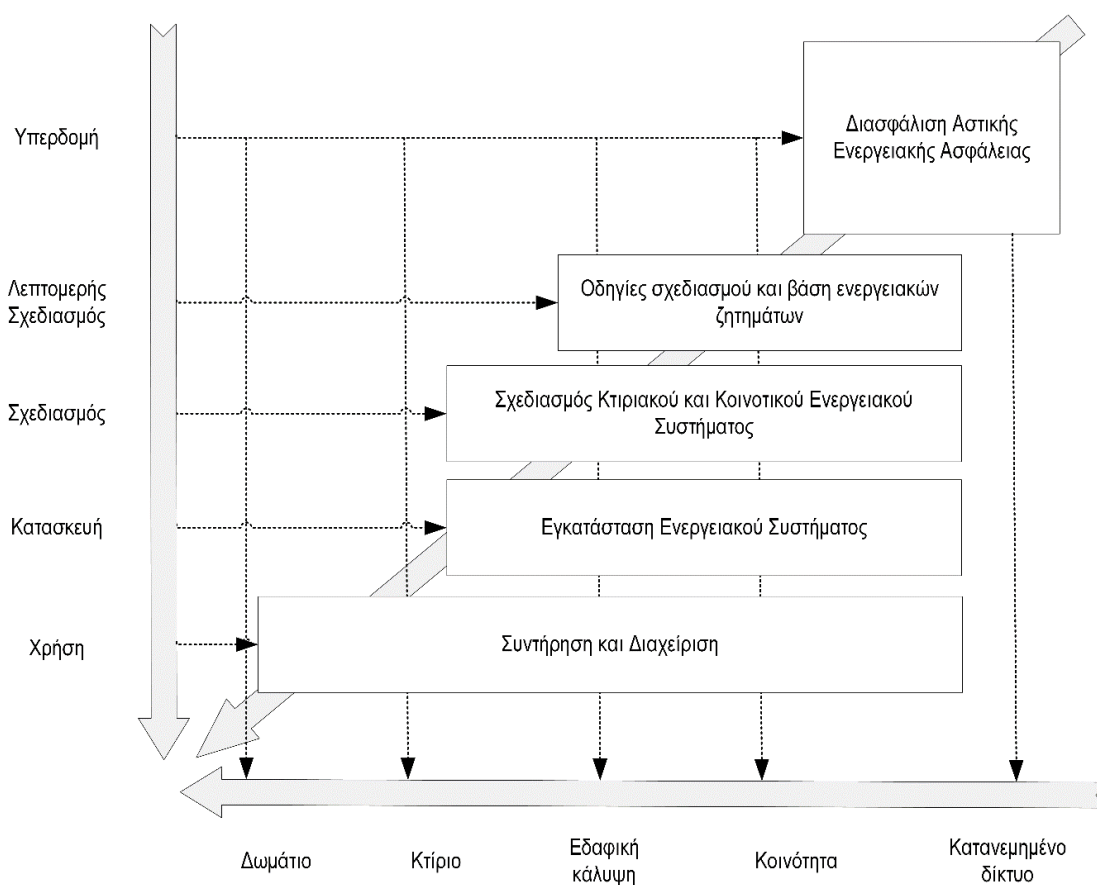
4.1.9 ESP-r

Το ESP-r είναι ένα λογισμικό κτιριακής προσομοίωσης φορτίων ηλεκτρικής και θερμικής κατανάλωσης ενέργειας. Η αρχιτεκτονική του είναι πολυδιάστατη, περιλαμβάνοντας στάδια σχεδιασμού κτιρίου, σχεδιασμού συστήματος κάλυψης αναγκών, λειτουργίας συστήματος με δυναμική προσομοίωση κατανομής φορτίου και περιβαλλοντικού αντικτύπου. Το κύριο χαρακτηριστικό που το διαφοροποιεί από τα προαναφερθέντα λογισμικά, είναι η δυνατότητα προσομοίωσης ροών των θερμών ρευστών μέσα στους χώρους για την κάλυψη των θερμικών φορτίων. Η χρήση του περιορίζεται στη δυναμικότητα της μεταβολής των συνθηκών εσωτερικών χώρων χωρίς ιδιαίτερη έμφαση στο σύστημα κάλυψης αναγκών. Υπάρχει περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων τεχνολογιών, χωρίς την προσθήκη σημαντικών ανανεώσιμων πηγών και με πλήρη απουσία αποθήκευσης ενέργειας [18]. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν [εδώ](#).

4.1.10 DeST

Το τελευταίο λογισμικό προς αναφορά, είναι ένα ακόμα λογισμικό προσομοίωσης κτιριακής συμπεριφοράς υπό θερμικά και ηλεκτρικά φορτία, το DeST που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο Tsinghua. Έχουν εκδοθεί

αρκετές αναβαθμίσεις του παρόντος λογισμικού που περιλαμβάνουν από απλή κατοικία έως ηλιακά κτίρια και πιστοποίηση ενεργειακής επάρκειας δημοσίων κτιρίων. Σκοπός του εργαλείου είναι να προσφέρει έναν κύκλο ανάδρασης στη σχεδιαστική διαδικασία του κτιρίου, με γνώμονα την ενεργειακή επάρκεια. Πραγματοποιεί δυναμικές προσομοιώσεις έτους όπως το ESP-r ή το TRNSYS και προσεγγίζει τη δυναμική ρευστών και τη διάχυσή τους στις διάφορες θερμικές ζώνες του κτιρίου. Η προσέγγιση του λογισμικού στο σύστημα κάλυψης ενέργειας περιορίζεται στην διαστασιολόγηση των τερματικών μονάδων εντός του κτιρίου. Περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν [εδώ](#). Όπως και στα περισσότερα από τα προαναφερθέντα λογισμικά, δεν συμπεριλαμβάνονται σενάρια αποθήκευσης ενέργειας με αποτέλεσμα να μειώνεται η σύγχρονη ερευνητική εφαρμογή του [19]. Η τυπική αρχιτεκτονική λογισμικών bottom-up που προαναφέρθηκαν συνοψίζονται στην Εικόνα 4. 2. Όλα τα παραπάνω εργαλεία λειτουργούν σε ένα ή περισσότερα επίπεδα της Εικόνα 4. 2, με το μεγαλύτερο μέρος τους να επικεντρώνεται στο πεδίο του Σχεδιασμού, Κατασκευής και Χρήσης.



Εικόνα 4. 2: Τυπική αρχιτεκτονική εργαλείων δημιουργίας ενεργειακών κοινοτήτων φιλοσοφίας bottom-up.

Όλα τα προαναφερθέντα λογισμικά επιδιώκουν να προβλέψουν σημαντικές παραμέτρους κατά τον σχεδιασμό ή τη λειτουργία δυναμικών συστημάτων, όπως αυτά των κτιρίων που καταναλώνουν θερμική/ψυκτική ενέργεια. Σκοπός τους είναι να ελαττώσουν τα πιθανά λάθη κατά τον σχεδιασμό, να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα υπερδιαστασιολόγησης εξοπλισμού και να καλύψουν το διαρκώς μεταβαλλόμενο φορτίο. Παρατηρείται μια σαφής επικέντρωση των διαθέσιμων εργαλείων προς την προσομοίωση κτιριακών δομών, της συμπεριφοράς που έχουν κατά τη θέρμανση ή ψύξη τους, με μόνο κάποια από αυτά να δίνουν την απαραίτητη έμφαση στο

σύστημα κάλυψης των αναγκών (H2RES, TRNSYS, EnergyPlan). Με την εξέλιξη όμως των τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής (βλ. Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.2), μεταβάλλεται σημαντικά και η τελική κατανάλωση ενέργειας [20]. Κρίνεται λοιπόν αναγκαία η ανάπτυξη εργαλείων που θα ενσωματώνουν τις νέες αυτές τεχνολογίες και θα αξιοποιούν το δυναμικό της εκάστοτε περιοχής. Με αυτόν τον τρόπο ο σχεδιασμός θα είναι εξατομικευμένος και προσαρμοσμένος στις ανάγκες της εκάστοτε ΕΚ.

Ο Πίνακας 4. 1 αποτυπώνει συγκεντρωτικά τα λογισμικά που προαναφέρθηκαν και αποτιμά τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους μέσω των ακόλουθων κατηγοριών:

Διαθεσιμότητα: Ο τρόπος με τον οποίο διατίθεται το λογισμικό/εργαλείο, είτε δωρεάν είτε επί πληρωμή. Αποτελεί σημαντικό δείκτη του εύρους χρήσης του, όπως π.χ. το λογισμικό TRNSYS που διατίθεται μέσω πληρωμής. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται ο αριθμός χρηστών/ερευνητών σημαντικά, αναλογικά και με τα άλλα λογισμικά.

Σύστημα Παραγωγής: Το κριτήριο αυτό αφορά την δυνατότητα των λογισμικών να συμπεριλάβουν στη διαδικασία σχεδιασμού το σύστημα παραγωγής θερμικής/ψυκτικής ενέργειας. Η πλειοψηφία αυτών, προσφέρει αυτήν τη δυνατότητα με αρκετούς περιορισμούς ως προς τον εξοπλισμό που διατίθεται μέσω ενσωματωμένων βιβλιοθηκών.

Ανανεώσιμες Πηγές: Η ικανοποίηση του κριτηρίου υποδεικνύει την υποστήριξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό. Προκειμένου να δημιουργηθούν δομές κοινοτήτων που εξυπηρετούν την ενεργειακή μετάβαση, είναι απαραίτητη η διάθεση ανανεώσιμων πηγών κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό.

Θερμική Ενέργεια: Το κριτήριο αυτό αφορά την δυνατότητα ελέγχου/υπολογισμού των θερμικών αναγκών της κοινότητας.

Ψυκτική Ενέργεια: Το κριτήριο αυτό αφορά την δυνατότητα ελέγχου/υπολογισμού των ψυκτικών αναγκών της κοινότητας.

Αποθήκευση Θερμικής/Ψυκτικής Ενέργειας: Τα λογισμικά που ικανοποιούν το κριτήριο αυτό, συμπεριλαμβάνουν τεχνολογίες αποθήκευσης θερμικής ή/και ψυκτικής ενέργειας. Βάσει της σημαντικότητας της αποθήκευσης ενέργειας για την ενεργειακή μετάβαση αλλά και την ενσωμάτωση των ενεργειακών κοινοτήτων στον ενεργειακό χάρτη (βλ. Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.3), το κριτήριο αποτελεί προαπαιτούμενο συστατικό των υφιστάμενων λογισμικών.

Προσομοίωση Συστήματος: Το κριτήριο αφορά την δυνατότητα των εργαλείων αυτών να εκτελούν προσομοιώσεις εντός καθοριζόμενων από τον χρήστη χρονικών διαστημάτων. Τυπικά αναφέρεται ότι στο χαρακτηριστικό αυτό ενσωματώνεται και το ελάχιστο διάστημα υπολογισμών, ανά ποιο χρονικό διάστημα πραγματοποιούνται οι διαφορικοί υπολογισμοί των εξισώσεων ενέργειας και ισορροπίας, που δίνουν και την ευκρίνεια αποτελεσμάτων. Συνήθως, τα σύγχρονα λογισμικά προσφέρουν δυνατότητες μέχρι και διαστημάτων 5 λεπτών/υπολογισμό, για ένα ολόκληρο έτος προσομοίωσης. Όσο μικρότερο το διάστημα υπολογισμών, και όσο πολυπλοκότερο το υπό σχεδίαση μοντέλο, τόσο μεγαλύτερος υπολογιστικός χρόνος απαιτείται για την περάτωση της προσομοίωσης. Αναφορικά, ενδεδειγμένη ευκρίνεια για προσομοίωση θερμικών μεγεθών προτείνεται αυτή των 30 λεπτών (εξαιτίας της δυναμικότητας των μεγεθών) ενώ για τα ηλεκτρικά μεγέθη προτείνεται ευκρίνεια μικρότερη των 15 λεπτών [21].

A priori (βασικό σενάριο): Η λατινική έκφραση που χρησιμοποιείται για το κριτήριο αυτό, υποδηλώνει την ανάγκη για ύπαρξη αρχικής υπόθεσης. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί οποιοδήποτε μαθηματικό πρόβλημα (σύστημα κάλυψης αναγκών στην προκειμένη) ο χρήστης προτρέπει να εισάγει μία περίπτωση βάσης από όπου το σύστημα, χτίζοντας πάνω σ' αυτήν, θα βελτιστοποιήσει ως προς την παραγόμενη ενέργεια, το οικονομικό πλάνο ή και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Αυτό προϋποθέτει γνώση του αντικειμένου σχεδιασμού από τον ερευνητή/σχεδιαστή/μηχανικό, ο οποίος πρέπει να κατανοεί την σημασία της βάσης που θα προτείνει, καθώς βάσει αυτής θα βελτιστοποιηθεί το υπό μελέτη σύστημα.

Βελτιστοποίηση Συστήματος: Η ύπαρξη του κριτηρίου στην προκειμένη, εξυπηρετεί στον εντοπισμό των λογισμικών που συμπεριλαμβάνουν κάποιου είδους αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Είτε αυτός θα έχει τη μορφή συνάρτησης γραμμικής βελτιστοποίησης, είτε κάποιου είδους γενετικό αλγόριθμο (συνήθως στα πιο σύγχρονα λογισμικά).

Απόδοση μερικής λειτουργίας (Part-Load Performance): Το τελευταίο κριτήριο αποτελεί επέκταση του συστήματος παραγωγής ενέργειας. Προκειμένου να προσεγγιστούν με ακρίβεια η απόδοση και η λειτουργία των συστημάτων παραγωγής θερμικής/ψυκτικής ενέργειας, λαμβάνονται υπόψη καμπύλες μερικής λειτουργίας. Οι καμπύλες αυτές είναι χαρακτηριστικές για την λειτουργία του εκάστοτε εξοπλισμού και αποτελούν μέτρο της συμβατότητάς του με τη διακύμανση του υπό κάλυψη φορτίου.

Από τον Πίνακα 4. 1 γίνεται κατανοητό ότι το κριτήριο *a priori* καλύπτεται από όλα τα διαθέσιμα λογισμικά. Αν και για τις ανάγκες σχεδίασης αποτελεί τυπική διαδικασία, εξαιτίας του χαρακτηριστικού αυτού η χρήση των εργαλείων αυτών περιορίζεται σε ειδικούς συστημάτων παραγωγής και διανομής ενέργειας [22]. Περιορίζεται έτσι το εύρος εφαρμογής και η χρήση αυτών ως εργαλεία ενίσχυσης της τοπικής αυτοδιοίκησης. Εφόσον απαιτούνται ολοκληρωμένα συστήματα σχεδιασμού ενεργειακών κοινοτήτων για να επιταχυνθεί η ενεργειακή μετάβαση, είναι θεμιτό να δημιουργηθούν εργαλεία που απαλείφουν την ανάγκη για *a priori* προσέγγιση. Επίσης, παρατηρείται ότι ένας μειωμένος αριθμός λογισμικών/εργαλείων απασχολούνται με τη δημιουργία του συστήματος παραγωγής ενέργειας, ενώ ακόμα μικρότερος περιλαμβάνει στη μελέτη σχεδιασμού συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό έγινε κατανοητό εν μέρει και κατά τη διάρκεια της βιβλιομετρικής ανάλυσης (βλ. Κεφάλαιο 3, Ενότητα 3.2 – Εικόνα 3.7, 3.8). Ακόμα μία σημαντική παρατήρηση επί του συγκεντρωτικού πίνακα, είναι η ελάχιστη αναφορά σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τεχνολογίες που τις εκμεταλλεύονται.

Συνοψίζοντας την αρχιτεκτονική bottom-up και πριν γίνει μετάβαση στην επόμενη ενότητα, είναι θεμιτό να αποδελτιωθεί το αποτέλεσμα της σύγκρισης των διαθέσιμων λογισμικών. Παρατηρείται συστηματική έλλειψη κατάλληλων εργαλείων σχεδιασμού συστημάτων παραγωγής, αποθήκευσης αλλά και διανομής θερμικής και ψυκτικής ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Σε αυτό προστίθεται και η απαραίτητη προϋπόθεση του *a priori* σεναρίου, όπου ο σχεδιαστής πρέπει να προεπιλέξει τον επιθυμητό εξοπλισμό του συστήματος παραγωγής, να διευκρινίσει την εγκατεστημένη ισχύ του έστω ως πρώτη προσέγγιση και να μοντελοποιήσει το σύστημα σε εποχικό χρονικό ορίζοντα. Αυτό δημιουργεί, όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφία, σημαντικό κενό ως προς τα εργαλεία σχεδιασμού, καθώς οι ανανεώσιμες πηγές, η συνεργασία τους με τον υφιστάμενο κτιριακό χάρτη, η αποθήκευση και η διανομή της ενέργειάς τους μέσω δικτύων τηλεθέρμανσης, είναι ένα εκ των σημαντικών βημάτων προς την ενεργειακή μετάβαση.

Πίνακας 4. 1: Συγκεντρωτικός πίνακας ευρέως χρησιμοποιούμενων εμπορικών λογισμικών για το σχεδιασμό και τη λειτουργία τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων.

Λογισμικό	Διαθεσιμότητα	Σύστημα Παραγωγής	Ανανεώσιμες Πηγές	Θερμική Ενέργεια	Ψυκτική Ενέργεια	Αποθήκευση Θερμικής Ψυκτικής	Δυναμική Προσομοίωση Συστήματος	A priori (βασικό σενάριο)	Βελτιστοποίηση Συστήματος	Part-load Performance (απόδοση μερικής λειτουργίας)
MARKAL/TIMES	Δωρεάν ²	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	-
DER-CAM	Δωρεάν	-	-	✓	-	-	-	✓	✓	-
H2RES	Δωρεάν	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	-
EnergyPlan	Δωρεάν	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
E-GIS	Επί πληρωμή	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-
SUNtool	Επί πληρωμή	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	-
TRNSYS	Επί πληρωμή	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EnergyPlus	Δωρεάν	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ESP-r	Δωρεάν	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	-
DEST	Δωρεάν	-	-	✓	✓	-	✓	✓	✓	-

² Τα λογισμικά που παραχωρούνται δωρεάν είναι προϊόντα που αναπτύχθηκαν σε εργαστήρια διαφορετικών πανεπιστημίων και έχουν δομηθεί για ερευνητικούς σκοπούς.

4.2 Πιστοποιήσεις Ενεργειακής Επάρκειας Κοινοτήτων - Top-down προσέγγιση

Εκτός της προσέγγισης bottom-up όπου το σύστημα ή το κτιριακό συγκρότημα σχεδιάζεται με γνώμονα την κάλυψη των αναγκών των κοινοτήτων, έχουν καθιερωθεί διεθνή πρότυπα αξιολόγησης κοινοτήτων. Με τον όρο αξιολόγηση καλύπτονται πρότυπα τα οποία κατατάσσουν τις ενεργειακές κοινότητες σε κλίμακες αποδοτικότητας (εκπομπή ρύπων, συνεισφορά ανανεώσιμων πηγών, εξάρτηση από κεντρικό πάροχο). Στην προσέγγιση αυτή, οι σχεδιαστές στηρίζονται σε λειτουργικά παραδείγματα κοινοτήτων και ακολουθούν εθνικές ή διεθνείς οδηγίες με σκοπό τη δημιουργία κοινοτήτων που να εντάσσονται στα πρότυπα. Τα καθιερωμένα πρότυπα στον τομέα αυτό είναι το BREEAM, το LEED_ND ενώ βρίσκεται σε προκαταρκτικό στάδιο η τυποποίηση προτύπου για κοινότητες στην Κίνα [1].

4.2.1 BREEAM Communities (BRE Environmental Assessment Method)

Το πρότυπο αυτό ξεκίνησε στις Ηνωμένες Πολιτείες και πλέον αποτελεί το πιο διαδεδομένο πρότυπο πιστοποίησης ενεργειακής κατανάλωσης κτιριακών δομών, είτε συμμετέχουν σε κοινότητες είτε σαν ανεξάρτητες δομές. Επικεντρώνεται σε μεγάλης κλίμακας δομές και αξιολογεί με κριτήρια οικονομικής, κοινωνικής αλλά και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Βαθμονομεί τις κοινότητες βάσει αυτών των κριτηρίων και προτείνει μεθόδους εξοικονόμησης θερμικής ενέργειας, φορτίων φωτισμού ή κλιματισμού κ.α. Ο κύριος άξονας δράσης του είναι η προτροπή που προσφέρει για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών προς αντικατάσταση εξοπλισμού που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα. Η βαθμολογία για την αξιολόγηση των κοινοτήτων είναι 10 πόντοι για κάθε 10% συνεισφορά από ανανεώσιμες πηγές και ανάλογα με ένα σενάριο βάσης, βαθμολογία από 1 μέχρι 10 για μείωση ρύπων από 10%-100% αντίστοιχα [23,24]. Περισσότερες πληροφορίες [εδώ](#).

4.2.2 LEED-ND (Leadership in Environmental and Energy Design – Neighborhood Development rating system)

Με αντίστοιχο σκοπό όπως και το BREEAM Communities, το πρότυπο LEED-ND αποτελεί σύμπραξη του Αμερικανικού Υπουργείου Πράσινου Αστικού Περιβάλλοντος και του Συμβουλίου της Νέας Αστικοποίησης και Υπεράσπισης Φυσικών Πόρων. Οι στόχοι που τίθενται για τις κοινότητες που αιτούνται του συγκεκριμένου προτύπου, αφορούν προτάσεις μείωσης των εκπεμπόμενων ρύπων του φορτίου θέρμανσης και ψύξης, της αχρησιμοποίητης ενέργειας (εισαγωγή μεθόδων αποθήκευσης στις προτάσεις), της βελτίωσης της αξιοποίησης της ενέργειας και της χρήσης συστημάτων ανάκτησης ενέργειας (είτε αποθήκευση είτε συμπαραγωγή για την κάλυψη φορτίου). Η βαθμολόγηση των κοινοτήτων γίνεται βάσει της διεύθυνσης των ανανεώσιμων πηγών (5%, 12,5% και 20% από 1, 2, και 3 πόντους αντίστοιχα) και βάσει της μείωσης των εκπομπών CO₂ με γνώμονα το πρότυπο ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2010 [25,26]. Περισσότερες πληροφορίες [εδώ](#).

Τα παραπάνω πρότυπα διευκολύνουν την σύγκριση μεταξύ διαφορετικών κοινοτήτων σε ζητήματα ενεργειακής κατανάλωσης αλλά και αντικτύπου εκπεμπόμενων ρύπων. Συνολικά, το BREEAM και το LEED-ND προτρέπουν τους μελετητές-μηχανικούς να προβούν σε ενεργειακά βιώσιμες λύσεις κατά το σχεδιασμό των κτιρίων αλλά και των συστημάτων κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, χωρίς όμως έμφαση και λεπτομέρεια στον σχεδιασμό. Πέραν των ενεργειακών στόχων, τα πρότυπα αυτά δεν συμπεριλαμβάνουν αξιοποίηση πρωτογενούς δυναμικού περιοχής ή ενσωμάτωση ορισμένων ανανεώσιμων τεχνολογιών στις προτεινόμενες λύσεις για τις κοινότητες. Ακόμα και στο στάδιο της βαθμολόγησης, δύο κοινότητες με ίδια βαθμολογία δεν είναι εφικτό να συγκριθούν

από τεχνικής απόψεως, καθώς δεν παρέχεται πληροφορία του μεγέθους φορτίου που καλύπτουν και των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν. Επομένως ακόμα και αν τους αποδίδεται ο ίδιος δείκτης βαθμολογίας, δεν μπορούν να συγκριθούν σε επίπεδο ενεργειακών λύσεων και αρχιτεκτονικής σχεδιασμού συστήματος. Η χρήση των προτύπων αυτών, αν και ολιστική, λόγω της επιφανειακής προσέγγισης στην ενεργειακή σκοπιά των ΕΚ, είναι σχετικά σύνθετη για να αποτελέσει καθολικό δείκτη ταξινόμησης της απόδοσης των κοινοτήτων, τουλάχιστον μέχρι να κανονικοποιηθούν τα αποτελέσματα και οι βαθμονομήσεις.

Συνοψίζοντας, είναι δόκιμο να αναφερθεί ότι αμφότερες οι αρχιτεκτονικές, bottom-up και top-down, προσφέρουν ωφέλιμη γνώση στους ερευνητές-μηχανικούς που σχεδιάζουν, λειτουργούν και συντηρούν συστήματα παραγωγής, διαχείρισης και διανομής ενέργειας σε ΕΚ. Το κοινό σημείο που έχουν αυτές όμως, είναι ο σχεδιασμός και διεκπεραίωσή τους από μηχανικούς-μελετητές που έχουν ορισμένη μόνο εμπειρία στον σχεδιασμό αντίστοιχων συστημάτων. Για τον σκοπό αυτό, ο σχεδιασμός ΕΚ ενισχύθηκε με την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων ή εργαλείων βελτιστοποίησης, που δομούνται και προγραμματίζονται από έμπειρους ερευνητές-μηχανικούς και προσφέρουν ένα προχωρημένο στάδιο ευελιξίας κατά τον σχεδιασμό. Αυτό είναι και το αντικείμενο της ακόλουθης ενότητας.

4.3 Μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης

Όπως αναφέρθηκε πρωτίστως στο παρόν εδάφιο, οι αρχιτεκτονικές που αναπτύσσονται από τους ερευνητές-μηχανικούς στον τομέα αυτό, ενδέχεται να εμπεριέχουν λάθη διαστασιολόγησης ή δυσκολίες επιλογής κάποιας από τις διαθέσιμες ημί-βέλτιστες λύσεις. Ο λόγος αυτής της σχετικής απροσδιοριστίας κατά τον αρχικό κυρίως σχεδιασμό, έγκειται στην εγγενή πολυπλοκότητα των συστημάτων αυτών καθώς οι μεταβλητές που τα συνθέτουν είναι αρκετές και ο τρόπος εντοπισμού ενιαίας βέλτιστης λύσης είναι υπολογιστικά πολύπλοκος. Προκειμένου να εξομαλυνθεί το φαινόμενο αυτό, κατασκευάζονται μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης τα οποία έχουν ως στόχο να μειώσουν τον χρόνο εντοπισμού βέλτιστης λύσης περιορίζοντάς την σε εφικτές βάσει κριτηρίων, επιλογές.

Τα μαθηματικά αυτά μοντέλα έχουν ως σκοπό τη βελτιστοποίηση (ή ελαχιστοποίηση) μιας επαρκώς ορισμένης αντικειμενικής συνάρτησης (συνάρτηση η οποία απαρτίζεται από τις φυσικές μεταβλητές-αγνώστους του προβλήματος) που συνδέει τις μεταβλητές αυτές με τον τρόπο που αλληλεπιδρούν στο πρόβλημα. Τα προβλήματα αυτού του τύπου δομούνται σε τρία επίπεδα: τη *σύνθεση*, που αποδελτιώνει τον τρόπο αλληλεπίδρασης των στοιχείων της αντικειμενικής συνάρτησης (φυσικοί μηχανισμοί ή τεχνητά μοντέλα), τον *σχεδιασμό*, που ορίζει τους τεχνικούς περιορισμούς και τις συνθήκες ροής πληροφορίας για τα στοιχεία της συνάρτησης και την *λειτουργία*, όπου τίθενται οι λειτουργικοί περιορισμοί και τα χαρακτηριστικά, δεδομένων των αρχικών συνθηκών [27]. Συνήθως, κατά τη διάρθρωση μαθηματικών μοντέλων βελτιστοποίησης συστημάτων παραγωγής ενέργειας, μπορεί να είναι απαραίτητες περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις, με διαφορετικό σκοπό. Αυτού του είδους τα προβλήματα ανήκουν στην κατηγορία της "Γραμμικής Βελτιστοποίησης Πολλαπλών Ακεραίων" (Multi-Integer Linear Programming-MILP) και αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής [28].

Τα περισσότερα από τα εμπορικά μοντέλα της Ενότητας 4.1 κάνουν χρήση μαθηματικών μοντέλων βελτιστοποίησης πολλαπλών ακεραίων για τον εντοπισμό μιας καθολικά βέλτιστης λύσης [17,18]. Το κοινό ζήτημα που ανακύπτει με μαθηματικές προσεγγίσεις πολλαπλών στόχων, είναι ότι οι προκύπτουσες λύσεις/η είναι ημί-

βέλτιστες των αναμενόμενων και όχι καθολικά βέλτιστες. Έτσι, δίνεται και πάλι στον ερευνητή-μηχανικό η δυνατότητα επιλογής μεταξύ αυτών των ημι-βέλτιστων³, με την επανεισαγωγή του περιθωρίου λανθασμένης επιλογής ή τουλάχιστον επιλογής κάποιας λύσης που δεν είναι η καθολικά βέλτιστη.

Έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές προσεγγίσεις κατηγοριοποίησης των μαθηματικών μοντέλων βελτιστοποίησης, που και πάλι κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι οι διάφορες μέθοδοι ανάπτυξης ευρετικών ή εξελικτικών αλγορίθμων, όπου το υπό διάρθρωση πρόβλημα δομείται από μηχανικές ή φυσικές παραμέτρους (όπως ενεργειακές και εξεργειακές αναλύσεις συστημάτων) και με μεθόδους μηχανικής μάθησης ή τεχνητής νοημοσύνης εντοπίζεται η βέλτιστη λύση. Ορισμένες ερευνητικές εργασίες που επιχειρηματολογούν και αναπτύσσονται στην κατηγορία αυτή είναι οι [29–34]. Η δεύτερη κατηγορία κάνει χρήση εμπειρικών και μηχανολογικών μοντέλων (πχ θερμοδυναμικής) με ορισμένους περιορισμούς, με σκοπό τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης. Παραδείγματα ερευνητικών εργασιών που κάνουν χρήση αυτής της κατηγορίας δόμησης μαθηματικών προβλημάτων είναι οι [35–39]. Τα καλώς ορισμένα όρια εξυπηρετούν στη μείωση των πιθανών επιλογών στις απολύτως εφαρμόσιμες. Η τρίτη κατηγορία είναι η χρήση υπερδομών (απεικονίσεις διαδικασιών-γράφων που οδηγούν σε συγκεκριμένο αποτέλεσμα πχ παραγωγή ενέργειας, που περιέχουν προκαθορισμένες διαδικασίες που συνδέονται με ορισμένο τρόπο και οδηγούν στο αποτέλεσμα) που μέσω αντικειμενικής συνάρτησης οδηγεί στη βέλτιστη διάταξη του υπό μελέτη συστήματος. Σχετικές ερευνητικές εργασίες στην κατηγορία αυτή είναι [22,39,40].

Η εφαρμογή οποιασδήποτε εκ των παραπάνω μαθηματικών προσεγγίσεων έχει αφαιρέσει σε ικανοποιητικό βαθμό την απροσδιοριστία και την αβεβαιότητα κατά τον σχεδιασμό. Η χρήση τους γίνεται τακτικότερη με αποτέλεσμα να βελτιώνεται τόσο η απόδοσή τους αλλά και η εφαρμοσιμότητά τους. Παρά όμως τα πλεονεκτήματά τους, τα μαθηματικά μοντέλα απαιτούν από τον ερευνητή μηχανικό εκτενή γνώση του υπό σχεδίαση συστήματος. Ακόμα και σε τελικά στάδια, σε περιπτώσεις πολλαπλών μεταβλητών και στόχων για τη βέλτιστη λύση (π.χ. ελαχιστοποίηση του κόστους παραγόμενης ενέργειας και βελτιστοποίηση της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές), ο ερευνητής-μηχανικός καλείται να επιλέξει μεταξύ ορισμένων ημί-βέλτιστων λύσεων [41]. Αυτό σε συνδυασμό με το προϋπάρχον ζήτημα των εμπορικών λογισμικών για προσφορά αρχικής συνθήκης κατά τον σχεδιασμό, δημιουργούν μία συστηματική έλλειψη διαθέσιμου εργαλείου σχεδιασμού συστημάτων ΕΚ. Για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, η συστηματική αυτή έλλειψη, βάσει των αποτελεσμάτων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, δημιουργεί τον χώρο για εισαγωγή ενός νέου εργαλείου σχεδιασμού, περισσότερο προσβάσιμου από χρήστες χαμηλότερης εμπειρίας στο σχεδιασμό.

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η προσπάθεια κάλυψης μέρους του “κενού” αυτού, εισάγοντας ένα υβριδικό μαθηματικό μοντέλο που οδηγεί σε μοναδική λύση χωρίς να υπεισέρχεται ανάγκη αγοράς κάποιου εμπορικού προϊόντος ή εκτενής γνώση των συνθηκών και της διαλειτουργικότητας των επιμέρους στοιχείων των συστημάτων παραγωγής, διαχείρισης και διανομής ενέργειας για της ΕΚ. Το προτεινόμενο μοντέλο χαρακτηρίζεται ως υβριδικό καθώς συνδυάζει υφιστάμενες μεθοδολογίες (όπως η RenewIslands και η Kaya Identity Methodology) αλλά και μαθηματικές προσεγγίσεις όπως είναι αυτή των υπερδομών (τρίτη κατηγορία) για τη

³ Οι σχεδόν βέλτιστες ή ημι-βέλτιστες λύσεις (μετάφραση βάσει του AI λεξικού DeepL) στον γραμμικό προγραμματισμό αναφέρονται σε λύσεις που βρίσκονται πολύ κοντά στη βέλτιστη λύση, αλλά όχι απαραίτητα στο παγκόσμιο βέλτιστο. Τέτοιες λύσεις έχουν τιμές αντικειμενικής συνάρτησης που βρίσκονται εντός μιας ορισμένης ανοχής από τη βέλτιστη λύση. Τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού πολλαπλών ακέραιων αριθμών περιλαμβάνουν ακέραιες μεταβλητές και γραμμικούς περιορισμούς στις μεταβλητές αυτές. Για την εύρεση σχεδόν βέλτιστων λύσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές. Σε αυτές περιλαμβάνονται ευρετικές τεχνικές, όπως η τοπική αναζήτηση και η αναζήτηση tabu, καθώς και αλγόριθμοι προσέγγισης και μεταερευτικές τεχνικές, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και η προσομοιωμένη απόπτηση [27]. Στη συνέχεια της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα γίνεται αναφορά σε αυτές ως ημί-βέλτιστες λύσεις.

δημιουργία ενός ιεραρχικού, ενιαίου, ολιστικού και καθολικού εργαλείου σχεδιασμού συστημάτων ΕΚ [7]. Το μοντέλο αυτό στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής ονομάζεται “Μεθοδολογία Ιεραρχικού Δομημένου Σχεδιασμού” (ΜΙΔΣ) ή «Hierarchically-Dependent Layering Methodology» (HDLM). Η συνοπτική περιγραφή του μοντέλου αυτού όσο αναφορά την αρχιτεκτονική σχεδιασμού του, παρουσιάζεται στην ενότητα που ακολουθεί ενώ η αναλυτική μαθηματική του αποτύπωση δίνεται στο 5^ο Κεφάλαιο.

4.4 Μεθοδολογία Ιεραρχικού Δομημένου Σχεδιασμού (ΜΙΔΣ) - Hierarchically-Dependent Layering Methodology» (HDLM)

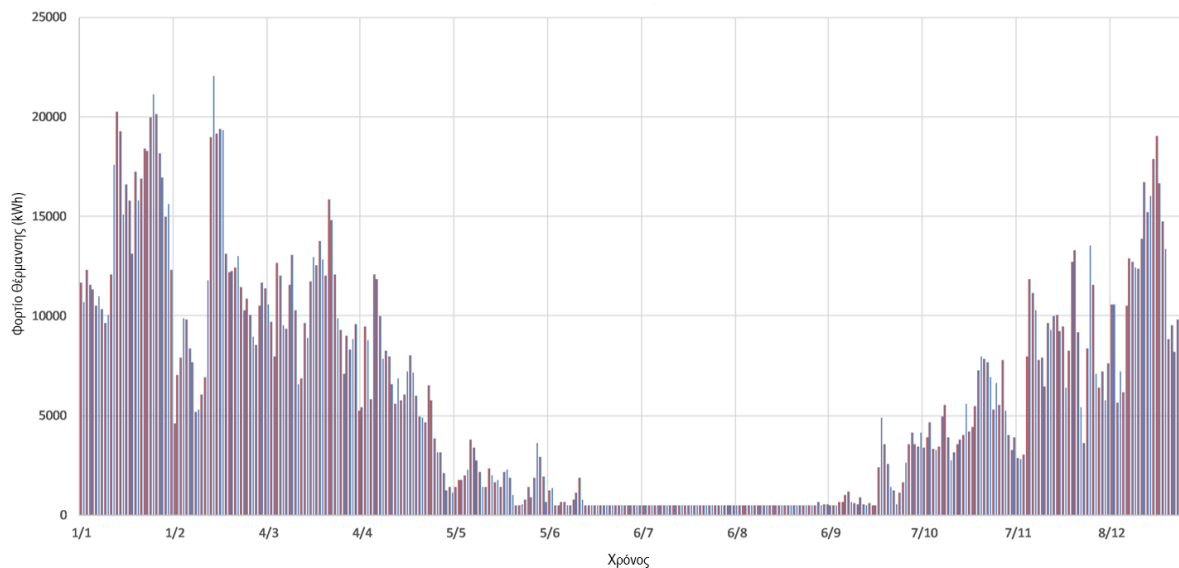
Στην προσπάθεια εύρεσης ενός εργαλείου εφαρμόσιμου σε κοινότητες διαφορετικής κλίμακας, τοποθετημένες σε διαφορετικά γεωγραφικά μήκη και πλάτη που επιδιώκουν να καλύψουν τις θερμικές και ψυκτικές τους ανάγκες ακολουθώντας πρότυπα σχεδιασμού όπως το LEEDs, ο συγγραφέας πραγματοποίησε εκτενή επισκόπηση των διαθέσιμων εργαλείων και προϊόντων, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.1 και 4.2 [42]. Η αδυναμία εντοπισμού ενός τέτοιου εργαλείου όμως, οδήγησε στην αναζήτηση μεθόδων επίλυσης του ζητήματος σχεδιασμού συστημάτων κάλυψης αναγκών θερμικών ΕΚ, μιας και μέρος της επιστημονικής κοινότητας συμφωνεί στην αναγκαιότητα ύπαρξης ενός τέτοιου [42–44]. Έτσι, ο συγγραφέας προχώρησε στο σχεδιασμό ενός μαθηματικού εργαλείου σχεδιασμού, το οποίο δομείται σε επίπεδα (layers), όπου κάθε επίπεδο αποτελεί και ένα διαφορετικό στάδιο σχεδιασμού. Το 1^ο Επίπεδο (1st Layer) αναφέρεται στον προσδιορισμό των ενεργειακών αναγκών των δυνητικών παραγωγαναλωτών της κοινότητας, το 2^ο Επίπεδο (2nd Layer) στον σχεδιασμό του συστήματος κάλυψης των αναγκών αυτών και στην τελική μηχανολογική του διάταξη, και το 3^ο Επίπεδο (3rd Layer) αφορά την οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου συστήματος (με δυνατότητα επιστροφής στο δεύτερο επίπεδο για αναδιάταξη και αναδιάρθρωση του συστήματος αν κριθεί απαραίτητο). Προκειμένου να αποτυπωθεί ο μαθηματικός ορισμός του εκάστοτε επιπέδου, έπρεπε να εκτιμηθεί η εφαρμοσιμότητα υφιστάμενων επιμέρους μαθηματικών προσεγγίσεων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν .

4.4.1 Πρώτο επίπεδο σχεδιασμού (1st Layer) – Χαρτογράφηση αναγκών παραγωγαναλωτών

Μια πρώτη προσέγγιση για το 1^ο Επίπεδο οδήγησε στον εντοπισμό της μεθοδολογίας “RenewIslands” που έχει καθολική εφαρμογή σε διαφορετικές περιοχές και εφαρμογές [7]. Η μεθοδολογία αυτή όμως έχει ποιοτικό χαρακτήρα, όπου ο μελετητής βαθμονομεί με τριβάθμια κλίμακα διαφορετικές σχεδιαστικές προοπτικές για την περιοχή, όπως την ύπαρξη αιολικού ή ηλιακού δυναμικού, την ύπαρξη ή όχι δικτύου μεταφοράς και αποθήκευσης ενέργειας, του μεγέθους του φορτίου των καταναλωτών κ.α. [7]. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά μεταβλητών ποσοτικού χαρακτήρα όμως, έχουν την εγγενή απροσδιοριστία της ασάφειας η οποία δεν είναι εκμεταλλεύσιμη από τον μελετητή [45,46]. Η Εικόνα 4. 3 απεικονίζει μια τυπική διακύμανση φορτίου θέρμανσης, που είναι και προαπαιτούμενο κατά τον σχεδιασμό.

Μεταβλητές όπως η διακύμανση φορτίου θέρμανσης και ψύξης είναι απαραίτητες κατά τον αρχικό σχεδιασμό. Συνήθως, οι καταναλωτές δεν έχουν την απαιτούμενη ποσοτική πληροφορία σχετικά με το φορτίο τους, είτε θερμικό είτε ψυκτικό. Αυτό κάνει δύσκολη την αρχική εκτίμηση για τον μελετητή αφού πρέπει να εκπονηθούν κτιριακές αναλύσεις της κατασκευής των υπό μελέτη κτιρίων που θα συμμετάσχουν στην δυνητική ΕΚ για να εξακριβωθεί το φορτίο [47]. Η μέθοδος RenewIslands παρακάμπτει το ζήτημα αυτό εισάγοντας ποιοτική προσέγγιση στην αποτύπωση του φορτίου, έτσι ώστε ο μελετητής να έχει διαθέσιμη μια πρώτη άποψη των αναγκών [48]. Όμως, δεν παρέχει μία ενιαία άποψη για τις ποιοτικές κλίμακες που χρησιμοποιεί, με αποτέλεσμα την προαναφερθείσα ασάφεια. Επομένως, είναι θεμιτό να ισοσκελιστεί η ποιοτική πληροφορία του “Μικρού”, “Μεσαίου” ή

“Μεγάλου” φορτίου με το ακριβές ποσοτικό ανάλογο. Η αντιμετάθεση αυτή θα πρέπει να είναι επαρκώς ορισμένη μαθηματικά, προκειμένου να μην χάνεται πληροφορία κατά τη μετάβαση από το ποιοτικό στο ποσοτικό, και το αντίστροφο [49].



Εικόνα 4. 3: Τυπικό διάγραμμα διακύμανσης ετήσιου φορτίου θέρμανσης μεγάλου κτιριακού συγκροτήματος κατοικιών.

Αυτή είναι και η προσπάθεια του 1^{ου} Επιπέδου σχεδιασμού, όπου προσεγγίζεται συστηματική μεθοδολογία εξακρίβωσης των ποσοτικών χαρακτηριστικών που υπολογίζονται από θερμικές μελέτες, και η μεταφορά τους σε αξιοποιήσιμη ποιοτική πληροφορία στα δεδομένα του εμπεριστατωμένου RenewIslands. Με την εξακρίβωση αυτή, είναι γνωστό το φορτίο βάσης και είναι τώρα δυνατή η συνέχεια στην αρχιτεκτονική του συστήματος που θα καλύψει το φορτίο αυτό, που είναι το αντικείμενο του δευτέρου επιπέδου [50]. Αναλυτικά, το 1^ο Επίπεδο θα παρουσιαστεί στο 5^ο Κεφάλαιο.

4.4.2 Δεύτερο επίπεδο σχεδιασμού (2nd Layer) – Σχεδιασμός υπερσυστήματος

Μετά τον προσδιορισμό του φορτίου βάσης, το υπό ανάπτυξη εργαλείο προσεγγίζει την αρχιτεκτονική του δυναμικού συστήματος κάλυψης του φορτίου. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σύστημα 100% ανανεώσιμης ενέργειας, όπως είναι και η θεώρηση της επιστημονικής κοινότητας, προαπαιτείται η διερεύνηση του πρωτογενούς δυναμικού της περιοχής που ενδιαφέρεται να συγκροτήσει ΕΚ. Ανάλογα με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της εκάστοτε περιοχής, αλλά και της γεωμορφολογίας του σημείου, διαφορετικά δυναμικά ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί να είναι διαθέσιμα [47]. Αυτό είναι και το επόμενο μέρος και της μεθοδολογίας RenewIslands που συνεισφέρει στο σημείο αυτό στο υπό ανάπτυξη εργαλείο, προσφέροντας την ποιοτική απεικόνιση του δυναμικού με τριβάθμια κλίμακα [50–52].

Αφού επιλεγθούν οι τεχνολογίες που θα αξιοποιούν το δυναμικό αυτό, σειρά έχει ο σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής διασύνδεσής τους αλλά και η επιλογή του μείγματος εγκατεστημένης ισχύος για καθεμία από αυτές. Τα λογισμικά που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 4.1 Εμπορικά Λογισμικά – Bottom up προσέγγιση, στο σημείο της επιλογής διασύνδεσης, δεν προσφέρουν πληροφορία στον μελετητή. Πρέπει να προϋπάρχει γνώση των μηχανισμών συνεργασίας πολυενεργειακών συστημάτων, ώστε όταν συνδεθούν κατάλληλα να δημιουργούν ένα υβριδικό σύστημα που θα καλύπτει τις ανάγκες και θα είναι λειτουργικό και οικονομικά βιώσιμο. Όπως προαναφέρθηκε όμως, τα προβλήματα αυτά είναι πολυμεταβλητά, με αποτέλεσμα ο μελετητής να πρέπει να κάνει αρκετές δοκιμές μέχρι να φτάσει στην βέλτιστη διασύνδεση και επιλογή μείγματος εγκατεστημένων ισχύων.

Το εργαλείο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, κάνει χρήση των υπερδομών με διαφορετική αρχική προσέγγιση. Όπως θα αναλυθεί λεπτομερώς στο επόμενο Κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5), ο μελετητής αποφασίζει μέσω λογικής πυλών (Logic Gates) για το ποιοι εξοπλισμοί θα συνεργαστούν για να καλύψουν το φορτίο (λύνοντας σε πολυενεργειακά συστήματα, το ζήτημα της προτεραιότητας παραγωγής κάποιου εξοπλισμού). Συμπληρώνοντας έτσι ένα βασικό πίνακα Αληθείας, κατασκευάζεται η πρώτη βασική Υπερδομή μέγιστης παραγωγής, από όπου θα προκύψει και το τελικό σύστημα.

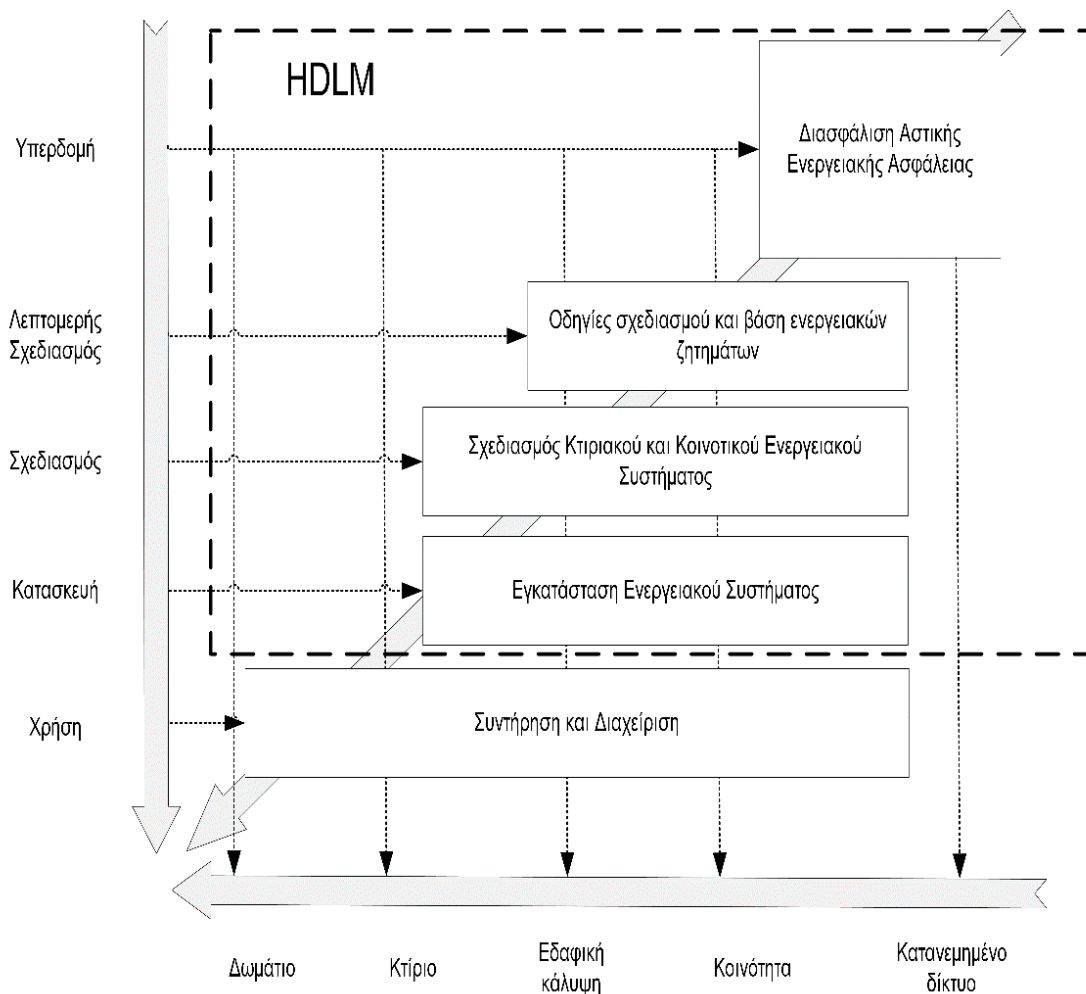
4.4.3 Τρίτο επίπεδο σχεδιασμού (3rd Layer) – Οικονομική αποτίμηση υπερσυστήματος

Για το τρίτο και τελευταίο επίπεδο, το παρόν εργαλείο χρησιμοποιεί βασικούς οικονομικούς δείκτες για να αποτιμήσει τη βιωσιμότητα του συστήματος που προτείνεται στο 2^ο Επίπεδο. Οι βασικότεροι δείκτες οικονομικών μελετών είναι, όπως θα αναλυθεί στο 5^ο Κεφάλαιο, είναι το αρχικό κόστος επένδυσης για το σύστημα, ή Κόστος Συστήματος (Capital Expenditures – CAPEX), το Κόστος Λειτουργίας (Operational Expenditures - OPEX) και το Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας, είτε θερμικής είτε ψυκτικής (Levelized Cost of Energy – LCoE, Levelized Cost of Heating – LCoH, Levelized Cost of Cooling – LCoC), οι αποσβέσεις (Return of Investment – ROI) και η περίοδος αποπληρωμής (Payback Period – PP).

Το OPEX είναι σημαντικό καθόλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος, καθώς από αυτό εξαρτάται η ετήσια βιωσιμότητα του συστήματος. Κατά βάση, τα συστήματα ανανεώσιμης ενέργειας έχουν χαμηλά κόστη λειτουργίας καθώς η συντήρησή τους και κάποιες ηλεκτρικές ιδιοκαταναλώσεις είναι τα βασικότερα έξοδα. Σε αντιδιαστολή, τα συμβατικά συστήματα συνυπολογίζουν στον δείκτη αυτό και τα κυμαινόμενα ετήσια έξοδα σε καύσιμα για την παραγωγή θερμότητας ή το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή ψύξης. Επομένως, στα 100% ανανεώσιμα συστήματα (συμπεριλαμβανομένων των λεβήτων βιομάζας), το OPEX αποσκοπεί στην ετήσια αξιολόγηση βιωσιμότητας για το σύστημα ενώ σπάνια αποτελεί κριτήριο αλλαγής του προτεινόμενου συστήματος. Σε ότι αφορά το LCoE, αποτελεί τον δείκτη με σημαντικό αντίκτυπο για την επιλογή τελικά ή όχι του συστήματος. Βάσει της παρούσας ενεργειακής κρίσης, το LCoE ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και των συμβατικών συστημάτων αυξήθηκε κατακόρυφα και αποτελεί μαζί με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, ακόμα έναν λόγο για επιτάχυνση της μετάβασης σε περισσότερο βιώσιμα συστήματα. Η **Error! Reference source not found.** παρουσιάζει την άποψη που αποδόθηκε στην Εικόνα 4. 2 για το προτεινόμενο εργαλείο HDLM.

Σύνοψη

Στο παρόν Κεφάλαιο έγινε εκτενής αναφορά στα διαθέσιμα εργαλεία σχεδιασμού ΕΚ. Τα εργαλεία αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, βάσει της προσέγγισης που έχουν στον σχεδιασμό, τα bottom-up και τα top-down. Αυτά μπορεί να είναι είτε εμπορικά προϊόντα, είτε διαθέσιμα άνευ κόστους για ερευνητικούς σκοπούς ενώ υπάρχουν και διεθνή πρότυπα διάρθρωσης ΕΚ, όπως το BREEAM και το LEEDs. Η αρχιτεκτονική σχεδιασμού τους όμως, αναφέρεται σε ερευνητές-μηχανικούς που έχουν εμπειρία στο σχεδιασμό και πρέπει είτε να επιλέξουν τις κατάλληλες τεχνολογίες και να τις συνδυάσουν, είτε να διαρθρώσουν μαθηματικά μοντέλα, που θα βελτιστοποιηθούν μέσω αντικειμενικών συναρτήσεων. Η αλληλεπίδραση μεταξύ σχεδιαζόμενου συστήματος και μελετητή είναι και ένα από τα σημαντικά ζητήματα στην προσπάθεια για ενεργειακή μετάβαση [6].



Εικόνα 4. 4: Αρχιτεκτονική σχεδιασμού προτεινόμενου εργαλείου - HDLM (bottom-up) με τα στάδια τα οποία περιλαμβάνει.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε και προτείνεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αποτελεί μια ενιαία, ιεραρχική μέθοδο σχεδιασμού υπερσυστημάτων (bottom-up αρχιτεκτονικής) ΕΚ, που προσεγγίζει όλες τις πτυχές της αρχιτεκτονικής εμπορικών λογισμικών. Η καινοτομία του εργαλείου είναι η χαμηλή απαίτηση για επί τούτω (ad hoc) εισαγωγή δεδομένων από πλευράς μελετητή, στην δημιουργία και ολοκλήρωση της δομής του δυνητικού συστήματος, καθώς και η ολοκληρωμένη τελική πρόταση για το σύστημα. Η πρόταση αυτή διευκολύνει τον αναλυτικότερο τεχνοοικονομικό έλεγχο του σχεδιαζόμενου συστήματος και ενισχύει την δυνατότητα ενσωμάτωσης θεωρίας ελέγχου (control strategy) αλλά και διερεύνησης εναλλακτικών σεναρίων. Η βασική αυτή διαφορά, μαζί με την καθολικότητα (universality) της δυνατότητας δημιουργίας ΕΚ οπουδήποτε και σε οποιαδήποτε κλίμακα, απαντά μερικώς σε σημαντικό τμήμα του εντοπισμένου ερευνητικού κενού. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα παρουσιαστεί αναλυτικά το μοντέλο που αναπτύχθηκε (HDLM) με το μαθηματικό του υπόβαθρο.

Βιβλιογραφία

1. Huang, Z.; Yu, H.; Peng, Z.; Zhao, M. Methods and Tools for Community Energy Planning: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2015**, *42*, 1335–1348, doi:10.1016/J.RSER.2014.11.042.

2. Angelis-Dimakis, A.; Biberacher, M.; Dominguez, J.; Fiorese, G.; Gadocha, S.; Gnansounou, E.; Guariso, G.; Kartalidis, A.; Panichelli, L.; Pinedo, I.; et al. Methods and Tools to Evaluate the Availability of Renewable Energy Sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2011**, *15*, 1182–1200, doi:10.1016/J.RSER.2010.09.049.
3. Coignard, J.; Janvier, M.; Debusschere, V.; Moreau, G.; Chollet, S.; Caire, R. Evaluating Forecasting Methods in the Context of Local Energy Communities. **2021**, doi:10.1016/j.ijepes.2021.106956.
4. Loulou, R.; Goldstein, G.; Noble, K. *Energy Technology Systems Analysis Programme Documentation for the MARKAL Family of Models*; 2004;
5. Stadler, M.; Marnay, C.; Deforest, N.; Eto, J.; Cardoso, G.; Mammoli, A.; Barsun, H.; Burnett, R.; Klapp, D.; Lai, J.; et al. Web-Based Economic and Environmental Optimization of Microgrids.; 2012.
6. Krajačić, G.; Duić, N.; Carvalho, M. da G. H2RES, Energy Planning Tool for Island Energy Systems – The Case of the Island of Mljet. *Int J Hydrogen Energy* **2009**, *34*, 7015–7026, doi:10.1016/J.IJHYDENE.2008.12.054.
7. Duić, N.; Krajačić, G.; da Graça Carvalho, M. RenewIslands Methodology for Sustainable Energy and Resource Planning for Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2008**, *12*, 1032–1062, doi:10.1016/J.RSER.2006.10.015.
8. Lund, H. Renewable Energy Strategies for Sustainable Development. *Energy* **2007**, *32*, 912–919, doi:10.1016/J.ENERGY.2006.10.017.
9. Henric Lund *Renewable Energy Systems—the Choice and Modeling of 100%renewable Solutions.*; 2010; ISBN 978 0 12 375028 0.
10. Connolly, D.; Lund, H.; Mathiesen, B. v.; Leahy, M. A Review of Computer Tools for Analysing the Integration of Renewable Energy into Various Energy Systems. *Appl Energy* **2010**, *87*, 1059–1082, doi:10.1016/J.APENERGY.2009.09.026.
11. Gašparović, G.; Krajačić, G.; Duić, N.; Baotić, M. New Energy Planning Software for Analysis of Island Energy Systems and Microgrid Operations - H2RES Software as a Tool to 100% Renewable Energy System. *Computer-aided chemical engineering* **2014**, doi:10.1016/B978-0-444-63455-9.50144-6.
12. Østergaard, P.A. Reviewing EnergyPLAN Simulations and Performance Indicator Applications in EnergyPLAN Simulations. *Appl Energy* **2015**, *154*, 921–933, doi:10.1016/J.APENERGY.2015.05.086.
13. Yeo, I.A.; Yoon, S.H.; Yee, J.J. Development of an Environment and Energy Geographical Information System (E-GIS) Construction Model to Support Environmentally Friendly Urban Planning. *Appl Energy* **2013**, *104*, 723–739, doi:10.1016/J.APENERGY.2012.11.053.
14. Robinson, D.; Campbell, N.; Gaiser, W.; Kabel, K.; Le-Mouel, A.; Morel, N.; Page, J.; Stankovic, S.; Stone, A. SUNtool – A New Modelling Paradigm for Simulating and Optimising Urban Sustainability. *Solar Energy* **2007**, *81*, 1196–1211, doi:10.1016/J.SOLENER.2007.06.002.
15. Visek, E.; Mazzrella, L.; Motta, M. Performance Analysis of a Solar Cooling System Using Self Tuning Fuzzy-PID Control with TRNSYS. In *Proceedings of the Energy Procedia*; 2014; Vol. 57, pp. 2609–2618.
16. S.A. Klein; J.A. Duffie; J.C.Mitchell; J.P. Kummer; J.W. Thornton; D.E. Bradley; D.A. Arias.; W.A. Beckman; N.A. Duffie; J.E. Braun; et al. TRNSYS 16: A TRaNsient SYstem Simulation Program 2006.
17. U.S. Department of Energy *EnergyPlus™ Version 22.2.0 Documentation*; Illinois, California, 2022;
18. William, J.; Arch, M. *Strategies for Deploying Virtual Representations of the Built Environment (Aka The ESP-r Cookbook)*; Glasgow, UK, 2018;

19. Yan, D.; Xia, J.; Tang, W.; Song, F.; Zhang, X.; Jiang, Y. DeST — An Integrated Building Simulation Toolkit Part I: Fundamentals. *Build Simul* **2008**, *1*, 95–110, doi:10.1007/s12273-008-8118-8.
20. Frederiksen, Svend.; Werner, Sven. District Heating and Cooling. **2013**.
21. Bahramian, F.; Akbari, A.; Nabavi, M.; Esfandi, S.; Naeiji, E.; Issakhov, A. Design and Tri-Objective Optimization of an Energy Plant Integrated with near-Zero Energy Building Including Energy Storage: An Application of Dynamic Simulation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **2021**, *47*, doi:10.1016/j.seta.2021.101419.
22. Voll, P.; Klaffke, C.; Hennen, M.; Bardow, A. Automated Superstructure-Based Synthesis and Optimization of Distributed Energy Supply Systems. *Energy* **2013**, *50*, 374–388, doi:10.1016/J.ENERGY.2012.10.045.
23. Umdu, D.C.; Alakavuk, E.; Koyuncu, A. BREEAM Communities: Criteria Aim, Status, Strengths and Weaknesses. In Proceedings of the Proceedings - 2021 International Conference on Digital Age and Technological Advances for Sustainable Development, ICDATA 2021; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., June 1 2021; pp. 208–215.
24. BRE Global Ltd. *BREEAM In-Use International Technical Manual: Commercial Version 6.0.0*; 2020;
25. Created by the Congress for the New Urbanism, N.R.D.C. and the U.S.G.B.C. (Updated J. 2014) *LEED 2009 for Neighborhood Development Rating System*; 2014;
26. Halverson, M.; Rosenberg, M.; Liu, B. *ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2010 Final Determination Quantitative Analysis*; 2010;
27. Frangopoulos, C.A.; von Spakovsky, M.R.; Sciubba, E.; di Roma, U.; Sapienza, L. *A Brief Review of Methods for the Design and Synthesis Optimization of Energy Systems*; 2002; Vol. 5;.
28. Papatsounis, A.G.; Lymperopoulos, K.; Botsaris, P.N.; Tsaka, S. Preliminary Results of a Closed-Loop Sea Water Heat Pump: Application in Large-Scale Elderly Home Center for Heating and Cooling Load Coverage. *Applied Sciences* **2022**.
29. Kallert, A.; Schmidt, D.; Bläse, T. Exergy-Based Analysis of Renewable Multi-Generation Units for Small Scale Low Temperature District Heating Supply. *Energy Procedia* **2017**, *116*, 13–25.
30. Miari Naeimi, M.; Eftekhari Yazdi, M.; Reza Salehi, G. Energy, Exergy, Exergoeconomic and Exergoenvironmental Analysis and Optimization of a Solar Hybrid CCHP System. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* **2019**, doi:10.1080/15567036.2019.1702122.
31. Kilkış, Ş. Exergy Transition Planning for Net-Zero Districts. *Energy* **2015**, *92*, 515–531, doi:10.1016/J.ENERGY.2015.02.009.
32. Miari Naeimi, M.; Eftekhari Yazdi, M.; Salehi, G.R. Advanced Exergy, Exergoeconomic, Exergoenvironmental Evaluation of a Solar Hybrid Trigeneration System Based on Solar Gas Turbine for an Office Building. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME* **2021**, *143*, doi:10.1115/1.4047756.
33. Shi, Z.; Li, X.; Hu, S. *Modeling and Exergy Analysis of Seawater Source Heat Pump System*; 2011; Vol. 291–294; ISBN 9783037851937.
34. Kilkış, Ş. Energy System Analysis of a Pilot Net-Zero Exergy District. *Energy Convers Manag* **2014**, *87*, 1077–1092.
35. Alturki, M.; Khodaei, A.; Paaso, A.; Bahramirad, S. Optimization-Based Distribution Grid Hosting Capacity Calculations. *Appl Energy* **2018**, doi:10.1016/j.apenergy.2017.10.127.
36. Voll, P. *Automated Optimization-Based Synthesis of Distributed Energy Supply Systems*; ISBN 9783861304746.
37. Sheyang, X.- *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*;

38. Calise, F.; D'Accadia, M.D.; Vanoli, L. Thermoeconomic Optimization of Solar Heating and Cooling Systems. *Energy Convers Manag* **2011**, *52*, 1562–1573, doi:10.1016/j.enconman.2010.10.025.
39. Engineering, C.; Vol ; D'isanto, M.; Manenti, F.; Grottoli, M.G.; Altavilla, M.; Marco, D. di Online Superstructure Optimization for Energy Saving of an Industrial Gas Distribution System.; 2012; Vol. 29.
40. Voll, P.; Lampe, M.; Wrobel, G.; Bardow, A. Superstructure-Free Synthesis and Optimization of Distributed Industrial Energy Supply Systems. *Energy* **2012**, doi:10.1016/J.ENERGY.2012.01.041.
41. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Katsavounis, S. Improved Structural Local Thermal Energy Planning Based on Prosumer Profile: Part A. *Applied Sciences (Switzerland)* **2022**, *12*, doi:10.3390/app12115355.
42. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Katsavounis, S. Thermal/Cooling Energy on Local Energy Communities: A Critical Review. *Energies (Basel)* **2022**, *15*.
43. Almeida, V.A.C.C.; Rabelo, R. de A.L.; Carvalho, A.; Rodrigues, J.J.P.C.; Solic, P. Aligning the Interests of Prosumers and Utilities through a Two-Step Demand-Response Approach. *J Clean Prod* **2021**, *323*, doi:10.1016/j.jclepro.2021.128993.
44. Caballero, V.; Vernet, D.; Zaballos, A. A Heuristic to Create Prosumer Community Groups in the Social Internet of Energy., doi:10.3390/s20133704.
45. Mancarella, P. MES (Multi-Energy Systems): An Overview of Concepts and Evaluation Models. *Energy* **2014**, *65*, 1–17, doi:10.1016/J.ENERGY.2013.10.041.
46. Voll, P.; Jennings, M.; Hennen, M.; Shah, N.; Bardow, A. The Optimum Is Not Enough: A near-Optimal Solution Paradigm for Energy Systems Synthesis. *Energy* **2015**, *82*, 446–456, doi:10.1016/J.ENERGY.2015.01.055.
47. Droutsas, K.G.; Kontoyiannidis, S.; Dascalaki, E.G.; Balaras, C.A. Mapping the Energy Performance of Hellenic Residential Buildings from EPC (Energy Performance Certificate) Data. *Energy* **2016**, *98*, 284–295, doi:10.1016/j.energy.2015.12.137.
48. Duić, N.; Krajačić, G.; da Graça Carvalho, M. RenewIslands Methodology for Sustainable Energy and Resource Planning for Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2008**, *12*, 1032–1062.
49. Wu, Y.; Xu, C.; Zhang, T. Evaluation of Renewable Power Sources Using a Fuzzy MCDM Based on Cumulative Prospect Theory: A Case in China. *Energy* **2018**, *147*, 1227–1239, doi:10.1016/J.ENERGY.2018.01.115.
50. Cao, X.; Dai, X.; Liu, J. Building Energy-Consumption Status Worldwide and the State-of-the-Art Technologies for Zero-Energy Buildings during the Past Decade. *Energy Build* **2016**, *128*, 198–213, doi:10.1016/J.ENBUILD.2016.06.089.
51. Rae, C.; Bradley, F. Energy Autonomy in Sustainable Communities—A Review of Key Issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2012**, *16*, 6497–6506, doi:10.1016/J.RSER.2012.08.002.
52. Dominković, D.F.; Stunjek, G.; Blanco, I.; Madsen, H.; Krajačić, G. Technical, Economic and Environmental Optimization of District Heating Expansion in an Urban Agglomeration. *Energy* **2020**, *197*, 117243, doi:10.1016/J.ENERGY.2020.117243.
53. Tao, M.; Zhenpeng, L.; Jiaxin, Z. Photovoltaic Panel Integrated with Phase Change Materials (PV-PCM): Technology Overview and Materials Selection. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2019**, *116*, doi:10.1016/j.rser.2019.109406.
54. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N. Improved Structural Local Thermal Energy Planning Based on Prosumer Profile: Part B. *Energies (Basel)* **2022**, *15*, 7708, doi:10.3390/en15207708.

Κεφάλαιο 5: Μεθοδολογία Ιεραρχικού Δομημένου Σχεδιασμού (ΜΙΔΣ) – Hierarchically-Dependent Layering Methodology (HDLM)

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	80
5.1 HDLM – 1 ^ο Επίπεδο: Ομαδοποίηση και Κατηγοριοποίηση Παραγωγαναλωτών.....	81
5.1.1 RenewIslands.....	83
5.1.2 Kaya Identity Methodology (KIM).....	84
5.1.3 Συνδυασμός υφιστάμενων μεθόδων	84
5.2 HDLM – 2 ^ο Επίπεδο: Σχεδιασμός Υπερδομής Κάλυψης Ενεργειακών Αναγκών	90
5.2.1 Πολυκριτήρια Ανάλυση	91
5.2.2 Επιλογή τεχνολογίας	94
5.2.3 Πίνακας αληθείας – Μέθοδος Quine McCluskey.....	94
5.2.4 Πίνακας Μέγιστης Παραγωγής – Γράφος Διαδικασίας	97
5.2.4 Λογικές πύλες και υδραυλικά ανάλογα.....	101
5.2.5 Διαστασιολόγηση εξοπλισμού	102
5.3 HDLM – 3 ^ο Επίπεδο: Οικονομική Αποτίμηση Προτεινόμενου Συστήματος.....	107
5.3.1 Κόστος Αρχικού Κεφαλαίου (Capital Expenditures – CAPEX).....	109
5.3.2 Αποσβέσεις (Discount Rate).....	109
5.3.3 Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας (Operational Expenditures – OPEX).....	109
5.3.4 Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (Levelized Cost of Energy – LCoE).....	110
5.3.5 Ρυθμός Απόσβεσης της Επένδυσης (Return of Investment – ROI)	110
5.3.6 Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV)	110
5.3.7 Περίοδος Απόσβεσης (Payback Period – PP).....	110
Σύνοψη	111
Βιβλιογραφία	111

Εισαγωγή

Μετά την ανάλυση των διαθέσιμων εργαλείων σχεδιασμού αλλά και την ανάδειξη της ανάγκης για ένα ολιστικό, ενιαίο εργαλείο, το παρόν Κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάλυση και περιγραφή της προτεινόμενης λύσης για την κάλυψη της ανάγκης στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Η πρόταση αυτή αφορά, όπως αναφέρθηκε και στο 4^ο Κεφάλαιο, τη δημιουργία ενός τέτοιου εργαλείου, το οποίο θα είναι καθολικά εφαρμόσιμο, εύχρη-

στο και ολιστικό. Η διάρθρωση του πραγματοποιείται σε τρία ιεραρχικά επίπεδα που έχουν ως στόχο να απαντήσουν σε καίρια ερωτήματα που προκύπτουν κατά τον σχεδιασμό συστημάτων κάλυψης θερμικών /ψυκτικών αναγκών στις ΕΚ.

Το 1^ο Επίπεδο (layer) αφορά τον προσδιορισμό των φορτίων της κοινότητας και την ομαδοποίηση των χρηστών ενέργειας (βλ. Εικόνα 5. 1). Το 2^ο επικεντρώνεται στον τρόπο με τον οποίο θα καλυφθούν τα φορτία, στην κατασκευή δηλαδή του συστήματος παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής της ενέργειας. Το 3^ο Επίπεδο αποτελεί την οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου συστήματος. Εξαιτίας της αρχιτεκτονικής του, το εργαλείο ανήκει στα μοντέλα σχεδιασμού bottom-up (βλ. 4^ο Κεφάλαιο) και λόγω της προσέγγισής του στην αρχιτεκτονική συστημάτων ονομάστηκε «Μεθοδολογία Ιεραρχικού Δομημένου Σχεδιασμού» (ΜΙΔΣ) ή “Hierarchically-Dependent Layering Methodology” (HDLM). Για λόγους ευκολίας στη συνέχεια της διδακτορικής διατριβής θα γίνεται αναφορά σε αυτό ως HDLM. Στο παρόν Κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το μαθηματικό υπόβαθρο της HDLM για όλα τα επιμέρους επίπεδα.

5.1 HDLM – 1^ο Επίπεδο: Ομαδοποίηση και Κατηγοριοποίηση Παραγωγαναλωτών

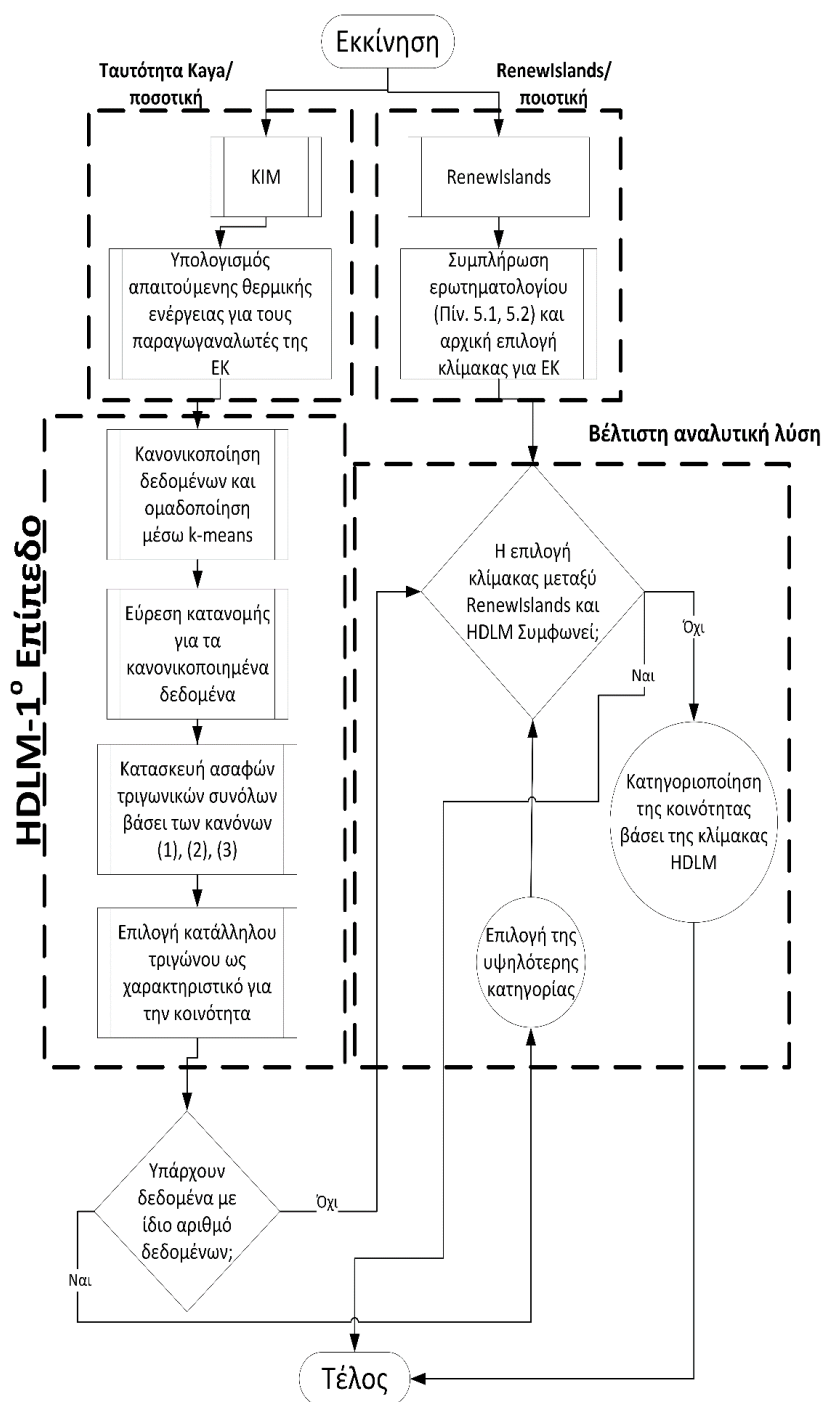
Η παρούσα ενότητα αναφέρεται στην μαθηματική μοντελοποίηση του 1^{ου} Επιπέδου όπου γίνεται προσδιορισμός των φορτίων των παραγωγαναλωτών της ΕΚ και ομαδοποίησή τους ανάλογα με την ενεργειακή τους ένταση (energy intensity – *EI*). Ως ενεργειακή ένταση ορίζεται ο λόγος της ακαθάριστης κατανάλωσης ενέργειας⁴ σε μία περιοχή (gross inland energy consumption - *GIEC*), προς το ακαθάριστο εθνικό προϊόν της περιοχής (gross domestic product - *GDP*). Η Εξίσωση 1 (Εξ. 1) δίνει τον λόγο ενεργειακής έντασης [1].

$$EI = \frac{GIEC}{GDP} \times 27 \times 10^{-5} \left(\frac{\text{kW}}{\text{€}} \right) \quad (1)$$

Πρέπει στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι το παρόν επίπεδο αποτελεί συνδυασμό δύο υφιστάμενων μεθόδων κατηγοριοποίησης παραγωγαναλωτών, μίας ποσοτικής και μίας ποιοτικής. Η ποιοτική μέθοδος είναι η μέθοδος RenewIslands η οποία αναφέρθηκε συνοπτικά στην Ενότητα 4.1.3 και προσεγγίζει την κατηγοριοποίηση μέσω εκτενούς ερωτηματολογίου το οποίο συμπληρώνεται από τον μελετητή σε τριβάθμια κλίμακα (Χαμηλό, Μέτριο, Υψηλό) [2]. Η ποσοτική μέθοδος είναι η μαθηματική ταυτότητα Kaya (Kaya Identity Methodology – KIM) η οποία υπολογίζει τη συνολική απαιτούμενη θερμική και ψυκτική ενέργεια ετησίως. Και οι δύο μέθοδοι έχουν τα πλεονεκτήματά τους όμως δεν μπορούν μεμονωμένα να εφαρμοστούν με ακρίβεια σε σχεδιασμό συστημάτων ΕΚ. Η μέθοδος RenewIslands ενέχει τις απροσδιοριστίες των ποιοτικών μεγεθών, όπου τα όρια είναι ασαφή και ο ορισμός αυτών δεν μπορεί να είναι καθολικός. Η KIM από την άλλη, αν και σαφώς ορισμένη μαθηματικά, δεν περιέχει κάποιου είδους ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων όταν εφαρμόζεται σε κοινότητες. Αποτελεί σύνθετη επιδίωξη η κατηγοριοποίηση πολλών παραγωγαναλωτών με τη KIM, καθώς το μεμονωμένο αποτέλεσμα που προσφέρει προκαλεί μερική απώλεια της εξατομικευμένης πληροφορίας που είναι απαραίτητη για τον ακριβή σχεδιασμό.

⁴ Στην οδηγία 2009/28/ΕΚ για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η **ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας** ορίζεται ως τα ενεργειακά βασικά προϊόντα που παραδίδονται για ενεργειακούς σκοπούς στη βιομηχανία, στις μεταφορές, στα νοικοκυριά, στις υπηρεσίες (συμπεριλαμβανομένων των δημόσιων υπηρεσιών), στη γεωργία, στη δασοκομία και στην αλιεία, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας από τον ενεργειακό κλάδο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, και συμπεριλαμβανομένων των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας κατά τη διανομή και τη μεταφορά [1].

Η δημιουργία όμως ενός υβριδικού μοντέλου που επιχειρείται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, αντιμετωπίζει αρκετά από τα προαναφερθέντα προβλήματα. Αρχικά η χρήση της ενεργειακής έντασης ως κριτήριο καθολικού χαρακτηρισμού παραγωγαναλωτών ή κοινοτήτων, προσδίδει τον καθολικό χαρακτήρα που απουσιάζει και από τις δύο. Έπειτα, η εισαγωγή του μαθηματικού υποβάθρου του συνδυασμού αυτών, εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα και των δύο, προσφέροντας ένα ενιαίο πλαίσιο κατηγοριοποίησης των παραγωγαναλωτών. Αυτή θα είναι και η διάρθρωση της Ενότητας αυτής. Αρχικά θα παρουσιαστούν οι υφιστάμενες μέθοδοι (RenewIslands και KIM) και έπειτα θα αποτυπωθεί το μαθηματικό υπόβαθρο του συνδυασμού τους. Η Εικόνα 5. 1 παρουσιάζει τον αλγόριθμο του 1^{ου} Επιπέδου της HDLM, του οποίου τα βήματα θα αναλυθούν στην συνέχεια.



Εικόνα 5. 1: Διάγραμμα ροής διαδικασίας υλοποίησης αλγορίθμου του 1^{ου} Επιπέδου της HDLM.

5.1.1 RenewIslands

Η μεθοδολογία RenewIslands αποτελεί μία ποιοτική προσέγγιση του σχεδιασμού απομονωμένων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ευελιξία που προσφέρει, καθώς μειώνει σημαντικά τις επιλογές του μελετητή κατά τον αρχικό σχεδιασμό. Κατά την χρήση της μεθοδολογίας, ο μελετητής συμπληρώνει το ερωτηματολόγιο του Πίνακα 5. 1.

Πίνακας 5. 1: Ερωτηματολόγιο μεθοδολογίας RenewIslands.

Ανάγκες/Πόροι	Επίπεδο
Θερμική ενέργεια	Χαμηλή/Μέτρια/Υψηλή
Ψυκτική ενέργεια	Χαμηλή/Μέτρια/Υψηλή
Υποδομές	
Κεντρικό δίκτυο διανομής ΘΨΕ	Ανύπαρκτο/Ασθενές/Ισχυρό
Αγωγός φυσικού αερίου	Ναι/Όχι
Τερματικό υδροποιημένου φυσικού αερίου	Ναι/Όχι
Τερματικό πετρελαίου	Ναι/Όχι
Τερματικό παραγωγών πετρελαίου	Ναι/Όχι

Το ερωτηματολόγιο αυτό στοχεύει στην κατανόηση της υφιστάμενης κατάστασης στην δυνητική ΕΚ, αναφερόμενο στην ύπαρξη συμβατικών μεθόδων κάλυψης αναγκών. Σε επόμενο ερωτηματολόγιο προσδιορίζεται το πρωτογενές δυναμικό της περιοχής προκειμένου να προταθούν οι κατάλληλες ανανεώσιμες τεχνολογίες για την κάλυψη των αναγκών. Ο Πίνακας 5. 2 παρουσιάζει το ερωτηματολόγιο αυτό. Παρά την απλότητα που προσφέρει, ο προσδιορισμός του πρωτογενούς δυναμικού με ποιοτική κλίμακα, προσφέρει ασαφή πληροφορία. Οι κλίμακες για τον ορισμό του Χαμηλού δυναμικού διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Για παράδειγμα, το Χαμηλό ηλιακό δυναμικό για μία ελληνική βορεινή περιοχή είναι ενδεχομένως Υψηλό σε σχέση με μία περιοχή της Δανίας. Για τον λόγο αυτό, γίνεται χρήση σαφών ορίων του Χαμηλού, Μέτριου και Υψηλού βάσει του ελληνικού πρωτογενούς δυναμικού (βλ. Κεφάλαιο 6, Ενότητα 6.3.1), προκειμένου ο μελετητής να έχει ως μέτρο τα πρότυπα της εκάστοτε περιοχής.

Πίνακας 5. 2: Ερωτηματολόγιο πρωτογενούς δυναμικού για τη δυνητική ΕΚ στη RenewIslands.

Πρωτογενές Δυναμικό	Επίπεδο
Αιολικό	Χαμηλό/Μέτριο/Υψηλό
Ηλιακό	Χαμηλό/Μέτριο/Υψηλό
Υδροδυναμικό	Χαμηλό/Μέτριο/Υψηλό
Τοπική πηγή βιομάζας	Χαμηλό/Μέτριο/Υψηλό
Γεωθερμία	Χαμηλό/Μέτριο/Υψηλό

Στο σημείο αυτό, ο μελετητής επιλέγει κλίμακα για την κοινότητα βάσει των στοιχείων της ενεργειακής έντασης της υπό μελέτη περιοχής, όπως θα γινόταν εξολοκλήρου με τη χρήση της RenewIslands. Η επιλογή μπορεί να γίνει είτε βάσει ΚΕΝΑΚ, είτε βάσει στοιχείων κατανάλωσης για την εκάστοτε μελέτη περίπτωσης [3].

5.1.2 Kaya Identity Methodology (KIM)

Όπως προαναφέρθηκε, η KIM είναι μια ποσοτική αποτύπωση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας η οποία χρησιμοποιεί δείκτες όπως η ειδική κατανάλωση ενέργειας, οι παραγωγαναλωτές ανά κατοικία και τα τετραγωνικά ανά παραγωγαναλωτή. Η Εξ. 2 παρουσιάζει τη μαθηματική απεικόνιση της KIM.

$$E = h \times \frac{p}{h} \times \frac{A}{p} \times \frac{E_{spec.}}{A} \left(\frac{kWh_{th}}{\text{έτος}} \right) \quad (2)$$

Όπου h είναι ο αριθμός των κατοικιών που συμμετέχουν στη δυνητική ΕΚ, p/h είναι ο αριθμός των παραγωγαναλωτών ανά κατοικία, A/p είναι η επιφάνεια χώρου που αντιστοιχεί σε κάθε παραγωγαναλωτή (m^2/p) και $E_{spec.}/A$ είναι η ειδική κατανάλωση θερμικής/ψυκτικής ενέργειας ανά καλυπτόμενη επιφάνεια (kWh_{th}/m^2) [4].

5.1.3 Συνδυασμός υφιστάμενων μεθόδων

Για τον συνδυασμό των μεθόδων, αναπτύχθηκε κατάλληλη μαθηματική μεθοδολογία για τη μετάβαση από την ποιοτική πληροφορία που εξάγει η KIM προς την ποιοτική που χρησιμοποιεί η RenewIslands. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η μετάβαση αυτή αρχικά ομαδοποιούνται οι διαφορετικοί παραγωγαναλωτές μέσω αλγορίθμου ομαδοποίησης. Έπειτα το σύνολο των δεδομένων των παραγωγαναλωτών (το αποτέλεσμα των εξατομικευμένων KIM για τη κάθε κατοικία παραγωγαναλωτή) κανονικοποιείται ώστε να αποκτήσει καθολικότητα η προσέγγιση και εντοπίζεται η στατιστική κατανομή στην οποία ανήκουν τα δεδομένα αυτά. Με τον εντοπισμό της κατάλληλης στατιστικής κατανομής, κατασκευάζονται τα ασαφή τριγωνικά σύνολα τα οποία αποτυπώνουν τη μετάβαση από τη ποσοτική πληροφορία στην ποιοτική. Ανάλογα με τη συγκέντρωση που έχουν τα δεδομένα των παραγωγαναλωτών στα ασαφή τριγωνικά σύνολα, επιλέγεται και ο κατάλληλος ποιοτικός χαρακτηρισμός για την δυνητική κοινότητα βάσει της RenewIslands (βλ. Εικόνα 5. 1) [5].

5.1.3.1 Kaya Identity Methodology για Παραγωγαναλωτές

Σε μία δυνητική ΕΚ, τα προφίλ των παραγωγαναλωτών συνήθως διαφέρουν. Οι διαφορετικές ανάγκες, το διαφορετικό μείγμα ανθρώπων που κατοικεί (π.χ. μονομελείς ή πολυμελείς οικογένειες, ηλικιωμένοι κ.α.), τα διαφορετικά ωράρια παραμονής στους χώρους και η δραστηριότητα των χρηστών είναι κάποιες από τις σημαντικότερες μεταβλητές που επηρεάζουν την ποικιλομορφία ενός μείγματος παραγωγαναλωτών [3]. Στην περίπτωση που αυτοί συμφωνήσουν για τη σύμπραξη μίας ΕΚ, πρέπει οι διαφορετικές αυτές ανάγκες να καλυφθούν από το κοινό σύστημα στο οποίο θα επενδύσουν. Η μεθοδολογία KIM υπολογίζει ανά περίπτωση την συνολική ενέργεια που απαιτείται από τον εκάστοτε παραγωγαναλωτή. Ο αναλυτικός τύπος υπολογισμού δίνεται από την Εξ. 2. Οι διαφορετικές κατοικίες ή οικοδομικοί οικισμοί ενέργειας (όπως οικοδομές, εργατικές κατοικίες, φυλακές, κατασκήνωσεις, αίθουσες ψυχαγωγίας κ.τ.λ.) αποτελούν και διαφορετικούς παραγωγαναλωτές. Έτσι υπολογίζεται ξεχωριστά για τον καθένα, βάσει της KIM, η ενεργειακή του απαίτηση ετησίως σε θέρμανση και ψύξη. Το σύνολο των διαφορετικών αποτελεσμάτων για όλους τους καταναλωτές αποτελεί ένα σύνολο δεδομένων ενέργειας, όπως θα αναφέρονται για το υπόλοιπο της διατριβής.

5.1.3.2 Κατηγοριοποίηση δεδομένων – *k means clustering*

Για να κατηγοριοποιηθεί το σύνολο των δεδομένων, πρέπει αρχικά να αποσαφηνιστεί σε πόσες ομάδες θα χωριστούν. Ο διαχωρισμός αυτός είναι απαραίτητος στο πρώτο στάδιο σύνταξης του αλγορίθμου (βλ. **Error! Reference source not found.**) καθώς αποτελεί προαπαιτούμενο βήμα για την ομαδοποίηση των παραγωγαναλωτών βάσει της μεθόδου των μέσων *k*-ομάδων (*k means clustering*) [6]. Η σύνταξη του σχετικού κώδικα για τον εντοπισμό του βέλτιστου αριθμού διαχωρισμού των ομάδων (*clusters*), βάσει της ομοιότητας που έχουν τα δεδομένα τους (υπολογισμένα μεγέθη από KIM), παρουσιάζεται ως Σχόλιο 1. Ο αλγόριθμος διαχωρίζει *n* αριθμό δεδομένων σε *k* αριθμό *clusters*, αναθέτοντας κάθε στοιχείο του συνόλου των δεδομένων στον *cluster* με τον πλησιέστερο μέσο (*mean*). Οι *clusters* διακρίνονται από κεντροειδή (*centroids*) που είναι οι μέσες Ευκλείδειες αποστάσεις από το σύνολο των *n* δεδομένων υψωμένες στο τετράγωνο (όχι Ευκλείδειες αποστάσεις, καθώς το πρόβλημα αποκτά αυξημένη υπολογιστική ισχύ) [7,8].

```
1- data=table2array(data);
2- sa=[];
3- K=[];
4- for k=1:20
5- [idx c sumd]=kmeans(data,k);
6- sa=[sa sum(sumd)];
7- K=[K k];
8- end
```

Σχόλιο 1

Σχόλιο 1: Κώδικας εντοπισμού βέλτιστου αριθμού *clusters* βάσει ομοιότητας δεδομένων (πίνακας *data*).

```
1- idx = kmeans(data,k);
2- gscatter(data(:,1),data(:,2), idx);
```

Σχόλιο 2

Σχόλιο 2: Κώδικας καταμερισμού δεδομένων στους *clusters*, ο αριθμός των οποίων έχει διευκρινιστεί στο Σχόλιο 1.

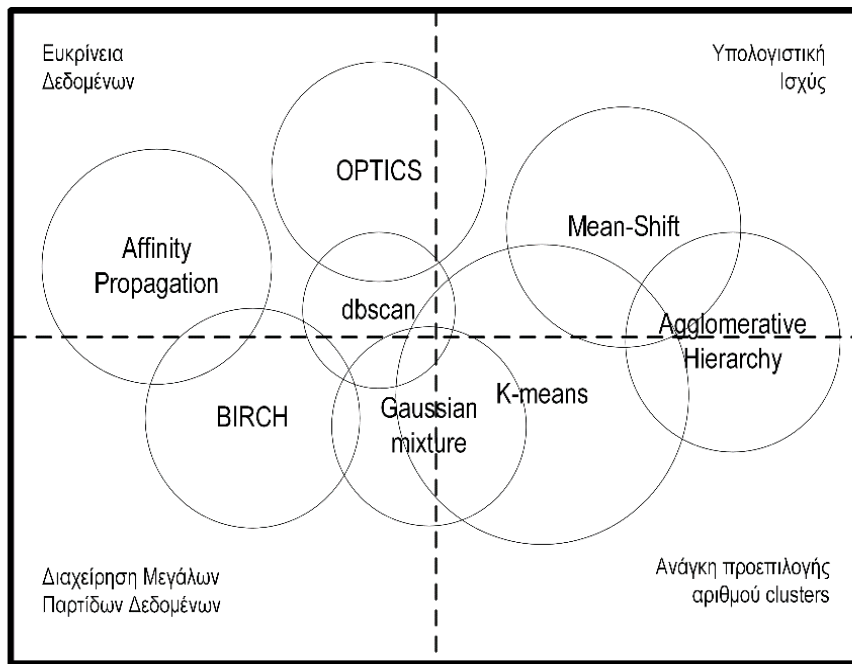
Η συνάρτηση *idx = kmeans(X,k)* εκτελεί τον αλγόριθμο *k*-means clustering προκειμένου να διαχωρίσει τις παρατηρήσεις/δεδομένα *X* σε ένα πίνακα δεδομένων $n \times p$ σε *k* αριθμό *clusters*, και επιστρέφει έναν μονοδιάστατο διανυσματικό πίνακα (*idx*) που περιέχει τους δείκτες *clusters* των παρατηρήσεων/δεδομένων. Οι γραμμές του πίνακα *X* αποτελούν σημεία ενώ οι στήλες αποτελούν τις μεταβλητές. Από άποψη δομής του αλγορίθμου, ο *kmeans* χρησιμοποιεί το τετράγωνο της Ευκλείδειας απόστασης και τον αλγόριθμο *k*-means++ για την αρχικοποίηση του κέντρου του *cluster* [8].

Η παραπάνω μεθοδολογία μπορεί να αναπτυχθεί και μέσω άλλων αλγορίθμων όπως ο *dbscan clustering* (density-based clustering algorithm), ο *Gaussian mixture model*, ο *BIRCH* (Balance Iterative Reducing and Clustering Hierarchies), ο *Affinity Propagation clustering*, ο *Mean-Shift clustering*, ο *OPTICS* (Ordering Points to Identify Clustering Structure), ο *Agglomerative Hierarchy clustering* κ.α. Ο *dbscan* χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν κάποιου είδους θόρυβο στα δεδομένα. Στόχος του είναι να βρει την περιβάλλουσα αυτών ώστε να δημιουργήσει ευκρινέστερα αποτελέσματα στο clustering, σε περιπτώσεις που τα δεδομένα είναι διασπαρμένα σημαντικά και το σχήμα τους είναι ακανόνιστο σε ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Από την άλλη, ο *Gaussian mixture model* χρησιμοποιείται έναντι του *k*-means σε περιπτώσεις που τα δεδομένα που πρέπει να

ομαδοποιηθούν δεν ακολουθούν κυκλικό μοτίβο. Η αρχιτεκτονική του αλγορίθμου αυτού, στηρίζεται στην αποτελεσματική απεικόνιση των δεδομένων σε clusters που ανήκουν στην ίδια Gaussian στατιστική κατανομή. Αν όμως τα δεδομένα δεν ανήκουν σ' αυτήν, τότε ο αλγόριθμος δεν μπορεί να εφαρμοστεί με ακρίβεια [9].

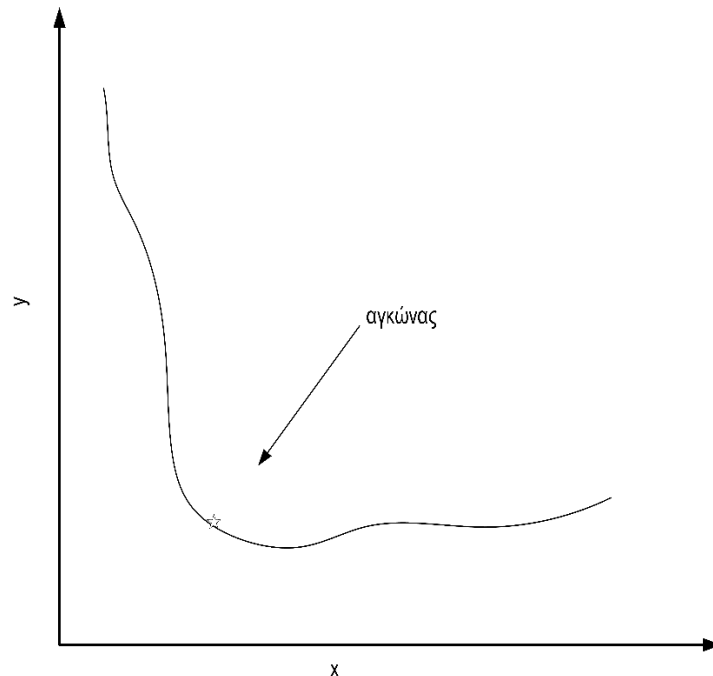
Σε ότι αφορά τον BIRCH, αποτελεί έναν κεντρικό αλγόριθμο ταξινόμησης μεγάλων παρτίδων δεδομένων, που συνήθως δεν είναι διαχειρίσιμα με ακρίβεια από άλλους αλγορίθμους (όπως ο k-means). Χρησιμοποιείται ως συμπληρωματικό εργαλείο, εξαιτίας της αρχιτεκτονικής του, παρά ως αυτούσιος αλγόριθμος. Ένας εκ των σημαντικότερων, βάσει αρχιτεκτονικής, αλγορίθμων είναι ο Affinity Propagation clustering. Ο αλγόριθμος αυτός λειτουργεί χωρίς προεπιλεγμένο αριθμό clusters, καθώς όλα τα δεδομένα επικοινωνούν μεταξύ τους και ενημερώνουν τα υπόλοιπα για την ομοιότητά τους (σύγκριση συντεταγμένων σημείων μεταξύ τους) δημιουργώντας έτσι τους clusters στην πορεία εξέλιξης του αλγορίθμου. Το σημαντικό σημείο του αλγορίθμου είναι ότι απαιτεί εκτεταμένη υπολογιστική ισχύ για να λειτουργήσει, εξαιτίας της σχέσης με την οποία αλληλεπιδρούν τα δεδομένα. Ο Mean-Shift clustering αλγόριθμος είναι ένας ιεραρχικός αλγόριθμος που τα δεδομένα επαναλαμβάνόμενα τείνουν προς μία κεντρική ρύθμιση (mode). Με τον όρο mode γίνεται αναφορά στα σημεία υψηλότερης συγκέντρωσης δεδομένων. Ο αλγόριθμος αυτός δεν χρησιμοποιείται για προβλήματα με μεγάλες παρτίδες (batch) δεδομένων λόγω της αρχιτεκτονικής του [9].

Ο αλγόριθμος OPTICS είναι παρόμοιος αρχιτεκτονικής με τον dbscan με τη διαφορά ότι προσφέρει clustering υψηλότερης ευκρίνειας. Αυτό πραγματοποιείται μέσω τακτοποίησης των δεδομένων με σειρά, βάσει της εγγύτητας μεταξύ των όμοιων τους. Το χαρακτηριστικό αυτό προσδίδει clusters υψηλότερης ευκρίνειας κατά τον διαχωρισμό. Τέλος, ο αλγόριθμος Agglomerative Hierarchy clustering λειτουργεί με παρόμοια αρχιτεκτονική όπως ο k-means. Κάθε δεδομένο ανατίθεται σε έναν cluster και κοντινοί clusters ομαδοποιούνται δημιουργώντας μεγαλύτερους. Τυπικά αποτελεί clustering μικρότερων clusters με αποτέλεσμα να μπορεί να διαχειριστεί δεδομένα με αρκετή εγγύτητα μεταξύ τους και σε μεγάλες παρτίδες. Η συνοπτική αυτή περιγραφή των μεθόδων clustering αποδεικνύει ότι ο k-means αποτελεί μία αξιόπιστη μέθοδο, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια για δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας που απασχολούν την παρούσα διατριβή. Η υλοποίηση και η υπολογιστική ισχύς που απαιτεί είναι σημαντικά χαρακτηριστικά για την τελική επιλογή του ως κεντρικό άξονα στην ομαδοποίηση των επιθυμητών δεδομένων [9]. Η Εικόνα 5. 2 παρουσιάζει τη σύνοψη των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών των μεθόδων ομαδοποίησης ως ενιαίο διάγραμμα Venn. Η σύνοψη αυτή πραγματοποιείται βάσει των κύριων χαρακτηριστικών της αρχιτεκτονικής τους όπως η ευκρίνεια δεδομένων, ο όγκος δεδομένων που μπορούν να διαχειριστούν με ακρίβεια, η υπολογιστική ισχύς που απαιτούν και η ανάγκη προεπιλογής αριθμού clusters στους οποίους θα ομαδοποιηθούν τα δεδομένα.



Εικόνα 5. 2: Οι 8 σημαντικότεροι μέθοδοι ομαδοποίησης (clustering) δεδομένων, ταξινομημένοι βάσει των βασικών στοιχείων της αρχιτεκτονικής τους.

Αφού αναπτυχθεί ο κατάλληλος κώδικας για τον βέλτιστο αριθμό clusters για το σύνολο των δεδομένων του προβλήματος (Σχόλιο 1), εντοπίζεται το σημείο «αγκώνα». Ως σημείο «αγκώνα» αναφέρεται το σημείο στο οποίο η γραφική παράσταση αριθμού δεδομένων ανά cluster (συντεταγμένη y) και αριθμού clusters (συντεταγμένη x), δημιουργεί ένα χαρακτηριστικό σημείο καμπής (Εικόνα 5. 3) [10].



Εικόνα 5. 3: Σημείο «αγκώνα» στην επιλογή βέλτιστου αριθμού clusters.

Το χαρακτηριστικό αυτό σημείο του «αγκώνα» έχει ως συντεταγμένες μοναδικό σημείο αριθμού clusters και αριθμού δεδομένων ανά cluster. Αυτός είναι και ο βέλτιστος αριθμός clusters για το εκάστοτε σύνολο δεδομέ-

νων αφού περισσότεροι clusters (+x) θα μείωναν την ευκρίνεια της ομαδοποίησης (περισσότεροι cluster – εγγύτερα μεταξύ τους, χωρίς σαφείς διαχωρισμούς) ενώ για λιγότερους cluster (+y), περισσότερα και ενδεχομένως με μεγαλύτερη απόσταση δεδομένα θα περιέχονταν ανά cluster, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού.

5.1.3.3 Κανονικοποίηση δεδομένων

Όπως προαναφέρθηκε, ένας εκ των στόχων του προτεινόμενου εργαλείου είναι η καθολική εφαρμοσιμότητα σε μελέτες με διαφορετικά σύνολα δεδομένων. Εκτός των διαφορετικών μελετών όμως, ακόμα και κατά την ίδια μελέτη, είναι δυνατή η παρουσία μεγάλης διακύμανσης μεταξύ των δεδομένων των παραγωγικών της ίδιας κοινότητας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρουσιαστεί συνήθως σε δυνητικές ΕΚ που περιλαμβάνουν εκτός των αστικών κατοικιών, κάποια τοπική βιομηχανία ή δημόσιο κτίριο διαφορετικής ενεργειακής έντασης από τα υπόλοιπα της μελέτης. Το ζήτημα αυτό αντιμετωπίζεται στην HDLM μέσω της κανονικοποίησης των δεδομένων, πριν τη μετάβαση σε κάποιο βήμα ανάλυσης αυτών. Η μέθοδος κανονικοποίησης που εφαρμόζεται στην προκειμένη περίπτωση είναι η “studentized residual” και ο τύπος της δίνεται από την Εξ. 3. Η φιλοσοφία αυτής της μεθόδου κανονικοποίησης είναι η διαίρεση του υπολοίπου του δείγματος με τη τυπική απόκλιση του δείγματος [11].

$$\frac{\hat{\varepsilon}_i}{\hat{\sigma}_i} = \frac{\hat{X}_i - \hat{\mu}_i}{\hat{\sigma}_i} \quad (3)$$

Όπου $\hat{\varepsilon}_i$ είναι το i -οστό υπόλοιπο, $\hat{\sigma}_i$ είναι η τυπική απόκλιση του δείγματος, $\hat{X}_i$ είναι το τυχαίο δείγμα από το σύνολο των δεδομένων και $\hat{\mu}_i$ είναι η μέση τιμή του.

Άλλες μέθοδοι κανονικοποίησης είναι οι “scaling to range”, “clipping”, “log scaling”, “z-score” κ.α. Η “scaling to range” χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις που το δείγμα έχει γνωστές ακραίες τιμές ή διακύμανση και είναι ομοιόμορφα καταμετρημένα στο πεδίο τιμών. Δεν είναι εφικτή η εφαρμογή της στην περίπτωση ενέργειας και στον αυτοσκοπό, που είναι η καθολικότητα, καθώς αφαιρεί ακραίες τιμές από αυτό (χάνοντας στην περίπτωση της HDLM τους παραγωγικούς με υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια). Σε ότι αφορά την μέθοδο “clipping” εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου οι ακραίες τιμές του δείγματος μπορούν να κανονικοποιηθούν σε προκαθορισμένα υψηλές τιμές, χωρίς ιδιαίτερα περιθώρια σφάλματος. Όπως και στην περίπτωση της “scaling to range”, η διαμόρφωση τιμών στο σύνολο δεδομένων πριν την κανονικοποίηση αποτελεί προσέγγιση με υψηλά ποσοστά σφάλματος για την εφαρμογή που επιδιώκει η HDLM. Η “log scaling» χρησιμοποιείται συνήθως σε σύνολα δεδομένων που η τιμή τους καθορίζεται από το συνδυασμό άλλων τιμών. Σε περιπτώσεις που ο συνδυασμός αυτός δεν είναι πλήρως εφικτός για όλα τα δεδομένα, τότε τα δεδομένα κανονικοποιούνται για ευκολία στη σύγκριση, μέσω του “log scaling”. Τέλος, η “z-score” είναι παρόμοια με τη “studentized residual” καθώς ο υπολογισμός της αφορά τη διαφορά που έχουν οι τυπικές αποκλίσεις ενός συνόλου δεδομένων, από τον μέσο. Χρησιμοποιείται αντί της “studentized residual” σε πολλές περιπτώσεις [12].

Αφού κανονικοποιηθούν τα δεδομένα, το επόμενο βήμα είναι ο καταμερισμός σε clusters, όπως αυτοί επιλέχθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Η Εξ. 4 δίνει την αντικειμενική συνάρτηση του καταμερισμού των δεδομένων στον προεπιλεγμένο αριθμό clusters προκειμένου να ομαδοποιηθούν μέσω του αλγορίθμου k-means clustering.

$$\min_{\{m_k\}, 1 \leq k \leq K} \sum_{k=1}^K \sum_{x \in C_k} \pi_x \text{dist}(x, m_k) \quad (4)$$

5.1.3.4 Εντοπισμός στατιστικής κατανομής

Το σύνολο των κανονικοποιημένων πλέον δεδομένων μπορεί να αναλυθεί ως προς το είδος της στατιστικής κατανομής που τα χαρακτηρίζει. Ο εντοπισμός της στατιστικής κατανομής προσφέρει πληροφορίες ως προς το σχήμα της καμπύλης που ορίζουν τα δεδομένα, που αργότερα θα χρησιμοποιηθεί για την σύγκριση μεταξύ ποιοτικής απεικόνισης και ποσοτικής. Μέσω του στοχαστικού προσδιορισμού της κατανομής στην οποία ανήκουν τα δεδομένα, μπορούν να εντοπιστούν τα ανώτατα και κατώτατα όρια καθώς και το κέντρο μάζας των δεδομένων. Επίσης είναι δυνατός ο υπολογισμός των ροπών της κατανομής (1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} τάξης) οι οποίες προσφέρουν πληροφορίες για το σχήμα και τη συγκέντρωση των δεδομένων. Ο εντοπισμός της κατανομής πραγματοποιείται με τη χρήση των ροπών, καθώς με τον υπολογισμό της k -οστής ροπής ($\forall k \in \mathbb{N}_+^*$). Η Εξ. 5 αποτυπώνει τον μαθηματικό ορισμό υπολογισμού της k -οστής ροπής, για τον προσδιορισμό της κατανομής στην οποία ανήκουν τα δεδομένα [12,13].

$$\left(\frac{\min_{\{m_k\}, 1 \leq k \leq K} \sum_{k=1}^K \sum_{x \in C_k} \pi_x \text{dist}(x, m_k)}{\sum_{k=1}^K \sum_{x \in C_k} \pi_x \text{dist}(x, m_k)} \right)^k = \prod_{x=1}^{x_n} [(1 + m + \tilde{\sigma} \varepsilon_i)^k] \quad (5)$$

Όπου το ε_i είναι η κεντροποιημένη Γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή. Με τον υπολογισμό της k -οστής ροπής είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατανομής (Γκαουσιανή, λογαριθμοκανονική, κανονική, κατανομή β, κατανομή Weibull κ.α.). Οι εξισώσεις οι οποίες θα χωρίσουν σε διακριτές ζώνες τα δεδομένα, βάσει της ορισμένης στατιστικής κατανομής, δίνονται στις Εξ. 6, 7 και 8 [12,13].

$$x_{S,min} \pm |x_{S,min} - \bar{x}_S| \quad (6)$$

$$x_S \pm |x_S - \sigma_S^2| \quad (7)$$

$$x_{S,max} \pm |x_{S,max} - \bar{x}_S| \quad (8)$$

Οι εξισώσεις αυτές διαχωρίζουν το σύνολο των δεδομένων S σε διακριτές ζώνες υψηλών, χαμηλών τιμών και τιμών ορισμένης απόκλισης από το κέντρο μάζας της κατανομής.

5.1.3.5 Ασαφή τριγωνικά σύνολα

Με το πέρας του διαχωρισμού των δεδομένων σε διακριτές ζώνες, ολοκληρώνεται η ποσοτική ανάλυση των δεδομένων όπως προκύπτουν από την ΚΙΜ. Προκειμένου να αποδοθούν ποιοτικά και να ενσωματωθούν στην RenewIslands, γίνεται χρήση ασαφών τριγωνικών συνόλων. Τα ασαφή τριγωνικά σύνολα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου το σύνολο δεδομένων ορισμένης κατανομής πρέπει να αποδοθεί ποιοτικά ή και το αντίστροφο (ποιοτικά δεδομένα που αποδίδονται ποσοτικά). Το πρώτο βήμα για την κατασκευή ασαφών τριγωνικών συνόλων είναι ο ορισμός της τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής των δεδομένων [14]. Αν υποθεθεί ότι $A1$, $A2$ και $A3$ είναι τα ασαφή τριγωνικά σύνολα που αντιπροσωπεύουν τις ποιοτικές κλίμακες της RenewIslands, οι ασαφείς κανόνες με τους οποίους τα κανονικοποιημένα δεδομένα εισάγονται στα σύνολα αυτά δίνονται από τις Εξ. 9, 10, 11:

$$R^{(1)}: IF x_S \in \{E\xi.6\} THEN \rightarrow A^1 (Χαμηλή) \quad (9)$$

$$R^{(2)}: IF x_S \in \{E\xi.7\} THEN \rightarrow A^2 (Μέτρια) \quad (10)$$

$$R^{(3)}: IF x_S \in \{E\xi.8\} THEN \rightarrow A^3 (Υψηλή) \quad (11)$$

Η περίπτωση του x_S να ανήκει σε παραπάνω από ένα τριγωνικό σύνολο υπολογίζεται μέσω της Εξ. 12.

$$\dot{x} = \frac{\sum_{q=1}^l \{\mu_{q1} \dot{x}^{q1} + \mu_{q2} \dot{x}^{q2}\}}{\sum_{q=1}^l \{\mu_{q1} + \mu_{q2}\}} \quad (12)$$

Όπου το $\dot{x}$ είναι η παράγωγος των δεδομένων, μ_{q1} και μ_{q2} είναι οι συναρτήσεις συμμετοχής και q είναι οι διαφορετικές παρατηρήσεις για το δείγμα (όταν το $x \in A^n$).

Η Εξ. 12 χαρακτηρίζεται και ως “defuzzification function” και μια επικάλυψη έως και 25% μεταξύ των ασαφών συνόλων είναι αποδεκτή [14]. Μετά και τον καταμερισμό των δεδομένων στα ασαφή τρίγωνα που αντιπροσωπεύουν τις ποιοτικές κλίμακες της RenewIslands, μπορούν να γίνουν οι εξής παραδοχές:

- Στην περίπτωση που κάποιο τρίγωνο υπερισχύει, συγκριτικά με τα υπόλοιπα, στον αριθμό δεδομένων που περιέχει, τότε η κλίμακά του γίνεται και κλίμακα για την ΕΚ βάσει RenewIslands. Αν παρατηρείται υψηλότερη συγκέντρωση στο τρίγωνο της «Υψηλής» κλίμακας, τότε η κοινότητα χαρακτηρίζεται ως «Υψηλής» ενεργειακής απαίτησης βάσει RenewIslands.
- Στην περίπτωση που υπάρχει ισοκατανομή δεδομένων μεταξύ δύο τριγώνων, η ΕΚ χαρακτηρίζεται μόνο από το τρίγωνο υψηλότερης, συγκριτικά, κλίμακας. Η παραδοχή αυτή πραγματοποιείται για να αποφευχθούν στη συνέχεια περιπτώσεις υποδιαστασιολόγησης του εξοπλισμού και να καλυφθεί η χειρότερη δυνατή περίπτωση φορτίου για την ΕΚ (περίπτωση δυσμενέστερης κατάστασης βάσει TOTEE) [3].

Στο πέρας της περιγραφής της RenewIslands, ο σχεδιαστής καλείται να επιλέξει κλίμακα για την ΕΚ ποιοτικά, όπως θα συνέβαινε και στην περίπτωση εφαρμογής της απλής RenewIslands προσέγγισης. Στην ολοκλήρωση του 1^{ου} Επιπέδου της HDLM όμως, η ΕΚ έχει κατηγοριοποιηθεί ως Χαμηλής, Μέτριας ή Υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης, που πιθανόν να μην συμβαδίζει με την ποιοτική επιλογή που έγινε με τη χρήση της RenewIslands. Στην περίπτωση αυτή επιλέγεται η κλίμακα που προέκυψε μέσω της HDLM (Χαμηλή, Μέτρια, Υψηλή), καθώς όντας αναλυτικότερη και σαφώς ορισμένη μαθηματικά, είναι λιγότερο πιθανό να καταλήγει σε λανθασμένη επιλογή κλίμακας. Με το βήμα αυτό ολοκληρώνεται το 1^ο Επίπεδο σχεδιασμού (Εικόνα 5. 1) και διαθέτοντας τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά τα χαρακτηριστικά της ΕΚ υπό μελέτη, μπορεί να γίνει μετάβαση στο επίπεδο σχεδιασμού του συστήματος κάλυψης των αναγκών της ΕΚ, στο 2^ο Επίπεδο.

5.2 HDLM – 2^ο Επίπεδο: Σχεδιασμός Υπερδομής Κάλυψης Ενεργειακών Αναγκών

Κατά το σχεδιασμό οποιουδήποτε συστήματος κάλυψης αναγκών, απαιτείται αρχική επιλογή τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν. Όπως αναλύθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο, πολλά από τα υφιστάμενα εργαλεία σχεδιασμού ή τα μαθηματικά μοντέλα, κατασκευάζουν τέτοια συστήματα βάσει των πληροφοριών που εισάγει ο μελετητής-μηχανικός. Σε περιπτώσεις όμως, όπως προαναφέρθηκε, που το υπό σχεδίαση σύστημα είναι εκτενές, η πο-

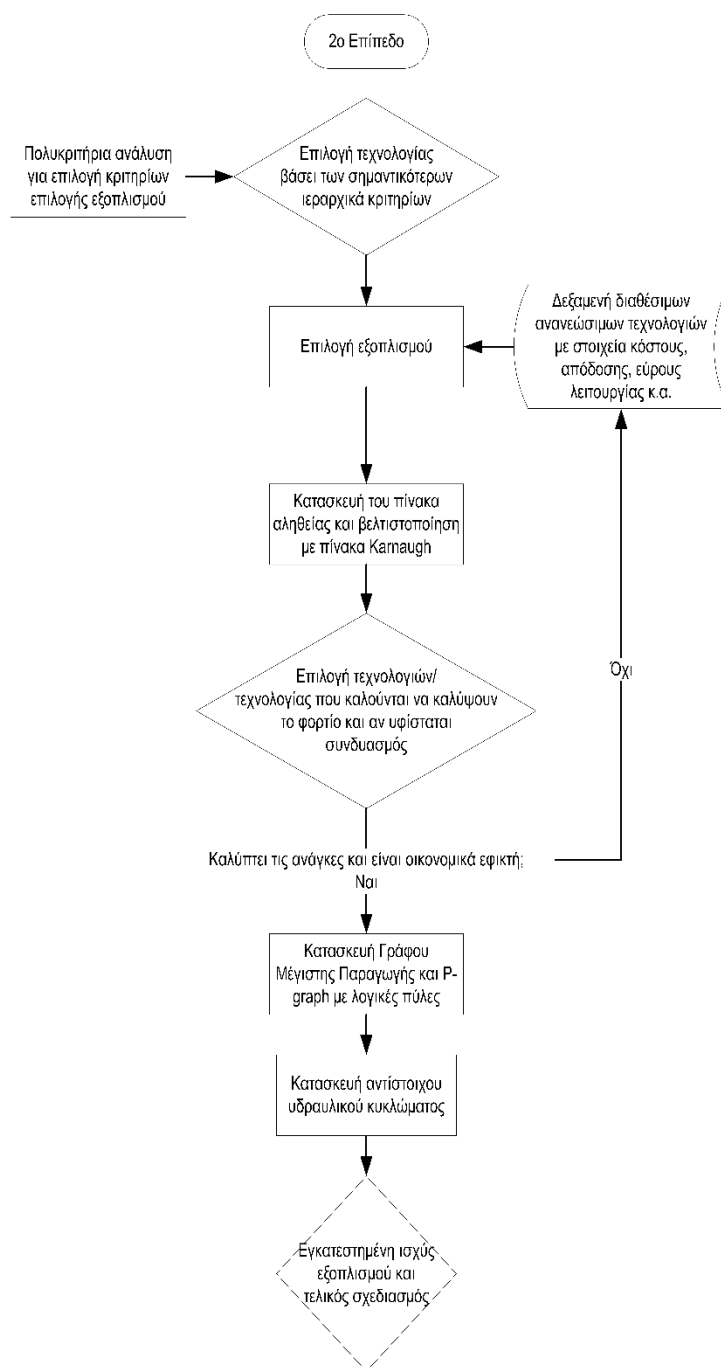
λυπλοκότητά του αυξάνεται και οι συνεργαζόμενες τεχνολογίες που είναι περισσότερες από μία πρέπει να συμπαράγουν σύμφωνα με την πρόβλεψη του αρχικού σχεδιασμού. Στη ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί το μαθηματικό υπόβαθρο σχεδιασμού bottom-up συστήματος κάλυψης των αναγκών που υπολογίστηκαν στο 1^ο layer, με τη χρήση των υπερδομών. Αρχικά αναφέρονται οι πολυκριτήριες αναλύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν στο βήμα αυτό, έπειτα γίνεται η επιλογή των τεχνολογιών, στη συνέχεια παρουσιάζεται η καινοτόμα μεταφορά της Δυαδικής Λογικής και των πινάκων αληθείας ως μέσο βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του συστήματος, έπειτα παρουσιάζεται ο σχεδιασμός της υπερδομής μέσω πινάκων μέγιστης παραγωγής και γράφων διαδικασίας ενώ τέλος γίνεται η μεταφορά του σχεδιαζόμενου συστήματος στο υδραυλικό του ανάλογο και η διαστασιολόγηση των επιλεχθέντων τεχνολογιών. Το διάγραμμα ροής της Εικόνα 5. 4 παρουσιάζει τα βήματα που ακολουθούνται στην προτεινόμενη μεθοδολογία, στο 2^ο Επίπεδο σχεδιασμού.

5.2.1 Πολυκριτήρια Ανάλυση

Το πρώτο βήμα στην κατασκευή υπερδομών είναι η επιλογή εξοπλισμού. Με τη πολυπλοκότητα όμως που έχουν οι διαθέσιμες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και τα πολλαπλά κριτήρια επιλογής της καταλληλότερης ανά περίπτωση, είναι απαραίτητη η εισαγωγή πολυκριτήριας ανάλυσης για την ιεράρχηση των σημαντικότερων κριτηρίων επιλογής. Οι πολυκριτήριες αναλύσεις με τη μεγαλύτερη εφαρμογή, ειδικά σε ανανεώσιμα συστήματα είναι οι: Μέθοδος του Ολικού Κριτηρίου, Μέθοδος του Σταθμισμένου Μέσου, Μέθοδος των Ικανοποιητικών Στόχων, Μέθοδοι ELECTRE, Μέθοδοι UTA, Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, Μέθοδοι PROMETHEE, Μέθοδος MACBETH, Μέθοδος TOPSIS κ.α. Θα παρουσιαστούν στην συνέχεια επιγραμματικά οι μέθοδοι αυτές, με σκοπό την αιτιολόγηση της μεθόδου που τελικά επιλέχθηκε στο πλαίσιο της διατριβής.

Η Μέθοδος του Ολικού Κριτηρίου (MOK) δομείται από μια συνάρτηση χρησιμότητας ή αξιών (utility function) η οποία αποδελτιώνει τα πολλαπλά κριτήρια $g_1, g_2, \dots, g_n$ σε ένα μοναδικό κριτήριο. Η ευθεία που ορίζει η κατάταξη των κριτηρίων βάσει της συνάρτησης χρησιμότητας, ορίζει και την μεγαλύτερη ολική χρησιμότητα, την επιλογή δηλαδή που είναι προτιμητέα από τον μελετητή. Η Μέθοδος του Σταθμισμένου Μέσου (ΜΣΜ), είναι μία ξεπερασμένη μέθοδος πολυκριτήριας ανάλυσης, όπου συντελεστές βαρύτητας με φυσική σημασία αποτυπώνουν βαθμούς παραχωρήσεων (trade-offs) μεταξύ των κριτηρίων. Οι λόγοι για τους οποίους θεωρείται πλέον ξεπερασμένη είναι πρώτον ο τρόπος επικάλυψης των συντελεστών βαρύτητας, καθώς αυτοί εκφράζονται ως μονάδες βάρους των υπόλοιπων συντελεστών και δεύτερον η αδυναμία χειρισμού ποιοτικών δεικτών.

Η Μέθοδος Ικανοποιητικών Στόχων (ΜΙΣ) ανήκει στις κατηγορίες πολυκριτήριων αναλύσεων γραμμικού προγραμματισμού βελτιστοποίησης. Η λύση της μεθόδου είναι μοναδική, όπως και οι στόχοι του γραμμικού προγραμματισμού, και ο αποφασίζων ορίζει τις χαμηλότερες τιμές των κριτηρίων για να μεταβάλλει δυναμικά το αποτέλεσμα μέχρι την επίτευξη του επιθυμητού. Η ΜΙΣ μπορεί να τροποποιηθεί προκειμένου να εφαρμοστεί σε ποιοτικά κριτήρια (ασαφής προσέγγιση). Σε ότι αφορά την οικογένεια Μεθόδων ELECTRE, ανήκουν στη κατηγορία των μεθόδων υπεροχής ή outranking relations. Σ' αυτήν την οικογένεια μεθόδων, πραγματοποιείται συστηματική ανάλυση των σχέσεων όλων των δυνατών συνδυασμών των επιλογών. Η αρχιτεκτονική της μεθόδου περιλαμβάνει μια εξίσωση υπεροχής, δείκτες συμφωνίας και διαφωνίας με την επιθυμητή επιλογή και ένα βήμα ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Σκοπός της είναι η επιλογή μιας λύσης η οποία να είναι αρκετά «Καλή» για τα κριτήρια συμφωνίας, ενώ ταυτόχρονα να μην είναι σχετικά «Κακή» για τα κριτήρια διαφωνίας. Η οικογένεια περιέχει τις μεθόδους ELECTRE I, II, III, IV, TRI (που είναι και η περισσότερο αναλυτική).



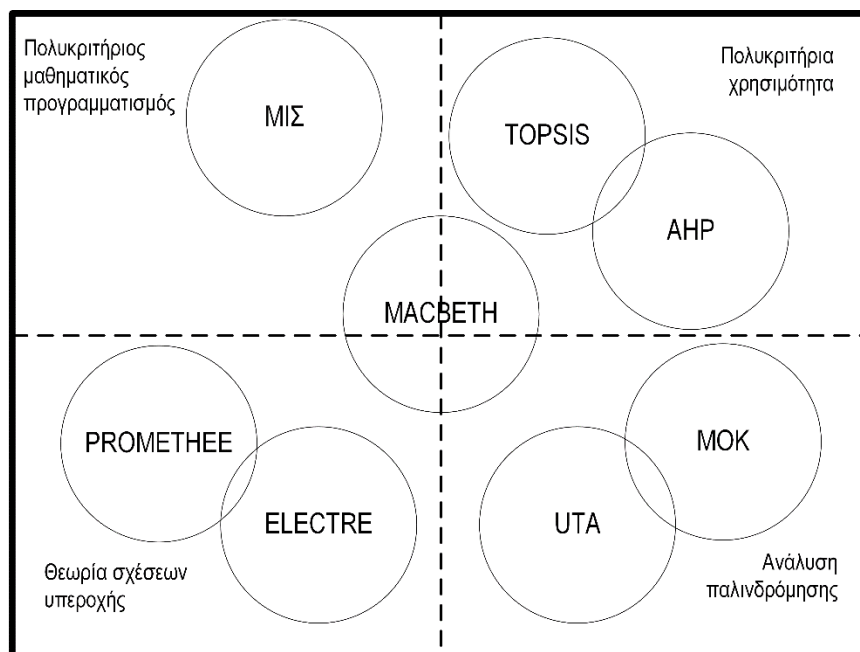
Εικόνα 5. 4 :Διάγραμμα ροής αλγορίθμου 2^{ου} Επιπέδου.

Οι Μέθοδοι UTA είναι οικογένεια μεθόδων (όπως και οι ELECTRE) που βασίζονται στη μονότονη παλινδρόμηση για την επιλογή της καταλληλότερης λύσης. Μπορούν να εφαρμοστούν και σε ποσοτικά αλλά και σε ποιοτικά κριτήρια ενώ λειτουργούν με περισσότερη ακρίβεια όταν τα υπό εξέταση κριτήρια απαντώνται από μια προσθετική συνάρτηση χρησιμότητας (όπως στην MOK). Η γενική φιλοσοφία των μεθόδων UTA είναι η ελαχιστοποίηση της ασάφειας μεταξύ των επικρατέστερων επιλογών μέσω της μεγιστοποίησης των αποστάσεων μεταξύ τους. Η επόμενη μέθοδος είναι η Αναλυτική Ιεραρχική (Analytical Hierarchy Process – AHP) και τυπικά αποτελεί μία υποκείμενη μέτρηση της απόστασης μεταξύ δύο κριτηρίων, τόσο ποσοτικών όσο και ποιοτικών. Από άποψη αρχιτεκτονικής, η μέθοδος ξεκινά με τον προσδιορισμό του προβλήματος και την ιεράρχηση των κριτηρίων αλλά και των πιθανών εκβάσεων ενώ εν συνεχεία συμπληρώνεται εμπειρικά η αλληλεπίδραση μεταξύ των κριτηρίων.

Το σημείο αυτό είναι και το σχετικά αδύνατο σημείο της μεθόδου καθώς η εμπειρική συμπλήρωση δεικτών αποτελεί μέσο ασάφειας αποτελέσματος και αδυναμίας επανάληψης της μεθόδου που ακολουθήθηκε από ανεξάρτητη ομάδα.

Στις αναλύσεις που κάνουν χρήση σχέσεων υπεροχής ανήκει και η Μέθοδος PROMETHEE. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μία διαφορετική προσέγγιση στην πολυκριτήρια μελέτη, καθώς δομείται μέσω τριών συναρτήσεων κριτηρίων, το αυστηρό κριτήριο (κανένα περιθώριο μεταβολής), το αυστηρό κριτήριο με περιοχή αδιαφορίας (μερική ελαστικότητα και περιθώριο μεταβολής) και κριτήριο με γραμμική προτίμηση. Με τον τρόπο αυτό, η σχέση υπεροχής είναι σαφώς ορισμένη και σε μερική απόσταση, γεγονός που της αποδίδει μικρή ευαισθησία σε αλλαγές και έτσι αποτελέσματα σημαντικής ακρίβειας. Η Μέθοδος MACBETH, εν αντιθέσει, αποτελεί μια αλληλεπιδραστική προσέγγιση η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της συνολικής ελκυστικότητας μιας λύσης (global attractiveness), εν μέσω πολλαπλών εναλλακτικών λύσεων. Στόχος της μεθόδου είναι η κατασκευή μιας αριθμητικής κλίμακας η οποία εκφράζει τη σχετική δύναμη της διαφοράς ελκυστικότητας μεταξύ των επιλογών. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις ανάγκης γνώσης της απόστασης μεταξύ των επιλογών, χαρακτηριστικό που την καθιστά κατάλληλη για προκαταρκτικούς σχεδιασμούς πολυκριτήριων προβλημάτων.

Τέλος, η Μέθοδος TOPSIS, χρησιμοποιείται σε ποσοτικά δεδομένα όπου εξαρτημένοι συντελεστές βαρύτητας αποδίδουν σημαντικότητα στα κριτήρια με σκοπό τον εντοπισμό καθολικής βέλτιστης λύσης. Η αρχιτεκτονική της δέχεται σαν εισόδους διαφορετικές τιμές ανά περίπτωση κριτηρίου, οι οποίες μετά την ενσωμάτωση των δεικτών βάρους αλλά και την κατηγοριοποίηση των κριτηρίων ως θετικά ή αρνητικά επηρεαζόμενων ως προς την τελική λύση, αποδίδουν μοναδική βέλτιστη λύση. Η Εικόνα 5. 5 παρουσιάζει τη σύνοψη των πολυκριτήριων μεθόδων, κατανεμημένων στις 4 κύριες κατηγορίες των αναλύσεων αυτών. Η μέθοδος MACBETH δεν ανήκει εξολοκλήρου σε καμία από τις 4 γι' αυτό και παρουσιάζεται στο κέντρο. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής θα γίνει χρήση της μεθόδου AHP εξαιτίας της ευελιξίας της τόσο σε ποσοτικές όσο και ποσοτικές μεταβλητές ενώ η συμπλήρωση των αντίστοιχων δεικτών θα γίνει μέσω αποδελτίωσης ανάλογης βιβλιογραφίας προς αποφυγή συμπλήρωσής της με υποκειμενικά κριτήρια.



Εικόνα 5. 5: Ποιοτική κατηγοριοποίηση μεθόδων πολυκριτήριων αναλύσεων.

5.2.2 Επιλογή τεχνολογίας

Με την αποδελτίωση των σημαντικότερων κριτηρίων επιλογής τεχνολογίας εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι πλέον σαφής η ιεράρχηση των σημαντικότερων κριτηρίων που θα καθορίσουν την τελική επιλογή τους. Ανάλογα με τα επικρατέστερα κριτήρια, γίνεται και η επιλογή των τεχνολογιών που θεωρούνται καταλληλότερες για τις ανάγκες της εκάστοτε περιοχής. Σε περιπτώσεις που κάποια τεχνολογία έχει επιλεχθεί αλλά κάποιο κριτήριο εμποδίζει την υλοποίησή της, όπως παραδείγματος χάρη η χρήση ηλιοθερμικών κατόπτρων σε περιοχή με μειωμένη διαθέσιμη έκταση, η τεχνολογία αυτή δεν συμπεριλαμβάνεται στον σχεδιασμό. Άλλη μια περίπτωση αποφυγής χρήσης κάποιας επιλεγμένης τεχνολογίας στο συνολικό μείγμα επιλεγμένων τεχνολογιών είναι η περίπτωση οι υπόλοιπες τεχνολογίες να έχουν μεγαλύτερη πρωτογενή δυναμικότητα στην υπό μελέτη περιοχή (Πίνακας 5. 2). Τελευταίο κριτήριο αποκλεισμού κάποιας επιλεχθείσας τεχνολογίας είναι η περίπτωση του κόστους της, συγκριτικά με τις υπόλοιπες (3^ο Επίπεδο).

5.2.3 Πίνακας αληθείας – Μέθοδος Quine McCluskey

Το επόμενο στάδιο σχεδιασμού είναι η δημιουργία του συστήματος κάλυψης αναγκών με τη χρήση των τεχνολογιών που επιλέχθηκαν. Προκειμένου να αποσαφηνιστεί ο τρόπος με τον οποίο μπορούν οι τεχνολογίες να συνεργαστούν, η HDLM κάνει χρήση της Δυαδικής Λογικής των ολοκληρωμένων ηλεκτρικών κυκλωμάτων για τον εντοπισμό του βέλτιστου συνδυασμού τους. Στο παρόν βήμα δεν λαμβάνονται υπόψη συνθήκες μερικής λειτουργίας για τον εξοπλισμό και στόχος είναι να κατασκευαστεί ο πίνακας αληθείας που περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς τρόπους συνδυασμού των τεχνολογιών. Η μερική λειτουργία των τεχνολογιών κάλυψης ενεργειακών αναγκών, αποτελεί ένα ευρύ και σύνθετο πεδίο του σχεδιασμού ενεργειακών συστημάτων. Κατά τη μερική λειτουργία, οι τεχνολογίες λειτουργούν σε συνθήκες χαμηλότερες της ονομαστικής τους απόδοσης, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο βαθμός απόδοσής τους. Σε συνθήκες πραγματικής λειτουργίας, οι τεχνολογίες κάλυψης αναγκών λειτουργούν κατά κανόνα υπό μερικό φορτίο και επομένως βρίσκονται συχνά σε συνθήκες μερικής λειτουργίας. Ο προσδιορισμός της απόδοσης των συστημάτων υπό μερική λειτουργία, ιδιαίτερα σε συνεργασία με παράλληλες διατάξεις κάλυψης αναγκών, αποτελεί ένα ζήτημα αυξημένου ενδιαφέροντος καθώς τόσο τεχνολογικά όσο και οικονομικά αναδιαμορφώνει την ολική απόδοση των συστημάτων αυτών.

Ο μελετητής στο σημείο αυτό προσδιορίζει, σε συνθήκες πλήρους και μόνον φορτίου, ποια είδη εξοπλισμού θα είναι οι κεντρικοί πάροχοι ενέργειας και ποιά θα είναι οι συμπληρωματικοί. Οι πίνακες αυτοί χρησιμοποιούνται τροποποιημένοι και με σαφώς λιγότερη πληροφορία, στην κατασκευή υπερδομών, ως «Πίνακες Συνδεσιμότητας». Η Εικόνα 5. 6 παρουσιάζει έναν τυπικό Πίνακα Συνδεσιμότητας ο οποίος χωρίζεται σε γραμμές και στήλες, όπου οι στήλες αποτελούν τις εισόδους ενέργειας στο σύστημα ενώ οι γραμμές τα φορτία και τον βαθμό εξυπηρέτησής τους από την εκάστοτε πηγή ενέργειας (δυαδικός όπου 1 εξυπηρετείται πλήρως και 0 δεν εξυπηρετείται).

Πίνακας Συνδεσιμότητας

0	1	1	0	Φορτίο 1
1	1	1	0	Φορτίο 2
0	0	0	0	Ζήτηση Αποθήκευσης
0	1	1	0	Φορτίο Ψύκτη Απορρόφησης
0	0	0	1	Ψυκτικό Φορτίο
Η/Θ Συλλέκτες	Αποθήκευση	Λέβητας Βιομάζας	Ψύκτης Απορρόφησης	

Εικόνα 5. 6: Απεικόνιση τυπικού Πίνακα Συνδεσιμότητας που χρησιμοποιείται στη κατασκευή υπερδομών.

Η χρήση του πίνακα αληθείας αντί του πίνακα συνδεσιμότητας προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και εντατικότερη αξιοποίηση της πληροφορίας που περιέχει. Ένας τυπικός πίνακας αληθείας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5. 3.

Πίνακας 5. 3: Τυπικός πίνακας αληθείας δύο μεταβλητών μονής εξόδου.

Μεταβλητές		Αποτέλεσμα
A	B	F
0	1	0
1	0	1
1	1	1

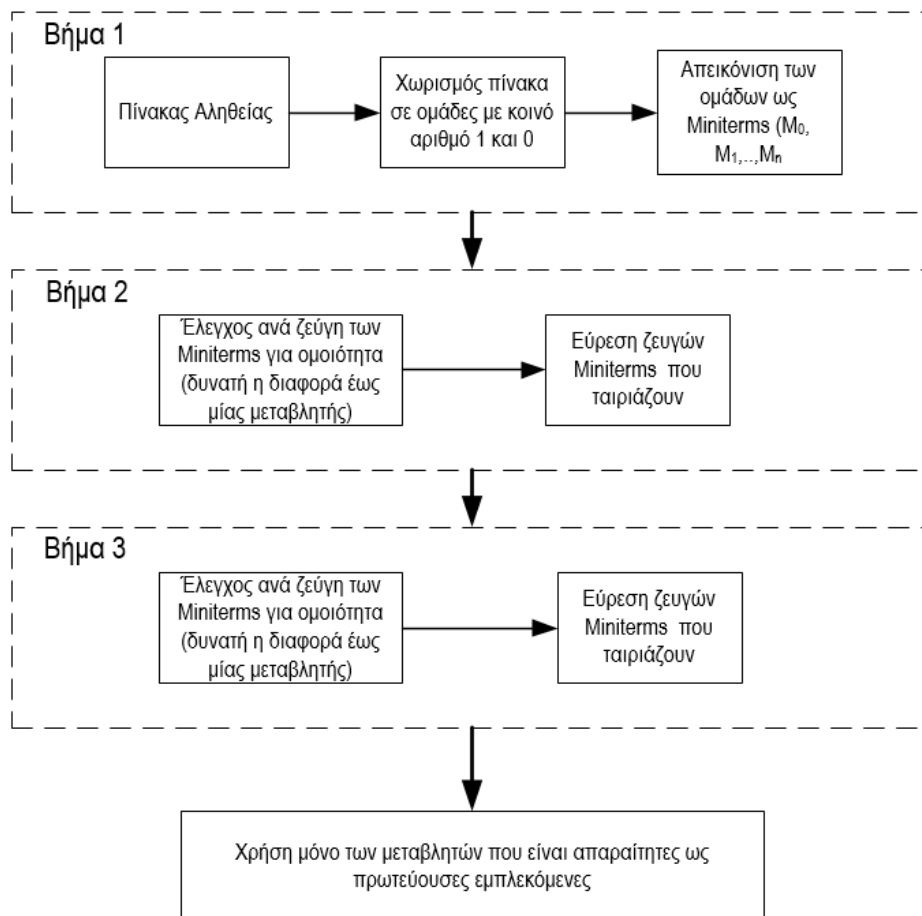
Με την αντιστοίχιση των τεχνολογιών σε διακριτές μεταβλητές (π.χ. ηλιοθερμικοί συλλέκτες - A, γεωθερμικές αντλίες - B κ.τ.λ.) μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ των εξυπηρετούμενων φορτίων σε έως δύο διαφορετικές εξόδους του συστήματος. Η πρώτη είναι η κάλυψη του φορτίου θέρμανσης (συμπεριλαμβανομένου του φορτίου ζεστού νερού χρήσης – ZNX) ενώ η δεύτερη αφορά την κάλυψη του φορτίου ψύξης (μέσω της τροφοδότησης θερμικώς καθοδηγούμενων μηχανών – Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.2.2). Έτσι, όταν ένας συνδυασμός (γραμμή του πίνακα αληθείας) εξυπηρετεί ένα από τα φορτία, ο μελετητής συμπληρώνει τον αριθμό 1 στην έξοδο του εξυπηρετούμενου φορτίου ενώ σε αντίθετη περίπτωση συμπληρώνει 0. Ο πίνακας αληθείας περιλαμβάνει τόσες μεταβλητές εισόδου όσες και οι επιλεχθείσες τεχνολογίες. Στον Πίνακα 5. 4 γίνεται η αναφορά στην φυσική σημασία που έχουν οι μεταβλητές στη δυαδική λογική.

Αφού ολοκληρωθεί ο πίνακας αληθείας, το επόμενο βήμα είναι η διάρθρωση του χάρτη Karnaugh. Ο χάρτης Karnaugh είναι ένα εργαλείο απλοποίησης της άλγεβρας Bool (Boolean algebra) όπου δυαδικές μεταβλητές συνδυάζονται για να εκφράσουν την συνάρτηση εξόδου του πίνακα αληθείας. Σκοπός του χάρτη Karnaugh είναι να εντοπίσει τα σημεία επαναληπτικού σχεδιασμού μεταξύ δύο μεταβλητών και να αποτυπώσει την εξίσωση της βέλτιστης αξιοποίησής τους. Η μέθοδος επίλυσης του χάρτη Karnaugh ονομάζεται Quine-McClysky από τους θεμελιωτές της μεθοδολογίας [11].

Πίνακας 5. 4: Αντιστοίχιση λογικών μεταβλητών με τα δυαδικά ανάλογά τους.

Μεταβλητές	Αποτέλεσμα
A	1
A'	0
B	1
B'	0

Η Εικόνα 5. 7 απεικονίζει τη διαγραμματική απεικόνιση της λογικής του αλγορίθμου Quine-McCluskey όπου κατά το πρώτο βήμα, απαιτείται ως είσοδος ο ολοκληρωμένος πίνακας αληθείας. Στη συνέχεια πρέπει να επιλεχθούν οι «μικροόροι» (Minterms) που αποτελούνται από ζεύγη γραμμών του πίνακα που ελέγχονται ανά δύο, για ομοιότητα.



Εικόνα 5. 7: Μεθοδολογία Quine-McCluskey για τη βελτιστοποίηση πίνακα αληθείας.

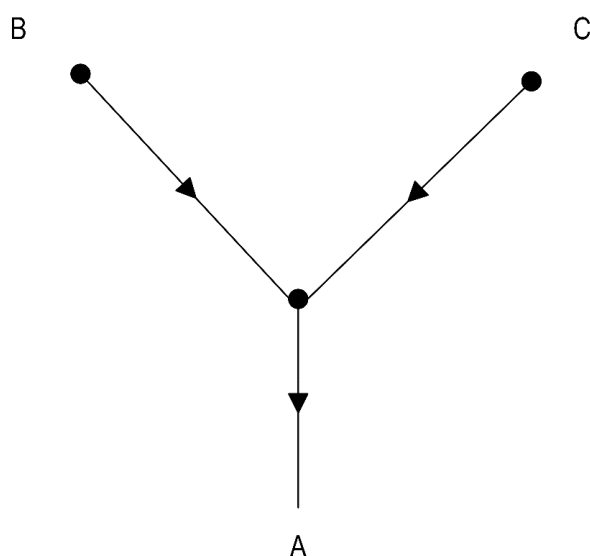
Ομοιότητα μεταξύ δύο γραμμών ορίζεται η ταύτιση των όρων τους με την ευελιξία να έχουν έως και έναν όρο διαφορετικό (αντί για 0, 1 ή και το αντίστροφο). Όλοι οι όροι που ικανοποιούν τη συνθήκη αποτελούν Minterms. Αυτοί οι Minterms συγκρίνονται επαναληπτικά διαδοχικά έως ότου να μην υπάρχει καμία ομοιότητα μεταξύ τους. Τέλος διαρθρώνεται ο ανάλογος πίνακας όπου παρουσιάζονται οι επικρατέστεροι Minterms. Minterms που δεν περιλαμβάνουν πληροφορία στο τελικό στάδιο (απεικονίζονται από άλλον Minterm) εξαιρούνται από την τελική συνάρτηση.

5.2.4 Πίνακας Μέγιστης Παραγωγής – Γράφος Διαδικασίας

Στο πέρας του προηγούμενου βήματος, το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η συνάρτηση βελτιστοποίησης για το σύστημα κάλυψης αναγκών. Ένα παράδειγμα της αποτύπωσης της συνάρτησης αυτής έχει την παρακάτω μορφή:

$$F = A'B + AB' + B^5$$

Η παράσταση αυτή αποτελεί μια αλγεβρική απλοποίηση της δυαδική αποτύπωσης της λειτουργίας του συστήματος βάσει των επιλογών του μελετητή. Οι επιλογές αυτές, στην τυπική μεθοδολογία υπερδομών, αναπαρίστανται με γράφους διαδικασίας (process graphs – P-graphs), οι οποίοι αποτελούν διατάξεις του υπό μελέτη συστήματος. Οι P-graphs, στα προβλήματα σύνθεσης διαδικασιών όπως είναι και η δημιουργία συστημάτων κάλυψης θερμικών αναγκών για ΕΚ, απεικονίζουν το άθροισμα των διαφορετικών σχεδιαστικών επιλογών. Η μαθηματική τους διατύπωση έγινε από τον Friedler et al. και αποτελούν μεθοδολογία επίλυσης σύνθετων και πολυκριτήριων προβλημάτων σύνθεσης διαδικασιών [15]. Στην Εικόνα 5. 8, απεικονίζεται η βασική δομή ενός P-graph που αποτελείται από δύο υλικά-εισόδους και μία μοναδική έξοδο-προϊόν. Η ροή της πληροφορίας δεν μπορεί να γίνει αντίστροφα (τα προϊόντα δεν μπορούν να επιστρέψουν στο στάδιο των μεμονωμένων υλικών, στην περίπτωση της παρούσας διατριβής δεν μπορεί η θερμική ή ψυκτική ενέργεια που παράγεται προς κατανάλωση να ξαναγίνει πρωτογενής ενέργεια ή χημική - καύσιμο), επομένως χαρακτηρίζεται ως γράφος μονής ροής ή κατευθυνόμενος γράφος. Αντίστοιχη είναι και η φιλοσοφία των συστημάτων παραγωγής ενέργειας (είσοδος) σε σχέση με την κατανάλωση (έξοδος).



Εικόνα 5. 8: Γράφος μονής ροής αποτελούμενος από δύο διαδικασίες για τη σύνθεση του αποτελέσματος.

Η μαθηματική μοντελοποίηση των γράφων διαδικασίας παρουσιάστηκε επίσης από τον Friedler et al. στην καινοτόμα αυτή εργασία, όπου ορίστηκε και η θεωρία υπερδομών ή γράφων μέγιστης παραγωγής. Προτιμάται από τον θεμελιωτή της θεωρίας ο όρος γράφος μέγιστης παραγωγής καθώς είναι περισσότερο περιεκτικός και δεν συγχέεται με τον όρο υπερδομών από την επιστήμη των υπολογιστών.

⁵ Εξισώσεις που δεν συνεισφέρουν σημαντικά στην εξέλιξη του κειμένου, δεν λαμβάνουν αρίθμηση. Το ίδιο ισχύει και για το θεώρημα της σελ. 98.

Επομένως, η μαθηματική αποτύπωση των γράφων διαδικασίας έχει ως εξής:

Αν $\mathbb{M}$ είναι ένα μη κενό σύνολο υλικών-εισόδων που θα συμμετάσχουν στο πρόβλημα της σύνθεσης και $x_1, x_2, \dots, x_n$ τα υλικά-είσοδοι, τότε ορίζεται ως:

$$\mathbb{M} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n)$$

και

$$\mathbb{M} = \{(A, \emptyset, \emptyset), (\emptyset, B, \emptyset), (\emptyset, \emptyset, C), (A, B, \emptyset), (\emptyset, B, C), (A, B, C)\}$$

παρουσιάζουν τον τρόπο αλληλεπίδρασης των εισόδων A, B, C για την δημιουργία του προϊόντος-εξόδου. Ένα τέτοιο μαθηματικό πρόβλημα αναπαρίσταται από τα υλικά ($\mathbb{M}$), από τα προϊόντα ($\mathcal{P}$) και από τα υλικά ($\mathcal{R}$) και από τις λειτουργικές μονάδες ($\mathcal{O}$) έτσι ώστε $\mathbb{M}(\mathcal{P}, \mathcal{R}, \mathcal{O})$. Η μαθηματική έκφραση αυτής της σχέσης είναι:

$$\mathcal{P} \subset \mathbb{M}, \mathcal{R} \subset \mathbb{M}, \text{ και } \mathcal{R} \subset \mathcal{P} = \emptyset$$

Βάσει του 1^{ου} Αξιώματος της θεωρίας P-graphs όπου τίθεται κλείσιμο υπό ένωση στη λύση-δομή, ορίζεται το εξής:
Η ένωση δύο λύσεων-δομών παραμένει λύση-δομή εάν:

$$\sigma_1 \in \mathcal{S}(\mathcal{P}, \mathcal{R}, \mathcal{O}) \text{ και } \sigma_2 \in \mathcal{S}(\mathcal{P}, \mathcal{R}, \mathcal{O})$$

τότε

$$(\sigma_1 \cup \sigma_2) \in \mathcal{S}(\mathcal{P}, \mathcal{R}, \mathcal{O})$$

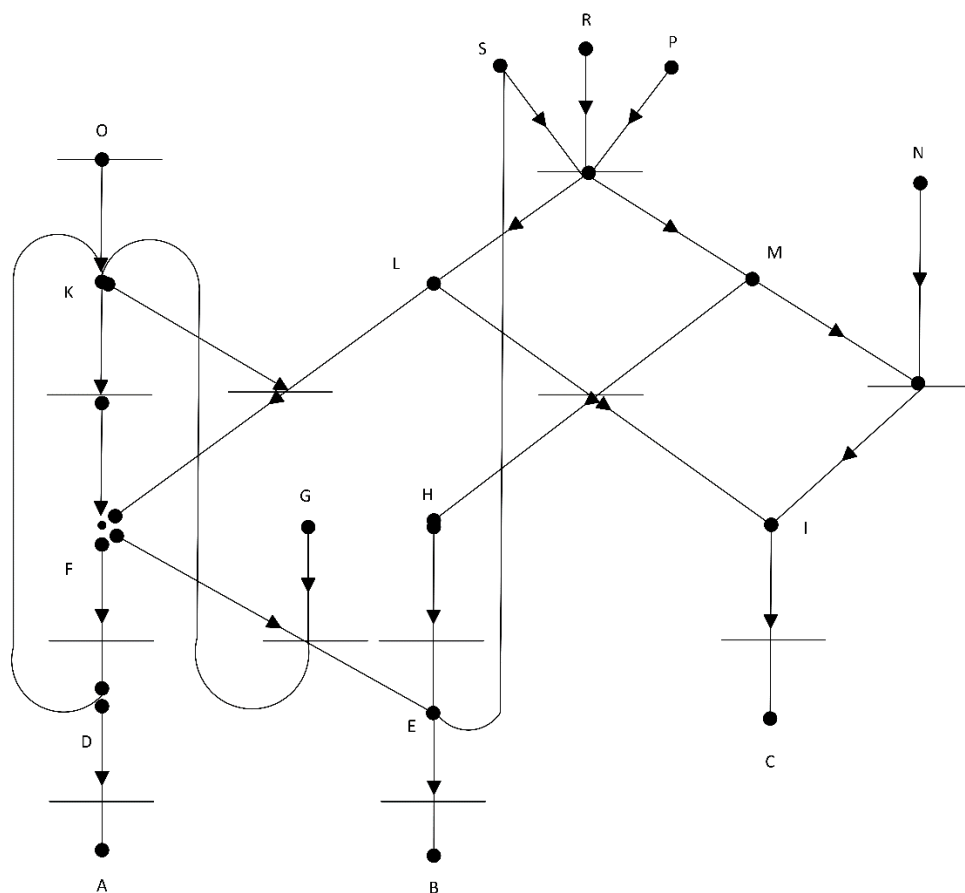
όπου σ_1, σ_2 λύσεις-δομές.

Εάν οι λύσεις του προβλήματος σύνθεσης είναι πεπερασμένες και κλειστές υπό του Αξιώματος, τότε σε αυτές περιέχεται μια μοναδική λύση-δομή που τις περιλαμβάνει όλες και χαρακτηρίζεται ως υπερδομή ή γράφος μέγιστης παραγωγής (ή στην προκειμένη πίνακας μέγιστης παραγωγής) και ορίζεται ως:

$$\mu(\mathcal{P}, \mathcal{R}, \mathcal{O}) = \bigcup_{\sigma \in \mathcal{S}(\mathcal{P}, \mathcal{R}, \mathcal{O})} \sigma \quad (13)$$

όπου το $\mu(\mathcal{P}, \mathcal{R}, \mathcal{O})$ είναι ένα στοιχείο που περιέχει όλες τις διαδικασίες που παράγουν ένα προϊόν [15]. Παράδειγμα υπερδομής σύνθετου προβλήματος σύνθεσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 5. 9.

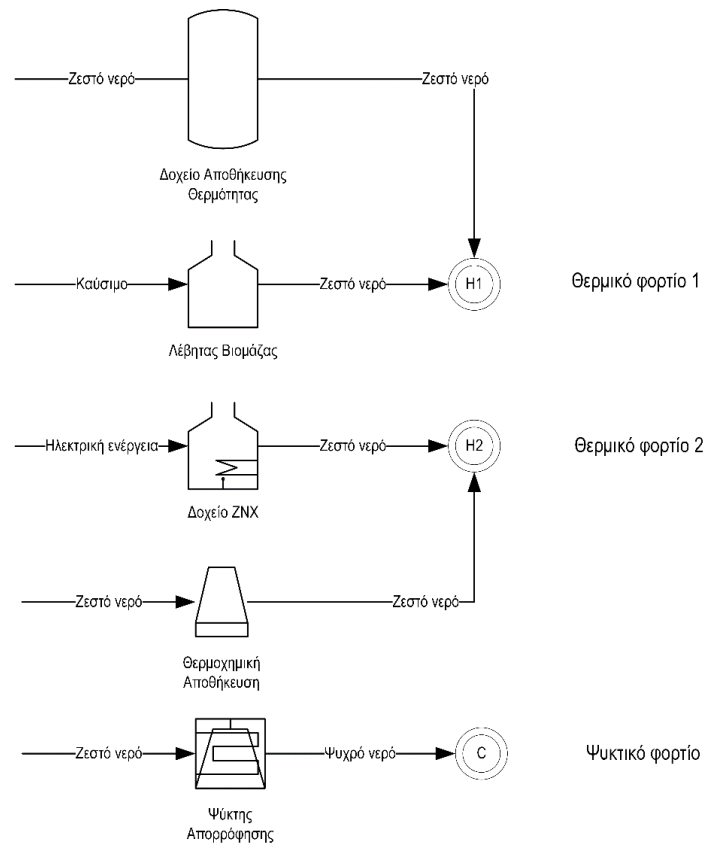
Οι απεικονίσεις αυτές αποτελούν χρήσιμα εργαλεία κατά το σχεδιασμό συστημάτων κάλυψης αναγκών, όπως αυτά που απασχολούν την παρούσα διατριβή. Οι μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής αναπαριστούν τα υλικά ενώ η κατανάλωση ενέργειας αναπαριστά το προϊόν (δύο προϊόντα στην προκειμένη, θερμική και ψυκτική ενέργεια). Έτσι μπορεί να αναχθεί η θεωρία γράφων διαδικασίας σε σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων, στα οποία όμως έχουν οριστεί πλήρως ο αριθμός των υλικών και ο αριθμός των προϊόντων. Με το πέρας του βήματος επιλογής τεχνολογιών, είναι γνωστά όλα τα δυνητικά υλικά, ενώ τα προϊόντα είναι γνωστά εξαρχής ως τα προς εξυπηρέτηση φορτία. Η Εικόνα 5. 9 απεικονίζει μια σύνθετη υπερδομή όπως αυτή παρουσιάζεται σε μονογραμμικό διάγραμμα ροής.



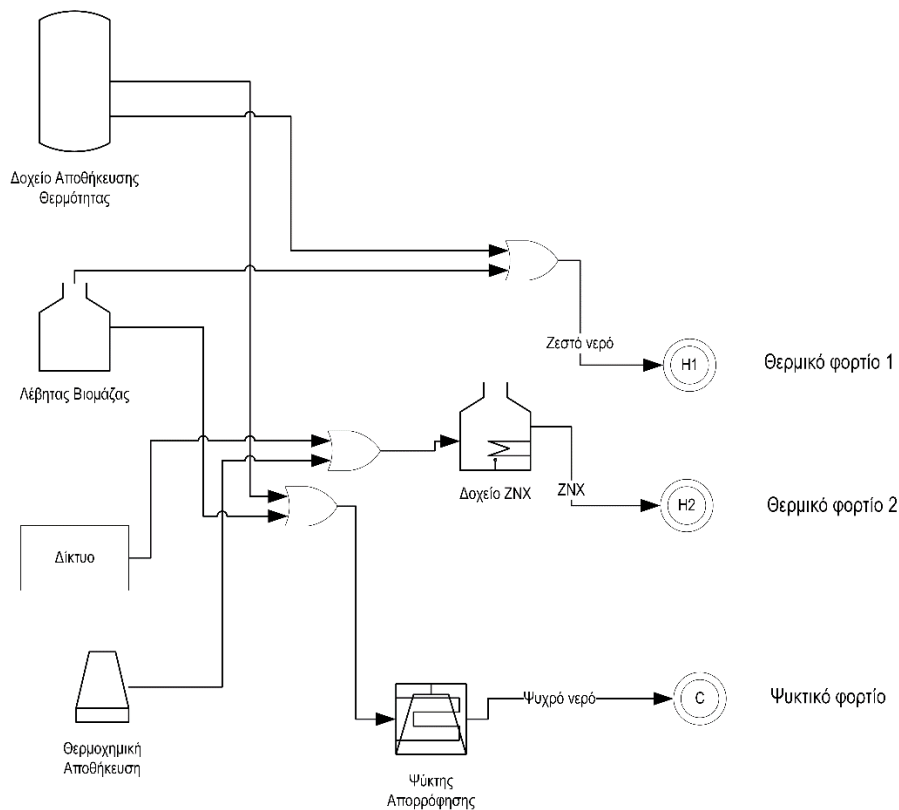
Εικόνα 5. 9: Απεικόνιση υπερδομής που αναπαριστά διαδικασία παραγωγής πολλαπλών προϊόντων από πολλαπλά υλικά. Προϊόντα τα K, F, A, B, C, E, L, M.

Η Εικόνα 5. 10 παρουσιάζει ένα παράδειγμα μέγιστης παραγωγής ενός συστήματος κάλυψης θερμικών και ψυκτικών αναγκών. Αξίζει να αναφερθεί, ότι η σημασιολογική (semantic) απόδοση των γράφων μέγιστης παραγωγής σε συστήματα κάλυψης αναγκών μεταφράζεται ως: η κάθε τεχνολογία που συμμετέχει, καλύπτει το 100% του προς εξυπηρέτηση φορτίου. Ποιοτικά, όλοι οι εξοπλισμοί έχουν διαστασιολογηθεί ώστε να καλύπτουν το κάθε φορτίο, λύση που αποτελεί ανεπαρκή πρόταση από άποψη διαστασιολόγησης για τους συμμετέχοντες εξοπλισμούς, καθώς αν λειτουργήσουν όλοι μαζί υπερκαλύπτουν το προς εξυπηρέτησης φορτίο με αποτέλεσμα απώλεια ενέργειας [16].

Συνδυάζοντας το αποτέλεσμα του πίνακα αληθείας (Ενότητα 5.2.3), με την θεωρία των γράφων μέγιστης παραγωγής, και με την εισαγωγή του 1^{ου} Αξιώματος των P-γράφων, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η λύση του πίνακα αληθείας αποτελεί μία από τις απεικονίσεις της διαδικασίας (τις οποίες περιέχει συνολικά η Εξ. 13 και ο γράφος μέγιστης παραγωγής). Ο συνδυασμός που προκύπτει είναι ένας γράφος διαδικασίας ο οποίος βελτιστοποιεί τη συνεργασία των υλικών (μονάδων παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής) ως προς το εξυπηρετούμενο υλικό (ενέργεια προς κατανάλωση). Παράδειγμα απεικόνισης γράφου διαδικασίας όπως προκύπτει από εξίσωση του βήματος 5.2.3 δίνεται στην Εικόνα 5. 11.



Εικόνα 5. 10: Παράδειγμα γράφου μέγιστης παραγωγής συστήματος κάλυψης θερμικών και ψυκτικών αναγκών.

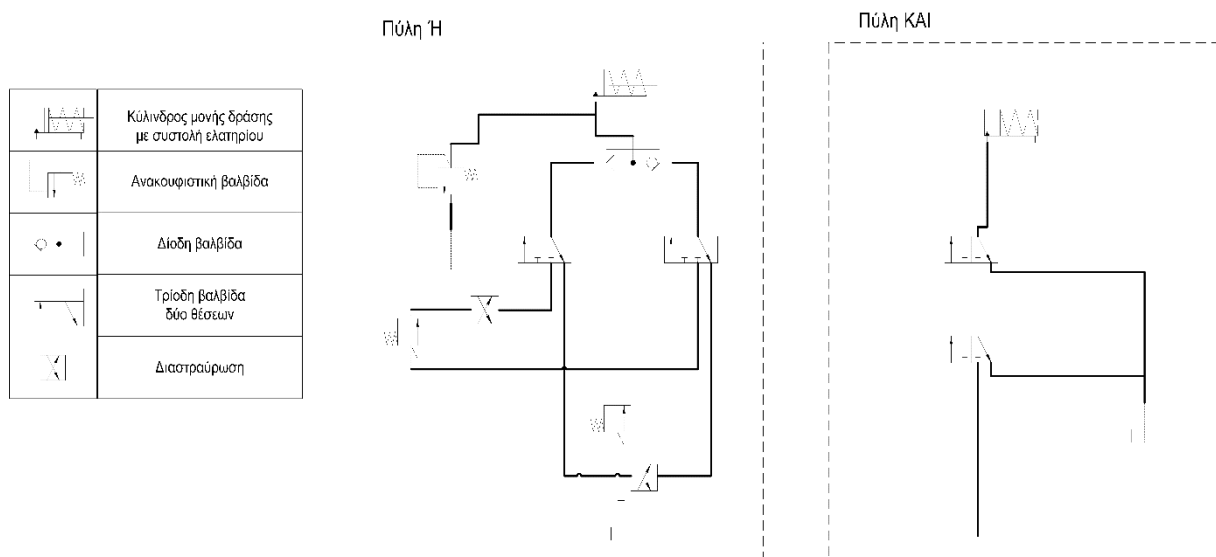


Εικόνα 5. 11: Παράδειγμα γράφου διαδικασίας, όπως προκύπτει από τον αντίστοιχο μετά τη βελτιστοποίηση, ως προς Quine-McCluskey, του αντίστοιχου πίνακα αληθείας.

Ολοκληρώνοντας τον γράφο μέγιστης παραγωγής και τον γράφο διαδικασίας όπως προκύπτει μετά τη βελτιστοποίηση ως προς Quine-McCluskey, το σύστημα απεικονίζεται με τη μορφή υπερδομής που περιέχει ορισμένη αλληλουχία λογικών πυλών. Η απόδοση αυτών στα υδραυλικά τους ανάλογα θα οδηγήσει στη βελτιστοποιημένη έκδοχή ενός συστήματος κάλυψης αναγκών, που περιέχει τις κατάλληλες τεχνολογίες ανά εφαρμογή, και που συνδυάζονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για να καλύψουν τα φορτία. Στο επόμενο βήμα θα αποδοθεί η αναλογία λογικών και υδραυλικών πυλών για την ολοκλήρωση και της μηχανολογικής αποτύπωσης του προτεινόμενου, ανά περίπτωση, σεναρίου.

5.2.4 Λογικές πύλες και υδραυλικά ανάλογα

Το τελευταίο στάδιο στον σχεδιασμό του συστήματος κάλυψης αναγκών του 2^{ου} Επιπέδου είναι η απόδοση των λογικών πυλών που εκφράζουν τον τρόπο διασύνδεσης του εξοπλισμού, στα υδραυλικά ανάλογά τους. Η πρώτη αποτύπωση της αναλογίας έγινε από τον Rohner P. το 1979 σε μια προσπάθεια μεταφοράς των διεθνώς αναγνωρισμένων υδραυλικών συμβόλων (βάσει των προτύπων ISO, DIN και CETOP), στη δυαδική λογική των πυλών [17]. Κεντρικός άξονας της προσπάθειας ήταν η μεταφορά ενός εργαλείου απλοποιημένης απεικόνισης ποιοτικής πληροφορίας (λογικές πύλες) σε ένα σύνθετο ποιοτικό και ποσοτικό ανάλογο της μηχανικής (υδραυλικές πύλες). Αποτύπωση των βασικότερων πυλών που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διατριβή με το αντίστοιχο υπόμνημα βρίσκεται στην Εικόνα 5. 12.



Εικόνα 5. 12: Απόδοση υδραυλικών αναλόγων των λογικών πυλών Ή και ΚΑΙ.

Στις βιβλιοθήκες του βιβλίου του Rohner υπάρχει απόδοση αρκετών ακόμη λογικών πυλών στα υδραυλικά τους ανάλογα, που βρίσκονται όμως εκτός της σκοπιάς της παρούσας διατριβής. Εκτός του υδραυλικού ελέγχου, με τις πύλες αυτές μπορεί να γίνει έλεγχος και πνευματικών συστημάτων. Η Εικόνα 5. 13 του Rohner παρουσιάζει την αποτύπωση των συνήθων πυλών Bool με την υδραυλική-πνευματική αναλογία τους αλλά και με το αποτέλεσμα που έχουν ως έξοδο [17].

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας αυτής αποτελεί *καινοτομία* στον τομέα του σχεδιασμού συστημάτων κάλυψης θερμικών και ψυκτικών φορτίων, καθώς συνδυάστηκαν εργαλεία που εξυπηρετούν στην απλοποίηση και στην αποφυγή επαναληπτικών βημάτων κατά τον σχεδιασμό. Αφού αποδοθούν οι ανάλογες υδραυλικές πύλες

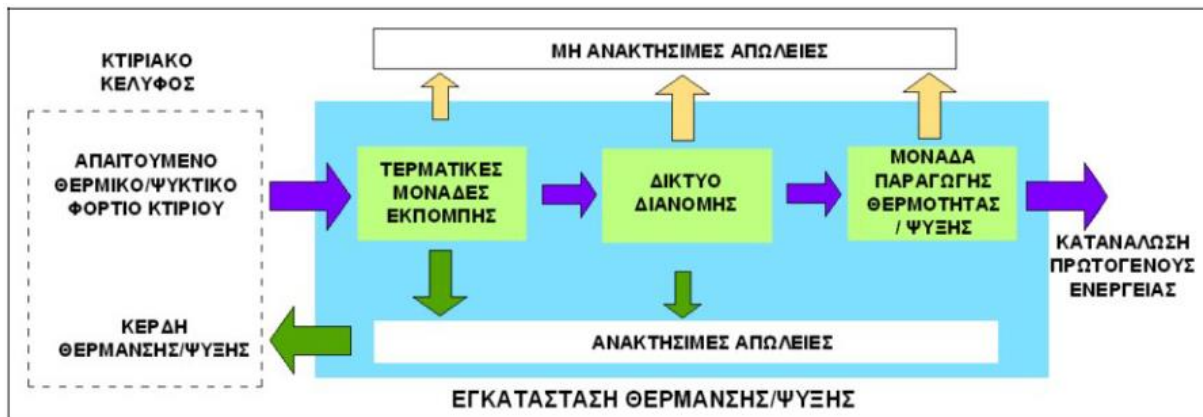
προς αντικατάσταση των λογικών, έχει ολοκληρωθεί η μηχανολογική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος του 2^{ου} Επιπέδου με την διαστασιολόγηση του εξοπλισμού που επιλέχθηκε.

5.2.5 Διαστασιολόγηση εξοπλισμού

Η ισχύουσα οδηγία για τη διαστασιολόγηση συστημάτων παραγωγής θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού (ΘΨΚ) και ζεστού νερού χρήσης (ΖΝΧ) είναι η «Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος» 20701/2010 (TO-TEE) [3]. Βάσει της τεχνικής οδηγίας, τα συστήματα ΘΨΚ και ΖΝΧ διαστασιολογούνται ώστε να καλύπτουν τα ετήσια φορτία αλλά και τις δυσμενέστερες κλιματικές συνθήκες ανά περιοχή. Στην ορθή διαστασιολόγηση σαφώς εμπίπτουν ζητήματα χρήσης χώρων των μελετών περίπτωσης, του ωραρίου λειτουργίας κτλ. Στην ανάλογη οδηγία καλύπτεται ένα μικρό δείγμα τεχνολογιών που εφαρμόζονται σε συστήματα ΘΨΚ και ΖΝΧ για τον ελλαδικό χώρο (τα ευρέως χρησιμοποιούμενα) και δεν αποδίδονται τα ανανεώσιμα συστήματα που εξετάζονται στη διατριβή αυτή (Εικόνα 5. 14). Στην κάλυψη αυτή υπεισέρχεται ο έλεγχος απόδοσης των συστημάτων αυτών, προκειμένου να υπολογιστούν οι κατάλληλες διαστάσεις για τους εξοπλισμούς αυτούς.

YES	$\begin{array}{c c} A & S \\ \hline 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{array}$			$A=S$
NOT	$\begin{array}{c c} A & S \\ \hline 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{array}$			$\bar{A}=S$
AND	$\begin{array}{c cc} A & B & S \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{array}$			$A \cdot B = S$
OR	$\begin{array}{c cc} A & B & S \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array}$			$A+B=S$
NAND	$\begin{array}{c cc} A & B & S \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{array}$			$\overline{A \cdot B} = S$
NOR	$\begin{array}{c cc} A & B & S \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{array}$			$\overline{A+B} = S$
INHIBITION	$\begin{array}{c cc} A & B & S \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{array}$			$A \cdot \bar{B} = S$
MEMORY				$A=S_1$ $B=S_0$

Εικόνα 5. 13: Πίνακας του Rohner για την απόδοση των λογικών πυλών (Bool) στα υδραυλικά-πνευματικά ανάλογά τους [17].



Εικόνα 5. 14: Κάλυψη αναγκών από συστήματα ΘΨΚ και ΖΝΧ στις κτιριακές δομές βάσει ΤΟΤΕΕ [3].

Τυπικά, όπως αναφέρεται στην σχετική οδηγία, η απόδοση καυστήρων-λεβήτων (συμβατικών καυσίμων και βιομάζας) ορίζεται ως:

$$n_{gen} = n_{gm} \times n_{g1} \times n_{g2} \quad (14)$$

όπου n_{gen} είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης της μονάδος, n_{gm} είναι ο βαθμός απόδοσης όπως μετρήθηκε από την ανάλυση καυσαερίων, n_{g1} είναι ο συντελεστής υπερδιαστασιολόγησης και n_{g2} είναι ο συντελεστής μόνωσης του καυστήρα-λέβητα [3]. Σε ότι αφορά συστήματα τηλεθέρμανσης, ο βαθμός απόδοσης λαμβάνεται ίσος με τον βαθμό απόδοσης του εναλλάκτη που χρησιμοποιείται από τη πλευρά του φορτίου. Για το ίδιο το δίκτυο διανομής, η θερμική μετάδοση Ψ_d υπολογίζεται από την Έξ. 15.

$$\Psi_d = \frac{\pi}{\frac{1}{2\lambda} \times \ln \frac{D}{d_a} + \frac{1}{h_a D}} \quad (15)$$

όπου λ [W/(m.K)] είναι η θερμική αγωγιμότητα της μόνωσης, D (m) είναι η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα μαζί με τη μόνωση, d_a (m) είναι η εξωτερική διάμετρος του σωλήνα σε m και h_a [W/(m²·K)] είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξωτερικά του μονωμένου σωλήνα.

Για τις αντλίες θερμότητας η οδηγία προτείνει τους μέσους ολικούς εποχικούς βαθμούς απόδοσης για αυτές ανάλογα με το θερμικό μέσο που χρησιμοποιείται (βάσει ΕΛΟΤ EN 15316.4.2:2008). Ο ανάλογος πίνακας παρουσιάζεται στον Πίνακα 5. 5.

Πίνακας 5. 5: Μέσος ολικός εποχικός βαθμός απόδοσης αντλιών θερμότητας βάσει TOTEE [3].

Πηγή Θερμότητας	Κτίρια τριτογενούς τομέα			Κτίρια κατοικιών	
	T < 35 °C	35 °C ≤ T ≤ 45 °C	45 °C ≤ T ≤ 55 °C	T < 35 °C	35 °C ≤ T ≤ 45 °C
Εξωτερικός αέρας	3,4	3,1	2,8	3,7	3,3
Έδαφος	5,5	5,1	4,7	3,8	3,4
Θερμότητα από καυσαέριο	6,1	5,1	4,4	--	--
Υπόγειο ή θαλασσινό νερό	4,7	4,2	3,6	4,5	4,1
Επιφανειακά νερά	4,1	3,7	3,3	--	--

Εν συνεχεία, η TOTEE συμπεριλαμβάνει και τα συμβατικά συστήματα όπως αυτά που κάνουν χρήση ηλεκτρισμού και ορυκτών καυσίμων πριν περάσει στα ψυκτικά συστήματα. Εκτός των κεντρικών κλιματιστικών μονάδων και των ανεμιστήρων οροφής, που βρίσκονται εκτός της σκοπιάς της παρούσας διατριβής, η TOTEE κάνει αναφορά στην απόδοση μονάδων απορρόφησης και προσρόφησης θερμικής ενέργειας (όπως αναφέρθηκαν και στο Κεφάλαιο 2). Ως βαθμός απόδοσης των μονάδων αυτών ορίζεται ο λόγος ενεργειακής απόδοσης (energy efficiency ratio – *EER*) που ορίζεται ως:

$$EER = \frac{kW_c}{kW_{th} + kW_{el}} \quad (16)$$

όπου kW_c είναι η ψυκτική ενέργεια που αποδίδει η μονάδα, kW_{th} είναι η θερμική ενέργεια που καταναλώνει και kW_{el} είναι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει η μονάδα για τη λειτουργία αντλιών και ανεμιστήρων [3].

Όσον αφορά τους ηλιοθερμικούς συλλέκτες, η απόδοση τους ορίζεται (ανά τύπο συλλέκτη) ως:

Για συλλέκτη σωλήνα κενού:

$$Q_c = Q_{abs} - Q_{loss} \quad (17)$$

όπου Q_{abs} (kWh_{th}) είναι η θερμική ενέργεια που απορροφήθηκε από τον συλλέκτη και Q_{loss} (kWh_{th}) είναι οι απώλειες με το περιβάλλον [18].

Για επίπεδο συλλέκτη:

$$Q_c = A[I_c \times (\tau\alpha)_e - U_c(T_{in} - T_a)] \quad (18)$$

όπου A (m²) είναι η επιφάνεια του συλλέκτη, I_c είναι η μέση ηλιακή ακτινοβολία (W/m²), $(\tau\alpha)_e$ είναι ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας του συλλέκτη, U_c είναι οι ολικές απώλειες (W/m²·K), T_{in} (K) είναι η θερμοκρασία του συλλέκτη και T_a είναι η θερμοκρασία του αέρα.

Για συγκεντρωτικό κάτοπτρο:

$$Q_c = F_R [C(\rho_{R,r} a_{R,r}) \dot{Q}_R - U_L(T_c - T_o) - \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_o^4)] A_{pdc} \quad (19)$$

όπου F_R ($W/m^2 \cdot K$) είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, $\rho_{R,r}$ είναι συντελεστής ανακλαστικότητας, $a_{R,r}$ είναι συντελεστής απορροφητικότητας και ε είναι ικανότητα εκπομπής του συλλέκτη. C ($J/kg \cdot ^\circ C$) είναι ο λόγος συγκέντρωσης, σ είναι η σταθερά των Stephan-Boltzmann, T_r ($^\circ C$) είναι η θερμοκρασία του συλλέκτη και T_o ($^\circ C$) είναι η θερμοκρασία αναφοράς. Q_R είναι η ανακλόμενη ακτινοβολία από τον συλλέκτη ($\rho_{rC} \times \alpha_{rC} \times I_{ds} \times A_C$), όπου ρ_{rC} και α_{rC} είναι αντίστοιχα οι συντελεστές ανακλαστικότητας και απορροφητικότητας του συλλέκτη, I_{ds} είναι η οριζόντια ακτινοβολία (W/m^2), στον συλλέκτη και A_C (m^2) είναι η ανακλαστική επιφάνεια [18].

Για τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, συνήθως ακολουθείται η απλουστευμένη εκδοχή του υπολογισμού της αποθηκευμένης του ενέργειας που δίνεται από την Εξ. 20.

$$Q_{stor} = q \times V \times c_p \times \Delta T \quad (20)$$

όπου q (kg/m^3) είναι η πυκνότητα του αποθηκευτικού μέσου, V (m^3) είναι ο αποθηκευτικός όγκος, c_p ($kJ/kg \cdot K$) είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού υπό σταθερή πίεση και ΔT (K) είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ προσαγωγής και επιστροφής στο αποθηκευτικό μέσο. Ανεξαρτήτως αποθηκευτικού μέσου (λανθάνουσας ή αισθητής θερμότητας) ο υπολογισμός της αποθηκευμένης ενέργειας υπολογίζεται μέσω της Εξ. 20 [18].

Οι παραπάνω θεωρητικές προσεγγίσεις των αποδόσεων του εξοπλισμού που απασχολούν τη παρούσα διατριβή, χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό της κατάλληλης μεθοδολογίας διαστασιολόγησης του εξοπλισμού για το σύστημα κάλυψης αναγκών. Παράδειγμα της θεωρητικής προσέγγισης αποτελεί το εξής: Υπολογισμένο δυσμενέστερο θερμικό φορτίο κατοικίας στα 20 kW_{th} . Το σύστημα θέρμανσης, έστω συμβατικού λέβητα πετρελαίου υπολογίζεται για να καλύψει το φορτίο αυτό, μετά την προσθήκη συντελεστή ασφαλείας 15% (σημείο υπερδιαστασιολόγησης), στα 23 kW_{th} εγκατεστημένης ισχύος. Όμως, ο πραγματικός εποχικός βαθμός απόδοσης του συστήματος καθορίζεται από την Εξ. 14 βάσει TOTE, και τυπικά κυμαίνεται από 89-93%. Επομένως αναμένεται απόδοση του συστήματος αυτού, βάσει διαστασιολόγησης, στα 21,4 $kW_{th,max}$. Αν συνυπολογιστεί και απώλεια στο δίκτυο μεταφοράς θερμότητας ακόμα 10 % (τυπική τιμή βάσει TOTE) τότε το σύστημα αποδίδει 19,09 $kW_{th,max}$ άρα ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να αυξηθεί περαιτέρω για να καλυφθούν πλήρως τα φορτία θέρμανσης του παραδείγματος. Γίνεται κατανοητό ότι χωρίς γνώση των θεωρητικών υπολογισμών απόδοσης ενέργειας του επιμέρους εξοπλισμού είναι αδύνατη η προσέγγιση της διαστασιολόγησης τους με ακρίβεια.

Απαραίτητη προϋπόθεση επομένως για την ακριβή διαστασιολόγηση είναι η γνώση της δυσμενέστερης περίπτωσης θερμικού και ψυκτικού φορτίου, βάσει TOTE [3]. Στην παρούσα διατριβή και προκειμένου η προτεινόμενη μεθοδολογία να είναι καθολικά εφαρμόσιμη, χρησιμοποιείται η μέθοδος βαθμομερών (degree days methodology) για τον υπολογισμό των θερμικών και ψυκτικών φορτίων. Η μέθοδος επίσης χρησιμοποιείται και για τον τυπικό υπολογισμό της ετήσιας ζήτησης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας, ως μέσο διασταύρωσης των υπολογισμών της KIM (Εξ. 2). Η μέθοδος παρουσιάζεται από τις Εξ. 21, 22, 23, 24.

$$(DD)_h = \sum_m (T_b - T_{av})^+ \quad (21)$$

$$(DD)_c = \sum_m (T_{av} - T_b)^+ \quad (22)$$

$$D_h = \frac{86,4 \times 10^3 \times Q_h}{(T_i - T_o)} (DD)_h \quad (23)$$

$$D_c = \frac{86,4 \times 10^3 \times Q_c}{(T_o - T_i)} (DD)_c \quad (24)$$

όπου T_b είναι η θερμοκρασία αναφοράς, T_{av} είναι η μέση εξωτερική θερμοκρασία, $86,4 \times 10^3$ είναι τα δευτερόλεπτα ενός 24ώρου, Q_h είναι οι αισθητές απώλειες θερμότητας ενώ Q_c οι αισθητές απώλειες ψύξης, $T_o - T_i$ είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος [19].

Με τις Εξ. 21, 22 υπολογίζονται οι βαθμοημέρες θέρμανσης και ψύξης, οι ώρες δηλαδή που παρατηρούνται απώλειες. Οι Εξ. 23, 24 χρησιμοποιούν τις βαθμοημέρες θέρμανσης και ψύξης για να υπολογίσουν τις ετήσιες ανάγκες σε θέρμανση και ψύξη. Βάσει των υπολογισμένων φορτίων διαστασιολογείται αναλόγως και ο εξοπλισμός κάλυψης των αναγκών.

5.2.4.1 Παραδοχές

Η μεθοδολογία διαστασιολόγησης σε συστήματα που περιέχουν περισσότερες από μια τεχνολογίες όπως αυτά που απασχολούν την παρούσα διδακτορική διατριβή (συστήματα υπερδομών που αναλύθηκαν στην Ενότητα 5.2.4) και συγκεκριμένα συστήματα τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πρέπει να εκτιμούν τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής. Ο γενικός κανόνας είναι ότι σε περιοχές όπου κατά τους χειμερινούς μήνες (μήνες με τη δυσμενέστερη κατάσταση θέρμανσης) η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή, εξοπλισμός όπως οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες δεν μπορούν να καλύψουν το συνολικό φορτίο θέρμανσης [18]. Σε αντιστοιχία, λόγω της εποχιακής διακύμανσης της θερμοκρασίας των θερμικών μέσων των αντλιών θερμότητας αλλά και του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας τους, ούτε αυτές μπορούν να καλύψουν πλήρως το φορτίο θέρμανσης (σημαντική παρατήρηση στη συγκεκριμένη δήλωση είναι ότι αναφέρεται σε μονοβάθμιες αντλίες – ένας συμπιεστής – ενώ διβάθμιες έχουν υψηλότερο θερμοκρασιακό εύρος και μπορούν να καλύψουν τα δυσμενέστερα φορτία). Συνήθως στην περίπτωση των αντλιών με υπερδιαστασιολόγηση αυτό το φαινόμενο μπορεί να αντιμετωπιστεί, αλλά έτσι προκύπτει σύστημα που λειτουργεί υπό μερικό φορτίο για το μεγαλύτερο μέρος του ημερολογιακού έτους [3].

Τα περισσότερα αξιόπιστα συστήματα στις περιπτώσεις αυτές είναι οι λέβητες βιομάζας που οι εποχιακοί βαθμοί απόδοσής τους είναι σημαντικά υψηλότεροι και επομένως μπορούν να τροφοδοτήσουν τα φορτία θέρμανσης. Σε περίπτωση επομένως περιοχής με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία κατά τους χειμερινούς μήνες, και εφόσον ο λέβητας βιομάζας έχει επιλεγεί ως δόκιμη τεχνολογία για την περιοχή, διαστασιολογείται αυτός ως η κύρια τεχνολογία κάλυψης του δυσμενέστερου θερμικού φορτίου βάσει TOTE [3]. Για το φορτίο ψύξης και προκειμένου το σχεδιαζόμενο σύστημα να περιέχει όσο το δυνατόν υψηλότερο ανανεώσιμο κλάσμα παραγωγής, οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες που έχουν το κατάλληλο θερμοκρασιακό εύρος, διαστασιολογούνται για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων βάσει της Εξ. 16. Οι αντλίες θερμότητας αποτελούν συμπληρωματικά συστήματα καθώς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν εξ ολοκλήρου θερμικώς καθοδηγούμενες μηχανές. Σημαντική παράμετρος στη συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι επίσης το κόστος εγκατάστασης, π.χ. οι αντλίες θερμότητας για κλίμακες ΕΚ ως συστήματα κεντρικής παραγωγής έχουν σημαντικό κόστος (ακόμα υψηλότερο έχουν οι διβάθμιες αντλίες θερμότητας) [20]. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, δεν συμπεριλαμβάνει, κατά την αρχική διαστασιολόγηση, συνθήκες μερικής λειτουργίας για τις τεχνολογίες που θα επιλεγθούν.

Μείζονα ρόλο στα συστήματα κάλυψης θερμικών και ψυκτικών αναγκών που κάνουν χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διαδραματίζουν τα συστήματα αποθήκευσης. Αν και σε σενάριο θέρμανσης μπορούν να αντισταθμίσουν τις δυσμενέστερες συνθήκες κατά περίπτωση, δεν αποτελούν ασφαλή στρατηγική διαστασιολόγησης του συστήματος. Η ενεργειακή ασφάλεια, που είναι και ένας εκ των στόχων του προτεινόμενου εργαλείου,

είναι απαιτούμενη κατά τον σχεδιασμό και έτσι είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός αδιάλειπτου συστήματος κάλυψης των αναγκών. Τα αποθηκευτικά μέσα, όπως και οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες, διαστασιολογούνται κατά την καλοκαιρινή περίοδο, όπου η μεθοδολογία διαστασιολόγησης τους, βάσει του Sillman S., υπολογίζει τον απαιτούμενο όγκο θερμικής αποθήκευσης ως προς την ημέρα του έτους με την υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία [21]. Στην περίπτωση αυτή, το ηλιοθερμικό πεδίο μπορεί να παράγει θερμική ενέργεια κοντά στην εγκατεστημένη του ισχύ, και αυτή πρέπει να είναι και η χωρητικότητα σε θερμική ενέργεια του συστήματος αποθήκευσης (οι συντελεστές απόδοσης ενδιάμεσου εξοπλισμού όπως του δικτύου διανομής αλλά και του εναλλάκτη θερμότητας πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη).

Στο τέλος της ενότητας αυτής ολοκληρώνεται το 2^ο Επίπεδο σχεδιασμού συστημάτων κάλυψης αναγκών ΕΚ της HDLM. Όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 5. 4 τα βήματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αποτελούν την αλγοριθμική αποτύπωση του επιπέδου αυτού. Στη συνέχεια γίνεται η μετάβαση στο επόμενο και τελευταίο επίπεδο, το 3^ο Επίπεδο της οικονομικής αποτίμησης του προτεινόμενου συστήματος. Στο επίπεδο αυτό θα παρουσιαστούν οι δείκτες αξιολόγησης ενός επενδυτικού πλάνου για αγορά και εγκατάσταση ενός συστήματος κάλυψης αναγκών, όπως αυτό προτείνεται από το 2^ο Επίπεδο.

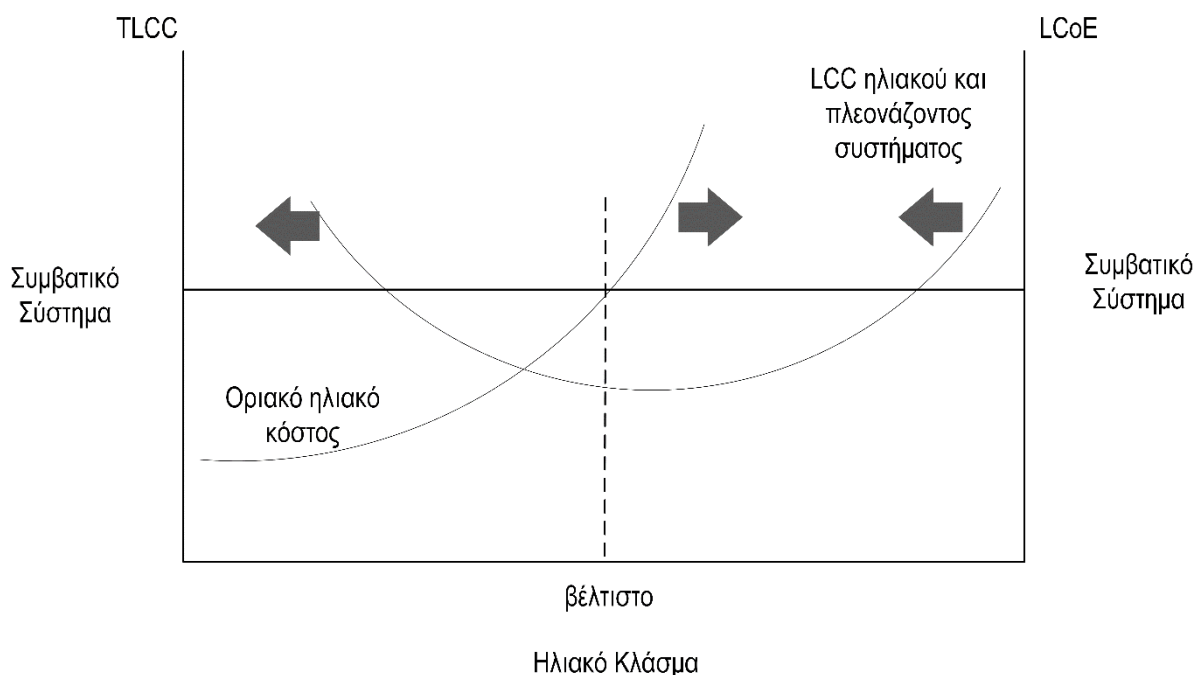
5.3 HDLM – 3^ο Επίπεδο: Οικονομική Αποτίμηση Προτεινόμενου Συστήματος

Σε επίπεδο επενδύσεων, τα συστήματα κάλυψης αναγκών αξιολογούνται οικονομικά με τη χρήση σημαντικών δεικτών οικονομικής απόδοσης (key performance indicators – KPIs). Οι συνηθέστεροι οικονομικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις αυτές σχετίζονται με το κόστος της αρχικής επένδυσης, την ανάλυση της επίδρασης του πληθωρισμού, την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης για τα έτη λειτουργίας της, το κόστος της ενέργειας που προσφέρει (συγκριτικά με αντίστοιχα συμβατικά συστήματα), τα λειτουργικά κόστη που αφορούν την ετήσια συντήρηση και λειτουργία του συστήματος, τον εσωτερικό ρυθμό επιστροφής κεφαλαίου στον επενδυτή και τον ετήσιο ρυθμό επιστροφής κεφαλαίου.

Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιβλιογραφία για την οικονομική αξιολόγηση διάφορων παρεμβάσεων ενέργειας, είτε είναι νέες τεχνολογίες είτε είναι μεγαλύτερα επενδυτικά σενάρια όπως αυτά των υπερδομών. Προκειμένου να διεκπεραιωθεί ορθά μια οικονομοτεχνική ανάλυση για ενεργειακά συστήματα, δύο απαραίτητοι δείκτες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι το σταθμισμένο κόστος ενέργειας (levelized cost of energy – LCoE) και ο λόγος αποταμίευσης/επένδυσης (savings to investment ratio – SIR) [22]. Ο συνδυασμός αυτών των δεικτών για την ορθότερη αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος από το 2^ο Επίπεδο είναι και ο στόχος του 3^{ου} Επιπέδου.

Η οικονομική θεωρία, σε ότι αφορά υβριδικά συστήματα ενέργειας, δίνει ιδιαίτερη έμφαση στις πλεονάζουσες μονάδες, τον αριθμό τους και την εγκατεστημένη ισχύ τους. Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 5.2.4, στα ανανεώσιμα συστήματα ενέργειας, λόγω διαλειπτότητας της παραγωγής απαιτούνται πλεονάζουσες μονάδες (όπως οι λέβητες βιομάζας ή σε κάποιες περιπτώσεις αντλίες θερμότητας) που αντισταθμίζουν τις ώρες ή ημέρες διαλειπτής παραγωγής. Σε πολλές οικονομικές αναλύσεις η αποθήκευση θερμότητας χρησιμοποιείται ως πλεονάζουσα μονάδα, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου είναι υπερδιαστασιολογημένη συγκριτικά με την παραγωγική ικανότητα του συστήματος [20]. Πρέπει επομένως να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση από τον μελετητή στην ελαχιστοποίηση της επιλογής πλεονάζοντος εξοπλισμού αλλά και βελτιστοποίησης της κάλυψης των αναγκών. Η Εικόνα 5. 15 παρουσιάζει την ποιοτική απεικόνιση της οικονομικής βελτιστοποίησης ως προς το ηλιακό κλάσμα. Οι άξονες αντιπροσωπεύουν το κόστος ενέργειας (LCoE) ως προς το ολικό κόστος κύκλου ζωής του συστήματος (total life-cycle analysis - TLCC) [22].

Στην εικόνα φαίνεται η μεταβολή του οριακού ηλιακού κόστους καθώς αυξάνεται το ηλιακό κλάσμα (επένδυση σε περισσότερους συλλέκτες για εκμετάλλευση ηλιακής ακτινοβολίας), σε σύγκριση με συμβατικό σύστημα κάλυψης θερμικών αναγκών λέβητα αερίου. Παρατηρείται ότι καθώς αυξάνεται το ηλιακό κλάσμα, το «νεκρό σημείο» της επένδυσης εντοπίζεται στο σημείο που το κόστος του συμβατικού συστήματος είναι ίδιο με αυτό του ηλιακού. Για περαιτέρω αύξηση του ηλιακού κλάσματος αυξάνεται το κόστος επένδυσης και κατ' επέκταση το κόστος ενέργειας (LCoE). Η καμπύλη που αφορά το κόστος ηλιακού και πλεονάζοντος συστήματος, που είναι και η περίπτωση που μελετάται στην παρούσα διατριβή, μπορεί να χωριστεί σε τρεις διακριτές περιοχές, στην περιοχή στα αριστερά της γραφικής παράστασης (χαμηλό ηλιακό κλάσμα, υψηλό κόστος σε σχέση με το συμβατικό σύστημα), στην περιοχή που εντοπίζεται στο κέντρο της γραφικής παράστασης (μέτριο ηλιακό κλάσμα, χαμηλότερο κόστος του συμβατικού) και στην περιοχή στα δεξιά της γραφικής παράστασης (υψηλό ηλιακό κλάσμα και κόστος επένδυσης υψηλότερο του συμβατικού). Στο αριστερό τμήμα, το κόστος του υβριδικού συστήματος, εξαιτίας του χαμηλού ηλιακού κλάσματος, το κόστος της παραγόμενης ενέργειας είναι υψηλότερο του συμβατικού, καθώς αυξάνεται σημαντικά το κόστος της επένδυσης εξαιτίας των συλλεκτών. Στο κεντρικό τμήμα της γραφικής παράστασης, το ηλιακό κλάσμα είναι υψηλότερο της προηγούμενης περίπτωσης, το πλεονάζον σύστημα λειτουργεί λιγότερο με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος της ενέργειας σε σχέση με το συμβατικό. Στο δεξιό τμήμα, το ηλιακό κλάσμα είναι υψηλό, γεγονός που επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση περισσότερων συλλεκτών σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, με το κόστος εγκατάστασης αλλά και κατ' επέκταση το κόστος της ενέργειας να αυξάνονται σημαντικά, περισσότερο του συμβατικού.



Εικόνα 5. 15: Οικονομική βελτιστοποίηση ηλιακού κλάσματος ως προς το κόστος το οριακό κόστος συστήματος. Αντιπαραβάλλεται το κόστος του συμβατικού αντίστοιχου συστήματος.

Σε ότι αφορά το λειτουργικό κόστος ή “operational and maintenance expenditures (OPEX)”, συνήθως στη βιβλιογραφία λαμβάνεται ως 1-2% επί του κόστους επένδυσης. Η συνήθης αυτή πρακτική όμως είναι εφαρμόσιμη χωρίς σημαντικά περιθώρια σφάλματος, για συμβατικά συστήματα που οι κύκλοι λειτουργίας τους είναι γνωστοί και έχουν αναλυθεί εκτενώς. Για ανανεώσιμα συστήματα δεν είναι δόκιμη η χρήση αυτού του ποσοστού καθώς η μεταβλητότητα του κόστους συντήρησης και λειτουργίας παρουσιάζει σημαντική αβεβαιότητα και ποικίλει στη

διαθέσιμη βιβλιογραφία [22]. Στη συνέχεια του παρόντος Κεφαλαίου θα παρουσιαστεί αναλυτικά ο υπολογισμός των KPIs που θα χρησιμοποιηθούν για την οικονομική αποτίμηση του εξοπλισμού που προσδιορίστηκε στο 2^ο Επιπέδου.

5.3.1 Κόστος Αρχικού Κεφαλαίου (Capital Expenditures – CAPEX)

Το κόστος αρχικού κεφαλαίου αναφέρεται στο ποσό δανεισμού που πρέπει να ληφθεί από την δυνητική ΕΚ προκειμένου να αγοραστεί ο δυνητικός εξοπλισμός κάλυψης των αναγκών τους. Προκύπτει από την Εξ. 25.

$$CAPEX = \sum_{n=l} q_n \text{ (€)} \quad (25)$$

όπου q είναι οι μονάδες της υπερδομής προς κάλυψη των αναγκών, n είναι το κόστος της εκάστοτε μονάδας και l είναι το σύνολο των μονάδων που δυνητικά θα αποκτηθούν [22].

5.3.2 Αποσβέσεις (Discount Rate)

Οι αποσβέσεις μιας επένδυσης εξοπλισμού αναφέρονται στην ετήσια πτώση της αξίας του εξοπλισμού από τη στιγμή αγοράς, λόγω πληθωριστικών μεταβολών και χρήσης του εξοπλισμού. Η επιλογή του κατάλληλου δείκτη απώλειας αξίας (ποσοστιαία μονάδα) είναι απαραίτητη για την ανάλυση της παρούσας αξίας του εξοπλισμού για οποιοδήποτε έτος και ο τύπος υπολογισμού του δίνεται από την Εξ. 26.

$$\begin{aligned} (1 + d_n) &= (1 + d_r)(1 + e) \\ d_n &= [(1 + d_r)(1 + e)] - 1 \text{ (%) } \\ d_r &= \left[\frac{(1 + d_n)}{(1 + e)} \right] - 1 \end{aligned} \quad (26)$$

όπου d_n είναι η ονομαστική πτώση αξίας, d_r είναι η πτώση αξίας χωρίς τον πληθωρισμό (πραγματική) και e είναι ο ρυθμός πτώσης.

5.3.3 Κόστος Συντήρησης και Λειτουργίας (Operational Expenditures – OPEX)

Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας αναφέρεται στο ποσό που δαπανάται ετησίως από την δυνητική ΕΚ προκειμένου να λειτουργήσει ο εξοπλισμός κάλυψης των αναγκών. Προκύπτει από την Εξ. 27.

$$OPEX = \sum_{n=l} a_n + m_n \text{ (€)} \quad (27)$$

όπου a είναι το λειτουργικό κόστος των n μονάδων του συστήματος και m είναι το αντίστοιχο κόστος συντήρησης τους [22].

5.3.4 Σταθμισμένο Κόστος Ενέργειας (Levelized Cost of Energy – LCoE)

Το σταθμισμένο κόστος ενέργειας αναφέρεται στην τιμή της μονάδας ενέργειας όπως αυτή προκύπτει από το κόστος που έχει επενδυθεί για την απόκτηση του εξοπλισμού αλλά και την απόδοση σε ενέργεια, του συστήματος κατά τη διάρκεια ζωής του. Η Εξ. 28 παρουσιάζει τον αναλυτικό τρόπο υπολογισμού του σταθμισμένου κόστους ενέργειας [22].

$$LCoE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1 + d_r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1 + d_r)^t}} \text{ (€/kWh)} \quad (28)$$

όπου I_t είναι το κόστος επένδυσης σε έτη t , το M_t είναι τα λειτουργικά κόστη αλλά και κόστη συντήρησης για τα έτη t , F_t είναι τα έξοδα για καύσιμα στα έτη t (π.χ. βιομάζα), E_t είναι η παραχθείσα θερμική και ψυκτική ενέργεια από το σύστημα κατά τα έτη n , d_r είναι ο ρυθμός απώλειας αξίας του συστήματος ως αυτός έχει υπολογισθεί στην Εξ. 26 και n είναι τα συνολικά έτη εκτιμώμενης ζωής του συστήματος.

5.3.5. Ρυθμός Απόσβεσης της Επένδυσης (Return of Investment – ROI)

Ο ρυθμός επιστροφής της επένδυσης αναφέρεται στο ποσό εισροών από το σύστημα (σε χρηματικές μονάδες) ως αυτές παρήχθησαν από το σύστημα ετησίως, συγκριτικά με το αρχικό κόστος επένδυσης. Ο αναλυτικός τύπος υπολογισμού του ROI παρουσιάζεται στην Εξ. 29 [22].

$$ROI = \frac{Net\ Revenue - CAPEX}{CAPEX} (\%) \quad (29)$$

5.3.6 Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV)

Η καθαρή παρούσα αξία αναφέρεται στην αξία της επένδυσης υπολογισμένη στο παρόν ως προς την δυνητική μελλοντική χρηματορροή από αυτή. Ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού της δίνεται από την Εξ. 30.

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1 + d_r)^t} - CAPEX \text{ (€)} \quad (30)$$

Όπου R_t είναι η καθαρή χρηματορροή στο σύνολο των περιόδων υπολογισμού της αξίας, t είναι οι περίοδοι υπολογισμού της καθαρής παρούσας αξίας και $CAPEX$ είναι το αρχικό κόστος επένδυσης [22].

5.3.7 Περίοδος Απόσβεσης (Payback Period – PP)

Η περίοδος απόσβεσης της επένδυσης αναφέρεται στο χρονικό διάστημα που απαιτείται από το επενδεδυμένο σύστημα για να παράγει συνολικά το αρχικό κόστος επένδυσης. Η Εξ. 31 παρουσιάζει τον αναλυτικό υπολογισμό της περιόδου απόσβεσης [22].

$$PP = \frac{CAPEX}{R_t} \text{ (έτη)} \quad (31)$$

Η οικονομική ανάλυση συστημάτων κάλυψης αναγκών προσεγγίζεται με τους δείκτες που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Είναι θεμιτό μετά τον αρχικό υπολογισμό να πραγματοποιείται ένας κύκλος ανάδρασης με τα αρχικά βήματα της οικονομικής αποτίμησης, για να εξακριβωθεί η βιωσιμότητα του προτεινόμενου συστήματος. Αν το LCoE υπολογίζεται υψηλότερα της αντίστοιχης συμβατικής λύσης, τότε πρέπει να επαναξιολογηθεί το σύστημα υπό τη σκοπιά της απόδοσης αλλά και της εγκατεστημένης ισχύος των επιλεγμένων τεχνολογιών.

Σύνοψη

Στο παρόν Κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η αναλυτική μαθηματική αποτύπωση του προτεινόμενου μαθηματικού εργαλείου, της μεθόδου HDLM. Παρουσιάστηκαν διεξοδικά τόσο η μεθοδολογία ανά επίπεδο σχεδιασμού, όσο και το μαθηματικό υπόβαθρο του κάθε βήματός της. Παράλληλα έγινε μνεία των σημαντικότερων εναλλακτικών μεθόδων αξιολόγησης ορισμένων βημάτων, που ενώ χρησιμοποιούνται ευρέως (διάφορες πολυκριτήριες μέθοδοι ανάλυσης ή αλγόριθμοι ομαδοποίησης) δεν είναι εφαρμόσιμες στην περίπτωση του προτεινόμενου εργαλείου. Αναφέρθηκαν εκτενώς τόσο οι παραδοχές που απαιτούνταν ανά σημείο ενδιαφέροντος όσο και η βιβλιογραφική κατεύθυνση ορισμένων σχεδιαστικών επιλογών.

Στο 1^ο Επίπεδο έγινε διεξοδική ανάλυση των αλγοριθμικών βημάτων ομαδοποίησης των δυνητικών παραγωγαναλωτών και περιεγράφηκε ο τρόπος συνδυασμού δύο εκ των ευρέως χρησιμοποιούμενων μεθόδων ταξινόμησής τους, σε έναν ενιαίο και μαθηματικώς ορισμένο. Στο 2^ο Επίπεδο, περιεγράφηκε το μαθηματικό υπόβαθρο της επιλογής τεχνολογιών αλλά και του τρόπου συνδυασμού τους σε υπερδομές/υπερσυστήματα ενώ ενσωματώθηκε η τεχνική οδηγία της TOTEE για ακριβέστερη και τεχνικώς προσδιορισμένη διαστασιολόγηση των επιλεγμένων τεχνολογιών. Στο 3^ο Επίπεδο παρουσιάστηκαν δομημένα οι σημαντικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) που χρησιμοποιούνται για την οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου σεναρίου από το 2^ο Επίπεδο. Στο επόμενο Κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθεί η προτεινόμενη μέθοδος HDLM σε μελέτη περίπτωσης και θα παρουσιαστούν τα ανάλογα αποτελέσματα για σύγκριση με τις υφιστάμενες μεθόδους σύνθεσης συστημάτων κάλυψης ενεργειακών αναγκών.

Βιβλιογραφία

1. Ling, J.; Zhao, L.; Xing, J.; Lu, Z. Statistical Analysis of Residential Building Energy Consumption in Tianjin. *Frontiers in Energy* **2014**, *8*, 513–520, doi:10.1007/s11708-014-0327-5.
2. Duić, N.; Krajačić, G.; da Graça Carvalho, M. RenewIslands Methodology for Sustainable Energy and Resource Planning for Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2008**, *12*, 1032–1062, doi:10.1016/J.RSER.2006.10.015.
3. ΤΟΤΕΕ ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ (Υ.Π.Ε.Κ.Α.) ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ Β΄ Έκδοση; Αθήνα, 2010;
4. Droutsas, K.G.; Kontoyiannidis, S.; Dascalaki, E.G.; Balaras, C.A. Mapping the Energy Performance of Hellenic Residential Buildings from EPC (Energy Performance Certificate) Data. *Energy* **2016**, *98*, 284–295, doi:10.1016/j.energy.2015.12.137.
5. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Katsavounis, S. Improved Structural Local Thermal Energy Planning Based on Prosumer Profile: Part A. *Applied Sciences* **2022**, *12*, 5355, doi:10.3390/app12115355.

6. Zheng, L.; Li, Y.; Wei, C.; Bai, X. A Data-Driven Method for Operation Pattern Analysis of the Integrated Energy Microgrid. *Energy Conversion and Management: X* **2021**, *11*, 100092, doi:10.1016/J.ECMX.2021.100092.
7. Das, T.; Paitnaik, S.; Mishra, S.P. Identification of the Optimal Number of Clusters in Textual Data. In; 2022; pp. 215–225.
8. Junjie Wu *Advances in K-Means Clustering*; 2012; Vol. 1;.
9. Reddy, A. • *DATA CLUSTERING DATA CLUSTERING Algorithms and Applications Chapman & Hall/CRC Data Mining and Knowledge Discovery Series Chapman & Hall/CRC Data Mining and Knowledge Discovery Series*; 2014;
10. Hatagami, Y.; Matsuka, T. Text Mining with an Augmented Version of the Bisecting K-Means Algorithm. In; 2009; pp. 352–359.
11. Arutkin, M.; Faranda, D.; Alberti, T.; Vallée, A. Delayed Epidemic Peak Caused by Infection and Recovery Rate Fluctuations. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* **2021**, *31*, 101107, doi:10.1063/5.0067625.
12. Yu, H.; Yin, Q.; Guo, P. Enlightening the Relationship Between Distribution and Regression Fitting. In; 2017; pp. 222–227.
13. Odry, J.; Arnaud, P. Comparison of Flood Frequency Analysis Methods for Ungauged Catchments in France. *Geosciences (Basel)* **2017**, *7*, 88, doi:10.3390/geosciences7030088.
14. Zeytounian, Rk. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems. *Appl Mech Rev* **2001**, *54*, 525–562, doi:10.1115/1.1416153.
15. Friedler, F.; Tarján, K.; Huang, Y.W.; Fan, L.T. Graph-Theoretic Approach to Process Synthesis: Axioms and Theorems. *Chem Eng Sci* **1992**, *47*, 1973–1988, doi:10.1016/0009-2509(92)80315-4.
16. Voll, P.; Lampe, M.; Wrobel, G.; Bardow, A. Superstructure-Free Synthesis and Optimization of Distributed Industrial Energy Supply Systems. *Energy* **2012**, doi:10.1016/J.ENERGY.2012.01.041.
17. Peter Rohner *FLUID POWER LOGIC CIRCUIT DESIGN: ANALYSIS, DESIGN METHODS and WORKED EXAMPLES*; London, 1979; ISBN 978-1-349-16126-3.
18. Ozturk, M.; Dincer, I. District Energy Conversion Systems. In *Comprehensive Energy Systems*; Elsevier Inc., 2018; Vol. 4–5, pp. 1159–1233 ISBN 9780128095973.
19. Kalogirou, S. *Solar Energy Engineering Processes and Systems*; 2014; ISBN 978-0-12-397270-5.
20. Renewable Energy Agency, I. *Renewable Power Generation Costs in 2021*; 2022;
21. Sillman, S.; Energy Research Institute, S. *THE TRADE-OFF BETWEEN COLLECTOR AREA, STORAGE VOLUME, AND BUILDING CONSERVATION IN ANNUAL STORAGE SOLAR HEATING SYSTEMS*; Colorado, 1981;
22. Short, W.; Packey, D.J.; Holt, T. *A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies*; 1995;

Κεφάλαιο 6: Μελέτη Περίπτωσης Ενεργειακής Κοινότητας Κιμμερίων, Ξάνθης

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	113
6.1 Χαρακτηριστικά μελέτης περίπτωσης Κιμμερίων Ξάνθης	114
6.1.1 Συνθήκες λειτουργίας κτιρίων βάσει TOTEE/ΚΕνΑΚ	114
6.1.2 Κτιριοδομική μελέτη – Μελέτη θερμικών απωλειών	115
6.1.3 Εφαρμογή υβριδικού μοντέλου στη μελέτη περίπτωσης	120
6.2 Σχεδιασμός ΕΚ με την χρήση της μεθοδολογίας HDLM – 1 ^ο Επίπεδο	121
6.2.1 Κατηγοριοποίηση κτιρίων μελέτης περίπτωσης	121
6.2.2 Εντοπισμός στατιστικής κατανομής	123
6.2.3 Ασαφή τριγωνικά σύνολα της μελέτης περίπτωσης	124
6.3 Σχεδιασμός ΕΚ με την χρήση της μεθοδολογίας HDLM – 2 ^ο Επίπεδο	125
6.3.1 Αποδελτίωση πρωτογενούς δυναμικού περιοχής μελέτης περίπτωσης	125
6.3.2 Επιλογή τεχνολογιών για εκμετάλλευση πρωτογενούς δυναμικού	129
6.3.3 Πίνακας αληθείας – Μέθοδος Quinne McCluskey	136
6.3.4 Διαστασιολόγηση συστήματος κάλυψης αναγκών θέρμανσης και ψύξης	143
6.4 Σχεδιασμός ΕΚ με την χρήση της μεθοδολογίας HDLM – 3 ^ο Επίπεδο	146
6.4.1 Δείκτες απόδοσης (KPIs) προτεινόμενου συστήματος	146
Σύνοψη	154
Βιβλιογραφία	156

Εισαγωγή

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο αναλύθηκε η μεθοδολογία HDLM και πώς αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για τον σχεδιασμό υπερδομών για την κάλυψη αναγκών στις ΕΚ. Η HDLM, στο παρόν Κεφάλαιο, θα εφαρμοστεί σε πραγματική μελέτη περίπτωσης ΕΚ, που βρίσκεται στα Κιμμέρια, Ξάνθης. Σκοπός του Κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τα αναλυτικά βήματα που ακολουθούνται για την κατασκευή μίας αληθινής μελέτης περίπτωσης. Η εφαρμογή της μεθόδου HDLM στην μελέτη περίπτωσης που θα παρουσιαστεί έχει δημοσιευτεί σε αναγνωρισμένα διεθνή “peer-reviewed” περιοδικά [1,2]. Στο πλαίσιο παρουσίασης του προτεινόμενου μοντέλου και του ελέγχου

του από peer-reviewed επιστημονικά περιοδικά, ο συγγραφέας χώρισε το μοντέλο σε δύο δημοσιεύσεις. Στην πρώτη παρουσιάστηκε το 1^ο Επίπεδο σχεδιασμού, ενώ στο δεύτερο παρουσιάστηκαν το 2^ο και 3^ο Επίπεδο.

Το παρόν Κεφάλαιο δομείται στην ίδια αρχιτεκτονική όπως και το 5^ο Κεφάλαιο. Σκοπός είναι η ολιστική παρουσίαση των βημάτων της μεθοδολογίας, καθώς αυτή θα πραγματοποιείται σε φιλοσοφία bottom-up. Αρχικά θα παρουσιαστεί αναλυτικά η μελέτη περίπτωσης της ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης σε επίπεδο γεωγραφικών και κτιριοδομικών χαρακτηριστικών, έπειτα θα κατηγοριοποιηθούν οι δυνητικοί παραγωγαναλωτές διαδοχικά με την ποσοτική και ποιοτική μέθοδο (RenewIslands και Kaya Identity). Το αποτέλεσμα του συνδυασμού τους όπως περιγράφηκε στο 5^ο Κεφάλαιο, θα προβληθεί στο 2^ο Επίπεδο, όπου θα επιλεγθούν και οι κατάλληλες τεχνολογίες κάλυψης αναγκών. Ο συνδυασμός αυτών με τη φιλοσοφία των υπερδομών θα προτείνει το υβριδικό σύστημα κάλυψης αναγκών το οποίο θα διαστασιολογηθεί πάνω στις ανάγκες των παραγωγαναλωτών της ΕΚ. Τέλος, η οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου σεναρίου στο 3^ο Επίπεδο, θα αξιολογήσει τη βιωσιμότητά του σε σύγκριση με αντίστοιχο συμβατικό σύστημα.

6.1 Χαρακτηριστικά μελέτης περίπτωσης Κιμμερίων Ξάνθης

Η μελέτη περίπτωσης που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της εφαρμοστικότητας και της ακρίβειας της προτεινόμενης μεθόδου, είναι το κτιριακό συγκρότημα φοιτητικών εστίων της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης που βρίσκεται στην πόλη της Ξάνθης. Η μελέτη περίπτωσης αποτελείται από 8 κτίρια (ανά δύο ίδιας αρχιτεκτονικής) και βρίσκεται στο γεωγραφικό διαμέρισμα της Ξάνθης στη Βορειοανατολική πλευρά της Ελλάδας (41°10' N, 24°55' E) [3,4]. Ο φέρων οργανισμός του κτιρίου είναι κατασκευασμένος από σκυρόδεμα και τοίχους από οπλισμένο σκυρόδεμα, με χαμηλά επίπεδα μόνωσης (μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας $U = 1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Τα παράθυρα αποτελούνται από διπλά τζάμια με χαμηλή αεροστεγανότητα (μέσος συντελεστής αεροστεγανότητας $U_w > 4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) [5]. Σε ότι αφορά την σκεπή, είναι και αυτή κατασκευασμένη από σκυρόδεμα ενώ επικάθεται κεκλιμένη οροφή από ξύλινο σκελετό και κεραμίδι.

Η θερμική ζώνη, βάσει TOTEE, που ανήκει η περιοχή των Κιμμερίων, Ξάνθης είναι η Γ (σχετικά κρύο κλίμα με 180 ημέρες θέρμανσης) ενώ τα κτιριοδομικά χαρακτηριστικά ορίζουν μέγιστη ειδική κατανάλωση θερμικής ενέργειας της τάξεως του 245 kWh/m^2 [6]. Όπως προαναφέρθηκε, τα 8 κτίρια είναι παρόμοια ανά 2, προκύπτουν δηλαδή 4 ζεύγη κτιρίων με διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες και τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. 1.

6.1.1 Συνθήκες λειτουργίας κτιρίων βάσει TOTEE/ΚΕνΑΚ

Στηριζόμενοι στις τεχνικές οδηγίες για υπολογισμό των αναγκών των κτιρίων της μελέτης περίπτωσης σύμφωνα με την TOTEE, είναι απαραίτητος ο αρχικός προσδιορισμός της περιόδου λειτουργίας καθώς και του ωραρίου των κτιρίων. Οι παράγοντες αυτοί διαφέρουν ανάλογα με τον κτιριακό τύπο (όπως γραφεία, νοσοκομεία, κατοικίες), αφού οι χρήστες διαμένουν για διαφορετικές ώρες και επιτελούν δραστηριότητες διαφορετικής έντασης. Η δραστηριότητα ανά χρήστη προσεγγίζεται ως 80 W/άτομο για άτομα σε κανονικές συνθήκες ενώ μπορεί να φτάσει έως 140 W/άτομο σε περιπτώσεις έντονης δραστηριότητας (γυμναστική, χειρωνακτική εργασία κ.α.). Το ωράριο λειτουργίας κτιρίων που ορίζονται ως κοιτώνες προσωρινής διαμονής, είναι 24 ώρες/ημέρα 7 ημέρες/εβδομάδα και 12 μήνες/έτος [8].

Πίνακας 6. 1: Κτιριοδομικά χαρακτηριστικά μελέτης περίπτωσης ΕΚ Κιμμερίων, Ξάνθης [7].

Κτίριο	Κάτοικοι	Ειδική Κατανάλωση Θερμικής Ενέργειας (kWh _{th} /m ²)	Ωφέλιμη Επιφάνεια Κτι- ρίου (m ²)
A1	68	218,81	1268,17
A2	59	198,65	1113,75
B1	103	183,99	1752,77
B2	66	179,88	1188,28
Γ1	68	218,81	1268,17
Γ2	59	198,65	1113,75
Δ1	103	183,99	1752,77
Δ2	66	179,88	1188,28

Όσο αναφορά την κλιματική ζώνη, η Ξάνθη ανήκει στην Γ κλιματική ζώνη βάσει TOTEE με περίοδο θέρμανσης που ξεκινά 15 Οκτωβρίου και τελειώνει 30 Απριλίου, ενώ η περίοδος ψύξης ορίζεται από 1 Ιουνίου μέχρι και 31 Αυγούστου. Κατά τις περιόδους αυτές πρέπει να καλύπτονται οι επιθυμητές εσωτερικές συνθήκες των χρηστών όπως η εσωτερική θερμοκρασία και υγρασία, οι οποίες διαμορφώνονται από την χρήση των θερμαινόμενων (ή ψυχόμενων χώρων), από τη δραστηριότητα των χρηστών σε αυτούς, από την ένδυσή τους αλλά και από την εκπεμπόμενη θερμότητα ως ακτινοβολία, ενεργού εξοπλισμού. Οι ενδεικνυόμενες τιμές θερμοκρασίας εσωτερικού χώρου αλλά και σχετικής υγρασίας για την χειμερινή αλλά και την θερινή περίοδο για την περίπτωση, είναι 20 °C και 26 °C καθώς και 40 % και 45 % αντίστοιχα.

Για τις ανάγκες ζεστού νερού χρήσης (ZNX), βάσει της TOTEE, το θερμό νερό τροφοδοτείται από θερμαντήρα ZNX (είτε ηλεκτρικής αντιστάσεως είτε σερπαντίνας-εναλλάκτη) σε θερμοκρασία σχεδιασμού 45 °C. Η ετήσια απαίτηση σε όγκο θερμού νερού για την κάλυψη αναγκών ZNX ανέρχεται, για την μελέτη περίπτωσης, σε 18,25 m³/δωμάτιο/έτος [8]. Η διαστασιολόγηση συστημάτων ZNX για την εκάστοτε περιοχή πραγματοποιείται κατά τη δυσμενέστερη περίπτωση, κατά την περίοδο δηλαδή που το νερό δικτύου έχει την χαμηλότερη του θερμοκρασία. Για την κλιματική ζώνη Γ, η χαμηλότερη θερμοκρασία παρατηρείται τον μήνα Ιανουάριο, στους 6,5 °C.

Όπως προαναφέρθηκε, σημαντική παράμετρο για τη διαστασιολόγηση συστημάτων κάλυψης θερμικών και ψυκτικών αναγκών διαδραματίζουν οι χρήστες και η δραστηριότητα που επιτελούν στον θερμαινόμενο χώρο. Για την περίπτωση κοιτώνων, όπως η μελέτη περίπτωσης, η θερμική ισχύς ανά άτομο διαμορφώνεται στα 80 W/άτομο ενώ η θερμική ισχύς ανά δομημένη επιφάνεια ανέρχεται σε 8 W/m². Ο μέσος συντελεστής παρουσίας στον χώρο είναι 1, καθώς οι χρήστες διαμένουν όλο το 24ωρο στους θερμαινόμενους χώρους. Πρόσθετα κέρδη για τους εσωτερικούς χώρους αποτελούν και ο ενεργός εξοπλισμός που λειτουργεί μέσα σε αυτούς, όπως φωτισμός και ηλεκτρικές συσκευές. Στην περίπτωση των κοιτώνων λαμβάνονται ως 4 W/m² ενώ ο μέσος συντελεστής ετεροχρονισμού ανέρχεται στο 0,5. Η ετεροχρονισμένη ισχύς εξοπλισμού έτσι υπολογίζεται στα 2 W/m² με μέσο συντελεστή λειτουργίας 1 [8].

6.1.2 Κτιριοδομική μελέτη – Μελέτη θερμικών απωλειών

Ανάλογα με τα θερμοφυσικά χαρακτηριστικά των υλικών που δομούν τις κτιριακές διατάξεις της μελέτης περίπτωσης, διαχωρίζονται οι διαφορετικές θερμικές ζώνες του κτιρίου. Οι θερμικές ζώνες αυτές βρίσκονται σε επαφή είτε μεταξύ τους, είτε με τον εξωτερικό αέρα, είτε με το έδαφος. Ο Πίνακας 6. 2 παρουσιάζει τους μέγιστους

συντελεστές θερμοπερατότητας ανά δομικό υλικό που δομεί τα κτίρια της μελέτης περίπτωσης. Η Εικόνα 6. 1 απεικονίζει την δορυφορική άποψη της μελέτης περίπτωσης, συμπεριλαμβανομένων του Αμφιθεάτρου και των Εστιατορίων (που είναι εκτός της παρούσας μελέτης) και του Ενεργειακού Κέντρου (που εξυπηρετεί ως energy hub για την κεντρική κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης με συμβατικά μέσα).

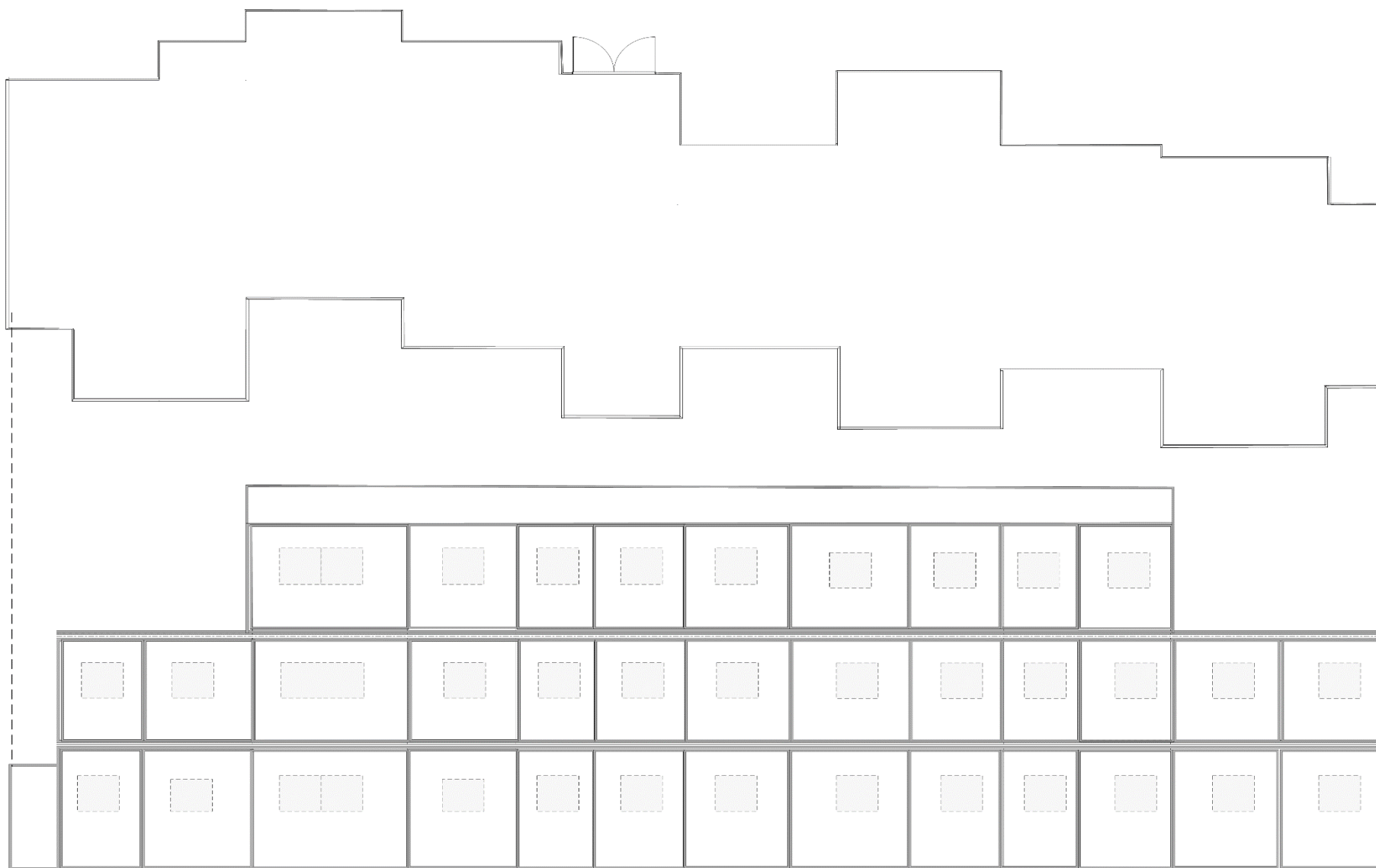
Πίνακας 6. 2: Συντελεστές θερμοπερατότητας ανά δομικό στοιχείο για την κλιματική ζώνη Γ.

Δομικό στοιχείο	Σύμβολο	Συντελεστής θερμοπερατότητας για τη κλιματική ζώνη Γ ($W/m^2 \cdot K$)
Εξωτερική οριζόντια επιφάνεια σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα	$U_{v,d}$	0,4
Εξωτερικοί τοίχοι σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα	$U_{v,w}$	0,45
Δάπεδα σε επαφή με εξωτερικό αέρα	$U_{v,dl}$	0,4
Δάπεδα σε επαφή με το έδαφος ή με κλειστούς μη θερμαινόμενους χώρους	$U_{v,g}$	0,75
Τοίχοι σε επαφή με το έδαφος ή με μη θερμαινόμενους χώρους	$U_{v,we}$	0,8
Ανοίγματα (παράθυρα μπαλκονόπορτες)	$U_{v,f}$	2,8

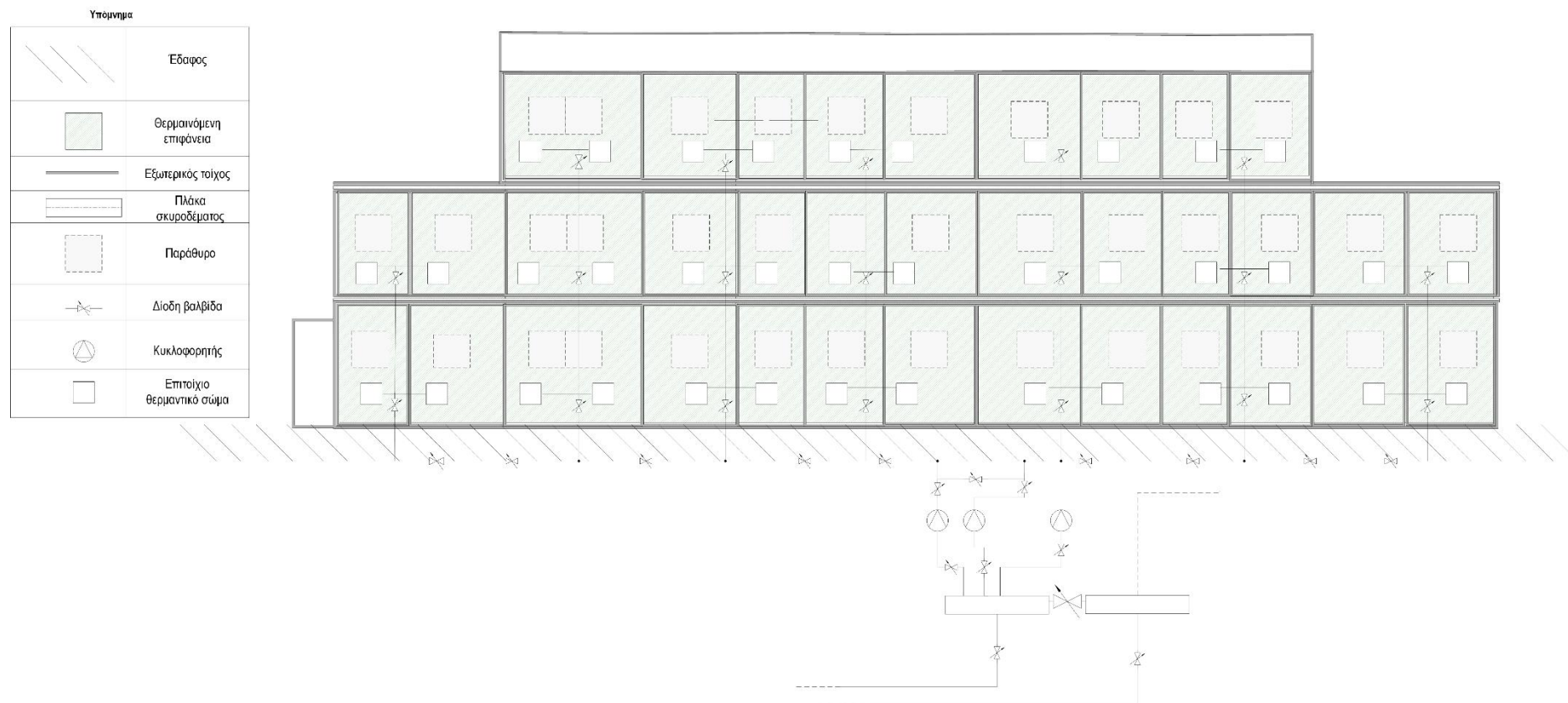
Στις Εικόνα 6. 2, Εικόνα 6. 3 παρουσιάζονται οι αρχιτεκτονικές κατόψεις ενός τυπικού κτιρίου της μελέτης περίπτωσης, μαζί με την υδραυλική όδευση του συστήματος κεντρικής κατανομής θέρμανσης στα κτίρια (Εικόνα 6. 3). Βάσει της TOTEE, για κτίρια με ανεπαρκή θερμομονωτική προστασία και με κατακόρυφα δομικά στοιχεία φέροντος οργανισμού οπλισμένου σκυροδέματος (επενδεδυμένο με γυψοσανίδα ή τσιμεντοσανίδα), ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι $0,8 W/m^2 \cdot K$ για στοιχεία σε επαφή με τον εξωτερικό αέρα, ενώ $0,75 W/m^2 \cdot K$ και $0,85 W/m^2 \cdot K$ για επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο και με το έδαφος αντίστοιχα. Για την οπλινθοδομή αντίστοιχα (μπάτικη στη περίπτωση αυτή) οι συντελεστές διαμορφώνονται ως $0,7 W/m^2 \cdot K$, $0,7 W/m^2 \cdot K$ και $0,75 W/m^2 \cdot K$ αντίστοιχα. Ο υπολογισμένος μέσος συντελεστής θερμοπερατότητας ενός τυπικού κτιρίου (ανεξαρτήτως προσανατολισμού), βάσει των παραπάνω υπολογίζεται ως $U_{tot} = 0,95 W/m^2 \cdot K$. Βάσει των στοιχείων αυτών, η αντίστοιχη μελέτη θερμικών απωλειών ανά κτίριο, παρουσιάζεται στον Πίνακα 6. 3.



Εικόνα 6. 1: Δορυφορική άποψη των φοιτητικών εστιών της μελέτης περίπτωσης των Κιμμερίων, Ξάνθης.



Εικόνα 6. 2: Αρχιτεκτονικές όψεις ενός τυπικού κτιρίου των φοιτητικών εστιών.



Εικόνα 6. 3: Πλάγια όψη ενός τυπικού κτιρίου όπου απεικονίζεται η όδευση του δικτύου κεντρικής θέρμανσης (από τον κεντρικό συλλέκτη – κάτω, προς τα δωμάτια του κτιρίου).

Πίνακας 6. 3: Μελέτη θερμικών απωλειών κτιρίων μελέτης περίπτωσης

Κτίριο	Υπολογισμένες Θερμικές Απώλειες (kW_{th})
A1	137,46
A2	111,21
B1-I	85,78
B1-II	82,25
B2	109,96
Γ1	137,46
Γ2	111,21
Δ1-I	85,78
Δ1-II	82,25
Δ2	109,96
Σύνολο	1.053,32

Αν το θερμικό φορτίο προσεγγιστεί με την μέθοδο των βαθμομερών, το θερμικό φορτίο τυπικού κτιρίου της μελέτης περίπτωσης υπολογίζεται βάσει της Εξ. 21 του Κεφαλαίου 5. Το συνολικό απαιτούμενο θερμικό φορτίο για τη μελέτη περίπτωσης (μέγιστο ωριαίο), βάσει της μεθόδου των βαθμομερών, υπολογίζεται στα 1.209,32 kW_{th} ενώ η ετήσια ζήτηση σε θερμική ενέργεια (Εξ. 22 – Κεφάλαιο 5) – 2.142,18 MWh_{th}/y . Για το ψυκτικό φορτίο, υπολογίζεται 1.451,2 kW_c ενώ η συνολική ψυκτική ενέργεια που απαιτείται ανέρχεται στα 405,47 MWh_c .

6.1.3 Εφαρμογή υβριδικού μοντέλου στη μελέτη περίπτωσης

Εφαρμόζοντας την μέθοδο KIM για τη περίπτωση των Κιμμερίων, Ξάνθης βάσει της Εξ. 2 του Κεφαλαίου 5, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. 4.

Πίνακας 6. 4: Εφαρμογή της μεθόδου KIM στη μελέτη περίπτωσης για υπολογισμό της ετήσιας θερμικής και ψυκτικής ενεργειακής κατανάλωσης.

Κτίριο	$E_{res.,heating} (MWh_{th}/y)$
A1	277,49
A2	221,24
B1	322,51
B2	213,75
Γ1	277,49
Γ2	221,24
Δ1	322,51
Δ2	213,75
Σύνολο	2.070

Το αποτέλεσμα της μεθόδου KIM για τον υπολογισμό των θερμικών φορτίων, συγκριτικά με τη μέθοδο βαθμομερών, αποκλίνει 3,5% που αποτελεί αποδεκτή διαφορά. Για την αναγωγή του συμβατικού υπολογισμού

θερμικών απωλειών σε θερμικό φορτίο, λαμβάνονται υπόψη η χρήση του κτιρίου, οι ημέρες θέρμανσης και οι ώρες λειτουργίας του συστήματος κάλυψης των αναγκών του (με τυπικό συντελεστή ασφαλείας 10%, το φορτίο αυτό μπορεί να καλυφθεί με λέβητα αερίου/πετρελαίου 1300 kW_{th}). Έστω 6,5 ώρες λειτουργίας ημερησίως για τις 180 ημέρες θέρμανσης της Γ κλιματικής ζώνης, με 25% προσαύξηση φορτίου για την κάλυψη του ZNX και βαθμό απόδοσης του συστήματος θέρμανσης 85% και 16% απώλειες αμόνωτου δικτύου εντός των κτιρίων, η ετήσια ανάγκη σε θερμική ενέργεια υπολογίζεται στα 2.030,85 MWh_{th}. Η διαφορά σε σχέση με τη μέθοδο KIM είναι της τάξεως του 1,9% που θεωρείται αποδεκτή.

Η δομή της KIM δεν επιτρέπει την αναγωγή σε υπολογισμό ψυκτικών φορτίων και επομένως δεν υφίσταται αντίστοιχη αντιπαράβολη. Υπάρχει σε πρώιμα στάδια στη βιβλιογραφία, αναφορά στην ειδική κατανάλωση ψυκτικής ενέργειας, σε κτίρια ανεπαρκώς μονωμένα, και παρουσιάζονται τυπικοί δείκτες 20% υψηλότεροι από την αντίστοιχη θερμική [9].

Σε ότι αφορά τη RenewIslands, η πρώτη προσέγγιση ποιοτικά στο σύστημα της μελέτης περίπτωσης αποτυπώνεται βάσει της ενεργειακής κλάσης των κτιρίων, και επομένως και όλης της κοινότητας (Πίνακας 6. 5). Βάσει TOTEE, λόγω της ανεπαρκούς μόνωσης και του έτους δόμησης των κτιρίων (τα κτίρια κατασκευάστηκαν σε δύο φάσεις, η πρώτη τελείωσε το 1990 και η δεύτερη το 1999), κατατάσσονται στην ενεργειακή κλάση H, με υψηλές ενεργειακές ανάγκες.

Πίνακας 6. 5: Συμπλήρωση ερωτηματολογίου RenewIslands για την μελέτη περίπτωσης.

Ανάγκες/Πόροι	Επίπεδο
Θερμική ενέργεια	Υψηλή (Ενεργειακή Κλάση H)
	Υποδομές
Κεντρικό δίκτυο διανομής ΘΨΕ	Ισχυρό
Αγωγός φυσικού αερίου	Όχι
Τερματικό υγροποιημένου φυσικού αερίου	Όχι
Τερματικό πετρελαίου	Ναι
Τερματικό παραγώγων πετρελαίου	Όχι

6.2 Σχεδιασμός ΕΚ με την χρήση της μεθοδολογίας HDLM – 1^ο Επίπεδο

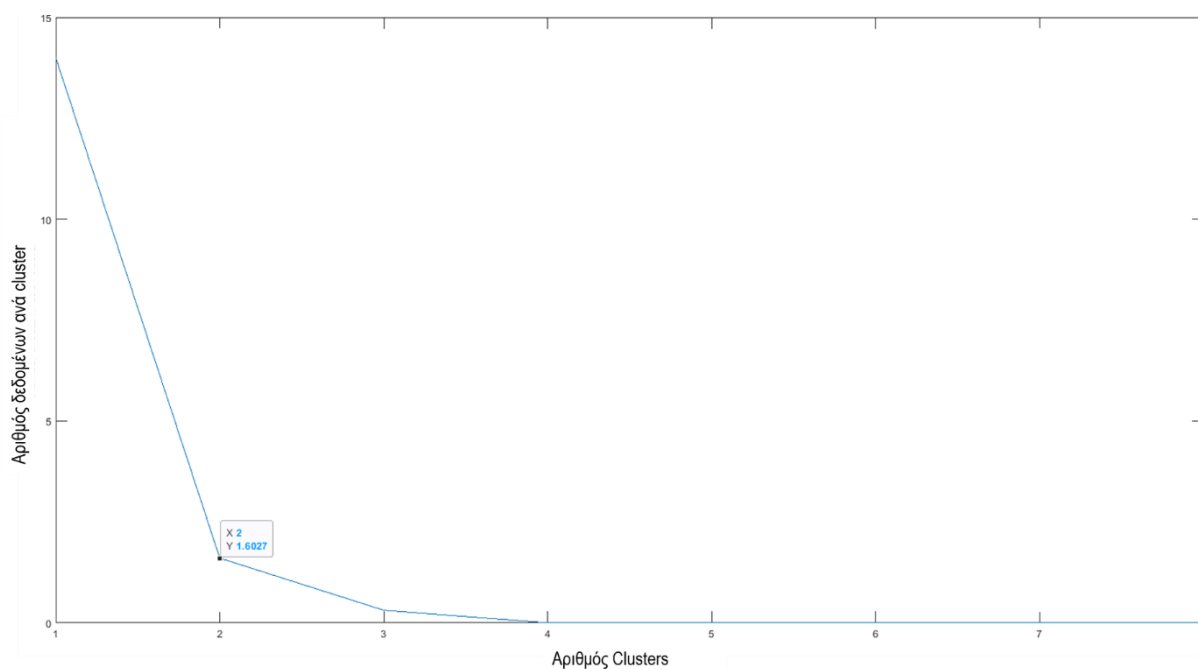
6.2.1 Κατηγοριοποίηση κτιρίων μελέτης περίπτωσης

Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο 5^ο Κεφάλαιο, προκειμένου να εφαρμοστεί η HDLM είναι απαραίτητη η αρχική προσέγγιση των ποσοτικών θερμικών φορτίων της κοινότητας (βλ. Κεφάλαιο 5, Εικόνα 5.1). Η προσέγγιση αυτή αναγράφεται στον Πίνακα 6. 4. Έπειτα ακολουθεί το βήμα της εύρεσης του βέλτιστου αριθμού clusters για το κανονικοποιημένο δείγμα (Πίνακας 6. 6) της μελέτης περίπτωσης και κατηγοριοποίησης των δεδομένων του Πίνακα 6. 4 μέσω της χρήσης του αλγορίθμου k-means.

Πίνακας 6. 6: Κανονικοποίηση των τιμών του Πίνακας 6. 4.

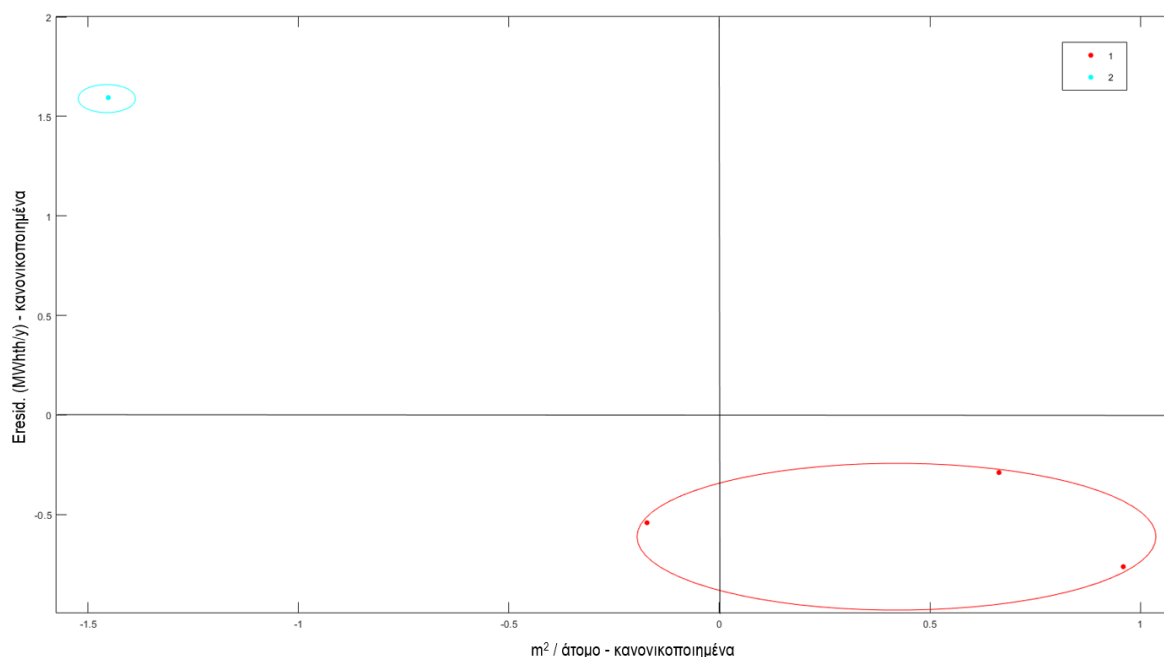
Κτίριο	$E_{res.,heating}$ (MWh _{th} /y)	Κανονικοποιημένες Τιμές $E_{resid, heating}$
A1	277,49	-0,289
A2	221,24	-0,762
B1	322,51	1,594
B2	213,75	-0,541
Γ1	277,49	-0,289
Γ2	221,24	-0,762
Δ1	322,51	1,594
Δ2	213,75	-0,541

Ακολουθούν οι Εικόνα 6. 4 και Εικόνα 6. 5 που απεικονίζουν την εύρεση του βέλτιστου αριθμού clusters για τη μελέτη περίπτωσης και την κατηγοριοποίηση σε αυτούς.



Εικόνα 6. 4: Εύρεση βέλτιστου αριθμού cluster για το κανονικοποιημένο δείγμα της μελέτης περίπτωσης (διάγραμμα αγκώνα).

Η Εικόνα 6. 4 παρουσιάζει την εύρεση του βέλτιστου αριθμού clusters για το δείγμα των κανονικοποιημένων δεδομένων. Το σημείο αγκώνα ορίζεται ως το σημείο αλλαγής κλίσης της εξίσωσης που ορίζουν ο αριθμός των cluster και τα δεδομένα ανά cluster. Η τιμή των δεδομένων ανά cluster παρουσιάζεται ως ο μέσος αριθμός δεδομένων ανά cluster, που στη συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίζεται ως 1,60. Με μέση τιμή 1,60 αναμένεται από 1 έως 3 στοιχεία στους δύο cluster που θα αποτυπώσουν την κατηγοριοποίηση των δεδομένων.



Εικόνα 6. 5: Κατηγοριοποίηση των κανονικοποιημένων δεδομένων στους clusters.

Η κατηγοριοποίηση των κανονικοποιημένων δεδομένων απεικονίζεται στην Εικόνα 6. 5. Ο αριθμός δεδομένων ανά cluster είναι 1 στοιχείο στον πρώτο cluster και 3 στοιχεία στον δεύτερο, ως όριζε η Εικόνα 6. 4. Στους cluster περιέχονται συνολικά 4 στοιχεία και όχι 8, αφού τα κτίρια της μελέτης περίπτωσης είναι ανά δύο ίδια. Ο κόκκινος cluster περιέχει κτίρια/παραγωγαναλωτές με σχετικά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση ετησίως ενώ αναλογούν αρκετά m^2 θερμαινόμενης περιοχής ανά παραγωγαναλωτή. Ποιοτικά, η σημασία του δείκτη m^2 ανά άτομο σε θερμαινόμενη περιοχή προσφέρει πληροφορίες κατανομής ενέργειας σε σύγκριση με τη συγκέντρωση ατόμων ανά θερμαινόμενο χώρο. Στην προκειμένη, τα άτομα και η κατανομή τους στους χώρους των κτιρίων της μελέτης είναι πανομοιότυπος για όλα τα κτίρια, χωρίς ανοιγμένες διαφορές (με την αύξηση των τετραγωνικών ανά κτίριο, αυξάνεται και ο αριθμός παραγωγαναλωτών). Ο δείκτης επομένως για τον κόκκινο cluster, εκφράζει μειωμένη κατανομή ενέργειας ανά άτομο σε μεγάλη δομημένη επιφάνεια, κατατάσσοντας τους χρήστες στην κατηγορία χρηστών χαμηλής ενεργειακής απαίτησης.

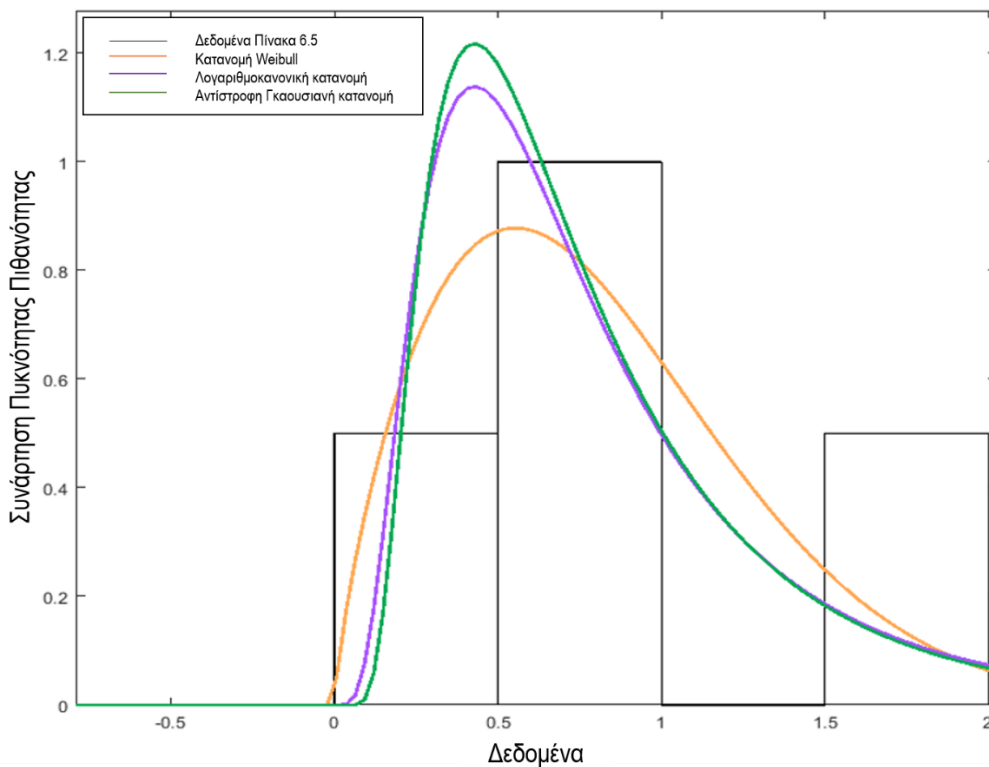
Σε αντίθεση, ο cluster με μπλέ χρώμα αποτυπώνει τους περισσότερο ενεργοβόρους χρήστες, που σε μειωμένο δομημένο εμβαδόν θερμαινόμενων χώρων, έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Τυπικά, αυτή η κατηγορία χρηστών αποτελεί το σημείο διαστασιολόγησης των συστημάτων κάλυψης αναγκών βάσει TOTEE [8]. Όμως, η σκοπιά της παρούσας μεθοδολογίας είναι η αποφυγή υπερδιαστασιολόγησης αυτών των συστημάτων με την εισαγωγή μαθηματικώς ορισμένου προσδιορισμού του επιπέδου αναγκών των παραγωγαναλωτών, που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

6.2.2 Εντοπισμός στατιστικής κατανομής

Για τον εντοπισμό της στατιστικής κατανομής που χαρακτηρίζει το δείγμα του Πίνακα 6. 6, χρησιμοποιείται το μαθηματικό υπόβαθρο που αναλύθηκε στο 5^ο Κεφάλαιο (Υποενότητα 5.1.3.4). Οι ροπές που εξυπηρετούν στην εύρεση της κατανομής αλλά και το σχήμα, κυρτότητα και λοξότητα είναι οι ροπές K_1 , K_2 , K_3 και K_4 . Ο υπολογισμός τους ορίζεται από το σύνολο εξισώσεων που παρουσιάζονται από την Εξ. 1 [10]:

$$\begin{aligned}
K_1 &= \frac{\sum_{x=1}^{x=n} X_i}{n_{xi}} \\
K_2 &= E[(X_i - \mu)^2] \\
K_3 &= \frac{K_2}{\sigma^3} \\
K_4 &= \frac{K_3}{\sigma^4}
\end{aligned}
\tag{1}$$

Το αποτέλεσμα του υπολογισμού ροπών είναι $K_1 = 0,8$ (μέση τιμή της απόλυτης τιμής των δεδομένων), $K_2 = 0,49$ (διακύμανση), $K_3 = -0,96$ (σχετική μέτρηση-λοξότητα κατανομής) και $K_4 = 1,21$ (κυρτότητα). Οι τιμές αυτές ορίζουν σημαντικά λοξή κατανομή με συγκέντρωση δεδομένων αριστερά του κέντρου βάρους ($K_3 < 0$) και πλατύκυρτη κατανομή καθώς τα δεδομένα έχουν $K_4 < 3$. Από την ανάλυση εντοπισμού στατιστικής κατανομής, η κατανομή με αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η λογαριθμοκανονική κατανομή, (με μώβ χρώμα) στην Εικόνα 6. 6. Ο λόγος απόρριψης των υπόλοιπων κατανομών είναι είτε η μεγαλύτερη του επιθυμητού λοξότητα (αντίστροφη Γκαουσιανή) είτε η χαμηλότερη (κατανομή Weibull) σε σχέση με τη λογαριθμοκανονική. Επιχειρήθηκε η ταύτιση και με άλλες κατανομές, την κανονική, την Γκαουσιανή και την κατανομή β τα αποτελέσματα τους όμως αποκλίνουν σημαντικά από το επιθυμητό, σε σύγκριση με αυτά που παρουσιάζονται στην Εικόνα 6. 6 ως καταλληλότερα.



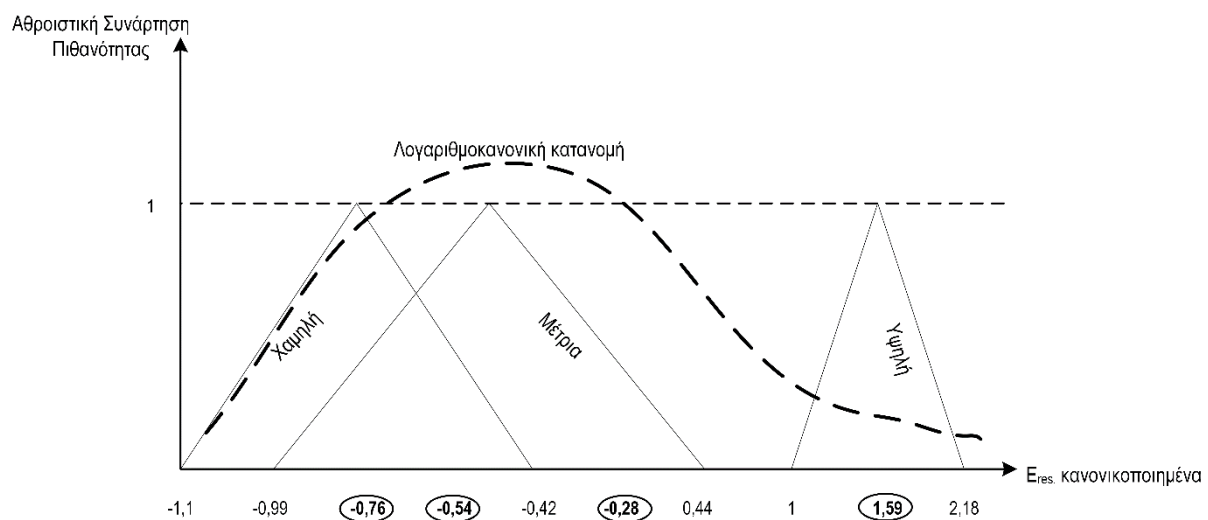
Εικόνα 6. 6: Εύρεση στατιστικής κατανομής του δείγματος του Πίνακα 6. 6 [7].

6.2.3 Ασαφή τριγωνικά σύνολα της μελέτης περίπτωσης

Η κατασκευή των ασαφών τριγωνικών συνόλων στην μελέτη περίπτωσης, θα ακολουθήσει το μαθηματικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκε στο 5^ο Κεφάλαιο (Ενότητα 5.1.3.5, Εικόνα 5.1) όπου θα γίνει η απόδοση των

δεδομένων στα τρίγωνα της ποιοτικής κλίμακας RenewIslands. Η Εικόνα 6. 7 παρουσιάζει τα τρίγωνα όπως κατασκευάστηκαν βάσει των Εξ. 9, 10, 11 του 5^{ου} Κεφαλαίου. Παρατηρείται ότι η απεικόνιση των τριγωνικών συνόλων συνάδει και με την κατανομή που θεωρείται ως κατάλληλη για το δείγμα, την λογαριθμοκανονική (απεικονίζεται με την έντονη διακεκομμένη γραμμή).

Η μεγαλύτερη συγκέντρωση δεδομένων παρατηρείται στην κατηγορία «Μέτριας» ενεργειακής έντασης ενώ αρχικά, στη συμπλήρωση του ερωτηματολογίου του Πίνακα 6. 5 η ΕΚ της μελέτης περίπτωσης βαθμολογείται ως «Υψηλής» ενεργειακής έντασης. Εξαιτίας της αναλυτικότερης και μαθηματικώς ορισμένης αποτύπωσης της κατηγοριοποίησης των παραγωγαναλωτών της δυνητικής ΕΚ, η μέθοδος HDLM χαρακτηρίζει τις ενεργειακές απαιτήσεις της ΕΚ ως «Μέτριας» ενεργειακής έντασης, σύμφωνα με την τριβάθμια κλίμακα της μεθόδου RenewIslands [7].



Εικόνα 6. 7: Ασαφή τριγωνικά σύνολα για τη μελέτη περίπτωσης.

Με την κατηγοριοποίηση της κοινότητας ως «Μέτριας» ενεργειακής έντασης και με τον υπολογισμό των θερμικών και ψυκτικών αναγκών της, ολοκληρώνεται το 1^ο Επίπεδο σχεδιασμού της μεθοδολογία HDLM. Ο σχεδιασμός του συστήματος κάλυψης των θερμικών και ψυκτικών αυτών φορτίων πραγματοποιείται στο 2^ο Επίπεδο, που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

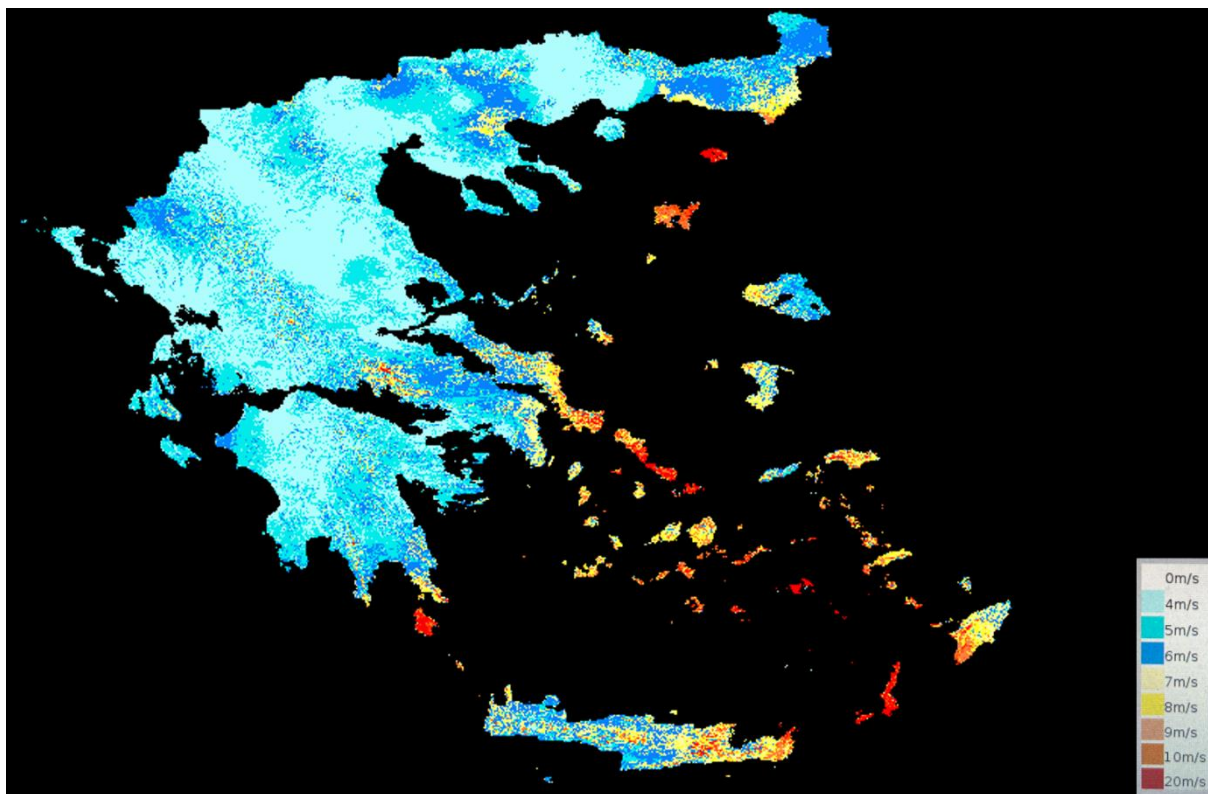
6.3 Σχεδιασμός ΕΚ με την χρήση της μεθοδολογίας HDLM – 2^ο Επίπεδο

Κατά την εκκίνηση του 2^{ου} Επιπέδου, όπως αναφέρθηκε στο 5^ο Κεφάλαιο, είναι θεμιτή η αποδελτίωση του πρωτογενούς δυναμικού της υπό μελέτη περιοχής, στην συγκεκριμένη περίπτωση των Κιμμερίων, Ξάνθης. Ο σχετικός πίνακας του αντίστοιχου Κεφαλαίου (Πίνακας 5.2) διευκρινίζει ποιοτικά το πρωτογενές δυναμικό της περιοχής. Σύμφωνα με πρωτογενή δεδομένα για το αιολικό, ηλιακό, βιομάζας και γεωθερμικό δυναμικό, θα διευκρινιστεί για τη δυνητική περιοχή της ΕΚ το πρωτογενές δυναμικό προς αξιοποίηση από κατάλληλες τεχνολογίες. Οι Εικόνα 6. 8, Εικόνα 6. 9, Εικόνα 6. 10 και Εικόνα 6. 11 παρουσιάζουν τα δεδομένα αυτά.

6.3.1 Αποδελτίωση πρωτογενούς δυναμικού περιοχής μελέτης περίπτωσης

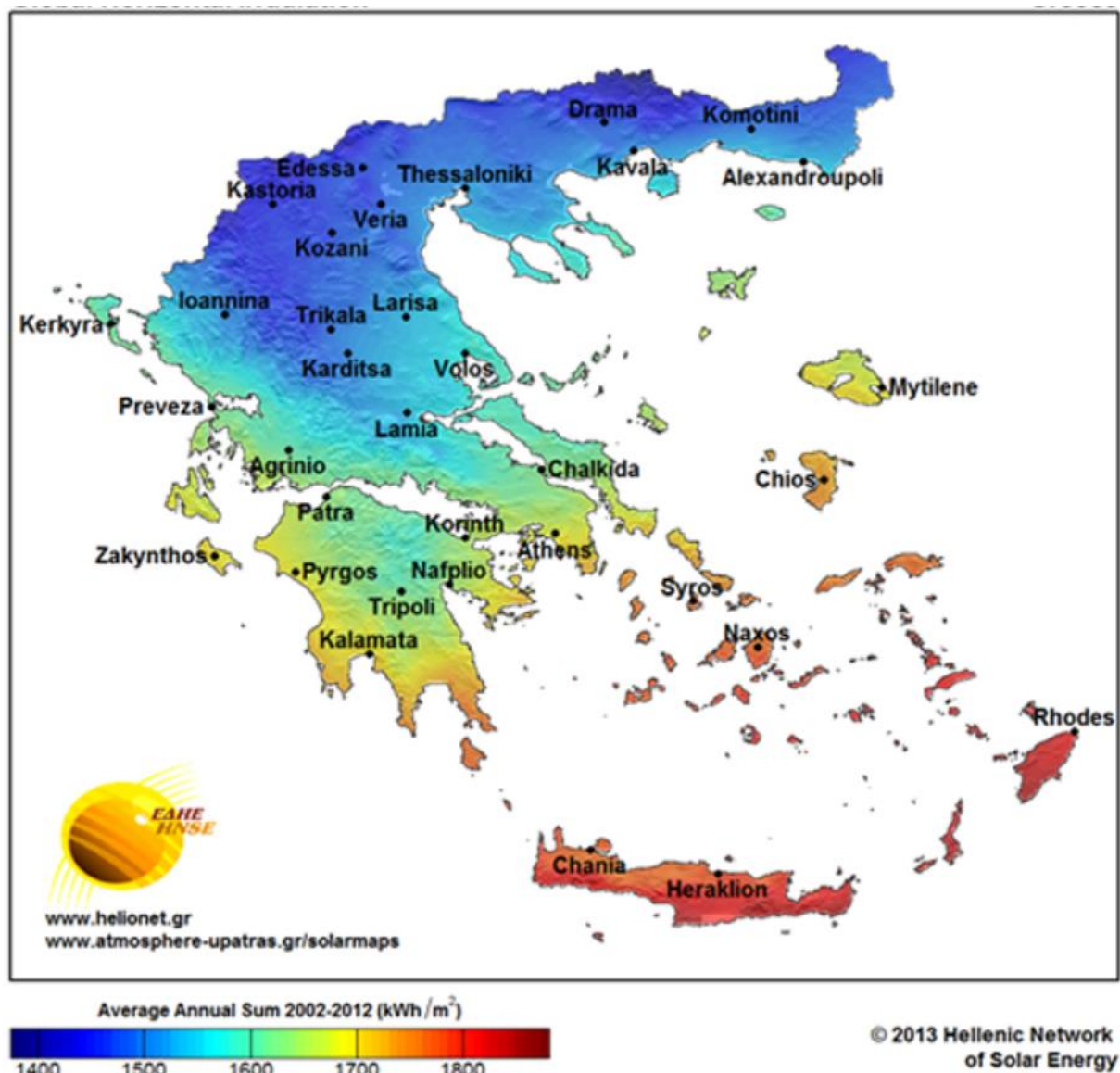
Η Εικόνα 6. 8 παρουσιάζει το αιολικό δυναμικό στον ελλαδικό χώρο ως μέση τιμή ταχύτητας ανέμου ετησίως. Παρατηρείται ότι με διαβαθμίσεις του μπλε απεικονίζονται σημεία με χαμηλό αιολικό δυναμικό (μέση

ταχύτητα ανέμου $< 6 \text{ m/s}$), με διαβαθμίσεις του κίτρινου απεικονίζονται σημεία με μέτριο δυναμικό (μέση ταχύτητα ανέμου μεταξύ 7 και 8 m/s) ενώ με διαβαθμίσεις του ερυθρού τα σημεία υψηλού αιολικού δυναμικού (μέση ταχύτητα $> 9 \text{ m/s}$). Η περιοχή των Κιμμερίων Ξάνθης κατηγοριοποιείται στις περιοχές με χαμηλό αιολικό δυναμικό, με αποτέλεσμα εξοπλισμοί όπως ανεμογεννήτριες να μην αποτελούν δυνητικές βιώσιμες τεχνολογίες προς εγκατάσταση [11].



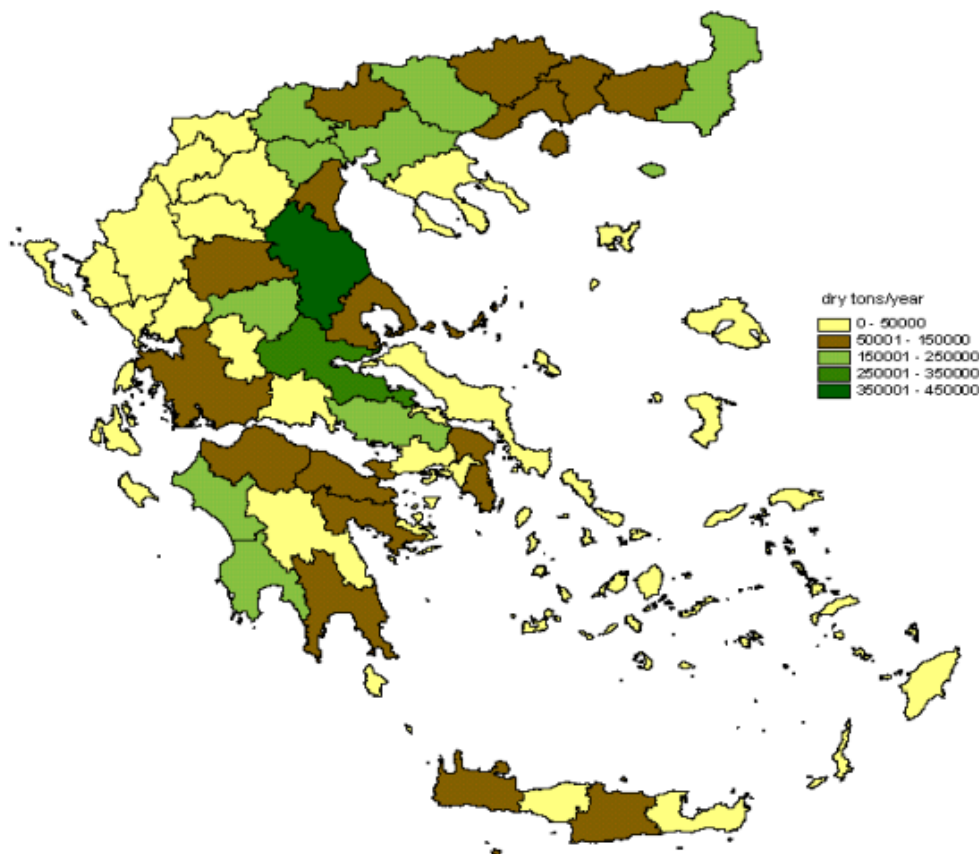
Εικόνα 6. 8: Αιολικό δυναμικό του ελλαδικού χώρου σύμφωνα με τα δεδομένα της ΠΑΕ [12].

Η Εικόνα 6. 9 παρουσιάζει το ηλιακό δυναμικό του ελλαδικού χώρου σε kWh/m^2 . Τα δεδομένα απεικονίζουν τη μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας για 10 έτη (2002-2012) και χωρίζονται και πάλι σε χρωματικές διαβαθμίσεις ανάλογα με την ένταση της ακτινοβολίας. Περιοχές με μέση ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μικρότερη των 1550 kWh/m^2 ανήκουν στην κατηγορία του χαμηλού ηλιακού δυναμικού (διαβαθμίσεις του μπλε). Αντίθετα, περιοχές με μέση ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ 1550 και 1700 kWh/m^2 ανήκουν στην κατηγορία του μέτριου ηλιακού δυναμικού (διαβαθμίσεις του κίτρινου) ενώ άνω των 1700 kWh/m^2 οι περιοχές ανήκουν στην κατηγορία του υψηλού ηλιακού δυναμικού. Η περιοχή των Κιμμερίων Ξάνθης κατηγοριοποιείται στις περιοχές με μέτριο ηλιακό δυναμικό, παρουσιάζοντας προοπτικές για εγκατάσταση εξοπλισμού όπως ηλιοθερμικοί συλλέκτες για την κάλυψη των αναγκών [13].



Εικόνα 6. 9: Ηλιακό δυναμικό ελλαδικού χώρου σύμφωνα με τα δεδομένα του Πανεπιστημίου Πατρών [14].

Σε ότι αφορά του δυναμικό βιομάζας, τα δεδομένα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 6. 10 αποτελούν απλοποιημένη προσέγγιση του ζητήματος, αφού λαμβάνουν υπόψη τους δραστηριότητες ανά περιοχή που μπορούν να παράγουν ξηρή βιομάζα από βιολογικές ή βιομηχανικές διαδικασίες. Η επιλογή τεχνολογίας εκμετάλλευσης βιομάζας (όπως οι λέβητες βιομάζας) είναι σαφώς συνθετότερη καθώς η προσβασιμότητα, η αναγκαία ποσότητα ανά περιοχή αλλά και το είδος της διαθέσιμης βιομάζας καθορίζουν την καταλληλότητα εφαρμογής συστημάτων καύσης βιομάζας. Καθαρά με όρους διαθεσιμότητας βιομάζας ανά περιοχή (σε ξηρούς τόνους) η Εικόνα 6. 10 παρουσιάζει με χρωματικές διαβαθμίσεις τις κατηγορίες δυναμικού βιομάζας ανά περιοχή του ελλαδικού χώρου. Η πρώτη κατηγορία (χαμηλό δυναμικό) είναι αυτή με διαθεσιμότητα έως 150.000 τόνους ενώ η δεύτερη κατηγορία (μέτριο δυναμικό) είναι αυτή με διαθεσιμότητα από 150.000 έως 350.000. Για δυναμικό άνω των 350.000 τόνων ξηρής βιομάζας οι περιοχές χαρακτηρίζονται από υψηλό δυναμικό. Η περιοχή των Κιμμερίων Ξάνθης, βάσει αυτών των στοιχείων, θα μπορούσε να κάνει χρήση συστήματος κάλυψης αναγκών που εκμεταλλεύεται βιομάζα, εφόσον κατατάσσεται στις περιοχές με μέτριο δυναμικό.



Εικόνα 6. 10: Δυναμικό βιομάζας στον ελλαδικό χώρο σύμφωνα με το ΚΑΠΕ [15].

Για το δυναμικό γεωθερμίας, τα μεγέθη προς σύγκριση είναι σαφώς περισσότερα. Ενώ υπάρχει (όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6. 11) διαβάθμιση στην ποιότητα ενθαλπίας προς εκμετάλλευση, στην πραγματικότητα διαφέρει το βάθος στο οποίο το γεωθερμικό ρευστό μπορεί να αντληθεί, το περιεχόμενο αυτού και η προσβασιμότητα σε αυτό (ποιότητα εδάφους). Αν ληφθούν υπόψη αμιγώς τα δεδομένα της Εικόνα 6. 11 χωρίς συμπερίληψη των προαναφερθέντων παραγόντων, το γεωθερμικό δυναμικό στον ελλαδικό χώρο κυμαίνεται από 25-350 °C. Αν θεωρηθεί ότι είναι σε εξορύξιμο επίπεδο και με επαρκές διαθέσιμο γεωρευστό, τότε σχηματίζει τρεις διαφορετικές ποιοτικές κλίμακες δυναμικού. Η πρώτη κατηγορία (χαμηλό δυναμικό) αφορά περιοχές με δυναμικό από 25-55 °C. Η δεύτερη κατηγορία (μέτριο δυναμικό) αφορά περιοχές από 55-75 °C ενώ η τρίτη κατηγορία αφορά περιοχές με θερμοκρασίες γεωρευστού άνω των 75 °C. Η περιοχή των Κιμμερίων Ξάνθης κατατάσσεται στις περιοχές με μέτριο γεωθερμικό δυναμικό, όπως ορίζει και αντίστοιχη προκαταρκτική μελέτη που έχει πραγματοποιηθεί σε παρακείμενο πεδίο της δυνητικής ΕΚ (επιγραμματικά η εν λόγω μελέτη παρατίθεται στο

Παράρτη).



Εικόνα 6. 11: Γεωθερμικό δυναμικό στον Ελλαδικό χώρο σύμφωνα με τα δεδομένα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου [16].

Ο συγκεντρωτικός πίνακας της αξιολόγησης του πρωτογενούς δυναμικού, όπως παρουσιάζεται στην μεθοδολογία RenewIslands, για την περιοχή των Κιμμερίων Ξάνθης, είναι ο Πίνακας 6. 7. Για το υδροδυναμικό δυναμικό, η κλίμακα ορίστηκε ως χαμηλή καθώς, όπως και η αιολική, δεν μπορεί να προσφέρει αποδοτικά θερμική και ψυκτική ενέργεια (μόνο μέσω μετατροπής της παραγόμενης ηλεκτρικής σε θερμική – μείωση ολικής απόδοσης συστήματος, αύξηση αέργου ισχύος και αύξηση εξέργειας στο σύστημα) [17].

6.3.2 Επιλογή τεχνολογιών για εκμετάλλευση πρωτογενούς δυναμικού

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, το επόμενο βήμα μετά τον προσδιορισμό του πρωτογενούς δυναμικού της υπό μελέτη περιοχής, είναι η επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται το δυναμικό αυτό και μπορούν να καλύψουν είτε ανεξάρτητα, είτε σε συνδυασμό (υβριδικά), τις ανάγκες της δυνητικής κοινότητας.

Στην παρούσα ενότητα γίνεται χρήση πολυκριτήριας ανάλυσης για τον προσδιορισμό των κριτηρίων επιλογής τεχνολογιών, καθώς η επιλογή επηρεάζεται από σημαντικές παραμέτρους. Η πολυκριτήρια ανάλυση που χρησιμοποιείται στην προκειμένη περίπτωση είναι η AHP (Analytical Hierarchy Process) εξαιτίας της αποτελεσματικότητάς της τόσο με ποιοτικούς όσο και με ποσοτικούς δείκτες. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 5, η συμπλήρωση της απόστασης μεταξύ των κριτηρίων είναι υποκειμενική σε τυπικές εφαρμογές της μεθόδου. Στην προκειμένη περίπτωση θα συμπληρωθεί μέσω εντοπισμού της σχέσης μεταξύ των κριτηρίων σε αντίστοιχη βιβλιογραφία πολυκριτήριων αναλύσεων ενεργειακών συστημάτων. Με τον τρόπο αυτό, η AHP αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο αξιολόγησης κριτηρίων, με το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας και πολυπλοκότητας για την περίπτωση.

Πίνακας 6. 7: Συγκεντρωτικός πίνακας αξιολόγησης πρωτογενούς δυναμικού για την περιοχή της μελέτης περίπτωσης.

Πρωτογενές Δυναμικό	Επίπεδο
Αιολικό	Χαμηλό
Ηλιακό	Μέτριο
Υδροδυναμικό	Χαμηλό
Τοπική πηγή βιομάζας	Μέτριο
Γεωθερμία	Μέτριο

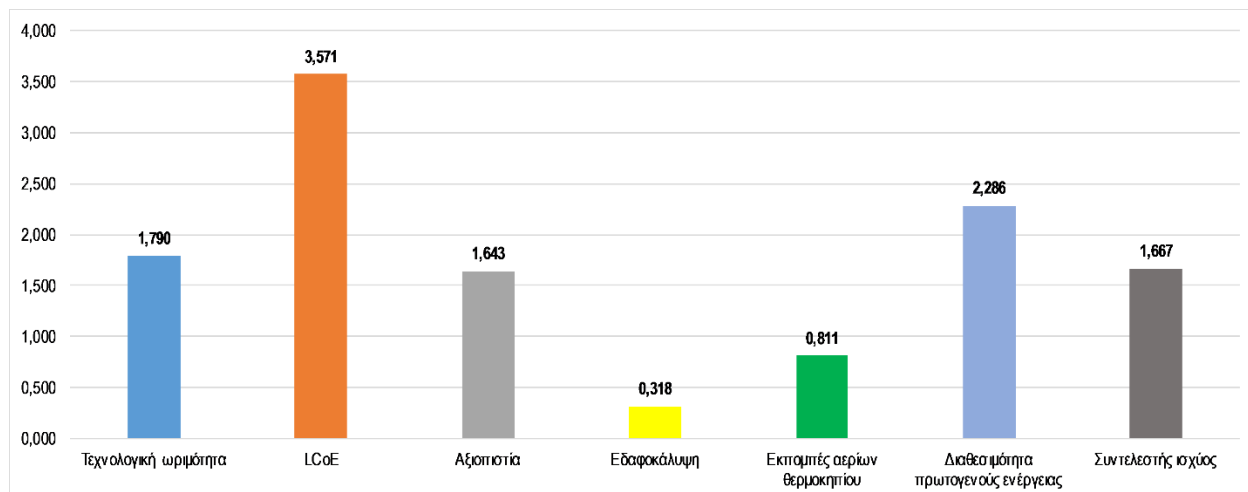
Τα κριτήρια προς ανάλυση παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. 8. Σκοπός είναι η απόδοση δεικτών βάρους στα επιμέρους κριτήρια προκειμένου να αποσαφηνιστεί ποια από αυτά καθορίζουν την επιλογή των κατάλληλων τεχνολογιών. Ο Πίνακας 6. 9 παρουσιάζει το αποτέλεσμα της πολυκριτήριας ανάλυσης μέσω της AHP καθώς αυτή συμπληρώθηκε από την αντίστοιχη βιβλιογραφία [2]. Η τεχνολογική ωριμότητα αφορά το στάδιο διείσδυσης της τεχνολογίας στην αγορά, ενώ αφορά και τα στάδια έρευνας και ανάπτυξης στα οποία μπορεί να βρίσκεται. Το LCoE είναι ένας εκ των σημαντικότερων δεικτών όσο αναφορά τις τεχνολογίες κάλυψης αναγκών, καθώς τελικά θα καθορίσουν τη βιωσιμότητα και εφαρμοστικότητα τους σε ευρεία κλίμακα. Για το κριτήριο της Αξιοπιστίας, γίνεται αναφορά κυρίως στον ρυθμό παρουσίασης αστοχιών στον εξοπλισμό. Αν κάποια τεχνολογία παρουσιάζει αυξημένο ρυθμό εμφάνισης αστοχιών, τότε θα βρίσκεται εκτός λειτουργίας για σημαντικό χρονικό διάστημα του έτους κατά το οποίο δεν θα παράγει την προβλεπόμενη ενέργεια, με αποτέλεσμα να αναδιαμορφώνει τις χρηματοροές του επενδυτικού σχεδίου.

Πίνακας 6. 8: Κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας κάλυψης αναγκών.

Κριτήρια
Τεχνολογική ωριμότητα
LCoE
Αξιοπιστία
Εδαφοκάλυψη
Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου
Διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενέργειας
Συντελεστής ισχύος

Πίνακας 6. 9: Πίνακας συνέπειας της μεθόδου AHP. Τα κριτήρια και οι αριθμητικές τιμές τους έχουν εξαχθεί από [18–21].

Βάρη Κριτηρίων	1,7905	3,5714	1,6429	0,3180	0,8109	2,2857	1,6667			
	T.Ω.	LCoE	A	E	E.A.Θ.	Δ.Ε.Π.	Σ.Ι.	Αθροιστικές Τιμές Βάρους (A.T.B.)	Βάρη Κριτηρίων (B.K.)	A.T.B./B.K.
Τεχνολογική ωριμότητα (T.Ω.)	1,7905	0,5102	3,2857	0,9541	5,6762	0,4571	0,5556	13,2294	1,7905	7,3887
LCoE	12,5333	3,5714	11,5000	2,2262	7,2980	2,2857	1,6667	41,0813	3,5714	11,5028
Αξιοπιστία (A)	0,4476	0,5102	1,6429	0,6361	4,0544	1,1429	5,0000	13,4340	1,6429	8,1772
Εδαφοκάλυψη (E)	0,5968	0,5102	0,8214	0,3180	0,2027	0,7619	0,2381	3,4492	0,3180	10,8456
Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (E.A.Θ.)	0,5968	0,3968	0,3286	1,2721	0,8109	0,3265	0,5556	4,2873	0,8109	5,2872
Διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενέργειας (Δ.Π.Ε.)	8,9524	3,5714	3,2857	0,9541	5,6762	2,2857	5,0000	29,7255	2,2857	13,0049
Συντελεστής ισχύος (Σ.Ι.)	5,3714	3,5714	0,5476	2,2262	2,4327	0,7619	1,6667	16,5779	1,6667	9,9467



Εικόνα 6. 12: Αποτελέσματα της AHP ως προς τα βάρη των κριτηρίων επιλογής τεχνολογιών [2].

Η Εδαφοκάλυψη απεικονίζει την έκταση αγροτεμαχίου που απαιτεί η εγκατάσταση του εκάστοτε εξοπλισμού. Η σημαντικότητα του κριτηρίου παρουσιάζεται κυρίως σε περιπτώσεις χαμηλής διαθέσιμης γής σε δυνητικές ΕΚ, που προκαλεί αποκλεισμό κάποιων τεχνολογιών όπως οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες (ως κύρια πηγή κάλυψης αναγκών) καθώς απαιτούν σημαντική έκταση αγροτεμαχίου για την εγκατάστασή τους.

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αναφέρονται κυρίως σε ρύπους ισοδύναμους του CO₂, που σχετίζονται με τον εκάστοτε εξοπλισμό σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του. Η Διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενέργειας αφορά την προαναφερθείσα ενότητα και επικεντρώνεται στην ύπαρξη ή όχι της ανάλογης διαθέσιμης πηγής σε αποδεκτά επίπεδα προκειμένου να αξιοποιηθεί από τον αντίστοιχο εξοπλισμό. Τέλος, ο Συντελεστής Ισχύος αναφέρεται στον λόγο ετήσιας παραγωγής ενέργειας από τον εξοπλισμό, στο σενάριο το οποίο αυτός θα εγκατασταθεί, προς την εγκατεστημένη του ισχύ. Ποιοτικά ο λόγος αντιπροσωπεύει το ποσό μετατροπής πρωτογενούς ενέργειας σε ωφέλιμη ισχύ, καθώς εξοπλισμός που έχει χαμηλό συντελεστή μπορεί να μην αποτελεί την ιδανική επιλογή για την περίπτωση.

Η Εικόνα 6. 12 παρουσιάζει τα βάρη των επιμέρους κριτηρίων όπως αυτά υπολογίστηκαν με τη μέθοδο AHP. Βάσει των δεικτών βάρους των κριτηρίων, είναι δυνατό να ιεραρχηθούν τα κριτήρια των τεχνολογιών, από το περισσότερο σημαντικό (μεγαλύτερο δείκτη βάρους) προς το λιγότερο σημαντικό. Η ιεραρχία αυτή θα καθορίσει και την αντίστοιχη λήψη απόφασης όσο αναφορά τη τεχνολογία που θα επιλεγεί να καλύψει το φορτίο της ΕΚ. Από την Εικόνα 6. 12 γίνεται αντιληπτό ότι το LCoE είναι το σημαντικότερο κριτήριο επιλογής τεχνολογίας (δείκτης βάρους 3,57) ενώ το δεύτερο στην κατάταξη είναι η Διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενέργειας (δείκτης βάρους 2,28). Η ιεράρχηση αυτή των κριτηρίων αποτελεί αποτέλεσμα και αρκετών ανάλογων δημοσιευμένων εργασιών, που έχουν καταδείξει τη σημασία αυτών των κριτηρίων κατά τη διαδικασία επιλογής τεχνολογίας κάλυψης αναγκών [18,19,22–29]. Αρκετά σημαντικό κριτήριο στα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης μέσω της AHP αποτελεί και η Τεχνολογική ωριμότητα (δείκτης βάρους 1,79).

Από την ιεράρχηση που προκύπτει μέσω της AHP γίνεται κατανοητό ότι το κόστος ενέργειας καθώς και διαθεσιμότητα της ανάλογης πρωτογενούς πηγής, είναι οι σημαντικότεροι δείκτες επιλογής τεχνολογιών. Αν δεν υπάρχει η διαθέσιμη πρωτογενής πηγή ενέργειας (π.χ. ηλιακή ακτινοβολία σε αποδεκτά επίπεδα) δεν μπορεί να επιλεγεί η αντίστοιχη τεχνολογία και να αποτελέσει βασική πηγή κάλυψης αναγκών για το σχεδιαζόμενο σύστημα. Η παράμετρος του κόστους ενέργειας (LCoE) αποτελεί επίσης δείκτη υψηλής σημαντικότητας καθώς αν υπάρχει το διαθέσιμο δυναμικό, αλλά το κόστος του εξοπλισμού αποτρέπει την προσφορά βιώσιμης ενέργειας, τότε η τεχνολογία δεν μπορεί να συμπεριληφθεί στο σχεδιαζόμενο σύστημα, που στόχος του είναι η παροχή αξιόπιστης, βιώσιμης, πράσινης ενέργειας.

Τα κριτήρια αυτά, όπως παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 6. 8, είναι είτε ποιοτικά είτε ποσοτικά και έχουν τυπικές τιμές ως ανοιγμένα μεγέθη στην διαθέσιμη βιβλιογραφία μελετών ενεργειακών συστημάτων. Ενδεικτικά, οι τυπικές τιμές, των κριτηρίων αυτών ανά τεχνολογία δίνονται στον Πίνακα 6. 10. Βάσει των αποτελεσμάτων της AHP (ιεραρχία κριτηρίων) και των τυπικών τιμών των κριτηρίων είτε ποσοτικά είτε ποιοτικά, καθώς και της αποδελτίωσης του πρωτογενούς δυναμικού της περιοχής της μελέτης περίπτωσης των Κιμμερίων Ξάνθης, η μεθοδολογία HDLM επιλέγει τις τεχνολογίες που θα συμμετέχουν στον σχεδιασμό του συστήματος κάλυψης αναγκών για την δυνητική ΕΚ.

Η αποδελτίωση του πρωτογενούς δυναμικού της περιοχής της μελέτης περίπτωσης (Πίνακας 6. 7) ορίζει πώς οι διαθέσιμες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η ηλιακή, η γεωθερμική ενώ υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης λέβητα βιομάζας. Τα διαφορετικά αυτά δυναμικά είναι εκμεταλλεύσιμα από διάφορες τεχνολογίες, οι σημαντικότερες εκ των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. 11, όπως αναλύθηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο. Ο στόχος του παρόντος βήματος της μεθοδολογίας είναι να επιλέξει τις τεχνολογίες που θα καλύψουν τις ανάγκες της κοινότητας της μελέτης περίπτωσης.

Πίνακας 6. 10: Ποιοτικοί και ποσοτικοί δείκτες αποδοτικότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των αντίστοιχων τεχνολογιών τους [18,19,22–29]

Πρωτογενές Δυναμικό Τεχνολογία	Αιολικό	Ηλιακό Δυναμικό	Δυναμικό βιο- μάζας	Γεωθερμικό δυναμικό
	Χερσαίες Ανε- μογεννήτριες	Ηλιοθερμικοί Συλ- λέκτες	Λέβητες Βιο- μάζας	Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας
LCoE (€/kWh)	0,35 (2020) [30]	0,195 (2020) [31]	0,2 (2021) [32]	0,16 (2022) [33]
Τεχνολογική ω- ριμότητα	Ωριμη	Ωριμη	Ωριμη	Ωριμη
Αξιοπιστία	Χαμηλή	Μέτρια	Μέτρια	Υψηλή
Εκπομπές (CO ₂ /kWh)	15	40	100	40
Εδαφοκάλυψη (m ² /kW)	200	40	25	100
Διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενέργειας	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Υψηλή

Εφόσον υπάρχουν τρεις διαθέσιμες πρωτογενείς πηγές ενέργειας, είναι δόκιμο να αξιοποιηθούν κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο με τη χρήση κατάλληλων τεχνολογιών. Η επιλογή δύο ή και παραπάνω εξ αυτών συνεπάγεται την πιθανότητα υβριδοποίησής τους (συνεργασίας τους) προκειμένου να παρέχουν στο δίκτυο την υψηλότερη δυνατή, ποιοτικά, ενέργεια. Η ηλιακή ακτινοβολία κρίθηκε ως «Μέτριας» δυναμικότητας για την περιοχή και επομένως είναι δόκιμη η χρήση ηλιοθερμικών συλλεκτών. Οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες έχουν χαμηλό LCoE (υψηλότερο ιεραρχικά κριτήριο βάσει AHP - Εικόνα 6. 12), υπάρχει διαθεσιμότητα της πρωτογενούς πηγής (δεύτερο κατά σειρά στην ιεραρχία των κριτηρίων βάσει AHP - Εικόνα 6. 12) και είναι τεχνολογικά ώριμη η εφαρμογή τους (τρίτο κατά σειρά κριτήριο στην ιεραρχία βάσει των κριτηρίων της AHP - Εικόνα 6. 12).

Το γεωθερμικό δυναμικό της περιοχής κατηγοριοποιήθηκε ως «Μέτριο» και επομένως είναι δόκιμη η χρήση γεωθερμικών αντλιών για την κάλυψη των αναγκών της κοινότητας. Οι γεωθερμικές αντλίες έχουν το δεύτερο χαμηλότερο LCoE (μετά τους ηλιοθερμικούς συλλέκτες) στην αγορά ενέργειας (υψηλότερο ιεραρχικά κριτήριο βάσει AHP - Εικόνα 6. 12) και είναι διαθέσιμη η αντίστοιχη πρωτογενής ενέργεια που απαιτείται (δεύτερο κατά σειρά στην ιεραρχία των κριτηρίων βάσει AHP - Εικόνα 6. 12). Η τεχνολογία των αντλιών βρίσκεται σε ώριμο εμπορικό και τεχνολογικό στάδιο, με αποτέλεσμα η συγκεκριμένη τεχνολογία να είναι συνολικά, και βάσει των κριτηρίων της AHP, δόκιμη για την χρήση στη μελέτη περίπτωσης. Όσο αναφορά το δυναμικό της βιομάζας, ανήκει επίσης στην κατηγορία «Μέτριας» διαθεσιμότητας για την περιοχή. Η χρήση της συγκεκριμένης ανανεώσιμης πηγής, βάσει των κριτηρίων της AHP, είναι δόκιμη καθώς έχει το τρίτο κατά σειρά χαμηλότερο LCoE από τις αντίστοιχες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών (υψηλότερο ιεραρχικά κριτήριο βάσει AHP - Εικόνα 6. 12) ενώ υπάρχει και η ανάλογη πρωτογενής πηγή σε διαθεσιμότητα στην περιοχή για να χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη τεχνολογία (δεύτερο κατά σειρά στην ιεραρχία των κριτηρίων βάσει AHP - Εικόνα 6. 12). Η τεχνολογία των λεβητών βιομάζας, που εκμεταλλεύονται το πρωτογενές δυναμικό, είναι ώριμη εμπορικά και τεχνολογικά με αποτέλεσμα να προκρίνεται και αυτή η τεχνολογία στις επιλεχθείσες προς εγκατάσταση.

Πίνακας 6. 11: Σύνολο διαθέσιμων εμπορικών τεχνολογιών προς επιλογή για την εξυπηρέτηση φορτίων στη μελέτη περίπτωσης.

Τεχνολογία	Βαθμός Απόδοσης (%)	Εύρος Λειτουργίας (°C)	Κόστος μονάδας (€/kWh)
Επίπεδος ηλιοθερμικός συλλέκτης	50-70%	150-500 °C [34]	0,2 €/kWh
Συλλέκτης κενού	30-50%	>200 °C [34]	0,192 €/kWh
Παραβολικός συλλέκτης	30-50%	<400 °C	0,22 €/kWh
Αντλία θερμότητας ανοικτού τύπου νερού-νερού	4,1	25-55 °C	0,21 €/kWh
Αντλία θερμότητας ανοικτού τύπου νερού-αέρα	3,5	20-45 °C	0,19 €/kWh
Αντλία θερμότητας κλειστού τύπου νερού νερού	4,7	25-50 °C	0,184 €/kWh
Αντλία θερμότητας κλειστού τύπου νερού αέρα	3,1	20-43 °C	0,171 €/kWh
Λέβητας βιομάζας με καύσιμο πριονίδι πυκνότητας 250 kg/m ³	85-93%	60-150 °C	0,18 €/kWh
Λέβητας βιομάζας με καύσιμο πελλέτες ξύλου πυκνότητας 650 kg/m ³	85-94	60-150 °C	0,11 €/kWh
Ψύκτης απορρόφησης θερμότητας	60-80%	4-15 °C	0,9 €/kWh
Ψύκτης προσρόφησης θερμότητας	35-50%	7-12 °C	Μη διαθέσιμο
Ψύκτης στερεού αποξηραντικού μέσου	50-80%	8-18 °C	Μη διαθέσιμο
Αισθητή αποθήκευση θερμότητας	kWh/m³	Εύρος λειτουργίας (°C)	€/kg
Νερό	23,26	$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,34 (σε συνδυασμένα συστήματα)
Γρανίτης	13,85	$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Μη διαθέσιμο
Λανθάνουσα θερμότητα	kWh/m³	Θερμοκρασία τήξης	€/kg
Νερό	84,76	0 °C	0,45
Παραφίνες	49,86	5-130 °C	3,2
Διαλύματα άλατος	83,1	5-130 °C	4,5
Άλατα	166,2-415,5	300-800 °C	5,6

Τα αποτελέσματα της πολυκριτήριας επιλογής τεχνολογιών καταδεικνύουν την καταλληλότητα των ηλιοθερμικών συλλεκτών, των αντλιών θερμότητας και των λεβήτων βιομάζας ως τεχνολογιών κατάλληλων προς συνδυασμό για την κάλυψη των αναγκών της ΕΚ. Οι ανάγκες της κοινότητας περιορίζονται σε κάλυψη θερμικών και ψυκτικών φορτίων, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως οι θερμοκρασίες ρευστών που πρέπει να παρέχονται στο σύστημα τηλεθέρμανσης δεν θα ξεπερνούν τα σχεδιαστικά όρια, βάσει TOTEE, των 80 °C. Αν για το δίκτυο τηλεθέρμανσης καθοριστεί ότι θα σχεδιαστεί βάσει των προτύπων των δικτύων 4^{ης} Γενιάς δικτύων τηλεθέρμανσης (Κεφάλαιο 2 – Ενότητα 2.2.4), τότε η μέση τιμή θερμοκρασίας στο δίκτυο δεν θα ξεπερνά τους 65 °C. Ως προς την κάλυψη των θερμικών φορτίων, η θερμοκρασία παροχής των 65 °C είναι επαρκής, όμως για την κάλυψη των φορτίων ψύξης δεν επαρκεί. Εφόσον οι σχεδιαστικές επιλογές περιορίζονται σε ανανεώσιμες πηγές και τεχνολογίες που τις αξιοποιούν, η παραγωγή ψύξης θα πραγματοποιείται μέσω είτε απορρόφησης αυτής, είτε προσρόφησης (μέσω των αντίστοιχων ψυκτικών μονάδων). Οι μονάδες αυτές απαιτούν ως είσοδο νερό θερμοκρασίας 75-80 °C με αποτέλεσμα να αναδιαμορφώνουν την σχεδίαση του συστήματος από τους 65 °C (κάλυψη φορτίων θέρμανσης) στους 80 °C για την κάλυψη του φορτίου ψύξης.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6. 11, οι τεχνολογίες των ηλιοθερμικών συλλεκτών είναι οι επίπεδοι, οι παραβολικοί και συλλέκτες κενού. Εκτός των επιπέδων όμως, οι άλλες δύο κατηγορίες συλλεκτών αποδίδουν θερμό ρευστό αρκετά υψηλότερης θερμοκρασίας από το επιθυμητό. Με ορισμένες διατάξεις όπως εναλλάκτες θερμότητας ή συστήματα ανάκτησης θερμότητας, η χρήση τους θα ήταν δυνατή για το σχεδιαζόμενο σύστημα, με υψηλή, όμως, απώλεια ενέργειας. Επομένως, οι επίπεδοι ηλιακοί συλλέκτες επιλέγονται ως καταλληλότερη τεχνολογία, καθώς το εύρος λειτουργίας τους εμπίπτει με το επιθυμητό (65 °C), έχουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης από τις άλλες δύο κατηγορίες και έχουν σχετικά χαμηλό LCoE. Αντίστοιχα για τις γεωθερμικές αντλίες, η τεχνολογία με την υψηλότερη απόδοση που εμπίπτει στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος είναι η τεχνολογία αντλιών ανοικτού τύπου νερού-νερού. Η χρήση αντλιών νερού-αέρα δεν θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην προκειμένη περίπτωση καθώς θα ήταν αδύνατος ο συνδυασμός τους με τους ηλιοθερμικούς συλλέκτες που έχουν σαν έξοδο αποκλειστικά νερό.

Όσο αναφορά τους λέβητες βιομάζας, σύμφωνα με τον Πίνακα 6. 11, η επιλογή λέβητα που χρησιμοποιεί ως καύσιμο πελλέτες ξύλου είναι καταλληλότερη καθώς έχει σημαντικά χαμηλότερο LCoE, παράγει νερό στο επιθυμητό θερμοκρασιακό εύρος και υψηλό βαθμό απόδοσης. Η επιλογή των τριών καταλληλότερων τεχνολογιών παραγωγής θερμικής ενέργειας δύναται να παράγει συνολικά νερό θερμοκρασίας 65-85 °C, δίνοντας την δυνατότητα στο σύστημα τους θερινούς μήνες να καλύψει τα φορτία ψύξης με την ανάλογη ψυκτική μονάδα. Από τον Πίνακα 6. 11 φαίνεται ότι η τεχνολογία με την υψηλότερη απόδοση και την μεγαλύτερη εμπορική εφαρμογή (οι ψύκτες προσρόφησης και στερεού αποξηραντικού μέσου δεν βρίσκονται σε στάδιο πλήρους εμπορικής διεύθυνσης και επομένως δεν είναι διαθέσιμα τα ανάλογα οικονομικά στοιχεία του κόστους ενέργειας που παράγουν) είναι οι ψύκτες απορρόφησης θερμότητας που επιλέγονται και ως η καταλληλότερη τεχνολογία για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων.

Λόγω όμως της διαλειπότητας των ανανεώσιμων πηγών, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες της διατριβής, είναι αναγκαία η χρήση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Από τον Πίνακα 6. 11 γίνεται αντιληπτό ότι οι τεχνολογίες λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας είναι αρκετά κοστοβόρες και έχουν αρκετά υψηλά LCoE. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του πρώιμου εμπορικού σταδίου στο οποίο βρίσκονται, που επηρεάζει το κόστος αγοράς τους και επομένως και το κόστος της ενέργειας που μπορούν να παρέχουν. Επομένως η επιλογή περιορίζεται στις τεχνολογίες αισθητής αποθήκευσης θερμότητας, με το νερό να υπερισχύει εξαιτίας της διαθεσιμότητάς του, του χαμηλού κόστους ενέργειας που προσφέρει και της αποθηκευτικής του ικανότητας συγκριτικά με τον γρανίτη (kWh/m³) και της φιλικότητάς του προς το περιβάλλον.

Συνοπτικά οι τεχνολογίες παραγωγής θερμικής ενέργειας που κρίθηκαν ως καταλληλότερες για την περίπτωση είναι οι επίπεδοι ηλιοθερμικοί συλλέκτες, οι αντλίες θερμότητας ανοικτού τύπου νερού-νερού και οι λέβητες βιομάζας ενώ για την παραγωγή ψυκτικής ενέργειας οι ψύκτες απορρόφησης θερμότητας. Ως αποθηκευτικό μέσο επιλέχθηκε το νερό και το δίκτυο διανομής της θερμικής και ψυκτικής ενέργειας θα σχεδιαστεί βάσει των προτύπων των δικτύων 4^{ης} Γενιάς. Ακολουθεί ο σχεδιασμός του συστήματος κάλυψης των αναγκών της δυνητικής ΕΚ με το συνδυασμό των τεχνολογιών που επιλέχθηκαν.

6.3.3 Πίνακας αληθείας – Μέθοδος Quinne McCluskey

Για διευκόλυνση της δημιουργίας και αναφοράς των επιμέρους τεχνολογιών στον πίνακα αληθείας αλλά και στην συνέχεια της παρουσίασης της εφαρμογής της μεθοδολογίας HDLM για την μελέτη περίπτωσης, οι τεχνολογίες που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6. 12. Στον σχεδιασμό του πίνακα αληθείας, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5 – Ενότητα 5.2.3, σε έναν εξοπλισμό αποδίδεται ο αριθμός 1 όταν δύναται να καλύψει το εξεταζόμενο φορτίο (θερμικό ή ψυκτικό) εξολοκλήρου, ενώ 0 όταν δεν έχει την απαραίτητη ισχύ ή δεν διατίθεται η απαραίτητη πρωτογενής ενέργεια για την λειτουργία του εξοπλισμού.

Πίνακας 6. 12: Επιλεγμένες τεχνολογίες για την κάλυψη των αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.

Τεχνολογία	Σύμβολο
Λέβητας βιομάζας	A
Επίπεδοι ηλιοθερμικοί συλλέκτες	B
Γεωθερμική αντλία θερμότητας ανοικτού τύπου	C
Αποθήκευση θερμότητας (TESS)	D
Ψύκτης απορρόφησης θερμότητας	E
Συνάρτηση	
Κάλυψη θερμικού φορτίου	h
Κάλυψη ψυκτικού φορτίου	c

Οι συναρτήσεις προς βελτιστοποίηση με τη μέθοδο Quine- McCluskey είναι δύο στην προκειμένη, η πρώτη αφορά την κάλυψη του φορτίου θέρμανσης και η δεύτερη την κάλυψη του φορτίου ψύξης. Προκειμένου να σχεδιαστεί ένα σύστημα επαρκούς ενεργειακής αυτονομίας και ασφάλειας, θα γίνει χρήση και των 3 τεχνολογιών παραγωγής θερμικής ενέργειας σε συνδυασμό, δημιουργώντας ένα υβριδικό μοντέλο. Ο υβριδισμός, ο μηχανισμός δηλαδή με τον οποίο θα συνεργάζονται οι επιμέρους τεχνολογίες (Πίνακας 6. 12), θα αποτελεί και στόχο του σχεδιασμού μέσω της κατασκευής του πίνακα αληθείας.

Η συμπλήρωσή είναι αποτέλεσμα βιβλιογραφικής ανασκόπησης αντίστοιχων υβριδικών συστημάτων, που χρησιμοποιούν διαφορετικά σενάρια συνδυασμού των τεχνολογιών για να καλύψουν κάποιο βασικό φορτίο. Παράδειγμα αποτελεί η εργασία των Voll P. et al. στην οποία εξετάζεται το υβριδικό σενάριο κάλυψης αναγκών με τη χρήση λέβητα αερίου, γεωθερμικών αντλιών και ψύκτη απορρόφησης [35]. Σε περιπτώσεις που ο συνδυασμός έχει εξεταστεί βιβλιογραφικά και λειτουργικά και μπορεί να εξυπηρετήσει το φορτίο, τότε στην ανάλογη γραμμή του πίνακα αληθείας θα αποδοθεί ο αριθμός 1 ως έξοδος (output). Το 1 ως έξοδος ποιοτικά σημαίνει κάλυψη του φορτίου που αντιπροσωπεύει η συνάρτηση (output), είτε αυτό είναι θερμικό είτε ψυκτικό. Αξίζει να αναφερθεί ότι ως είσοδοι (μεταβλητές είσοδο – inputs) λαμβάνονται οι τεχνολογίες που επιλέχθηκαν (τεχνολογίες

παραγωγής και αποθήκευσης - Πίνακας 6. 12), εκτός του ψύκτη απορρόφησης που αντιμετωπίζεται από το σύστημα ως ένα ακόμα θερμικό φορτίο. Η απόδοση θερμικής ενέργειας ορισμένης ενθαλπίας μετατρέπεται σε ψυκτική ενέργεια από τον ψύκτη, που καλύπτει το ψυκτικό φορτίο. Επομένως, για τη συμπλήρωση της συνάρτησης εξόδου του ψυκτικού φορτίου στον πίνακα αληθείας, με 1 τίθεται η γραμμή του πίνακα που απεικονίζει κατάλληλο συνδυασμό τεχνολογιών ικανών να καλύψουν το θερμικό φορτίο του ψύκτη και συνεπώς να καλύψουν το ψυκτικό, ενώ με 0 συμπληρώνεται ο συνδυασμός των τεχνολογιών της γραμμής στην περίπτωση που δεν δύναται να καλύψει το θερμικό του φορτίο και συνεπώς το ανάλογο ψυκτικό (παράδειγμα αποτελεί η αντλία θερμότητας που το θερμοκρασιακό εύρος εξόδου της είναι σημαντικά χαμηλότερο από το επιθυμητό για την λειτουργία του ψύκτη, 55 °C μέγιστη θερμοκρασία εξόδου έναντι 75 °C που απαιτούνται για τη λειτουργία του ψύκτη). Ο πίνακας αληθείας που ανταποκρίνεται στην μελέτη περίπτωσης παρουσιάζεται στον Πίνακας 6. 13.

Πίνακας 6. 13: Πίνακας αληθείας για τη μελέτη περίπτωσης των Κιμμερίων Ξάνθης, που απεικονίζει τις επιλεγμένες τεχνολογίες και των υβριδικό τους συνδυασμό προς την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων.

A	B	C	D	h	c	Αναφορά
0	0	0	0	0	0	
0	0	0	1	0	0	[36]
0	0	1	0	0	1	[37]
0	0	1	1	1	1	[38]
0	1	0	0	0	0	[39]
0	1	0	1	0	1	[40]
0	1	1	1	1	1	[41]
1	0	0	0	0	1	[42]
1	0	0	1	1	1	[43]
1	0	0	1	1	1	[44]
1	0	1	0	1	1	[44]
1	0	1	1	1	1	[45]
1	1	0	0	1	1	[11,46]
1	1	0	1	1	1	[5]
1	1	1	0	1	1	[5]
1	1	1	1	1	1	

Τα αποτελέσματα του πίνακα αληθείας καθιστούν σαφές ότι σε περίπτωση που δεν υπάρχει καμία διαθέσιμη πηγή ενέργειας (1^η γραμμή του πίνακα) και η αποθήκευση δεν έχει την απαιτούμενη ενέργεια, δεν μπορεί να καλυφθεί κανένα από τα φορτία. Επίσης, στην περίπτωση που είναι διαθέσιμες όλες οι πηγές και η αποθήκευση έχει την απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας για να καλύψει τα φορτία (16^η γραμμή του πίνακα), τα φορτία καλύπτονται πλήρως. Οι παραδοχές του πίνακα περιορίζονται στην πλήρη λειτουργία του εξοπλισμού (1) για την κάλυψη του φορτίου, δηλαδή η εγκατεστημένη τους ισχύ σε πλήρη λειτουργία μπορεί να καλύψει το εκάστοτε φορτίο. Δεν λαμβάνεται υπόψη στον αρχικό σχεδιασμό καμία περίπτωση μερικής λειτουργίας (part-load performance) για τις επιλεγμένες τεχνολογίες. Επειδή η πρακτική αυτή μπορεί να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση των επιμέρους τεχνολογιών, ο πίνακας αληθείας εξετάζει διαδοχικά τα σενάρια υβριδικής λειτουργίας τους με τις υπόλοιπες τεχνολογίες (γραμμές του Πίνακας 6. 13.) ώστε το σύστημα που προκύπτει να είναι i) υβριδικό, ii)

διαστασιολογημένο στις ανάγκες της ΕΚ, iii) να προσφέρει την επιθυμητή ευελιξία ως προς την προέλευση της ενέργειας, iv) να προσφέρει ενεργειακή αυτονομία και v) να προσφέρει ενεργειακή ασφάλεια στην δυνητική ΕΚ.

Βάσει του Πίνακα 6. 13., σχεδιάζεται ο αντίστοιχος χάρτης Karnaugh για την αποτύπωση των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών. Ο χάρτης Karnaugh παρουσιάζεται στους Πίνακες 6. 14, Πίνακας 6. 15 για την κάλυψη του φορτίου θέρμανσης και του φορτίου ψύξης αντίστοιχα.

Πίνακας 6. 14: Χάρτης Karnaugh βάσει του Πίνακα 6. 13. για την κάλυψη του φορτίου θέρμανσης.

AB/CD	00	01	11	10
00	0	0	1	0
01	0	0	1	1
11	1	1	1	1
10	0	1	1	1

Πίνακας 6. 15: Χάρτης Karnaugh βάσει του Πίνακα 6. 13. για την κάλυψη του φορτίου ψύξης.

AB/CD	00	01	11	10
00	0	0	1	1
01	0	1	1	1
11	1	1	1	1
10	1	1	1	1

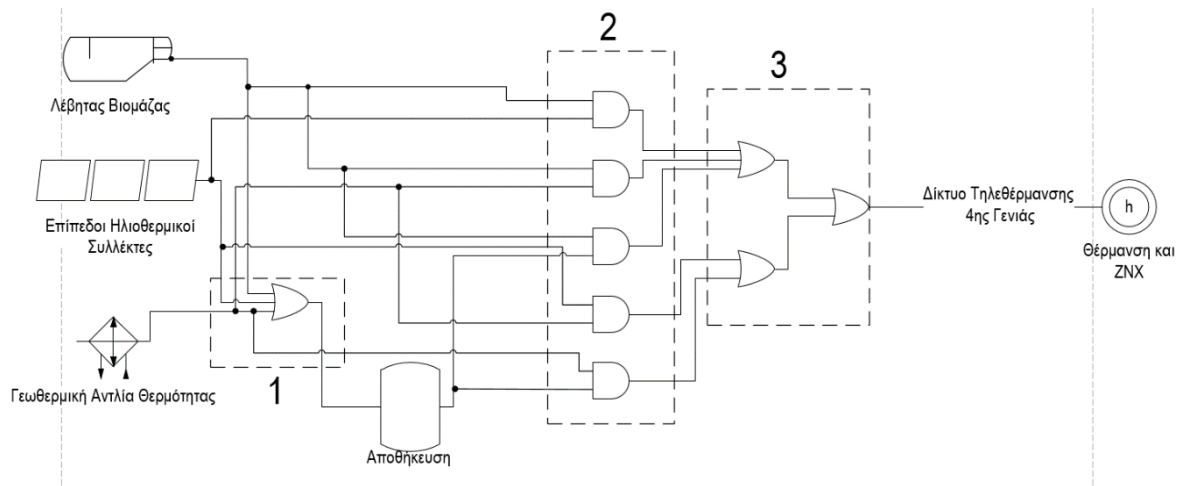
Οι εξισώσεις που απλοποιούν τον χάρτη Karnaugh για την κάλυψη των θερμικών και ψυκτικών φορτίων αντίστοιχα, βάσει της μεθόδου Quine-McCluskey, δίνονται από τις Εξ. 2 και 3.

$$h = CD + BC + AD + AC + AB \quad (2)$$

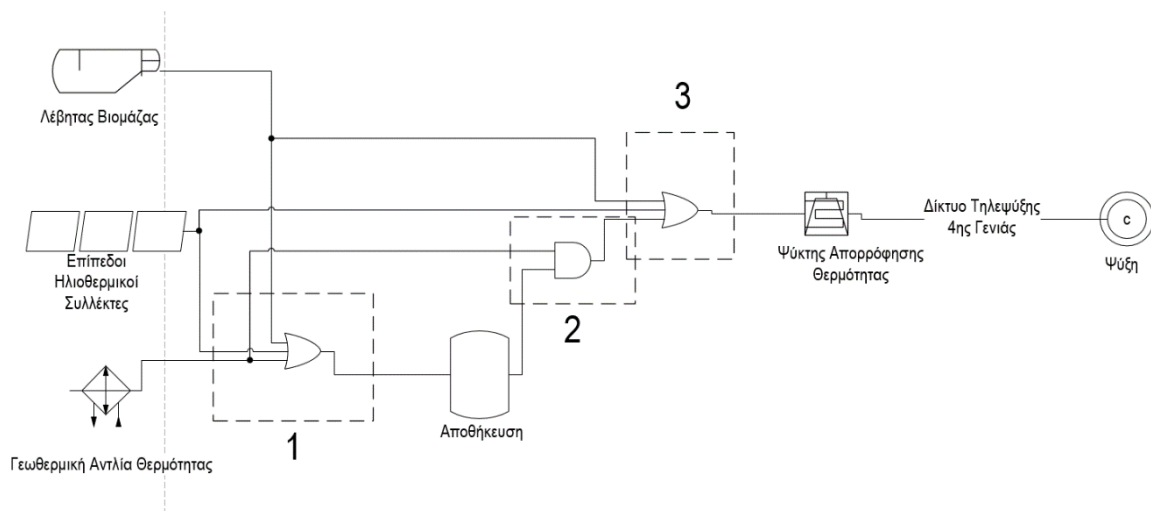
$$c = C + A + BD \quad (3)$$

Η Εξ. 2 αποτυπώνει τον συνδυασμό τεχνολογιών για την κάλυψη του φορτίου θέρμανσης (h) και ποιοτικά εκφράζει ότι: αν υπάρχει αποθηκευμένη θερμική ενέργεια και θερμική ενέργεια από γεωθερμικές αντλίες, ή αν υπάρχει ενέργεια από τους ηλιοθερμικούς συλλέκτες και τις γεωθερμικές αντλίες, ή αν υπάρχει ενέργεια από τον λέβητα βιομάζας και τις γεωθερμικές αντλίες, ή αν υπάρχει ενέργεια από τον λέβητα βιομάζας και τους ηλιοθερμικούς συλλέκτες, μπορεί να καλυφθεί το φορτίο θέρμανσης της μελέτης περίπτωσης. Αντίστοιχα, η Εξ. 3 αποτυπώνει τον βέλτιστο συνδυασμό τεχνολογιών για την κάλυψη του φορτίου ψύξης (c) και ποιοτικά εκφράζει ότι: αν υπάρχει θερμική ενέργεια από τις γεωθερμικές αντλίες, ή από τον λέβητα βιομάζας, ή από τον συνδυασμό των ηλιοθερμικών συλλεκτών και της αποθήκευσης, μπορεί να καλυφθεί το απαιτούμενο θερμικό φορτίο του ψύκτη για την κάλυψη του αντίστοιχου ψυκτικού καταναλωτών.

Με την αποδελτίωση των πληροφοριών που εξάγονται από τους χάρτες Karnaugh και τις προκύπτουσες εξισώσεις (Εξ. 2 και 3), είναι δυνατός ο σχεδιασμός του γράφου διαδικασίας P-graph, που με την ενσωμάτωση λογικών πυλών μπορεί να προσφέρει μια πρώτη αποτύπωση του συστήματος κάλυψης των αναγκών (Κεφάλαιο 5-Ενότητα 5.2.4). Η πρώτη αυτή αποτύπωση παρουσιάζεται στις Εικόνα 6. 13, Εικόνα 6. 14 αντίστοιχα για την κάλυψη του φορτίου θέρμανσης και ψύξης.



Εικόνα 6. 13: Ανηγγέμενος γράφος διαδικασίας (P-graph) που συμπεριλαμβάνει τις επιλεχθείσες τεχνολογίες και τις λογικές πύλες όπως προκύπτουν από την Εξ. 2 για το σενάριο κάλυψης του φορτίου θέρμανσης.



Εικόνα 6. 14: Ανηγγέμενος γράφος διαδικασίας (P-graph) που συμπεριλαμβάνει τις επιλεχθείσες τεχνολογίες και τις λογικές πύλες όπως προκύπτουν από την Εξ. 3 για το σενάριο κάλυψης του φορτίου ψύξης.

Η διάκριση των πυλών που εμφανίζονται στις Εικόνα 6. 13, Εικόνα 6. 14 με αριθμητικούς δείκτες γίνεται προκειμένου να σχεδιαστούν με ακρίβεια και να αποδοθούν σταδιακά στις ανάλογες υδραυλικές πύλες. Η αντιστοίχιση των υδραυλικών ανάλογων των λογικών πυλών, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 – Ενότητα 5.2.4, είναι αυτή που θα αποδώσει και το μηχανολογικό ανάλογο του προτεινόμενου συστήματος. Στην Εικόνα 6. 13, η πύλη 1 απεικονίζει ποιοτικά μια τετράοδη βαλβίδα 3 εισόδων 1 εξόδου, όπου λαμβάνει θερμό ρευστό είτε από τους επίπεδους ηλιοθερμικούς συλλέκτες είτε από την γεωθερμική αντλία θερμότητας είτε από τον λέβητα βιομάζας προκειμένου να φορτίσει τα δοχεία αποθήκευσης θερμότητας. Το σύνολο πυλών της 2 στην Εικόνα 6. 13 απεικονίζει αντίστοιχα έναν συλλέκτη θερμού νερού⁶ που τροφοδοτείται (φορτίζεται) από τον συνδυασμό είτε ηλιοθερμικών συλλεκτών και λέβητα βιομάζας, είτε λέβητα βιομάζας και γεωθερμικής αντλίας, είτε λέβητα βιομάζας και αποθήκευσης, είτε ηλιοθερμικών συλλεκτών και γεωθερμικής αντλίας, είτε αποθήκευσης και γεωθερμικής αντλίας.

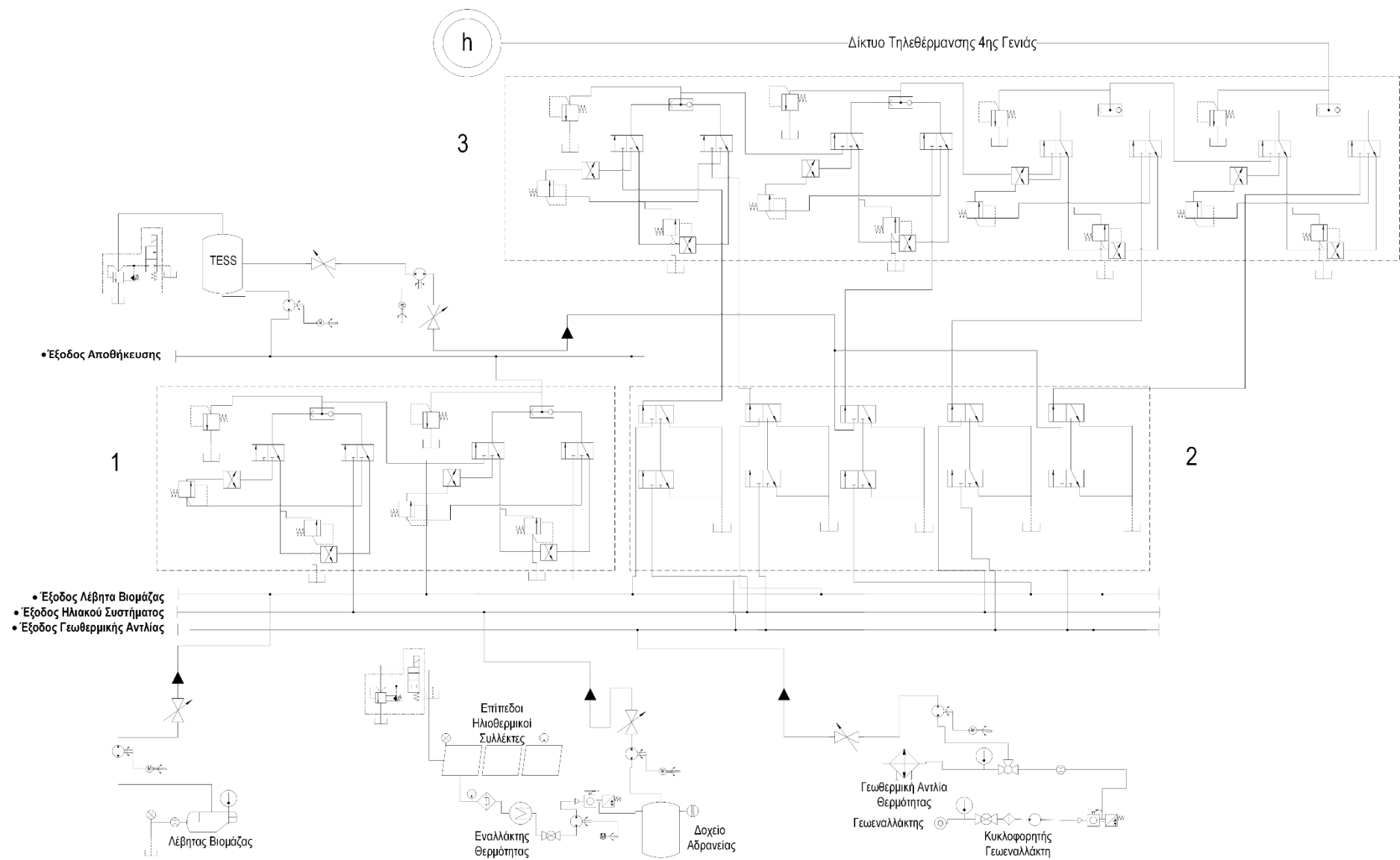
⁶ Ως συλλέκτες θερμού νερού αναφέρονται κυλινδρικές υδραυλικές διατάξεις πεπερασμένου όγκου όπου εισέρχονται εισοδοί νερού (ή ατμού, εξαρτάται από το είδος της εγκατάστασης) και εξέρχονται ανάλογες αναχωρήσεις προς τα εξυπηρετούμενα σημεία του υδραυλικού κυκλώματος.

Η πύλη 3 απεικονίζει ποιοτικά 3 διαφορετικές βαλβίδες. Μια τετράοδη βαλβίδα 3 εισόδων και 1 εξόδου, μία τριόδη βαλβίδα 2 εισόδων και 1 εξόδου και μία τριόδη βαλβίδα 2 εισόδων και 1 εξόδου προς το φορτίο θέρμανσης.

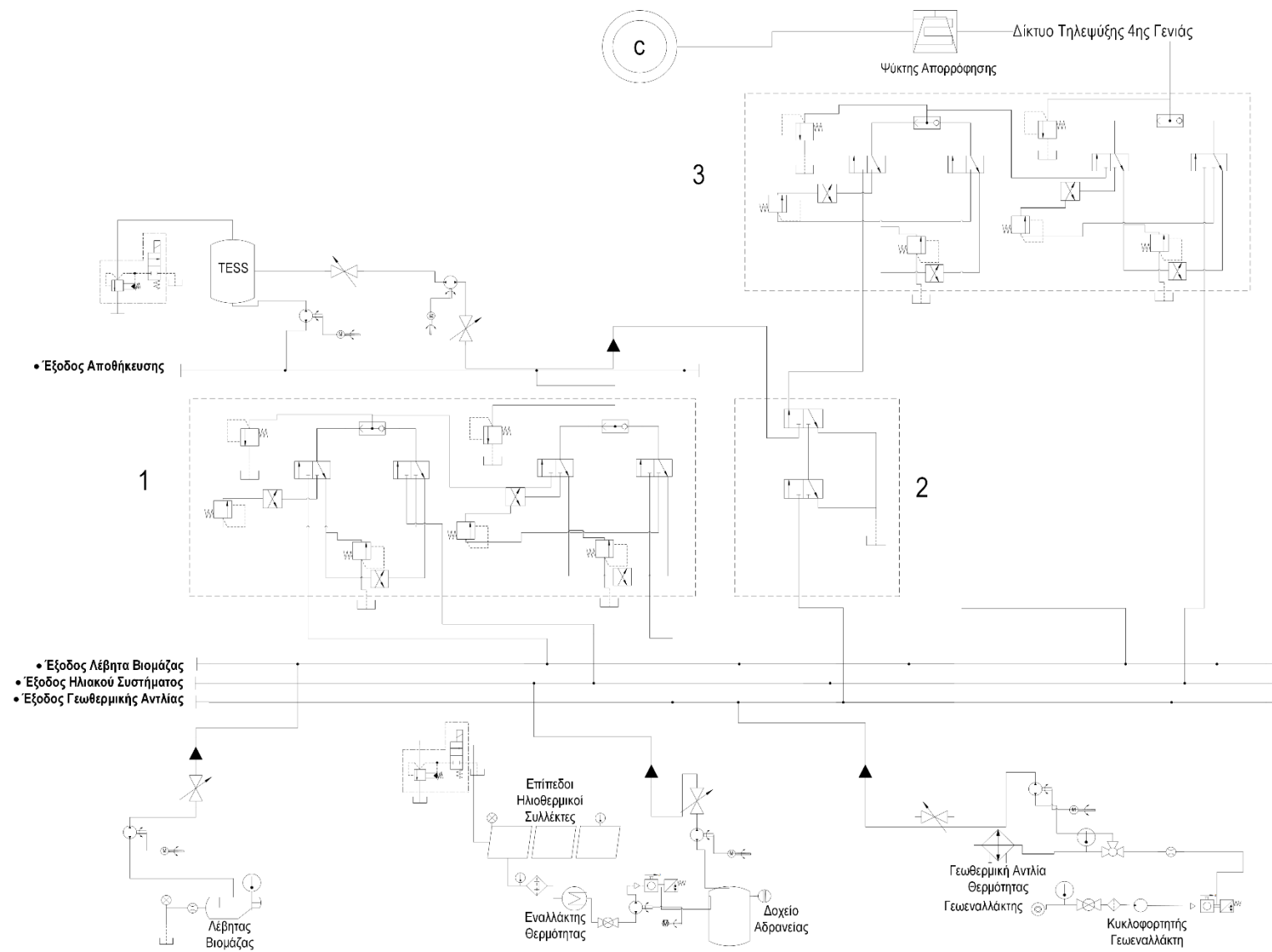
Στην Εικόνα 6. 14, η πύλη 1 απεικονίζει μία τετράοδη βαλβίδα 3 εισόδων 1 εξόδου που λαμβάνει θερμό ρευστό είτε από τον λέβητα βιομάζας, είτε από τους επίπεδους ηλιοθερμικούς συλλέκτες, είτε από τις γεωθερμικές αντλίες για να φορτίσει την αποθήκευση. Η πύλη 2 απεικονίζει έναν συλλέκτη θερμού νερού που τροφοδοτείται από την αποθήκευση και τις γεωθερμικές αντλίες για να φορτιστεί. Η πύλη 3 απεικονίζει μία τετράοδη βαλβίδα 3 εισόδων και 1 εξόδου, που τροφοδοτείται είτε από τον συλλέκτη (πύλη 2) είτε από τους επίπεδους ηλιοθερμικούς συλλέκτες, είτε από τον λέβητα βιομάζας προκειμένου να τροφοδοτήσει τον ψύκτη απορρόφησης με την απαιτούμενη θερμική ενέργεια.

Τα μηχανολογικά-υδραυλικά σχέδια των προαναφερθέντων πυλών, όπως απεικονίζονται στις Εικόνα 6. 13, Εικόνα 6. 14, παρουσιάζονται στις Εικόνα 6. 15, Εικόνα 6. 16. Στα σχέδια αυτά απεικονίζονται και επιμέρους απαραίτητες διατάξεις, όπως ανακουφιστικές βαλβίδες (χρησιμοποιούνται σε υδραυλικά κυκλώματα που κυκλοφορούν θερμό ρευστό κυμαινόμενων θερμοκρασιών και εγκλωβίζουν κατά τόπους αέρα με αποτέλεσμα να παρεμποδίζουν την κανονική ροή του ρευστού —οι βαλβίδες αυτές είτε είναι αυτόματες είτε χειροκίνητες και απελευθερώνουν τον αέρα), αισθητήρια θερμοκρασίας και πίεσης, εναλλάκτες θερμότητας όπου αυτό είναι απαραίτητο, δοχεία αδρανείας/δοχεία αποθήκευσης, κυκλοφορητές, διατάξεις αποστράγγισης και ογκομετρικοί μετρητές. Στην Εικόνα 6. 15 παρουσιάζονται επίσης διαδοχικά οι λογικές πύλες που παρουσιάστηκαν στην αντίστοιχη Εικόνα 6. 13, με την αντίστοιχη υδραυλική τους αποτύπωση. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 6. 16 παρουσιάζονται οι ανάλογες λογικές πύλες όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 6. 14 με την ανάλογη υδραυλική αποτύπωση.

Οι υδραυλικές αυτές διατάξεις αποτελούν και τις τελικές υπερδομές του συστήματος, αφού ενσωματώνουν τον υβριδικό συνδυασμό τεχνολογιών (διαδικασιών παραγωγής και αποθήκευσης) για την κάλυψη των φορτίων θέρμανσης και ψύξης της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης. Αν και ως υπερδομή θεωρείται πλήρης, η μηχανολογική αποτύπωση ολοκληρώνεται με την διαστασιολόγηση των επιλεγμένων τεχνολογιών. Οι επιμέρους τεχνολογίες θα διαστασιολογηθούν στην επόμενη ενότητα.



Εικόνα 6. 15: Ολοκληρωμένη υδραυλική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος κάλυψης αναγκών θέρμανσης της μελέτης περίπτωσης της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.



Εικόνα 6. 16: Ολοκληρωμένη υδραυλική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος κάλυψης αναγκών ψύξης της μελέτης περίπτωσης της δυνητικής ΕΚ των Κιμερών, Ξάνθης.

6.3.4 Διαστασιολόγηση συστήματος κάλυψης αναγκών θέρμανσης και ψύξης

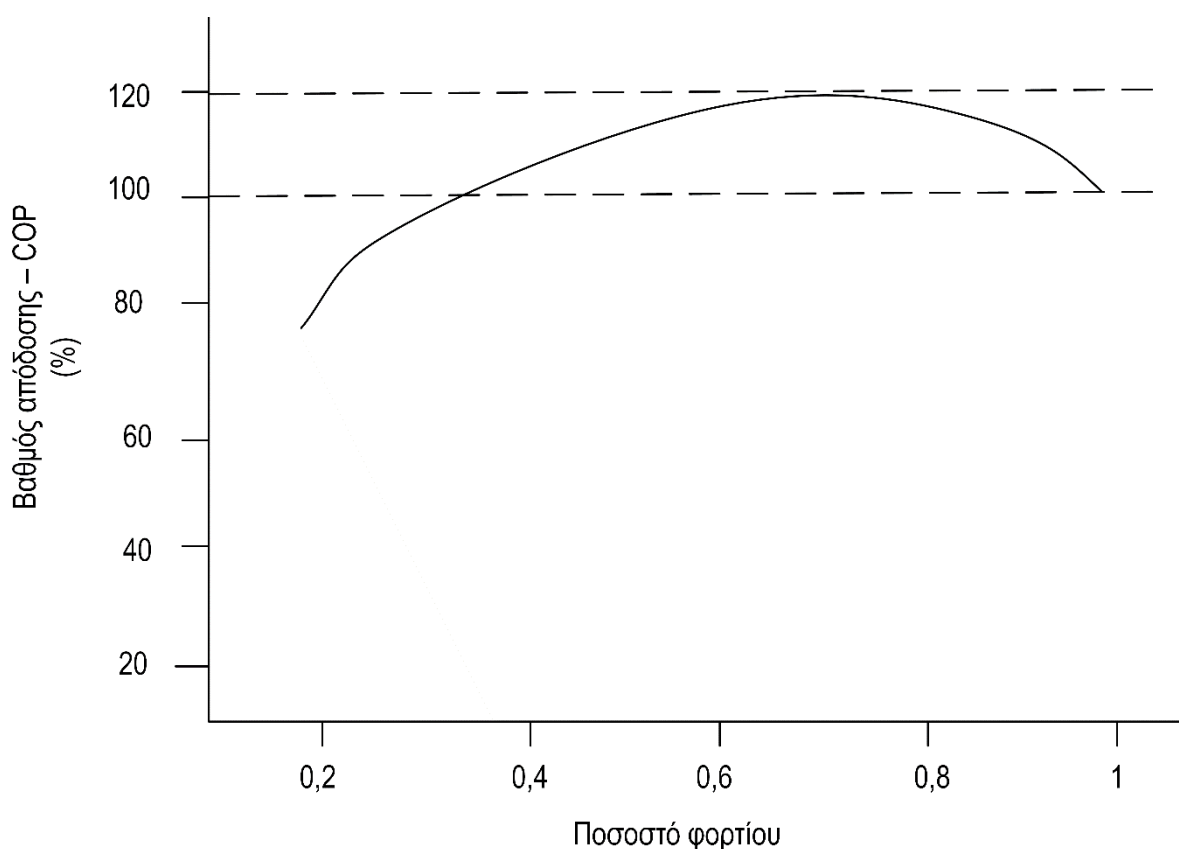
Για τη διαστασιολόγηση του εξοπλισμού λαμβάνεται υπόψη η μεθοδολογία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5 - Ενότητα 5.2.5. Το φορτίο προς εξυπηρέτηση στη μελέτη περίπτωσης είναι φορτίο θέρμανσης (θέρμανση και ZNX) και φορτίο ψύξης. Το φορτίο θέρμανσης είναι $1.209,32 \text{ kW}_{\text{th}}$ ενώ η ετήσια ζήτηση σε θερμική ενέργεια (Εξ. 22 – Κεφάλαιο 5) – $2.142,18 \text{ MWh}_{\text{th}}/\text{y}$. Για το ψυκτικό φορτίο, υπολογίζεται $1.451,2 \text{ kW}_c$ ενώ η συνολική ψυκτική ενέργεια που απαιτείται ετησίως ανέρχεται στα $405,47 \text{ MWh}_c$. Το προτεινόμενο σύστημα θέρμανσης και ψύξης για την δυνητική ΕΚ της μελέτης περίπτωσης πρέπει να μπορεί να καλύψει τη μέγιστη ζήτηση (δυσμενέστερη περίπτωση βάσει TOTEE) ακολουθώντας ορισμένες σχεδιαστικές απαιτήσεις: i) πρέπει να καλύπτει το φορτίο ανά εποχή με το μεγαλύτερο δυνατό μείγμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ii) πρέπει να προσφέρει ενεργειακή ασφάλεια στο σύστημα —να εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο τον υβριδικό χαρακτήρα του συστήματος, iii) να παρέχει οικονομική ενέργεια στο σύστημα. Προκειμένου να διαστασιολογηθεί με ακρίβεια το υπό μελέτη σύστημα, διακρίνονται δύο σενάρια κάλυψης φορτίου, ένα σενάριο θέρμανσης και ένα σενάριο ψύξης.

Στο σενάριο θέρμανσης, το σύστημα πρέπει να καλύψει το μέγιστο φορτίο που είναι $1.209,32 \text{ kW}_{\text{th}}$. Το φορτίο αυτό παρατηρείται κατά τη δυσμενέστερη ημέρα του έτους, τον Ιανουάριο που η εξωτερική θερμοκρασία είναι -9°C και με χαμηλά ποσοστά ηλιακής ακτινοβολίας (παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας τα κέρδη για τα κτίρια είναι σχετικά υψηλά και επομένως οι εσωτερικές συνθήκες δεν είναι οι δυσμενέστερες). Επομένως, το ηλιοθερμικό πεδίο δεν μπορεί να αποδώσει την απαραίτητη θερμική ενέργεια για να καλύψει την ζήτηση, με αποτέλεσμα να μην αποτελεί ασφαλή επιλογή ως κύριος εξοπλισμός για την κάλυψη του φορτίου. Επίσης, η χειρότερη περίπτωση στο σενάριο θέρμανσης προϋποθέτει ότι η αποθήκευση δεν είναι φορτισμένη από προηγούμενη ημέρα και επομένως η ασφαλέστερη επιλογή δεν λαμβάνει υπόψη της την ενδεχόμενη αποθηκευμένη θερμική ενέργεια. Οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας δεν μπορούν να καλύψουν το φορτίο για δύο λόγους, πρώτον τον μήνα Ιανουάριο το γεωθερμικό ρευστό έχει την χαμηλότερη του θερμοκρασία-ενθαλπία (Παράρτημα Ι (Προκαταρκτική μελέτη Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας – ΚΑΠΕ για την περίπτωση των Κιμμερίων, Ξάνθης)) και δεύτερον το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους είναι χαμηλότερο από την επιθυμητή θερμοκρασία κυκλοφορίας στο δίκτυο τηλεθέρμανσης ($> 50^\circ\text{C}$). Έτσι, ο λέβητας βιομάζας θα πρέπει να διαστασιολογηθεί για την κάλυψη του φορτίου θέρμανσης για την περίπτωση που θα το καλύψει εξολοκλήρου, χωρίς την συνεισφορά των υπόλοιπων τεχνολογιών.

Για την διαστασιολόγησή του θα ληφθεί υπόψη συντελεστής ασφαλείας 10% με αποτέλεσμα η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς για τον λέβητα να ανέρχεται σε $1.330,25 \text{ kW}_{\text{th}}$ και βάσει των διαθέσιμων εμπορικών λεβήτων η εγκατεστημένη ισχύς του λέβητα βιομάζας ανέρχεται σε $1,4 \text{ MW}_{\text{th}}$. Προκειμένου να αποφευχθούν όμως σενάρια μερικής λειτουργίας του λέβητα για το υπόλοιπο του έτους (εκτός της δυσμενέστερης περίπτωσης) αλλά και μεγάλης αδράνειας του συστήματός του, η εγκατεστημένη ισχύς των $1,4 \text{ MW}_{\text{th}}$ διαχωρίζεται σε δύο παράλληλους λέβητες (παραδοχή) των $700 \text{ kW}_{\text{th}}$. Η παραλληλία στην διασύνδεσή τους προτιμάται έναντι της εν σειρά σύνδεσης για την αποφυγή της ταυτόχρονης λειτουργίας και των δύο. Το σύστημα ελέγχου του συστήματος κάλυψης του φορτίου θα ελέγχει την ζήτηση θερμικής ενέργειας και ανάλογα θα ενεργοποιεί τον έναν ή και τους δύο λέβητες. Γίνεται σαφές ότι σενάρια διαφορετικών εγκατεστημένων ισχύων παράλληλης σύνδεσης θα μπορούσαν να εξεταστούν, είναι όμως εκτός της σκοπιάς της παρούσας διατριβής.

Στο σενάριο ψύξης, το φορτίο προς κάλυψη είναι $1.451,2 \text{ kW}_c$ που παρατηρείται την θερμότερη καλοκαιρινή ημέρα (Ιούλιο), όπου είναι διαθέσιμη και η αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία. Στο σενάριο αυτό, το ηλιοθερμικό πεδίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως η ασφαλέστερη και οικονομικότερη πηγή ενέργειας για την κάλυψη του απαιτούμενου θερμικού φορτίου για την παραγωγή ψύξης από τον ψυκτή απορρόφησης. Επομένως προκειμένου το

ηλιοθερμικό πεδίο να καλύψει το θερμικό φορτίο του ψύκτη βάσει της Εικόνα 6. 17 πρέπει να του αποδώσει ποσό θερμότητας ίσο με το ποσό ψύξης που θα παραχθεί. Βάσει της Εξ. 16 του Κεφαλαίου 5, ο βαθμός απόδοσης ψύκτη απορρόφησης θερμότητας ορίζεται ως η παραγόμενη ψυκτική ενέργεια προς την παρεχόμενη θερμική. Σε συνθήκες πλήρους φορτίου (όπως είναι η δυσμενέστερη περίπτωση του σεναρίου ψύξης), ο βαθμός απόδοσης του ψύκτη είναι 100%, δηλαδή 1. Ποσοτικά αυτό εκφράζεται ως ίση παραγόμενη ψυκτική ενέργεια σε σχέση με την προσφερόμενη. Επομένως στη δυσμενέστερη κατάσταση φορτίου ψύξης, ο ψύκτης απορρόφησης αποδίδει όση θερμική ενέργεια λαμβάνει από το σύστημα παραγωγής θερμότητας, σε ψυκτική. Έτσι, η προσφερόμενη θερμική στο σενάριο αυτό πρέπει να είναι 1.451,2 kW_{th}. Αν προαυξηθεί αυτή η ισχύς με έναν συντελεστή ασφαλείας της τάξεως του 10%, η τελική απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς των επιπέδων ηλιακών συλλεκτών είναι 1.596,32 kW_{th}, που για λόγους διευκόλυνσης διαχωρισμού του ανάλογου ηλιακού πεδίου σε κλάδους, ανάγεται σε 1,6 MW_{th}.



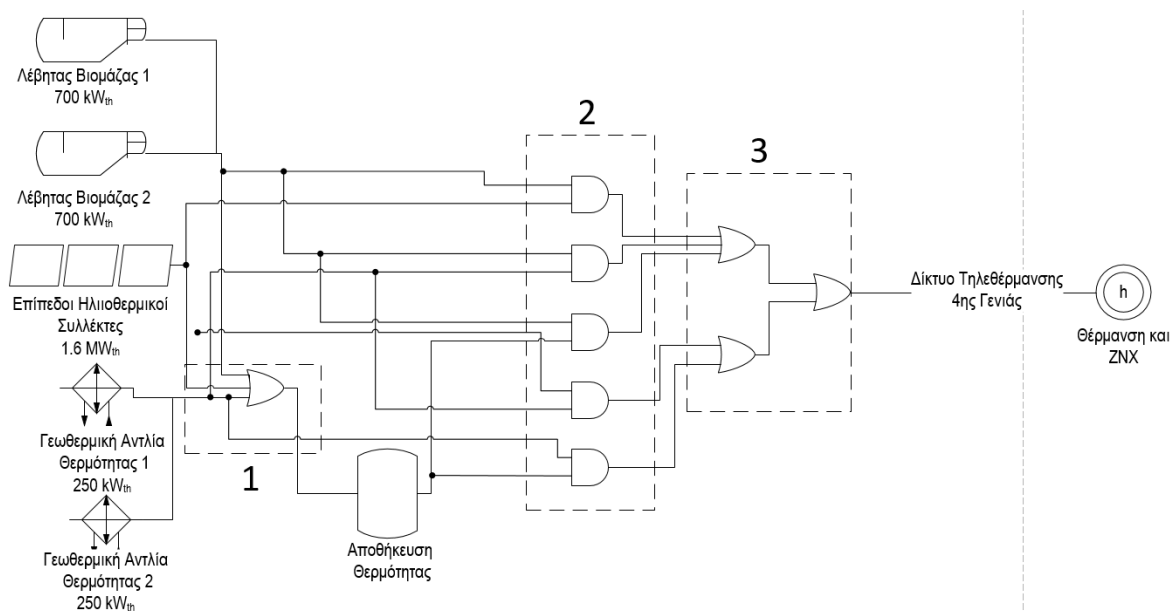
Εικόνα 6. 17: Μεταβολή του βαθμού απόδοσης – COP ψύκτη απορρόφησης θερμότητας υπό διαφορετικά σενάρια φορτίου [47].

Βάσει του Sillman με θέμα την διαστασιολόγηση των αποθηκευτικών συστημάτων νερού ανάλογα με την επιφάνεια συλλεκτών, θα αναχθεί η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς επιπέδων ηλιακών συλλεκτών σε αποθηκευτική ισχύ για το σύστημα [48]. Η αρχή διαστασιολόγησης βάσει του Sillman, ορίζει πως για αποθήκευση θερμότητας με το νερό ως μέσο αποθήκευσης για μονωμένα δοχεία, η απόδοση των συστημάτων αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του όγκου αποθήκευσης. Η γραμμική αυτή αύξηση της απόδοσης έχει ως σημείο καμπής το σημείο όπου η αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος μπορεί να αποθηκεύσει το σύνολο της παραχθείσας θερμικής ενέργειας την ημέρα με το υψηλότερο ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας, την ημέρα δηλαδή που το ηλιοθερμικό πεδίο παράγει την μέγιστη ισχύ του. Επομένως, τα δοχεία στην μελέτη περίπτωσης θα πρέπει να μπορούν

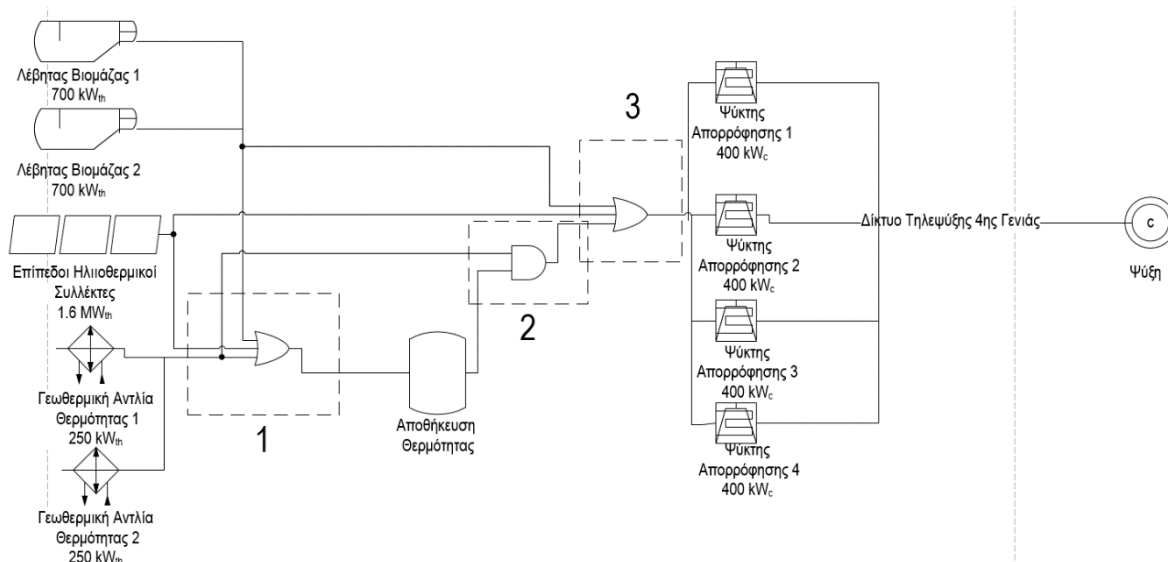
να αποθηκεύσουν $1,6 \text{ MW}_{\text{th}}$. Βάσει του Πίνακα 6. 11, η εγκατεστημένη αυτή ισχύς ανταποκρίνεται σε $69,56 \text{ m}^3$, που ανάγονται σε 70 m^3 .

Για τον ψύκτη απορρόφησης, η εγκατεστημένη του ισχύς καθορίζεται όπως και των ηλιοθερμικών συλλεκτών (με συντελεστή ασφαλείας 10%), στα $1,6 \text{ MW}_{\text{th}}$. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ευελιξία του συστήματος ψύξης και να αποφευχθούν φαινόμενα διαρκούς μερικής λειτουργίας του συστήματος του ψύκτη απορρόφησης, γίνεται παραδοχή παράλληλης εγκατάστασης (παραδοχή) 4 ψυκτών απορρόφησης των $400 \text{ kW}_{\text{th}}$. Σε ότι αφορά τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, ενσωματώνονται στο σύστημα προκειμένου να αποκτήσει ευελιξία ως προς την προέλευση της ενέργειας, και θα λειτουργούν ως εφεδρική μονάδα για το σύστημα. Στηριζόμενοι στο πρότυπο σχεδιασμού θερμικών συστημάτων κτιρίων EN 15450:2007, οι εφεδρικές μονάδες για θερμικά συστήματα δεν πρέπει να ξεπερνούν το 60% της εγκατεστημένης ισχύος των συστημάτων θέρμανσης [49]. Επομένως, αν ληφθεί υπόψη ότι για το σενάριο θέρμανσης το κύριο σύστημα είναι ο λέβητας βιομάζας, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας θα έχουν εγκατεστημένη ισχύ όχι μεγαλύτερη των $0,84 \text{ MW}_{\text{th}}$. Έτσι, για την εγκατεστημένη της ισχύ γίνεται η παραδοχή ότι θα είναι $500 \text{ kW}_{\text{th}}$ (36% της εγκατεστημένης ισχύος του λέβητα βιομάζας). Για λόγους ευελιξίας στην εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος, η προτεινόμενη εγκατεστημένη ισχύς των γεωθερμικών αντλιών θα καταμεμηθεί σε δύο παράλληλες αντλίες των $250 \text{ kW}_{\text{th}}$.

Η τελική απεικόνιση του συστήματος παρουσιάζεται στις Εικόνα 6. 18, Εικόνα 6. 19 για το σενάριο θέρμανσης και για το σενάριο ψύξης αντίστοιχα.



Εικόνα 6. 18: Τελική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος κάλυψης των θερμικών αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.



Εικόνα 6. 19: Τελική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος κάλυψης των θερμικών αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.

Με την τελική διαστασιολόγηση και προτεινόμενη διάταξη για το σύστημα κάλυψης αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης ολοκληρώνεται το 2^ο Επίπεδο σχεδιασμού της HDLM. Στην επόμενη ενότητα θα παρουσιαστεί το 3^ο Επίπεδο με την οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου σεναρίου και την παρουσίαση των δεικτών απόδοσής του.

6.4 Σχεδιασμός ΕΚ με την χρήση της μεθοδολογίας HDLM – 3^ο Επίπεδο

Προκειμένου να αξιολογηθεί η οικονομική βιωσιμότητα του προτεινόμενου συστήματος κάλυψης θερμικών και ψυκτικών αναγκών, είναι δόκιμο να αποτιμηθούν οι σημαντικοί δείκτες οικονομικής απόδοσης του (KPIs), όπως αυτοί αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 5 – Ενότητα 5.3. Οι δείκτες αυτοί είναι το CAPEX, το OPEX (δείκτες χρηματικής ροής και όχι δείκτες απόδοσης του συστήματος), το LCoE, το ROI, το NPV και η περίοδος απόσβεσης ή PP. Στο Επίπεδο αυτό, το σύστημα αποτιμάται ως προς την βιωσιμότητά του και ανάλογα με την απόδοση των σημαντικών δεικτών, μπορεί να κριθεί σκόπιμη η επιστροφή του σχεδιαστή στο 2^ο Επίπεδο για την διαφοροποίηση της διάταξης του συστήματος. Αν για παράδειγμα το LCoE του προτεινόμενου συστήματος προκύψει υψηλότερο μιας προκαθορισμένης τιμής, ο σχεδιαστής πρέπει να επιστρέψει στο 2^ο Επίπεδο και να αναδιαμορφώσει την εγκατεστημένη ισχύ του εξοπλισμού. Συνήθως τα οικονομικά κριτήρια είναι οι κύριοι άξονες αλλαγής των προτεινόμενων σεναρίων, όμως δείκτες όπως οι ετήσιοι εκπεμπόμενοι ρύποι CO₂ και ισοδύναμων αερίων, μπορεί να είναι υψηλότεροι των στόχων της ΕΚ, με αποτέλεσμα και πάλι να πρέπει να αναδιαμορφωθεί το προτεινόμενο σύστημα.

6.4.1 Δείκτες απόδοσης (KPIs) προτεινόμενου συστήματος

Για τον υπολογισμό των δεικτών, είναι απαραίτητος ο αρχικός προσδιορισμός του σταθμισμένου κόστους των επιλεγμένων τεχνολογιών (€/kW). Ο Πίνακας 6. 16 παρουσιάζει το σταθμισμένο κόστος ανά προτεινόμενη τεχνολογία από όπου γίνεται αντιληπτό ότι το σταθμισμένο κόστος των επίπεδων συλλεκτών και των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας ανοικτού τύπου, είναι σημαντικά υψηλότερο από τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Υψηλό

σταθμισμένο κόστος έχει και ο ψύκτης απορρόφησης αλλά ελλείπει συγκρινόμενης τεχνολογίας, δεν μπορεί να αναδιαμορφωθεί το προτεινόμενο σύστημα ως προς αυτόν.

Πίνακας 6. 16: Σταθμισμένο κόστος τεχνολογιών ανά εγκατεστημένη μονάδα ισχύος (kW) [50–52].

Τεχνολογία	Σταθμισμένο Κόστος (€/kW)
Λέβητας Βιομάζας	131,74
Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες	363
Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας (νερού – νερού ανοικτού τύπου)	753,8
Αποθήκευση Θερμότητας (νερό)	60,73
Ψύκτης Απορρόφησης Θερμότητας	353,1

Το κόστος ανά μονάδα ισχύος των τεχνολογιών του Πίνακας 6. 16 αναφέρεται σε τιμές προ της υγειονομικής κρίσης του COVID-19. Επομένως, το CAPEX για το προτεινόμενο σύστημα παρουσιάζεται στον Πίνακα 6. 17.

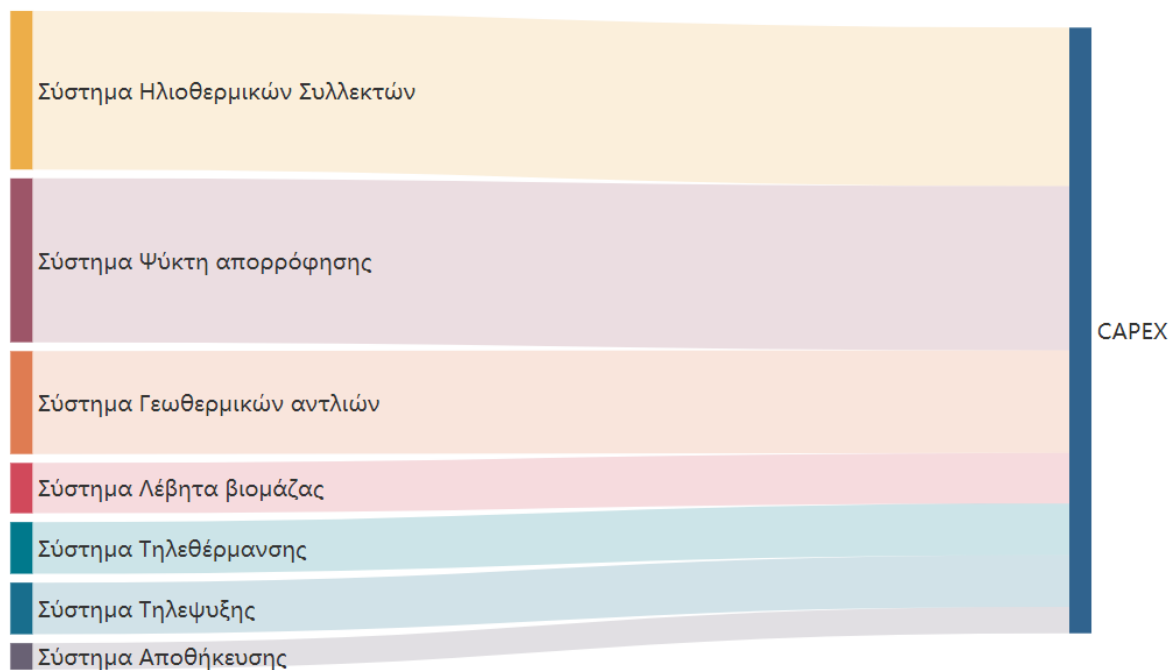
Πίνακας 6. 17: CAPEX προτεινόμενου σεναρίου για την κάλυψη των αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.

Τεχνολογία	Σταθμισμένο Κόστος (€/kW)	Προτεινόμενη Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Κόστος (€)
Λέβητας Βιομάζας	131,74 (2020) [31,32,33]	1,4	184.436
Επίπεδοι Ηλιακοί Συλλέκτες	363 (2021) [31,32,37]	1,6	580.800
Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας (νερού – νερού ανοικτού τύπου)	753,8 (2021) [37]	0,5	376.900
Αποθήκευση Θερμότητας (νερό)	60,73 (2020) [31,32,37]	1,6	97.168
Ψύκτης Απορρόφησης Θερμότητας	353,1 (2022) [33]	1,7	600.270
Σύνολο			1.839.574 €

Στο συνολικό κόστος, προστίθεται ένα 10% επί του συνολικού για τους αναγκαίους βοηθητικούς εξοπλισμούς (αισθητήρες, δοχεία διαστολής, βαλβίδες, ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης, πλαίσια τοποθέτησης). Στο κόστος αυτό πρέπει να προστεθούν και κόστη εγκατάστασης του συστήματος μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας, το κόστος του συστήματος τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης. Στο κόστος αυτό πρέπει να συνυπολογιστεί και το κόστος κατασκευής του συστήματος τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης, το οποίο τυπικά έχει κόστος 145,51 €/m. Στο Παράρτημα II υπολογίζεται το συνολικό απαιτούμενο μήκος δικτύου τηλεθέρμανσης για τη μελέτη περίπτωσης ως 1300 m. Προκειμένου να διατηρηθεί υδραυλική ισορροπία και να περιοριστούν τα σχεδιαστικά σφάλματα που προκαλεί η ενοποίηση του δικτύου τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης, προτείνονται δύο διακριτά συστήματα το κα-

θένα με μήκος 1300 m και συνολικό μήκος σωλήνωσης για την εγκατάσταση 2600 m. Στο μήκος αυτό δεν λαμβάνονται υπόψη οι οδεύσεις από τα μηχανοστάσια των κτιρίων προς τα επιμέρους δωμάτια/κατοικίες. Επομένως το CAPEX του προτεινόμενου συστήματος υπολογίζεται στα 2.217.920 €.

Η Εικόνα 6. 20 παρουσιάζει το διάγραμμα Sankey της ροής του CAPEX, ως μέσο ποιοτικής απεικόνισης του κόστους εγκατάστασης. Παρατηρείται ότι το σημαντικότερο ποσοστό επί του συνολικού CAPEX το καταλαμβάνει ο ψύκτης απορρόφησης και οι επίπεδοι ηλιοθερμικοί συλλέκτες.



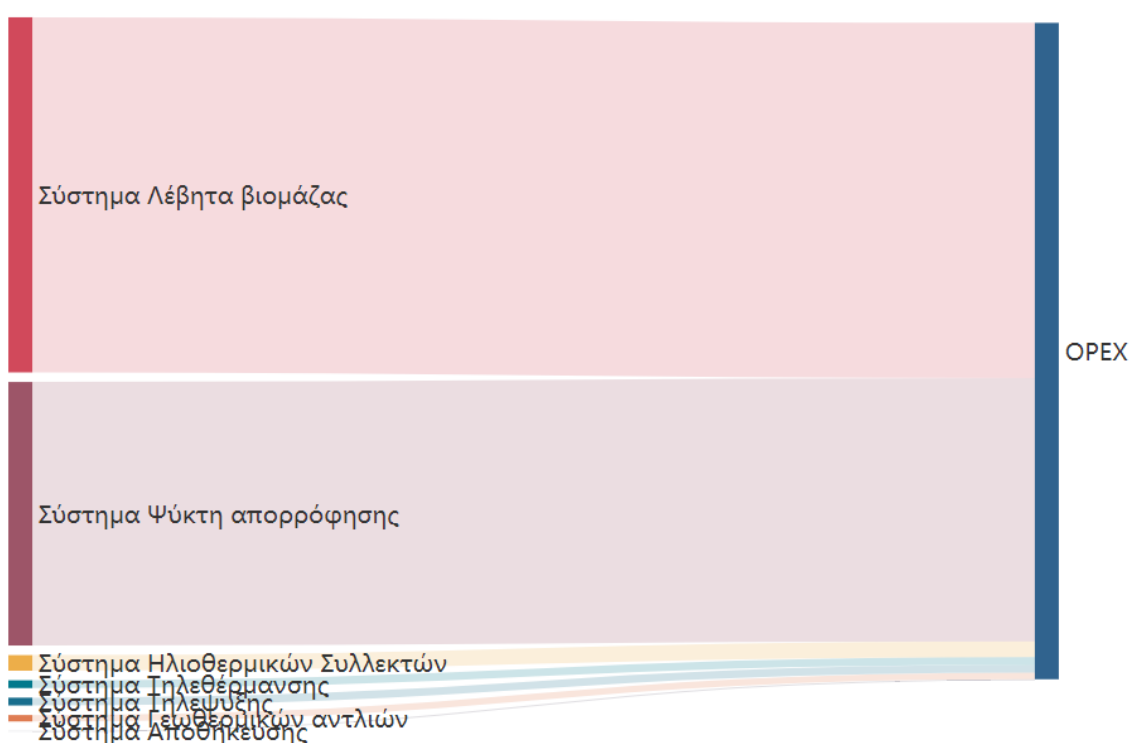
Εικόνα 6. 20: Διάγραμμα Sankey που απεικονίζει ποιο ποσοστό επί του συνολικού, καταλαμβάνει το CAPEX της εκάστοτε τεχνολογίας.

Όσο αναφορά το OPEX, οι σταθμισμένες τιμές λειτουργικών εξόδων ανά επιλεγμένη τεχνολογία παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. 18. Οι τιμές αυτές αναφέρονται στα έξοδα συντήρησης του εξοπλισμού (στην περίπτωση του λέβητα βιομάζας πρέπει να συμπεριληφθούν και σταθμισμένες τιμές καυσίμου που καταναλώνεται ετησίως).

Πίνακας 6. 18: Ανάλυση σταθμισμένου κόστους λειτουργικών εξόδων ανά επιλεγμένη τεχνολογία για την κάλυψη των αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης [52–56].

Τεχνολογία	€/kW/έτος	Συνολικό κόστος (€/έτος)
Λέβητας Βιομάζας	9,5 (2020) [31]	13.300
Γεωθερμική αντλία θερμότητας	4,3 (2021) [33]	2.150
Επίπεδοι ηλιοθερμικοί συλλέκτες	3,26 (2021) [32]	5.216
Δοχεία αποθήκευσης	0,03 (2022) [37]	42
Ψύκτης Απορρόφησης	55 (2022) [33]	88.000
Δίκτυο τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης	2 (2022) [37]	5.200
Σύνολο		113.866 €

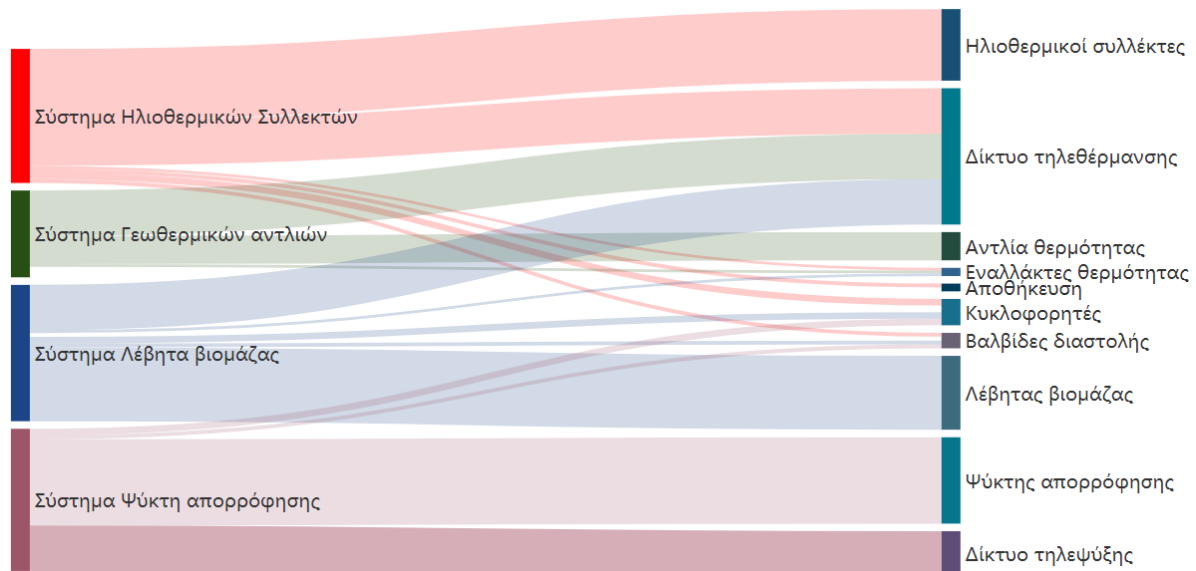
Για τον λέβητα βιομάζας, το μέσο κόστος συντήρησης ετησίως δίνεται στον Πίνακα 6. 18. Ο υπολογισμός της κατανάλωσης καυσίμου για τον λέβητα, αν υποθεθεί ότι το σταθμισμένο κόστος ανά κιλό πέλλετ είναι 0,65 €/kg (τιμή Δεκεμβρίου 2022), για ετήσια παραγωγή 786,02 MWh (που είναι και η υπολογισμένη αποδιδόμενη ενέργεια από την υβριδική λειτουργία του λέβητα ετησίως - Παράρτημα III) και ωριαία κατανάλωση πέλλετ από τον καυστήρα 150 kg/h, το ετήσιο κόστος κατανάλωσης καυσίμου του λέβητα ανέρχεται σε 105.300 €/έτος. Το κόστος αυτό αυξάνει κατά ίση μονάδα το συνολικό OPEX του Πίνακα 6. 18, που ανέρχεται στα 219.166 €/έτος. Αν το OPEX προσεγγιζόταν όπως στα συμβατικά συστήματα (2% του CAPEX, κλάσμα που αφορά μόνο τα έξοδα για συντήρηση του εξοπλισμού) τότε το τελικό OPEX θα διαμορφωνόταν στις 36.791,48 €/έτος, που απέχει σημαντικά από το πραγματικό, όπως υπολογίζεται από την προσέγγιση αυτή. Σημαντική σημείωση στον υπολογισμό που προηγήθηκε είναι η μεταβλητότητα της μοναδιαίας τιμής καυσίμου για τον λέβητα, που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την τελική διαμόρφωση του OPEX του συστήματος.



Εικόνα 6. 21: Διάγραμμα Sankey που απεικονίζει ποιο ποσοστό επί του συνολικού, καταλαμβάνει το OPEX της εκάστοτε τεχνολογίας.

Πριν ολοκληρωθεί η παρουσίαση της χρηματικής ροής του OPEX, είναι δόκιμο να αναφερθεί ότι τα συστήματα παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής ενέργειας, εκτός του ισοζυγίου ενέργειας που πρέπει να διατηρούν, πρέπει κατά τον σχεδιασμό και λειτουργία τους να διατηρούν και τα επίπεδα καταστροφής εξέργειας (exergy destruction) ή απώλειας εξέργειας σε χαμηλά επίπεδα. Η εξέργεια, αποτελώντας το μέτρο της δυνητικής ενέργειας, υποδεικνύει τα σημεία του συστήματος που δεν λειτουργούν βέλτιστα (καταστρέφουν εξέργεια —δεν μετατρέπουν όλη τη διαθέσιμη ενέργεια σε ωφέλιμη) [57–59]. Επομένως, η απώλεια εξέργειας αποτελεί σημαντικό δείκτη απώλειας χρηματοροής στην διαδικασία τέτοιων συστημάτων και είναι δόκιμο να αναφερθεί. Η Εικόνα 6. 22 παρουσιάζει την ποιοτική απεικόνιση ολικής απώλειας εξέργειας στο προτεινόμενο σύστημα, με επιμερισμό στον επιμέρους εξοπλισμό (τυπική απώλεια εξέργειας ανά εξοπλισμό βάσει βιβλιογραφίας) [57-59]. Το ανάλογο ενεργειακό

ισοζύγιο δίνεται στο Παράρτημα III, με σκοπό την αξιολόγηση της ροής ενέργειας από το πρωτογενές δυναμικό στην τελική ωφέλιμη θερμική ενέργεια.

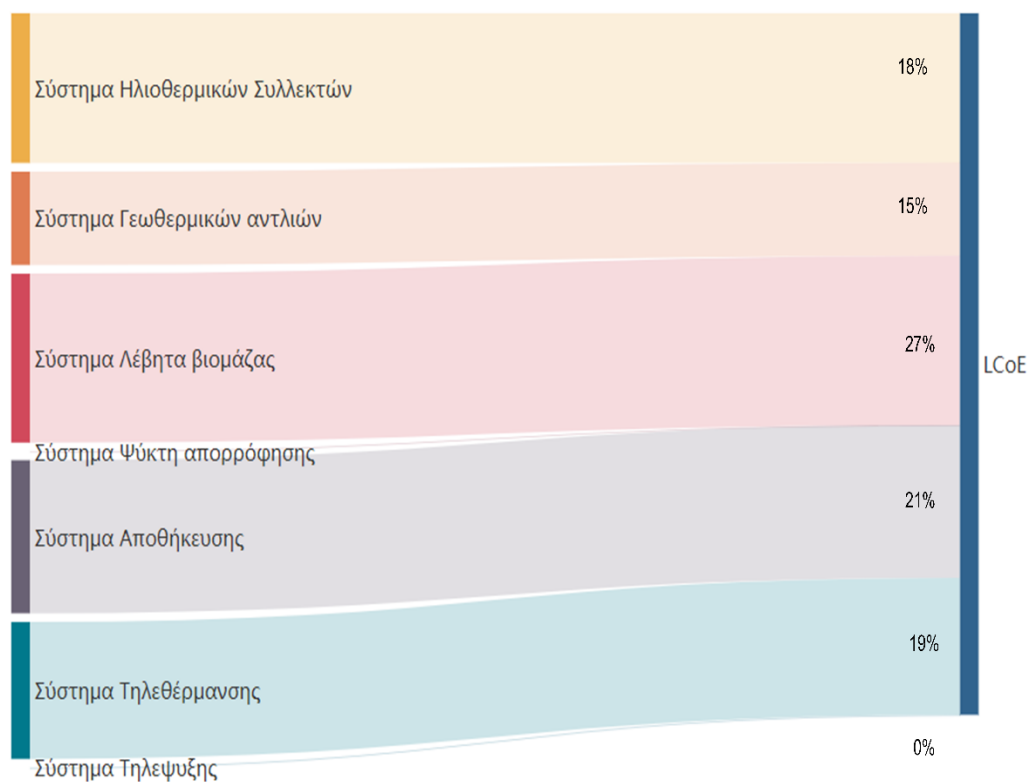


Εικόνα 6. 22: Διάγραμμα Sankey για ολική απώλεια εξέργειας στο προτεινόμενο σύστημα κάλυψης αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.

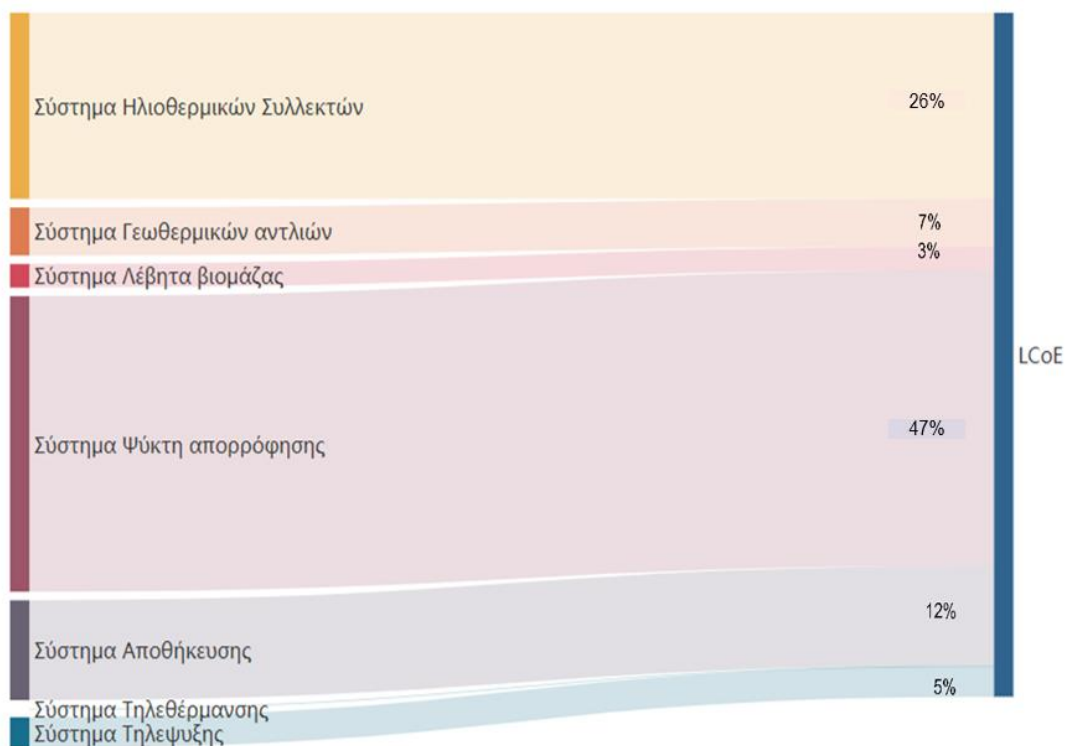
Παρατηρείται ότι οι σημαντικότερες τεχνολογίες καταστροφής εξέργειας είναι το δίκτυο τηλεθέρμανσης, ο λέβητας βιομάζας και ο ψύκτης απορρόφησης. Το συμπέρασμα της παρούσας ποιοτικής απεικόνισης της καταστροφής εξέργειας καταδεικνύει τα σημεία αυτά ως σημεία που χρήζουν βελτιστοποίησης κατά τη λειτουργία τους, προκειμένου το συνολικό σύστημα να αυξήσει το βαθμό απόδοσής του.

Συνεχίζοντας την οικονομική ανάλυση του προτεινόμενου συστήματος, το LCoE θέρμανσης και ψύξης αποτελεί και τον σημαντικότερο δείκτη απόδοσης του προτεινόμενου συστήματος. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η Εξ. 28 του Κεφαλαίου 5. Στο σημείο αυτό πρέπει να συμπεριληφθεί πιθανή μέθοδος χρηματοδότησης του προτεινόμενου σεναρίου. Η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων, όπως το προτεινόμενο από την HDLM, συνήθως αποτελεί συγχρηματοδοτούμενη δράση περιφερειών, κρατών ή και ευρωπαϊκών δράσεων [60]. Οι χρηματοδοτήσεις αποτελούν κίνητρα της κεντρικής ευρωπαϊκής επιτροπής για την ενεργειακή μετάβαση του κτιριακού τομέα και την ενδυνάμωση των καταναλωτών με τη διαχείριση της ενέργειάς τους. Τα ποσοστά χρηματοδότησης για ανανεώσιμα συστήματα (ή συστήματα χαμηλότερου ανθρακικού αποτυπώματος σε σχέση με τα συμβατικά) ξεπερνούν το 85% του κόστους επένδυσης.

Αν ληφθεί υπόψιν 85% χρηματοδότηση, η ελάχιστη δυνατή για επενδύσεις συστημάτων όπως το προτεινόμενο, τότε τα ίδια κεφάλαια από την κοινότητα ανέρχονται σε 332.688 €, ενώ τα λειτουργικά κόστη παραμένουν αμετάβλητα στα 219.166 €. Η μέση παραγωγή θερμικής ενέργειας ετησίως από το σύστημα ανέρχεται στις 2.484,92 MWh_{th}/έτος, ενώ η μέση ψυκτική στις 470,34 MWh_{th}/έτος. Αν τα έτη ωφέλιμης λειτουργίας του συστήματος είναι 25 και ο ρυθμός απόσβεσης του συστήματος είναι 2%, τότε το LCoE για τη θέρμανση διαμορφώνεται στα 0,22 €/kWh_{th} ενώ το LCoE ψύξης διαμορφώνεται στα 1,17 €/kWh_c. Οι Εικόνα 6. 23 και Εικόνα 6. 24 παρουσιάζουν τον επιμερισμό του σταθμισμένου κόστους ενέργειας ανά εξοπλισμό, σε διάγραμμα Sankey.



Εικόνα 6. 23: Διάγραμμα Sankey που απεικονίζει ποιο ποσοστό επί του συνολικού, καταλαμβάνει το LCoE θέρμανσης, της εκάστοτε τεχνολογίας.



Εικόνα 6. 24: Διάγραμμα Sankey που απεικονίζει ποιο ποσοστό επί του συνολικού, καταλαμβάνει το LCoE ψύξης, της εκάστοτε τεχνολογίας.

Είναι σαφές ότι κατά τη λειτουργία θέρμανσης (χειμερινό σενάριο) ο ψύκτης απορρόφησης και το δίκτυο τηλεψύξης δεν συμμετέχουν στον επιμερισμό του κόστους, αφού βρίσκονται εκτός λειτουργίας. Στην αντίθετη περίπτωση, κατά τη λειτουργία ψύξης (θερινό σενάριο), το μόνο σύστημα που δεν συνεισφέρει στο σταθμισμένο κόστος ενέργειας είναι το σύστημα τηλεθέρμανσης, αφού βρίσκεται εκτός λειτουργίας κατά την περίοδο αυτή.

Για τον ρυθμό απόσβεσης της επένδυσης, αρκεί η παραδοχή ότι η δυνητική ΕΚ πωλεί την παραγόμενη θερμική και ψυκτική της ενέργεια στην τιμή του σταθμισμένου κόστους της (LCoE). Σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 6.22, το συνολικό δυνητικό κέρδος από την πώληση της παραγόμενης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας για την ΕΚ είναι 1.069.025 €/έτος. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό είναι το οριακό κέρδος της ΕΚ καθώς (LCoE) οποιαδήποτε τιμή μεγαλύτερη του σταθμισμένου κόστους, θα είχε σημαντική επίδραση στην αύξηση των ετήσιων δυνητικών κερδών της ΕΚ. Η προσέγγιση αυτή πραγματοποιείται μόνο για τον προσδιορισμό του ρυθμού απόσβεσης (ROI – Κεφάλαιο 5, Ενότητα 5.3.5), ενώ μια ακόμα μέθοδος θα ήταν ο υπολογισμός της διαφοράς μεταξύ του κόστους συμβατικού συστήματος με την ίδια ετήσια παραγωγή ενέργειας, και του προτεινόμενου από την HDLM, ως ετήσια χρηματορροή για την επένδυση, όπως υπολογίζεται στη συνέχεια.

Στην πρώτη προσέγγιση, το ROI υπολογίζεται στο 41% (Κεφάλαιο 5, Εξ. 29). Στην δεύτερη περίπτωση, με την τυπική μέθοδο διαστασιολόγησης συμβατικών συστημάτων που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 – Ενότητα 5.2.5 (Διαστασιολόγηση εξοπλισμού), βάσει TOTEE και για θερμικό φορτίο 1.209,32 kW_{th} (με συντελεστή ασφαλείας 10% -1330,25 kW_{th}) - Πίνακας 6. 22, ο ανάλογος λέβητας (ή λέβητες) φυσικού αερίου που θα κάλυπτε το φορτίο θα έπρεπε να έχει εγκατεστημένη ισχύ όση και ο λέβητας βιομάζας, δηλαδή 1,4 MW_{th}. Το τυπικό κόστος αγοράς του είναι 10.000 € (τιμές λεβήτων φυσικού αερίου για το Δεκέμβριο 2022) [61]. Για το σύστημα ψύξης, το φορτίο προς κάλυψη είναι 1.451,2 kW_c (με συντελεστή ασφαλείας 10% - 1596,32 kW_c). Η αναλογία σε ψυκτικούς τόνους είναι 453,5 ΨΤ και το τυπικό κόστος τους ανέρχεται στις 105.000 € (ηλεκτρικός ψύκτης με κοχλιωτό συμπιεστή).

Πίνακας 6. 19: Κόστος εγκατάστασης συμβατικού συστήματος κάλυψης των ανάλογων αναγκών για την δυνητική ΕΚ των Κιμμερίων Ξάνθης.

Τεχνολογία	MW	Κόστος (€)
Λέβητας φυσικού αερίου	1,4	10.000
Κεντρική κλιματιστική μονάδα	1,6	105.000
Δίκτυο τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης		367.926
Σύνολο		482.926 €

Πίνακας 6. 20: Λειτουργικά κόστη συμβατικού συστήματος κάλυψης των ανάλογων αναγκών για την δυνητική ΕΚ των Κιμμερίων Ξάνθης.

Τεχνολογία	Κόστος καυσίμου/ενέργειας (€/kWh – δεδομένα Δεκεμβρίου 2022 [61])	Συνολικό ετήσιο κόστος (€) (συμπεριλαμβανομένων εξόδων συντήρησης)
Λέβητας φυσικού αερίου	0,14	345.065
Κεντρική κλιματιστική μονάδα (EER = 2,5)	0,12	22.576
Δίκτυο τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης		5.200
Σύνολο		380.297 €

Επομένως το ROI σ' αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται συμπεριλαμβανομένης της διαφοράς του ετήσιου λειτουργικού κόστους του προτεινόμενου και του συμβατικού συστήματος (Net Revenue) και προκύπτει 85,51% . Η περίπτωση αυτή του ROI είναι σαφώς υψηλότερη και αποτελεί ένδειξη της βιωσιμότητας του προτεινόμενου σεναρίου έναντι του συμβατικού εξαιτίας της σημαντικής διαφοράς των λειτουργικών εξόδων του συμβατικού. Η προστιθέμενη αξία του προτεινόμενου συστήματος στην προκειμένη, εξασφαλίζει σταθερότερες χρηματοροές ετησίως καθώς δεν ενσωματώνει ευμετάβλητα κόστη καυσίμων σε σημαντικά ποσοστά (σε αντίθεση με το συμβατικό σύστημα).

Πίνακας 6. 21: Χρηματοροή προτεινόμενου και συμβατικού συστήματος για τα 10 πρώτα χρόνια λειτουργίας.

Έτος	Χρηματοροή προτεινόμενου συστήματος (€)	Χρηματοροή συμβατικού συστήματος (€)
1 ^ο Έτος Λειτουργίας (<i>αρχική δαπάνη</i>)	-2.217.920,00	-482.926,00
2 ^ο Έτος Λειτουργίας	-1.784.127,92	-469.502,42
3 ^ο Έτος Λειτουργίας	-1.350.335,84	-456.078,84
4 ^ο Έτος Λειτουργίας	-916.543,76	-442.655,26
5 ^ο Έτος Λειτουργίας	-482.751,68	-429.231,68
6 ^ο Έτος Λειτουργίας	-48.959,60	-415.808,10
7 ^ο Έτος Λειτουργίας	384.832,48	-402.384,52
8 ^ο Έτος Λειτουργίας	818.624,56	-388.960,94
9 ^ο Έτος Λειτουργίας	1.252.416,64	-375.537,36
10 ^ο Έτος Λειτουργίας	1.686.208,72	-362.113,78

Βάσει του Πίνακας 6. 21 υπολογίζεται και το NPV (Κεφάλαιο 5, Εξ. 30) για το συμβατικό και για το προτεινόμενο σύστημα. Το NPV του προτεινόμενου συστήματος στα 10 έτη λειτουργίας είναι 347.967 € ενώ για το συμβατικό σύστημα είναι -1.408.399,63 €. Η χρήση του NPV σε χρηματοοικονομική αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων γίνεται για την εξακρίβωση της βιωσιμότερης, μακροπρόθεσμα, επένδυσης. Στην προκειμένη η σύγκριση είναι μεταξύ μιας θετικής και μιας αρνητικής NPV που υποδεικνύουν τη βιωσιμότητα της επένδυσης του προτεινόμενου συστήματος έναντι του συμβατικού, παρά τη σημαντική διαφορά του αρχικού κόστους επένδυσης. Με τα στοιχεία αυτά και με τη χρήση της Εξ. 31 (Κεφάλαιο 5), υπολογίζεται και ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης (PP), που για το προτεινόμενο σύστημα είναι τα 6 έτη. Κατά τον 7^ο χρόνο έχει φτάσει η επένδυση το νεκρό σημείο και παράγει πλέον θετικές χρηματοροές για την δυνητική ΕΚ. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης, μαζί με σημαντικούς δείκτες όπως οι συνολική εκπομπή CO₂ για το σύστημα και η εδαφοκάλυψη παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. 22.

Πίνακας 6. 22: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων προτεινόμενης μεθόδου HDLM στα τρία επίπεδα σχεδιασμού.

Μεταβλητές HDLM	Αποτέλεσμα
Μέγιστο θερμικό φορτίο (μέθοδος βαθμομερών)	1.209,32 kW _{th}
Μέγιστο ψυκτικό φορτίο (μέθοδος βαθμομερών)	1.451,2 kW _c
Συνολική ζήτηση θερμικής ενέργειας ετησίως (KIM)	2070 MWh _{th} /έτος
Συνολική ζήτηση ψυκτικής ενέργειας ετησίως (μέθοδος βαθμομερών)	405,47 MWh _c /έτος
Συνολική εκτιμώμενη παραχθείσα θερμική ενέργεια για το σύστημα (Παράρτημα III)	2.464,75 MWh _{th} /έτος
Συνολική εκτιμώμενη παραχθείσα ψυκτική ενέργεια για το σύστημα	470,34 MWh _c /έτος
Χρηματοδότηση	85%
CAPEX	2.217.920 € (Εξ. 25 – Κεφ.5)
OPEX	219.166 €/έτος (Εξ. 27 – Κεφ.5)
LCoE θέρμανσης	0,22 €/kWh _{th} (Εξ. 28 – Κεφ.5)
LCoE ψύξης	1,17 €/kWh _c (Εξ. 28 – Κεφ.5)
ROI	85,51% (Εξ. 29 – Κεφ.5)
NPV	-886.185,47 € (Εξ. 30 – Κεφ.5)
PP	6 έτη (Εξ. 31 – Κεφ.5)
CO ₂ _{equiv.}	244.000 τόνοι CO ₂ (ετησίως – συνδυασμένο για όλους τους εξοπλισμούς [19-21])
Συνολική εδαφοκάλυψη επιλεγμένων τεχνολογιών (στοιχεία Πίνακας 6. 10)	149.087,5 m ²
Συντελεστής Ισχύος (στοιχεία Πίνακας 6. 10)	2,9

Σύνοψη

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου HDLM για τον σχεδιασμό μίας δυνητικής ΕΚ στα Κιμμέρια, Ξάνθης. Η μελέτη περίπτωσης που παρουσιάστηκε εξετάστηκε και στα τρία επίπεδα σχεδιασμού της μεθόδου όπου στο 1^ο, όπου πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός των ενεργειακών αναγκών των δυνητικών παραγωγαναλωτών με τον καταμερισμό τους σε διακριτές ομάδες ανάλογα με την ενεργειακή τους ένταση. Στο 2^ο παρουσιάστηκε η αποδελτίωση του πρωτογενούς δυναμικού και αναλύθηκε τόσο η επιλογή όσο και η τελική υδραυλική/μηχανολογική διάταξη των επιλεγμένων τεχνολογιών για την εξυπηρέτηση των φορτίων που υπολογίστηκαν στο 1^ο Επίπεδο. Στο 3^ο και τελευταίο επίπεδο εκπονήθηκε η ανάλογη οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου σεναρίου, όπου υπολογίστηκαν οι δείκτες απόδοσης, συμπεριλαμβανομένου του σταθμισμένου κόστους ενέργειας του προτεινόμενου συστήματος (LCoE), του χρόνου αποπληρωμής (PP) και της καθαρής παρούσας αξίας της επένδυσης (NPV).

Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου μπορούν να επιμεριστούν ξεχωριστά στα τρία επίπεδα σχεδιασμού καθώς συνεισφέρουν τόσο εξατομικευμένα, όσο και συνολικά στον τομέα της διαστασιολόγησης συ-

στημάτων κάλυψης αναγκών. Τα αποτελέσματα του 1^{ου} Επίπεδου, αρχικά, προσφέρουν μια υβριδική άποψη υφιστάμενων μεθόδων προσδιορισμού της ενεργειακής έντασης παραγωγαναλωτών. Κατά την υβριδοποίηση των μεθόδων στο 1^ο Επίπεδο, διαπιστώθηκε ότι η αρχική εκτίμηση της ποιοτικής μεθόδου (RenewIslands) διαφοροποιείται κατά τον συνδυασμό με την ποσοτική μέθοδο KIM. Η διαφοροποίηση αυτή προκύπτει αφενός λόγω της διαφορετικής προσέγγισης της ποιοτικής μεθόδου RenewIslands και αφετέρου λόγω της εγγενούς απροσδιοριστίας που μπορεί να ενέχει η χρήση της για τον προσδιορισμό και την κατηγοριοποίηση χρηστών ως προς την ενεργειακή τους ένταση. Το πρώτο επίπεδο διαφοροποιεί την απάντηση στην εφαρμογή της μελέτης περίπτωσης από «Υψηλή» βαθμίδα σε «Μέτρια». Η σημασία του αποτελέσματος αυτού διαφοροποιεί σημαντικά και την προσέγγιση κατά τον σχεδιασμό, που ακολουθεί στο επόμενο επίπεδο (2^ο Επίπεδο).

Κατά τον σχεδιασμό στο 2^ο Επίπεδο στόχος ήταν η κάλυψη του φορτίου που υπολογίστηκε στο 1^ο Επίπεδο με οικονομικά βιώσιμο και τεχνολογικά εφικτό τρόπο. Η επίτευξη αυτών των στόχων εν μέρει καλύπτεται στο επίπεδο αυτό καθώς η διάταξη του προτεινόμενου συστήματος για την δυνητική ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης πληροί τους βασικούς σχεδιαστικούς στόχους. Οι στόχοι αυτοί είναι η αξιοποίηση του πρωτογενούς δυναμικού, η επιλογή τεχνολογιών σε ώριμο εμπορικό στάδιο, ο σχεδιασμός υβριδικής διάταξης για το συνδυασμό τους προς κάλυψη των αναγκών, η διασφάλιση υψηλού ποσοστού διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα και η διατήρηση του συντελεστή ισχύος σε χαμηλά επίπεδα. Αρχικά, προκειμένου να αξιοποιηθεί το πρωτογενές δυναμικό εφαρμόστηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση του ελληνικού δυναμικού της περιοχής των Κιμμερίων, Ξάνθης όπου ορίστηκαν και τα όρια (Χαμηλά, Μέτρια, Υψηλά) επάρκειας πρωτογενών πόρων. Αν η κλίμακα της πρωτογενούς πηγής για τη περιοχή ξεπερνούσε το επίπεδο «Μέτριο», τότε η πρωτογενής πηγή θεωρούνταν επαρκής προς αξιοποίηση, καλύπτοντας έτσι τον στόχο αξιοποίησης του πρωτογενούς δυναμικού της περιοχής. Στη μελέτη περίπτωσης το ηλιακό, το γεωθερμικό και το δυναμικό βιομάζας κρίθηκαν ως επαρκή προς αξιοποίηση.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε αναλυτική ιεραρχική μέθοδος (AHP) για την επιλογή των καταλληλότερων τεχνολογιών για τη περιοχή, όπου αναλύθηκαν κριτήρια όπως η τεχνολογική ωριμότητα, το σταθμισμένο κόστος ενέργειας, η εδαφοκάλυψη, ο συντελεστής ισχύος, η διαθεσιμότητα πρωτογενούς δυναμικού, η αξιοπιστία της τεχνολογίας και οι εκπομπές ρύπων στον κύκλο ζωής της τεχνολογίας. Η AHP κατέδειξε την τεχνολογική ωριμότητα και το σταθμισμένο κόστος ενέργειας ως τα σημαντικότερα κριτήρια κατά την επιλογή τεχνολογιών κάλυψης αναγκών και βάσει αυτών επιλέχθηκαν ως κύριες τεχνολογίες παραγωγής ο λέβητας βιομάζας, οι επίπεδοι ηλιοθερμικοί συλλέκτες και οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας ανοικτού τύπου. Ως τεχνολογία παραγωγής ψύξης ορίστηκε καταλληλότερη η επιλογή ψύκτη απορρόφησης θερμότητας ενώ ως τεχνολογία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας επιλέχθηκε το νερό (αποθήκευση αισθητής θερμότητας). Καλύπτεται έτσι η επιλογή ώριμων τεχνολογιών για την κάλυψη των αναγκών της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης. Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή των πινάκων αληθείας και σχεδιάστηκε ο ανάλογος χάρτης Karnough, που αποτελούν το βήμα σχεδιασμού του υβριδικού σεναρίου, βάσει των επιλογών του σχεδιαστή. Η επέκταση του χάρτη Karnough απεικονίζεται ως ενιαίος γράφος διαδικασίας (P-graph) που με την αντιστοίχιση με υδραυλικά ανάλογα διαμορφώνει τη διάταξη της υβριδικής αποτύπωσης του προτεινόμενου συστήματος, συνδυάζοντας τις τεχνολογίες που επιλέχθηκαν.

Η αναλυτική αυτή αποτύπωση της διασύνδεσης του εξοπλισμού ολοκληρώνεται με την διαστασιολόγηση τους για να καλύψουν τα θερμικά και ψυκτικά φορτία της δυνητικής ΕΚ. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε στηρίζεται εν μέρει στην TOTEE και συμπεριλαμβάνει ζητήματα μέγιστης διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών, όπου είναι δυνατό, καθώς λαμβάνει υπόψη ζητήματα ενεργειακής ασφάλειας και βιώσιμης παροχής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποδελτίωση του πρωτογενούς δυναμικού για την περιοχή (χαμηλή διαθεσιμότητα ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη χειμερινή περίοδο, χαμηλή ενθαλπία γεωθερμικού πεδίου), όπου κρίνεται ως κεντρικός άξονας κάλυψης των αναγκών, η χρήση βιομάζας για την εξασφάλιση της ενδοκοινοτικής παραγωγής ενέργειας. Αποκλείονται

έτσι σενάρια ανεπαρκούς κάλυψης κατά τους χειμερινούς μήνες, ενδυναμώνοντας ενεργειακά την κοινότητα και προσφέροντας ενέργεια βιώσιμου κόστους. Αντίθετα, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες που η ηλιακή ακτινοβολία και η ενθαλπία του γεωθερμικού πεδίου είναι επαρκής, η κάλυψη των φορτίων ψύξης πραγματοποιείται εξολοκλήρου από τις πηγές αυτές, με τον λέβητα βιομάζας να λειτουργεί μόνον ως εφεδρικό σύστημα. Καλύπτεται έτσι βιώσιμα το θερινό σενάριο χωρίς την ανάγκη εξάρτησης από συμβατικές κλιματιστικές μονάδες. Με την ολοκλήρωση της διαστασιολόγησης και των τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν είναι δυνατή και η οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου σεναρίου.

Στο 3^ο και τελευταίο Επίπεδο χρησιμοποιούνται οι διαθέσιμες σταθμισμένες τιμές των τεχνολογιών που επιλέχθηκαν προκειμένου να προσδιοριστεί η οικονομική βιωσιμότητα του σεναρίου. Εξαιτίας της σημασίας που έχουν για τα εθνικά και πανευρωπαϊκά σχέδια μετάβασης του κτιριακού τομέα προς βιώσιμα οικιστικά περιβάλλοντα, θεωρήθηκε χρηματοδότηση του προτεινόμενου σεναρίου σε ποσοστό 85% του συνολικού. Επομένως, οι αντίστοιχοι οικονομικοί δείκτες για το προτεινόμενο σύστημα είναι το σταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCoE), ο ρυθμός απόσβεσης της επένδυσης (ROI), η καθαρή παρούσα αξία μετά από 10 έτη (NPV) και η περίοδος αποπληρωμής ή απόσβεσης (PP). Σε ότι αφορά το LCoE, είναι 0,22 €/kWh_{th} για τη θέρμανση και 1,17 €/kWh_e για την ψύξη (έναντι 0,14 και 0,12 €/kWh από το συμβατικό σύστημα). Η διαφορά στο κόστος ενέργειας δικαιολογείται εξαιτίας της διαφοράς στο αρχικό κόστος επένδυσης των επιλεγμένων τεχνολογιών έναντι των συμβατικών, καθώς η διαφορά τιμής τους παραμένει σε σημαντικά υψηλά, συγκριτικά, επίπεδα ιδιαίτερα για την ψύξη. Το ROI του προτεινόμενου συστήματος διαμορφώθηκε στο 85,51%, υψηλό συγκριτικά με ανάλογα συμβατικά συστήματα ενώ το NPV σε βάθος δεκαετίας για την επένδυση ήταν θετικό και διαμορφώθηκε στα -886.185,47€ (έναντι -1.408.399,63 € του συμβατικού συστήματος). Η περίοδος αποπληρωμής του υπολογίστηκε στα 6 έτη, ενώ για το συμβατικό σύστημα η απόσβεση προκύπτει μετά την 20ετία.

Βιβλιογραφία

1. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Katsavounis, S. Improved Structural Local Thermal Energy Planning Based on Prosumer Profile: Part A. *Applied Sciences* **2022**, *12*, 5355, doi:10.3390/app12115355.
2. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N. Improved Structural Local Thermal Energy Planning Based on Prosumer Profile: Part B. *Energies (Basel)* **2022**, *15*, 7708, doi:10.3390/en15207708.
3. Botsaris, P.N.; Giourka, P.; Papatsounis, A.; Dimitriadou, P.; Goitia-Zabaleta, N.; Patsonakis, C. Developing a Business Case for a Renewable Energy Community in a Public Housing Settlement in Greece—the Case of a Student Housing and Its Challenges, Prospects and Barriers. *Sustainability (Switzerland)* **2021**, *13*, doi:10.3390/su13073792.
4. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Lymperopoulos, K.A.; Rotas, R.; Kanellia, Z.; Iliadis, P.; Nikolopoulos, N. Operation Assessment of a Hybrid Solar-Biomass Energy System with Absorption Refrigeration Scenarios. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* **2022**, *44*, doi:10.1080/15567036.2022.2049929.
5. Botsaris, P.N.; Lymperopoulos, K.; Pechtelidis, A. Preliminary Evaluation of Operational Results of RES Systems Integrated in Students' Residences in Xanthi, Greece. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; Institute of Physics Publishing, January 24 2020; Vol. 410.

6. Droutsas, K.G.; Kontoyiannidis, S.; Dascalaki, E.G.; Balaras, C.A. Mapping the Energy Performance of Hellenic Residential Buildings from EPC (Energy Performance Certificate) Data. *Energy* **2016**, *98*, 284–295, doi:10.1016/j.energy.2015.12.137.
7. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Katsavounis, S. Improved Structural Local Thermal Energy Planning Based on Prosumer Profile: Part A. *Applied Sciences (Switzerland)* **2022**, *12*, doi:10.3390/app12115355.
8. ΤΟΤΕΕ ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ (Υ.Π.Ε.Κ.Α.) ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΗΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ Β' Έκδοση; Αθήνα, 2010;
9. Garshasbi, S.; Haddad, S.; Paolini, R.; Santamouris, M.; Papangelis, G.; Dandou, A.; Methymaki, G.; Portakakis, P.; Tombrou, M. Urban Mitigation and Building Adaptation to Minimize the Future Cooling Energy Needs. *Solar Energy* **2020**, *204*, 708–719, doi:10.1016/j.solener.2020.04.089.
10. Ζιούτας, Γ. Πιθανότητες Και Στατιστική Για Μηχανικούς. Μέθοδοι - Εφαρμογές. In: Εκδόσεις σοφία, Ed.; σοφία: Θεσσαλονίκη, 2014; Vol. 1, pp. 203–204 ISBN 978-960-6706-77-6.
11. Papatsounis, A.G.; Botsaris, P.N.; Lymperopoulos, K.A.; Rotas, R.; Kanellia, Z.; Iliadis, P.; Nikolopoulos, N. Operation Assessment of a Hybrid Solar-Biomass Energy System with Absorption Refrigeration Scenarios. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* **2022**, *44*, 700–717, doi:10.1080/15567036.2022.2049929.
12. GEODATA Ανοικτά Δεδομένα Αιολικού Δυναμικού. <http://geodata.gov.gr/> 2021.
13. Dénarié, A.; Calderoni, M.; Muscherà, M. *Technical, Financial and Urban Potentials for Solar District Heating in Italy*; 2017; ISBN 9783319448992.
14. Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών Νέοι Κλιματολογικοί Χάρτες Ηλιακής Ενέργειας Για Την Ελλάδα .
15. Χρήστου, Μ. Δυναμικό Βιομάζας Στην Ελλάδα Και Προοπτικές. ΚΑΠΕ (CRES) 2017.
16. Φυτίκας, Μ.; Καθηγητής Γεωθερμίας ΑΠΘ, Ο. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ ΗΜΕΡΙΔΑ «Κλιματική Αλλαγή, Ενέργεια Και Ελληνικό Περιβάλλον» Αθήνα, 28 Ιανουαρίου 2020 Το Γεωθερμικό Δυναμικό Της Ελλάδας;
17. Παπαντώνης Δημήτριος ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ; 3rd ed.; ΤΣΟΤΡΑΣ, 2016; Vol. 1;.
18. Troldborg, M.; Heslop, S.; Hough, R.L. Assessing the Sustainability of Renewable Energy Technologies Using Multi-Criteria Analysis: Suitability of Approach for National-Scale Assessments and Associated Uncertainties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2014**, *39*, 1173–1184, doi:10.1016/j.rser.2014.07.160.
19. Lee, H.C.; Chang, C. ter Comparative Analysis of MCDM Methods for Ranking Renewable Energy Sources in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018, *92*, 883–896.
20. al Garni, H.; Kassem, A.; Awasthi, A.; Komljenovic, D.; Al-Haddad, K. A Multicriteria Decision Making Approach for Evaluating Renewable Power Generation Sources in Saudi Arabia. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **2016**, *16*, 137–150, doi:10.1016/J.SETA.2016.05.006.
21. Haddad, B.; Liazid, A.; Ferreira, P. A Multi-Criteria Approach to Rank Renewables for the Algerian Electricity System. *Renew Energy* **2017**, *107*, 462–472, doi:10.1016/J.RENENE.2017.01.035.
22. Yokoyama, R.; Hasegawa, Y.; Ito, K. A MILP Decomposition Approach to Large Scale Optimization in Structural Design of Energy Supply Systems;

23. Diakoulaki, D.; Karangelis, F. Multi-Criteria Decision Analysis and Cost–Benefit Analysis of Alternative Scenarios for the Power Generation Sector in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2007**, *11*, 716–727, doi:10.1016/J.RSER.2005.06.007.
24. Bugaeva, T.; Filippova, I.; Tribunskii, N. APPLYING THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS TO DECISION MAKING ON THE DEVELOPMENT OF URBAN ENERGY SYSTEM., doi:10.1145/3444465.3444513.
25. Kılış, Ş.; Krajačić, G.; Duić, N.; Montorsi, L.; Wang, Q.; Rosen, M.A.; Ahmad Al-Nimr, M. Research Frontiers in Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems in a Time of Climate Crisis. *Energy Convers Manag* **2019**, *199*, doi:10.1016/j.enconman.2019.111938.
26. Navarro, L.; de Gracia, A.; Colclough, S.; Browne, M.; McCormack, S.J.; Griffiths, P.; Cabeza, L.F. Thermal Energy Storage in Building Integrated Thermal Systems: A Review. Part 1. Active Storage Systems. *Renew Energy* **2016**, *88*, 526–547, doi:10.1016/J.RENENE.2015.11.040.
27. Mostafaeipour, A.; Sedeh, A.S.; Chowdhury, S.; Techato, K. Ranking Potential Renewable Energy Systems to Power On-Farm Fertilizer Production., doi:10.3390/su12197850.
28. Tomescu, M. *Renewable Energy in Europe — Approximated Recent Growth and Knock-on Effects*; Luxembourg, 2013;
29. Kalogirou, S. *Solar Energy Engineering Processes and Systems*; 2014; ISBN 978-0-12-397270-5.
30. Langer, J.; Quist, J.; Blok, K. Recent Progress in the Economics of Ocean Thermal Energy Conversion: Critical Review and Research Agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2020**, *130*, 109960, doi:10.1016/J.RSER.2020.109960.
31. Bhattacharjee, R.; Bhattacharjee, S. Viability of a Concentrated Solar Power System in a Low Sun Belt Prefecture. *Frontiers in Energy* **2020**, *14*, 850–866, doi:10.1007/s11708-020-0664-5.
32. Maximov, S.A.; Mehmood, S.; Friedrich, D. Multi-Objective Optimisation of a Solar District Heating Network with Seasonal Storage for Conditions in Cities of Southern Chile. *Sustain Cities Soc* **2021**, *73*, 103087, doi:10.1016/J.SCS.2021.103087.
33. Hemmatabady, H.; Welsch, B.; Formhals, J.; Sass, I. AI-Based Enviro-Economic Optimization of Solar-Coupled and Standalone Geothermal Systems for Heating and Cooling. *Appl Energy* **2022**, *311*, 118652, doi:10.1016/J.APENERGY.2022.118652.
34. Trevor M. Letcher *Future Energy*; Elsevier, 2014; ISBN 9780080994246.
35. Voll, P.; Bardow, A. Automated Optimization Based Synthesis of Distributed Energy Supply Systems. **2014**.
36. Wiegel, C. *Thermal Comfort in Sun Spaces To What Extend Can Energy Collectors and Seasonal Energy Storages Provide Thermal Comfort in Sun Spaces?*; 2017;
37. Calise, F.; Cappiello, F.L.; Dentice d'Accadia, M.; Petrakopoulou, F.; Vicidomini, M. A Solar-Driven 5th Generation District Heating and Cooling Network with Ground-Source Heat Pumps: A Thermo-Economic Analysis. *Sustain Cities Soc* **2022**, *76*, 103438, doi:10.1016/J.SCS.2021.103438.
38. Pavković, B.; Delač, B.; Mrakovčić, T. Modified Water Loop Heat Pump System for a Hospital with Complex HVAC Systems | Modificirani Sustav Dizalica Topline s Vodenim Krugom Za Bolnicu Sa Složenim Termotehničkim Sustavima. *Tehnicki Vjesnik* **2012**, *19*, 621–631.
39. Calise, F.; d'Accadia, M.D.; Vanoli, R. Dynamic Simulation and Parametric Optimisation of a Solar-Assisted Heating and Cooling System. *International Journal of Ambient Energy* **2010**, *31*, 173–194, doi:10.1080/01430750.2010.9675811.

40. Boero, A.; Agyenim, F. Modeling and Simulation of a Small-Scale Solar-Powered Absorption Cooling System in Three Cities with a Tropical Climate. *International Journal of Low-Carbon Technologies* **2019**, *15*, 1–16, doi:10.1093/ijlct/ctz040.
41. Qu, S.; Han, J.; Sun, Z.; Yin, R.; Ji, R.; Chai, C. Study of Operational Strategies for a Hybrid Solar-Geothermal Heat Pump System. *Build Simul* **2019**, *12*, 697–710, doi:10.1007/s12273-019-0519-3.
42. Sebestyén, T.T.; Pavičević, M.; Dorotić, H.; Krajačić, G. The Establishment of a Micro-Scale Heat Market Using a Biomass-Fired District Heating System. *Energy Sustain Soc* **2020**, *10*, doi:10.1186/s13705-020-00257-2.
43. Zheng, Y.; Jenkins, B.M.; Kornbluth, K.; Træholt, C. Optimization under Uncertainty of a Biomass-Integrated Renewable Energy Microgrid with Energy Storage. *Renew Energy* **2018**, *123*, 204–217, doi:10.1016/j.renene.2018.01.120.
44. Alberg Østergaard, P.; Mathiesen, B.V.; Möller, B.; Lund, H. A Renewable Energy Scenario for Aalborg Municipality Based on Low-Temperature Geothermal Heat, Wind Power and Biomass. *Energy* **2010**, *35*, 4892–4901, doi:10.1016/j.energy.2010.08.041.
45. Kapsalis, V.; Karamanis, D. Solar Thermal Energy Storage and Heat Pumps with Phase Change Materials. *Appl Therm Eng* **2016**, *99*, 1212–1224, doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.01.071.
46. Zhang, C.; Sun, J.; Ma, J.; Xu, F.; Qiu, L. Environmental Assessment of a Hybrid Solar-Biomass Energy Supplying System: A Case Study. *Int J Environ Res Public Health* **2019**, *16*, doi:10.3390/ijerph16122222.
47. Voll, P.; Klaffke, C.; Hennen, M.; Bardow, A. Automated Superstructure-Based Synthesis and Optimization of Distributed Energy Supply Systems. *Energy* **2013**, *50*, 374–388, doi:10.1016/J.ENERGY.2012.10.045.
48. Sillman, S.; Energy Research Institute, S. *THE TRADE-OFF BETWEEN COLLECTOR AREA, STORAGE VOLUME, AND BUILDING CONSERVATION IN ANNUAL STORAGE SOLAR HEATING SYSTEMS*; Colorado, 1981;
49. European Committee for Standardization *Heating Systems in Buildings-Design of Heat Pump Heating Systems*; Brussels, 2007;
50. - International Energy Agency, I. *A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas*; 2022;
51. IRENA International Renewable Energy Agency *Renewable Power Generation Costs in 2017*; 2018; ISBN 978-92-9260-040-2.
52. Rademaekers, Koen.; Smith, Matthew.; Demurtas, Andrea.; Torres Vega, P.C.; Janzow, Natalie.; Zibell, Laurent.; Hoogland, Onne.; Pollier, Karine.; Crènes, Morgan.; Radigois, Geoffrey.; et al. *Study on Energy Prices, Costs and Their Impact on Industry and Households : Final Report.*; ISBN 9789276189541.
53. Ashfaq, A.; Ianakiev, A. *Cost-Minimised Design of a Highly Renewable Heating Network for Fossil-Free Future*;
54. Kim, D.W.; Kim, M.H.; Lee, D.W. Economic and Environmental Analysis of Solar Thermal and Seasonal Thermal Energy Storage Based on a Renewable Energy Conversion System for Greenhouses. *Energies (Basel)* **2022**, *15*, doi:10.3390/en15186592.
55. Zhang, Y.; Johansson, P.; Sasic Kalagasidis, A. Assessment of District Heating and Cooling Systems Transition with Respect to Future Changes in Demand Profiles and Renewable Energy Supplies. *Energy Convers Manag* **2022**, *268*, doi:10.1016/j.enconman.2022.116038.
56. *ADVICE NOTES-SOLAR THERMAL Advice Notes on Solar Thermal Technology Economics for the NPA Region*; 2017;

57. Miar Naeimi, M.; Eftekhari Yazdi, M.; Reza Salehi, G. Energy, Exergy, Exergoeconomic and Exergoenvironmental Analysis and Optimization of a Solar Hybrid CCHP System. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* **2019**, doi:10.1080/15567036.2019.1702122.
58. Kilkış, Ş. Exergy Transition Planning for Net-Zero Districts. *Energy* **2015**, 92, 515–531, doi:10.1016/J.ENERGY.2015.02.009.
59. Miar Naeimi, M.; Eftekhari Yazdi, M.; Salehi, G.R. Advanced Exergy, Exergoeconomic, Exergoenvironmental Evaluation of a Solar Hybrid Trigeneration System Based on Solar Gas Turbine for an Office Building. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME* **2021**, 143, doi:10.1115/1.4047756.
60. International Renewable Energy Agency.; European Commission. *Renewable Energy Prospects for the European Union*; International Renewable Energy Agency (IRENA), 2018;
61. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (PAE) *Τιμολόγια Προμήθειας Ηλεκτρικής Ενέργειας Ανά Κατηγορία Πελατών Και Τιμολόγιο Αναφοράς Καθολικής Υπηρεσίας Για Τον Δεκέμβριο Του 2022*;
62. Li, H.; Svendsen, S. Energy and Exergy Analysis of Low Temperature District Heating Network. *Energy* **2012**, 45, 237–246, doi:10.1016/J.ENERGY.2012.03.056.
63. Shi, Z.; Li, X.; Hu, S. *Modeling and Exergy Analysis of Seawater Source Heat Pump System*; 2011; Vol. 291–294; ISBN 9783037851937.
64. Khakrah, H.; Shamloo, A.; Kazemzadeh Hannani, S. Exergy Analysis of Parabolic Trough Solar Collectors Using Al₂O₃/Synthetic Oil Nanofluid. *Solar Energy* **2018**, 173, 1236–1247, doi:10.1016/J.SOLENER.2018.08.064.
65. Kilkış, Ş. Energy System Analysis of a Pilot Net-Zero Exergy District. *Energy Convers Manag* **2014**, 87, 1077–1092.
66. Kazanci, O.B.; Shukuya, M.; Olesen, B.W. Theoretical Analysis of the Performance of Different Cooling Strategies with the Concept of Cool Exergy. *Build Environ* **2016**, 100, 102–113, doi:10.1016/j.build-env.2016.02.013.
67. Mohammadi, A.; Ahmadi, M.H.; Bidi, M.; Joda, F.; Valero, A.; Uson, S. Exergy Analysis of a Combined Cooling, Heating and Power System Integrated with Wind Turbine and Compressed Air Energy Storage System. *Energy Convers Manag* **2017**, doi:10.1016/j.enconman.2016.11.003.
68. Bondy, J. Adrian, and Vasek Chvátal. "A method in graph theory." *Discrete Mathematics* 15.2 (1976): 111-135.
69. Pisinger, David. "Where are the hard knapsack problems?." *Computers & Operations Research* 32.9 (2005): 2271-2284.

Συμπεράσματα-Προτάσεις

Περιεχόμενα

Σύνοψη Διατριβής	161
Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα	163
Ερευνητική συνεισφορά διατριβής	170
Επιστημονική συνεισφορά	170
Κοινωνική συνεισφορά	171
Περιορισμοί και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	171
Περιορισμοί και προτάσεις 1 ^{ου} Επιπέδου HDLM	172
Περιορισμοί και προτάσεις 2 ^{ου} Επιπέδου HDLM	172
Περιορισμοί και προτάσεις 3 ^{ου} Επιπέδου HDLM	173
Γενικοί περιορισμοί και προτάσεις	174
Σύνοψη και τελευταία σχόλια	174

Σύνοψη Διατριβής

Στο παρόν Κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η σύνοψη της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Τα 6 κεφάλαια που προηγήθηκαν προσπάθησαν να απαντήσουν στα ερευνητικά υποερωτήματα που τέθηκαν στο Κεφάλαιο της Εισαγωγής, και είχαν ως στόχο τους να απαντήσουν στο κεντρικό ερευνητικό ερώτημα της διατριβής που ήταν: «Πώς επιδρούν οι διαφορετικές τεχνολογίες κάλυψης θερμικής ενέργειας στην ενεργειακή μετάβαση και πώς μεταβάλλουν τη βιωσιμότητα των τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων (LECs);». Αρχικά, στο 2^ο Κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση της εγχώριας και διεθνούς βιβλιογραφίας στη θεματική των θερμικών ενεργειακών κοινοτήτων (ΕΚ) και στο ρόλο που διαδραματίζουν στην ενεργειακή μετάβαση του κτιριακού τομέα. Έπειτα εξετάστηκαν οι τεχνολογίες που επιτρέπουν δυνητικά τις ΕΚ να ενσωματωθούν στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη και να καλύψουν επαρκώς τις θερμικές και ψυκτικές ενεργειακές τους απαιτήσεις τοπικά με βιώσιμες πηγές. Οι τεχνολογίες που αναλύθηκαν ήταν τόσο τεχνολογίες παραγωγής (ηλιοθερμικοί συλλέκτες, γεωθερμικές αντλίες, λέβητες βιομάζας, ψύκτες απορρόφησης/προσρόφησης θερμικής ενέργειας) και δίκτυα διανομής (δίκτυα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης παλαιότερων και σύγχρονων γενεών) όσο και τεχνολογίες αποθήκευσης (αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας). Τα ευρήματα του 2^{ου} Κεφαλαίου κατέδειξαν την σημαντικότητα των θερμικών ΕΚ και την απουσία συστηματικού εργαλείου ολοκληρωμένου σχεδιασμού θερμικών ΕΚ.

Στο 3^ο Κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε βιβλιομετρική ανάλυση προκειμένου να διαπιστωθούν τα σημεία ερευνητικού ενδιαφέροντος στις θερμικές ΕΚ και στην ενσωμάτωση τους στον ενεργειακό χάρτη. Για τον σκοπό αυτό έγινε χρήση λογισμικού βιβλιομετρικής ανάλυσης (VOS Viewer) του οποίου τα αποτελέσματα κατέδειξαν τη σημαντικότητα της θερμικής ενέργειας για την επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης, αλλά και το ενδεχόμενο ερευνητικό κενό μεταξύ θερμικής ενέργειας και της τοπικής εκμετάλλευσής της. Έπειτα, έγινε χρήση του λογισμικού Litmaps με σκοπό την διερεύνηση των σημαντικότερων ερευνητικών εργασιών (2011-2022) στον τομέα της θερμικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμα ή υβριδικά συστήματα και εξυπηρετεί τοπικές ανάγκες. Αποδελτιώθηκε με τον τρόπο αυτό όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης βιβλιογραφίας και έγινε συστηματική προσπάθεια εντοπισμού τεχνολογικών, οικονομικών και κοινωνικών περιορισμών και καινοτομιών στον τομέα της ενσωμάτωσης της θερμικής και ψυκτικής ανανεώσιμης ενέργειας στον τοπικό ενεργειακό χάρτη.

Στο 4^ο Κεφάλαιο έγινε εκτενής ανασκόπηση των διαθέσιμων εργαλείων σχεδιασμού θερμικών ΕΚ με έμφαση τόσο σε εμπορικά λογισμικά όσο και σε μαθηματικά υπολογιστικά μοντέλα. Ο διαχωρισμός μεταξύ των υφιστάμενων εργαλείων σχεδιασμού, χωριζόμενος σε bottom-up και top-down προσεγγίσεις αρχιτεκτονικής σχεδιασμού, αποδεικνύεται σύνθετος και πολυδιάστατος για ευρεία χρήση. Τα διαθέσιμα λογισμικά απαιτούν εμπειρία από την πλευρά του σχεδιαστή και προϋποθέτουν εισαγωγή αρχικού σεναρίου για να προτείνουν κάποιο σύστημα για την κάλυψη των αναγκών της εκάστοτε μελέτης περίπτωσης. Από την άλλη, τα μαθηματικά μοντέλα σχεδιασμού αποτελούν πολύπλοκες και πολλές φορές δυσεπίλυτες προσεγγίσεις των πραγματικών συστημάτων καθώς προσπαθούν να εκφράσουν νόμους όπως ο 2^{ος} θερμοδυναμικός νόμος, ισοζύγια μάζας, ισοζύγια εξέργειας κ.α. με τις κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις. Οι εξισώσεις αυτές δεν είναι γραμμικές και συνήθως αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να μην οδηγούν σε μοναδική λύση αλλά σε σύνολο ημι-βέλτιστων λύσεων όπως τα μέτωπα Pareto. Το αποτέλεσμα αυτής της ανασκόπησης οδηγεί στην εισαγωγή της πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής, στην πρόταση δηλαδή μιας ενιαίας, ολιστικής, καθολικής και μαθηματικώς ορισμένης μεθοδολογίας σχεδιασμού θερμικών ΕΚ, της ΜΙΔΣ (Μεθοδολογία Ιεραρχικού Δομημένου Σχεδιασμού) ή αλλιώς HDLM (Hierarchically Dependent Layering Methodology). Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται εισαγωγή στην προτεινόμενη μεθοδολογία, ενώ το αναλυτικό μαθηματικό της υπόβαθρο παρουσιάστηκε στο 5^ο Κεφάλαιο.

Στο 5^ο Κεφάλαιο έγινε η διάκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών επιπέδων σχεδιασμού της προτεινόμενης μεθοδολογίας HDLM. Ο σχεδιασμός χωρίστηκε σε 3 επίπεδα, με: 1^ο Επίπεδο τον καθορισμό των αναγκών των παραγωγαναλωτών της δυνητικής ΕΚ και την κατηγοριοποίησή τους σε ποιοτικές κλίμακες (Χαμηλή, Μέτρια, Υψηλή), 2^ο Επίπεδο, τον σχεδιασμό του συστήματος που αξιοποιώντας το πρωτογενές δυναμικό της εκάστοτε περιοχής θα καλύψει τις ανάγκες της δυνητικής ΕΚ που υπολογίστηκαν στο 1^ο Επίπεδο και 3^ο Επίπεδο όπου γίνεται η οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου συστήματος. Αν στο 3^ο Επίπεδο εντοπιστεί αυξημένο σταθμισμένο κόστος παραγόμενης ενέργειας (LCoE), τότε ο μελετητής-σχεδιαστής επιστρέφει στο 2^ο Επίπεδο σχεδιασμού προκειμένου να επαναπροσδιορίσει το μείγμα τεχνολογιών που θα καλύψουν τις θερμικές και ψυκτικές ανάγκες της ΕΚ και θα πληρούν τα οικονομικά κριτήρια του 3^{ου} Επιπέδου. Στα επίπεδα αυτά παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα μαθηματικά μοντέλα που τα διέπουν καθώς και οι παραδοχές που γίνονται, όπου αυτό είναι απαραίτητο, προκειμένου η προτεινόμενη μεθοδολογία να είναι καθολική και εύχρηστη. Στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας HDLM σε πραγματική μελέτη περίπτωσης, σε ΕΚ στα Κιμμέρια, Ξάνθης.

Συγκεκριμένα, μέσω συγκριτικής ανάλυσης μεταξύ τυπικών μεθόδων σχεδιασμού και διαστασιολόγησης τεχνολογιών (TOTEΕ, βαθμομέρες) για την κάλυψη θερμικών/ψυκτικών αναγκών, η προτεινόμενη μέθοδος (HDLM) εφαρμόζεται και στα 3 επίπεδα με σκοπό τον σχεδιασμό ενός κατάλληλα διαστασιολογημένου, βιώσιμου και ασφαλούς συστήματος κάλυψης αναγκών. Αρχικά κατηγοριοποιήθηκαν οι χρήστες (παραγωγαναλωτές) των κτιρίων της μελέτης περίπτωσης (8 κτίρια – Κεφάλαιο 6, Ενότητα 6.2.1) και υπολογίστηκε το προς εξυπηρέτηση

θερμικό και ψυκτικό φορτίο τους. Η συγκριτική ανάλυση μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου υπολογισμού του ετήσιου θερμικού φορτίου και των συμβατικών (TOTEE και βαθμομερών) κατέδειξε διαφορές εντός επιτρεπτών ορίων (1,9% διαφορά συγκριτικά με την TOTEE και 3,5% διαφορά με την μέθοδο των βαθμομερών) – Κεφάλαιο 6, Ενότητα 6.1.2. Το προσδιορισμένο φορτίο προβλήθηκε στο 2^ο Επίπεδο, όπου αποδελτιώνοντας το πρωτογενές δυναμικό της περιοχής, το ηλιακό, γεωθερμικό και δυναμικό βιομάζας κρίθηκαν καταλληλότερα προς αξιοποίηση στην περιοχή. Έπειτα, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες, για την περίπτωση, τεχνολογίες που θα αξιοποιήσουν το πρωτογενές δυναμικό και θα προσφέρουν πλήρη κάλυψη των υπολογισμένων θερμικών και ψυκτικών αναγκών του 1^{ου} Επιπέδου. Οι τεχνολογίες αυτές ήταν οι επίπεδοι ηλιοθερμικοί συλλέκτες, οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας ανοικτού τύπου, οι λέβητες βιομάζας, οι ψύκτες απορρόφησης θερμότητας και η αποθήκευση με μέσο το νερό (αισθητή), που επιλέχθηκαν βάσει κριτηρίων τεχνολογικής ωριμότητας, κόστους παραγόμενης ενέργειας, απαιτούμενης εδαφοκάλυψης, αξιοπιστίας, εκπεμπόμενων ρύπων και συντελεστή ισχύος.

Προσεγγίστηκε η υβριδική λειτουργία και συνδυασμός των τεχνολογιών αυτών για την κάλυψη των αναγκών με στόχο την παροχή ανανεώσιμης ενέργειας, την ενεργειακή ασφάλεια, την ενδυνάμωση των παραγωγικών με την παραγωγή και διαχείριση της ενέργειάς τους, την προσφορά φθηνής ενέργειας και την ανεξαρτητοποίησή της ΕΚ από κεντρικούς παρόχους διανομής και διαχείρισης ενέργειας. Η οικονομική αποτίμηση του προτεινόμενου σεναρίου, που πραγματοποιήθηκε στο 3^ο Επίπεδο, κατέδειξε τη βιωσιμότητα του προτεινόμενου συστήματος κάλυψης των θερμικών και ψυκτικών αναγκών (NPV προτεινόμενου συστήματος $> NPV$ του αντίστοιχου συμβατικού), την προσφορά φθηνής ενέργειας ($LCoE$ 0,22 €/kWh για τη θέρμανση και 1,17 €/kWh για τη ψύξη) και τη σύντομη αποπληρωμή της προτεινόμενης επένδυσης (6 έτη σε αντίθεση με το συμβατικό που η απόσβεσή του υπερβαίνει τα 20 έτη), με την προϋπόθεση επιδότησης της τάξεως του 85%.

Στη συνέχεια απαντώνται τα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν στο 1^ο Κεφάλαιο-Εισαγωγή, σχολιάζονται τα σημαντικότερα σημεία της προτεινόμενης μεθοδολογίας HDLM, παρουσιάζονται η συνεισφορά της παρούσας διατριβής σε ερευνητικό και κοινωνικό επίπεδο, οριοθετούνται περιορισμοί/παραδοχές που λήφθηκαν υπόψη κατά την υλοποίηση της διατριβής και προτείνονται κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα ενώ πραγματοποιείται και μια τελική σύνοψη της διδακτορικής διατριβής.

Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα

Τα τέσσερα ερευνητικά υποερωτήματα που τέθηκαν στην αρχή της παρούσας διατριβής και αναφέρονται στη συνέχεια, είχαν ως στόχο να απαντήσουν ως επί το πλείστον στο κεντρικό ερευνητικό ερώτημα, «*Πώς επιδρούν οι διαφορετικές τεχνολογίες κάλυψης θερμικής ενέργειας στη ενεργειακή μετάβαση και πώς μεταβάλλουν τη βιωσιμότητα των τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων (LECs)*;». Το ερώτημα αυτό προέκυψε μετά από συστηματική αποδελτίωση της διαθέσιμης εγχώριας και διεθνούς βιβλιογραφίας όπου καταδείχθηκε η ανάγκη διερεύνησης συστημάτων κάλυψης θερμικών και ψυκτικών αναγκών τοπικά (2^ο και 3^ο Κεφάλαιο). Έγινε σαφές από την ανασκόπηση αυτή ότι οι ΕΚ θα αποτελέσουν αρωγούς του μετασχηματισμού του υφιστάμενου ενεργειακού χάρτη από κεντροποιημένα συστήματα (π.χ. ΔΕΗ) σε αποκεντρωμένα όπου οι καταναλωτές ενδυναμώνονται με την διαχείριση και παραγωγή της ενέργειάς τους. Όμως, παρά το σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον, η θεματική αυτή ασχολείται κυρίως με ηλεκτρικές ΕΚ και ένα περιορισμένο ποσοστό ερευνητικών εργασιών επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση της θερμικής (και ψυκτικής) ενέργειας.

Οι εργασίες που ασχολούνται με την θεματική αυτή καταδεικνύουν τη σημαντικότητα διερεύνησης κατάλληλων εργαλείων σχεδιασμού για τις ΕΚ, την θεσμοθέτηση και χρηματοδοτική τους προοπτική και την ενσωμάτωση αποθήκευσης για τη βελτίωση της εκμετάλλευσης του πρωτογενούς δυναμικού της εκάστοτε περιοχής. Στο

πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα της παρούσας διδακτορικής διατριβής, με στόχο της πλαισίωσης του τίτλου της διδακτορικής:

Τίτλος Διατριβής: «Ανάλυση λειτουργίας συστήματος με αποθήκευση θερμικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας και αξιολόγηση της επίδρασής του στη βιωσιμότητα μιας τοπικής ενεργειακής κοινότητας»

Κεντρικό Ερευνητικό Ερώτημα: «Πώς επιδρούν οι διαφορετικές τεχνολογίες κάλυψης θερμικής ενέργειας στη ενεργειακή μετάβαση και πώς μεταβάλλουν τη βιωσιμότητα των τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων (LECs);»

Το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα είναι, κατά την άποψη του συγγραφέα πολυδιάστατο και διεπιστημονικό και ήταν αναγκαίο να προσεγγιστεί με όσο το δυνατόν σαφέστερα υποερωτήματα. Τα υποερωτήματα αυτά προσπαθούν να απαντήσουν εν μέρει το κεντρικό αυτό ερώτημα και να θέσουν νέα και ίσως συνθετότερα ερωτήματα στην επιστημονική κοινότητα.

Ερευνητικό υποερώτημα 1: *Πώς ορίζεται το ενεργειακό προφίλ των χρηστών θερμικής ενέργειας, ποια είναι τα εξυπηρετούμενα φορτία και ποιες τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψή τους;*

Το πρώτο υποερώτημα επιδρά σε σημαντικές πτυχές του κεντρικού. Αρχικά είναι απαραίτητοι οι ορισμοί του ενεργειακού προφίλ των χρηστών, ποια είναι τα είδη, ποιοι καταναλωτές θεωρούνται ενεργοβόροι, ποια είναι η κλίμακα σύγκρισης, ποιες κτιριακές κατηγορίες-ομάδες κατηγοριοποιούνται στην τάξη μεγάλης, μεσαίας και μικρής κλίμακας. Η προσπάθεια απάντησης αυτών των ερωτημάτων αποδόθηκε στα 2^ο, 3^ο και 5^ο Κεφάλαια όπου διευκρινίστηκαν τα ενεργειακά προφίλ των χρηστών ενέργειας ως χαμηλά, μέτρια και υψηλά βάσει της ετήσιας ενεργειακής κατανάλωσης (Κεφάλαιο 5 – Ενότητα 5.1.3) που αποτελεί και το μέτρο καθολικής σύγκρισης. Οι κλίμακες μικρή, μεσαία, μεγάλη σε ότι αφορά το μέγεθος της ΕΚ ορίζονται βάσει βιβλιογραφίας και της Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής ως μικρής κλίμακας – έως 3 κατοικίες, μεσαίας κλίμακας – από 10 μέχρι 20 κατοικίες και μεγάλης κλίμακας – κτιριακά συγκροτήματα άνω των 20 κατοικιών μέχρι ολόκληρες πόλεις (βλ. **Papatsounis, A. G., Botsaris, P. N., & Katsavounis, S. (2022).** Thermal/Cooling Energy on Local Energy Communities: A Critical Review. *Energies*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/en15031117>, όπου γίνεται χρήση του δόκιμου όρου prosumers γι' αυτήν την κατηγορία καταναλωτών). Οι χρήστες ενέργειας στις θερμικές ΕΚ στην διεθνή βιβλιογραφία ονομάζονται "prosumers".

Η ελληνική απόδοση δεν αναφέρεται στην διαθέσιμη εγχώρια βιβλιογραφία με αποτέλεσμα ο συγγραφέας να προσεγγίσει τον Ομότιμο Καθηγητή του ΕΚΠΑ κ.Γ. Μπαμπινιώτη (τέως Υπ. Παιδείας και Πρύτανη του Πανεπιστημίου Αθηνών) για την αποσαφήνιση του όρου και την απόδοσή του στην ελληνική. Η απόδοση αυτή εμφανίζεται συχνά στην παρούσα διατριβή και είναι οι «παραγωγαναλωτές» σύνθετη των ουσιαστικών «παραγωγός» και «καταναλωτής».

Για τα φορτία προς εξυπηρέτηση σε ότι αφορά την θερμική ενέργεια του κτιριακού τομέα η παρούσα διδακτορική διατριβή ασχολείται με τα τρία βασικά στις θερμικές ΕΚ δηλαδή φορτία θέρμανσης, φορτία ψύξης και φορτία ΖΝΧ. Η κάλυψη των φορτίων αυτών με βιώσιμο και οικονομικό τρόπο μειώνει το ανθρακικό αποτύπωμα του κτιριακού χάρτη, που οι ανάγκες του γι' αυτά αυξάνονται διαρκώς. Η διαρκής αυτή αύξηση οφείλεται κυρίως στις ισχυρές περιβαλλοντικές μεταβολές που παρατηρούνται τόσο κατά τους χειμερινούς όσο και τους καλοκαιρινούς μήνες. Όσο για τις τεχνολογίες που μπορούν να καλύψουν τα φορτία αυτά, αναλύονται εκτενώς στο 2^ο Κεφάλαιο και χρησιμοποιούνται στο 6^ο Κεφάλαιο στην εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στη μελέτη περίπτωσης.

Ερευνητικό υποερώτημα 2: Ποιες είναι οι κυριότερες τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής, σε ποιο στάδιο βρίσκονται ποιες είναι οι δυνατότητες ενσωμάτωσής τους στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη;

Το υποερώτημα αυτό στοχεύει στην αποσαφήνιση της τεχνολογικής σκοπιάς του παρόντος διδακτορικού. Στο 2^ο Κεφάλαιο έγινε αναλυτική περιγραφή των τεχνολογιών παραγωγής θέρμανσης και ψύξης. Οι κυριότερες τεχνολογίες στον τομέα αυτό είναι οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες, με τους συλλέκτες κενού, τους επίπεδους και τους παραβολικούς να είναι οι σημαντικότεροι στην κατηγορία. Οι συλλέκτες κενού καθώς και οι παραβολικοί λαμβάνουν υψηλή ερευνητική προσοχή καθώς είναι κατάλληλοι για εφαρμογές σε εγκαταστάσεις υψηλών θερμοκρασιών (λόγω του μεγάλου θερμοκρασιακού τους εύρους) και εφαρμόζονται επαρκώς σε περιπτώσεις ηλεκτροπαραγωγής και συστημάτων συνδυασμένης ηλεκτρικής και θερμικής παραγωγής ή ακόμα και σε τριπαραγωγή (ηλεκτρική, θερμική, ψυκτική). Βρίσκονται σε ώριμο εμπορικό στάδιο και έχουν υψηλή αξιοπιστία ως τεχνολογίες αλλά δεν χρησιμοποιούνται ευρέως για κάλυψη φορτίων θέρμανσης εξαιτίας του μεγάλου θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας τους.

Άλλη τεχνολογία παραγωγής που αναλύθηκε είναι οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Η εκμετάλλευση της γεωθερμίας με ανοικτού ή κλειστού τύπου εναλλάκτη (γεωεναλλάκτη, εναλλάκτη νερού ή εναλλάκτη αέρα) λαμβάνει όλο και υψηλότερη προσοχή καθώς οι διατάξεις αυτές μπορούν να καλύψουν φορτία τόσο θέρμανσης όσο και ψύξης. Το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας τους είναι κατάλληλο για συστήματα τηλεθέρμανσης 4^{ης} Γενιάς (θερμοκρασία ρευστού σε κυκλοφορία <60 °C) και το ερευνητικό ενδιαφέρον τους προσανατολίζεται πλέον στην εκμετάλλευση παρακείμενων υδροφορέων, είτε λιμνών και ποταμών είτε θαλασσινού νερού. Ο συγγραφέας ασχολήθηκε ενδελεχώς με τα συστήματα αυτά σε παράλληλες της διατριβής του δραστηριότητες, στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος με τίτλο "IDEOGRAM". Ο συγγραφέας ήταν υπεύθυνος για το σχεδιασμό και την οικονομοτεχνική αποτίμηση συστήματος γεωθερμικής αντλίας με θαλάσσιο εναλλάκτη σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (νοσοκομεία, γηροκομεία, σχολεία, δημόσια κτίρια κ.α.) και διαπίστωσε το βαθύ ερευνητικό τους ενδιαφέρον τόσο σε επίπεδο υλικών και κατασκευής, όσο και σε επίπεδο θερμοδυναμικής και οικονομικής ανάλυσης (βλ. **Papatsounis, A.G.**; Lymperopoulos, K.; Botsaris, P.N.; Tsaka, S. Preliminary Results of a Closed-Loop Sea Water Heat Pump: Application in Large-Scale Elderly Home Center for Heating and Cooling Load Coverage. *Applied Sciences* **2022**).

Οι λέβητες βιομάζας ήταν η επόμενη τεχνολογία που εξετάστηκε για την παραγωγή θερμικής ενέργειας, υπό τη σκοπιά του μηδενικού ανθρακικού ισοζυγίου της. Η τεχνολογία αυτή βρίσκεται σε ώριμα εμπορικά στάδια και η διαθεσιμότητα καυσίμου (πέλλετ ή πριονίδι) μπορεί να καλυφθεί επαρκώς στις περισσότερες περιοχές τις περιφέρειας. Ως τεχνολογία παραγωγής ψύξης, εξετάστηκαν οι ψύκτες απορρόφησης και οι ψύκτες προσρόφησης θερμικής ενέργειας. Οι ψύκτες αυτοί ανήκουν στην κατηγορία των θερμικώς καθοδηγούμενων μηχανών που με επαρκή τροφοδοσία θερμικής ενέργειας μπορούν να καλύψουν τα φορτία ψύξης. Η εμπορική ωριμότητα των ψυκτών απορρόφησης βρίσκεται στα πρώτα στάδια διείσδυσης στην αγορά με αποτέλεσμα να είναι διαθέσιμες μόνο μονάδες με υψηλή ισχύ. Εν αντιθέσει, οι ψύκτες προσρόφησης βρίσκονται ακόμα σε στάδια ανάπτυξης, καθώς η εφαρμογή τους περιορίζεται σε βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και όχι σε οικιστικά περιβάλλοντα.

Εκτός των τεχνολογιών παραγωγής θερμικής και ψυκτικής ενέργειας, πραγματοποιήθηκε επισκόπηση στο 2^ο Κεφάλαιο, των τεχνολογιών αποθήκευσης θερμότητας. Οι δύο μεγάλες κατηγορίες που εμφανίζονται είναι η αποθήκευση αισθητής και η αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Παρά τα πλεονεκτήματα της λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας (σημαντική αποθηκευτική ικανότητα σε μικρό κατά αναλογία όγκο), η αισθητή βρίσκεται σε ωριμότερο εμπορικό στάδιο και εξαιτίας αυτού οι τιμές των προϊόντων αυτών βρίσκονται σε χαμηλότερα επίπεδα.

Ο συγγραφέας κινήθηκε σε δύο άξονες για την διερεύνηση της αποθήκευσης: ο πρώτος αφορούσε την εξέταση σεναρίων αποθήκευσης αισθητής θερμότητας σε υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που αποσκοπούσαν στην κάλυψη φορτίων θέρμανσης/ψύξης. Από την ενασχόληση αυτή προέκυψε η ακόλουθη δημοσίευση βλ. **Papatsounis, A.G.**; Botsaris, P.N.; Lymperopoulos, K.A.; Rotas, R.; Kanellia, Z.; Iliadis, P.; Nikolopoulos, N. Operation Assessment of a Hybrid Solar-Biomass Energy System with Absorption Refrigeration Scenarios. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* **2022**, *44*, 700–717, doi:10.1080/15567036.2022.2049929). Ο δεύτερος αφορούσε τη συμμετοχή του σε δύο ερευνητικά προγράμματα. Το πρώτο είναι το Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο “Ministor” (MinimalSize Thermal and Electrical Energy Storage System for In-Situ Residential In-stallation, Horizon 2020, GA No 869821- σε εξέλιξη). Στο ερευνητικό αυτό πρόγραμμα διερευνώνται σενάρια αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας με τη χρήση θερμοχημικής αποθήκευσης συνδυασμένης με αποθήκευση σε υλικά αλλαγής φάσης, για την κάλυψη φορτίων τόσο θέρμανσης όσο και ψύξης. Το δεύτερο ήταν το “Renaissance” (Renewable Integration & Sustainability in Energy Communities, HORIZON 2020, GA 824342) όπου διερευνήθηκε η επιρροή της αποθήκευσης αισθητής (νερό) και λανθάνουσας (υλικά αλλαγής φάσης) θερμότητας για την κάλυψη των θερμικών αναγκών χρηστών ενέργειας. Από την ενασχόλησή του στο ερευνητικό αυτό πρόγραμμα προέκυψε η ακόλουθη δημοσίευση βλ. Botsaris, P. N., Giourka, P., **Papatsounis, A.**, Dimitriadou, P., Goitia-Zabaleta, N., & Patsonakis, C. (2021). Developing a business case for a renewable energy community in a public housing settlement in greece—the case of a student housing and its challenges, prospects and barriers. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(7). <https://doi.org/10.3390/su13073792>).

Περιπτώσεις αποθήκευσης ψυκτικής ενέργειας, ενώ αρχίζουν να αποκτούν ερευνητικό ενδιαφέρον, δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής για τους εξής λόγους: δεν βρίσκονται σε εμπορικά ώριμο στάδιο με αποτέλεσμα η λειτουργία τους, το κόστος τους και η απόδοσή τους να μην προσφέρουν δεδομένα προς αξιοποίηση. Επιπλέον, τα προϊόντα που βρίσκονται σε εμπορική χρήση προσανατολίζονται στην κάλυψη αναγκών ψύξης τροφίμων και φαρμάκων ενώ στις περιπτώσεις χρήσης τους για κτιριακές εγκαταστάσεις, αποθηκεύουν ψύξη με ηλεκτρικούς κύκλους συμπίεσης. Σε κάποιες περιπτώσεις, ως μέσα αποθήκευσης ψύξης θεωρούνται υπογειοποιημένες δεξαμενές (νερού), μονωμένες, που τροφοδοτούνται από κάποια ψυκτική διάταξη, με σημαντικές μηχανικές και θερμοδυναμικές απώλειες. Αυξάνεται το ερευνητικό ενδιαφέρον για τη λανθάνουσα αποθήκευση ψύξης που όπως και η λανθάνουσα αποθήκευση θερμότητας, έχει σημαντικά βήματα προς την εμπορική ωριμότητα, οικονομική λειτουργία και τεχνολογική εξέλιξη.

Στο επίπεδο της διανομής της παραγόμενης θερμικής και ψυκτικής ενέργειας, έγινε αναφορά στο 2^ο Κεφάλαιο σε δίκτυα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης. Τα επικρατέστερα δίκτυα βιβλιογραφικά είναι τα δίκτυα 4^{ης} Γενιάς που μπορούν να διανέμουν τόσο θέρμανση όσο και ψύξη. Τα δίκτυα αυτά ενσωματώνουν και λειτουργίες έξυπνης διαχείρισης της ενέργειας και της μεταφοράς με αποτέλεσμα να αποτελούν την πλέον αποδοτική διάταξη μεταφοράς ενέργειας σε συστήματα παραγωγής θέρμανσης/ψύξης. Ήδη σε ερευνητικό επίπεδο εξετάζονται και δίκτυα 5^{ης} Γενιάς που θα ενσωματώνουν και συστήματα IoT (Internet of Things) και θα λειτουργούν απομακρυσμένα μέσω «ψηφιακών διδύμων» (digital twins).

Το ερευνητικό υποερώτημα που εξετάζεται σ’ αυτήν την ενότητα, δηλαδή «Ποιες είναι οι κυριότερες τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και διανομής, σε ποιο στάδιο βρίσκονται ποιες είναι οι δυνατότητες ενσωμάτωσής τους στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη;» είναι άκρως δυναμικό και εξελίσσεται διαρκώς, όπως και οι τεχνολογίες που ενσωματώνει. Υπάρχουν πολλές εφαρμογές σε μελέτες περίπτωσης είτε εμπορικών είτε πειραματικών τεχνολογιών τόσο παραγωγής όσο και αποθήκευσης. Βρίσκονται όμως ακόμα στο στάδιο έρευνας, ανάπτυξης και δοκιμαστικής λειτουργίας και δεν παρέχουν επαρκή δεδομένα.

Ερευνητικό υποερώτημα 3: Πώς μπορεί να σχεδιαστεί μια ΕΚ, ποια είναι τα διαθέσιμα εργαλεία σχεδιασμού, πώς μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους οι θερμικές ΕΚ;

Στο 3^ο και 4^ο Κεφάλαιο εκπονήθηκε αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση των εργαλείων σχεδιασμού ΕΚ. Τα εργαλεία αυτά μπορεί να μην σχεδιάστηκαν για να προτείνουν ολοκληρωμένα σενάρια σχεδιασμού ΕΚ, αλλά έγινε διερεύνηση της επάρκειάς τους στο επίπεδο αυτό. Οι κατηγορίες εργαλείων σχεδιασμού είναι δύο, η πρώτη είναι η bottom-up, εργαλεία που λαμβάνουν υπόψη τους τις ανάγκες σε ενέργεια των χρηστών και σχεδιάζουν το σύστημα που θα ανταποκριθεί σε αυτές, και η δεύτερη είναι η top-down όπου τα συστήματα κάλυψης αναγκών σχεδιάζονται για να εμπίπτουν σε πρότυπα και διεθνείς πιστοποιήσεις ΕΚ (πιστοποιήσεις πράσινης ενέργειας και ενεργειακής αυτονομίας κοινοτήτων).

Σε εμπορικό επίπεδο, διαπιστώθηκε ότι τα διαθέσιμα λογισμικά-εργαλεία ενώ έχουν τις προδιαγραφές για σχεδιασμό συστημάτων κάλυψης αναγκών (π.χ. TRNSYS, EnergyPlus), απαιτούν εξειδικευμένη γνώση από μεριάς του σχεδιαστή και η δημιουργία συστημάτων σε αυτά είναι δυναμική και μη γραμμική. Η μη γραμμικότητα οδηγεί σε αυξημένες πιθανότητες αστοχιών κατά τον διαφορικό υπολογισμό δυναμικών μεγεθών με αποτέλεσμα οι πληροφορίες που προσφέρουν τα λογισμικά-εργαλεία αυτά να έχουν ορισμένο, μόνο, βαθμό εμπιστοσύνης. Τα υπόλοιπα λογισμικά που είναι διαθέσιμα για εμπορική χρήση, φαίνεται να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό θερμικών συστημάτων, καθώς δεν διαθέτουν τις κατάλληλες βιβλιοθήκες εξοπλισμού. Ακόμα και μερικά που διαθέτουν, δεν συμπεριλαμβάνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για κάλυψη θερμικών και ψυκτικών φορτίων όπως επίσης και τεχνολογίες αποθήκευσης.

Μια ακόμα προσέγγιση, εκτός των εμπορικών λογισμικών-εργαλείων, είναι η μαθηματική μοντελοποίηση και τα μοντέλα γραμμικών και μη γραμμικών συστημάτων (όπως τα υπό μελέτη συστήματα). Η προσέγγιση αυτή στηρίζεται στην κατασκευή μίας (ή πολλών πεπλεγμένων) συνάρτησης η οποία ελαχιστοποιείται στο μαθηματικό μοντέλο με διαφορετικές μεθόδους (αλγορίθμους βελτιστοποίησης). Οι εξισώσεις που διέπουν τα υπό εξέταση συστήματα (συστήματα κάλυψης αναγκών θέρμανσης και ψύξης) είναι συνήθως εκτενείς και αναφέρονται σε ισοζύγια μάζας και ενέργειας στο σύστημα, σε κόστος ενέργειας ή σε επίπεδα κάλυψης αναγκών από το σύστημα και λόγω της μη γραμμικότητάς τους (διαφορικές εξισώσεις πρώτου ή μεγαλύτερου βαθμού) δεν οδηγούν σε μια και μοναδική λύση (βελτιστοποίηση συστήματος πολλαπλών μεταβλητών – multi-objective optimization). Αντιθέτως οδηγούν σε μέτωπο λύσεων (Pareto) που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση για επιλογή μίας λύσης. Η επιλογή γίνεται συνήθως βάσει προκαθορισμένων κριτηρίων επάρκειας του προς σχεδίαση συστήματος. Οι προσεγγίσεις του multi-objective optimization συγκρίνονται ως προς την ποιότητα του αποτελέσματος, την ταχύτητα επίλυσης και την ανάγκη ή όχι για αρχική συνθήκη κατά τον σχεδιασμό.

Οι μέθοδοι αυτοί έχουν σημαντικούς περιορισμούς και σημεία ευαισθησίας που ενώ δίνουν μια πρώτη αποτύπωση του προς σχεδίαση συστήματος, αλληλεπιδρούν με τον σχεδιαστή και στηρίζονται στην εμπειρία του για την επιλογή, διερεύνηση και διάταξη των τεχνολογιών που θα δομήσουν το σύστημα. Το συμπέρασμα αυτό ενέχει δύο κινδύνους: ο πρώτος είναι η περιορισμένη εφαρμοστικότητα τους εξαιτίας αυτού, καθώς χρήστες χωρίς μεγάλη μηχανολογική εμπειρία δεν μπορούν να τα χρησιμοποιήσουν με ακρίβεια, και δεύτερον τα περιθώρια επιλογής ημί-βέλτιστης λύσης είναι αυξημένα εξαιτίας της πολυπλοκότητας. Ένα επιπλέον σημείο που κατά την κρίση του συγγραφέα λείπει από τα διαθέσιμα εργαλεία, είναι η αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος ως ενιαία μηχανολογική ή υδραυλική διάταξη. Εργαλεία που προτείνουν τεχνολογίες κάλυψης αναγκών, αφήνουν τον σχεδιαστή να επιλέξει τον τρόπο διασύνδεσής τους, το ποσοστό υβριδικότητας του συστήματος του, ενώ προσφέρουν συνήθως πληροφορία μόνο για την εγκατεστημένη ισχύ. Όμως, η δυσκολία συνδυασμού των τεχνολογιών αυτών, ιδιαίτερα σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που είναι διαλειπτά και πολύπλοκα κατά την λειτουργία, είναι σημαντικό εμπόδιο προς την ολοκληρωμένη πρόταση σχεδίου κάλυψης αναγκών.

Η απουσία αυτή ήταν και ένα από τα σημαντικότερα ερευνητικά κενά που προσπάθησε να καλύψει η παρούσα διατριβή. Με την εισαγωγή μιας ενιαίας, ολιστικής, καθολικής και μαθηματικώς ορισμένης μεθοδολογίας (HDLM) έγινε προσπάθεια κάλυψης των κενών που δημιουργούν τα υφιστάμενα εργαλεία σχεδιασμού ΕΚ και πόσο μάλλον θερμικών ΕΚ. Η προσέγγιση της προτεινόμενης μεθοδολογίας εμπίπτει στα μοντέλα σχεδιασμού αρχιτεκτονικής bottom-up και προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει την αλληλεπίδραση του σχεδιαστή με το τελικό αποτέλεσμα προς αποφυγή προτεινόμενων ημί-βέλτιστων συστημάτων. Η μεθοδολογία εισάγει, ως μοναδικό στοιχείο στα εργαλεία σχεδιασμού ΕΚ, την ολοκληρωμένη υδραυλική αποτύπωση του προτεινόμενου συστήματος με αποτέλεσμα οποιοσδήποτε σχεδιαστής να μπορεί να παρέμβει και να αξιολογήσει τον σχεδιασμό, να τον προσεγγίσει μέσω θεωρίας ελέγχου και να κοστολογήσει τα επιμέρους απαραίτητα μέρη (βαλβίδες, μήκη σωληνώσεων, αισθητήρες, διατάξεις ασφαλείας κ.α.) (βλ. 5^ο και 6^ο Κεφάλαιο).

Ερευνητικό υποερώτημα 4: Πώς μπορεί να γίνει βιώσιμη μια θερμική ΕΚ, ποιοι είναι οι δείκτες που επιδρούν στη βιωσιμότητα και πώς η αποθήκευση ενέργειας επιδρά στη βιωσιμότητα των ΕΚ;

Οι θερμικές ΕΚ, όπως όλα τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής) κρίνονται βάσει της ποιότητας των υπηρεσιών ενέργειας που προσφέρουν. Στο 2^ο Κεφάλαιο ορίστηκαν τα κριτήρια βιωσιμότητας και προσεγγίστηκαν στο 5^ο Κεφάλαιο με τη μορφή σημαντικών δεικτών (KPIs). Οι συνηθέστεροι δείκτες είναι το κόστος της ενέργειας που προσφέρουν τα συστήματα αυτά (LCoE), ο ρυθμός απόσβεσης της επένδυσης του προτεινόμενου συστήματος (ή του εν λειτουργία) (ROI), η περίοδος αποπληρωμής (PP), η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης στα συστήματα αυτά (NPV), τα ποσά εκλυόμενων ρύπων και η εξάρτηση από συμβατικές πηγές. Σχεδιάζοντας συστήματα κάλυψης αναγκών για θερμικές ΕΚ, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η βιωσιμότητα του προτεινόμενου σεναρίου ως στοιχείο μείζονος σημασίας σε σύγκριση με τα συμβατικά σύστημα κάλυψης αναγκών (συμβατικών καυσίμων). Επομένως, το κόστος ενέργειας πρέπει να είναι ανταγωνιστικό, αν όχι φθηνότερο, των συμβατικών λύσεων, και τα αντίστοιχα οικονομικά στοιχεία να προσφέρουν μειωμένους χρόνους απόσβεσης.

Δείκτης βιωσιμότητας υψηλής σημασίας είναι και η ενεργειακή ασφάλεια. Αν γινόταν προσπάθεια ορισμού της ενεργειακής ασφάλειας στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, θα οριζόταν ως: το ποσοστό κάλυψης των αναγκών χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές. Επιλέγεται ο ορισμός αυτός καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η κάλυψη από ανανεώσιμες πηγές, τόσο μικρότερη είναι η εξάρτηση από συμβατικά συστήματα και επομένως τόσο μικρότερη η μεταβλητότητα του κόστους της ενέργειας που παρέχεται στην κοινότητα. Η μετάβαση όμως προς συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που καλύπτουν σε υψηλά ποσοστά (μέχρι και 100% των αναγκών) είναι σύνθετη. Αρχικά τα συστήματα αυτά παράγουν ενέργεια διαλειπτά και με χαμηλή αξιοπιστία ως προς την ποσότητα και τον χρόνο παραγωγής. Οι ανάγκες θέρμανσης και ψύξης όμως είναι αμετάβλητες στην διάρκεια του έτους (εκτός από μείωση του θερμοστάτη και χρήση ζεστού νερού συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, δεν υπάρχει άλλος τρόπος μετατόπισης των φορτίων) με αποτέλεσμα η παραγωγή να μην ταυτίζεται ως επί το πλείστον με την κατανάλωση.

Την εξομάλυνση του φαινομένου αυτού την προσφέρουν τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής (ή ψυκτικής ενέργειας). Ανάλογα με το είδος της αποθήκευσης (αισθητής ή λανθάνουσας) και τον χρονικό ορίζοντα αποθήκευσης (βραχυχρόνια ή μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας), τα συστήματα αυτά αποθηκεύουν την θερμική (ή ψυκτική) ενέργεια όταν υπάρχει διαθέσιμη παραγωγή και ανάλογα με το σύστημα διαχείρισης τους τροφοδοτούν τη ζήτηση όποτε αυτή προκύπτει. Υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των συστημάτων (βλ. 2^ο Κεφάλαιο) αυτών, και διαφοροποιείται ανάλογα η επίδραση που έχουν στην κάλυψη του φορτίου. Ανεξαρτήτως όμως των διαφορών τους, αυξάνουν σημαντικά τα ποσοστά διείσδυσης ανανεώσιμης ενέργειας στην κάλυψη φορτίου και

ανάλογα με την δυνατότητα αποθήκευσής τους μπορούν να καλύψουν ολόκληρο το φορτίο, με το ανάλογο πάντοτε κόστος εγκατάστασης.

Μια ακόμα παράμετρος της ενεργειακής ασφάλειας, είναι η διάταξη του συστήματος παραγωγής, η ύπαρξη υβριδικού ή συστήματος με μία μόνο τεχνολογία παραγωγής. Στη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής, έγινε κατανοητό ότι σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που χαρακτηρίζονται εγγενώς από χαμηλά ποσοστά αξιοπιστίας στην προσφορά ενέργειας (λόγω διαλειπτής παραγωγής), είναι απαραίτητη η χρήση περισσοτέρων της μίας τεχνολογίας παραγωγής. Επιπλέον τεχνολογία ή τεχνολογίες, είναι θεμιτό να εκμεταλλεύονται διαφορετικές πηγές ανανεώσιμης ενέργειας, έτσι ώστε αν η μια πηγή δεν είναι διαθέσιμη (απουσία ηλιοφάνειας λόγω συννεφιάς – αδυναμία χρήσης ηλιοθερμικών συλλεκτών) να υπάρχει η δυνατότητα κάλυψης του φορτίου από τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Ο συνδυασμός όμως κρίνεται πολύπλοκος καθώς η υβριδική λειτουργία και ο εντοπισμός της βέλτιστης διάταξης υβριδικών συστημάτων έχει πολλές μεταβλητές. Οι επιλογές διασύνδεσης των επιμέρους τεχνολογιών είναι είτε εν σειρά, είτε παράλληλα, είτε μικτά και η διαχείριση της διαθεσιμότητάς τους μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε από κεντρικό σύστημα έξυπνης διαχείρισης είτε από σύστημα αυτόματης υδραυλικής εξισορρόπησης.

Αν ληφθούν υπόψη και συστήματα αποθήκευσης, το πρόβλημα υβριδοποίησης αυξάνεται καθώς ο όγκος αποθήκευσης είναι πεπερασμένος (οι διατάξεις αυτές είναι είτε ενιαία δοχεία είτε πολλαπλά με ειδικές διαμορφώσεις διασύνδεσης μεταξύ τους) με αποτέλεσμα ακόμα και η διαχείριση της προς αποθήκευση ενέργειας να απαιτεί πρόβλεψη από τον σχεδιαστή. Σε περιπτώσεις δε, που οι αποθηκευτικοί όγκοι δεν είναι ενιαίοι αλλά αποτελούνται από πολλά δοχεία, η διασύνδεση μεταξύ τους είναι ιδιαίτερης σημασίας για τη λειτουργία του συστήματος. Επομένως, η αποθήκευση θερμικής (ή ψυκτικής) ενέργειας έχει ισχυρή αλληλεπίδραση στη βιωσιμότητα των ΕΚ καθώς επιτρέπει τελικά την εισχώρηση του βέλτιστου δυνατού ανανεώσιμου κλάσματος ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, που δυνητικά μπορεί να φτάσει και το 100% της κάλυψης.

Τα ερευνητικά υποερωτήματα (1-4) προσπάθησαν να απαντήσουν το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα και να καταδείξουν τα σημεία ενδιαφέροντος, τα σημεία βελτίωσης και ενδεχόμενης συνεισφοράς, αλλά και τα σημεία περαιτέρω έρευνας. Συνοψίζοντας, η απάντηση που δίνουν στο κεντρικό ερευνητικό ερώτημα που έχει τεθεί: «*Πώς επιδρούν οι διαφορετικές τεχνολογίες κάλυψης θερμικής ενέργειας στη ενεργειακή μετάβαση και πώς μεταβάλλουν τη βιωσιμότητα των τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων (LECs);*» είναι: Κατά την ανάλυση λειτουργίας συστημάτων με αποθήκευση θερμικής ενέργειας, σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, διαπιστώνεται ότι τα συστήματα αυτά προσφέρουν την επιθυμητή ενεργειακή ευελιξία (ενσωματώνοντας όσο το δυνατόν περισσότερες πηγές ενέργειας), ενεργειακή ασφάλεια (μέσω της εξομάλυνσης της διαλειπτής παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών) και συστημική σταθερότητα (προσφέροντας υδραυλική και ενεργειακή ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης). Με την προσφορά τους αυτή επιτρέπουν στον κτιριακό τομέα να μεταβεί ομαλά στην απεξάρτηση από συμβατικά καύσιμα και να ενισχύει την ενδυνάμωση των καταναλωτών σε θέματα ενεργειακής διαχείρισης. Απουσία των συστημάτων αποθήκευσης η παραγόμενη από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι χαμηλής αξιοπιστίας, γεγονός που εντείνει φαινόμενα υπερδιαστασιολόγησης και κατ' επέκταση αύξησης του σταθμισμένου κόστους ενέργειας. Μέσω αυτών οι ΕΚ μπορούν να εγκαθιδρυθούν στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη και να ανταλλάσουν ενέργεια είτε μεταξύ των παραγωγικών τους είτε με άλλες κοινότητες, ως ένα ενιαίο χρηματιστήριο ενέργειας. Χωρίς την αποθήκευση δεν είναι δυνατή η επαρκής και αξιόπιστη μετάβαση, πόσο μάλλον η δημιουργία ανταγωνιστικής για τις συμβατικές λύσεις, ενέργειας.

Στη συνέχεια αποδίδεται αναλυτικά η συνεισφορά της παρούσας διδακτορικής διατριβής τόσο σε επιστημονικό όσο και σε κοινωνικό επίπεδο.

Ερευνητική συνεισφορά διατριβής

Επιστημονική συνεισφορά

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, προκειμένου να απαντήσει στο κεντρικό ερευνητικό ερώτημα καθώς και στα υποερωτήματα, ανέπτυξε μία συστηματική μεθοδολογία σχεδιασμού θερμικών ΕΚ. Η μεθοδολογία αυτή (HDLM) ιεραρχήθηκε σε τρία διαδοχικά επίπεδα σχεδιασμού, που όπως περιεγράφηκαν αναλυτικά στο 5^ο και 6^ο Κεφάλαιο, χρησιμοποιούνται για την κατανόηση των αναγκών των παραγωγαναλωτών της δυνητικής ΕΚ (1^ο Επίπεδο), διαστασιολογούν και σχεδιάζουν ένα υβριδικό σύστημα που θα καλύψει τις ανάγκες τους βιώσιμα και τοπικά (2^ο Επίπεδο) και αξιολογούν την οικονομική βιωσιμότητα του (3^ο Επίπεδο). Το προτεινόμενο εργαλείο σχεδιασμού αποτελεί και την ερευνητική συνεισφορά της παρούσας διατριβής στο ερευνητικό κενό που εντοπίστηκε στο 2^ο Κεφάλαιο, την απουσία δηλαδή ενός ενιαίου, ολιστικού και ολοκληρωμένου εργαλείου σχεδιασμού θερμικών ΕΚ.

Το πρώτο σημαντικό σημείο επιστημονικής συνεισφοράς εντοπίζεται στο 1^ο Επίπεδο, όπου προτείνεται υβριδοποίηση δύο υφιστάμενων εργαλείων σχεδιασμού ΕΚ (της RenewIslands και της Kaya Identity Methodology). Με τον τρόπο αυτό αξιοποιούνται τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων ενώ αντισταθμίζονται τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν, όπως αυξημένη ασάφεια και απροσδιοριστία (ποιοτική RenewIslands) καθώς και αδυναμία συσχετισμού αποτελεσμάτων (Kaya Identity Methodology). Ο μαθηματικώς ορισμένος συνδυασμός τους αναδιαμορφώνει το τελικό αποτέλεσμα (όπως φάνηκε και στην εφαρμογή στη μελέτη περίπτωσης – 6^ο Κεφάλαιο). Σαφώς, τα αποτελέσματα αυτά πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω σε διαφορετικές περιπτώσεις με διαφορετικά μείγματα καταναλωτικών προφίλ και συμπεριφορών.

Το δεύτερο σημείο αυξημένου ενδιαφέροντος είναι η πρόταση του 2^{ου} Επιπέδου για χρήση πινάκων αληθείας στην προσέγγιση βελτιστοποίησης της διάταξης κάλυψης των θερμικών και ψυκτικών αναγκών. Αφενός, η χρήση πινάκων αληθείας κάνει παραδοχή ολικής και όχι μερικής λειτουργίας για τα συστήματα αυτά (κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό) και αφετέρου προσφέρεται στον σχεδιαστή η επιλογή του συνδυασμού λειτουργίας των επιλεγμένων τεχνολογιών. Παρά όμως τα χαρακτηριστικά αυτά, παρατηρείται σημαντική βελτίωση του χρόνου περάτωσης της διαδικασίας (σε σχέση με τα υφιστάμενα εργαλεία-λογισμικά σχεδιασμού) και η προσέγγιση εξετάζει όλα τα σενάρια υβριδισμού των επιλεγμένων τεχνολογιών επιλέγοντας τον καταλληλότερο συνδυασμό (πίνακες αληθείας – Quine-McClusky). Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής, ο καταλληλότερος συνδυασμός των τεχνολογιών παραγωγής και αποθήκευσης της ενέργειας, επεκτείνεται περαιτέρω μέσω λογικών πυλών, διαμορφώνοντας γράφους διαδικασίας (P-graphs). Το σημείο αυτό είναι από τις σημαντικότερες συνεισφορές της παρούσας διατριβής, καθώς χρησιμοποιώντας τις λογικές πύλες του γράφου διαδικασίας, προτείνεται το υδραυλικό ανάλογο κύκλωμα που συνδυάζει παραγωγή και αποθήκευση θερμικής και ψυκτικής ενέργειας.

Με την αποτύπωση του συστήματος ως υδραυλικό-μηχανολογικό ισοδύναμο, ο σχεδιασμός υπερδομών και πολύπλοκων συστημάτων βελτιώνεται και προσφέρεται μία νέα οπτική για τους μελετητές (επιπέδου informatics). Πλέον οι διορθώσεις, η εισαγωγή και άλλων μεταβλητών όπως ο έλεγχος (θεωρία ελέγχου) ή τα ηλεκτρολογικά συστήματα υποβοήθησης ενσωματώνονται ενιαία χωρίς αύξηση της υπολογιστικής ισχύος του αρχικού προβλήματος, βελτιώνοντας την συνολική διαδικασία του σχεδιασμού.

Κοινωνική συνεισφορά

Η προσφορά οικονομικής και τεχνικά εφικτής ενέργειας αποτελεί βασική προϋπόθεση στην προσπάθεια εισόδου εναλλακτικών συστημάτων κάλυψης ενεργειακών αναγκών, σε σύγκριση με τα ανάλογα συμβατικά συστήματα. Αυτός ήταν και ο σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Με την εκπονηθείσα έρευνα, διερευνήθηκαν στοιχεία ενεργειακής ασφάλειας και οικονομικής προσφοράς ενέργειας, μέσω της βελτίωσης των δομών που τα καλύπτουν (ενεργειακών συστημάτων). Υπό το πρίσμα αυτό αναπτύχθηκε και η προτεινόμενη μεθοδολογία (HDLM) που έχει ως σκοπό τον σχεδιασμό βιώσιμης λύσης ενεργειακού συστήματος κάλυψης θερμικών και ψυκτικών αναγκών. Ο σχεδιασμός αυτός επηρεάζει την κοινωνική δομή μέσω της προσφοράς: οικονομικής ενέργειας, σταθερής και συνεχούς κάλυψης των αναγκών και χαμηλού έως μηδενικού περιβαλλοντικού αντικτύπου. Σύμφωνα με τα δεδομένα της Παγκόσμιας Τράπεζας για τον γηράσκοντα πληθυσμό, που έχει περισσότερες θερμικές και ψυκτικές ανάγκες από τον μέσο καταναλωτή (>12%) αλλά είναι και περισσότερο ευάλωτος στα κύματα καύσωνα και ψύχους (φαινόμενα με παρατεταμένους καύσωνες ή ακραία χαμηλές θερμοκρασίες που από το 2015 και μετά εμφανίζονται όλο και συχνότερα), είναι απαραίτητη η προσφορά βιώσιμης ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών του.

Εκτός της συνεισφοράς σε επίπεδο σχεδιασμού μεμονωμένης ΕΚ, η διατριβή επηρεάζει και το συλλογικό ή περιφερειακό επίπεδο της κοινωνικής δομής. Μέσω της διευκόλυνσης σχεδιασμού ΕΚ που καλύπτουν τις θερμικές και ψυκτικές ανάγκες, ενδυναμώνονται οι περιφερειακές ενότητες καθώς δεν εξαρτώνται πλέον από κεντρικούς παρόχους ενέργειας. Διαφαίνεται ότι αναδιαμορφώνεται η κατανομή πλούτου σε κρατικό επίπεδο, καθώς τα κέρδη της διαφοράς χρήσης τοπικών συστημάτων κάλυψης αναγκών έναντι κεντρικών συστημάτων, μπορούν να αξιοποιηθούν τοπικά για την ανάπτυξη και βελτίωση των δομών της περιφέρειας, να αυξήσουν το μέσο εισόδημα των επενδυτών παραγωγαναλωτών, αυξάνοντας συνολικά την ποιότητα ζωής. Τα συμπεράσματα αυτά χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Επιπροσθέτως, η κάλυψη των αναγκών με ανανεώσιμες πηγές μειώνει σημαντικά τους ρύπους και την ατμοσφαιρική ρύπανση. Στις περιοχές όπως η Πτολεμαΐδα και η Κοζάνη που βρίσκονται μονάδες συγκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας, παρατηρείται εντατικοποίηση των ασθενειών αυτού του τύπου εξαιτίας της τοπικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Άλλο παράδειγμα αποτελούν περιοχές που χρησιμοποιούν το χειμώνα ως καύσιμη ύλη ξύλο (χωριά, μικρές πόλεις και ακριτικές περιοχές χαμηλών μέσων εισοδημάτων), που εξαιτίας του εκλυόμενου νέφους παρατηρείται αύξηση των περιστατικών άσθματος ιδιαίτερα σε παιδιά και ηλικιωμένους.

Ο μετασχηματισμός λοιπόν του υφιστάμενου ενεργειακού χάρτη σε τοπικές δομές όπως οι ΕΚ, θα βελτιώσει την ποιότητα ζωής, την τοπική οικονομία και θα ελαφρύνει το σύστημα υγείας με λιγότερα περιστατικά καρκίνων, ασθμάτων και συνολικών αναπνευστικών προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι πολίτες εξαιτίας των υφιστάμενων συστημάτων κάλυψης αναγκών.

Περιορισμοί και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η ενασχόληση του συγγραφέα με τα συστήματα κάλυψης ενεργειακών αναγκών κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής του διατριβής, προσέφερε μία ολιστική άποψη τόσο των σημείων που αναλύθηκαν αλλά και των περιορισμών που εντοπίζονται στη λειτουργία υβριδικών συστημάτων κάλυψης τοπικών θερμικών και ψυκτικών αναγκών. Η παρούσα ενότητα κάνει αναφορά στους συναφείς περιορισμούς ανά επίπεδο σχεδιασμού υβριδικών συστημάτων ενώ ταυτόχρονα προσφέρει προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Περιορισμοί και προτάσεις 1^{ου} Επιπέδου HDLM

Κατά την υβριδική προσέγγιση και συνδυασμό των υφιστάμενων μεθοδολογιών του 1^{ου} Επιπέδου (RenewIslands-Kaya Identity Methodology), αναπτύχθηκε μία αναλυτική μαθηματική διαδικασία μετάβασης από το ποσοτικό στο ποιοτικό. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν περιλάμβαναν την κατηγοριοποίηση των δεδομένων που προκύπταν από την KIM (k-means clustering), την κανονικοποίηση των δεδομένων, τον εντοπισμό της κατάλληλης στατιστικής κατανομής και τον σχεδιασμό των ανάλογων ασαφών τριγώνων. Επομένως, προτείνεται ο υπολογισμός του συνολικού συντελεστή εμπιστοσύνης του 1^{ου} Επιπέδου, για την διασφάλιση της εγκυρότητας του αποτελέσματος.

Στα επιμέρους βήματα, θα είχε σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον η διερεύνηση τόσο άλλων αλγορίθμων ομαδοποίησης, όσο και η λεπτομερής ανάλυση του k-means. Σε περιπτώσεις περισσότερων δεδομένων (παραγωγαναλωτών) η διερεύνηση των cluster που προκύπτουν, της επικάλυψής τους αλλά και του μέγιστου αριθμού δεδομένων που μπορούν να ομαδοποιηθούν μπορεί να προσφέρει νέα οπτική στη διαστασιολόγηση της κοινότητας. Οι άλλες επιλογές αλγορίθμων ομαδοποίησης πρέπει να λάβουν υπόψη την εφαρμογή (συστήματα ενέργειας-διαχείριση δεδομένων καταναλωτών) και θα μπορούσαν να είναι είτε π.χ. ο αλγόριθμος Agglomerative Hierarchy είτε ο Gaussian Mixture (σύμφωνα με την Εικόνα 5.1 έχουν τη μεγαλύτερη εγγύτητα σε εφαρμογή με την k-means). Στον εντοπισμό στατιστικής κατανομής, ο υπολογισμός των ροπών θα μπορούσε να γίνει σε περισσότερα επίπεδα. Στην παρούσα διατριβή υπολογίζονται μόνο οι πρώτες 4 ροπές, που είναι και οι απαραίτητες για τον προσδιορισμό του σχήματος της κατανομής ενώ ροπές υψηλότερου βαθμού δεν προσεγγίζονται. Ο υπολογισμός τους προσφέρει θεωρητικότερα αποτελέσματα από τις 4 πρώτες, που μπορούν όμως να βοηθήσουν στον ακριβέστερο προσδιορισμό της κατανομής. Τέλος, αξίζει να διερευνηθεί περαιτέρω η σχέση μεταξύ του σχήματος της κατανομής και της κατανομής των ασαφών συνόλων, καθώς ο συντελεστής εμπιστοσύνης μεταξύ τους δεν έχει διερευνηθεί ακόμα στην βιβλιογραφία και επομένως δεν υπάρχει το ανάλογο υπόβαθρο.

Περιορισμοί και προτάσεις 2^{ου} Επιπέδου HDLM

Η δομή του 2^{ου} Επιπέδου περιελάμβανε τη διερεύνηση του πρωτογενούς δυναμικού της περιοχής, την πολυκριτήρια ανάλυση των κριτηρίων επιλογής τεχνολογιών, την διάρθρωση του πίνακα αληθείας και του ανάλογου πίνακα Karnaugh, τον σχεδιασμό του P-graph και του υδραυλικού ισοδύναμου του ως τελική πρόταση υπερδομής για την κάλυψη των αναγκών. Σε επίπεδο πολυκριτήριας ανάλυσης, εξαιτίας της έλλειψης πρωτογενών δεδομένων αλλά και της ασάφειας που προσδίδουν τα υποκειμενικά βαθμονομημένα κριτήρια, η παρούσα διατριβή προσέγγισε την πολυκριτήρια ανάλυση με βιβλιογραφικά δεδομένα. Αξίζει περαιτέρω διερεύνηση της βαθμονόμησης των κριτηρίων και του ελέγχου αλληλεπίδρασής τους στην επιλογή τεχνολογίας ως κύκλος ανάδρασης, προκειμένου να εντοπιστεί το βέλτιστο μείγμα κριτηρίων καθώς και η καθολική ιεράρχησή τους βάσει σημαντικότητας.

Οι υφιστάμενοι πίνακες συνδεσιμότητας (Εικόνα 5.5) στα συστήματα υπερδομών, ανήχθησαν σε πίνακες αληθείας. Οι πίνακες αληθείας όμως μπορούν να έχουν διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με τις διαφορετικές επιλογές που κάνει ο σχεδιαστής στον συνδυασμό των τεχνολογιών. Θα ήταν δόκιμο να ερευνηθούν επιπλέον σενάρια συμπλήρωσης και ο αντίκτυπος που έχουν στον τελικό σχεδιασμό. Βάσει της εμπειρίας που αποκτήθηκε, αναμένεται να προκύψουν βέλτιστα μοτίβα σχεδιασμού, ανεξάρτητα με τις διαφορετικές σχεδιαστικές επιλογές. Επίσης, η προσέγγιση των πινάκων αληθείας λαμβάνει υπόψη μόνο τη λειτουργία των τεχνολογιών υπό πλήρες φορτίο. Σε υβριδικά συστήματα όμως, η λειτουργία του εξοπλισμού σπάνια είναι πλήρης. Φαινόμενα μερικής λειτουργίας και του συνδυασμού τεχνολογιών σε κατάσταση μερικής λειτουργίας αξίζει να διερευνηθούν ή

ακόμα και να ενσωματωθούν στους πίνακες αληθείας. Μία άποψη αυτών των πινάκων θα μπορούσε να είναι η συμπλήρωση υποπινάκων ανά συμπληρωμένη γραμμή του πίνακα, όπου θα συμπληρώνονται εμφωλιασμένοι πίνακες μερικής λειτουργίας σε διαφορετικά σενάρια. Το ίδιο πρόβλημα θα μπορούσε να αναχθεί επίσης σε πίνακες αληθείας ενσωματωμένους σε πίνακες σχεδιασμού δομών (Design Structure Matrices – DSM). Οι πίνακες αυτοί ομαδοποιούν με ορισμένο αλγόριθμο περιοχές του πίνακα που έχουν τη μεγαλύτερη αλληλεπίδραση και επομένως επηρεάζουν σημαντικότερα το σύστημα.

Τέλος, το προτεινόμενο τελικό υδραυλικό σύστημα ενσωματώνει τις τεχνολογίες που θα συνδυαστούν και θα καλύψουν το φορτίο. Τα σενάρια αυτά όμως δεν εξετάζονται στην τελική διάταξη καθώς θα έπρεπε να συμπεριληφθεί θεωρία ελέγχου και αυτοματισμών που θα αλληλοεπιδρούσαν με τη διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενέργειας και φορτίου προς εξυπηρέτηση. Αν σε αυτές τις μεταβλητές προστεθεί και η μεταβλητή του χρόνου με τη μορφή της πρόβλεψης παραγωγής και κατανάλωσης με ανάλογη διαχείριση των πόρων, τότε η πολυπλοκότητα του συστήματος είναι αρκετά αυξημένη και θα πρέπει να γίνει ενδελεχής ανασκόπηση επί αυτού.

Περιορισμοί και προτάσεις 3^{ου} Επιπέδου HDLM

Το τρίτο και τελευταίο επίπεδο σχεδιασμού αποτιμά οικονομικά το προτεινόμενο σενάριο κάλυψης των αναγκών. Στο επίπεδο αυτό χρησιμοποιούνται τόσο δείκτες χρηματοροής (CAPEX, OPEX) όσο και δείκτες οικονομικής απόδοσης (LCoE, NPV, ROI). Η περίπτωση του LCoE που ξεπερνά είτε το κόστος ενέργειας του συμβατικού ανάλογου, είτε κάποιου προκαθορισμένου ορίου, οδηγεί τον σχεδιαστή σε επαναξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος (ανάδραση με 2^ο Επίπεδο). Στην επαναξιολόγηση αυτή πρέπει να ληφθούν περιορισμοί όπως εδαφοκάλυψη, κόστους, παραγόμενης ενέργειας κ.α. και να επανεκτιμηθεί η διαθεσιμότητα πρωτογενούς δυναμικού, προκειμένου να μεταβληθεί το μείγμα εγκατεστημένης ισχύος. Οι περιπτώσεις αυτές δημιουργούν ένα κύκλο ανάδρασης με το τελικό χρηματοοικονομικό σενάριο, που συνεχώς διερευνά την οικονομικότερη λύση. Όμως, ζητήματα ενοικίασης γης, αλλαγή της αξίας, πληθωρισμός δεν ενσωματώνονται στην παρούσα μελέτη λόγω της αυξημένης υπολογιστικής τους απαίτησης.

Επίσης, η ενσωμάτωση των συστημάτων των ΕΚ στην νεοαφιχθείσα αγορά ενέργειας (χρηματιστήριο) δεν λαμβάνεται υπόψη λόγω απουσίας δεδομένων. Οι ΕΚ συμμετέχουν σε εμπορικό επίπεδο στην αγορά ενέργειας (κυρίως στη Μ. Βρετανία και την Ολλανδία) αναδιαμορφώνοντας συνεχώς τους οικονομικούς δείκτες απόδοσής τους, αναζητώντας την βέλτιστη τιμή πώλησης. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε ΕΚ ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν περίσσεια παραγωγής, διαθέσιμη για πώληση στο δίκτυο. Το σενάριο αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη καθολικού δικτύου τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης σε γεωγραφικό επίπεδο π.χ. εθνικό, περιφερειακό ή τοπικό, στο οποίο οι θερμικές ΕΚ θα μπορούν να διοχετεύσουν την περίσσεια ενέργειά τους. Ο ορισμός της περιπτώσεως ενέργειας όμως και της πώλησής της είναι λεπτό χρηματοοικονομικό σημείο, καθώς πέραν του προσωρινού κέρδους, σε ενδεχόμενο αδυναμίας κάλυψης των αναγκών της ΕΚ σε επόμενο χρονικό σημείο, η ΕΚ θα πρέπει να προμηθευτεί εξωτερικά ενέργεια πιθανότατα σε υψηλότερο κόστος. Όλοι αυτοί οι παράγοντες και η επίδραση τους στα χρηματοοικονομικά στοιχεία της ΕΚ αξίζει να διερευνηθούν περαιτέρω, ειδικά υπό το πρίσμα των διαφορετικών στόχων της κοινότητας (κοινωνικοί - προσφορά ενέργειας στα μέλη και στις γειτονικές ΕΚ, οικονομικοί - ιδιοκάλυψη των αναγκών στο χαμηλότερο δυνατό κόστος, τεχνολογικοί/τεχνικοί – κορεσμός συστήματος, ποσοστό του έτους που το σύστημα της ΕΚ είναι υπό μερική λειτουργία και πώς αυτό επηρεάζει τόσο τη λειτουργία όσο και το κόστος της ενέργειας).

Γενικοί περιορισμοί και προτάσεις

Η μετάβαση από το ένα βήμα στο επόμενο, στην προτεινόμενη μεθοδολογία HDLM, γίνεται με κάποια μαθηματική ακρίβεια, η οποία δεν συνυπολογίζεται στο τελικό αποτέλεσμα του επιπέδου. Επακριβώς, ενδεχόμενη απλοποίηση κάποιας αριθμητικής τιμής σε αρχικά στάδια μπορεί να διαδοθεί σε επόμενους υπολογισμούς οδηγώντας σε σφάλμα. Λόγω της συνθετότητας των υπολογισμών και της σχέσης μεταξύ τους στα επιμέρους βήματα, δεν γίνεται διερεύνηση των συντελεστών εμπιστοσύνης από το ένα βήμα στο επόμενο. Όλοι αυτοί οι μαθηματικοί φορμαλισμοί πραγματοποιούνται με κάποιον συντελεστή εμπιστοσύνης, που ο υπολογισμός του μπορεί να έχει επιρροή στην τελική αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου.

Σε γενικότερο πλαίσιο, τα συστήματα που αναλύθηκαν στην παρούσα διατριβή προσεγγίζονται και μέσω μοντέλων βελτιστοποίησης πολλών μεταβλητών. Η δημιουργία υβριδικού μοντέλου που να περιλαμβάνει τόσο την προτεινόμενη bottom-up αρχιτεκτονική όσο και τα κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα βελτιστοποίησης, θα αποτελούσε μία ακριβέστερη ανάλυση των συστημάτων, που θα αύξανε σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο της μεθοδολογίας.

Ένας επιπλέον περιορισμός, ο οποίος δεν αναλύθηκε διεξοδικά στην παρούσα διατριβή, αλλά έχει σημαντική επίδραση στη δημιουργία, αλληλεπίδραση και βιωσιμότητα των ΕΚ, είναι το νομοθετικό πλαίσιο. Στην Ελλάδα μόλις πρόσφατα θεσμοθετήθηκαν οι ΕΚ με τον νόμο 4513/2018, που επιτρέπει τον σχηματισμό και λειτουργία τους. Δεν υπάρχει όμως το νομικό πλαίσιο αλληλεπίδρασής τους με κεντρικά συστήματα όπως το δίκτυο, καθώς πρώτον δεν υπάρχουν οι υποδομές και δεύτερον το δίκτυο της Ελληνικής επικράτειας είναι κορεσμένο με αποτέλεσμα να μην επιτρέπει την εισχώρηση νέων παραγωγών (μείζον θέμα και στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών). Παρουσία ευνοϊκότερου νομικού πλαισίου, θα αναδιαμορφώνονταν ή θα εμποδίζονταν κάποια από τα σημεία που αναφέρθηκαν στη παρούσα διατριβή, με αποτέλεσμα να χρήζουν επαναδιατύπωσης.

Τέλος, οι οικονομικοί περιορισμοί αποτελούν σημαντικότερη παράμετρο κατά τον αρχικό σχηματισμό ΕΚ. Τα αρχικά κεφάλαια που θα διαθέσει η ΕΚ για την εγκατάσταση του προτεινόμενου συστήματος, στην παρούσα διατριβή θεωρούνται ότι χρηματοδοτούνται μερικώς από δημόσια κεφάλαια. Στην πραγματικότητα όμως, οι ΕΚ θα έπρεπε να επενδύσουν στο 100% του απαιτούμενου κεφαλαίου, καθώς δεν υπάρχει χρηματοδοτικός μηχανισμός σε εθνικό επίπεδο που να ενισχύει τον σχηματισμό τους. Το αυξημένο αυτό κόστος μειώνεται σταδιακά, καθώς επηρεάζεται κυρίως από το κόστος των επιλεγμένων τεχνολογιών. Η ερευνητική και εμπορική προσπάθεια που πραγματοποιείται εξομαλύνει σταδιακά το κόστος και πλησιάζει αυτό των συμβατικών συστημάτων. Όταν οι τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές για την παραγωγή θερμικής και ψυκτικής ενέργειας έχουν κόστος εγκατάστασης χαμηλότερο των συμβατικών, τότε η πρόσβαση σε αυτές τις τεχνολογίες θα γίνει ευκολότερη και τα επενδυτικά σχήματα θα αναδιαμορφωθούν αναλόγως.

Σύνοψη και τελευταία σχόλια

Με την βελτίωση της σχεδιαστικής διαδικασίας, την μείωση του χρόνου περάτωσης των αναλύσεων, την οικονομοτεχνική βελτιστοποίηση των συστημάτων κάλυψης αναγκών ΕΚ, η παρούσα διατριβή φιλοδοξεί να επιταχύνει την ενσωμάτωση των θερμικών ΕΚ στον υφιστάμενο ενεργειακό χάρτη. Η μεταβλητότητα των κοινωνικών ιστών εξαιτίας της ενεργειακής κρίσης προέρχεται κυρίως από την πολυσύνθετη διακρατική αλληλεπίδραση των διεθνών συμφωνιών. Αν οι ΕΚ αποτελούν μία προσπάθεια ανεξαρτητοποίησης των πολιτών από τις ευαίσθητες διακρατικές σχέσεις και στο πώς αυτές επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα ενέργειας, τότε σίγουρα αποτελούν έναν από τους φορείς αλλαγής της ενεργειακής αλλά και της περιβαλλοντικής κρίσης.

Η προσπάθεια της παρούσας διατριβής έχει τον εκδημοκρατισμό της ενέργειας, ως κεντρικό άξονα. Με την βελτίωση των εργαλείων σχεδιασμού, οι ΕΚ γίνονται περισσότερο βιώσιμες και λειτουργικές προσφέροντας ενεργειακή ασφάλεια και οικονομική ενέργεια σε σχέση με τις υφιστάμενες δομές. Αν η επιστημονική κοινότητα επιδιώκει συνεχώς τρόπους αποκέντρωσης της παραγόμενης ενέργειας στον ενεργειακό χάρτη, τελικά οι κοινωνικές δομές θα γίνουν σταθερότερες, με τους πολίτες στο κέντρο διαχείρισης και αποφάσεων. Ο ενεργειακός αυτός εκδημοκρατισμός ίσως τελικά εξυπηρετήσει όχι μόνο τοπικά την κοινότητα αλλά θα αναδιαμορφώσει και τα περιφερειακά, κρατικά και διεθνή συμφέροντα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Ι (Προκαταρκτική μελέτη Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας – ΚΑΠΕ για την περίπτωση των Κιμμερίων, Ξάνθης)

Η προκαταρκτική μελέτη γεωθερμίας για το κτίριο του εστιατορίου των εστιών του ΔΠΘ, είχε τεκμηριώσει τα πεδία των κατακόρυφων οπών της γεωθερμίας στα γειτονικά τμήματα των εν λόγω κτιρίων. Μετά από αυτοψία που πραγματοποιήθηκε διαπιστώθηκε ότι στα πεδία αυτά υπάρχουν υπόγειες σήραγγες οι οποίες εξυπηρετούν την υδραυλική και ηλεκτρική διασύνδεση των κτιρίων με το κεντρικό λεβητοστάσιο και κεντρικό τομέα παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνθήκη αυτή που επικρατούσε, είχε σαν αποτέλεσμα να γίνεται άμεσα αναγκαίο η μεταφορά των πεδίων αυτών σε γειτονικά διαθέσιμα πεδία ή σε συγκεντρωτικό πεδίο. Η λύση που επιλέχθηκε βασίστηκε στα κριτήρια της απόστασης από το κτίριο ενδιαφέροντος, τον διαθέσιμο χώρο, την απομάκρυνση του πεδίου από τις υπόγειες σήραγγες και της μορφολογίας που παρουσιάζει η ευρύτερη περιοχή του έργου. Κατά την διάρκεια ανόρυξης της πρώτης κατακόρυφης οπής στο εν λόγω πεδίο, διαπιστώθηκε η ακόλουθη στρωματογραφία των πετρωμάτων:

- 0 έως 70 μέτρα, αργιλικά πετρώματα με υψηλό ποσοστό υγρασίας,
- 70 έως 90 μέτρα, αποσαθρωμένα πετρώματα γρανίτη,
- 90 έως 105 μέτρα συμπαγής γρανίτης.

Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, τα τελευταία δυσχεραίνουν τη μεταφορά της θερμότητας σε σύγκριση με τα αργιλικά πετρώματα. Κατά συνέπεια, εξετάστηκε το σενάριο μείωσης του βάθους των οπών μέχρι τα 90 μέτρα διατηρώντας όμως τις αρχικές προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, εκπονήθηκε μία υπομελέτη έργου χρησιμοποιώντας την υπολογιστική ανάλυση EED (πρόγραμμα μελέτης γεωθερμικών εγκαταστάσεων) η οποία και απέδειξε ότι για να διατηρηθούν οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας όχι μόνον οι κατακόρυφες οπές θα πρέπει να αυξηθούν αλλά ταυτόχρονα να μειωθεί η διάμετρος του σωλήνα του γεωσυλλέκτη ώστε να δημιουργήσει τυρβώδη ροή στοχεύοντας στην άμεση μεταφορά της ενέργειας από και προς το έδαφος. Τα παραπάνω συμπεράσματα αποδεικνύονται στους αναλυτικούς υπολογισμούς που ακολουθούν κι επεξηγούν ότι οι μετατροπές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν λόγω ανάγκης στο συγκεκριμένο έργο, όχι μόνον δεν επηρεάζουν τις συνθήκες αλλά βελτιώνουν το συνολικό σύστημα.

Πίνακας Παραρτήματος Ι 1: Μέση θερμοκρασία γεωρευστού σύμφωνα με την αντίστοιχη μελέτη, για τα 25 έτη λειτουργίας του γεωθερμικού πεδίου.

Έτος	1	2	5	10	25
Ιανουάριος	18,66	13,39	13,46	13,46	13,41
Φεβρουάριος	18,66	13,85	13,9	13,88	13,83
Μάρτιος	18,66	14,23	14,25	14,22	14,18
Απρίλιος	18,66	16,29	16,23	16,21	16,17
Μάιος	18,66	17,37	17,28	17,29	17,25
Ιούνιος	18,66	18,05	18,11	18,15	18,1
Ιούλιος	18,66	27,68	28	28,05	28,01
Αύγουστος	18,66	27	27,41	27,46	27,42
Σεπτέμβριος	18,66	19,28	19,64	19,68	19,63
Οκτώβριος	18,06	18,49	18,78	18,8	18,76
Νοέμβριος	15,98	16,36	16,56	16,57	16,53
Δεκέμβριος	14,14	14,34	14,44	14,45	14,4

Παράρτημα II

Για τον σχεδιασμό του βέλτιστου δικτύου τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης, ακολουθείται η μεθοδολογία υπολογισμού ελάχιστης απόστασης μεταξύ κόμβων, πρόβλημα γνωστό ως πρόβλημα του «πλανόδιου πωλητή» (πρόβλημα κατά το οποίο κάποιος πλανόδιος πωλητής πρέπει να επισκεφθεί έναν ορισμένο αριθμό πόλεων που απέχουν συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους, ενέχουν ορισμένο κόστος μετακίνησης από την μια στην άλλη και ο πωλητής πρέπει να τις επισκεφθεί μόνο μια φορά χωρίς να ξαναγυρίσει σε κάποια προηγούμενη). Τα προβλήματα αυτά ανήκουν στον κλάδο των μαθηματικών της θεωρίας γράφων και αναφέρονται σε προβλήματα τα οποία έχουν ορισμένη τοπογραφική τοποθέτηση και οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι πεπερασμένες. Η επίλυση αυτών υπολογίζει την ελάχιστη διαδρομή που πρέπει να ακολουθηθεί από το σύστημα (πλανόδιο πωλητή στο παράδειγμα) προκειμένου να φτάσει σε όλους τους κόμβους (πόλεις στο παράδειγμα).

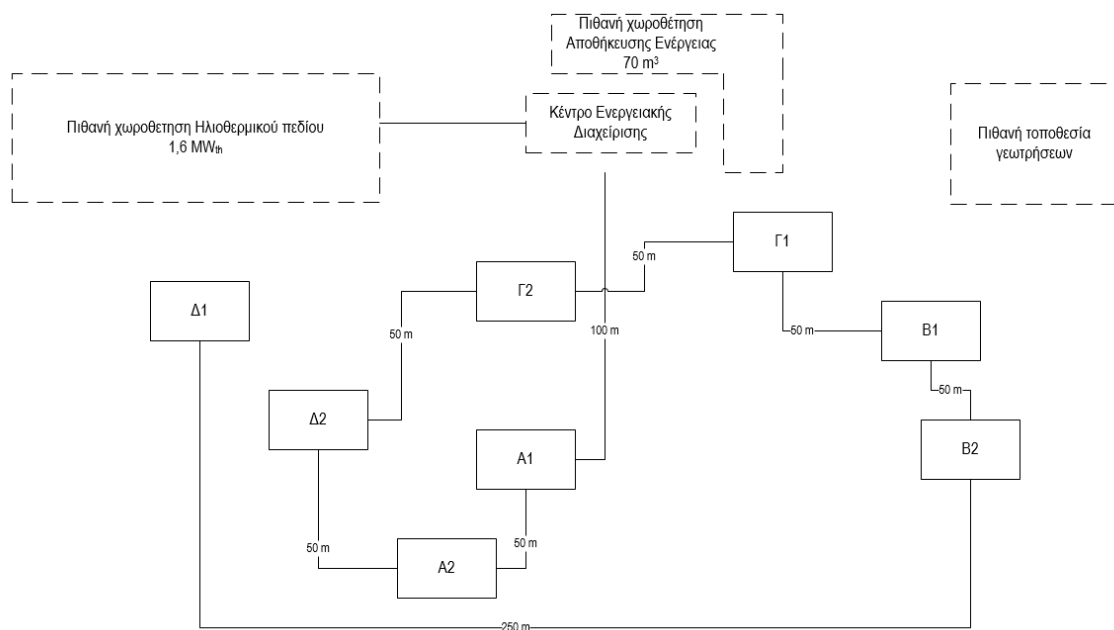
Η αναγωγή του προβλήματος αυτού στον σχεδιασμό δικτύων τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης (υπόγειων) μπορεί να προσφέρει την λύση i) με το μικρότερο δυνατό κόστος (το κόστος δικτύων αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση των μέτρων δικτύου) και ii) με τη μικρότερη δυνατή πτώση πίεσης. Τα κτίρια της Εικόνα 6. 25 παρουσιάζουν την προσεγγιστική τοπογραφία της διάταξής τους στην πραγματική μελέτη περίπτωσης. Αυτή η αποτύπωση των κτιρίων αποτελεί και τον κύκλο Χαμιλτον (Hamiltonian cycle) για το πρόβλημα, όπου ο Πίνακας Παραρτήματος II 1 παρουσιάζει τα βάρη (αποστάσεις) μεταξύ τους [68].

Πίνακας Παραρτήματος II 1: Αποστάσεις μεταξύ των κόμβων (κτιρίων) για τη περίπτωση της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων, Ξάνθης.

	A1	A2	B1	B2	Γ1	Γ2	Δ1	Δ2
A1	0	50	150	150	100	50	100	50
A2	50	0	200	250	200	100	100	50
B1	150	250	0	50	50	100	150	200
B2	200	250	50	0	100	150	250	200
Γ1	100	200	50	100	0	50	150	200
Γ2	50	100	100	150	50	0	50	50
Δ1	100	100	150	250	150	50	0	50
Δ2	50	50	200	200	200	50	50	0

Μέσω της επίλυσης του προβλήματος (περίπτωση προβλήματος Knapsack μη γραμμικής πολυπλοκότητας), το βέλτιστο μονοπάτι μεταξύ των κτιρίων είναι το [69]:

A1 → A2 → Δ2 → Γ2 → Γ1 → B1 → B2 → Δ1



Εικόνα 6. 25: Μονογραμμική απεικόνιση της προτεινόμενης όδευσης του δικτύου τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης για την περίπτωση της δυνητικής ΕΚ των Κιμμερίων Ξάνθης.

Το δίκτυο αυτό έχει συνολικό μήκος 650 m και με την υπόθεση ότι η προσαγωγή προς τα κτίρια και η επιστροφή έχουν το ίδιο μήκος (δεν λαμβάνεται υπόψη περίπτωση δικτύου ανάστροφης επιστροφής – το τελευταίο σημείο που τροφοδοτείται επιστρέφει πρώτο στο δίκτυο κεντρικής παροχής) τότε το συνολικό μήκος του προτεινόμενου δικτύου τηλεθέρμανσης είναι 1300 m.

Παράρτημα III

Η ενεργειακή ανάλυση του προτεινόμενου συστήματος παρουσιάζεται στον Πίνακα Παραρτήματος III 1. Η ανάλυση στηρίζεται στις Εξ. I, και II του παρόντος παραρτήματος και έχει ως σκοπό τον ποσοτικό προσδιορισμό της μετατροπής των πρωτογενών ενεργειών σε ωφέλιμες θερμικές ή ψυκτικές, λαμβάνοντας υπόψη τα ενδιάμεσα συστήματα, όπως αντλίες κυκλοφορίας, εναλλάκτες θερμότητας, βαλβίδες διαφορετικών τύπων, απώλειες λόγω αγωγής ή συναγωγής στο γενικότερο κύκλωμα-δίκτυο τηλεθέρμανσης/τηλεψύξης [57,62–67]. Οι Εξ. I και II αποτυπώνουν το ισοζύγιο μάζας και το ισοζύγιο ενέργειας αντίστοιχα, που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή ανάλυση του προτεινόμενου συστήματος από την HDLM.

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0 \text{ (ισοζύγιο μάζας)} \quad (I)$$

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = 0 \text{ (ισοζύγιο ενέργειας)} \quad (II)$$

Πίνακας Παραρτήματος III 1: Ενεργειακή ανάλυση προτεινόμενου συστήματος σύμφωνα με τις Εξ. I και II.

Σύστημα	Βαθμός από- δοσης μετά- δοσης	MWh/y
Ηλιοθερμικοί συλλέκτες	0,85	3204,00
Κέρδη	0,05	160,20
Αποθήκευση	0,08	256,32
Μηχανική ενέργεια	1	17,50
κυκλοφορητής ηλιακού ρευστού	0,85	14,90
Δίκτυο μεταφοράς	0,95	14,15
Απώλειες	0,16	512,64
Εναλλάκτης θερμότητας	0,7	1883,95
Απώλειες	0,12	226,07
Μηχανική ενέργεια	1	18,03
κυκλοφορητής κύριου ρευστού	0,85	15,33
Δίκτυο μεταφοράς	0,95	14,56
Απώλειες	0,16	301,43
Αποθήκευση	0,88	1356,45
Απώλειες	0,08	108,52
Δίκτυο μεταφοράς	0,88	1247,93
Απώλειες	0,16	1037,57
Μηχανική ενέργεια	1	10,95
κυκλοφορητής κατανάλωσης	0,85	9,30
Μηχανική ενέργεια	1	4,12
Κοχλίας τροφοδοσίας	0,85	3,50
Αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε πελλετ	0,85	3,22
Λέβητας βιομάζας	0,93	960,00

Λέβητας βιομάζας	0,12	147,45
Μηχανική ενέργεια	1	3,89
Σύστημα τροφοδοσίας αέρα	0,8	3,50
Λέβητας βιομάζας	0,4	1,40
Απώλειες	0,07	1107,45
Δίκτυο μεταφοράς	1	1107,45
Μηχανική ενέργεια	1	3,70
κυκλοφορητής κύριου ρευστού	0,85	3,15
Απώλειες	0,16	930,25
Αποθήκευση	0,88	818,62
Δίκτυο μεταφοράς	0,92	786,04
Απώλειες	0,16	632,63
Μηχανική ενέργεια	0,85	10,95
Γεωεναλλάκτης	0,77	151,42
Μηχανική ενέργεια	1	3,70
κυκλοφορητής Γεωεναλλάκτη	0,85	3,15
Δίκτυο Γεωθερμικού ρευστού	0,08	151,42
Εναλλάκτης θερμότητας	1	151,42
Απώλειες	0,15	22,71
Μηχανική ενέργεια	1	2,64
κυκλοφορητής κύριου ρευστού	0,85	2,25
Αντλία θερμότητας	0,08	2,07
Αντλία θερμότητας	1	64,28
Απώλειες	0,18	53,00
Δίκτυο μεταφοράς	0,82	514,84
Μηχανική ενέργεια	1	66,17
κυκλοφορητής κύριου ρευστού	0,85	56,25
Απώλειες	0,16	82,37
Αποθήκευση	0,75	432,47
Δίκτυο μεταφοράς	0,92	430,78
Απώλειες	0,16	63,66
Μηχανική ενέργεια	0,85	10,95
κυκλοφορητής κατανάλωσης	0,85	9,30
Κατανάλωση	0,84	2464,75

Παράρτημα IV: Σύντομο Βιογραφικό Υποψηφίου στο πεδίο των δημοσιεύσεων (αρχείο ORCID)

Adamantios Papatsounis

<https://orcid.org/0000-0002-2815-594X>

- **Also known as**

-

A G Papatsounis

- **Other IDs**

-

[SciProfiles: 1142860](#) [Scopus Author ID: 57222036281](#)

Employment (1)

-

- **Demokriteio Panepistemio Thrakes: Xanthi, Xanthi, GR**

2020-06-13 to present | Researcher (Production Engineering and Management)

Employment

-

Source:Adamantios Papatsounis

Education and qualifications (1)

-

- **Democritus University of Thrace School of Engineering: Xanthi, GR**

2014-09-26 to 2019-11-08 | Production Engineer (Production engineering and management)

Education

-

Source:Adamantios Papatsounis

Works (6 of 6)

-

- **Improved Structural Local Thermal Energy Planning Based on Prosumer Profile: Part B*En-ergies***

2022-10-19 | journal-article

-

- DOI: [10.3390/en15207708](https://doi.org/10.3390/en15207708)

Source:Crossref

-

- **Improved Structural Local Thermal Energy Planning Based on Prosumer Profile: Part A*Applied Sciences***

2022-05-25 | journal-article

-

- DOI: [10.3390/app12115355](https://doi.org/10.3390/app12115355)

Source:Crossref

-

- **Operation assessment of a hybrid solar-biomass energy system with absorption refrigeration scenarios*Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects***

2022-03-14 | journal-article

- - DOI: [10.1080/15567036.2022.2049929](https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2049929)
 - Part of ISSN: [1556-7036](https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2049929)
 - Part of ISSN: [1556-7230](https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2049929)

Source:Adamantios Papatsounis

- - **Thermal/Cooling Energy on Local Energy Communities: A Critical Review***Energies*

2022-02-02 | journal-article

- - DOI: [10.3390/en15031117](https://doi.org/10.3390/en15031117)
 - Part of ISSN: [1996-1073](https://doi.org/10.3390/en15031117)

Source:Adamantios Papatsounis

- - **Developing a Business Case for a Renewable Energy Community in a Public Housing Settlement in Greece—The Case of a Student Housing and Its Challenges, Prospects and Barriers***Sustainability*

2021-03 | journal-article

- - DOI: [10.3390/su13073792](https://doi.org/10.3390/su13073792)

Source:Multidisciplinary Digital Publishing Institute

- - **Preliminary Results for Detection Evaluation in Failure Modes and Effect Analysis Study: 600 kW Wind Turbine Case Study***Journal of Engineering Science and Technology Review*

2020-12 | journal-article

- - DOI: [10.25103/jestr.136.13](https://doi.org/10.25103/jestr.136.13)
 - Part of ISSN: [1791-9320](https://doi.org/10.25103/jestr.136.13)
 - Part of ISSN: [1791-2377](https://doi.org/10.25103/jestr.136.13)

Source:Adamantios Papatsounis

Record last modified Dec 23, 2022, 11:41:02 AM

(οπισθόφυλλο)