



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ**

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

Διπλωματική Εργασία

**“Ανάλυση λειτουργίας και μελέτη ευαισθησίας συγκεντρωτικού συλλέκτη
Fresnel σε συνδυασμό με θερμική αποθήκευση”**

Νικόλαος Τσιτσιμπάκος

A.M.: 2013050060

Εξεταστική Επιτροπή:

Κολοκοτσά Διονυσία (Επιβλέπουσα)

Τσούτσος Θεοχάρης

Λαζαρίδης Μιχαήλ

Χανιά, 2019

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Abstract	6
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	7
1.1 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	7
1.2 Ηλιακή ενέργεια	8
1.2.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία και ενέργεια.....	8
1.2.2 Συστήματα αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας	9
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο για τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ισχύος	11
2.1 Εισαγωγή και ανάλυση των διαφόρων τεχνολογιών	11
2.1.1 Τεχνολογίες Συγκέντρωσης Ηλιακής Ισχύος (CSP Technologies)	11
2.1.2 Σύγκριση τεχνολογιών CSP	14
2.1.3 Χρήσεις τεχνολογιών CSP	15
2.2 Linear Fresnel Reflectors.....	15
2.2.1 Ανάλυση τεχνολογίας.....	16
2.2.2 Εξιιώσεις λειτουργίας για LFR (Venezia, 2014)	22
2.3 Λογισμικό TRNSYS (Transient System Simulation Tool).....	28
2.3.1 Εισαγωγή στο λογισμικό TRNSYS.....	28
2.3.2 Simulation Studio	29
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία.....	30
3.1 Σκοπός της εργασίας.....	30
3.2 Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος LFR	30
3.3 Ανάλυση ευαισθησίας για τις διάφορες παραμέτρους	33
3.4 Εκτίμηση απόδοσης σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες	34
3.5 Σχηματική απεικόνιση μεθοδολογίας	37
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα προσομοίωσης	39
4.1 Ανάλυση ευαισθησίας για διάφορες παραμέτρους	39
4.1.1 Παράμετρος 1: Επιφάνεια συλλέκτη	41
4.1.2 Παράμετρος 2: Χωρητικότητα δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας.....	47
4.1.3 Παράμετρος 3: Διαστάσεις σωλήνα	54
4.1.4 Παράμετρος 4: Θερμικό ρευστό	60
4.2 Εκτίμηση απόδοσης σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες	64
Κεφάλαιο 5: Σχολιασμός αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.....	70
5.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.....	70

5.1.1 Θερμική ενέργεια	70
5.1.2 Θερμοκρασίες.....	72
5.2 Αποτελέσματα για απόδοση σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες	72
Βιβλιογραφία	75

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Διονυσία Κολοκοτσά για την καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Καμπέλη για τη βοήθειά που μου προσέφερε για να ολοκληρώσω την εργασία μου.

Τέλος, ευχαριστώ τον κύριο Θεοχάρη Τσούτσο και τον κύριο Μιχαήλ Λαζαρίδη για το χρόνο που αφιέρωσαν για τη μελέτη και την παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας.

“This project has received funding from the European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 645677”.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει στόχο την ανάλυση ευαισθησίας ενός συστήματος γραμμικών κατόπτρων Fresnel, το οποίο ανήκει στις τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ισχύος, για τον προσδιορισμό του βαθμού επιρροής διαφόρων παραμέτρων του συστήματος στην παραγόμενη θερμική ενέργεια και στις θερμοκρασίες σε διάφορα σημεία του συστήματος. Επιπλέον, εξετάζεται η απόδοση του συστήματος σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες, ώστε να προσδιοριστεί η βιωσιμότητα του συστήματος σε διάφορα κλίματα.

Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο έχει κατασκευαστεί στο στούντιο προσομοίωσης του λογισμικού TRNSYS (Transient Systems Simulation Tool). Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει ολόκληρο το σύστημα LFR, το οποίο είναι εγκατεστημένο στο Ινστιτούτο της Κύπρου.

Για την ανάλυση ευαισθησίας, εξετάζεται η επίδραση διαφόρων τιμών της επιφάνειας του συλλέκτη, της χωρητικότητας της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας, των διαστάσεων του σωλήνα μεταφοράς του ρευστού και του είδους του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στην παραγόμενη ενέργεια και στις θερμοκρασίες.

Για την εξέταση της απόδοσης του συστήματος σε διαφορετικά κλίματα, εισήχθησαν στο μοντέλο αρχεία καιρικών δεδομένων για τα Χανιά, το Μόναχο, τη Στοκχόλμη και το Πόρτο, πόλεις οι οποίες ανήκουν σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες σύμφωνα με την κλιματική ταξινόμηση Köppen. Τα αποτελέσματα τότε συγκρίνονται με δεδομένα για τις ετήσιες ανάγκες θέρμανσης των χώρων, ώστε να προσδιοριστεί εάν η εγκατάσταση συστήματος LFR θα ήταν συμφέρουσα.

Abstract

The present thesis' objective is the sensitivity analysis of a Linear Fresnel Reflector (LFR) system, which is one of the concentrated solar power technologies. The goal of this analysis is to determine the extent at which different parameters affect the thermal energy output and the temperatures of the system. Moreover, the performance of this system in different climate classes will be examined, in order for its viability in such climates to be assessed.

The model being used was constructed in the Simulation Studio of the TRNSYS (Transient Systems Simulation Tool). This model simulates the entire LFR system, which is installed at the Cyprus Institute in Nicosia.

For the sensitivity analysis to be performed, the effect that the area of the reflector, the volume of the thermal storage tank, the size of the pipes and the heat transfer fluid itself had on the thermal energy output and the temperatures was examined.

For the capacity of the system to perform in different climates to be assessed, weather files containing weather data for Chania, Munich, Stockholm and Porto were inserted in the model. All the above mentioned cities belong to different climate classes according to the Köppen climate classification. The results are then compared to annual thermal energy needs data for these cities, so as to deduce whether installing an LFR system there would be beneficial.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά σε εισαγωγικές πληροφορίες όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την ηλιακή ακτινοβολία και τις διάφορες κατηγορίες τεχνολογίας που την αξιοποιούν.

1.1 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι πηγές, “οι οποίες είναι ανεξάντλητες σε χρονικούς όρους της ανθρώπινης ζωής” (Kaltschmitt et al, 2007). Ένας ακόμη ορισμός των ΑΠΕ τις περιγράφει ως τις “πηγές ενέργειας που αναπληρώνονται με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο καταναλώνονται” (Boyle et al, 2004).

Σήμερα, σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, οι πηγές που χαρακτηρίζονται και επίσημα ως ανανεώσιμες είναι οι εξής (Tsoutsos, 2013):

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Γεωθερμία
- Βιομάζα
- Υδροηλεκτρική ενέργεια
- Ενέργεια των κυμάτων και της παλίρροιας
- Εκλυόμενα αέρια σε ΧΥΤΑ ή σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων

Στις ΑΠΕ δεν συμπεριλαμβάνεται η πυρηνική ενέργεια, καθώς χρησιμοποιεί ως καύσιμο το ουράνιο ή το πλουτώνιο, τα οποία αποτελούν ορυκτά καύσιμα. Το ίδιο ισχύει και για τις κυψέλες υδρογόνου (fuel cells), οι οποίες μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, καθώς συνήθως η λειτουργία τους απαιτεί την καύση ορυκτών καυσίμων.

Μία συνήθης παρανόηση είναι πως οι ΑΠΕ δεν έχουν καμία απολύτως αρνητική επίπτωση στο περιβάλλον. Αυτό είναι αναληθές, αν και οι επιπτώσεις τους σε σχέση με αυτές των συμβατικών μορφών παραγωγής ενέργειας φαντάζουν αμελητέες. Μερικές από τις επιπτώσεις αυτές είναι

η μεγάλη κάλυψη γης, η κατανάλωση νερού, τα υπολείμματα και οι επιβαρύνσεις από την κατασκευή, οι καθιζήσεις και η προσβολή της αισθητικής.

1.2 Ηλιακή ενέργεια

Ο ήλιος αποτελεί εδώ και χιλιετίες πηγή ενέργειας για τους ανθρώπους, ακόμη και για τους πιο πρώιμους πολιτισμούς, οι οποίοι χρησιμοποιούσαν την ενέργεια που τους παρείχε για θέρμανση και παραγωγή τροφής. Με την πάροδο των αιώνων και με τη βοήθεια της ραγδαία αναπτυσσόμενης τεχνολογίας, οι άνθρωποι ανέπτυξαν τεχνολογίες για τη συλλογή της ηλιακής ενέργειας και τη χρήση της για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρισμού.

1.2.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ακτινοβολία και ενέργεια

Από τον Ήλιο εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, το φάσμα της οποίας εκτείνεται ανάμεσα σε μήκη κύματος 0,3-2,5 μm και μπορεί να διαχωριστεί σε τρία διαφορετικά είδη ακτινοβολίας ή, αλλιώς, σε τρεις περιοχές:

1. Την περιοχή της υπεριώδους (ultraviolet – UV) ακτινοβολίας ($\lambda < 0,4 \mu\text{m}$)
2. Την περιοχή της ορατής ακτινοβολίας ($0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,7 \mu\text{m}$)
3. Την περιοχή της υπέρυθρης (infrared - IR) ακτινοβολίας ($0,7 \mu\text{m} < \lambda$)

Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελεί περίπου το 7% του συνόλου της εκπεμπόμενης από τον Ήλιο ακτινοβολίας, ενώ η ορατή ακτινοβολία αποτελεί το 46% και η υπέρυθρη το 47%. Η υπεριώδης και η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι και οι δύο αόρατες και συνεπώς δεν γίνονται οπτικά αντιληπτές από τον άνθρωπο. Ωστόσο, η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι αυτή που ευθύνεται για την αίσθηση της θερμότητας που προκαλεί το φως του ηλίου. Η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται σε μήκη κύματος 0,5 – 0,6 μm , δηλαδή εντός των ορίων της περιοχής της ορατής ακτινοβολίας.

Μέρος της ακτινοβολίας (περίπου το 23%) απορροφάται από το στρώμα του όζοντος που περιβάλλει τη Γη. Επιπλέον, ένα ποσοστό της ακτινοβολίας (περίπου το 29%) που διαπερνά την ατμόσφαιρα της Γης ανακλάται πίσω στο διάστημα. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα μόνο περίπου το 48% να παραμένει εντός της ατμόσφαιρας και να απορροφάται στην επιφάνεια.

1.2.2 Συστήματα αξιοποίησης ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του συνόλου των ΑΠΕ και είναι, στο σύνολό της, πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Τα ηλιακά συστήματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, τα φωτοβολταϊκά, τα ηλιοθερμικά και τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

- **Φωτοβολταϊκά συστήματα**

Τα συστήματα αυτά λειτουργούν βάσει του φωτοβολταϊκού ή φωτοηλεκτρικού φαινομένου, το οποίο ανακαλύφθηκε το 1839 από το Γάλλο φυσικό Έντμοντ Μπεκερέλ και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στη βιομηχανία το 1954. Η αρχή του φαινομένου είναι πως δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα όταν μετατοπίζονται ηλεκτρόνια. Για να συμβεί αυτό, τα φωτόνια πρέπει να διεγείρουν τα εξωτερικά ηλεκτρόνια των ατόμων κάποιου στοιχείου, το οποίο αποτελεί ημιαγωγό. Πρακτικά, το φως το οποίο προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό από έναν ημιαγωγό, ο οποίος συνήθως είναι το πυρίτιο. Ένα φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελείται από πολλά τέτοια στοιχεία, τα οποία παράγουν συνεχόμενο ρεύμα, το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο μέσω ενός εναλλάκτη.

- **Ηλιοθερμικά/Θερμοηλεκτρικά συστήματα (Ενεργητικά ηλιακά συστήματα)**

Στη δεύτερη αυτή κατηγορία ανήκουν τεχνολογίες, οι οποίες συλλέγουν τη θερμότητα που προέρχεται από τον ήλιο. Η θερμότητα αυτή είτε αξιοποιείται άμεσα για θέρμανση (Low-temperature Solar Thermal) είτε συγκεντρώνεται, μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και, εν συνεχεία, σε ηλεκτρισμό (Concentrated Solar Power – CSP).

Στην πρώτη περίπτωση, ο συλλέκτης απορροφά τη θερμότητα και τη μεταφέρει στο αντίστοιχο θερμικό ρευστό, το οποίο με τη σειρά του τη μεταφέρει στην περιοχή προς θέρμανση. Συχνότερα χρησιμοποιούνται επίπεδοι συλλέκτες, οι οποίοι λειτουργούν σε θερμοκρασίες μικρότερες των 100°C.

Στη δεύτερη περίπτωση, ο συλλέκτης συγκεντρώνει τις ακτίνες του ηλίου για τη θέρμανση ενός θερμικού ρευστού (π.χ. πετρέλαιο, βενζίνη, τετηγμένο άλας), το οποίο θερμαίνει ένα δίκτυο

νερού σε υψηλές θερμοκρασίες, μεγαλύτερες από το σημείο βρασμού του. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ατμός, ο οποίος κινεί μια τουρμπίνα (ατμοστρόβιλο), παράγοντας έτσι ηλεκτρισμό. Συνήθως απαντάται και κάποια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας, η οποία καθιστά δυνατή τη χρήση της και σε ώρες περιορισμένης ή μηδενικής ακτινοβολίας. Αυτές οι τεχνολογίες απαντώνται συνήθως υπό τη μορφή μεγάλων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου επίπεδοι ή κυρτοί καθρέπτες εγκαθίστανται πάνω από τεράστιες εκτάσεις. Η χρήση τέτοιων συστημάτων συνιστάται κυρίως για περιοχές, όπου επικρατεί έντονη ηλιοφάνεια.

- **Παθητικά ηλιακά συστήματα**

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης χρησιμοποιούνται σε κτίρια, με σκοπό την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για τη θέρμανση των χώρων καθώς και για παροχή φυσικού φωτισμού κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μέσω αυτών η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται και αποθηκεύεται υπό τη μορφή θερμότητας, η οποία εν συνεχεία διανέμεται στους διάφορους χώρους προς θέρμανση.

Η λειτουργία των συστημάτων αυτών βασίζεται στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στο χώρο μέσω διαφανούς υλικού, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις είναι γυαλί. Στη συνέχεια, η προκύπτουσα θερμότητα εγκλωβίζεται στο εσωτερικό του κτιρίου με αποτέλεσμα τη θέρμανση του χώρου. Τα παθητικά συστήματα συνιστάται να εγκαθίστανται με νότιο προσανατολισμό, ούτως ώστε να προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία στα ανοίγματα κατά τη μεγαλύτερο μέρος της ημέρας τη χειμερινή περίοδο.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο για τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ισχύος

2.1 Εισαγωγή και ανάλυση των διαφόρων τεχνολογιών

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά σε όλες τις τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ισχύος, οι οποίες χρησιμοποιούνται σήμερα. Θα αναλυθούν οι διαφορές που παρουσιάζουν μεταξύ τους και θα σχολιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μίας.

2.1.1 Τεχνολογίες Συγκέντρωσης Ηλιακής Ισχύος (CSP Technologies)

Οι τεχνολογίες αυτές ανήκουν όλες στην ευρύτερη κατηγορία των ηλιοθερμικών/θερμοηλεκτρικών συστημάτων, καθώς όλες αξιοποιούν τη θερμότητα που προκύπτει από την ηλιακή ακτινοβολία είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε για την αποθήκευση της θερμότητας αυτής για θέρμανση ή ψύξη. Οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι κάνουν χρήση κάποιου συστήματος ανακλαστικής επιφάνειας για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, πριν αυτή οδηγηθεί στο συλλέκτη. Ωστόσο, παρουσιάζουν ένα πολύ σοβαρό μειονέκτημα, καθώς δύνανται να αξιοποιήσουν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Direct Normal Irradiation – DNI) και όχι την διάχυτη. Αυτό περιορίζει τις περιοχές στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς, καθώς αυτές πρέπει να έχουν χαμηλά επίπεδα νέφους και σκόνης, αλλά και υψηλό ποσοστό ηλιοφάνειας ετησίως (Cirocco et al., 2014), Επιπλέον, έχει συζητηθεί πως το κατώτατο όριο ετήσιας άμεσης ακτινοβολίας για αποδοτική χρήση των τεχνολογιών αυτών είναι 2000 kWh/m². Περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν τιμές που ανέρχονται στις 2800 kWh/m² θεωρούνται ιδανικές τοποθεσίες (Hoffschmidt et al., 2012).

Οι διάφορες κατηγορίες τεχνολογιών συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας αποτελούνται από τα εξής βασικά τμήματα: τον συγκεντρωτή ακτινοβολίας (concentrator), τον λήπτη της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας (receiver), το θερμικό ρευστό (heat-transfer fluid), τη δεξαμενή αποθήκευσης (thermal storage tank) και τη μονάδα μετατροπής ισχύος (power conversion unit). Οι βασικοί τύποι τεχνολογιών που ανήκουν στην παραπάνω κατηγορία αναλύονται στη συνέχεια.

- **Συστήματα παραβολικών κατόπτρων εστιακής γραμμής (Parabolic trough mirror reflectors)**

Θεωρείται σήμερα η πιο ώριμη και αξιόπιστη από τις θερμοηλεκτρικές τεχνολογίες, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ, η οποία ξεπερνάει τα 500MW παγκοσμίως. Ο συγκεντρωτής είναι το κάτοπτρο παραβολικού σχήματος και ο λήπτης είναι ο σωλήνας απορρόφησης (absorber) στον οποίο καταλήγει το εστιασμένο φως. Τα κάτοπτρα είναι επενδυμένα με ανακλαστικό υλικό (συνήθως μεταλλικά φύλλα ή καθρέπτης γυαλιού), είναι πάντα τοποθετημένα σε διεύθυνση Βορράς – Νότος και συνήθως διαθέτουν μονοαξονικό σύστημα παρακολούθησης του ηλίου (single-axis tracking). Οι σωλήνες απορρόφησης είναι συνήθως κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα και περιβάλλονται από αερόκενο σωλήνα γυαλιού, σκοπός του οποίου είναι η ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών. Σε θερμοκρασίες της τάξεως των 400°C η απορρόφηση φτάνει μέχρι και το 95%. Το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο θερμικό ρευστό σήμερα είναι το συνθετικό θερμικό λάδι.

- **Συστήματα εστιακής γραμμής τύπου Fresnel (Linear Fresnel Reflectors – LFR)**

Πολύ παρόμοια σε λειτουργία με τα συστήματα παραβολικών κατόπτρων, καθώς και αυτά ανακλούν την ακτινοβολία και τη συγκεντρώνουν σε μία εστιακή γραμμή, η οποία καταλήγει στον απορροφητή. Η μία βασική διαφοροποίηση είναι το σχήμα του κατόπτρου, το οποίο δεν είναι παραβολικό, αλλά επίπεδο. Τα κάτοπτρα αυτά ακολουθούν την πορεία του ηλίου και μπορούν να περιστραφούν γύρω από τον άξονά τους, είτε ομαδικά είτε το καθένα ξεχωριστά. Για να συμβεί αυτό απαιτείται ένα πιο πολύπλοκο σύστημα ελέγχου από αυτό που χρησιμοποιείται στα παραβολικά κάτοπτρα. Το σύνολο των χρησιμοποιούμενων κατόπτρων λειτουργούν σαν ένας φακός Fresnel, ο οποίος, μιμούμενος το παραβολικό σχήμα, συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία σε μία εστιακή γραμμή που καταλήγει στο υπερυψωμένο μέσο απορρόφησης. Η συνέχεια είναι παρόμοια με τα παραβολικά συστήματα, με το θερμικό υγρό να θερμαίνεται από το μέσο απορρόφησης και να δημιουργείται κορεσμένος ατμός για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εναλλακτικά, η θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί σε θερμική δεξαμενή για μετέπειτα χρήση. Τα συστήματα τύπου Fresnel έχουν σε γενικές γραμμές χαμηλότερη οπτική ποιότητα και θερμική απόδοση από τα αντίστοιχα συστήματα παραβολικών κατόπτρων, καθώς επηρεάζονται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από τη γωνία πρόσπτωσης της

ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, παρουσιάζουν ταυτόχρονα μειωμένο κόστος, καθώς στην περίπτωση των παραβολικών κατόπτρων ένας σημαντικός παράγοντας που αυξάνει το κόστος είναι η διεργασία σχηματισμού παραβολικών κατασκευών από γυαλί, κάτι το οποίο δεν απαιτείται για τα συστήματα Fresnel.

- **Συστήματα ηλιακού πύργου (Solar tower)**

Στην τεχνολογία αυτή χρησιμοποιούνται συστήματα επίπεδων ηλιοστατικών καθρεπτών μεγάλης επιφάνειας (συνήθως μεγαλύτερης των 100m^2), οι οποίοι τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να σχηματίζουν παραβολική διάταξη. Οι καθρέπτες παρακολουθούν την τροχιά του ηλίου σε διαξονικό σύστημα και ανακλούν την ακτινοβολία, συγκεντρώνοντάς την σε έναν λήπτη (receiver), ο οποίος είναι τοποθετημένος στην κορυφή ενός πύργου. Η θερμοκρασία του λήπτη αυξάνεται μέχρι και τους 1000°C . Εν συνεχεία, η θερμότητα μεταφέρεται σε μία θερμική μηχανή, η οποία συνήθως χρησιμοποιεί ως μέσο λειτουργίας τον ατμό, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

- **Συστήματα παραβολικού πιάτου εστιακού σημείου (Parabolic Dish Stirling)**

Τα συστήματα αυτά συνίστανται από ένα παραβολικό κάτοπτρο, το οποίο λειτουργεί ως συγκεντρωτής, έναν δέκτη τοποθετημένο στο εστιακό σημείο του κατόπτρου και μία θερμική μηχανή Stirling με ενσωματωμένη γεννήτρια ηλεκτρισμού. Το κάτοπτρο έχει διαξονικό σύστημα παρακολούθησης του ηλίου. Το χρησιμοποιούμενο ρευστό (σχεδόν πάντα αέριο) θερμαίνεται στους $250\text{-}700^\circ\text{C}$ και στη συνέχεια χρησιμοποιείται από τη μηχανή Stirling για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μηχανή Stirling είναι μια θερμική μηχανή, η οποία λειτουργεί με κυκλική συμπίεση και αποσυμπίεση του ρευστού σε διαφορετικές θερμοκρασίες, έτσι ώστε η θερμότητα να μετατραπεί σε μηχανικό έργο. Η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει υψηλή απόδοση μετατροπή ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια, της τάξης του 31-32%.



Εικόνα 2.1.1.1: Τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ισχύος: (α) Παραβολικό κάτοπτρο (β) LFR (γ) Παραβολικό πιάτο (δ) Ηλιακός πύργος (Πηγή: Renewable Energy Australia).

2.1.2 Σύγκριση τεχνολογιών CSP

	Παραβολικό Κάτοπτρο	Ηλιακός Πύργος	Παραβολικό Πιάτο Stirling	LFR
Τυπική ετήσια απόδοση	15%	17%	22%	11%
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	300-500	300-500	500-600	260-400
Κόστος λειτουργίας	Υψηλό	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό
Κόστος επένδυσης	Μέτριο	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό
Κάλυψη γης (m ² /kW)	2500-5000	5000-7000	8000-10000	2000-3500

Πίνακας 2.1.2.1: Σύγκριση τεχνολογιών συγκέντρωσης ηλιακής ισχύος.

Από τον παραπάνω πίνακα (SmartGems, 2014a), παρατηρούμε πως το παραβολικό κάτοπτρο έχει το μεγαλύτερο δυναμικό από όλες τις τεχνολογίες, καθώς βιβλιογραφικά παρουσιάζει και

τη μεγαλύτερη απόδοση. Τα LFR σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα έχει μικρότερο συντελεστή απόδοσης, κάτι που όμως αντισταθμίζεται από το αισθητά μικρότερο κόστος επένδυσης και λειτουργίας και την ευνοϊκότερη προς το περιβάλλον κάλυψη γης. Ο ηλιακός πύργος θα μπορούσε να θεωρηθεί συγκρίσιμος με το παραβολικό κάτοπτρο, ωστόσο αποτελεί μια αρκετά λιγότερο ώριμη και δοκιμασμένη τεχνολογία. Τέλος, το πιάτο Stirling είναι ένα σύστημα, του οποίου η χρήση βρίσκεται ακόμη σε πιλοτικό στάδιο, και η εγκατάστασή του εγκυμονεί ακόμη πολλά ρίσκα.

2.1.3 Χρήσεις τεχνολογιών CSP

Οι τεχνολογίες CSP βρίσκουν εφαρμογή με πολλούς διαφορετικούς τρόπους και για την εξυπηρέτηση διαφόρων σκοπών. Μερικές από τις χρήσεις αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Θέρμανση νερού για οικιακή χρήση ή ακόμη και για χρήση σε διάφορα ιδρύματα, όπως νοσοκομεία και εστίες πανεπιστημίων. Το ζεστό νερό είναι απαραίτητο στην καθημερινότητα για όλους τους ανθρώπους και το κόστος θέρμανσής του είναι υψηλό.
- Θέρμανση νερού για χρήση σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες. Πολλοί τομείς της βιομηχανίας απαιτούν τεράστιες ποσότητες νερού για να φέρουν εις πέρας τις διεργασίες παραγωγής και συντήρησης.
- Θέρμανση εσωτερικών χώρων κατά τη διάρκεια του χειμώνα.
- Ψύξη μέσω ψυκτών απορρόφησης, για κλιματισμό χώρων ή και για διατήρηση τροφίμων και φαρμάκων.
- Θέρμανση και ψύξη θερμοκηπίων. Τα φυτά και οι σοδειές στα θερμοκήπια μπορούν να ωφεληθούν σημαντικά από θέρμανση κατά τη διάρκεια της νύχτας και ψύξη κατά τη διάρκεια της ημέρας.

2.2 Linear Fresnel Reflectors

Τα συστήματα τέτοιου τύπου αποτελούνται κατά βάση από έναν ηλιακό συγκεντρωτή τύπου Fresnel, έναν αποδέκτη της συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, μία δεξαμενή αποθήκευσης της θερμότητας και μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση

μελετάται μόνο η παραγωγή και αποθήκευση θερμότητας και όχι η μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, από τη μελέτη έχει εξαιρεθεί η οποιαδήποτε χρήση του συστήματος για ψύξη.

Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα γραμμικών κατόπτρων Fresnel παρουσιάζουν μικρότερη αποδοτικότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ισχύος. Ωστόσο, χαρακτηρίζονται και από μικρότερο κόστος κατασκευής και συντήρησης, καθώς και από μικρότερη απαίτηση κάλυψης γης. Τα χαρακτηριστικά τους αυτά τα καθιστούν μία βιώσιμη επιλογή, παρ' όλα τα μειονεκτήματά τους. Η συνιστώμενη χρήση για LFR είναι σε εγκαταστάσεις υψηλού δυναμικού.



Εικόνα 1.2.1: Κάτοπτρα LFR στο Παλέρμο, Ιταλία (αριστερά) και στη Λευκωσία, Κύπρος (δεξιά) (Πηγή: SmartGems).

2.2.1 Ανάλυση τεχνολογίας

Η υπό μελέτη τεχνολογία της συγκεκριμένης εργασίας είναι το μοντέλο LF-11, το οποίο παράγεται από τη γερμανική εταιρία Industrial Solar. Παρακάτω αναλύονται εκτενέστερα τα διάφορα μέρη του συγκεκριμένου συστήματος.

- **Ηλιακός συγκεντρωτής/κάτοπτρο Fresnel**

Η τεχνολογία των γραμμικών κατόπτρων Fresnel οφείλει την ονομασία της στο φακό Fresnel, ο οποίος επινοήθηκε από τον Γάλλο φυσικό Augustin-Jean Fresnel για χρήση σε φάρους τον 18^ο αιώνα. Η αρχή λειτουργίας του φακού αυτού είναι η διάσπαση μίας συνεχούς επιφάνειας ενός τυπικού φακού σε μικρότερες επιφάνειες με ασυνέχειες μεταξύ τους. Αυτό επιτρέπει αισθητή

μείωση του πάχους και, συνεπώς, και του βάρους και του όγκου του φακού, κοστίζοντας όμως στην ποιότητα απεικόνισής του.

Με ανάλογο τρόπο, ένα γραμμικό κάτοπτρο Fresnel μπορεί να κατασκευαστεί ούτως ώστε να αντικαθιστά ένα παραβολικό κάτοπτρο, εστιάζοντας την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα επίπεδο παράλληλο με τη γεωμετρία του παραβολικού κατόπτρου. Η ακτινοβολία εστιάζεται σε μία εστιακή γραμμή και όχι σε ένα σημείο. Τα κάτοπτρα έχουν σύστημα παρακολούθησης της πορείας του ηλίου και μπορούν να περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους είτε ατομικά είτε ομαδικά.

Τα κάτοπτρα μπορούν να είναι επίπεδα ή και καμπύλα και, σε γενικές γραμμές, κατασκευάζονται από γυαλί με μεταλλική υποστήριξη. Η προσθήκη καμπυλότητας στο κάτοπτρο αυξάνει το ποσοστό συγκέντρωσης, αλλά αυξάνει το κόστος κατασκευής.

Στο μοντέλο LF-11, η κάθε μονάδα αποτελείται από 11 κάτοπτρα συνολικής επιφάνειας 22 m^2 , τα οποία είναι τοποθετημένα σε ύψος 0,5 m από το έδαφος. Ωστόσο, η συνολική επιφάνεια που καλύπτει το σύστημα με την εγκατάστασή του είναι μεγαλύτερη από αυτή των καθρεπτών, έχοντας μήκος 4,06 m και πλάτος 7,5 m. Συνεπώς, η επιφάνεια της μίας μονάδας είναι $30,45 \text{ m}^2$. Το ελάχιστο προτεινόμενο μήκος μίας γραμμής μονάδων είναι 32,5 m, δηλαδή 8 μονάδες σε σειρά. Το τυπικό μήκος είναι τα 65 μέτρα, ή 16 μονάδες σε σειρά (The Industrial Solar, 2011).

- **Αποδέκτης συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας**

Στον αποδέκτη αυτόν καταλήγει η ανακλώμενη, συγκεντρωμένη από τα κάτοπτρα ακτινοβολία. Αποτελείται από έναν ή και περισσότερους σωλήνες απορρόφησης, οι οποίοι περιέχουν το θερμικό ρευστό που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της θερμότητας. Οι σωλήνες αυτοί συνήθως περικλείονται από γυάλινο περίβλημα.

Η βασική μονάδα LF-11 της Industrial Solar χρησιμοποιεί έναν αποδέκτη με έναν σωλήνα απορρόφησης κενού με επιλεκτική επίστρωση, η οποία μειώνει σημαντικά τις θερμικές απώλειες του σωλήνα και αυξάνει δραματικά την απορρόφηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Το πλέον δημοφιλές υλικό που χρησιμοποιείται για τέτοιου είδους επιστρώσεις είναι το μαύρο χρώμιο. Επιπλέον, έχει εγκατασταθεί ένα δευτερεύον κάτοπτρο πάνω από τον σωλήνα απορρόφησης. Το κάτοπτρο αυτό ανακλά μέρος της ακτινοβολίας που καταλήγει σε

αυτό από τα κυρίως κάτοπτρα, η οποία, εν τέλει, καταλήγει και αυτή στον αποδέκτη. Η θερμότητα που παράγεται από την απορροφημένη ακτινοβολία χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τη θέρμανση του θερμικού ρευστού, το οποίο στο συγκεκριμένο σύστημα είναι θερμικό λάδι.



Εικόνα 2.2.1.1: Σωλήνας απορρόφησης με γυάλινο περίβλημα.

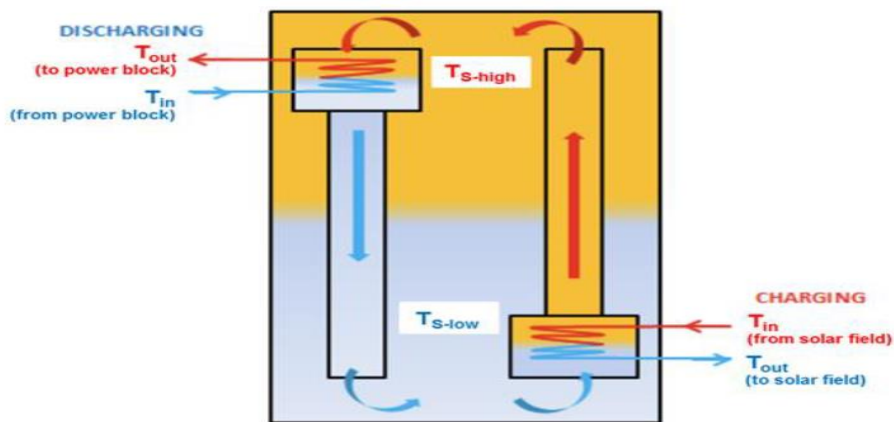
- **Αποθήκευση θερμότητας**

Η χρήση αποθήκευσης θερμικής ενέργειας στα συστήματα LFR εξασφαλίζει τη συνεχόμενη παραγωγή θερμικής ισχύος, αποθηκεύοντας ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμικό ρευστό στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας μέσω ενός εναλλάκτη. Επιπλέον, οι δεξαμενές συνήθως εξοπλίζονται με βαλβίδες εκτόνωσης για ασφάλεια σε περίπτωση υπερβολικής πίεσης.

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που συνήθως χρησιμοποιούνται σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας τεχνολογίας συγκέντρωσης ηλιακής ισχύος, λειτουργούν με ηλιακά/τετηγμένα άλατα (μίγμα NaNO_3 και KNO_3 60%-40% w/w) σε δύο δεξαμενές. Αυτές, σε περιπτώσεις που χρησιμοποιείται θερμικό λάδι ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας, είναι η ψυχρή δεξαμενή και η θερμή δεξαμενή, με συνηθέστερες θερμοκρασίες λειτουργίας τους 290°C και τους 385°C αντίστοιχα. Ωστόσο, σε μικρότερους σταθμούς (με δυναμικό μικρότερο του 1MW) είναι σχετικά δύσκολο να αναπαραχθεί ένα τόσο εξεζητημένο

σύστημα αποθήκευσης, κυρίως λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας, καθώς και της απαίτησης εξειδικευμένου προσωπικού για την ορθή διαχείριση των βρόχων των αλάτων.

Για τους παραπάνω λόγους, αναπτύχθηκε ένα καινοτόμο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, το οποίο είναι ιδανικό για χρήση σε σταθμούς μικρής κλίμακας. Η λειτουργία του βασίζεται στην ιδιότητα των μη αναμεμιγμένων αλάτων να διαχωρίζονται στον κατακόρυφο άξονα, ως αποτέλεσμα της χαμηλής θερμικής τους αγωγιμότητας και της διαφοροποίησης της πυκνότητάς τους συναρτήσει της θερμοκρασίας. Έτσι, δημιουργούνται δύο διαφορετικές θερμοκρασιακές ζώνες εντός της δεξαμενής, η ζώνη υψηλής θερμοκρασίας (πάνω) και η ζώνη χαμηλής θερμοκρασίας (κάτω). Ένας εναλλάκτης εγκαθίσταται στην κάθε ζώνη. Αυτός στην ψυχρή ζώνη χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της δεξαμενής από το θερμικό μέσο που προέρχεται από το ηλιακό πεδίο, ενώ αυτός στη θερμή ζώνη φροντίζει για την αποφόρτιση της δεξαμενής και την περαιτέρω χρήση της αποθηκευμένης θερμότητας για θέρμανση, ψύξη μέσω ψυκτών απορρόφησης, ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ατμοστροβίλου. Επιπλέον, η δεξαμενή είναι μονωμένη με στρώση πετροβάμβακα πάχους 20 cm.



Εικόνα 2.2.1.2: Δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας με δύο ζώνες θερμοκρασίας (Πηγή: SmartGems).

Μία εναλλακτική της αποθήκευσης θερμότητας σε δεξαμενή τετηγμένων αλάτων είναι η χρήση δεξαμενής νερού συμπιεσμένου με άζωτο. Στην περίπτωση αυτή, το άζωτο που χρησιμοποιείται για τη συμπίεση του νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη συμπίεση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας (SmartGems, 2014b).

- **Ατμοστρόβιλος (Τουρμπίνα) – Γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας**

Ο Κύκλος Rankine είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος, ο οποίος μετατρέπει τη θερμότητα σε μηχανικό έργο. Η θερμότητα προμηθεύεται σε έναν κλειστό βρόχο, στον οποίο συνήθως χρησιμοποιείται νερό ως φέρον ρευστό. Ο Κύκλος Rankine που βασίζεται στο νερό παρέχει περίπου το 85% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (www.turboden.com).

Στην προκειμένη περίπτωση όμως, για τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική, χρησιμοποιείται ο Οργανικός Κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle – ORC). Η αρχή λειτουργίας του κύκλου αυτού βασίζεται στη χρήση ενός ατμοστροβίλου για τη μετατροπή της θερμότητας σε μηχανική ενέργεια και, εν συνεχεία, σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας. Ωστόσο, αντί για παραγωγή ατμού από νερό, το σύστημα ORC εξατμίζει ένα οργανικό υγρό, το οποίο χαρακτηρίζεται από μοριακό βάρος υψηλότερο από αυτό του νερού. Αυτή η διαφοροποίηση από τον απλό Κύκλο Rankine έχει ως συνέπεια την μείωση της ταχύτητας περιστροφής του ατμοστροβίλου, χαμηλότερη πίεση, καθώς και αποφυγή διάβρωσης των διαφόρων μεταλλικών τμημάτων.

Ο Οργανικός Κύκλος Rankine σήμερα είναι ευρέως γνωστός και αρκετά διαδεδομένος για την παραγωγή ενέργειας, κυρίως σε εφαρμογές βιομάζας και γεωθερμίας, ενώ αναμένεται και αύξηση της χρήσης του σε ηλιακές εφαρμογές. Μάλιστα, η ανησυχία για την κλιματική αλλαγή, καθώς και οι διαρκώς αυξανόμενες τιμές του πετρελαίου, αποτελούν βασικούς παράγοντες της ανάπτυξης αυτής της αποτελεσματικής, καθαρής και αξιόπιστης μεθόδου παραγωγής ηλεκτρισμού.

- **Ψύκτες απορρόφησης**

Οι ψύκτες απορρόφησης πραγματοποιούν μετατροπή της θερμότητας σε ψύξη. Η χρήση τους είναι διαδεδομένη σε συστήματα συμπαραγωγής, στα οποία η συμπαραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια του χειμώνα για θέρμανση εσωτερικών χώρων, ενώ το καλοκαίρι αξιοποιείται για τον κλιματισμό χώρων, αφού μετατραπεί σε ψύξη από τους ψύκτες απορρόφησης.

Ο κύκλος απορρόφησης έχει ως εξής: Το νερό, το οποίο λειτουργεί ως ψυκτικό μέσο, ψεκάζεται σε μία δεξαμενή, στην οποία επικρατούν συνθήκες κενού. Από την εξάτμιση του νερού προκύπτει πτώση της θερμοκρασίας. Οι υδρατμοί που παράγονται απορροφούνται από το μέσο απορρόφησης, το οποίο συνήθως είναι το βρωμιούχο λίθιο (LiBr). Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και διάλυμα αμμωνίας, εάν υπάρχει ανάγκη για επίτευξη χαμηλότερων θερμοκρασιών. Στη συνέχεια, οι υδρατμοί ελευθερώνονται από το κορεσμένο μέσο με τη βοήθεια μια πηγής θερμότητας (συνήθως νερό θερμοκρασίας μεγαλύτερης των 70°C ή ατμός χαμηλής πίεσης). Τέλος, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται από ένα ψυκτικό ρευστό (συνήθως νερό θερμοκρασίας μικρότερης των 35°C).

Η απόδοση (Coefficient of performance – COP) ενός ψύκτη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$COP = \frac{\text{Παραγόμενη ψύξη}}{\text{Καταναλισκόμενη θερμότητα}}$$

Η απόδοση αυτή είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας της πηγής θερμότητας που χρησιμοποιείται για την απελευθέρωση των υδρατμών από το κορεσμένο διάλυμα. Ενδεικτικές τιμές είναι:

Για νερό θερμοκρασίας 70°C: COP = 0,5

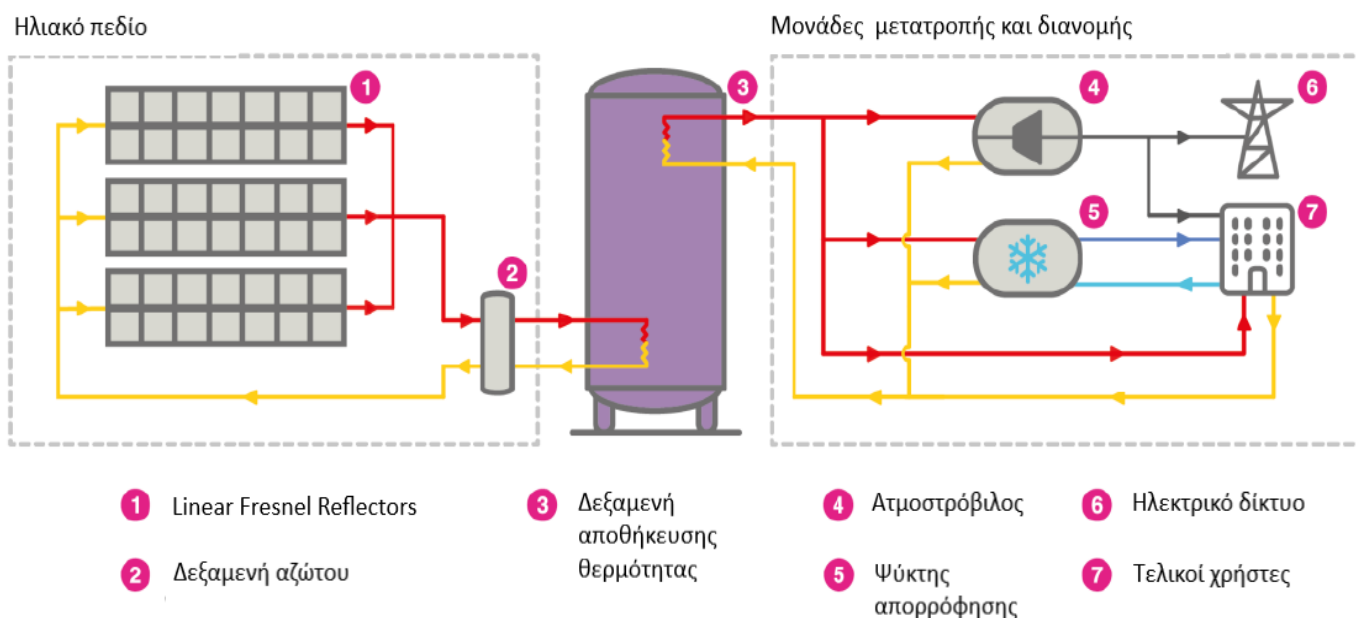
Για ατμό: COP = 1,1

- **Σύστημα παρακολούθησης ηλίου**

Ο κυριότερος σκοπός των μηχανισμών παρακολούθησης του ηλίου είναι η περιστροφή των κατόπτρων για την επίτευξη της μέγιστης συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την αποεστίαση των καθρεπτών για να υποβληθούν σε συντήρηση ή σε επείγουσα περίπτωση. Επιπλέον, επιτρέπει στους καθρέπτες να επανέλθουν στην αρχική τους θέση στο τέλος των ωρών λειτουργίας.

Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί παρακολούθησης του ηλίου, ο μονοαξονικός και ο διαξονικός. Ο μονοαξονικός μηχανισμός έχει σταθερή κλίση και καθιστά δυνατή την παρακολούθηση του ηλίου μόνο σε έναν άξονα (Νότος – Βορράς ή Ανατολή – Δύση). Αντίθετα, ο διαξονικός μηχανισμός επιτρέπει στο κάτοπτρο να ακολουθεί τον ήλιο τόσο στον κατακόρυφο, όσο και στον οριζόντιο άξονα, αλλάζοντας με αυτόν τον τρόπο διαρκώς τη γωνία κλίσης. Ο δεύτερος σαφώς αυξάνει την απόδοση του συστήματος, αλλά είναι και λιγότερο οικονομικός.

Ο μηχανισμός παρακολούθησης μπορεί να ελέγχεται είτε μηχανικά είτε ηλεκτρονικά. Σε γενικές γραμμές, ο ηλεκτρονικός χειρισμός έχει αποδειχθεί πιο αξιόπιστος και ακριβής και μπορεί να επιτευχθεί με αισθητήρες, οι οποίοι μετρούν τον ηλιακό φωτισμό και περιστρέφουν το κάτοπτρο αναλόγως. Σε μερικά σύγχρονα συστήματα η παρακολούθηση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια Παγκόσμιου Συστήματος Θεσιθεσίας (Global Positioning System – GPS).



Εικόνα 2.2.1.3: Τυπική διάταξη συστήματος LFR για θέρμανση, ψύξη και παραγωγή ηλεκτρισμού (Πηγή: Smart Gems).

2.2.2 Εξισώσεις λειτουργίας για LFR (Venezia, 2014)

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί το μαθηματικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παραγόμενης θερμικής ενέργειας για μία σειρά ενός συστήματος LFR, η οποία αποτελείται από n αριθμό μονάδων.

Ο υπολογισμός της παραγόμενης θερμότητας είναι εφικτός για οποιοδήποτε μέρος και για οποιαδήποτε ώρα της ημέρας, αρκεί να είναι γνωστή η άμεση ηλιακή ακτινοβολία (Direct Normal Irradiance – DNI), η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η θέση του ηλίου, όσον αφορά τη γωνία ζενίθ και τη γωνία αζιμουθίου.

Το μαθηματικό αυτό μοντέλο χωρίζεται σε δύο μέρη, το οπτικό και το θερμικό μοντέλο. Το οπτικό μοντέλο περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζεται η απόδοση του συστήματος από τη θέση του ηλίου. Το θερμικό μοντέλο δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστούν οι θερμικές απώλειες του συστήματος από τον σωλήνα απορρόφησης, η τιμή των οποίων εξαρτάται από τη μέση θερμοκρασία του υγρού μεταφοράς θερμότητας, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

Η εξίσωση θερμικής ισορροπίας του σωλήνα απορρόφησης είναι η εξής:

$$\dot{Q}_h(x) = \dot{Q}_{abs}(x) + \dot{Q}_{loss}(x) [W]$$

όπου:

- $\dot{Q}_h(x)$ είναι η χρήσιμη θερμική ενέργεια που παράγεται από το ηλιακό πεδίο
- $\dot{Q}_{abs}(x)$ είναι η θερμική ενέργεια που απορροφάται από τον ηλιακό αποδέκτη (σωλήνα απορρόφησης)
- $\dot{Q}_{loss}(x)$ είναι η θερμική ενέργεια που χάνεται από τον σωλήνα απορρόφησης

Οπτικό Μοντέλο

$$\dot{Q}_{abs} = G_{bn} \times A_{net} \times \eta_0 \times K_{\theta}(\theta_i, \theta_t) \times K_E [W]$$

όπου:

- G_{bn} είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2]
- A_{net} είναι η συνολική επιφάνεια των καθρεπτών του ηλιακού πεδίου. Είναι αποτέλεσμα του πολλαπλασιασμού της επιφάνειας της μίας μονάδας με το πλήθος των μονάδων ($A_{net} = A_{LFR,module} \times n$) [m^2]

- η_0 είναι η μέγιστη οπτική απόδοση του συστήματος, η οποία γεωμετρικά επιτυγχάνεται για γωνία ζενίθ ίση με 0°), (για το δικό μας σύστημα LFR $\rightarrow \eta_0 = 0.64$) [–]
- $K_\theta(\theta_i, \theta_t)$ είναι η παράμετρος που χρησιμοποιείται για να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα σκίασης και φραγής ανάμεσα στους καθρέπτες του πρωτογενούς οπτικού συστήματος. Η τιμή της παραμέτρου αυτής αλλάζει ανάλογα με τη θέση του ηλίου και είναι αδιάστατη. Επίσης, ισχύει ότι $0 \leq K_\theta(\theta_i, \theta_t) \leq 1$ [–]
- K_E είναι μία παράμετρος, η οποία χρησιμοποιείται για να ληφθούν υπόψη οι οπτικές απώλειες λόγω του μήκους της σειράς του ηλιακού πεδίου. Εξαρτάται από το μήκος της σειράς, την απόσταση μεταξύ των πρωτογενών και των δευτερογενών οπτικών και την διαμήκη συνιστώσα των διανυσμάτων των ηλιακών ακτινών. Η παράμετρος είναι αδιάστατη. Επίσης, ισχύει ότι $0 \leq K_E \leq 1$ [–]

Στο μοντέλο:

Το G_{bn} είναι εισακτέα τιμή.

Τα A_{net} και η_0 είναι ένα γεωμετρικό και ένα οπτικό χαρακτηριστικό του πεδίου αντίστοιχα.

Τα $K_\theta(\theta_i, \theta_t)$ και $K_E(\theta_i)$ μπορούν να υπολογιστούν ως συναρτήσεις της θέσης του ηλίου, καθορισμένης από εγκάρσια και διαμήκη γωνία.

Όσον αφορά την παράμετρο σκίασης και φραγής $K_\theta(\theta_i, \theta_t)$, ισχύει:

$$K_\theta(\theta_i, \theta_t) = IAM_I(\theta_i) \times IAM_t(\theta_t)$$

όπου:

- $IAM_I(\theta_i)$ είναι ο συντελεστής διόρθωσης γωνίας πρόσπτωσης (Incident Angle Modifier – IAM) συναρτήσει της διαμήκους γωνίας του διανύσματος της ηλιακής ακτίνας.
- $IAM_t(\theta_t)$ είναι ο συντελεστής διόρθωσης γωνίας πρόσπτωσης συναρτήσει της εγκάρσιας γωνίας του διανύσματος της ηλιακής ακτίνας.

Χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες τριγωνομετρικές σχέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαμήκη και την εγκάρσια γωνία (θ_i και θ_t αντίστοιχα) για οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας. Ωστόσο, είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε τη θέση του ηλίου για τη δεδομένη στιγμή, η οποία

χαρακτηρίζεται από το αζιμούθιο (γ_s) και τη γωνία ζενίθ (θ_z). Με όλα τα παραπάνω γνωστά μπορούν να υπολογιστούν οι δύο ζητούμενες γωνίες ως εξής:

$$\theta_t = \text{atan}\{\sin(\gamma_s)\tan(\theta_z)\}$$

$$\theta_l = \text{atan}\{\cos(\gamma_s)\tan(\theta_z)\}$$

όπου:

- θ_z είναι η γωνία ζενίθ, δηλαδή η γωνία που σχηματίζουν οι ακτίνες του ηλίου με την κατακόρυφη (0° εάν ο ήλιος έχει κατακόρυφη θέση, 90° κατά την ανατολή και τη δύση του ηλίου)
- γ_s είναι η γωνία αζιμουθίου, δηλαδή η γωνία που σχηματίζει η προβολή των ηλιακών ακτινών στο οριζόντιο επίπεδο με την κατεύθυνση του Νότου. Θετικές τιμές λαμβάνει για θέσεις του ηλίου δυτικά της νότιας κατεύθυνσης και αρνητικές για θέσεις ανατολικά της νότιας κατεύθυνσης. Όταν ο ήλιος βρίσκεται ακριβώς στην κατεύθυνση του Νότου, ισχύει $\gamma_s = 0$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, εάν έχω $0^\circ \leq |\theta_t| \leq 90^\circ$, τότε ισχύει:

$$IAM_t(\theta_t) = a_t + b_t \times |\theta_t| + c_t \times |\theta_t|^2 + d_t \times |\theta_t|^3 + e_t \times |\theta_t|^4$$

όπου:

IAM _t (θ_t) - Πολυώνυμο 4 ^{ου} βαθμού: $y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4$	
Τιμές Συντελεστών:	
$a_t =$	1.0041698498100000000
$b_t =$	-0.0051845486244400000
$c_t =$	0.0003570013897980000
$d_t =$	-0.0000074822297628100
$e_t =$	0.0000000308091814441

Πίνακας 2.2.2.1: Τιμές συντελεστών για IAM_t

Εάν έχω $0^\circ \leq |\theta_l| < 80^\circ$, τότε ισχύει:

$$IAM_l(\theta_l) = a_l + b_l \times |\theta_l| + c_l \times |\theta_l|^2 + d_l \times |\theta_l|^3 + e_l \times |\theta_l|^4$$

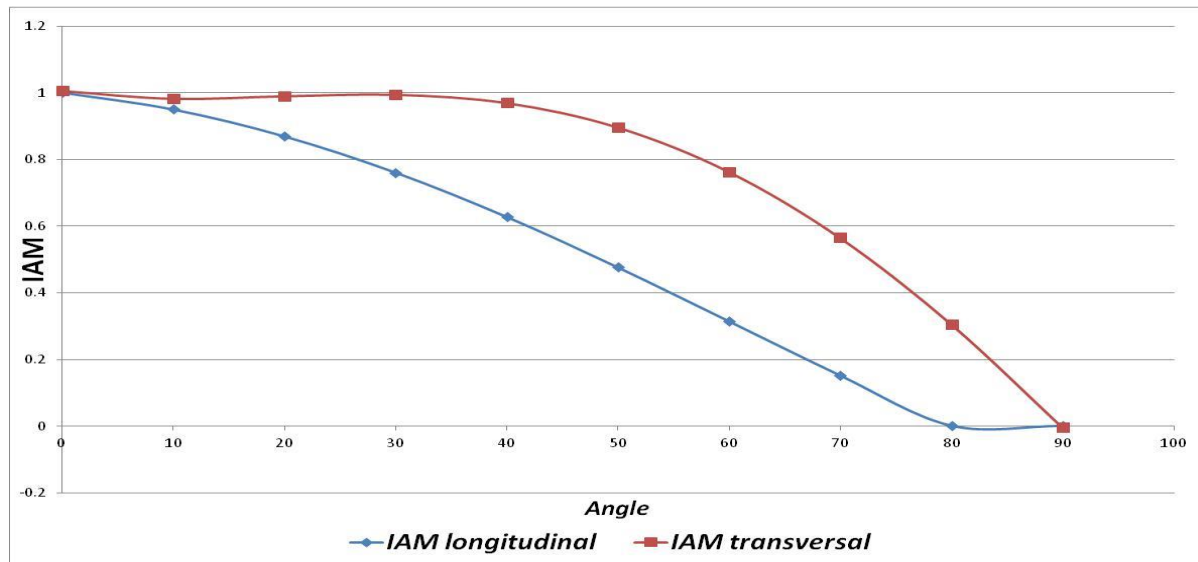
όπου:

IAM _l (θ _l) - Πολυώνυμο 4 ^{ου} Βαθμού: y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4	
Τιμές Συντελεστών:	
a _l =	0.99982434896
b _l =	-0.00355988761238
c _l =	-0.000149272477121
d _l =	-0.000000211305704115
e _l =	0.00000000852272256379

Πίνακας 2.2.1.2: Τιμές συντελεστών για IAM_l

Εάν $|\theta_l| \geq 80^\circ$, τότε ισχύει:

$$IAM_l(\theta_l) = 0.$$



Διάγραμμα 2.2.2.1: Τιμές IAM_l και IAM_t συναρτήσει της κλίσης

Όσον αφορά την παράμετρο των οπτικών απωλειών K_E:

$$K_E = \frac{L_{tot} - d_f \tan(\theta_l)}{L_{tot}}$$

όπου:

- L_{tot} είναι το μήκος της σειράς, η οποία αποτελείται από n αριθμό μονάδων LFR [m]
- d_f είναι η εστιακή απόσταση, δηλαδή η απόσταση των πρωτογενών οπτικών από το σωλήνα απορρόφησης [m]

Θερμικό Μοντέλο

$$\dot{Q}_{loss} = - \left[a_1 \times \left(\frac{T_{mf} - T_{amb}}{G_{bn}} \right) + a_2 \times \left(\frac{T_{mf} - T_{amb}}{G_{bn}} \right)^2 \right] \times A_{net} \times G_{bn} [W]$$

όπου:

- $T_{mf} = \frac{(T_{in,f} + T_{out,f})}{2}$, είναι η μέση τιμή της θερμοκρασίας του υγρού μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στην εισροή και την εκροή του σωλήνα απορρόφησης [°C]
- T_{amb} είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος [°C]
- a_1 είναι ο συντελεστής πρωτογενών θερμικών απωλειών σε μοντέλο σταθερών συνθηκών, όπως έχει οριστεί από το UNI EN ISO 9806 (Νοέμβριος 2013) (για το δικό μας σύστημα $\rightarrow a_1 = 0.00729 [\frac{W}{m^2 \times K}]$)
- a_2 είναι ο συντελεστής δευτερογενών θερμικών απωλειών σε μοντέλο σταθερών συνθηκών, όπως έχει οριστεί από το UNI EN ISO 9806 (Νοέμβριος 2013) (για το δικό μας σύστημα $\rightarrow a_2 = 0.00043 [\frac{W}{m^2 \times K^2}]$)
- G_{bn} είναι η άμεση ηλιακή ακτινοβολία [W/m^2]

Συνεπώς, για τη χρήσιμη θερμική ισχύ θα ισχύει:

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_{ads} + \dot{Q}_{loss} \Rightarrow$$

$$\dot{Q}_h = \left\{ \eta_0 \times K_\theta(\theta_i, \theta_t) \times K_E - \left[a_1 \times \left(\frac{T_{mf} - T_{amb}}{G_{bn}} \right) + a_2 \times \left(\frac{T_{mf} - T_{amb}}{G_{bn}} \right)^2 \right] \right\} \times A_{net} \times G_{bn} [W]$$

2.3 Λογισμικό TRNSYS (Transient System Simulation Tool)

2.3.1 Εισαγωγή στο λογισμικό TRNSYS

Το λογισμικό TRNSYS αποτελεί ένα υπολογιστικό περιβάλλον, σκοπός του οποίου είναι, κατά κύριο λόγο, η προσομοίωση διαφόρων θερμικών και ηλεκτρικών ενεργειακών συστημάτων. Ωστόσο, η λειτουργία του δεν περιορίζεται μόνο σε αυτόν τον τομέα, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση πληθώρας διαφορετικών συστημάτων, όπως διαφόρων βιολογικών διεργασιών. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με την εγγενή ευελιξία που το χαρακτηρίζει, έχουν ως αποτέλεσμα το TRNSYS να χρησιμοποιείται εκτενώς σε παγκόσμια κλίμακα από ερευνητές και μηχανικούς μέχρι και φοιτητές διαφόρων ειδικοτήτων.

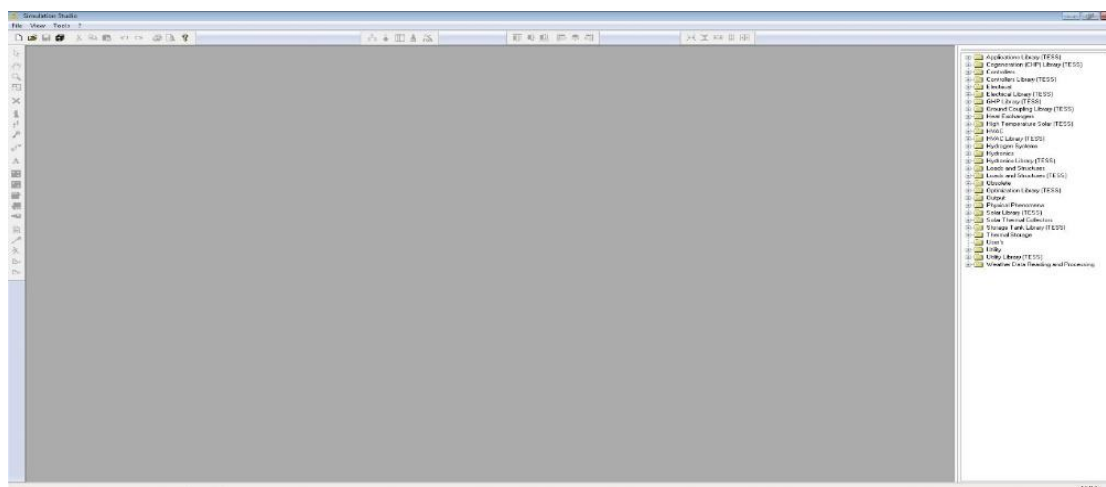
Το TRNSYS μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από δύο διακριτά μέρη. Το πρώτο, το οποίο αποκαλείται kernel (kernel = πυρήνας), είναι μία μηχανή, η οποία επεξεργάζεται το αρχείο που εισάγει ο χρήστης σε αυτήν, λύνει το πρόβλημα σε πολλές επαναλήψεις, παρουσιάζει σε διαγράμματα τις διάφορες μεταβλητές και προσδιορίζει διάφορες θερμοφυσικές ιδιότητες. Τα παραπάνω αποτελούν μόνο ένα μικρό μέρος των δυνατοτήτων του πυρήνα. Το δεύτερο μέρος είναι μία εκτενής βιβλιοθήκη εξαρτημάτων και δομικών στοιχείων, καθένα από τα οποία προσομοιάζει τη λειτουργία ενός στοιχείου του συστήματος που δημιουργείται. Υπάρχουν περισσότερα από 150 τέτοια στοιχεία στη βιβλιοθήκη του TRNSYS. Η κατάλληλη διάταξη αυτών των στοιχείων και η σωστή σύνδεση μεταξύ τους οδηγούν στην μοντελοποίηση ολόκληρου του συστήματος.

Ένα πολύ σημαντικό προσόν του TRNSYS είναι ότι ο κώδικας των διαφόρων μοντέλων μπορεί με ευκολία να τροποποιηθεί, έτσι ώστε να εξυπηρετεί τις ανάγκες του εκάστοτε χρήστη. Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής νέων μοντέλων, τα οποία δεν συμπεριλαμβάνονται στα ήδη υπάρχοντα στη βιβλιοθήκη του λογισμικού, χρησιμοποιώντας τις διάφορες υποστηριζόμενες γλώσσες προγραμματισμού (π.χ. FORTRAN, C, C++, PASCAL, κ.λπ.). Επιπρόσθετα, το TRNSYS μπορεί να συνδεθεί με άλλες κοινές εξωτερικές εφαρμογές, όπως το Microsoft Excel, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται απευθείας σε αρχεία που υποστηρίζονται από αυτές, κάτι που καθιστά την επεξεργασία τους πολύ ευκολότερη.

2.3.2 Simulation Studio

Το στούντιο προσομοίωσης (simulation studio) αποτελεί το κύριο περιβάλλον προσομοίωσης του TRNSYS. Είναι ένα ισχυρό και εύληπτο γραφικό περιβάλλον, το οποίο αποτελεί το εμπρόσθιο άκρο της προσομοίωσης. Καθιστά πολύ εύκολη τη συναρμολόγηση ενός λεπτομερούς συστήματος από το χρήστη, καθώς ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται τα διάφορα δομικά στοιχεία του συστήματος, τα οποία εντός του προγράμματος ονομάζονται “types” είναι πολύ παρόμοιος με τον τρόπο διάταξής τους στην πραγματικότητα. Τα δεδομένα εξόδου ενός στοιχείου αποτελούν δεδομένα εισόδου για το επόμενο. Τα αποτελέσματα της εκάστοτε προσομοίωσης παρουσιάζονται σε γραφήματα. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα και σε αρχείο εξόδου της επιλογής του (.xls, .txt, κ.λπ.).

Για την κατασκευή ενός μοντέλου στο στούντιο προσομοίωσης, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τα δομικά στοιχεία (Types) από τα οποία θα αποτελείται το σύστημά του. Τα στοιχεία αυτά επιλέγονται από την εκτενή προϋπάρχουσα βιβλιοθήκη του TRNSYS. Στη συνέχεια, θα πρέπει να συνδεθούν γραφικά μεταξύ τους, ώστε να προσομοιωθεί η πραγματική διάταξη του συστήματος. Αφού συμπληρωθούν και τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου, η προσομοίωση μπορεί να ξεκινήσει. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, λύνονται οι αλγεβρικές και διαφορικές μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος και, τέλος, εξάγονται τα αποτελέσματα. Με μία απλή σύνδεση των αποτελεσμάτων με στοιχεία, τα οποία ονομάζονται “plotters”, μπορούν να παρουσιαστούν σε αναλυτικά γραφήματα.



Εικόνα 2.3.2.1: User Interface του TRNSYS Simulation Studio πριν τη φόρτωση μοντέλου.

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

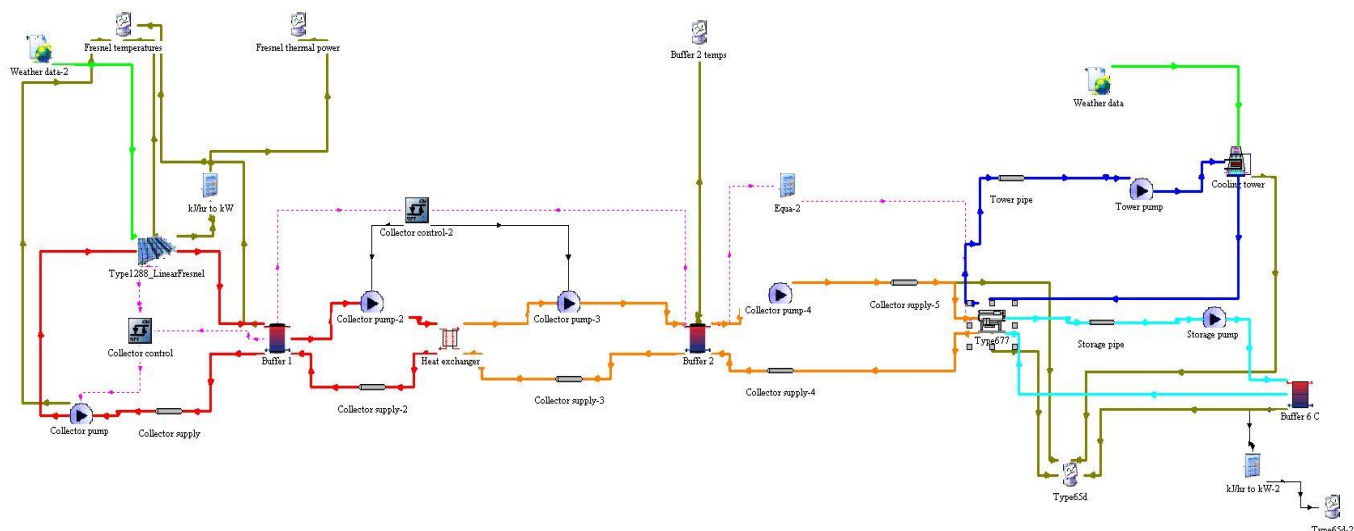
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί αναλυτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Η μεθοδολογία θα χωριστεί σε δύο τμήματα: την ανάλυση ευαισθησίας για διαφορετικές τιμές διαφόρων μεταβλητών και την εκτίμηση απόδοσης του υπό μελέτη συστήματος LFR σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες.

3.1 Σκοπός της εργασίας

Το θέμα της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση ευαισθησίας ενός συστήματος γραμμικού κατόπτρου Fresnel σε σχέση με διάφορες παραμέτρους, καθώς και η εξέταση της απόδοσής του σε διάφορες κλιματικές ζώνες. Ο σκοπός της ανάλυσης ευαισθησίας είναι ο προσδιορισμός της παραμέτρου, η οποία έχει το μεγαλύτερο αντίκτυπο στη σωστή λειτουργία του συστήματος και, κατά συνέπεια, στην παραγωγή θερμικής ενέργειας. Αυτό θα συμβάλλει σημαντικά σε μελλοντικές εφαρμογές της τεχνολογίας LFR, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοσή τους. Εν συνεχεία, η μελέτη για τον προσδιορισμό της απόδοσης του συστήματος σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες, αποσκοπεί στο να καθορίσει εάν η εγκατάσταση συστημάτων LFR είναι βιώσιμη σε περιοχές με κλίμα παρόμοιο με τα εξεταζόμενα.

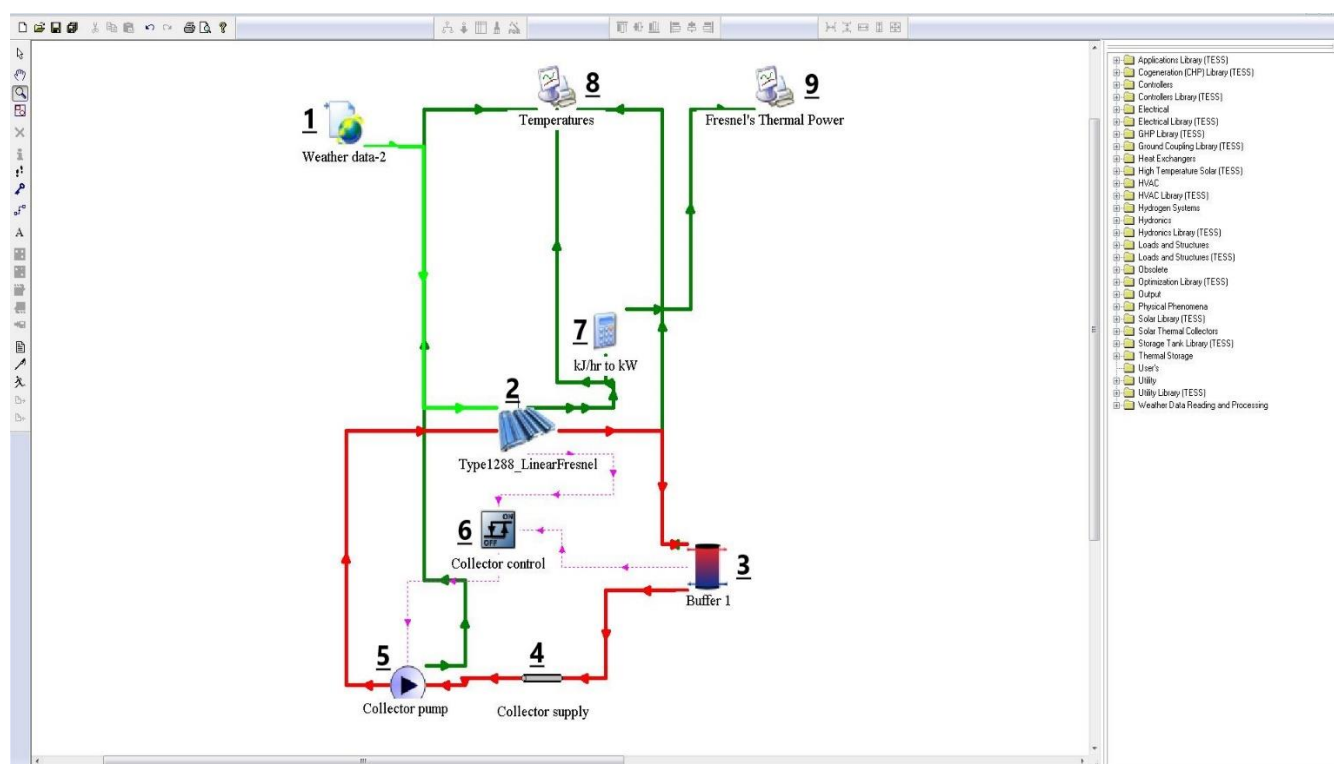
3.2 Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος LFR

Η διάταξη του μοντέλου προσομοίωσης του συστήματος LFR περιέχει πληθώρα στοιχείων, τα οποία υπήρχαν ήδη στην εκτενή βιβλιοθήκη του TRNSYS (Kolokotsa, D., 2014). Το σύνθετο αυτό μοντέλο έχει απλοποιηθεί για το σκοπό της εργασίας, με πολλά από τα στοιχεία του να έχουν αφαιρεθεί, έτσι ώστε να μελετηθούν μόνο οι θερμοκρασίες του ρευστού μεταφοράς θερμότητας και η χρήσιμη θερμότητα που παράγεται. Το ολοκληρωμένο μοντέλο περιέχει πολλά επιπλέον στοιχεία (Types), τα οποία υπολογίζουν πολλές παραπάνω τιμές εξόδου. Οι τιμές αυτές δεν θα εξεταστούν εδώ.



Εικόνα 3.2.1: Το ολοκληρωμένο μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος LFR.

Το απλοποιημένο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την εν λόγω μελέτη περιέχει όλα τα στοιχεία της διάταξης μέχρι και το Buffer 1, τα οποία αρκούν για να υπολογιστεί η χρήσιμη θερμότητα που παράγεται από το σύστημα, καθώς και οι θερμοκρασίες του θερμικού ρευστού σε διάφορα σημεία του συστήματος.



Εικόνα 3.2.2: Το απλοποιημένο μοντέλο προσομοίωσης του συστήματος LFR.

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται το μοντέλο με τη μορφή που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη. Τα στοιχεία από τα οποία είναι κατασκευασμένο είναι τα εξής:

1. Type 15-2: Στοιχείο το οποίο μπορεί να συσχετιστεί με αρχείο καιρικών δεδομένων τύπου TMY-2 (Typical Meteorological Year 2). Τέτοια ήταν και τα αρχεία, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο. Για να αναγνωριστούν άλλου τύπου αρχεία καιρικών δεδομένων, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και το αντίστοιχο Type από τη βιβλιοθήκη του TRNSYS.
2. Type 1288: Στοιχείο, το οποίο προσομοιώνει το LFR. Σε αυτό εισάγονται δεδομένα, όπως η επιφάνεια του συλλέκτη, τα θερμοδυναμικά και χημικά χαρακτηριστικά του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, οι συντελεστές απόδοσης και η αρχική θερμοκρασία του συλλέκτη.
3. Type 4a: Κατακόρυφη κυλινδρική δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας με δύο ζώνες θερμοκρασίας. Εδώ ορίζονται η χωρητικότητα και ο συντελεστής απωλειών της δεξαμενής.
4. Type 31: Σωλήνας, του οποίου τα χαρακτηριστικά (διάμετρος, μήκος και συντελεστής απωλειών) ορίζονται από το χρήστη. Ωστόσο, το συγκεκριμένο στοιχείο δεν λαμβάνει υπόψη για τους υπολογισμούς τη μάζα του σωλήνα και της μόνωσης.
5. Type 3d: Αντλία μεταβαλλόμενης παροχής. Απαιτείται από το χρήστη ο ορισμός της μέγιστης παροχής, της μέγιστης κατανάλωσης ισχύος και του συντελεστή μετατροπής ισχύος της αντλίας σε θερμική ενέργεια.
6. Type 2b: Σύστημα ελέγχου του συλλέκτη. Παράγει τη συνάρτηση ελέγχου γ_o , η οποία λαμβάνει τιμές 0 ή 1 και ελέγχει τη λειτουργία του συλλέκτη ($\gamma_o = 1 \rightarrow \text{ON}$, $\gamma_o = 0 \rightarrow \text{OFF}$). Η τιμή που θα λάβει η συνάρτηση ελέγχου εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ T_H και T_C .
7. Calculator: Δέχεται ως τιμή εισόδου την παραγόμενη ισχύ σε kJ/h και τη μετατρέπει σε kW. Η εξίσωση με την οποία γίνεται η μετατροπή ορίζεται από τον χρήστη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η εξίσωση είναι η εξής: $\text{Output} = \text{Input}/3600$
8. Type 65c: Online plotter with file. Σχεδιαστής γραφικής παράστασης με δυνατότητα συσχέτισης εξωτερικού αρχείου. Παρουσιάζει σε γράφημα τις τιμές των συσχετισμένων με αυτόν μεταβλητών. Με αυτό το συγκεκριμένο στοιχείο τα αποτελέσματα μπορούν να

εξαχθούν και σε εξωτερικό αρχείο της επιλογής του χρήστη. Στη μελέτη μας επιλέχθηκε αρχείο του Microsoft Excel.

9. Type 65c: Όμοια με το στοιχείο 8.

Η χρονική περίοδος που έχει οριστεί για την προσομοίωση είναι 8760 ώρες, δηλαδή 1 έτος.

3.3 Ανάλυση ευαισθησίας για τις διάφορες παραμέτρους

Η ανάλυση ευαισθησίας που εκτελέστηκε μελετά τις συνέπειες που υφίστανται οι τιμές της παραγόμενης θερμικής ενέργειας και των διαφόρων θερμοκρασιών του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, ως συνέπεια αλλαγών στις τιμές διαφόρων παραμέτρων του συστήματος. Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για μελέτη είναι οι εξής:

1. Η επιφάνεια του συλλέκτη.
2. Η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας.
3. Οι διαστάσεις του σωλήνα μεταφοράς του θερμικού ρευστού.
4. Το είδος του θερμικού ρευστού.

Ο σκοπός της μεθόδου της ανάλυσης ευαισθησίας είναι, σε γενικές γραμμές, να βρεθεί η παράμετρος, η οποία επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την παραγόμενη θερμική ενέργεια, έτσι ώστε μελλοντικά να μπορούν να ληφθούν τεκμηριωμένες αποφάσεις για την επιλογή των τιμών των παραμέτρων αυτών.

Μέσω του στούντιο προσομοίωσης του TRNSYS, είναι πολύ απλό να τροποποιηθούν οι τιμές των επιλεγμένων παραμέτρων. Κάνοντας διπλό κλικ πάνω σε οποιοδήποτε στοιχείο, ο χρήστης μπορεί να δώσει οποιαδήποτε τιμή επιθυμεί στις παραμέτρους αυτές. Αφού επιλεγούν οι επιθυμητές τιμές, μπορεί να ξεκινήσει η προσομοίωση, παράλληλα με την οποία εμφανίζεται και γραφική παράσταση για τις θερμοκρασίες και την παραγόμενη θερμική ενέργεια.

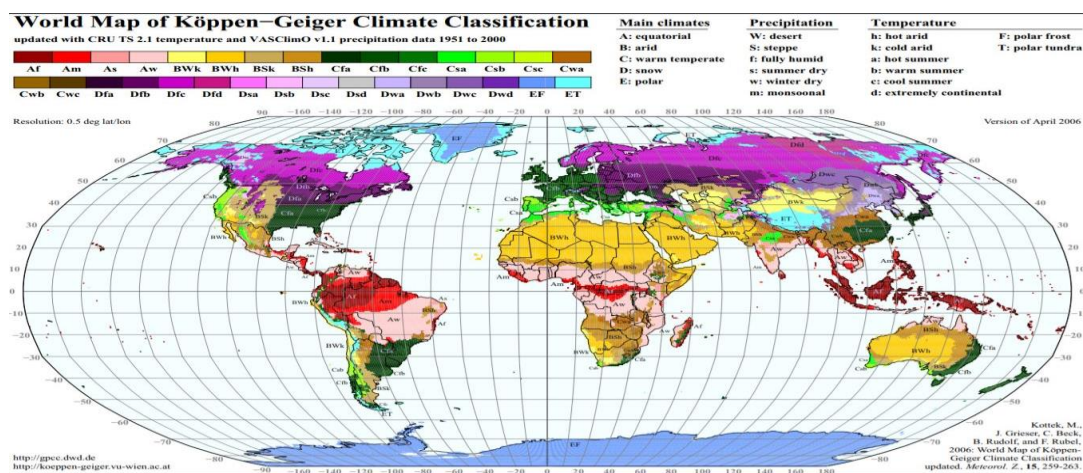
Οι διάφορες τιμές που επιλέχθηκαν προς εξέταση παρουσιάζονται παρακάτω:

- Επιφάνεια συλλέκτη: 22, 32, 42, 52, 62 [m²] (όλες πολλαπλασιασμένες επί 8, αφού χρησιμοποιούμε 8 στοιχεία)
- Χωρητικότητα δεξαμενής: 20, 25, 30, 35, 40 [m³]
- Διαστάσεις σωλήνα: d = 0,2m και L = 1 m, d = 0,4m και L = 2m, d = 0,6m και L = 3m
- Θερμικό ρευστό: Θερμικό λάδι, τετηγμένο άλας, υγρό νάτριο

3.4 Εκτίμηση απόδοσης σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες

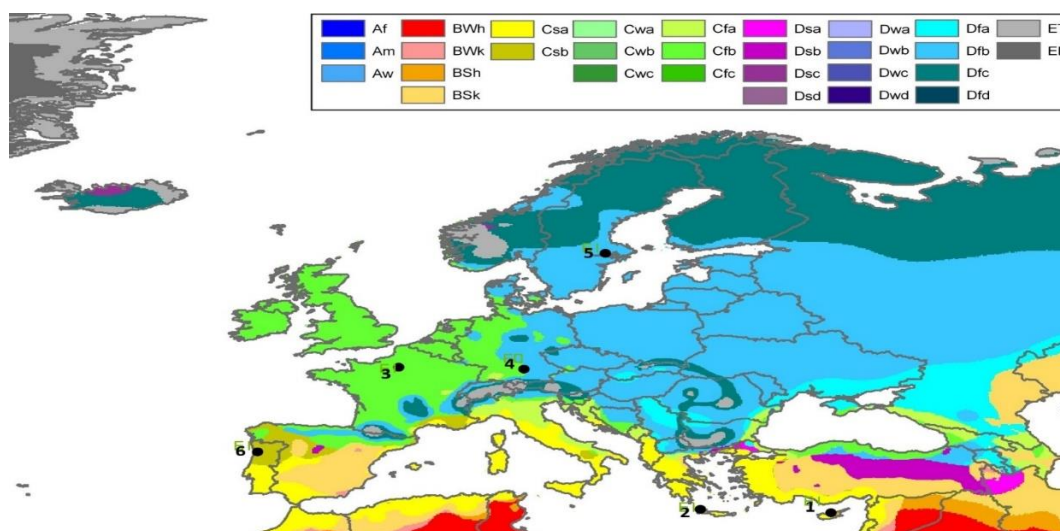
Είναι γνωστό πως τα συστήματα LFR, αλλά και οι υπόλοιπες τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ισχύος, δεν λειτουργούν ιδανικά με διάχυτη ακτινοβολία. Για το λόγο αυτό, θα εξεταστεί η αποδοτικότητά τους σε περιοχές με διαφορετικό κλίμα από τη Λευκωσία, η οποία αποτελεί το αρχικό σενάριο.

Η επιλογή των πόλεων που θα εξεταστούν έγινε με βάση την κλιματική ταξινόμηση Köppen (Köppen climate classification). Η ταξινόμηση αυτή αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως διαδεδομένα συστήματα για την κατηγοριοποίηση των κλιμάτων. Αναπτύχθηκε το 1884 από τον κλιματολόγο Vladimir Köppen και, από τότε, έχει υποστεί αρκετές τροποποιήσεις. Για την ταξινόμηση του κλίματος μίας περιοχής σε μία από τις κατηγορίες χρησιμοποιούνται οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες και βροχοπτώσεις, η εποχιακή κατανομή του υετού, καθώς και δεδομένα της βλάστησης της περιοχής.



Εικόνα 3.4.1: Παγκόσμιος χάρτης κλιματικής ταξινόμησης Köppen.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε χάρτη οι επιλεγθείσες προς μελέτη πόλεις μαζί με την κλιματική κατηγορία στην οποία ανήκουν. Στη συνέχεια, αναλύονται τα χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας.



Εικόνα 3.4.2: Ευρωπαϊκός χάρτης κλιματικής κατάταξης Köppen.
1: Λευκωσία, 2: Χανιά, 3: Παρίσι, 4: Μόναχο, 5: Στοκχόλμη, 6: Πόρτο

- **Λευκωσία – Κατηγορία Bsh**

Η κατηγορία Bsh αναφέρεται σε ζεστό και ημιάνυδρο κλίμα. Αυτού του τύπου το κλίμα τείνει να έχει πολύ θερμά και, μερικές φορές, υπερβολικά θερμά καλοκαίρια με πολύ έντονη ηλιοφάνεια και δροσερούς χειμώνες με ελάχιστες βροχοπτώσεις.

- **Χανιά – Κατηγορία Csa**

Η κατηγορία αυτή αντιστοιχεί σε Μεσογειακό κλίμα με πολύ θερμά καλοκαίρια. Οι περιοχές που ανήκουν σε αυτόν τον τύπο κλίματος παρουσιάζουν πολύ θερμά καλοκαίρια με έντονη ηλιοφάνεια και ήπιους χειμώνες με πολύ υψηλά ποσοστά υγρασίας.

- **Μόναχο – Κατηγορία Cfb**

Ωκεάνιο κλίμα ή θαλάσσιο κλίμα δυτικών ακτών. Σε γενικές γραμμές χαρακτηρίζεται από σχετικά κρύα και υγρά καλοκαίρια και ήπιους και υγρούς χειμώνες. Οι κατακρημνίσεις ανάμεσα στις εποχές δεν διαφοροποιούνται σημαντικά.

- **Στοκχόλμη – Κατηγορία Dfb**

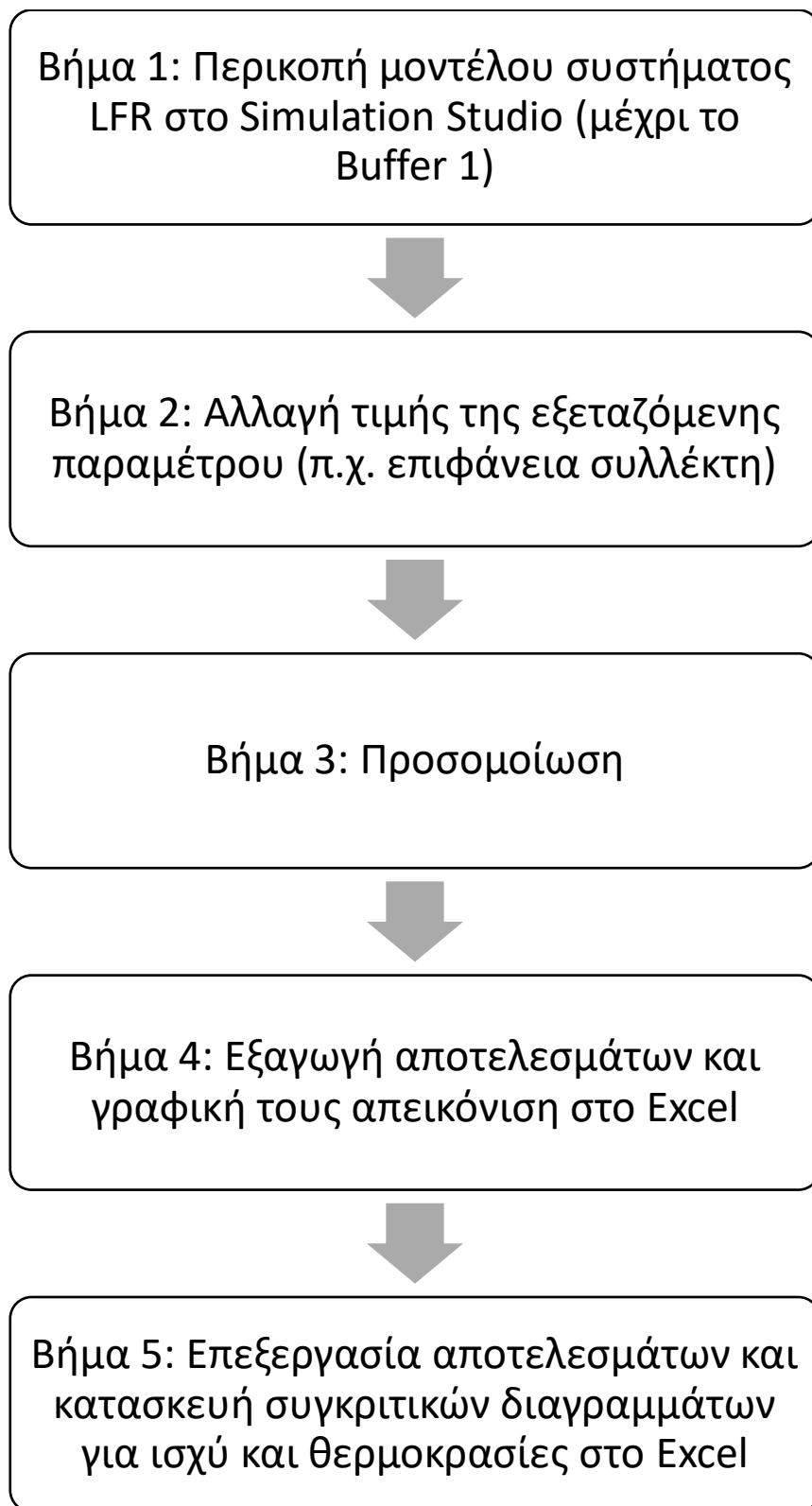
Υγρό ηπειρωτικό κλίμα με θερμά καλοκαίρια. Ο ψυχρότερος μήνας παρουσιάζει συνήθως μέση θερμοκρασία υπό του μηδενός. Η βροχόπτωση δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους.

- **Πόρτο – Κατηγορία Csb**

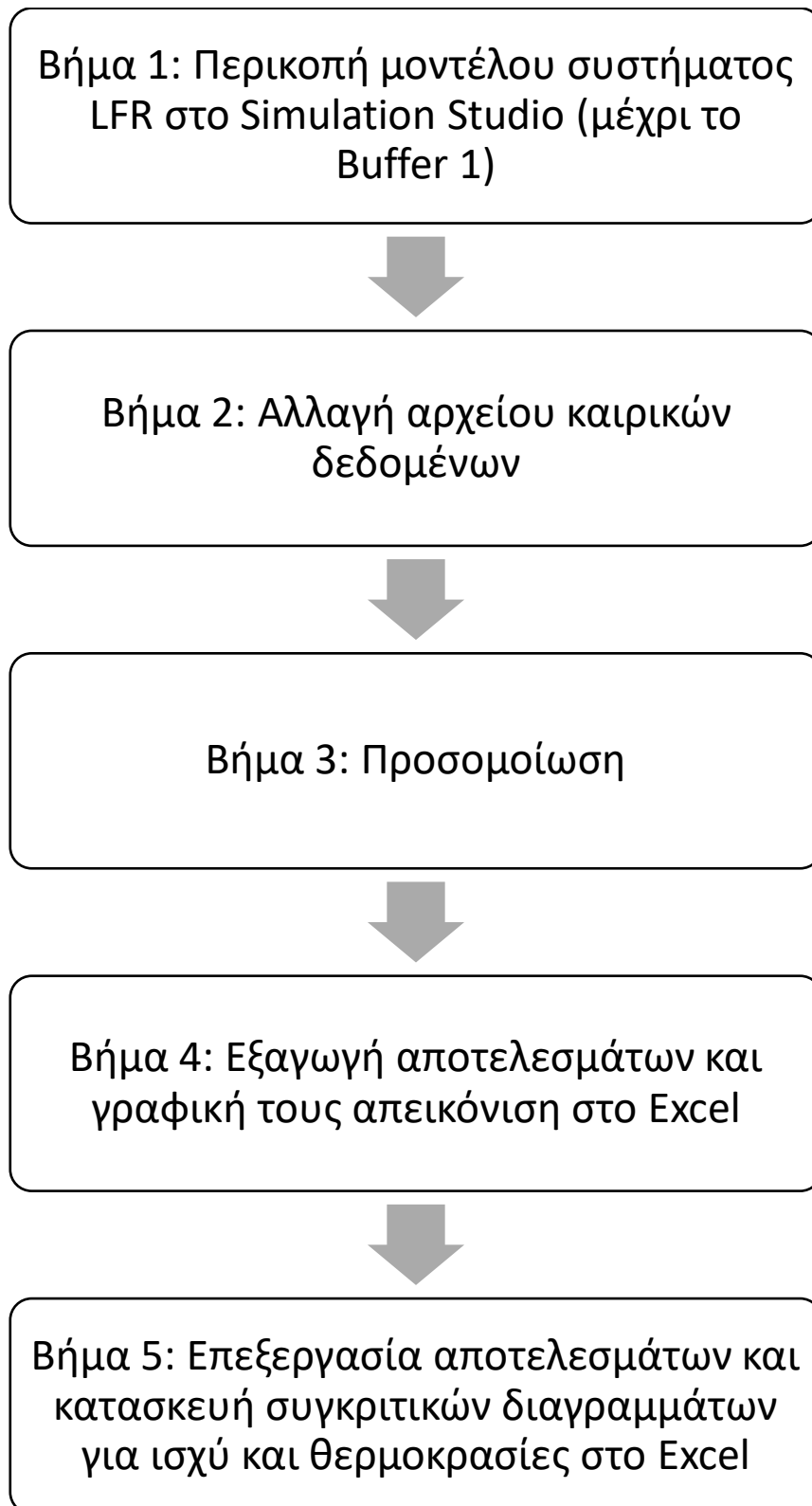
Εύκρατο Μεσογειακό κλίμα με άνυδρο, ήπιο καλοκαίρι. Είναι πιο σπάνιος κλιματικός τύπος από το Csa. Οφείλει την ύπαρξή του κυρίως σε ψυχρά ωκεάνια ρεύματα. Οι χειμώνες είναι σχετικά ήπιοι από άποψη θερμοκρασίας, αλλά αρκετά βροχεροί.

Για τη μελέτη της λειτουργίας του συστήματος LFR σε κάθε πόλη, αρκεί να αντικατασταθεί στο Simulation Studio του TRNSYS το αρχικό αρχείο καιρικών δεδομένων της Λευκωσίας, με ένα νέο για κάθε πόλη. Τα αρχεία καιρικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σε μορφή TMY-2.

3.5 Σχηματική απεικόνιση μεθοδολογίας



Σχήμα 3.5.1: Σχηματική απεικόνιση μεθοδολογίας ανάλυσης ευαισθησίας για διαφορετικές παραμέτρους.



Σχήμα 3.5.2: Σχηματική απεικόνιση μεθοδολογίας εκτίμησης απόδοσης συστήματος σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες.

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των διαφόρων προσομοιώσεων λειτουργίας του συστήματος LFR που πραγματοποιήθηκαν μέσω του στούντιο προσομοίωσης του TRNSYS. Αρχικά, θα παρατεθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας του συστήματος σε σχέση με διάφορες παραμέτρους και στη συνέχεια τα αποτελέσματα της μελέτης της λειτουργίας του LFR σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες.

4.1 Ανάλυση ευαισθησίας για διάφορες παραμέτρους

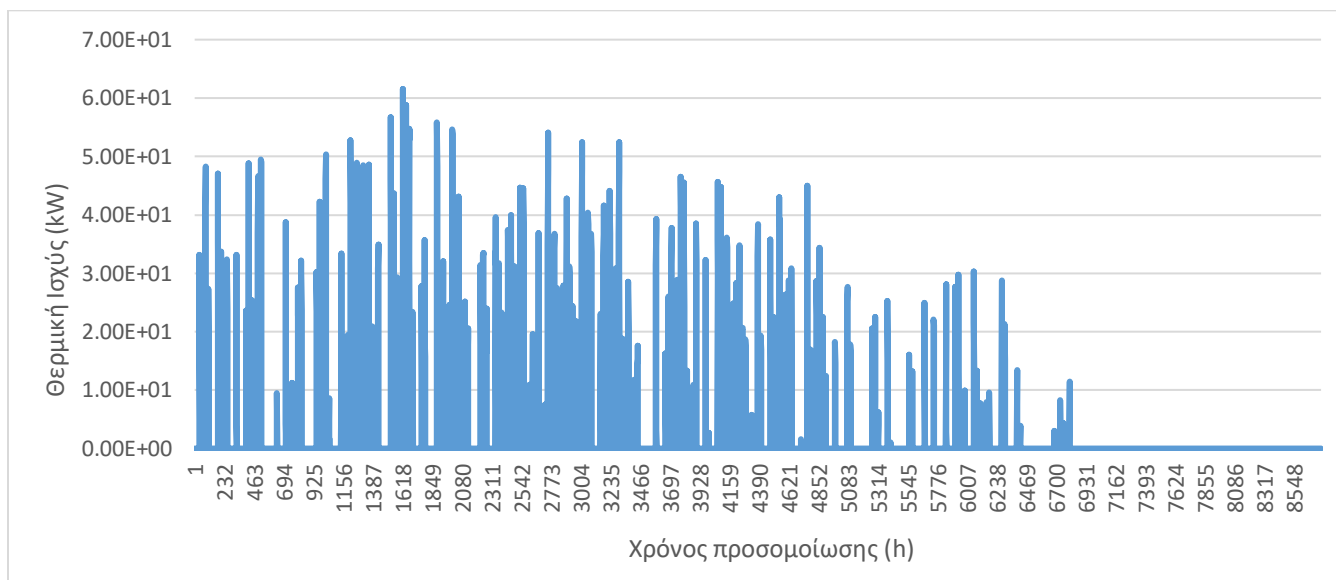
Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιλέχθηκαν τέσσερις παράμετροι προς μελέτη. Αλλάζοντας τις τιμές των παραμέτρων αυτών και παρατηρώντας τις αλλαγές που προκύπτουν στις τιμές των θερμοκρασιών και της παραγόμενης θερμικής ισχύος στο τέλος της προσομοίωσης, μπορεί να αποκτηθεί μία γενική εικόνα του βαθμού, στον οποίο επηρεάζει η κάθε παράμετρος τα αποτελέσματα.

Για αρχή, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του αρχικού σεναρίου, με τα οποία θα συγκρίνουμε εν συνεχεία όλα τα υπόλοιπα σενάρια. Οι τιμές των παραμέτρων του σεναρίου αυτού, το οποίο αναφέρεται στη Λευκωσία, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

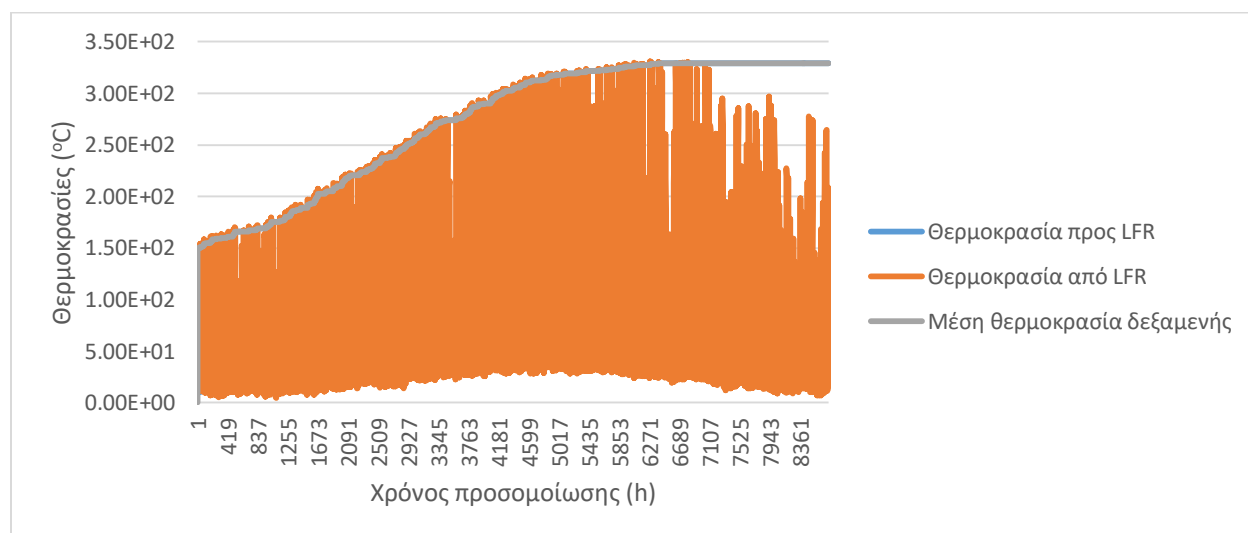
Επιφάνεια στοιχείου (m ²)	Συνολική επιφάνεια συλλέκτη (m ²)	Χωρητικότητα δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας (m ³)	Θερμικό ρευστό	Διάμετρος σωλήνα μεταφοράς ρευστού (m)	Μήκος σωλήνα μεταφοράς ρευστού (m)
22	176	20	Θερμικό λάδι	0,2	1

Πίνακας 4.1.1: Αποτελέσματα αρχικού σεναρίου.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γραφήματα που προκύπτουν στο τέλος της προσομοίωσης:



Διάγραμμα 4.1.1: Θερμική ισχύς αρχικού σεναρίου.



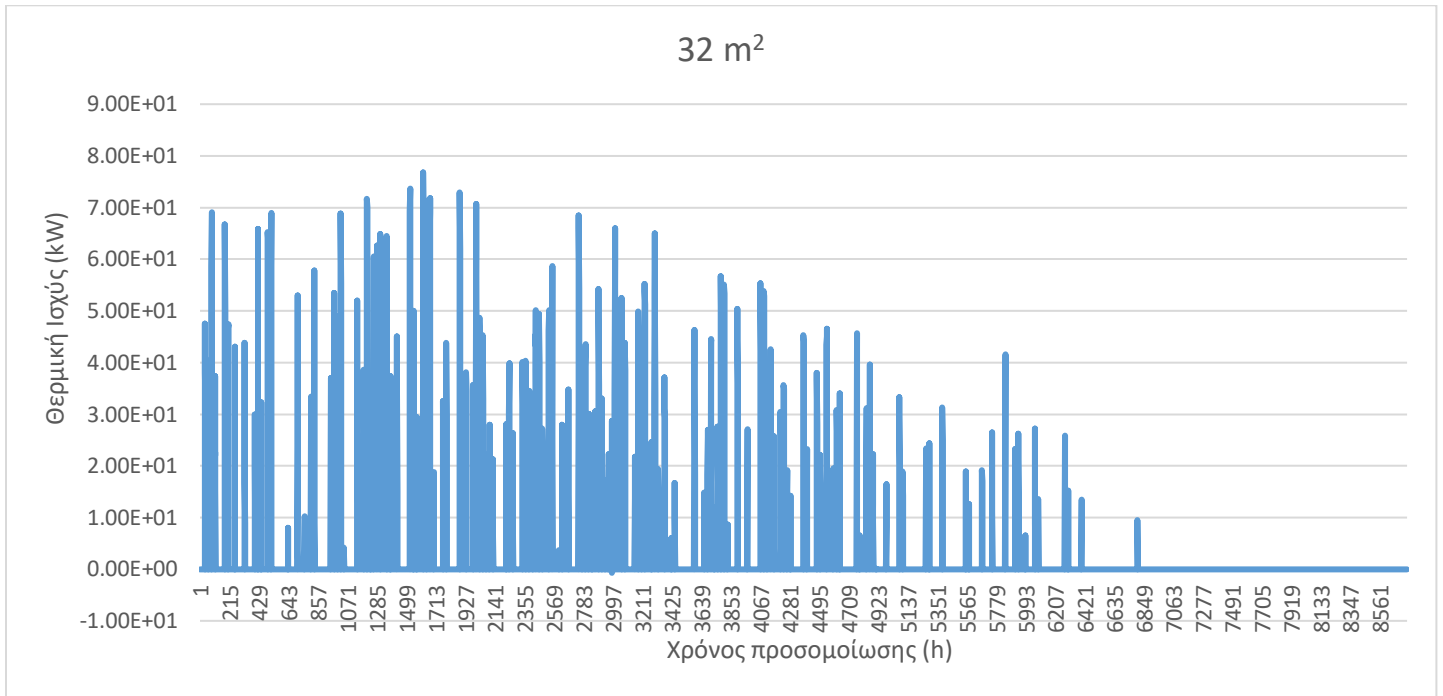
Διάγραμμα 4.1.2: Θερμοκρασίες αρχικού σεναρίου.

Συνολική ετήσια θερμική ενέργεια (kWh)	15600
Μέγιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	329
Ελάχιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	10
Μέγιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	331
Ελάχιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	4,72
Μέγιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	329
Ελάχιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	0

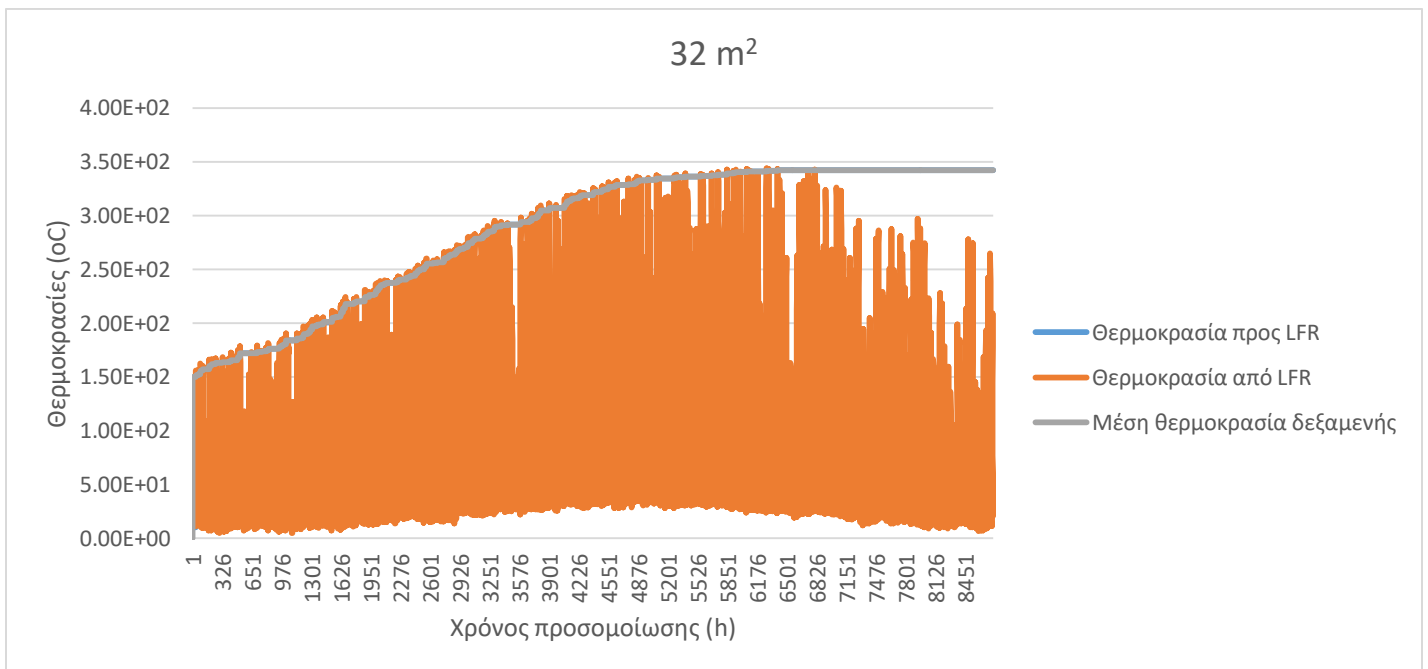
Πίνακας 4.1.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης για αρχικό σενάριο.

4.1.1 Παράμετρος 1: Επιφάνεια συλλέκτη

Για επιφάνεια στοιχείου 32 m²:

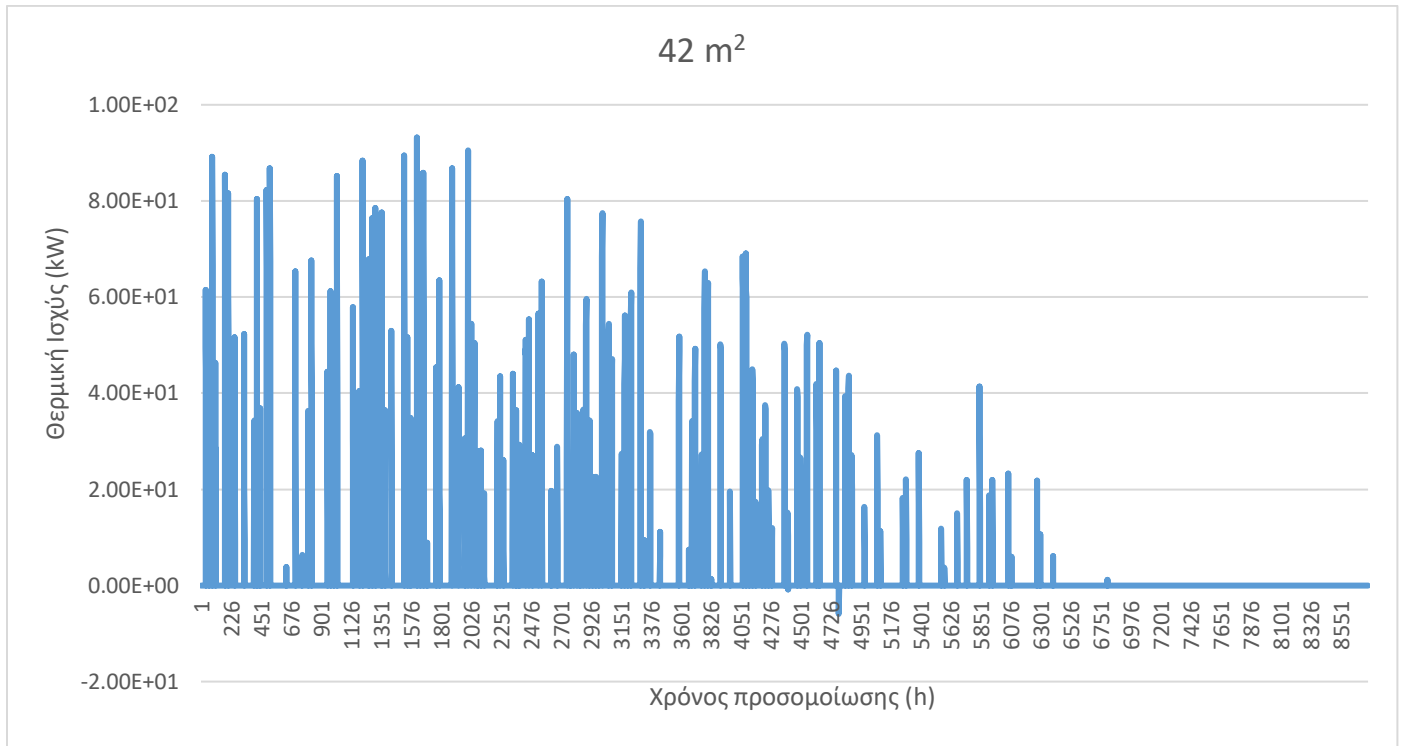


Διάγραμμα 2: Θερμική ισχύς για επιφάνεια στοιχείου 32 m².

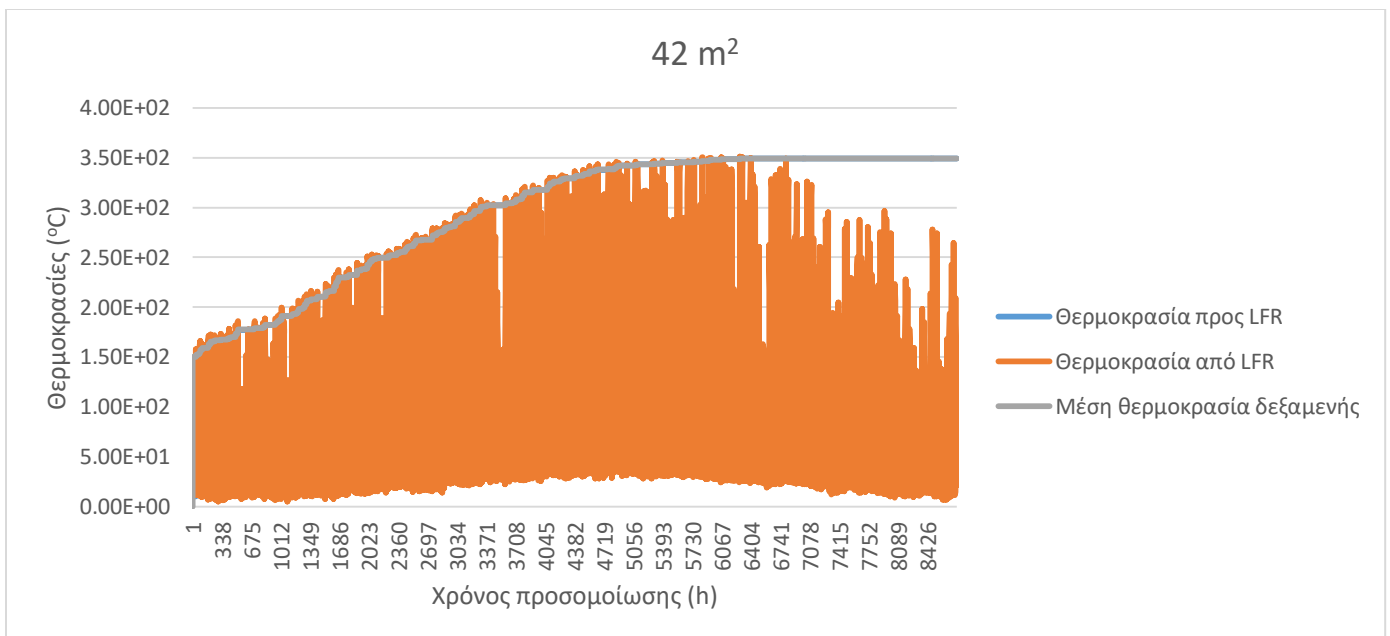


Διάγραμμα 4.1.1.2: Θερμοκρασία για επιφάνεια στοιχείου 32 m².

Για επιφάνεια στοιχείου 42 m² έχουμε:

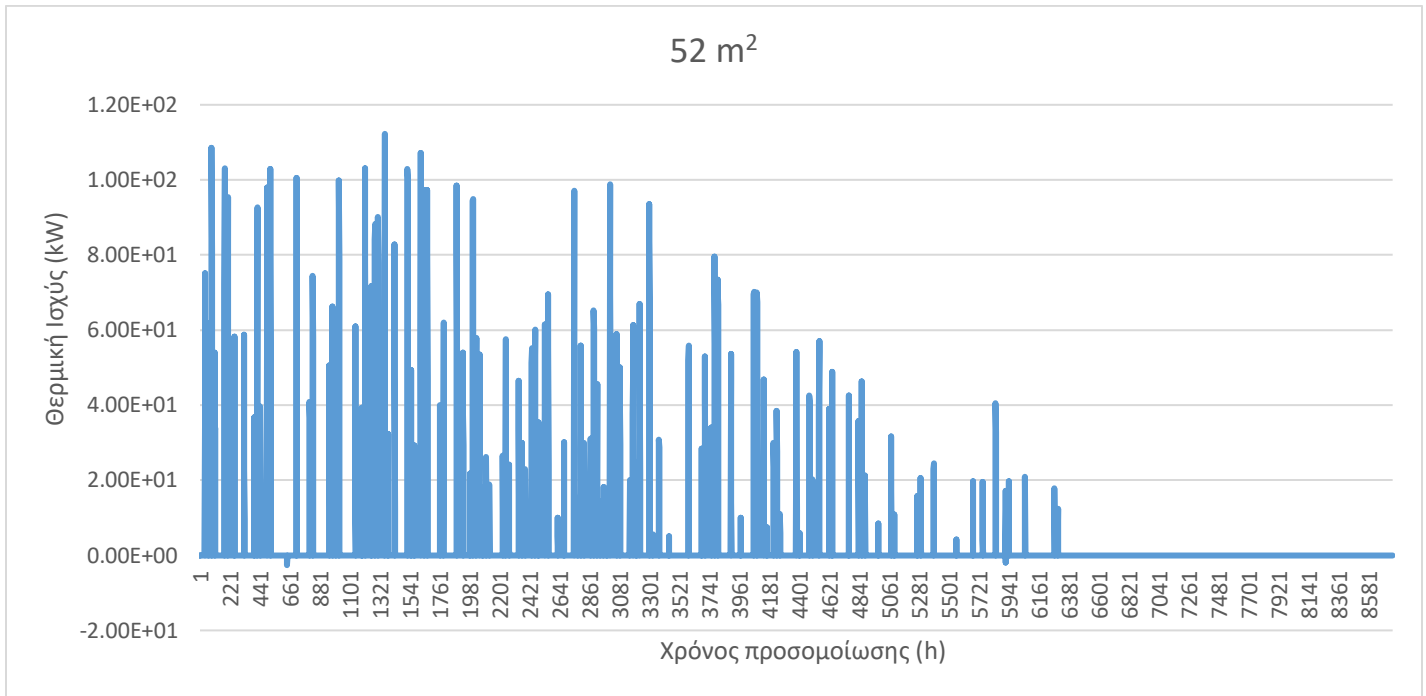


Διάγραμμα 4.1.1.3: Θερμική ισχύς για επιφάνεια στοιχείου 42 m².

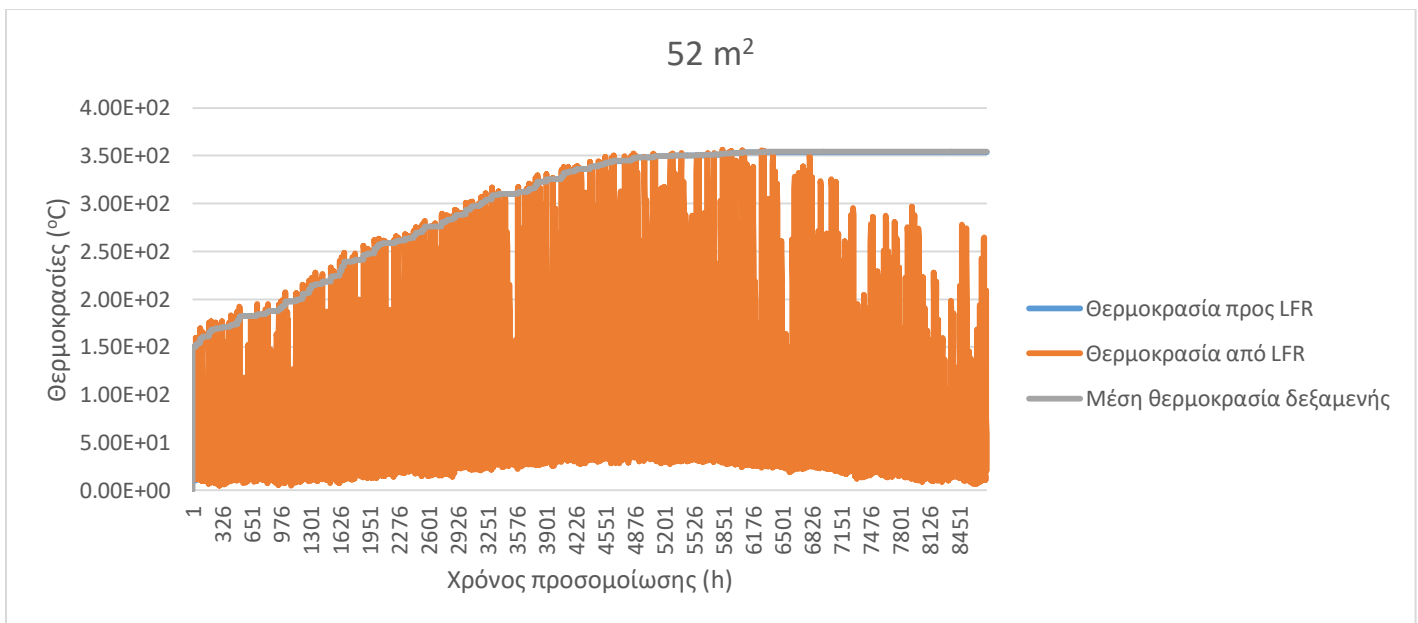


Διάγραμμα 4.1.1.4: Θερμοκρασία για επιφάνεια στοιχείου 42 m².

Για επιφάνεια στοιχείου 52 m² έχουμε:

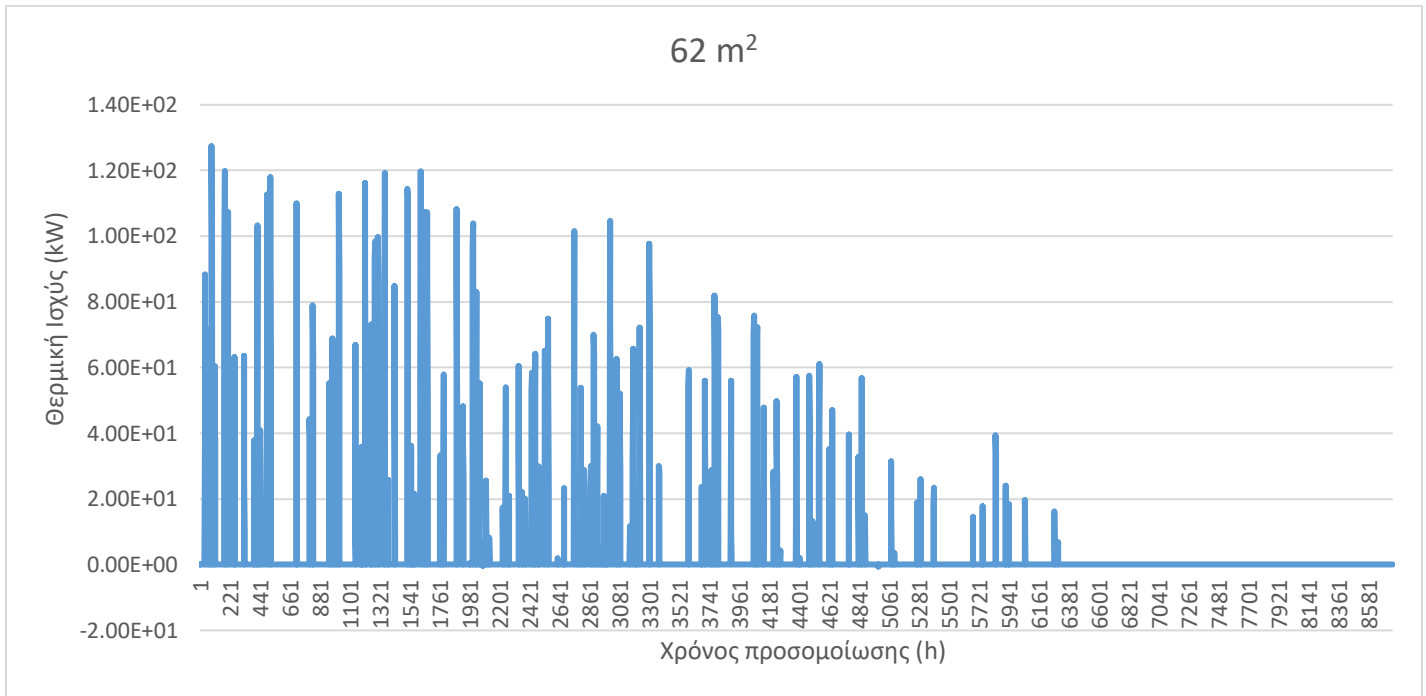


Διάγραμμα 4.1.1.5: Θερμική ισχύς για επιφάνεια στοιχείου 52 m².

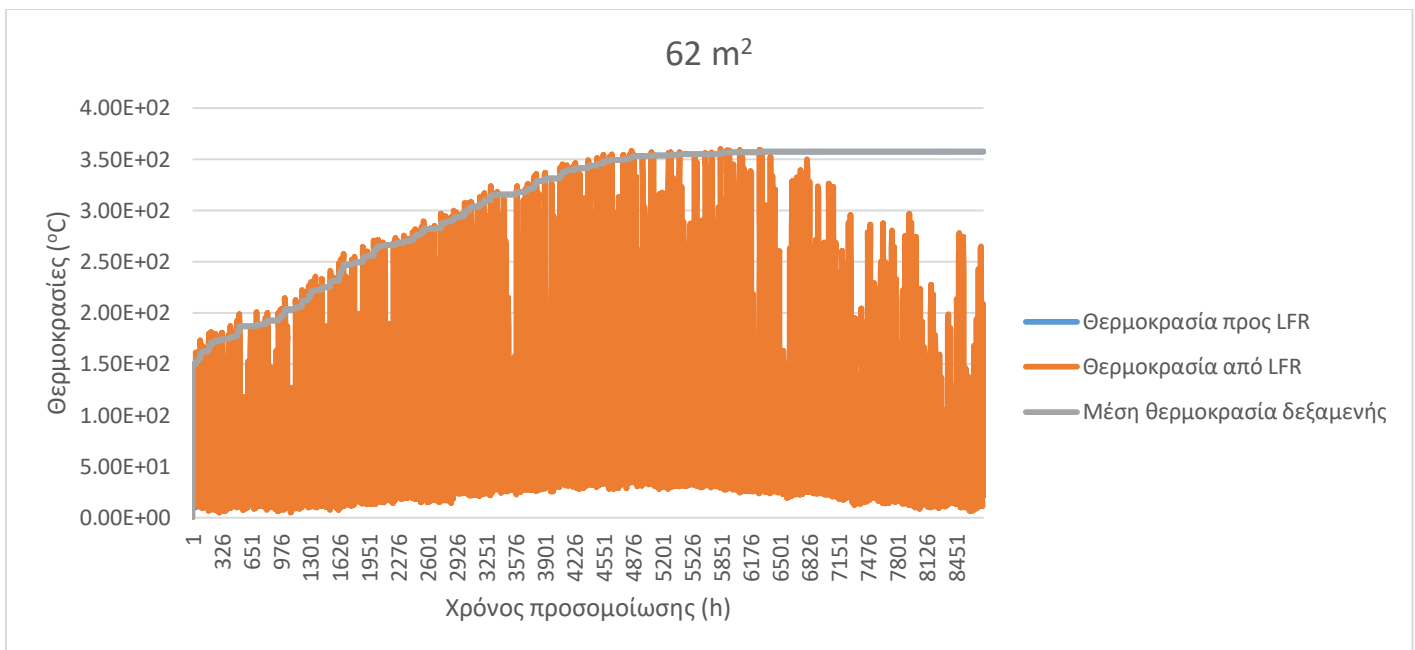


Διάγραμμα 4.1.1.6: Θερμοκρασία για επιφάνεια στοιχείου 52 m².

Για επιφάνεια στοιχείου 62 m² έχουμε:



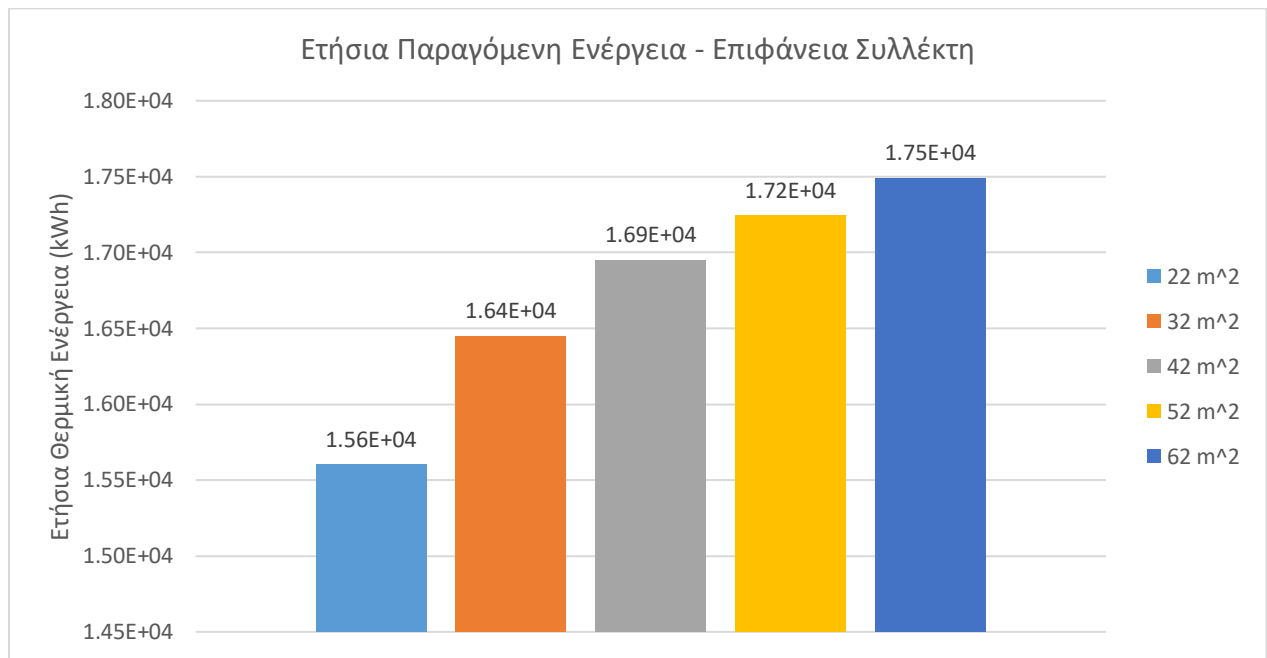
Διάγραμμα 4.1.1.7: Θερμική ισχύς για επιφάνεια στοιχείου 62 m².



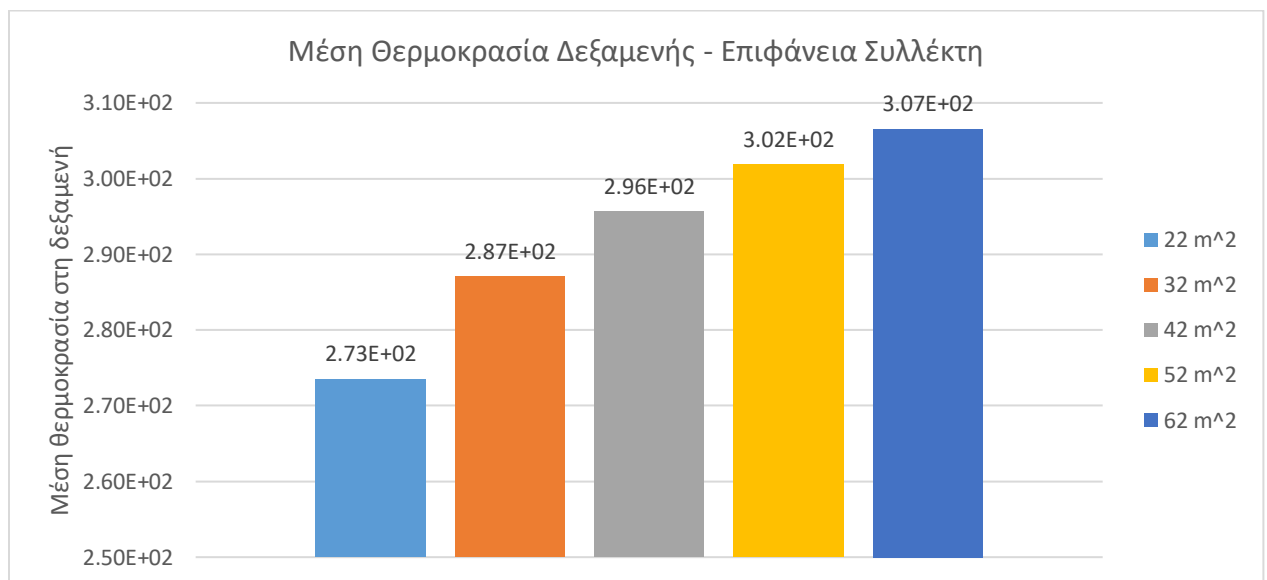
Διάγραμμα 4.1.1.8: Θερμοκρασία για επιφάνεια στοιχείου 62 m².

	22 m ²	32 m ²	42 m ²	52 m ²	62 m ²
Συνολική ετήσια θερμική ενέργεια (kWh)	15600	16400	16900	17200	17500
Μέγιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	329	342	349	354	357
Ελάχιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	10	10	10	10	10
Μέγιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	331	344	351	356	360
Ελάχιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72
Μέγιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	329	342	349	354	357
Ελάχιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.1.1.1: Αποτελέσματα για διαφορετικές επιφάνειες συλλέκτη.



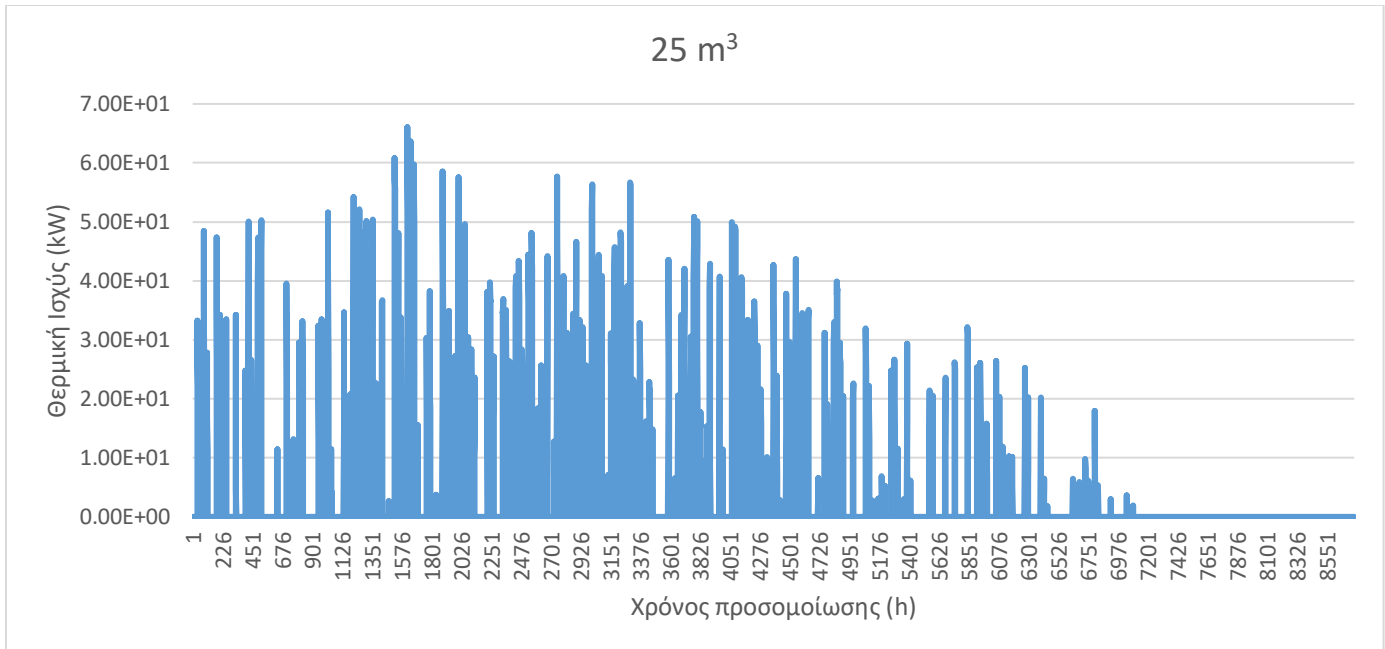
Διάγραμμα 4.1.1.9: Συγκριτικό διάγραμμα παραγόμενης ενέργειας σεναρίων για διαφορετικές επιφάνειες συλλέκτη.



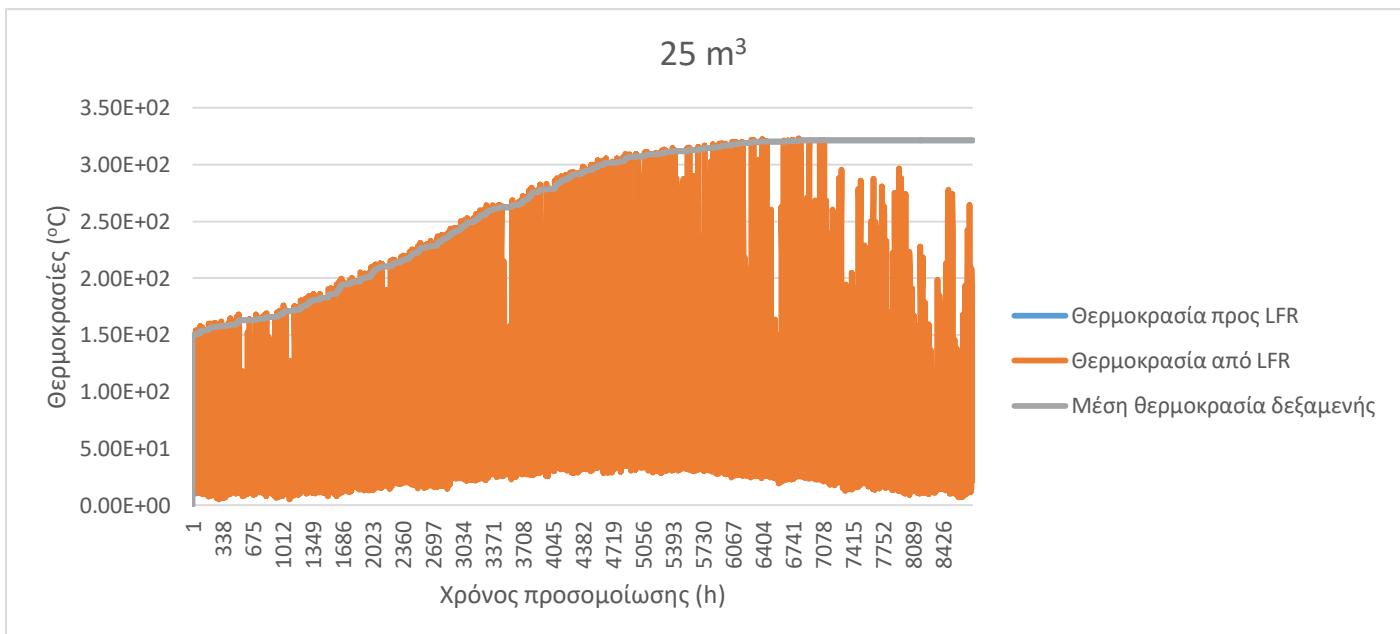
Διάγραμμα 4.1.1.10: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας δεξαμενής για διαφορετικές επιφάνειες συλλέκτη.

4.1.2 Παράμετρος 2: Χωρητικότητα δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας

Για χωρητικότητα δεξαμενής 25 m³:

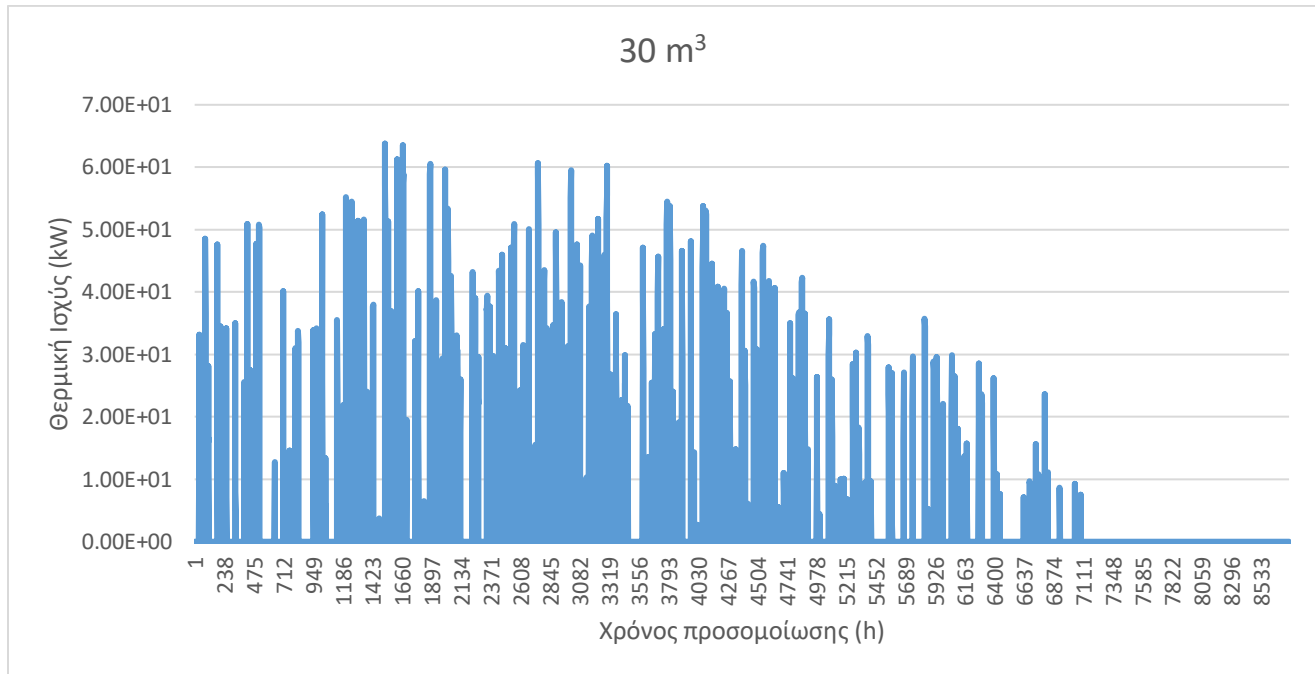


Διάγραμμα 4.1.2.1: Θερμική ισχύς για χωρητικότητα δεξαμενής 25 m³.

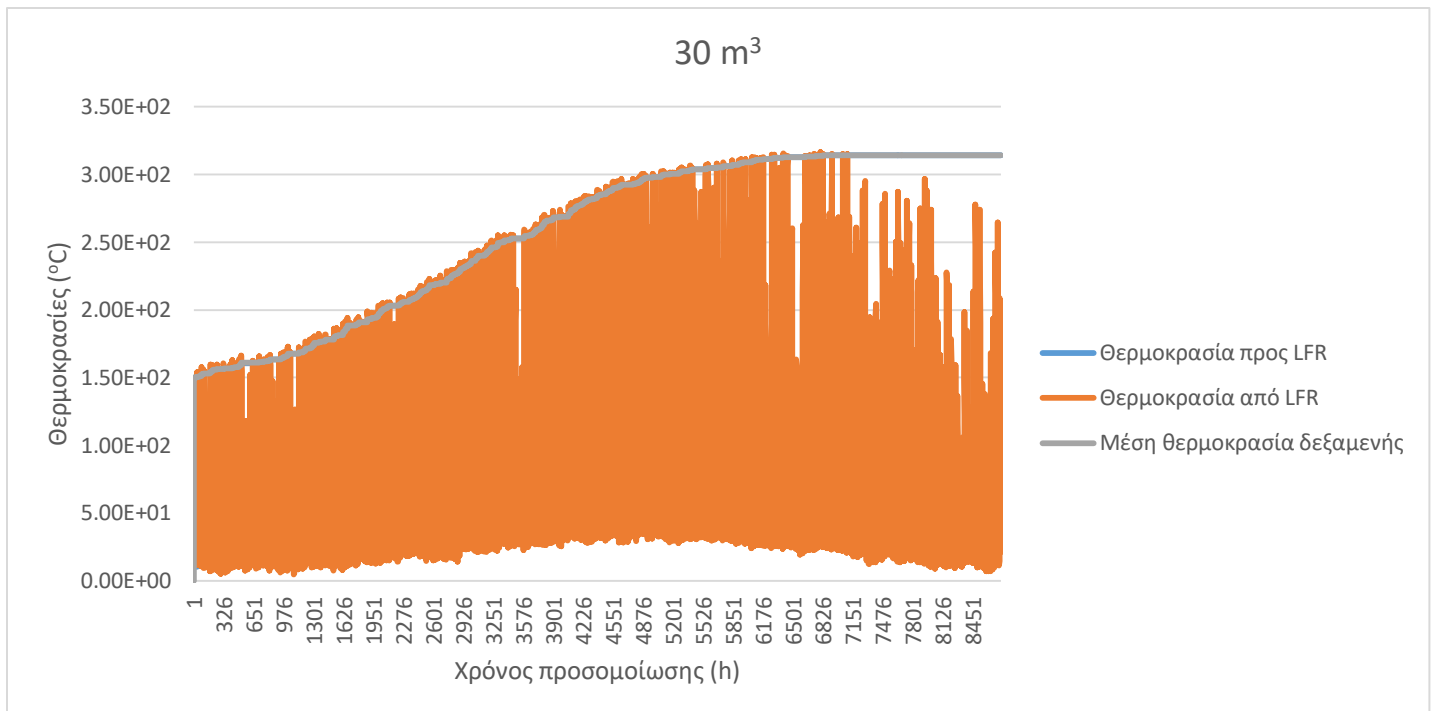


Διάγραμμα 4.1.2.2: Θερμοκρασίες για χωρητικότητα δεξαμενής 25 m³.

Για χωρητικότητα δεξαμενής 30 m³:

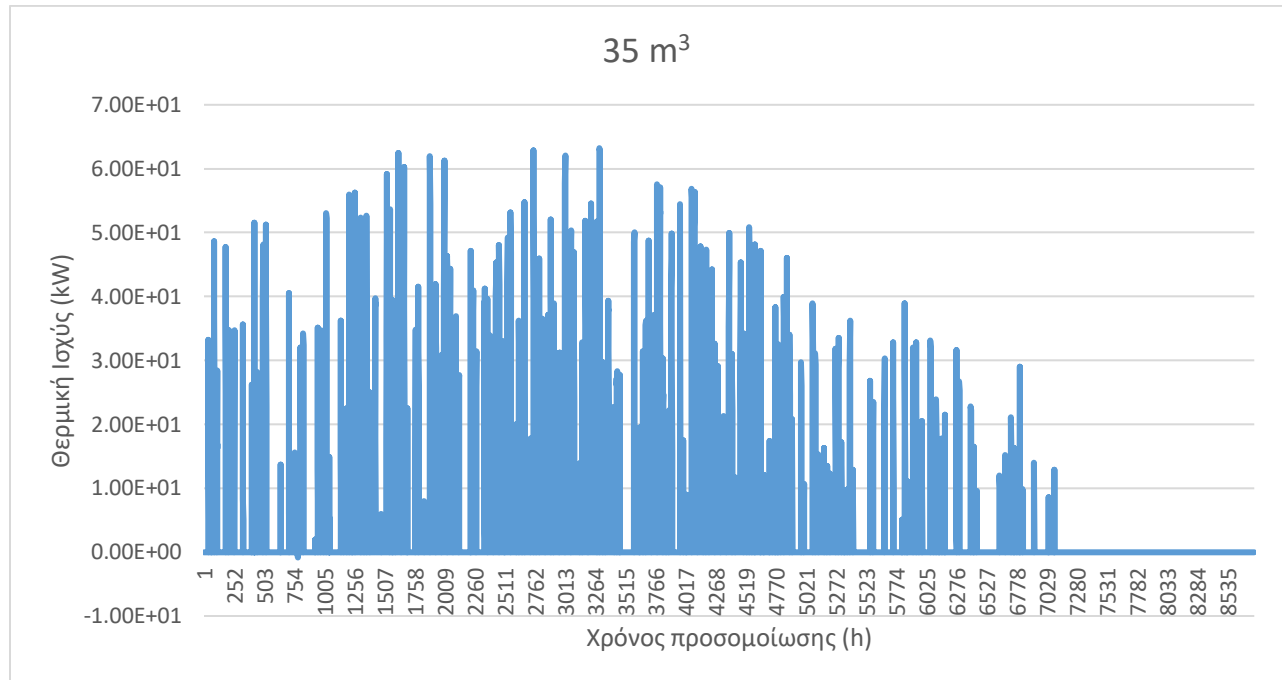


Διάγραμμα 4.1.2.3: Θερμική ισχύς για χωρητικότητα δεξαμενής 30 m³.

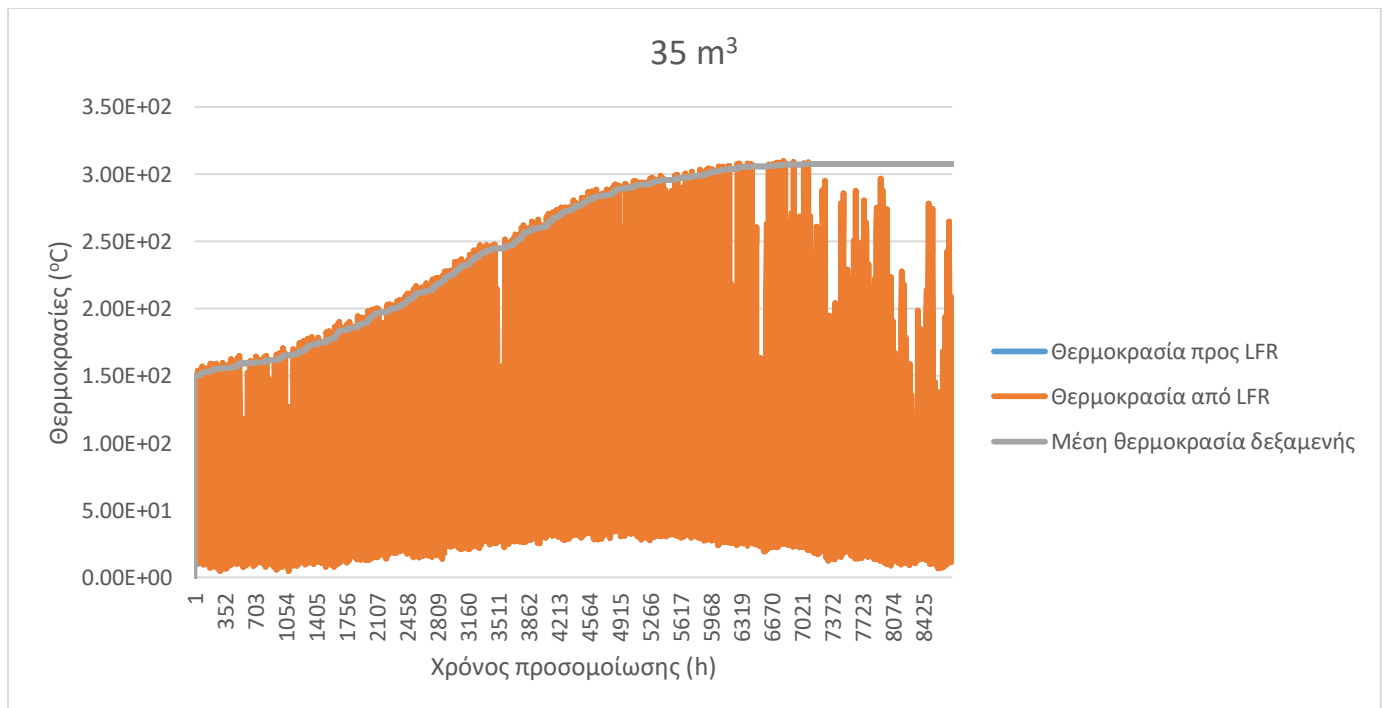


Διάγραμμα 4.1.2.4: Θερμοκρασίες για χωρητικότητα δεξαμενής 30 m³.

Για χωρητικότητα δεξαμενής 35 m³:

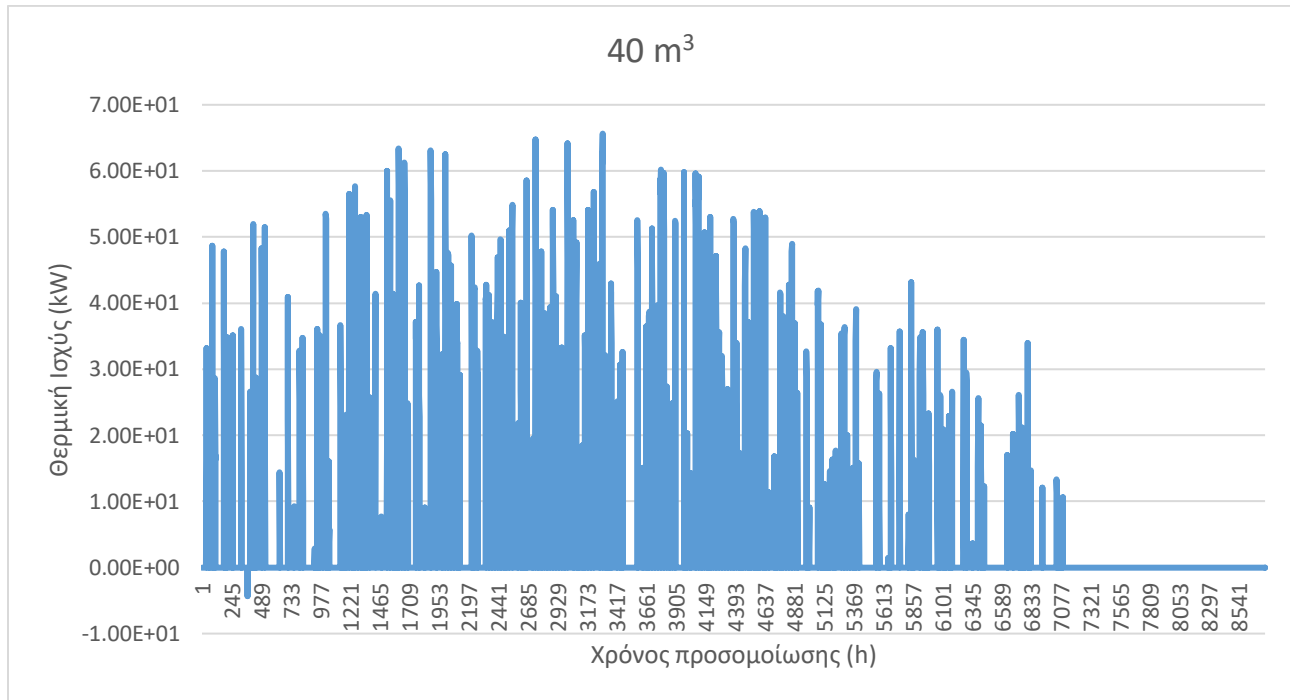


Διάγραμμα 4.1.2.5: Θερμική ισχύς για χωρητικότητα δεξαμενής 35 m³.

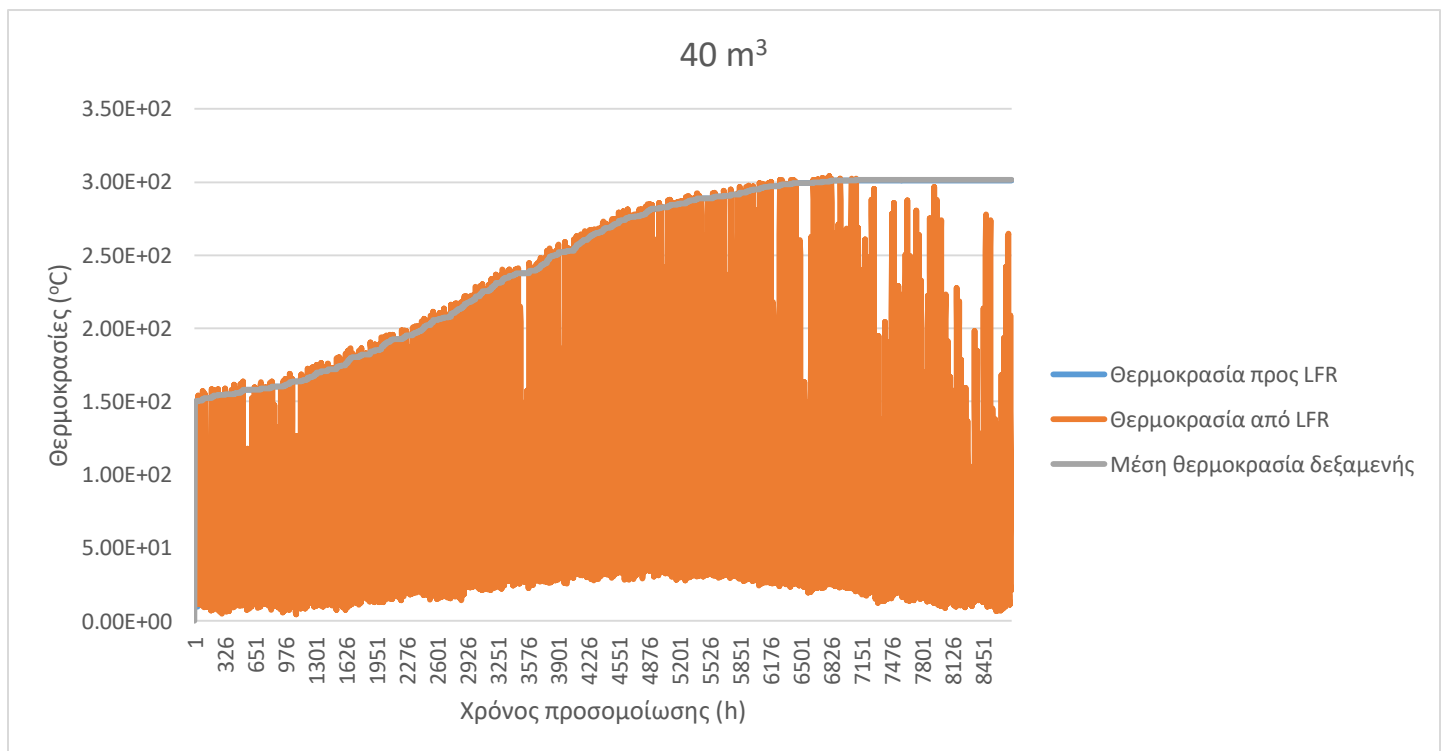


Διάγραμμα 4.1.2.6: Θερμοκρασίες για χωρητικότητα δεξαμενής 35 m³.

Για χωρητικότητα δεξαμενής 40 m³:



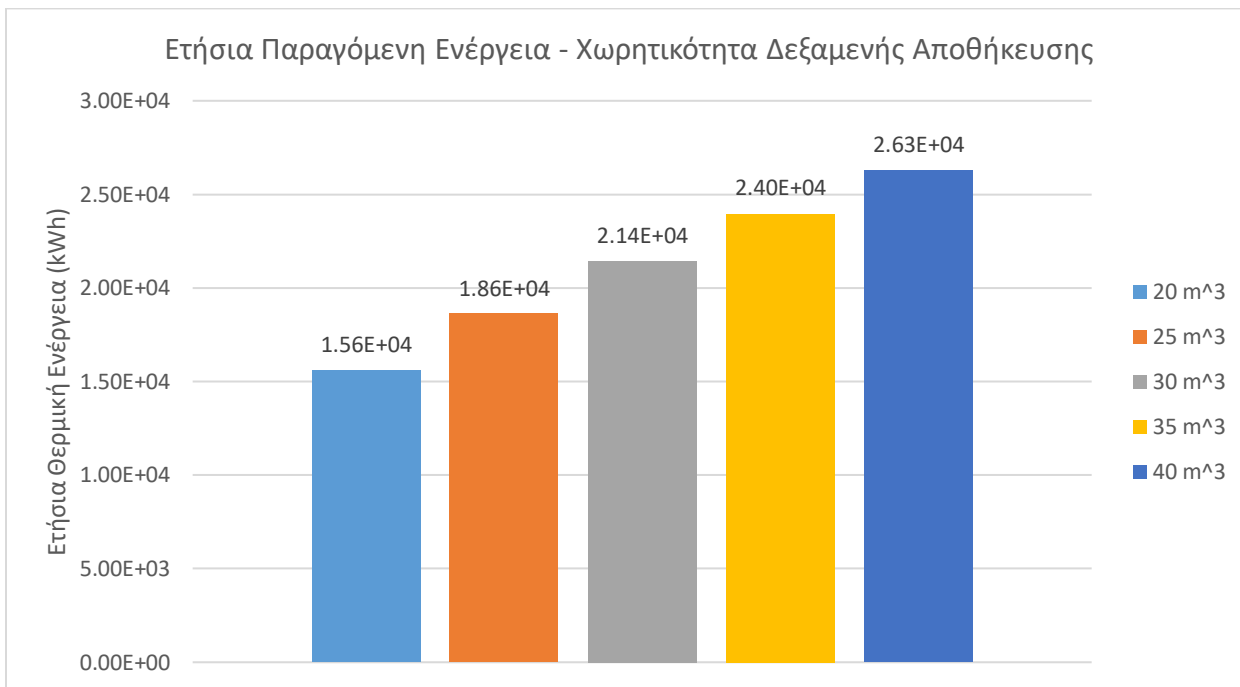
Διάγραμμα 4.1.2.7: Θερμική ισχύς για χωρητικότητα δεξαμενής 40 m³.



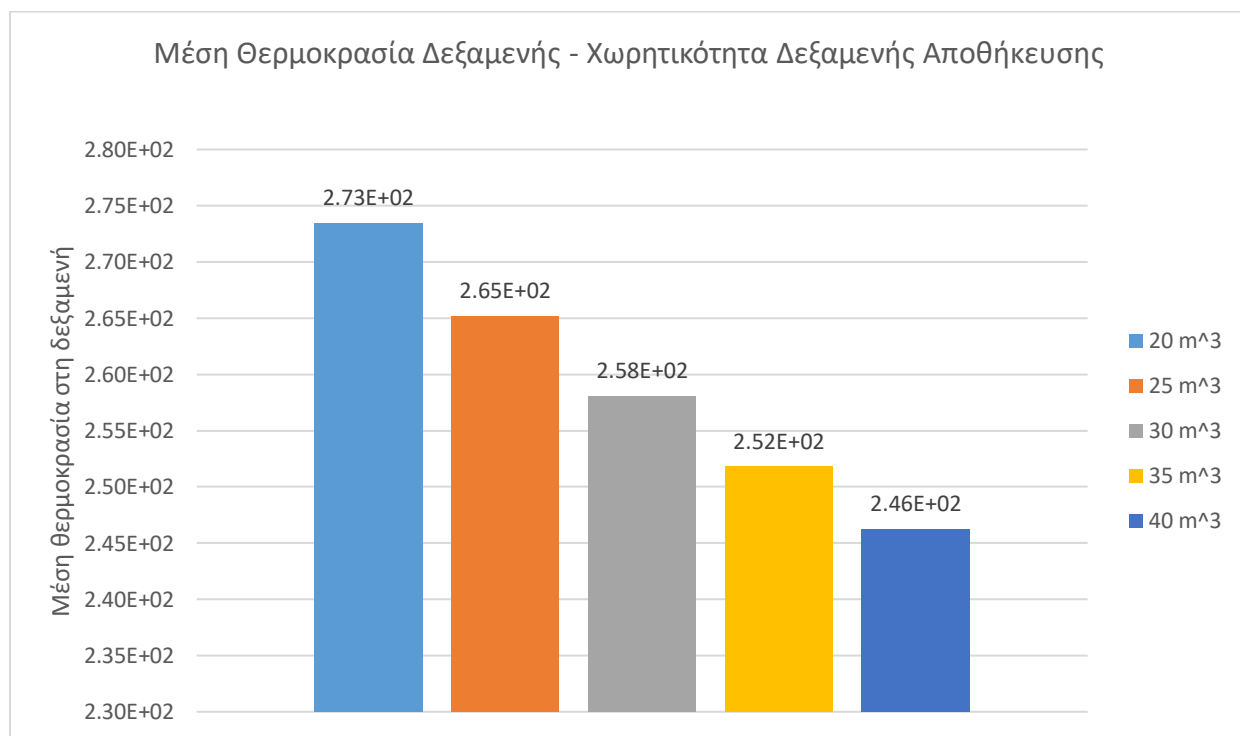
Διάγραμμα 4.1.2.8: Θερμοκρασίες για χωρητικότητα δεξαμενής 40 m³.

	20 m ³	25 m ³	30 m ³	35 m ³	40 m ³
Συνολική ετήσια θερμική ενέργεια (kWh)	15600	18600	21400	24000	26300
Μέγιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	329	321	314	307	301
Ελάχιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	10	10	10	10	10
Μέγιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	331	323	316	310	304
Ελάχιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72
Μέγιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	329	321	314	308	301
Ελάχιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.1.2.1: Αποτελέσματα για διαφορετικές χωρητικότητες δεξαμενής.



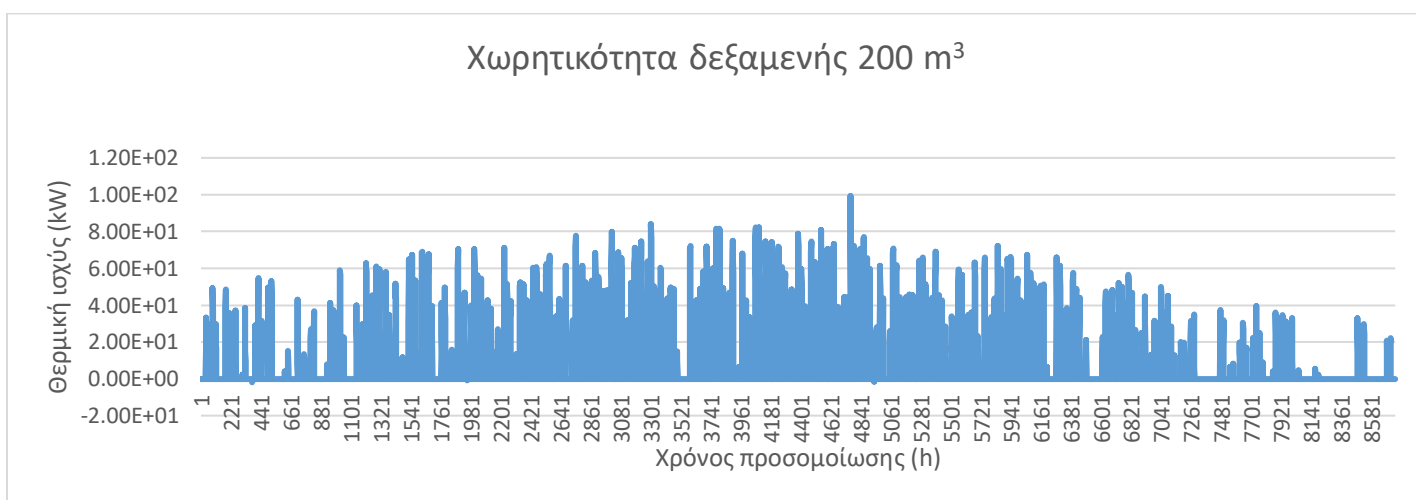
Διάγραμμα 4.1.2.9: Συγκριτικό διάγραμμα παραγόμενης ενέργειας σεναρίων για διαφορετικές χωρητικότητες δεξαμενής.



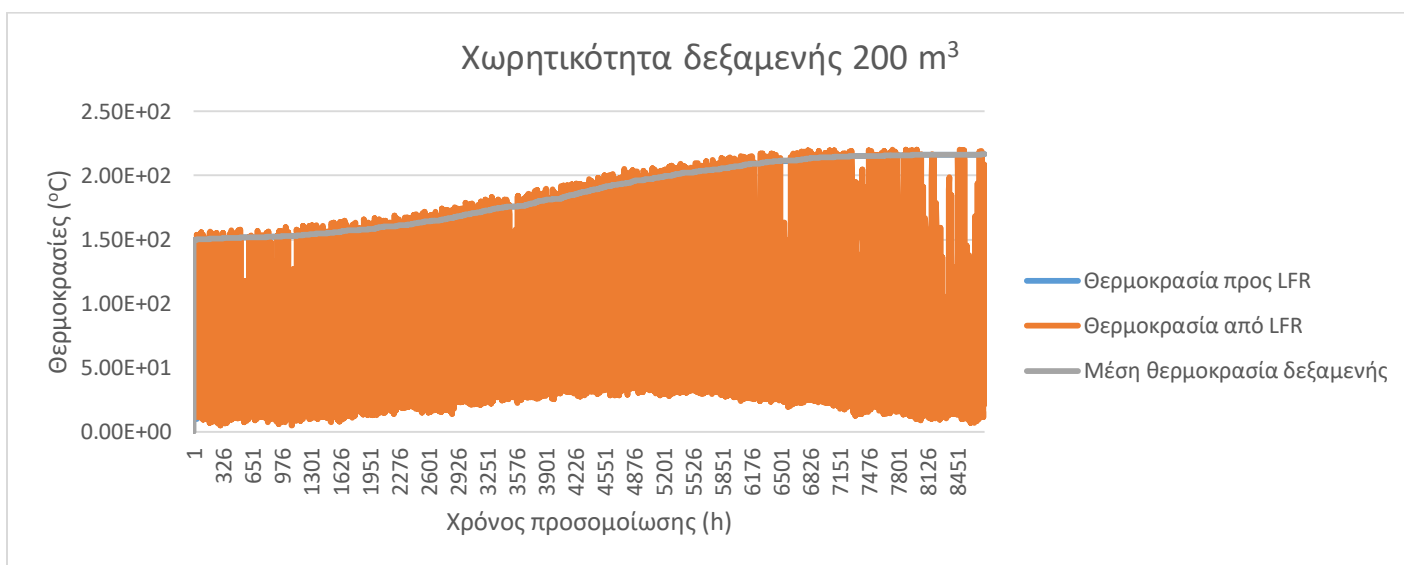
Διάγραμμα 4.1.2.10: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας δεξαμενής για διαφορετικές χωρητικότητες δεξαμενής.

Γενικά, παρατηρείται σε όλες τις προσομοιώσεις ότι η παραγωγή θερμικής ενέργειας σταματάει από ένα σημείο και μετά. Επίσης, θα ήταν αναμενόμενο η μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας να λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, κάτι που δε συμβαίνει.

Ο καθοριστικός παράγοντας για τα παραπάνω προβλήματα αποδείχθηκε να είναι η χωρητικότητα της δεξαμενής. Το σύστημα δύναται να αξιοποιήσει μόνο την ενέργεια που αποθηκεύεται στη δεξαμενή. Έτσι, όταν η δεξαμενή φτάσει στη μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει, η ενέργεια που παράγεται μετέπειτα απορρίπτεται. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για χωρητικότητα δεξαμενής ίση με 200 m^3 , στα οποία φαίνεται πως το πρόβλημα έχει αντιμετωπιστεί.



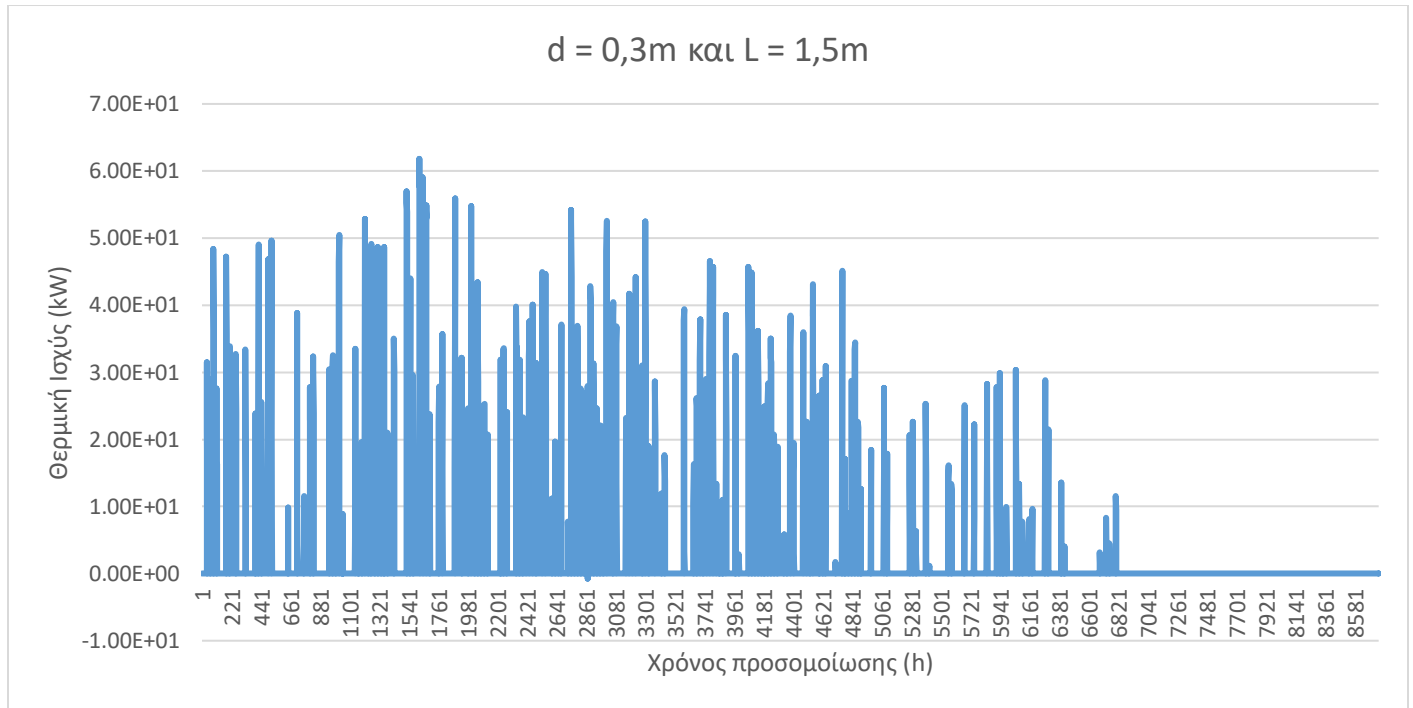
Διάγραμμα 4.1.2.11: Θερμική ισχύς για χωρητικότητα δεξαμενής 200 m^3 .



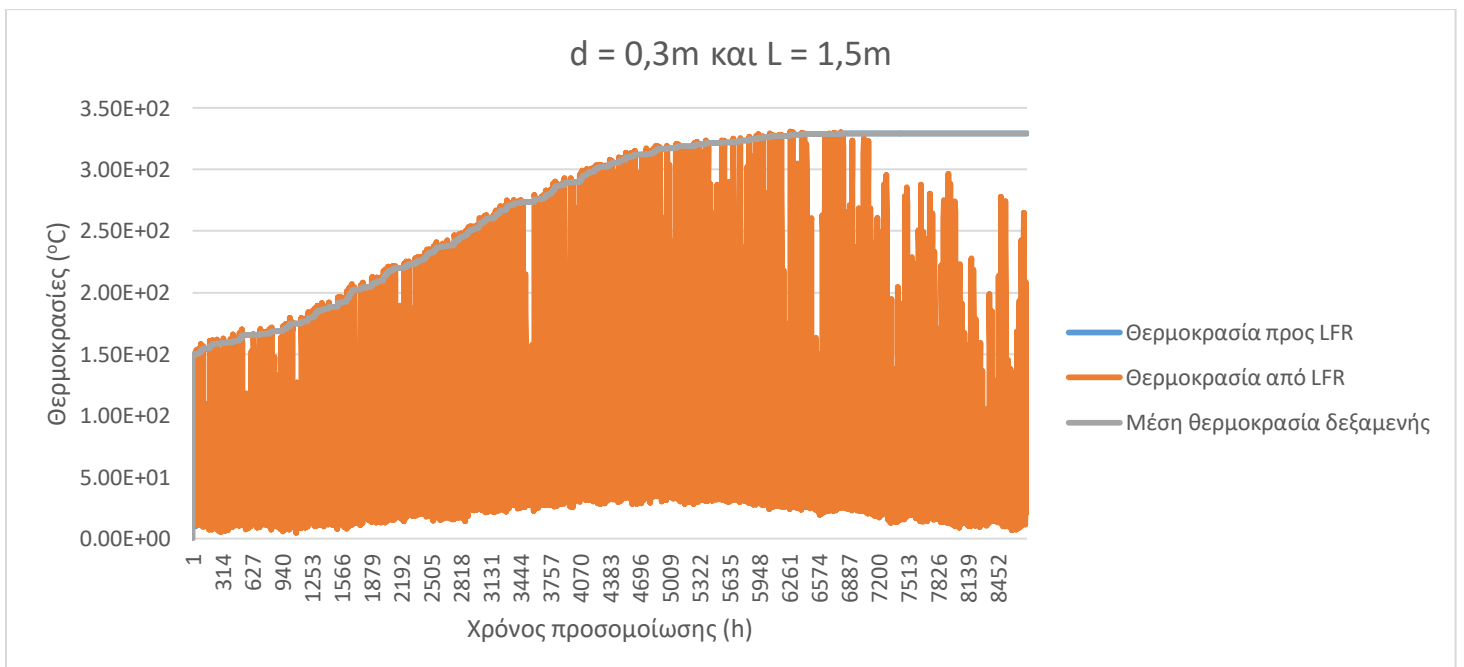
Διάγραμμα 4.1.2.12: Θερμοκρασίες για χωρητικότητα δεξαμενής 200 m^3 .

4.1.3 Παράμετρος 3: Διαστάσεις σωλήνα

Για διάμετρο 0,3 m και μήκος 1,5 m:

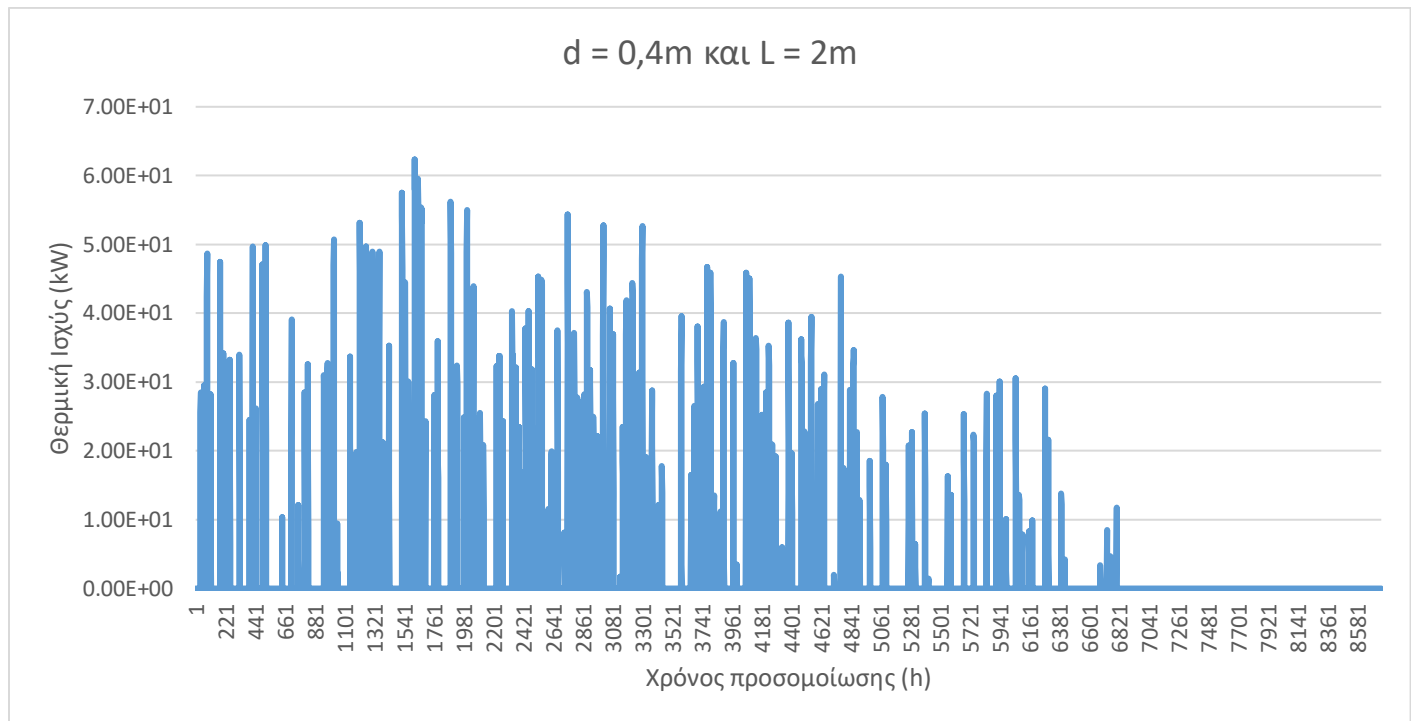


Διάγραμμα 4.1.3.1: Θερμική ισχύς για διάμετρο σωλήνα 0,3 m και μήκος σωλήνα 1,5 m.

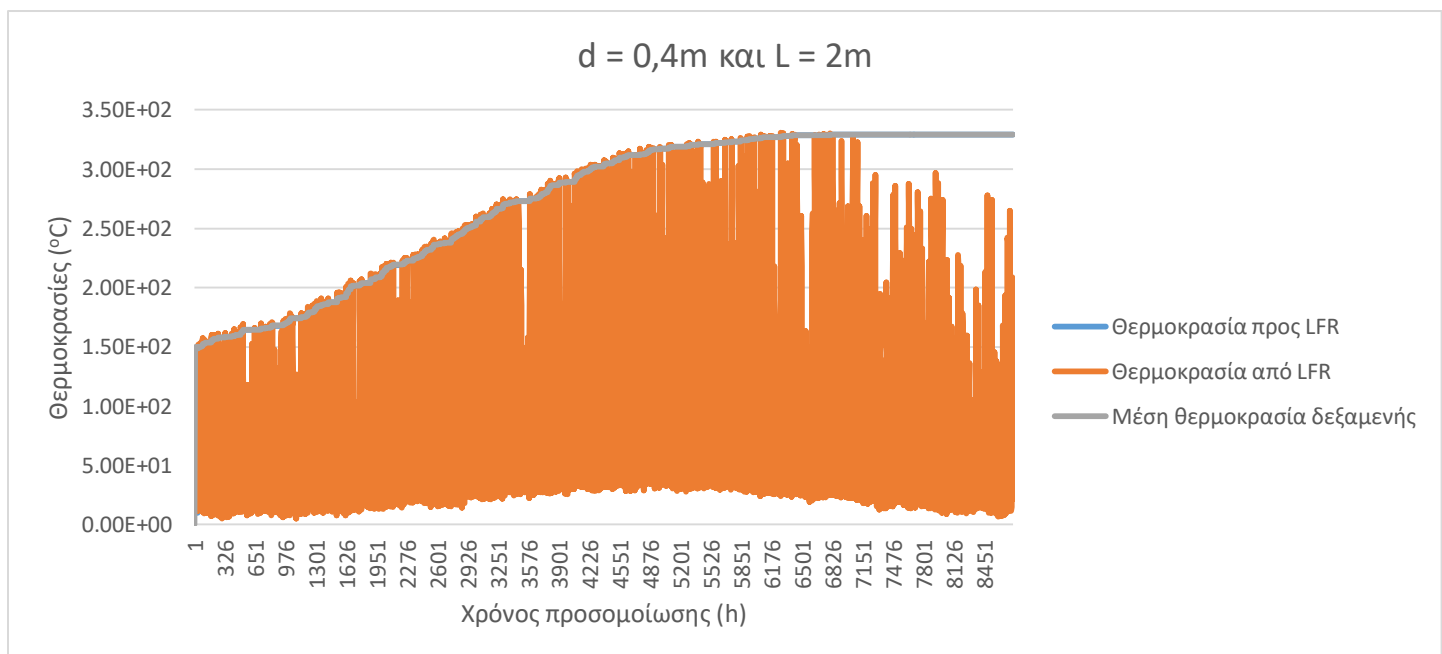


Διάγραμμα 4.1.3.2: Θερμοκρασίες για διάμετρο σωλήνα 0,3 m και μήκος σωλήνα 1,5 m.

Για διάμετρο 0,4 m και μήκος 2 m:

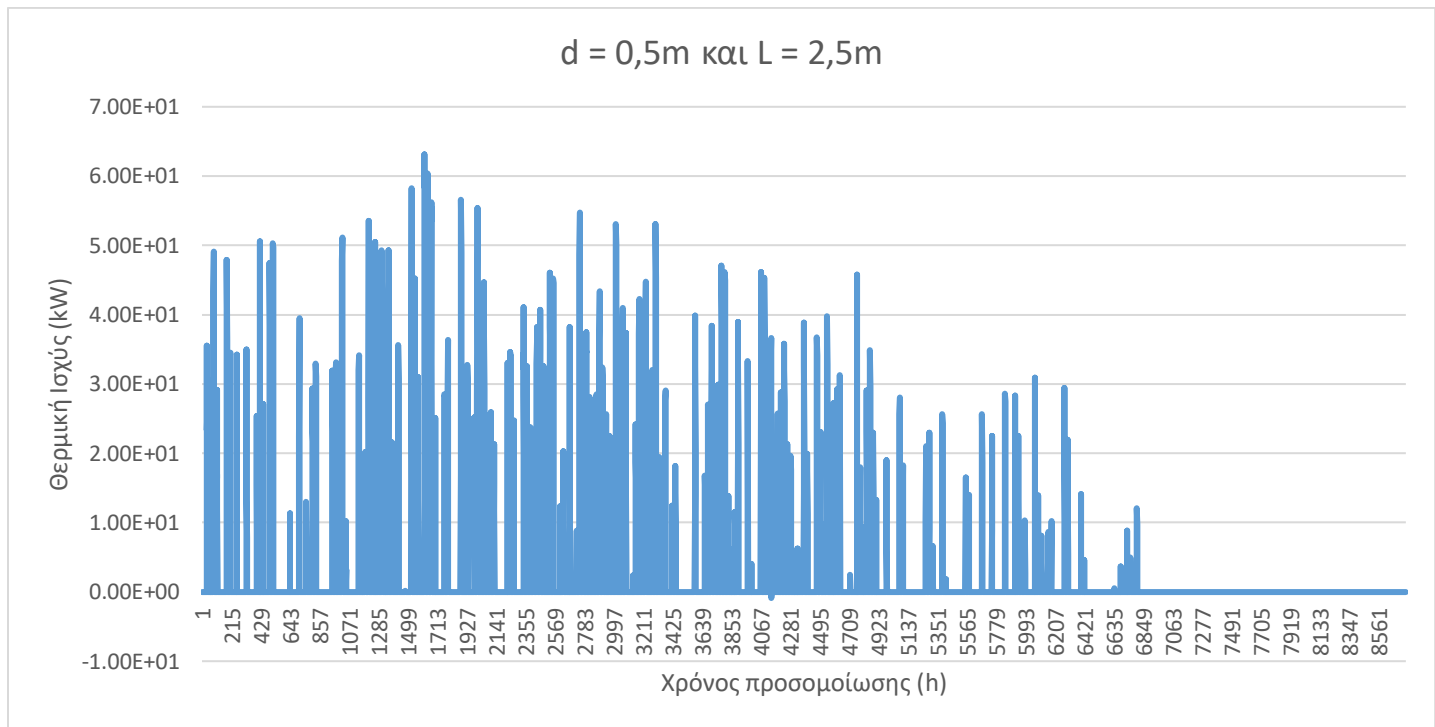


Διάγραμμα 4.1.3.3: Θερμική ισχύς για διάμετρο σωλήνα 0,4 m και μήκος σωλήνα 2 m.

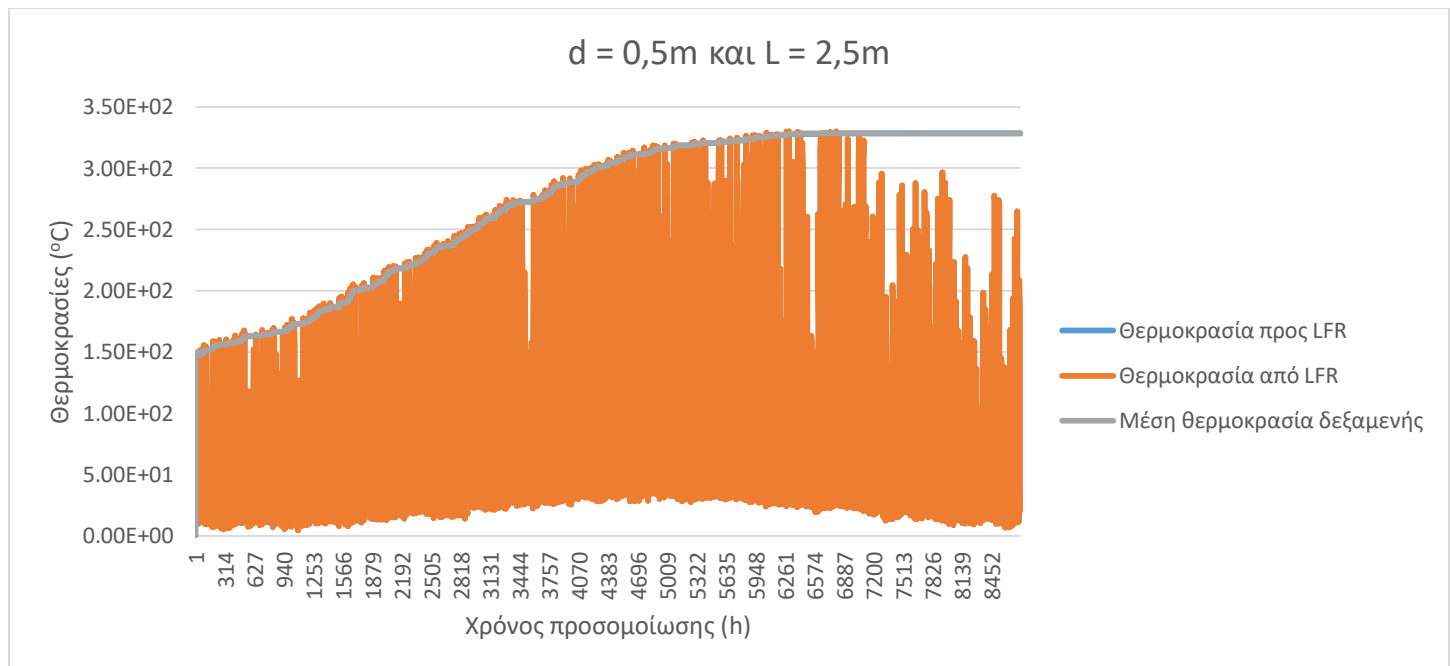


Διάγραμμα 4.1.3.4: Θερμοκρασίες για διάμετρο σωλήνα 0,4 m και μήκος σωλήνα 2 m.

Για διάμετρο 0,5 m και μήκος 2,5 m:

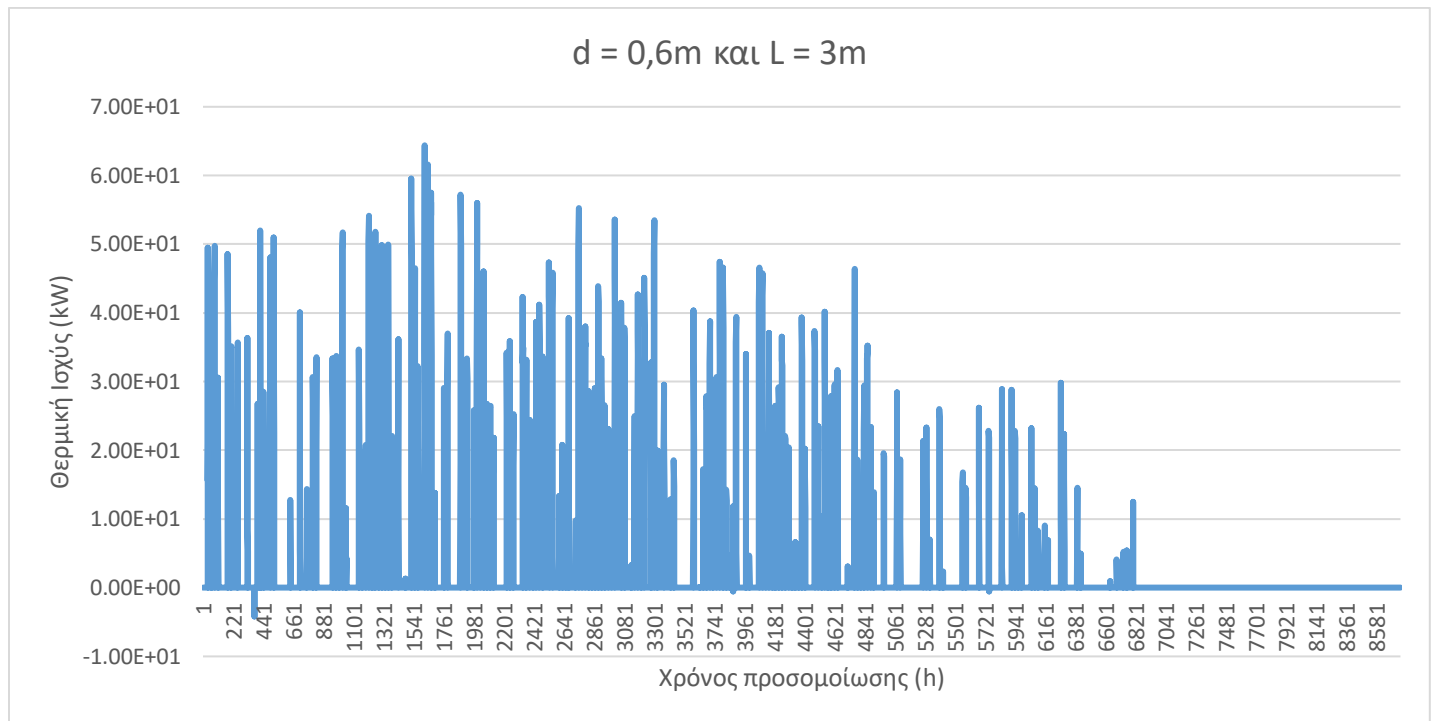


Διάγραμμα 4.1.3.5: Θερμική ισχύς για διάμετρο σωλήνα 0,5 m και μήκος σωλήνα 2,5 m.

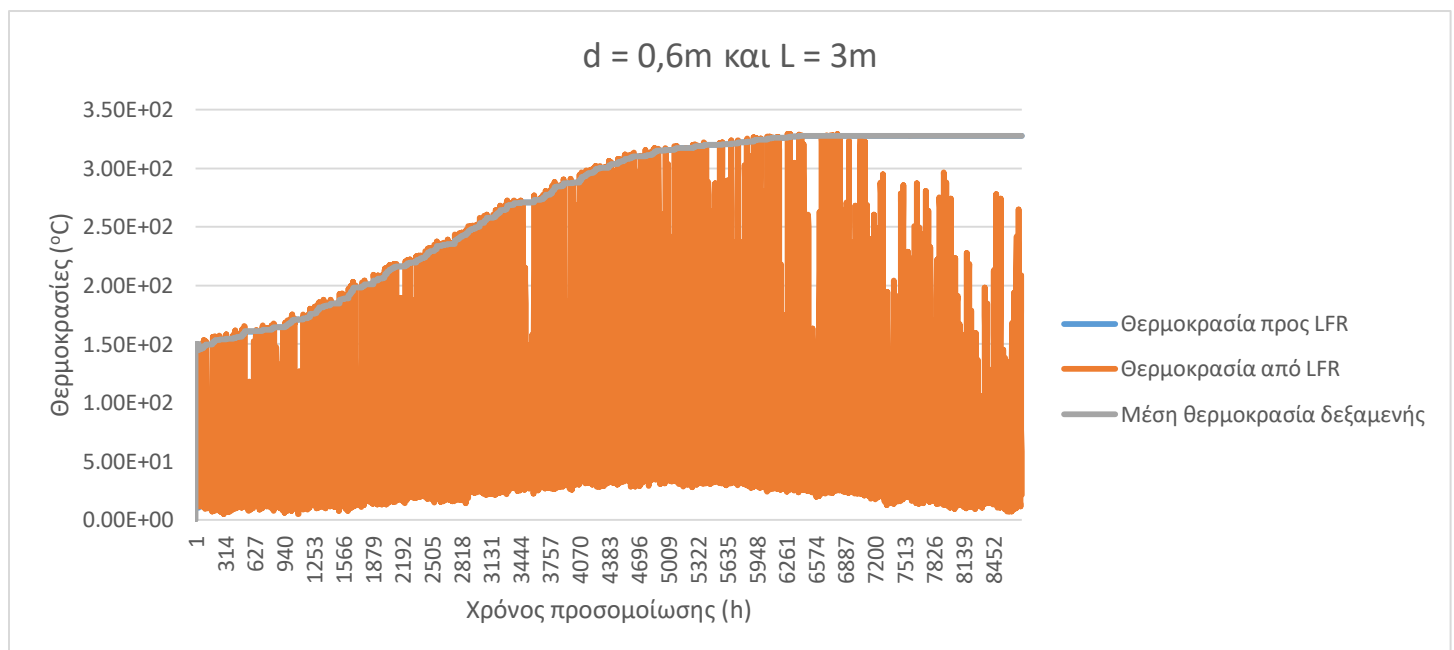


Διάγραμμα 4.1.3.6: Θερμοκρασίες για διάμετρο σωλήνα 0,5 m και μήκος σωλήνα 2,5 m.

Για διάμετρο 0,6 m και μήκος 3 m:



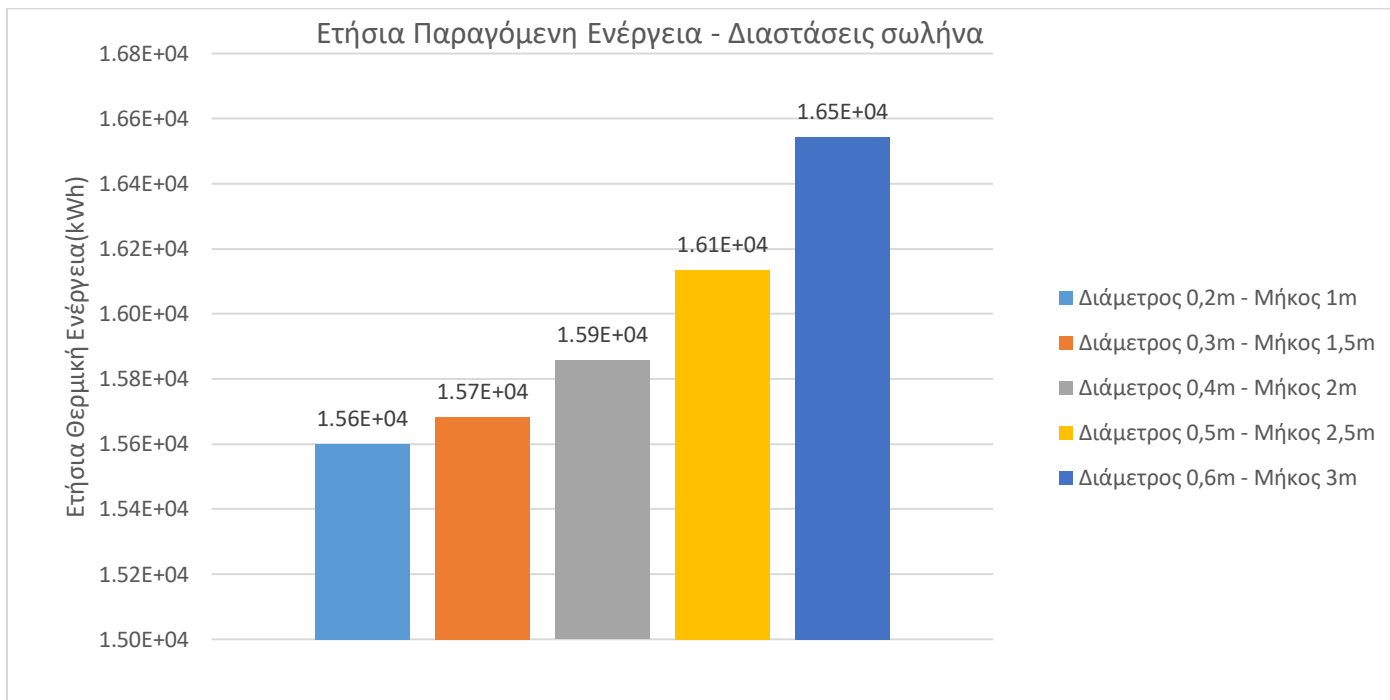
Διάγραμμα 4.1.3.7: Θερμική ισχύς για διάμετρο σωλήνα 0,6 m και μήκος σωλήνα 3 m.



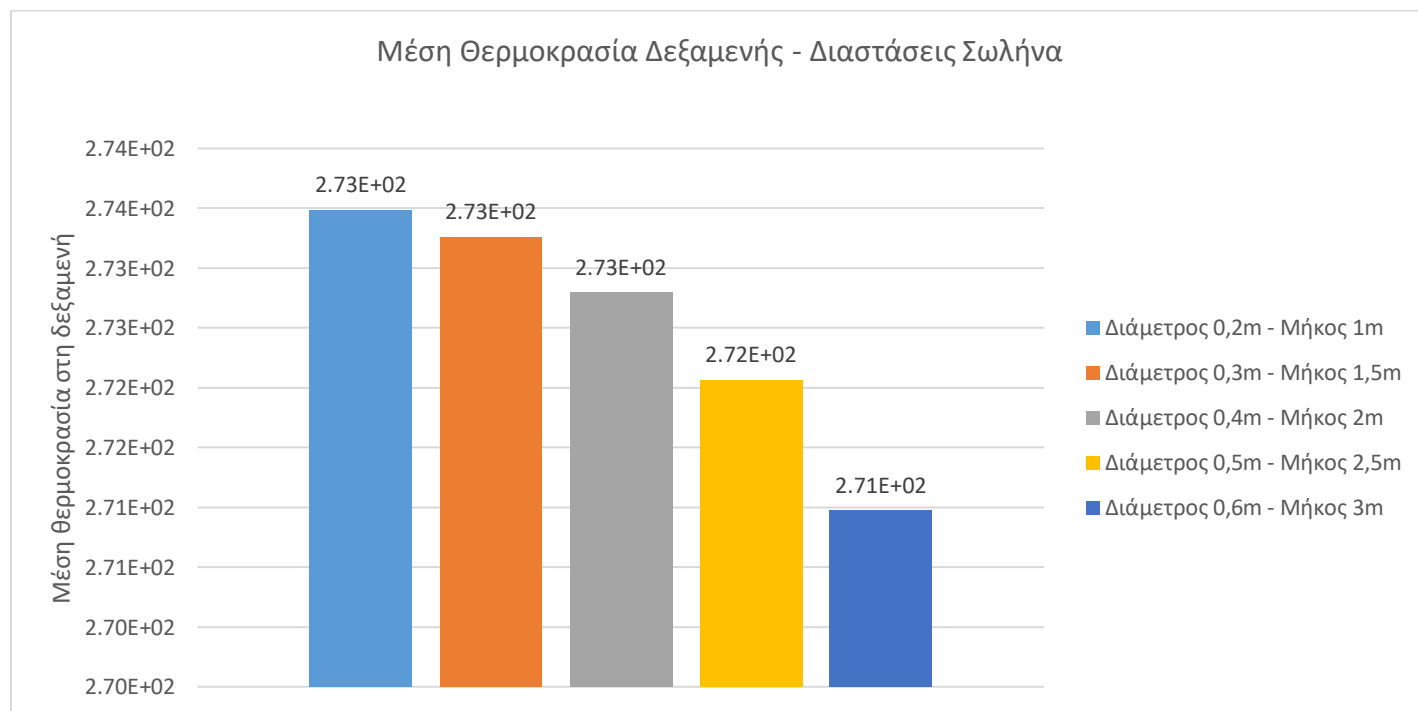
Διάγραμμα 4.1.3.8: Θερμοκρασίες για διάμετρο σωλήνα 0,6 m και μήκος σωλήνα 3 m.

	d=0,2m L=1m	d=0,3m L=1,5m	d=0,4m L=2m	d=0,5m L=2,5m	d=0,6m L=3m
Συνολική ετήσια θερμική ενέργεια (kWh)	15600	15700	15900	16100	16500
Μέγιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	329	329	329	329	328
Ελάχιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	10	10	10	10	10
Μέγιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	331	331	331	330	330
Ελάχιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72
Μέγιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	329	329	329	329	328
Ελάχιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.1.3.1: Αποτελέσματα για διαφορετικές διαστάσεις σωλήνα.



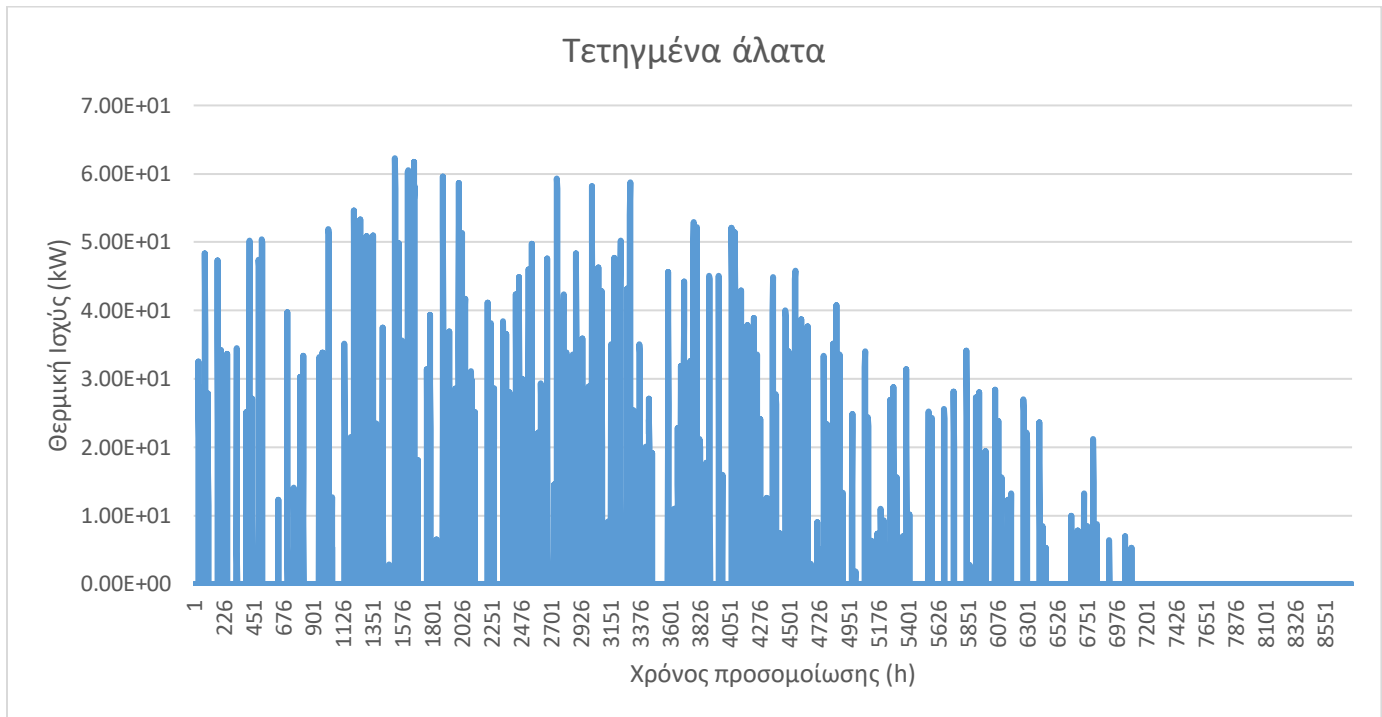
Διάγραμμα 4.1.3.9: Συγκριτικό διάγραμμα παραγόμενης ενέργειας σεναρίων για διαφορετικές διαστάσεις σωλήνα.



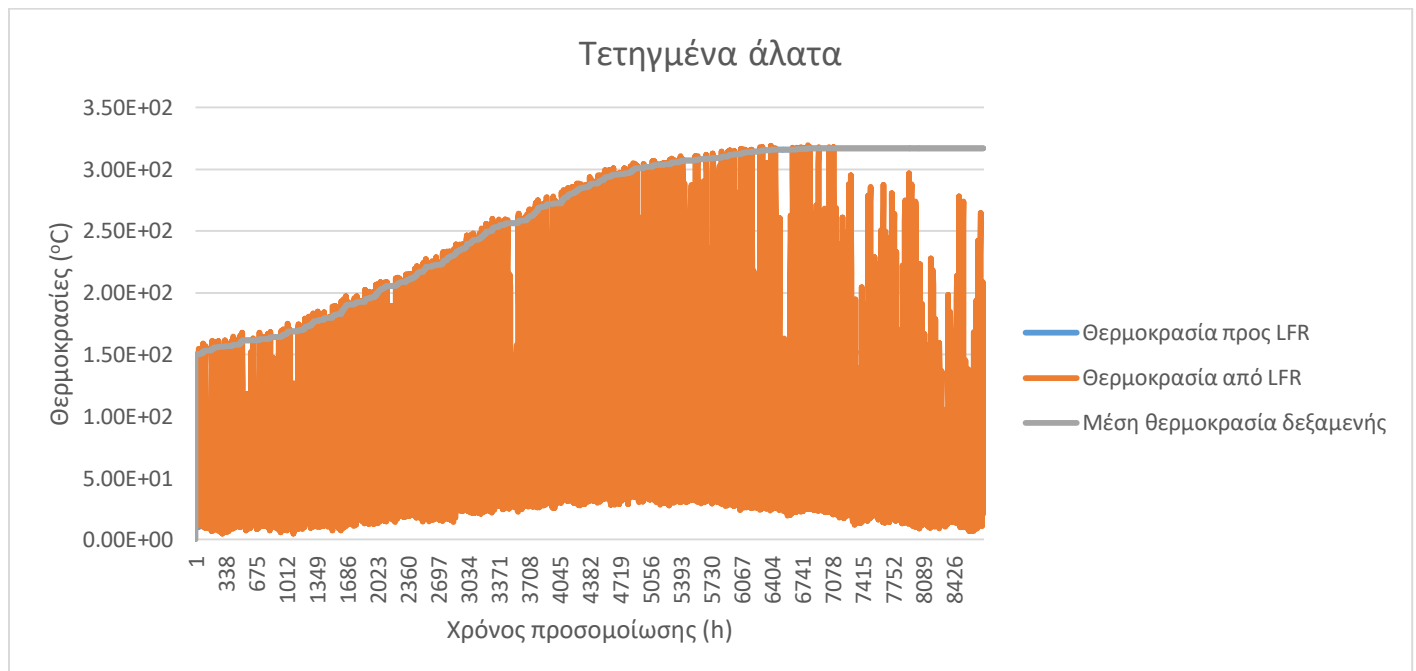
Διάγραμμα 4.1.3.10: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας δεξαμενής για διαφορετικές διαστάσεις σωλήνα.

4.1.4 Παράμετρος 4: Θερμικό ρευστό

Για τετηγμένα άλατα:

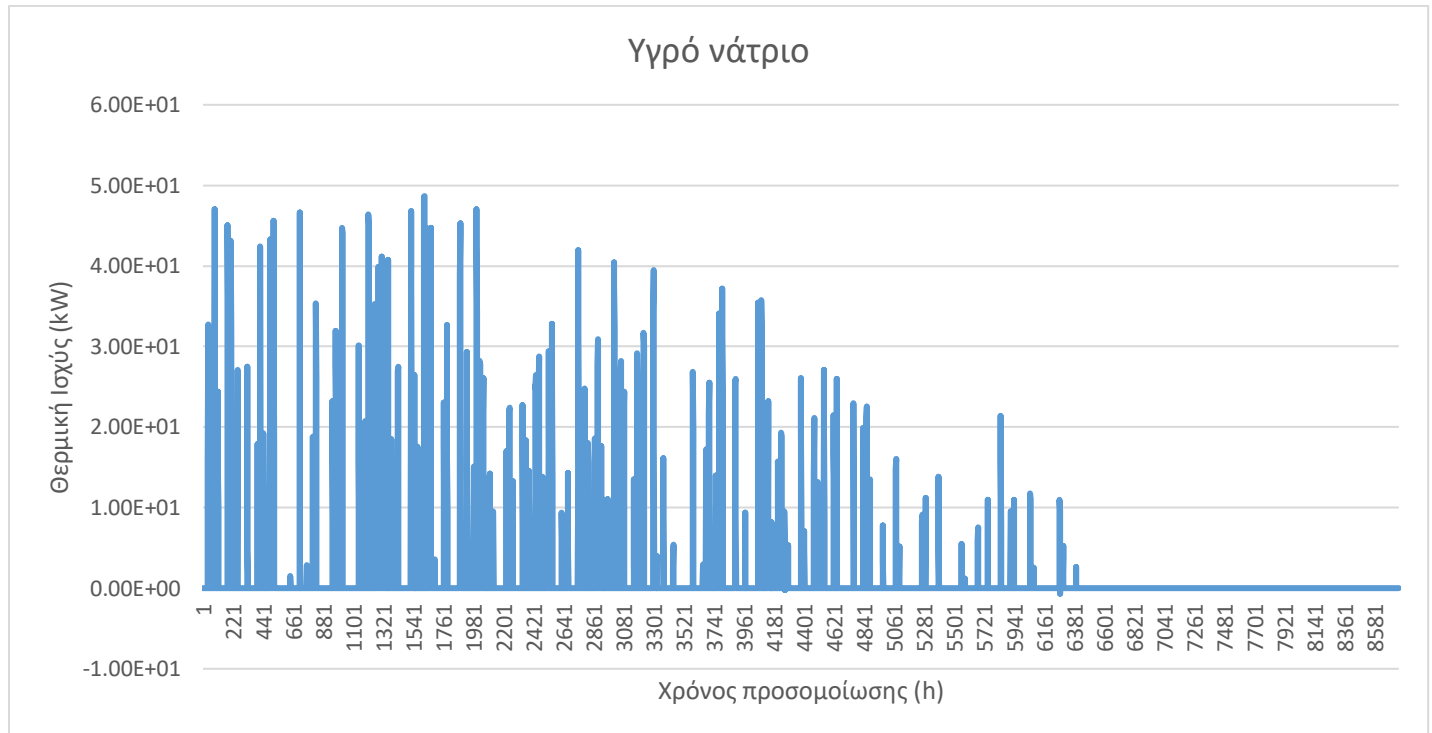


Διάγραμμα 4.1.4.1: Θερμική ισχύς για τετηγμένα άλατα.

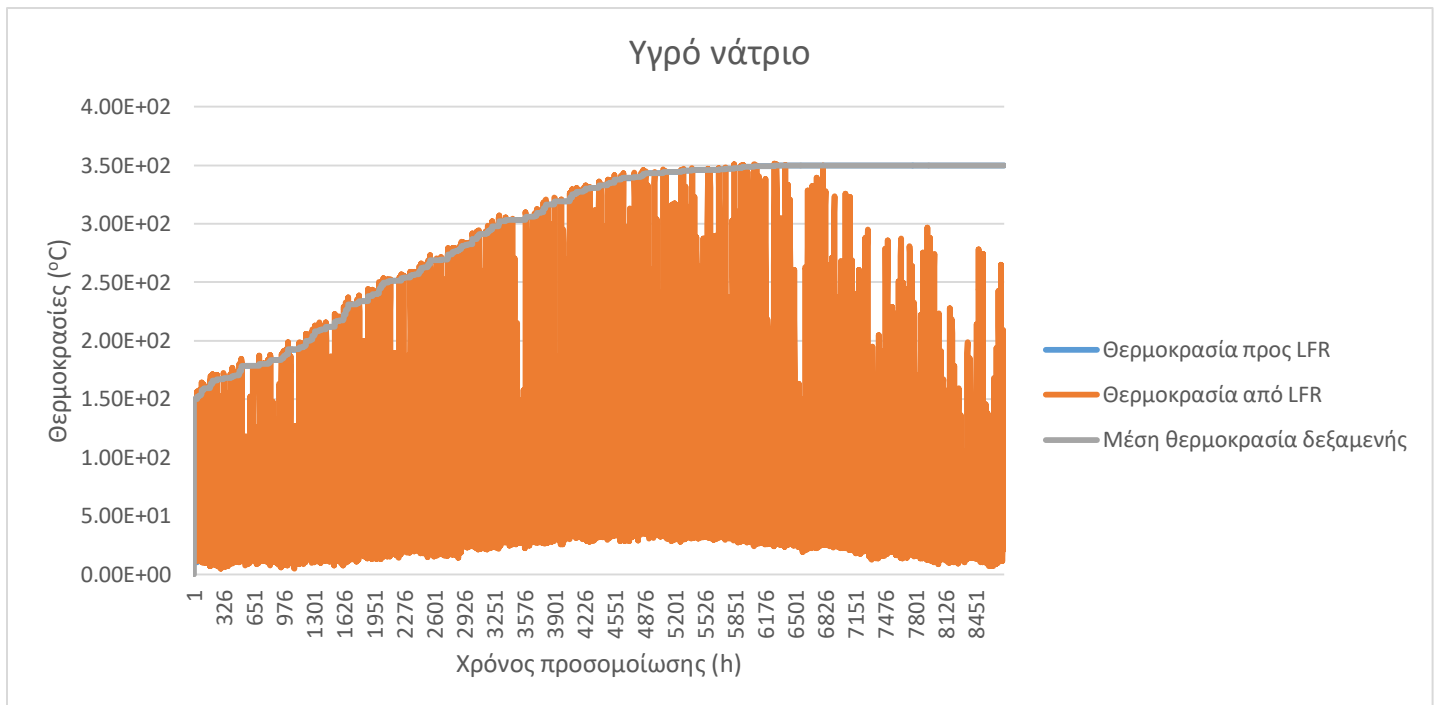


Διάγραμμα 4.1.4.2: Θερμοκρασίες για τετηγμένα άλατα.

Για υγρό νάτριο:



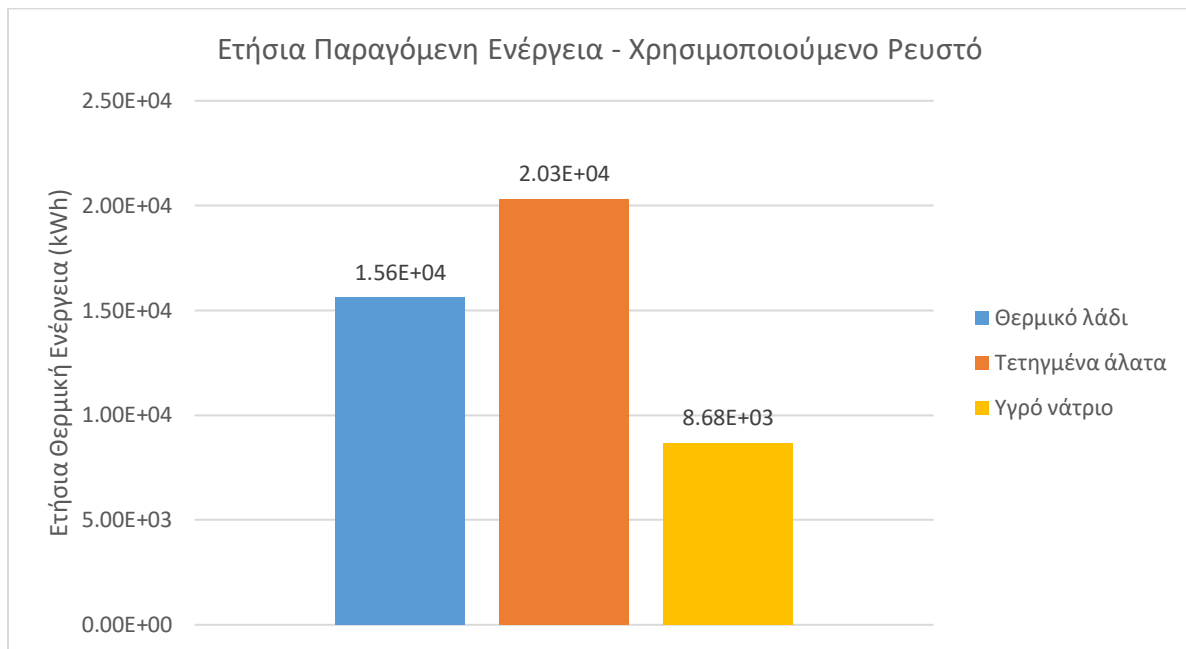
Διάγραμμα 4.1.4.3: Θερμική ισχύς για υγρό νάτριο.



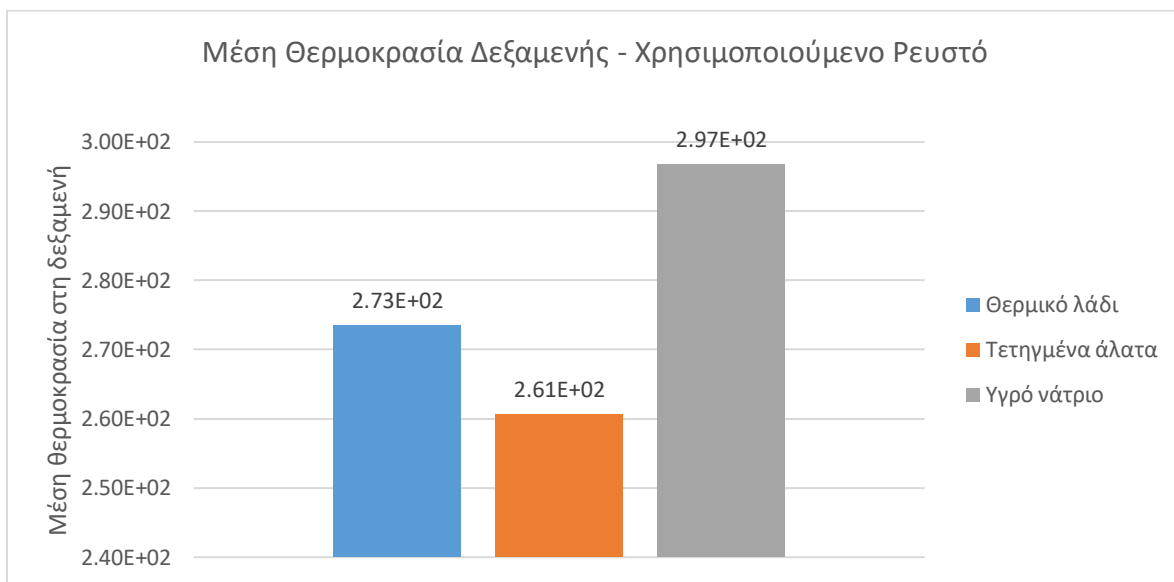
Διάγραμμα 4.1.4.4: Θερμοκρασίες για υγρό νάτριο.

	Θερμικό λάδι	Τετηγμένα άλατα	Υγρό νάτριο
Συνολική ετήσια θερμική ενέργεια (kWh)	15600	20300	8680
Μέγιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	329	317	350
Ελάχιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	10	10	10
Μέγιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	331	320	351
Ελάχιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	4.72	4.72	4.72
Μέγιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	329	317	350
Ελάχιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	0	0	0

Πίνακας 4.1.4.1: Αποτελέσματα για διαφορετικά ρευστά μεταφοράς θερμότητας.



Διάγραμμα 4.1.4.5: Συγκριτικό διάγραμμα παραγόμενης ενέργειας σεναρίων για διαφορετικά θερμικά ρευστά.



Διάγραμμα 4.1.4.6: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας δεξαμενής για διαφορετικά θερμικά ρευστά.

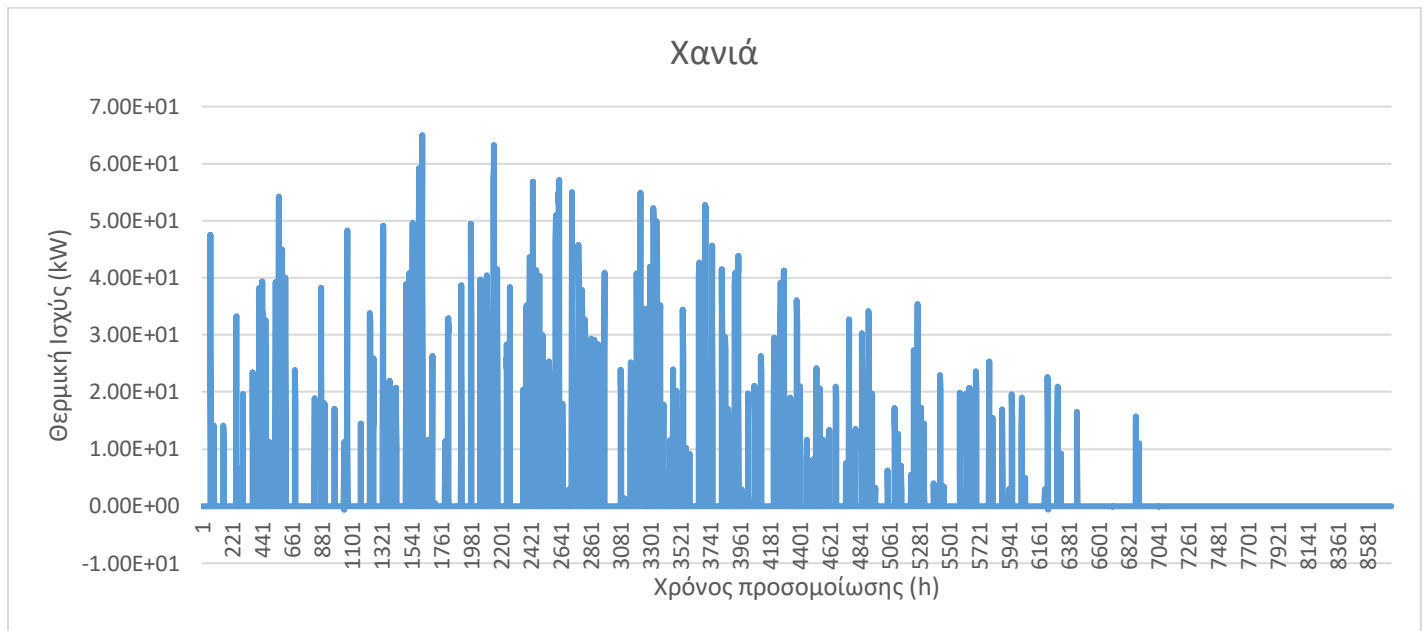
	Πυκνότητα (kg/m ³)	Ειδική Θερμότητα (kJ/kg×K)	Σημείο Βρασμού (°C)
Θερμικό λάδι	969	1,92	400
Τετηγμένα άλατα	1680	1,56	600
Υγρό νάτριο	750	1,26	882

Πίνακας 4.1.4.2: Χαρακτηριστικά θερμικών ρευστών.

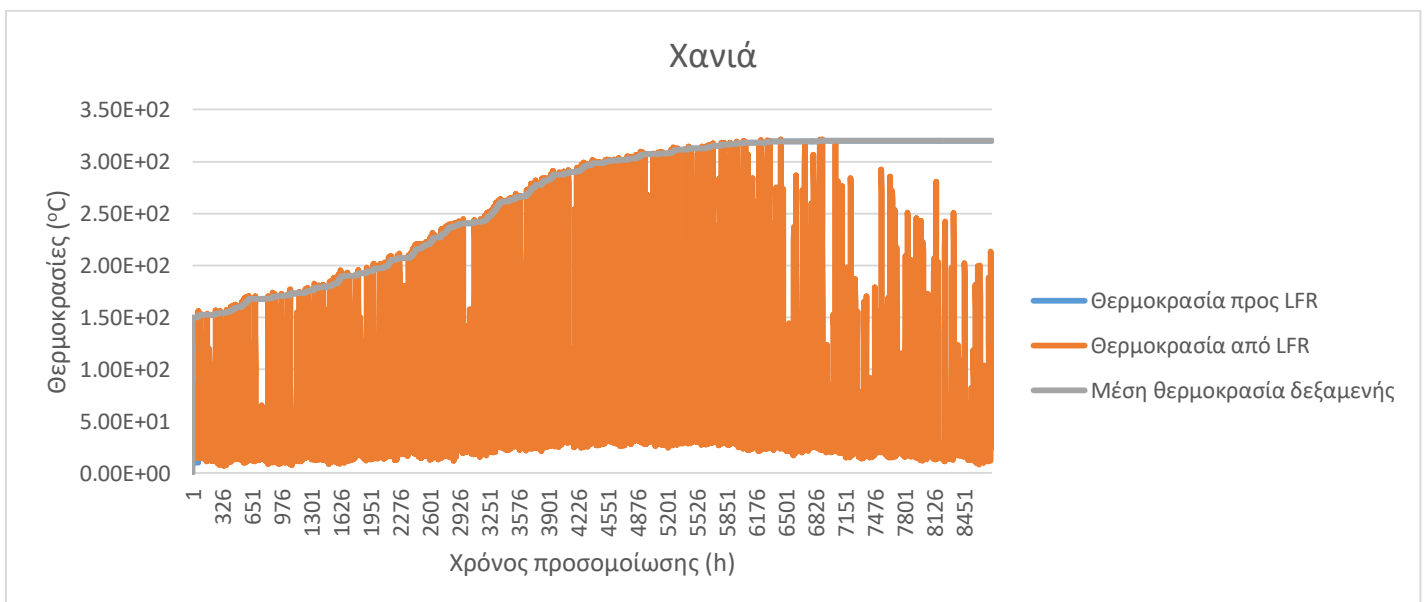
4.2 Εκτίμηση απόδοσης σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί η απόδοση του συστήματος LFR σε 5 Ευρωπαϊκές πόλεις, οι οποίες επιλέχθηκαν βάσει της κατηγορίας στην οποία ανήκουν σύμφωνα με την κλιματική ταξινόμηση Köppen.

Για τα Χανιά:

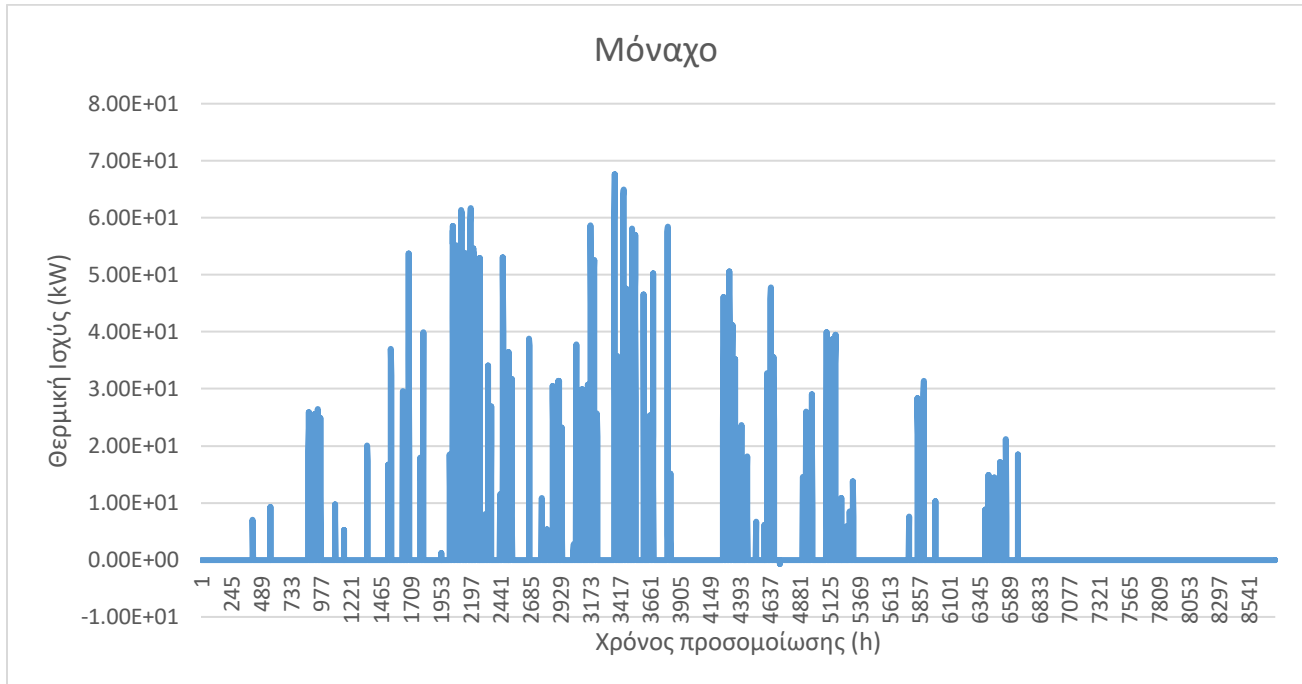


Διάγραμμα 4.2.1: Θερμική ισχύς για τα Χανιά.

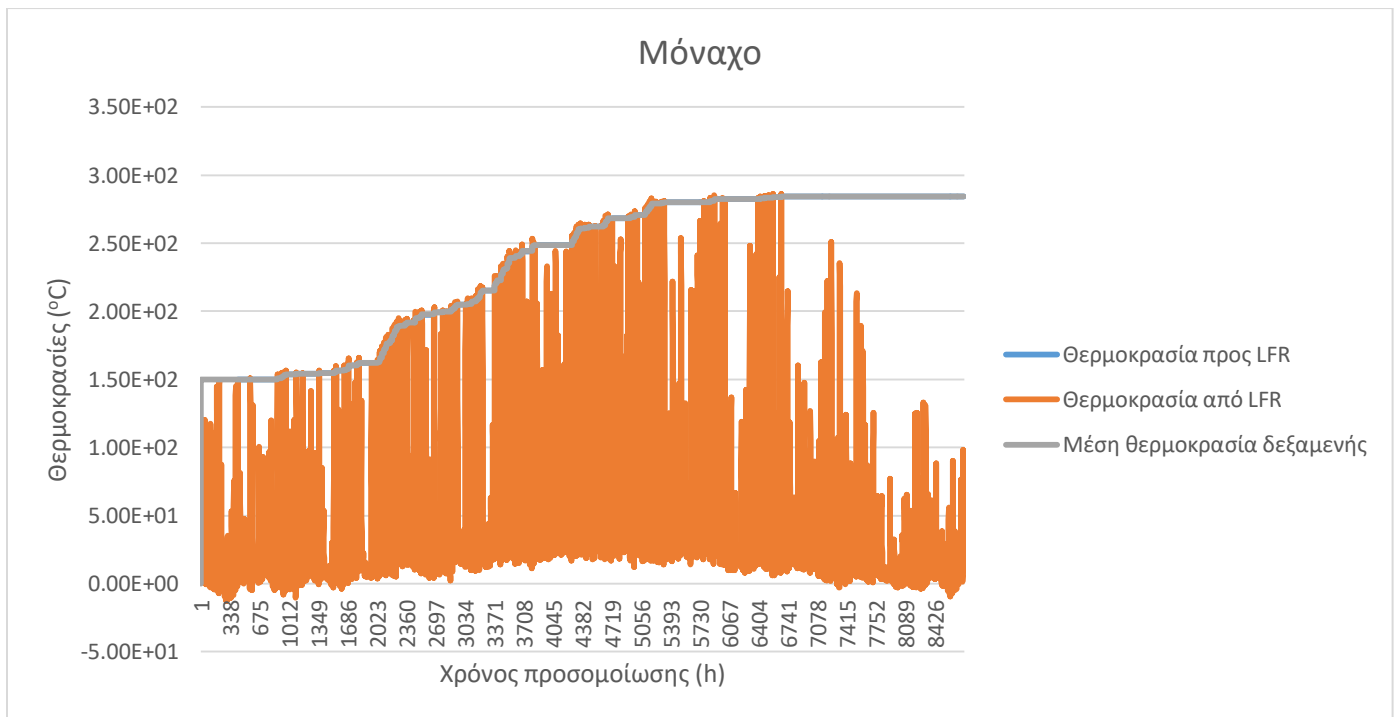


Διάγραμμα 4.2.2: Θερμοκρασίες για τα Χανιά.

Για το Μόναχο:

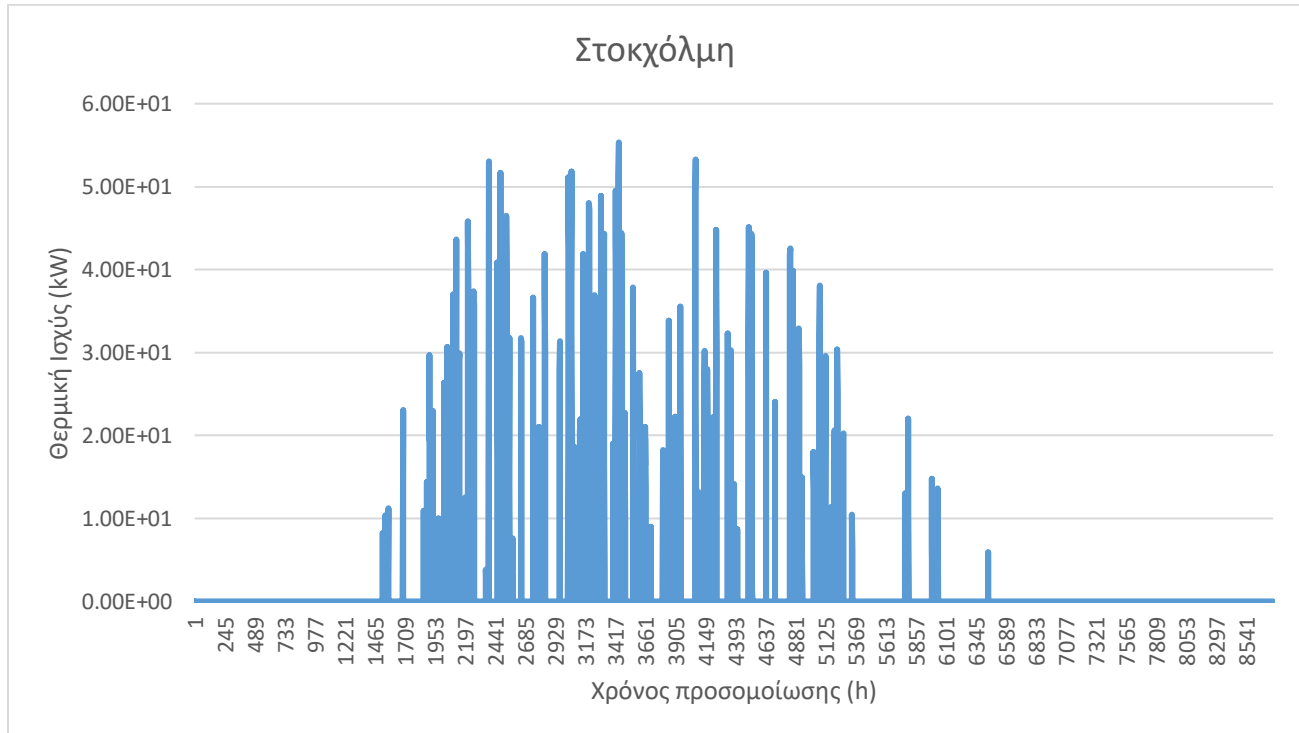


Διάγραμμα 4.2.3: Θερμική ισχύς για το Μόναχο.

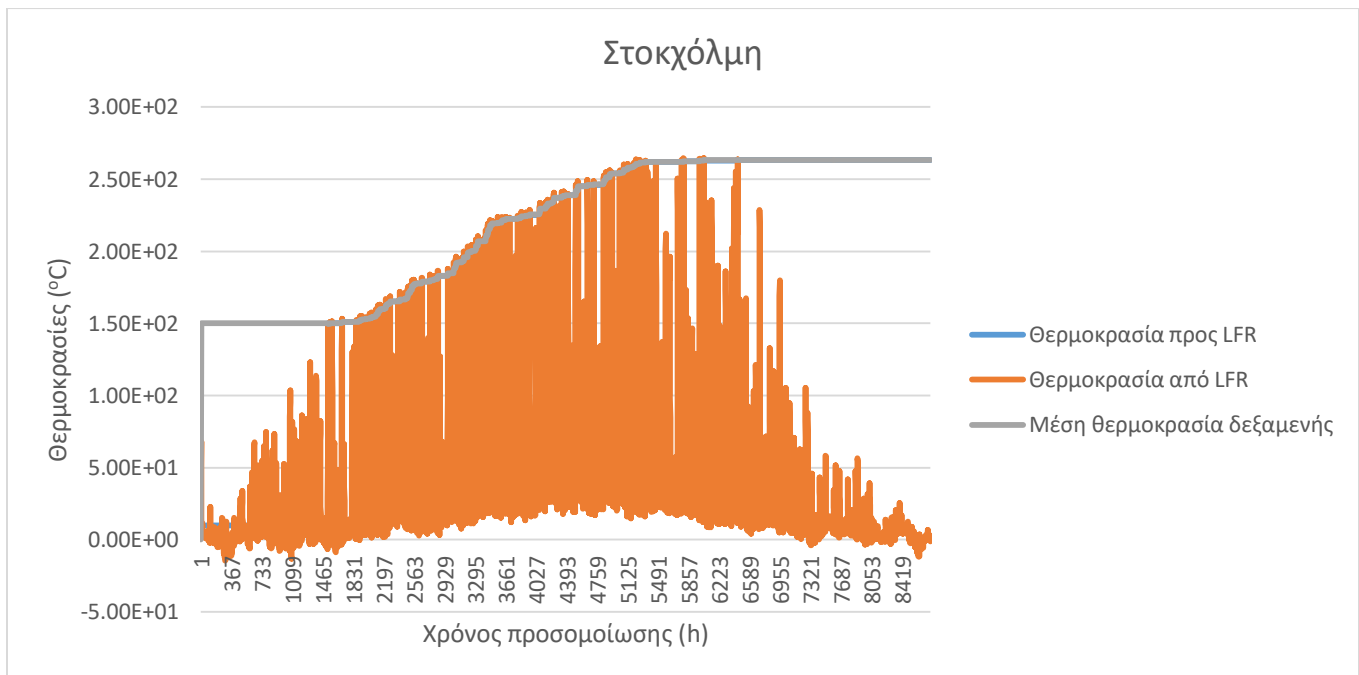


Διάγραμμα 4.2.4: Θερμοκρασίες για το Μόναχο.

Για τη Στοκχόλμη:

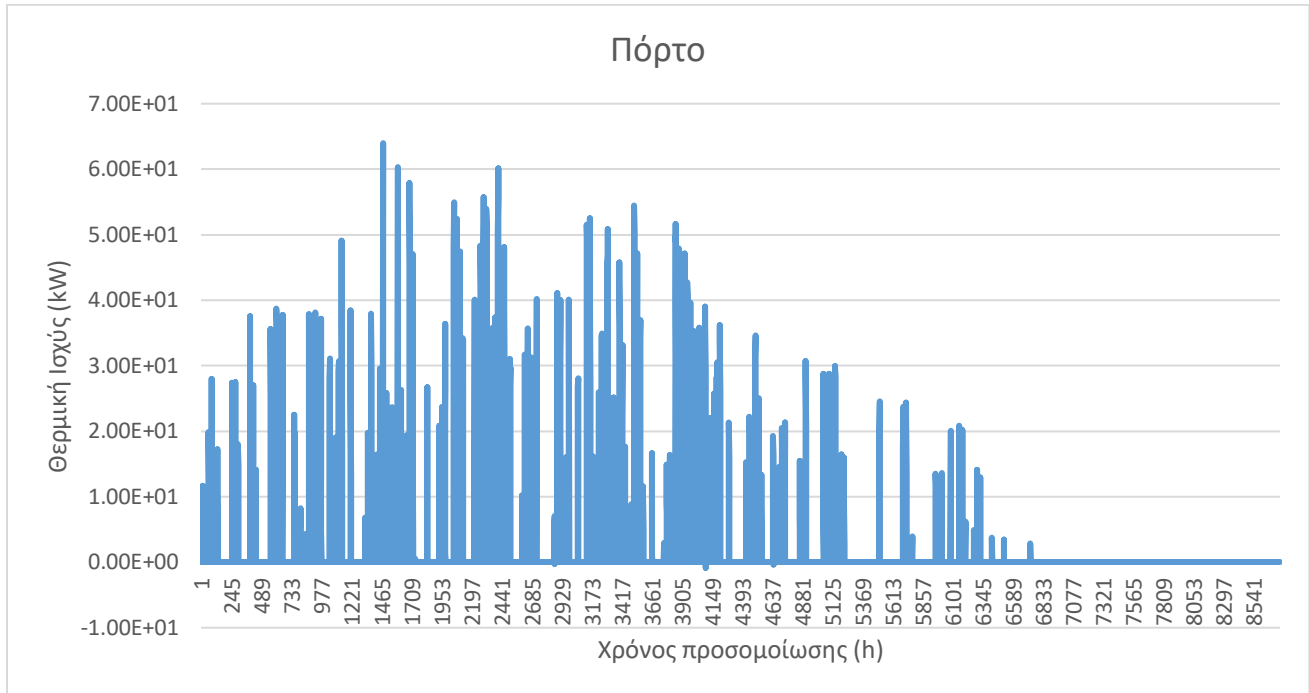


Διάγραμμα 4.2.5: Θερμική ισχύς για τη Στοκχόλμη.

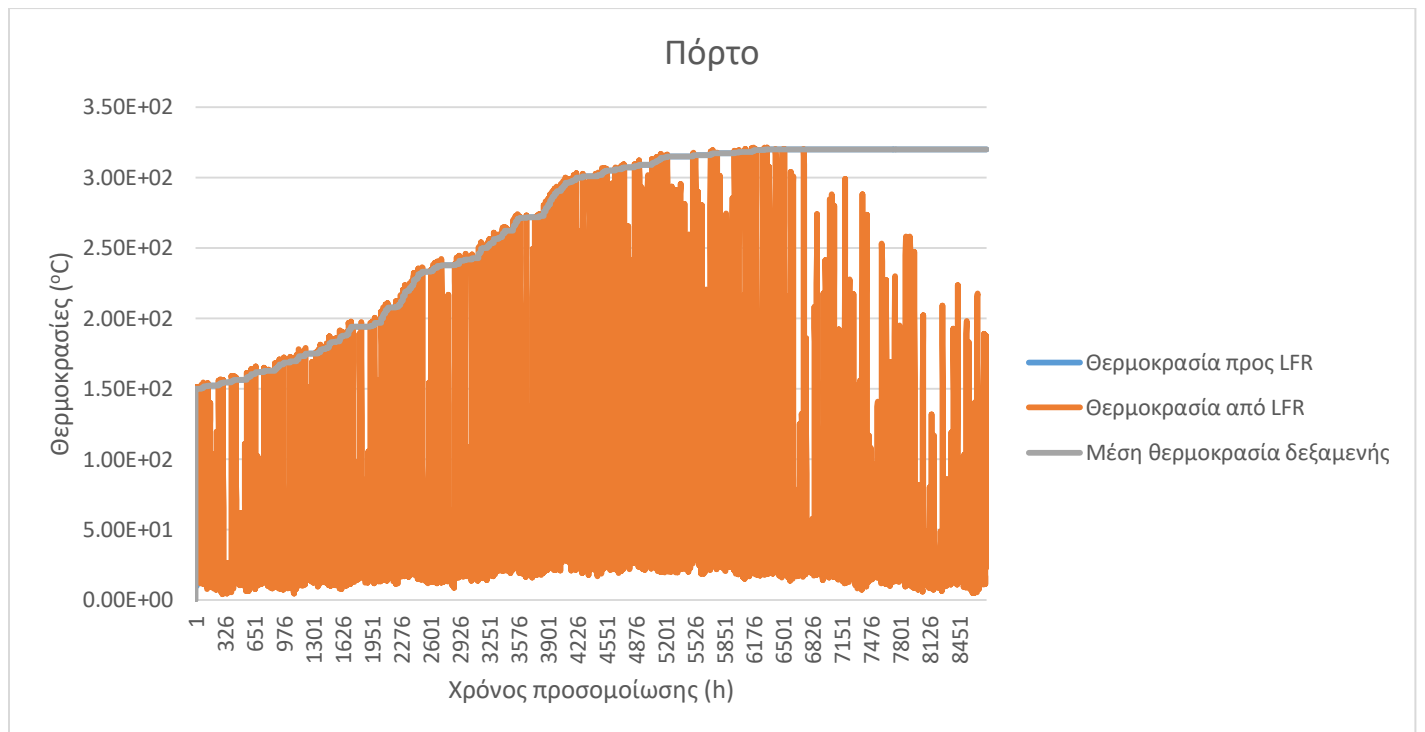


Διάγραμμα 4.2.6: Θερμοκρασίες για τη Στοκχόλμη.

Για το Πόρτο:



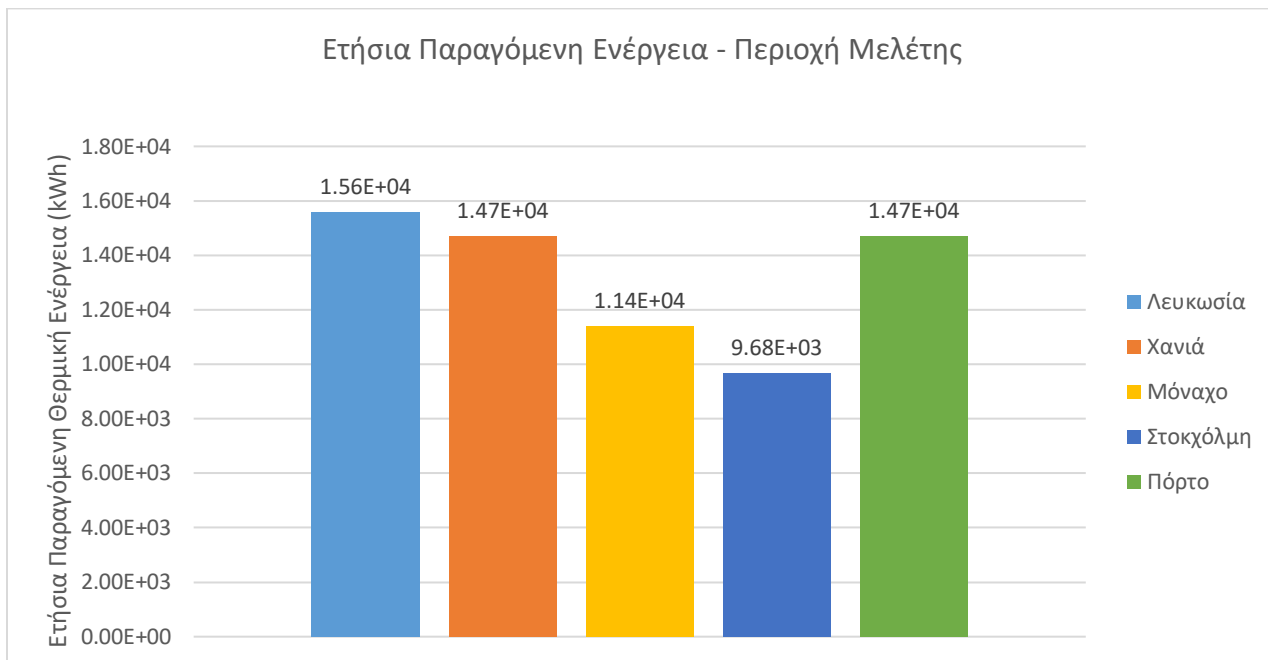
Διάγραμμα 4.2.7: Θερμική ισχύς για το Πόρτο.



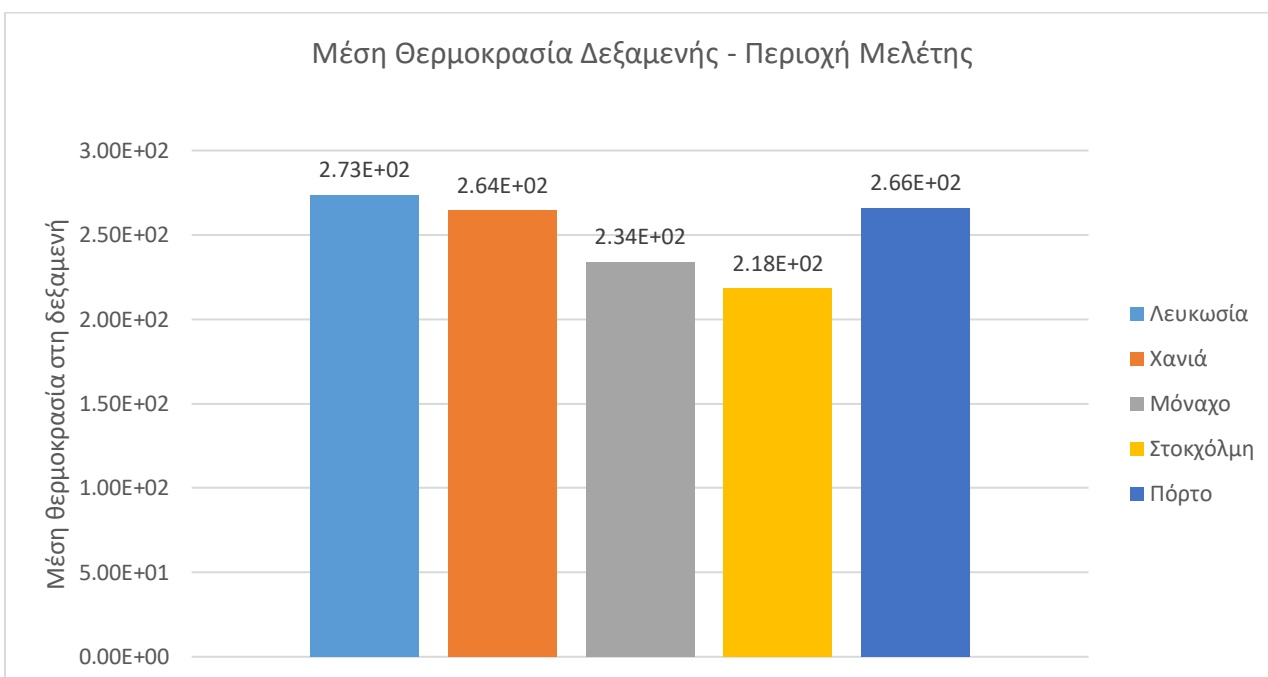
Διάγραμμα 4.2.8: Θερμοκρασίες για το Πόρτο.

	Λευκωσία	Χανιά	Μόναχο	Στοκχόλμη	Πόρτο
Συνολική ετήσια θερμική ενέργεια (kWh)	15600	14700	11400	9680	14700
Μέγιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	329	320	284	263	320
Ελάχιστη θερμοκρασία προς LFR (°C)	10	10	10	10	10
Μέγιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	331	321	286	265	321
Ελάχιστη θερμοκρασία από LFR (°C)	4.72	7	-1.26	-1.45	4.14
Μέγιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	329	320	284	263	320
Ελάχιστη θερμοκρασία στη δεξαμενή (°C)	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.2.1: Αποτελέσματα για διαφορετικές περιοχές μελέτης.



Διάγραμμα 4.2.9: Συγκριτικό διάγραμμα παραγόμενης ενέργειας για διαφορετικές περιοχές μελέτης.



Διάγραμμα 4.2.10: Συγκριτικό διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας δεξαμενής για διαφορετικές περιοχές μελέτης.

Κεφάλαιο 5: Σχολιασμός αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

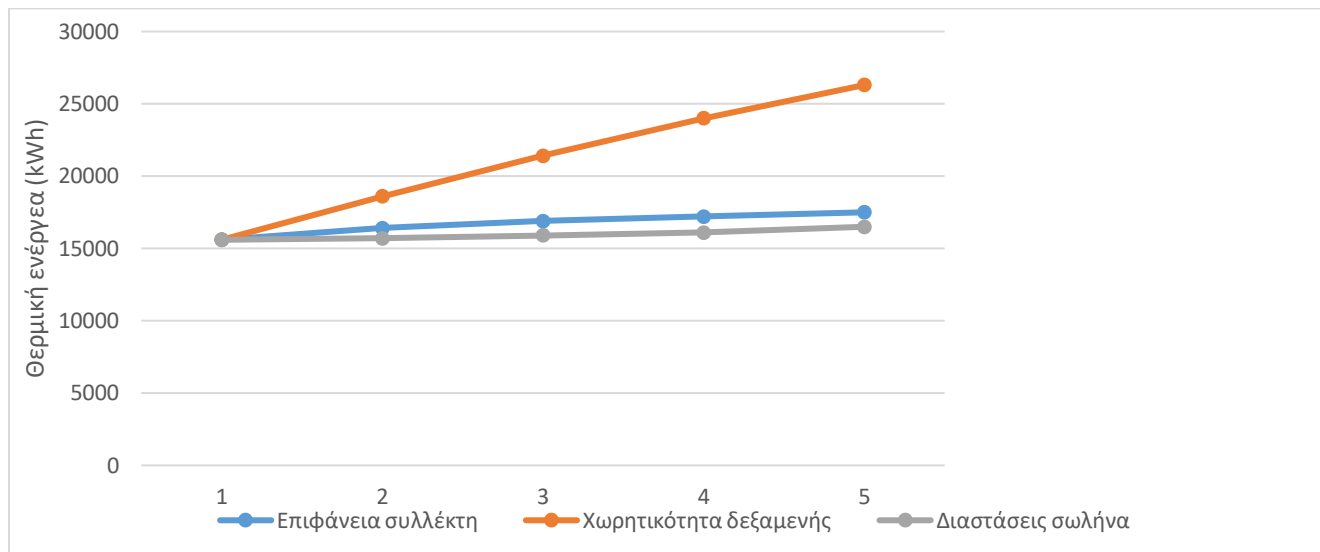
Από τα διαγράμματα και τους συγκεντρωτικούς πίνακες του Κεφαλαίου 4 προκύπτουν αρκετά συμπεράσματα, όσον αφορά την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στις θερμοκρασίες και στην παραγωγή θερμικής ενέργειας του συστήματος. (Bishoyi and Sudhakar, 2017)

5.1 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

5.1.1 Θερμική ενέργεια

Παρατηρείται πως η χωρητικότητα της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην παραγωγή θερμικής ενέργειας, καθώς με κάθε αύξησή της προκύπτει και αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από 9,5% έως και 19,2%. Συνολικά, με αύξηση της χωρητικότητας της δεξαμενής από 20 m³ σε 40 m³, η παραγόμενη ενέργεια αυξάνεται κατά 68,6%. Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 4.1.2, η χωρητικότητα της δεξαμενής αποτέλεσε τον κυριότερο παράγοντα για τη διακοπή παραγωγής ενέργειας που παρατηρείται στο τέλος της προσομοίωσης. Με μία αισθητή αύξησή της, μπορεί να παραχθεί ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Αντίθετα, παρατηρείται πως, τόσο η επιφάνεια του συλλέκτη, όσο και οι διαστάσεις του σωλήνα, επηρεάζουν σε πολύ μικρότερο βαθμό την παραγόμενη ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, με κάθε αύξηση της επιφάνειας του συλλέκτη, η ενέργεια παρουσιάζει κατά μέσο όρο αύξηση της τάξης του 2,85%. Αντίστοιχα, για τις διαστάσεις του σωλήνα, παρατηρείται ακόμη μικρότερη αύξηση, περίπου ίση με 1,3%. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται και γραφικά η αύξηση της ετησίως παραγόμενης θερμικής ενέργειας συναρτήσει των τριών αυτών παραμέτρων.



Διάγραμμα 5.1.1.1: Σύγκριση σεναρίων 1-3.

Όσον αφορά τα διαφορετικά θερμικά ρευστά, δεν μπορούν να ενσωματωθούν στο παραπάνω συγκεντρωτικό γράφημα, καθώς για το κάθε ρευστό που εξετάστηκε χρειάστηκε να αλλάξουν τρεις παράμετροι εντός του Simulation Studio, οι οποίες παρουσίαζαν αυξομειώσεις.

Από το Διάγραμμα 4.1.4.7 παρατηρούνται σημαντικές διαφορές της παραγόμενης ενέργειας για κάθε εξεταζόμενο ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Τα 3 κύρια χαρακτηριστικά των ρευστών που επηρεάζουν την ενέργεια που παράγεται είναι η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα και το σημείο βρασμού. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.4.2.

Αρχικά, σημειώνεται πως το υγρό νάτριο δίνει με μεγάλη διαφορά τη μικρότερη ενέργεια. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο πολύ υψηλό σημείο βρασμού του σε σχέση με τα υπόλοιπα ρευστά. Επιπλέον, έχει και τη μικρότερη ειδική θερμότητα από όλα τα υπόλοιπα, η οποία επηρεάζει άμεσα την παραγόμενη ενέργεια, σύμφωνα με τις εξισώσεις του Simulation Studio.

Η υψηλότερη παραγωγή ενέργειας δίνεται με χρήση τετηγμένων αλάτων και ακολουθεί το θερμικό λάδι. Αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη πυκνότητα των αλάτων, καθώς και στο γεγονός ότι τα άλατα συνεχίζουν να παράγουν ενέργεια για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται συγκρίνοντας τα διαγράμματα 4.1.1 και 4.1.4.1.

5.1.2 Θερμοκρασίες

Σε γενικές γραμμές, είναι εμφανές πως οι θερμοκρασίες δεν παρουσιάζουν έντονες διακυμάνσεις με τις αλλαγές των τιμών των διαφόρων παραμέτρων.

Οι θερμοκρασίες αυξάνονται με την αύξηση της επιφάνειας του συλλέκτη, γεγονός απολύτως λογικό, καθώς είναι μεγαλύτερη η επιφάνεια που θερμαίνεται, αλλά η ποσότητα του ρευστού μεταφοράς θερμότητας παραμένει η ίδια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, με κάθε αύξηση της επιφάνειας, να μεταφέρεται περισσότερη θερμότητα στο ρευστό και, συνεπώς, να αυξάνεται ολόένα και περισσότερο η θερμοκρασία.

Όσον αφορά την επιρροή της χωρητικότητας της δεξαμενής, είναι εμφανές πως με την αύξησή της οι θερμοκρασίες μειώνονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμότητα που μεταφέρεται από το ρευστό κατανέμεται σε μεγαλύτερο όγκο, όταν φτάνει στη δεξαμενή. Συνεπώς, η μέση θερμοκρασία της δεξαμενής, αλλά και οι θερμοκρασίες του ρευστού που εισέρχεται και εξέρχεται από το LFR παρουσιάζουν καθοδική πορεία.

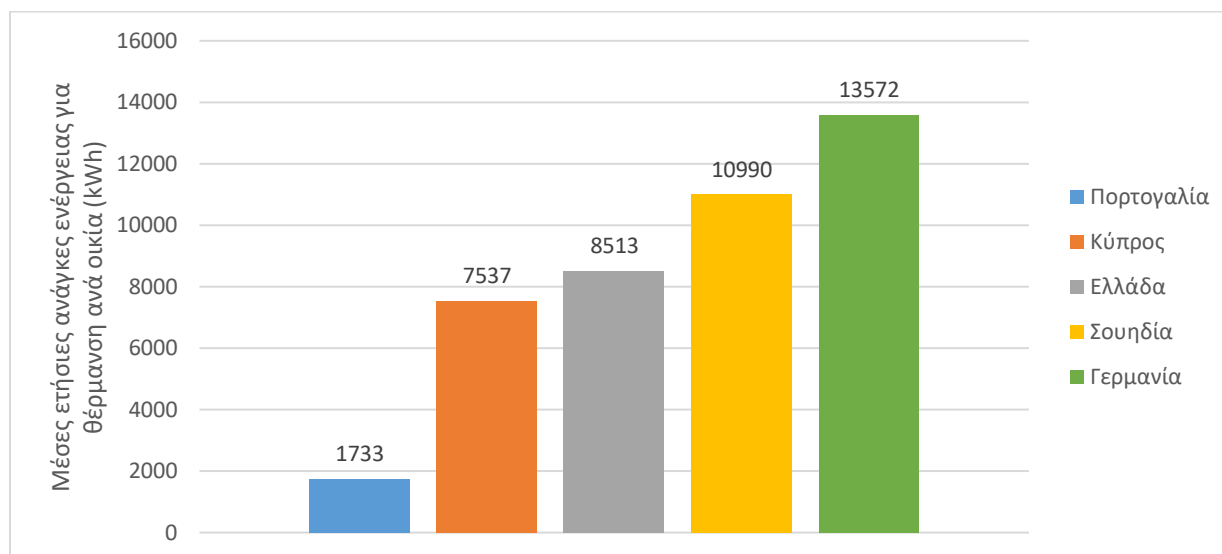
Το είδος του θερμικού ρευστού δείχνει να έχει κάποια επίδραση στις θερμοκρασίες. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι διαφορετικές χημικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες του κάθε ρευστού σίγουρα επηρεάζουν την απορρόφηση θερμότητας και, συνεπώς, την θερμοκρασία του.

Τέλος, οι διαστάσεις του σωλήνα φαίνονται να μην σχετίζονται καθόλου με τις θερμοκρασίες στα διάφορα σημεία του συστήματος.

5.2 Αποτελέσματα για απόδοση σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες

Στο διάγραμμα 5.2.1 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες ανάγκες ενέργειας για θέρμανση ανά οικία για τις χώρες στις οποίες βρίσκονται οι υπό μελέτη πόλεις. Το διάγραμμα αυτό θα μας βοηθήσει να προσδιορίσουμε τον βαθμό στον οποίο είναι βιώσιμη η εγκατάσταση ενός συστήματος LFR στις πόλεις αυτές. Φυσικά, αυτές οι ανάγκες που παρουσιάζονται αναφέρονται μόνο σε θέρμανση και όχι σε ψύξη. Συνεπώς, οι συνολικές ανάγκες για θέρμανση και ψύξη στις περιοχές αυτές θα είναι μεγαλύτερες από αυτές που παρουσιάζονται στο διάγραμμα. Ωστόσο, οι ανάγκες για ψύξη, ακόμη και σε χώρες με θερμό κλίμα, είναι κατά πολύ μικρότερες των

αναγκών για θέρμανση κατά τη διάρκεια του χρόνου. Για παράδειγμα, στην Ελλάδα οι ανάγκες για θέρμανση για όλο τον οικιακό τομέα το 2009 ήταν 83,1 PJ, ενώ οι ανάγκες για ψύξη ήταν μόλις 1,5 PJ (DBDH et al., 2015).



Διάγραμμα 5.2.1: Μέσες ετήσιες ανάγκες ενέργειας για θέρμανση ανά οικία για τις υπό μελέτη χώρες.

- **Πόρτο:** Οι πολύ μικρές ανάγκες θερμικής ενέργειας που παρουσιάζει η Πορτογαλία και η αρκετά μεγάλη ετήσια παραγωγή του συστήματος για τα καιρικά δεδομένα του Πόρτο καθιστούν την εγκατάσταση του συστήματος ιδανική. Μάλιστα, θα αρκούσε και ένα σύστημα μικρότερης κλίμακας για την κάλυψη των αναγκών αυτών. Επιπλέον, η περίσσεια θερμότητας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς εκτός της θέρμανσης και ψύξης των χώρων, όπως η θέρμανση νερού.
- **Λευκωσία:** Το σύστημα είναι ικανό να καλύψει τις ανάγκες στη Λευκωσία. Ωστόσο, αφού οι ανάγκες στην Κύπρο δεν είναι εξίσου μικρές με της Πορτογαλίας, ένα μικρότερο σύστημα ίσως να μην αρκούσε. Και σε αυτήν την περίπτωση θα υπήρχε η δυνατότητα για τη χρήση της περισσευούμενης θερμότητας για την εξυπηρέτηση άλλων σκοπών.
- **Χανιά:** Πολύ παρόμοια με τη Λευκωσία είναι και η περίπτωση των Χανίων. Όλα όσα αναφέρθηκαν για τη Λευκωσία θα ίσχυαν και για τα Χανιά, με ελαφρώς μικρότερη περίσσεια ενέργειας.

- **Στοκχόλμη:** Η παραγόμενη ενέργεια σε αυτήν την περίπτωση δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών στη Σουηδία, συνεπώς η εγκατάσταση του συστήματος δεν θεωρείται ιδανική. Ωστόσο, δεν μπορεί να θεωρηθεί μη βιώσιμη, καθώς θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για μερική κάλυψη των αναγκών για θέρμανση και μείωση του ετησίου κόστους θέρμανσης. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, παρατηρούνται πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, οι οποίες καθιστούν τη λειτουργία του συστήματος αδύνατη.
- **Μόναχο:** Όμοια με τη Στοκχόλμη. Οι συνθήκες δεν θεωρούνται ιδανικές για εγκατάσταση συστήματος LFR.

Βιβλιογραφία

- Bishoyi, D., Sudhakar, K., 2017. Modeling and performance simulation of 100 MW PTC based solar thermal power plant in Udaipur India. Case Stud. Therm. Eng. 10, 216–226.
- Boyle G., 2004. Renewable Energy: Power for a sustainable future
- Cirocco, L., Belusko, M., Bruno, F., Boland, J., Pudney, P., 2014. Optimisation of Storage for Concentrated Solar Power Plants. Challenges 5, 473–503.
- DBDH, Report, S., JRC, 2015. Heat and cooling demand and market perspective, Hot&Cool - International magazine on district heating and cooling.
- Hoffschmidt, B., Alexopoulos, S., Götttsche, J., Sauerborn, M., Kaufhold, O., 2012. High concentration solar collectors, Comprehensive Renewable Energy. Elsevier Ltd.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A., 2007. Renewable Energy: Technology, Economics and Environment
- Kolokotsa, D., Papantoniou, S., 2014. Development of a solar cooling system using Fresnel Collectors for the Cyprus institute building , in the city of Nicosia.
- SmartGems, 2014a. Smart Grid Energy Management Staff Exchange D2 . 2 Webinars in smart grids and smart communities : Recordings.
- SmartGems, 2014b. Smart Grid Energy Management Staff Exchange D4 . 2 Cost benefit analysis for polygeneration and CSP / CPV for smart communities : Infrastructure and connectivity 1–102.
- The Industrial Solar, 2011. Technical Data Industrial Solar linear Fresnel collector LF-11 Technical Data Industrial Solar LF-11. Source.
- Tsoutsos, T., 2013. Βασικές αρχές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Venezia, L., 2014. Linear Fresnel Reflector Equations
- <http://www.trnsys.com/>
- <https://www.industrial-solar.de/en/products/fresnel-collector/>
- https://www.engineeringtoolbox.com/sensible-heat-storage-d_1217.html
- <https://www.turboden.com/turboden-orc-technology/1062/the-orc-technology>