



ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΑΤΑΙΒΑΤΗΣ

Σχεδιασμός πρωτότυπου συστήματος
ηλιακής τριπαραγωγής βασισμένου
στον Οργανικό Κύκλο Rankine και
στον Κύκλο Ψύξης Ακροφυσίου



Τομέας: Θερμότητας, Εργαστήριο Ατμοκινητήρων &
Λεβήτων

Επιβλέπων: Καρέλλας Σωτήριος, Καθηγητής ΕΜΠ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Αθήνα 2023



GEORGE KATEVATIS

SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

Design of trigeneration prototype based on Organic Rankine Cycle and Ejector Cooling Cycle



Sector : Thermal Engineering

Supervisor : Professor Sotirios Karellas

Athens 2023

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.

Ονοματεπώνυμο

Γιώργος Καταιβάτης

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Σωτήριου Καρέλλα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον κ. Καρέλλα που με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να συνδράμω στο νέο, μεγάλο αυτό έργο του εργαστηρίου.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κώστα Μπραϊμάκη για την πολύτιμη βοήθεια του στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας, τον χρόνο που διέθεσε προς επίλυση αποριών και τις εύστοχες παρατηρήσεις του κατά την διάρκεια της συνεργασίας μας, καθώς και τους ερευνητές του εργαστηρίου, κυρίους Αντώνη Χαραλαμπίδη και Γαβριήλ Παλαμίδα για την συμβολή τους και την βοηθητική τους διάθεση.

Η παρούσα εργασία ήταν μια πρόκληση για μένα και συνεπώς θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους φίλους και τους συμφοιτητές μου, που ήταν πάντα κοντά μου στο πολύμηνο, απαιτητικό αυτό ταξίδι.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κοπέλα μου, Λυδία, για την στήριξη της και την υπομονή της.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	4
Σύνοψη	7
Abstract.....	8
Λίστα Συμβόλων	9
1. Εισαγωγή.....	12
1.1. Ιστορική αναδρομή του παγκόσμιου ενεργειακού τομέα	12
1.2. Απανθρακοποίηση και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	16
1.3. Ορυκτά καύσιμα και παραγωγή αερίων θερμοκηπίου	22
2. Οργανικός κύκλος Rankine (ORC)	25
2.1. Η παγκόσμια αγορά μονάδων ORC	25
2.2. Περιγραφή του θερμοδυναμικού κύκλου	29
2.3. Πηγές θερμότητας για τον ORC	31
2.3.1. Απορριπτόμενη θερμότητα.....	31
2.3.2. Καύση βιομάζας	33
2.3.3. Γεωθερμική ενέργεια	34
2.3.4. Ηλιακή ενέργεια.....	35
2.4. Αφαλάτωση θαλασσινού νερού μέσω μονάδων ORC.....	39
3. Ο κύκλος ψύξης ακροφυσίου (ECC).....	40
3.1. Επισκόπηση των μεθόδων παραγωγής ψύξης	40
3.1.1. Ψύξη με συμπίεση ατμού	40
3.1.2. Ψύξη με απορρόφηση	41
3.1.3. Ψύξη με προσρόφηση.....	42
3.1.4. Ψύξη με αποξηραντικό μέσο	44
3.1.5. Ψύξη με συμπίεση σε ακροφύσιο	44
3.2. Είδη Ακροφυσίων.....	47
4. Το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα TES4Trig.....	48
4.1. Περιγραφή της συνολικής εγκατάστασης τριπαραγωγής ενέργειας.....	48
4.2. Το Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (ΤΠΠΛ).....	49
4.3. Οικονομοτεχνικά και τοπογραφικά στοιχεία της εγκατάστασης στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (ΤΠΠΛ)	51
4.4. Εκτιμώμενο κόστος επέμβασης και αξιολόγηση της εγκατάστασης	54
4.5. Στοιχεία έργου TES4Trig.....	55
4.6. Προδιαγραφές για την εγκατάσταση του συστήματος τριπαραγωγής	56
4.6.1. Πεδίο ηλιακών συλλεκτών	56
4.6.2. Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας.....	58
4.6.3. Σύστημα τριπαραγωγής ORC-ECC.....	59
4.6.4. Συνδεσμολογία και λειτουργία.....	59
5. Το σύστημα συνδυασμένου θερμοδυναμικού κύκλου ORC-ECC	60
5.1. Καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος τριπαραγωγής.....	60
5.2. Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος ORC-ECC.....	66
6. Διαστασιολόγηση και επιλογή βαλβίδων.....	69

6.1.	Σωληνοειδείς Βαλβίδες.....	70
6.2.	Σφαιρικές βαλβίδες με κινητήρα (Motorized Ball Valve)	72
6.3.	Πνευματικές Βαλβίδες	75
6.4.	Εκτονωτική Βαλβίδα	77
6.5.	Αποτελέσματα.....	78
7.	Μοντελοποίηση εγκατάστασης	87
7.1.	Τρισδιάστατη μοντελοποίηση εξαρτημάτων και βαλβίδων	87
7.1.1.	Εναλλάκτες θερμότητας.....	90
7.1.2.	Εκτονωτές σε σύνδεση με γεννήτριες A/C.....	95
7.1.3.	Παροχόμετρα τύπου Coriolis	96
7.1.4.	Φίλτρο	98
7.1.5.	Διάταξη αντλίας-ηλεκτροκινητήρα	99
7.1.6.	Λοιπά εξαρτήματα	100
7.2.	Σχεδίαση του συνολικού συναρμολογήματος.....	104
8.	Συμπεράσματα.....	114
	Κατάλογος Σχημάτων	115
	Κατάλογος Πινάκων.....	119
	Κατάλογος Αναφορών	120

Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη σχεδίαση και τρισδιάστατη μοντελοποίηση της διάταξης ενός συστήματος Οργανικού Κύκλου Rankine (ORC) σε σύζευξη με έναν Κύκλο Ψύξης Ακροφυσίου (ECC), τη διαστασιολόγηση του συστήματος και των σωληνώσεων καθώς και τη χωροταξική μελέτη της εγκατάστασης με βάση δοσμένους χωρικούς περιορισμούς.

Το σύστημα συμπαραγωγής ORC-ECC, η σχεδίαση του οποίου αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι το μεγαλύτερο υποσύνολο της εγκατάστασης του ευρωπαϊκού προγράμματος Tes4Trig που έχει ως στόχο την ενεργειακή αναβάθμιση του Τεχνολογικού και Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου. Πρόκειται για μία πρωτοποριακή ενεργειακή μονάδα τριπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης και ψύξης, η οποία λειτουργεί σε συνδυασμό με μια μονάδα αποθήκευσης θερμότητας. Η διάταξη προορίζεται να εγκατασταθεί στο Κτήριο Διοίκησης του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου με σκοπό να καλύψει πλήρως και με ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου για θέρμανση, ψύξη και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας το ενεργειακά αυτόνομο και φιλικό προς το περιβάλλον. Στο έργο συμμετέχουν διάφοροι οργανισμοί από την Ελλάδα και το εξωτερικό με το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο να διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στο σχεδιασμό και την υλοποίηση της προαναφερθείσας εγκατάστασης.

Για την επίτευξη του στόχου της εργασίας, πραγματοποιήθηκε αρχικά διαστασιολόγηση των σωληνώσεων της διάταξης και δημιουργήθηκε το μονογραμμικό διάγραμμα της εγκατάστασης σε κάτοψη (P&ID). Κατόπιν, σχεδιάστηκαν τα μοντέλα όλων των εξαρτημάτων του συνδυασμένου κύκλου ORC και ECC μέσω CAD (Computer Aided Design), μαζί με τα απαραίτητα μετρητικά και τις βαλβίδες για τον έλεγχο του συστήματος. Εν συνεχεία, προστέθηκαν οι σωληνώσεις της διάταξης στο τρισδιάστατο μοντέλο και σχεδιάστηκε το μοντέλο του container τοποθέτησης της διάταξης, ώστε να μελετηθεί η χωροθέτηση του συναρμολογήματος. Τέλος, παρήχθησαν φωτορεαλιστικά μοντέλα της συνολικής διάταξης καθώς και των επιμέρους εξαρτημάτων που την απαρτίζουν για την καλύτερη παρουσίαση της δουλειάς που προηγήθηκε.

Μέσω της παραπάνω διαδικασίας, εξασφαλίστηκε η χωρική επάρκεια ενός τυπικού εμπορευματοκιβωτίου τυποποιημένων διαστάσεων, μήκους 6,06 m, ύψους 2,43 m και πλάτους 2,60 m για την τοποθέτηση της υπό μελέτης διάταξης, δημιουργήθηκε το συνολικό τρισδιάστατο μοντέλο ολόκληρης της διάταξης των δύο συζευγμένων κύκλων με ορθή χωροθέτηση όλων των εξαρτημάτων και των σωληνώσεων, έτσι ώστε το σύστημα να λειτουργεί βέλτιστα με το ελάχιστο δυνατό μήκος σωληνώσεων και με τις ελάχιστες δυνατές στροφές της ροής που οδηγούν σε απώλειες πίεσης κατά μήκος τους. Κατά το σχεδιασμό, λήφθηκε υπόψιν η ευκολία συντήρησης της εγκατάστασης, η πρόληψη κατά του φαινομένου της σπηλαίωσης της αντλίας, ενώ στο μοντέλο τοποθετήθηκε πίνακας ελέγχου σε θέση με εύκολη πρόσβαση κοντά στην πόρτα του container.

Abstract

The topic of this dissertation was the design and three-dimensional modelling of an Organic Rankine Cycle system coupled with an Ejector Cooling Cycle, the dimensioning of the system as well as the spatial study of the facility based on given spatial limitations.

The combined ORC-ECC unit which was designed and modeled in this thesis is the largest subsystem of the entire installation of the Tes4Trig European project. The aim of this project is to upgrade the energy production unit of the administration building in the Technological and Cultural Park in the vicinity of Lavrion. The unit is comprised of a novel tri-generation system, which is capable of producing heat, cooling and electricity for the whole building, thus making it environmentally friendly and self-sufficient energywise. The system also incorporates a thermal energy storage (TES) system for the storage of excess energy collected through parabolic solar collectors. Many European organisations and universities are involved in the Tes4Trig project. Among them, the National Technical University of Athens plays a vital role in the technical studies and the management of the project.

In order to achieve the objective of this dissertation, initially the piping of the arrangement was dimensioned and the piping and instrumentation 2D diagram (P&ID) of the plant was created. In addition, all the components of the combined ORC-ECC cycle were designed via CAD (Computer Aided Design), in particular Solidworks, along with the necessary gauges and valves in order to control the system. Afterwards, the piping and instrumentation was added to the 3D model and the model of the container which will house the energy system was designed, in order to study the placement of the assembly inside it. Finally, photo-realistic renderings of the overall layout as well as the individual components that make up the installation were produced for a better presentation of the work that was done in the thesis.

Through the process explained above, the spatial adequacy of a container of standard dimensions, 6.06 m long, 2.43 m high and 2.60 m wide was ensured for the placement of the facility and the three dimensional model of the entire arrangement of the two combined thermodynamic cycles was produced with proper placement of all components so that the system works optimally with the minimum possible piping. During the design, the ease of maintenance of the installation was taken into account and a control panel was placed in an easily accessible position near the container door for system monitoring. Furthermore, the layout was designed as to prevent cavitation at the suction side of the pump of the assembly.

Λίστα Συμβόλων

Συντομέυσεις	Ερμηνεία	Meaning
CAD	Σχεδίαση με βοήθεια υπολογιστή	Computer Aided Design
CAE	Μηχανική με βοήθεια υπολογιστή	Computer Aided Engineering
CAM	Κατασκευή με βοήθεια υπολογιστή	Computer Aided Manufacturing
CFD	Υπολογιστική Ρευστομηχανική	Computational Fluid Dynamics
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	Renewable Energy Sources
ORC	Οργανικός κύκλος Rankine	Organic Rankine Cycle
ECC	Κύκλος Ψύξης Ακροφυσίου	Ejector Cooling Cycle
TES	Σύστημα Αποθήκευσης Θερμότητας	Thermal Energy Storage
P&ID	Μονογραμμικό διάγραμμα	Piping and Instrumentation Diagram
WHR	Ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας	Waste Heat Recovery
M.E.K	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης	Internal Combustion Engines
CHP	Συνδυασμένη θέρμανση και ηλεκτροπαραγωγή	Combined Heat and Power
Η.Π.Α	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής	United States of America
CO ₂	Διοξείδιο του άνθρακα	Carbon Dioxide
RO	Αντίστροφη Ώσμωση	Reverse Osmosis
COP	Θερμικός Συντελεστής Συμπεριφοράς	Coefficient of Performance
GWP	Συμμετοχή στην παγκόσμια	Global Warming Potential

	υπερθέρμαση	
ODP	Ενδεχόμενη καταστροφή του στρώματος όζοντος	Ozone Depletion Potential
PHE	Πλακοειδής Εναλλάκτης Θερμότητας	Plated Heat Exchanger
ΤΠΠΛ	Τεχνολογικό και Πολιτισμικό Πάρκο Λαυρίου	Technological and Cultural Park in Lavrio
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο	National Technical University of Athens
CPC	Συγκεντρωτικός Παραβολικός Συλλέκτης	Compound Parabolic Collector
VHC	Ψύκτης Συμπύεσης Ατμού	Vapor Compression Chiller

Σύμβολα	Ερμηνεία	Meaning
λ	Συντελεστής πτώσης πίεσης	Pressure drop coefficient
D (m)	Διάμετρος	Diameter
L (m)	Μήκος	Length
ρ (kg/m ³)	Πυκνότητα	Density
k_v	Συντελεστής Παροχής	Coefficient of flow rate
ω	Λόγος αναρρόφησης	Entrainment ratio
\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 factor

1. Εισαγωγή

1.1. Ιστορική αναδρομή του παγκόσμιου ενεργειακού τομέα

Οι τελευταίες δεκαετίες έχουν χαρακτηριστεί από ραγδαία τεχνολογική πρόοδο σε όλους σχεδόν τους επιστημονικούς τομείς. Νέα τεχνολογικά μέσα έχουν διευκολύνει τη ζωή της πλειονότητας των ανθρώπων και έχουν αυξήσει σημαντικά την παραγωγικότητα των μηχανικών. Υπολογιστικά προγράμματα τρισδιάστατης μοντελοποίησης, σχεδίασης και ανάλυσης μηχανολογικών εξαρτημάτων και συσκευών (CAD–CAE–CAM) καθώς και υπολογιστικά συστήματα επίλυσης και οπτικοποίησης ρευστομηχανικών προβλημάτων ανταλλαγής ενέργειας και ορμής (CFD) έχουν ανοίξει το δρόμο για μια παγκόσμια τεχνολογική αναγέννηση υπό το πρίσμα της περιβαλλοντικής συνείδησης, της οικολογίας, της απανθρακοποίησης στον πρωτογενή τομέα παραγωγής ενέργειας με αρωγούς νέες μεθόδους ανάλυσης και συσχέτισης δεδομένων, την ευρεία εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης και της βαθιάς μηχανικής μάθησης στα πλαίσια της εφαρμογής στοιχείων της κυκλικής οικονομίας και της γενικότερης βιώσιμης ανάπτυξης σε διάφορους τομείς του επιστητού. Επιπροσθέτως, το κίνημα οικολογίας των τελευταίων δεκαετιών σε συνδυασμό με τον τεράστιο όγκο ερευνών περί κλιματικής αλλαγής, ρύπανσης και αλλοίωσης του φυσικού περιβάλλοντος λόγω ανθρώπινης παρέμβασης έχουν επιστήσει τη προσοχή των κυβερνήσεων, των πολιτών, των επιστημόνων και των μηχανικών στην υπάρχουσα, σοβαρή περιβαλλοντική κρίση. Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω και λόγω των αυστηρών μέτρων και νομοθεσιών που έχουν ψηφιστεί την τελευταία δεκαετία σε ευρωπαϊκό αλλά και παγκόσμιο επίπεδο με στόχο την αντιστροφή της κλιματικής κρίσης και την αποφυγή των καταστροφικών συνεπειών της για το ανθρώπινο είδος και για τον πλανήτη μας, έχει παρατηρηθεί τεράστιο ερευνητικό ενδιαφέρον στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε μεθόδους αντιρρύπανσης, στην αύξηση του βαθμού απόδοσης των νέων συσκευών και εγκαταστάσεων και στην εμφάνιση νέων μεθόδων παραγωγής ενέργειας (πυρηνική σύντηξη, ΑΠΕ, γεωθερμία), νέων φιλικότερων καύσιμων υλών (βιομάζα, υδρογόνο/κυψέλες καυσίμου) και πρωτόλυων μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας (Υπερπυκνωτές, συστήματα συμπιεσμένου αέρα, δεξαμενές θερμής άμμου, συσσωρευτές ιόντων λιθίου κ.α).

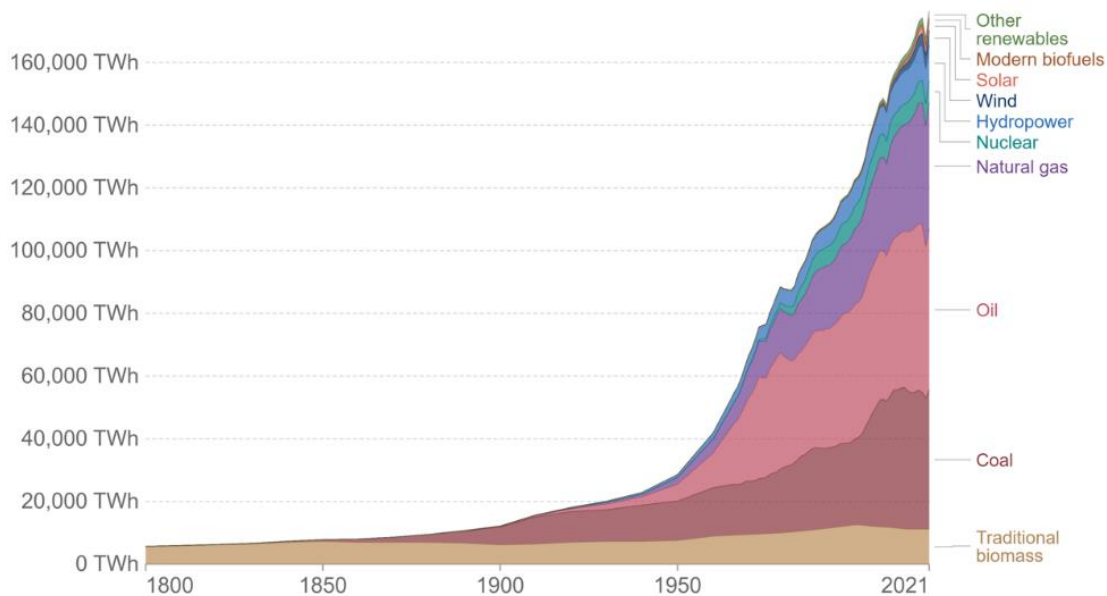
Για να αποκτήσει ο αναγνώστης μια καλύτερη εικόνα της ενεργειακής κατάστασης μακροσκοπικά, παραθέτω μια σύντομη ιστορική αναδρομή με κάποια ενδεικτικά στατιστικά στοιχεία περί παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα, όπου γίνεται φανερό το μέγεθος της εξάρτησης της παγκόσμια οικονομίας από τα ορυκτά καύσιμα.

Σύμφωνα με τον συγγραφέα και καθηγητή Vaclav Smil στο εξαιρετικό του βιβλίο «Πως λειτουργεί πραγματικά ο κόσμος», το μακρινό 1800 η καύση άνθρακα σε οικιακές κουζίνες και μπόιλερ για την παραγωγή θερμότητας και το βράσιμο του νερού είχε απόδοση της τάξης του 25-30%, ενώ μόνο το 2% του άνθρακα που κατανάλωναν οι ατμομηχανές γινόταν καθαρό μηχανικό έργο, με αποτέλεσμα η απόδοση της μετατροπής ενέργειας να μην ξεπερνάει το 15%. Έναν αιώνα αργότερα, βελτιωμένες οικιακές συσκευές και μηχανές αύξησαν την απόδοση περίπου στο 20% και μέχρι το 2000 ο μέσος βαθμός μετατροπής ενέργειας ήταν περίπου στο 50%. Συνεπώς, κατά τον 20ο αιώνα τα κέρδη σε ωφέλιμη ενέργεια σαρανταπλασιάστηκαν.

Για την καλύτερη κατανόηση της τεχνολογικής προόδου των τελευταίων αιώνων ας εκφράσουμε τα μεγέθη αναλογικά με τον πληθυσμό. Ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξήθηκε από 1 δισεκατομμύριο το 1800 σε 1,6 δισεκατομμύρια το 1900, σε 6,1 δισεκατομμύρια το 2000, ενώ εν έτει 2023 πλησιάζει τα 8 δισεκατομμύρια. Σε αυτή τη περίοδο η παροχή ωφέλιμης ενέργειας αυξήθηκε από 0,05 GJ ανά κεφαλή το 1800 σε 2,7 GJ το 1900 και σε περίπου 28 GJ έως το 2020. Πλέον ο μέσος κάτοικος του πλανήτη έχει, λοιπόν, στη διάθεση του 700 φορές περισσότερη ωφέλιμη ενέργεια απ’ ότι οι πρόγονοι του στις αρχές του 19ου αιώνα [1].

Η σύγχρονη ιστορία του κόσμου μπορεί υπό μία έννοια να ερμηνευτεί ως μια συνεχόμενη, ταχεία ακολουθία μεταβάσεων σε νέες, πιο αποδοτικές πηγές ενέργειας και ο σύγχρονος πολιτισμός είναι σε μεγάλο βαθμό το αθροιστικό αποτέλεσμα αυτών των αλλαγών.

Το φαινόμενο αυτό γίνεται πρόδηλο στο **Σχήμα 1**, που απεικονίζει την παγκόσμια παραγωγή ενέργειας σε TWh τους τελευταίους δύο αιώνες, καθώς και την συμμετοχή διάφορων πρωτογενών πηγών ενέργειας στο συνολικό ενεργειακό μείγμα, σύμφωνα με έρευνα του οργανισμού Our world in Data [2].

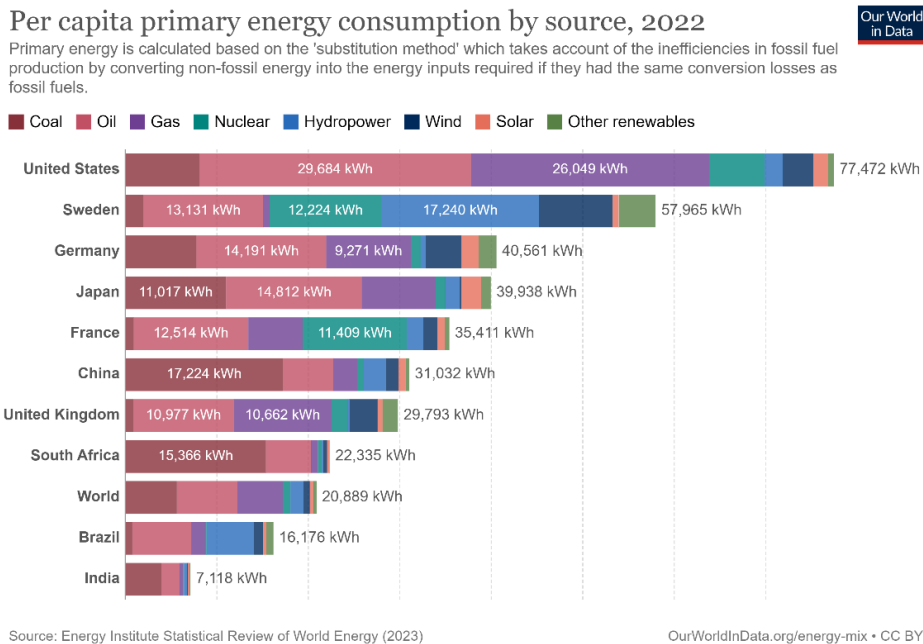


Σχήμα 1 : Παγκόσμια παραγωγή ενέργειας και οι πρωτογενείς πηγές της τους τελευταίους δύο αιώνες [2]

Σήμερα, υπάρχει μεγάλη ποικιλία πρωτογενών πηγών ενέργειας που συμμετέχουν στην παγκόσμια παραγωγή, όπως το φυσικό αέριο, η πυρηνική, υδροηλεκτρική, αιολική και ηλιακή ενέργεια, σύγχρονα βιοκαύσιμα και βιομάζα, λιγνίτης και παράγωγα αργού πετρελαίου. Τα πράγματα βέβαια δεν ήταν πάντα έτσι. Μέχρι το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο το ενεργειακό μείγμα ήταν αρκετά φτωχό με τον ενεργειακό τομέα να βασίζεται κυρίως στην καύση βιομάζας, άνθρακα και πετρελαίου. Από το 1960 και έπειτα η πυρηνική ενέργεια εντάχθηκε στον ενεργειακό τομέα, ενώ οι δύο κυρίαρχες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική και ηλιακή) άρχισαν να ενσωματώνονται στο ενεργειακό δίκτυο από το 1980 και μετά. Όπως και διάφοροι άλλοι τομείς και ολόκληρες βιομηχανίες, οι μέθοδοι παραγωγής ενέργειας παρέμειναν σχετικά άκαμπτοι και σταθεροί για πολλούς αιώνες, μέχρι την τεράστια τεχνολογική επανάσταση που ακολούθησε μετά το πέρας του Β΄ Παγκοσμίου πολέμου και οδήγησε στην ραγδαία αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας και στην ένταξη νέων, συχνά φιλικότερων προς το περιβάλλον, πηγών πρωτογενούς ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα. Σήμερα, η συνολική παραγωγή ενέργειας παγκοσμίως αγγίζει τις 179000 TWh, μια αύξηση 532% σε σχέση με το όχι τόσο μακρινό 1950.

Στο πλαίσιο αυτό, καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια υποκατάστασης της καύσης ορυκτών καυσίμων (βενζίνη, λιγνίτης/άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) από εναλλακτικές μορφές παραγωγής ενέργειας με μικρότερο ανθρακικό αποτύπωμα, ενώ ταυτόχρονα επιχειρείται σταδιακή «αποκέντρωση» της παραγωγής ενέργειας.

Στο **Σχήμα 2** που ακολουθεί απεικονίζεται η ετήσια κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας σε διάφορες χώρες του κόσμου για το έτος 2022, σύμφωνα με σχετική έρευνα [2].



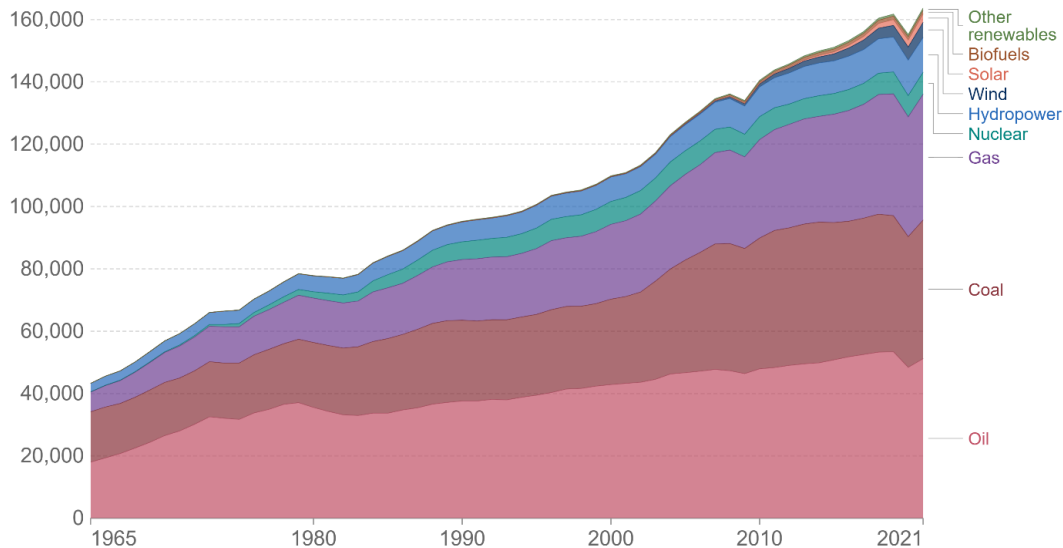
Σχήμα 2 : Συμμετοχή διαφορετικών πηγών στην παραγωγή ενέργειας [2]

Με βάση το ανωτέρω διάγραμμα επιβεβαιώνεται πως οι μεγαλύτερες χώρες παραγωγής και εξαγωγής ενέργειας βασίζονται ακόμα σε μεγάλο βαθμό στα ορυκτά καύσιμα για να καλύψουν την ενεργειακή ζήτηση. Επίσης, αξιοσημείωτη είναι η αυξημένη χρήση φυσικού αερίου ως πηγή ενέργειας από τις Η.Π.Α, η τεράστια βιομηχανία πυρηνικής ενέργειας της Γαλλίας και η εκτεταμένη χρήση ΑΠΕ στην Σουηδία.

Στο **Σχήμα 3** παρουσιάζονται οι πρωτογενείς πηγές ενέργειας από το 1965 έως το 2021 [2]. Αξιοσημείωτη είναι η μείωση κατά περίπου 5% στις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες λόγω της πανδημίας του COVID-19, καθώς και η ταχύτατη ανάκαμψη τους μετά το πέρας της πανδημίας. Η ήδη υπάρχουσα αυξητική τάση αναμένεται να συνεχίσει να υφίσταται και μάλιστα με επιταχυνόμενο ρυθμό τη δεκαετία 2020-2030, εξαιτίας της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού, της ανάπτυξης χωρών της Αφρικής και της Ασίας και της γενικευμένης βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου ανά τον κόσμο. Η ανάγκη, συνεπώς, για έρευνα πάνω σε νέους τρόπους κάλυψης των συνεχώς αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών, καθώς και σε τρόπους καλύτερης και αποδοτικότερης αξιοποίησης και αποθήκευσης της ήδη παραγόμενης ενέργειας κρίνεται επιτακτική για τα επόμενα χρόνια.

Energy consumption by source, World

Primary energy consumption is measured in terawatt-hours (TWh). Here an inefficiency factor (the 'substitution' method) has been applied for fossil fuels, meaning the shares by each energy source give a better approximation of final energy consumption.



Source: BP Statistical Review of World Energy

Note: 'Other renewables' includes geothermal, biomass and waste energy.

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Σχήμα 3 : Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας σε TWh και οι πηγές της από το 1965 μέχρι σήμερα [2]

1.2. Απανθρακοποίηση και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η βιομηχανία παραγωγής ενέργειας, κυρίως εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης ορυκτών καυσίμων ως πρωτογενή πηγή, είναι υπεύθυνη για περίπου 75% της παγκόσμιας εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Επιπροσθέτως, εκτιμάται πως περίπου 5 εκατομμύρια ανθρώπινες ζωές χάνονται πρόωρα κάθε χρόνο λόγω της επιβαρυσμένης ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Συνεπώς, η προσπάθεια απανθρακοποίησης σε όλους τους τομείς της παραγωγής ενέργειας οφείλει να είναι παγκόσμια και συλλογική. Στόχος, είναι η αναδιάρθρωση του ενεργειακού μείγματος με κύριους συντελεστές πηγές χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (low-carbon sources), ανανεώσιμες πηγές και τη πυρηνική ενέργεια.

Σύμφωνα με τα πορίσματα του Ενεργειακού Ινστιτούτου, κατά τη διάρκεια του 2022 παρατηρήθηκε αύξηση μόλις 1% στη συνολική πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας, δηλαδή σε ποσοστό 3%, από το επίπεδο κατανάλωσης πριν την παγκόσμια πανδημία του Covid-19. Επιπροσθέτως, η ποσοστιαία συμμετοχή των Α.Π.Ε. (εκτός της υδροηλεκτρικής ενέργειας) επι της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας έφτασε το 7,5%, μια αύξηση που ξεπερνάει περίπου 1% το αντίστοιχο ποσοστό της προηγούμενης χρονιάς. Όσον αφορά την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ως ποσοστό της συνολικής πρωτογενούς ενέργειας, αυτή βρίσκεται στο υψηλό ποσοστό του 82% [3].

Δεν υπάρχει, προς το παρόν, έλλειψη πόρων ορυκτών καυσίμων στο υπέδαφος, με την έννοια ότι δεν υπάρχει άμεσος κίνδυνος να τελειώσουν στο κοντινό μέλλον τα αποθέματα γαιανθράκων στον φλοιό της γης. Σύμφωνα με έρευνες, με τα επίπεδα παραγωγής του 2020, τα αποθέματα άνθρακα επαρκούν για περίπου 120 χρόνια, ενώ του πετρελαίου και του φυσικού αερίου για περίπου 50 χρόνια. Η ενεργειακή εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα είναι πασιφανής, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες, αλλά οι ανησυχίες για τον ταχύ ρυθμό υπερθέρμανσης του πλανήτη έχει οδηγήσει σε γενικευμένες εκκλήσεις, ώστε να απαλλαγούμε από τον ορυκτό άνθρακα το συντομότερο δυνατόν. Ιδανικά, η απανθρακοποίηση της παγκόσμιας παροχής ενέργειας θα πρέπει να προχωρήσει με αρκετά ταχείς ρυθμούς, έτσι ώστε η μέση άνοδος της θερμοκρασίας του πλανήτη να περιοριστεί το πολύ σε 1,5°C. Κάτι τέτοιο, σύμφωνα με τα περισσότερα κλιματικά μοντέλα, σημαίνει πως οι καθαρές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) παγκοσμίως θα πρέπει να μηδενιστούν μέχρι το 2050 [1].

Πάνω από 100 κράτη έχουν θέσει τέτοιους φιλόδοξους και ρεαλιστικά δύσκολα υλοποιήσιμους στόχους, μεταξύ άλλων η Νορβηγία για το 2030, η Φινλανδία για το 2035, η Ευρωπαϊκή Ένωση, μαζί με τον Καναδά, την Ιαπωνία και την Νότια Αφρική για το 2050. Δεδομένου, πάντως, ότι οι ετήσιες εκπομπές CO₂ από ορυκτά καύσιμα ξεπέρασαν του 37 δισεκατομμύρια τόνους το κοντινό 2019, οι στόχοι αυτοί για να επιτευχθούν απαιτούν μια πρωτοφανή σε κλίμακα, ρυθμό, τεχνογνωσία και υποδομές ενεργειακή μετάβαση.

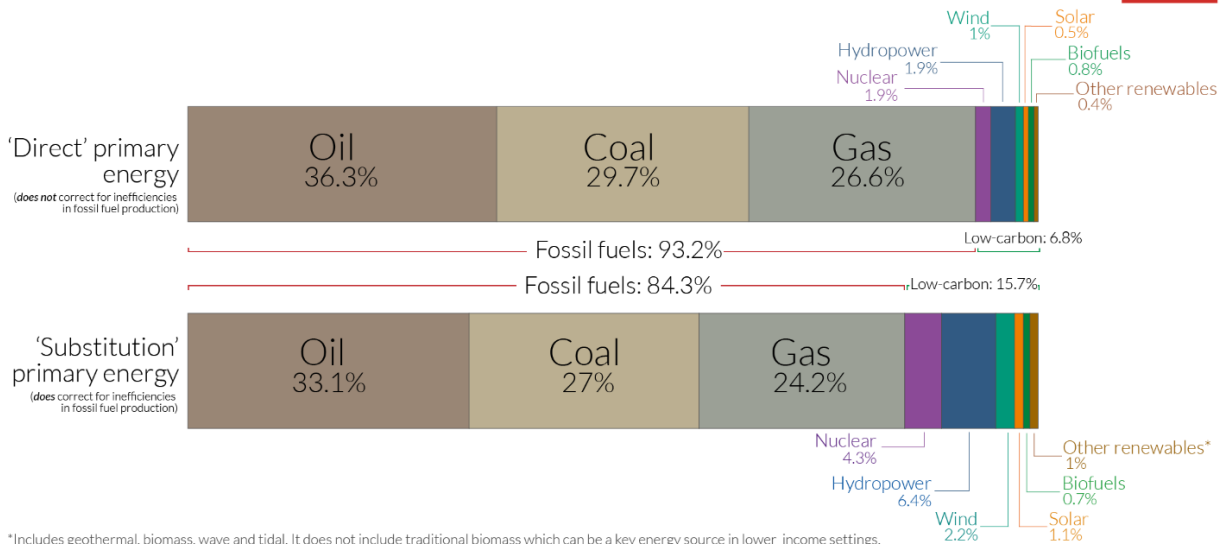
Όσο δύσκολη και αν φαντάζει εκ πρώτης όψης η υλοποίηση των παραπάνω στόχων, στηρίζεται σε τεχνικά ώριμες λύσεις, ενεργειακές μελέτες και έρευνες Κυβερνητικών Οργανισμών και ερευνητικών κέντρων και σε καινοτόμες τεχνολογίες και μεθόδους που αναπτύσσονται στα καλύτερα Πανεπιστήμια του κόσμου τις τελευταίες δεκαετίες. Οι φορείς

αυτοί του δημόσιου και ιδιωτικού τομέα έχουν συνεισφέρει τα τελευταία χρόνια στην παραγωγή αποδοτικότερων φωτοβολταϊκών κυψελών, μεγάλων επίγειων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών και ασφαλών δικτύων μεταφοράς υψηλής τάσης.

Η όλο και αυξανόμενη συμμετοχή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η ηλιακή, η αιολική και η κυματική ενέργεια θαλασσών και ωκεανών αποτελεί τεχνολογική, λογιστική και οργανωτική πρόκληση για την Ευρώπη. Το κύριο πρόβλημα είναι η διακοπτόμενη και μη ντετερμινιστική παροχή ενέργειας μέσω του αιολικού δυναμικού και της ηλιακής ακτινοβολίας. Για να είναι εφικτή η εξάρτηση του δικτύου παροχής ενέργειας και ηλεκτρικού ρεύματος από ΑΠΕ απαιτούνται πολύ μεγάλες αποθηκευτικές μονάδες, ειδικά για τις μεγάλες πόλεις. Με το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας ως πρωτογενούς μέσου παραγωγής ενέργειας σε μεγάλες μονάδες βάσης να είναι αμφίβολο, μέχρι στιγμής η μόνη βιώσιμη λύση σε μεγάλη κλίμακα, εκτός κάποιων λιγοστών ρηξικέλευθων ερευνητικών προσπαθειών, για την κάλυψη των αναγκών παροχής ενέργειας και ηλεκτρισμού είναι τα συστήματα αντλιοσταμίου που χρησιμοποιούν φθηνότερη νυχτερινή ηλεκτρική ενέργεια για την άντληση νερού από χαμηλό υψόμετρο και την μεταφορά του σε ταμιαυτήρες υψηλότερου υψομέτρου, με την απελευθέρωση του να παράγει άμεσα την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη της ζήτησης. Χάρη στην ηλεκτροπαραγωγή από ανανεώσιμες πηγές, η άντληση μπορεί να γίνει όποτε υπάρχει πλεόνασμα ηλιακής ή αιολικής ενέργειας, όμως προφανώς η αντλιοσταμίου είναι εφικτή σε περιοχές με κατάλληλες υψομετρικές διαφορές και η λειτουργία των συστημάτων δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική (καταλώνεται το ¼ της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την άντληση του νερού). Επιπροσθέτως, η δυναμικότητα άλλων μορφών ενεργειακής αποθήκευσης, όπως των μπαταριών, του συμπιεσμένου αέρα, των υπερπυκνωτών και των σφονδύλων μεγάλης ροπής αδράνειας παραμένει αρκετές τάξεις μικρότερη από αυτή που απαιτείται στις μεγαλουπόλεις για την κάλυψη μίας μόνο μέρας ζήτησης ενέργειας.

Η προσπάθεια απανθρακοποίησης και η αποδέσμευση της βιομηχανίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα ορυκτά καύσιμα έχει ήδη αρχίσει από την έναρξη της νέας χιλιετίας. Ωστόσο, οι ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη καλύπτονται ακόμα ως επί το πλείστον από ορυκτά καύσιμα και υδρογονάνθρακες, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4**, όπου παρουσιάζεται ο ποσοστιαίος καταμερισμός των πρωτογενών πηγών παραγωγής επί της συνολικής παραγόμενης ενέργειας.

Global primary energy by source: direct vs. substitution Our World in Data

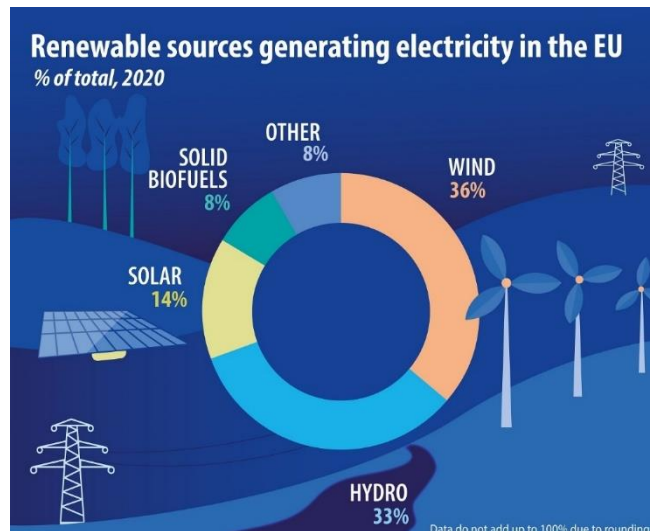


Σχήμα 4 : Πρωτογενείς πηγές παραγωγής επί της συνολικής παραγόμενης ενέργειας [2]

Το 2019, σχεδόν το 16% της παγκόσμιας πρωτογενούς παραγωγής ενέργειας προήλθε από πηγές χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, όπως η πυρηνική ενέργεια, η ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική, γεωθερμική και παλιρροιακή ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, 11,4 % προήλθε από Α.Π.Ε, ενώ 4,3 % από πυρηνική ενέργεια. Τα αιολικά πάρκα, επίγεια και υπεράκτια καθώς και οι μονάδες φωτοβολταϊκών έχουν ωστόσο σημειώσει μεγάλη άνοδο την τελευταία εικοσαετία [2].

Με βάση στατιστικές μελέτες του Ενεργειακού Ινστιτούτου [3], οι Α.Π.Ε. αυξήθηκαν κατά 14% μέσα στο 2022 ώστε να φτάσουν τα 40,9 EJ (Exa-Joule). Η ηλιακή και αιολική χωρητικότητα συνέχισε να αυξάνεται ραγδαία το 2022, καταγράφοντας ένα ρεκόρ αύξησης που άγγιζε τα 266 GW. Η ηλιακή ήταν αυτή που έφτανε το ποσοστό του 72% (192 GW) της προστιθέμενης χωρητικότητας. Η μεγαλύτερη αύξηση εντοπίστηκε στην Κίνα, όπου της άνηκε ένα ποσοστό από 37 έως 41%, της παγκόσμιας προστιθέμενης χωρητικότητας.

Όσον αφορά τις ΑΠΕ παρουσιάζεται σταδιακή αύξηση της συνεισφοράς τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως στην Ευρώπη, όπου καλύπταν το 37% της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια εν έτει 2020, ποσοστό που αυξάνεται σταδιακά κάθε χρόνο. Εν συνεχεία, παρατίθεται συμπληρωματικά το **Σχήμα 5**, στο οποίο παρουσιάζεται η ποσοστιαία συμμετοχή επί της συνολικής παραγωγής ' Πράσινης Ενέργειας ' από ανανεώσιμες πηγές για το 2020. Η αιολική ενέργεια και οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις λαμβάνουν τη μερίδα του λέοντος, με 36% και 33% αντιστοίχως. Αθροιστικά, οι δύο αυτές πηγές ενέργειας είναι υπεύθυνες για σχεδόν 70% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ [4].



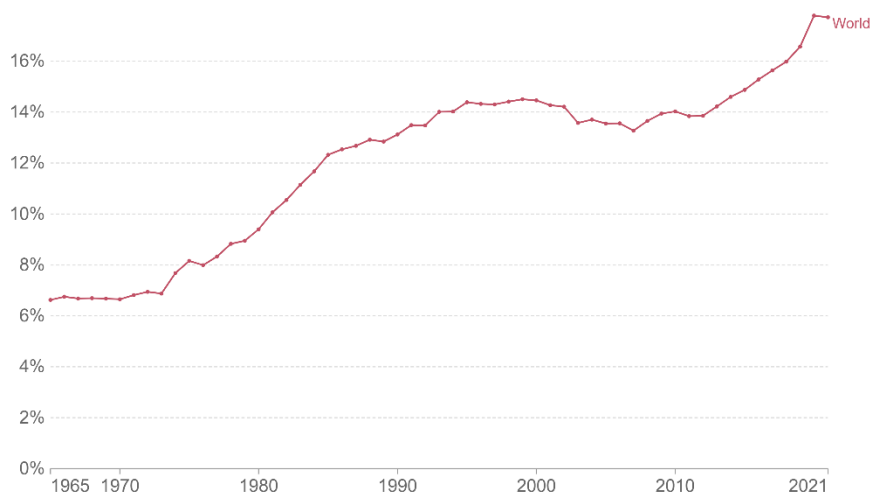
Σχήμα 5 : Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή [4]

Το τεράστιο, διεθνές εγχείρημα απανθρακοποίησης της βιομηχανίας παραγωγής ενέργειας γίνεται καλύτερα κατανοητό στο **Σχήμα 6**. Έκδηλη είναι η προσπάθεια ενσωμάτωσης πηγών χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος στο ενεργειακό μείγμα. Σήμερα, η ποσοστιαία συμμετοχή τους έχει σχεδόν τριπλασιαστεί σε σχέση με 50 χρόνια πριν. Ωστόσο, ο ρυθμός ανόδου τέτοιων φιλικών προς το περιβάλλον πηγών φαίνεται να έχει μειωθεί από το 1990 και μετά, σημειώνοντας μικρή αύξηση της τάξης του 5% τα τελευταία 30 χρόνια [5].

Share of primary energy from low-carbon sources

Low-carbon energy is defined as the sum of nuclear and renewable sources. Renewable sources include hydropower, solar, wind, geothermal, wave and tidal and bioenergy. Traditional biofuels are not included.

Our World
in Data



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy (2022)

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Note: Primary energy is calculated using the 'substitution method', which accounts for the energy production inefficiencies of fossil fuels.

Σχήμα 6 : πρωτογενής ενέργεια από πηγές χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα [5]

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η ποσοστιαία συμμετοχή ορυκτών καυσίμων και πηγών χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος από το 1970 έως το 2019:

Έτος	Ορυκτά Καύσιμα	Πηγές χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος (πυρηνική ενέργεια + ΑΠΕ)	ΑΠΕ	Πυρηνική Ενέργεια
1970	94%	6%	5,6%	0,4%
1980	91,6%	8,4%	6%	2,4%
1990	88%	12%	6,4%	5,6%
2000	87%	13%	7%	6%
2010	87%	13%	7,8%	5,2%
2019	84,3%	15,7%	11,4%	4,3%

Πίνακας 1 : Ποσοστιαία συμμετοχή ορυκτών καυσίμων και πηγών χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος

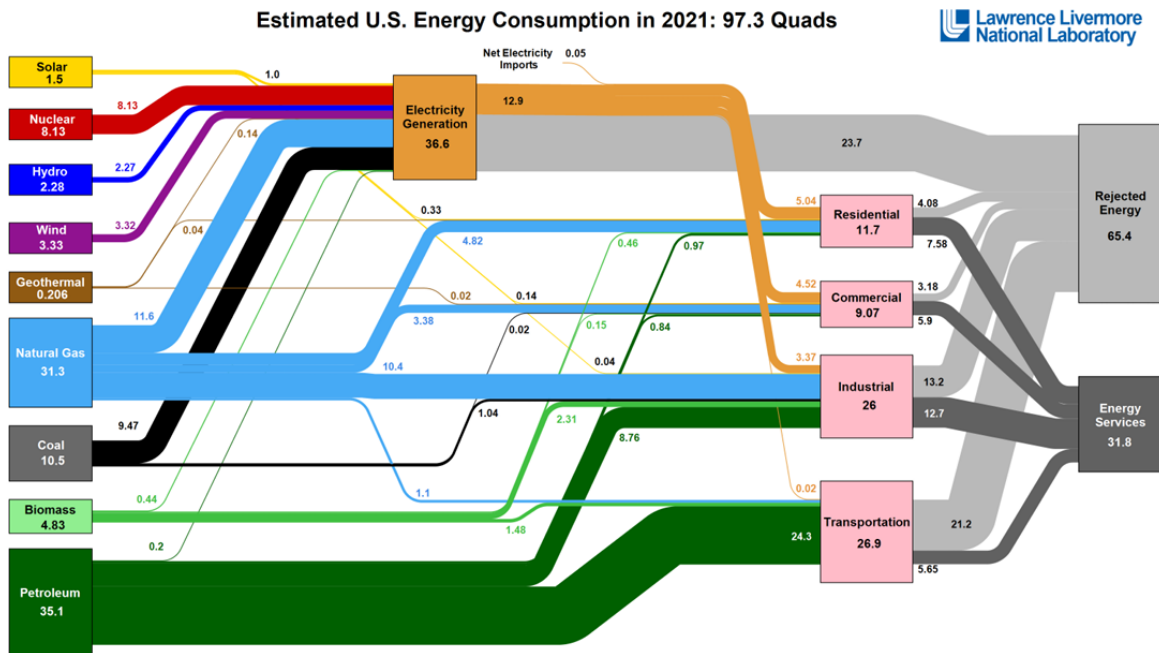
Τέλος, το ζήτημα απανθρακοποίησης δεν τίθεται μόνο στον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για την τροφοδότηση της παραγωγής των 4 μεγάλων πυλώνων της σύγχρονης βιομηχανίας, δηλαδή το τσιμέντο και το χάλυβα για τον κατασκευαστικό κλάδο, την αμμωνία για την παραγωγή λιπασμάτων στην καλλιέργεια τροφίμων και το πλαστικό που βρίσκεται παντού στο σύγχρονο πολιτισμό απαιτούνται τεράστιες ποσότητες ορυκτών καυσίμων. Προς το παρόν, δεν διαθέτουμε αξιοποιήσιμες, μαζικής κλίμακας εναλλακτικές στην παραγωγή των παραπάνω υλικών, στα οποία βασίζονται ολόκληροι κλάδοι της βιομηχανίας.

Στο πλαίσιο της τεχνολογικής και επιστημονικής εφευρετικότητας που κρίνεται απαραίτητη για τη μείωση στη χρήση των ορυκτών καυσίμων και στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, έχει γραφτεί η παρούσα διπλωματική διατριβή. Αρκετές τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία προς την κατεύθυνση της βελτιωμένης αποδοτικότητας συστημάτων και μηχανών και τη χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας χαμηλής ενθαλπίας για τη παραγωγή έργου και ηλεκτρικής ενέργειας, ανάμεσα τους και ο Οργανικό Κύκλος Rankine (ORC).

Σε συνδυασμό με την σταδιακή απομάκρυνση από τα ορυκτά καύσιμα απαιτείται και η προσπάθεια βελτίωσης των ήδη υφιστάμενων εγκαταστάσεων και σταθμών παραγωγής ενέργειας, μέσω της βελτίωσης του βαθμού απόδοσης τους μέσω νέων τεχνολογιών εκμετάλλευσης της απορριπτόμενης ενέργειας χαμηλότερης θερμοκρασίας και με την ενσωμάτωση αντιρρυπαντικών συσκευών (φίλτρα, χημικές διεργασίες με καταλύτες, παγίδες αιθάλης κ.α) στις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Μόνο μέσω του συνδυασμού βραχυπρόθεσμων βελτιωτικών παρεμβάσεων με μια σταδιακή, ριζική, ολιστική ενεργειακή μεταρρύθμιση θα μπορέσουν να υλοποιηθούν οι φιλόδοξοι περιβαλλοντικοί στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των υπόλοιπων κρατών της υφελίου.

Στο **Σχήμα 7** παρουσιάζεται η ροή ενέργειας στις Η.Π.Α από την παραγωγή στην κατανάλωση για το έτος 2017, καθώς η ποσοστιαία συμμετοχή των διαφορετικών πηγών ενέργειας επί της συνολικής παραγωγής. Επιπρόσθετα, από το διάγραμμα φαίνεται το τεράστιο ποσοστό απορριπτόμενης, αναξιοποίητης ενέργειας στο περιβάλλον που αγγίζει το 67% της συνολικής. Ακόμα, παρουσιάζεται ο καταμερισμός της καταναλισκόμενης ενέργειας ανά κλάδο.

Οι μονάδες ORC κρίνονται ως οι πλέον κατάλληλες διατάξεις για την αξιοποίηση αυτής της απορριπτόμενης ενέργειας για παραγωγή θερμικού φορτίου και ηλεκτρικής ενέργειας.



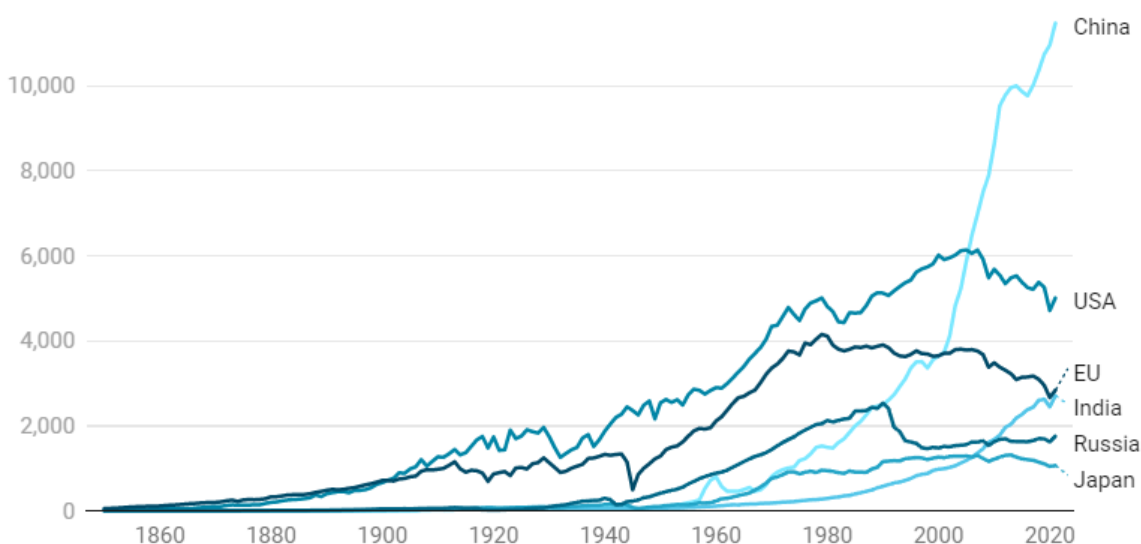
Σχήμα 7 : Ροή ενέργειας από την παραγωγή στην κατανάλωση στην Αμερική [14]

1.3. Ορυκτά καύσιμα και παραγωγή αερίων θερμοκηπίου

Κατά τη διάρκεια του 2022 οι τιμές του λιγνίτη ξεπέρασαν κάθε προηγούμενη τιμή, με την αύξηση των Ευρωπαϊκών τιμών σε 294\$ ανά τόνο και της Ιαπωνίας περίπου σε 225\$ ανά τόνο. Παράλληλα η κατανάλωση λιγνίτη συνέχισε να αυξάνεται, με μια αύξηση του μεγέθους 0,6% το 2021 σε 161 EJ, η οποία αποτελεί την μεγαλύτερη κατανάλωση από το 2014. Η ζητούμενη αύξηση ήταν κατά βάση οδηγούμενη από την Κίνα (1%) και την Ινδία (4%). Τέλος, η παγκόσμια παραγωγή λιγνίτη αυξήθηκε πάνω από 7% σε σύγκριση με αυτή του 2021, όπου άγγιξε μέγιστη ιστορικά τιμή ύψους 175 EJ (exa-joule). Η Κίνα, η Ινδία και η Ινδονησία ήταν υπεύθυνες για πάνω από 95% της παγκόσμιας αύξησης στην παραγωγή.

Επιπλέον, λόγω του πολέμου στην Ουκρανία η τιμή του φυσικού αερίου έχει αυξηθεί δραματικά σε Ευρώπη και Ασία, σημειώνοντας τριπλάσια τιμή στην Ευρώπη σε σχέση με το 2021. Το συνολικό παγκόσμιο εμπόριο φυσικού αερίου μειώθηκε δραματικά κατά 15% μέσα στο 2022. Ταυτόχρονα οι εκπομπές CO₂ συνεχίζουν να αυξάνονται κάθε χρόνο, με μειούμενο πάντως ρυθμό. Μέσα στο 2022 οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αυξήθηκαν κατά 0,8% σε σχέση με το 2021 φτάνοντας τους 34,3 GtCO₂e [3].

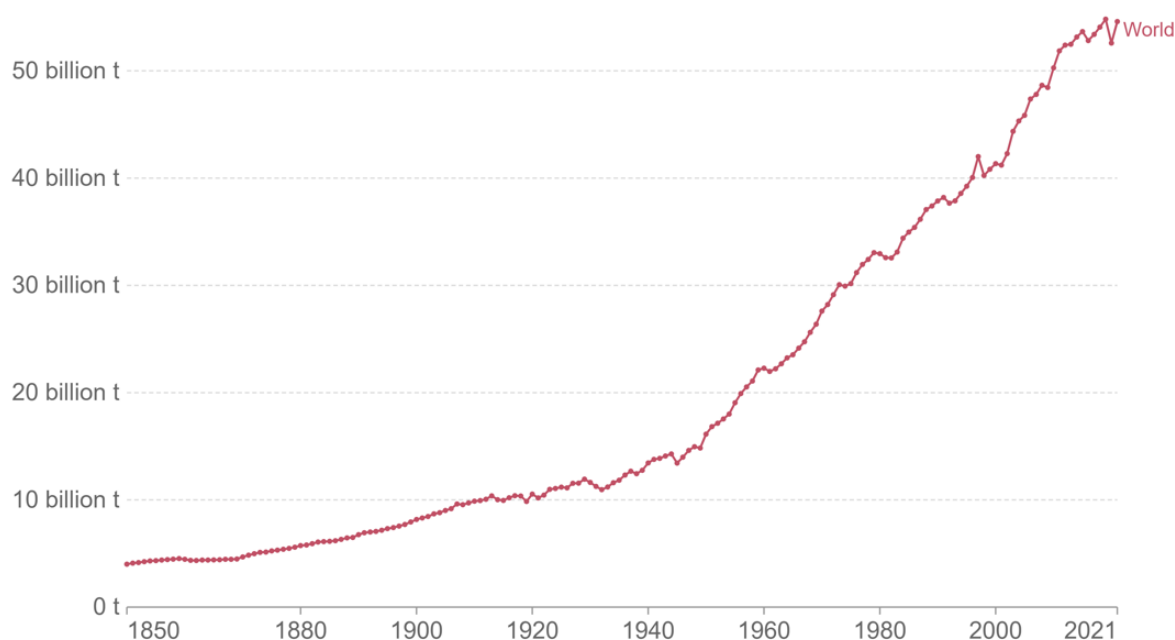
Carbon dioxide emissions from burning fossil fuels, flaring, and cement production, in millions of metric tons.



Source: [Global Carbon Project](#) - [Get the data](#) - Created with [Datawrapper](#)

Σχήμα 8 : Διάγραμμα παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα [5]

Στο **Σχήμα 8** παρουσιάζεται η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα σε τόνους των μεγαλύτερων χωρών του κόσμου (η Ε.Ε λογίζεται ως μία ενιαία επικράτεια) τα τελευταία 160 χρόνια. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η καμπύλη παραγωγής ρύπων CO₂ της Κίνας, η οποία αυξάνεται ραγδαία από το 1960 και έπειτα κατά τη περίοδο της έντονης οικονομικής και βιομηχανικής της ανάπτυξης. Στο Σχήμα 10 απεικονίζεται η καμπύλη εκπομπών CO₂ παγκοσμίως από το 1850 μέχρι και σήμερα. Αξιομνημόνευτη είναι η ταχύτατη αύξηση των εκπομπών μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, ενώ αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως ο ρυθμός αύξησης των εκπομπών άρχισε να μειώνεται μόλις την δεκαετία που μας πέρασε.



Source: Calculated by Our World in Data based on emissions data from Jones et al. (2023)
 Note: Land use change emissions can be negative.
 OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions • CC BY

Σχήμα 9 : Καμπύλη ετήσιας παραγωγής ρύπων διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως τους τελευταίους δύο αιώνες [5]

Στο **Σχήμα 9** απεικονίζεται η παγκόσμια ανθρωπογενής παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα σε τόνους, ετησίως από το 1850 έως το 2021. Παρατηρείται σταδιακή αύξηση στην παραγωγή ρύπων CO₂ μέχρι το 1950, όπου οι εκπομπές ρύπων άγγιζαν τους 6 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως. Από το 1950 και έκτοτε υπήρξε ραγδαία αύξηση στις εκπομπές CO₂, οι οποίες σχεδόν τετραπλασιάστηκαν μέχρι το 1990, φτάνοντας τους 22 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως. Η αυξητική αυτή τάση διακόπηκε για 2 χρόνια εξαιτίας της πανδημίας COVID-19, από το 2019, αλλά συνεχίζει να υφίσταται από το 2021 και μετά.

2. Οργανικός κύκλος Rankine (ORC)

2.1. Η παγκόσμια αγορά μονάδων ORC

Πρόσφατα, το 2021 υπήρχαν ήδη 4,5 GW εγκατεστημένης ισχύος σε μονάδες ORC ανά τον κόσμο. Από το 2016 και έπειτα η αγορά ORC έχει επεκταθεί κατά 40% (+1,18 GW) σε μονάδες συνολικής εγκατεστημένης ισχύος και κατά 46.5% (+859 μονάδες ORC) σε μονάδες αριθμού των εγκαταστάσεων. Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης αυτής σε εγκατεστημένη ισχύ τα τελευταία χρόνια αφορά γεωθερμικές εφαρμογές (+972 MW), ενώ οι περισσότερες νέες μονάδες που τέθηκαν σε λειτουργία ανήκουν σε εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας (waste heat systems).

Σύμφωνα με μία έρευνα του Markets and Markets, η παγκόσμια αγορά εγκαταστάσεων ORC αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 450 εκατομμύρια δολάρια από το 2020 μέχρι το 2025, μια αύξηση 66% μέσα σε μια 5ετία. Ο σύνθετος ρυθμός ετήσιας ανάπτυξης (compound annual growth rate ή αλλιώς CAGR) είναι 9,3% για την πενταετία που διανύουμε. Οι περισσότερες μονάδες βρίσκονται κατά κόρον στην Ευρώπη προς το παρόν [εικόνα], παρ' ότι πολλά νέα εγχειρήματα που συμπεριλαμβάνουν κύκλους ORC έχουν ήδη δρομολογηθεί ή αναμένεται να ξεκινήσουν μέχρι το 2025, καθιστώντας τις χώρες του Ειρηνικού Ωκεανού και της Ασιατικής ηπείρου τον πόλο έλξης του ερευνητικού αλλά και βιομηχανικού ενδιαφέροντος για εφαρμογές της τεχνολογίας ORC [6].

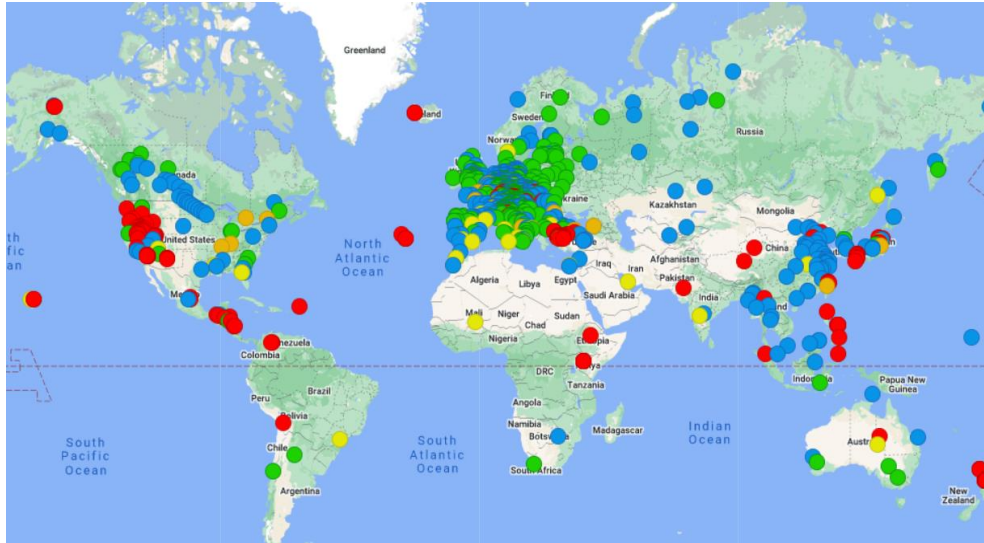
Τα περισσότερα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας ORC ανήκουν στην κλίμακα ισχύος των MW, η οποία είναι και ευρέως εμπορικά διαθέσιμη. Σε μικρότερες μονάδες ερευνητικών προγραμμάτων της κλίμακας των KW υπάρχει ερευνητικό ενδιαφέρον για παραλλαγές του ORC με διάφορες πηγές ενέργειας, ενώ αξιολογες εργασίες συντελούνται στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της τεχνολογίας των εκτονωτών θετικής εκτόπισης, που αποτελούν την πλέον κατάλληλη εφαρμογή για μικρές αποκεντρωμένες μονάδες με σχετικά μικρή παροχή εργαζόμενου μέσου κατά τη λειτουργία τους [7].

Στο **Σχήμα 10** και στο **Σχήμα 11** απεικονίζονται με βούλες οι εγκαταστάσεις ORC σε παγκόσμια αλλά και σε Ευρωπαϊκή κλίμακα. Οι κυρίαρχες γεωγραφικές περιοχές όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ είναι η Μέση Ανατολή και η Βόρεια Αμερική, εξαιτίας της αφθονίας γεωθερμικής ενέργειας που διαθέτουν. Ακολουθεί η Ευρώπη, όπου η πιο διαδεδομένη τεχνολογία για παροχή θερμότητας στον κύκλο ORC είναι η καύση βιομάζας.

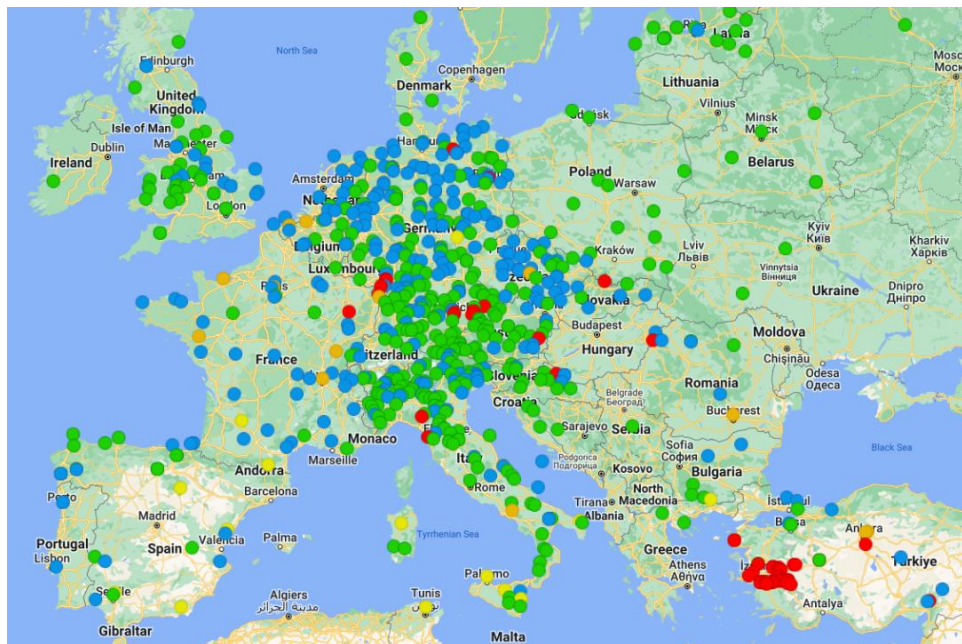
Αναφορικά με τον αριθμό εγκατεστημένων μονάδων, η Ευρώπη κατέχει την πρώτη θέση με μεγάλο πλήθος μικρών σχετικά εγκαταστάσεων βιομάζας και ανάκτησης θερμότητας (WHR) ισχύος 1 έως 5 MW. Στη δεύτερη θέση βρίσκεται η Ρωσία που διαθέτει πολλά μικρού μεγέθους αποκεντρωμένα συστήματα ενέργειας κατά μήκος των αγωγών φυσικού αερίου της, παρ' όλα αυτά διαθέτει μικρή συνολική εγκατεστημένη ισχύ.

Η Τουρκία και οι Η.Π.Α κυριαρχούν στις γεωθερμικές εφαρμογές ORC συστημάτων, ενώ η χρήση βιομάζας ως πηγή θερμότητας εισόδου στον ORC απαντάται κυρίως στην Ευρώπη, λόγω ευνοϊκών κινήτρων, αυστηρών κυρώσεων και περιβαλλοντικών νομοθεσιών από την

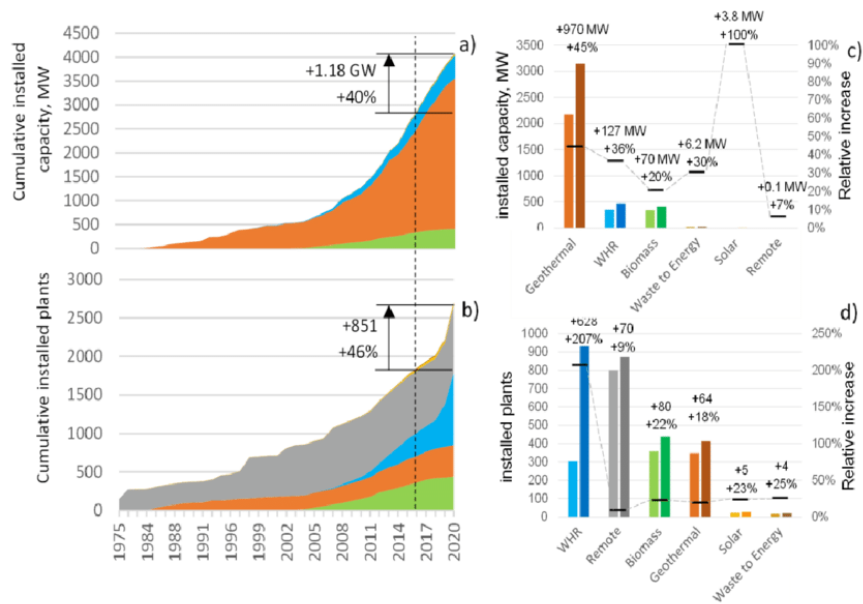
Ευρωπαϊκή Ένωση. Οι εφαρμογές ανάκτησης θερμότητας έχουν μεγαλύτερη γεωγραφική διασπορά και δεν συγκεντρώνονται σε κάποια γεωγραφική περιοχή, καθώς είναι συνδεδεμένες με βιομηχανικές διεργασίες και όχι με την διαθεσιμότητα κάποιας πρωτογενούς πηγής ενέργειας.



Σχήμα 10 : Ενεργειακές εγκαταστάσεις ORC παγκοσμίως [16]



Σχήμα 11 : Ενεργειακές εγκαταστάσεις ORC στην Ευρώπη [16]



Σχήμα 12 : Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ORC και πηγές ενέργειας εισόδου [8]

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη της τεχνολογίας ORC όσον αφορά τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ καθώς και τον αριθμό των εγκαταστάσεων, από το 1975 μέχρι το 2020. Δίνεται, επίσης η ποσοστιαία συμμετοχή των διάφορων εφαρμογών από διαφορετικές πηγές θερμότητας στη δυναμικότητα των μονάδων ORC. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι μέχρι το 2008 η εγκατεστημένη ισχύς παρέμεινε σε σχετικά χαμηλά επίπεδα (κάτω από 100 MW) και έπειτα αυξήθηκε δραματικά σε μικρό χρονικό διάστημα, φτάνοντας το μέγιστο των 400 MW το 2015. Τα τελευταία χρόνια η εγκατεστημένη ισχύς παρουσιάζει σταθερότητα στη τιμή της, περίπου στα 300 MW. Εφαλτήριο για αυτή τη ραγδαία ανάπτυξη των συστημάτων ORC μετά το 2008 αποτέλεσε η αύξηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος σε πηγές γεωθερμικής ενέργειας και κατ' επέκταση η δημιουργία εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης της. Ένας άλλος μεγάλος παράγοντας στην εξέλιξη αυτή ήταν η ανάπτυξη συστημάτων καύσης βιομάζας (κυρίως από το 2000-2012). Τα τελευταία χρόνια η αγορά ORC φαίνεται να εκδηλώνει μεγάλο ενδιαφέρον σε εφαρμογές αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας από θερμικές διεργασίες (WasteHeatRecovery - WHR). Η δυναμικότητα της κάθε εφαρμογής μπορεί να διαιρεθεί με την σημερινή αθροιστική εγκατεστημένη ισχύ, ώστε να ποσοτικοποιήσουμε τη συνεισφορά της εκάστοτε πηγής θερμότητας επί της συνολική εγκατεστημένη ισχύος των μονάδων ORC. Οι γεωθερμικές εφαρμογές ξεχωρίζουν από τις υπόλοιπες, διαθέτοντας τη μερίδα του λέοντος επί της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος με 77,4 %. Ακολουθούν, οι μονάδες WHR με 11,6 % και οι εγκαταστάσεις καύσης βιομάζας με 10,1%. Η συνεισφορά των άλλων εφαρμογών είναι αρκετά μικρή, με τις μονάδες 'Waste-to-energy' στο 0,7 % και τις ηλιακές εγκαταστάσεις μόλις στο 0,2 % της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος [8].

Αναφορικά με τις εγκατεστημένες λειτουργικές μονάδες ORC, οι τάσεις ανά τα χρόνια είναι λιγότερο στατικές και παρουσιάζουν κάποιες υπερακοντίσεις, κυρίως εξαιτίας της εγκατάστασης μικρών ‘micro-scale’ αποκεντρωμένων μονάδων ισχύος περίπου 1kW. Από το 2018 και μετά έχει σημειωθεί τεράστια αύξηση στον αριθμό των μονάδων WHR μικρού μεγέθους. Το μεγαλύτερο ποσοστό των μονάδων ORC μέχρι το 2000 χρησιμοποιούσαν γεωθερμική ενέργεια μέχρι το 2000, βιομάζα από το 2000 μέχρι το 2010 και απορριπτόμενη θερμότητα από θερμικές διεργασίες (WHR) από το 2010 μέχρι και σήμερα. Η εικόνα μετά την πανδημία COVID-19 για τις μονάδες ORC παγκοσμίως έχει ως εξής : 34,5 % των μονάδων ανήκουν στην κατηγορία WHR, 32,3 % είναι αποκεντρωμένα συστήματα, 16,2 % είναι γεωθερμικές, ενώ οι ηλιακές μονάδες απαρτίζουν το 1 % των συνολικών εγκατεστημένων μονάδων ORC.

Αναφορικά με τις εμπορικές διατάξεις συστημάτων ORC και τους κατασκευαστές τους, ένα ενδιαφέρον και αξιοσημείωτο στατιστικό στοιχείο είναι ότι οι 3 κυρίαρχες εταιρίες κατασκευής εγκαταστάσεων ORC, που ηγούνταν στην αγορά τη προηγούμενη δεκαετία, έχουν κατορθώσει να κρατήσουν τα ηνία στην αγορά τα τελευταία χρόνια, παρά τον αυξημένο ανταγωνισμό. Μαζί οι τρεις αυτές εταιρίες εγκατέστησαν το 78 % της νέας εγκατεστημένης ισχύος στην πενταετία 2016-2021, με την Ormat να προσθέτει 776 MW, την Turboden 158,2 MW και την Exergy 156,2 MW. Με αυτές τους τις πρωτοβουλίες κατάφεραν να αυξήσουν την εγκατεστημένη ισχύ τους κατά 40-50 % η καθεμία. Πολλές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον τομέα αύξησαν κατά μεγάλο βαθμό την εγκατεστημένη ισχύ στις εγκαταστάσεις τους, ανοίγοντας έτσι την αγορά των ORC και αποδεικνύοντας πως υπάρχει μεγάλο περιθώριο ανάπτυξης και κερδοφορίας. Ενδεικτικά παραθέτονται τα ακόλουθα στοιχεία :

- ✓ Orcan Energy AG (+3900 %)
- ✓ Enogia (+595 %)
- ✓ Rank (+192%)
- ✓ Dórr Systems AG (+111 %)
- ✓ Enerbasque (+ 72%)

Εταιρία	Εύρος ισχύος (MW_{el})
Ormat	$0.2-4.0 * 10^{-3}$
	0.2-22.0
Turboden	0.4-18.0
Exergy	0.1-50.0
Eneftch	0.005-0.030
GMK	0.5-15.0
Tri-O-Gen	0.10-0.17
Electrather	0.035-0.110

Πίνακας 2 : Μεγάλες εγκαταστάσεις ORC

Τοποθεσία	Καθαρή ηλ. ισχύς(kW)	Εύρος θερμοκρασιών (°C)	Ηλ. βαθμός απόδοσης (%)	Εργαζόμενο μέσο
Hefei City, Κίνα	1.00	30-100	6.8	R123
Cassino, Ιταλία	1.00	34-90	9.3	R245fa
Düsseldorf, Γερμανία	0.85	75-123	4.7	Novac 649
Liege, Βέλγιο	3.00	35-140	12.0	R245fa
Liege, Βέλγιο	3.70	25-88	5.7	R134a
Gdansk, Πολωνία	1.14	65-164	11.6	HFE7100
Αθήνα/Ε.Μ.Π.	5.00	30-82	-	R134a
Tianjin, Κίνα	0.35	23-88	6.0	R245fa
Ιαπωνία	0.35	20-136	11.0	R113
Lesotho	3.00	30-130÷180	8.1	R245fa

Πίνακας 3 : Μικρής Ισχύος ORC

2.2. Περιγραφή του θερμοδυναμικού κύκλου

Ο Οργανικός Κύκλος Rankine βασίζεται στον κύκλο Clausius-Rankine και οι διαδικασίες θέρμανσης, ατμοποίησης και εκτόνωσης παραμένουν ίδιες στους δύο κύκλους. Ο ORC εμφανίζει λοιπόν, όπως μαρτυρά και το όνομά του αρκετές ομοιότητες με τον κλασικό κύκλο Clausius-Rankine, παρουσιάζει ωστόσο και κάποιες βασικές διαφορές σε σχέση με αυτόν που τον καθιστούν κατάλληλο για τις εφαρμογές της παρούσας διατριβής. Η βασικότερη διαφορά μεταξύ των δύο πανομοιότυπων αυτών θερμοδυναμικών κύκλων είναι το εργαζόμενο μέσο. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του ORC γίνεται χρήση κάποιου οργανικού μέσου (το οποίο

διαφέρει ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή) στη θέση του νερού-ατμού που χρησιμοποιείται ως εργαζόμενο μέσο στον τυπικό κύκλο Clausius-Rankine. Το οργανικό μέσο στον ORC εμφανίζει χαμηλότερες θερμοκρασίες ατμοποίησης, γεγονός που καθιστά εφικτή την αξιοποίηση πηγών θερμότητας χαμηλής και μέσης θερμοκρασίας, όπως είναι η ηλιακή και γεωθερμική ενέργεια, τα καυσαέρια μηχανών εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ) και αεριοστροβίλων, η βιομάζα κ.α. Η μείωση αυτή στην απαιτούμενη θερμοκρασία ατμοποίησης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα από μηχανολογικής σκοπιάς, όπως μικρότερη θερμική καταπόνηση των εξαρτημάτων του συστήματος (βαλβίδων, σωληνώσεων, στροβίλων) και χαμηλότερες πιέσεις στα σημεία του κύκλου. Επίσης, τα περισσότερα οργανικά μέσα παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τα αντίστοιχα μη οργανικά (όπως το νερό) και αυτό συντελεί στην ανάπτυξη εγκαταστάσεων μικρότερου όγκου, όπως η υπό μελέτη εγκατάσταση στο Λαύριο. Τέλος, σε αντίθεση με τον τυπικό κύκλο Clausius-Rankine, η ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου πραγματοποιείται γρήγορα εντός ενός μόνο εναλλάκτη και όχι σταδιακά όπως στην περίπτωση χρήσης νερού-ατμού. Συνεπώς, δεν απαιτείται η ύπαρξη τυμπάνου για τη ατμοποίηση του εργαζόμενου μέσου, αλλά επαρκεί ένα τροφοδοτικό δοχείο που λειτουργεί ως μέσο αποθήκευσης του μέσου, γεγονός που απλοποιεί την εγκατάσταση και μειώνει το κόστος της. Η αναθέρμανση εν γένει δεν συνιστάται σε εφαρμογές ORC, ενώ η απομάστευση εργαζόμενου μέσου από τον εκτονωτή/στρόβιλο δεν βελτιώνει αισθητά την συνολική απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου.

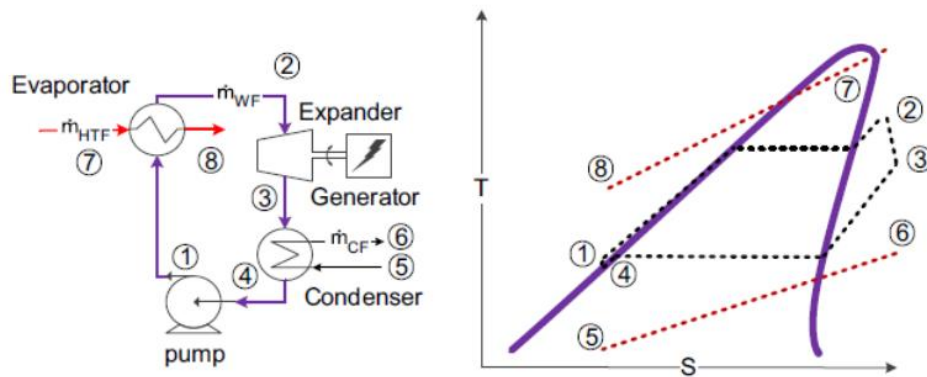
Η αρχή λειτουργίας του κύκλου Rankine, ανεξάρτητα αν το εργαζόμενο μέσο είναι οργανικό ή νερό-ατμός είναι η ακόλουθη. Αρχικά το μέσο καταθλίβεται στην τροφοδοτική αντλία και οδηγείται στον ατμοπαραγωγό της εγκατάστασης. Εν συνεχεία, προθερμαίνεται στον Οικονομητήρα μέχρι την κατάσταση κορεσμένου υγρού, ατμοποιείται στον Ατμοποιητή και αλλάζει φάση από κορεσμένο υγρό σε κορεσμένο ατμό. Έπειτα, γίνεται υπέρθερμος ατμός στον Υπερθερμαντή και οδηγείται στον στρόβιλο, όπου και εκτονώνεται δίνοντας κίνηση στον ρότορα της γεννήτριας, ώστε να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα. Η μη αξιοποιήσιμη θερμότητα μετά τον στρόβιλο απορρίπτεται στο Συμπυκνωτή, όπου το εργαζόμενο μέσο συμπυκνώνεται ώστε να επαναλάβει εκ νέου τον κύκλο.

Τα συστήματα ORC συνήθως ταξινομούνται με βάση της εγκατεστημένη ισχύ της μονάδας, δηλαδή το μέγεθος της, καθώς και με βάση τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας (Heat source temperature).

Αναφορικά με την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων, αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής :

- Μικρής Κλίμακας : 0 – 50 kW
- Μεσαίας Κλίμακας : 50 Kw – 1 MW
- Μεγάλης Κλίμακας : 1 MW και πάνω

Τα όρια δεν είναι το ίδιο ξεκάθαρα όσον αφορά τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας, καθώς η επιστημονική κοινότητα χρησιμοποιεί διαφορετικά τους εκάστοτε όρους ανάλογα με την εφαρμογή και τις διαφορετικές πηγές πρόσδοσης θερμότητας στο σύστημα. Για παράδειγμα, μια γεωθερμική πηγή στους 200°C θεωρείται πηγή υψηλής θερμοκρασίας για τις εφαρμογές γεωθερμίας, όμως κρίνεται ως αρκετά χαμηλή για ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας (waste heat recovery system).



Σχήμα 13 : Τυπική διάταξη ORC και διάγραμμα T-S του θερμοδυναμικού κύκλου [29]

2.3. Πηγές θερμότητας για τον ORC

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, οι κυριότερες πηγές θερμότητας που αξιοποιούνται από συστήματα ORC είναι η γεωθερμική ενέργεια, η ηλιακή, η απορριπτόμενη θερμότητα από κάποια διεργασία και η καύση βιομάζας. Από τις παραπάνω διαφορετικές εφαρμογές ανάλογα με την πηγή της θερμότητας που εισάγεται σαν είσοδος στο θερμοδυναμικό μας σύστημα, η ανάκτηση της απορριπτόμενης ενέργειας (waste heat recovery) από προηγούμενες διεργασίες αναμένεται να εξελιχθεί ταχύτητα και σε μεγαλύτερη εμβέλεια από τους άλλες εφαρμογές, λαμβάνοντας τα ηνία στην αγορά ORC συστημάτων. [master thesis solar]

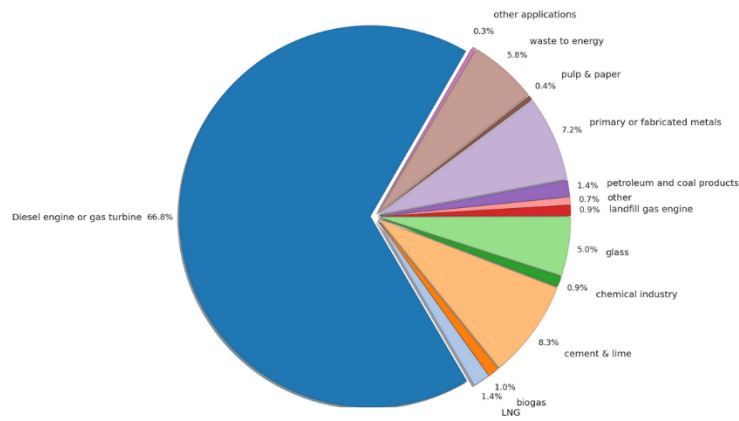
2.3.1. Απορριπτόμενη θερμότητα

Οι περισσότεροι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η πλειονότητα των βιομηχανικών διεργασιών παράγουν καυσαέρια. Σε πολλές εφαρμογές τα καυσαέρια των εγκαταστάσεων διαθέτουν μεγάλη εξέργεια, καθώς και διάφορες χημικές ενώσεις επιβλαβείς για το περιβάλλον ως αποτέλεσμα των θερμικών και χημικών διεργασιών που συντελούνται.

Στην προσπάθεια της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και εξαιτίας της τάσης για συνεχή αύξηση της αποδοτικότητας των ενεργειακών

συστημάτων, έχει δημιουργηθεί μεγάλο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση αυτών των καυσαερίων.

Heat Recovery applications



Heat recovery - Total installed capacity : 349.1 MWel - Last update : January 21th, 2016

With 349.1 MWel of installed capacity in the world, and 19.5 MW of new capacity in construction (10 projects), the heat recovery market is still at an early stage but has long passed the demo/protophase phase. The main application is waste heat recovery from Diesel engines or gas turbines, with 66.8% of the installed capacity (41 projects). These units are mostly installed on compressor stations along gas pipeline, or on Diesel power plants. Cement & lime plants are the first industrial application, with 10 projects and a total installed power of 29 MWel. Waste to Energy (incineration) and metal industries (steel, aluminum, foundries...), have similar shares with respectively 12 and 24 projects.

Σχήμα 14 : Εφαρμογές ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας

Η θερμότητα που παράγεται ως πάρεργο από βιομηχανικές διεργασίες συχνά δεν αξιοποιείται πλήρως και απορρίπτεται στο περιβάλλον. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται βαριές βιομηχανίες όπως η χαλυβουργία, η υαλοποιία, η τσιμεντοβιομηχανία και τα διυλιστήρια. Από τις παραπάνω εφαρμογές, η τσιμεντοβιομηχανία προσφέρει μεγάλη δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας, αφού πάνω από το 40 % της προσδιδόμενης θερμότητας απορρίπτεται υπό τη μορφή καυσαερίων θερμοκρασίας περίπου 300°C. Οι πηγές της κατηγορίας αυτής έχουν ως επί το πλείστον ένα εύρος θερμοκρασιών της τάξης των 300 – 400 °C. Η εναπομείνουσα θερμότητα των παραπάνω διεργασιών ανακτάται μέσω ενός ενδιάμεσου κυκλώματος θερμικού ελαίου, έτσι ώστε να αμβλύνονται και να αποσβένονται οι μεταβολές του φορτίου.

Επίσης, οι μηχανές που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και διαθέτουν αρκετές δυνατότητες ως προς την εκμετάλλευση της “χαμένης” ενέργειας των καυσαερίων είναι οι Μ.Ε.Κ και οι αεριοστρόβιλοι. Στις μηχανές εσωτερικής καύσης οι κύριες πηγές θερμότητας είναι τα καυσαέρια με θερμοκρασίες 350–900 °C και το κύκλωμα ψύξης τους με θερμοκρασίες 80-100 °C. Όσον αφορά τους αεριοστρόβιλους, οι θερμοκρασίες των καυσαερίων κυμαίνονται από 250 °C για μικρές μονάδες μέχρι και 700 °C για αεριοστρόβιλους μεγάλης ονομαστικής ισχύος.

Κατηγορία	Πηγή Θερμότητας	Εύρος Θερμοκρασίας	Τεχνολογία Ανάκτησης
Υψηλής Θερμότητας (>650°C)	Solid waste	650-1000	Air preheating
	Fume incinerators	650-1450	Steam Rankine cycle
	Nickel refining furnace	1370-1650	Steam generation (Heating)
	Glass melting furnace	1000-1550	Heat exchanger (preheating)
	Aluminum refining furnaces	650-760	Thermoelectric
	Copper reverberatory furnace	900-1100	Thermal PV
	Copper refining furnace	760-815	
	Zinc refining furnace	760-110	
	Cement kiln	620-730	
	Hydrogen plants	650-1000	
Μέτριας Θερμότητας (230-650 °C)	Steam boiler exhaust	230-480	Steam Rankine cycle
	Gas turbine exhaust	370-540	Organic Rankine cycle
	Drying and baking	230-600	Heat exchangers (pre-heating process)
	Catalytic crackers	425-650	Air pre-heating
	Reciprocating engine exhausts	315-600	Thermoelectric
	Drying and baking ovens	230-600	Thermal PV
Χαμηλής Θερμότητας (<230°C)	Process steam condensate	50-90	Space heating
	Cooling water from:		Domestic water heating
	Internal combustion engines	66-120	Heat pump
	Hot processed liquids and solids	32-232	Organic Rankine Cycle
	Annealing furnaces	66-230	Heat exchangers
	Drying, baking and curing ovens	93-230	Absorption/adsorption cooling
	Welding and injection molding machines	32-88	Kalina cycle
	Bearings	32-88	Piezoelectric
	Air compressors	27-50	

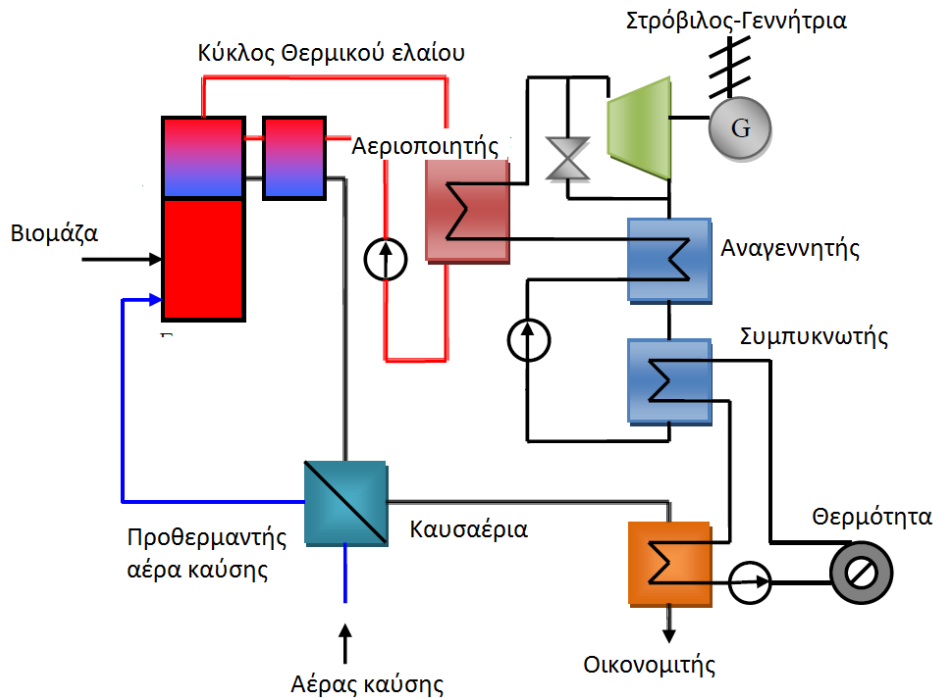
Σχήμα 15 : Κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών ανάκτησης θερμότητας ανάλογα με την θερμοκρασία της πηγής [28]

2.3.2. Καύση βιομάζας

Η χρήση κύκλων ORC για συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP) από την καύση βιομάζας είναι ευρέως διαδεδομένη. Οι μονάδες ORC είναι η καταλληλότερη και μία εκ των λίγων αποδεδειγμένων τεχνολογιών για αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής ενέργειας μεγαλύτερης του 1 MWe που μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά με στερεά καύσιμα και να είναι ταυτόχρονα συμφέρουσα από οικονομικής πλευράς.

Η αρχή λειτουργίας είναι όμοια με συστημάτων που χρησιμοποιούν τις πηγές ενέργειας που αναφέρθηκαν προηγουμένως, με τη βασική διαφορά ότι το οργανικό μέσο δεν εισέρχεται απευθείας μέσα από το λέβητα προκειμένου να θερμανθεί και να ατμοποιηθεί, αλλά λαμβάνει την θερμότητα έμμεσα από ένα ενδιάμεσο μέσο. Το ενδιάμεσο αυτό μέσο μπορεί να είναι νερό, όμως συνηθέστερα πρόκειται για κάποιο θερμικό έλαιο. Μέσω της χρήση ελαίων για τη μεταφορά θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο επιτρέπεται η αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου, δίχως να αυξηθεί ιδιαίτερα η πίεση. Ακόμα, αυξάνεται η αδράνεια της εγκατάστασης σε αλλαγές του φορτίου και η διαδικασία ελέγχου του συστήματος απλοποιείται σε σημαντικό βαθμό. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συστημάτων

καύσης βιομάζας είναι αρκετά μικρός, γεγονός που κρίνει αναγκαία τη χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας από τη διεργασία μέσω μονάδων συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (CHP). Η θερμότητα συμπύκνωσης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ζεστού νερού θερμοκρασίας 80-130 °C μπορεί να αξιοποιηθεί για τηλεθέρμανση και άλλες θερμικές διεργασίες, όπως ξήρανση ξύλου και θέρμανση κτιρίων.



Σχήμα 16 : Αρχή λειτουργίας κύκλου ORC [30]

2.3.3. Γεωθερμική ενέργεια

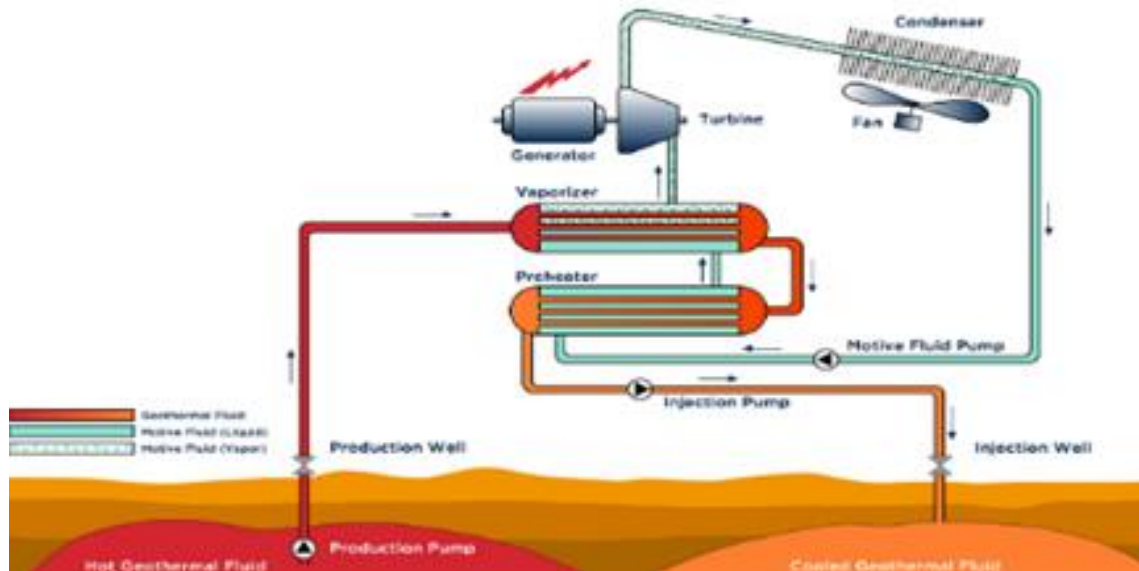
Γεωθερμία ονομάζεται η θερμική ενέργεια που έχει η γη είτε αυτή προέρχεται από υγρά, κυρίως ζεστό νερό, είτε από πετρώματα. Όσο πιο βαθιά προχωρούμε προς το εσωτερικό της γης, τόσο μεγαλύτερες είναι οι θερμοκρασίες που επικρατούν. Η θερμότητα που εκλύεται στο περιβάλλον από την επιφάνεια της γης στη μονάδα του χρόνου διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Ο μέσος γεωθερμικός λόγος κοντά στην επιφάνεια της γης είναι περίπου 300K/Km, ο οποίος δεν είναι ομοιόμορφα διανεμημένος, γ'αυτό υπάρχουν περιοχές κατάλληλες και ακατάλληλες για γεωθερμικές εγκαταστάσεις.

Η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας στο υπέδαφος της γης έχει πολλές προοπτικές και δυνατότητες σε παγκόσμια κλίμακα. Ειδικά για πηγές γεωθερμίας με θερμοκρασία μικρότερη των 180°C τα συστήματα ORC είναι η πλέον κατάλληλη και διαδεδομένη τεχνολογία στις μέρες μας. Οι μονάδες ORC χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την αξιοποίηση της ενέργειας μέσω χαμηλής και μέσης ενθαλπίας, όπως είναι οι γεωθερμικές πηγές. Η

βελτιστοποίηση των θερμοδυναμικών διεργασιών, της διάταξης της εγκατάστασης και η επιλογή του καλύτερου οργανικού εργαζόμενου μέσου για την εκάστοτε εφαρμογή έχουν ώριμη ακαδημαϊκή και βιομηχανική ιστορία.

Η θερμοκρασία των γεωθερμικών πηγών κυμαίνεται από 80° C για θερμότητα υπό τη μορφή ζεστού νερού, μέχρι 650° C για θερμότητα υπό τη μορφή σχιστόλιθου. Πιο συγκεκριμένα, η βιωσιμότητα των συστημάτων ORC απαιτεί πηγές θερμότητας μεγαλύτερες των 80° C και μικρότερες των 180° C. Κάτω από την θερμοκρασία των 80° C ο βαθμός απόδοσης της μετατροπής μειώνεται δραματικά, καθιστώντας τις γεωθερμικές μονάδες οικονομικά μη βιώσιμες. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες εισόδου κρίνεται καταλληλότερη και αποδοτικότερη η εφαρμογή διατάξεων συμπαραγωγής.

Η διάταξη ενός δυαδικού συστήματος γεωθερμίας και ORC παρουσιάζεται ακολούθως στο **Σχήμα 17** :



Σχήμα 17 : Διάταξη δυαδικού συστήματος γεωθερμίας και ORC

2.3.4. Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια από τις πιο διαδεδομένες, οικολογικά βιώσιμες, τεχνολογικά ώριμες και άφθονες πηγές ενέργειας. Η εκμετάλλευση της ανεξάντλητης αυτής ενέργειας από τον ήλιο κατά τη διάρκεια της μέρας μπορεί να πραγματοποιηθεί με ηλιακούς συλλέκτες διαφόρων τύπων και γεωμετριών καθώς και μέσω εγκαταστάσεων 'ηλιακών λιμνών' (solar ponds).

Η σχεδίαση και κατασκευή των ηλιακών παραβολικών συλλεκτών είναι αρμοδιότητα άλλου συνεργαζόμενου φορέα για αυτό και δεν θα εξεταστεί εκτενώς στο παρόν κείμενο.

Ανάλογα με τον τύπο των συλλεκτών, αυτοί κατηγοριοποιούνται σε σωλήνες κενού (μη συγκεντρωτικούς) και συγκεντρωτικούς. Οι συγκεντρωτικοί χωρίζονται περαιτέρω σε

γραμμικούς παραβολικούς συλλέκτες, παραβολικούς δίσκους, ανακλαστήρες Fresnel καθώς και ηλιακούς πύργους.



Σχήμα 18 : Σχεδιάγραμμα ηλιακών θερμικών συστημάτων [30]

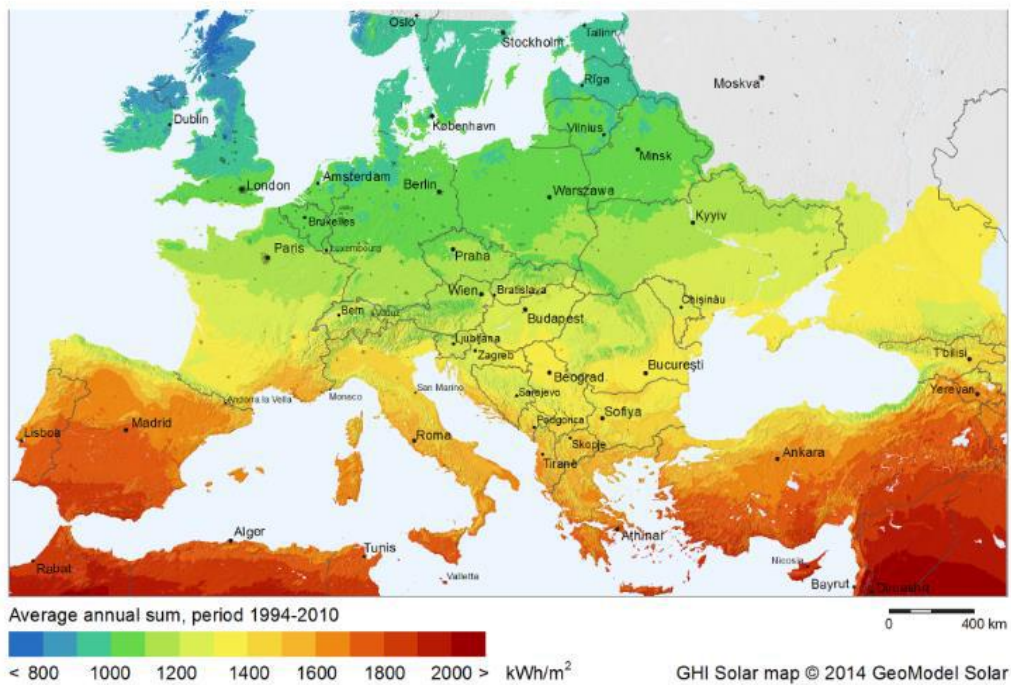
Οι διαφορετικές αυτές διατάξεις διαθέτουν διαφορετική θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου. Η διακύμανση των τιμών είναι μεταξύ 80°C στις ηλιακές λίμνες μέχρι και 1000°C στους ηλιακούς πύργους.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά και για λόγους πληρότητας οι θερμοκρασίες διάφορων τύπων συλλεκτών ηλιακής ακτινοβολίας.

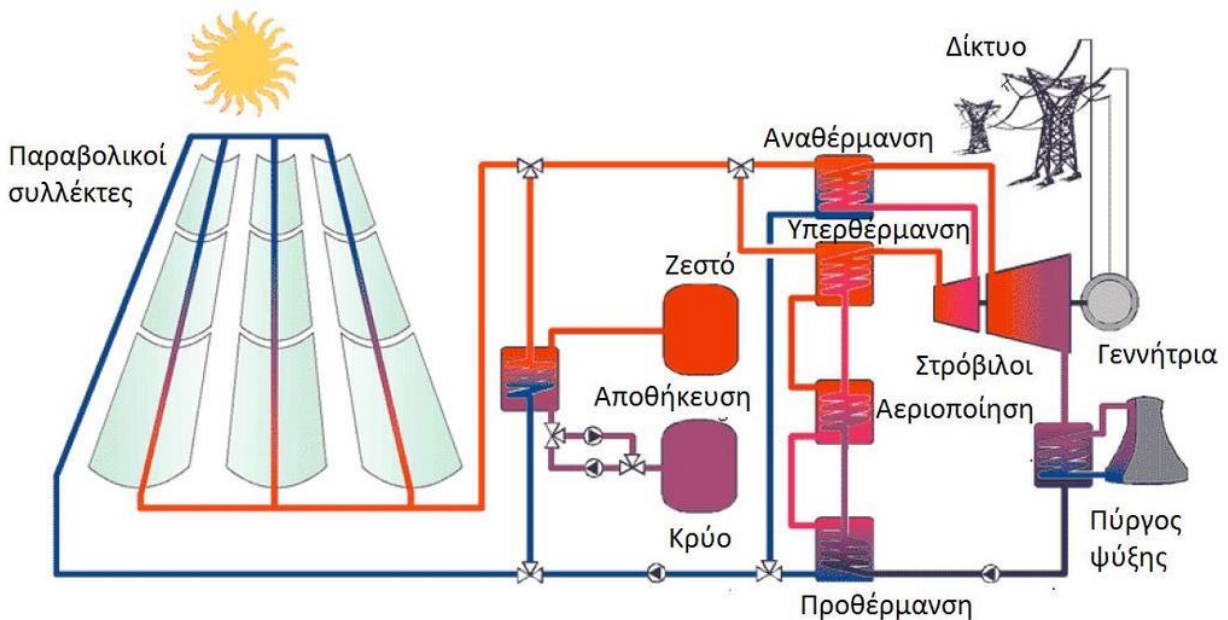
Τύπος Συλλέκτη	Θερμοκρασία (°C)
Ηλιακή λίμνη	80 - 90
Επίπεδα Ηλιακά πάνελς	80 - 100
Συλλέκτης κενού	90 - 120
Γραμμικός παραβολικός συλλέκτης	200 – 450
Ανακλαστήρες Fresnel	100 – 400
Παραβολικός δίσκος	750
Ηλιακός Πύργος	1000

Πίνακας 4 : Οι διαφορετικοί τύποι συλλεκτών και τα εύρη θερμοκρασίας τους

Όπως παρουσιάζεται και στον **Πίνακα 4**, οι περισσότεροι τύποι συλλεκτών εμφανίζουν θερμοκρασίες εργαζόμενου μέσου μικρότερες από 450°C. Συνεπώς, συνδυάζονται ικανοποιητικά με κύκλους Rankine και ειδικά με τον ORC, λόγω της σχετικά μικρής θερμοκρασίας εισόδου στο σύστημα. Επίσης, λόγω της αβεβαιότητας στην πρόβλεψη των καιρικών φαινομένων και στη μεταβλητότητα της παροχής ηλιακής ισχύος ανά ημέρα, μήνα και εποχή του χρόνου ένα σύστημα ORC με ηλιακούς συλλέκτες ενδείκνυται να είναι εξοπλισμένο με μια μονάδα αποθήκευσης θερμότητας, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχεδιάγραμμα.



Σχήμα 19 : Μέση τιμή ηλιακής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας σε διάφορες χώρες του κόσμου



Σχήμα 20 : Σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μέσω παραβολικών συλλεκτών [31]

Τα μικρότερα ηλιακά συστήματα με κύκλους ORC παρουσιάζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, συνήθως μικρότερες των 300° C
- Μείωση του αρχικού κεφαλαίου της επένδυσης λόγω των σχετικά φτηνών υλικών που χρησιμοποιούνται στην εγκατάσταση
- Ευελιξία, καθώς μεγάλα ηλιακά συστήματα μερικών MW μπορούν να υλοποιηθούν μέσω συνδυασμού μικρότερων συστημάτων ORC

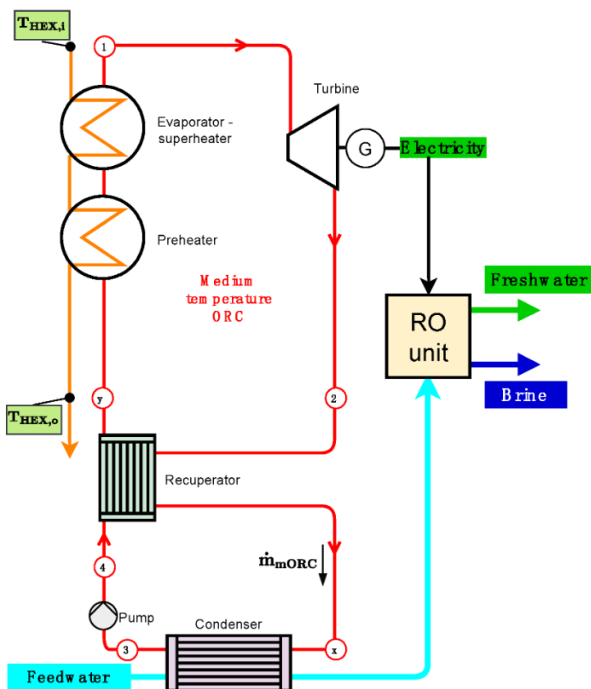
Παρ' όλα αυτά οι μονάδες παραγωγής ενέργειας με ηλιακά συστήματα και μονάδες ORC έχουν πολύ περιορισμένη εφαρμογή και η τεχνολογία βρίσκεται σε πρώιμο ερευνητικό στάδιο.

2.4. Αφαλάτωση θαλασσινού νερού μέσω μονάδων ORC

Ο πληθυσμός της γης αυξάνεται συνεχώς και προβλέπεται να ξεπεράσει το κατώφλι των 8 δισεκατομμυρίων μέσα στο 2023, σύμφωνα με τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών. Το ζήτημα του υπερπληθυσμού έχει οδηγήσει σε σοβαρές ανησυχίες για το πρόβλημα της παροχής πόσιμου νερού στις επόμενες δεκαετίες. Επιπροσθέτως, ένα μεγάλο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε παράκτιες περιοχές, γεγονός που καθιστά την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού σε τοπικές μονάδες αφαλάτωσης μια πολλά υποσχόμενη λύση στο πρόβλημα.

Γενικά, οι τεχνικές αφαλάτωσης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες :

- Τεχνολογίες Μembrάνης με συχνότερη εφαρμογή αυτή της αντίστροφης ώσμωσης (reverse osmosis «RO») για θαλασσινό αλλά και υφάλμυρο νερό, κατά την οποία το νερό διέρχεται μέσω μιας πολύ λεπτής μεμβράνης και το άλας απομακρύνεται σχεδόν εξολοκλήρου.
- Θερμικές, με κυρίαρχη εφαρμογή την απόσταση πολλαπλής φάσης (Multi-stage Flash «MSF»), όπου πραγματοποιείται ατμοποίηση και συμπύκνωση του νερού, έτσι ώστε το άλας να κατακαθίσει σε κάποιο δοχείο και να απομακρυνθεί.



Σχήμα 21 : Μονάδα ORC αφαλάτωσης θαλασσινού νερού

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν εισέλθει και στη βιομηχανία της αφαλάτωσης νερού για την διαδικασία απομάκρυνσης της αλμύρας, ώστε να μειθούν τα αέρια θερμοκηπίου και να περιοριστεί η περιβαλλοντική ρύπανση που παράγεται από τις τεχνικές αφαλάτωσης.

Επιπροσθέτως, ο κύκλος ORC βρίσκει ευρύ πεδίο εφαρμογών σε εγκαταστάσεις αφαλάτωσης, κυρίως σε εφαρμογές αντίστροφης ώσμωσης που απαιτούν ηλεκτρική ή μηχανική ενέργεια για τη λειτουργία τους.

3. Ο κύκλος ψύξης ακροφυσίου (ECC)

3.1. Επισκόπηση των μεθόδων παραγωγής ψύξης

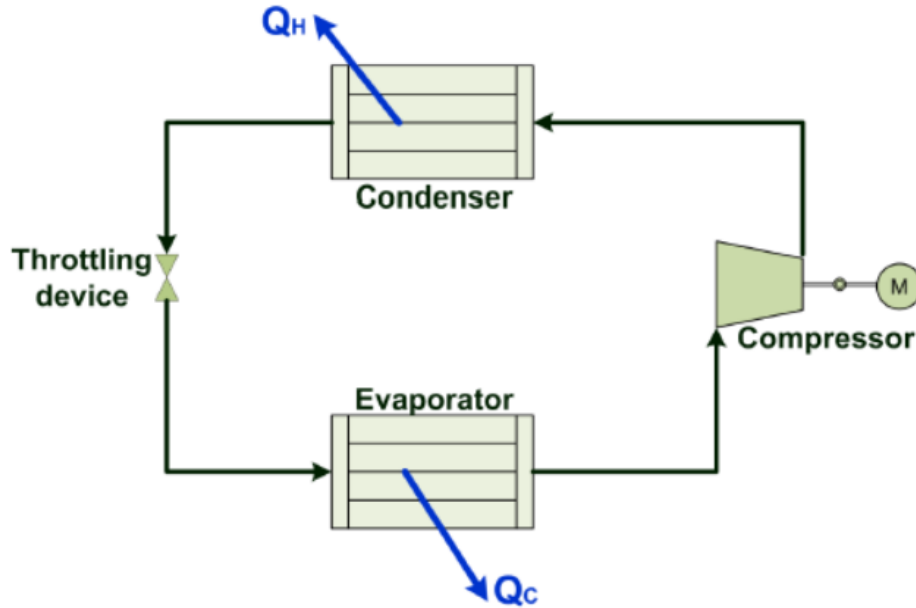
Ο κύκλος ORC της εγκατάστασης συνδυάζεται με έναν κύκλο ψύξης ακροφυσίου (Ejector Cooling Cycle – ECC). Ακολουθεί μια σύντομη επισκόπηση των μεθόδων παραγωγής ψύξης.

Τα συστήματα θερμικής ψύξης ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες :

- Ψύξη με συμπίεση ατμού
- Ψύξη με απορρόφηση
- Ψύξη με προσρόφηση
- Ψύξη με αποξηραντικό μέσο
- Ψύξη με συμπίεση σε ακροφύσιο
- Υβριδικές διατάξεις ψύξης

3.1.1. Ψύξη με συμπίεση ατμού

Μια τυπική διάταξη ψύξης μέσω συμπίεσης ατμών απεικονίζεται στο **Σχήμα 22**. Το ψυκτικό μέσο εξέρχεται από τον ατμοποιητή σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού χαμηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας. Κατόπιν, ο υψηλής ενθαλπίας ατμός εισέρχεται στον συμπιεστή, όπου και καταθλίβεται σε υψηλή πίεση. Εν συνεχεία, το εργαζόμενο μέσο διέρχεται στο ψυγείο, εναλλάσει θερμότητα με το περιβάλλον και εξέρχεται από αυτό σε κατάσταση υπόψυκτου υγρού. Έπειτα, αποτονώνεται ισενθαλπικά μέχρι κάποια χαμηλή πίεση στην στραγγαλιστική βαλβίδα και εξέρχεται από αυτή ως διφασικό ρευστό. Ο κύκλος κλείνει, καθώς το ψυκτικό κατευθύνεται στον ατμοποιητή, όπου απορροφά θερμότητα από τον ψυχόμενο χώρο και παράγει το επιθυμητό ψυκτικό αποτέλεσμα του κύκλου.



Σχήμα 22 : Τυπική διάταξη ψύξης μέσω συμπίεσης ατμού

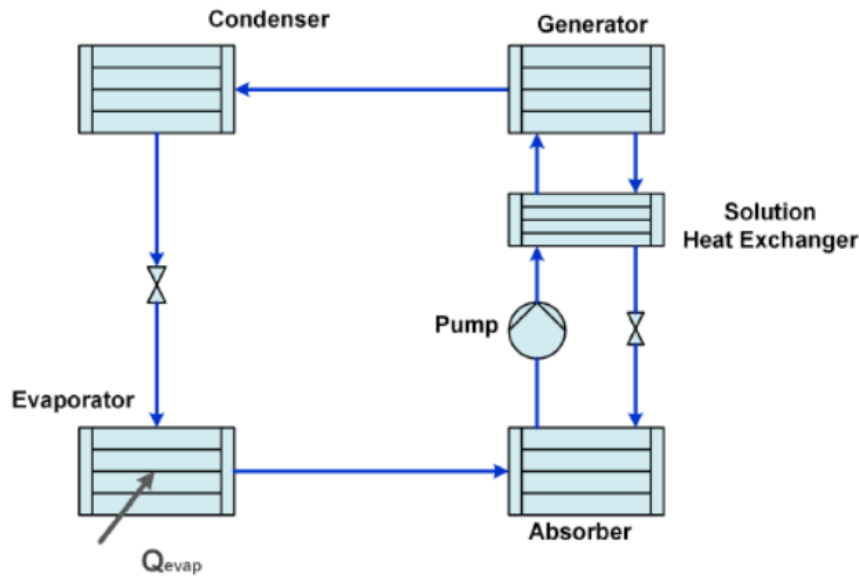
Ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP) ενός συστήματος ψύξης με συμπίεση ατμού λαμβάνει σχετικά μεγάλες τιμές, οι οποίες εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας της εγκατάστασης ψύξης. Ο COP μιας τέτοιας διάταξης παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση και κυμαίνεται από 1,5 μέχρι και σε τιμές μεγαλύτερες του 10.

3.1.2. Ψύξη με απορρόφηση

Η σχηματική αναπαράσταση μιας διάταξης ψύξης μέσω απορρόφησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 23. Εδώ, το ψυκτικό μέσο εξέρχεται από τον ατμοποιητή ως υπέρθερμος ατμός και κατόπιν εισέρχεται στον απορροφητή (absorber). Εκεί, το μέσο απορροφάται από ένα απρροφητικό υγρό, ενώ ταυτόχρονα αποβάλλει θερμότητα. Το διάλυμα απορροφητικού και ψυκτικού υγρού συμπιέζεται μέσω αντλίας και δέχεται θερμότητα από εξωτερική πηγή για τον διαχωρισμό του στον εναλλάκτη θερμότητας του διαλύματος (Solution Heat Exchanger). Το ψυκτικό μέσο που έχει αποδεσμευτεί διοχετεύεται στο ψυγείο της μονάδας, ενώ το ασθενές μείγμα εισέρχεται σε στραγγαλιστική βαλβίδα, όπου ελαττώνεται η πίεση του μέχρι την ελάχιστη τιμή του κύκλου και επιστρέφει στον απορροφητή. Ο κύκλος ολοκληρώνεται με την επιστροφή του ψυκτικού μέσου στον ατμοποιητή, αφού αυτό πρώτα διέλθει από την στραγγαλιστική βαλβίδα ώστε να εκτονωθεί.

Συνήθως, ως απορροφητικό μέσο χρησιμοποιείται ένα διάλυμα βρωμιούχου λιθίου (LiBr), ενώ ως ψυκτικό μέσο νερό. Η πηγή θερμότητας στο υποσύστημα γεννήτριας-εναλλάκτη διαλύματος πρέπει να βρίσκεται σε ελάχιστη θερμοκρασία 70-90°C. Ακόμα, σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγαλύτερο ψυκτικό αποτέλεσμα (πχ. σε διάταξη κατάψυξης) το ψυκτικό μέσο είναι συνήθως αμμωνίας (NH₃) με το νερό να διαδραματίζει το ρόλο του απορροφητικού μέσου, ενώ η θερμική πηγή πρέπει να βρίσκεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία της τάξεως των 100-120 °C.

Οι τυπικές τιμές του COP σε τέτοιου είδους διατάξεις κυμαίνονται μεταξύ 0,6 και 0,8, δηλαδή σαφώς μικρότερες από τις αντίστοιχες σε κύκλο συμπίεσης ατμών. Το βασικό πλεονέκτημα τέτοιων διατάξεων, ωστόσο, σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες συμπίεσης ατμών είναι η απουσία συμπίεστή που μειώνει τις απαιτήσεις του συστήματος σε ηλεκτρική ενέργεια. Επιπροσθέτως, η έλλειψη περιστρεφόμενων εξαρτημάτων αυξάνει την αξιοπιστία της διάταξης, μειώνει τα επίπεδα ανεπιθύμητων κραδασμών και θορύβου στο σύστημα και διευκολύνει τη συντήρησή του, μειώνοντας έτσι σε κάποιο βαθμό το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης.



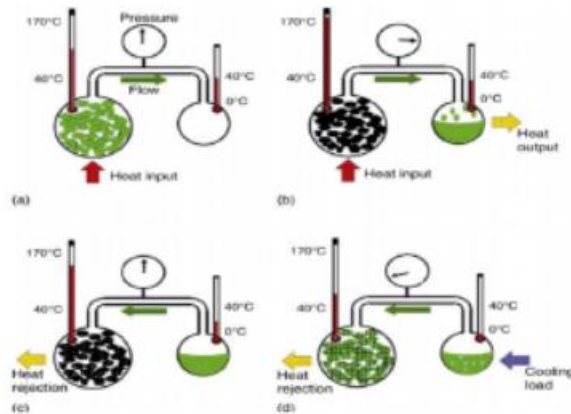
Σχήμα 23 : Σχηματική αναπαράσταση μιας διάταξης ψύξης μέσω απορρόφησης

3.1.3. Ψύξη με προσρόφηση

Οι διατάξεις ψύξης με προσρόφηση είναι εν γένει φιλικές προς το περιβάλλον και έχουν τη δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας σε χαμηλή θερμοκρασία ή χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, έχοντας έτσι καλές προοπτικές σε διατάξεις που στοχεύουν στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Ένα τυπικό σύστημα ψύξης μέσω προσρόφησης απεικονίζεται στο **Σχήμα 24**. Η διάταξη αποτελείται από δύο δύο διασυνεδεμένα δοχεία. Το πρώτο περιέχει ένα μείγμα απορροφητή και ψυκτικού, ενώ το δεύτερο μόνο ψυκτικό ρευστό. Τα δύο δοχεία βρίσκονται, αρχικά, σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας και πίεσης και το μείγμα στο πρώτο δοχείο διαθέτει ψυκτικό μέσο σε υψηλή συγκέντρωση. Κατά τη λειτουργία του συστήματος το δοχείο μείγματος απορροφητή-ψυκτικού δέχεται θερμότητα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πίεση του και το ψυκτικό μέσο να ωθείται εκτός του δοχείου. Εν συνεχεία, το ψυκτικό κατευθύνεται στο δεύτερο δοχείο, όπου απορρίπτει θερμότητα και ψύχεται. Όταν η συγκέντρωση του ψυκτικού μέσου στο πρώτο δοχείο φτάσει σε κάποια επίπεδα με βάση το σχεδιασμό και τις απαιτήσεις ψύξης της μονάδας, ψύχεται

μέχρι την αρχική θερμοκρασία, μειώνοντας έτσι την πίεση στο πρώτο δοχείο, το οποίο αναρροφά το ψυκτικό από το δεύτερο δοχείο, ώστε να επαναληφθεί εκ νέου ο κύκλος ψύξης. Η πτώση πίεσης στο πρώτο δοχείο συντελεί στην ατμοποίηση του υγρού ψυκτικού μέσου στο δεύτερο δοχείο, με αποτέλεσμα την παραλαβή θερμότητας από αυτό και την παραγωγή του επιθυμητού ψυκτικού αποτελέσματος.



Σχήμα 24 : Τυπικό σύστημα ψύξης μέσω προσρόφησης

Ο προσροφητής μαζί με το ψυκτικό μέσο αποτελούν το ζεύγος προσρόφησης. Η επιλογή των σωστών εργαζόμενων μέσων βασίζεται στα επιθυμητά χαρακτηριστικά τους ανάλογα με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι οι θερμοδυναμικές και χημικές ιδιότητες των ρευστών, καθώς και και το κόστος και η διαθεσιμότητα των χημικών ενώσεων.

Στις περισσότερες εφαρμογές κύκλων ψύξης με προσρόφηση, οι επιθυμητές ιδιότητες είναι οι εξής :

- Υψηλή λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης
- Μη τοξικότητα, μη αναφλεξιμότητα και αντιδιαβρωτική ικανότητα
- Θερμοκρασία ατμοποίησης μικρότερη των 0 °C
- Χαμηλή πίεση κορεσμού (υψηλότερη όμως τη ατμοσφαιρικής) στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας

Αντίστοιχα, για τον προσροφητή, οι επιθυμητές ιδιότητες είναι οι εξής :

- Υψηλή ικανότητα απελευθέρωσης του ψυκτικού κατά την πρόσδοση θερμότητας σε αυτό
- Υψηλή ικανότητα προσρόφησης υπό χαμηλές θερμοκρασίες

- Μη αλλοίωση των ιδιοτήτων με την πάροδο του χρόνου και με την ολοκλήρωση μεγάλου αριθμού ψυκτικών κύκλων
- Χαμηλό κόστος, μεγάλη διαθεσιμότητα της χημικής ουσίας
- Χαμηλή διαβρωτική ικανότητα και μη τοξικότητα

3.1.4. Ψύξη με αποξηραντικό μέσο

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν θερμική ενέργεια για να παράγουν το επιθυμητό ψυκτικό αποτέλεσμα. Σε σχέση με τις τυπικές διατάξεις ψύξης, οι διατάξεις ψύξης μέσω αποξηραντικού μέσου είναι πιο αποδοτικές και μπορούν να εξοικονομήσουν σημαντικά ποσά ενέργειας.

Εδώ, ένα αποξηραντικό μέσο (στερεό ή υγρό) ξηραίνει τον αέρα. Ο αποξηραμένος αέρας κατόπιν ψύχεται με άμεση ή έμμεση εξάτμιση και κατευθύνεται στον υπό ψύξη ή υπό κλιματισμό χώρο. Το αποξηραντικό μέσο φτάνει στο σημείο κορεσμού του, θερμαίνεται και απελευθερώνει την υγρασία που είχε προσλάβει προηγουμένως από τον αέρα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται 'επαναδραστηριοποίηση' του αποξηραντικού μέσου.

Γενικά, τα συστήματα αυτά κατηγοριοποιούνται ως συστήματα αφύγρανσης και θερμικά ενεργοποιημένης ψύξης. Ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP) τέτοιων μονάδων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1,3 – 2. Το μεγαλύτερο όφελος από την χρήση τέτοιων μονάδων είναι η σημαντικά μικρότερη περιβαλλοντική επίπτωση σε σχέση με συμβατικές διατάξεις και η δυνατότητα μείωσης του φορτίου αιχμής στην ηλεκτροπαραγωγή.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, οι εφαρμογές ψύξης με αποξηραντικό μέσο σε εφαρμογές οικιακού κλιματισμού μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια έως και 13%, ενώ σε εμπορικές εφαρμογές κλιματισμού η εξοικονόμηση ενέργειας είναι της τάξης του 8% [9].

3.1.5. Ψύξη με συμπίεση σε ακροφύσιο

Η παρουσίαση του συγκεκριμένου κύκλου ψύξης θα είναι πιο εκτενής μιας και αποτελεί μέρος της εγκατάστασης. Εδώ, η συμπίεση του ψυκτικού μέσου πραγματοποιείται μέσω ενός συγκλίνοντος-αποκλίνοντος υπερηχητικού ακροφυσίου. Μια τέτοια διάταξη ψύξης παρουσιάζεται στο **Σχήμα 25** μαζί με το θερμοδυναμικό διάγραμμα T-s του κύκλου στο **Σχήμα 27**. Στη θέση 1 το πρωτεύον ρεύμα του ψυκτικού σε κατάσταση κορεσμένου ατμού εισέρχεται στη διάταξη και αρχικά διοχετεύεται σε ένα συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο με λαϊμό διαμέτρου d_t . Εκεί η ταχύτητα του αυξάνεται με ταυτόχρονη μείωση της πίεσης του. Στην έξοδο του ακροφυσίου έχουμε υπερηχητική στραγγαλισμένη ροή. Παράγεται, έτσι υποπίεση και το δευτερεύον ρεύμα ψυκτικού χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας αναρροφάται και εισέρχεται στο ακροφύσιο. Το πρωτεύον ρεύμα μεγάλης κινητικής ενέργειας παρασέρνει τη δευτερεύουσα ροή, η οποία επιταχύνεται και αναμειγνύεται με την πρωτεύουσα. Η ανάμειξη αυτή λαμβάνει χώρα εντός του τμήματος σταθερής διατομής της διάταξης. Στη συνέχεια λόγω

των συνθηκών, δημιουργείται κρουστικό κύμα, το οποίο προκαλή απότομη αύξηση της πίεσης, η οποία αυξάνεται περαιτέρω στο αποκλίνον τμήμα της διάταξης.

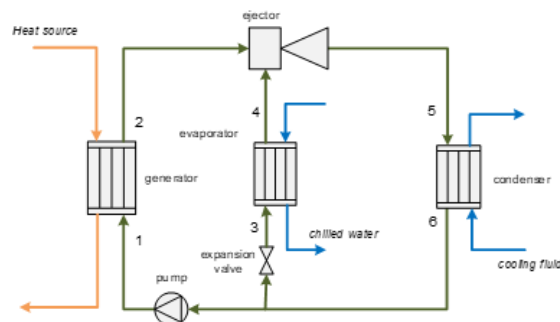
Η αναμεμειγμένη ροή εξέρχεται από το ακροφύσιο και εισέρχεται στο ψυγείο όπου θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον και κατόπιν διαχωρίζεται εκ νέου σε δύο τμήματα. Το πρωτεύον τμήμα της ροής διέρχεται μέσα από την αντλία και μετά από τη γεννήτρια, όπου θερμαίνεται μέσω της θερμότητας που έχει παραχθεί από το υποσύστημα των ηλιακών συλλεκτών. Το δευτερεύον τμήμα περνάει από μια στραγγαλιστική βαλβίδα και αποτονώνεται ισενθαλπικά ώστε να επιστρέψει στον ατμοποιητή. Το σκαρίφημα ενός ακροφυσίου συμπίεσης σε πλαινή όψη παρουσιάζεται στο **Σχήμα 26** [10].

Η ψύξη μέσω συμπίεσης σε ακροφύσιο πρόκειται για μια πολύ ενδιαφέρουσα τεχνική παραγωγής ψύξης, η οποία καταναλώνει λιγοστή ηλεκτρική ενέργεια (για την τροφοδοσία της αντλίας) και δεν διαθέτει περιστρεφόμενη μέρη, γεγονός που μειώνει το κόστος της συντήρησης της εγκατάστασης και αυξάνει την αξιοπιστία και τη μακροβιότητα του συστήματος.

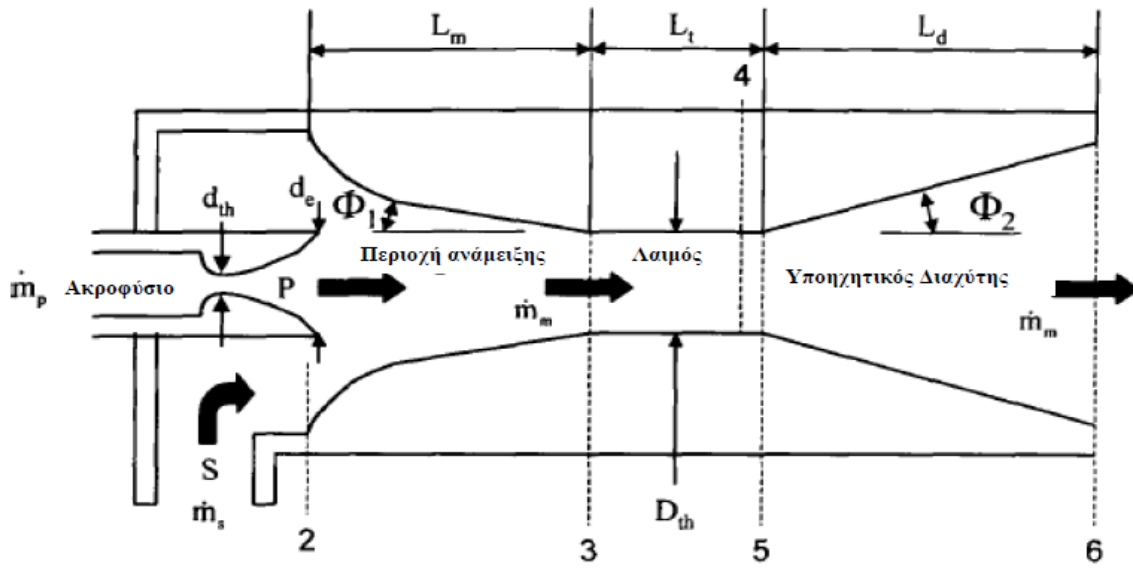
Η λειτουργία του ακροφυσίου εξαρτάται από την επιλογή του ψυκτικού μέσου, τη γεωμετρία του και την πίεση και θερμοκρασία των δύο ροών στην είσοδο του. Βασική παράμετρο για το ακροφύσιο αποτελεί ο λόγος αναρρόφησης (entrainment ratio), ο οποίος συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα ω και εκφράζει το πηλίκο της παροχής της δευτερεύουσας ροής προς την παροχή της πρωτεύουσας ροής. Ισχύει δηλαδή :

$$\omega = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_p} \quad (1)$$

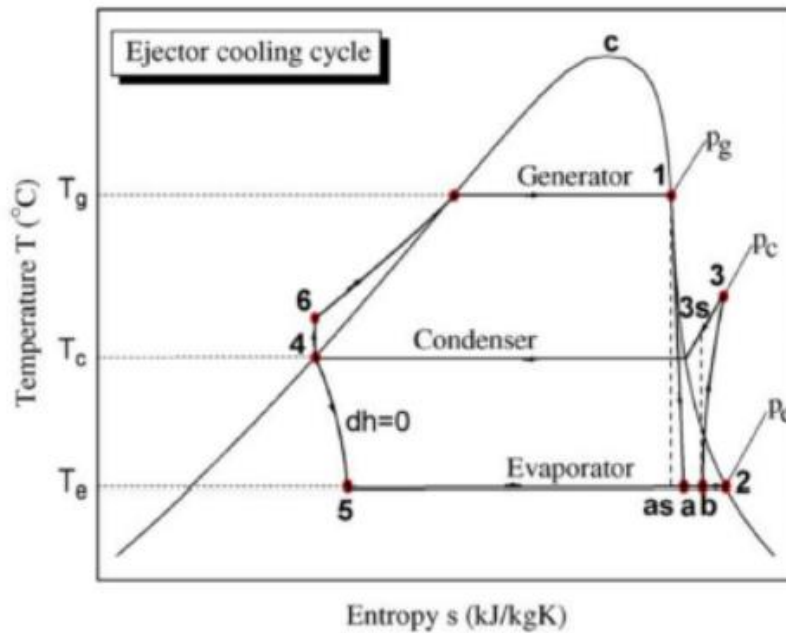
Ο παραπάνω λόγος εξαρτάται από την θερμοκρασία και την πίεση της δευτερεύουσας και της πρωτεύουσας ροής και από τη γεωμετρία του ακροφυσίου. Η τιμή του μένει σταθερή και ανεξάρτητη της πίεσης που επικρατεί κατόπιν του ακροφυσίου μέχρι μια χαρακτηριστική τιμή που ονομάζεται κρίσιμη πίεση συμπυκνωτή (Critical Condenser Pressure). Αν η πίεση υπερβεί αυτή τη κρίσιμη τιμή, τότε ο λόγος αναρρόφησης μειώνεται με γραμμικό τρόπο υψηλής κλίσης, διότι η δευτερεύουσα ροή παύει να είναι στραγγαλισμένη και η παροχή της μειώνεται όσο η πίεση όσο η πίεση στη μεριά του ψυγείου βαίνει αυξανόμενη. Αν η πίεση αυξηθεί περαιτέρω υπάρχει ο κίνδυνος οπισθοροής (backflow) της δευτερεύουσας ροής προς τον ατμοποιητή, με εν δυνάμει καταστροφικές συνέπειες για την εγκατάσταση.



Σχήμα 25 : Ψύξη με συμπίεση σε ακροφύσιο



Σχήμα 26 : Σκαρίφημα ενός ακροφυσίου συμπίεσης [10]



Σχήμα 27 : Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Εντροπίας σε Κύκλο Ψύξης [10]

3.2. Είδη Ακροφυσίων

Τα ακροφύσια (ejectors) ταξινομούνται ανάλογα με το είδος του ακροφυσίου από το οποίο διέρχεται η πρωτεύουσα ροή (primary flow) κατά την είσοδο της στη διάταξη του ακροφυσίου καθώς και με τη θέση εξόδου της αναμεμιγμένης ροής.

Αναφορικά με το είδος του πρωτεύοντος ακροφυσίου διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση είναι το συγκλίνον ακροφύσιο με υποχητική ροή διαμήκους του. Η ροή ενδέχεται να φτάσει το ηχητικό κατώφλι (Αριθμός Mach ίσος με 1), χωρίς παρόλα αυτά να ξεπεράσει την ταχύτητα του ήχου καθόλο το μήκος του ακροφυσίου. Στη δεύτερη περίπτωση έχουμε ένα συγκίνος-αποκλίνον ακροφύσιο, ικανό να παρέχει υπερηχητικές συνθήκες ροής στη σημείο εξόδου του.

Η πρώτη κατηγορία των υποχητικών συγκλίνοντων ακροφυσίων βρίσκει εφαρμογές σε διατάξεις, όπου απαιτείται μικρός λόγος συμπίεσης, όπως σε κυψέλες καυσίμων ανταλλαγής πρωτονίων, βιομηχανικές εγκαταστάσεις και συστήματα ψύξης με χρήση διοξειδίου του άνθρακα. Οι υπερηχητικοί ejectors, αντιθέτως απαντώνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ανάκτηση πίεσης (δηλαδή μεγάλους λόγους συμπίεσης ακροφυσίου). Συνήθως, χρησιμοποιούνται σε προηγμένα συστήματα ψύξης, όπως το υποσύστημα που θα εγκατασταθεί στο σύστημα τριπαραγωγής που πραγματεύεται η παρούσα εργασία, για την παραγωγή του επιθυμητού ψυκτικού αποτελέσματος.

Όσον αφορά την θέση εξόδου του ακροφυσίου συναντώνται δύο κατηγορίες ακροφυσίων, οι ejectors σταθερής πίεσης ανάμειξης (Constant Pressure Mixing Ejectors – CPM) και αυτοί σταθερής διατομής ανάμειξης (Constant Area Mixing Ejectors – CAM). Στην πρώτη κατηγορία, η έξοδος του ακροφυσίου εντός του θαλάμου αναρρόφησης (suction chamber), ενώ αντιθέτως στη δεύτερη κατηγορία η έξοδος βρίσκεται εκτός του θαλάμου, στο τμήμα σταθερής διατομής της διάταξης που ονομάζεται “λαιμός”. Τα ακροφύσια σταθερής πίεσης βρίσκουν συχνότερη εφαρμογή εξαιτίας της δυνατότητας που διαθέτουν, να λειτουργούν σε μεγαλύτερο εύρος πιέσεων του συμπυκνωτή που βρίσκεται κατάντι του ακροφυσίου. Ωστόσο οι ejectors σταθερής διατομής μπορούν να επιτύχουν υψηλότερες τιμές παροχής μάζας του ψυκτικού μέσου [10].

4. Το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα TES4Trig

4.1. Περιγραφή της συνολικής εγκατάστασης τριπαραγωγής ενέργειας

Το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα TES4Trig αφορά την εγκατάσταση και την επίδειξη της λειτουργίας ενός πρωτότυπου συστήματος ηλιακής τριπαραγωγής (ηλεκτρισμός, θέρμανση και ψύξη) στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο του Λαυρίου (ΤΠΠΛ), με στόχο την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης του χώρου του Κτηρίου Διοίκησης (Βίλα Σερπιέρι). Το σύστημα τροφοδοτείται με θερμότητα που παράγεται από ηλιακούς παραβολικούς συλλέκτες υψηλής θερμοκρασίας και βασίζεται στην σύζευξη ενός Οργανικού Κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle - ORC) για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας με έναν Ψυκτικό Κύκλο Ακροφυσίου (Ejector Cooling Cycle - ECC) για την παραγωγή ψύξης. Το σύστημα περιλαμβάνει ένα οικονομικά αποδοτικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε στερεή κατάσταση μέσω θέρμανσης για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ηλιακής ενέργειας σε υψηλή θερμοκρασία και την αξιοποίησή της σε περιόδους χαμηλής ηλιακής διαθεσιμότητας.

Πρόκειται για ένα πρωτοπόρο έργο, το οποίο χρηματοδοτείται από το 1ο Joint Call CSP-ERANET. Σε αυτό συμμετέχουν 6 εταιρείες από τρεις ευρωπαϊκές χώρες, με συντονιστή το ΕΜΠ. Το έργο είναι πιλοτικό και πρόκειται να ολοκληρωθεί τον Δεκέμβριο του 2023. Η ολοκλήρωση της εγκατάστασης του συστήματος προγραμματίζεται για το καλοκαίρι του 2023. Εντούτοις, προβλέπεται η συνέχιση της επίδειξης της λειτουργίας του πέραν της επίσημης λήξης του έργου σε χρονικό ορίζοντα 6 ετών μετά την έγκριση της εγκατάστασής του.

Ο καινοτόμος χαρακτήρας του έργου συμβαδίζει με τους στόχους του ΤΠΠΛ, ως χώρου που προάγει την έρευνα, την τεχνολογική πρόοδο καθώς και την βιώσιμη παραγωγή και οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, δεδομένης της ιστορικής και αρχιτεκτονικής αξίας του αρχιτεκτονικού του αποθέματος, είναι αναγκαία η διερεύνηση της κατάλληλης χωροθέτησης του συστήματος και ο προσεκτικός και ευαίσθητος σχεδιασμός της εγκατάστασης, ώστε να ενταχθεί ομαλά στο χώρο, χωρίς να επιβαρύνει αισθητικά ή λειτουργικά τα υφιστάμενα κελύφη. Στόχος είναι να βρεθεί η βέλτιστη λύση ένταξης, η οποία θα είναι και πλήρως αναστρέψιμη μετά την οριστική λήξη της επίδειξης λειτουργίας του συστήματος.

Στο πλαίσιο του έργου, τα επιμέρους συστήματα (ηλιακό πεδίο, σύστημα αποθήκευσης θερμότητας, σύστημα ORC-ECC) θα σχεδιαστούν και θα συναρμολογηθούν σε ένα ενιαίο σύστημα. Μετά το πέρας της συναρμολόγησης, η πλήρως αυτοματοποιημένη ολοκληρωμένη διάταξη θα τεθεί σε λειτουργία με στόχο την επίδειξη των δυνατοτήτων της, την αξιολόγηση της απόδοσής της σε πραγματικές συνθήκες και την απόδειξη της βιωσιμότητάς της. Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη του συστήματος τριπαραγωγής (ORC-ECC).

4.2. Το Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (ΤΠΠΛ)

Το Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου βρίσκεται στη βόρεια είσοδο της πόλης του Λαυρίου, επί της λεωφόρου Αθηνών-Λαυρίου, σε μικρή απόσταση από τη θάλασσα. Καταλαμβάνει μια έκταση 250 στρεμμάτων στην οποία υπάρχουν 41 κτίρια κτισμένα στην πλειονότητά τους κατά τη χρονική περίοδο 1875-1940. Από το 1867 μέχρι το 1990, ο χώρος στέγαζε τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις της Γαλλικής Εταιρίας Μεταλλείων Λαυρίου (ΓΕΜΛ).

Το συγκρότημα αποτελεί μια ιστορική μαρτυρία για την εξέλιξη της μεταλλουργίας και της μεταλλευτικής τέχνης, όπως αποτυπώνεται στα κτίρια και στο μηχανολογικό εξοπλισμό που στεγάζουν. Πολλές εκ των κτιριακών μονάδων συνιστούν σπάνια τεκμήρια βιομηχανικής αρχιτεκτονικής του 19ου αιώνα ενώ ο εξοπλισμός τους αποτελεί μοναδικό δείγμα για τη μελέτη της βιομηχανικής τεχνολογίας στην Ελλάδα. Το οικόπεδο και οι εγκαταστάσεις παραχωρήθηκαν στο ΕΜΠ από την Κτηματική Εταιρία Δημοσίου το 1992 με σκοπό την αποκατάσταση των κτιρίων για τη στέγαση τεχνολογικού Πάρκου και Μουσείου τεχνολογίας. Το συγκρότημα κηρύχθηκε διατηρητέο με τον εξοπλισμό του in situ με βάση την από 14-4-1992 απόφαση του Υπουργείου Πολιτισμού (ΦΕΚ 293Β/1992). Το 1995 εντάχθηκε στο Γενικό Πολεοδομικό Σχέδιο του Δήμου Λαυρεωτικής ως Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο.

«Το Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου είναι ένας χώρος υποστήριξης καινοτομιών, πρωτότυπης τεχνολογικής έρευνας διεθνών προδιαγραφών και ανάπτυξης νέων βιομηχανικών εφαρμογών, που δημιουργεί ένα ευνοϊκό περιβάλλον για τη δυναμική ανάπτυξη των επιχειρήσεων που πρόκειται να εγκατασταθούν σε αυτό. Το βασικό πλεονέκτημα του Πάρκου σε σχέση με τα υπόλοιπα Τεχνολογικά Πάρκα του Ελληνικού χώρου, πέρα από το μέγεθος και την ιστορική-πολιτισμική φυσιογνωμία του χώρου είναι το γεγονός ότι ο φορέας υποστήριξης του Πάρκου είναι το ΕΜΠ, το μεγαλύτερο δηλαδή και πιο έμπειρο Ανώτατο Τεχνολογικό Ίδρυμα της χώρας, που έχει ήδη αναπτύξει ένα πυκνό δίκτυο διασύνδεσης, έρευνας και παραγωγής διαθέτοντας σήμερα στη χώρα -και πιθανότατα σε όλη τη Νότια Ευρώπη- τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη βάση τεχνολογίας ανάπτυξης τεχνολογικών-βιομηχανικών εφαρμογών και μεταφοράς τεχνολογίας.» (ΕΜΠ, 1997, 4-10)

Όπως γίνεται αντιληπτό η καινοτομία είναι μέσα στο DNA του χώρου. Ένας εκ των δύο πυλώνων που προσδιορίζουν το χαρακτήρα του είναι το τρίπτυχο έρευνα - τεχνολογική ανάπτυξη - παραγωγή. Ως εκ τούτου, η επιλογή του για την εγκατάσταση του συστήματος ηλιακής τριπαραγωγής TES4Trig κρίνεται κατάλληλη. Ωστόσο, δεδομένης της ιστορικής και αρχιτεκτονικής αξίας του συγκροτήματος είναι αναγκαία η διερεύνηση της κατάλληλης χωροθέτησης του συστήματος και ο προσεκτικός και ευαίσθητος σχεδιασμός της εγκατάστασης, ώστε να ενταχθεί ομαλά στο χώρο, χωρίς να επιβαρύνει αισθητικά ή λειτουργικά τα υφιστάμενα κελύφη.

Οι συνεργαζόμενοι συντελεστές του έργου είναι οι ακόλουθοι :

1) Εταίροι :

- Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων (Συντονιστής),
Καθ. Σ. Καρέλλας, Δρ. Κ. Μπραϊμάκης, Καθ. Ε. Κορωνάκη (Εργαστήριο εφαρμοσμένης θερμοδυναμικής)
- NCSR “Δημόκριτος” – Εργαστήριο Ηλιακών και άλλων Ενεργειακών Συστημάτων Solar & other Energy Systems Laboratory (SESL)
- Solar-Institut Jülich of the Aachen University of Applied Sciences (SIJ)
- CADE Soluciones de Ingeniería, S.L. (CADE)
- Protarget AG (PT)
- MES ENERGY SA (MESE)

2) Αρχιτεκτονικός Σχεδιασμός :

- Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εργαστήριο Αστικού Περιβάλλοντος,
Δώρα Χατζή Ροδοπούλου, Δρ. Αρχιτέκτων Μηχ. TUDelft-EMΠ

3) Σύμβουλος σχεδιασμού τοπίου :

- Μαρία Παπαϊωάννου, Αρχιτέκτων Μηχανικός - Πολεοδόμος ΕΜΠ, Γεωπόνος ΑΠΘ

4.3. Οικονομοτεχνικά και τοπογραφικά στοιχεία της εγκατάστασης στο Τεχνολογικό Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (ΤΠΠΛ)

Κατά τη διάρκεια των προκαταρκτικών μελετών για το έργο διερευνήθηκαν και αξιολογήθηκαν 3 εναλλακτικά σενάρια χωροθέτησης του συστήματος ηλιακής τριπαραγωγής TES4Trig στο ΤΠΠΛ.

Το έργο αποτελεί ένα πρωτοπόρο και καινοτόμο σύστημα τριπαραγωγής (παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας και ψύξης). Πέραν της μεγάλης τεχνικής του αξίας, το σύστημα παρουσιάζει σημαντική προστιθέμενη αξία και για το χώρο εγκατάστασής του. Η ανάλυση που προηγήθηκε τεκμηριώνει τον θετικό περιβαλλοντικό και οικονομικό αντίκτυπο της εγκατάστασης του συστήματος στο ΤΠΠΛ, που πρόκειται να υποδεχτεί το TES4Trig.

Βάσει της συγκριτικής αξιολόγησης των προτεινόμενων σεναρίων διαπιστώθηκε η υπεροχή του Σεναρίου 3. Το Σενάριο 1, παρότι συνιστά το πιο οικονομικό εκ των τριών λύσεων, παρουσιάζει μεγάλες τεχνικές δυσκολίες στο στάδιο της εγκατάστασης του συστήματος και δεν αξιοποιεί σε ικανοποιητικό βαθμό τις δυνατότητες ενεργειακής εξοικονόμησης που αυτό προσφέρει. Επίσης, πρόκειται για μια λύση η οποία επεμβαίνει άγρια στο ανάγλυφο του εδάφους και απαιτεί δαπανηρές εργασίες για την αναστρεψιμότητά της μετά το πέρας του έργου. Το Σενάριο 2 απορρίπτεται λόγω του μεγάλου κόστους που συνεπάγεται η εγκατάστασή του συστήματος.

Στο 3ο σενάριο, το οποίο και επιλέχθηκε τελικά για την υλοποίηση του έργου, προτείνεται η χωροθέτηση των ηλιακών κατόπτρων στη θέση που περιεγράφηκε στο Σενάριο 2 και η χωροθέτηση των containers και του πύργου ψύξης ανατολικά του προσκτίσματος του Φαρμακείου.

Ως εκ τούτου, προτείνεται η υλοποίηση του σεναρίου 3. Η εγκατάσταση του συστήματος βορειοανατολικά της Βίλας Σερπιέρη (σύμφωνα με το τοπογραφικό της Εικ.18) παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων τόσο από τη σκοπιά της ένταξης στο κηρυγμένο ιστορικό συγκρότημα όσο και από την τεχνική σκοπιά. Πρόκειται για μια διακριτική, διακριτή και απόλυτα αναστρέψιμη επέμβαση, η οποία σέβεται τα υφιστάμενα κελύφη. Ακολουθεί τις αρχές των Διεθνών Διακηρύξεων για τη Διατήρηση της Βιομηχανικής Κληρονομιάς (ICOMOS-TICCIH, 2011, TICCIH, 2003) και την πρόσφατη διακήρυξη του New European Bauhaus. Η νέα αρχιτεκτονική γλώσσα των κύριων μερών του συστήματος είναι απόλυτα συμβατή με τη βιομηχανική αρχιτεκτονική, παραπέμποντας μέσω της υλικότητάς της στο ιστορικό παρελθόν του χώρου και διαμορφώνοντας ταυτόχρονα έναν ενδιαφέρον διάλογο μεταξύ υφιστάμενου και νέου. Επιπροσθέτως, η λύση αυτή προσφέρει προοπτικές επανάχρησης μέρους της εγκατάστασης μετά την οριστική λήξη του έργου

Πέραν των πλεονεκτημάτων που σχετίζονται με ζητήματα αρχιτεκτονικής, το Σενάριο 3 υπερτερεί σημαντικά των υπολοίπων λόγω και των τεχνικών πλεονεκτημάτων που

παρουσιάζει. Προσφέρει υψηλή αξιοποίηση της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας του συστήματος ενώ συντελεί στην οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα του συγκροτήματος, μειώνοντας συνολικά την ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων της Βίλας Σερπιέρη και του Φαρμακείου λόγω των σχετικά υψηλών και χρονικά συνεπών θερμικών και ψυκτικών φορτίων.

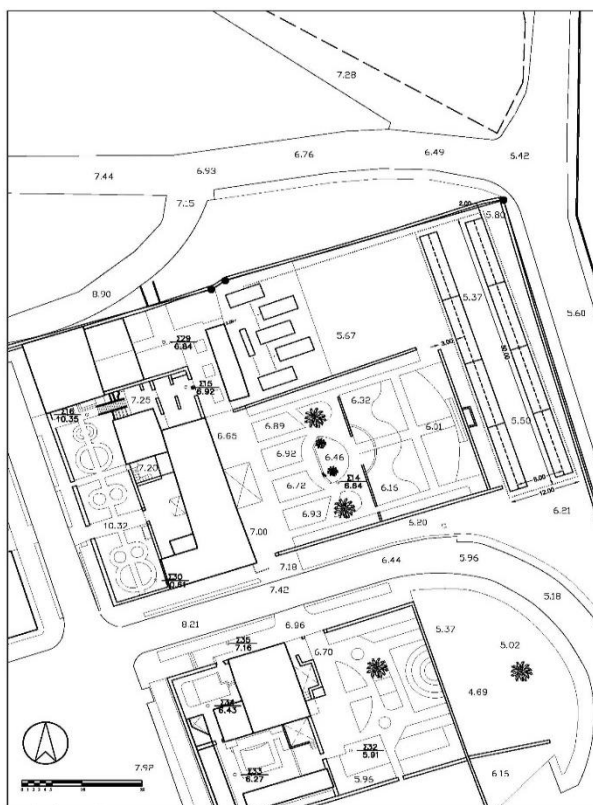


Σχήμα 28 : Προτεινόμενος χώρος εγκατάστασης των containers σύμφωνα με το Σενάριο 3. Στο βάθος διακρίνεται πρόσκτισμα του συγκροτήματος και πίσω του το Φαρμακείο ενώ αριστερά διακρίνεται τμήμα της Βίλας Σερπιέρη

Η πρόταση αυτή κινείται σε διαφορετική κατεύθυνση σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια. Στο παρόν σενάριο δεν επιχειρείται η απόκρυψη των containers και του πύργου ψύξης του συστήματος. Αντίθετα, τα στοιχεία αυτά αλλάζουν υλικότητα και τρέπονται σε αρχιτεκτονικά στοιχεία που εισάγονται δυναμικά στο χώρο, συνομιλώντας με τα υφιστάμενα κελύφη.

Συγκεκριμένα, προτείνεται η επένδυση των containers με φύλλα χάλυβα COR-TEN, 1mm. Ο πύργος ψύξης θα εγκιβωτιστεί επίσης σε ένα πλαίσιο από COR-TEN το οποίο θα στεγάζεται αν αυτό κριθεί απαραίτητο από σχάρα ίδιας υλικότητας. Το COR-TEN είναι ένα ισχυρό κράμα οξειδωμένου χάλυβα που παρουσιάζει αντοχή στο χρόνο και τη διάβρωση. Ο χάλυβας COR-TEN, δεν χρειάζεται να χρωματιστεί για προστασία. Όταν χρησιμοποιείται απροστάτευτος, παρουσιάζει αύξηση της αντοχής σε ατμοσφαιρική διάβρωση σε σύγκριση με χάλυβες χωρίς κράματα. Αυτό γίνεται λόγω της δημιουργίας ενός προστατευτικού στρώματος (πατίνας) στην επιφάνειά του υπό την επίδραση του καιρού.

Η επιβράδυνση της διάβρωσης είναι αποτέλεσμα του προστατευτικού στρώματος που δημιουργείται από τη φύση της δομής των στοιχείων και της ιδιαίτερης διανομής και συγκέντρωσης των στοιχείων του κράματος. Με την πάροδο του χρόνου και υπό την επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών, η επιφανειακή προστασία αναπτύσσεται και αναδημιουργείται συνεχώς. Η φυσικά σκουριασμένη επιφάνεια του COR-TEN συνδυάζεται αρμονικά με την υφή και την υλικότητα παλαιών αρχιτεκτονημάτων εξού και χρησιμοποιείται κατά κόρον σε έργα επαναχρήσεων ιστορικών κτιρίων αλλά και σε διαμορφώσεις αρχαιολογικών χώρων.



Σχήμα 29 : Τοπογραφικό σχέδιο της περιοχής εγκατάστασης

Με την επένδυση των containers με φύλλα χάλυβα COR-TEN επιτυγχάνονται δύο στόχοι. Πρώτον, τα containers διαφοροποιούνται από ταυφιστάμενα ιστορικά κελύφη. Δεύτερον, η υλικότητά τους συμβάλει στην ομαλή τους ένταξη στο συγκρότημα. Το οξειδωμένο COR-TEN αποτελεί απόλυτα συμβατό υλικό με έναν τόπο στον οποίο κυριαρχούν οι σκουριές.

4.4. Εκτιμώμενο κόστος επέμβασης και αξιολόγηση της εγκατάστασης

Περιγραφή εργασίας	Εκτιμώμενο κόστος (€)
Αρχιτεκτονικές διαμορφώσεις/διαμορφώσεις τοπίου	7.500-9.000€ (ανάλογα με τον αριθμό των containers)
Υδραυλική διασύνδεση	62.000€ (όδευση 37.000€, μηχανολογικός εξοπλισμός 25.000€)
ΣΥΝΟΛΟ	69.500 – 71.000€

Πίνακας 5 : Εκτιμώμενο κόστος επέμβαση ανά είδος εργασίας

Θετικές συνέπειες :

- Η εγκατάσταση του συστήματος συντελεί στην οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα του συγκροτήματος, μειώνοντας συνολικά την ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων της Βίλας Σερπιέρη και του Φαρμακείου λόγω των σχετικά υψηλών και χρονικά συνεπών θερμικών και ψυκτικών φορτίων.
- Υψηλή αξιοποίηση της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας του συστήματος.
- Αισθητική αναβάθμιση του Πάρκου με την εγκατάσταση νέων όγκων σύγχρονης αρχιτεκτονικής με υλικά συμβατά με τα ιστορικά κτίρια και το χαρακτήρα του υφιστάμενου συγκροτήματος.
- Δυνατότητα εγκατάστασης 5 containers.
- Μικρότερη απόσταση όδευσης υδραυλικού δικτύου μεταξύ αντλιοστασίου συστήματος TES4Trig και λεβητοστασίου κτιρίου Σερπιέρη με αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος υλοποίησης και μειωμένες θερμικές απώλειες.
- Πλήρως αναστρέψιμη εγκατάσταση μετά τη λήξη του έργου.
- Δυνατότητα επανάχρησης των containers για τις ανάγκες του Πάρκου μετά τη λήξη του έργου.

Αρνητικές συνέπειες :

- Σχετικά υψηλό κόστος όδευσης σε Σχέση με εναλλακτικά σενάρια χωροθέτησης

Ως εκ τούτου, προτείνεται η υλοποίηση του σεναρίου 3. Η εγκατάσταση του συστήματος βορειοανατολικά της Βίλας Σερπιέρη παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων τόσο από τη σκοπιά της ένταξης στο κηρυγμένο ιστορικό συγκρότημα όσο και από την τεχνική σκοπιά. Πρόκειται για μια διακριτική, διακριτή και απόλυτα αναστρέψιμη επέμβαση, η οποία σέβεται

τα υφιστάμενα κελύφη. Ακολουθεί τις αρχές των Διεθνών Διακηρύξεων για τη Διατήρηση της Βιομηχανικής Κληρονομιάς (ICOMOS-TICCIH, 2011, TICCIH, 2003) και την πρόσφατη διακήρυξη του New European Bauhaus. Η νέα αρχιτεκτονική γλώσσα των κύριων μερών του συστήματος είναι απόλυτα συμβατή με τη βιομηχανική αρχιτεκτονική, παραπέμποντας μέσω της υλικότητάς της στο ιστορικό παρελθόν του χώρου και διαμορφώνοντας ταυτόχρονα έναν ενδιαφέρον διάλογο μεταξύ υφιστάμενου και νέου. Επιπροσθέτως, η λύση αυτή προσφέρει προοπτικές επανάχρησης μέρους της εγκατάστασης μετά την οριστική λήξη του έργου

Πέραν των πλεονεκτημάτων που σχετίζονται με ζητήματα αρχιτεκτονικής, το Σενάριο 3 υπερτερεί σημαντικά των υπολοίπων λόγω και των τεχνικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει. Προσφέρει υψηλή αξιοποίηση της δυνατότητας αποθήκευσης θερμότητας του συστήματος ενώ συντελεί στην οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα του συγκροτήματος, μειώνοντας συνολικά την ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων της Βίλας Σερπιέρη και του Φαρμακείου λόγω των σχετικά υψηλών και χρονικά συνεπών θερμικών και ψυκτικών φορτίων.

4.5. Στοιχεία έργου TES4Trig

Ενδεικτικά, το σύστημα θα έχει δύο βασικές λειτουργίες, ανάλογα με την ύπαρξη ή μη ζήτησης θερμικής και ψυκτικής ισχύος.

- Κατά τη θερινή περίοδο, μέρος της παραγόμενης θερμότητας από τους παραβολικούς συλλέκτες θα τροφοδοτείται στη διάταξη ψύξης ECC για την κάλυψη ψυκτικών αναγκών επιλεγμένου κτιρίου ή κτιρίων, ενώ το υπόλοιπο μέρος θα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη διάταξη ORC.
- Κατά τη χειμερινή περίοδο, ο κύκλος ECC θα τίθεται εκτός λειτουργίας. Η παραγόμενη θερμότητα από τους συλλέκτες θα χρησιμοποιείται για την κάλυψη θερμικών αναγκών (θέρμανση χώρου) επιλεγμένου κτιρίου ή κτιρίων και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη διάταξη ORC.

Ένα από τα ιδιαίτερα στοιχεία καινοτομίας του έργου είναι η τεχνολογία αποθήκευσης θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία σε στερεή κατάσταση, που μπορεί να διασφαλίσει τη μακρά λειτουργία του συστήματος και την επίτευξη υψηλού βαθμού αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας.

Στο πλαίσιο του έργου, τα επιμέρους υποσυστήματα (πεδίο παραβολικών συλλεκτών υψηλής θερμοκρασίας, σύστημα αποθήκευσης θερμότητας βασισμένο σε τσιμέντο, σύστημα τριπαραγωγής ORC-ECC) θα σχεδιαστούν, θα συναρμολογηθούν και θα ενσωματωθούν στο ενιαίο, πρωτότυπο σύστημα TES4Trig, η λειτουργία του οποίου θα επιδειχθεί προκειμένου να αποδειχθεί η τεχνική βιωσιμότητά του και να αξιολογηθεί η πραγματική του απόδοση σε ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τις εργασίες ανάπτυξης του πρωτότυπου συστήματος, ο εταίρος Protarget θα αναλάβει την κατασκευή και την εγκατάσταση του ηλιακού πεδίου

παραβολικών συλλεκτών υψηλής θερμοκρασίας (250-400°C) και ονομαστικής ωφέλιμης θερμικής ισχύος 120 kWth. Παράλληλα, ο εταίρος CADE θα αναλάβει την κατασκευή και την εγκατάσταση του συστήματος αποθήκευσης θερμότητας, το οποίο και θα ενσωματωθεί στο ηλιακό πεδίο. Το ΕΜΠ (Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών) θα είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη του συστήματος τριπαραγωγής που βασίζεται στους κύκλους ORC-ECC. Επιπλέον, οι παραπάνω εταίροι θα αναλάβουν το σχεδιασμό του συστήματος αυτομάτου ελέγχου του ολοκληρωμένου συστήματος με στόχο τη διασφάλιση της ασφαλούς, αυτόνομης και αποδοτικής λειτουργίας του.

Μετά το πέρας της συναρμολόγησης των επί μέρους υποσυστημάτων, θα διεξαχθεί επίδειξη της λειτουργίας του πρωτότυπου συστήματος. Στην πειραματική επίδειξη του συστήματος θα συμμετέχει το Εργαστήριο Ηλιακών και άλλων Ενεργειακών Συστημάτων του Εθνικού Κέντρου Ερευνών Φυσικών Επιστημών «Δημόκριτος», σε στενή συνεργασία με τον εταίρο Protarget, ο οποίος θα διαθέσει προσωπικό για την επίβλεψη της επίδειξης. Επιπλέον το Ινστιτούτο Ηλιακής Ενέργειας του Πανεπιστημίου του Άαχεν (SIJ) θα είναι επιφορτισμένο για δραστηριότητες σχετικές με τη μοντελοποίηση του συστήματος σε πλήρες και μερικό φορτίο, ενώ ο εταίρος MES ENERGY θα είναι υπεύθυνος για εργασίες ανάλυσης τεχνοοικονομικής βιωσιμότητας.

Η λειτουργία του συστήματος θα επιδειχθεί σε χρονικό ορίζοντα 6 ετών μετά την έγκριση της εγκατάστασής του στο ΤΠΠΛ με στόχο την αξιολόγηση της λειτουργίας του κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες (ηλιακής διαθεσιμότητας, ζήτησης ψύξης και θερμότητας) προκειμένου να γίνει η αποτίμηση των πραγματικών δυνατοτήτων του και η εξέταση της βιωσιμότητάς του σε πραγματικές εφαρμογές, με απώτερο σκοπό την αναβάθμισή του σε μεγαλύτερες κλίμακες ισχύος και σε διαφορετικά σενάρια τελικών χρήσεων.

4.6. Προδιαγραφές για την εγκατάσταση του συστήματος τριπαραγωγής

4.6.1. Πεδίο ηλιακών συλλεκτών

Η μελέτη και ο σχεδιασμός του συγκεκριμένου υποσυστήματος είναι αρμοδιότητα εξωτερικού συνεργαζόμενου φορέα και δεν θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στην παρούσα εργασία. Ωστόσο, παρουσιάζονται ακολούθως κάποια βασικά τεχνικά στοιχεία του πεδίου ηλιακών συλλεκτών, έτσι ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει μια πληρέστερη εικόνα του έργου και των υποσυστημάτων που το αποτελούν.

Το πεδίο ηλιακών συλλεκτών αποτελείται από 8 modules παραβολικών αυλακωτών συλλεκτών, τα οποία προτείνεται να διαταχθούν σε 2 σειρές με 4 modules έκαστη. Η κάθε σειρά θα έχει μήκος περίπου 50 m και πλάτος 3 m. Μεταξύ των δύο σειρών των συλλεκτών θα υπάρχει απόσταση 6-8 m, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 30**. Βάσει των ανωτέρω προδιαγραφών, η συνολική απαιτούμενη επιφάνεια του ηλιακού πεδίου εκτιμάται να είναι ίση με περί τα 800-1000 m².

Οι συλλέκτες θα είναι μεταβλητής κλίσης και θα παρακολουθούν την πορεία του ηλίου από την ανατολή προς τη δύση για μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας σε αυτούς ηλιακής

ακτινοβολίας. Το κύκλωμα των συλλεκτών θα διαρρέεται από ειδικό ρευστό μεταφοράς θερμότητας (heat transfer fluid), η θερμοκρασία του οποίου μπορεί να φτάσει μέχρι και τους 420°C. Εντούτοις η θερμοκρασία σχεδιασμού των συλλεκτών θα καθοριστεί από τον τελικό σχεδιασμό του συστήματος ORC-ECC. Το κάθε module συλλεκτών έχει βάρος 1350 kg, επομένως το συνολικό βάρος του ηλιακού πεδίου (8 modules) θα είναι ίσο με περίπου 10800 kg.

Πέραν των δύο σειρών παραβολικών συλλεκτών, το σύστημα του ηλιακού πεδίου θα περιλαμβάνει και 1 container στο οποίο θα περικλειστεί το αντλιοστάσιο και ο κεντρικός πίνακας ελέγχου της λειτουργίας του.



Σχήμα 30 : Κάτοψη του πεδίου ηλιακών συλλεκτών, των containers αποθήκευσης θερμότητας και του μετεωρολογικού σταθμού



Σχήμα 31, Σχήμα 32 : Απεικόνιση της διάταξης του πεδίου ηλιακών παραβολικών συλλεκτών του εταιρίου Protarget

4.6.2. Σύστημα αποθήκευσης θερμότητας

Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας δεν θα αναλυθεί λεπτομερώς, καθώς δεν αποτελεί μέρος της μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παρ'όλα αυτά, παραθέτονται εν συνεχεία κάποια βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά για την πληρότητα του παρόντος κειμένου.

Το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας στερεάς φάσης θα αποτελείται από 1 ή 2 containers (ανάλογα με τον τελικό σχεδιασμό του συστήματος). Το κάθε container θα έχει βάρος 23800 kg που ισοκατανέμεται στις 4 γωνίες του και διαστάσεις 6.1 (μήκος) x 2.4 (πλάτος) x 2.4 (ύψος) m. Το σύστημα θα έχει τη δυνατότητα θερμικής αποθήκευσης 400-800 kWth σε μεσαίες και υψηλές θερμοκρασίες άνω των 200°C.



Σχήμα 33 : Εξωτερική άποψη και το περιεχόμενο των containers που θα στεγάσουν το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας στερεής κατάστασης

4.6.3 Σύστημα τριπαραγωγής ORC-ECC

Το σύστημα τριπαραγωγής ORC-ECC θα αποτελείται από ένα κύκλο ORC σε σύνδεση με ένα κύκλο ECC.

Οι ακριβείς διαστάσεις και το βάρος του συστήματος θα προσδιοριστούν κατόπιν του σχεδιασμού τους από το ΕΜΠ. Το σύστημα ORC θα έχει τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος εύρους 5-10 kW_e, ωφέλιμης θερμικής ισχύος 60-75 kW_{th} ενώ η ψυκτική ισχύς του ECC εκτιμάται ίση με 10-20 kW_c. Το σύστημα μπορεί να καλύψει μέρος των θερμικών και ψυκτικών του αναγκών κάποιου κτιρίου του Τεχνολογικού Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου. Ο σχεδιασμός και η συναρμολόγησή του θα λάβουν χώρα στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Το σύστημα ORC-ECC θα αποτελείται από 2 containers για τη στέγαση του συστήματος ORC-ECC και για το αντλιοστάσιο του υδραυλικού κυκλώματος προσαγωγής ζεστού/ψυχρού νερού προς το κτήριο/καταναλωτή. Επιπλέον, θα περιλαμβάνει έναν αερόψυκτο πύργο ψύξης.

4.6.4 Συνδεσμολογία και λειτουργία

Με βάση όσα περιεγράφηκαν, το σύστημα TES4Trig θα αποτελείται από 4 ή 5 containers (1 container για το αντλιοστάσιο του ηλιακού πεδίου, 1 ή 2 containers για το σύστημα αποθήκευσης, 1 container για το σύστημα ORC-ECC και 1 container για το αντλιοστάσιο του υδραυλικού κυκλώματος προσαγωγής θερμότητας και ψύξης προς το κτίριο/καταναλωτή). Κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού θα ληφθούν μέτρα αποφυγής και αντιμετώπισης ηχητικής όχλησης στον περιβάλλοντα χώρο. Την οικονομική επιβάρυνση της εγκατάστασης του συστήματος θα αναλάβουν οι εταίροι του έργου. Το σύστημα θα είναι αυτοματοποιημένο και θα χρειάζεται ελάχιστη εποπτεία κατά τη λειτουργία του, με την οποία θα είναι επιφορτισμένοι οι Εταίροι Protarget και Δημόκριτος. Στο πλαίσιο του έργου, προβλέπεται η επίδειξη της λειτουργίας του συστήματος για 6 έτη μετά από την έγκριση της εγκατάστασης του έργου.

5. Το σύστημα συνδυασμένου θερμοδυναμικού κύκλου ORC-ECC

5.1. Καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος τριπαραγωγής

Προτού πραγματοποιηθεί η τρισδιάστατη μοντελοποίηση του συστήματος ORC-ECC πρέπει να διαστασιοποιηθούν οι σωληνώσεις της διάταξης και να επιλεγθούν οι απαραίτητες βαλβίδες. Η εγκατάσταση ανάλογα με την εποχή του χρόνου και την ζήτηση λειτουργεί σε τέσσερα βασικά διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, λειτουργία τον χειμώνα χωρίς θέρμανση, λειτουργία τον χειμώνα με θέρμανση, λειτουργία την άνοιξη με ψύξη και λειτουργία το καλοκαίρι με ψύξη.

Σενάριο 1: Λειτουργία των χειμώνα, χωρίς θέρμανση

Κατά την χειμερινή λειτουργία χωρίς θέρμανση, η μέγιστη πίεση και θερμοκρασία του κύκλου είναι 17.35 bar και $135 \text{ }^\circ\text{C}$ αντίστοιχα. Η ηλεκτροπαραγωγή είναι 10.6 kW , ενώ δεν παράγεται καθόλου θέρμανση. Επιπλέον, ο ψυκτικός κύκλος δεν χρησιμοποιείται. Η διαδρομή που ακολουθεί το εργαζόμενο μέσο εξηγείται παρακάτω. Το ρευστό από το τροφοδοτικό δοχείο οδηγείται στον εναλλάκτη υπόψυξης, όπου ψύχεται κατά 5 K . Και στην συνέχεια, εισέρχεται στην αντλία. Βγαίνοντας από την αντλία διέρχεται μέσα από τον προθερμαντήρα και τον ατμοποιητή, απ' όπου προκύπτει υπέρθερμος ατμός. Στον εκτονωτή λαμβάνει χώρα η ηλεκτροπαραγωγή και ο ατμός οδηγείται στο δεύτερο ρεύμα του προθερμαντήρα για να θερμάνει το ρευστό που βγαίνει απ' την αντλία. Στο τέλος, οδηγείται στον συμπυκνωτή, όπου αποβάλλει την εναπομένουσα θερμότητα και καταλήγει στο τροφοδοτικό δοχείο.

Σενάριο 2: Λειτουργία των χειμώνα, με θέρμανση

Κατά την χειμερινή λειτουργία χωρίς θέρμανση, η μέγιστη πίεση και θερμοκρασία του κύκλου είναι 17.35 bar και $135 \text{ }^\circ\text{C}$ αντίστοιχα. Η ηλεκτροπαραγωγή είναι 7.4 kW , ενώ η θερμότητα που παράγεται είναι 65.6 kW . Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα, καθώς και η διαδρομή που ακολουθεί το εργαζόμενο μέσο είναι ίδια με το σενάριο 1, με την διαφορά ότι η πίεση/θερμοκρασία κορεσμού του συμπυκνωτή είναι αυξημένες ώστε να παράγεται θερμότητα σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία προκειμένου να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του κτηρίου. Ως αποτέλεσμα, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι αισθητά μικρότερη.

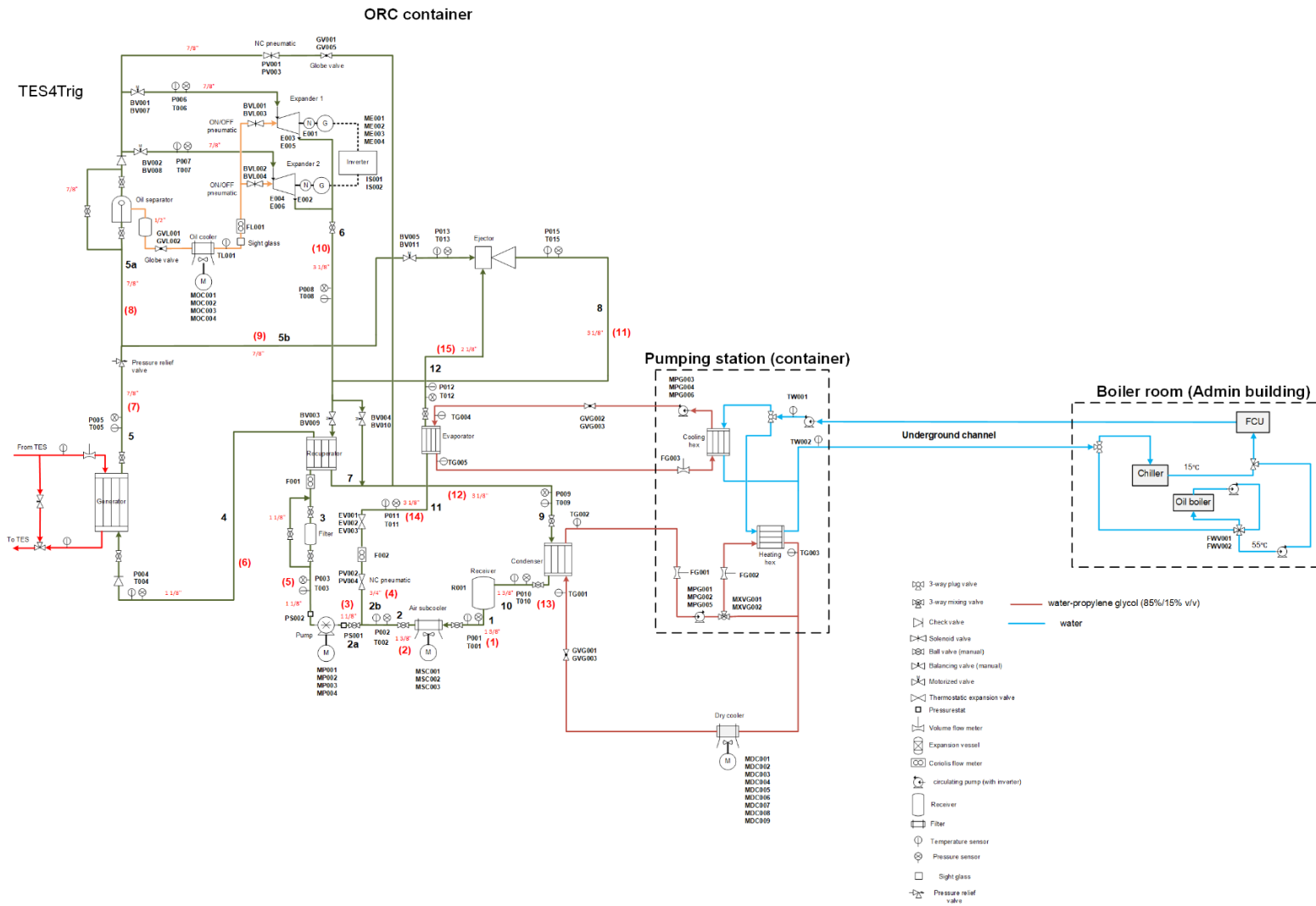
Σενάριο 3: Λειτουργία την άνοιξη, με ψύξη

Κατά την λειτουργία την άνοιξη με ψύξη, η μέγιστη πίεση και θερμοκρασία του κύκλου είναι 20.93 *bar* και 140 °C αντίστοιχα. Στο σενάριο αυτό δεν λειτουργεί ο κλάδος του ORC με τον εκτονωτή και γίνεται παραγωγή μόνο ψύξης 15.9 *kW*. Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα διαφέρουν από τα δύο προηγούμενα σενάρια. Πριν εισέλθει στην αντλία το ρευστό διακλαδίζεται σε δύο ρεύματα. Το πρώτο ρεύμα κατευθύνεται στον ατμοποιητή θέρμανσης και στην συνέχεια στο πρωτεύον ρεύμα του ακροφυσίου (ο εκτονωτής δεν λειτουργεί). Το δεύτερο ρεύμα αρχικά πηγαίνει στην εκτονωτική βαλβίδα και στην συνέχεια στον ατμοποιητή του ψυκτικού κύκλου, απ' όπου και παράγεται η ψύξη. Το εξερχόμενο ρευστό σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού χαμηλής πίεσης εισέρχεται στο ακροφύσιο, όπου αναμειγνύεται με τον υπέρθερμο ατμό υψηλής πίεσης, που προέρχεται από τον ατμοποιητή του κύκλου ORC. Το μείγμα εξέρχεται από το ακροφύσιο και καταλήγει πρώτα στον ανακομιστή και μετά στον συμπυκνωτή και τέλος στο τροφοδοτικό δοχείο.

Σενάριο 4: Λειτουργία το καλοκαίρι, με ψύξη

Κατά την λειτουργία την άνοιξη με ψύξη, η μέγιστη πίεση και θερμοκρασία του κύκλου είναι 20.93 *bar* και 140 °C αντίστοιχα. Η ψύξη είναι 7.7 *kW*. Το σενάριο 4 είναι ίδιο με το 3, όμως χρησιμοποιείται το ακροφύσιο υψηλής θερμοκρασίας, αντί για αυτό χαμηλής θερμοκρασίας. Επιπλέον, στο καλοκαιρινό σενάριο δεν γίνεται χρήση του εκτονωτή, δηλαδή ο ατμός που βγαίνει από τον ατμοποιητή κατευθύνεται εξ ολοκλήρου στο πρωτεύον ρεύμα του ακροφυσίου.

Το μονογραμμικό διάγραμμα της εγκατάστασης φαίνεται στο **Σχήμα 39**, στο οποία έχουν αριθμηθεί τα θερμοδυναμικά σημεία του κύκλου (μαύρο χρώμα) και οι αγωγοί του συστήματος (κόκκινο χρώμα). Με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι σωληνώσεις του βασικού συστήματος των κύκλων ORC-ECC, στις οποίες κυκλοφορεί το οργανικό ψυκτικό ρευστό. Με μπλε χρώμα απεικονίζεται το υδραυλικό κύκλωμα νερού στο οποίο παρέχεται η παραγόμενη θερμότητα και ψύξη του συστήματος ORC-ECC, και το οποίο είναι μέρος του Κτηρίου Διοίκησης. Επιπλέον, με καφέ χρώμα απεικονίζεται το κύκλωμα νερού-γλυκόλης, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η διασύνδεση του συστήματος ORC-ECC με το υδραυλικό κύκλωμα. Ακόμα, με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται στο διάγραμμα το κύκλωμα ψύξης λαδιού, ενώ με κόκκινο χρώμα είναι το κύκλωμα θερμικού ρευστού του πεδίου ηλιακών συλλεκτών που τροφοδοτεί το σύστημα ORC-ECC με θερμότητα που παράγεται από τους παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες ή θερμότητα που είναι αποθηκευμένη στο σύστημα αποθήκευσης



Σχήμα 34 : Μονογραμμικό διάγραμμα της εγκατάστασης του συστήματος TES4Trig

Αρχικά, οργανώνεται ένας πίνακας τοπολογίας που περιέχει όλους τους κύριους αγωγούς της εγκατάστασης, ο οποίος είναι απαραίτητος για τους μετέπειτα υπολογισμούς.

Αγωγός	Αρχή	Τέλος
1	Τροφοδοτικό Δοχείο	Εναλλάκτης υπόψυξης
2	Εναλλάκτης υπόψυξης	Διακλάδωση ORC-ECC χαμηλής πίεσης
3	Διακλάδωση ORC-ECC χαμηλής πίεσης	Αντλία
4	Διακλάδωση ORC-ECC χαμηλής πίεσης	Εκτονωτική Βαλβίδα
5	Αντλία	Ανακομιστής
6	Ανακομιστής	Ατμοποιητής θέρμανσης
7	Ατμοποιητής θέρμανσης	Διακλάδωση ORC-ECC υψηλής πίεσης
8	Διακλάδωση ORC-ECC υψηλής πίεσης	Εκτονωτής
9	Διακλάδωση ORC-ECC υψηλής πίεσης	Ακροφύσια
10	Εκτονωτής	Ανακομιστής
11	Ανακομιστής	Ένωση ORC-ECC πριν το συμπυκνωτή
12	Ακροφύσια	Ένωση ORC-ECC πριν το συμπυκνωτή
13	Ένωση ORC-ECC πριν το συμπυκνωτή	Συμπυκνωτής
14	Συμπυκνωτής	Τροφοδοτικό Δοχείο
15	Εκτονωτική Βαλβίδα	Ατμοποιητής Ψυκτικού Κύκλου
16	Ατμοποιητής ψύξης	Ακροφύσιο

Πίνακας 6 : Πίνακας τοπολογίας με τους κύριους αγωγούς της εγκατάστασης

Το σύστημα ORC-ECC αποτελείται από τη σύζευξη ενός κύκλου ORC και ενός κύκλου ψύξης ακροφυσίου (ECC). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στην εισαγωγή του παρόντος κειμένου το σύστημα συμπαραγωγής (Combined Cooling, Heating and Power – CCHP) πρόκειται μακροσκοπικά για ένα θερμικό κύκλο ηλεκτροπαραγωγής και ψύξης που αξιοποιεί θερμική ενέργεια χαμηλής θερμοκρασία (και ισοδύναμα ενθαλπίας). Το σχέδιο μιας απλοποιημένης διάταξης συμπαραγωγής ORC-ECC δίνεται στο **Σχήμα 35**, ενώ ένα προκαταρκτικό σχέδιο σύζευξης των δύο διατάξεων ακολουθεί στο **Σχήμα 36**.

Οι δύο συζευγμένοι θερμοδυναμικοί κύκλοι (ORC και ECC) χρησιμοποιούν το ίδιο εργαζόμενο μέσο, κοινό ενναλάκτη θερμότητας που λειτουργεί ως ατμοποιητής για τον ORC και ως generator για τον ECC καθώς και κοινό συμπυκνωτή, υποψύκτη (subcooler) και αντλία.

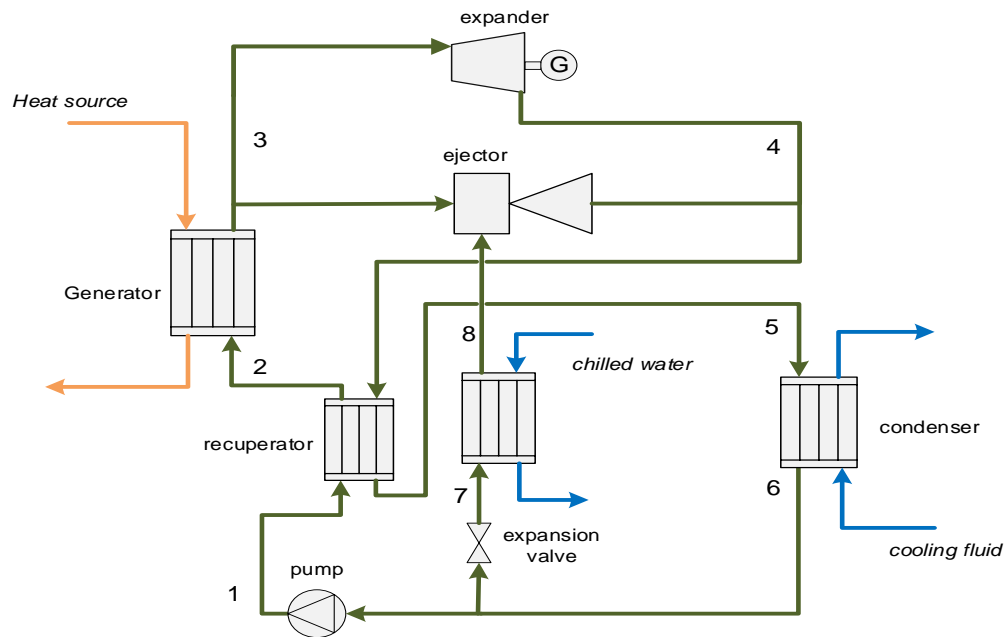
Η απαιτούμενη είσοδος θερμότητας στο σύστημα συμπαραγωγής προέρχεται, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως στο παρόν κείμενο, είτε άμεσα από το ηλιακό πεδίο (Solar Field–SF) είτε από τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage–TES). Το σύστημα ORC-ECC είναι σχεδιασμένο για 3 καταστάσεις λειτουργίας αναφορικά με τη παραγωγή ενέργειας :

- 1) Λειτουργία αποκλειστικά για ηλεκτροπαραγωγή, κατά την οποία μόνο το υποσύστημα του ORC τίθεται σε λειτουργία.
- 2) Λειτουργία συμπαραγωγής θερμότητα και ηλεκτρισμού (Combined Heat and Power–CHP), όπου ο ORC αξιοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή, αλλά θερμότητα χαμηλής ενθαλπίας ανακτάται από τον συμπυκνωτή του ORC.
- 3) Λειτουργία αποκλειστικά για ψύξη (cooling-only mode), κατά την οποία μόνο ο κύκλος ψύξης ECC τίθεται σε λειτουργία.

Για να επιτευχθεί το επιδιωκόμενο θερμικό και ψυκτικό αποτέλεσμα που θα καλύπτει τις απαιτήσεις θέρμανσης και ψύξης του Κτιρίου Διοίκησης, το σύστημα ORC-ECC έχει ενσωματωθεί στις ήδη υπάρχουσες υποδομές ψύξης και θέρμανσης, οι οποίες αποτελούνται από έναν λέβητα λαδιού (oil boiler) για θέρμανση και έναν ψύκτη συμπίεσης ατμών (vapor compression chiller) για ψύξη.

Η σύζευξη του συστήματος ORC-ECC με το σύστημα ψύξης και θέρμανσης του κτιρίου επιτυγχάνεται μέσω ενός ενδιάμεσου κυκλώματος νερού-γλυκόλης που λειτουργεί ως μέσο διασύνδεσης του οργανικού μέσου του κυκλώματος ORC-ECC με τις σωληνώσεις νερού του κτιρίου.

Επιπλέον, το κύκλωμα νερού-γλυκόλης περιέχει ένα ψυγείο (dry cooler) για την απόρριξη της πλεονάζουσας θερμότητας στο περιβάλλον.



Σχήμα 35 : σχέδιο μιας απλοποιημένης διάταξης συμπαραγωγής ORC-ECC

Όταν δεν υπάρχει ζήτηση για θέρμανση ή/και ψύξη ο ORC λειτουργεί στην πρώτη κατάσταση λειτουργίας, αποκλειστικά για τη παραγωγή ηλεκτρισμού. Σε αυτή τη περίπτωση, η περισσευούμενη θερμότητα αποβάλλεται από το κύκλωμα νερού-γλυκόλης προς το περιβάλλον μέσω του dry cooler.

Όταν, αντιθέτως υπάρχει απαίτηση ψύξης του κτιρίου, ο κύκλος ORC τίθεται εκτός λειτουργίας και το σύστημα μπαίνει στη 3η κατάσταση λειτουργίας, αποκλειστικά για ψύξη. Εδώ, το ψυκτικό μέσο συμπυκνώνεται στο ψυγείο του ECC σε χαμηλή θερμοκρασία και κατόπιν ψύχει το ενδιάμεσο κύκλωμα νερού-γλυκόλης. Αυτό με τη σειρά του ψύχει το ρεύμα νερού στο σύστημα σωληνώσεων του κτιρίου. Το ψυκτικό αποτέλεσμα, ωστόσο, που επιτυγχάνεται μέσω του κύκλου ψύξης ECC δεν επαρκεί για να καλύψει πλήρως τις απαιτήσεις ψύξης του κτιρίου Διοίκησης, αλλά μειώνει αισθητά την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος ψύξης του κτιρίου, καθώς το νερό εισέρχεται στο ψυγείο (chiller) σε αρκετά μικρότερη θερμοκρασία από τη συνηθισμένη.

Τέλος, όταν υπάρχει ζήτηση για θέρμανση, το σύστημα μπαίνει στη λειτουργία συμπαραγωγής (CHP). Σε αυτή τη περίπτωση, η πίεση συμπύκνωσης του ORC αυξάνεται, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία εξόδου του κυκλώματος νερού-γλυκόλης από τον συμπυκνωτή του ORC να αυξάνεται. Το ένα ρεύμα νερού-γλυκόλης κατευθύνεται εν συνεχεία στον δευτερεύοντα εναλλάκτη θερμότητας (Heating Hex), όπου προθερμαίνεται το νερό που επιστρέφει στο λέβητα λαδιού, μειώνονται έτσι τη κατανάλωση καυσίμου του λέβητα.

Η ζήτηση για θέρμανση στο κτίριο παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της μέρας. Για το λόγο αυτό η παροχή του μείγματος νερού-γλυκόλης προσαρμόζεται κατάλληλα μέσω μίας βαλβίδας τριών δρόμων (three-way valve).

Τόσο στη λειτουργία συμπαραγωγής όσο και στη λειτουργία αποκλειστικής ψύξης μέσω του ECC, όταν η παραγόμενη θέρμανση ή η ψύξη του συστήματος ORC δεν επαρκεί για να καλύψει το φορτίο του κτιρίου, η ήδη υπάρχουσα διάταξη του λέβητα λαδιού και του ψυγείου (chiller) του κτιρίου χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά.

Τα σενάρια λειτουργίας της εγκατάστασης συμπαραγωγής παρουσιάζονται στο **Σχήμα 36**.

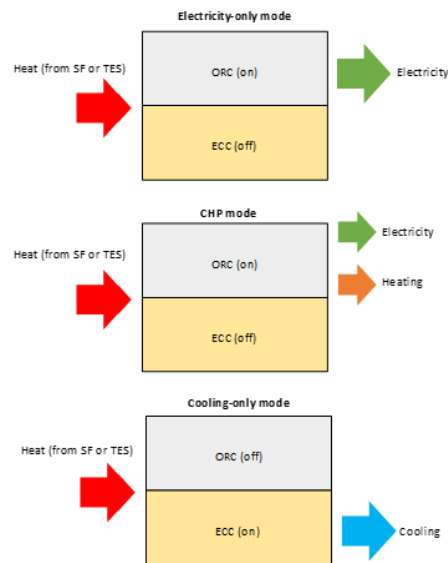


Figure 10: Overview of ORC-ECC operating modes

Σχήμα 36 : Τα σενάρια λειτουργίας της εγκατάστασης συμπαραγωγής

5.2. Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος ORC-ECC

Η επιλογή του κατάλληλου εργαζόμενου μέσου αποτελεί σημαντική παράμετρο στο σχεδιασμό οποιουδήποτε θερμοδυναμικού κύκλου και δη στην περίπτωση ενός οργανικού κύκλου Rankine. Για την υπό μελέτη εγκατάσταση επιλέχθηκε η υδροφθοριολεφίνη R1233zd ως εργαζόμενο μέσο. Οι βασικοί λόγοι που συντέλεσαν στην επιλογή του συγκεκριμένου μέσου είναι η ασφάλεια του κατά τη λειτουργία, καθώς πρόκειται για ένα μη τοξικό και μη εύφλεκτο ρευστό και οι περιβαλλοντικά αποδεκτές ιδιότητες του, αφού διαθέτει μηδενική δυνατότητα καταστροφής του όζοντος της ατμόσφαιρας (Ozone Depletion Potential–ODP) και μηδενική συμβολή στην υπερθέρμανση του πλανήτη (Global Warming Potential–GWP). Ένα μειονέκτημα της χρήσης του R1233zd είναι η σχετικά μικρή απόδοση του σε εφαρμογές

κύκλων ORC και ECC, εξαιτίας της μικρής κρίσιμης θερμοκρασίας του (167 °C) και της σχετικά μικρής μέγιστης τιμής επιτρεπόμενης θερμοκρασίας (150 – 170 °C) που καθορίζεται από το όριο θερμοευστάθιας της ένωσης.

Εξαιτίας των παραπάνω περιορισμών, η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου ORC-ECC δεν ξεπερνά τους 140 °C. Στον ακόλουθο **Πίνακα 7** παρουσιάζονται οι βαθμοί απόδοσης του κύκλου συμπαραγωγής ORC-ECC (ηλεκτρικός, θερμικός και COP) κατά τα τρία κύρια σενάρια λειτουργίας της εγκατάστασης :

Σενάριο Λειτουργίας	Ηλεκτρικός β.απόδοσης (%)	Θερμικός β.απόδοσης (%)	COP (-)
1 : Αποκλειστικά Ηλεκτροπαραγωγή (χειμώνας / καλοκαίρι)	13,6 / 10,7	0/0	0/0
2 : Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανσης (CHP)	8,9	87,4	0
3 : Αποκλειστικά Ψύξη	0	0	0,1

Πίνακας 7 : Βαθμοί απόδοσης του κύκλου συμπαραγωγής ORC-ECC (ηλεκτρικός, θερμικός και COP) κατά τα τρία κύρια σενάρια λειτουργίας της εγκατάστασης

Αναφορικά με το ηλιακό πεδίο των παραβολικών συλλεκτών, η μέγιστη ισχύς του ανέρχεται στα 150 kW_{th} και η ημερήσια παραγωγή ενέργειας ισούται με 1080 kWh_{th} κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Στη χειμερινή περίοδο, η μέγιστη ισχύς του ηλιακού υποσυστήματος είναι προφανώς μικρότερη, με μέγιστη τιμή στα 121 kW_{th}, ενώ η ημερήσια παραγωγή θερμικής ενέργειας ισούται με 611 kWh_{th}.

Με βάση τις απαιτήσεις ψύξης και θέρμανσης του κτιρίου Διοίκησης που υπολογίστηκαν κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό της εγκατάστασης, καθώς και εξαιτίας της περιορισμένης μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας του εργαζόμενου μέσου, η ονομαστική θερμική ισχύς εισόδου του συστήματος ORC-ECC υπολογίστηκε στα 75 kW_{th}. Επίσης, η θερμική χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) τέθηκε ίση με 400 kWh_{th}.

Η μέγιστη συνολική, παραγώμενη, ηλεκτρική ισχύς του κύκλου ORC είναι ίση με 10,2 kW_e στο πρώτο σενάριο λειτουργίας αποκλειστικά για ηλεκτροπαραγωγή. Στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θέρμανσης (CHP) η συνολική, παραγώμενη, ηλεκτρική ισχύς είναι ίση με 6,7 kW_e και η ωφέλιμη παραγωγή θερμικής ενέργειας ίση με 65,6 kW_{th}. Τέλος, κατά το τρίτο σενάριο λειτουργίας, αποκλειστικά για παραγωγή ψύξης μέσω του κύκλου ECC, η παραγώμενη ισχύς ψύξης ισούται με 7,7 kW_c.

Γενικά, ο συνδυασμένος κύκλος ORC-ECC θα λειτουργεί όποτε υπάρχει διαθέσιμη θερμική ενέργεια απευθείας μέσω του ηλιακού πεδίου ή εμμέσως από τη μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES). Επιπροσθέτως, ανάλογα με τις απαιτήσεις ψύξης ή θέρμανσης, η εγκατάσταση θα μπαίνει σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας με βάση τα σενάρια λειτουργίας που αναλύθηκαν προηγουμένως στο παρόν κείμενο.

6. Διαστασιολόγηση και επιλογή βαλβίδων

Όπως μπορεί να φανεί και στο μονογραμμικό διάγραμμα το κύκλωμα ORC-ECC περιλαμβάνει σωληνοειδείς βαλβίδες, σφαιρικές βαλβίδες με κινητήρα, μία πνευματική βαλβίδα καθώς και μία εκτονωτική βαλβίδα. Οι σφαιρικές βαλβίδες χρησιμοποιούνται για την απομόνωση τμημάτων του κύκλου σε περιπτώσεις που αυτό απαιτείται. Οι σφαιρικές βαλβίδες με κινητήρα χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της πτώσης πίεσης διαμέσου ενός κλάδου. Η πνευματική βαλβίδα χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής στον κλάδο bypass. Η εκτονωτική βαλβίδα χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση της μεταβολής αδιαβατικού στραγγαλισμού στον ψυκτικό κύκλο.

Η διαστασιολόγηση των βαλβίδων γίνεται με κριτήριο την ελάχιστη πτώση πίεσης εντός της βαλβίδας, δηλαδή την ελάχιστη επιτρεπόμενη πτώση πίεσης έτσι ώστε η βαλβίδα να μπορεί να λειτουργήσει, μέσω του χαρακτηριστικού συντελεστή παροχής k_v .

Η μεθοδολογία επιλογής βαλβίδων παρουσιάζεται στην συνέχεια και εφαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε βαλβίδα του κύκλου. Αρχικά, ορίζεται η ελάχιστη πτώση πίεσης στην βάνα, με βάση τις τιμές του κατασκευαστή. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο μέγιστος συντελεστής παροχής $k_{v|max}$ από τον παρακάτω τύπο:

$$k_{v|max} = \dot{Q} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p_{min}}} \quad (2)$$

Από το φυλλάδιο του κατασκευαστή επιλέγεται η βάνα με τον αμέσως μικρότερο συντελεστή παροχής για να ικανοποιείται πάντα το κριτήριο της ελάχιστης πίεσης. Τέλος, για δεδομένη βαλβίδα, με δεδομένο k_v , υπολογίζονται οι εντοπισμένες απώλειες πίεσης από την σχέση:

$$\Delta p = \rho \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{k_v}\right)^2 \quad (3)$$

Για τον υπολογισμό των παραπάνω, χρησιμοποιείται η παροχή όγκου που διαρρέει τον εκάστοτε σωλήνα, που τοποθετείται η βάνα, και η πυκνότητα στην είσοδο του αγωγού.

6.1. Σωληνοειδείς Βαλβίδες

Οι σωληνοειδείς βαλβίδες είναι ηλεκτρικά ελεγχόμενες βαλβίδες. Διαθέτουν ένα ηλεκτρικό πηνίο με κινητό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Ανάλογα με την αρχική, φυσική θέση του εμβόλου, αν δηλαδή επιτρέπει ή όχι την ροή ρευστού όταν δεν διαρρέονται από ρεύμα, διαχωρίζονται σε Normally Open και Normally Closed αντίστοιχα. Οι Normally Closed βαλβίδες τοποθετούνται εκατέρωθεν κάθε εξαρτήματος του κύκλου για να είναι δυνατή η απομόνωσή του, ώστε να μπορούν να συντηρηθούν, να επισκευαστούν ή να αντικατασταθούν, χωρίς να υπάρξουν διαρροές. Οι Normally Open βαλβίδες χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για την επιστροφή του εργαζόμενου μέσου στο τροφοδοτικό δοχείο σε περίπτωση διακοπής ρεύματος ή γενικότερης βλάβης.

Για την συγκεκριμένη διάταξη εξετάζονται βαλβίδες της Danfoss τύπου Solenoid EVR 2 – EVR 40 [11]. Τα διαφορετικά μοντέλα βαλβίδων Normally Closed με τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον **Πίνακα 8**.

Μοντέλο	Ονομαστική Διάμετρος["]	Συντελεστής Παροχής k_v	Μέγιστη Πίεση Λειτουργίας[bar]	Κωδικός
EVR 2	1/4	0.16	45.2	032F1201
EVR 3	1/4	0.27	45.2	032F1206
	3/8			032F1204
EVR 6	3/8	0.80	45.2	032F1212
	1/2			032F1209
EVR 10	1/2	1.90	35	032F1217
	5/8			032F1214
EVR 15	5/8	2.60	32	032F1228
	7/8			032F1225
EVR 20	7/8	5.00	32	032F1240
	1 1/8			032F1244
EVR 22	1 3/8	6.00	32	032F3267
EVR 25	1 1/8	10.00	32	032F2201
	1 3/8			032F2208

EVR 32	1 5/8	16.00	32	042H1104
EVR 40	1 5/8	25.00	32	042H1110
	2 1/8			042H1112

Πίνακας 8 : Μοντέλα Ηλεκτρομαγνητικών Βαλβίδων DanfossNC

Τα διαφορετικά μοντέλα βαλβίδων Normally Closed με τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον **Πίνακα 9**.

Μοντέλο	Ονομαστική Διάμετρος["]	Συντελεστής Παροχής k_v	Μέγιστη Πίεση Λειτουργίας[bar]	Κωδικός
EVR 6	3/8	0.80	45.2	032F1290
EVR 10	1/2	1.90	35	032F1291
EVR 15	5/8	2.60	32	032F1299
	7/8			032F3270
EVR 20	7/8	5.00	32	032F1260
	1 1/8			032F1269
EVR 22	1 3/8	6.00	32	032F3268

Πίνακας 9 : Μοντέλα Ηλεκτρομαγνητικών Βαλβίδων DanfossNC

Παρατηρείται ότι τα μοντέλα των Normally Open βαλβίδων έχουν μικρότερη ποικιλία και χαμηλότερα k_v . Αυτό σημαίνει ότι πιθανότατα θα δημιουργούνται υψηλές απώλειες πίεσης κατά την διέλευση του εργαζόμενου μέσου απ' την βαλβίδα. Ωστόσο, επειδή οι Normally Open βαλβίδες χρησιμοποιούνται μόνο σε έκτακτες περιπτώσεις και όχι κατά την κανονική λειτουργία του κύκλου δεν υπάρχει πρόβλημα.

Από την διαδικασία της διαστασιολόγησης υπολογίζεται ο ιδανικός συντελεστής παροχής από τους συντελεστές του Πίνακας και του Πίνακας. Αν στο συγκεκριμένο μοντέλο βαλβίδας αντιστοιχούν περισσότερες από μία διαμέτρους σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή, επιλέγεται πλησιέστερη διάμετρος σε αυτή της αντίστοιχης σωλήνωσης.

6.2. Σφαιρικές βαλβίδες με κινητήρα (Motorized Ball Valve)

Οι μηχανοκίνητες σφαιρικές βαλβίδες είναι περιστρεφόμενες βαλβίδες, χωρίς χειροκίνητες λαβές περιστροφής, με χρήση ενεργοποιητή για την αυτοματοποίηση του ανοίγματος και του κλεισίματος της βαλβίδας. Οι ενεργοποιητές είναι ηλεκτρικού, υδραυλικού και πνευματικού τύπου. Σε αντίθεση με τις σωληνοειδείς βαλβίδες, οι οποίες ελέγχονται με ηλεκτρομηχανικό ελεγκτή, οι σφαιρικές βαλβίδες λειτουργούν με εισερχόμενο ηλεκτρικό σήμα από κινητήρα.

Στο συγκεκριμένο κύκλωμα χρησιμοποιούνται οι βαλβίδες της Castel[2]. Τα χαρακτηριστικά τους συγκεντρώνονται στον **Πίνακα 10**.

Μοντέλο	Διάμετρος ["]	Διάμετρος [mm]	Συντελεστής Παροχής k_v	Μέγιστη Πίεση Λειτουργίας [bar]	Κωδικός
Reinforced Copper Ods Connections	3/8	-	4.60	80	6690EM/3A2
	1/2				6690EM/4A2
	5/8				6690EM/5A2
	3/4				6690EM/6A2
K65 Copper Alloy Ods Connections	3/8	-		130	6697EM/3A2
	1/2				6697EM/4A2
	5/8				6697EM/5A2
	3/4				6697EM/6A2
Stainless Steel Connections	-	10		140	6698EM/M10A2
	-	12			6698EM/M12A2
	-	16	6698EM/M16A2		
	-	18	6698EM/M18A2		
3 Way Ball Valves (Simple)	3/8	-	45 – 50	6690NM/3A2	
	1/2			6690NM/4A2	
	5/8			6690NM/5A2	
	3/4				

					6690NM/6A2
Reinforced Copper Ods Connections	7/8	-	10.70	80	6690EM/7A2
K65 Copper Alloy Ods Connections	7/8	-		130	6697EM/7A2
Stainless Steel Connections	-	22		140	6698EM/M22A2
3 Way Ball Valves (Simple)	7/8			45 – 50	6690NM/7A2
Reinforced Copper Ods Connections	1 1/8	-		80	6690EM/9A2
K65 Copper Alloy Ods Connections	1 1/8	-	15.90	130	6697EM/9A2
Stainless Steel Connections	-	28		140	6698EM/M28A2
3 Way Ball Valves (Simple)	1 1/8			45 – 50	6690NM/9A2
Reinforced Copper	1 3/8	-		20.30	80

Ods Connections					
K65 Copper Alloy Ods Connections	1 3/8	-		130	6697EM/11A2
Stainless Steel Connections	-	35		140	6698EM/M35A2
3 Way Ball Valves (Simple)	1 3/8	-			6690NM/11A2
Reinforced Copper Ods Connections	1 5/8	-		80	6690EM/13A2
K65 Copper Alloy Ods Connections	1 5/8	-	38.5	130	6697EM/13A2
Stainless Steel Connections	-	42		140	6698EM/M42A2
3 Way Ball Valves (Simple)	1 5/8	-		45 – 50	6690NM/13A2

Πίνακας 10 : Μηχανοκίνητες Σφαιρικές Βαλβίδες

Και σε αυτή την περίπτωση από την διαδικασία της διαστασιολόγησης υπολογίζεται ο ιδανικός συντελεστής παροχής από τους συντελεστές του Πίνακα 9.

Αφού γίνει η διαστασιολόγηση των βαλβίδων με βάση το k_v , η διάμετρος και το υλικό επιλέγονται μετά το στάδιο επιλογής σωληνώσεων, με τέτοιο τρόπο ώστε η διάμετρος της βαλβίδας να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην διάμετρο της σωλήνωσης και το υλικό να είναι το ίδιο με της σωλήνωσης ή τέτοιο ώστε να μην δημιουργούνται χημικές αντιδράσεις.

6.3. Πνευματικές Βαλβίδες

Ο όρος «πνευματική βαλβίδα» αναφέρεται σε δύο διαφορετικές έννοιες, ανάλογα με το σύστημα στο οποίο βρίσκεται η βαλβίδα. Σε ένα πνευματικό σύστημα η πνευματική βαλβίδα είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση ή τον έλεγχο της ροής του αέρα (ή άλλου αερίου). Σε άλλα συστήματα, όπου συνήθως το εργαζόμενο μέσο δεν είναι ο αέρας, η πνευματική βαλβίδα λειτουργεί σαν ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, με την διαφορά ότι ο αέρας λειτουργεί ως εργαλείο ελέγχου της βαλβίδας, αντί για μαγνητικό πεδίο ή κινητήρα. Καθώς αυξάνεται η πίεση του αέρα, ο συμπιεσμένος αέρας πιέζει το έμβολο και ενεργοποιεί την βαλβίδα.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης πνευματικής βαλβίδας, έναντι κάποιου άλλου είδους, είναι η απαίτηση ελάχιστης συντήρησης, η ευελιξία σε μέγεθος και βάρος και η προσαρμοστικότητα σε ποικιλία εφαρμογών. Ο κυριότερος λόγος επιλογής τους στην συγκεκριμένη εγκατάσταση (ειδικότερα στην θέση μετά τον ατμοποιητή στο ρεύμα παράκαμψης) είναι η δυνατότητα λειτουργίας σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Στο σύστημα που εξετάζεται επιλέγεται πνευματική βαλβίδα από τον κατάλογο της Schubert & Salzer [12]. Οι βαλβίδες αυτές έχουν σχεδιασμό γωνιακής έδρας, που προσφέρει υψηλό ρυθμό ροής. Το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας είναι $-30^{\circ}\text{C} - 170^{\circ}\text{C}$

Μοντέλο	Ονομαστική Διάμετρος["]	Υλικό	Συντελεστής Παροχής k_v	
Standard Design	1/4	Stainless Steel, Bronze	0.95	
	3/8	Stainless Steel, Bronze	1.6	
	1/2	Stainless Steel, Bronze	3.5	
	3/4	Stainless Steel, Bronze	8.0	
	1	1	Stainless Steel, Bronze	15.0
			Stainless Steel, Bronze	16.0
	1 1/4	1 1/4	Stainless Steel, Bronze	21.0
			Stainless Steel, Bronze	24.0
	1 1/2	1 1/2	Stainless Steel, Bronze	30.0
			Stainless Steel, Bronze	35.0

	2	Stainless Steel, Bronze	40.0
		Stainless Steel, Bronze	55.0
	2 1/2	Stainless Steel, Bronze	80.0
		Brass	93.0
	3	Stainless Steel, Bronze	112.0
		Brass	115.0
Reinforced Design	2	Reinforced Stainless Steel	55.0
	2 1/2		55.0
	3		80.0
Pressure Balanced Version	1 1/4	Stainless Steel	21.0
	1 1/2	Stainless Steel	30.0
		Stainless Steel	35.0
	2	Stainless Steel	40.0
		Stainless Steel	55.0
	2 1/2	Stainless Steel	80.0
3	Stainless Steel	112.0	
Version HT220	3/8	Stainless Steel	1.6
	1/2	Stainless Steel	3.5
	3/4	Stainless Steel	8.0
	1	Stainless Steel	16.0
	1 1/4	Stainless Steel	24.0
	1 1/2	Stainless Steel	35.0
	2	Stainless Steel	55.0

Πίνακας 11 : Μοντέλα Πνευματικών Βαλβίδων Γωνιακής Έδρας Schubert&Salzer

6.4. Εκτονωτική Βαλβίδα

Η εκτονωτική βαλβίδα τοποθετείται στον ψυκτικό κύκλο του συστήματος, πριν τον ατμοποιητή του ψυκτικού κύκλου. Εντός της βαλβίδας πραγματοποιείται ισενθαλπική εκτόνωση του εργαζόμενου μέσου, έτσι ώστε να εισέλθει στον ατμοποιητή με χαμηλότερη πίεση, να δεχθεί περισσότερη θερμότητα και να αυξήσει την παραγόμενη ψυκτική ενέργεια.

Στην παρούσα εγκατάσταση επιλέγεται εκτονωτική βαλβίδα της εταιρείας Danfoss. Η επιλογή από τα υπάρχοντα μοντέλα γίνεται με βάση την πίεση και την θερμοκρασία στις οποίες θα λειτουργεί η βαλβίδα.

Μοντέλο	Τύπος	Θερμοκρασία Εργαζόμενου Μέσου	Μέγιστη Πίεση Λειτουργίας
Ρυθμιζόμενου ελέγχου	ETS M	-30 ÷ 70°C	45.5 bar
		-30 ÷ 70°C	49 bar
	ETS 6	-30 ÷ 70°C	47 bar
	ETS C	-40 ÷ 70°C	50 bar
	ETS L	-40 ÷ 70°C	37 bar
	ETS P	-40 ÷ 65°C	37 bar
Παλλόμενου ελέγχου	AKV	-50 ÷ 60°C	28 ÷ 46 bar
	AKV-P	-60 ÷ 60°C	90 bar
Ρυθμιζόμενου ελέγχου για κύκλους CO ₂	CCM	-40 ÷ 40°C	90 bar
	CCMT	-40 ÷ 60°C	140 bar
	CCMT Light	-20 ÷ 55°C (inlet)	120 ÷ 140 bar
		-40 ÷ 55°C (outlet)	
ICMTS	-60 ÷ 120°C	140 bar	

Πίνακας 12 : Μοντέλα Εκτονωτικών Βαλβίδων Danfoss

Οι συνθήκες που επικρατούν στο σημείο τοποθέτησης της εκτονωτικής βαλβίδας είναι μέγιστη πίεση 2.52 bar και μέγιστη θερμοκρασία 40 °C (Σενάριο 4 – είσοδος εκτονωτικής βαλβίδας). Από τα παραπάνω μοντέλα, όλα είναι κατάλληλα για τον συγκεκριμένο κύκλο.

6.5. Αποτελέσματα

Ακολουθώντας την διαδικασία διαστασιολόγησης βανών, όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, επιλέγεται η καταλληλότερη βαλβίδα για κάθε σημείου του κύκλου. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε σενάριο και σε κάθε βαλβίδα επιλέγεται από τις τέσσερις υποψήφιες αυτή με τον μικρότερο συντελεστή παροχής. Εξαιρέση αποτελούν οι αγωγοί πριν και μετά τα ακροφύσια (δηλαδή οι αγωγοί 9 και 15), καθώς εκεί το εργαζόμενο μέσο διέρχεται από διαφορετικό αγωγό και άρα από διαφορετική βαλβίδα σε κάθε σενάριο. Γενικά, είναι επιθυμητή η επιλογή της βαλβίδας με την μικρότερη πτώση πίεσης, έτσι ώστε τα πραγματικά θερμοδυναμικά σημεία του κύκλου να μην απέχουν από την θεωρητική σχεδίαση και για να καταναλώνει η αντλία όσο το δυνατόν μικρότερο έργο. Επιπλέον, σε μερικά σημεία του κύκλου, όπου το ρευστό βρίσκεται κοντά στην κατάσταση κορεσμού, από την πλευρά του αερίου, μεγαλύτερες πτώσεις πίεσης ενδέχεται να οδηγήσουν σε διφασικό μείγμα, με αποτέλεσμα η συμπεριφορά του κύκλου να μην είναι η επιθυμητή και να υπάρχει κίνδυνος καταστροφές των εναλλακτών θερμότητας.

Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον **Πίνακα 13**. Οι τελικές διάμετροι των βαλβίδων επιλέγονται μετά και το στάδιο της διαστασιολόγησης των σωληνώσεων, έτσι ώστε η διάμετροί τους να απέχουν όσο το δυνατόν λιγότερο και να χρησιμοποιηθεί απλούστερη συνδεσμολογία. Επιπλέον, και η επιλογή των υλικών γίνεται μετά την επιλογή των σωληνώσεων, έτσι ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα κατά την επαφή διαφορετικών μετάλλων, που μπορεί να οδηγήσουν σε χημικές αντιδράσεις, διαβρώσεις κ.α..

Αγωγός	Τύπος Βαλβίδας	Εταιρεία	Μοντέλο Βαλβίδας	k_v	Διάμετρος Σύνδεσης	Λειτουργία
4	Solenoid	Danfoss	EVR 6 (032F1209/032F1212)	0.8	3/8 1/2	Απομόνωση κλάδου ατμοποιητή ECC
8	Motorized Ball	Castel	6690EM/11A2 6697EM/11A2 6698EM/M35A2 6690NM/9A2	20.3	1 3/8	Ρύθμιση πίεσης πριν τον εκτονωτή
9	Motorized Ball	Castel	6690EM/11A2 6697EM/11A2 6698EM/M35A2	20.3	1 3/8	Ρύθμιση πίεσης πριν ΗΤ ακροφύσιο

			6690NM/9A2			
	Motorized Ball	Castel	6690EM/11A2 6697EM/11A2 6698EM/M35A2 6690NM/9A2	20.3	1 3/8	Ρύθμιση πίεσης πριν LTακροφύσιο
10	SolenoidNC	Danfoss	EVR 40 (042H1110 / 042H1112)	25.0	1 5/8 2 1/8	
	Solenoid NO	Danfoss	EVR 22 (032F3268)	6.0	1 3/8	
12	Solenoid NC	Danfoss	EVR 40 (042H1110 / 042H1112)	25.0	1 5/8 2 1/8	
		Danfoss	EVR 32 (042H1104)	16.0	1 5/8	
Παράκαμψης	Pneumatic	Schubert & Salzer	Standard design/ Version HT220	16.0	1	Κύριος κλάδος παράκαμψης

Πίνακας 13 : Στοιχεία επιλεγμένων βαλβίδων

Με δεδομένη την πτώση πίεσης σε κάθε αγωγό εξαιτίας των βαλβίδων, υπολογίζονται εκ νέου τα θερμοδυναμικά μεγέθη του κύκλου, τα οποία αναμένεται να έχουν μικρές αποκλίσεις με τα θεωρητικά. Για τον υπολογισμό πρέπει να θεωρηθούν δεδομένα και ίσα με τα θεωρητικά κάποια σημεία του πραγματικού κύκλου. Το ένα από αυτά είναι το τροφοδοτικό δοχείο, καθώς λόγω της μεγάλης ποσότητας εργαζόμενου μέσου που περιέχει μπορεί και επιβάλλει την κατάστασή του και στον αγωγό που εισέρχεται σε αυτό και στον αγωγό που εξέρχεται από αυτό. Το δεύτερο είναι η είσοδος στον εκτονωτή, γιατί έχει σχεδιαστεί έτσι το σύστημα, ώστε να έχουμε την επιθυμητή ηλεκτροπαραγωγή.

Για τον υπολογισμό όλων των σημείων χωρίζεται ο κύκλος σε τέσσερις περιοχές: από την τροφοδοτική αντλία μέχρι την είσοδο του εκτονωτή, από το τροφοδοτικό δοχείο μέχρι την είσοδο της αντλίας, από το τροφοδοτικό δοχείο μέχρι την είσοδο του δευτερεύοντος ρεύματος του ακροφυσίου και από την έξοδο του ακροφυσίου μέχρι την είσοδο του

τροφοδοτικού δοχείου. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζονται οι μεταβολές της αντλίας, του εκτονωτή και των ακροφυσίων.

Οι παραδοχές που γίνονται είναι οι εξής:

- Η πυκνότητα κάθε αγωγού είναι ίση με την μέση τιμή των πυκνοτήτων έναρξης και τέλους του αγωγού.
- Στους αγωγούς η πτώση θερμοκρασίας είναι αμελητέα και συνεπώς η θερμοκρασία στο τέλος του αγωγού είναι ίση με εκείνη στην αρχή του.

Είναι προφανές ότι η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται και για τα τέσσερα σενάρια λειτουργίας. Παράλληλα με τα παραπάνω γίνεται και διερεύνηση της διατομής του εκάστοτε αγωγού.

Οι βασικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται αναφέρονται στην συνέχεια. Το βασικό κριτήριο για την επιλογή διαμέτρου είναι η ταχύτητα που αναπτύσσει το ρευστό εντός του. Από την βιβλιογραφία βρέθηκε ότι για το εργαζόμενο μέσο σε υγρή κατάσταση το όριο επιτρεπόμενης ταχύτητας είναι $u_{lim} = 0.6 \text{ m/s}$, ενώ σε αέρια κατάσταση είναι $u_{lim} = 15.2 \text{ m/s}$.

Επομένως, για την επιλογή διαμέτρου χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \Rightarrow V = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\rho \cdot \pi \cdot D^2} \leq V_{lim} \quad (4)$$

Οι πιθανές διάμετροι σωληνώσεων επιλέγονται από τους καταλόγους της ΧΑΛΚΟΡ [13]. Στον Πίνακα αναφέρονται κάποια τυπικά γεωμετρικά μεγέθη των σωληνώσεων, όπως αυτά δίνονται από τον κατασκευαστή.

Με εκκίνηση από την μικρότερη διάμετρο, για να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη η εγκατάσταση, δοκιμάζονται όλες οι επιλογές στον παραπάνω τύπο. Τελικά, επιλέγεται η μικρότερη διάμετρος που ικανοποιεί το κριτήριο της ταχύτητας.

Στην συνέχεια, για τις απώλειες εντός των αγωγών χρησιμοποιείται ο τύπος:

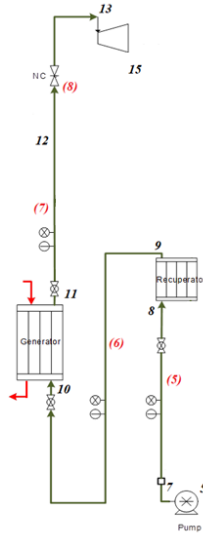
$$dp = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot V^2 + \rho \cdot g \cdot H + dp_s \quad (5) \quad \text{όπου}$$

$$\lambda = \left[1.14 - \log \left(\frac{e}{D} + \frac{21.25}{Re^{0.9}} \right) \right]^2 \quad (6)$$

Ονομαστική Διάμετρος [mm]	Ονομαστική Διάμετρος [inch]	Πάχος [mm]	Εσωτερική Διάμετρος [mm]
10.00	3/8	0.70	8.60
10.00	3/8	1.00	8.00
12.00	1/2	0.70	10.60
12.00	1/2	1.00	10.00
15.00	5/8	0.70	13.60
15.00	5/8	0.80	13.40
15.00	5/8	1.00	13.00
15.00	5/8	1.20	12.60
18.00	3/4	0.80	16.40
18.00	3/4	1.00	16.00
18.00	3/4	1.20	15.60
22.00	7/8	0.80	20.40
22.00	7/8	0.90	20.20
22.00	7/8	1.00	20.00
22.00	7/8	1.50	19.00
28.00	1 1/8	0.80	26.40
28.00	1 1/8	0.90	26.20
28.00	1 1/8	1.00	26.00
28.00	1 1/8	1.50	25.00
35.00	1 3/8	1.00	33.00
35.00	1 3/8	1.50	32.00
35.00	1 3/8	2.00	31.00
42.00	1 5/8	1.00	40.00
42.00	1 5/8	1.20	39.60
42.00	1 5/8	1.50	39.00
54.00	2 1/8	1.00	52.00
54.00	2 1/8	1.20	51.60
54.00	2 1/8	1.50	51.00
54.00	2 1/8	2.00	50.00
64.00	2 1/4	2.00	60.00
76.10	3	2.00	72.10
88.90	3 1/2	2.00	84.90
108.00	4 1/4	2.00	104.00
108.00	4 1/4	2.50	103.00

Πίνακας 14 : Σωληνώσεις ΧΑΛΚΟΡ

Τα τμήματα στα οποία διαχωρίστηκε ο κύκλος της εγκατάστασης αναλύονται ξεχωριστά και παρουσιάζεται η διαδικασία (επαναληπτική ή γραμμική) υπολογισμού των θερμοδυναμικών μεγεθών.



Σχήμα 37 : Τμήμα 1: Αντλία - Εκτονωτής

Για τον υπολογισμό των πραγματικών θερμοδυναμικών μεγεθών σε κάθε σημείο χρειάζεται επαναληπτική διαδικασία, με αφετηρία το σημείο 7 (έξοδος αντλίας) και τέλος το σημείο 13 (είσοδος εκτονωτή). Επειδή γνωστό είναι το τελικό σημείο (13) γίνεται υπόθεση της πίεσης στο σημείο 7 και λαμβάνει χώρα επαναληπτική διαδικασία, έως ότου η είσοδος του εκτονωτή να έχει ίδια πίεση και θερμοκρασία με την θεωρητική. Για τον τερματισμό των επαναλήψεων ορίζεται αποδεκτή η απόκλιση των $5 Pa$.

Σημείο 7: Έξοδος Αντλίας

Η αρχικοποίηση της πίεσης γίνεται θεωρώντας την ίση με την θεωρητική, ομοίως και της θερμοκρασίας.

$$p_7 = p_{th_7}$$

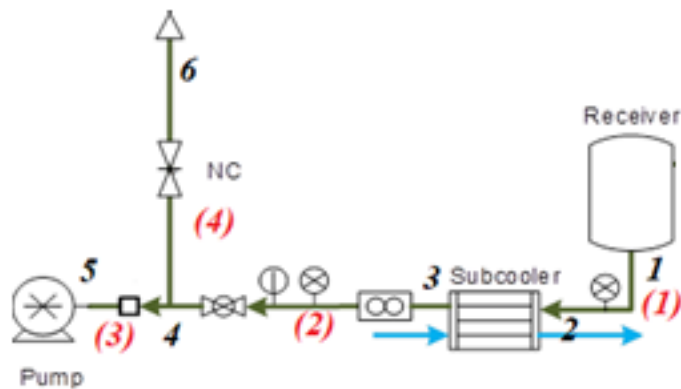
$$T_7 = T_{th_7}$$

Τα υπόλοιπα θερμοδυναμικά μεγέθη (πυκνότητα και ενθαλπία) υπολογίζονται με το εργαλείο Coolprop.

Σε κάθε αγωγό εφαρμόζεται η εξίσωση της πτώσης πίεσης για τον υπολογισμό της πίεσης στο τέλος του. Στους εναλλάκτες θεωρείται δεδομένη η αύξηση της θερμοκρασίας, όπως έχει ήδη υπολογιστεί στον θεωρητικό κύκλο. Στο τελικό σημείο ελέγχεται η τιμή της πίεσης και εάν η απόκλιση είναι μεγαλύτερη των $5 Pa$, η πίεση στην έξοδο της αντλίας μεταβάλλεται ως εξής:

$$p_{7_{NEW}} = p_{7_{OLD}} - 0.2 \cdot DP$$

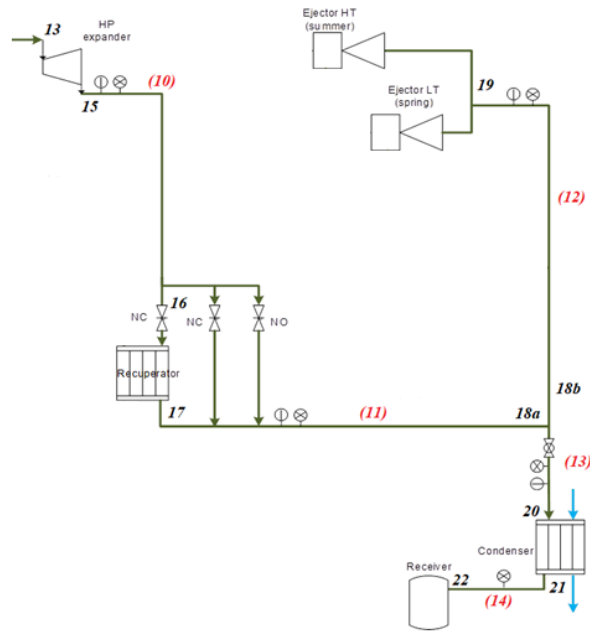
Όπου DP είναι η απόκλιση της υπολογισμένης πίεσης στην είσοδο του εκτονωτή από την θεωρητική.



Σχήμα 38 : Τμήμα 2: Τροφοδοτικό Δοχείο – Αντλία

Το συγκεκριμένο τμήμα δεν χρειάζεται επαναληπτική διαδικασία, εφόσον το σημείο εκκίνησης είναι δεδομένο. Επομένως, ακολουθώντας τη παραπάνω διαδικασία γραμμικά, καθορίζονται όλα τα σημεία του δεύτερου τμήματος. Πλέον, μπορεί να υπολογιστεί η αύξηση πίεσης της αντλίας, με βάση την οποία θα γίνει η επιλογή από το εμπόριο.

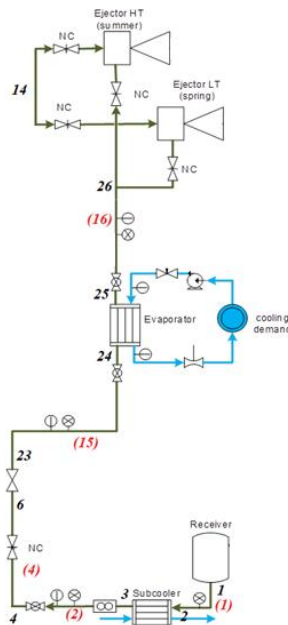
$$dp_{pump} = p_7 - p_5$$



Σχήμα 39 : Τμήμα 3: Εκτονωτής – Τροφοδοτικό Δοχείο

Στο τμήμα αυτό ακολουθείται η ίδια επαναληπτική διαδικασία με το πρώτο τμήμα. Ομοίως, λοιπόν, γίνεται υπόθεση της πίεσης στην έξοδο του εκτονωτή και μεταβάλλεται μέχρι οι συνθήκες στην είσοδο του τροφοδοτικού δοχείου προσεγγίσουν ικανοποιητικά τις θεωρητικές. Και εδώ το όριο σύγκλισης είναι τα $5 Pa$.

Επειδή στο σημείο 18, λίγο πριν την είσοδο στον συμπυκνωτή, πραγματοποιείται ανάμειξη δύο ρευμάτων, πρώτα καθορίζεται το σημείο 18 και στην συνέχεια με δύο διαφορετικές επαναληπτικές διαδικασίες υπολογίζεται το ρεύμα μέχρι τον εκτονωτή και το ρεύμα μέχρι την έξοδο του ακροφυσίου.



Σχήμα 40 : Τμήμα 4: Δευτερεύον Ρεύμα Ακροφυσίου

Το δευτερεύον τμήμα του ακροφυσίου είναι αυτό που ξεκινάει μετά τον υποψύκτη, διέρχεται από τον ατμοποιητή του ψυκτικού κύκλου και καταλήγει στο ακροφύσιο. Στο τμήμα αυτό δεν χρειάζεται επαναληπτική διαδικασία, καθώς είναι γνωστό το σημείο της αφητηρίας.

Η διαστασιολόγηση του κύκλου γίνεται με εργαζόμενο μέσο: το R1233Zd. Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Παρατηρείται ότι σε όλα τα σενάρια η αναπτυσσόμενη ταχύτητα στους αγωγούς είναι εντός των ορίων των προδιαγραφών.

Αγωγός	Εσωτερική Διάμετρος [mm]	Ονομαστική Διάμετρος [mm]	Ονομαστική Διάμετρος [inch]	Αναπτυσσόμενη Ταχύτητα Ρευστού [m/sec]			
				Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
1	31.00	35.00	1 3/8	0.322	0.404	0.467	0.443
2	31.00	35.00	1 3/8	0.319	0.399	0.462	0.438
3	26.00	28.00	1 1/8	0.453	0.568	0.515	0.549

4	13.00	15.00	$\frac{9}{16}$	0.000	0.000	0.565	0.294
5	26.00	28.00	$1 \frac{1}{8}$	0.452	0.566	0.514	0.548
6	26.00	28.00	$1 \frac{1}{8}$	0.474	0.592	0.542	0.579
7	19.00	22.00	$\frac{7}{8}$	11.710	13.687	9.915	10.400
8	19.00	22.00	$\frac{7}{8}$	11.719	13.701	0.000	0.000
9	16.00	18.00	$\frac{11}{16}$	-	-	14.736	14.692
10	60.00	64.00	$2 \frac{1}{2}$	14.319	7.447	-	-
11	72.10	76.10	3	12.044	4.987	-	-
12	72.10	76.10	3	0.000	0.000	11.695	12.536
13	72.10	76.10	3	12.049	4.990	11.698	8.686
14	31.00	35.00	$1 \frac{3}{8}$	0.321	0.404	0.467	0.443
15	103.00	108.00	$4 \frac{1}{4}$	-	-	0.462	0.312
16	50.00	54.00	$2 \frac{1}{8}$	-	-	13.767	11.585
Bypass	19.00	22.00	$\frac{7}{8}$	11.710	13.687	9.915	10.400

Πίνακας 15 : Αποτελέσματα Διαστασιολόγησης Σωληνώσεων

Γενικά, ο συνδυασμένος κύκλος ORC-ECC θα λειτουργεί όποτε υπάρχει διαθέσιμη θερμική ενέργεια απευθείας μέσω του ηλιακού πεδίου ή εμμέσως από τη μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES). Επιπροσθέτως, ανάλογα με τις απαιτήσεις ψύξης ή θέρμανσης, η εγκατάσταση θα μπαίνει σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας με βάση τα σενάρια λειτουργίας που αναλύθηκαν προηγουμένως στο παρόν κείμενο.

7. Μοντελοποίηση εγκατάστασης

7.1. Τρισδιάστατη μοντελοποίηση εξαρτημάτων και βαλβίδων

Προκειμένου να κατασκευαστεί το τρισδιάστατο μοντέλο του υποσυστήματος ORC ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία :

Αρχικά, σχεδιάστηκαν μέσω του προγράμματος CAD Solidworks τα 3D μοντέλα όλων των εξαρτημάτων που αποτελούν το σύστημα ORC με βάση τα δοσμένα κατασκευαστικά σχέδια των υπό μοντελοποίηση εξαρτημάτων. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη δημιουργία μοντέλων επαρκούς ακρίβειας που αναπαριστούν πιστά τα πραγματικά εξαρτήματα και έχουν τις σωστές διαστάσεις, ώστε να μπορεί να μελετηθεί λεπτομερώς η χωροθέτηση της εγκατάστασης και να αναπαρασταθεί σωστά το συνολικό συναρμολόγημα της εγκατάστασης στο επόμενο βήμα της μοντελοποίησης.

Τα εξαρτήματα που μοντελοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον επόμενο **πίνακα 16** :

A/A	Εξάρτημα	Εταιρία Κατασκευής	Μοντέλο
1	Τροφοδοτικό δοχείο	Bitzer	FS202
2	Υποψύκτης	ALFA LU-VE	AGSE351.2CSH/V
3	Αντλία	Wanner International	G10XRNPHECA Τριπλού διαφράγματος
4	Φίλτρο	Danfoss	DCL 167s 023Z5034
5	Παροχόμετρο Coriolis (1)	Krohne	S10
6	Ανακομιστής	ALFA LU-VE	ACH220EQ-86AM-F
7	Ατμοποιητής ORC	CADE	i0029
8	Ελαιοδιαχωριστής	ESK Schultze	OS-54FH 2-1/8
9	Παροχόμετρο Coriolis (2)	Krohne	S08
10	Εκτονωτής (1)	Bitzer	OSN5361-K
11	Εκτονωτής (2)	Bitzer	OSK5361-K
12	Ψυγείο λαδιού	Raal	RU 53235-0

13	Παροχόμετρο λαδιού Coriolis	Krohne	S15
14	Ακροφύσιο συμπίεσης	Ε.Μ.Π	-
15	Ατμοποιητής ECC	ALFA LU-VE	AC220EQ-94AM-F
16	Συμπυκνωτής	ALFA LU-VE	CB112-68AM
17	Προθερμαντήρας ORC	CADE	i0029
18	Πίνακας Ελέγχου	-	-
19	Αεροσυμπιεστής	Toros	150Lt 3Hp 230V/50Hz 602039

Πίνακας 16 : Εξαρτήματα που μοντελοποιήθηκαν

Για τον έλεγχο της λειτουργίας της εγκατάστασης τοποθετούνται οι παρακάτω βαλβίδες στα υποσυστήματα ORC και ECC:

A/A	Είδος Βαλβίδας	Θέση Βαλβίδας	Διατομή Σωλήνα (ίντσες)	Τεμάχια	Μοντέλο	Λοιπά Εξαρτήματα
1		Μετά τον ατμοποιητή του ORC	"7/8"	1	6570N/9	-
2		Γύρω από τον ελαιοδιαχωριστή	"7/8"	3	6570N/9	-
3		Πριν την αντλία	"1 1/8"	1	6570N/9	-
4		Γύρω από το φίλτρο	"1 1/8"	3	6570N/9	-
5		Μετά τον ανακομιστή	"1 1/8"	1	6570N/9	-
6		Μετά τον συμπυκνωτή	"1 3/8"	1	6570N/9	-
7		Μετά το τροφοδοτικό	"1 3/8"	1	6570N/9	-

	Απλή Σφαιρική βαλβίδα	δοχείο				
8		Μετά τον υποψύκτη	"1 3/8"	1	6570N/9	-
9		Μετά τον ατμοποιητή του ECC	"2 1/8"	1	6570N/11	-
10		Μετά τους εκτονωτές	"3 1/8"	1	6570N/17	-
11		Πριν τον συμπυκνωτή	"3 1/8"	1	6570N/17	-
12	Σφαιρική Βαλβίδα με κινητήρα	Πριν τον κάθε εκτονωτή	"7/8"	2	6570N/9	Κινητήρας 9700/RA6 και αντάπτορας 9901/Χ57 τηςCastel
13		Πριν το ακροφύσιο συμπίεσης	"7/8"	1	6570N/9	Κινητήρας 9700/RA6 και αντάπτορας 9901/Χ57 τηςCastel
14		Στη σωλήνωση παράκαμψης του ανακομιστή	"3 1/8"	1	6570N/17	Κινητήρας 9730/RA6 και αντάπτορας 9901/Χ76 τηςCastel
15		Σωλήνωση λαδιού πριν τους εκτονωτές	"1/2"	2	6570N/4	Κινητήρας 9700/RA2 και αντάπτορας 9901/Χ58 τηςCastel
17		Check Valve	Μετά τον ελαιοδιαχωριστή	"7/8"	1	3145W/25
18	Εκτονωτική βαλβίδα	Μετά τον ατμοποιητή ECC	"2 1/8"	1	Danfoss ETS Colibri 12C-12	-

	και ελεγκτής				+ Controller Danfoss EKE 1C	
19	Ρυθμιστική Βαλβίδα	Στη σωλήνωση λαδιού μετά το Παροχόμετρο Coriolis	"1/2"	1	Emerson EX5-U21 16mm x 22mm	-
20	Πνευματική Βαλβίδα (PV)	Στη σωλήνωση παράκαμψης του συμπυκνωτή ECC	"7/8"	1	S&S 7010 On-OFF	-

Πίνακας 17 : Βαλβίδες στα υποσυστήματα ORC και ECC

7.1.1. Εναλλάκτες θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συσκευές μεταφοράς θερμικής ενέργειας μεταξύ δύο ρευστών που έχουν διαφορετική θερμοκρασία και κατηγοριοποιούνται ως εξής :

- 1) Εναλλάκτες άμεσης επαφής
- 2) Εναλλάκτες έμμεσης επαφής

Στους εναλλάκτες άμεσης επαφής τα δύο ρευστά βρίσκονται σε διαφορετική φάση έρχονται σε επαφή, η θερμότητα μεταφέρεται από το ένα στο άλλο και έπειτα διαχωρίζονται ξανά. Αντιθέτως, στους εναλλάκτες έμμεσης επαφής τα δύο ρευστά δεν αναμειγνύονται και η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται μέσω μιας διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ των δύο. Η θερμική ενέργεια μεταφέρεται δια συναγωγής ανάμεσα στο ρευστό και την διαχωριστική επιφάνεια και δια αγωγής στον όγκο της επιφάνειας.

Ανάλογα με την γεωμετρία και τον τρόπο κατασκευής, οι εναλλάκτες διαχωρίζονται περαιτέρω σε πλακοειδής (plate heat exchangers) και εναλλάκτες κελύφους σωλήνων (shell and tube heat exchangers). Οι πλακοειδής εναλλάκτες χωρίζονται επίσης σε συγκολλητούς εναλλάκτες (brazed plate heat exchangers) και σε εναλλάκτες με φλάντζα (gasketed plate heat exchangers), ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των πλακών τους.

Στην υπό σχεδίαση διάταξη υπάρχουν οι εξής εναλλάκτες θερμότητας :

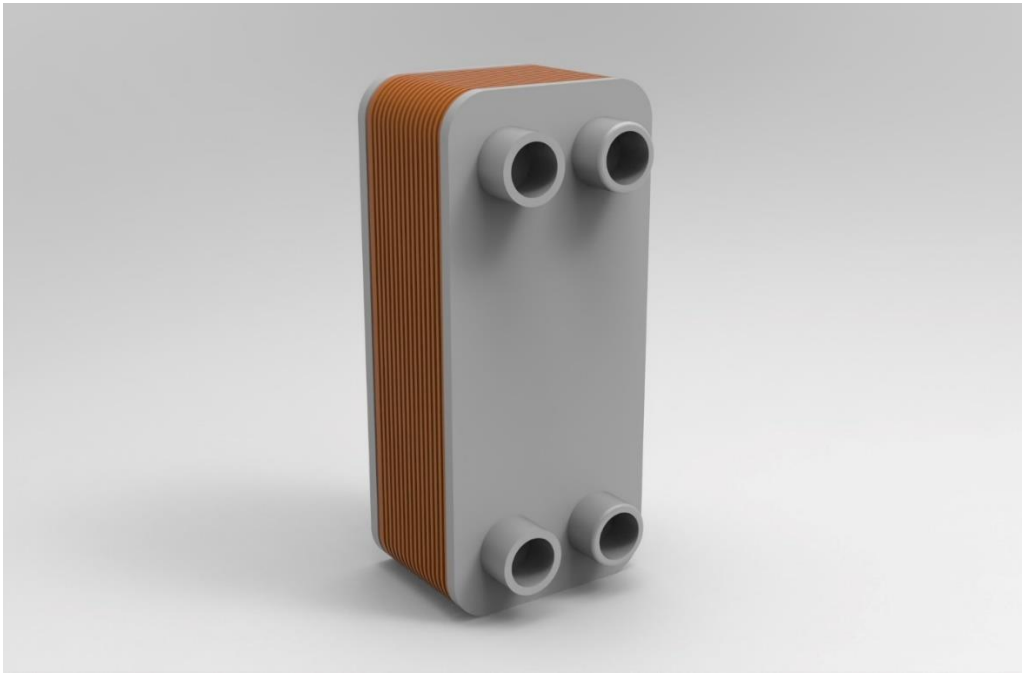
- 1) Ανακομιστής (brazed PHE)
- 2) Συμπυκνωτής (brazed PHE)
- 3) Ατμοποιητής (brazed PHE)

- 4) Υποψύκτης
- 5) Ψυγείο λαδιού
- 6) Προθερμαντής ORC (Shell-tube heat exchanger)
- 7) Ατμοποιητής ORC (Shell-tube heat exchanger)

Με βάση τα κατασκευαστικά σχέδια των παραπάνω εξαρτημάτων παράχθηκαν τα ακόλουθα μοντέλα για τους εναλλάκτες του συστήματος ORC-ECC.



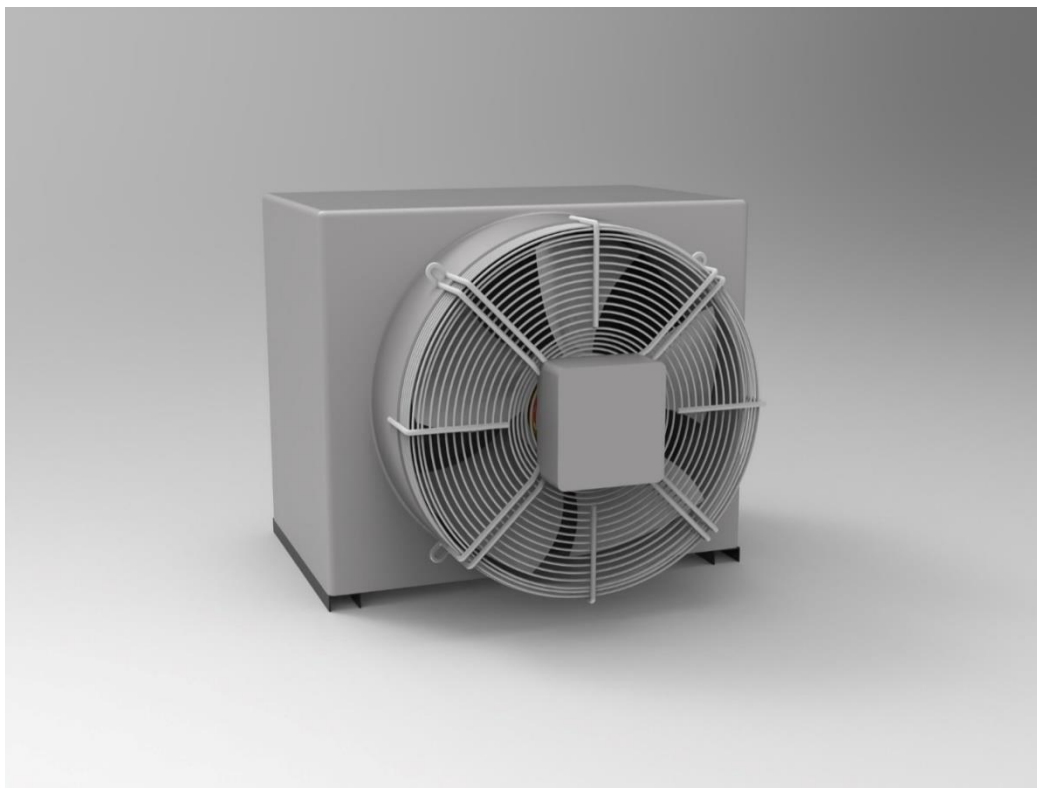
Σχήμα 41 : Συμπυκνωτής (condenser)



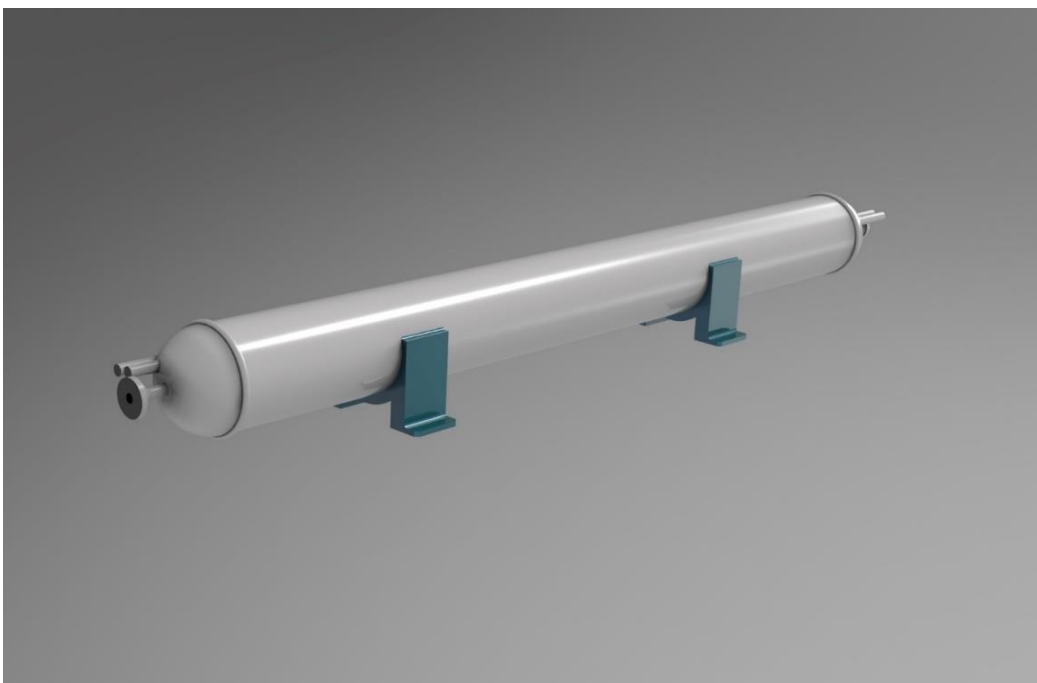
Σχήμα 42 : ατμοποιητής ECC (evaporator)



Σχήμα 13 : Ανακομιστής (recuperator)



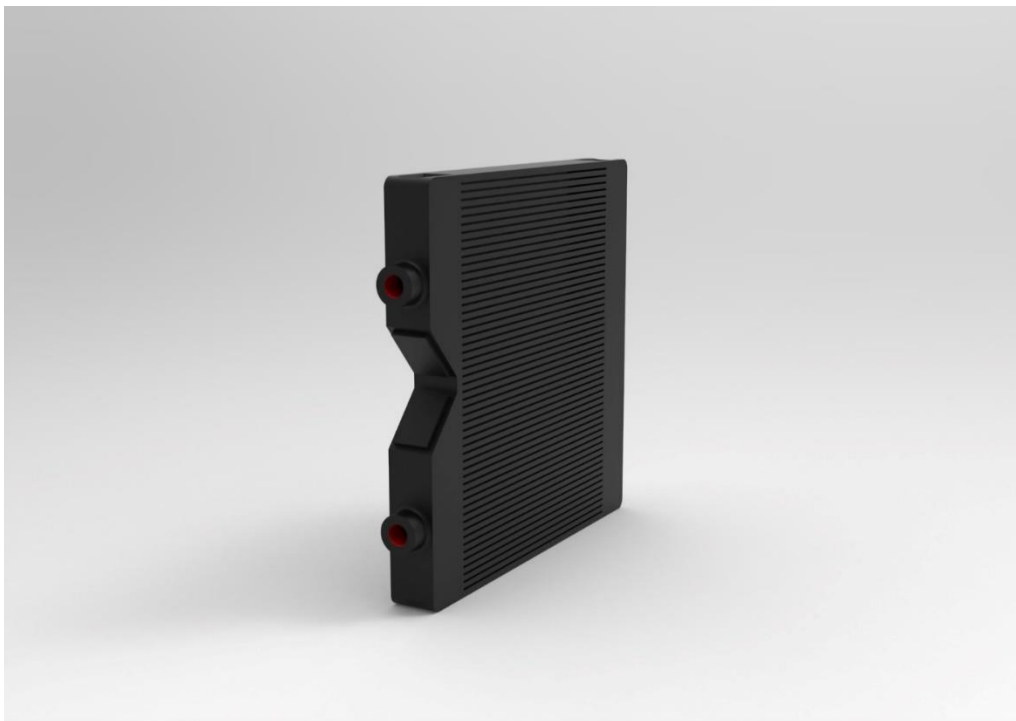
Σχήμα 44 : Υποψύκτης (subcooler)



Σχήμα 45 : προθερμαντής ORC (preheater)



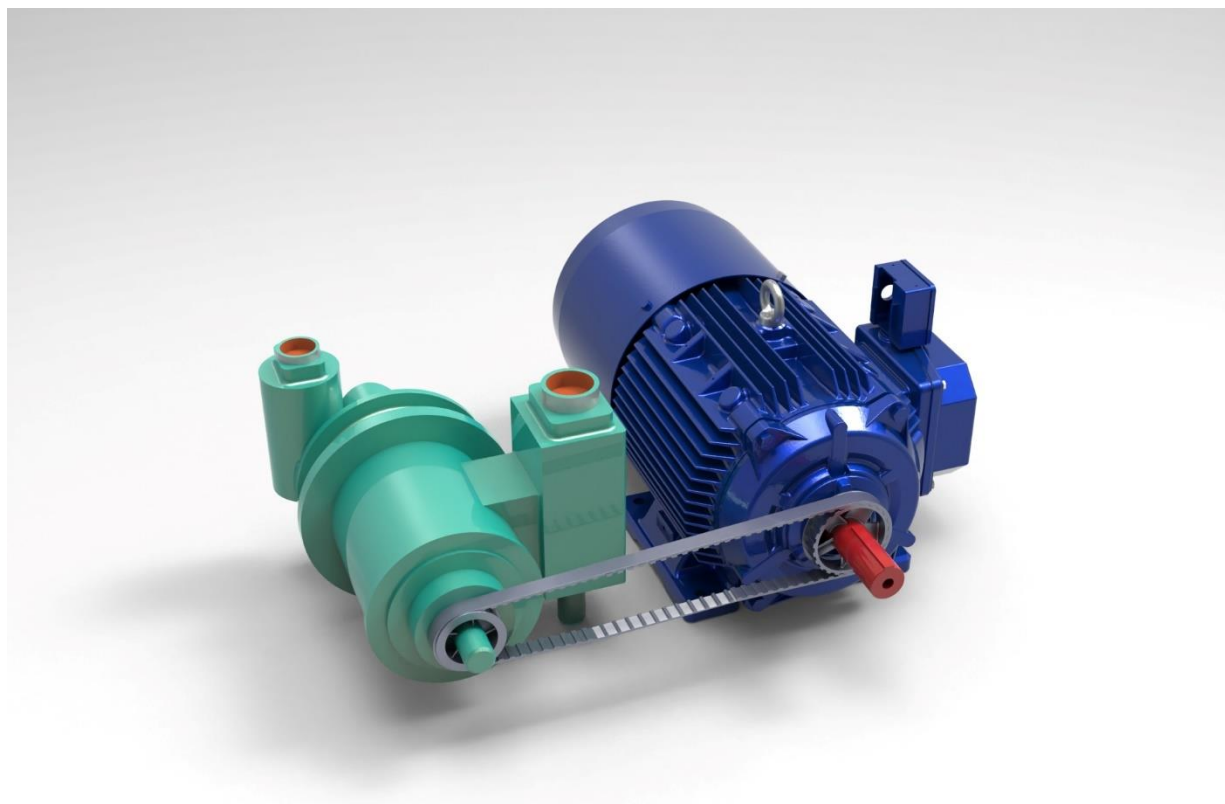
Σχήμα 46 : ατμοποιητής ORC (evaporator – shell/tube type)



Σχήμα 42 : ψυγείο λαδιού (oil cooler)

7.1.2. Εκτονωτές σε σύνδεση με γεννήτριες A/C

Στη συνέχεια μοντελοποιήθηκε η διάταξη των δύο περιστροφικών εκτονωτών με δίδυμους κοχλίες (screw expander) μαζί με την μηχανική σύνδεση μέσω ιμάντα με τις γεννήτριες επαγωγικού τύπου, εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 48 : Διάταξη εκτονωτή-γεννήτριας

Κατόπιν σχεδιάστηκε ένα πλαίσιο από προφίλ αλουμινίου για τη στήριξη των εκτονωτών. Οι δύο εκτονωτές μαζί με τις γεννήτριες με τις οποίες συνδέονται βρίσκονται σε 2 επίπεδα σε διαφορετικό ύψος από το πάτωμα του εμπορευματοκιβωτίου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 49**

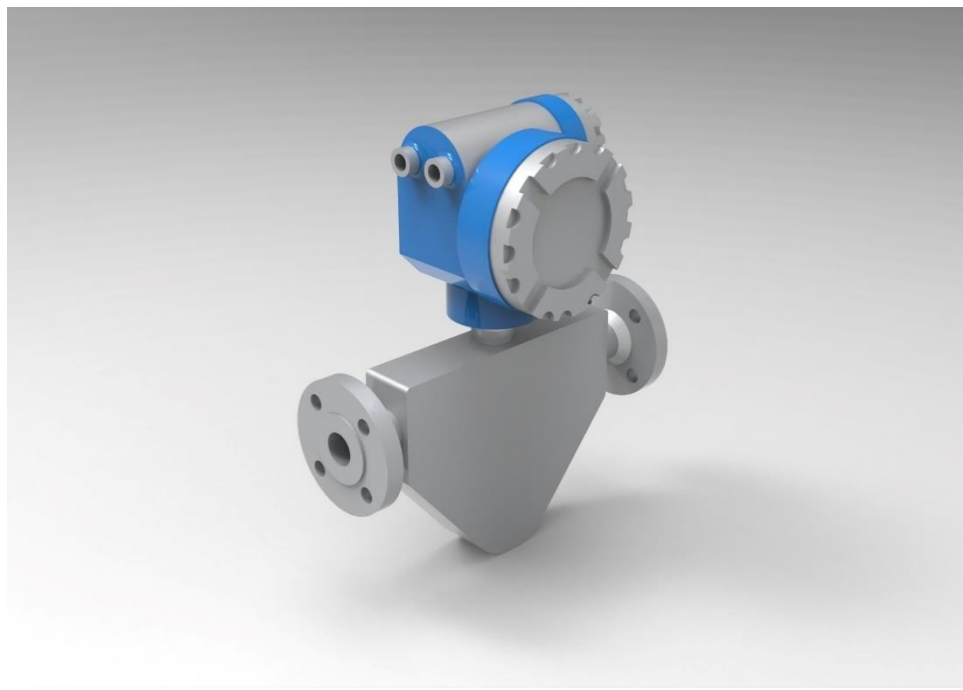


Σχήμα 49 : Υποσύστημα δύο εκτονωτών-γεννητριών με πλαίσιο στήριξης

7.1.3. Παροχόμετρα τύπου Coriolis

Τα παροχόμετρα είναι όργανα μέτρησης της παροχής μάζας διαμέσου μιας σωλήνωσης, καθώς και της πυκνότητας του εργαζόμενου μέσου. Συγκεκριμένα, τα παροχόμετρα τύπου Coriolis που χρησιμοποιούνται στην υπό μελέτη εγκατάσταση λειτουργούν με βάση τις αρχές της ρευστομηχανικής. Η ροή εισέρχεται στο μετρητικό όργανο και χωρίζεται στα δύο. Ένα πηνίο εξαναγκάζει τους δύο αγωγούς να ταλαντωθούν στη φυσική συχνότητα τους. Η κίνηση των αγωγών επάγει ένα ημιτονοειδές σήμα τάσης για κάθε αγωγό σε αισθητήρες. Λόγω των δυνάμεων Coriolis που εμφανίζονται στους δύο αγωγούς καθώς το ρευστό διέρχεται από αυτούς, τα δύο σήματα τάσης εμφανίζουν μια διαφορά φάσης, ανάλογη της παροχής μάζας της ροής. Η συχνότητα των σημάτων είναι ανάλογη της πυκνότητας του ρευστού.

Η διάταξη συμπαραγωγής ORC-ECC διαθέτει δύο παροχόμετρα ψυκτικού και ένα παροχόμετρο ελαίου. Τα τρισδιάστατα μοντέλα τους παρουσιάζονται στο **Σχήμα 50** και στο **Σχήμα 51** αντιστοίχως.



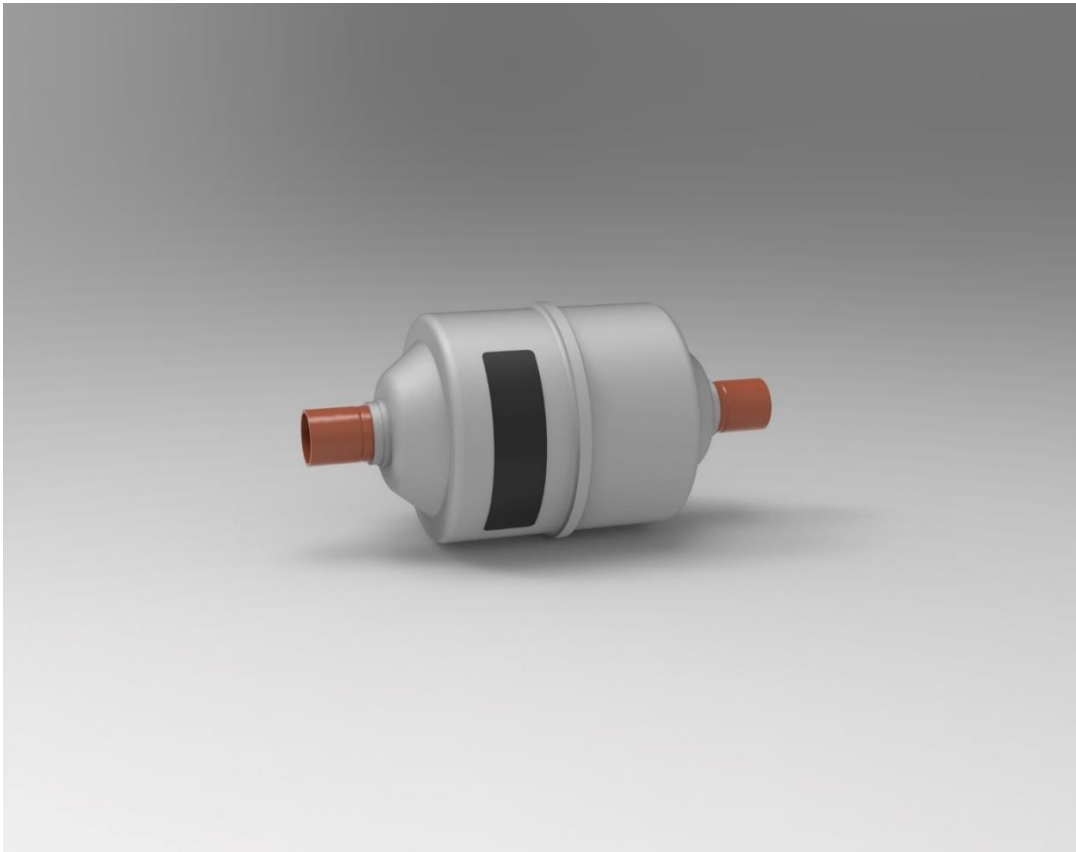
Σχήμα 50 : S08-S10 παροχόμετρα τύπου Coriolis



Σχήμα 51 : S15 παροχόμετρο ελαίου τύπου Coriolis

7.1.4. Φίλτρο

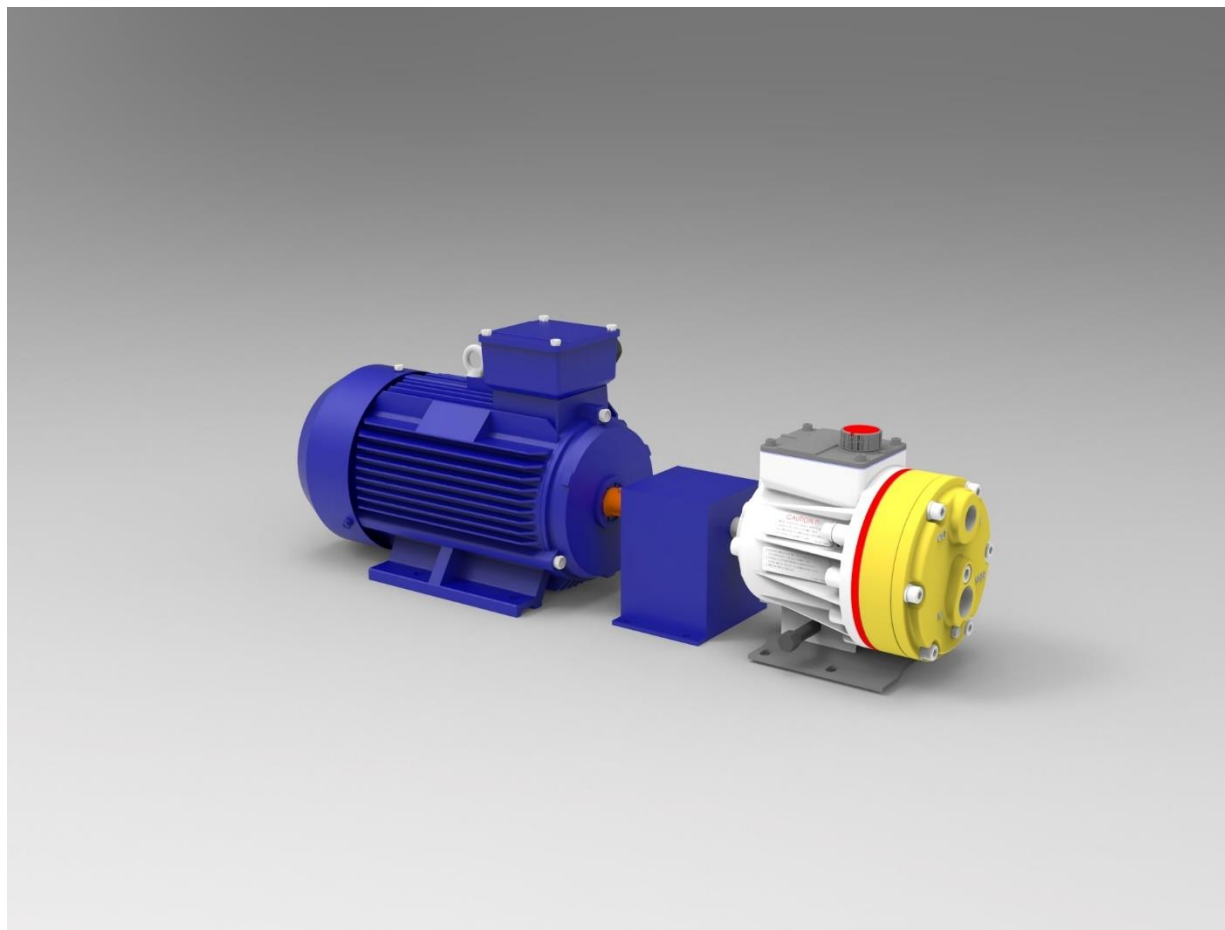
Η χρήση φίλτρου είναι απαραίτητη για την προστασία του συστήματος. Ο ρόλος του είναι να συγκρατεί τυχόν στερεά σωματίδια που παρασέρνει το οργανικό μέσο από το όλο σύστημα και να προστατεύει έτσι την αντλία καθώς και τον υποψύκτη από την μηχανική διάβρωση και την φραγή της ροής. Επιπλέον συγκρατεί ενδεχόμενη υγρασία που έχει εισέλθει στο εσωτερικό του συστήματος κατά την τοποθέτηση των επιμέρους εξαρτημάτων. Αυτή η υγρασία αν παρέμενε στην κυκλοφορία του συστήματος θα καθιστούσε πολύ διαβρωτικό το οργανικό μέσο δημιουργώντας έτσι φθορές. Για την εκλογή του μελετώνται οι συνθήκες λειτουργίας στο σημείο που αυτό θα τοποθετηθεί και κρίνεται ποιος τύπος φίλτρου καλύπτει το εύρος αυτό λειτουργίας. Το τύπο του φίλτρου καθορίζει επίσης και το οργανικό μέσο που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση.



Σχήμα 52 : Φίλτρο εγκατάστασης

7.1.5. Διάταξη αντλίας-ηλεκτροκινητήρα

Η τοποθέτηση της αντλίας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη σωστή λειτουργία του συστήματος. Προς αποφυγή του φαινομένου σπηλαίωσης, η διάταξη της αντλίας μαζί με τον ομοαξονικό σύνδεσμο (κόμπλερ) και τον ηλεκτροκινητήρα που την κινεί τοποθετείται στο χαμηλότερο επίπεδο της εγκατάστασης, στο πάτωμα του εμπορευματοκιβωτίου με επαρκή υψομετρική διαφορά με τον υποψύκτη στην πλευρά υποπίεσης.



Σχήμα 53: Διάταξη αντλίας-κόμπλερ-ηλεκτροκινητήρα

7.1.6. Λοιπά εξαρτήματα

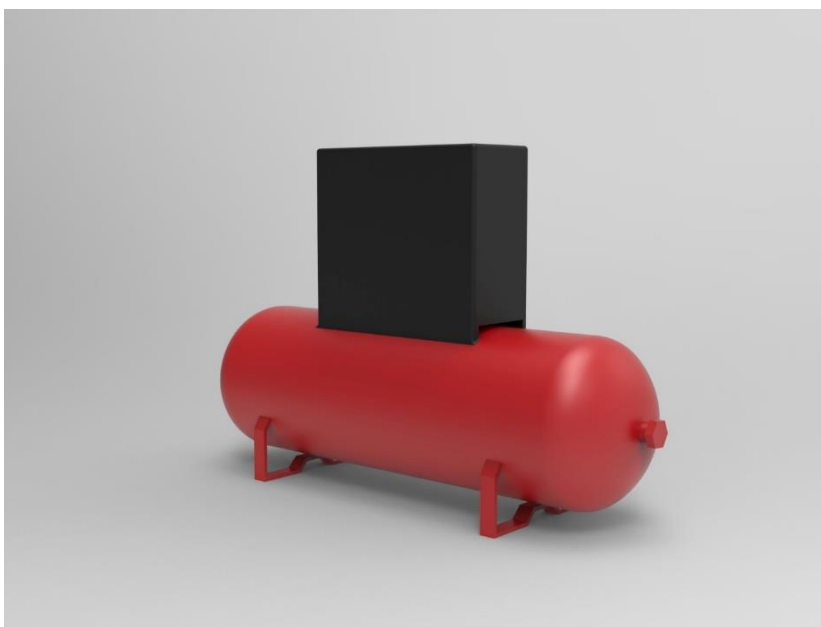
Εν συνεχεία, σχεδιάστηκαν τα μοντέλα του ελαιοδιαχωριστή, των απαραίτητων βαλβίδων και του αεροσυμπιεστή της εγκατάστασης.



Σχήμα 54 : Ελαιοδιαχωριστής



Σχήμα 55 : Ακροφύσιο συμπίεσης



Σχήμα 56 : Αεροσυμπιεστής



Σχήμα 57 : 4 τύποι βαλβίδων

Με βάση ηλεκτρολογικούς πίνακες ελέγχου που υπάρχουν σε διατάξεις παρόμοιου μεγέθους στο εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων του ΕΜΠ, σχεδιάστηκε ο ακόλουθος πίνακας ελέγχου που θα τοποθετηθεί στην είσοδο του container, σε θέση όπου είναι εύκολη η πρόσβαση σε αυτόν.

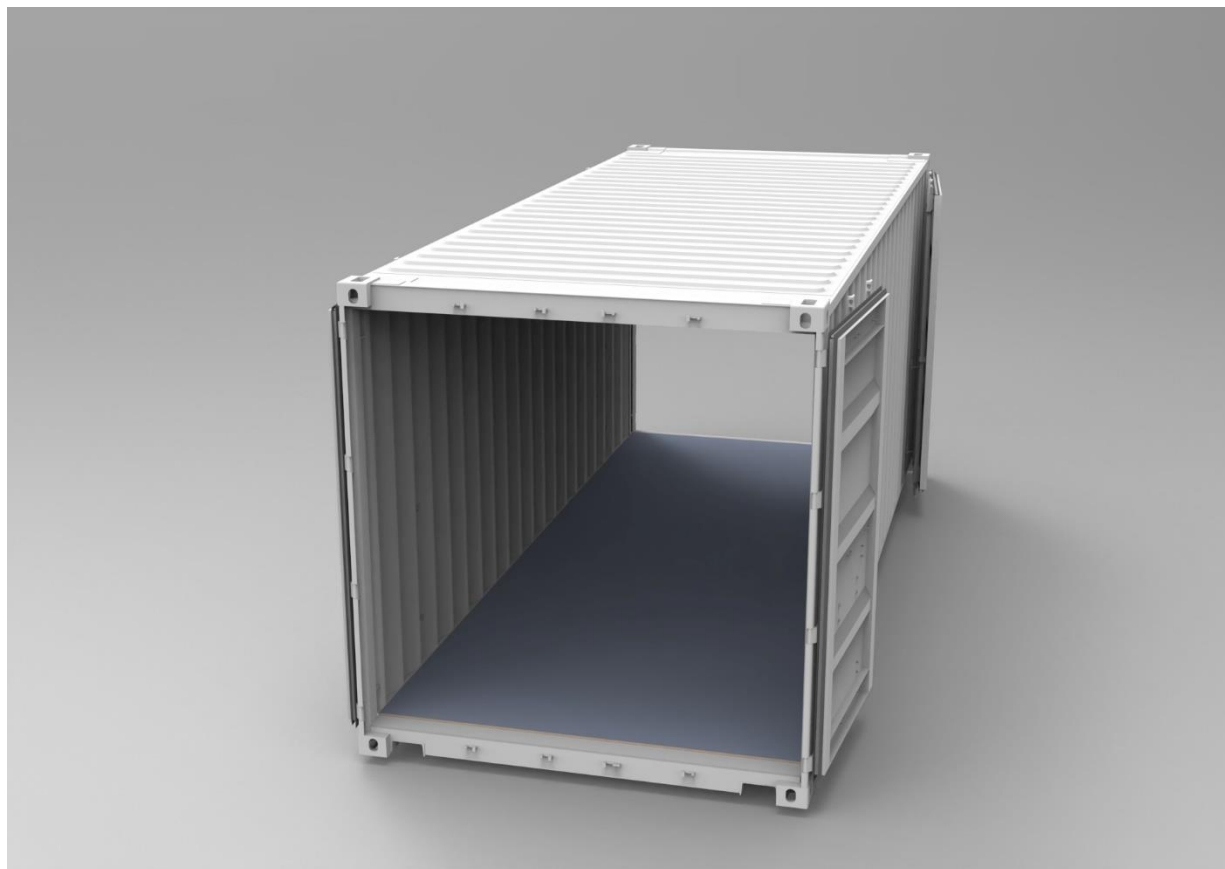


Σχήμα 58 : Πίνακας ελέγχου

Μετά τη μοντελοποίηση όλων των εξαρτημάτων, των μετρητικών και των βαλβίδων της διάταξης σχεδιάστηκε ένα εμπορευματοκιβώτιου με βάση το πρότυπο ISO. Οι διαστάσεις του είναι οι εξής :

- Μήκος : 6,06 m
- Πλάτος : 2,43 m
- Ύψος : 2,59 m

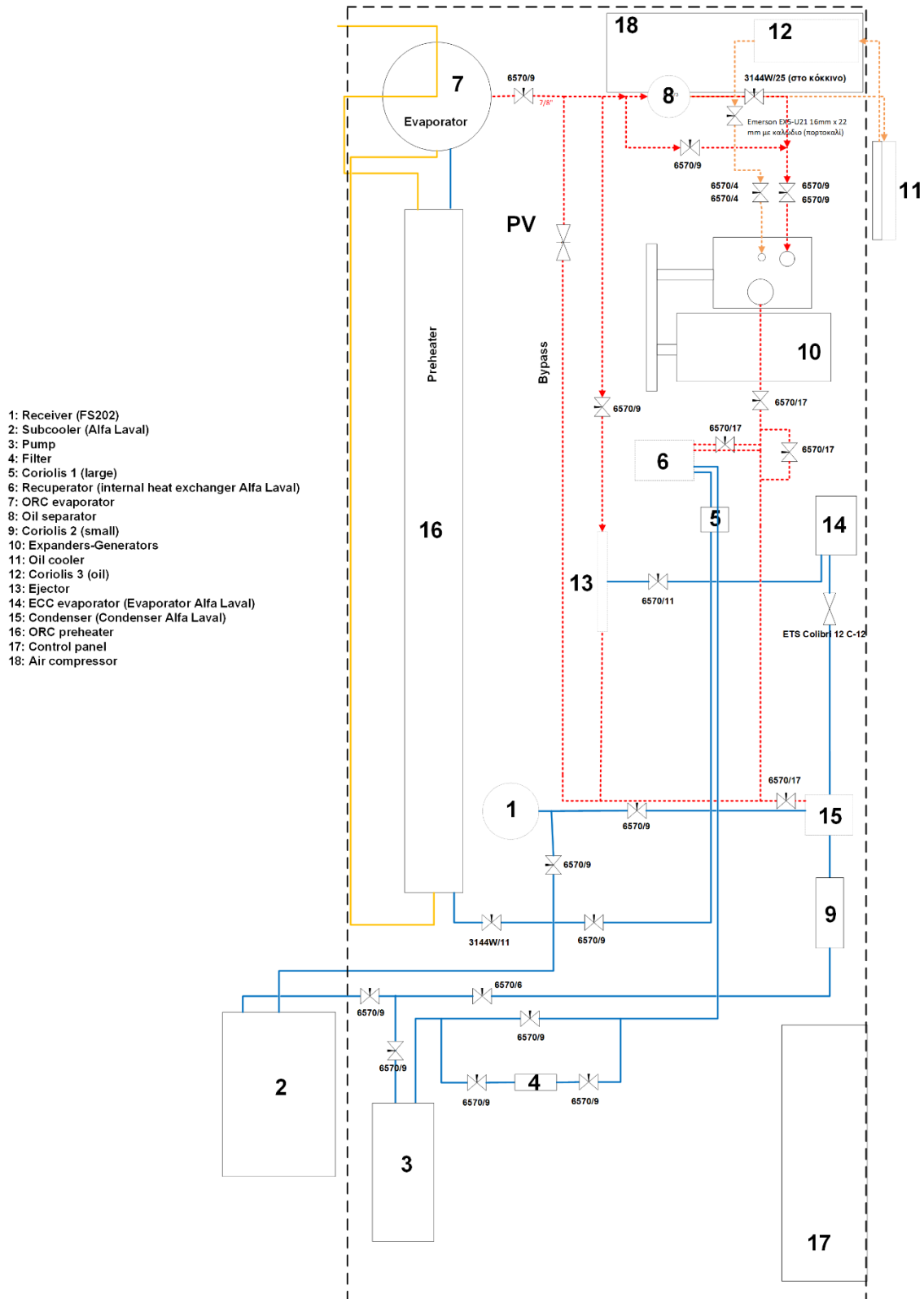
Το container είναι κατασκευασμένο από χαλύβδινες λαμαρίνες COR-TEN.



Σχήμα 59 : Εμπορευματοκιβώτιο πρότυπου ISO, για την τοποθέτηση του συστήματος ORC-ECC

7.2. Σχεδίαση του συνολικού συναρμολογήματος

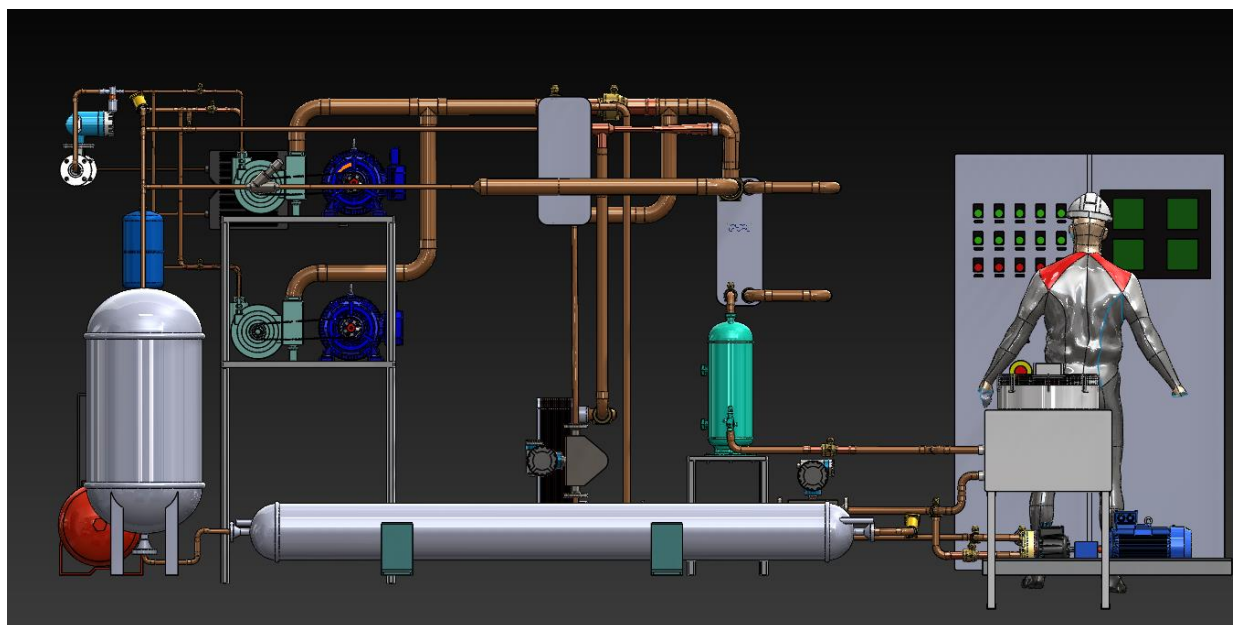
Για να υλοποιηθεί σωστά η χωροθέτηση των εξαρτημάτων στο εμπορευματοκιβώτιο, παράχθηκε αρχικά ένα σχέδιο της κάτοψης της εγκατάστασης (P&ID), που συμπεριλάμβανε όλα τα εξαρτήματα, μαζί με τις σωληνώσεις, τα μετρητικά όργανα και τις βαλβίδες και παρουσιάζεται στο **Σχήμα 60**. Με οδηγό το σχέδιο κάτοψης του συστήματος, ξεκίνησε η διαδικασία παραγωγής του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου ολόκληρου του συναρμολογήματος.



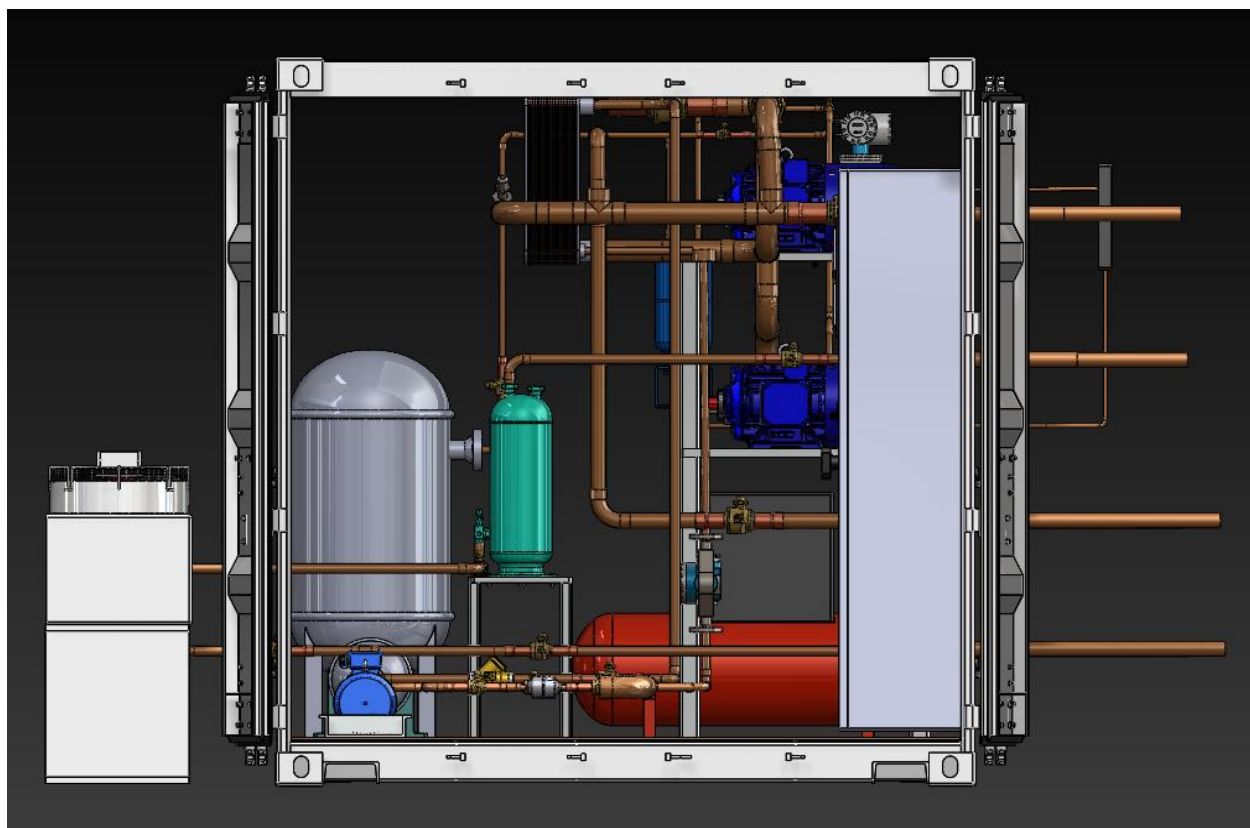
Σχήμα 60 : Σχέδιο κάτοψης του συστήματος ORC-ECC

Όλα τα εξαρτήματα εισήχθησαν σε ένα αρχείο τύπου assembly στο Solidworks. Αφού, τα εξαρτήματα τοποθετήθηκαν στη σωστή θέση εντός του container με βάση το μονογραμμικό σχέδιο σε κάτοψη της εγκατάστασης, έγινε χρήση της βιβλιοθήκης routing & riripng σε περιβάλλον Solidworks, έτσι ώστε να τοποθετηθούν οι σωληνώσεις, τα μετρητικά και οι βαλβίδες στις κατάλληλες θέσεις. Ιδιαίτερη προσοχή δώθηκε στο ύψος της αντλίας σε σχέση με το τροφοδοτικό δοχείο προς αποφυγή του φαινομένου της σπηλαιώσης. Μετά από αρκετές δοκιμές και τροποποιήσεις στη θέση των εξαρτημάτων, σχεδιάστηκε το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο της εγκατάστασης. Επιπροσθέτως, για την κατανόηση των σχετικών μεγεθών τοποθετήθηκε στο συναρμολόγημα ένα μοντέλο ενός τυπικού εργάτη ύψους 1,80m.

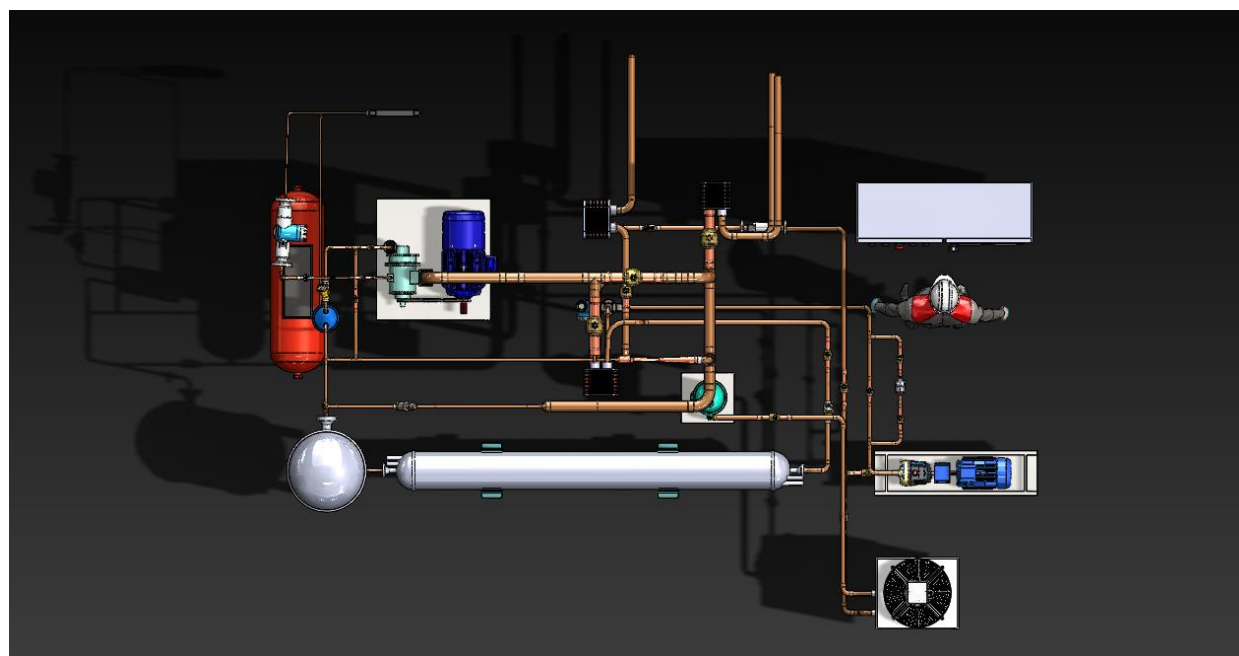
Το τελικό συναρμολόγημα απεικονίζεται στα ακόλουθα σχήματα :



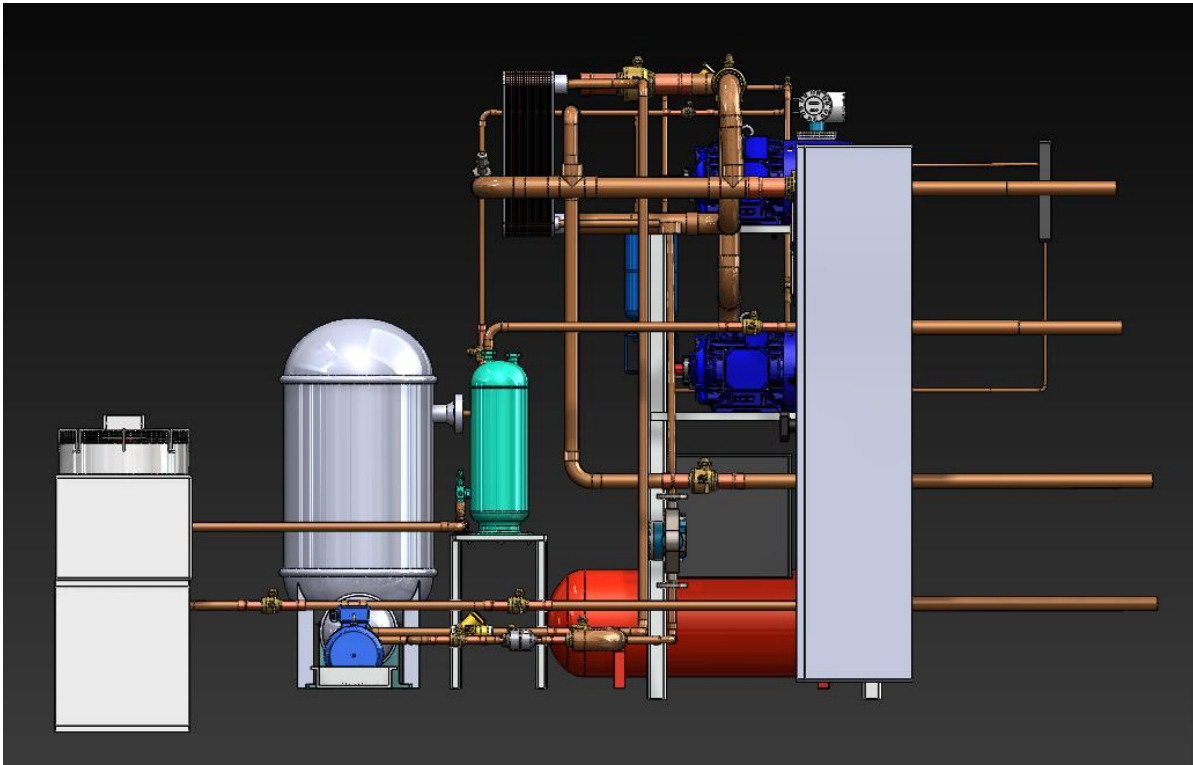
Σχήμα 61 : Αριστερή πλάγια όψη της εγκατάστασης



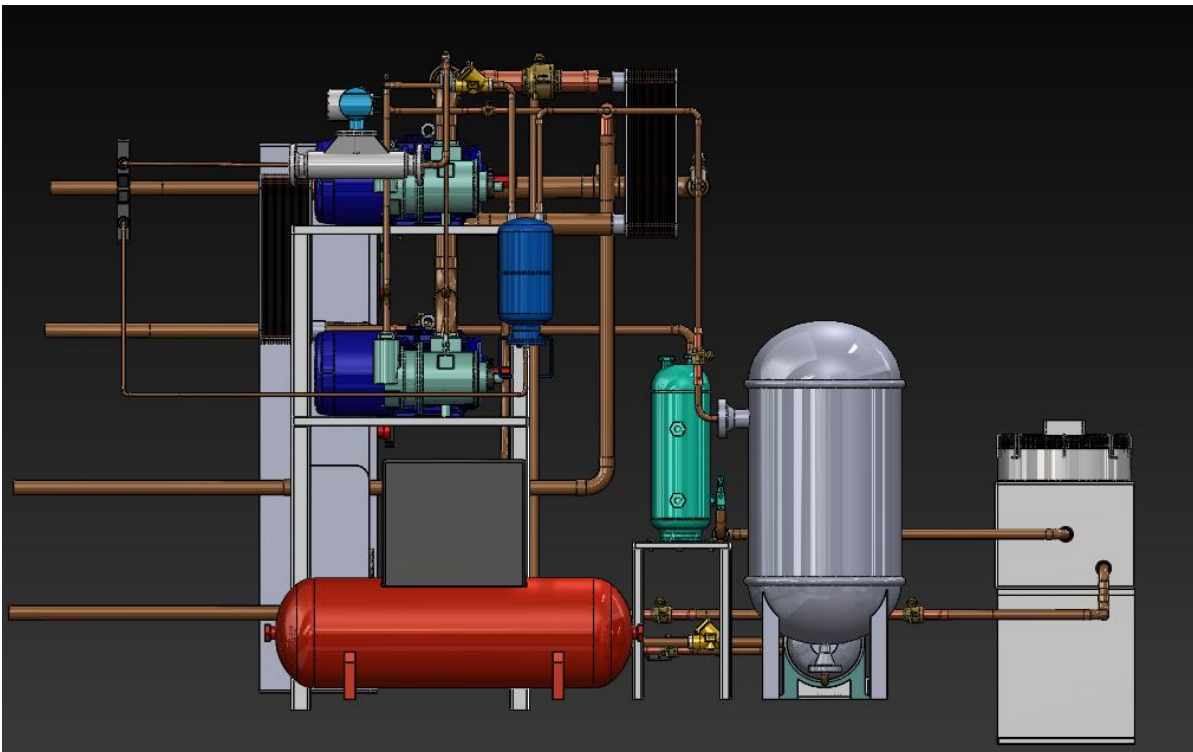
Σχήμα 62 : Πρόσοψη της εγκατάστασης μαζί με το container



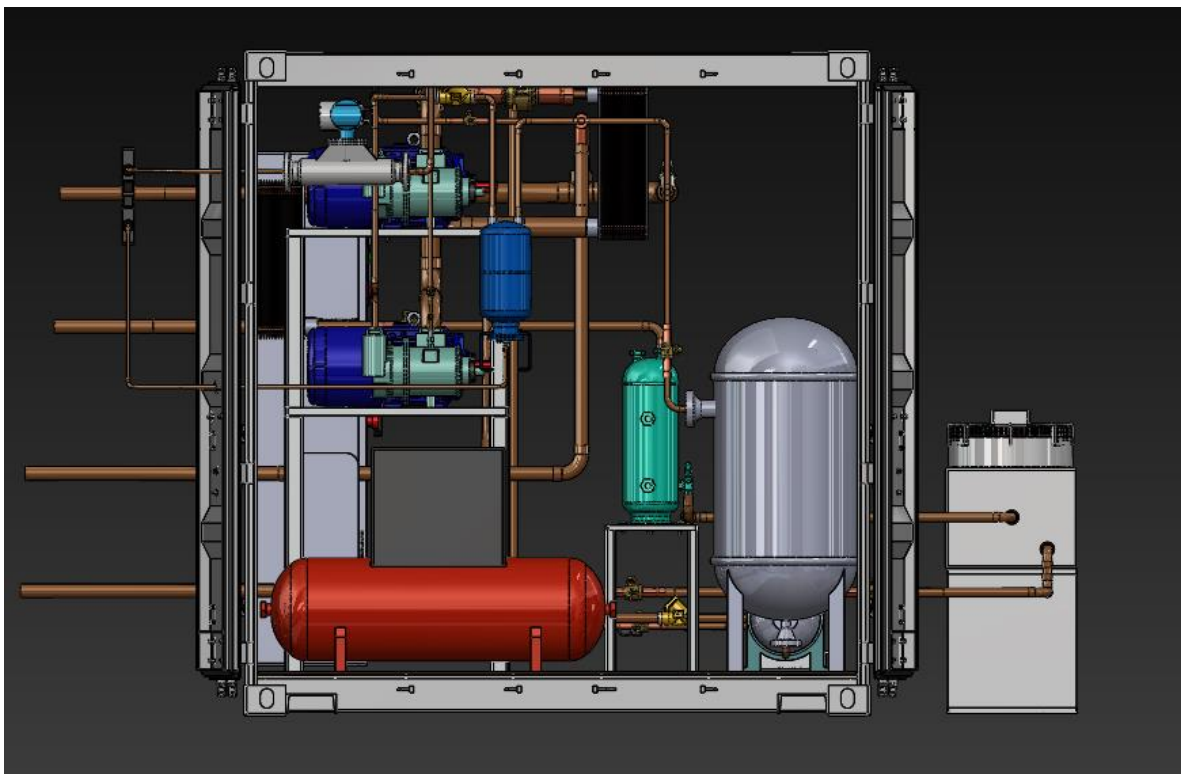
Σχήμα 63 : Κάτοψη της εγκατάστασης



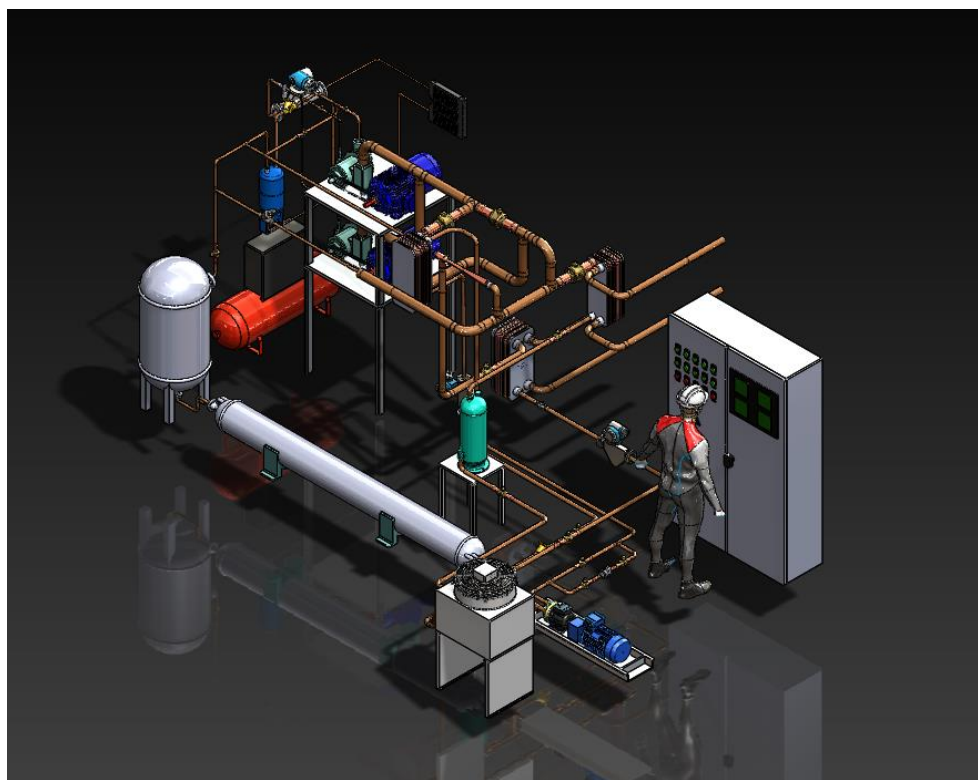
Σχήμα 64 : Πρόοψη της εγκατάστασης



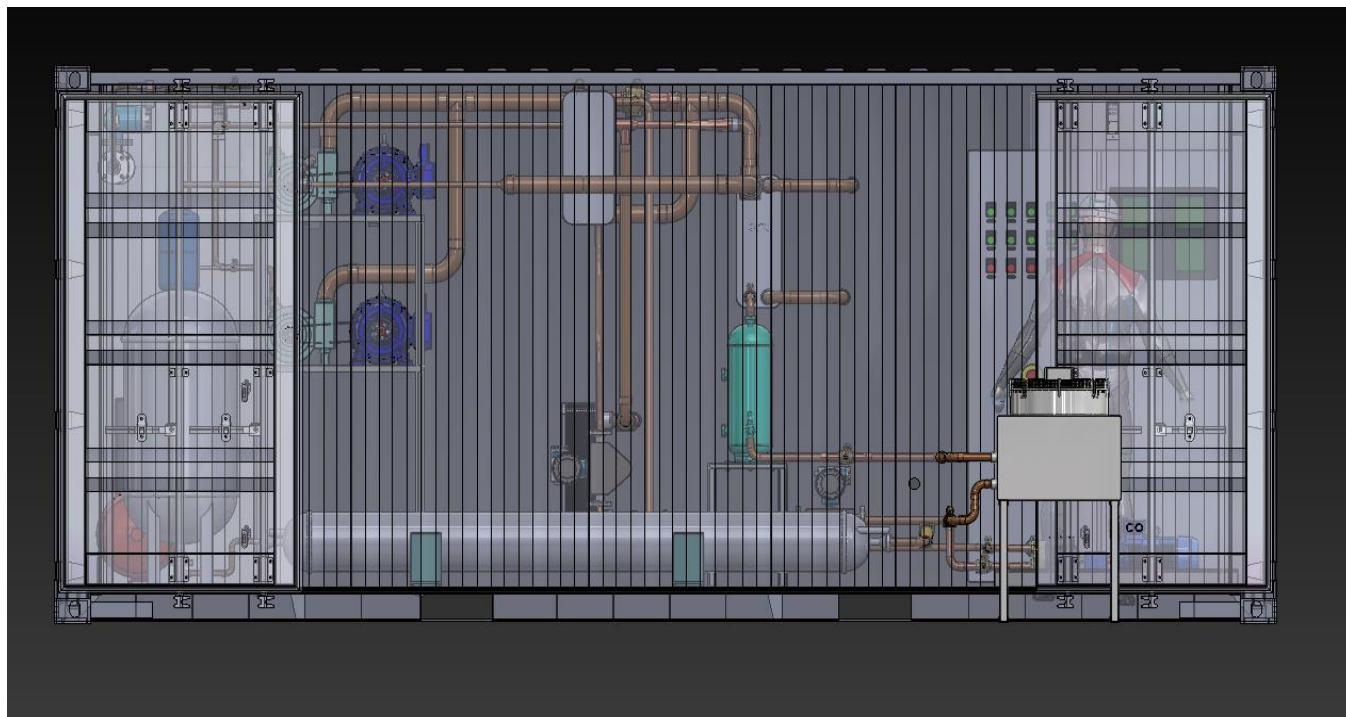
Σχήμα 65 : Πίσω όψη της εγκατάστασης



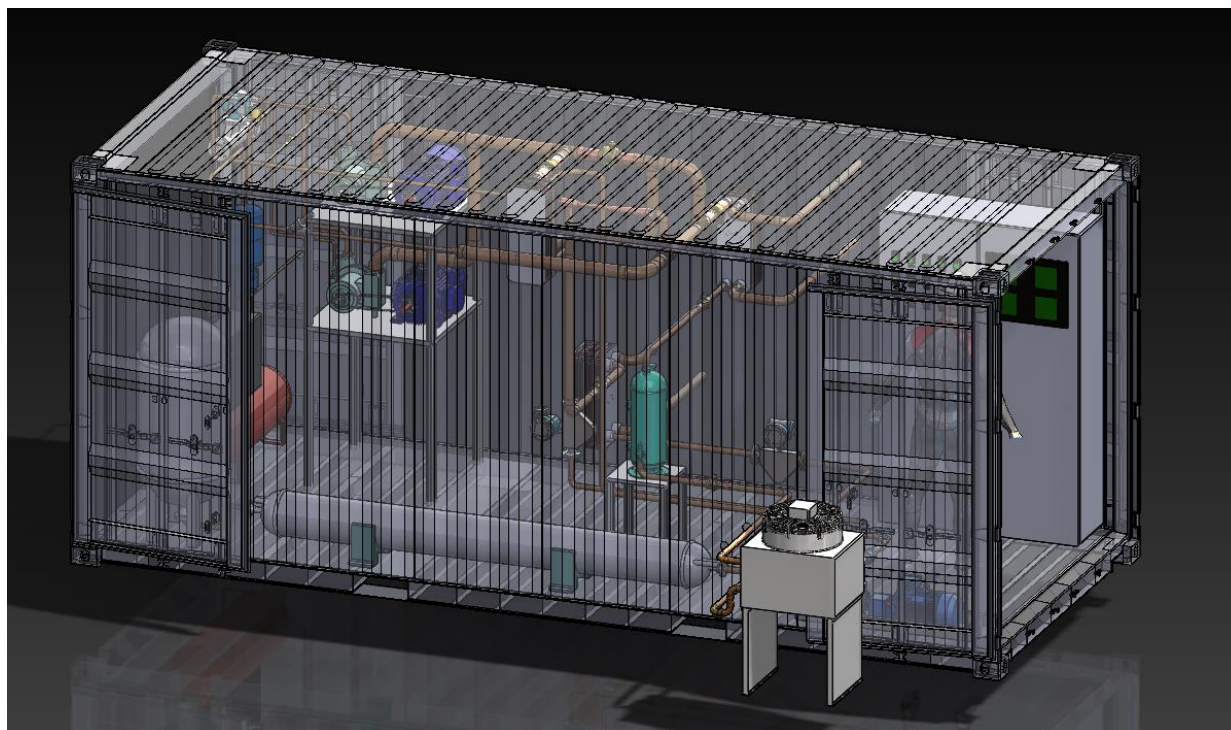
Σχήμα 66 : Πίσω όψη της εγκατάστασης μαζί με το container



Σχήμα 67 : Ισομετρική προβολή της εγκατάστασης



Σχήμα 68 : Αριστερή όψη της εγκατάστασης μαζί με το container

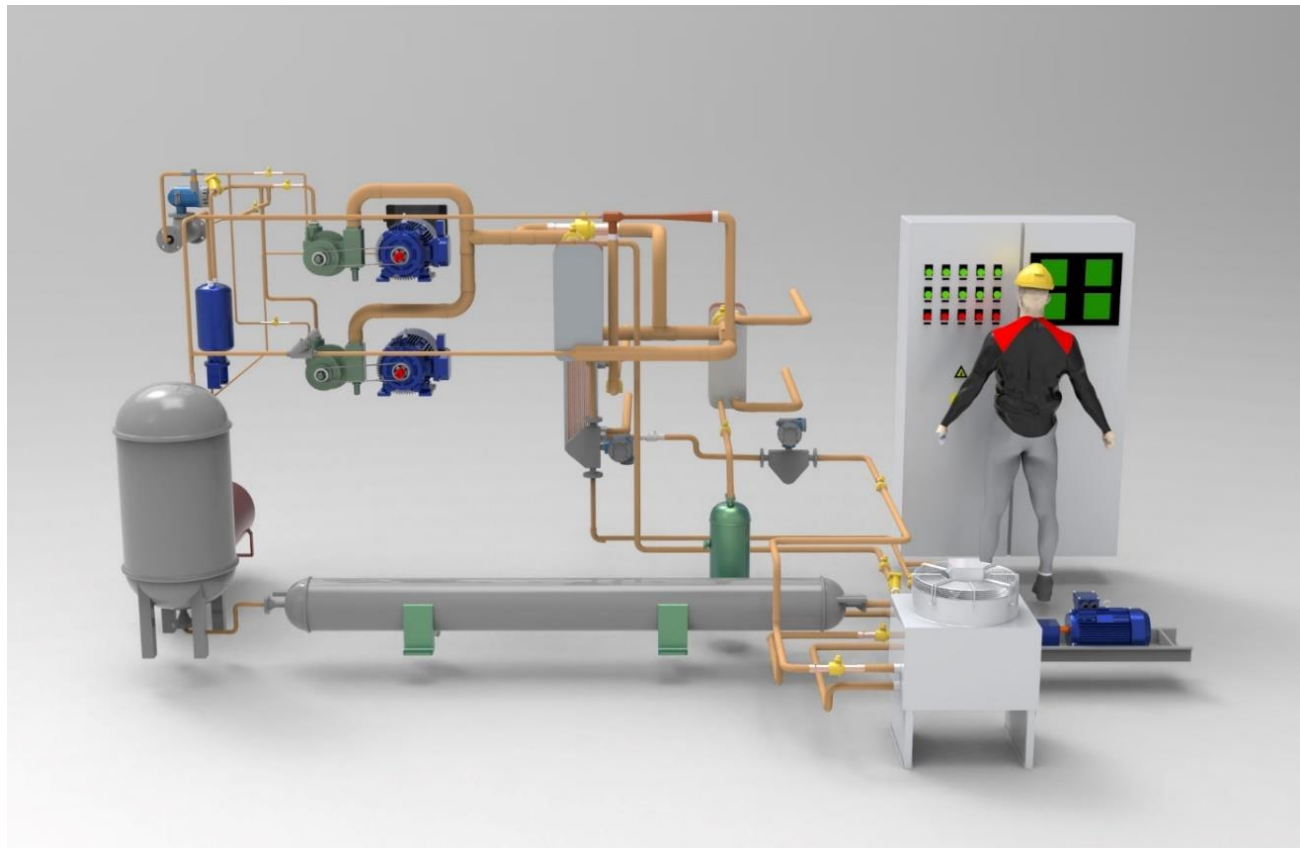


Σχήμα 69 : Προβολή της εγκατάστασης υπό γωνία μαζί με το container



Σχήμα 70 : Κάτοψη της εγκατάστασης μαζί με το container

Τέλος για την καλύτερη παρουσίαση του συναρμολογήματος παράχθηκε το συνολικό φωτορεαλιστικό μοντέλο της εγκατάστασης μέσω του προγράμματος Keyshot.



Σχήμα 71 : Αριστερή όψη φωτορεαλιστικού μοντέλου της εγκατάστασης



Σχήμα 72 : Ισομετρική όψη φωτορεαλιστικού μοντέλου της εγκατάστασης



Σχήμα 73 : Πρόοψη φωτορεαλιστικού μοντέλου μαζί με το container

8. Συμπεράσματα

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε ο σχεδιασμός ενός συστήματος τριπαραγωγής ενέργειας με βάση τον Οργανικό κύκλο Rankine (ORC) και τον Κύκλο Ψύξης Ακροφυσίου (ECC). Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε το μονογραμμικό σχέδιο του συστήματος συμπαραγωγής ORC-ECC, διαστασιολογήθηκαν οι βαλβίδες και οι αγωγοί του συστήματος και παράχθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο της εγκατάστασης. Με την ολοκλήρωση του μοντέλου της εγκατάστασης και της διαδικασίας σχεδιασμού, πραγματοποιήθηκε η χωροθέτηση του συστήματος εντός ενός τυπικού container και επιβεβαιώθηκε η χωρική επάρκεια για την τοποθέτηση του συναρμολογήματος, μαζί με τον πίνακα ελέγχου της εγκατάστασης. Ακόμα, εξασφαλίστηκε χώρος για την συντήρηση της διάταξης και τοποθετήθηκαν οι σωληνώσεις που απαιτούνται για την σύνδεση των εξαρτημάτων. Με βάση τον σχεδιασμό που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, οι υπεύθυνοι του έργου στο Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων είναι σε θέση να προβούν σε παραγγελίες των χαλκοσωληνώσεων και στη τελική συναρμολόγηση της διατάξεως εντός του εμπορευματοκιβωτίου τοποθέτησής της.

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 : Παγκόσμια παραγωγή ενέργειας και οι πρωτογενείς πηγές της τους τελευταίους δύο αιώνες [2].....	13
Σχήμα 2 : Συμμετοχή διαφορετικών πηγών στην παραγωγή ενέργειας [2].....	14
Σχήμα 3 : Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας σε TWh και οι πηγές της από το 1965 μέχρι σήμερα [2].....	15
Σχήμα 4 : Πρωτογενείς πηγές παραγωγής επί της συνολικής παραγώμενης ενέργειας [2].....	18
Σχήμα 5 : Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή [4].....	19
Σχήμα 6 : πρωτογενής ενέργεια από πηγές χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα [5].....	20
Σχήμα 7 : Ροή ενέργειας από την παραγωγή στην κατανάλωση [14].....	22
Σχήμα 8 : Διάγραμμα παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα [5].....	23
Σχήμα 9 : Καμπύλη ετήσιας παραγωγής ρύπων διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως τους τελευταίους δύο αιώνες [15].....	24
Σχήμα 10 : Ενεργειακές εγκαστάσεις ORC παγκοσμίως [16].....	26
Σχήμα 11 : Ενεργειακές εγκαταστάσεις ORC στην Ευρώπη [16].....	26
Σχήμα 12 : Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ORC και πηγές ενέργειας εισόδου [8].....	27
Σχήμα 13 : Τυπική διάταξη ORC και διάγραμμα T-S του θερμοδυναμικού κύκλου.....	31
Σχήμα 14 : Εφαρμογές ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας.....	32
Σχήμα 15 : Κατηγοριοποίηση των τεχνολογιών ανάκτησης θερμότητας ανάλογα με την θερμοκρασία της πηγής.....	33
Σχήμα 16 : Αρχή λειτουργίας κύκλου ORC.....	34
Σχήμα 17 : Διάταξη δυαδικού συστήματος γεωθερμίας και ORC.....	35
Σχήμα 18 : Σχεδιάγραμμα ηλιακών θερμικών συστημάτων.....	36
Σχήμα 19 : Μέση τιμή ηλιακής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας σε διάφορες χώρες του κόσμου.....	37
Σχήμα 20 : Σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μέσω παραβολικών συλλεκτών.....	38
Σχήμα 21 : Μονάδα ORC αφαλάτωσης θαλασσινού νερού.....	39
Σχήμα 22 : Τυπική διάταξη ψύξης μέσω συμπίεσης ατμού.....	41

Σχήμα 23 : Σχηματική αναπαράσταση μιας διάταξης ψύξης μέσω απορρόφησης.....	42
Σχήμα 24 : Τυπικό σύστημα ψύξης μέσω προσρόφησης.....	43
Σχήμα 25 : Ψύξη με συμπίεση σε ακροφύσιο.....	45
Σχήμα 26 : Σκαρίφημα ενός ακροφυσίου συμπίεσης.....	46
Σχήμα 27 : Διάγραμμα Θερμοκρασίας – Εντροπίας σε Κύκλο Ψύξης.....	46
Σχήμα 28 : Προτεινόμενος χώρος εγκατάστασης των containers σύμφωνα με το Σενάριο 3. Στο βάθος διακρίνεται πρόσκτισμα του συγκροτήματος και πίσω του το Φαρμακείο ενώ αριστερά διακρίνεται τμήμα της Βίλας Σερπιέρη.....	52
Σχήμα 29 : Τοπογραφικό σχέδιο της περιοχής εγκατάστασης.....	53
Σχήμα 30 : Κάτοψη του πεδίου ηλιακών συλλεκτών, των containers αποθήκευσης θερμότητας και του μετεωρολογικού σταθμού	57
Σχήμα 31 : Απεικόνιση της διάταξης του πεδίου ηλιακών παραβολικών συλλεκτών του εταίρου Protarget.....	57
Σχήμα 32 : Απεικόνιση της διάταξης του πεδίου ηλιακών παραβολικών συλλεκτών του εταίρου Protarget.....	57
Σχήμα 33 : Εξωτερική άποψη και το περιεχόμενο των containers που θα στεγάσουν το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας στερεής κατάστασης.....	58
Σχήμα 34 : Μονογραμμικό διάγραμμα της εγκατάστασης του συστήματος TES4Trig.....	62
Σχήμα 35 : Σχέδιο μιας απλοποιημένης διάταξης συμπαραγωγής ORC-ECC.....	65
Σχήμα 36 : Τα σενάρια λειτουργίας της εγκατάστασης συμπαραγωγής.....	66
Σχήμα 37 : Τμήμα 1: Αντλία – Εκτονωτής.....	82
Σχήμα 38 : Τμήμα 2: Τροφοδοτικό Δοχείο – Αντλία.....	83
Σχήμα 39 : Τμήμα 3: Εκτονωτής – Τροφοδοτικό Δοχείο.....	84
Σχήμα 40 : Τμήμα 4: Δευτερεύον Ρεύμα Ακροφυσίου.....	85
Σχήμα 41 : Συμπυκνωτής (condenser)	91
Σχήμα 42 : Ατμοποιητής ECC (evaporator)	92
Σχήμα 33 : Ανακομιστής (recuperator)	92
Σχήμα 44 : Υποψύκτης (subcooler)	93
Σχήμα 45 : Προθερμαντής ORC (preheater)	93

Σχήμα 46 : Ατμοποιητής ORC (evaporator – shell/tube type).....	94
Σχήμα 44 : Ψυγείο λαδιού (oil cooler)	94
Σχήμα 48 : Διάταξη εκτονωτή-γεννήτριας.....	95
Σχήμα 49 : Σύστημα δύο εκτονωτών-γεννητριών με πλαίσιο στήριξης.....	96
Σχήμα 50 : S08-S10 παροχόμετρα τύπου Coriolis.....	97
Σχήμα 51 : S15 παροχόμετρο ελαίου τύπου Coriolis.....	97
Σχήμα 52 : Φίλτρο εγκατάστασης.....	98
Σχήμα 53: Διάταξη αντλίας-κόμπλερ-ηλεκτροκινητήρα.....	99
Σχήμα 54 : Ελαιοδιαχωριστής.....	100
Σχήμα 55 : Ακροφύσιο συμπίεσης.....	101
Σχήμα 56 : Αεροσυμπιεστής.....	101
Σχήμα 57 : Οι 4 τύποι βαλβίδων.....	102
Σχήμα 58 : Πίνακας ελέγχου.....	103
Σχήμα 59 : Εμπορευματοκιβώτιο πρότυπου ISO, για την τοποθέτηση του συστήματος ORC-ECC.....	104
Σχήμα 60 : Σχέδιο κάτοψης του συστήματος ORC-ECC.....	105
Σχήμα 61 : Αριστερή πλάγια όψη της εγκατάστασης.....	106
Σχήμα 62 : Πρόσοψη της εγκατάστασης μαζί με το container.....	107
Σχήμα 63 : Κάτοψη της εγκατάστασης	107
Σχήμα 64 : Πρόοψη της εγκατάστασης.....	108
Σχήμα 65 : Πίσω όψη της εγκατάστασης.....	108
Σχήμα 66 : Πίσω όψη της εγκατάστασης μαζί με το container.....	109
Σχήμα 67 : Ισομετρική προβολή της εγκατάστασης.....	109
Σχήμα 68 : Αριστερή όψη της εγκατάστασης μαζί με το container.....	110
Σχήμα 69 : Προβολή της εγκατάστασης υπό γωνία μαζί με το container.....	110

Σχήμα 70 : Κάτοψη της εγκατάστασης μαζί με το container.....	111
Σχήμα 71 : Αριστερή όψη φωτορεαλιστικού μοντέλου της εγκατάστασης.....	112
Σχήμα 72 : Ισομετρική όψη φωτορεαλιστικού μοντέλου της εγκατάστασης.....	113
Σχήμα 73 : Πρόοψη φωτορεαλιστικού μοντέλου μαζί με το container.....	113

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Ποσοστιαία συμμετοχή ορυκτών καυσίμων και πηγών χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος.....	20
Πίνακας 3 : Μεγάλες εγκαταστάσεις ORC.....	29
Πίνακας 3 : Μικρής Ισχύος ORC.....	29
Πίνακας 4 : Οι διαφορετικοί τύποι συλλεκτών και τα εύρη θερμοκρασίας τους.....	36
Πίνακας 5 : Εκτιμώμενο κόστος επέμβαση ανά είδος εργασίας.....	54
Πίνακας 6 : Πίνακας τοπολογίας με όλους τους αγωγούς της εγκατάστασης.....	63
Πίνακας 7 : Βαθμοί απόδοσης του κύκλου συμπαραγωγής ORC-ECC (ηλεκτρικός, θερμικός και COP) κατά τα τρία κύρια σενάρια λειτουργίας της εγκατάστασης.....	67
Πίνακας 8 : Μοντέλα Ηλεκτρομαγνητικών Βαλβίδων DanfossNC.....	70
Πίνακας 9 : Μοντέλα Ηλεκτρομαγνητικών Βαλβίδων DanfossNC.....	71
Πίνακας 10 : Μηχανοκίνητες Σφαιρικές Βαλβίδες.....	72
Πίνακας 11 : Μοντέλα Πνευματικών Βαλβίδων Γωνιακής Έδρας Schubert&Salzer.....	75
Πίνακας 12 : Μοντέλα Εκτονωτικών Βαλβίδων Danfoss.....	77
Πίνακας 13 : Στοιχεία επιλεγμένων βαλβίδων.....	78
Πίνακας 14 : Σωληνώσεις ΧΑΛΚΟΡ.....	81
Πίνακας 15 : Αποτελέσματα Διαστασιολόγησης Σωληνώσεων.....	85
Πίνακας 16 : Εξαρτήματα που μοντελοποιήθηκαν.....	87
Πίνακας 17 : Βαλβίδες στα υποσυστήματα ORC και ECC.....	88

Κατάλογος Αναφορών

- [1] V. Smil, Πως λειτουργεί πραγματικά ο κόσμος, Penguin Books Ltd, 2022.
- [2] M. R. a. P. R. Hannah Ritchie, «Energy,» *Our World in Data*, 2022.
- [3] E. Institute, «Statistical review of world energy,» 2023.
- [4] Eurostat, Renewable Energy Mix, 2020.
- [5] H. R. a. M. R. a. P. Rosado, «CO₂ and Greenhouse Gas Emissions,» *Our World in Data*, 2020.
- [6] M. a. Markets, «Organic Rankine Cycle Market by Type, End-Use Industry, Application and Region,» 2023.
- [7] M. A. Thomas Tartière, «A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market,» *Energy Procedia*, τόμ. 129, 2017.
- [8] F. D. Christoph Wieland, «Market report on Organic Rankine Cycle power systems : recent developments and outlook,» 2022.
- [9] W. R. R. Best, «A review of thermal cooling systems,» Applied Thermal Engineering, 2015.
- [10] Ι. Σερασκέρης, «Μελέτη και διαστασιολόγηση συστήματος ψύξης με ακροφύσιο,» ΕΜΠ, Αθήνα, 2019.
- [11] Danfoss, «Data Sheet Solenoid Valve: Types EVR 2 - EVR 40 NC/NO».
- [12] S. & S. C. S. GmbH, «Data Sheet Pneumatic Valve,» 2021.
- [13] ΧΑΛΚΟΡ, «Τεχνικός Οδηγός: Χαλκοσωλήνες για Θερμοϋδραυλικές Εγκαταστάσεις,» σε *Χαλκοσωλήνες Talos*.
- [14] L. L. N. Laboratory, «Estimated U.S Energy Consumption,» 2021.
- [15] O. W. i. Data, «CO₂ emissions».
- [16] «<https://orc-world-map.org/analysis>,» [Ηλεκτρονικό].
- [21] Castel, «Product Catalogue 2022,» 2022.
- [22] Danfoss, «Ultimate system efficiency and reliability: Electric Expansion Valve,» 2022.

- [23] «orc-world-map.org,» 2021. [Ηλεκτρονικό].
- [24] O. Munich, «MARKET REPORT ON ORGANIC RANKINE CYCLE POWER SYSTEMS,» Munich, 2021.
- [25] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ourworldindata.org/energy-mix>.
- [27] «U.S energy consumption,» Lawrence Livermore National Laboratory, 2018.
- [28] Χ. Αντώνιος, «Σύζευξη συστήματος ORC μικρής ισχύος με οικιακό ηλιακό σύστημα και σχεδιασμός κατάλληλης διάταξης,» Αθήνα, 2018.
- [29] Ο. Γαρδελάκος, «Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση συστήματος τριπαραγωγής αντιστρεπτής αντλίας θερμότητας - ORC,» Αθήνα, 2020.
- [30] Π. Θεόδωρος, «Μοντελοποίηση οργανικού κύκλου Rankine για μικρά συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα,» Αθήνα, 2020.
- [31] Γ. Παλαμίδης, «Σχεδιασμός συστήματος ηλιακής ψύξης-θέρμανσης με συνδυασμό των κύκλων συμπίεσης και ακροφυσίου,» Αθήνα, 2020.