

Πειραματική Διερεύνηση Κύκλου Ηλιακής Ψύξης με Ακροφύσιο

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023

SPYRIDON KALYVAS

Experimental Investigation of a Solar Ejector Cooling Cycle

Section: Thermal Engineering

Supervisor: Sotirios Karellas, Professor NTUA

Athens 2023



SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Σωτηρίου Καρέλλα.

Αρχικά, θα ήθελα να αναφερθώ στην εμπιστοσύνη που μου έδειξε ο κ. Σωτήριος Καρέλλας για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής και να τον ευχαριστήσω για τις συμβουλές που μου παρείχε.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Μπραϊμάκη, για τη καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Γαβριήλ Παλαμίδη, για τη βοήθεια και την υποστήριξη του στη διεκπεραίωση των πειραμάτων στο Εργαστήριο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου για το καλό κλίμα συνεργασίας.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σπυρίδων Καλύβας

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Σύνοψη	6
Abstract	7
Λίστα Συμβόλων.....	8
1. Εισαγωγή	11
1.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ψύξη	11
1.2 Εισαγωγή στον κύκλο ακροφυσίου	12
1.3 Εισαγωγή στην ηλιακή ψύξη με ακροφύσιο	14
1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στην ηλιακή ψύξη με ακροφύσιο	15
1.5 Στόχος της εργασίας	25
2. Περιγραφή πειραματικής εγκατάστασης SunClim.....	26
2.1 Γενική παρουσίαση της εγκατάστασης	26
2.2 Κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών	26
2.3 Σύστημα κύκλου ψύξης με ακροφύσιο	32
2.3.1 Στοιχεία μηχανολογικού εξοπλισμού	34
2.3.2 Στοιχεία ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.....	49
2.4 Υδραυλικό κύκλωμα εργαστηρίου	54
3. Πειραματικά αξιολόγηση	56
3.1 Πειραματικά αποτελέσματα ηλιακού πεδίου εγκατάστασης	56
3.2 Πειραματικά αποτελέσματα συστήματος ECC.....	66
3.2.1 Περιγραφή βασικών μεγεθών	66
3.2.2 Διαγράμματα πειραματικών αποτελεσμάτων	68
3.2.3 Ανάλυση και αποτελέσματα της διαδικασίας των μετρήσεων	94
3.2.4 Θεωρητικό μοντέλο του κύκλου ψύξης με ακροφύσιο	104
4. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική εργασία	113
Κατάλογος Σχημάτων	115
Κατάλογος Πινάκων	118
Κατάλογος Εικόνων	119
Κατάλογος Αναφορών.....	120
Παράρτημα.....	122

Σύνοψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση ενός ψυκτικού κύκλου ακροφυσίου με ηλιακή ψύξη. Αρκετές ερευνητικές μελέτες είχαν προηγηθεί αναδεικνύοντας σημαντικά προτερήματα, αλλά και μερικές προκλήσεις του συγκεκριμένου συστήματος ψύξης. Στη παρούσα εργασία εξετάστηκε πειραματικά το σύστημα SunClim, που ήταν εγκατεστημένο στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Η καινοτομία του συστήματος SunClim αφορούσε τις ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας του, καθώς και την ενσωμάτωση του ηλιακού πεδίου στην εγκατάσταση. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν, υπολογίστηκαν προσεγγιστικά ο βαθμός απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών και ολόκληρου του πεδίου. Επιπλέον, ως παράμετροι αξιολόγησης του συστήματος ψύξης, χρησιμοποιήθηκαν ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς και ο λόγος αναρρόφησης του ακροφυσίου. Η ανάλυση των πειραματικών τιμών των ζητούμενων παραμέτρων έγινε με δύο τρόπους. Ο πρώτος εμφάνισε συνοπτικά τα αποτελέσματα από όλες τις πειραματικές μετρήσεις συναρτήσει της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του συστήματος. Ο δεύτερος παρουσίασε την εξέλιξη των τιμών αυτών των μεγεθών, συναρτήσει του χρόνου που περνούσε από την αρχή μίας ορισμένης πειραματικής διαδικασίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα ως προς τη παραγωγή ψύξης, υπήρξαν ικανοποιητικά, με τις τιμές του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς και του λόγου αναρρόφησης να προσεγγίζουν τις τιμές 0.55 και 0.275, αντίστοιχα. Τελικά, τα πειραματικά αποτελέσματα επαληθεύτηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια για τις χαμηλές θερμοκρασίες συμπύκνωσης κατόπιν σύγκρισής τους με τα αποτελέσματα προσομοίωσης με συγκεκριμένο θεωρητικό μοντέλο. Αντίθετα, σε υψηλότερες θερμοκρασίες υπήρξαν αιτιολογημένες αποκλίσεις.

Abstract

In the context of this thesis, an experimental investigation of a solar ejector cooling cycle (SECC) was conducted. Several research studies had preceded, highlighting significant advantages as well as some challenges of this specific cooling system. In this thesis, the SunClim system was used and it was installed in the Laboratory of Steam Boilers and Thermal Plants at the School of Mechanical Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA). The innovation of the SunClim system concerned its realistic operating conditions and the integration of the solar field into the installation. Based on the obtained experimental results, the performance of the solar collectors and the solar field were evaluated. Additionally, the thermal coefficient of performance and the ejector entrainment ratio were used as assessment parameters for the cooling system. The analysis of the experimental values of the desired parameters was performed in two ways. In the first way, the results from all the experimental processes were summarized and presented as a function of the condensing temperature. In the second way, the evolution of these parameter values were presented as a function of time elapsed from the beginning of a specific experimental procedure. The experimental results concerning the cooling production, were satisfactory. The thermal coefficient of performance and the ejector entrainment ratio, approached the values of 0.55 and 0.275, respectively. Finally, the experimental results were proved accurate in the case of low condensing temperatures, after the comparison with the results of the simulation with a specific theoretical model. However, in the case of high condensing temperatures there were reasoned deviations.

Λίστα Συμβόλων

Συντομεύσεις	Ερμηνεία	Meaning
CAS	Τομέας σταθερής διατομής	Constant Area Section
CDN	Συγκλίνον-Αποκλίνον ακροφύσιο	Converging Diverging Nozzle
COP	Συντελεστής συμπεριφοράς	Coefficient Of Performance
EERC	Ψυκτικός κύκλος ακροφυσίου-διαστολής	Ejector-Expansion Refrigeration Cycle
MSV	Τροποποιημένη έγχυση ατμού με εναλλάκτη υπόψυξης	Modified Sub-cooler Vapor-injection
PTC	Κυλινδρικοί παραβολικοί συλλέκτες	Parabolic Tubes Collectors
SECC	Ψυκτικός κύκλος ακροφυσίου με ηλιακή ενέργεια	Solar Ejector Cooling Cycle
SJEC	Ψύκτης εκτοξευτήρας-ακροφύσιο με ηλιακή ενέργεια	Solar Jet Ejector Chiller
VCC	Κύκλος συμπίεσης ατμού	Vapor Compression Cycle
VGE	Ακροφύσιο μεταβλητής γεωμετρίας	Variable Geometry Ejector

Μεταβλητές	Ερμηνεία	Meaning
a [m/s]	Ταχύτητα ήχου	Sonic velocity
A [m ²]	Επιφάνεια	Area
C_p [kJ/kgK]	Ειδική θερμοχωρητικότητα αερίου υπό σταθερή πίεση	Specific heat of gas at constant pressure
C_v [kJ/kgK]	Ειδική θερμοχωρητικότητα αερίου υπό σταθερό όγκο	Specific heat of gas at constant volume
d [m]	Διάμετρος	Diameter
h [kJ/kg]	Ενθαλπία	Enthalpy
I'' [W/m ²]	Ηλιακή ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο	Solar radiation per square unit

\dot{m} [kg/s]	Παροχή μάζας	Mass flow rate
M	Αριθμός Mach	Mach number
P [bar]	Πίεση	Pressure
\dot{Q} [W]	Ισχύς	Power
R [kJ/kgK]	Σταθερά των αερίων	Gas constant
T [°C]	Θερμοκρασία	Temperature
V [m/s]	Ταχύτητα	Velocity
$\gamma (=C_p/C_v)$	Λόγος θερμοχωρητικότητων	Specific heats ratio
η	Βαθμός απόδοσης	Efficiency grade
ρ [kg/m ³]	Πυκνότητα	Density
ω	Λόγος αναρρόφησης	Entrainment ratio

Δείκτες	Ερμηνεία	Meaning
*	Κρίσιμη λειτουργία ακροφυσίου	Critical mode operation of ejector
c	Έξοδος ακροφυσίου, συμπυκνωτής	Exit of ejector, condenser
co	Περιοριστική συνθήκη λειτουργίας του ακροφυσίου	Limiting condition of ejector operational mode
e	Θύρα εισόδου δευτερεύουσας ροής, υποθετικός λαιμός	Inlet port of the entrained flow, hypothetical throat
g	Είσοδος ακροφυσίου	Nozzle inlet
htf	Ρευστό μεταφοράς θερμότητας	Heat transfer fluid
m	Αναμειγμένη ροή	Mixed flow
p	Πρωτεύουσα ροή	Primary flow
p1	Έξοδος ακροφυσίου	Nozzle exit
py	Πρωτεύουσα ροή στη θέση κρούσης της δευτερεύουσας ροής	Primary flow at the location of choking for the entrained flow
ret	Επιστροφή	Return
s	Δευτερεύουσα ροή	Suction or entrained flow

s	Συστοιχία ηλιακών συλλεκτών	Solar collectors array
sf	Ηλιακό πεδίο	Solar field
sol	Ηλιακός	Solar
sup	Τροφοδοσία	Supply
sy	Δευτερεύουσα ροή στη θέση κρούσης της δευτερεύουσας ροής	Entrained flow at the location of choking for the entrained flow
t	Λαιμός ακροφυσίου	Nozzle throat
th	Θερμικός	Thermal
u	Προς το ρευστό μεταφοράς θερμότητας	To heat transfer fluid
γ	Θέση κρούσης δευτερεύουσας ροής	Location of choking for the entrained flow
1	Έξοδος ακροφυσίου	Nozzle exit
2	Είσοδος τομέα σταθερής διατομής	Entrance of the constant-area section
3	Έξοδος τομέα σταθερής διατομής	Exit of the constant-area section

1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στην ηλιακή ψύξη

Η κλιματική αλλαγή και η ενεργειακή κρίση οδήγησαν την επιστημονική κοινότητα στη δημιουργία συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [1]. Συγκεκριμένα, η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας, η αστικοποίηση και η αύξηση του πληθυσμού έχουν ανεβάσει τις απαιτήσεις για ψύξη. Παράλληλα, η οικονομική ανάπτυξη επέφερε την αύξηση της ζήτησης για κλιματισμό και άλλες τεχνολογίες ψύξης, καθώς περισσότεροι άνθρωποι στις αναπτυσσόμενες χώρες είχαν την απαιτούμενη οικονομική δυνατότητα [2]. Σύμφωνα με αναφορές του διεθνούς οργανισμού ενέργειας, μέχρι το 2050 οι ανάγκες για κλιματισμό προβλέπεται να τριπλασιαστούν, γεγονός το οποίο θα οδηγήσει στην αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακος και την έξαρση της κλιματικής αλλαγής [3]. Για το λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητη η χρήση τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον και αποτελεσματικών για την κάλυψη των αναγκών σε ψύξη [4].

Η ηλιακή θερμική ψύξη αναφέρεται στη χρησιμοποίηση της ηλιακής θερμικής ενέργειας με σκοπό την ψύξη κτιρίων, σπιτιών ή βιομηχανικών διεργασιών. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα μηχανικής ψύξης, τα συστήματα θερμικής ψύξης δε καταναλώνουν σημαντικά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία της ηλιακής ψύξης μελετάται για κάποιες δεκαετίες, αλλά ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σημαντική προσπάθεια, ώστε να βελτιωθεί η απόδοσή της, τόσο σε ενεργειακό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Με την ολοένα αυξανόμενη ανησυχία για την κλιματική αλλαγή και την ανάγκη μείωσης των εκπομπών του θερμοκηπίου, η ηλιακή θερμική ψύξη έχει επέλθει ως μία υποσχόμενη λύση, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ψύξης στα σύγχρονα κτίρια, με παράλληλη τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

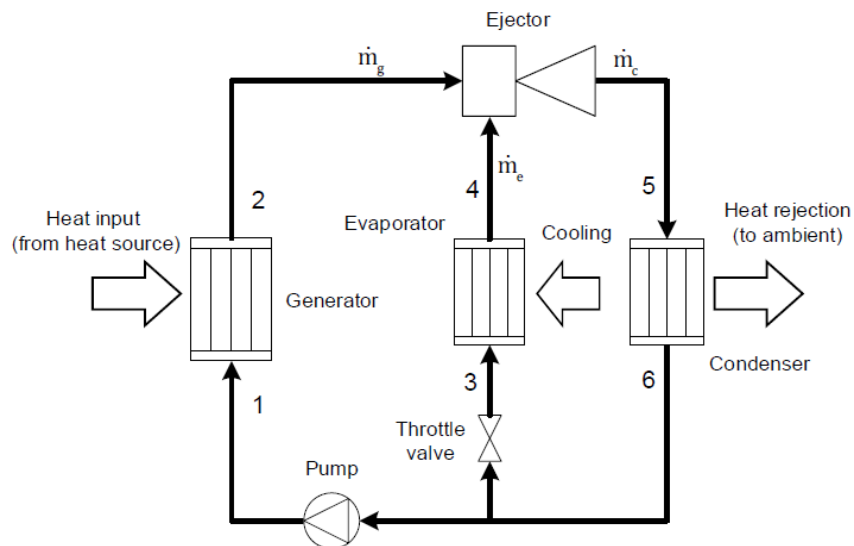
Τα παραδοσιακά συστήματα ηλιακής θερμικής ψύξης μπορούν να τοποθετηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες, απορρόφησης και προσρόφησης [5]. Στη ψύξη με απορρόφηση, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας που ενεργοποιεί έναν κύκλο ψύξης, ενώ στη ψύξη με προσρόφηση, η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την εκρόφηση των ψυκτικών στοιχείων από το υλικό αφομοίωσης, με σκοπό την παραγωγή ψύξης.

Παρόλα αυτά, υπάρχουν συγκεκριμένα εμπόδια σχετιζόμενα με την τεχνολογία της ηλιακής ψύξης, όπως είναι το μεγάλο αρχικό κόστος και οι διαλείψεις ηλιακής ενέργειας. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα ζητήματα πραγματοποιούνται αρκετές επιστημονικές μελέτες και προσπάθειες, ώστε να καταστήσουν αυτή τη τεχνολογία πιο αποτελεσματική και πιο αξιόπιστη.

1.2 Εισαγωγή στον κύκλο ακροφυσίου

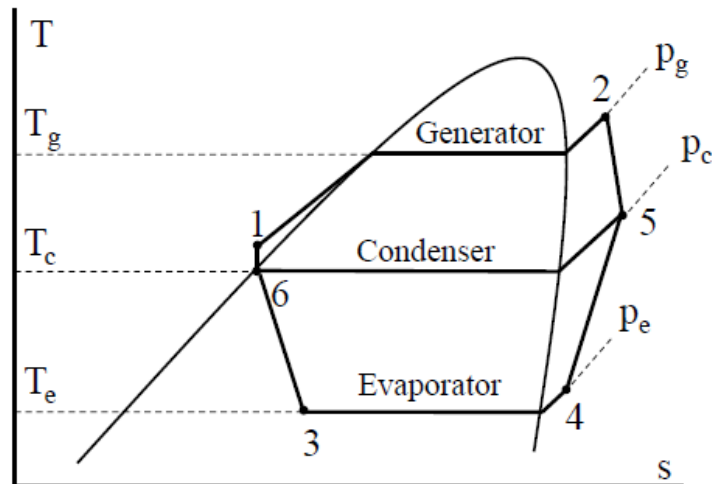
Ο κύκλος ακροφυσίου συνιστά ένα θερμοδυναμικό κύκλο ψύξης, ο οποίος με τη βοήθεια του ακροφυσίου επιτυγχάνει βελτίωση στον βαθμό απόδοσης του κύκλου. Η αρχή λειτουργίας του ακροφυσίου βασίζεται στην εξαναγκασμένη ροή ενός υπέρθερμου ατμού χαμηλής πίεσεως από ένα ρεύμα αντίστοιχου υπέρθερμου ατμού υψηλής πίεσεως. Τα δύο αυτά ρεύματα αναμειγνύονται και καταλήγουν σε ένα ρεύμα ενδιάμεσης πίεσεως.

Στο κύκλο του ακροφυσίου (Σχήμα 1), το ακροφύσιο αντικαθιστά τον συμπιεστή από τα συνήθη συστήματα μηχανικής ψύξης. Η συμπίεση του ατμού χαμηλής πίεσεως που εξέρχεται από τον ατμοποιητή ψύξης πραγματοποιείται εντός του ακροφυσίου από μία ροή υψηλής πίεσεως, που παράγεται με τη χρήση εξωτερικής πηγής θερμότητας, στον ατμοποιητή υψηλής πίεσεως. Το μείγμα των ροών του ακροφυσίου οδηγείται στο συμπυκνωτή. Μετά τη συμπύκνωσή του το ένα μέρος του υγρού καταπιέζεται στην αντλία και στη συνέχεια εισέρχεται στον ατμοποιητή υψηλής πίεσεως, όπου εκεί ατμοποιείται και εξέρχεται ως ατμός υψηλής πίεσεως. Το υπόλοιπο μέρος του υγρού στραγγαλίζεται στην εκτονωτική βαλβίδα σε χαμηλή πίεση και κατευθύνεται στον ατμοποιητή ψύξης. Εκεί, πραγματοποιείται η παραγωγή ψύξης. Ο ατμός που εξέρχεται από τον ατμοποιητή υψηλής πίεσεως εισέρχεται στο ακροφύσιο, όπου παρασύρει τον ατμό χαμηλής πίεσης, ο οποίος εξέρχεται από τον ατμοποιητή ψύξης. Το μεικτό ρεύμα εγκαταλείπει το ακροφύσιο σε ενδιάμεση πίεση και εισέρχεται στο συμπυκνωτή, στον οποίο ψύχεται μέχρι τη κατάσταση κορεσμένου ή υπόψυκτου υγρού.



Σχήμα 1: Διάταξη συστήματος ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο [6]

Στη συνέχεια, παρατίθεται το διάγραμμα μεταβολών της θερμοκρασίας του οργανικού ρευστού του κύκλου ψύξης με ακροφύσιο, συναρτήσεως της εντροπίας, για τις διάφορες καταστάσεις στις οποίες εντοπίζεται κατά τη διάρκεια του κύκλου (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Διάγραμμα T-s συστήματος ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο [6]

Η απόδοση του κύκλου ακροφυσίου έχει ερευνηθεί πειρατικά καθώς και αριθμητικά. Ο ηλεκτρικός συντελεστής συμπεριφοράς του κύκλου («Coefficient of Performance-COP») έχει υπολογιστεί σχετικά υψηλότερος από τα προηγούμενα μοντέλα ψυκτικών κύκλων, όπως αυτό του κύκλου με συμπιεστή (VCC). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πραγματοποιείται ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα για την παραγωγή της ψύξης. Αυτό επιτυγχάνεται με την απαλοιφή του συμπιεστή. Η αντλία που εντοπίζεται στον κύκλο ακροφυσίου καταναλώνει αμελητέα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με αυτά που καταναλώνει ένας συμπιεστής σε ένα σύστημα μηχανικής ψύξης. Η ηλεκτρική κατανάλωση υπολογίζεται περίπου στο 10% από αυτή του συστήματος μηχανικής ψύξης. Ο ηλεκτρικός συντελεστής συμπεριφοράς υπολογίζεται ως εξής:

$$COP_{el} = \frac{\dot{Q}_e}{P_{el,pump}} = \frac{\dot{m}_e \cdot (h_4 - h_3)}{\dot{m}_g \cdot \frac{(h_1 - h_6)}{\eta_M}} \quad (1)$$

Όπου, με η_M συμβολίζεται ο βαθμός απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα της αντλίας.

Για την αξιολόγηση του κύκλου ακροφυσίου χρησιμοποιείται ακόμα ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς (Thermal Coefficient of Performance-COP_{th}). Ο συγκεκριμένος

συντελεστής είναι ίσος με το πηλίκο της παραγόμενης ψυκτικής ισχύος προς το ποσό θερμότητας που τροφοδοτεί το σύστημα ECC.

$$COP_{th} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} = \frac{\dot{m}_e \cdot (h_4 - h_3)}{\dot{m}_g \cdot (h_2 - h_1)} \quad (2)$$

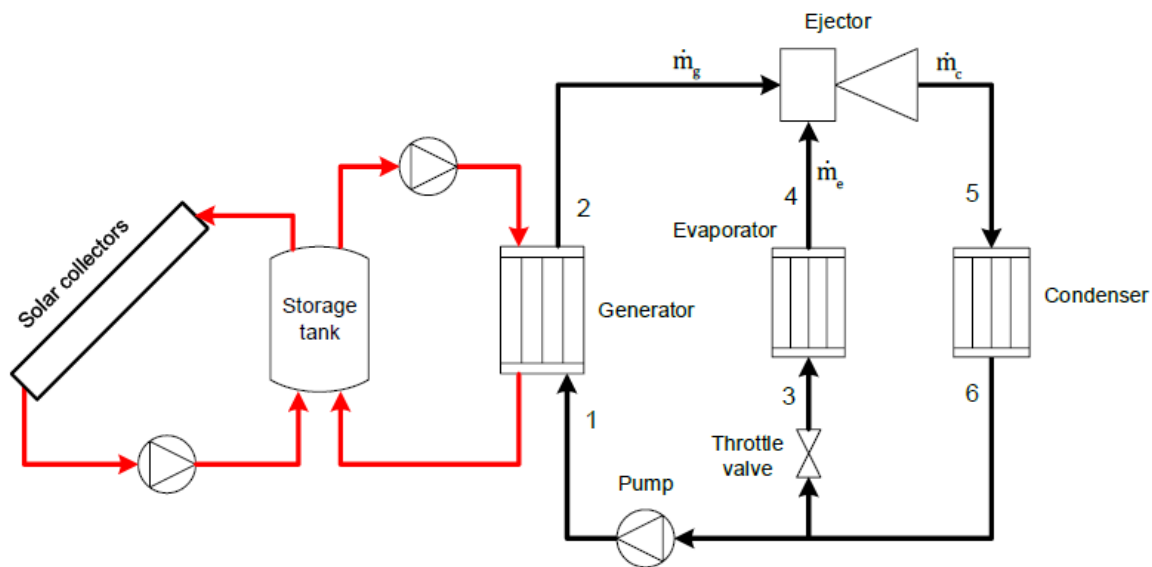
Ένα ακόμη σημαντικό μέγεθος για τη μελέτη και την αξιολόγηση του κύκλου ακροφυσίου συνιστά ο λόγος αναρρόφησης του ακροφυσίου ω (ejector entrainment ratio). Ο συντελεστής αυτός αντικατοπτρίζει την ποσότητα του οργανικού ρευστού το οποίο στραγγαλίζεται στην εκτονωτική βαλβίδα και εισέρχεται στον ατμοποιητή χαμηλής πίεσεως. Συγκεκριμένα, η σχέση που το περιγράφει έχει ως εξής:

$$\omega = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_g} \quad (3)$$

1.3 Εισαγωγή στην ηλιακή ψύξη με ακροφύσιο

Μια τεχνολογία αυτής της κατηγορίας με σοβαρές και ελπιδοφόρες προοπτικές συνιστά η ηλιακή ψύξη με ακροφύσιο (SECC). Η λειτουργία της βασίζεται στον ψυκτικό κύκλο του ακροφυσίου με πηγή ενέργειας τη θερμότητα από τον ήλιο. Το σύστημα εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα της χρήσης ανανεώσιμων μορφών ενέργειας και της αποδοτικότητας του κύκλου του ακροφυσίου.

Στα συστήματα ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο, οι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται για να συλλάβουν και να μετατρέψουν σε θερμότητα την ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω κυκλώματος ρευστού μεταφοράς θερμότητας στο εργαζόμενο ρευστό του κύκλου (Σχήμα 3). Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας εισέρχεται στο δοχείο αποθήκευσης θερμότητας του ηλιακού κυκλώματος και αυξάνει τη θερμοκρασία του. Στη συνέχεια, τροφοδοτείται στον ατμοποιητή υψηλής πίεσεως και με αυτόν τον τρόπο μεταφέρεται θερμότητα στο οργανικό ρευστό του κύκλου ψύξης. Τέλος, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας επιστρέφει στο δοχείο αποθήκευσης θερμότητας. Για την θέρμανση του δοχείου αποθήκευσης θερμότητας, υπεύθυνο είναι το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που διαπερνά τους ηλιακούς συλλέκτες και τροφοδοτεί με θερμότητα το δοχείο. Στους ηλιακούς συλλέκτες πραγματοποιείται εκμετάλλευση της προσπίπτουσας και απορροφημένης ηλιακής ενέργειας, με την προσφορά θερμότητας στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας.

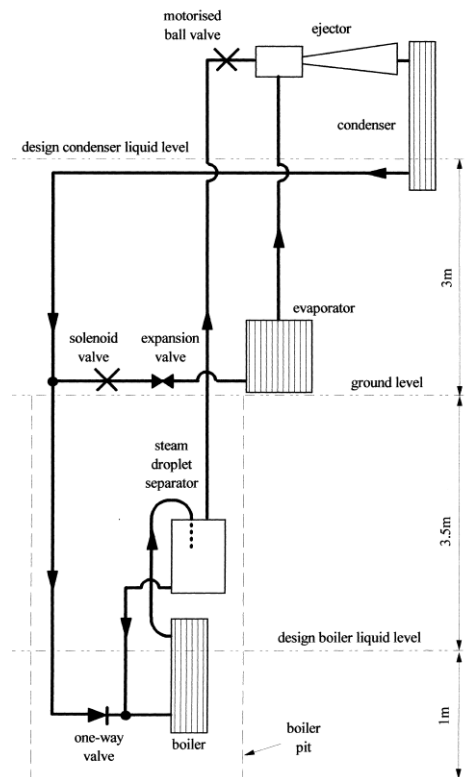


Σχήμα 3: Διάταξη συστήματος ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο [6]

Τα πλεονεκτήματα της ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο ποικίλουν. Είναι ιδιαίτερα ότι μειώνονται τα απαιτούμενα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζονται για την παραγωγή των ζητούμενων ποσών ψύξης. Αυτό οδηγεί στη μείωση των εκπομπών άνθρακος, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κατά κύριο λόγο με την χρήση ορυκτών καυσίμων. Ο συνδυασμός της χρήσης της ανανεώσιμης ηλιακής ενέργειας με την υψηλή απόδοση του κύκλου ακροφυσίου συνιστούν βασικούς λόγους για την αύξηση του ενδιαφέροντος για τη πειραματική διερεύνηση αυτού του συστήματος.

1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση στην ηλιακή ψύξη με ακροφύσιο

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν πειράματα ώστε να δοκιμαστεί η απόδοση ενός παθητικού SECC στο «Loughborough», το οποίο ήταν ικανό να λειτουργήσει με εργαζόμενο μέσο το νερό (Nguyen et al. , [7]). Το σύστημα είχε ονομαστικό ψυκτικό φορτίο ίσο με 7 kW_c και θερμικό 20 kW_{th} . Η τοποθέτηση των εξαρτημάτων του εξοπλισμού έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε η κατανομή πίεσης του εργαζόμενου μέσου να δημιουργείται με τη βοήθεια της βαρύτητας, με συνέπεια η χρήση αντλίας να θεωρείται περιττή. Η διάταξη συμπεριελάμβανε την τοποθέτηση του συμπυκνωτή σε μεγαλύτερο υψόμετρο, σε σχέση με αυτό του μπόιλερ (Σχήμα 4).

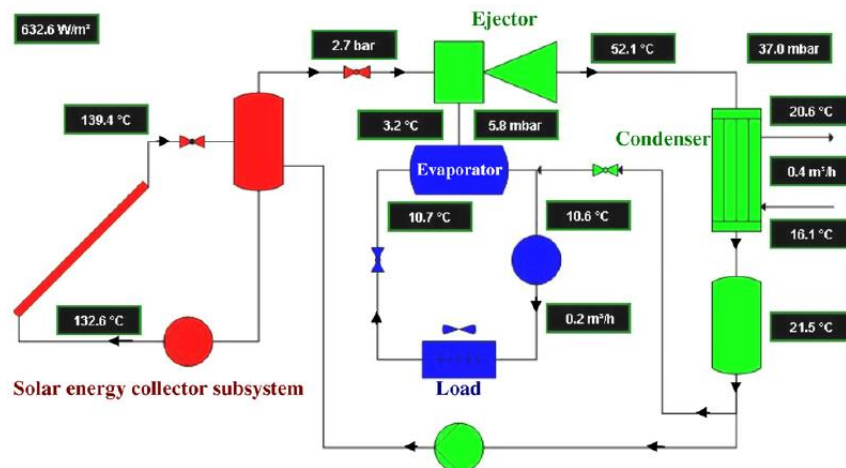


Σχήμα 4: Διάταξη συστήματος SECC στο «Loughborough» [7]

Πραγματοποιήθηκαν 3 πειραματικές δοκιμές με αλλαγή της θερμοκρασίας του ατμοποιητή υψηλής πίεσης (μπόιλερ). Αυτή πήρε τις τιμές 79.4, 76.7 και 73.4 °C, ενώ η πίεση του συμπυκνωτή διατηρούταν σταθερή και ίση με 0.035 bar. Η θερμοκρασία του ατμοποιητή ψύξης τέθηκε στους 1.7, 1.5 και 5.1 °C, αντίστοιχα για τις 3 πειραματικές δοκιμές. Ο συντελεστής συμπεριφοράς του συστήματος για τις 3 διαφορετικές συνθήκες προέκυψε ίσος με 0.28, 0.32 και 0.27, αντίστοιχα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ανάδειξη της δεύτερης θερμοκρασίας του ατμοποιητή υψηλής πίεσης ως προτιμότερη.

Στην ίδια μελέτη, πραγματοποιήθηκε τεχνοοικονομική μελέτη και σύγκριση του προτεινόμενου SECC με το VCC. Τα κόστη του εξοπλισμού του προτεινόμενου συστήματος βρέθηκαν υψηλότερα από αυτά του συστήματος συμπίεσης ατμού. Σε αντίθεση, παρατηρήθηκε ότι η διάρκεια ζωής του SECC ήταν διπλάσια σε σχέση με του VCC. Η περίοδος αποπληρωμής του προτεινόμενου συστήματος υπολογίστηκε ίση με 33 χρόνια. Ως συμπέρασμα, προέκυψε το γεγονός ότι παρόλο που το κόστος λειτουργίας του SECC ήταν χαμηλό, το μεγάλο κόστος του εξοπλισμού του το κατέστησε λιγότερο συμφέρον από το VCC.

Στη συνέχεια, δοκιμάστηκε ένας ψύκτης με εκτοξευτήρα ατμού (SJEC), ισχύος 1 kW, υποκινούμενος από την ηλιακή ενέργεια, με τη χρήση κυλινδρικών παραβολικών συλλεκτών (PTC) (Pollerberg et al. , [8]). Τα κύρια εξαρτήματα αυτού του συστήματος ήταν τα PTC, ο συμπιεστής εκτοξευτήρα, ο ατμοποιητής υψηλής πίεσης, ο πλακοειδής εναλλάκτης και ο ψύκτης συναγωγής (Σχήμα 5). Τα PTC είχαν επιφάνεια 10.5 m² και χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συμπιεστής εκτοξευτήρα εντοπιζόταν πάνω από τον ατμοποιητή ψύξης, συμπεριελάμβανε ένα εκ των δύο ακροφυσίων με διάμετρο 1.5 ή 1.7 mm και η λειτουργία του αφορούσε τη συμπίεση του κινούμενου ατμού που καθοδηγούσε τον κύκλο ψύξης. Ο ατμοποιητής υψηλής πίεσης τροφοδοτούσε με θερμότητα τον κινούμενο ατμό. Ο πλακοειδής εναλλάκτης χρησιμοποιήθηκε με σκοπό τη συμπύκνωση του μίγματος των ρευμάτων μετά την έξοδό του από το ακροφύσιο. Το ψυκτικό φορτίο προσομοιωνόταν στον ψύκτη συναγωγής, ο οποίος λειτουργούσε ως ατμοποιητής χαμηλής θερμοκρασίας και τα αποτελέσματά του χρησιμοποιήθηκαν για την προσέγγιση της απόδοσης του συστήματος.

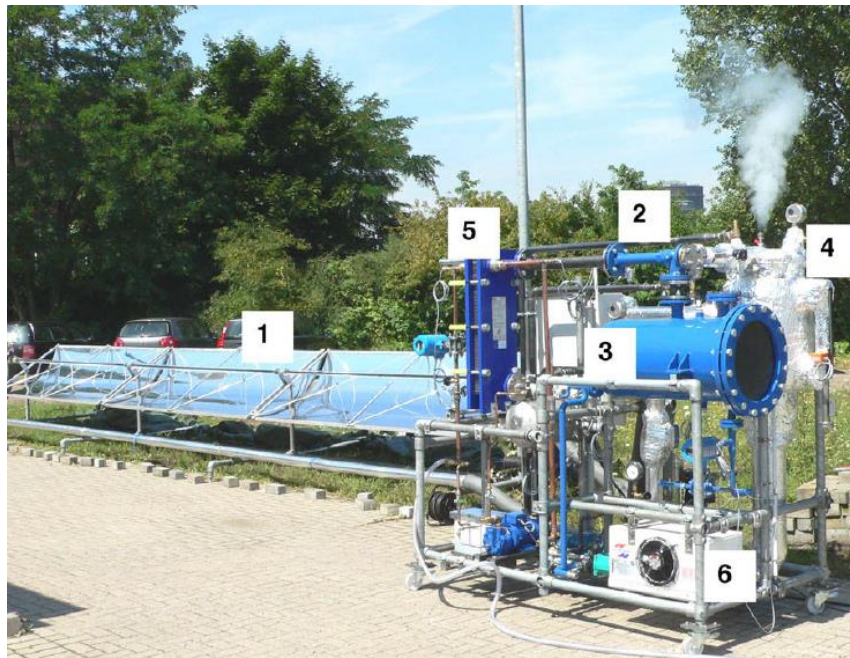


Σχήμα 5: Διάταξη και τιμές λειτουργίας του συστήματος SJEC [8]

Κατά τη λειτουργία του παρατηρήθηκε ότι η πτώση της θερμοκρασίας του συμπυκνωτή κατά 12°C, με παράλληλη διατήρηση της θερμοκρασίας ατμοποίησης στους 7 °C, επέφερε αύξηση του COP κατά 57%. Αντίστοιχα, όταν αυξανόταν η θερμοκρασία του ατμοποιητή σε 13 και 17 °C, διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, το COP παρουσίαζε αύξηση κατά 41% και 34.4%, αντίστοιχα. Έτσι, βγήκε το συμπέρασμα ότι το σύστημα απέδιδε καλύτερα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες συμπύκνωσης και η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου είναι πολύ σημαντική τόσο για την επιλογή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, όσο και για τη γενικότερη απόδοση του κύκλου. Επιπρόσθετα, η αύξηση της θερμοκρασίας ατμοποίησης από 7 στους 13 °C είχε ως αποτέλεσμα τη διακύμανση των τιμών του COP στο διάστημα 14 -56.7%, ενώ με την αύξηση από 7 σε 17 °C προέκυψε διάστημα 53-132%. Το γεγονός αυτό, ανέδειξε τη σημασία της θερμοκρασίας ατμοποίησης

στον συντελεστή συμπεριφοράς του συστήματος. Το σύστημα απέδιδε καλύτερα σε υψηλότερες τιμές ατμοποίησης.

Μία επόμενη μελέτη πραγματοποιήθηκε στο ίδιο σύστημα SJEC, με ταυτόχρονη διατήρηση σταθερών των συνθηκών της πειραματικής διάταξης (Σχήμα 6), όπως στη προηγούμενη έρευνα (Rollerberg et al. , [9]). Η μέγιστη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας μετρήθηκε από 550 έως 600 W/m², επιτρέποντας στη πρωτεύουσα ροή ατμού να φτάσει έως και τους 140 βαθμούς κελσίου. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του βαθμού απόδοσης των ηλιακών συλλεκτών για διαφορετικές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος, με τη μέγιστη τιμή να προκύπτει ίση με περίπου 60%. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μία θετική συσχέτιση μεταξύ της πίεσης και της παροχής μάζας της δευτερεύουσας ροής, σε αντίθεση με το γεγονός ότι η αύξηση της πίεσης της πρωτεύουσας ροής άφηνε ανεπηρέαστη τη παροχή μάζας της δευτερεύουσας.

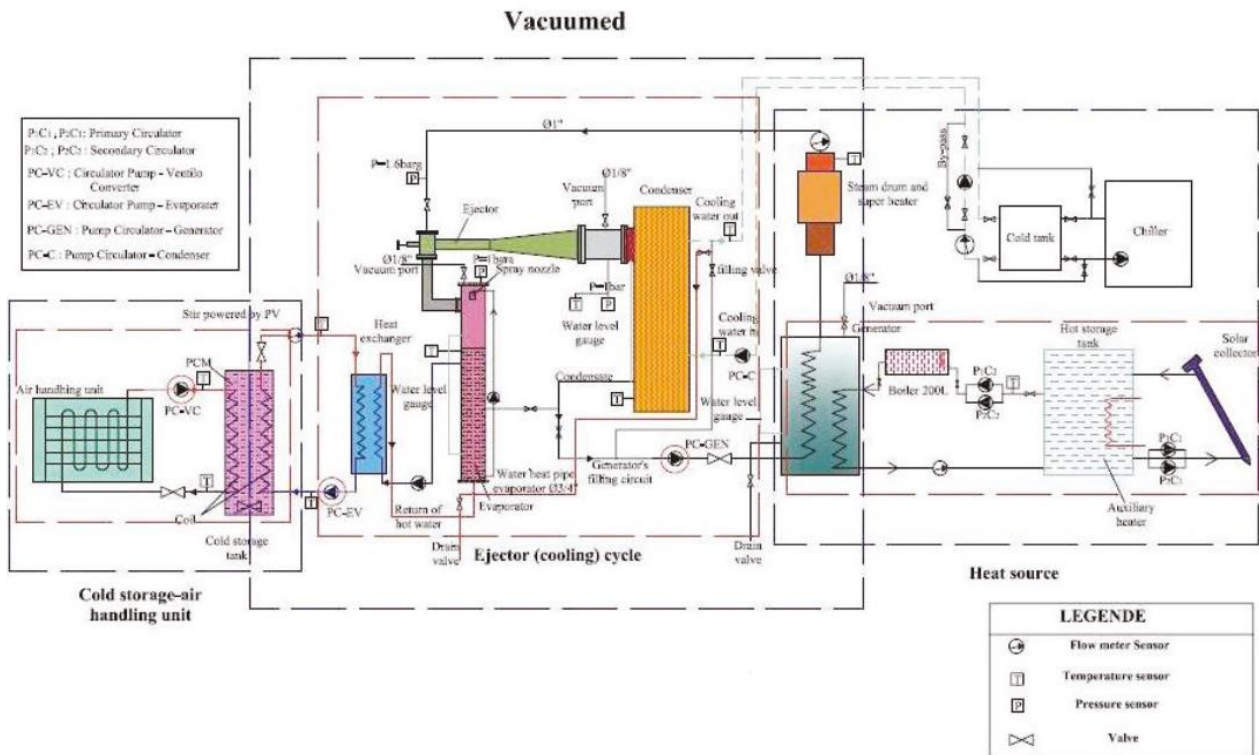


Σχήμα 6: Πειραματική διάταξη SJEC [9]

Ακόμη, γίνεται ανάλυση της ποικιλίας των τιμών του συντελεστή απόδοσης του συστήματος με παράμετρο τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, για διάφορες θερμοκρασίες ατμοποίησης. Επισημάνθηκε ότι η μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης κατά 5K οδήγησε στην μείωση κατά 30% της πρωτεύουσας ροής και επιβεβαιώθηκε η αύξηση του COP, το οποίο ξεπερνούσε την τιμή 1, για θερμοκρασία συμπύκνωσης περίπου 20°C. Παρόμοια αποτελέσματα επέφερε και η αύξηση της θερμοκρασίας ατμοποίησης. Εν κατακλείδι, στην έρευνα συμπεριλαμβάνεται και οικονομική διερεύνηση της εγκατάστασης. Υπολογίστηκε

το κόστος της παραγόμενης ψυκτικής κιλοβατώρας για διάφορες ευρωπαϊκές πόλεις και για την Αίγυπτο. Στη Γερμανία προέκυψε κόστος 0.62 €/kWhc, ενώ για την Αίγυπτο 0.15 €/kWhc.

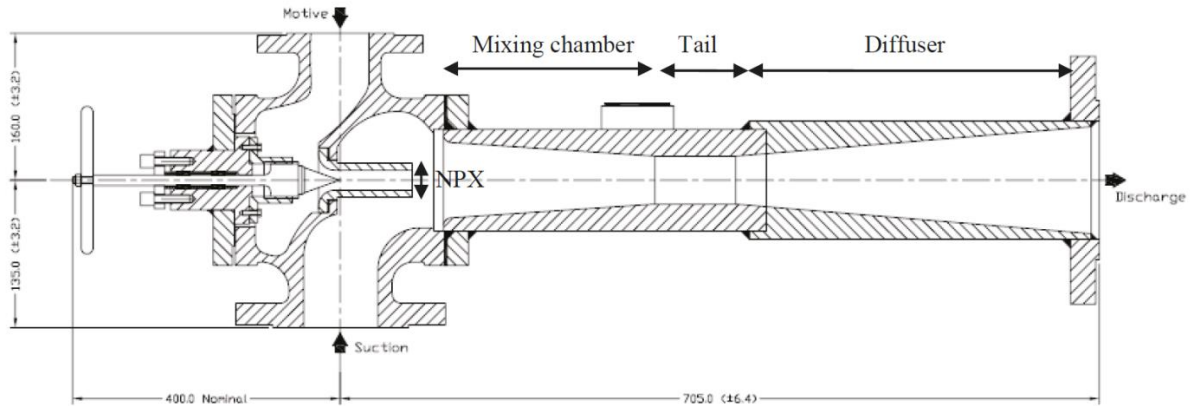
Στα πλαίσια του προγράμματος «Mediterranean AIRCOND» κατασκευάστηκε σύστημα κλιματισμού καθοδηγούμενο από την ηλιακή ενέργεια (Allouche et al. , [10]). Το σύστημα μπορεί να διαχωριστεί σε 3 κομμάτια, τον θερμικό κύκλο, τον κύκλο του ακροφυσίου και την αποθήκευση ψύξης-μονάδες διαχείρισης αέρα ().



Σχήμα 7: Διάταξη εγκατάστασης «Mediterranean AIRCOND» [10]

Για τον θερμικό κύκλο έχει γίνει εγκατάσταση 60 m² με ηλιακούς συλλέκτες κενού. Με σκοπό την αποθήκευση της θερμότητας, αλλά και την ζεστή τροφοδοσία στον κύκλο ακροφυσίου, υπήρχε δοχείο με χωρητικότητα 3000 λίτρα και ενσωματωμένη σε αυτό ηλεκτρική αντίσταση ισχύος 7 kW. Η παραγόμενη ψύξη από το σύστημα μεταφερόταν, με σκοπό την αποθήκευσή της σε δοχείο χωρητικότητας 900 λίτρων, στο οποίο υπήρχαν 800 λίτρα υλικού αλλαγής φάσης σε μορφή κόκκων. Ο σχεδιασμός του ακροφυσίου διαφαίνεται στο Σχήμα 8 . Χρησιμοποιήθηκε ακόμη συμπυκνωτής ισχύος 10 kWth και ένα τύμπανο ατμού με σκοπό την αποφυγή εισόδου υγρού στο ακροφύσιο. Το μοντέλο σχεδιάστηκε και

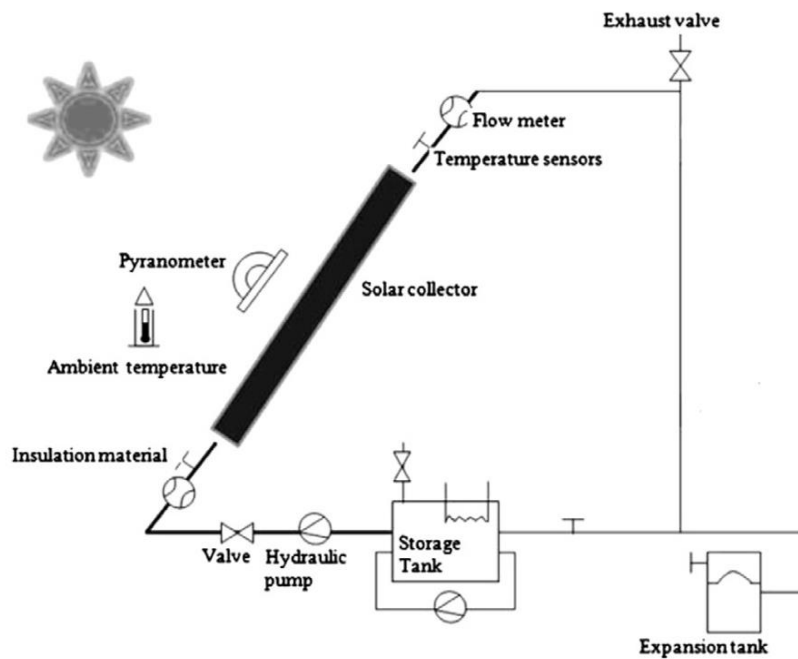
γινόταν έλεγχος ώστε ο ατμός στην έξοδο της γεννήτριας να είναι υπέρθερμος κατά 10 βαθμούς σταθερά.



Σχήμα 8: Σκαρίφημα ακροφυσίου «Mediterranean AIRCOND» [10]

Ως αποτέλεσμα των πειραμάτων που διεκπεραιώθηκαν, ήταν η ανάδειξη της σημασίας της κατάλληλης επιλογής βαλβίδων για την ορθή λειτουργία του κύκλου. Λόγω αυτών των συγκεκριμένων τεχνικών ζητημάτων η δημιουργία κενού στον κύκλο δεν ήταν εφικτή και τα αποτελέσματα, όπως και οι διάφορες πειραματικές τιμές, δεν έγιναν γνωστά.

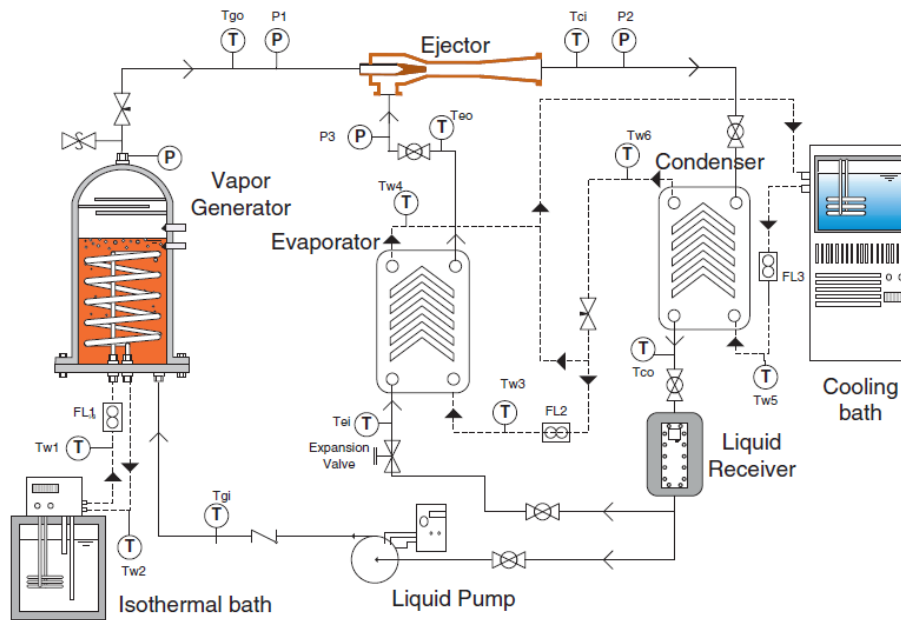
Έρευνα πραγματοποιήθηκε και για την απόδοση διαφορετικών ηλιακών συλλεκτών, που στοχεύουν στη θερμική τροφοδοσία ενός συστήματος ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο για κλιματισμό (Zhang et al. , [11]). Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικοί ηλιακοί συλλέκτες κενού. Για τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη (Σχήμα 9) επιλέχθηκαν τα μοντέλα ηλιακών συλλεκτών TMA600, Cortec2, και TMZ8-1800.



Σχήμα 9: Πειραματική διάταξη ηλιακών συλλεκτών κενού [11]

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων, οι συλλέκτες TMA600 πέτυχαν βαθμό απόδοσης 70%, οι συλλέκτες Cortec2 59%, ενώ οι συλλέκτες TMZ8-1800 53%. Παρόλο που οι τελευταίοι προσφέρουν τον χαμηλότερο βαθμό απόδοσης, θεωρήθηκαν προτιμότεροι εξαιτίας του χαμηλού αρχικού κεφαλαίου που χρειάζονται, αλλά και του χαμηλού κόστους συντήρησης. Για δεδομένο κλίμα αυτό της Τυνησίας- Λιβύης, μία επιφάνεια συλλεκτών ίση με 46.2 m^2 , υπολογίστηκε ότι μπορεί να καλύψει τις ανάγκες ενός συστήματος ECC 5 kW με θερμοκρασία $100 \text{ }^\circ\text{C}$, τροφοδοτώντας το με 16.7 kWth .

Σε μια πειραματική διάταξη ECC (Σχήμα 10) με εργαζόμενο μέσο το R134a, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με σκοπό τη καταμέτρηση των τιμών του θερμικού COP (SAITO et al. , [12]). Ως παράμετρος δοκιμών, επιλέχθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ακροφυσίου. Συγκεκριμένα, δοκιμάστηκαν 4 διαφορετικά ακροφύσια.



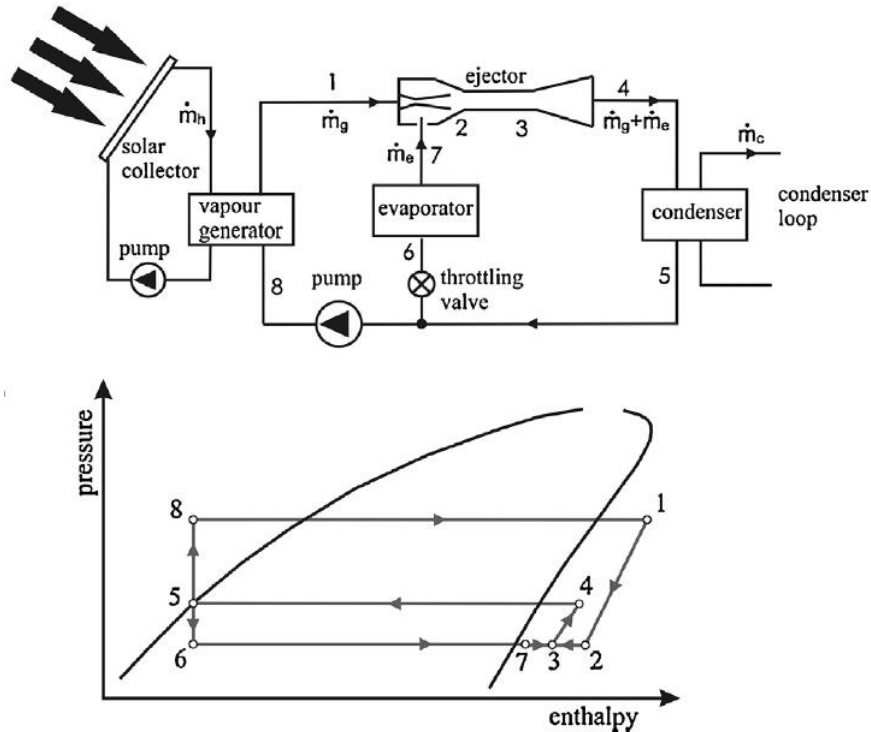
Σχήμα 10: Πειραματική διάταξη ECC [12]

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία ατμοποίησης ίση με 15°C , ενώ η θερμοκρασία στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης ήταν στους 60°C . Παρατηρήθηκε ότι όταν η πίεση συμπύκνωσης ήταν χαμηλότερη από την κρίσιμη πίεση του ακροφυσίου, οι μεταβολές στη θερμοκρασία συμπύκνωσης δεν επέφεραν ιδιαίτερα αισθητά αποτελέσματα στο λόγω παροχών του ακροφυσίου, αλλά ούτε στον συντελεστή συμπεριφοράς του συστήματος. Παρά ταύτα, όταν η πίεση συμπύκνωσης υπερβαίνει την κρίσιμη πίεση του ακροφυσίου, έγινε ευδιάκριτη η πτώση τόσο του λόγου αναρρόφησης, όσο και του συντελεστή συμπεριφοράς.

Ως συμπέρασμα της έρευνας προέκυψε το γεγονός ότι ο σχεδιασμός της γεωμετρίας του ακροφυσίου ήταν πολύ επιδραστικός στη ψυκτική χωρητικότητα και στις θερμοκρασίες συμπύκνωσης. Ένας ιδανικός χώρος ανάμειξης των ροών, κατάφερε να αυξήσει τη ψυκτική χωρητικότητα του συστήματος, αλλά ταυτόχρονα επέφερε αλλαγές στη θερμοκρασία συμπύκνωσης. Από την άλλη μεριά, μία μικρότερη περιοχή εξόδου του μίγματος των ροών απέτρεψε την εμφάνιση ενεργειακών απωλειών χάρη στη δημιουργία κρουστικών κυμάτων και προσέφερε σταθερότητα και αξιοπιστία και υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας συμπύκνωσης. Όμως, σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται χαμηλότερο ψυκτικό φορτίο αυτή η λύση δεν ενδείκνυται.

Πραγματοποιήθηκε ακόμη μια μελέτη σε σύστημα ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο, με στόχο την κάλυψη αναγκών κλιματισμού (Smierciew et al. , [13]). Το εργαζόμενο μέσο της

πειραματικής εγκατάστασης (Σχήμα 11) ήταν το ισοβουτανίου. Η πειραματική διαδικασία περιέλαβε δύο φάσεις.



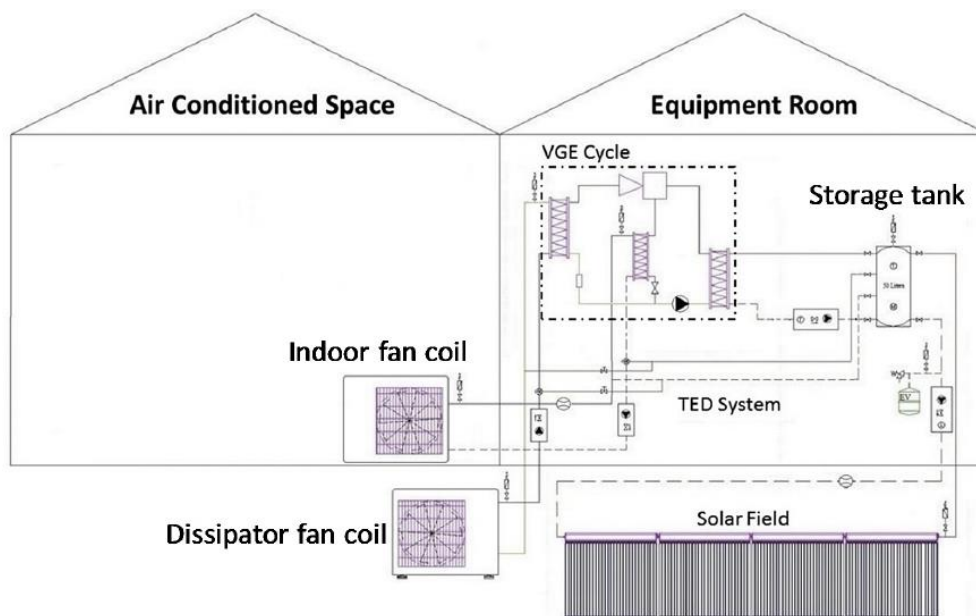
Σχήμα 11: Πειραματική διάταξη και διάγραμμα p-h ισοβουτανίου [13]

Κατά τη πρώτη φάση, διατηρήθηκε σταθερές η θερμοκρασία ατμοποίησης και συμπύκνωσης στους 4.5 και 24 °C, αντίστοιχα. Η μεταβλητή αυτής της φάσης ήταν η θερμοκρασία κορεσμού της πρωτεύουσας ροής στη γεννήτρια, η οποία έλαβε τιμές από 50 έως 64 °C, θέτοντας σταθερά την υπερθέρμανση του ατμού κατά 8 K. Παρατηρήθηκε ότι ο λόγος αναρρόφησης, η θερμοκρασία του ατμοποιητή υψηλής πίεσης και του συμπυκνωτή εμφάνισαν καλή συσχέτιση.

Στη δεύτερη φάση, ελέγχθηκε η απόδοση του ακροφυσίου υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Η θερμοκρασία ατμοποίησης ήταν σταθερή στους 7 °C, η θερμοκρασία κορεσμού της πρωτεύουσας ροής ποίκιλε στο διάστημα 55 με 64.5 °C και η πίεση του συμπυκνωτή λάμβανε διάφορες τιμές. Η διάμετρος του λαιμού του ακροφυσίου είναι ίση με 3.5 χιλιοστά και οι περιοχές μεταξύ της εξόδου του λαιμού, της περιοχής αναμείξεως και του διαχύτη ήταν 1.8, 2.94 και 26.45, αντίστοιχα. Το μέγιστο COP που καταμετρήθηκε ήταν ίσο με 0.19. Οι συνθήκες που το επέφεραν ήταν η θερμοκρασία κορεσμού της γεννήτριας ίση με 55 °C

και θερμοκρασία συμπύκνωσης υπό των 25 °C. Η χαμηλότερη τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς παρατηρήθηκε για θερμοκρασία κορεσμού πρωτεύουσας ροής ίση με 63 °C.

Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές σε ένα σύστημα ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο μεταβλητής γεωμετρίας (Variable Geometry Ejector-VGE), μικρής ισχύος (Varga et al. , [14]). Η πειραματική διάταξη (Σχήμα 12) περιείχε 3 υποσυστήματα, τους ηλιακούς συλλέκτες, τον ψυκτικό κύκλο και το σύστημα ενεργειακής θερμικής τροφοδοσίας. Ο ψυκτικός κύκλος είχε ονομαστική ισχύ τα 1.5 kW, ακροφύσιο μεταβλητής γεωμετρίας και ως εργαζόμενο μέσο το R600a. Η πειραματική διαδικασία είχε ως σκοπό την ψύξη το καλοκαίρι και τη θέρμανση το χειμώνα, ενός δοκιμαστικού χώρου με έκταση τα 16 m².



Σχήμα 12: Πειραματική διάταξη συστήματος με ακροφύσιο μεταβλητής γεωμετρίας [14]

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μεταξύ του Απριλίου και Ιουλίου του 2016 και περιέλαβαν την απόδοση των ηλιακών συλλεκτών, το COP και της ψυκτικής ισχύος. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν ότι η ψυκτική χωρητικότητα βρισκόταν μεταξύ του 1 και 2 kW, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Το θερμικό COP του κύκλου ακροφυσίου πήρε τιμές μεταξύ του 0.15 με 0.40, ενώ το μέσο ηλεκτρικό COP ήταν ίσο με 4.6. Το σύστημα αποδείχθηκε ιδιαίτερα σταθερό στις μέρες ηλιοφάνειας και σε αυτές με μικρά, μόνο, διαστήματα συννεφιάς. Το εργαζόμενο μέσο και η ικανότητα του ακροφυσίου να μεταβάλλει τη γεωμετρία του ήταν οι κύριοι λόγοι που επέφεραν στο σύστημα σταθερότητα και αξιοπιστία στα αποτελέσματά του.

Περαιτέρω ανάλυση πραγματοποιήθηκε στο ίδιο σύστημα με ακροφύσιο μεταβλητής γεωμετρίας (Varga et al. , [15]). Τα πειράματα έγιναν σε δύο πιέσεις στη γεννήτρια, 10.2 και 12.2 bar. Η θερμοκρασία της γεννήτριας ήταν στο διάστημα 84 με 90 °C, ενώ η θερμοκρασία ατμοποίησης και συμπύκνωσης ήταν σταθερές και ίσες με 8.5 και 31.4 °C, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν μία ενδιάμεση τιμή της θέσης εξόδου του ακροφυσίου ως βέλτιστη. Αυτή ήταν τα 1.5 χιλιοστά και μεγιστοποιούσε το COP, τον λόγο αναρρόφησης και τη ψυκτική χωρητικότητα και για τις δυο διαφορετικές τιμές της πίεσης της γεννήτριας.

Ως συμπέρασμα της μελέτης, προέκυψε το γεγονός ότι με την αντικατάσταση του απλού ακροφυσίου με ένα μεταβλητής γεωμετρίας, είναι σε θέση να βελτιώσει το COP κατά 24%, επιτυγχάνοντας μέγιστη τιμή 0.29 και ψυκτική ισχύ 1.6 kWc.

1.5 Στόχος της εργασίας

Οι προηγούμενες μελέτες πάνω στην ηλιακή ψύξη με ακροφύσιο ανέδειξαν τις σοβαρές και ελπιδοφόρες προοπτικές αυτού του συστήματος. Με την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση σε ψύξη, η ηλιακή ψύξη με ακροφύσιο έχει αποδείξει πως θα μπορούσε να συντελέσει καίριος παράγοντας στην βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων, αλλά και στην καταπολέμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προηγούμενων μεθόδων παραγωγής ψύξης. Στο πλαίσιο αυτού του ζητήματος, στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων του ΕΜΠ εγκαταστάθηκε το σύστημα SunClim. Το σύστημα αυτό αποτελείται από το ηλιακό πεδίο και το σύστημα ψύξης ακροφυσίου (ECC). Το SunClim, σε σχέση με άλλες πειραματικές μελέτες, καινοτόμησε στο θέμα της ενσωμάτωσης ηλιακού πεδίου στον κύκλο ψύξης της εγκατάστασης και της κατασκευής του δικού του ακροφυσίου. Σκοπός της παρούσας εργασίας συνιστά η πειραματική διερεύνηση της εγκατάστασης, καθώς και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων της.

2. Περιγραφή πειραματικής εγκατάστασης SunClim

2.1 Γενική παρουσίαση της εγκατάστασης

Το σύστημα SunClim τοποθετήθηκε στον χώρο του Εργαστηρίου των Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Η επιλογή του εξοπλισμού του συστήματος βασίστηκε σε θεωρητικούς υπολογισμούς βάσει της επιφάνειας του ηλιακού πεδίου, η οποία και καθορίστηκε με βάση την ελεύθερη διαθέσιμη επιφάνεια στην οροφή του Κτιρίου Ο. Όπως προαναφέρθηκε, τα δύο υποσυστήματα του SunClim συνιστούν το ηλιακό πεδίο και ο ψυκτικός κύκλος ακροφυσίου (ECC). Στην εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε ενσωμάτωση του υδραυλικού κυκλώματος του Εργαστηρίου, με στόχο την εξομοίωση της ψυκτικής κατανάλωσης και της απόρριψης θερμότητας στο περιβάλλον. Για τη λειτουργία της εγκατάστασης και την καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων υλοποιήθηκε πλήθος αυτοματισμών και αναπτύχθηκε κατάλληλη διεπαφή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του προγράμματος LabView.

2.2 Κύκλωμα ηλιακών συλλεκτών

Οι ηλιακοί συλλέκτες της εγκατάστασης (Εικόνα 1, Εικόνα 2) κατασκευάστηκαν από την εταιρεία COSMOSOLAR και τοποθετήθηκαν στην οροφή του Εργαστηρίου στο Κτίριο Ο. Ο εκάστοτε συλλέκτης είχε επιφάνεια 2 τετραγωνικών μέτρων. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 24 συλλέκτες, με αποτέλεσμα η συνολική επιφάνεια του ηλιακού κυκλώματος να γίνεται ίση με 48 τετραγωνικά μέτρα.

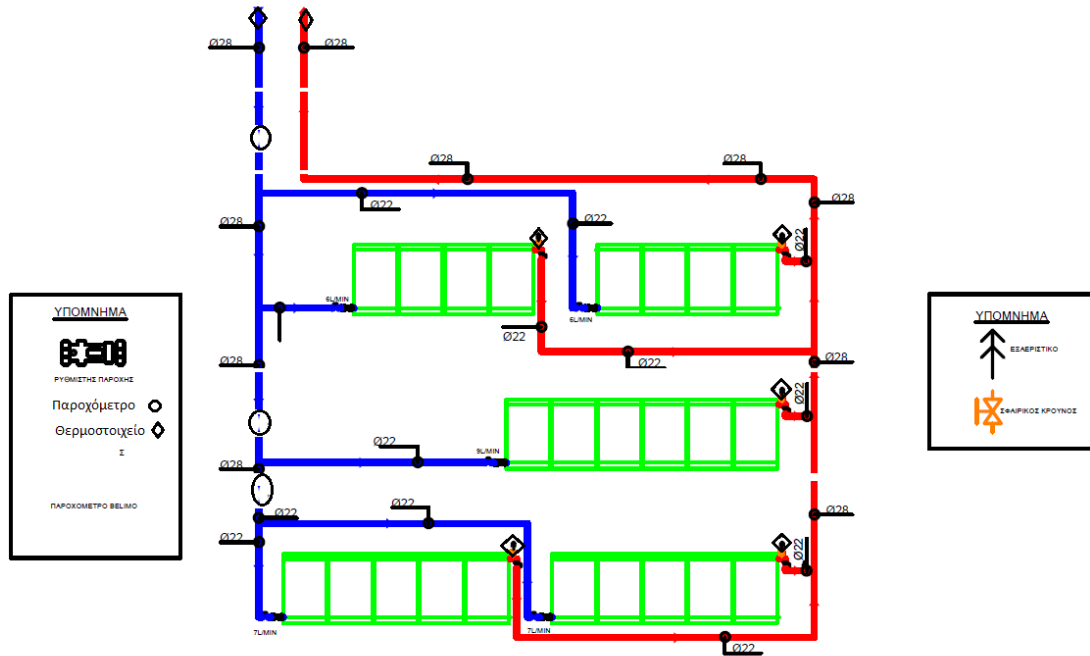


Εικόνα 1: Διάταξη ηλιακών συλλεκτών στην οροφή του Κτιρίου Ο (πλάγια όψη)



Εικόνα 2: Διάταξη ηλιακών συλλεκτών στην οροφή του Κτιρίου Ο (πρόοψη)

Οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετήθηκαν σε 5 συστοιχίες. Αυτές περιλάμβαναν 2 τετράδες, 2 πεντάδες και 1 εξάδα. Οι συστοιχίες ήταν παράλληλα συνδεδεμένες και η χωροθέτησή τους (Σχήμα 13) έγινε με τρόπο, ώστε να μεγιστοποιείται η προσπίπτουσα σε αυτές ηλιακή ακτινοβολία με βάση τον διαθέσιμο χώρο της οροφής.



Σχήμα 13: Σκαρίφημα χωροθέτησης ηλιακών συλλεκτών

Ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας για το ηλιακό κύκλωμα επιλέχθηκε το μίγμα νερού-προπυλενογλυκόλης. Από την εταιρεία Akotec, χρησιμοποιήθηκε το Theros VT-51 df, για το οποίο επισημάνθηκε ότι είναι κατάλληλο για συλλέκτες άμεσης ροής, όπως αυτοί της εγκατάστασης. Στο ισόγειο του Κτιρίου Ο του Εργαστηρίου εντοπίζεται το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας (Εικόνα 3). Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας με τη βοήθεια μίας αντλίας κυκλοφορούσε από το δοχείο στους ηλιακούς συλλέκτες και θερμαινόταν αποδίδοντας αυτή τη θερμότητα στο εσωτερικού του δοχείου αποθήκευσης θερμότητας. Η συναλλαγή θερμότητας εντός του δοχείου γινόταν χάρη σε έναν σπειροειδή εναλλάκτη, μέσα από τον οποίο διερχόταν το ρευστό μεταφοράς θερμότητας.



Εικόνα 3: Δοχείο αποθήκευσης θερμότητας

Ο κυκλοφορητής του ηλιακού πεδίου ελεγχόταν από ένα σύστημα αυτοματισμού (Εικόνα 4), το οποίο ήταν υπεύθυνο για τη κυκλοφορία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας όταν εμφανιζόταν υψηλότερη θερμοκρασία στην έξοδο των ηλιακών συλλεκτών από αυτή στο εσωτερικό του δοχείου.



Εικόνα 4: Σύστημα αυτοματισμού ηλιακού πεδίου

Το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας τροφοδοτούσε το σύστημα ECC με την απαιτούμενη θερμότητα μέσω του υδραυλικού κυκλώματος (Εικόνα 5). Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας εισερχόταν στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης του ECC προσφέροντας την απαιτούμενη θερμική ισχύ στο οργανικό ρευστό του ψυκτικού κύκλου και στη συνέχεια επέστρεφε στο δοχείο.



Εικόνα 5: Διασύνδεση δοχείου αποθήκευσης θερμότητας με σύστημα ECC

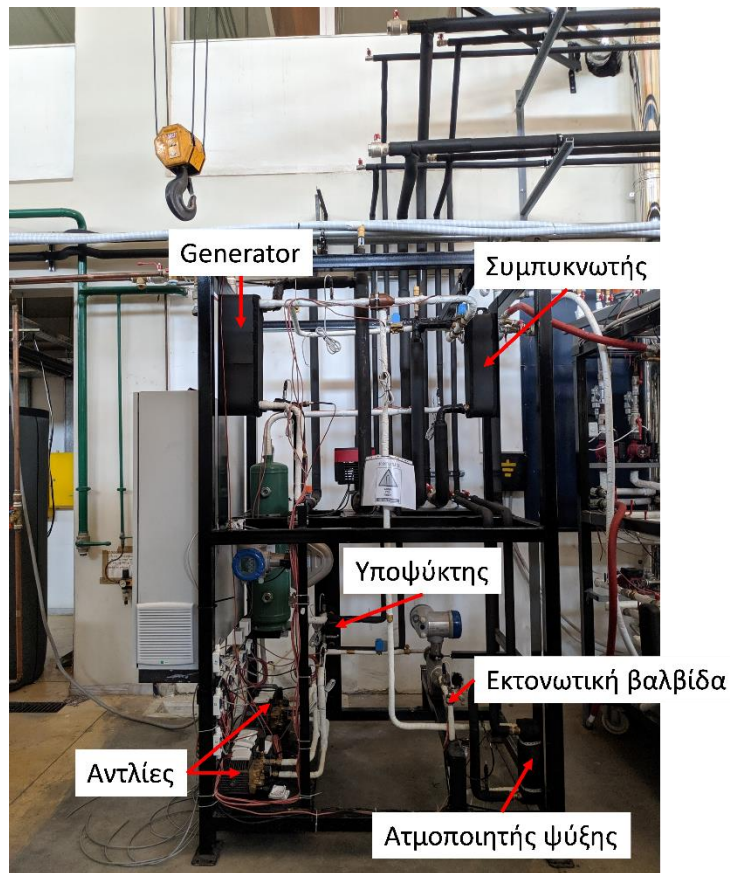
Σε περιπτώσεις ανεπάρκειας απαιτούμενου ποσού θερμότητας από το κύκλωμα του ηλιακού πεδίου, υπήρχε σύνδεση του δοχείου αποθήκευσης θερμότητας με ένα σύστημα καυστήρα (Εικόνα 6). Ο καυστήρας ήταν της εταιρείας Θερμής και συγκεκριμένα το μοντέλο E-9. Η λειτουργία του βασιζόταν στην καύση φυσικού αερίου, με συνέπεια τη θέρμανση σωληνώσεων νερού, οι οποίες κυκλοφορούσαν από το σύστημα καυστήρα μέχρι και το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας, με αποτέλεσμα τη μετάδοση της θερμότητας σε αυτό.



Εικόνα 6: Σύστημα καυστήρα φυσικού αερίου

2.3 Σύστημα κύκλου ψύξης με ακροφύσιο

Τα κύρια μέρη του ECC είναι ο μηχανολογικός εξοπλισμός, ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός και τα μετρητικά όργανα και αισθητήρια. Το σύστημα απεικονίζεται στην Εικόνα 7. Στη συνέχεια, παρατίθενται και παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι συνιστώσες που συνθέτουν τον κύκλο ψύξης ακροφυσίου.



Εικόνα 7: Σύστημα ECC

Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 1), καταγράφονται τα στοιχεία εξοπλισμού του κύκλου ψύξης με ακροφύσιο.

Πίνακας 1: Στοιχεία εξοπλισμού ECC

α/α	Στοιχείο εξοπλισμού
	<u>Μηχανολογικός εξοπλισμός</u>
1	Αντλίες
2	Ατμοποιητής υψηλής θερμοκρασίας - Generator
3	Ατμοποιητής ψύξης- Evaporator
4	Συμπυκνωτής - Condenser
5	Εναλλάκτης υπόψυξης - Subcooler
6	Ακροφύσιο
7	Φίλτρο ψυκτικού κυκλώματος
8	Βαλβίδες και σωληνώσεις

9	Σκελετός της εγκατάστασης
10	Οργανικό ρευστό
<u>Ηλεκτρολογικός εξοπλισμός</u>	
1	Inverters
2	Ηλεκτρολογικός πίνακας
3	Λογισμικό παρακολούθησης και ελέγχου
<u>Μετρητικά όργανα και αισθητήρια</u>	
1	Μετρητικά θερμοκρασίας
2	Μετρητικά πίεσης
3	Παροχόμετρα Coriolis οργανικού ρευστού

2.3.1 Στοιχεία μηχανολογικού εξοπλισμού

Τα μηχανολογικά εξαρτήματα της εγκατάστασης είναι υπεύθυνα και καθορίζουν τις θερμοδυναμικές μεταβολές του ψυκτικού κύκλου. Επίσης, η ενεργειακή απόδοση του κύκλου εξαρτάται άμεσα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανολογικών κομματιών του ψυκτικού κύκλου και της μεταξύ τους συνδεσμολογίας.

2.3.1.1 Αντλίες

Οι αντλίες έχουν ως κύριο ρόλο την διακίνηση του οργανικού ρευστού του ψυκτικού κύκλου και την αύξηση της πίεσής του. Η πίεση του λαμβάνει την επιθυμητή τιμή προτού αυτό εισαχθεί στον εναλλάκτη του ατμοποιητή υψηλής πίεσης, όπου θα υπερθερμανθεί.

Με βάση τις μελέτες για το σχεδιασμό της εγκατάστασης, είχε υπολογισθεί ότι η τιμή της παροχής του οργανικού ρευστού όφειλε να είναι περίπου στα 0.157 kg/sec, ενώ η πίεση να έφτανε τα 18 bar. Για το οργανικό ρευστό της εγκατάστασης, το R134a, αυτές οι συνθήκες αντιστοιχούν σε 30 °C, πυκνότητα 1187 kg/m³ και παροχή όγκου 7.93 l/min. Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις, σχεδιάστηκε η ενσωμάτωση δύο αντλιών με ονομαστική παροχή τα 4 l/min σε παράλληλη σύνδεση. Από αυτό έπεται ότι η συνολική παροχή θα ισοδυναμεί με το άθροισμά των παροχών τους και η συνολική πίεση θα είναι ίση με την ίση πίεση των δύο αντλιών. Το μοντέλο των εμβολοφόρων αντλιών που επιλέχθηκε είναι της εταιρίας Anponi Reverberi και συγκεκριμένα το HPE-M 04.08 με by-pass (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας HPE-M 04.08

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Χωρητικότητα (L/min)	4
Μέγιστη πίεση (bar)	80

Ισχύς (kW)	0.7
Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	1450
Βάρος (kg)	22

Οι αντλίες φέρουν μαζί και τον ηλεκτροκινητήρα τους. Η παροχή του οργανικού ρευστού επιτυγχάνεται με τη δυνατότητα του καθορισμού της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής των αντλιών μέσω της σύνδεσης των κινητήρων τους με inverters. Αυτό γίνεται με βάση το γεγονός ότι οι αντλίες είναι θετικής εκτόπισης (positive displacement) και η παροχή του οργανικού ρευστού που προκαλούν δεν επηρεάζεται από τη πίεση του. Η παράλληλη σύνδεσή τους δίνει τη δυνατότητα να καλυφθεί το μέγιστο δυνατό εύρος λειτουργίας τους. Με σκοπό την κατανάλωση του ελάχιστου δυνατού ποσού ηλεκτρικής ενέργειας, η συνδεσμολογία πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε σε συνθήκες χαμηλής ζήτησης, να λειτουργεί μόνο μία αντλία και η δεύτερη να ενεργοποιείται μόλις αυξηθεί η ζήτηση.

2.3.1.2 Ατμοποιητής υψηλής θερμοκρασίας – Generator

Στον εναλλάκτη θερμότητας του ατμοποιητή υψηλής πίεσης εισέρχεται το υγροποιημένο οργανικό ρευστό. Σε εκείνο το σημείο ατμοποιείται και υπερθερμαίνεται, ώστε να αποτελέσει τη πρωτεύουσα ροή στο ακροφύσιο. Για τη θέρμανσή του, το οργανικό ρευστό, αντλεί θερμότητα από το ζεστό ρεύμα του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, το οποίο εισέρχεται στον εναλλάκτη από το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας. Ως πρωτεύουσα ροή στο ακροφύσιο, στόχο έχει να συμπαρασύρει το ρεύμα υπέρθερμου ατμού χαμηλής πίεσης, που εξέρχεται από τον ατμοποιητή ψύξης.

Με βάση τις προδιαγραφές (Πίνακας 3) σχεδιασμού του ατμοποιητή υψηλής θερμοκρασίας επιλέχθηκε το μοντέλο ACH-70X-40M-F της εταιρείας Alfa Laval, το οποίο συνιστά συγκολλητό πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας.

Πίνακας 3: Προδιαγραφές ατμοποιητή υψηλής θερμοκρασίας - Generator

Θερμική ισχύς (kW_{th})	44.5	
	<u>Θερμό ρεύμα</u>	<u>Ψυχρό ρεύμα</u>
Ονομασία	Νερό	Οργανικό ρευστό R134A
Παροχή μάζας (kg/s)	1.255	0.232
Θερμοκρασία εισόδου (°C)	80 (υπόψυκτο υγρό)	31.1 (υπόψυκτο υγρό)
Θερμοκρασία εξόδου (°C)	70 (υπόψυκτο υγρό)	67.7 (υπέρθερμος ατμός, υπερθέρμανση κατά 5 K)

Πίεση (bar)	2	18
--------------------	---	----

2.3.1.3 Ατμοποιητή ψύξης – Evaporator

Στον ατμοποιητή ψύξης εξομοιώνεται η παραγωγή ψύξης της εγκατάστασης. Σε αυτόν τον εναλλάκτη θερμότητας εισέρχεται το οργανικό ρευστό σε διφασική κατάσταση, το οποίο εξέρχεται από την εκτονωτική βαλβίδα και με την απορρόφηση θερμότητας από το θερμό ρεύμα (νερό που προσάγεται από το υδραυλικό κύκλωμα) μετατρέπεται σε υπέρθερμο αέριο και στη συνέχεια οδηγείται ως δευτερεύουσα ροή στο ακροφύσιο. Η ψύξη του νερού του υδραυλικού κυκλώματος εκπροσωπεί τις ψυκτικές ανάγκες του συστήματος. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές (Πίνακας 4), που προέκυψαν από τη θεωρητική ανάλυση, το μοντέλο συγκολλητού πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας που επιλέχθηκε ήταν το ACH18-18H-F της εταιρείας Alfa Laval.

Πίνακας 4: Προδιαγραφές ατμοποιητή ψύξης - Evaporator

Θερμική ισχύς (kW_{th})	4.5	
	<u>Θερμό ρεύμα</u>	<u>Ψυχρό ρεύμα</u>
Ονομασία	Νερό	Οργανικό ρευστό R134A
Παροχή μάζας (kg/s)	0.140	0.027
Θερμοκρασία εισόδου ($^{\circ}C$)	20	8 (διφασικό, ξηρότητα 16%)
Θερμοκρασία εξόδου ($^{\circ}C$)	13	10 (υπέρθερμος ατμός, υπερθέρμανση κατά 2 K)
Πίεση (bar)	1.013	3.9

2.3.1.4 Συμπυκνωτής – Condenser

Στον συμπυκνωτή εισέρχεται το υπέρθερμο ρεύμα αερίου του οργανικού ρευστού που εξέρχεται από το ακροφύσιο. Ο βασικός ρόλος του συνιστά η αποβολή θερμότητας στο περιβάλλον. Από το συμπυκνωτή το οργανικό ρευστό εξέρχεται ως κορεσμένο υγρό και στη συνέχεια εισέρχεται στο τροφοδοτικό δοχείο, όπου επικρατεί θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ αέριας και υγρής φάσης. Η θερμότητα που αποβάλλεται από το οργανικό ρευστό απορροφάται από το νερό του υδραυλικού κυκλώματος, μέσω του οποίου εξομοιώνεται η απόρριψη θερμότητας προς το περιβάλλον. Οι προδιαγραφές (Πίνακας 5) της μελέτης οδήγησαν στην επιλογή του μοντέλου συγκολλητού πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας CB60-60H-F της εταιρείας Alfa Laval.

Πίνακας 5: Προδιαγραφές συμπυκνωτή - Condenser

Θερμική ισχύς (kW_{th})	47.51	
	<u>Θερμό ρεύμα</u>	<u>Ψυχρό ρεύμα</u>
Όνομασία	Ψυκτικό ρευστό R134A	Νερό
Παροχή μάζας (kg/s)	0.261	1.891
Θερμοκρασία εισόδου (°C)	47.5 (υπέρθερμος ατμός)	25 (υγρό)
Θερμοκρασία εξόδου (°C)	35.2 (κορεσμένο υγρό)	30.6 (υγρό)
Πίεση (bar)	8.9	1.013

2.3.1.5 Εναλλάκτης υπόψυξης – Subcooler

Το οργανικό ρευστό καθοδηγείται στον εναλλάκτη υπόψυξης έπειτα από την έξοδο του από το τροφοδοτικό δοχείο σε κατάσταση κορεσμένου υγρού. Σε εκείνο το σημείο, υποβάλλεται σε υπόψυξη 5 K. Ο κρισιμότερος λόγος που συμβαίνει αυτό αποτελεί η αποτροπή της πιθανότητας εμφάνισης σπηλαιώσης στις αντλίες της εγκατάστασης. Η υπόψυξη επιτυγχάνεται χάρη στην απορρόφηση θερμότητας από το ρεύμα νερού που περνάει από τον εναλλάκτη υπόψυξης και επιστρέφει στα δοχεία του υδραυλικού κυκλώματος. Η θερμοκρασία αυτού του ρεύματος ταυτίζεται με τη θερμοκρασία του νερού του συμπυκνωτή, δηλαδή με τη τιμή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Οι προδιαγραφές (Πίνακας 6) επέφεραν την επιλογή του μοντέλου συγκολλητού πλακοειδή εναλλάκτη θερμότητας ACH16-14H-F της εταιρείας Alfa Laval.

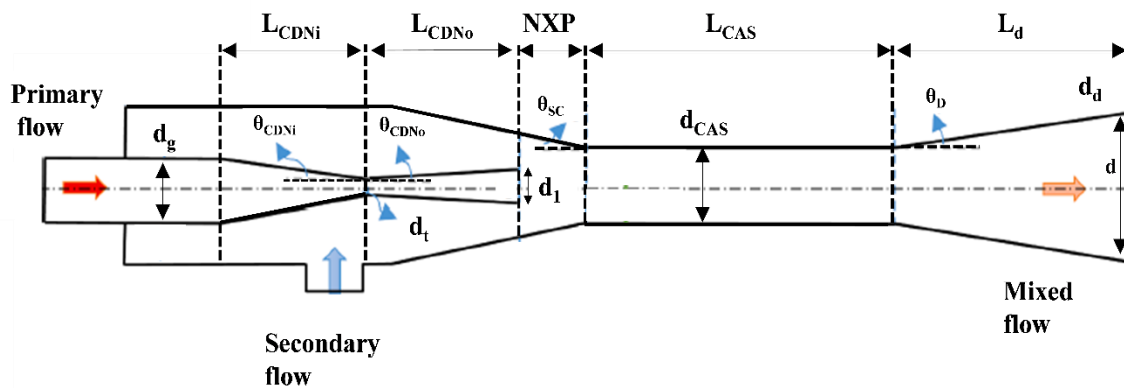
Πίνακας 6: Προδιαγραφές εναλλάκτη υπόψυξης - Subcooler

Θερμική ισχύς (kW_{th})	2	
	<u>Θερμό ρεύμα</u>	<u>Ψυχρό ρεύμα</u>
Όνομασία	Οργανικό ρευστό R134A	Νερό
Παροχή μάζας (kg/s)	0.261	0.084
Θερμοκρασία εισόδου (°C)	35.2 (κορεσμένο υγρό)	25 (υγρό)
Θερμοκρασία εξόδου (°C)	30.2 (υπόψυκτο υγρό)	30.2 (υγρό)
Πίεση (bar)	8.9	1.013

2.3.1.6 Ακροφύσιο

Το ακροφύσιο συνιστά το επίκεντρο του κύκλου ψύξης του συστήματος. Στο ακροφύσιο εισέρχονται η πρωτεύουσα ροή υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας και η δευτερεύουσα ροή χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Η πρωτεύουσα ροή έρχεται από τον ατμοποιητή υψηλής πίεσης σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού υψηλής πίεσεως. Με την είσοδο του στο ακροφύσιο, εξαιτίας της ειδικής γεωμετρίας του, αναπτύσσει υπερηχητική ταχύτητα, με αποτέλεσμα να συμπαρασύρει τη δευτερεύουσα ροή χαμηλής πίεσεως, η οποία προέρχεται από τον ατμοποιητή ψύξης. Η ροή που προκύπτει από την ανάμειξή τους βρίσκεται σε ενδιάμεση πίεση και οδηγείται στον συμπυκνωτή του κύκλου.

Το ακροφύσιο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 14, αποτελείται από δύο ανεξάρτητα μέρη, το συγκλίνον-αποκλίνον κομμάτι (CDN) και τον λαιμό του ακροφυσίου. Το πρώτο τμήμα λαμβάνει την πρωτεύουσα ροή και επιταχύνει υποηχητικά μέχρι ένα σημείο ελάχιστης διατομής (d_t). Στη συνέχεια, η ροή επιταχύνεται υπερηχητικά μέχρι το σημείο εξόδου (d_1). Το δεύτερο τμήμα, ο λαιμός του ακροφυσίου, αναλαμβάνει την ανάμειξη της πρωτεύουσας ροής με τη δευτερεύουσα χαμηλής πίεσεως. Αυτή η ανάμειξη συμβαίνει έπειτα από την υπερηχητική επιτάχυνση της πρωτεύουσας ροής. Στην έξοδο του δεύτερου τμήματος, εντοπίζεται μια διαμόρφωση διαχύτη, με στόχο την αύξηση της πίεσης.



Σχήμα 14: Σκαρίφημα ακροφυσίου

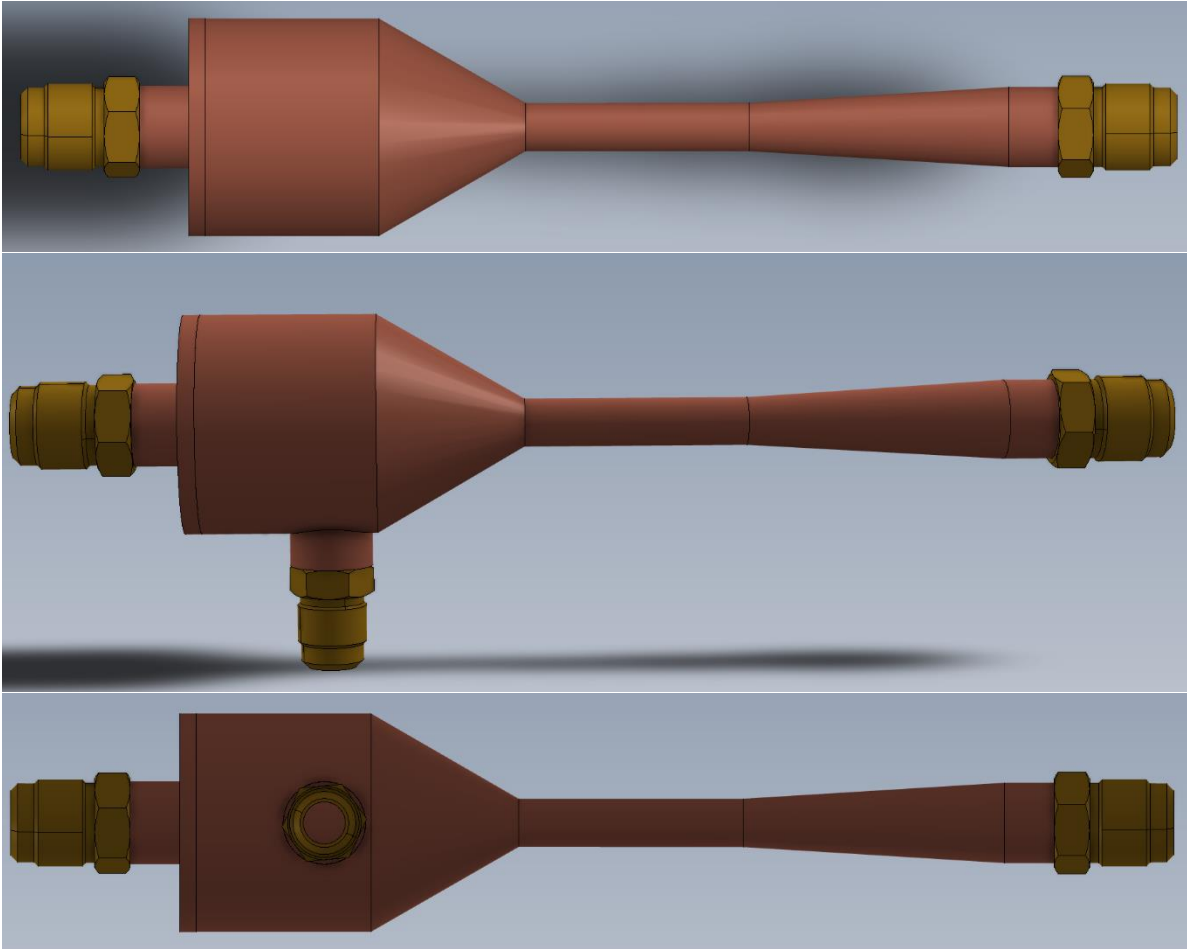
Οι διαστάσεις (Πίνακας 7) που υπολογίστηκαν για το σχεδιασμό του ακροφυσίου αφορούσαν διάφορες διατομές, μήκη και γωνίες των δύο τμημάτων. Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός περιλάμβανε τον αναλυτικό υπολογισμό των τιμών της διατομής λαιμού, της

διατομής εξόδου και της διατομής τμήματος σταθερής διατομής. Σε αντίθεση με τις αρχικές διαστάσεις, υπήρξαν άλλες διαστάσεις για τις οποίες δεν ήταν εφικτός ο αναλυτικός υπολογισμός τους. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική μελέτη πάνω σε εγχειρίδια σχεδιασμού ακροφυσίων, αλλά και σε άλλες πειραματικές έρευνες, με σκοπό τον υπολογισμό τους με βάση εμπειρικούς κανόνες και πρακτικές.

Πίνακας 7: Διαστάσεις ακροφυσίου

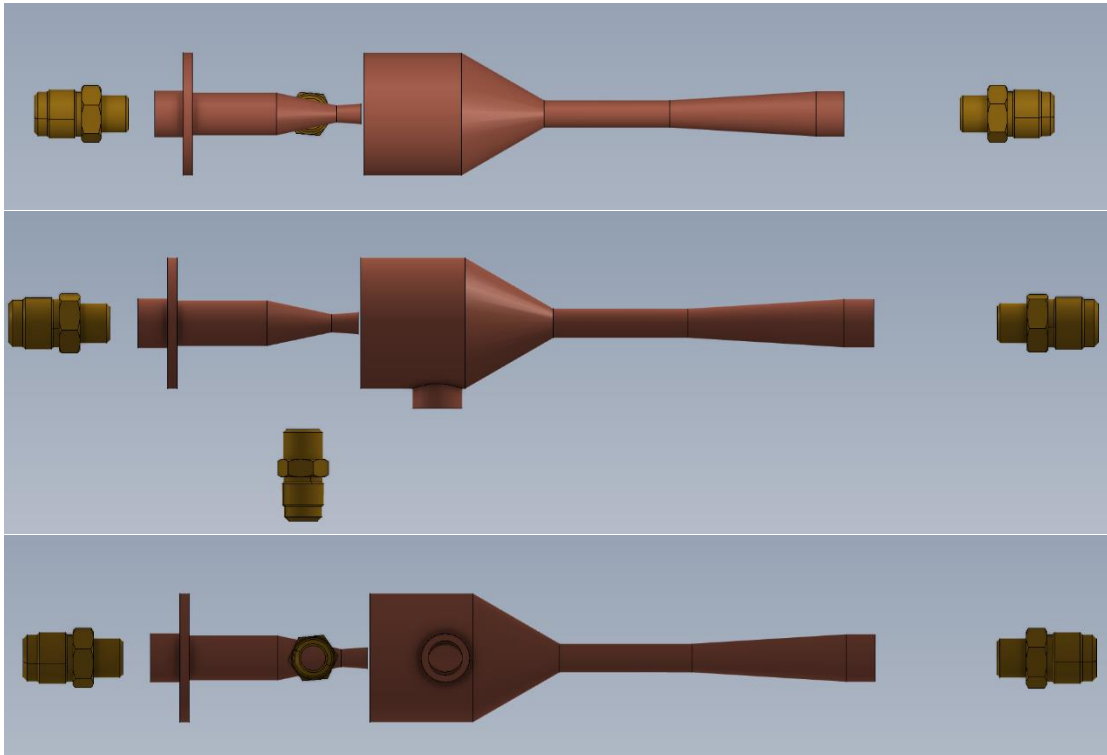
Διαστάσεις συγκλίνοντος-αποκλίνοντος τμήματος (converging-diverging nozzle – CDN)	
d_g	19.0
d_e	15.8
d_t	5.1
d_1	7
θ_{CDNi}	12
θ_{CDNo}	4
L_{CDNi}	32.8
L_{CDNo}	13.5
θ_{sc}	7.5
NXP	5.16
Διαστάσεις λαιμού (constant area section – CAS)	
d_{CAS}	8.6
d_d	18.2
θ_d	3.5
L_{CAS}	68.8
L_d	78.8

Η κατασκευή του ακροφυσίου πραγματοποιήθηκε υπό τη συνεργασία του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων με τον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Κατά τη διάρκεια του τελικού σχεδιασμού κρίθηκαν απαραίτητες διάφορες τροποποιήσεις σε σχέση με την αρχική διαστασιολόγηση, προκειμένου το τελικό σχέδιο (Σχήμα 15) να ήταν λειτουργικό.



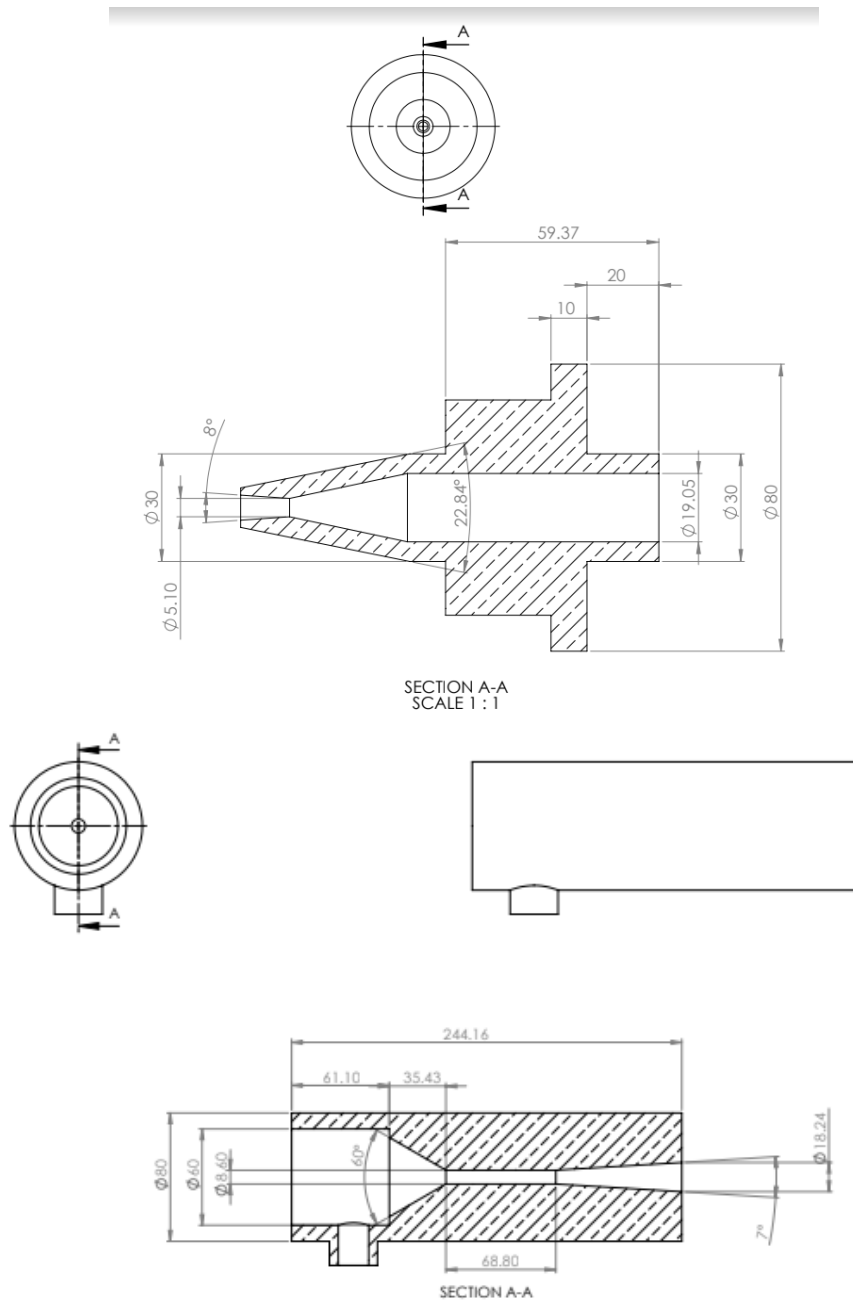
Σχήμα 15: Τρισδιάστατη σχεδίαση του ακροφυσίου

Για θέματα άνεσης και ευκολίας στη χρήση, το ακροφύσιο κατασκευάστηκε ως αποτέλεσμα της συναρμολόγησης των επί μέρους κομματιών του (Σχήμα 16).



Σχήμα 16: Αποσυναρμολογημένο ακροφύσιο

Τα τελικά διαστασιολογημένα σχέδια των κομματιών του ακροφυσίου διαφαίνονται στο Σχήμα 17.



Σχήμα 17: Διαστασιολογημένο σχέδιο κομματιών ακροφυσίου

Το τελικό ακροφύσιο που κατασκευάστηκε παρατίθεται στην Εικόνα 8:



Εικόνα 8: Ακροφύσιο SunClim

2.3.1.7 Τροφοδοτικό δοχείο

Το τροφοδοτικό δοχείο εντοπίζεται μετά το συμπυκνωτή του συστήματος. Ο ρόλος του είναι διπλός. Αρχικά, είναι ένας χώρος στον οποίο το οργανικό ρευστό είναι σε θέση να αποθηκευτεί. Κατά δεύτερον, προσφέρει ασφάλεια στο ζήτημα της τροφοδοσίας, στη συνέχεια του κυκλώματος, με κορεσμένο υγρό. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος (Πίνακας 8), επιλέχθηκε η κατάλληλη κάθετη φιάλη (Πίνακας 9).

Πίνακας 8: Προδιαγραφές τροφοδοτικού δοχείου

Όνομασία ρευστού	Οργανικό ρευστό R134A
Πίεση (bar)	9
Θερμοκρασία (°C)	35
Χωρητικότητα (L)	30
Παροχή μάζας (kg/s)	0.1443
Παροχή όγκου (L/s)	0.125839
Προσανατολισμός	Κατακόρυφος

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά τροφοδοτικού δοχείου SunClim

Χωρητικότητα (L)	30
Μέγιστη πίεση λειτουργίας (bar)	33
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	120
Σύνδεση εισόδου	28 mm 1-1/8"
Σύνδεση εξόδου	22 mm 7/8"
Ασφαλιστικό πίεσης (bar)	28

2.3.1.8 Φίλτρο ψυκτικού κυκλώματος

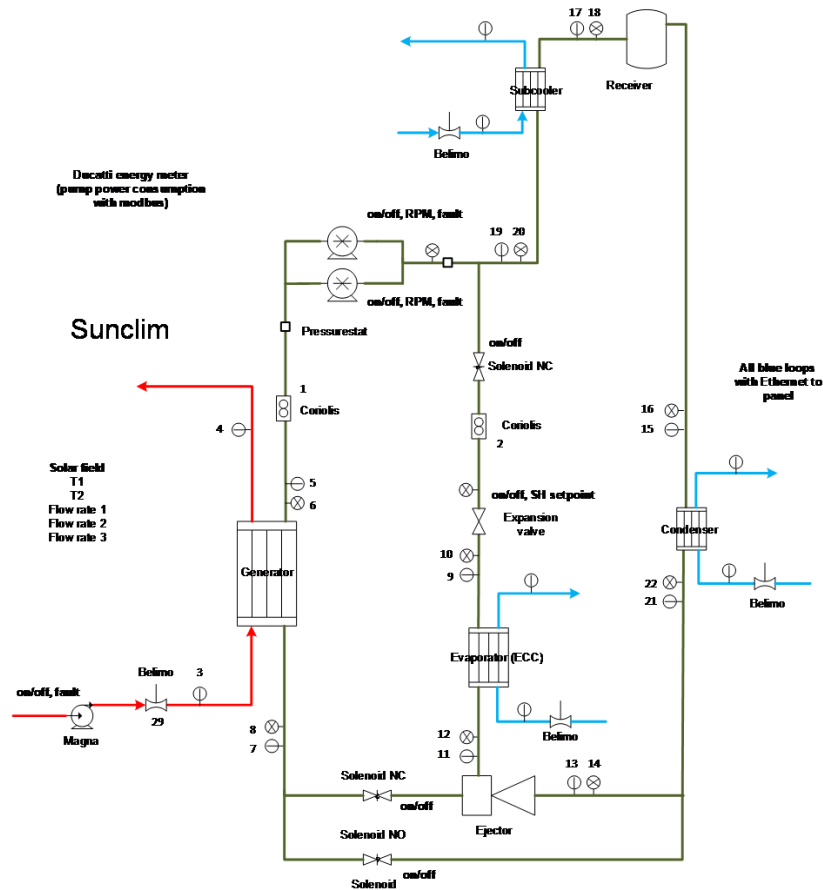
Για φίλτρο του οργανικού ρευστού του κυκλώματος επιλέχθηκε το μοντέλο ADK-415 (Εικόνα 9) της σειράς ADK της εταιρείας Emerson Climate Technologies. Το φίλτρο τοποθετήθηκε ανάμεσα στο τροφοδοτικό δοχείο και τον εναλλάκτη υπόψυξης. Η χρήση του φίλτρου είναι σημαντική, καθώς είναι υπεύθυνο για την συγκράτηση τυχών σωματιδίων που εμπεριέχονται στο οργανικό ρευστό και για τη συγκράτηση της πιθανής υγρασίας που εγκλωβίστηκε στο σύστημα κατά την συνδεσμολογία του. Στη πρώτη περίπτωση, ο κίνδυνος εντοπίζεται στις αντλίες, αφού τα στερεά σωματίδια είναι σε θέση να τις φρακάρουν, με άμεση συνέπεια την αδυναμία λειτουργίας του συστήματος. Στη δεύτερη περίπτωση, η ύπαρξη υγρασίας εντός του κυκλώματος είναι σε θέση να καταστήσει το οργανικό ρευστό διαβρωτικό, με αποτέλεσμα την πρόκληση φθορών των εξαρτημάτων της εγκατάστασης.



Εικόνα 9: Φίλτρο οργανικού ρευστού ADK-415

2.3.1.9 Βαλβίδες και σωληνώσεις

Για την ομαλή λειτουργία της εγκατάστασης καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη συγκεκριμένων κατηγοριών βαλβίδων, με συγκεκριμένες αρμοδιότητες, σε ειδικά σημεία των σωληνώσεων (Σχήμα 18).



Σχήμα 18: Μονογραμμικό διάγραμμα SunClim

Η πρώτη κατηγορία βαλβίδων είναι οι σφαιρικές (ball valves). Αυτό το είδος βαλβίδων επιτρέπει την αποσυναρμολόγηση των εξαρτημάτων είτε για λόγους συντήρησης είτε για λόγους αντικατάστασης. Η βάνα αντεπιστροφής καθιστά εφικτή μόνο τη μία κατεύθυνση ροής, δηλαδή εμποδίζει το οργανικό ρευστό να αλλάξει φορά κίνησης. Ακόμη, στο σύστημα εντοπίζονται οι σωληνοειδείς βαλβίδες (Normally Open, Normally Closed). Τοποθετούνται στα τμήματα διασταυρώσεων των σωληνώσεων, καθώς υπάρχει η δυνατότητα χειρισμού τους για άνοιγμα και κλείσιμο μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τελευταία αλλά εξίσου σημαντική είναι η εκτονωτική βαλβίδα, που εντοπίζεται πριν τον ατμοποιητή ψύξης. Πραγματοποιείται αυτοματοποιημένη ρύθμιση του κλεισίματος της βάνας, ώστε να ανοίγει

όταν επικρατούν συνθήκες υπέρθερμου ατμού 2 K, μετά τον ατμοποιητή ψύξης. Με αυτόν τον τρόπο, ελέγχεται ο στραγγαλισμός και η πτώση θερμοκρασίας του οργανικού ρευστού. Στην εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκε η εκτονωτική βαλβίδα ETS6 με τον controller EKE 1A.

Η χρήση διαφόρων ειδών σωληνώσεων σε ένα σύστημα κυκλοφορίας οργανικού ρευστού είναι σημαντική για την σύνδεση των επιμέρους εξαρτημάτων του κύκλου και τη διασφάλιση της ομαλής ροής του ρευστού. Τα είδη σωληνώσεων που επικρατούν είναι τα εξής:

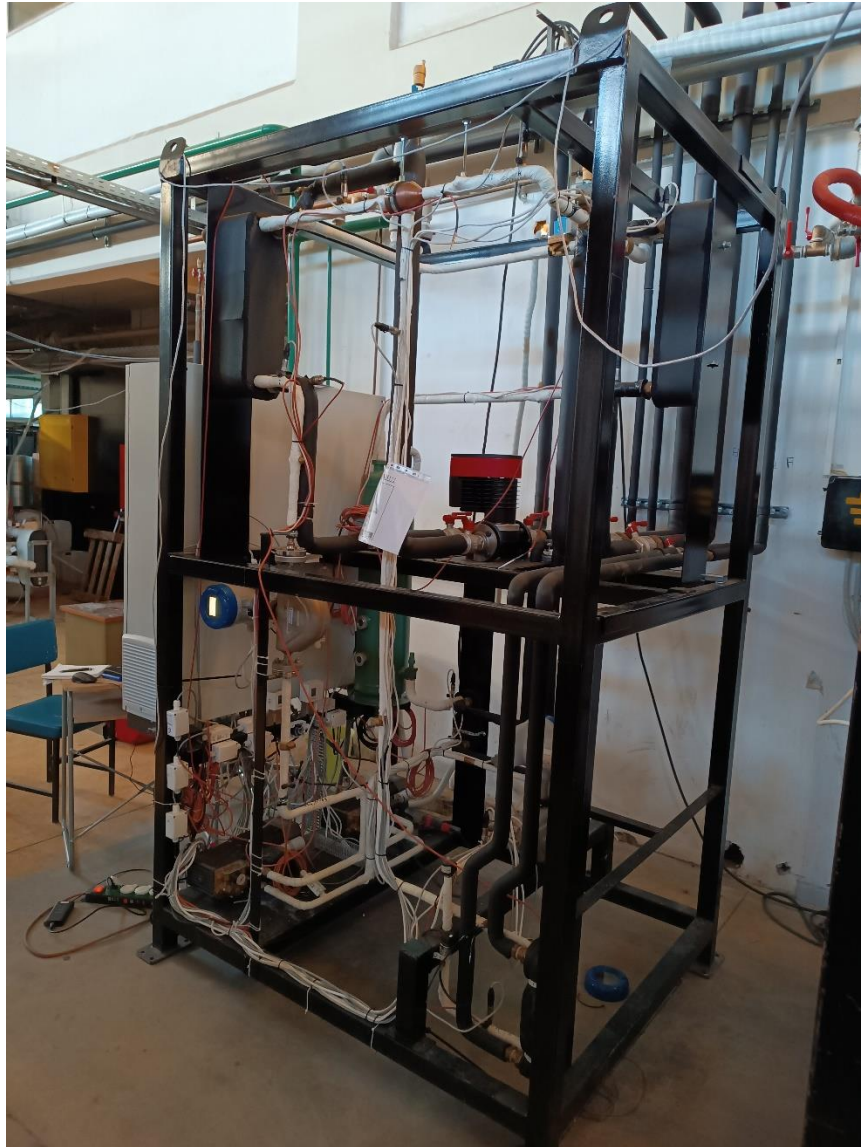
- Ευθύγραμμες σωληνώσεις: Αυτοί οι σωλήνες είναι ευθείες και χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση δύο σημείων χωρίς καμπύλες ή στροφές. Είναι ιδανικοί για τις περιπτώσεις όπου η απόσταση μεταξύ των σημείων είναι ευθεία και δεν απαιτείται αλλαγή κατεύθυνσης.
- Μονωμένες σωληνώσεις: Αυτοί οι σωλήνες περιβάλλονται από μόνωση για τη μείωση των απωλειών θερμότητας. Χρησιμοποιούνται συνήθως όταν η θερμοκρασία του ρευστού είναι χαμηλή και πρέπει να διατηρηθεί σε σταθερό επίπεδο κατά τη διάρκεια της μεταφοράς του.
- Καμπύλες χαλκού: Αναφέρονται σε σωλήνες κατασκευασμένους από χαλκό και που έχουν μορφή καμπύλης. Αυτοί οι σωλήνες χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται να αλλάξει η κατεύθυνση της ροής του οργανικού ρευστού σε ένα σύστημα.
- Συστολές χαλκού: Αφορούν σωλήνες αλλαγής διατομής. Τοποθετούνται σε σημεία όπου για διάφορους λόγους απαιτείται αλλαγή της διατομής της σωλήνωσης.

Η διαστασιολόγηση των σωληνώσεων έγινε με βάση την παροχή του ρευστού και την επιθυμητή ταχύτητα ροής σε κάθε σημείο της εγκατάστασης. Οι απαιτούμενες ταχύτητες ροής επηρεάζουν το μέγεθος της διαμέτρου των σωληνώσεων. Για να εξασφαλιστεί ότι οι αναπτυσσόμενες ταχύτητες βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ευρών, χρησιμοποιούνται πρότυπες και κατευθυντήριες γραμμές, που προσδιορίζουν τις μέγιστες ταχύτητες για κάθε τύπο σωλήνα. Σε κάθε σημείο της εγκατάστασης, επιλέγεται ο τυποποιημένος σωλήνας που πληροί τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής και προσεγγίζει τις επιθυμητές ταχύτητες ροής.

2.3.1.10 Σκελετός της εγκατάστασης

Για τον σχεδιασμό του σκελετού της εγκατάστασης σημαντικά κριτήρια συνιστούν ο απαιτούμενος χώρος της εγκατάστασης, οι λειτουργικές ανάγκες της καθώς και ο

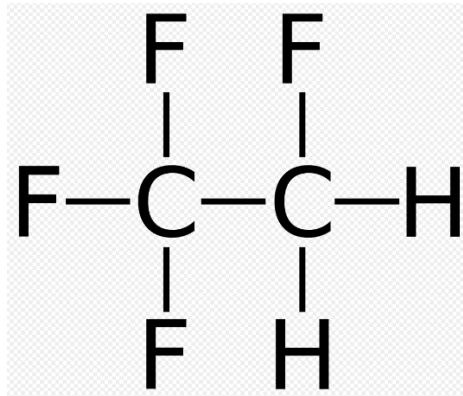
διαθέσιμος χώρος στη θέση όπου θα τοποθετηθεί. Με βάση τα παραπάνω, κατασκευάστηκε σκελετός (Εικόνα 10), που περιέλαβε μεταλλικό πλαίσιο διαστάσεων 1613x1320x1700 mm.



Εικόνα 10: Σκελετός εγκατάστασης SunClim

2.3.1.11 Οργανικό ρευστό

Ως οργανικό ρευστό για την εγκατάσταση επιλέχτηκε το ψυκτικό R134a (Σχήμα 19). Οι κύριοι λόγοι που το έκριναν προτιμότερο σε σχέση με άλλα ήταν η καλή απόδοσή του στις συνθήκες των δοκιμών, το κόστος του αλλά και η ασφάλεια που προσφέρει σε περίπτωση ατυχήματος. Για την εγκατάσταση χρειάστηκαν 30 kg αυτού του οργανικού ρευστού.



Σχήμα 19: Μοριακή δομή R134a [16]

Οι βασικές ιδιότητες του οργανικού ρευστού παρατίθενται στο ακόλουθο Σχήμα 20:

Limits	
Maximum temperature [K]	455.0
Maximum pressure [Pa]	70000000.0
Triple point	
Triple point temperature [K]	169.85
Triple point pressure [Pa]	389.5637885619895
Critical point	
Critical point temperature [K]	374.21
Critical point density [kg/m ³]	511.89995169599996
Critical point density [mol/m ³]	5017.053
Critical point pressure [Pa]	4059280.0
Reducing point	
Reducing point temperature [K]	374.18
Reducing point density [mol/m ³]	4978.830171000001

Σχήμα 20: Ιδιότητες οργανικού ρευστού R134a [16]

2.3.2 Στοιχεία ηλεκτρολογικού εξοπλισμού

Ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός είναι πολύ χρήσιμος για την ορθή και ομαλή λειτουργία των μηχανολογικών εξαρτημάτων. Δεν έχει άμεση σχέση με τον κύκλο ψύξης, αλλά βοηθάει στον συντονισμό και στον έλεγχο των μηχανολογικών κομματιών του. Με αυτόν τον τρόπο, καθιστά εύχρηστη και λειτουργική την εγκατάσταση.

2.3.2.1 Inverters

Οι inverters είναι υπεύθυνοι για τη ρύθμιση των στροφών των ηλεκτροκινητήρων των αντλιών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη δυνατότητα καθορισμού της τιμής της παροχής του εργαζόμενου μέσου στο κύκλωμα. Για την επιλογή των κατάλληλων inverters, αρχικά υπολογίστηκαν μέσα από τη θεωρητική ανάλυση συγκεκριμένες προδιαγραφές σχεδίασης (Πίνακας 10). Επιπλέον, αφού το σύστημα περιείχε δύο ολοίδιες αντλίες με τους ηλεκτροκινητήρες τους και οι inverters που επιλέχθηκαν ήταν ίδιοι.

Πίνακας 10: Προδιαγραφές των inverters

Ονομαστική ισχύς των κινητήρων στους οποίους θα συνδεθούν οι inverters [W]	700
Ονομαστικές στροφές [RPM]	1450
Τάση [V]	230

Με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές, επιλέχθηκε για την εγκατάσταση το μονοφασικό μοντέλο Inverter Sinamics V20 της εταιρείας Siemens (Πίνακας 11). Οι συγκεκριμένοι inverters διακρίνονται για την καλή τους απόδοση σε φορτία αντλιών, για τον μικρό χρόνο απόκρισής τους και για την ικανότητα του ελέγχου λειτουργίας τους τόσο τοπικά, όσο και από ένα κεντρικό σύστημα.

Πίνακας 11: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Inverter Sinamics V20

Τάση εισόδου 1AC-phase (-10%/+10%) [W]	200 – 240
Ονομαστική ισχύς εξόδου [kW]	2.2
Τάση εισόδου 3AC-phase (-15%/+10%) [W]	380 – 480

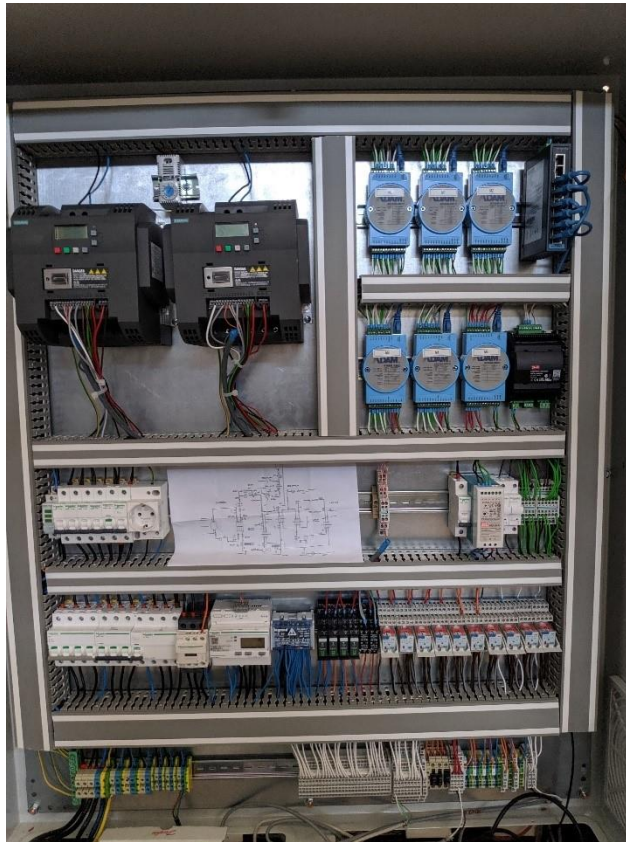
Υπερφόρτιση στο 150% του ονομαστικού ρεύματος εξόδου για 60 sec.

Ψηφιακές εισοδοι	4
Ψηφιακές έξοδοι	2
Αναλογικές εισοδοι	2
Αναλογική έξοδος	1
Δυνατότητα επικοινωνίας με τα πρωτόκολλα USS και Modbus RTU μέσω RS48	

Οι inverters είχαν ενσωματωμένο ένα σύστημα ελέγχου, με σκοπό την ασφαλή και ορθή λειτουργία τους. Μέσα από ένα αρχείο ρυθμίσεων καθορίζονταν αρχικά οι ονομαστικές τιμές λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων με τους οποίους θα συνδέονταν. Στη συνέχεια, υπήρχε απαίτηση για την ενημέρωση του συστήματος για τον τρόπο επαφής και σύνδεσης του inverter με τον ηλεκτροκινητήρα. Επίσης, εφικτή ήταν η επιλογή για αυτόματη ή χειροκίνητη λειτουργία. Με βάση τον καθορισμό της εφαρμογής στην οποία θα χρησιμοποιούνταν οι inverters, ήταν σε θέση να προσφερθεί η κατάλληλη μέθοδος ελέγχου της λειτουργίας τους. Για τους παραπάνω λόγους, το μοντέλο Inverter Sinamics V20 της εταιρείας Siemens κρίθηκε ως το προτιμότερο για τον σχεδιασμό της πειραματικής εγκατάστασης.

2.3.2.2 Ηλεκτρολογικός πίνακας

Ο ηλεκτρολογικός πίνακας (Εικόνα 11) περιείχε θύρες εισόδου και εξόδου, οι οποίες ήταν αναλογικές αλλά και ψηφιακές. Η μεταφορά σημάτων επέτρεψε την αναμετάδοση, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, των συνθηκών της εγκατάστασης στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς και την καταγραφή και αποθήκευση των αποτελεσμάτων. Επίσης, μέσα από αυτόν, ο χειριστής της εγκατάστασης έστελνε τις εντολές για το άνοιγμα ή το κλείσιμο των βαλβίδων και πραγματοποιούταν η ρύθμιση των στροφών των ηλεκτροκινητήρων.



Εικόνα 11: Ηλεκτρολογικός πίνακας

Οι παραπάνω ιδιότητες που προσέφερε ο ηλεκτρολογικός πίνακας είχαν πολύ σημαντικό αντίκτυπο για την πειραματική διαδικασία. Κατ' αρχάς, η γνώση των συνθηκών σε κάθε σημείο της πειραματικής εγκατάστασης προσέφερε τόσο ασφάλεια όσο και εμπιστοσύνη στην ομαλή εξέλιξη των πειραμάτων. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα καταγραφής και αποθήκευσης των αποτελεσμάτων επέτρεψε την επεξεργασία τους. Με αυτό τον τρόπο, έγινε εφικτή η εξαγωγή των συμπερασμάτων.

Για τη συνδεσμολογία του ηλεκτρολογικού πίνακα με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή χρησιμοποιήθηκαν ένας διακόπτης Ethernet και 3 θύρες καλωδιακής σύνδεσης τερματικού. Συγκεκριμένα, αναφέρονται οι απαιτήσεις των συνδέσεων της εισόδου και της εξόδου των θυρών του ηλεκτρολογικού πίνακα:

- 16 κανάλια αναλογικής εισόδου διαφορικής σύνδεσης για σήματα τάσεως ή εντάσεως, unipolar και bipolar, στο εύρος $\pm 10V$, $\pm 20mA$
- 4 κανάλια αναλογικής εξόδου σήματος τάσεως ή εντάσεως, στο εύρος 0-10 V(DC), 0-20 mA, 4-20 mA
- 12 κανάλια ψηφιακής εισόδου

- 6 κανάλια ψηφιακής εξόδου
- σφάλμα των συσκευών μικρότερο του $\pm 0.5\%$
- όλες οι συσκευές θα έπρεπε να διαθέτουν Modbus TCP module

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα παρεμφερή εξαρτήματα:

- 8 Port 10/100Mbps Unmanaged Ethernet switch για τη διασύνδεση των συσκευών
- 3 τεμάχια τερματικής σύνδεσης DB9 to RS-232/422/485 για τη διασύνδεση άλλων συσκευών

Οι συσκευές εισόδου-εξόδου επιλέχθηκαν μέσα από τον κατάλογο προϊόντων της εταιρείας Advantech A.E. (Πίνακας 12).

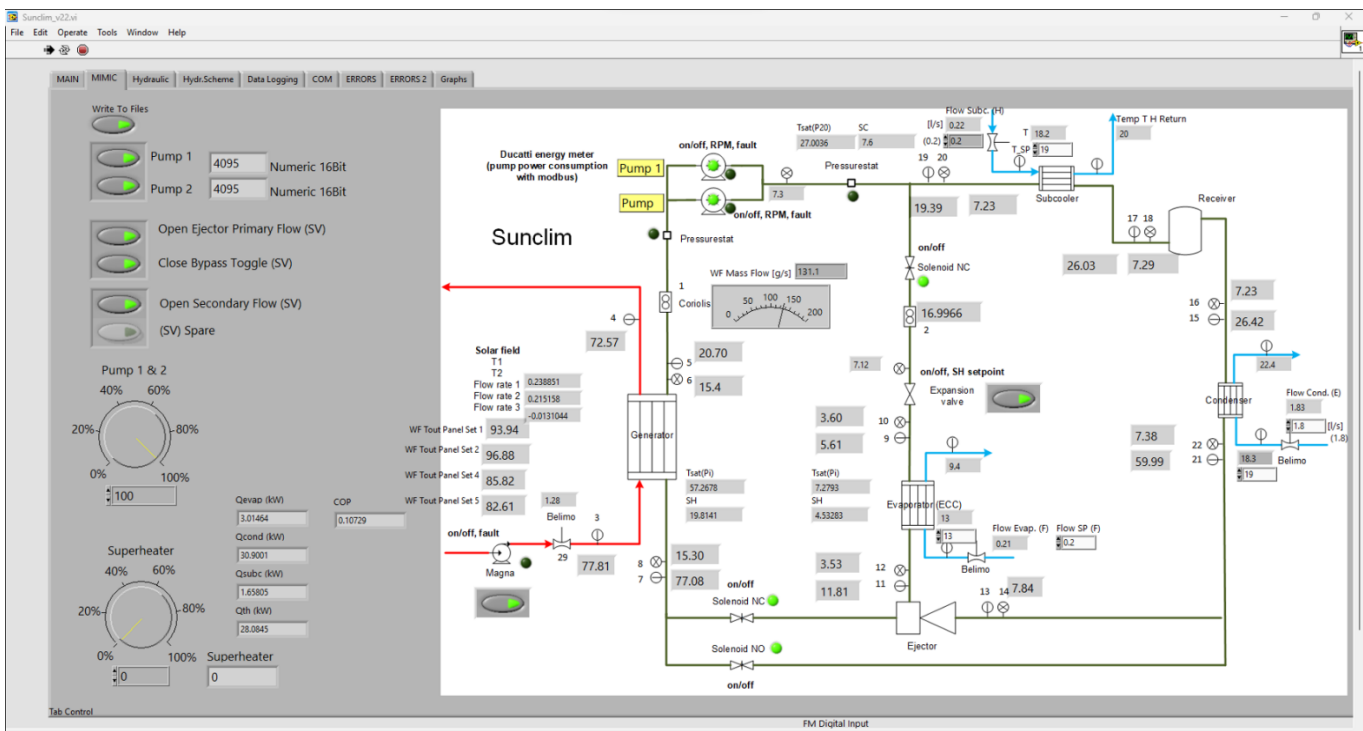
Πίνακας 12: Συσκευές εισόδου-εξόδου της εταιρείας Advantech A.E.

<u>α/α</u>	<u>Μοντέλο</u>	Περιγραφή	Τεμάχια
1	ADAM-6017	8-Ch AI/DO Module	2
2	ADAM-6024	12-Ch Isolated Universal I/O Modbus TCP Module	2
3	ADAM-6051	16-Ch Isolated DI/O w/Counter Module. 12xDI2xDO, 2xCounter	1
4	EKI-2528	8FE Unmanaged Ethernet Switch	1
5	OPT1-DB9-Cab	1 Port DB9 to RS-232/422/485 Terminal to Cable Kit	3

2.3.2.3 Λογισμικό παρακολούθησης και ελέγχου

Για την αναπαράσταση των πειραματικών δοκιμών, αλλά και τη προσομοίωσή τους, το σύστημα ήταν κρίσιμο να μοντελοποιηθεί σε ένα λογισμικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η μοντελοποίηση επιτρέπει τη δημιουργία ενός οικείου και φιλικού περιβάλλοντος προς το χρήστη, διευκολύνει τη πειραματική διαδικασία και επιτρέπει την αποθήκευση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Με βάση τα παραπάνω, επιλέχθηκε το λογισμικό LabVIEW (Σχήμα 21) της εταιρείας NI (National Instruments Italy Srl) και συγκεκριμένα των ακόλουθων υπηρεσιών και δυνατοτήτων:

- LabVIEW Professional Development System, Windows, All Languages, With Media
- LabVIEW DSC Module Windows. NI Software Service provides free automatic upgrades for your software & access to NI Application Engineers via phone/email for technical support
- NI OPC Servers Unlimited Simultaneous Driver Usage
- LabVIEW Datalogging and Supervisory Ctrl Module, Run-Time System



Σχήμα 21: Περιβάλλον LabVIEW

2.3.2.4 Μετρητικά όργανα και αισθητήρια

Τα μετρητικά όργανα και αισθητήρια της εγκατάστασης μπορούν να χωριστούν σε 3 βασικές κατηγορίες: τα μετρητικά θερμοκρασίας, τα μετρητικά πίεσης και τα παροχόμετρα μάζας.

Τα μετρητικά θερμοκρασίας είναι ουσιαστικά θερμοστοιχεία τα οποία τοποθετούνται στις σωληνώσεις της πειραματικής εγκατάστασης. Η χρήση τους αφορούσε την μελέτη και καταγραφή των συνθηκών κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Συγκεκριμένα,

χρησιμοποιήθηκαν θερμοστοιχεία σε 19 διαφορετικά σημεία της εγκατάστασης και 1 αισθητήριο θερμοκρασίας για την ηλεκτρονική εκτονωτική βαλβίδα.

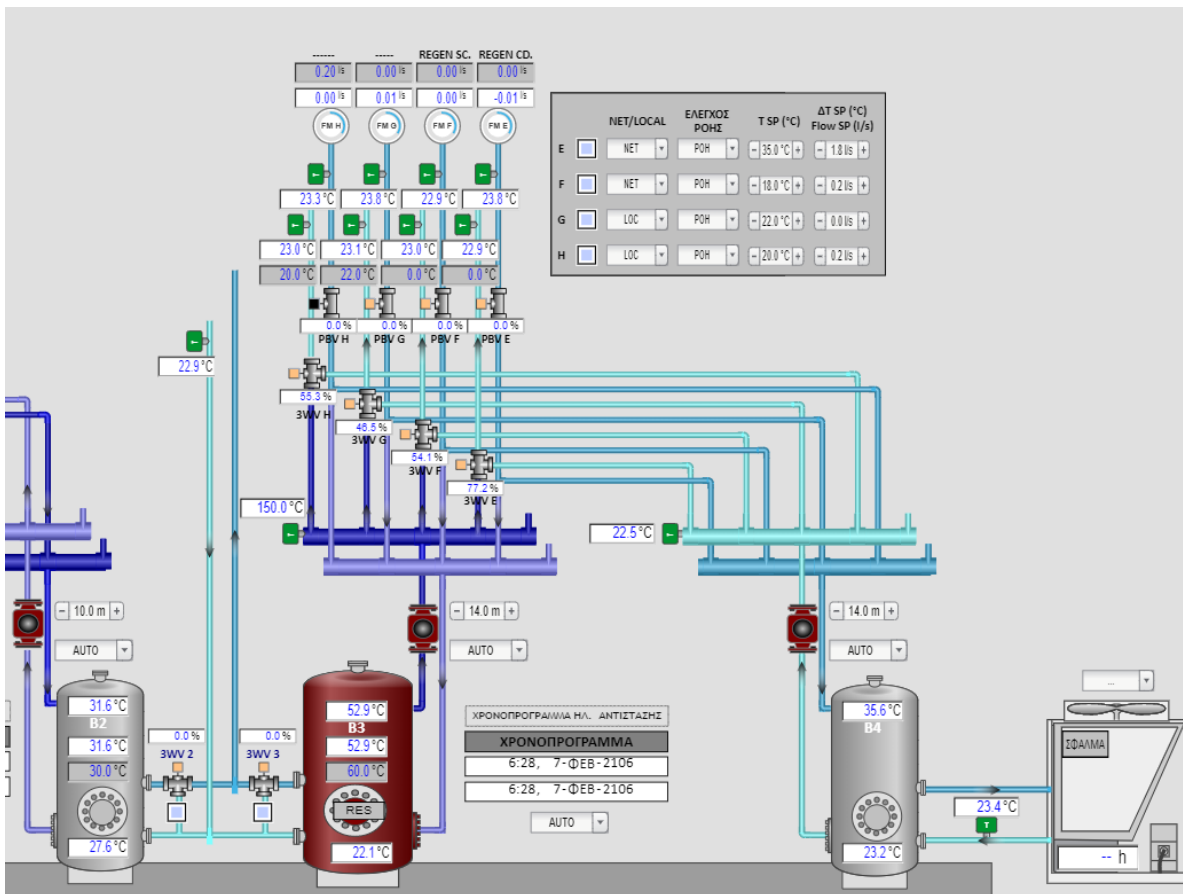
Τα μετρητικά πίεσης ήταν σημαντικά τόσο για την καταγραφή των συνθηκών όσο και για την προστασία της εγκατάστασης από τυχόν υπερβολική αύξηση της πίεσης στις αντλίες. Οι ανάγκες της εγκατάστασης οδήγησαν στην τοποθέτηση 12 μετρητικών πίεσης PT5-30M EMERSON με σπείρωμα 1/4" φλερ, καθώς και στη χρήση 12 καλωδίων PT4-M60 EMERSON, για διάφορα σημεία της εγκατάστασης. Τα μετρητικά πίεσης μπορούσαν να υποστηρίξουν τη λειτουργία τους σε συνθήκες έως 30 bar, γεγονός που τις κατέστησε ικανοποιητικές για το συγκεκριμένο κύκλωμα.

Για την ομαλή λειτουργία της πειραματικής εγκατάστασης κρίθηκε απαραίτητη η χρήση 2 παροχόμετρων Coriolis. Το ένα τοποθετήθηκε ακριβώς μετά τις αντλίες, ενώ το άλλο ακριβώς πριν τον ατμοποιητή ψύξης. Η καταγραφή των παροχών μάζας σε αυτά τα δύο σημεία είναι πολύ σημαντική για την ενεργειακή ανάλυση των πειραμάτων. Με βάση αυτές τις τιμές υπολογίζονται κρίσιμα μεγέθη όπως η ισχύς των αντλιών, η ψυκτική ισχύς της εγκατάστασης και ο λόγος αναρρόφησης του ακροφυσίου.

Για το λόγο αυτό, με βάση τις ανάγκες της εγκατάστασης χρησιμοποιήθηκαν 2 παροχόμετρα Coriolis. Το ένα είναι μοντέλο Krohne Mass flowmeter Optimass 6000 – S10 και το άλλο Krohne Mass flowmeter Optimass 6000 – S08.

2.4 Υδραυλικό κύκλωμα εργαστηρίου

Στο Εργαστήριο ήταν εγκατεστημένο ένα υδραυλικό κύκλωμα (Σχήμα 22). Το κύκλωμα περιείχε δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας του νερού τροφοδοσίας, στις οποίες με τη χρήση μίας αντίστασης και ενός ψύκτη, γινόταν εφικτή η αύξηση ή μείωση της θερμοκρασίας του νερού, αντίστοιχα. Με ειδικές μονωμένες σωληνώσεις το νερό ήταν σε θέση να κατευθυνθεί προς όλες τις πειραματικές εγκαταστάσεις του εργαστηρίου (όπου ήταν απαραίτητο) και να επιστραφεί και πάλι στη δεξαμενή. Οι σωλήνες είχαν κατονομασθεί με σκοπό την ορθή διαχείριση του συστήματος και την αυτοματοποίησή του. Ο έλεγχος της ροής πραγματοποιούνταν με δύο τρόπους. Ο πρώτος ήταν ο ορισμός της επιθυμητής θερμοκρασίας του επιλεγμένου ρεύματος. Με αυτόν τον τρόπο, το κύκλωμα ανοιγόκλεινε την τρίοδη βάννα μεταξύ της ζεστής τροφοδοσίας και του ψύκτη, με σκοπό την επίτευξη της κατάλληλης θερμοκρασίας. Ο δεύτερος τρόπος ήταν ο ορισμός του ποσοστού ανοίγματος της τρίοδης βάννας. Αυτό είχε το αποτέλεσμα η τροφοδοσία να ήταν σταθερή και ανεξάρτητη από τις θερμοκρασιακές μεταβολές της ζεστής τροφοδοσίας ή του ψύκτη.



Σχήμα 22: Διάταξη υδραυλικού κυκλώματος

Για το σύστημα SunClim η χρησιμότητα του υδραυλικού κυκλώματος είχε δύο πτυχές. Η πρώτη αφορούσε την εξομίωση της ψυκτικής ισχύος του συστήματος με την τροφοδοσία νερού στον ατμοποιητή ψύξης. Δεύτερον, με την τροφοδοσία νερού στον συμπυκνωτή και στον εναλλάκτη υπόψυξης πραγματοποιούνταν η εξομίωση της απόρριψής θερμότητας του κύκλου στο περιβάλλον. Στη πρώτη περίπτωση, τη ψύξη την καθόριζε η πτώση της θερμοκρασίας του νερού του υδραυλικού κυκλώματος, ενώ στη δεύτερη την απόρριψη θερμότητας στο περιβάλλον τη καθόριζε η αύξηση της θερμοκρασίας του.

3. Πειραματικά αξιολόγηση

3.1 Πειραματικά αποτελέσματα ηλιακού πεδίου εγκατάστασης

Ένα από τα βασικά μελήματα της μελέτης της εγκατάστασης SunClim ήταν η ανάλυση και η αξιολόγηση τόσο του συνολικού ηλιακού πεδίου, όσο και συγκεκριμένα των ηλιακών συλλεκτών της εταιρείας COSMOSOLAR. Από τη θεωρία [17] είναι γνωστή η σχέση που προσεγγίζει τον βαθμό απόδοσης του ηλιακού πεδίου. Αυτός είναι ίσος με το πηλίκο της προσδιδόμενης θερμότητας στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας, προς την ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους ηλιακούς συλλέκτες.

$$\eta_{sf} = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_{sol}} = \frac{\dot{m}_{hff} \cdot c_{p,hff} \cdot (T_{hff,ret} - T_{hff,sup})}{I'' \cdot A_{sf}} \quad (4)$$

Όπου:

\dot{Q}_u : Προσδιδόμενη θερμότητα στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας

\dot{Q}_{sol} : Ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια του πεδίου

\dot{m}_{hff} : Παροχή μάζας ρευστού μεταφοράς θερμότητας

$c_{p,hff}$: Θερμοχωρητικότητα ρευστού μεταφοράς θερμότητας

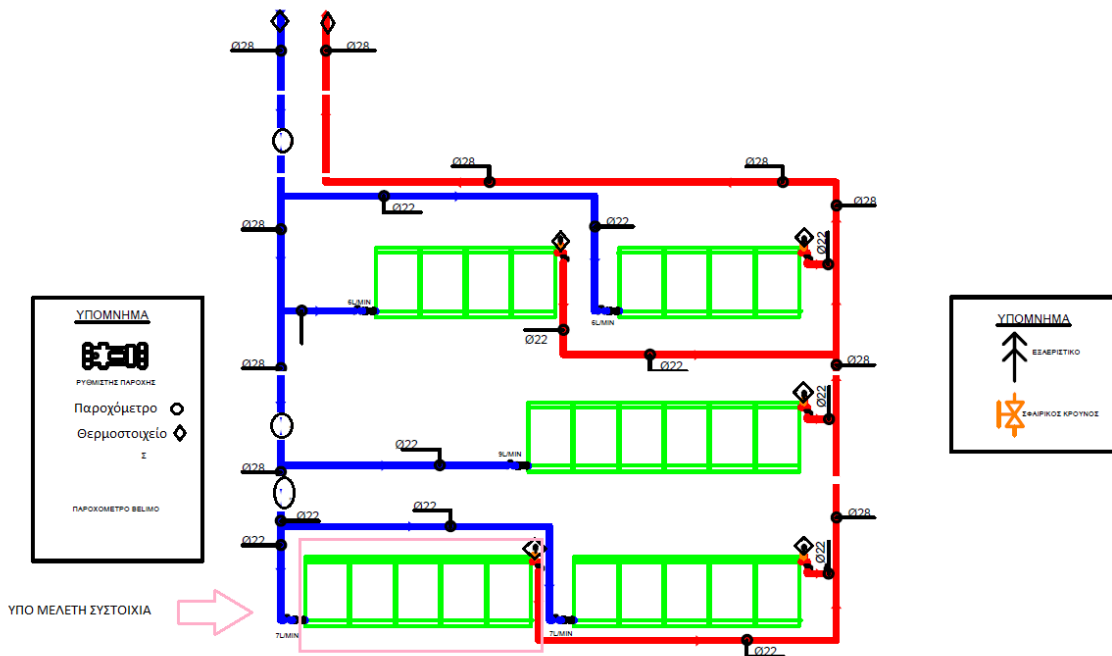
$T_{hff,sup}$: Θερμοκρασία τροφοδοσίας ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δοχείο στο ηλιακό πεδίο

$T_{hff,ret}$: Θερμοκρασία επιστροφής ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το ηλιακό πεδίο στο δοχείο

I'' : Ηλιακή ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο

A_{sf} : Συλλεκτική επιφάνεια ηλιακού πεδίου

Λόγω της διάταξης του ηλιακού πεδίου, δεν ήταν δυνατή η καταγραφή της θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου για ένα μεμονωμένο συλλέκτη. Για αυτό το λόγο, προκειμένου να γίνει μία όσο το δυνατόν ακριβέστερη αποτύπωση του βαθμού απόδοσης του συλλέκτη, έγινε αξιολόγηση μίας συγκεκριμένης συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε για τη συστοιχία 1, η οποία αποτελούταν από 5 συλλέκτες τοποθετημένους σε σειρά (Σχήμα 23).



Σχήμα 23: Υπό μελέτη συστοιχία

Ο τρόπος υπολογισμού ήταν όμοιος με αυτόν για τον υπολογισμό του συνολικού βαθμού απόδοσης του ηλιακού πεδίου. Οι βασικές διαφορές ήταν στην παροχή ρευστού, όπου χρησιμοποιήθηκε η τιμή της παροχής του συγκεκριμένου κλάδου, στη θερμοκρασία εξόδου του ρευστού όπου χρησιμοποιήθηκε η θερμοκρασία εξόδου από τη συγκεκριμένη συστοιχία των συλλεκτών καθώς και στην συλλεκτική επιφάνεια ηλιακής ακτινοβολίας, όπου τέθηκε ίση με την επιφάνεια των 5 ηλιακών συλλεκτών. Συγκεκριμένα, η τροποποιημένη σχέση υπολογισμού του βαθμού απόδοσης έχει ως εξής:

$$\eta_s = \frac{\dot{Q}_{u,s}}{\dot{Q}_{sol,s}} = \frac{\dot{m}_{hfs} \cdot c_{p,s} \cdot (T_{hfs,ret,s} - T_{hfs,sup})}{I \cdot A_s} \quad (5)$$

Όπου:

$\dot{Q}_{u,s}$: Προσδιδόμενη θερμότητα στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας

$\dot{Q}_{sol,s}$: Ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της συστοιχίας των συλλεκτών

$\dot{m}_{hf,s}$: Παροχή μάζας ρευστού μεταφοράς θερμότητας στη συστοιχία συλλεκτών

$c_{p,s}$: Θερμοχωρητικότητα ρευστού μεταφοράς θερμότητας

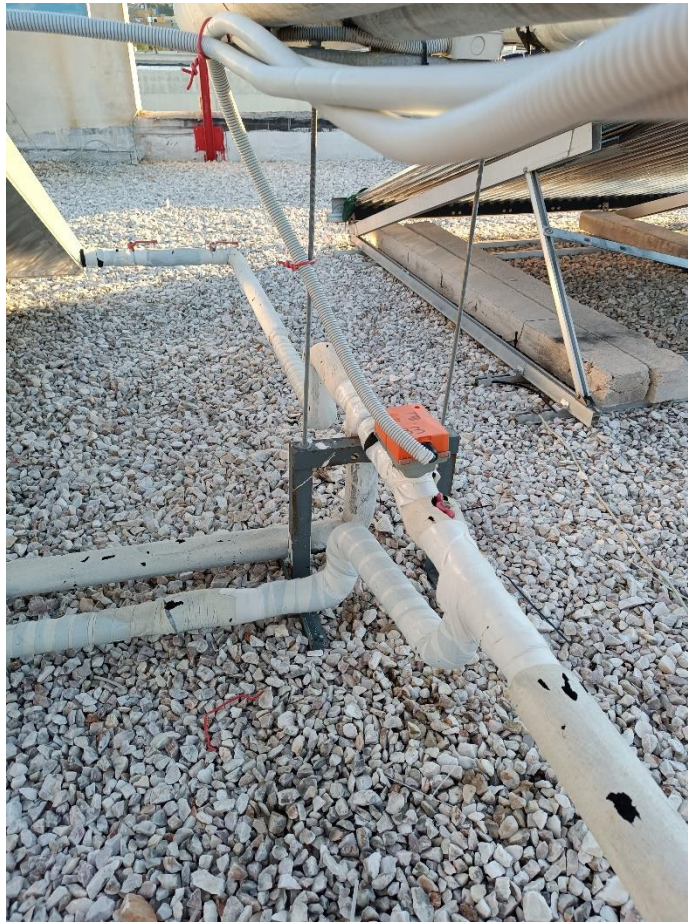
$T_{hf,sup}$: Θερμοκρασία τροφοδοσίας ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δοχείο στο ηλιακό πεδίο

$T_{hf,ret,s}$: Θερμοκρασία επιστροφής ρευστού μεταφοράς θερμότητας από τη συστοιχία συλλεκτών

I'' : Ηλιακή ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο

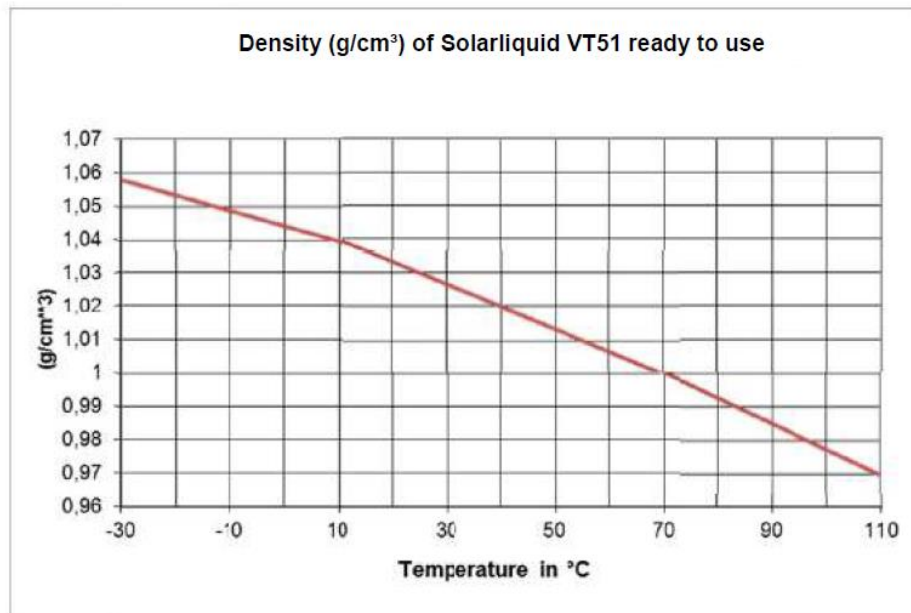
A_s : Συλλεκτική επιφάνεια πάνελ

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τη πειραματική εγκατάσταση με τη βοήθεια κατάλληλων αισθητηρίων. Αρχικά, στο εσωτερικό του δοχείου αποθήκευσης θερμότητας είχαν τοποθετηθεί θερμοστοιχεία με σκοπό την καταμέτρηση της θερμοκρασίας του προσαγόμενου ρευστού μεταφοράς θερμότητας προς το ηλιακό πεδίο και του επιστρέφοντος ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το ηλιακό πεδίο. Ακόμη, στην έξοδο κάθε συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών ήταν ενσωματωμένο ένα θερμοστοιχείο. Με αυτό τον τρόπο, καταγραφόταν η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας από κάθε συστοιχία ηλιακών συλλεκτών. Η τροφοδοσία τους με το ρευστό μεταφοράς θερμότητας καταγράφηκε με 3 παροχόμετρα BELIMO FM025R-SZ, τα οποία τοποθετήθηκαν στους διάφορους κλάδους (Εικόνα 12), ώστε να γίνεται μέτρηση της παροχής σε κάθε συστοιχία.



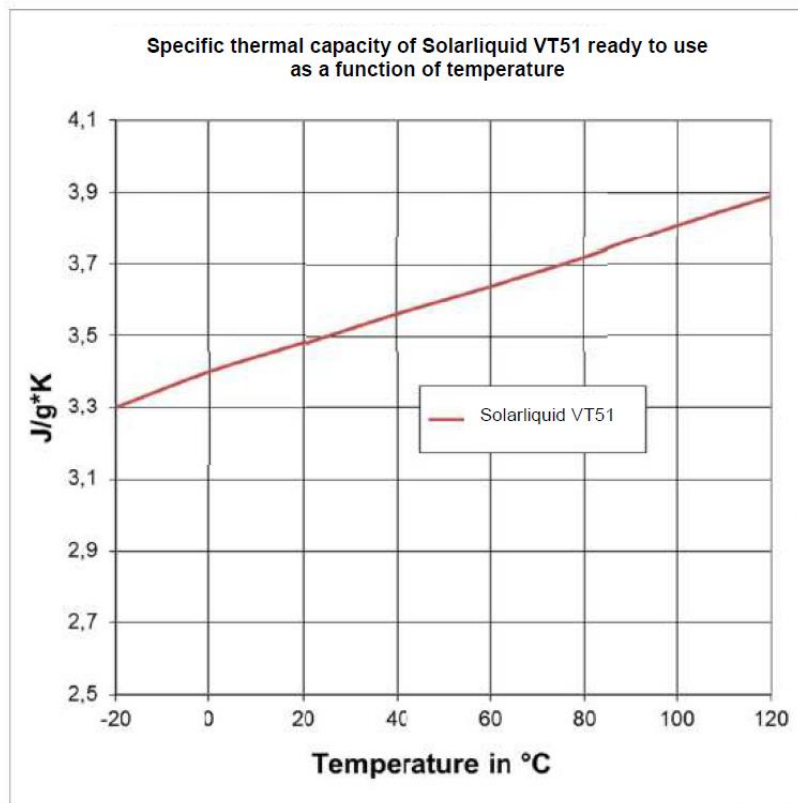
Εικόνα 12: Παροχόμετρο οροφής Κτιρίου Ο

Για τη χρήση των εξισώσεων (4),(5) απαιτείται η γνώση της παροχής μάζας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Για τον υπολογισμό της παροχής μάζας, χρειαζόταν η προσέγγιση της πυκνότητας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, αφού ήταν ήδη γνωστή η παροχή όγκου του από μέτρηση. Οπότε ο υπολογισμός της πυκνότητάς του κατέστησε εφικτή την μετατροπή της ποσότητας του όγκου σε ποσότητα μάζας. Η πυκνότητα υπολογίστηκε με βάση το διάγραμμά της, συναρτήσει της θερμοκρασίας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας (Σχήμα 24), που δόθηκε από τον προμηθευτή του, δηλαδή την εταιρεία Akotec.



Σχήμα 24: Διάγραμμα πυκνότητας-θερμοκρασίας VT51

Η θερμοχωρητικότητα του ρευστού μεταφοράς θερμότητας υπολογίστηκε επίσης, συναρτήσει της θερμοκρασίας του. Το διάγραμμα της ειδικής θερμοχωρητικότητας σε σχέση με την θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας (Σχήμα 25) αντλήθηκε και αυτό από τον προμηθευτή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, την εταιρεία Akotec.



Σχήμα 25: Διάγραμμα θερμοχωρητικότητας-θερμοκρασίας VT51

Για τον ορισμό της θερμοκρασίας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, βάσει της οποίας έγινε ο υπολογισμός της πυκνότητας και της ειδικής θερμοχωρητικότητας, επιλέχθηκε ως τιμή ο μέσος όρος των τιμών θερμοκρασίας της τροφοδοσίας και της επιστροφής από το ηλιακό πεδίο ή της εξόδου από τη συστοιχία των ηλιακών συλλεκτών για την εκάστοτε περίπτωση.

Ένα ακόμη ζήτημα για τον υπολογισμό της θερμοχωρητικότητας και της πυκνότητας του ρευστού μεταφοράς θερμότητας συνιστά η επιλογή της τιμής τους από τα αντίστοιχα διαγράμματα. Το πρόβλημα δημιουργείται, αφού οι καμπύλες των διαγραμμάτων δεν συνιστούν ευθείες. Όποτε, αφού είναι γνωστή η τεταγμένη του σημείου της, οφείλεται μόνο να βρεθεί και η τεταγμένη του. Αυτό δε μπορεί να γίνει με ακρίβεια με οπτικό τρόπο. Ως μέθοδος προσέγγισης αποτέλεσε η γραμμική παρεμβολή των καμπύλων. Η γραμμική παρεμβολή πραγματοποιήθηκε για το διάστημα θερμοκρασιών 60 έως 100 °C του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, καθώς από τις πειραματικές μετρήσεις οι θερμοκρασίες του εντοπίστηκαν σε αυτό το εύρος. Επιπλέον, η επιλογή διαστήματος από το σύνολο των θερμοκρασιών των καμπυλών του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, προσέφερε και

μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσέγγιση των ευθειών από τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής. Οι δύο σχέσεις παρατίθενται στη συνέχεια:

$$\rho = -0.00075 \cdot T + 1.0525 \quad (6)$$

$$c_p = 4 \cdot T + 3410 \quad (7)$$

Για τις παραπάνω σχέσεις, η πυκνότητα υπολογίζεται ως [kg/l], η θερμοκρασία ως [°C] και η θερμοχωρητικότητα ως [J/kgK].

Επιπλέον, η παροχή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας που τροφοδοτείται στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης του συστήματος ECC μετρήθηκε με τη βοήθεια του παροχόμετρου BELIMO FM032R-SZ. Ακόμη, ήταν ενσωματωμένο δύο θερμοστοιχεία, ώστε να καταγράφεται η θερμοκρασία τροφοδοσίας και επιστροφής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δοχείο στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης του συστήματος ECC.

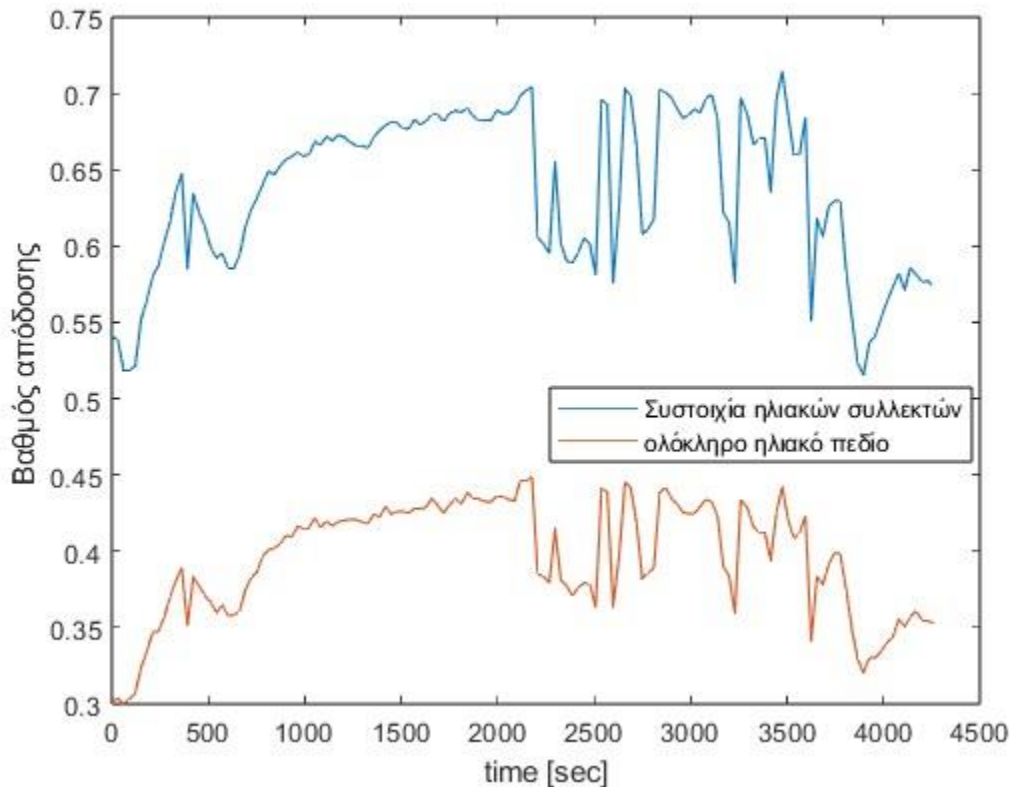
Από τις πειραματικές τιμές που συλλέχθηκαν από τα λογισμικά Winsol και LabView και με την χρήση των εξισώσεων για κάθε χρονική στιγμή, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης τόσο του συνολικού ηλιακού πεδίου, όσο και της συστοιχίας συλλεκτών της εταιρείας COSMOSOLAR. Η ημέρα της συνολικής καταγραφής των μετρήσεων ήταν η 20^η Μαρτίου του 2023. Τα πειραματικά δεδομένα ξεκίνησαν να αντλούνται από τις 13:22:22 μέχρι και τις 14:33:37.

Το λογισμικό Winsol προσέφερε τις τιμές των δεδομένων του ανά 30 δευτερόλεπτα. Από αυτό το λογισμικό πάρθηκαν οι τιμές της θερμοκρασίας του ρευστού από το δοχείο στα ηλιακά, αλλά και της επιστροφής του από τα ηλιακά στο δοχείο, οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και η συνολική παροχή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Το λογισμικό LabView κατέγραφε τιμές ανά μισό δευτερόλεπτο. Σε αυτό βασίστηκε η άντληση δεδομένων για τη 1^η συστοιχία ηλιακών συλλεκτών της οροφής. Συγκεκριμένα, για τη παροχή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας σε αυτό το σετ και για την τιμή της θερμοκρασίας εξόδου από αυτό. Τα λογισμικά αποθήκευαν τις καταγεγραμμένες τιμές σε αρχεία excel.

Με βάση τα παραπάνω, κατασκευάστηκε αλγόριθμος στο λογισμικό της Matlab (βλ. Παράρτημα: Κώδικας 1), σύμφωνα με τον οποίο, αρχικά, διάβαζε τα δεδομένα από τα αρχεία excel. Στη συνέχεια, τα ζητούμενα μεγέθη από το σύνολο των δεδομένων, αποκόπτονταν και τοποθετούνταν σε έναν νέο πίνακα στο περιβάλλον της Matlab. Από εκεί δημιουργούνταν τα ξεχωριστά διανύσματα των μεγεθών, ώστε να γίνεται εύκολη η επεξεργασία τους. Με τα διανύσματα των θερμοκρασιών και με την χρήση των εξισώσεων (6) και (7), κατασκευάζονταν τα διανύσματα της πυκνότητας και της θερμοχωρητικότητας. Στη συνέχεια, υπολογίζονταν οι βαθμοί απόδοσης του συστήματος. Τέλος, για την καλύτερη

κατανόηση των αποτελεσμάτων σχεδιάστηκαν τα κατάλληλα διαγράμματα των διάφορων μεγεθών συναρτήσει του χρόνου που πέρασε από την αρχή της πειραματικής διεργασίας.

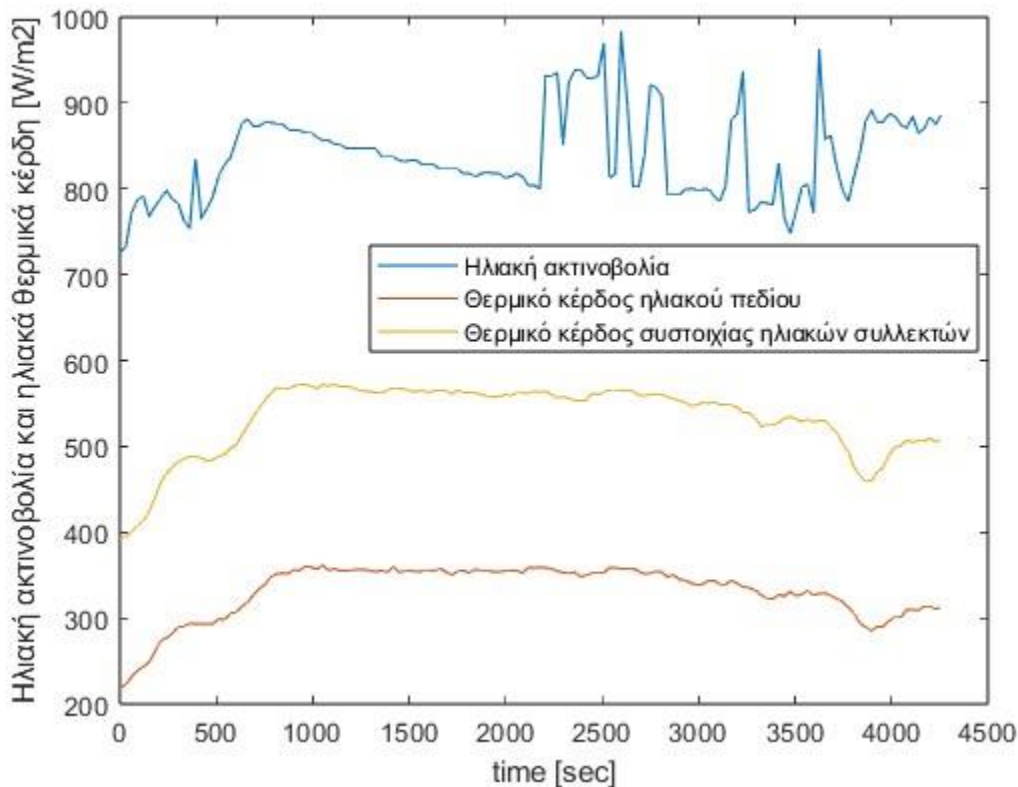
Στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 26) σχεδιάστηκε η πορεία των βαθμών απόδοσης του συνολικού πεδίου και της συστοιχίας των ηλιακών συλλεκτών στο πέρασμα του χρόνου της πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 26: Βαθμός απόδοσης συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών και ηλιακού πεδίου

Στο διάγραμμα των βαθμών απόδοσης είναι εμφανής μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στις δύο καμπύλες. Η καμπύλη του ηλιακού πεδίου εντοπίζεται αισθητά χαμηλότερα σε σχέση με αυτή της συστοιχίας των ηλιακών συλλεκτών. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι για τη μέτρηση του βαθμού απόδοσης του ηλιακού πεδίου είναι φυσιολογικό να εμφανιστούν συγκεκριμένες θερμικές απώλειες. Οι απώλειες οφείλονται στην αποβολή θερμότητας προς το περιβάλλον, κατά τη μεταφορά του ρευστού μεταφοράς θερμότητας από την οροφή στο δοχείο αποθήκευσης θερμότητας. Ακόμη, υπάρχουν απώλειες από την επιρροή της θερμοκρασίας του εσωτερικού του δοχείου αποθήκευσης θερμότητας στο ρεύμα της επιστροφής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας προς το δοχείο. Για τον περιορισμό των πρώτων απωλειών είχε ενσωματωθεί στις σωληνώσεις του δικτύου του ηλιακού πεδίου,

μονωτικό υλικό, ώστε να αποτρέψει την μετάδοση θερμότητας από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που έρεε στο σωλήνα προς το εξωτερικό περιβάλλον, στο οποίο επικρατούσαν χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας. Οι δεύτερες απώλειες, κατά κύριο λόγο, προέρχονται από την τοποθέτηση του θερμοστοιχείου καταμέτρησης της θερμοκρασίας της επιστροφής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας εντός του δοχείου θερμότητας, οπότε αυτές οι απώλειες δεν αποφεύγονται. Οι διαφορές που επικρατούν στα θερμικά κέρδη γίνονται πιο κατανοητές στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 27) που παρατίθεται και αφορά την εξέλιξη της ηλιακής ακτινοβολίας και των θερμικών κερδών του ηλιακού πεδίου συνολικά και του της συστοιχίας των ηλιακών συλλεκτών συναρτήσει του χρόνου που διανύεται από την αρχή του πειράματος.

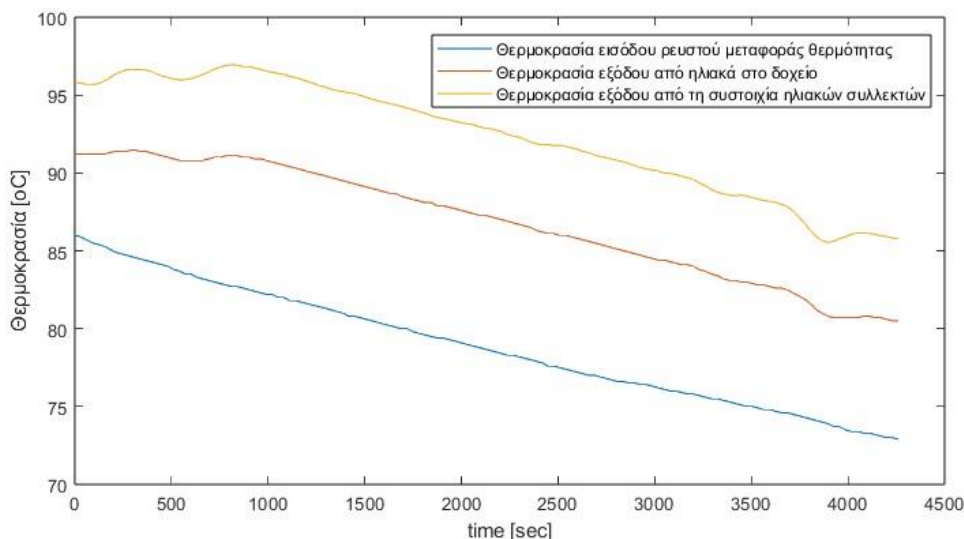


Σχήμα 27: Ηλιακή ακτινοβολία και θερμικά κέρδη συναρτήσει του χρόνου του πειράματος

Όπως αναμενόταν και από το διάγραμμα των βαθμών απόδοσης, τα ηλιακά θερμικά κέρδη εμφανίζουν εμφανή απόκλιση στις μεταξύ τους τιμές σε όλη τη πειραματική διεργασία. Αρχικά, η ηλιακή ακτινοβολία, σύμφωνα και με την βιβλιογραφία [18], παρουσιάζει λογικές τιμές. Στα τέλη Μάρτη η ηλιακή ακτινοβολία αναμενόταν να ήταν της τάξεως 790-830 W/m², τις ώρες εκτέλεσης του πειράματος (μεσημέρι). Τα πειραματικά αποτελέσματα

δείχνουν ότι όντως η καταμέτρηση ήταν ορθή προσφέροντας αξιοπιστία στα δεδομένα που καταγράφηκαν. Οι απότομες μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας δεν αποτελούν πρόβλημα. Είναι λογικό κατά τη διάρκεια του πειράματος να υπάρξουν συνθήκες μερικής συννεφιάς και σε συνεργία με τη μεταβολή της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, να προκαλέσουν στιγμιαία αισθητές μεταβολές στα πειραματικά αποτελέσματα. Σε αντίθεση με το παραπάνω γεγονός, οι καμπύλες των θερμικών κερδών δεν παρουσιάζουν απότομες μεταβολές. Από αυτό το στοιχείο έπεται το συμπέρασμα ότι το σύστημα του ηλιακού πεδίου με τις κατάλληλες μονώσεις, τη κατάλληλη διάταξη και το σωστό περιβάλλον στο οποίο εγκαταστάθηκε, προσέφερε σταθερότητα κατά τη λειτουργία του, αποδεικνύοντας ότι απότομες μεταβολές σε μικρά χρονικά διαστήματα της ηλιακής ακτινοβολίας δε επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στα θερμικά κέρδη της εγκατάστασης.

Τέλος, για την ανάλυση των μεταβολών των αποτελεσμάτων του ηλιακού πεδίου χρήσιμο διάγραμμα αποτελεί αυτό της μεταβολής της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στο ηλιακού πεδίο, της θερμοκρασίας εξόδου από αυτό και της θερμοκρασίας εξόδου από τη συστοιχία ηλιακών συλλεκτών, συναρτήσεσι του χρόνου από την αρχή της πειραματικής διαδικασίας (Σχήμα 28).



Σχήμα 28: Μεταβολή θερμοκρασιών ηλιακού πεδίου συναρτήσεσι του χρόνου του πειράματος

Τα αποτελέσματα της πορείας των διάφορων θερμοκρασιών ανέδειξαν δύο κύρια σημεία. Πρώτον, η απόκλιση στις θερμοκρασίες εξόδου ανάμεσα σε αυτή του ηλιακού πεδίου και αυτή της συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών ήταν εμφανής. Η απόκλιση αυτή ουσιαστικά συνέστησε τον βασικό λόγο στις διαφορές των ηλιακών θερμικών κερδών και κατ' επέκταση

των βαθμών απόδοσης του ηλιακού συστήματος. Δεύτερον, παρατηρείται μια συνεχής πτώση των τριών θερμοκρασιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο κύκλος ECC της πειραματικής εγκατάστασης SunClim λειτουργούσε κανονικά. Αυτό προκαλούσε πτώση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δοχείου αποθήκευσης θερμότητας. Έτσι, η θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στην είσοδό του στο ηλιακό πεδίο έφθινε, με άμεση συνέπεια την αδυναμία συντήρησης των ίδιων υψηλών τιμών στις θερμοκρασίες εξόδου του, τόσο από το συνολικό ηλιακό πεδίο, όσο και από τη συστοιχία των ηλιακών συλλεκτών.

3.2 Πειραματικά αποτελέσματα συστήματος ECC

3.2.1 Περιγραφή βασικών μεγεθών

Μεγέθη σημαντικά για την αξιολόγηση του κύκλου ψύξης με ακροφύσιο συνιστούν ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς COP_{th} και ο λόγος αναρρόφησης στο ακροφύσιο. Ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς υπολογίζεται ως το πηλίκο της παραγόμενης ψύξης στον ατμοποιητή ψύξης, προς τη προσδιδόμενη θερμική ισχύ στο οργανικό ρευστό του κύκλου μέσω του ατμοποιητή υψηλής πίεσης. Από την άλλη, ο λόγος αναρρόφησης ορίζεται ως το πηλίκο της παροχής μάζας της δευτερεύουσας ροής του ακροφυσίου, που προέρχεται από τον ατμοποιητή ψύξης, προς την παροχή μάζας της πρωτεύουσας ροής, η οποία εξέρχεται από τον ατμοποιητή υψηλής πίεσης.

Η ψυκτικής ισχύς, όπως προαναφέρθηκε, παραγόταν στον ατμοποιητή χαμηλής θερμοκρασίας της εγκατάστασης. Το οργανικό ρευστό αφού στραγγαλιζόταν στην εκτονωτική βαλβίδα, κατευθυνόταν στον ατμοποιητή ψύξης. Σε εκείνο το σημείο, το οργανικό ρευστό απορροφούσε θερμότητα από το εξωτερικό ρεύμα νερού του υδραυλικού κυκλώματος του Εργαστηρίου. Η ψυκτική ισχύς της εγκατάστασης προσδιοριζόταν ως το γινόμενο της παροχής μάζας του οργανικού ρευστού πολλαπλασιασμένο με την αύξηση της ενθαλπίας του στον ατμοποιητή ψύξης. Το οργανικό ρευστό που διαπερνά την εκτονωτική βαλβίδα βρίσκεται στη διφασική περιοχή (εντός της καμπάνας) και εξέρχεται από τον ατμοποιητή ως υπέρθερμος ατμός χαμηλής πίεσεως.

Η θερμική ισχύς εξομοιωνόταν στον εναλλάκτη θερμότητας του ατμοποιητή υψηλής πίεσης. Το οργανικό ρευστό απορροφούσε θερμότητα από το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το οποίο προερχόταν από το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας. Το ποσό της θερμότητας, που μεταφερόταν στο οργανικό ρευστό, είχε άμεση εξάρτηση με τη θερμοκρασία που επικρατούσε στο δοχείο αποθήκευσης θερμότητας. Το δοχείο λάμβανε το ζεστό ρεύμα του ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το ηλιακό πεδίο και με αυτό τον

τρόπο θερμαινόταν. Από το δοχείο το ρευστο μεταφοράς θερμότητας κατευθυνόταν στον εναλλάκτη θερμότητας του ατμοποιητή υψηλής πίεσης. Όσο πιο ζεστό ήταν, τόσο αυξανόταν το ποσό θερμότητας που μεταφερόταν στο σύστημα ECC. Η θερμική ισχύς προσεγγιζόταν ως το γινόμενο της παροχής μάζας του οργανικού ρευστού της πρωτεύουσας ροής επί την αύξηση της ενθαλπίας του, με το πέρασμά του από τον ατμοποιητή υψηλής πίεσης. Το οργανικό ρευστό σε φάση υπόψυκτου υγρού της τάξεως των 5 K, όπως εξήλθε από τον εναλλάκτη υπόψυξης, τροφοδοτούταν στις αντλίες. Οι αντλίες, παράλληλα τοποθετημένες, ήταν σχεδιασμένες να του αυξήσουν την πίεση στα 18 bar, με λειτουργία στο μέγιστο φορτίο τους. Εξαιτίας της αδυναμίας κάλυψης των θεωρητικών τους ικανοτήτων, η πίεση του οργανικού ρευστού δεν υπέρβαινε τα 16 bar. Στη συνέχεια, εισερχόταν στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης, από την οποία εξερχόταν σε φάση υπέρθερμου ατμού, ώστε να αποτελέσει την πρωτεύουσα ροή στο ακροφύσιο. Η αύξηση της πίεσής του ήταν ιδιαίτερα σημαντική, καθώς όσο μεγαλύτερη πίεση είχε, τόσο καλύτερο αποτέλεσμα θα είχε στον εκβιασμό της δευτερεύουσας ροής εντός του ακροφυσίου.

Η παροχή μάζας του οργανικού ρευστού που διαπερνούσε την εκτονωτική βαλβίδα ήταν άμεσα εξαρτημένη με τον υπέρθερμο ατμό του οργανικού ρευστού μετά τον ατμοποιητή ψύξης. Αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι κατά τη πειραματική διαδικασία η εκτονωτική βαλβίδα συνδεόταν με ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου και αυτοματισμού. Σύμφωνα με αυτό, είχε προγραμματιστεί να ρυθμίζεται το άνοιγμα και το κλείσιμο του διαφράγματός της, ώστε να επιτυγχάνεται υπερθέρμανση 5 K για την ομαλή είσοδο του οργανικού ρευστού στο ακροφύσιο με την έξοδό του από τον ατμοποιητή ψύξης. Για το λόγο αυτό, το σύστημα της εκτονωτικής βαλβίδας συνδεόταν με τις πληροφορίες του θερμοστοιχείου και του αισθητήριου πίεσης μετά τον ατμοποιητή ψύξης. Αρχικά, ορίστηκε στο λογισμικό της εκτονωτικής το οργανικό ρευστό, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση, το R134a. Στη συνέχεια, καθορίστηκε ο στόχος της λειτουργίας της, που όπως αναφέρθηκε, ήταν η επίτευξη υπερθέρμανσης 5 K. Με την ανάγνωση των τιμών, που λάμβανε η εκτονωτική από τη πειραματική διάταξη, και με βάση την καμπύλη κορεσμού του εργαζόμενου μέσου, που είχε ορισθεί, υπολόγιζε την θερμοκρασία κορεσμού της εκάστοτε πίεσης. Με βάση τη διαφορά των δύο θερμοκρασιών, ελεγχόταν το ποσοστό ανοίγματος της εκτονωτικής. Συγκεκριμένα, σε συνθήκες όπου η υπερθέρμανση προσεγγιζόταν σε τιμή χαμηλότερη των 5 K, το διάφραγμα έκλεινε με σκοπό την περαιτέρω πτώση της πίεσης του οργανικού ρευστού και την αύξηση της υπερθέρμανσης. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν η υπερθέρμανση υπερέβαινε τους 5 βαθμούς K, το διάφραγμα άνοιγε, με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής μάζας του οργανικού ρευστού και της αύξησης της πίεσής του, που οδηγούσαν στη μείωση της υπερθέρμανσής του.

Κρίσιμο ρόλο για το κύκλο ψύξης, με βάση και τα παραπάνω, είχε η σωστή μέτρηση των τιμών της θερμοκρασίας και πίεσης μετά τον ατμοποιητή ψύξης από την εκτονωτική βαλβίδα. Συγκεκριμένα, στις πρώτες πειραματικές μετρήσεις είχε εντοπιστεί ένα πρόβλημα

αδυναμίας δημιουργίας ψύξης της εγκατάστασης. Κύριος παράγοντας ευθύνης αυτής της δυσλειτουργίας συνιστούσε η εκτονωτική βαλβίδα, η οποία παρέμενε συνεχώς κλειστή. Έπειτα από αρκετές πειραματικές δοκιμές, βρέθηκε σημαντική απόκλιση στις τιμές θερμοκρασίας και πίεσης, που διάβαζε η εκτονωτική, σε σχέση με αυτές που κατέγραφε το λογισμικό LabView. Αυτό το γεγονός οδηγούσε την εκτονωτική στο να διαβάζει, λανθασμένα, αρνητική υπερθέρμανση, με συνέπεια να παραμένει συνεχώς κλειστή. Το πρόβλημα για αυτή τη λανθασμένη ανάγνωση τιμών, υπήρξε η τοποθέτηση του θερμοστοιχείου και του αισθητήρα πίεσης της εκτονωτικής αρκετά κοντά στο ακροφύσιο. Αυτό οδήγησε στο φαινόμενο, κατά το οποίο οι τιμές που καταμετρούσαν οι αισθητήρες να επηρεάζονται από τα υπόλοιπα ρεύματα του ακροφυσίου. Για το λόγο αυτό, επανατοποθετήθηκαν σε θέση πιο κοντά στην έξοδο του ατμοποιητή ψύξης, με σκοπό την πιο ορθή μέτρηση των συνθηκών εκείνης της περιοχής. Επιπλέον, ορίστηκε στο λογισμικό της εκτονωτικής μια ελάχιστη τιμή κλεισίματος του διαφράγματός της, της τάξεως του 0.8%, με σκοπό την αποτροπή μηδενισμού της δευτερεύουσας ροής του ακροφυσίου. Έπειτα από αυτές τις αλλαγές το σύστημα της εκτονωτικής παρείχε ίδιες τιμές με αυτές του λογισμικού LabView.

3.2.2 Διαγράμματα πειραματικών αποτελεσμάτων

Βασικό μέλημα των πειραμάτων ήταν ο εντοπισμός των ευρών λειτουργίας της πειραματικής εγκατάστασης SunClim. Μία οπτική, που συνεισφέρει στην ανάδειξη των ικανοτήτων του συστήματος ECC, συνιστά η εμφάνιση των τιμών του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για τις διάφορες τιμές ατμοποίησης. Ο υπολογισμός του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση (2). Οι πειραματικές διεργασίες ήταν αρκετές, με αποτέλεσμα να υπάρχουν δεδομένα για πολλές διαφορετικές συνθήκες. Ο πλουραλισμός είναι σημαντικός για οποιαδήποτε πειραματική διερεύνηση. Το σύστημα ήταν σε θέση να αξιολογηθεί σε μεγάλο βαθμό, για ένα καλό εύρος θερμοκρασιών, τόσο στον συμπυκνωτή, όσο και στον ατμοποιητή.

Μία δεύτερη οπτική που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό των συνθηκών λειτουργίας του SunClim, ήταν η απεικόνιση του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο συναρτήσει της θερμοκρασίας κορεσμού μετά τον συμπυκνωτή για τις διάφορες θερμοκρασίες ατμοποίησης του εργαζόμενου μέσου. Ο λόγος αναρρόφησης υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση (3). Ο λόγος αναρρόφησης επηρεαζόταν άμεσα από το άνοιγμα της εκτονωτικής βαλβίδας. Όσο πιο ανοικτή ήταν, τόσο πιο μεγάλη ήταν η δευτερεύουσα παροχή, με αποτέλεσμα την αύξηση του λόγου ω . Η μεγάλη τιμή του λόγου παροχών ανεδείκνυε την καλή παραγωγή ψύξης του συστήματος.

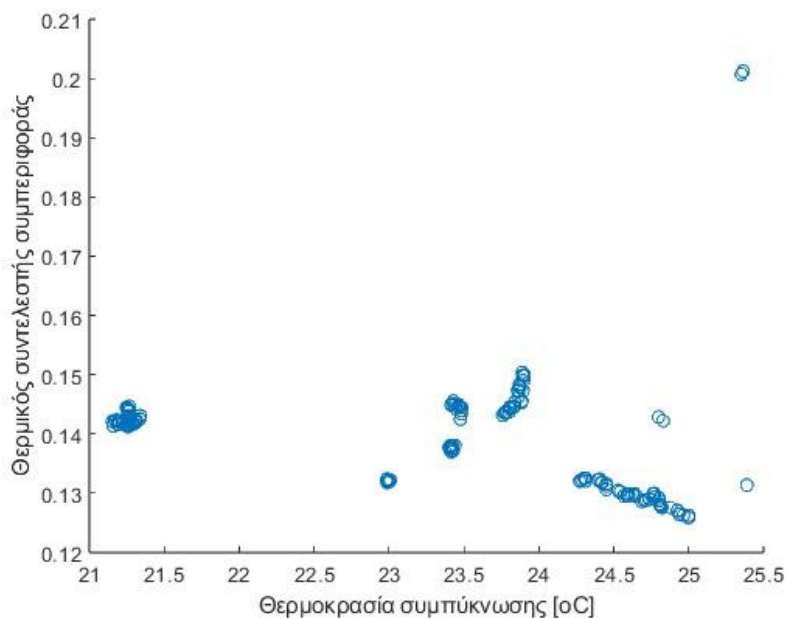
Για τον σχεδιασμό των δύο παραπάνω ειδών διαγραμμάτων κατασκευάστηκε κώδικας στο λογισμικό Matlab (βλ. Παράρτημα: Κώδικας 2). Αρχικά, ο κώδικας ξεκίνησε με τον εντοπισμό και το διάβασμα όλων των αρχείων excel με τα πειραματικά δεδομένα από τις διάφορες μετρήσεις. Στη συνέχεια, οριζόταν ένας κενός πίνακας, στον οποίο θα καταγραφόντουσαν τα ζητούμενα μεγέθη. Σε εκείνο το σημείο ξεκινούσε η πρώτη επαναληπτική διαδικασία του αλγορίθμου. Για κάθε αρχείο excel, πραγματοποιούνταν εστίαση της στήλης που αφορούσε τις τιμές της θερμοκρασίας ατμοποίησης του οργανικού ρευστού στον ατμοποιητή ψύξης. Οριζόταν σε εκείνο το σημείο, η θερμοκρασία της ατμοποίησης που θα χρειαζόταν για την κάθε περίπτωση, με περιθώριο 0.1 βαθμών κελσίου. Το πρόγραμμα έλεγχε τα δεδομένα της στήλης και συγκρατούσε τα κελιά, των οποίων η τιμή βρισκόταν εντός των ορίων του αριθμού της θερμοκρασίας της ατμοποίησης με ανοχή +/- 0.1. Κατόπιν, οι σειρές αυτών των κελιών καταγραφόντουσαν στον κενό πίνακα που είχε δημιουργηθεί στην αρχή του προγράμματος. Με αυτό τον τρόπο, αφού ο αλγόριθμος τελείωνε με όλα τα αρχεία των πειραματικών μετρήσεων, δημιουργούταν ο καταληκτικός πίνακας των πειραματικών δεδομένων με βάση την επιλεγμένη θερμοκρασία ατμοποίησης.

Έπειτα, ξεκινούσε ο δεύτερος βρόγχος του αλγορίθμου. Κατά τη δεύτερη επαναληπτική διαδικασία, χρησιμοποιούνταν η συνάρτηση CoolProp, η οποία καλούταν από τις βιβλιοθήκες της προγραμματιστικής γλώσσας Python. Το λογισμικό αφού του παρέχονταν 2 θερμοδυναμικά μεγέθη για ένα ρευστό, ήταν σε θέση να υπολογίσει τα υπόλοιπα. Με αυτόν τον τρόπο, με στοιχεία εισόδου την πίεση και τη θερμοκρασία του κάθε σημείου, που χρειαζόταν να υπολογιστεί η ενθαλπία του, χρησιμοποιούνταν το CoolProp. Τα σημεία αυτά ήταν η είσοδος και η έξοδος του ατμοποιητή υψηλής πίεσης, η έξοδος του εναλλάκτη υπόψυξης και η έξοδος του ατμοποιητή. Είναι εμφανές ότι για τον υπολογισμό της ψύξης χρησιμοποιείται το σημείο πριν την εκτονωτική βαλβίδα και όχι αυτό πριν τον ατμοποιητή. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του γεγονότος ότι μετά την εκτονωτική το οργανικό ρευστό βρισκόταν εντός της διφασικής περιοχής, με συνέπεια να μην ήταν εφικτός ο υπολογισμός της ενθαλπίας, αφού υπήρχαν άπειρα σημεία με το ίδιο ζεύγος πίεσης θερμοκρασίας. Ο στραγγαλισμός στην εκτονωτική βαλβίδα θεωρήθηκε ισενθαλπικός. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ισότητα των ενθαλπιών των σημείων μετά τον εναλλάκτη υπόψυξης με αυτό πριν τον ατμοποιητή. Για αυτό το λόγο, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της ενθαλπίας του υπόψυκτου υγρού πριν την εκτονωτική βαλβίδα.

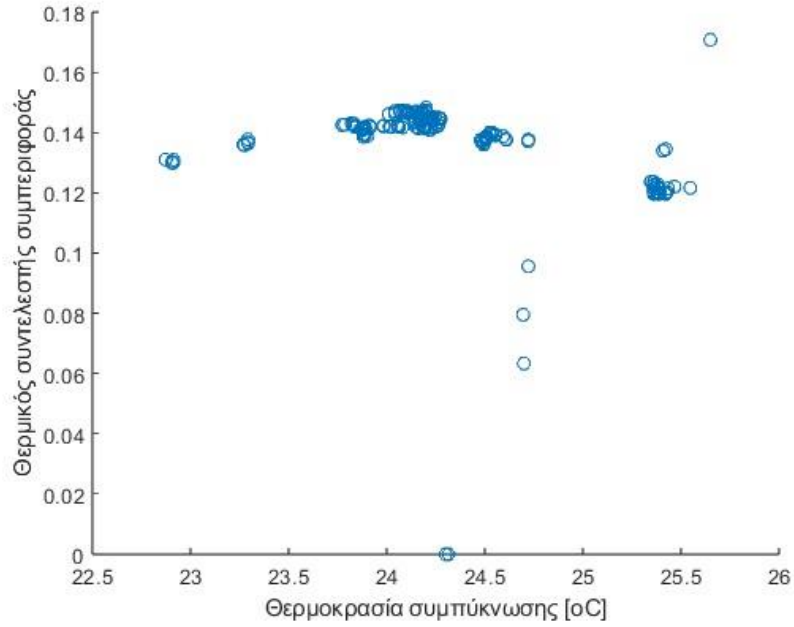
Η δεύτερη επαναληπτική διαδικασία ολοκληρωνόταν με τον υπολογισμό του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς και του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο. Αυτό επιτεύχθηκε με την άντληση των παροχών της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ροής από τον πίνακα των πειραματικών αποτελεσμάτων. Το γινόμενο της πρωτεύουσας ροής επί τη διαφορά ενθαλπίας στη γεννήτρια ισοδυναμούσε με τη θερμική ισχύ, ενώ το γινόμενο της δευτερεύουσας ροής επί τη διαφορά ενθαλπίας στην έξοδο του ατμοποιητή ψύξης και στην έξοδο του υποψύκτη ισοδυναμούσε με την ψυκτική ισχύ. Τελικό στάδιο, υπήρξε η

δημιουργία των διαγραμμάτων του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς και του λόγου αναρρόφησης συναρτήσει της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για τις διάφορες επιλεγμένες τιμές της θερμοκρασίας ατμοποίησης. Τα διαγράμματα ήταν υπό τη μορφή κουκίδων για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

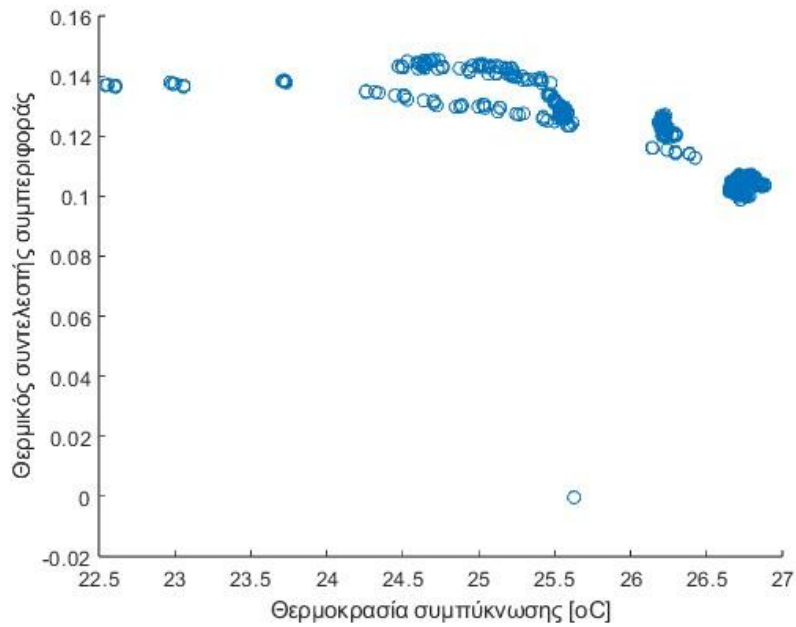
Αρχικά, παρατίθενται τα διαγράμματα του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για τις διάφορες θερμοκρασίες ατμοποίησης. Έπειτα, γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και στη συνέχεια πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία για τα διαγράμματα του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο. Από τα πειραματικά δεδομένα όλων των πραγματοποιημένων μετρήσεων, το εύρος των θερμοκρασιών ατμοποίησης, που εντοπίστηκε, ήταν από 3 έως 20°C. Η πίεση εισόδου της πρωτεύουσας ροής του οργανικού ρευστού δεν ήταν σταθερή πάντοτε μεταξύ των διαφορετικών πειραματικών διεργασιών. Οι τιμές της εντοπιζόταν κυρίως στο διάστημα μεταξύ των 15 και 15.5 bar, με μέση τιμή τα 15.25 bar.



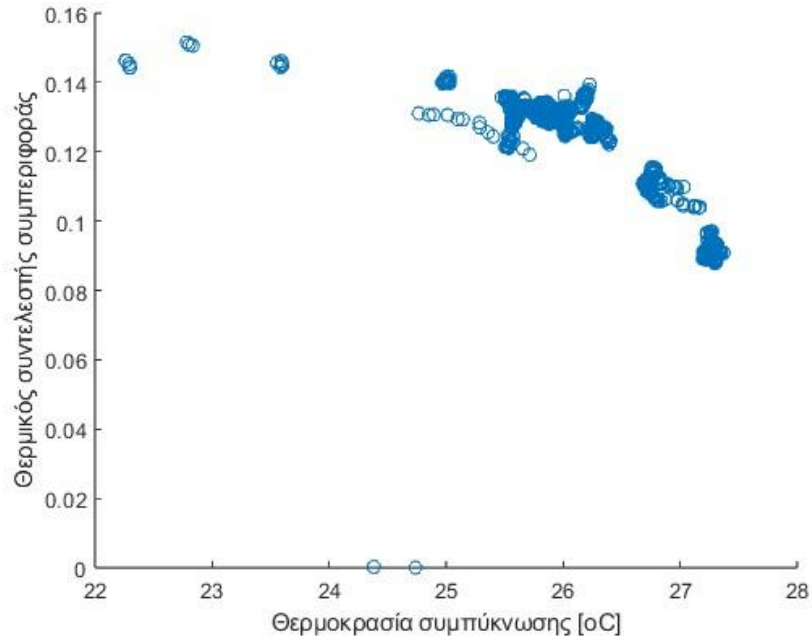
Σχήμα 29: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap}=3 °C



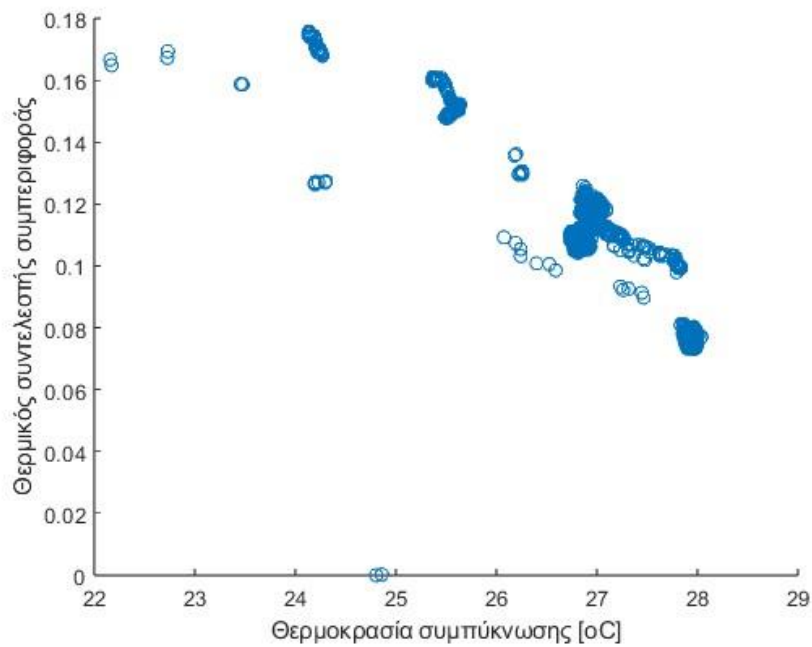
Σχήμα 30: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap}=4 °C



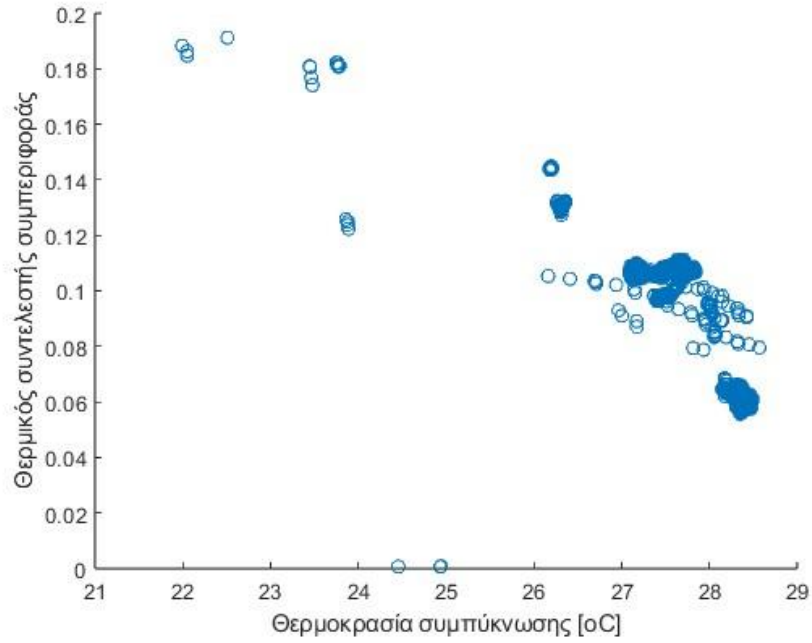
Σχήμα 31: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap} =5 °C



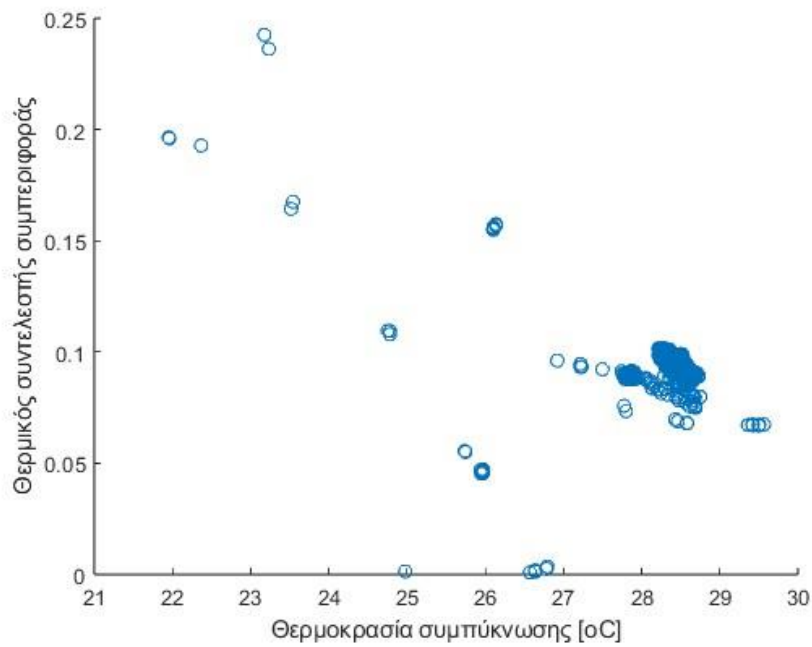
Σχήμα 32: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap} = 6 °C



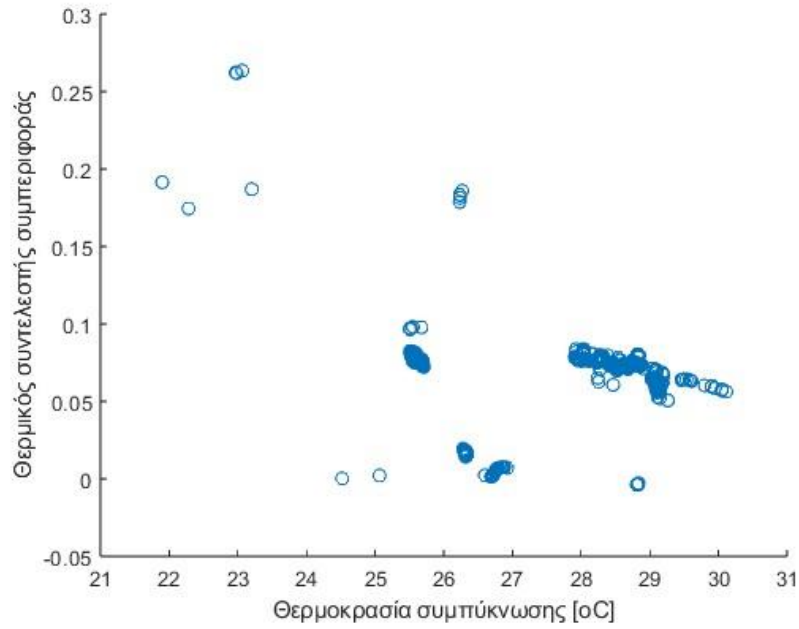
Σχήμα 33: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap} = 7 °C



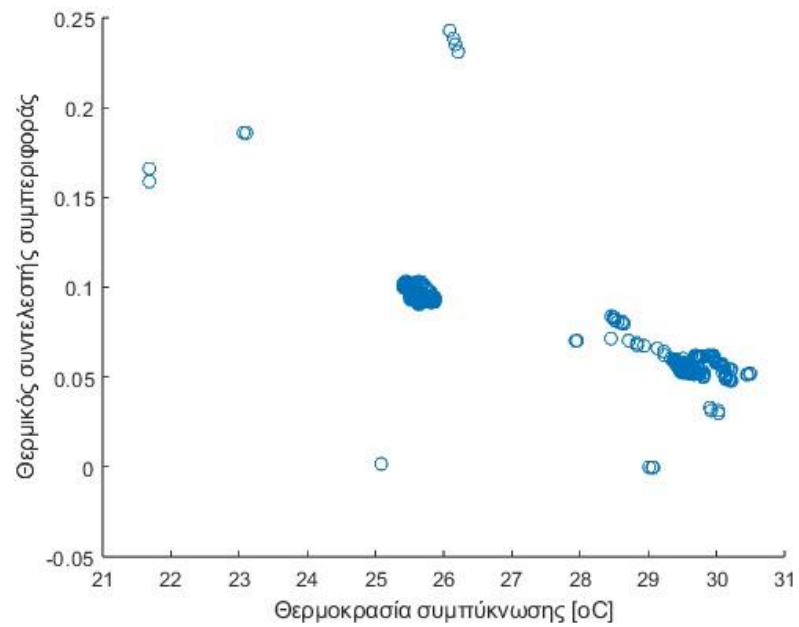
Σχήμα 34: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap} = 8 °C



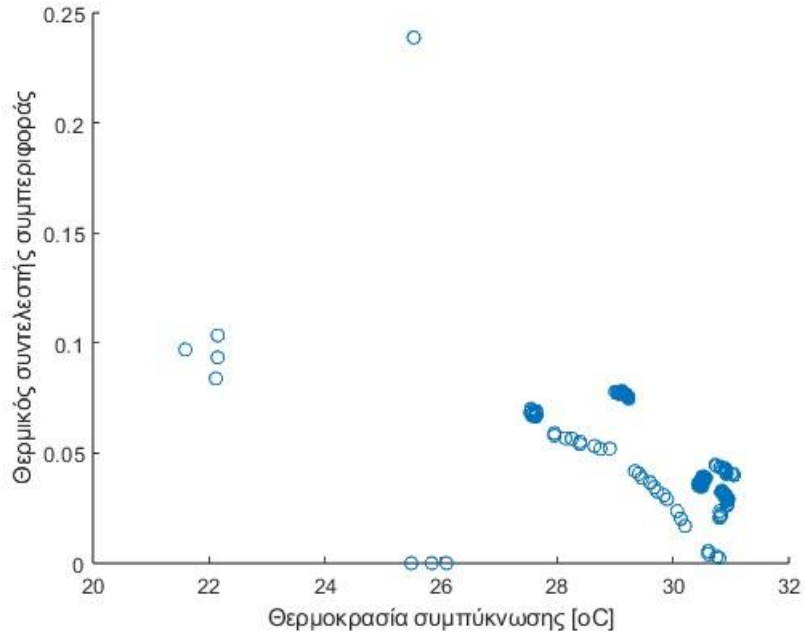
Σχήμα 35: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap} = 9 °C



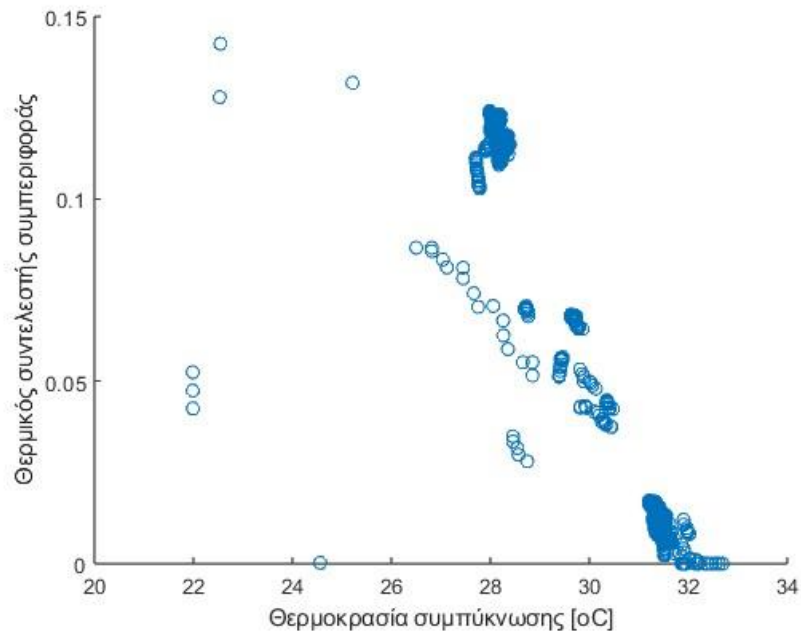
Σχήμα 36: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap} =10 °C



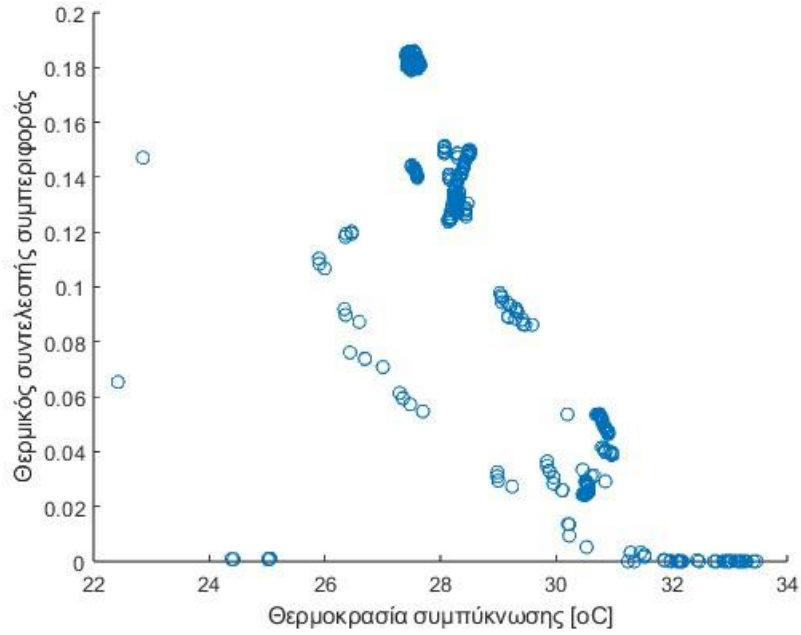
Σχήμα 37: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap} =11 °C



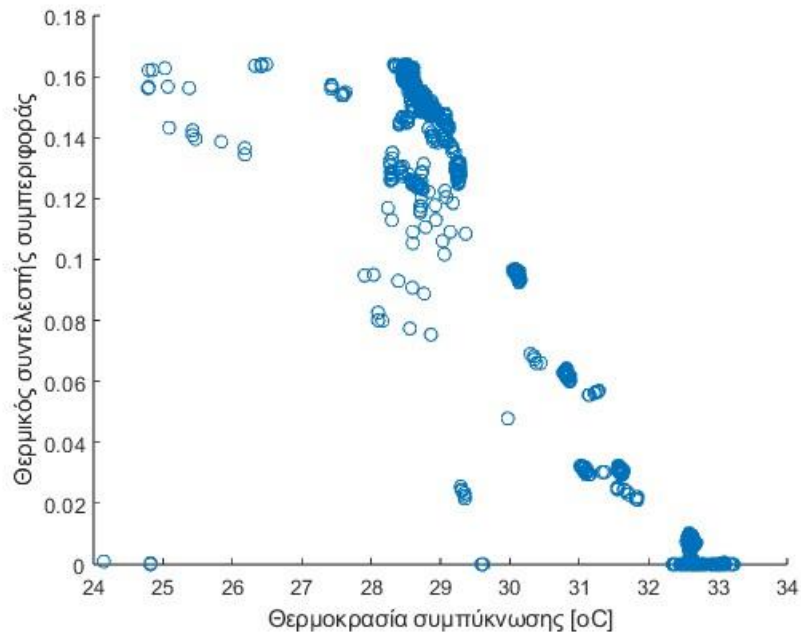
Σχήμα 38: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap} =12 °C



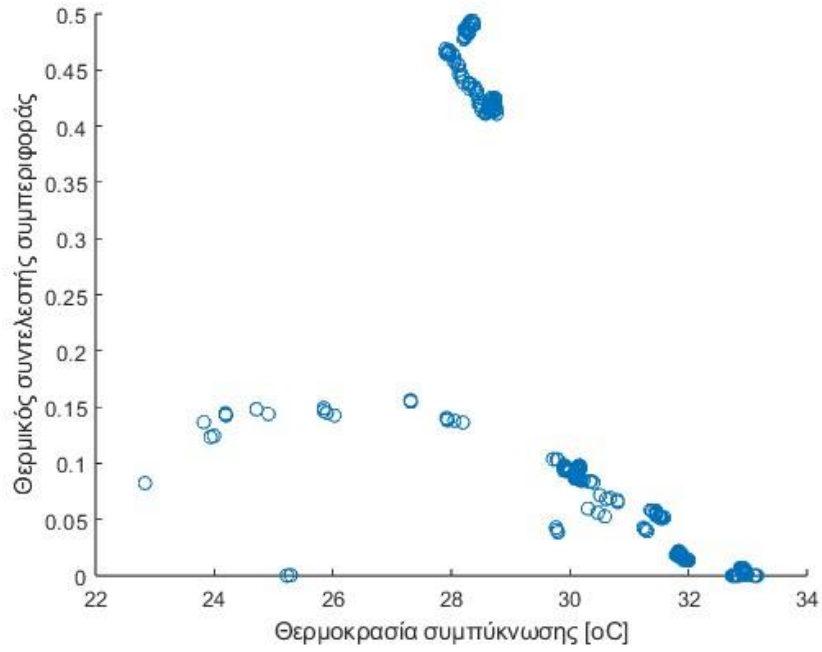
Σχήμα 39: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για T_{evap} =13 °C



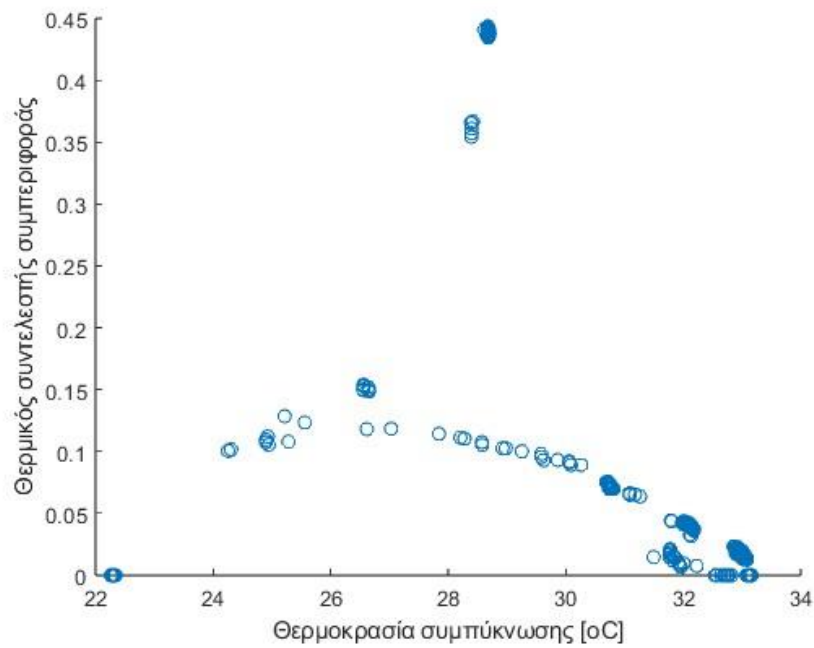
Σχήμα 40: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 14 \text{ } ^\circ\text{C}$



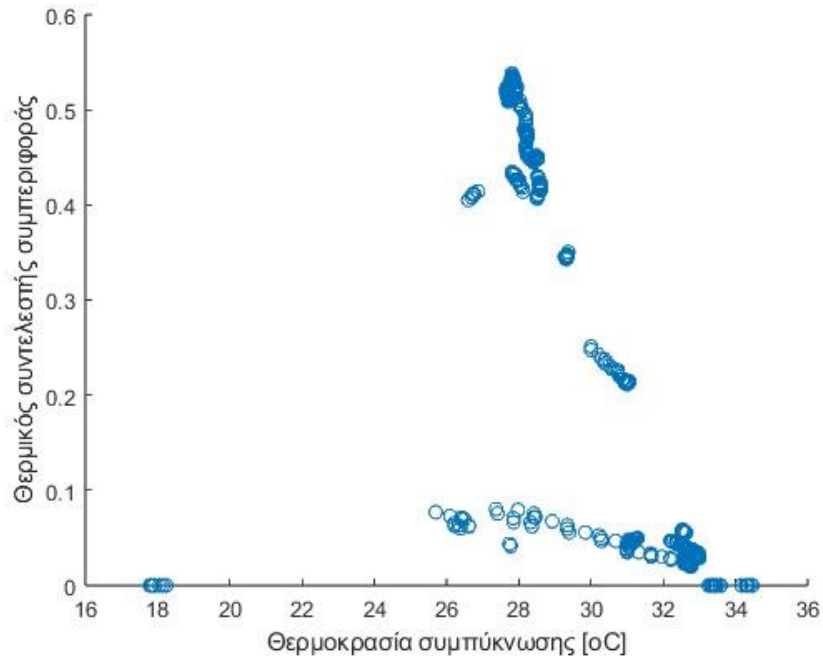
Σχήμα 41: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$



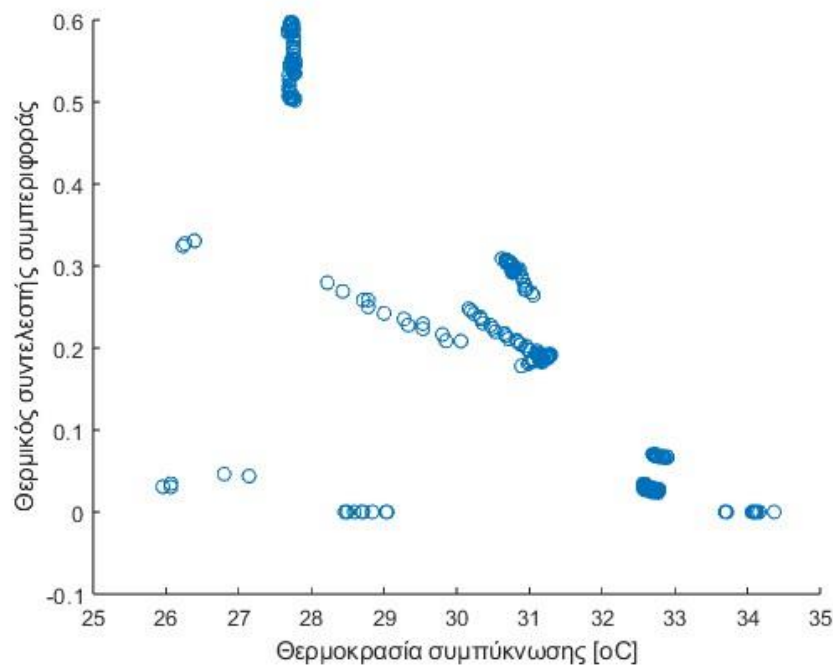
Σχήμα 42: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$



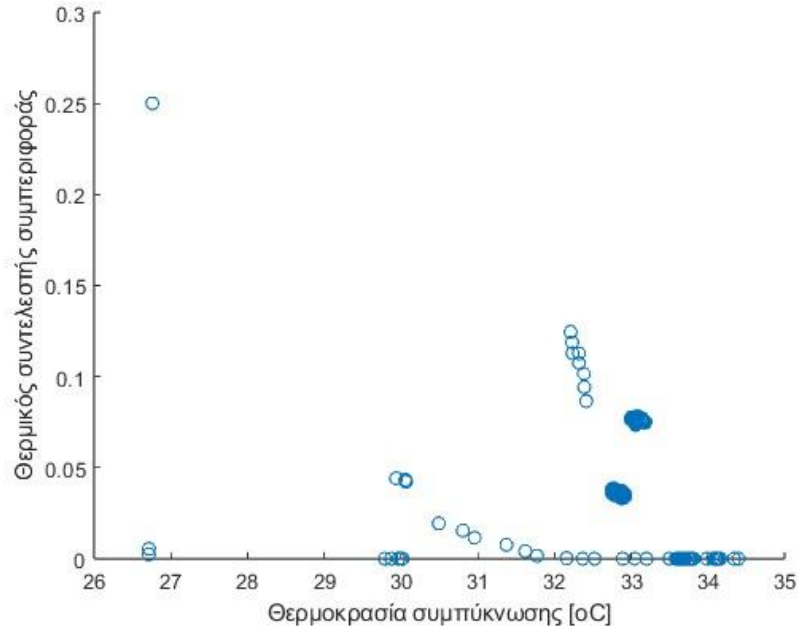
Σχήμα 43: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$



Σχήμα 44: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$

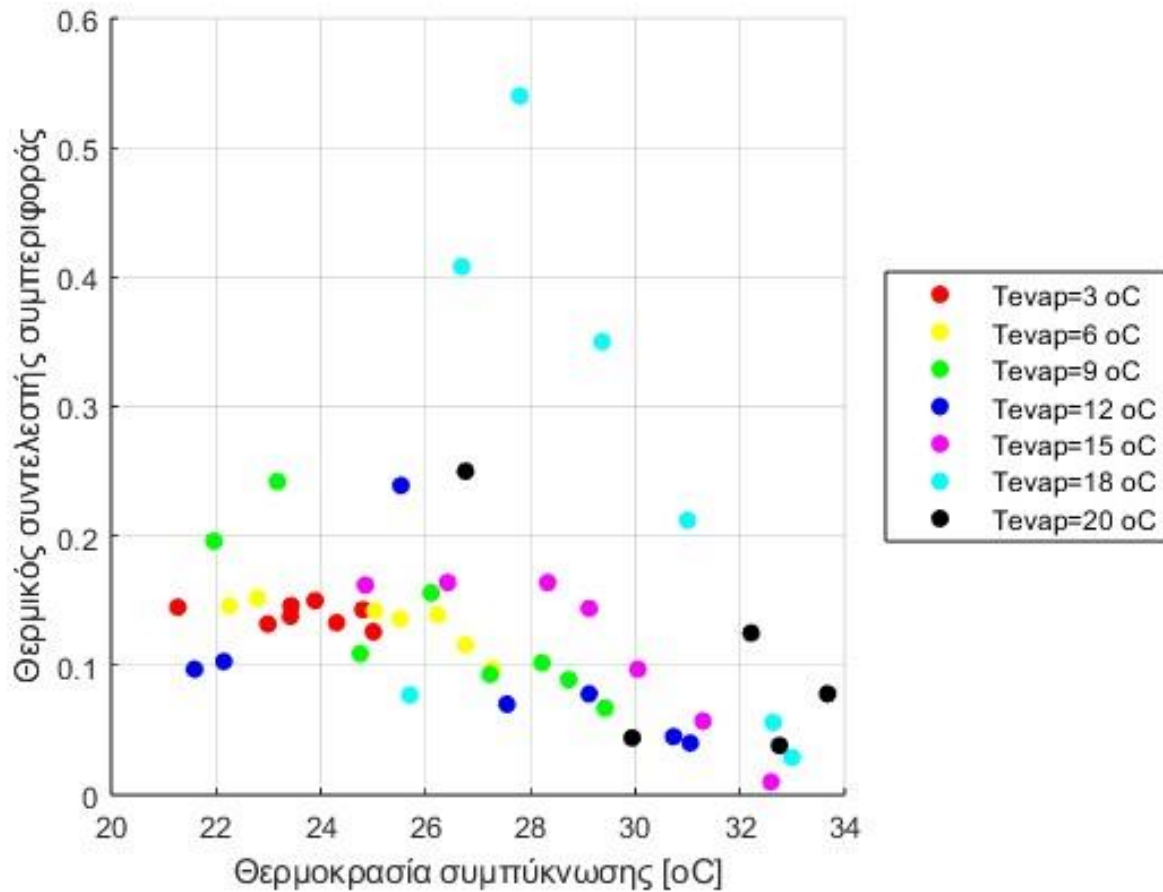


Σχήμα 45: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 19 \text{ } ^\circ\text{C}$



Σχήμα 46: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 20\text{ }^{\circ}C$

Τα σημεία λειτουργίας της εγκατάστασης συμβολίστηκαν με μικρούς κύκλους. Στις περιοχές όπου εντοπίστηκαν έντονες αποχρώσεις του μπλε χρώματος, υποδηλώθηκε συχνή εμφάνιση σημείου λειτουργίας. Αυτό πρακτικά σήμανε, ότι για εκείνη τη περιοχή των συνθηκών, των θερμοκρασιών ατμοποίησης και συμπύκνωσης, το σύστημα κατά κύριο λόγο απέδιδε με αυτό τον τρόπο. Σε περιοχές όπου οι κύκλοι ήταν αραιοί μπορεί να ίσχυαν δύο πιθανές καταστάσεις. Πρώτον, η λειτουργία σε αυτές τις συνθήκες με τη συγκεκριμένη απόδοση να επιτεύχθηκε ελάχιστες φορές. Δεύτερον, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ανά πολύ μικρές χρονικές στιγμές, κυρίως στην αρχή ή στο τέλος, ενώ η εκτονωτική βαλβίδα ήταν κλειστή, το σύστημα κατέγραφε αύξηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου στον ατμοποιητή ψύξης, με συνέπεια την καταγραφή ενός λανθασμένου συντελεστή συμπεριφοράς. Αυτό οφειλόταν κυρίως στο γεγονός ότι το σύστημα βρισκόταν σε μεταβατική κατάσταση. Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των μεταβολών του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς συναρτήσει της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για τις διάφορες θερμοκρασίες ατμοποίησης, σχεδιάστηκε ένα κοινό διάγραμμα, το οποίο περιείχε ως σημεία τις πυκνές περιοχές των παραπάνω διαγραμμάτων, για θερμοκρασίες ατμοποίησης από 3 έως 20 °C με βήμα 3 °C. Με αυτό τον τρόπο προέκυψε το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 47: Συγκεντρωτικό διάγραμμα COP_{th}

Από τα διαγράμματα των θερμικών συντελεστών απόδοσης συναρτήσεως της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για τις διάφορες θερμοκρασίες ατμοποίησης προέκυψαν τα ακόλουθα σχόλια:

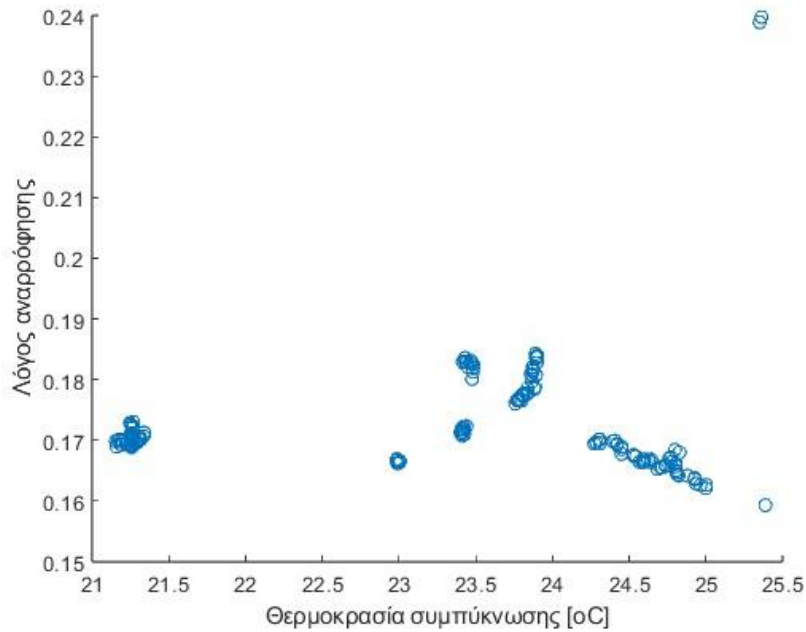
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 3 °C, παρατηρήθηκε σχετικά σταθερός θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς για θερμοκρασίες συμπύκνωσης 21 έως 25 °C. Η τιμή υπολογίστηκε περίπου ίση με 0.14.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 6 °C, ήταν εμφανής μία ισχυρά φθίνουσα τάση για θερμοκρασίες συμπύκνωσης από 25.5 έως 27.5 °C. Οι τιμές του COP_{th} άρχισαν από την τιμή 0.13 και κατέληξαν στη τιμή 0.09.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 9 °C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 23.2 °C, ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς προσέγγισε την τιμή 0.25. Στη συνέχεια, υπήρξε φθίνουσα πορεία έως τη θερμοκρασία συμπύκνωσης των 29.5 °C.

- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 12 °C και θερμοκρασία συμπύκνωσης από 25.5 °C, ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς προσέγγισε την τιμή 0.25. Έπειτα, έφθινε μέχρι τη θερμοκρασία συμπύκνωσης των 31 °C.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 15 °C και για θερμοκρασίες συμπύκνωσης από 28.5 έως 29 βαθμών κελσίου, οι τιμές του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς άρχισαν από τη τιμή 0.16 και μειώθηκαν έως τη τιμή 0.145. Για υψηλότερες τιμές της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, της τάξεως 30.5 έως 31.5 βαθμών κελσίου, οι τιμές του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς έπεσαν σημαντικά σε 0.065 έως 0.03.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 18 °C, τα αποτελέσματα εμφάνισαν τις μέγιστες τιμές του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς για θερμοκρασίες συμπύκνωσης από 26 έως 29 °C. Για θερμοκρασία συμπύκνωσης περίπου ίση με 27.8 °C, η μέγιστη τιμή του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς προσέγγισε την τιμή 0.55.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 20 °C και για θερμοκρασία συμπύκνωσης 26.8 °C, η τιμή του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς προσέγγισε την τιμή 0.25 και στη συνέχεια έφθινε μέχρι τη θερμοκρασία συμπύκνωσης των 34 °C.

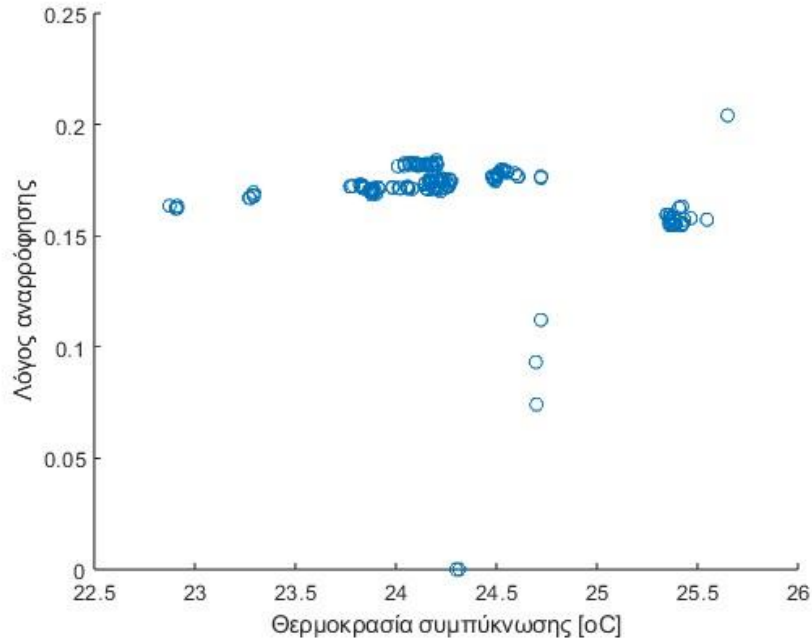
Σε γενικές γραμμές, παρατηρήθηκε μία φθίνουσα πορεία του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς στα σημεία λειτουργίας του συστήματος με αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, για τις ίδιες τιμές της θερμοκρασίας ατμοποίησης. Παράλληλα, η αύξηση της θερμοκρασίας ατμοποίησης για τις ίδιες θερμοκρασίες συμπύκνωσης, προκάλεσε αύξηση του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς του κύκλου ψύξης. Επιπλέον, ήταν εμφανές ότι με την ταυτόχρονη αύξηση τόσο της θερμοκρασίας ατμοποίησης όσο και της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του οργανικού ρευστού, οι τιμές του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς του συστήματος μειώθηκαν. Αυτό οφειλόταν κυρίως στο γεγονός ότι οι αντλίες ενώ είχαν σχεδιαστεί να ανεβάζουν τη πίεση του οργανικού ρευστού στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης στα 18 bar, στη πράξη, όμως, δε πραγματοποιήθηκε αύξηση της πίεσης σε τιμή πάνω από τα 16 bar. Η μειωμένη πίεση της πρωτεύουσας ροής του ακροφυσίου δυσκόλεψε τον εξαναγκασμό της πορείας της δευτερεύουσας ροής εντός του ακροφυσίου, με συνέπεια το σύστημα να υπολειτουργεί. Το φαινόμενο αυτό επιβαρυνόταν ιδιαίτερα για θερμοκρασίες συμπύκνωσης και ατμοποίησης υψηλές, που είχαν άμεσο αντίκτυπο στην προσπάθεια της πρωτεύουσας ροής να συμπαρασύρει τη δευτερεύουσα. Η μέγιστη τιμή του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς της τάξεως 0.55, εντοπίστηκε για τη θερμοκρασία ατμοποίησης των 18 °C και θερμοκρασία συμπύκνωσης περίπου ίση με 27.8 °C. Γενικότερα, ισχύει ότι όσο κοντινότερες είναι οι θερμοκρασίες συμπύκνωσης και ατμοποίησης τόσο καλύτερη ψύξη πραγματοποιείται, όμως ο κύκλος γίνεται όλο και λιγότερο ρεαλιστικός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι καμπύλες θερμοκρασίας του οργανικού ρευστού στο θερμοδυναμικό κύκλο T-s συγκλίνουν. Η αύξηση της θερμοκρασίας ατμοποίησης με ταυτόχρονη μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, πρακτικά,

υποδηλώνουν την ανάγκη για ψύξη σε υψηλότερες θερμοκρασίες αλλά για μικρότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, γεγονός που κατά κύριο λόγο δεν υφίσταται.

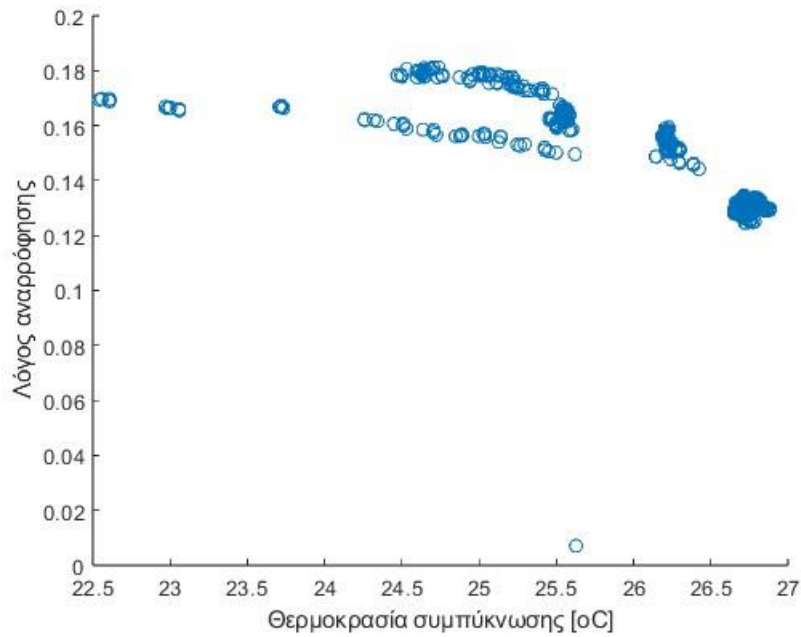
Επόμενο βήμα στην ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων, συνιστά η παράθεση των διαγραμμάτων του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο, συναρτήσει της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, για τις διάφορες θερμοκρασίες ατμοποίησης. Και σε αυτά τα διαγράμματα ισχύει το ίδιο εύρος θερμοκρασιών ατμοποίησης και η μέση πίεση της πρωτεύουσας ροής.



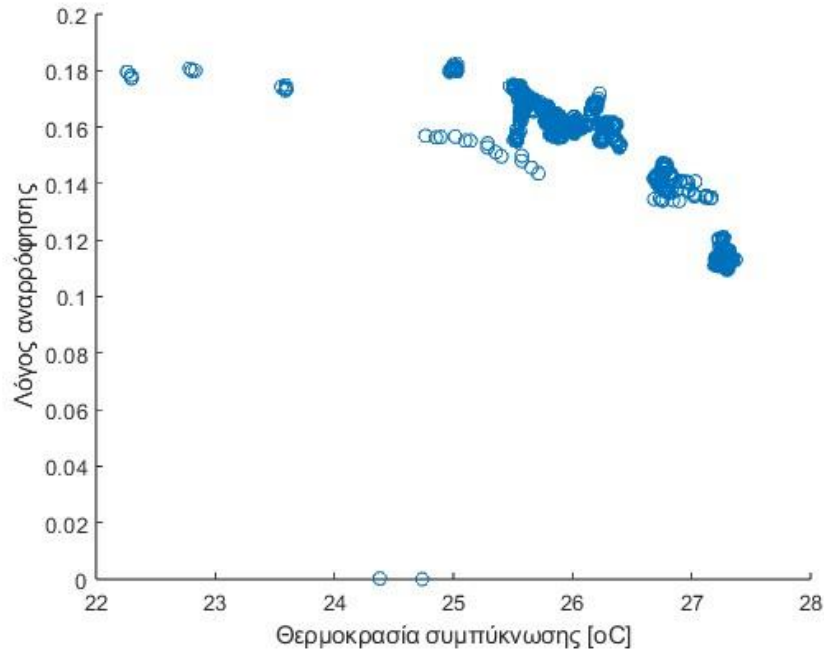
Σχήμα 48: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=3\text{ }^{\circ}\text{C}$



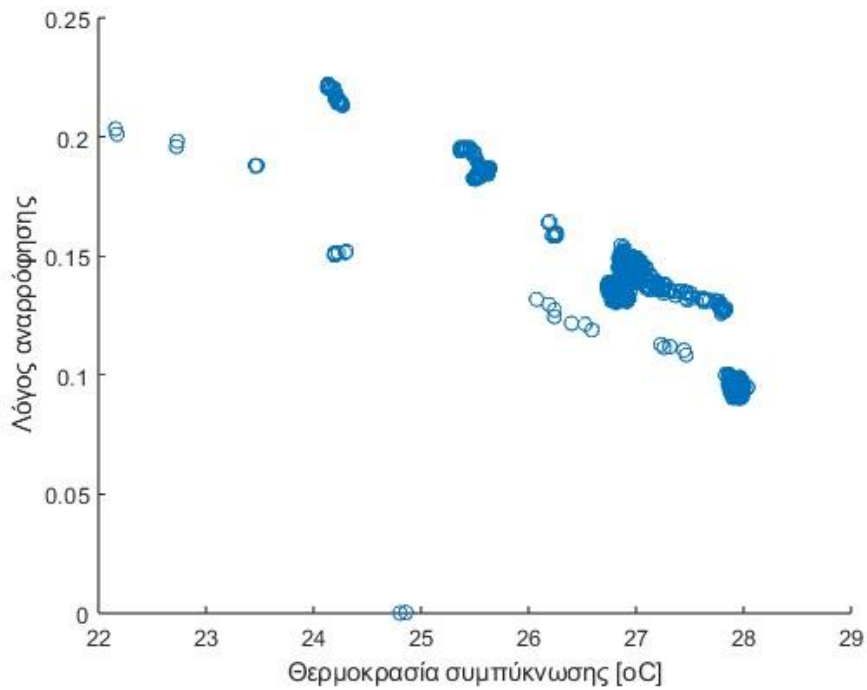
Σχήμα 49: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=4$ °C



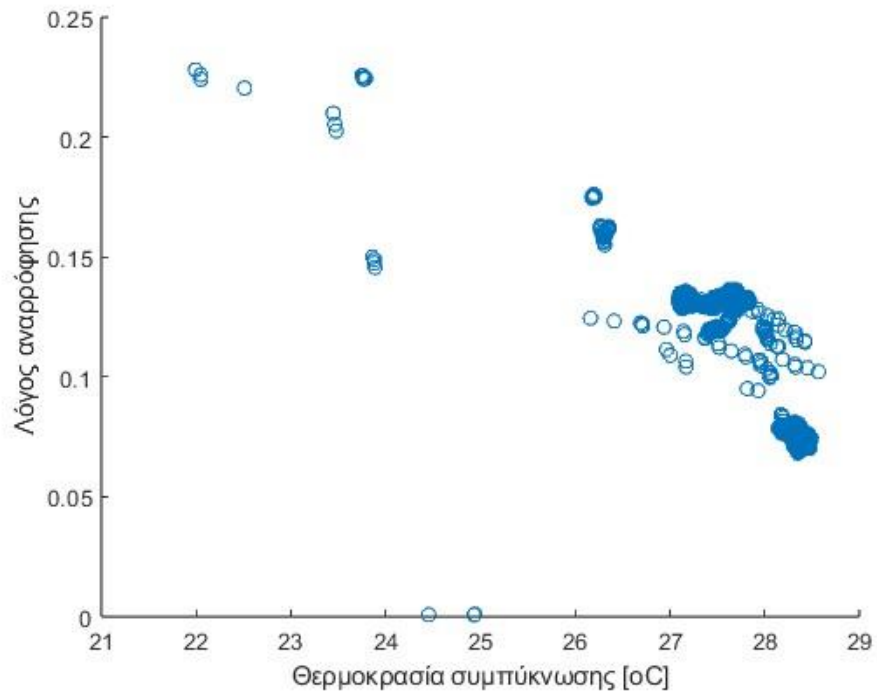
Σχήμα 50: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=5$ °C



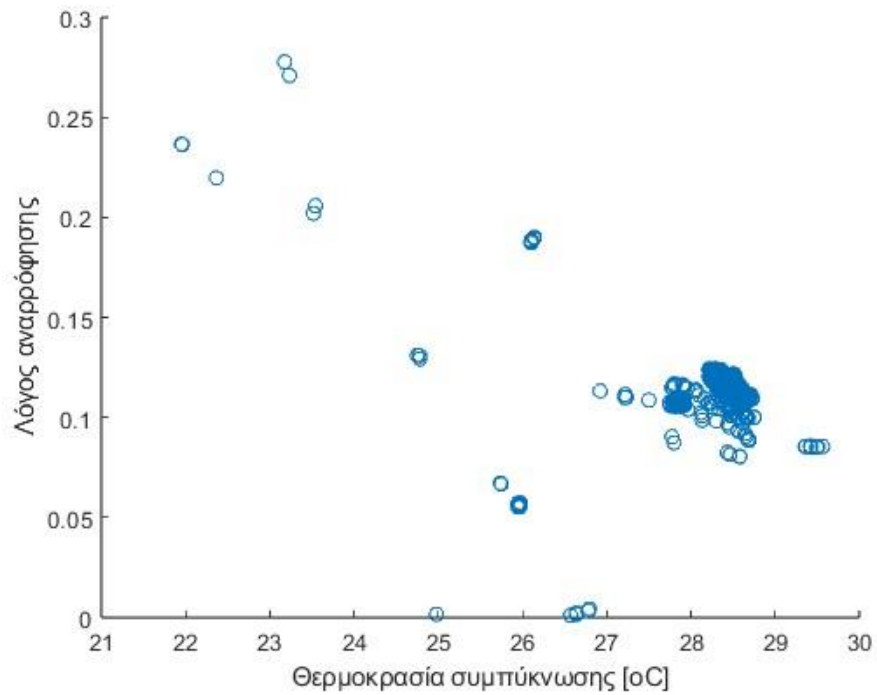
Σχήμα 51: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$



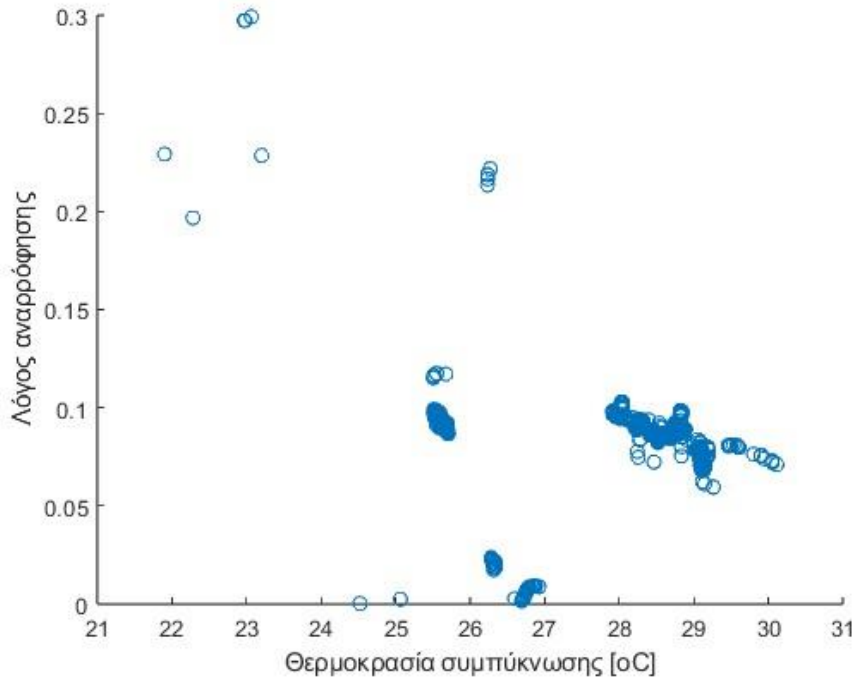
Σχήμα 52: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$



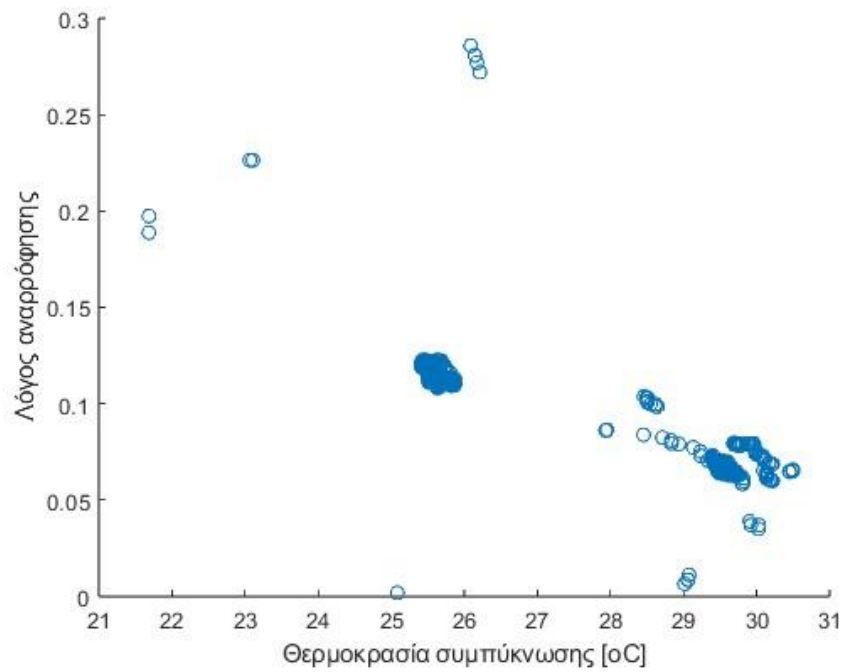
Σχήμα 53: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap}=8\text{ °C}$



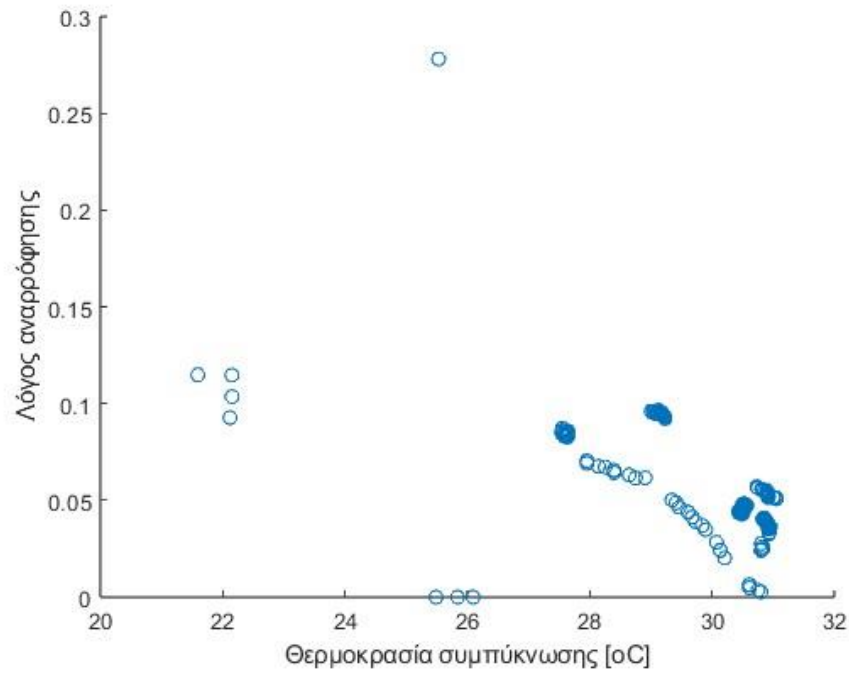
Σχήμα 54: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap}=9\text{ °C}$



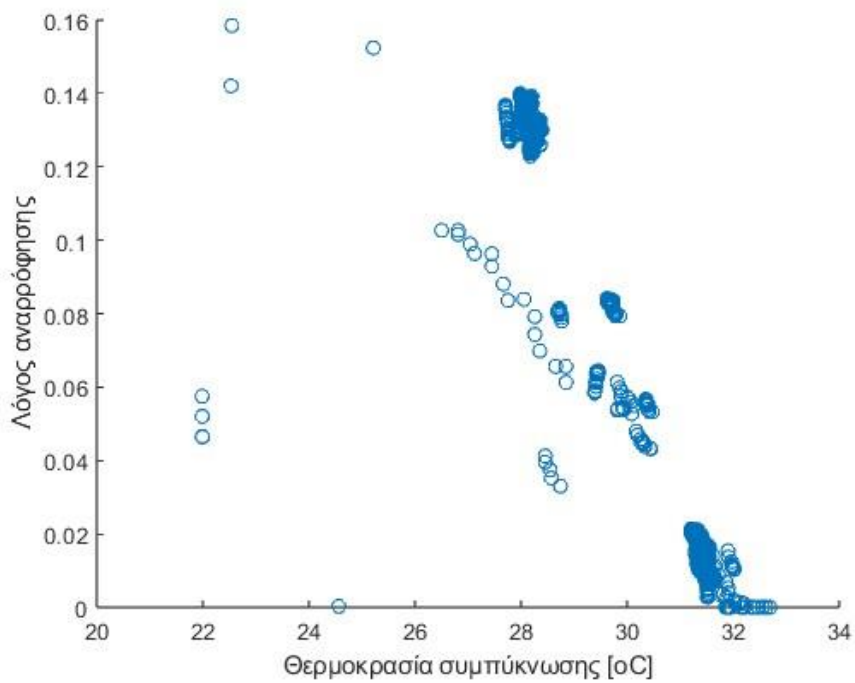
Σχήμα 55: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=10$ °C



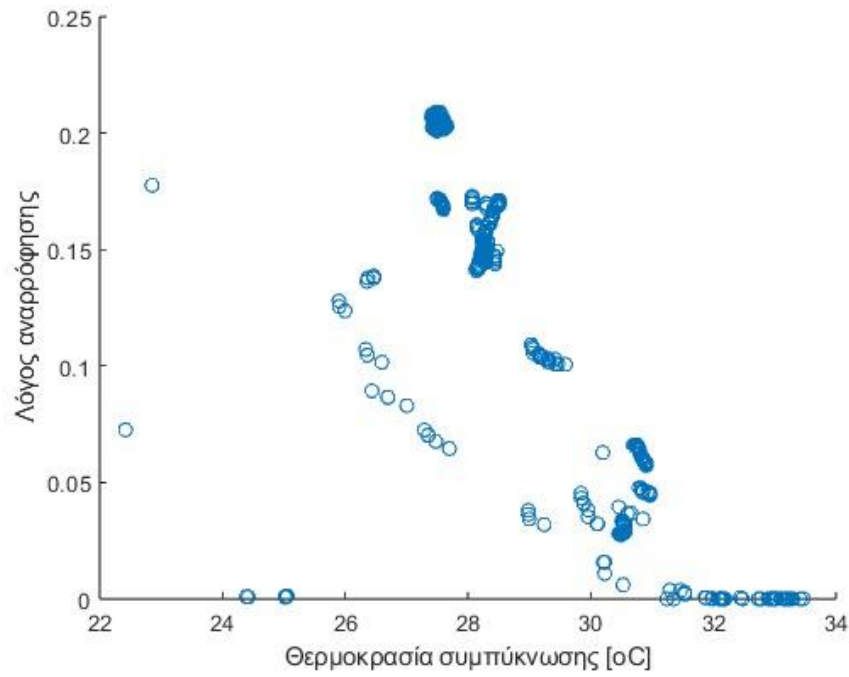
Σχήμα 56: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=11$ °C



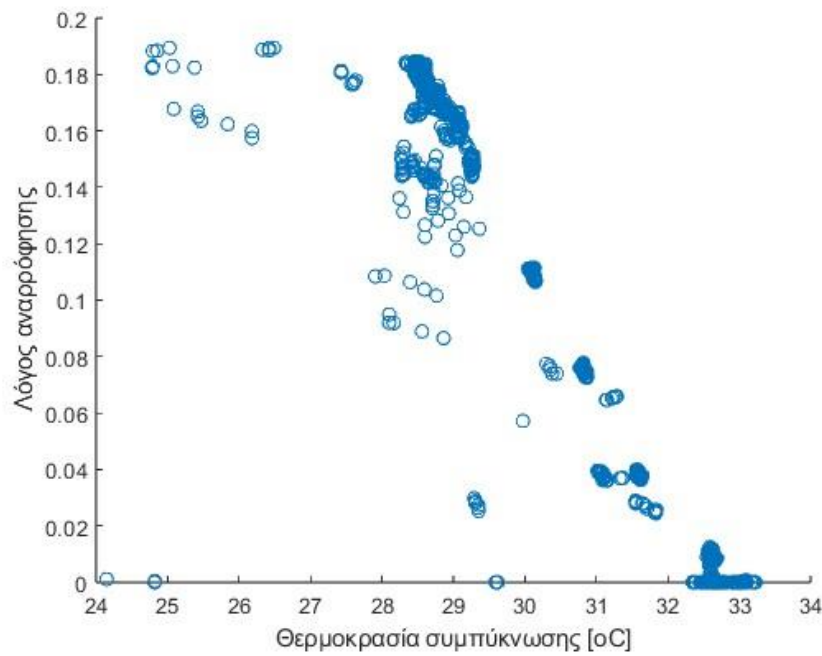
Σχήμα 57: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=12\text{ }^{\circ}\text{C}$



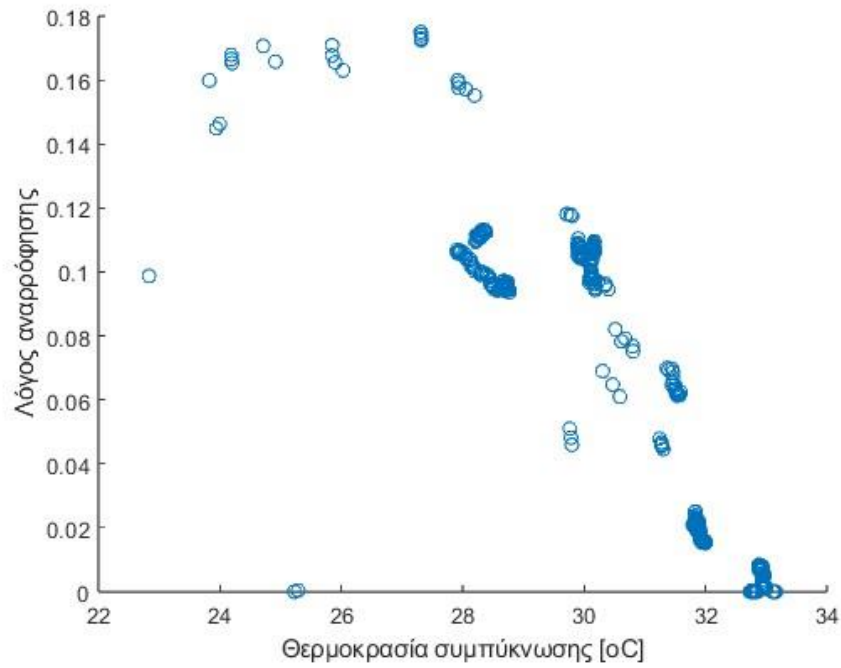
Σχήμα 58: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=13\text{ }^{\circ}\text{C}$



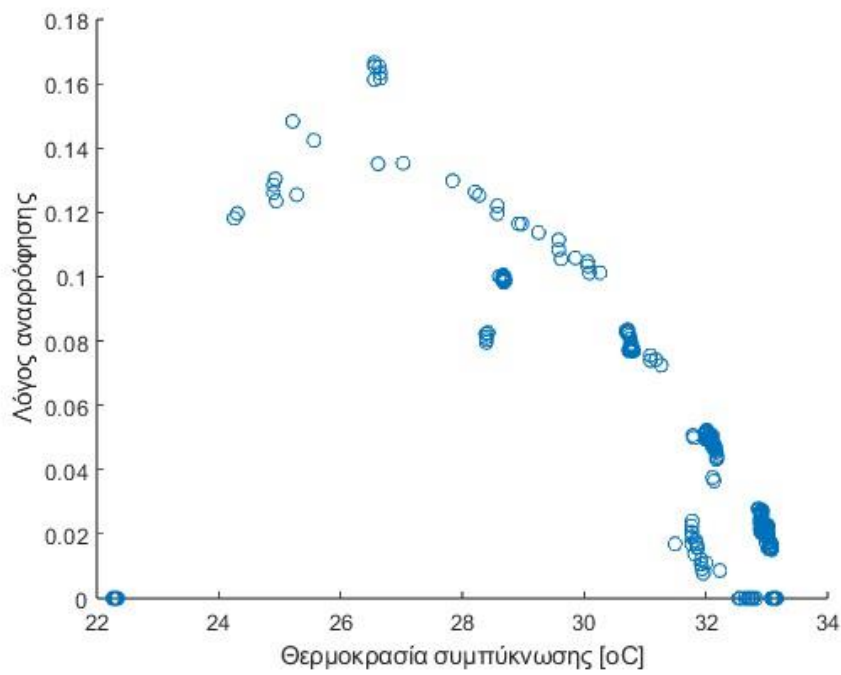
Σχήμα 59: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=14$ °C



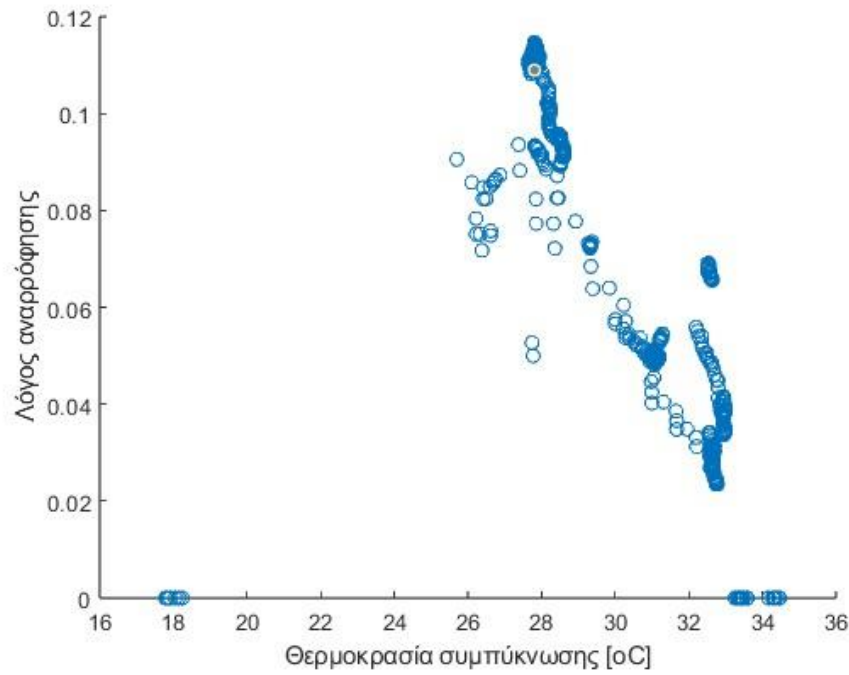
Σχήμα 60: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=15$ °C



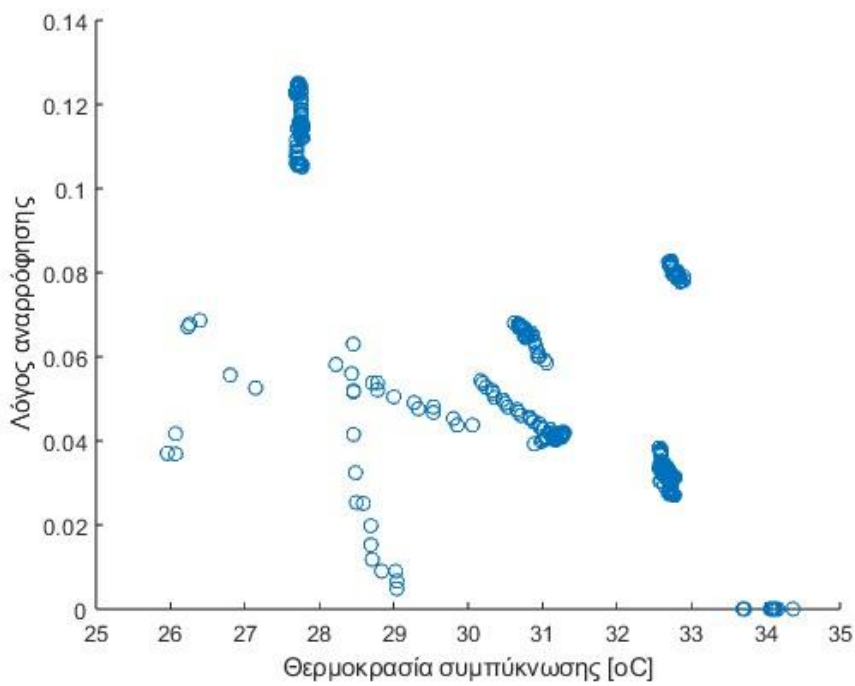
Σχήμα 61: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=16$ °C



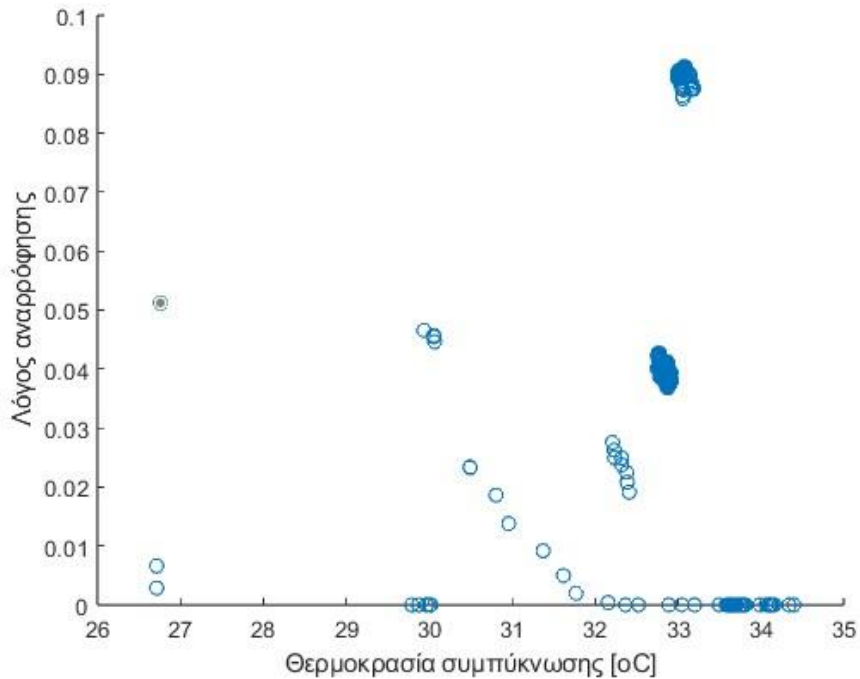
Σχήμα 62: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=17$ °C



Σχήμα 63: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=18 \text{ }^\circ\text{C}$

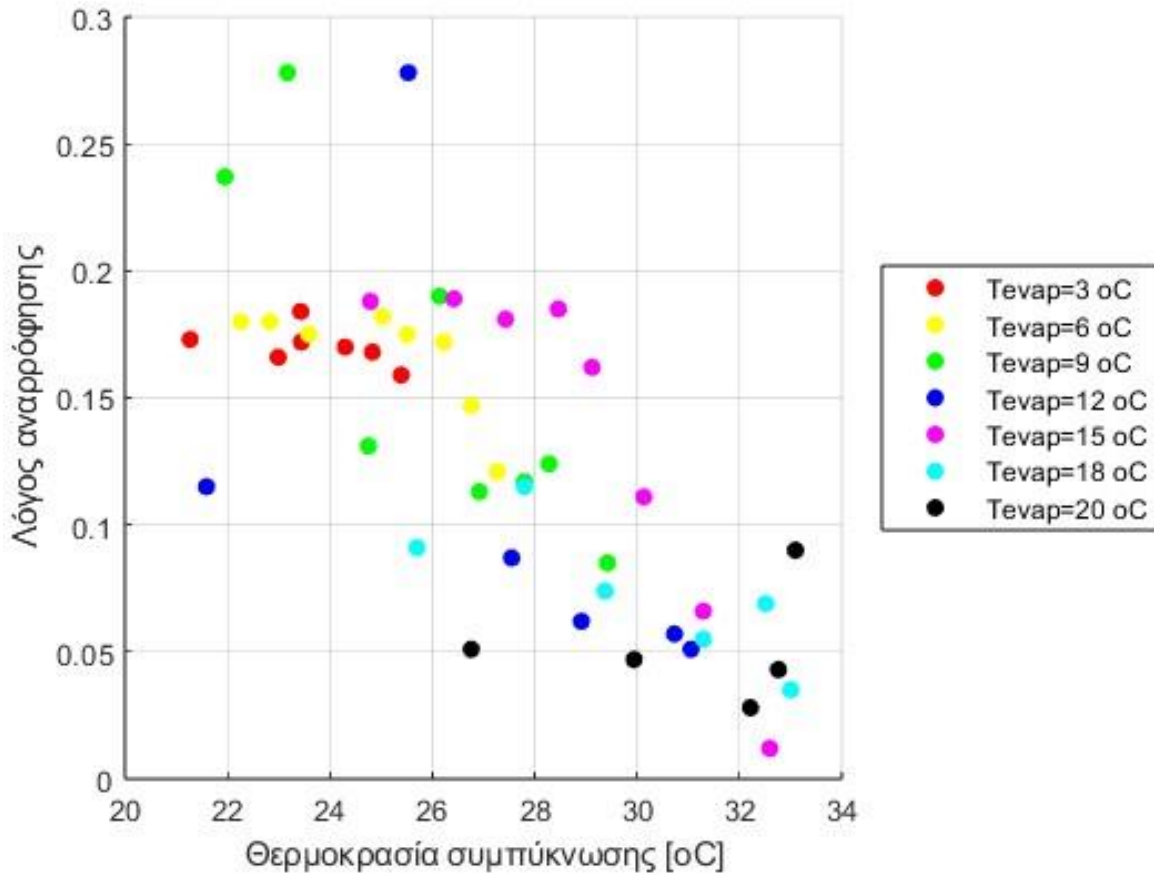


Σχήμα 64: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=19 \text{ }^\circ\text{C}$



Σχήμα 65: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{\text{evap}}=20$ °C

Για τα διαγράμματα του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο συναρτήσεως της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για τις διάφορες τιμές της θερμοκρασίας ατμοποίησης, παρατηρήθηκαν παρόμοιες μεταβολές με εκείνες των αντίστοιχων διαγραμμάτων του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς. Τα σημεία λειτουργίας συμβολίστηκαν με μικρούς μπλε κύκλους. Οι πιο πυκνές περιοχές των διαγραμμάτων υποδήλωσαν την υψηλή συχνότητα εμφάνισης των συγκεκριμένων τιμών του λόγου αναρρόφησης, για τις συνθήκες της περιοχής. Οι απόμακρες και πιο αραιές περιοχές των διαγραμμάτων ανέδειξαν την μεταβατική κατάσταση που επικρατούσε σε εκείνες τις περιοχές στον κύκλο ψύξης του ακροφυσίου. Με τον όρο μεταβατική κατάσταση, αναφερόταν το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η εκτονωτική βαλβίδα ήταν κλειστή και άρχιζε να ανοίγει ή ήταν ανοικτή και ξεκινούσε να μικραίνει το διάφραγμα της. Για την καλύτερη κατανόηση των μεταβολών του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο, με τις διαφορετικές συνθήκες θερμοκρασιών συμπύκνωσης και ατμοποίησης, σχεδιάστηκε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα με το σύμπλεγμα όλων των πυκνών περιοχών των διαγραμμάτων, για θερμοκρασίες ατμοποίησης από 3 έως 20 °C με βήμα 3 °C.



Σχήμα 66: Συγκεντρωτικό διάγραμμα λόγου αναρρόφησης ω

Η κατανομή των σημείων του συγκεντρωτικού διαγράμματος του λόγου αναρρόφησης ήταν αρκετά πανομοιότυπη με το αντίστοιχο διάγραμμα του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς. Συγκεκριμένα, για τις μεταβολές του λόγου αναρρόφησης:

- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 3 °C, η τιμή του λόγου αναρρόφησης ήταν σχετικά σταθερή και ίση με 0.17, για θερμοκρασίες συμπύκνωσης από 21 έως 25.5 °C.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 6 °C, παρατηρήθηκε η τιμή του λόγου αναρρόφησης να προσεγγίζει την τιμή 0.182 για θερμοκρασία συμπύκνωσης περίπου ίση με 25 °C. Στη συνέχεια παρατηρήθηκε μια συνεχόμενη φθίνουσα τάση μέχρι τη θερμοκρασία συμπύκνωσης των 27.5 °C, όπου ο λόγος αναρρόφησης προσέγγισε την τιμή 0.11.

- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 9 °C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 23.2 °C, η τιμή του λόγου αναρρόφησης προσέγγισε τη μέγιστη τιμή της τάξεως του 0.275. Στη συνέχεια ακολούθησε φθίνουσα πορεία έως τη θερμοκρασία συμπύκνωσης των 29.5 °C.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 12 °C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 25.6 °C, η τιμή του λόγου αναρρόφησης προσέγγισε τη μέγιστη τιμή της τάξεως του 0.275. Στη συνέχεια ακολούθησε φθίνουσα πορεία έως τη θερμοκρασία συμπύκνωσης των 31 °C.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 15 °C, το διάστημα της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για την οποία λειτούργησε το σύστημα ήταν από τους 24.8 έως τους 32.5 °C. Σε αυτό το διάστημα, ο λόγος αναρρόφησης μειωνόταν συνεχώς με φθίνοντα ρυθμό από την τιμή 0.19 μέχρι και την τιμή 0.01.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 18 °C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 27.9 °C, ο λόγος αναρρόφησης προσέγγισε την τιμή 0.12 και στη συνέχεια μειώθηκε στη τιμή 0.035 για θερμοκρασία συμπύκνωσης 33 °C.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 20 °C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 33 °C, η τιμή του λόγου αναρρόφησης ήταν ίση με 0.09.

Οι μεταβολές του λόγου αναρρόφησης βρέθηκαν σε άμεση συσχέτιση με τις τιμές της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και τη θερμοκρασία ατμοποίησης. Η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για σταθερές τιμές της θερμοκρασίας ατμοποίησης επέφερε μείωση της τιμής του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο. Αντίστοιχα, η αύξηση της θερμοκρασίας ατμοποίησης για σταθερές τιμές της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, προκάλεσε αύξηση του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο. Τα σημεία λειτουργίας όσο μεγάλωναν οι θερμοκρασίες ατμοποίησης και συμπύκνωσης, εντοπιζόνταν σε χαμηλότερα επίπεδα της τιμής του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο. Αυτό οφειλόταν στο γεγονός, ότι η αύξηση της πίεσης του οργανικού ρευστού στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης από τις αντλίες δε πραγματοποιήθηκε σε τέτοιο βαθμό, όπως είχε σχεδιαστεί. Άμεση συνέπεια αυτού, αποτέλεσε η καλύτερη λειτουργία του σε συνθήκες περιβάλλοντος και ψύξης, χαμηλότερων τιμών θερμοκρασίας.

Γενικότερα, ήταν ευδιάκριτη μια θετική συσχέτιση μεταξύ των διαγραμμάτων του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς και του λόγου αναρρόφησης. Αυτό το φαινόμενο ήταν απολύτως λογικό. Εξ ορισμού, ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς ισούται με το πηλίκο της ψυκτικής ισχύος προς τη θερμική. Η ψυκτική ισχύς είναι ίση με τη παροχή μάζας της δευτερεύουσας ροής επί τη διαφορά ενθαλπίας του οργανικού ρευστού στον ατμοποιητή ψύξης. Η θερμική ισχύς είναι ίση με την παροχή μάζας της πρωτεύουσας ροής επί τη διαφορά ενθαλπίας του οργανικού ρευστού στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης. Οπότε, ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς ισούται με τον λόγο αναρρόφησης στο ακροφύσιο επί τη διαφορά ενθαλπίας στον ατμοποιητή ψύξης προς τη διαφορά ενθαλπίας στον

ατμοποιητή υψηλής πίεσης (Εξίσωση (8)). Συνεπώς, τα δυο αυτά μεγέθη είναι ανάλογα, με αποτέλεσμα η θετική συσχέτισή τους από τα διαγράμματα να ήταν αναμενόμενη και ορθή. Η επαλήθευση της αναλογίας μεταξύ του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς του ψυκτικού κύκλου και του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο, ενίσχυσε την αξιοπιστία των πειραματικών αποτελεσμάτων της εγκατάστασης SunClim.

$$COP_{th} = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_g} \cdot \frac{h_4 - h_3}{h_2 - h_1} = \omega \cdot \frac{h_4 - h_3}{h_2 - h_1} \quad (8)$$

3.2.3 Ανάλυση και αποτελέσματα της διαδικασίας των μετρήσεων

Στην προηγούμενη ενότητα, πραγματοποιήθηκε παράθεση των αποτελεσμάτων του συνόλου των μετρήσεων για τα δύο βασικά μεγέθη του κύκλου ψύξης του συστήματος, δηλαδή τον θερμικό συντελεστή συμπεριφοράς και τον λόγο αναρρόφησης στο ακροφύσιο. Επίσης, είναι σημαντικό για την κατανόηση της διαδικασίας των μετρήσεων του συστήματος SunClim, η επεξήγηση των βημάτων για την περάτωση ενός πειράματος, καθώς και η ανάδειξη της πορείας των τιμών συγκεκριμένων μεγεθών συναρτήσει του χρόνου περάσματος από την αρχή ενός πειράματος.

Πρώτο βήμα για την αρχή μιας νέας πειραματικής διεργασίας συνιστούσε ο έλεγχος της συνδεσμολογίας των επιμέρους υποσυστημάτων. Προτού ξεκινήσει ένα πείραμα, πραγματοποιούταν έλεγχος για την ορθή σύνδεση του συστήματος ECC με το σύστημα του ηλιακού πεδίου και συγκεκριμένα με το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας. Παράλληλα, ξεκινούσε η λειτουργία του κυκλοφορητή του ατμοποιητή υψηλής πίεσης, με σκοπό τη προθέρμανσή του. Επιπλέον, γινόταν αποκοπή του υδραυλικού συστήματος με τα υπόλοιπα συστήματα του Εργαστηρίου Ατμοκινητήρων και Λεβήτων, ώστε να αποφεύγονται απώλειες παροχής κατά τη λειτουργία και έπειτα συνδεόταν με το σύστημα ECC. Τελικό βήμα, πριν την έναρξη του πειράματος συνιστούσε ο ορισμός των επιθυμητών τιμών θερμοκρασίας, κρύου και ζεστού νερού, από το υδραυλικό κύκλωμα. Οι θερμοκρασίες αυτές επιτυγχάνονταν χάρη στη λειτουργία ενός ψύκτη και μίας αντίστασης, για την κάλυψη των ψυκτικών και θερμικών αναγκών του υδραυλικού κυκλώματος, αντίστοιχα. Οι ζητούμενες θερμοκρασίες καθορίζονταν ανάλογα τις ενεργειακές και σχεδιαστικές απαιτήσεις του πειράματος για την τροφοδοσία των εναλλακτών συμπύκνωσης, ατμοποίησης και υπόψυξης. Σε περιπτώσεις έλλειψης της απαιτούμενης θερμότητας από το ηλιακό πεδίο, κυρίως τους χειμερινούς μήνες λόγω έλλειψης ηλιοφάνειας, αναγκαία ήταν η προσφορά θερμότητας στο δοχείο του ηλιακού πεδίου και από το σύστημα καυστήρα. Για τη συνεισφορά του συστήματος του καυστήρα, αναγκαία ήταν η εκκίνηση της καύσης λίγη ώρα νωρίτερα από το πείραμα, με σκοπό την απόκτηση της ζητούμενης θερμοκρασίας της ζεστής τροφοδοσίας στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης

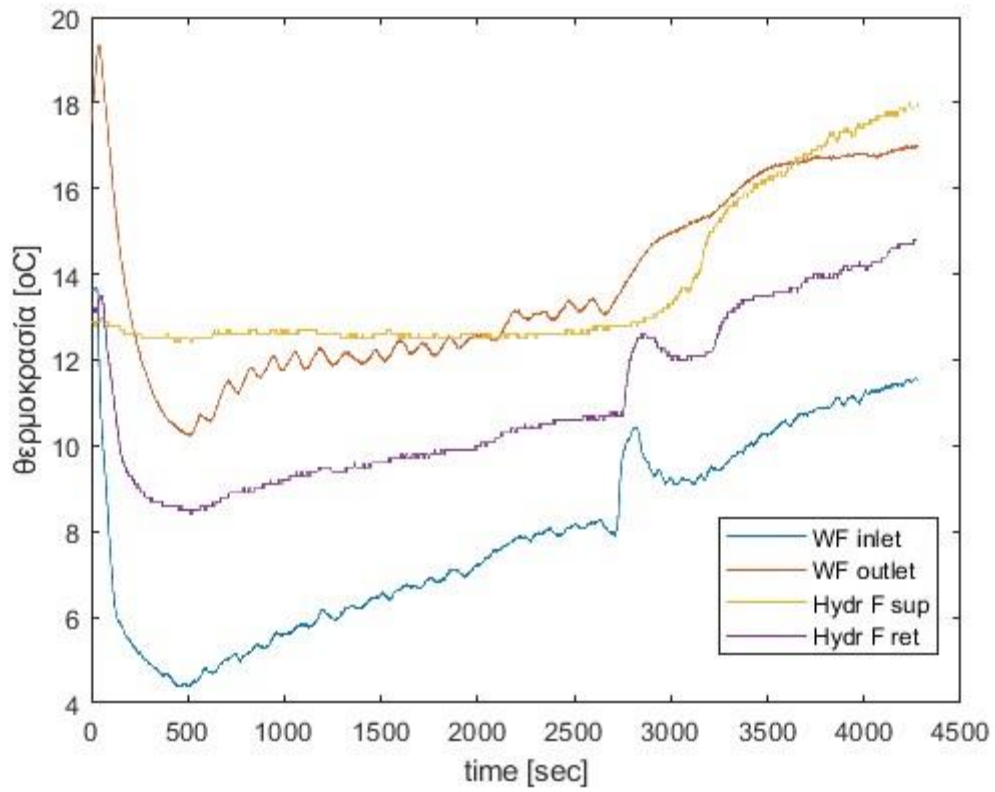
του συστήματος ECC. Με την περάτωση των παραπάνω ενεργειών, η πειραματική διεργασία ήταν έτοιμη να αρχίσει.

Αρχικά, ενεργοποιούταν η καταγραφή των δεδομένων από το λογισμικό LabView και η αποθήκευσή του σε μορφή '.csv' στον υπολογιστή. Στη συνέχεια, άρχιζε η αύξηση του φορτίου των αντλιών μέχρι τη μέγιστη τιμή τους. Το οργανικό ρευστό αφηνόταν να κυκλοφορήσει εντός των σωληνώσεων, ώστε να κινητοποιηθεί και ταυτόχρονα να απορροφήσει τη προσφερόμενη θερμότητα στον εναλλάκτη του ατμοποιητή υψηλής πίεσης. Έπειτα, άνοιγε η σωληνοειδή βαλβίδα (NC) της πρωτεύουσας ροής του ακροφυσίου. Μετά από ένα μικρό χρονικό διάστημα, έκλεινε η σωληνοειδής βαλβίδα (NO) bypass. Τέλος, αφού είχε αποκατασταθεί η ροή του εργαζόμενου μέσου, άνοιγε η σωληνοειδής βαλβίδα (NC) της δευτερεύουσας ροής του ακροφυσίου και ενεργοποιούταν το ηλεκτρονικό σύστημα της εκτονωτικής βαλβίδας. Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διεργασίας, σε μεταβολές υποβαλλόντουσαν μόνο οι θερμοκρασίες τροφοδοσίας των νερών του υδραυλικού κυκλώματος. Για τη λήξη του πειράματος, ακολουθούταν η αντίθετη διαδικασία, από αυτή της έναρξής του.

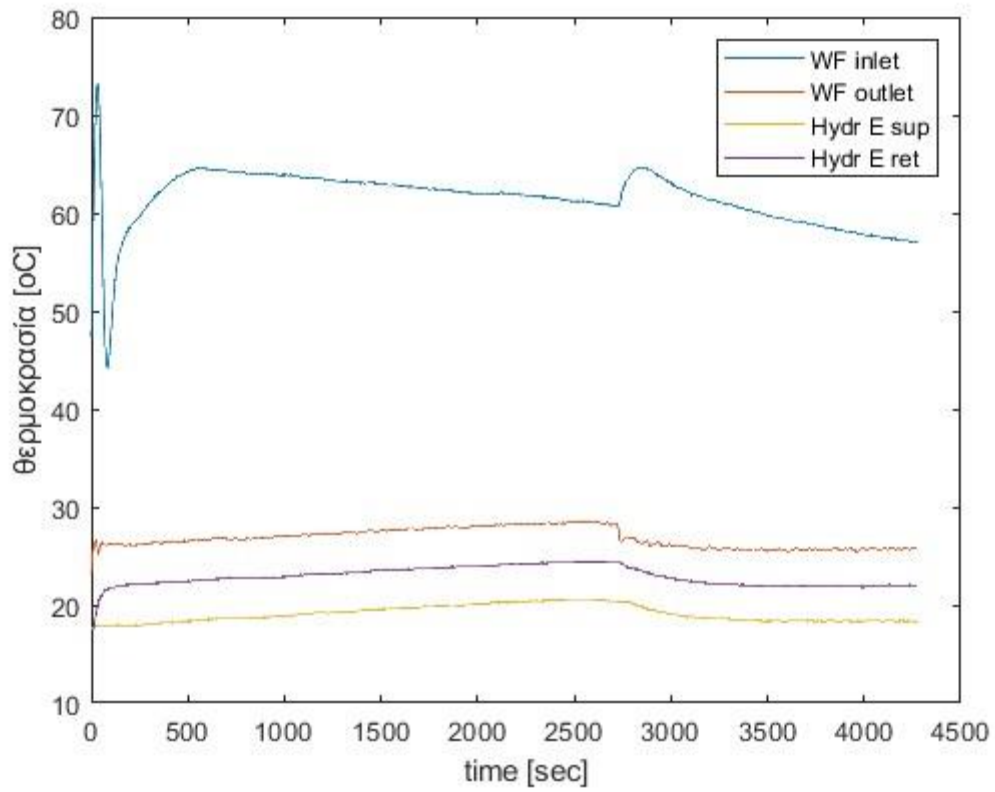
Για την κατανόηση των φυσικών μεταβολών κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, κατασκευάστηκε κώδικας στο λογισμικό Matlab, με σκοπό τη δημιουργία διαγραμμάτων διάφορων σημαντικών μεγεθών του κύκλου ψύξης, συναρτήσε του χρόνου που πέρασε από την αρχή του πειράματος (βλ. Παράρτημα: Κώδικας 3). Τα δεδομένα αντλήθηκαν από τη μέτρηση που χρησιμοποιήθηκε και για τα ηλιακά αποτελέσματα σε προηγούμενη ενότητα, δηλαδή το πείραμα στις 20/3/2023 και ώρα 13:22:22 μέχρι 14:33:37.

Ο κώδικας ξεκινούσε με την αρχικοποίηση ενός κενού πίνακα, στον οποίο θα τοποθετούνταν τα πειραματικά δεδομένα. Επόμενο βήμα συνιστούσε η άντληση δεδομένων από το αρχείο excel του συγκεκριμένου πειράματος. Στη συνέχεια, δημιουργούνταν τα διανύσματα των μεγεθών, τα οποία θα χρειαζόντουσαν στους περαιτέρω υπολογισμούς ή θα ενσωματώνονταν στα διαγράμματα. Στη συνέχεια, μέσα σε μια επαναληπτική διαδικασία υπολογιζόντουσαν τα υπόλοιπα ζητούμενα μεγέθη, που θα χρειαζόντουσαν για το σχεδιασμό των διαγραμμάτων. Τέλος, κατασκευάζονταν συγκεκριμένα διαγράμματα, χρήσιμα για την κατανόηση της φυσικής εξέλιξης του πειράματος.

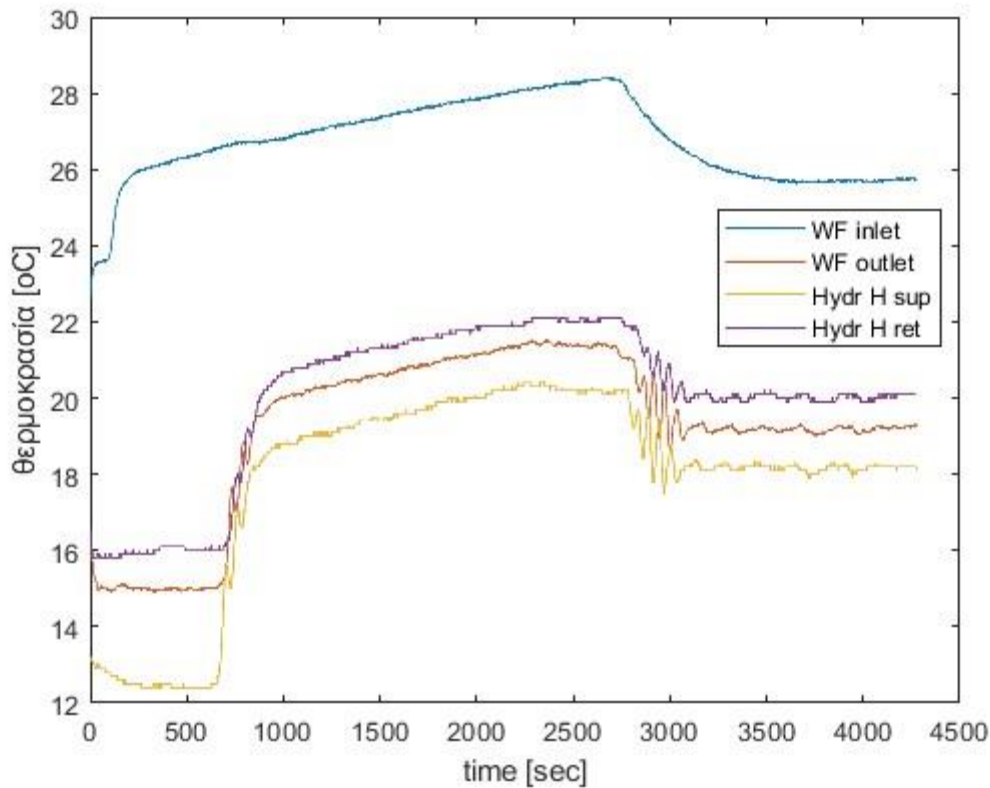
Το πρώτο διάγραμμα, που παρατίθεται, περιέχει τις θερμοκρασίες των ρευμάτων που διαπερνούσαν τους εναλλάκτες του συστήματος ECC, συναρτήσε του χρόνου που πέρασε από την αρχή του πειράματος (Σχήμα 67, Σχήμα 68, Σχήμα 69).



Σχήμα 67: Θερμοκρασίες ρευμάτων ατμοποιητή ψύξης

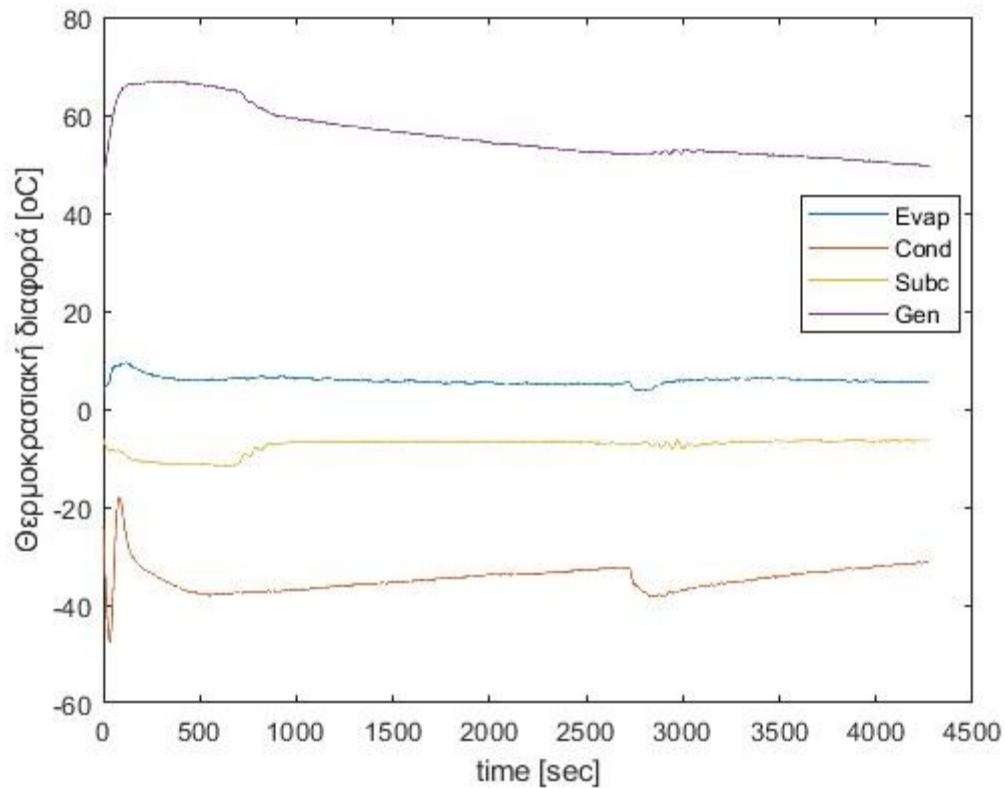


Σχήμα 68: Θερμοκρασίες ρευμάτων συμπυκνωτή



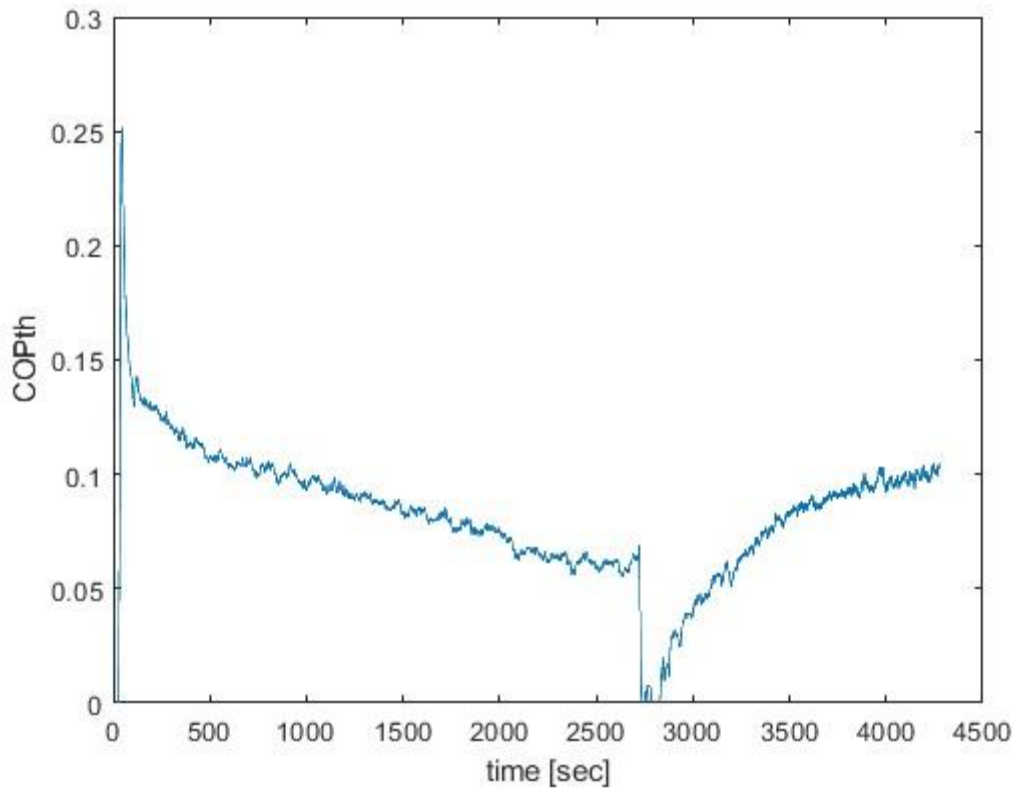
Σχήμα 69: Θερμοκρασίες ρευμάτων εναλλάκτη υπόψυξης

Το πείραμα ξεκίνησε με τροφοδοσία του ατμοποιητή ψύξης με νερό θερμοκρασίας 12.5 βαθμών κελσίου για αρκετό χρονικό διάστημα, μέχρι τη χρονική στιγμή, περίπου, 2800 δευτερολέπτων. Παρόλο που η τροφοδοσία με νερό στον ατμοποιητή πραγματοποιήθηκε με σταθερή θερμοκρασία, στο ρεύμα της επιστροφής νερού στο υδραυλικό σύστημα παρατηρήθηκε μία συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι η θερμοκρασία τροφοδοσίας από το υδραυλικό κύκλωμα με νερό του συμπυκνωτή και του εναλλάκτη υπόψυξης, συνεχώς και με χαμηλό ρυθμό αυξανόταν. Έπειτα, η τροφοδοσία του νερού στον ατμοποιητή αφέθηκε να ανέβει σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ενώ οι θερμοκρασίες τροφοδοσίας του συμπυκνωτή και του εναλλάκτη υπόψυξης παρέμειναν σταθερές με τιμή της τάξεως των 18 βαθμών κελσίου. Σε εκείνη τη περίοδο η θερμοκρασία επιστροφής του νερού στο υδραυλικό σύστημα από τον ατμοποιητή αυξανόταν σε αναλογία με την αύξηση της θερμοκρασίας τροφοδοσίας. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας των επιστροφών των ρευμάτων νερού του συμπυκνωτή και του εναλλάκτη υπόψυξης είχαν θετική συσχέτιση με τις μεταβολές των θερμοκρασιών των αντίστοιχων νερών τροφοδοσίας. Οι θερμοκρασιακές διαφορές των εναλλακτών του συστήματος ECC γίνονται καλύτερα αντιληπτές στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 70).



Σχήμα 70: Θερμοκρασιακές διαφορές εργαζόμενου μέσου στους εναλλάκτες θερμότητας

Όπως φαίνεται, και στους 4 εναλλάκτες στα πρώτα λεπτά το σύστημα περνούσε μια φάση αποκατάστασης. Η φάση αυτή περιέλαβε απότομες μεταβολές των θερμοκρασιακών διαφορών. Σύντομα, όμως, οι θερμοκρασιακές διαφορές αποκαταστάθηκαν και το σύστημα ήρθε σε ηρεμία. Ενδιαφέρον υπάρχει στον τρόπο με τον οποίο οι παραπάνω συνθήκες και οι μεταβολές τους, επηρέασαν τον θερμικό συντελεστή συμπεριφοράς του κύκλου ψύξης. Οι τιμές του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς για κάθε χρονική στιγμή, που πέρασε από την αρχή του πειράματος, διαφαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 71):

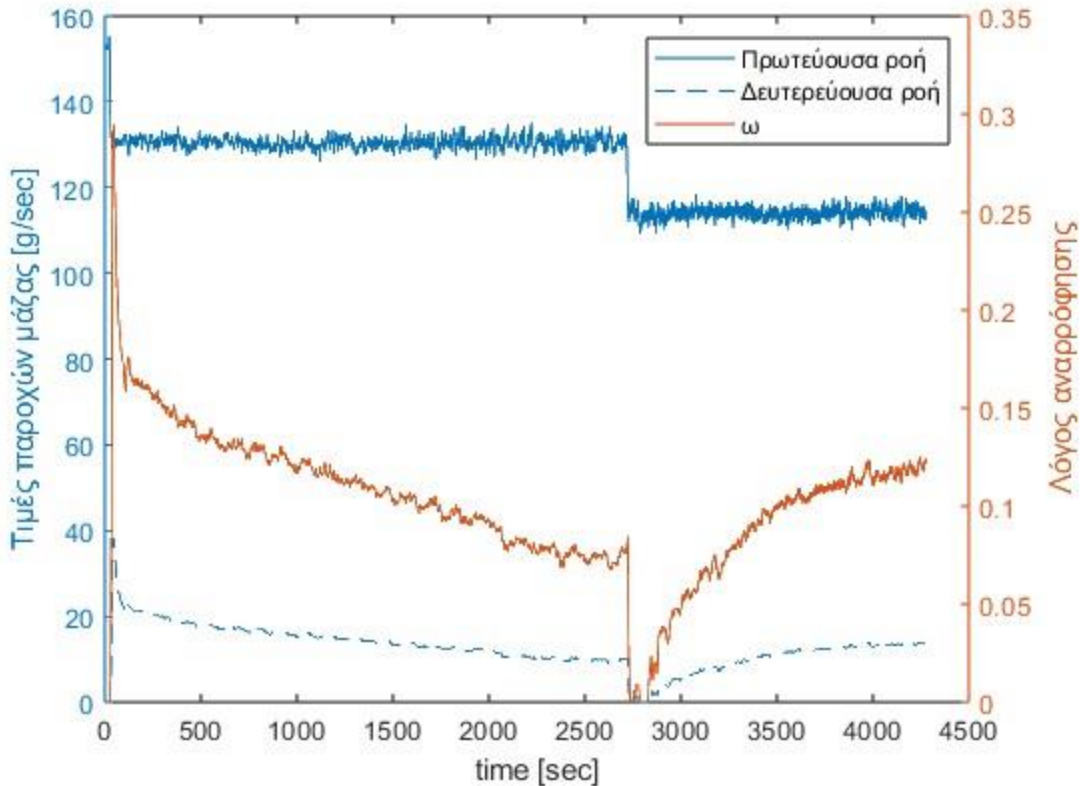


Σχήμα 71: Θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς κύκλου ψύξης

Στην αρχή του πειράματος έως ότου αποκαταστάθηκε η ροή του οργανικού ρευστού, ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς εμφάνιζε απότομες μεταβολές. Κατά τη διάρκεια της σταθεροποίησης της θερμοκρασίας τροφοδοσίας νερού στον ατμοποιητή και ταυτόχρονα της συνεχής αύξησης της θερμοκρασίας των νερών τροφοδοσίας του συμπυκνωτή και του εναλλάκτη υπόψυξης, παρατηρήθηκε διαρκής πτώση του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς με φθίνοντα ρυθμό. Στη συνέχεια στη μεταβατική κατάσταση, προκλήθηκαν και πάλι αναταράξεις στη καμπύλη του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς. Τέλος, με την αύξηση του νερού τροφοδοσίας του ατμοποιητή και τη σταθεροποίηση των νερών τροφοδοσίας του συμπυκνωτή και του εναλλάκτη υπόψυξης, οι τιμές του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς άρχισαν και πάλι να αυξάνονται με φθίνοντα ρυθμό.

Οι προαναφερθείσες μεταβολές του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς είχαν άμεση αλληλεπίδραση με τις μεταβολές του ποσοστού ανοίγματος της εκτονωτικής βαλβίδας. Το ποσοστό ανοίγματος, πρακτικά, επηρέαζε την παροχή της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ροής. Επομένως, και τον λόγο αναρρόφησης. Όπως είχε αναλυθεί και παραπάνω, ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς βρέθηκε σε αναλογία με τη τιμή του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο. Συνεπώς, στο διάγραμμα των παροχών μάζας της

πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ροής και του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο (Σχήμα 72) αναμένονταν αντίστοιχες μεταβολές με αυτές που παρατηρήθηκαν στο διάγραμμα του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς.

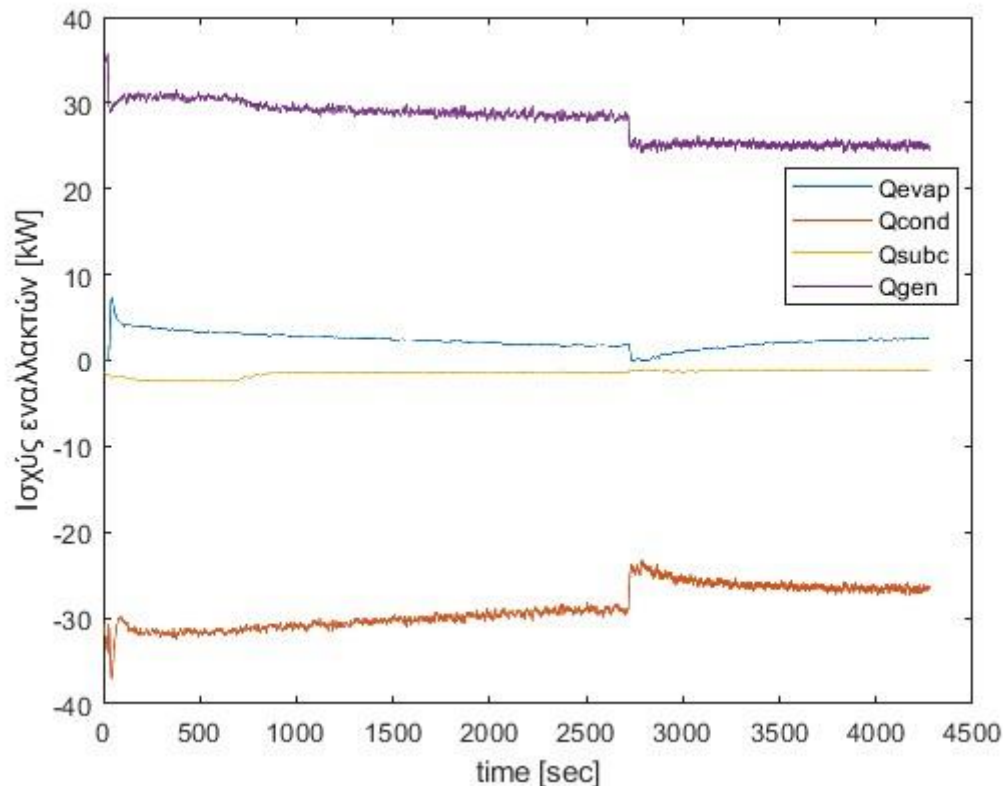


Σχήμα 72: Παροχές μάζας και λόγος αναρρόφησης στο ακροφύσιο

Όπως αναμενόταν η καμπύλη του λόγου αναρρόφησης συναρτήσει του χρόνου από την αρχή του πειράματος ακολούθησε παρόμοια καμπύλη με αυτή του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς του κύκλου ψύξης του ακροφυσίου. Η πτώση στην πρώτη φάση του πειράματος, οφειλόταν στο γεγονός πως ενώ θερμοκρασία της ατμοποίησης παρέμενε σταθερή, η θερμοκρασία της συμπύκνωσης και της υπόψυξης των νερών αυξανόταν. Η αύξηση της μεταξύ τους διαφοράς δυσχέραινε την υπερθέρμανση του οργανικού ρευστού μετά τον ατμοποιητή ψύξης, με συνέπεια το σταδιακό κλείσιμο του διαφράγματος της εκτονωτικής βαλβίδας. Στη μεταβατική φάση, μέχρι και την σταθεροποίηση των συνθηκών του κύκλου ψύξης, η εκτονωτική για ένα μικρό χρονικό διάστημα έκλεισε και δε παραγόταν ψύξη. Στη συνέχεια, η αύξηση της θερμοκρασίας τροφοδοσίας του νερού στον ατμοποιητή ψύξης, με την ταυτόχρονη σταθεροποίηση των θερμοκρασιών των νερών τροφοδοσίας του

συμπυκνωτή και του εναλλάκτη υπόψυξης, διευκόλυνε τη παραγωγή ψύξης με συνέπεια την αύξηση του διαφράγματος της εκτονωτικής βαλβίδας με φθίνοντα ρυθμό.

Η επιρροή των παροχών της δευτερεύουσας και πρωτεύουσας ροής του ακροφυσίου στη παραγόμενη ή καταναλισκόμενη θερμική ισχύ των εναλλακτών του συστήματος ECC, ήταν ευδιάκριτη στο πέρασμα του χρόνου. Αυτό γίνεται κατανοητό στο διάγραμμα της μεταβολής των ισχύων των εναλλακτών του συστήματος ECC συναρτήσει του χρόνου από την αρχή του πειράματος (Σχήμα 73).

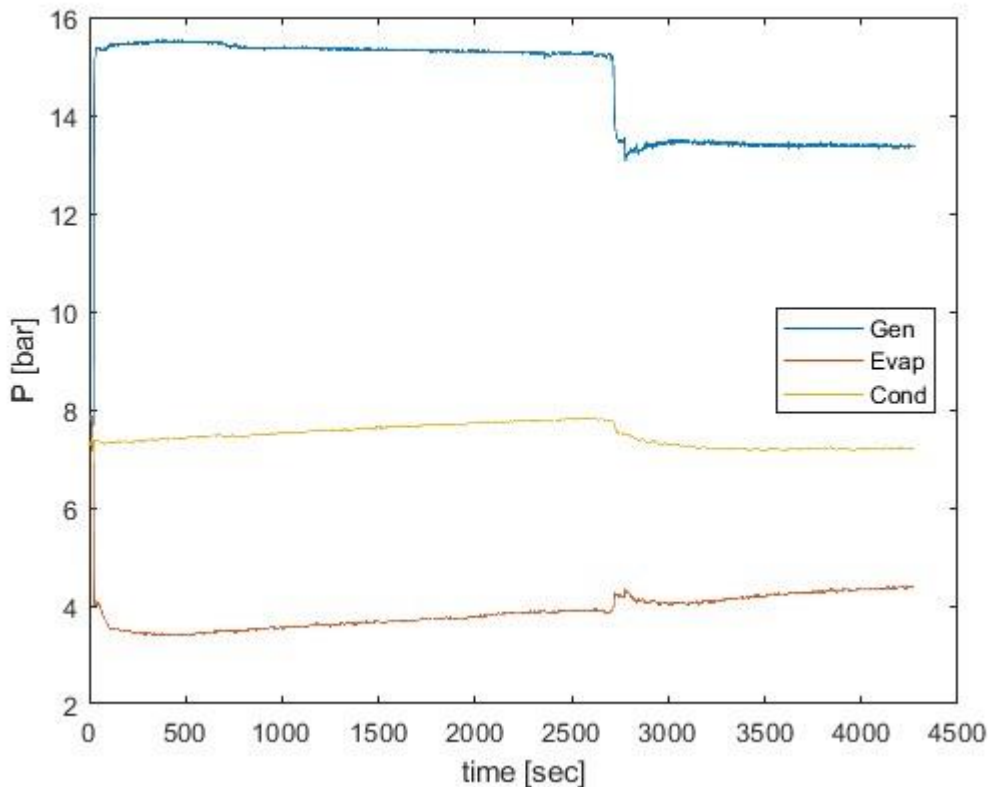


Σχήμα 73: Ισχύς των εναλλακτών θερμότητας

Η θερμική ισχύς σε όλη τη πειραματική διεργασία, δεν εμφάνισε συνεχόμενες μεταβολές. Υπήρξε σταθερότητα στις τιμές της με εξαίρεση δύο σημεία. Την αρχή του πειράματος μέχρι την αποκατάσταση της ροής του οργανικού ρευστού και στη μεταβατική φάση όπου υπήρξε απότομη πτώση εξαιτίας της πτώσης της παροχής μάζας της πρωτεύουσας ροής. Οι υπόλοιπες παραγωγές ή καταναλώσεις ισχύος εμφάνισαν μια μικρή θετική ή αρνητική κλίση. Αυτές οι κλίσεις ακολούθησαν τις μεταβολές των θερμοκρασιακών διαφορών στους εναλλάκτες. Το κρίσιμο σημείο φαίνεται και σε αυτό το διάγραμμα πώς ήταν η μεταβατική

φάση. Οι εναλλάκτες θερμότητας εμφάνισαν απότομη μεταβολή, με εξαίρεση τον εναλλάκτη υπόψυξης.

Σημαντικό στοιχείο για την ανάλυση της μέτρησης και τη κατανόηση των φυσικών φαινομένων και μεταβολών, συνίστησε η απεικόνιση των πιέσεων του ακροφυσίου συναρτήσει του χρόνου που πέρασε από την αρχή του πειράματος (Σχήμα 74).



Σχήμα 74: Πιέσεις του ακροφυσίου

Η πίεση της πρωτεύουσας ροής που εξερχόταν από τον ατμοποιητή υψηλής πίεσης και κατευθυνόταν προς το ακροφύσιο ξεκίνησε με σταθερή περίπου τιμή της τάξεως των 15.5 bar. Στη συνέχεια, στη μεταβατική φάση υπέκυψε σε σημαντική πτώση και σταθεροποιήθηκε και πάλι στη τιμή των 13.5 bar. Η τιμή της πίεσης της δευτερεύουσας ροής στην έξοδο του ατμοποιητή ψύξης, καθώς εισερχόταν στο ακροφύσιο, ξεκίνησε από μια χαμηλή τιμή της τάξεως των 3.6 bar και αυξανόταν σιγά αλλά σταδιακά μέχρι τη μεταβατική φάση στη τιμή των 3.8 bar. Σε εκείνο το σημείο, προκλήθηκαν μερικές διαταραχές και έπειτα συνέχισε την ανοδική της πορεία με σταθερό περίπου ρυθμό. Από την άλλη, η πίεση της ροής εξόδου από το ακροφύσιο προς τον συμπυκνωτή, είχε αρχική τιμή 7.5 bar και μικρή θετική κλίση. Στη μεταβατική φάση, μετά τις αναταραχές η τιμή

επανήλθε στα 7.5 bar περίπου και στη συνέχεια μειωνόταν με μικρό φθίνοντα ρυθμό. Μετά τη μεταβατική φάση, η αύξηση της πίεσης της δευτερεύουσας ροής μετά τον ατμοποιητή ψύξης και η μείωση της πίεσης της ροής εξόδου από το ακροφύσιο, οφείλονταν στην αύξηση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας του ατμοποιητή και τη μείωση και, εν τέλει, σταθεροποίηση του νερού τροφοδοσίας του συμπυκνωτή, αντίστοιχα.

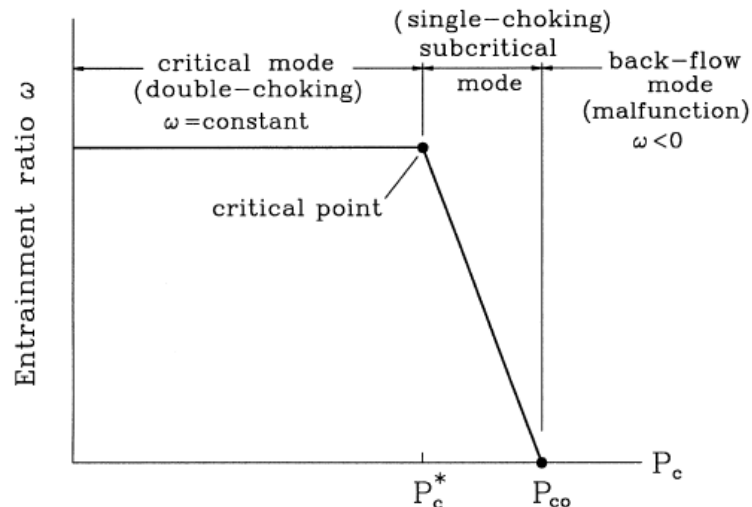
Συμπερασματικά, κατά τη διάρκεια της πειραματικής διεργασίας αναδείχθηκε η σημαντική αλληλεξάρτηση των σημαντικών μεγεθών του κύκλου ψύξης με τις τιμές της θερμοκρασίας των νερών του υδραυλικού κυκλώματος στους εναλλάκτες θερμότητας του συστήματος ECC. Από τα διαγράμματα, ακόμη, έγιναν εμφανείς οι στενές σχέσεις των κρίσιμων μεγεθών του κύκλου ψύξης μεταξύ τους. Αυτό είχε ως συμπέρασμα, να επαληθευθεί η μεταξύ τους επιρροή όπως ίσχυε από τις θεωρητικές τους σχέσεις.

3.2.4 Θεωρητικό μοντέλο του κύκλου ψύξης με ακροφύσιο

Τελικό στάδιο της αξιολόγησης των πειραματικών αποτελεσμάτων αποτελεί η σύγκρισή τους με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Διάφορα θεωρητικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί πάνω στη μελέτη του κύκλου ψύξης με ακροφύσιο. Συγκεκριμένα, η θεωρητική ανάλυση του συστήματος ECC βασίζεται στη θεωρία της ανάμειξης σταθερής πίεσης (constant pressure mixing theory) στο ακροφύσιο (Huang et al. , [19]). Σύμφωνα με αυτή, η πρωτεύουσα και η δευτερεύουσα ροή αναμειγνύονται στην έξοδο του ακροφυσίου με ίδια πίεση.

Πρακτικά, πραγματοποιούνται δύο φαινόμενα στραγγαλισμού των ροών εντός του ακροφυσίου. Το ένα συνιστά ο στραγγαλισμός της πρωτεύουσας ροής κατά μήκος του ακροφυσίου. Το δεύτερο εντοπίζεται στον στραγγαλισμό της δευτερεύουσας ροής στο κομμάτι της σταθερής διατομής του ακροφυσίου, όπου αναπτύσσει υπερηχητική ταχύτητα. Κατά τη λειτουργία του κύκλου του ακροφυσίου μπορούν να εμφανιστούν 3 διαφορετικές καταστάσεις (Σχήμα 75). Η πρώτη είναι ο διπλός στραγγαλισμός (double choking) που αντιστοιχεί στην κανονική λειτουργία του ακροφυσίου, κατά τον οποίο η πίεση της ροής στην έξοδο του ακροφυσίου είναι μικρότερη ή ίση από την κρίσιμη πίεση και τόσο η πρωτεύουσα, όσο και η δευτερεύουσα ροή στραγγαλίζονται. Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο παραμένει σταθερή. Η δεύτερη κατάσταση χαρακτηρίζεται από τον στραγγαλισμό μόνο της πρωτεύουσας ροής, με την πίεση εξόδου να είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη τιμή και ταυτόχρονα μικρότερη από την τιμή περιορισμού της λειτουργίας του ακροφυσίου. Η τιμή του λόγου αναρρόφησης μεταβάλλεται συναρτήσει της πίεσης εξόδου. Τρίτη περίπτωση συνιστά η αντίστροφη ροή (back-flow), κατά την οποία η πίεση στην έξοδο είναι μεγαλύτερη από τη τιμή περιορισμού της λειτουργίας του ακροφυσίου, με συνέπεια την αδυναμία λειτουργίας τους. Καμία από τις δύο ροές δε στραγγαλίζεται και ο λόγος αναρρόφησης λαμβάνει τιμές μικρότερες ή ίσες

του μηδενός. Είναι λογικό πως το ακροφύσιο αποκτά καλύτερη απόδοση στην πρώτη κατάσταση, δηλαδή στη κρίσιμη λειτουργία.

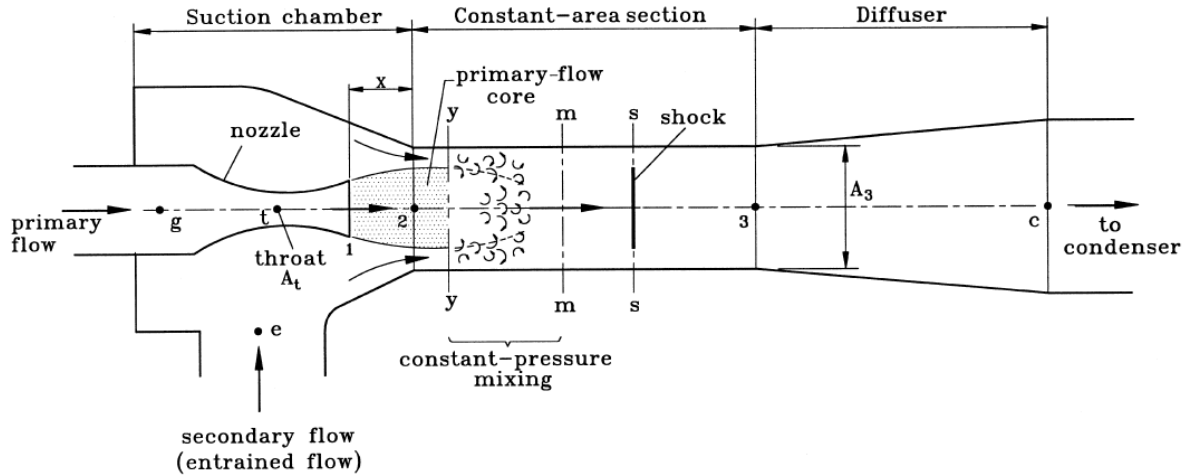


Σχήμα 75: Λειτουργικές καταστάσεις ακροφυσίου [19]

Η πρωτεύουσα ροή εξέρχεται από το ακροφύσιο στραγγαλισμένη χωρίς να έχει έρθει σε επαφή με τη δευτερεύουσα, δημιουργώντας έναν συγκλίνοντα διαχύτη για αυτήν. Η δευτερεύουσα ροή εισέρχεται στον συγκλίνοντα διαχύτη και αναπτύσσει την ταχύτητα ήχου σε ένα σημείο, τον θεωρητικό λαιμό. Μετά από αυτό, τα δύο ρεύματα αναμειγνύονται με παρόμοια πίεση. Τόσο ο υποθετικός λαιμός όσο και η ανάμειξη των ροών, θεωρείται πως εντοπίζονται εντός της περιοχής της σταθερής διατομής. Ακόμη, συγκεκριμένες υποθέσεις χρειάζονται για τη μονοδιάστατη θεωρητική ανάλυση του ακροφυσίου. Συγκεκριμένα:

- Η ροή εντός του ακροφυσίου είναι σταθερή και μονοδιάστατη.
- Η κινητική ενέργεια στην είσοδο της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ροής, καθώς και στην έξοδο του διαχύτη θεωρείται αμελητέα.
- Για τις απώλειες της τριβής και της ανάμειξης των ροών, χρησιμοποιούνται ειδικοί εμπειρικοί συντελεστές, σχετιζόμενοι με τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης.
- Μετά τον στραγγαλισμό της, η πρωτεύουσα ροή δεν αναμειγνύεται με τη δευτερεύουσα ροή, μέχρι μια υποτιθέμενη διατομή $\gamma\text{-}\gamma$ (Σχήμα 76), τον υποθετικό λαιμό, που εντοπίζεται εντός του κομματιού σταθερής διατομής.
- Οι δύο ροές αναμειγνύονται μετά τη διατομή $\gamma\text{-}\gamma$ με ίδια πίεση $P_{p\gamma}=P_{s\gamma}$, πριν τη κρούση (shock), που συμβαίνει σε μια διατομή $s\text{-}s$.

- Η δευτερεύουσα ροή στραγγαλίζεται στη διατομή γ-γ, τον υποθετικό λαιμό.
- Το εσωτερικό τοίχωμα του ακροφυσίου θεωρείται αδιαβατικό.



Σχήμα 76: Συμβολισμός περιοχών ακροφυσίου [19]

Για τη διαδικασία του θεωρητικού υπολογισμού της συμπεριφοράς του ακροφυσίου, είναι αναγκαία η γνώση των χαρακτηριστικών γεωμετρικών μεγεθών του. Τα μεγέθη αυτά φαίνονται στον Πίνακα 7: Διαστάσεις ακροφυσίου.

Στην ακόλουθη υπολογιστική διαδικασία, ο συμβολισμός της θέσης των αναφερόμενων μεγεθών θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση δείκτη του αντίστοιχου συμβολισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 76: Συμβολισμός περιοχών ακροφυσίου.

Οι υπολογισμοί ξεκινούν με την προσέγγιση της παροχής μάζας της πρωτεύουσας ροής στη κατάσταση στραγγαλισμού εντός του ακροφυσίου, με την χρήση της πίεσης και θερμοκρασίας της πρωτεύουσας ροής στην είσοδο και τη διατομή του λαιμού, στην ακόλουθη σχέση:

$$\dot{m}_p = \frac{P_g \cdot A_t}{\sqrt{T_g}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{R} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \cdot \sqrt{\eta_p} \quad (9)$$

Όπου, η_p ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης της συμπιεστής ροής στο ακροφύσιο.

Στη συνέχεια, με τη χρήση της διατομής στην έξοδο του ακροφυσίου της πρωτεύουσας ροής (Σχήμα 76, θέση 1), πριν το κομμάτι σταθερής διατομής, ο αριθμός Mach και η πίεση σε εκείνη τη θέση προκύπτουν ως εξής:

$$\left(\frac{A_{p1}}{A_t}\right)^2 = \frac{1}{M_{p1}^2} \cdot \left[\frac{2}{\gamma+1} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{p1}^2\right) \right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \quad (10)$$

$$\frac{P_g}{P_{p1}} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{p1}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (11)$$

Έπειτα, η πίεση ανάμειξης των ρευμάτων υπολογίζεται με τη ενσωμάτωση της πίεσης και θερμοκρασίας εισόδου της δευτερεύουσας ροής με τη σχέση:

$$\frac{P_e}{P_{sy}} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{sy}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (12)$$

Σε εκείνο το σημείο η δευτερεύουσα ροή αποκτά ηχητική ταχύτητα, οπότε λαμβάνεται το $M_{sy}=1$. Κατόπιν, υπολογίζονται η διατομή και ο αριθμός Mach της πρωτεύουσας ροής στη τομή γ-γ:

$$\frac{P_{py}}{P_{p1}} = \frac{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{p1}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{py}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \quad (13)$$

$$\frac{A_{py}}{A_{p1}} = \frac{\frac{\varphi_p}{M_{py}} \cdot \left[\frac{2}{\gamma+1} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{py}^2\right) \right]^{\frac{\gamma-1}{2(\gamma-1)}}}{\frac{1}{M_{p1}} \cdot \left[\frac{2}{\gamma+1} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{p1}^2\right) \right]^{\frac{\gamma-1}{2(\gamma-1)}}} \quad (14)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, η πίεση $P_{py}=P_{sy}$, από την υπόθεση της ανάλυσης και ο συντελεστής φ_p εκφράζει τις αυθαίρετες απώλειες από την τομή 1-1 έως την τομή γ-γ και λογίζεται ίσος με 0.85.

Η συνολική επιφάνεια τομής των δύο ροών είναι ίση με:

$$A_{py} + A_{sy} = A_3 \quad (15)$$

Έπειτα, υπολογίζεται η παροχή μάζας της δευτερεύουσας ροής με την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{m}_s = \frac{P_e \cdot A_{sy}}{\sqrt{T_e}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{R} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \cdot \sqrt{\eta_s} \quad (16)$$

Όπου, η_s ο συντελεστής που αφορά την ισεντροπική απόδοση της δευτερεύουσας ροής και τίθεται ίσος με 0.65 για το ψυκτικό R134a.

Οι θερμοκρασίες της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας ροής στη τομή γ-γ προκύπτουν ως:

$$\frac{T_g}{T_{py}} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{py}^2 \quad (17)$$

$$\frac{T_e}{T_{sy}} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot M_{sy}^2 \quad (18)$$

Οι ταχύτητες της πρωτεύουσας και της δευτερεύουσας ροής στη τομή γ-γ είναι ίσες με:

$$V_{py} = M_{py} \cdot a_{py} = M_{py} \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{py}} \quad (19)$$

$$V_{sy} = M_{sy} \cdot a_{sy} = M_{sy} \cdot \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_{sy}} \quad (20)$$

Η ταχύτητα της μεικτής ροής στη τομή m-m υπολογίζεται με τη χρήση του συντελεστή φ_m , που αφορά τις απώλειες τριβής για το R134a και υπολογίζεται ως:

$$\varphi_m = 0.9303 - 0.005519 \cdot \frac{A_3}{A_1} + 0.00006586 \cdot \left(\frac{P_g}{P_e}\right)^\gamma \quad (21)$$

Η ταχύτητα της μεικτής ροής, λοιπόν, είναι:

$$\varphi_m \cdot (\dot{m}_p \cdot V_{py} + \dot{m}_s \cdot V_{sy}) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) \cdot V_m \quad (22)$$

Η τιμή της θερμοκρασίας της μεικτής ροής προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{m}_p \cdot \left(C_p \cdot T_{py} + \frac{V^2}{2} \right) + \dot{m}_s \cdot \left(C_p \cdot T_{sy} + \frac{V^2}{2} \right) = (\dot{m}_p + \dot{m}_s) \cdot \left(C_p \cdot T_m + \frac{V_m^2}{2} \right) \quad (23)$$

Στην ίδια θέση ο αριθμός Mach είναι ίσος με:

$$M_m = \frac{V_m}{a_m} = \frac{V_m}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_m}} \quad (24)$$

Με την υπόθεση ότι μετά την κρούση στην τομή s-s το ρευστό θα ακολουθήσει ισεντροπική πορεία, η πίεση και ο αριθμός Mach στην έξοδο του κομματιού σταθερής διατομής (θέση 3) είναι:

$$\frac{P_3}{P_m} = 1 + \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma + 1} \cdot (M_m^2 - 1) \quad (25)$$

$$M_3^2 = \frac{1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_m^2}{\gamma \cdot M_m^2 - \frac{\gamma - 1}{2}} \quad (26)$$

Τέλος, υπολογίζεται η πίεση εξόδου της ροής προς τον συμπυκνωτή ως:

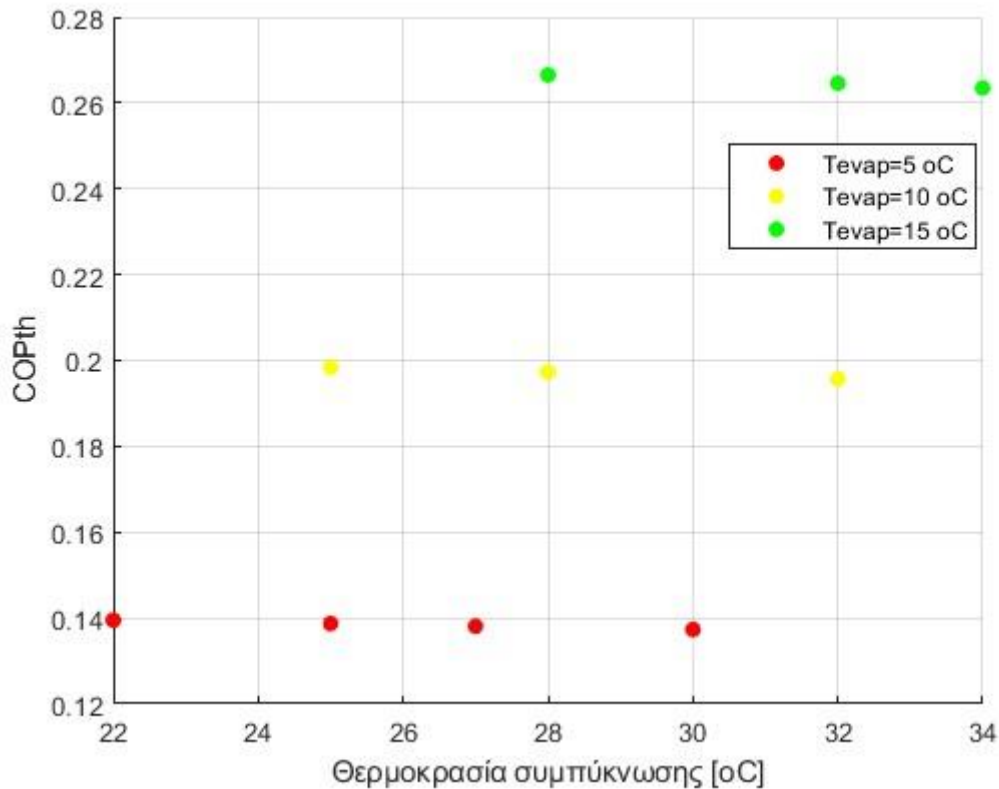
$$\frac{P_c}{P_3} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_3^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (27)$$

Η τιμή P_c ελέγχεται σε σχέση με τις τιμές λειτουργίας της πίεσης στον συμπυκνωτή. Η πίεση στην έξοδο του ακροφυσίου οφείλεται να είναι μεγαλύτερη από αυτή τη κρίσιμη τιμή, ώστε το σύστημα να είναι λειτουργικό. Στη περίπτωση, που προκύψει τιμή μικρότερη, έπεται η αδυναμία λειτουργίας του ακροφυσίου υπό αυτές τις συνθήκες. Αν η τιμή προκύψει να είναι μεγαλύτερη, τότε υπολογίζεται ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς του κύκλου και ο λόγος αναρρόφησης στο ακροφύσιο ως:

$$COP_{th} = \frac{\dot{Q}_{cooling}}{\dot{Q}_{thermal}} = \frac{\dot{m}_e \cdot (h_{evap,out} - h_{evap,in})}{\dot{m}_g \cdot (h_{gen,out} - h_{gen,in})} \quad (28)$$

$$\omega = \frac{\dot{m}_e}{\dot{m}_g} \quad (29)$$

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του θεωρητικού μοντέλου παρατίθεται συνοπτικό διάγραμμα με τα βασικά αποτελέσματα του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς της εγκατάστασης για τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας (Σχήμα 77).



Σχήμα 77: Συνοπτικό διάγραμμα τιμών COP_{th} θεωρητικού μοντέλου

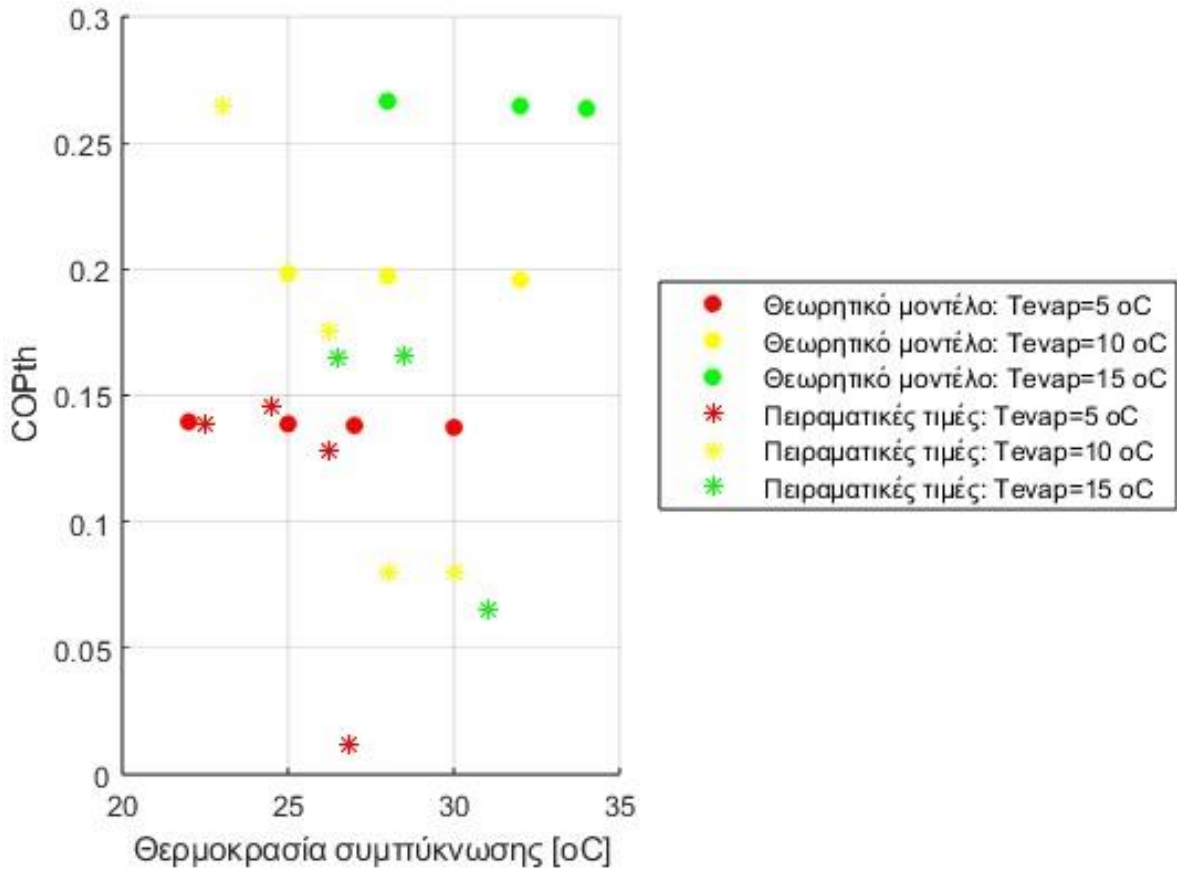
Για τη σύνοψη επιλέχθηκαν 3 διαφορετικές θερμοκρασίες ατμοποίησης, των 5, 10 και 15 βαθμών κελσίου. Για κάθε μία από αυτές, χρησιμοποιήθηκαν τιμές της θερμοκρασίας συμπύκνωσης για τις οποίες το σύστημα λειτουργούσε στην κρίσιμη περιοχή. Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν μερικά χρήσιμα συμπεράσματα:

- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 5 °C, ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς είναι ελάχιστα χαμηλότερος από 0.14 για θερμοκρασίες συμπύκνωσης από 22 έως 30 °C.
- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 10 °C, το σύστημα λειτουργεί για θερμοκρασίες συμπύκνωσης από 25 έως 32 °C, με θερμικό συντελεστή συμπεριφοράς ελάχιστα μικρότερο από 0.2.

- Για θερμοκρασία ατμοποίησης 15 °C, το σύστημα αποδίδει με θερμικό συντελεστή συμπεριφοράς λίγο μικρότερο από τη τιμή 0.265, για τιμές συμπύκνωσης από 28 έως 34 °C.
- Για σταθερή τιμή της θερμοκρασίας ατμοποίησης, η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης επιφέρει μείωση του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς. Το γεγονός αυτό, ταιριάζει με τα πειραματικά αποτελέσματα. Βέβαια παρατηρείται ότι στις μεγαλύτερες τιμές συμπύκνωσης ο ρυθμός μείωσης του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς είναι σημαντικά μεγαλύτερος στο διάγραμμα των πειραματικών αποτελεσμάτων.
- Για σταθερή τιμή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, η αύξηση της θερμοκρασίας ατμοποίησης προκαλεί αύξηση της τιμής του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς. Αυτό το φαινόμενο είναι εμφανές και στα πειραματικά αποτελέσματα. Ο ρυθμός αύξησης των τιμών του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς είναι ιδιαίτερα μεγαλύτερος στο διάγραμμα των αποτελεσμάτων του θεωρητικού μοντέλου.
- Στις χαμηλές θερμοκρασίες ατμοποίησης και συμπύκνωσης, οι τιμές του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς, που προκύπτουν από τα πειραματικά αποτελέσματα και από τους υπολογισμούς του θεωρητικού μοντέλου, έχουν μικρή σχετικά απόκλιση μεταξύ τους. Μάλιστα, οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν από τα πειράματα, ήταν ελαφρώς υψηλότερες.
- Στις μεγάλες τιμές της θερμοκρασίας της ατμοποίησης και της συμπύκνωσης, οι αποκλίσεις μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών τιμών του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς, αποκτούν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, οι τιμές του θεωρητικού μοντέλου προσφέρουν καλύτερο συντελεστή συμπεριφοράς για το σύστημα.
- Βασικός λόγος για αυτές τις διαφορές των τιμών στις υψηλές θερμοκρασίες συνιστά η αδυναμία του συστήματος να φτάσει τη σχεδιασμένη τιμή της πίεσης της πρωτεύουσας ροής στα 18 bar, στην έξοδό της από τις αντλίες.
- Ένας ακόμη λόγος για τις αποκλίσεις των τιμών θερμικών συντελεστών συμπεριφοράς του συστήματος, αποτελούν διάφορες μικρές απώλειες του κύκλου στη πειραματική διάταξη, που δε μπορούν να προσομοιωθούν θεωρητικά.
- Η υπόθεση των ισεντροπικών μεταβολών, επίσης, οδηγεί στην απομάκρυνση των τιμών της πειραματικής διαδικασίας και της εφαρμογής του θεωρητικού μοντέλου, με σκοπό την προσέγγιση του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς του συστήματος.

Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα αποτέλεσαν ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών τιμών για τις μικρότερες τιμές της θερμοκρασίας συμπύκνωσης (Σχήμα 78). Η μελέτη των μεταβολών της τιμής του θερμικού βαθμού συμπεριφοράς, με βάση τις

αλλαγές των συνθηκών λειτουργίας, ήταν σε μεγάλο βαθμό εύστοχη σε σχέση με τη πειραματική μελέτη. Συγκεκριμένα, για σταθερή μια εκ των θερμοκρασιών ατμοποίηση ή συμπύκνωσης και με μεταβολή της άλλης, η τιμή του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς συμπεριφερόταν με τον ίδιο τρόπο. Οι αποκλίσεις που εμφανίστηκαν, ήταν αναμενόμενες ως ένα σημείο, καθώς στη μετάβαση από τη θεωρία στη πράξη πάντα υποβόσκουν κρίσιμα σημεία, που προκαλούν τη διαφοροποίηση των τιμών.



Σχήμα 78: Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

4. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ εγκαταστάθηκε το σύστημα ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο, SunClim. Η καινοτομία του βασίστηκε στις ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας του και στη τοποθέτηση πραγματικής εγκατάστασης για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας και τη μεταφορά της στο σύστημα ECC. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η πειραματική διερεύνηση του SunClim. Το συγκεκριμένο σύστημα ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο αποτελούταν από 2 υποσυστήματα, το ηλιακό πεδίο και το σύστημα ECC. Η συνεργασία των 2 συστημάτων πραγματοποιήθηκε χάρη στο υδραυλικό κύκλωμα του Εργαστηρίου, καθώς και στα λογισμικά χειρισμού των συστημάτων Winsol και LabView, αντίστοιχα.

Για την ανάλυση της λειτουργίας του ηλιακού πεδίου χρησιμοποιήθηκαν τιμές που αποθηκεύτηκαν από την ημερομηνία 20/3/2023 και ώρα 13:22:22 με 14:33:37, με χρονικό βήμα τα 30 δευτερόλεπτα. Για τον ολικό βαθμό απόδοσης του ηλιακού πεδίου αντλήθηκαν δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία, την παροχή και τη θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το δοχείο αποθήκευσης θερμότητας προς το ηλιακό πεδίο, καθώς και τη θερμοκρασία επιστροφής του σε αυτό. Για τη προσέγγιση του βαθμού απόδοσης της συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών, επιπλέον, χρειάστηκαν η παροχή και η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στη συγκεκριμένη συστοιχία ηλιακών συλλεκτών. Η απόδοση του ηλιακού πεδίου έφτασε μέχρι και την τιμή περίπου 0.45, ενώ η απόδοση της συστοιχίας των ηλιακών συλλεκτών προσέγγισε την τιμή 0.7. Η διαφορά μεταξύ αυτών των τιμών, προκλήθηκε κατά κύριο λόγο από τις απώλειες που δημιουργήθηκαν στο πεδίο κατά τη μετακίνηση του ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Οι απώλειες αυτές επιδρούσαν στη θερμοκρασία του ρευστού μεταφοράς θερμότητας, μειώνοντάς τη. Ακόμη, η τοποθέτηση του θερμοστοιχείου που καταμετρούσε τη θερμοκρασία επιστροφής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στο δοχείο αποθήκευσης θερμότητας εντός του δοχείου επηρέαζε την αναδεικνυόμενη θερμοκρασία με βάση τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του δοχείου. Με αυτόν τον τρόπο, εμφανίστηκε σημαντική απόκλιση στους υπολογιζόμενους βαθμούς απόδοσης.

Για την αξιολόγηση του συστήματος ECC μελετήθηκαν οι δύο βασικές παράμετροι λειτουργίας του. Η πρώτη παράμετρος ήταν ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς. Αυτό το μέγεθος υπολογίστηκε ως το πηλίκο της ψυκτικής ισχύος στον ατμοποιητή ψύξης προς τη θερμική ισχύ στον ατμοποιητή υψηλής πίεσης. Η μέγιστη τιμή του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς προσεγγίστηκε ίση με την τιμή 0.55. Παρατηρήθηκε ευκολία στην ψύξη, για αύξηση της θερμοκρασίας ατμοποίησης, όταν η θερμοκρασία συμπύκνωσης παρέμενε σταθερή ή για μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, όταν η θερμοκρασία ατμοποίησης ήταν σταθερή. Η δεύτερη παράμετρος ήταν ο λόγος αναρρόφησης στο ακροφύσιο ω . Στο

συνοπτικό διάγραμμα που παρουσιάστηκε αποδείχθηκε η θεωρητική σχέση αναλογίας, μεταξύ των μεγεθών του θερμικού συντελεστή συμπεριφοράς και του λόγου αναρρόφησης στο ακροφύσιο. Στις συνθήκες όπου παρουσιαζόταν ευκολία της ψύξης, επικρατούσε μεγάλη τιμή του λόγου παροχών. Η μέγιστη τιμή του λόγου αναρρόφησης ήταν περίπου ίση με 0.275.

Στη συνέχεια, αναλύθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο, με δεδομένα εισόδου τη γεωμετρία του ακροφυσίου του SunClim, υπολογίστηκε ο θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς του συστήματος για τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας του. Τα αποτελέσματα, ενώ εμφάνισαν κάποιες αποκλίσεις στις τιμές τους, σε σχέση με τις πειραματικές, ακολούθησαν παρόμοια λογική στα συνοπτικά διαγράμματά τους. Παρατηρήθηκε, λοιπόν, ότι οι μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας επηρέασαν με τον ίδιο τρόπο τα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου. Αυτό το γεγονός αποτέλεσε επιβεβαίωση της ορθότητας λειτουργίας και αντίδρασης του συστήματος ECC.

Τα πειραματικά αποτελέσματα και η αξιολόγηση τους, μέσω της σύγκρισής τους με αυτά που προέκυψαν από τις θεωρητικές σχέσεις, επέλυσαν αρκετές απορίες πάνω στη συμπεριφορά της πειραματικής εγκατάστασης της ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο. Παρόλα αυτά, υπάρχουν, ακόμα, διάφορα πράγματα που μπορούν να συμβάλλουν τόσο στην καλύτερη κατανόηση του συστήματος ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο, όσο και στη βελτίωση της απόδοσης τέτοιου συστήματος. Συγκεκριμένα:

- Προτείνεται η χρήση αντλιών, με τις οποίες η πίεση της πρωτεύουσας ροής να φτάσει τη τιμή των 18 bar, έτσι όπως είχε σχεδιαστεί. Η μη εκπλήρωση αυτού του στόχου θεωρήθηκε ότι αποτέλεσε τον κύριο παράγοντα για την χαμηλότερη απόδοση του συστήματος ECC σε υψηλότερες θερμοκρασίες.
- Πραγματοποιήθηκε μια γενικευμένη ανάλυση της απόδοσης του συστήματος. Θα είχε ενδιαφέρον η δοκιμή του σε συνθήκες πραγματικών αναγκών για κάποια εφαρμογή ψύξης. Με αυτό τον τρόπο, θα δημιουργούνταν περισσότερα δεδομένα, για ένα μικρότερο εύρος συνθηκών, με συνέπεια την πιο ενδελεχή ανάλυσή του.
- Για την απόδοση του ηλιακού πεδίου θα ήταν χρήσιμες περισσότερες μετρήσεις κατά τη διάρκεια όλου του έτους, με σκοπό την ανάδειξη της συμπεριφοράς του υπό ποικίλες συνθήκες.
- Καθώς η πειραματική εγκατάσταση SunClim αποδείχθηκε αποτελεσματική και προσέφερε ικανοποιητικά εύρη των συνθηκών μελέτης, η χρήση ακροφυσίων διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών θα βοηθούσε στη παραμετροποίηση της απόδοσης της ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο, συναρτήσει των διάφορων γεωμετρικών μεταβολών του.

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Διάταξη συστήματος ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο [6]	12
Σχήμα 2: Διάγραμμα T-s συστήματος ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο [6]	13
Σχήμα 3: Διάταξη συστήματος ηλιακής ψύξης με ακροφύσιο [6]	15
Σχήμα 4: Διάταξη συστήματος SECC στο «Loughborough» [7]	16
Σχήμα 5: Διάταξη και τιμές λειτουργίας του συστήματος SJEC [8]	17
Σχήμα 6: Πειραματική διάταξη SJEC [9].....	18
Σχήμα 7: Διάταξη εγκατάστασης «Mediterranean AIRCOND» [10]	19
Σχήμα 8: Σκαρίφημα ακροφυσίου «Mediterranean AIRCOND» [10]	20
Σχήμα 9: Πειραματική διάταξη ηλιακών συλλεκτών κενού [11].....	21
Σχήμα 10: Πειραματική διάταξη ECC [12].....	22
Σχήμα 11: Πειραματική διάταξη και διάγραμμα p-h ισοβουτανίου [13].....	23
Σχήμα 12: Πειραματική διάταξη συστήματος με ακροφύσιο μεταβλητής γεωμετρίας [14]	24
Σχήμα 13: Σκαρίφημα χωροθέτησης ηλιακών συλλεκτών	28
Σχήμα 14: Σκαρίφημα ακροφυσίου	38
Σχήμα 15: Τρισδιάστατη σχεδίαση του ακροφυσίου	40
Σχήμα 16: Αποσυναρμολογημένο ακροφύσιο.....	41
Σχήμα 17: Διαστασιολογημένο σχέδιο κομματιών ακροφυσίου	42
Σχήμα 18: Μονογραμμικό διάγραμμα SunClim.....	45
Σχήμα 19: Μοριακή δομή R134a	48
Σχήμα 20: Ιδιότητες οργανικού ρευστού R134a [16]	48
Σχήμα 21: Περιβάλλον LabVIEW	53
Σχήμα 22: Διάταξη υδραυλικού κυκλώματος	55
Σχήμα 23: Υπό μελέτη συστοιχία	57
Σχήμα 24: Διάγραμμα πυκνότητας-θερμοκρασίας VT51	60
Σχήμα 25: Διάγραμμα θερμοχωρητικότητας-θερμοκρασίας VT51	61
Σχήμα 26: Βαθμός απόδοσης συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών και ηλιακού πεδίου	63
Σχήμα 27: Ηλιακή ακτινοβολία και θερμικά κέρδη συναρτήσει του χρόνου του πειράματος	64
Σχήμα 28: Μεταβολή θερμοκρασιών ηλιακού πεδίου συναρτήσει του χρόνου του πειράματος.....	65
Σχήμα 29: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap}=3\text{ }^{\circ}\text{C}$	70
Σχήμα 30: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap}=4\text{ }^{\circ}\text{C}$	71
Σχήμα 31: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$	71
Σχήμα 32: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$	72
Σχήμα 33: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap}=7\text{ }^{\circ}\text{C}$	72
Σχήμα 34: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap}=8\text{ }^{\circ}\text{C}$	73
Σχήμα 35: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap}=9\text{ }^{\circ}\text{C}$	73
Σχήμα 36: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$	74
Σχήμα 37: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap}=11\text{ }^{\circ}\text{C}$	74

Σχήμα 38: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$	75
Σχήμα 39: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$	75
Σχήμα 40: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$	76
Σχήμα 41: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$	76
Σχήμα 42: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$	77
Σχήμα 43: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$	77
Σχήμα 44: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$	78
Σχήμα 45: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$	78
Σχήμα 46: Πειραματικά αποτελέσματα COP_{th} για $T_{evap} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	79
Σχήμα 47: Συγκεντρωτικό διάγραμμα COP_{th}	80
Σχήμα 48: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$	82
Σχήμα 49: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$	83
Σχήμα 50: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	83
Σχήμα 51: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$	84
Σχήμα 52: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$	84
Σχήμα 53: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$	85
Σχήμα 54: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 9 \text{ }^{\circ}\text{C}$	85
Σχήμα 55: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	86
Σχήμα 56: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 11 \text{ }^{\circ}\text{C}$	86
Σχήμα 57: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$	87
Σχήμα 58: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 13 \text{ }^{\circ}\text{C}$	87
Σχήμα 59: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$	88
Σχήμα 60: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$	88
Σχήμα 61: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$	89
Σχήμα 62: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$	89
Σχήμα 63: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$	90
Σχήμα 64: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$	90
Σχήμα 65: Πειραματικά αποτελέσματα λόγου αναρρόφησης (ω) για $T_{evap} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	91
Σχήμα 66: Συγκεντρωτικό διάγραμμα λόγου αναρρόφησης ω	92
Σχήμα 67: Θερμοκρασίες ρευμάτων ατμοποιητή ψύξης	96
Σχήμα 68: Θερμοκρασίες ρευμάτων συμπυκνωτή	97
Σχήμα 69: Θερμοκρασίες ρευμάτων εναλλάκτη υπόψυξης	98
Σχήμα 70: Θερμοκρασιακές διαφορές εργαζόμενου μέσου στους εναλλάκτες θερμότητας	99
Σχήμα 71: Θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς κύκλου ψύξης	100
Σχήμα 72: Παροχές μάζας και λόγος αναρρόφησης στο ακροφύσιο	101
Σχήμα 73: Ισχύς των εναλλακτών θερμότητας	102
Σχήμα 74: Πιέσεις του ακροφυσίου	103
Σχήμα 75: Λειτουργικές καταστάσεις ακροφυσίου [19]	105
Σχήμα 76: Συμβολισμός περιοχών ακροφυσίου [19]	106
Σχήμα 77: Συνοπτικό διάγραμμα τιμών COP_{th} θεωρητικού μοντέλου	110

Σχήμα 78: Σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων 112

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Στοιχεία εξοπλισμού ECC	33
Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας HPE-M 04.08	34
Πίνακας 3: Προδιαγραφές ατμοποιητή υψηλής θερμοκρασίας - Generator	35
Πίνακας 4: Προδιαγραφές ατμοποιητή ψύξης - Evaporator	36
Πίνακας 5: Προδιαγραφές συμπυκνωτή - Condenser	37
Πίνακας 6: Προδιαγραφές εναλλάκτη υπόψυξης - Subcooler	37
Πίνακας 7: Διαστάσεις ακροφυσίου	39
Πίνακας 8: Προδιαγραφές τροφοδοτικού δοχείου	43
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά τροφοδοτικού δοχείου SunClim	44
Πίνακας 10: Προδιαγραφές των inverters	49
Πίνακας 11: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Inverter Sinamics V20.....	49
Πίνακας 12: Συσκευές εισόδου-εξόδου της εταιρείας Advantech A.E.....	52

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Διάταξη ηλιακών συλλεκτών στην οροφή του Κτιρίου Ο (πλάγια όψη)	27
Εικόνα 2: Διάταξη ηλιακών συλλεκτών στην οροφή του Κτιρίου Ο (πρόοψη)	27
Εικόνα 3: Δοχείο αποθήκευσης θερμότητας	29
Εικόνα 4: Σύστημα αυτοματισμού ηλιακού πεδίου	30
Εικόνα 5: Διασύνδεση δοχείου αποθήκευσης θερμότητας με σύστημα ECC.....	31
Εικόνα 6: Σύστημα καυστήρα φυσικού αερίου	32
Εικόνα 7: Σύστημα ECC.....	33
Εικόνα 8: Ακροφύσιο SunClim.....	43
Εικόνα 9: Φίλτρο οργανικού ρευστού ADK-415	44
Εικόνα 10: Σκελετός εγκατάστασης SunClim	47
Εικόνα 11: Ηλεκτρολογικός πίνακας	51
Εικόνα 12: Παροχόμετρο οροφής Κτιρίου Ο	59

Κατάλογος Αναφορών

- [1] I. DINCER, ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ, 2020.
- [2] Ε. ΚΑΚΑΡΑΣ, ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ, 2009.
- [3] Σ. Κ. Ε. Κακαράς, Αποκεντρωμένα Θερμικά Συστήματα, 2015.
- [4] Σ. Κ. Ε. Κακαράς, Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών, 2013.
- [5] T. C. R. N. T. K. B. S. Karellas, *Solar Cooling Technologies*, 2019.
- [6] K. Braimakis, «Solar ejector cooling systems: A review,» *Renewable Energy*, pp. 566-602, 2020.
- [7] S. R. P. D. V.M. Nguyen, «Development of a solar-powered passive ejector cooling,» *Applied Thermal Engineering*, pp. 157-168, 2001.
- [8] A. H. H. A. C. D. Clemens Pollerberg, «Experimental study on the performance of a solar driven steam jet ejector chiller,» *Energy Conversion and Management*, pp. 3318-3325, 2008.
- [9] A. H. H. A. b. C. D. Clemens Pollerberg, «Solar driven steam jet ejector chiller,» *Applied Thermal Engineering*, pp. 1245-1252, 2009.
- [10] C. B. a. S. R. Yosr Allouche, «A solar-driven ejector refrigeration system for Mediterranean climate:,» *Energy Procedia*, pp. 1115-1124, 2012.
- [11] X. M. S. O. S. R. Wei Zhang, «Optimum selection of solar collectors for a solar-driven ejector air,» *Energy Conversion and Management*, pp. 106-111, 2012.
- [12] T. I. A. M. H. S. Yusuke SAITO, «Ejector Configuration for Designing,» *Energy Procedia*, pp. 2564-2571, 2014.
- [13] J. G. D. B. J. K. Kamil' Smierciew, «Experimental investigations of solar driven ejector air-conditioning system,» *Energy and Buildings*, pp. 260-267, 2014.
- [14] A. C. O. A. P.-M. J. V. Szabolcs Varga, «Preliminary experimental results with a solar driven ejector air,» *Renewable Energy*, pp. 83-92, 2017.

- [15] S. V. ,, J. S. ,, V. D. A. C. O. Vu Van Nguyen, «Applying a variable geometry ejector in a solar ejector refrigeration system,» *International Journal of Refrigeration*, pp. 187-195, 2020.
- [16] Wikipedia. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/1,1,1,2-Tetrafluoroethane>.
- [17] [Ηλεκτρονικό]. Available:
http://www.coolprop.org/fluid_properties/fluids/R134a.html.
- [18] D. Y. Goswami, ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ, ΑΘΗΝΑ: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2021.
- [19] Κ. Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ, ΘΕΡΜΙΚΑ - ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, ΑΘΗΝΑ, 2015.
- [20] J. C. C. W. V. P. B.J. Huang, «A 1-D analysis of ejector performance,» *International Journal of Refrigeration*, pp. 354-364, 1999.

Παράρτημα

Κώδικες στο λογισμικό Matlab για την ανάλυση και την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.

ΚΩΔΙΚΑΣ 1:

Κώδικας για επεξεργασία τιμών και δημιουργία διαγραμμάτων με τα πειραματικά δεδομένα του ηλιακού πεδίου:

```

clc
clear all
% Dimiourgia pinakwn me apotelesmata tvn hliakwn metrhsewn

data_lbv = xlsread('AllData_2023-03-20_13-22-22.xlsx');

selected_data_lbv = data_lbv(2:60:8496, 1:8);

data_wsl=xlsread('Βαθμοί απόδοσης ηλιακών συλλεκτών');

selected_data_wsl = data_wsl(2:143, 2:5);

% Orismos megethwn

Atot=48;
Aset=10;
time=selected_data_lbv(1:end,1)'; % sec
flow_rate_set=0.5*selected_data_lbv(1:end,2)'; % l/sec
T_out_set=selected_data_lbv(1:end,3)'; % oC
T_out_tot=selected_data_wsl(1:end,1)'; % oC
I=selected_data_wsl(1:end,2)'; % W/m2
T_in_tot=selected_data_wsl(1:end,3)'; % oC
flow_rate_tot=selected_data_wsl(1:end,4)'/3600; % l/hr-->l/sec

% Ypologismos pyknothtas kai thermoxwritikothtas

for i = 1:142
    dens_set(i)=-0.00075*0.5*(T_out_set(i)+T_in_tot(i))+0.9475;
    cp_set(i)=4*0.5*(T_out_set(i)+T_in_tot(i))+3410;

    dens_tot(i)=-0.00075*0.5*(T_out_tot(i)+T_in_tot(i))+1.0525;
    cp_tot(i)=4*0.5*(T_out_tot(i)+T_in_tot(i))+3410;
end

% Ypologismos bathmoy apodoshs hliakoy pedioy

for j = 1:142

```

```

    h_set(j)=flow_rate_set(j)*dens_set(j)*cp_set(j)*(T_out_set(j)-
T_in_tot(j))/(I(j)*Aset);
    h_tot(j)=flow_rate_tot(j)*dens_tot(j)*cp_tot(j)*(T_out_tot(j)-
T_in_tot(j))/(I(j)*Atot);
    Qu_set(j)=flow_rate_set(j)*dens_set(j)*cp_set(j)*(T_out_set(j)-T_in_tot(j));
    Qu_tot(j)=flow_rate_tot(j)*dens_tot(j)*cp_tot(j)*(T_out_tot(j)-T_in_tot(j));
end

% Dhmioyrgia diagrammatwn

figure (1);

plot(time,h_set,time,h_tot)
xlabel('time [sec]')
ylabel('Βαθμός απόδοσης ')
legend('Συστοιχία ηλιακών συλλεκτών','ολόκληρο ηλιακό πεδίο','Location','east')

figure (2);

plot(time,I,time,Qu_tot/Atot,time,Qu_set/Aset)
xlabel('time [sec]')
ylabel('Ηλιακή ακτινοβολία και ηλιακά θερμικά κέρδη [W/m2]')
legend('Ηλιακή ακτινοβολία','Θερμικό κέρδος ηλιακού πεδίου','Θερμικό κέρδος
συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών')

figure (3);

plot(time,T_in_tot,time,T_out_tot,time,T_out_set);
xlabel('time [sec]')
ylabel('Θερμοκρασία [oC]')
legend('Θερμοκρασία εισόδου ρευστού μεταφοράς θερμότητας','Θερμοκρασία εξόδου από
ηλιακά στο δοχείο','Θερμοκρασία εξόδου από τη συστοιχία ηλιακών συλλεκτών')

figure (4);

plot(time,flow_rate_tot,time,flow_rate_set);
xlabel('time [sec]')
ylabel('Παροχή όγκου [l/sec]')
legend('Παροχή ηλιακού πεδίου','Παροχή συστοιχίας ηλιακών συλλεκτών')

```

ΚΩΔΙΚΑΣ 2:

Κώδικας για δημιουργία συνοπτικών διαγραμμάτων από το σύνολο πειραματικών διεργασιών:

```

clc
clear all
% Kathorismos arxeiwn dedomenwn

```

```

fileNames = {'AllData_2022-11-28_16-38-09', 'AllData_2022-11-29_17-00-
49', 'AllData_2022-11-30_11-14-21', 'AllData_2022-12-02_11-57-02', 'AllData_2022-12-
02_16-21-30', 'AllData_2022-12-05_13-19-16', 'AllData_2023-03-02_12-33-
06', 'AllData_2023-03-02_17-16-47', 'AllData_2023-03-20_13-06-34', 'AllData_2023-03-
20_13-22-22', 'AllData_2023-04-11_13-59-56'};
sheetNames =
{'Data', 'Data', 'Data', 'Data', 'Data', 'Data', 'Data', 'Data', 'Data', 'Data', 'Data'};

% Arxikopoihsh kenoy pinaka gia katagrafi twn dedomenwn
extractedData = [];

% Epanalipseis sta arxeia excel
for i = 1:numel(fileNames)
    % Diabasma twn arxeiwn Excel
    [~, ~, raw] = xlsread(fileNames{i}, sheetNames{i});

    % Eksagwgi stilis gia sygkrisi
    columnNumber = 21; % 21st column
    columnData = cell2mat(raw(2:end, columnNumber));

    % Entopismos seirwn poy ikanopoioun th synthiki
    rowIndices = find(columnData > 5.9 & columnData < 6.1) + 1; % Add 1 to adjust
for header row

    % Ejagwgh seirwn me ta dedomena toys apo th 1 mexri kai th 44 stili
    extractedRows = cell2mat(raw(rowIndices, 1:44));

    % Katagrafi twn seirwn ston pinaka
    extractedData = [extractedData; extractedRows];
end

% Ypologismos enthalpiwn kai bathmoy apodoshs
for i = 1:size(extractedData,1)

Hsubo(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',extractedData(i,40)*10^5,'T',extrac
tedData(i,39)+273.15,'R134a');

Hevapo(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',extractedData(i,24)*10^5,'T',extra
ctedData(i,22)+273.15,'R134a');
    m2(i)=extractedData(i,20);
    Qc(i)=m2(i)*(Hevapo(i)-Hsubo(i));

Hgeni(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',extractedData(i,15)*10^5,'T',extrac
tedData(i,14)+273.15,'R134a');

Hgeno(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',extractedData(i,17)*10^5,'T',extrac
tedData(i,16)+273.15,'R134a');
    m1(i)=extractedData(i,13);
    Qth(i)=m1(i)*(Hgeno(i)-Hgeni(i));
    COPth(i)=Qc(i)/Qth(i);
    omega(i)=m2(i)/m1(i);
    Tcondo(i)=extractedData(i,30);

```



```

end

% Dhmioyrgia diagrammatwn
figure (1);

scatter(Tcondo,COPth)
xlabel('Θερμοκρασία συμπύκνωσης [oC]')
ylabel('Θερμικός συντελεστής συμπεριφοράς')

figure (2);

scatter(Tcondo,omega)
xlabel('Θερμοκρασία συμπύκνωσης [oC]')
ylabel('Λόγος αναρρόφησης')

```

ΚΩΔΙΚΑΣ 3:

Κώδικας για τη δημιουργία διαγραμμάτων για τα αποτελέσματα της μέτρησης που πραγματοποιήθηκε στις 20/3/2023 και ώρα 13:22:22 μέχρι 14:33:37 :

```

clc
clear all
% Kathorismos arxeiwn dedomenwn
fileName = 'AllData_2023-03-20_13-22-22';
sheetName = 'Data';

% Arxikopoihsh kenoy pinaka gia katagrafi twn dedomenwn
extractedData = [];

% Diabasma twn arxeiwn Excel
[~, ~, raw] = xlsread(fileName, sheetName);

% Ejagwgh timwn gia oles tis seires kai apo th 1 mexri kai th 44 stili
data = cell2mat(raw(2:end, 1:44));

% Orismos twn metablitwn
time=data(1:end,1)';
mcor1=data(1:end,13)';
Tgeni=data(1:end,14)';
Pgeni=data(1:end,15)';
Tgeno=data(1:end,16)';
Pgeno=data(1:end,17)';
mcor2=data(1:end,20)';
Tevapi=data(1:end,21)';
Tevapo=data(1:end,22)';
Pevapo=data(1:end,24)';
m_hydr_f_evap=data(1:end,25)';

```

```

T_hydr_f_evap_sup=data(1:end,26)';
T_hydr_f_evap_ret=data(1:end,27)';
Tcondi=data(1:end,29)';
Tcondo=data(1:end,30)';
Pcondi=data(1:end,31)';
Pcondo=data(1:end,32)';
m_hydr_e_cond=data(1:end,33)';
T_hydr_e_cond_sup=data(1:end,34)';
T_hydr_e_cond_ret=data(1:end,35)';
Tresco=data(1:end,37)';
Preco=data(1:end,38)';
Tsubco=data(1:end,39)';
Psubco=data(1:end,40)';
m_hydr_h_subc=data(1:end,41)';
T_hydr_h_subc_sup=data(1:end,42)';
T_hydr_h_subc_ret=data(1:end,43)';

% Υπολογισμος megethwm
DTevap=Tevapo-Tevapi;
DTcond=Tcondo-Tcondi;
DTsubc=Tsubco-Tresco;
DTgen=Tgeno-Tgeni;

for i = 1:size(data,1)

Hsubo(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',Psubco(i)*10^5,'T',Tsubco(i)+273.15,
'R134a');

Hevapo(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',Pevapo(i)*10^5,'T',Tevapo(i)+273.15,
'R134a');
    Qevap(i)=0.001*mcors2(i)*(Hevapo(i)-Hsubo(i));

Hgeni(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',Pgeni(i)*10^5,'T',Tgeni(i)+273.15,
'R134a');

Hgeno(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',Pgeno(i)*10^5,'T',Tgeno(i)+273.15,
'R134a');
    Qgen(i)=0.001*mcors1(i)*(Hgeno(i)-Hgeni(i));
    COPth(i)=Qevap(i)/Qgen(i);
    omega(i)=mcors2(i)/mcors1(i);

Hcondi(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',Pcondi(i)*10^5,'T',Tcondi(i)+273.15,
'R134a');

Hcondo(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',Pcondo(i)*10^5,'T',Tcondo(i)+273.15,
'R134a');
    Qcond(i)=0.001*(mcors1(i)+mcors2(i))*(Hcondo(i)-Hcondi(i));

Hsubi(i)=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H','P',Preco(i)*10^5,'T',Tresco(i)+273.15,
'R134a');
    Qsubc(i)=0.001*(mcors1(i)+mcors2(i))*(Hsubo(i)-Hsubi(i));

```

```

end

% Diagrammata
figure(1);

plot(time,COPth);
xlabel('time [sec]');
ylabel('COPth');

figure(2);

plot(time,Pgeno,time,Pevapo,time,Pcondi);
xlabel('time [sec]');
ylabel('P [bar]');
legend('Gen','Evap','Cond','Location','east');

figure(3);

yyaxis left;

plot(time,mcor1,time,mcor2);
xlabel('time [sec]');
ylabel('Τιμές παροχών μάζας [g/sec]');

yyaxis right;

plot(time,omega);
xlabel('time [sec]');
ylabel('Λόγος αναρρόφησης');
legend('Πρωτεύουσα ροή','Δευτερεύουσα ροή','ω')

figure(4);

plot(time,0.001*Qevap,time,0.001*Qcond,time,0.001*Qsubc,time,0.001*Qgen);
xlabel('time [sec]');
ylabel('Ισχύς εναλλακτών [kW]');
legend('Qevap','Qcond','Qsubc','Qgen')

figure(5);

plot(time,Tevapi,time,Tevapo,time,T_hydr_f_evap_sup,time,T_hydr_f_evap_ret);
xlabel('time [sec]');
ylabel('Θερμοκρασία [oC]');
legend('WF inlet','WF outlet','Hydr F sup','Hydr F ret')

figure(6);

plot(time,Tcondi,time,Tcondo,time,T_hydr_e_cond_sup,time,T_hydr_e_cond_ret);
xlabel('time [sec]');
ylabel('Θερμοκρασία [oC]');
legend('WF inlet','WF outlet','Hydr E sup','Hydr E ret')

```

```
figure(7);  
  
plot(time,Treco,time,Tsubco,time,T_hydr_h_subc_sup,time,T_hydr_h_subc_ret);  
xlabel('time [sec]');  
ylabel('Θερμοκρασία [oC]')  
legend('WF inlet','WF outlet','Hydr H sup','Hydr H ret')  
  
figure(8);  
  
plot(time,DTEvap,time,DTcond,time,DTsubc,time,DTgen);  
xlabel('time [sec]')  
ylabel('Θερμοκρασιακή διαφορά [oC]')  
legend('Evap','Cond','Subc','Gen')
```