



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική Εργασία

ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΙΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟ ΑΕΡΑ ΚΑΙ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Νάνος Θεόδωρος
Α.Μ.: 02104687

Επιβλέπουσα: Κορωνάκη Ειρήνη, Αναπ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2019

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ειρήνη Κορωνάκη για την πολύτιμη βοήθεια της και τους ανθρώπους που με στήριξαν κατά την προσπάθεια μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
1. Εισαγωγή.....	7
1.1. Η στροφή σε συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής λόγω της αύξησης της κατανάλωσης πετρελαίου.....	7
2. Συμβατικά συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής.....	10
2.1. Συμπαραγωγή.....	10
2.1.1. Ιστορική αναδρομή.....	10
2.1.2. Σημερινές εφαρμογές συμπαραγωγής.....	11
2.1.3. Βαθμός απόδοσης ενός τυπικού συστήματος συμπαραγωγής.....	14
2.1.4. Οικονομικό και οικολογικό κόστος της συμπαραγωγής.....	15
2.1.5. Η ανάγκη για ψύξη κατά τους θερινούς μήνες.....	17
2.2. Τριπαραγωγή.....	18
2.2.1. Εισαγωγή σε ένα συμβατικό σύστημα τριπαραγωγής.....	18
2.2.2. Πολιτικές για την τριπαραγωγή και η τρέχουσα κατάσταση.....	19
2.2.3. Κινητήριες μονάδες τυπικών συστημάτων τριπαραγωγής.....	23
3. Σύστημα τριπαραγωγής με πεπιεσμένο αέρα και αποθήκευση θερμότητας.....	30
3.1. Εισαγωγή στο σύστημα τριπαραγωγής.....	30
3.2. Διαμόρφωση του συστήματος.....	31
3.3. Μονάδα συμπίεσης και αποθήκευσης αέρα.....	34
3.3.1. Γενικά για τη μονάδα συμπίεσης και αποθήκευσης αέρα.....	34
3.3.2. Εμβολοφόρος συμπιεστής.....	35
3.3.3. Ενδιάμεσος ψύκτης (Intercooler).....	48
3.3.4. Αποστραγγιστής.....	49
3.3.5. Ξηραντήρας πεπιεσμένου αέρα.....	50
3.3.6. Δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα.....	54
3.3.7. Ρυθμιστής πίεσης.....	58
3.4. Μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	60
3.4.1. Γενικά για τη μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.....	60
3.4.2. Εναλλάκτης θερμότητας.....	62
3.4.3. Δεξαμενές θερμού και ψυχρού υγρού.....	68
3.4.4. Αντλία θερμικού υγρού.....	69

3.5. Μονάδα έκλυσης και απολαβής ενέργειας.....	70
3.5.1. Γενικά για τη μονάδα έκλυσης και απολαβής ενέργειας.....	70
3.5.2. Στρόβιλος εκτόνωσης αερίου.....	71
3.5.3. Γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος.....	72
4. Θερμοδυναμική ανάλυση του συστήματος τριπαραγωγής.....	74
4.1. Εισαγωγή.....	74
4.2. Θερμοδυναμική ανάλυση της διεργασίας συμπίεσης αέρα.....	74
4.3. Θερμοδυναμική ανάλυση της διεργασίας έκλυσης ενέργειας.....	79
4.4. Αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος.....	86
5. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....	93
Βιβλιογραφικές αναφορές και παραπομπές.....	96
Παράρτημα.....	99

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένα καινοτόμο σύστημα τριπαραγωγής (συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης και ψύξης) με πεπιεσμένο αέρα και αποθήκευση θερμότητας. Το σύστημα αυτό, λόγω της χρήσης πεπιεσμένου αέρα, διαφέρει από τα συμβατικά συστήματα τριπαραγωγής που χρησιμοποιούν τεχνολογία ψύξης απορρόφησης.

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση και στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προκαλούν οι συμβατικοί τρόποι παραγωγής ενέργειας. Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής είναι απαραίτητη έτσι ώστε να μειωθούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια ιστορική αναδρομή στη χρήση συστημάτων συμπαραγωγής (συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης) από την εποχή της Βιομηχανικής Επανάστασης μέχρι και σήμερα. Έπειτα, γίνεται αναφορά στα συστήματα τριπαραγωγής και στις πολιτικές που εφαρμόζονται για τα συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται το σύστημα τριπαραγωγής με πεπιεσμένο αέρα και αποθήκευση θερμότητας και γίνεται ανάλυση των επιμέρους μονάδων του συστήματος και των εξαρτημάτων που αποτελούν το σύστημα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η θερμοδυναμική ανάλυση της διεργασίας συμπίεσης του αέρα και της διεργασίας έκλυσης ενέργειας. Επίσης, παρουσιάζεται μια μελέτη περίπτωσης του προτεινόμενου συστήματος τριπαραγωγής σε ένα συγκρότημα γραφείων στο Σικάγο.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας (κυρίως της θερμοδυναμικής ανάλυσης που προηγήθηκε) και αναφέρεται πιθανή μελλοντική εργασία πάνω στο σύστημα αυτό.

ABSTRACT

This thesis presents a novel trigeneration system (combined electric power, heating and cooling) based on compressed air and thermal energy storage. This system differs from the conventional trigeneration systems that use absorption chilling technology in the usage of compressed air.

The first chapter of this thesis deals with the global energy consumption and the greenhouse gas emissions caused by the conventional power plants. We reach the conclusion that cogeneration and trigeneration systems are necessary for the reduction of greenhouse gas emissions.

In the second chapter, there is a historical review on the usage of cogeneration systems (combined electric power and heating) from the Industrial Revolution to present. Then, there is a reference on trigeneration systems and the applied policies on cogeneration and trigeneration systems on a global level.

In the third chapter, the proposed trigeneration system based on compressed air and thermal energy storage is described and its components are analyzed.

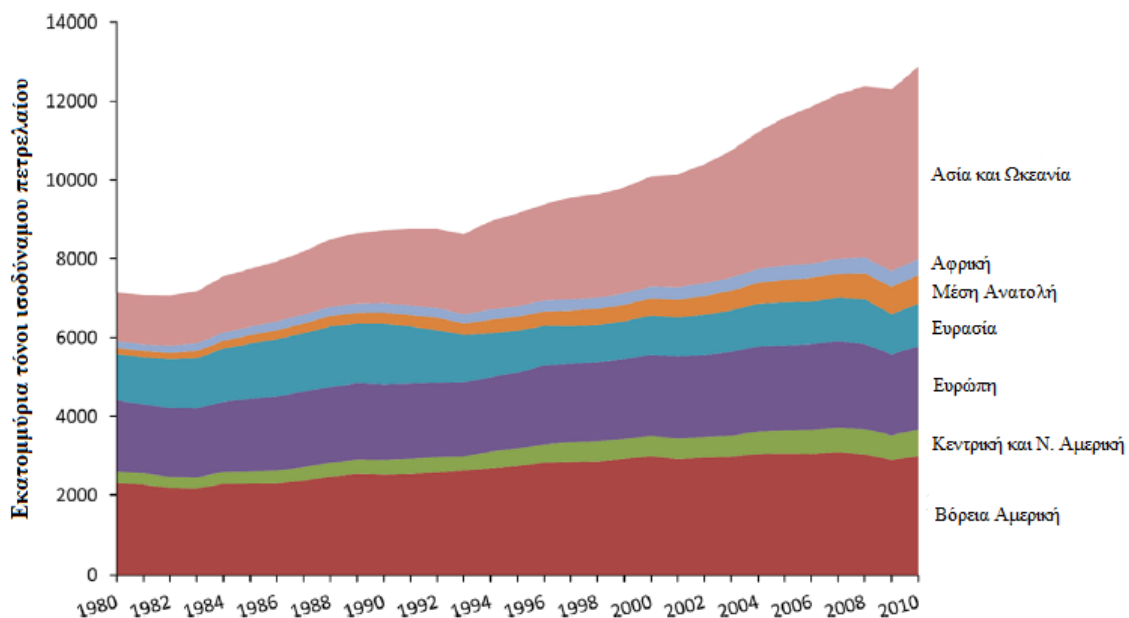
In the fourth chapter, a thermodynamic analysis is performed on the air compression process and the energy release process. Also, a case study of the proposed trigeneration system on a small office building in Chicago is presented.

In the fifth chapter, the conclusions from this thesis, specifically the results of the thermodynamic analysis, are presented and possible future work on this system is mentioned.

1. Εισαγωγή

1.1. Η στροφή σε συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής λόγω της αύξησης της κατανάλωσης πετρελαίου

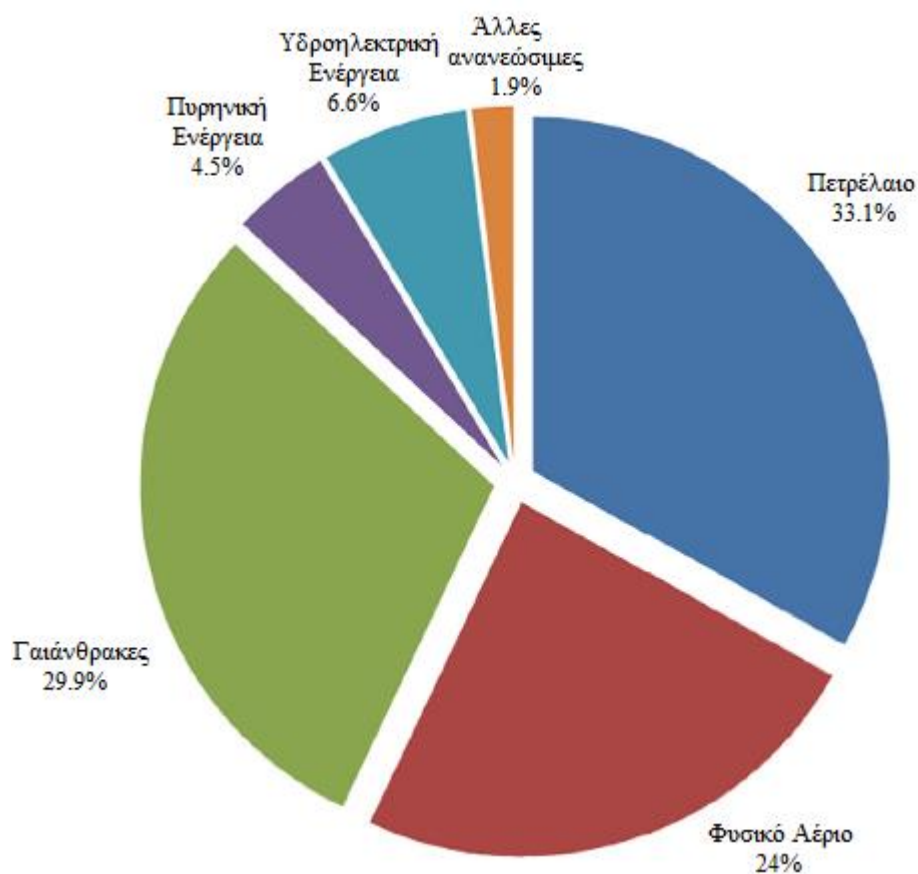
Η πληθυσμιακή αύξηση και η τεχνολογική πρόοδος των δύο τελευταίων δεκαετιών, παράλληλα με την ανάγκη για υψηλότερα επίπεδα ζωής και άνεσης, οδήγησαν σε μία άνευ προηγουμένου αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Στην Εικ. 1 παρουσιάζεται η αύξηση στη συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά περιοχή από 7140.7 Mtoe (εκατομμύρια τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) το 1980 σε 12875.6 Mtoe το 2010^[2]. Η Ασία και η Ωκεανία κατέχουν το μεγαλύτερο μερίδιο στην κατανάλωση ενέργειας το 2010 με ποσοστό 37.9%, ακολουθεί η Βόρεια Αμερική με ποσοστό 23.1% και η Ευρώπη με ποσοστό 16.4%. Ωστόσο, τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν ακόμα να κυριαρχούν στον ενεργειακό τομέα. Αυτό έχει ως συνέπεια η παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου να αυξηθεί από 3602.7 Mtoe το 2002 σε 4118.9 Mtoe το 2012 με μία παράλληλη αύξηση στην παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου από 78.470.000 βαρέλια την ημέρα σε 89.774.000 βαρέλια την ημέρα.



Εικ. 1: Συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά περιοχή^[2]

Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο παρουσιάζεται στην Εικ. 2^[2]. Παρατηρείται ότι το πετρέλαιο παραμένει ο επικρατών πόρος με ποσοστό 33.1% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Ακολουθούν οι γαιάνθρακες με ποσοστό 29.9% και

το φυσικό αέριο με ποσοστό 24%. Η συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας παραμένει λιγότερη από 9%, με ένα 6.6% να αποτελεί την υδροηλεκτρική ενέργεια και κάτι λιγότερο από 2% να αποτελεί όλες τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο σύνολο τους. Αυτή η μεγάλη εξάρτηση στα συμβατικά ορυκτά καύσιμα οδήγησε στην αύξηση των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 1.4% φτάνοντας τους 31.6 γιγατόνους το 2012 με το ιστορικό υψηλό των 400 ppm στην ατμόσφαιρα τον Μάιο του 2013^[2].



Εικ. 2: Συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο^[2]

Επιπροσθέτως, οι ενεργειακές καταναλώσεις στα κτίρια (κυρίως για ηλεκτρική ισχύ, θέρμανση και ψύξη) συνεισφέρουν περίπου στο 20 – 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης (με παρόμοια συμβολή στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα) σε Ευρωπαϊκή Ένωση και Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής^[2]. Η πλειοψηφία των κτιρίων αυτών εξαρτάται από μεγάλους σταθμούς παραγωγής για τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σταθμοί αυτοί χρησιμοποιούν ως καύσιμα πετρέλαιο, φυσικό αέριο ή γαϊάνθρακες. Ωστόσο, η λειτουργία αυτών των κεντρικών σταθμών χαρακτηρίζεται συνήθως από υψηλά ποσοστά ενεργειακών απωλειών, κυρίως στη μορφή απορριπτόμενης θερμότητας. Επιπρόσθετες απώλειες

υπάρχουν και κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας δια μέσου καλωδίων υψηλής τάσης, όπως επίσης και λόγω των μετασχηματιστών. Ως συνέπεια, μόνο το 35 – 45% της συνολικής ενέργειας που παράγεται από αυτούς τους σταθμούς παραδίδεται στον καταναλωτή. Έτσι, το υψηλό επενδυτικό κόστος και η υψηλή ριψοκινδυνότητα επένδυσης στους συγκεκριμένους σταθμούς, μαζί με το μεγάλο οικολογικό αποτύπωμα (από την παραγωγή της ενέργειας) και τον πολύπλοκο σχεδιασμό, ευνοούν τη στρόφη σε πιο αποδοτικά και συμπαγή αποκεντρωμένα συστήματα και εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας από τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την εκπλήρωση των αναγκών θέρμανσης και ψύξης, έχει παρουσιαστεί και συζητηθεί ως μια βιώσιμη λύση για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των συστημάτων και τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής.

2. Συμβατικά συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής

2.1. Συμπαραγωγή

2.1.1. Ιστορική αναδρομή

Τα συστήματα συμπαραγωγής, δηλαδή τα συστήματα συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης (CHP – Combined Heat and Power), επιτρέπουν την ταυτόχρονη παραγωγή θέρμανσης και ηλεκτρικής ενέργειας από μία μόνο πηγή ενέργειας. Αυτή η πηγή ενέργειας μπορεί να είναι το πετρέλαιο, οι γαιάνθρακες, το φυσικό αέριο, η βιομάζα ή η ηλιακή ενέργεια. Στην Εικ. 1 παρουσιάζεται μια απλή σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος συμπαραγωγής.



Εικ. 1: Σχηματική αναπαράσταση τυπικού συστήματος συμπαραγωγής^[27]

Η συμπαραγωγή δεν είναι μια νέα έννοια. Μια πρώιμη ιδέα της συμπαραγωγής υπήρξε γύρω στο 1880, όπου στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις ο ατμός ήταν η πρωταρχική πηγή ενέργειας. Ο ηλεκτρισμός, επίσης, μόλις που είχε εμφανιστεί και ήταν έτοιμος να χρησιμοποιηθεί για ισχύ και για φωτισμό. Η χρήση της συμπαραγωγής μετατράπηκε σε συνηθισμένη πρακτική όταν οι μηχανικοί εκείνης της εποχής αντικατέστησαν τους κινούμενους με ατμό μίαντες και τροχαλίες, με ηλεκτρικά κινούμενους, μεταβαίνοντας έτσι από τα μηχανικά κινούμενα συστήματα στα ηλεκτρικά. Κατά τη διάρκεια των πρώτων ετών του 20ου αιώνα, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας προερχόταν από λέβητες καύσης άνθρακα και ατμοστρόβιλους, με τον εξερχόμενο ατμό να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές βιομηχανικής θέρμανσης. Την ίδια περίοδο, εκτιμάται ότι το 58% της συνολικής ενέργειας που παραγόταν στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, από τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας αυτής της εποχής, ήταν προϊόν συμπαραγωγής^[31].

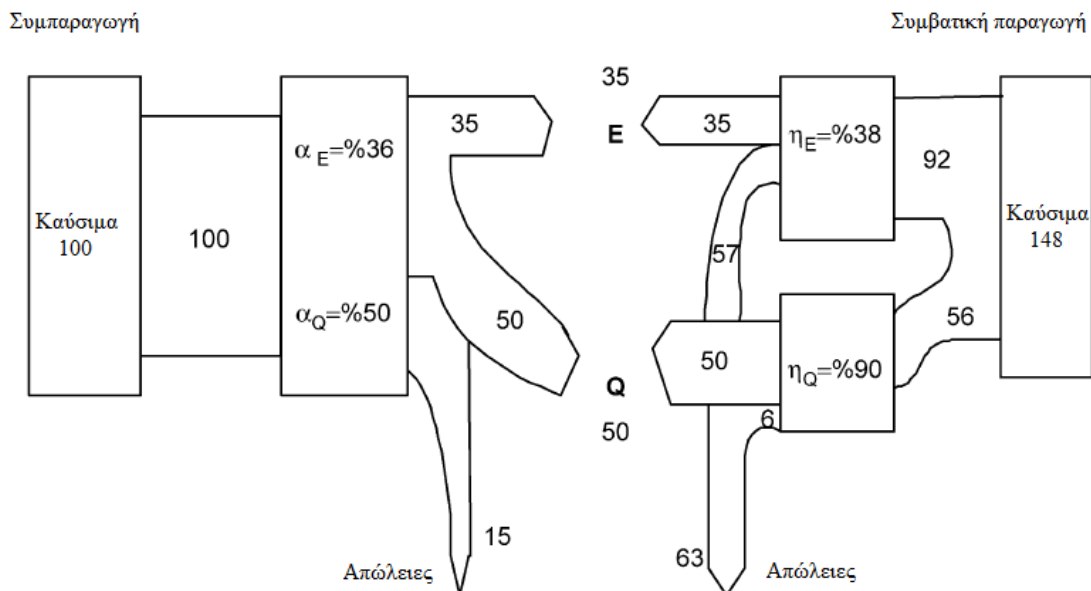
Η κατασκευή κεντρικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αξιόπιστων ηλεκτρικών δικτύων οδήγησε στη μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις ξεκίνησαν να αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια από εταιρίες κοινής ωφέλειας και σταμάτησαν να την παράγουν από μόνες τους. Αυτό είχε ως συνέπεια, η επί τόπου βιομηχανική συμπαραγωγή να μειωθεί στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, σε σημείο το 1950 να αντιπροσωπεύει μόνο το 15% της συνολικής ηλεκτρικής παραγωγής και το 1974 να μειωθεί περισσότερο στο 5%^[3]. Επιπροσθέτως, άλλοι παράγοντες που οδήγησαν στη μείωση της συμπαραγωγής ήταν οι ολοένα και αυξανόμενες ρυθμιστικές πολιτικές σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το χαμηλό κόστος καυσίμων, οι αυστηρότεροι περιβαλλοντικοί έλεγχοι και οι εξελίξεις στην τεχνολογία, με αποτέλεσμα προϊόντα όπως οι προσυναρμοσμένοι λέβητες. Ωστόσο, αυτή η πτωτική τάση άρχισε να αναστρέφεται μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973. Εξαιτίας της αύξησης της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος και εξαιτίας της αβεβαιότητας όσον αφορά τα αποθέματα καυσίμων, η προσοχή στράφηκε σε αποδοτικά συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Επιπλέον, η συμπαραγωγή τράβηξε την προσοχή λόγω της χαμηλής κατανάλωσης καυσίμων και των χαμηλών εκπομπών.

2.1.2. Σημερινές εφαρμογές συμπαραγωγής

Στη σημερινή εποχή, εξαιτίας των προαναφερθέντων, πολλές κυβερνήσεις, ειδικά στην Ευρώπη, στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, στην Ιαπωνία και στον Καναδά, έχουν αναλάβει ηγετικούς ρόλους στην καθιέρωση και στην προώθηση της χρήσης συστημάτων συμπαραγωγής, όχι μόνο στη βιομηχανία αλλά και σε άλλους τομείς, όπως ο οικιακός.

Στον οικιακό τομέα, υπάρχει μια αυξανόμενη τάση προς τη χρήση συστημάτων μικρο-συμπαραγωγής, επειδή έχουν τη δυνατότητα να παράγουν εξίσου χρήσιμη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια από μία πηγή ενέργειας, όπως πετρέλαιο ή φυσικό αέριο, με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης. Στα συστήματα συμπαραγωγής, ο βαθμός ενεργειακής απόδοσης αγγίζει το 80% σε σύγκριση με το σύννηθες 30 – 35% των συμβατικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα. Στην Εικ. 2^[3] παρουσιάζεται ο τρόπος που η εσωτερική ενέργεια από το καύσιμο μετατρέπεται σε χρήσιμη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια σε ένα συμβατικό σύστημα παραγωγής ενέργειας και σε ένα σύστημα συμπαραγωγής. Παρατηρείται ότι η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνεται στο συμβατικό

σύστημα παραγωγής είναι αρκετά μεγαλύτερη από εκείνη που καταναλώνεται στο σύστημα συμπαραγωγής, όπως επίσης παρατηρείται ότι οι απώλειες του συμβατικού συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες του συστήματος συμπαραγωγής.



Εικ. 2: Συμπαραγωγή και συμβατική παραγωγή. Όπου α_E είναι το μέρος της ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα συμπαραγωγής, α_Q είναι το μέρος της ενέργειας που μετατρέπεται σε χρήσιμη θερμική ενέργεια στο σύστημα συμπαραγωγής, η_E είναι ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συμβατικού συστήματος (μόνο παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας), η_Q είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης του λέβητα του συμβατικού συστήματος (μόνο παραγωγή θέρμανσης), E είναι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και Q είναι η ζήτηση θερμότητας^[3].

Η αύξηση του βαθμού ενεργειακής απόδοσης κατά τη συμπαραγωγή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του οικονομικού κόστους και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης ξεχωριστά. Η συμπαραγωγή εφαρμόζεται σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διαφόρων μεγεθών, από μικρής κλίμακας για οικιακές εφαρμογές έως συστήματα συμπαραγωγής μεγάλης κλίμακας σε βιομηχανίες και δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει όφελος από τη συμπαραγωγή αν χρησιμοποιείται η ηλεκτρική και θερμική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα. Συνεπώς, η συμπαραγωγή είναι κατάλληλη για κτιριακές εφαρμογές, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει ζήτηση για τη θερμότητα που παράγεται.

Κατάλληλες κτιριακές εφαρμογές για συμπαραγωγή είναι νοσοκομεία, κυβερνητικά κτίρια, ξενοδοχεία, συγκροτήματα γραφείων, μονοκατοικίες και πολυκατοικίες. Στην περίπτωση

της συμπαραγωγής για μονοκατοικίες, ο σχεδιασμός του συστήματος αποτελεί μια σημαντική τεχνική πρόκληση επειδή τα θερμικά και ηλεκτρικά φορτία δεν συμπίπτουν πάντα και καθίσταται αναγκαία η αποθήκευση της θερμικής και της ηλεκτρικής ενέργειας ή η παράλληλη σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ωστόσο, τα συστήματα συμπαραγωγής για πολυκατοικίες και δημόσια κτίρια επωφελούνται από την ποικιλομορφία των θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας.

Οι εφαρμογές συμπαραγωγής στα κτίρια θα πρέπει να ικανοποιούν είτε τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας ταυτόχρονα, είτε τη ζήτηση θερμότητας και μέρος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, είτε τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και μέρος της ζήτησης θερμότητας. Ανάλογα με το μέγεθος των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων (είτε συμπίπτουν είτε όχι) και τον τρόπο λειτουργίας, το σύστημα συμπαραγωγής μπορεί να χρειαστεί να λειτουργήσει σε συνθήκες μερικού φορτίου. Η πλεονάζουσα ενέργεια (ηλεκτρισμός ή θερμότητα) μπορεί να αποθηκευτεί ή να πωληθεί και οποιεσδήποτε ελλείψεις μπορούν να καλυφθούν αγοράζοντας ηλεκτρική ενέργεια (ή θέρμανση) από άλλες πηγές, όπως για παράδειγμα το ηλεκτρικό δίκτυο. Η πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται μπορεί να αποθηκευτεί σε μια συσκευή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, όπως μια δεξαμενή υγρού ή σε υλικά αλλαγής φάσης. Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας όπως συσσωρευτές και πυκνωτές. Επιπροσθέτως, η λειτουργία ενός συστήματος συμπαραγωγής εξαρτάται από το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος, κάνοντας τα συστήματα συμπαραγωγής ελκυστικά από οικονομικής άποψης σε περιόδους υψηλού κόστους του ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι εφαρμογές συμπαραγωγής στον οικιακό τομέα προσφέρουν οφέλη από την άποψη της βελτίωσης του βαθμού ενεργειακής απόδοσης και της μείωσης των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Τεχνολογίες όπως οι μηχανές Stirling και οι κυψέλες καυσίμου είναι πολλά υποσχόμενες στο μέλλον για εφαρμογές συμπαραγωγής κτιρίων μικρής κλίμακας λόγω των δυνατοτήτων τους να επιτυγχάνουν υψηλό βαθμό απόδοσης και χαμηλά επίπεδα εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Επί του παρόντος όμως, οι μηχανές εσωτερικής καύσης είναι τα μόνα διαθέσιμα συστήματα σε λογικό κόστος. Επιπροσθέτως, οι μηχανές εσωτερικής καύσης είναι ελκυστικές για εφαρμογές συμπαραγωγής μικρής κλίμακας λόγω της αντοχής τους και της γνωστής τους τεχνολογίας. Η άλλη τεχνολογία συμπαραγωγής η οποία έχει τη δυνατότητα να αξιοποιηθεί σε οικιακές εφαρμογές είναι τα συστήματα μικροτουρμπίνων. Ωστόσο, οι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης στο χαμηλότερο εύρος ισχύος και το οικονομικό κόστος των μικροτουρμπίνων είναι μεγαλύτερο σε σχέση με εκείνο των εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης.

2.1.3. Βαθμός απόδοσης ενός τυπικού συστήματος συμπαραγωγής

Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής ορίζεται ως το ποσοστό του καυσίμου που μπορεί να ανακτηθεί ως ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Η υπόλοιπη ενέργεια χάνεται με τη μορφή θερμότητας μέσω των καυσαερίων χαμηλής θερμοκρασίας και ως απώλειες ακτινοβολίας και μεταφοράς από τη μηχανή εσωτερικής καύσης και τη γεννήτρια. Όταν καίγεται υδρογονάνθρακας σε οξυγόνο, παράγεται, ως προϊόν καύσης, νερό. Έπειτα, το νερό εξατμίζεται λόγω της θερμότητας της αντίδρασης. Ο βαθμός απόδοσης συσχετίζεται με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (Lower Heating Value – LHV). Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη ορίζεται ως η ανώτερη θερμογόνος δύναμη του καυσίμου (Higher Heating Value – HHV) μείον την ενέργεια που απαιτείται για να ατμοποιηθεί το νερό που παράγεται κατά την καύση. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη είναι επίσης γνωστή ως καθαρή θερμογόνος δύναμη (Net Calorific Value – NCV). Ο βαθμός απόδοσης χωρίζεται στον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης και στον ολικό βαθμό απόδοσης^[3]:

$$\text{ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης} = \frac{\text{ηλεκτρική ισχύς (KW)}}{\text{ισχύς από το καύσιμο (KW)}}$$

$$\text{ολικός βαθμός απόδοσης} = \frac{\text{χρήσιμη θερμική και ηλεκτρική ισχύς (KW)}}{\text{ισχύς από το καύσιμο (KW)}}$$

Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής εξαρτάται από την κινητήρια μονάδα, το μέγεθος της και τη θερμοκρασία στην οποία αξιοποιείται η ανακτώμενη θερμότητα. Επίσης, ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από την κατάσταση και το καθεστώς λειτουργίας της μονάδας συμπαραγωγής.

Το καθεστώς λειτουργίας είναι σημαντικό, επειδή ένα σύστημα συμπαραγωγής σπάνια λειτουργεί κάτω από το 50% της ονομαστικής του ισχύος. Σε χαμηλά φορτία, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης μειώνεται σημαντικά, εκτός από συστήματα συμπαραγωγής με κυψέλη καυσίμου και μηχανή Stirling, τα οποία χειρίζονται τα μερικά φορτία με καλύτερη απόδοση. Επίσης, σε χαμηλά φορτία ο λόγος της θερμότητας προς την ηλεκτρική ενέργεια επηρεάζεται επειδή ένα μεγάλο μέρος της θερμικής ενέργειας ανακτάται από το νερό ψύξης. Η χαμηλή θερμότητα οδηγεί σε αυξομείωση της παραγόμενης ισχύος, αυξημένο κόστος συντήρησης και μειωμένη διάρκεια ζωής. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται όταν το σύστημα συμπαραγωγής προγραμματίζεται να ακολουθήσει το θερμικό φορτίο του κτιρίου^[3].

Κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος συμπαραγωγής για κτιριακές εφαρμογές, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν το επίπεδο χρήσης του συστήματος. Το επίπεδο αυτό είναι συνήθως λίγο μεγαλύτερο από 4500 ώρες/έτος. Τα υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας είναι ζωτικής σημασίας, ιδίως λόγω των προγραμματισμένων διακοπών που απαιτούνται για τη διενέργεια προληπτικής συντήρησης. Μεγάλης κλίμακας συντήρηση συνήθως εκτελείται μία φορά τον χρόνο. Οι μη προγραμματισμένες διακοπές είναι ανεπιθύμητες για τους χρήστες της συμπαραγωγής και ως εκ τούτου θα πρέπει να ληφθούν μέτρα για να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις των διακοπών αυτών^[3].

Η αξιοπιστία καθορίζεται από το ποσοστό των μη προγραμματισμένων διακοπών λόγω βλάβης εξοπλισμού, ενώ η διαθεσιμότητα είναι το ποσοστό του χρόνου που το σύστημα συμπαραγωγής είναι διαθέσιμο για χρήση όποτε αυτό απαιτείται. Οι σχέσεις που εκφράζουν την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα είναι^[3]:

$$\% \text{ αξιοπιστίας} = \frac{T - (S + U)}{T - S} \cdot 100$$

$$\% \text{ διαθεσιμότητας} = \frac{T - (S + U)}{T} \cdot 100$$

Όπου S είναι ο χρόνος προγραμματισμένης συντήρησης σε ώρες/έτος, U είναι ο χρόνος μη προγραμματισμένης συντήρησης σε ώρες/έτος και T είναι ο χρόνος που απαιτείται να λειτουργεί το σύστημα σε ώρες/έτος.

2.1.4. Οικονομικό και οικολογικό κόστος της συμπαραγωγής

Εκτός από την ενεργειακή απόδοση ενός συστήματος συμπαραγωγής οικιακής ή εμπορικής χρήσης, παράγοντες όπως το οικονομικό κόστος (π.χ. καύσιμα και κόστος συντήρησης), τα περιβαλλοντικά οφέλη και η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται, επηρεάζουν την τεchnοοικονομική σκοπιμότητα της συμπαραγωγής. Τα συστήματα συμπαραγωγής μεγάλης κλίμακας έχουν κέρδος από τις οικονομίες κλίμακας και τείνουν να έχουν μικρότερο κόστος εγκατάστασης ανά μονάδα ισχύος. Από την άλλη όμως, τα συστήματα συμπαραγωγής μικρής κλίμακας τείνουν να έχουν υψηλότερο κόστος επένδυσης, πράγμα που αποτελεί οικονομικό φραγμό στην εφαρμογή τους. Επιπροσθέτως, η αντιληπτά χαμηλή αξιοπιστία και ανθεκτικότητα των εξαρτημάτων του συστήματος συμπαραγωγής μικρής κλίμακας, η ασυμβατότητα με την τεχνολογία HVAC (θέρμανση – αερισμός – κλιματισμός)

και η έλλειψη ευελιξίας στη συνδεσιμότητα με το ηλεκτρικό δίκτυο ως τώρα, έχει περιορίσει τη χρήση συστημάτων συμπαραγωγής στον οικιακό τομέα.

Για να αποφασιστεί η υιοθέτηση ενός συστήματος συμπαραγωγής απαιτείται η εκπόνηση μελέτης σκοπιμότητας επένδυσης ή μια οικονομική ανάλυση. Προκειμένου να προχωρήσει η επένδυση, η εγκατάσταση θα πρέπει να είναι οικονομικά βιώσιμη. Είναι αναγκαίο λοιπόν να ληφθούν υπόψιν αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με τα κόστη. Δηλαδή το κόστος κεφαλαίου, το κόστος εγκατάστασης, το κόστος καυσίμων, το κόστος λειτουργίας και το κόστος συντήρησης, κατά το διάστημα μελέτης της εγκατάστασης συστημάτων συμπαραγωγής. Τα κόστη καυσίμων, λειτουργίας και συντήρησης αποτελούν τα τρέχοντα έξοδα.

Το κόστος κεφαλαίου εξαρτάται από τα εξαρτήματα που αποτελούν το σύστημα συμπαραγωγής και τις προδιαγραφές τους. Τα εξαρτήματα αυτά είναι: η κινητήρια μονάδα και η γεννήτρια, το σύστημα ανάκτησης και αποβολής θερμότητας, το σύστημα καυσαερίων και η καπνοδόχος, η παροχή καυσίμου, ο πίνακας ελέγχου, οι σωληνώσεις και τα συστήματα αερισμού. Επίσης, στο κόστος κεφαλαίου περιλαμβάνονται τα έξοδα αποστολής και οι φόροι, αν αυτοί εφαρμόζονται. Στο κόστος εγκατάστασης περιλαμβάνονται οι άδεια εγκατάστασης, η απόκτηση και προετοιμασία γης, η κατασκευή του κτιρίου και η εγκατάσταση του εξοπλισμού. Ορισμένες από αυτές τις δαπάνες, ενδέχεται να μην ισχύουν για συστήματα οικιακής και μικρής εμπορικής συμπαραγωγής. Στα τρέχοντα έξοδα περιλαμβάνονται τα καύσιμα, το προσωπικό (αν υπάρχει), τα κόστη συντήρησης και ασφάλειας.

Οι εφαρμογές συμπαραγωγής συνήθως εμπλέκουν την καύση ορυκτών καυσίμων, η οποία παράγει διαφορετικά προϊόντα καύσης τα οποία βλάπτουν το περιβάλλον. Τα προϊόντα καύσης που παράγονται από την καύση των ορυκτών καυσίμων είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), τα οξειδία του αζώτου (NO_x), το διοξείδιο του θείου (SO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), άκαυστοι υδρογονάνθρακες και διάφορα σωματίδια. Ωστόσο, δεδομένου ότι η αποδοτικότητα του καυσίμου στα συστήματα συμπαραγωγής είναι υψηλότερη από την αποδοτικότητα του καυσίμου στα συμβατικά συστήματα παραγωγής ενέργειας, τα επίπεδα ειδικών εκπομπών (δηλαδή εκπομπές ανά μονάδα χρήσιμης παραγόμενης ενέργειας) των συστημάτων συμπαραγωγής είναι χαμηλότερα από εκείνα των συμβατικών συστημάτων.

2.1.5. Η ανάγκη για ψύξη κατά τους θερινούς μήνες

Διάφοροι τύποι κινητήριων μονάδων συστημάτων συμπαραγωγής είναι εμπορικά διαθέσιμοι, ή υπό έρευνα και ανάπτυξη, για μονοκατοικίες, πολυκατοικίες και μικρές επιχειρήσεις. Αυτοί είναι οι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης (ανάφλεξη με σπινθηριστή – βενζίνη ή ανάφλεξη με συμπίεση – diesel), τα συστήματα μικρο-αεριοστροβίλων, τα συστήματα κυψελών καυσίμου και τα συστήματα μηχανών Stirling. Αυτές οι τεχνολογίες θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τον συμβατικό λέβητα σε μια κατοικία και να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση (και ενδεχομένως ψύξη με απορρόφηση), με την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια να εξάγεται στο τοπικό δίκτυο και την πλεονάζουσα θερμική ενέργεια να αποθηκεύεται σε ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας.

Έχει αποδειχτεί ότι η εγκατάσταση ενός εκατομμυρίου συστημάτων μικρο-συμπαραγωγής της τάξης των 1 – 10 kWe στον οικιακό τομέα του Ηνωμένου Βασιλείου θα επέτρεπαν μια ετήσια μείωση κόστους της τάξης των 176.000.000 £ στην παραγωγή ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 2.1 εκατομμύρια τόνους^[2]. Αν και η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης, ως μια αποδεδειγμένη και αξιόπιστη τεχνολογία, παρέχει διάφορα τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την ξεχωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης, ο βαθμός απόδοσης και η ικανότητα ενός τέτοιου συστήματος μειώνεται δραματικά σε περιοχές με θερμά κλίματα, κυρίως κατά τους θερινούς μήνες όπου η ανάγκη για θέρμανση είναι μηδαμινή. Απαιτείται, λοιπόν, ένα ισορροπημένο και συνεχές προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης για όλο τον χρόνο για να επιτευχθεί υψηλός συνολικός βαθμός απόδοσης στο σύστημα συμπαραγωγής. Ωστόσο, η κατάσταση είναι πολύ διαφορετική σε πραγματικές κλιματικές συνθήκες, όπου πολλές περιοχές έχουν καλοκαίρι και η ζήτηση για ψύξη και κλιματισμό αυξάνεται, λόγω των μεγαλύτερων θερμικών φορτίων, των υψηλότερων επιπέδων ζώης, των νέων κτιριακών σχεδιασμών και αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών μαζί με την επιθυμία για υψηλά επίπεδα θερμικής άνεσης.

2.2. Τριπαραγωγή

2.2.1. Εισαγωγή σε ένα συμβατικό σύστημα τριπαραγωγής

Εάν μία μονάδα παραγωγής συνδυασμένης ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης συζευχθεί με μια θερμικά ενεργοποιούμενη ψυκτική τεχνολογία, αυτό το ολοκληρωμένο σύστημα συνδυασμένης ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης και ψύξης ονομάζεται σύστημα τριπαραγωγής (Combined Cooling Heat and Power – CCHP). Στην Εικ. 3 παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού συστήματος τριπαραγωγής.



Εικ. 3: Σχηματική αναπαράσταση τυπικού συστήματος τριπαραγωγής^[27]

Η ιδέα της ενσωμάτωσης διαφόρων μονάδων ώστε να συγκροτηθεί ένα σύστημα συνδυασμένης θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του '80 με σκοπό την τηλεθέρμανση και την τηλεψύξη^[2]. Ένα τυπικό σύστημα τριπαραγωγής περιλαμβάνει μία κινητήρια μονάδα, μια ηλεκτρική γεννήτρια, θερμικά ενεργοποιούμενες τεχνολογίες, μια μονάδα ανάκτησης θερμότητας και μια μονάδα διαχείρισης και ελέγχου. Κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών, τα συστήματα τριπαραγωγής έχουν προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον. Ειδικά, τα συστήματα μικρής κλίμακας (κάτω του 1 MWe), με την ανάπτυξη διαφορετικών εναλλακτικών για θερμικά οδηγούμενες τεχνολογίες ψύξης και συστήματα συμπαραγωγής. Πιθανοί χρήστες συστημάτων τριπαραγωγής είναι εγκαταστάσεις μικρής και μεσαίας κλίμακας όπως πολυκατοικίες και μικρές κοινότητες, συγκροτήματα γραφείων, ξενοδοχεία, νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα, πανεπιστήμια, εστιατόρια και η βιομηχανία τροφίμων^[2].

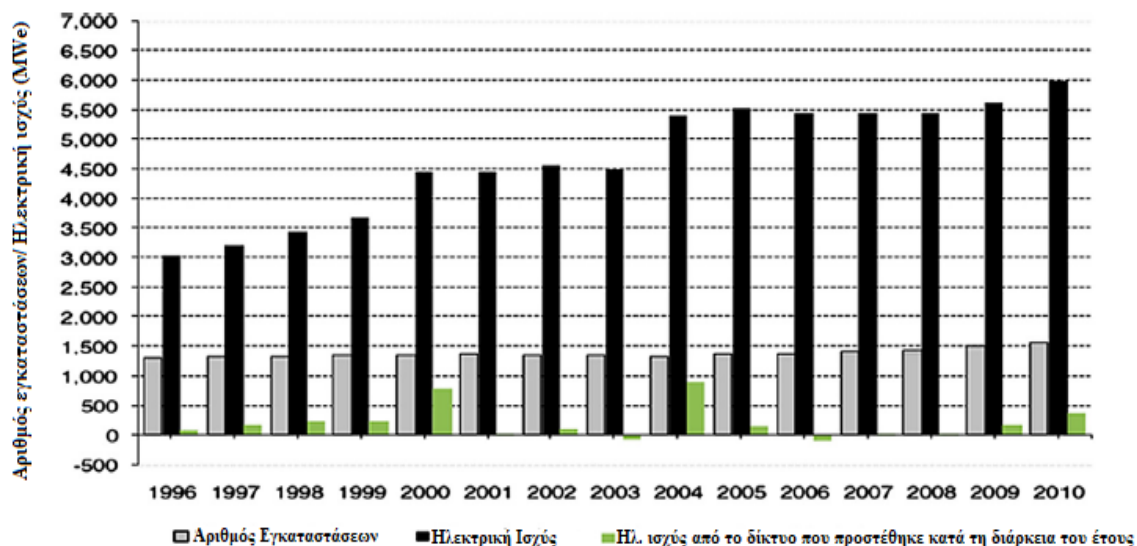
Σε σύγκριση με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας με ξεχωριστά συστήματα (θέρμανση μέσω λέβητα και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω σταθμού παραγωγής) και τα συμβατικά συστήματα συμπαραγωγής, τα συστήματα τριπαραγωγής ενισχύουν τον

συνολικό βαθμό απόδοσης με διάφορα τεχνικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά οφέλη σε διαφορετικά επίπεδα όπως^[2]:

- Παράδοση πολλαπλών προϊόντων
- Μείωση κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας
- Μείωση θερμικών απωλειών
- Μείωση λειτουργικού κόστους
- Βελτίωση της αξιοπιστίας της παροχής ενέργειας
- Βελτίωση της ασφάλειας στον τομέα της ενέργειας
- Μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

2.2.2. Πολιτικές για την τριπαραγωγή και η τρέχουσα κατάσταση

Εκτός από τον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό των ερευνητικών και τεχνολογικών εξελίξεων στον τομέα της τριπαραγωγής, έχουν εισαχθεί μέτρα και πολιτικές σε διάφορες χώρες για την προώθηση της ανάπτυξης συστημάτων τριπαραγωγής για κατοικίες, επιχειρήσεις και βιομηχανίες. Ένα πλαίσιο για την ανάπτυξη συστημάτων συμπαραγωγής υψηλής απόδοσης είχε θεσμοθετηθεί με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2004/8/EC προκειμένου να επιτευχθεί εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας στην εσωτερική αγορά ενέργειας^[2]. Η συνολική ηλεκτρική ισχύς των συστημάτων συμπαραγωγής που ήταν εγκατεστημένα στην Ευρωπαϊκή Ένωση ως το 2010 υπερέβη τα 105 GW^[2]. Με τον τρόπο αυτό, η Γερμανία έφτασε να προηγείται με 22% της συνολικής ισχύος και ακολουθούν η Πολωνία και η Δανία με 9% έκαστες^[2]. Επιπλέον, το 46% της παραγωγής ηλεκτρισμού στη Δανία και το 30% σε Λετονία, Φινλανδία και Ολλανδία παρέχεται από συστήματα συμπαραγωγής^[2]. Αφετέρου, η ηλεκτρική ισχύς των ποιοτικών συστημάτων συμπαραγωγής αυξήθηκε από 5614 MWe το 2009 σε 6111 MWe το τέλος του 2011, με τα συστήματα συμπαραγωγής μεσαίας κλίμακας με ισχύ από 100 kW έως 1 MW να κυριαρχούν στην αγορά^[2]. Η Εικ. 4 παρουσιάζει την προοδευτική αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος των εγκατεστημένων συστημάτων συμπαραγωγής στο Ηνωμένο Βασίλειο από το 1996 έως το 2010^[2].



Εικ. 4: Ηλεκτρική ισχύς των εγκατεστημένων στο Ηνωμένο Βασίλειο συστημάτων συμπαραγωγής^[2]

Επίσης, το 68% των συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής που είναι εγκατεστημένα στο Ηνωμένο Βασίλειο λειτουργούν με φυσικό αέριο, όπου το ποσοστό της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ήταν μόλις το 6% της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος το 2010^[2]. Επιπροσθέτως, η Κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου μείωσε τον ΦΠΑ για την εγκατάσταση συστημάτων μικρο-συμπαραγωγής σε κτίρια, από το 17.5% μόλις στο 5%, αποσκοπώντας στην αύξηση των συστημάτων μικρο-συμπαραγωγής ώστε να μπορούν να παρέχουν το 30 – 40% της συνολικής ηλεκτρικής ζήτησης στο Ηνωμένο Βασίλειο ως το 2050^[2]. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τους κύριους μηχανισμούς στήριξης για την προώθηση συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής σε διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης με βάση την κατάσταση που επικρατούσε το 2007^[2].

Ο αριθμός συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής που εγκαταστάθηκαν στην Ιαπωνία ως το 2006 ήταν περίπου 5190 μονάδες σε εμπορικές εφαρμογές με συνολική ηλεκτρική ισχύ 1715 MW και 2169 μονάδες σε βιομηχανικές εφαρμογές με συνολική ηλεκτρική ισχύ 7170 MW, παρέχοντας το 4% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στη χώρα^[2]. Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος των συστημάτων τριπαραγωγής αυξήθηκε από τα 200 KW το 1986 στα 9440 MW τον Μάρτιο του 2010^[2]. Αυτό οφείλεται στα μέτρα που έχουν ληφθεί από την Κυβέρνηση της Ιαπωνίας για την προώθηση της ανάπτυξης και της εγκατάστασης συστημάτων τριπαραγωγής μέσω ειδικού φορολογικού συστήματος, επενδυτικών επιδοτήσεων και δανείων με χαμηλό επιτόκιο. Η Νέα Εθνική Στρατηγική Ενέργειας που υιοθετήθηκε το 2006 είναι μια από τις ενεργειακές πολιτικές που στοχεύουν στην αύξηση της αποδοτικότητας της ενεργειακής κατανάλωσης

στο 30% έως το 2030, μέσω της προώθησης της τεχνολογικής ανάπτυξης και της εμπορευματοποίησης των συστημάτων μικρο-συμπαγωγής^[2].

Χώρα	Φορολογική υποστήριξη	Τιμολόγια τροφοδότησης	Σύστημα πιστοποίησης	Επιδότηση κεφαλαίου	Άλλα μέτρα
Αυστρία		✓			✓
Βέλγιο	✓		✓		✓
Βουλγαρία		✓			✓
Κύπρος					✓
Τσεχία		✓			✓
Δανία					
Εσθονία					✓
Φινλανδία				✓	✓
Γαλλία		✓			✓
Γερμανία		✓			✓
Ελλάδα	✓	✓			✓
Ουγγαρία		✓			✓
Ισλανδία					✓
Ιταλία	✓	✓		✓	
Λετονία		✓			✓
Λιθουανία		✓			✓
Λουξεμβούργο	✓				✓
Μάλτα	✓				✓
Ολλανδία	✓	✓		✓	✓
Πολωνία			✓		
Πορτογαλία				✓	✓
Ρουμανία		✓		✓	
Σλοβακία		✓			
Σλοβενία		✓			✓
Ισπανία	✓	✓			✓
Σουηδία				✓	✓
Ηνωμένο Βασίλειο	✓	✓		✓	

Πίνακας 1: Μηχανισμοί υποστήριξης για συστήματα τριπαραγωγής σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης^[2]

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η Κυβέρνηση της Κίνας εισήγαγε μια σειρά πολιτικών που περιλαμβάνουν φοροαπαλλαγές και άμεσες επιδοτήσεις για έργα εξοικονόμησης ενέργειας συμπεριλαμβανομένων συστημάτων τριπαραγωγής^[2]. Ο Νόμος Συντήρησης της Ενέργειας του Κράτους που θεσπίστηκε το 1998 έχει προωθήσει την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών σε όλη την Κίνα, όπου η συνολική ισχύς των συστημάτων τριπαραγωγής, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων συμπαραγωγής, έφτασε τα 28.15 MW^[2]. Το 2001, η κυβέρνηση εφήρμοσε τον κανονισμό για τη συμπαραγωγή έτσι ώστε να προωθηθεί η διαχείριση και η ανάπτυξη συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής, οδηγώντας σε μια αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, με ένα σύστημα τριπαραγωγής των 49.6 MW εγκατεστημένο στην πόλη Τζινάν και ένα σύστημα τριπαραγωγής των 120 MW εγκατεστημένο στην πόλη Χανγκτσόου^[2].

Η εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων τριπαραγωγής στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής είχε αυξηθεί από τα 12 GW το 1980 στα 45 GW το 1995^[2]. Το Υπουργείο Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, ο Οργανισμός Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) και η Ένωση Συνδυασμένης Παραγωγής Θερμότητας και Ηλεκτρικής Ενέργειας (CHPA) θέσπισαν το 1998 την “Πρόκληση Συμπαραγωγής” (CHP Challenge), με στόχο την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των συστημάτων τριπαραγωγής στα 92 GW ως το 2010^[2]. Στόχος ήταν να εγκατασταθούν μονάδες τριπαραγωγής στο 25% των νέων κατασκευών και στο 10% των υφισταμένων εμπορικών και κυβερνητικών κτιρίων ως το 2010^[2]. Η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς των συστημάτων τριπαραγωγής στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής έφτασε στα 80 GW το 2004^[2]. Ωστόσο, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής τον Αύγουστο του 2012, αντιπροσώπευε μόλις το 8% της συνολικής παραγόμενης ισχύος στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής^[2]. Για τον λόγο αυτό, η Κυβέρνηση των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής έχει βάλει στοίχημα να εγκατασταθούν νέα και αποδοτικά συστήματα συμπαραγωγής και τριπαραγωγής εγκατεστημένης ισχύος 40 GW ως το 2020^[2].

Επιπροσθέτως, έχουν εισαχθεί και εφαρμοστεί, σε διάφορες χώρες, ποίκιλα μέτρα και πολιτικές για την προώθηση της ανάπτυξης συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής. Στις χώρες αυτές συμπεριλαμβάνονται η Ρωσία, η Βραζιλία, το Ιράν, η Ινδία, το Μεξικό και η Νότια Αφρική. Πρόσφατα, οι εξελίξεις στον τομέα της τριπαραγωγής έχουν επικεντρωθεί στη βελτίωση του σχεδιασμού και του βαθμού απόδοσης της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, της χρησιμοποιούμενης ψυκτικής τεχνολογίας και της στρατηγικής διαχείρισης και ελέγχου.

2.2.3. Κινητήριες μονάδες τυπικών συστημάτων τριπαραγωγής

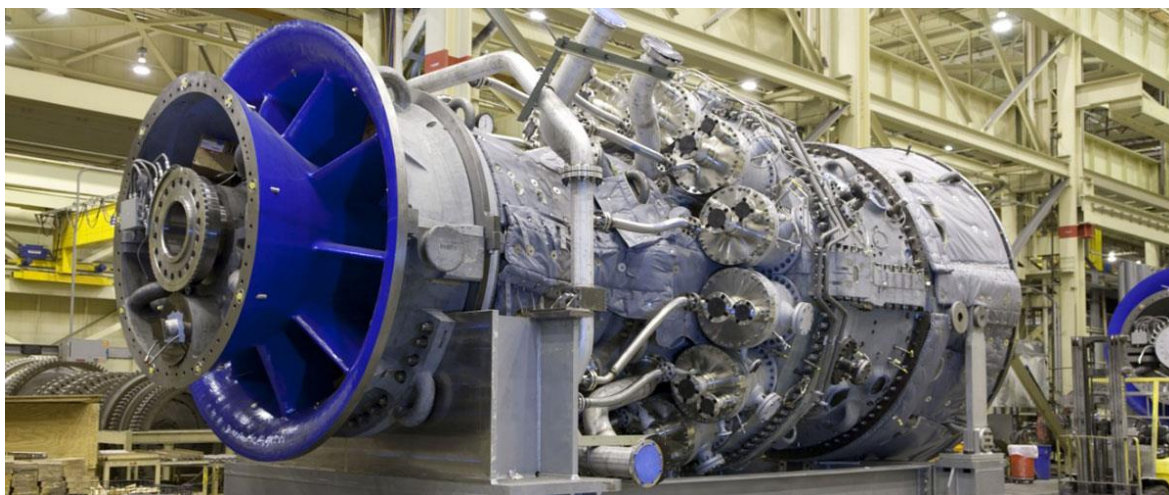
Στη βιβλιογραφία, έχουν ληφθεί υπόψιν διάφορες τεχνολογίες παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως κινητήριες μονάδες σε εφαρμογές τριπαραγωγής. Οι τεχνολογίες αυτές θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, στις τεχνολογίες που βασίζονται στην καύση (μηχανές Stirling, αεριοστρόβιλοι, μονάδες που λειτουργούν με κύκλο Rankine και εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης) και ηλεκτροχημικές τεχνολογίες (κυψέλες καυσίμου). Κάποιες από αυτές τις τεχνολογίες, όπως οι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης και οι αεριοστρόβιλοι, είναι άμεσα διαθέσιμες στην αγορά, ενώ άλλες εξακολουθούν να βρίσκονται στο στάδιο της έρευνας και της ανάπτυξης, με ελάχιστα συστήματα να είναι διαθέσιμα στην αγορά, όπως μονάδες Stirling, μονάδες οργανικού κύκλου Rankine (ORC) και μονάδες κυψελών καυσίμου. Ακολουθεί μια σύντομη σύγκριση αυτών των κινητήριων μονάδων.

Οι εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης στα μερικά φορτία, υψηλή ευελιξία και σύντομο χρόνο εκκίνησης λίγο μεγαλύτερο από 10 sec. Υστερούν όμως λόγω του μεγάλου αριθμού των κινούμενων μερών τους, των υψηλών επιπέδων ήχου και μηχανικών δονήσεων και των υψηλών ποσοστών εκπομπών. Η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς ενός συστήματος τριπαραγωγής με εμβολοφόρο μηχανή εσωτερικής καύσης αγγίζει τα 75 MW. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στα 25 – 45% και ο συνολικός βαθμός απόδοσης στα 65 – 80%. Ο χρόνος ζωής μιας εμβολοφόρου μηχανής εσωτερικής καύσης είναι γύρω στις 20000 – 50000 ώρες. Τα καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι το καύσιμο diesel, το φυσικό αέριο, το προπάνιο, το βιοαέριο και τα αέρια από χώρους υγειονομικής ταφής. Ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την παραγόμενη θερμική κυμαίνεται στα 0.5 – 1. Η θερμοκρασία των θερμικών αποβλήτων κυμαίνεται στους 80 – 200 °C. Η θερμική ισχύς που παράγεται ανά 1 kWh ηλεκτρικής ισχύος κυμαίνεται στα 3376 – 5908 kJ/kWh. Το οικολογικό αποτύπωμα κυμαίνεται στα 0.062 – 0.47 sqft/kWe. Το κόστος επένδυσης κυμαίνεται στα 340 – 1600 \$/kWe. Οι εκπομπές NO_x και CO₂ είναι αντίστοιχα έως 10 kg/MWh και έως 650 kg/MWh^[2]. Στην Εικ. 5 παρουσιάζεται μια τυπική εμβολοφόρος μηχανή εσωτερικής καύσης.



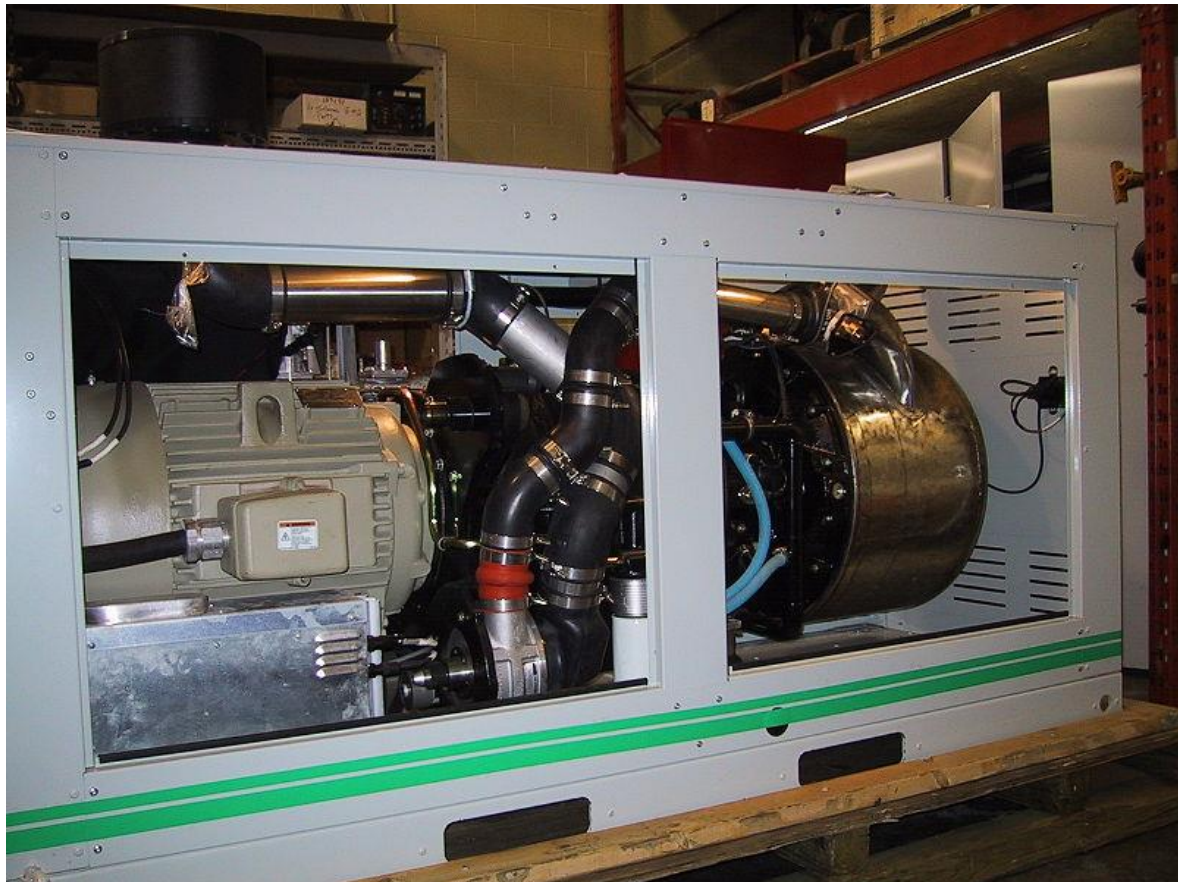
Εικ. 5: Τυπική εμβολοφόρος μηχανή εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας^[28]

Οι αεριοστρόβιλοι υπερτερούν με συμπαγή και ευέλικτο σχεδιασμό, χαμηλά επίπεδα συντήρησης και μέτρια θερμοκρασία εξόδου. Υστερούν όμως λόγω μη ικανοποιητικού βαθμού απόδοσης στα μερικά φορτία και λόγω ακαταλληλότητας σε εφαρμογές με διακοπτόμενη λειτουργία και τακτικές επανεκκινήσεις. Η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς ενός συστήματος με αεριοστρόβιλο αγγίζει τα 250 MW. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στα 18 – 36% και ο συνολικός βαθμός απόδοσης στα 65 – 75%. Ο χρόνος ζωής ενός αεριοστρόβιλου κυμαίνεται στις 5000 – 40000 ώρες. Τα καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι το προπάνιο, το φυσικό αέριο, το ελαφρύ πετρέλαιο και το βιοαέριο. Ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την παραγόμενη θερμική κυμαίνεται στα 0.4 – 0.7. Η θερμοκρασία των θερμικών αποβλήτων κυμαίνεται στους 120 – 350 °C. Η θερμική ισχύς που παράγεται ανά 1 kWh ηλεκτρικής ισχύος κυμαίνεται στα 3376 – 7174 kJ/kWh. Το οικολογικό αποτύπωμα κυμαίνεται στα 0.18 – 0.42 sqft/kWe. Το κόστος επένδυσης κυμαίνεται στα 450 – 1500 \$/kWe. Ο χρόνος εκκίνησης είναι μεγαλύτερος των 10 λεπτών. Οι εκπομπές NO_x και CO₂ κυμαίνονται αντίστοιχα στα 0.1 - 0.5 kg/MWh και στα 580 – 720 kg/MWh^[2]. Στην Εικ. 6 παρουσιάζεται ένας τυπικός αεριοστρόβιλος που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας.



Εικ. 6: Τυπικός αεριοστρόβιλος που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ενέργειας^[29]

Οι μηχανές Stirling είναι κατάλληλες για οικιακές εφαρμογές, τα επίπεδα θορύβου και εκπομπών είναι χαμηλά και έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Δυστυχώς όμως απαιτούν μεγάλο χρόνο έναρξης λειτουργίας, το επενδυτικό κόστος είναι μεγάλο, η ικανότητα προσαρμογής της παραγόμενης ενέργειας είναι περιορισμένη και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος στα μερικά φορτία είναι μέτριος. Η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς ενός συστήματος με μηχανή Stirling αγγίζει μόλις τα 55 kW. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στα 15 – 35% και ο συνολικός βαθμός απόδοσης στα 60 – 80%. Ο χρόνος ζωής μιας μηχανής Stirling κυμαίνεται στις 10000 – 30000 ώρες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε καύσιμο συμπεριλαμβανομένων του φυσικού αερίου και των βιοκαυσίμων. Ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την παραγόμενη θερμική κυμαίνεται στα 0.15 – 0.4. Η θερμοκρασία των θερμικών αποβλήτων αγγίζει τους 85 °C. Το οικολογικό αποτύπωμα κυμαίνεται στα 3 – 6.5 sqft/kWe. Το κόστος επένδυσης κυμαίνεται στα 1300 – 2000 \$/kWe. Οι εκπομπές NO_x και CO₂ είναι αντίστοιχα 0.23 kg/MWh και στα 672 kg/MWh^[2]. Στην Εικ. 7 παρουσιάζεται μια μηχανή Stirling που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ενέργειας.



Εικ. 7: Μηχανή Stirling που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ενέργειας^[30]

Οι κυψέλες καυσίμου υπερτερούν με υψηλό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, υψηλή θερμοκρασία εξόδου, πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης στα μερικά φορτία και χαμηλά επίπεδα θορύβου και εκπομπών. Στα μειονεκτήματα τους παρατηρούμε το υψηλό κόστος κεφαλαίου και επένδυσης, τον πολύπλοκο σχεδιασμό και τη γνώση απαραίτητων τεχνικών αποδοτικής αποθήκευσης υδρογόνου. Η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς ενός συστήματος με κυψέλες καυσίμου αγγίζει τα 2 MW. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στα 37 – 60% και ο συνολικός βαθμός απόδοσης στα 55 – 80%. Ο χρόνος ζωής των κυψελών καυσίμου κυμαίνεται στις 10000 – 65000 ώρες. Τα καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι το υδρογόνο, η μεθανόλη, το φυσικό αέριο και το προπάνιο. Ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την παραγόμενη θερμική κυμαίνεται στα 0.5 – 2. Η θερμοκρασία των θερμικών αποβλήτων αγγίζει τους 1000 °C. Η θερμική ισχύς που παράγεται ανά 1 kWh ηλεκτρικής ισχύος κυμαίνεται στα 1900 – 4431 kJ/kWh. Ο χρόνος εκκίνησης ξεπερνά τις 3 ώρες. Το οικολογικό αποτύπωμα κυμαίνεται στα 0.5 – 2 sqft/kWe. Το κόστος επένδυσης κυμαίνεται στα 2500 – 3500 \$/kWe. Οι εκπομπές NO_x και CO₂ κυμαίνονται αντίστοιχα στα 0.005 - 0.01 kg/MWh και στα 430 – 490 kg/MWh^[2]. Στην Εικ. 8 παρουσιάζεται μία κυψέλη καυσίμου που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας.



Εικ. 8: Κυψέλη καυσίμου που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ενέργειας^[31]

Οι μονάδες οργανικού κύκλου Rankine υπερτερούν με υψηλή ευελιξία, απλό σχεδιασμό, ευρύ φάσμα καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και χαμηλή πίεση και θερμοκρασία λειτουργίας. Δυστυχώς όμως ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι σχετικά μικρός και απαιτείται περισσότερη έρευνα και εμπορική ανάπτυξη στο πεδίο του οργανικού κύκλου Rankine. Η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς ενός συστήματος με μονάδες οργανικού κύκλου Rankine αγγίζει τα 250 MW. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στα 15 – 38% και ο συνολικός βαθμός απόδοσης αγγίζει τα 80%. Ο χρόνος ζωής μιας μονάδας οργανικού κύκλου Rankine κυμαίνεται στις 30000 – 50000 ώρες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε καύσιμο συμπεριλαμβανομένων του φυσικού αερίου και των βιοκαυσίμων. Ο λόγος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς την παραγόμενη θερμική κυμαίνεται στα 0.15 – 0.4. Η θερμοκρασία των θερμικών αποβλήτων αγγίζει τους 100 °C. Η θερμική ισχύς που παράγεται ανά 1 kWh ηλεκτρικής ισχύος κυμαίνεται στα 1065 – 52753 kJ/kWh. Ο βαθμός απόδοσης στα μερικά φορτία είναι μέτριος και ο χρόνος εκκίνησης του συστήματος ξεπερνά τη μία ώρα. Το οικολογικό αποτύπωμα είναι μικρότερο των 0.1 sqft/kWe. Τα επίπεδα θορύβου είναι μέτρια. Το κόστος επένδυσης κυμαίνεται στα 1000 – 2000 \$/kWe. Οι εκπομπές NO_x και CO₂ εξαρτώνται από το καύσιμο που χρησιμοποιείται^[2]. Στην Εικ. 9 παρουσιάζεται μια μονάδα οργανικού κύκλου Rankine που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ενέργειας.



Εικ. 9: Τυπική μονάδα οργανικού κύκλου Rankine που χρησιμοποιείται στην παραγωγή ενέργειας^[32]

Παρατηρείται ότι και οι πέντε παραπάνω κινητήριες μονάδες, ασχέτως της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και του βαθμού απόδοσης τους, εκπέμπουν μεγάλα ποσοστά διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και οξειδίων του αζώτου (NO_x). Όπως προαναφέρθηκε βέβαια, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, σε παγκόσμιο επίπεδο, αυξάνεται κάθε χρόνο με συνέπεια να αυξάνονται και οι αντίστοιχες εκπομπές ρύπων. Με σκοπό την αποφυγή της περαιτέρω μόλυνσης του περιβάλλοντος, είναι δυνατή η ανάπτυξη ενός καινοτόμου συστήματος τριπαραγωγής που χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο συμπιεσμένο αέρα και μπορεί να κινείται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

3. Σύστημα τριπαραγωγής με πεπιεσμένο αέρα και αποθήκευση θερμότητας

3.1. Εισαγωγή στο σύστημα τριπαραγωγής

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται ένα καινοτόμο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο αποθηκεύει την πλεονάζουσα ενέργεια σε μορφή πεπιεσμένου αέρα και θερμικής ενέργειας. Η μεγάλη διαφορά του συστήματος αυτού από ένα συμβατικό σύστημα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα (CAES), έγκειται στο γεγονός ότι το σύστημα αυτό επιτρέπει, μέσω της έκλυσης ενέργειας, την τριπαραγωγή ηλεκτρισμού, θέρμανσης και ψύξης. Η ψυκτική ισχύς του συστήματος αυτού παράγεται με την άμεση εκτόνωση του πεπιεσμένου αέρα και όχι με τη χρήση τεχνολογίας ψύξης απορρόφησης, όπως γίνεται στα συμβατικά συστήματα τριπαραγωγής. Επίσης, το σύστημα αυτό είναι ικανό να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των καταναλωτών σε ηλεκτρισμό, θέρμανση και ψύξη ελέγχοντας απλά την πίεση και τη θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο ενός στροβίλου εκτόνωσης αερίου^[1].

Στο παρελθόν, η έρευνα πάνω στην τριπαραγωγή είχε επικεντρωθεί κυρίως σε πολύ μεγάλης κλίμακας συστήματα και είχε δοθεί ελάχιστη προσοχή στη μικρο-τριπαραγωγή και στην οικιακή τριπαραγωγή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για εφαρμογές μικρής κλίμακας, οι περισσότεροι μέθοδοι παρέχουν ψυκτικό φορτίο μέσω του αντίστροφου κύκλου Rankine, ο οποίος απαιτεί εξαρτήματα υψηλού οικονομικού κόστους, όπως ψύκτες απορρόφησης και λέβητες. Επιπροσθέτως του υψηλού οικονομικού κόστους, πολλοί ψύκτες απορρόφησης λειτουργούν με τοξικές και επιβλαβείς ουσίες, όπως το βρωμιούχο λίθιο (LiBr), οι οποίες, εάν υπάρξει διαρροή, ενέχουν κινδύνους για την υγεία. Πρόσφατα, ως εναλλακτική λύση, η τεχνολογία ψύξης αέρα έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον για την παροχή ψυκτικής ισχύος. Ο ψυκτικός κύκλος του αέρα (γνωστός και ως αντίστροφος κύκλος Brayton) παράγει ψυκτική ισχύ μέσω της άμεσης εκτόνωσης πεπιεσμένου αέρα. Η διεργασία αυτή απαιτεί μια απλή διαμόρφωση συστήματος και μέσω αυτής παρέχεται ψυχρός αέρας, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για οικιακή ψύξη. Παρά το γεγονός ότι ο συντελεστής απόδοσης COP ενός συστήματος ψύξης αέρα είναι χαμηλότερος από εκείνον ενός συστήματος ψύξης συμπίεσης ατμού, το σύστημα ψύξης αέρα γίνεται όλο και πιο ανταγωνιστικό για διπλή παροχή ηλεκτρικής και ψυκτικής ισχύος. Πράγματι, οι δυνατότητες της τεχνολογίας ψύξης αέρα έχουν παρουσιαστεί στα αυτοκίνητα πεπιεσμένου αέρα, όπου μέσω του πεπιεσμένου αέρα δεν παρέχεται μόνο η ισχύς στον άξονα του αυτοκινήτου αλλά επίσης παράγεται και ψυκτική ισχύς (για κλιματισμό). Στο σύστημα αυτό παρουσιάζεται επίσης ένα εξαιρετικό

επίπεδο ασφάλειας στην αποθήκευση αέρα. Ο αέρας αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή από ανθρακονήματα σε υψηλή πίεση της τάξης των 30-35 MPa. Το αξιοσημείωτο είναι ότι ακόμα κι αν υπάρξει ρωγμή στη δεξαμενή, αυτή δε θα ανατιναχτεί αλλά ο αέρας υψηλής πίεσης θα διαφύγει διαμέσου της ρωγμής παράγοντας έναν δυνατό αλλά ακίνδυνο κρότο^[1].

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι ένα σύστημα μικρο-τριπαραγωγής για κατοικίες και μικρά συγκροτήματα γραφείων. Μια τέτοια τεχνολογία εμπλέκει την αποθήκευση ενέργειας σε μορφή πεπιεσμένου αέρα και θερμικής ενέργειας, όπου η θερμική ενέργεια μπορεί να προέλθει από τον ήλιο, γεωθερμικά ή μέσω θερμικής επεξεργασίας απορριμμάτων και αποθηκεύεται σε μορφή αισθητής θερμότητας σε κάποιο θερμικό υγρό. Οι μονάδες αποθήκευσης στο σύστημα τριπαραγωγής επιτρέπουν μεταβλητό φορτίο λειτουργίας σε υψηλή απόδοση, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να ανταποκριθεί στις διάφορες απαιτήσεις. Συγκεκριμένα, αν ο συμπιεστής κινείται απευθείας από τον άνεμο και η θερμική ενέργεια παρέχεται από τον ήλιο τότε το προτεινόμενο σύστημα μπορεί να γίνει ένας αυτόνομος πάροχος ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές εκτός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2. Διαμόρφωση του συστήματος

Στην Εικ. 1 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος τριπαραγωγής, όπου ηλεκτρισμός και θερμική ενέργεια θα χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί η απαιτούμενη ενέργεια^[1]. Όταν είναι διαθέσιμη πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια, αυτή αποθηκεύεται σε μορφή πεπιεσμένου αέρα, ο οποίος παράγεται από τον συμπιεστή 1 και αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης 6 (με τη βαλβίδα αποκοπής 5 ανοιχτή και τη βαλβίδα 7 κλειστή). Καθώς παράγεται θερμότητα κατά τη διάρκεια της συμπίεσης, για την καλύτερη απόδοση ολόκληρου του συστήματος, είναι απαραίτητη η ανάκτηση αυτού του μέρους της ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση εναλλακτών θερμότητας (ψύκτης 2). Για την αφαίρεση του νερού που συμπυκνώθηκε από τον αέρα, κατά τη διάρκεια της ψύξης, χρησιμοποιούνται αποστραγγιστές (3) μαζί με έναν ξηραντήρα (4). Εντωμεταξύ, θερμική ενέργεια από άλλες πηγές θερμότητας, αποθηκεύεται σε θερμικό υγρό που βρίσκεται στη δεξαμενή θερμότητας (12) σε μορφή αισθητής θερμότητας. Ο σκοπός της χρήσης θερμικού υγρού για την αποθήκευση θερμότητας είναι η επίτευξη καλύτερου ελέγχου της διαδικασίας έκλυσης της ενέργειας. Επίσης, μπορούν να τοποθετηθούν στη δεξαμενή θερμότητας στερεά υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, για να αυξηθεί η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας^[1].

Όταν υπάρχει απαίτηση ενέργειας, η βαλβίδα αποκοπής 5 κλείνει, ενώ η βαλβίδα 7 ανοίγει, έτσι ώστε να επιτραπεί η εκτόνωση του πεπιεσμένου αέρα για την παραγωγή ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου. Στη διεργασία αυτή, ο αέρας υψηλής πίεσης περνάει πρώτα από τον ρυθμιστή πίεσης 8 (για να ρυθμιστεί η ροή του αέρα και η πίεση), μετά από τον εναλλάκτη θερμότητας 9 (για πρόσδοση θερμότητας και έλεγχο της θερμοκρασίας) και τέλος από τον στρόβιλο 10 για την εκτόνωση, η οποία θα παράγει ηλεκτρική ισχύ διαμέσου της γεννήτριας 11. Εάν η ποσότητα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη, τότε η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του συμπιεστή, ο οποίος θα παράγει πεπιεσμένο αέρα. Ο αέρας που εξέρχεται από τον στρόβιλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την ψύξη ή τη θέρμανση του χώρου, σε συνάρτηση βέβαια με τη θερμοκρασία του χώρου και τις απαιτήσεις θερμικού φορτίου^[1].

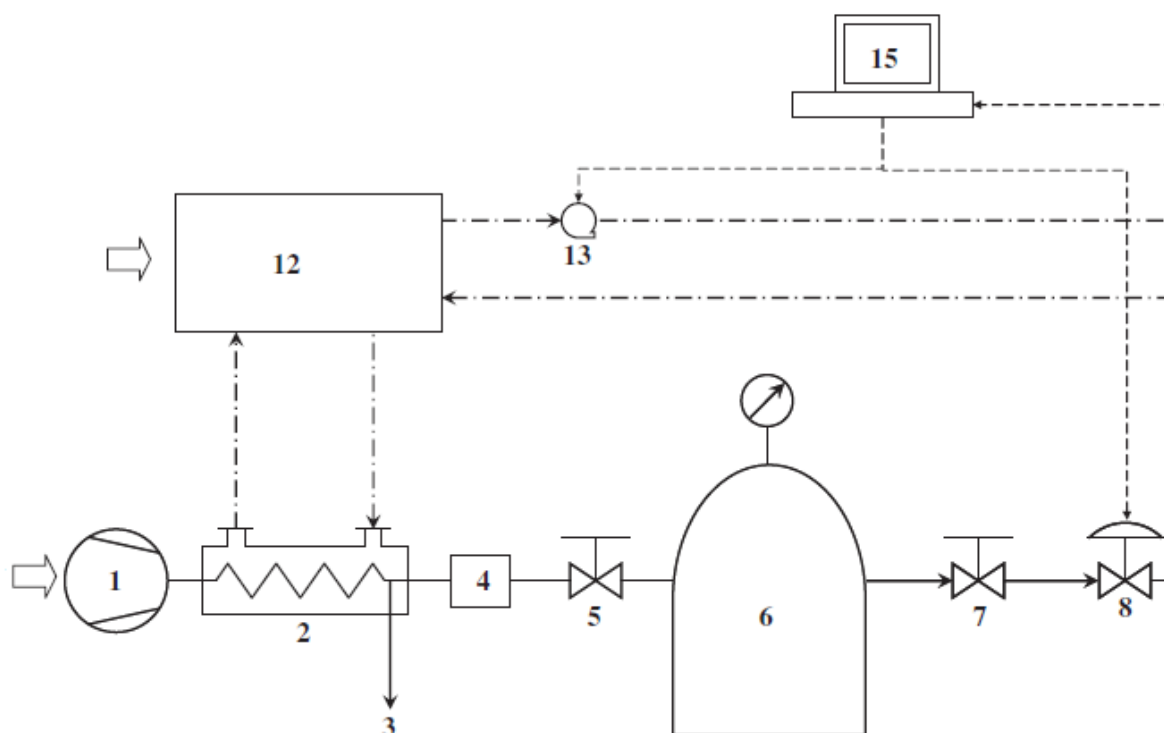
Οι απαιτήσεις των καταναλωτών διαφέρουν συχνά ως προς τον χρόνο, επειδή εξαρτώνται από το κλίμα και την ανθρώπινη δραστηριότητα. Αυτό αντιμετωπίζεται μεταβάλλοντας την πίεση εισόδου και τη θερμοκρασία μέσω του ρυθμιστή πίεσης 8 και της αντλίας θερμικού υγρού 13. Η δεξαμενή θερμότητας μπορεί να παρέχει ζεστό νερό και θέρμανση για τον χώρο, όταν η θερμογόνο δύναμη του αερίου που εξέρχεται από τον στρόβιλο είναι ανεπαρκής ή μηδενική. Παρά το γεγονός ότι αυτή η εργασία επικεντρώνεται στο σύστημα τριπαραγωγής, οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας σε πρακτικές εφαρμογές μπορούν επίσης να ικανοποιηθούν, εν μέρει, απευθείας από πρωτογενείς πηγές ενέργειας. Αυτό μπορεί να αυξήσει τη συνολική ενεργειακή απόδοση σε πολλές περιπτώσεις. Για παράδειγμα, αν μια μηχανή Diesel χρησιμοποιηθεί ως κύρια μονάδα παροχής ισχύος, η αποβαλλόμενη θερμότητα μπορεί, όχι μόνο, να επανακτηθεί από τη δεξαμενή θερμικής ενέργειας, αλλά επίσης η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει στο βέλτιστο φορτίο, με την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια να αποθηκεύεται (στη μορφή πεπιεσμένου αέρα). Ως εκ τούτου, ο βαθμός απόδοσης της μηχανής αυξάνεται^[1].

Το παρόν σύστημα μικρο-τριπαραγωγής αποτελείται από μία μονάδα συμπίεσης και αποθήκευσης αέρα, μια μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και μια μονάδα έκλυσης και απολαβής ενέργειας.

3.3. Μονάδα συμπίεσης και αποθήκευσης αέρα

3.3.1. Γενικά για τη μονάδα συμπίεσης και αποθήκευσης αέρα

Η μονάδα συμπίεσης και αποθήκευσης αέρα αποτελείται από έναν εμβολοφόρο συμπιεστή με ενδιάμεσους ψύκτες, αποστραγγιστές, έναν ξηραντήρα, μια δεξαμενή αποθήκευσης αέρα υψηλής πίεσης, δύο βαλβίδες αποκοπής, έναν ρυθμιστή πίεσης, μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας και ένα σύστημα ελέγχου.



Εικ. 2: Μονάδα συμπίεσης και αποθήκευσης αέρα^[1]

Στη μονάδα αυτή, αέρας σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος εισέρχεται σε εμβολοφόρο συμπιεστή τεσσάρων σταδίων συμπίεσης. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης παράγεται θερμότητα και ως συνέπεια, εκτός από την πίεση, αυξάνεται και η θερμοκρασία του αέρα. Επειδή ο πεπιεσμένος αέρας θα χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές ψύξης, για την αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος, είναι απαραίτητη η ψύξη του. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν ενδιάμεσο ψύκτη (intercooler) στο τέλος κάθε σταδίου συμπίεσης. Πριν εισέλθει ο πεπιεσμένος αέρας στη δεξαμενή αποθήκευσης αέρα υψηλής πίεσης, πρέπει να αφαιρεθεί το νερό που συμπυκνώθηκε κατά τη διάρκεια της ενδιάμεσης ψύξης. Για τον

λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται αποστραγγιστές και ένας ξηραντήρας. Έπειτα, ο πεπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται στη δεξαμενή υψηλής πίεσης μέχρι να υπάρξει ζήτηση ενέργειας.

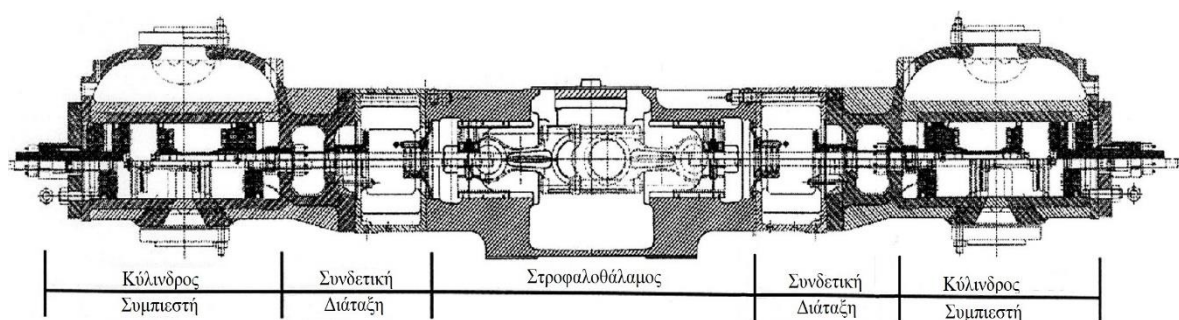
3.3.2. Εμβολοφόρος συμπιεστής

Οι εμβολοφόροι ή αλλιώς παλινδρομικοί συμπιεστές είναι μηχανές θετικής μετατόπισης, στις οποίες το στοιχείο συμπίεσης και μετατόπισης είναι ένα έμβολο που κινείται παλινδρομικά εντός ενός κυλίνδρου. Υπάρχουν δύο τύποι εμβολοφόρων συμπιεστών:

- Υψηλής ταχύτητας
- Χαμηλής ταχύτητας

Οι συμπιεστές υψηλής ταχύτητας είναι γνωστοί και ως συμπιεστές ημίκλειστου τύπου και οι συμπιεστές χαμηλής ταχύτητας είναι γνωστοί και ως συμπιεστές κλειστού τύπου.

Ο όρος “ημίκλειστος” χρησιμοποιείται επειδή αυτή η κατηγορία εμβολοφόρων συμπιεστών είναι ξεχωριστή από τον οδηγό της. Ο συμπιεστής ημίκλειστου τύπου συνήθως κινείται μέσω μιας μηχανής ή ενός ηλεκτροκινητήρα. Συχνά απαιτείται η χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Η ταχύτητα λειτουργίας κυμαίνεται κυρίως μεταξύ 900 και 1.800 rpm. Οι συμπιεστές ημίκλειστου τύπου είναι εύκολοι στην εγκατάσταση, έχουν σχετικά χαμηλό αρχικό κόστος, μετακινούνται εύκολα και κυκλοφορούν σε διάφορα μεγέθη. Ωστόσο, οι συμπιεστές ημίκλειστου τύπου έχουν μεγαλύτερο κόστος συντήρησης από του κλειστού τύπου. Στην Εικ. 3 παρουσιάζεται η διατομή ενός τυπικού συμπιεστή ημίκλειστου τύπου και στην Εικ. 4 παρουσιάζεται ένα σύστημα συμπιεστή ημίκλειστου τύπου^[4].

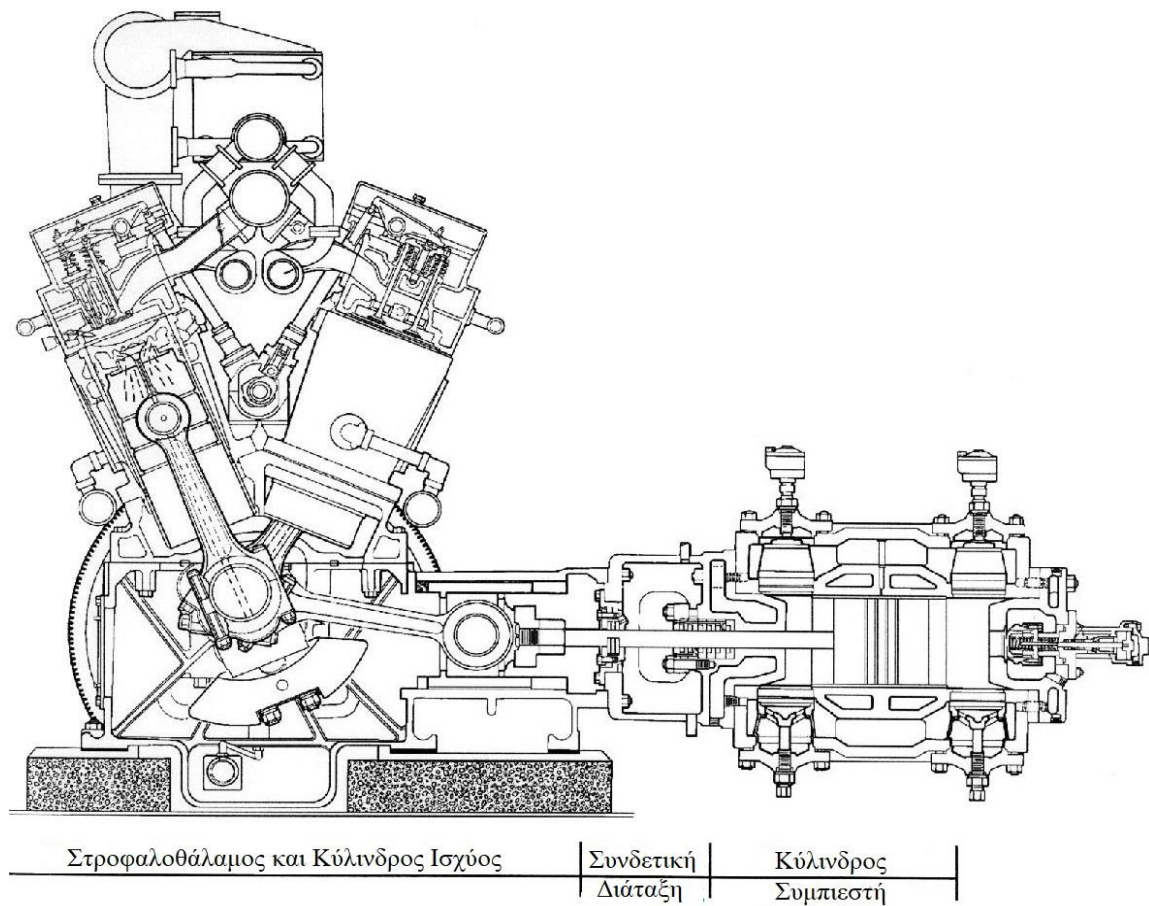


Εικ.3: Διατομή τυπικού συμπιεστή ημίκλειστου τύπου^[4]



Εικ. 4: Συμπιεστής ημίκλειστου τύπου^[33]

Ο όρος “κλειστός” χρησιμοποιείται επειδή οι κύλινδροι ισχύος που κινούν τον συμπιεστή είναι τοποθετημένοι μέσα στο πλαίσιο που περιέχει τους κυλίνδρους του συμπιεστή. Η τυπική ταχύτητα μιας μονάδας συμπιεστή κλειστού τύπου κυμαίνεται κυρίως μεταξύ 200 και 600 rpm. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργοστάσια φυσικού αερίου και εφαρμογές σωληνώσεων, όπου η αποδοτικότητα του καυσίμου και η διάρκεια ζωής είναι ζωτικής σημασίας. Οι συμπιεστές κλειστού τύπου έχουν τη δυνατότητα να είναι εξοπλισμένοι με δύο έως δέκα κυλίνδρους συμπιεστών ισχύος από 120 έως 12.000 hp. Οι συμπιεστές κλειστού τύπου προσφέρουν υψηλό βαθμό απόδοσης σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας και απαιτούν λιγότερη συντήρηση σε σχέση με τους συμπιεστές ημίκλειστου τύπου. Ωστόσο, οι συμπιεστές κλειστού τύπου πρέπει να εγκατασταθούν μόνιμα, απαιτούν γερά θεμέλια και έχουν υψηλό βαθμό καταστολής κραδασμών και παλμών. Επίσης έχουν υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης^[4]. Στην Εικ. 5 παρουσιάζεται η διατομή ενός τυπικού συμπιεστή κλειστού τύπου και στην Εικ. 6 παρουσιάζεται ένα σύστημα συμπιεστή κλειστού τύπου.



Εικ. 5: Διατομή τυπικού συμπίεστή κλειστού τύπου^[4]



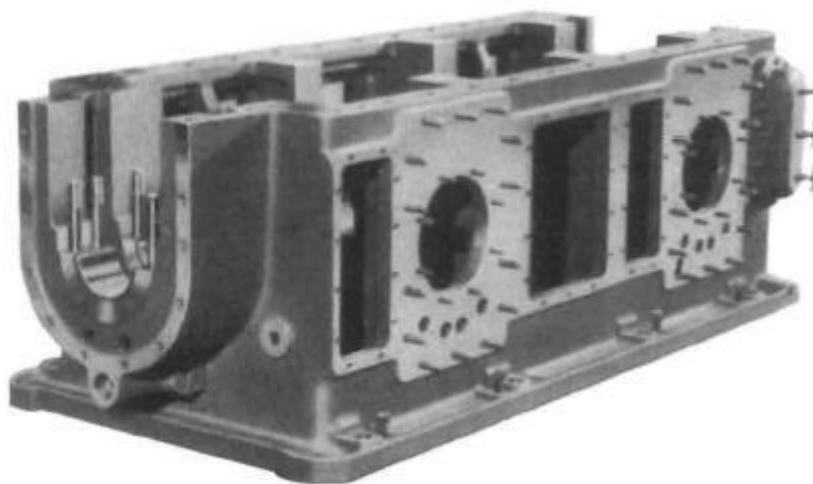
Εικ. 6: Συμπίεστής κλειστού τύπου^[34]

Στο σύστημα τριπαραγωγής που μελετάται χρησιμοποιείται ένας **συμπίεστής κλειστού τύπου τεσσάρων κυλίνδρων** (τεσσάρων βαθμών συμπίεσης).

Τα βασικά εξαρτήματα ενός εμβολοφόρου συμπίεστή αναλύονται παρακάτω.

Κέλυφος

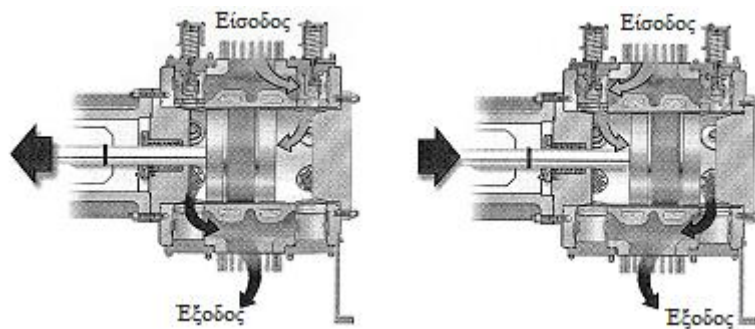
Το κέλυφος είναι ένα βαρύ, ανθεκτικό περίβλημα που περιέχει όλα τα περιστρεφόμενα μέρη του συμπιεστή και σε αυτό είναι τοποθετημένος ο κύλινδρος και ο οδηγός του ζυγώματος. Κατασκευαστές συμπιεστών σχεδιάζουν τα κέλυφη για μέγιστη συνεχή ιπποδύναμη και φορτίο. Στους συμπιεστές κλειστού τύπου, όπως είναι ο συμπιεστής του συστήματος τριπαραγωγής, συνήθως ο συμπιεστής και οι κύλινδροι ισχύος είναι τοποθετημένοι στο ίδιο κέλυφος και κινούνται από την ίδια στροφαλοφόρο άτρακτο. Οι κύλινδροι στους συμπιεστές κλειστού τύπου είναι συνήθως διατεταγμένοι μόνο από τη μία πλευρά του κελύφους^[4]. Στην Εικ.7 παρουσιάζεται ένα τυπικό κέλυφος.



Εικ. 7: Τυπικό κέλυφος εμβολοφόρου συμπιεστή

Κύλινδρος

Ο κύλινδρος είναι ένα δοχείο πίεσης που περιέχει το αέριο του κύκλου συμπίεσης. Οι κύλινδροι μονής ενέργειας συμπιέζουν το αέριο σε μία μόνο κατεύθυνση της διαδρομής του εμβόλου. Η εξαγωγή του αερίου μπορεί να βρίσκεται από τη μεριά της κεφαλής ή του διωστήρα. Οι κύλινδροι διπλής ενέργειας συμπιέζουν το αέριο και από τις δύο κατευθύνσεις της διαδρομής του εμβόλου. Οι περισσότεροι παλινδρομικοί συμπιεστές, όπως και ο συμπιεστής του συστήματος τριπαραγωγής, χρησιμοποιούν κυλίνδρους διπλής ενέργειας. Στην Εικ. 8 παρουσιάζονται δύο κύλινδροι διπλής ενέργειας^[4].



Εικ. 8: Κύλινδροι διπλής ενέργειας^[4]

Η επιλογή του υλικού του κυλίνδρου καθορίζεται από την πίεση λειτουργίας. Ο χυτοσίδηρος χρησιμοποιείται συνήθως για πιέσεις έως 68 bar, ο ελατός χυτοσίδηρος χρησιμοποιείται για πιέσεις έως 103 bar, ο χυτοχάλυβας χρησιμοποιείται για πιέσεις από 103 bar μέχρι 172 bar και ο σφυρήλατος χάλυβας χρησιμοποιείται για πιέσεις μεγαλύτερες των 172 bar. Η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση λειτουργίας ενός κυλίνδρου (maximum allowable working pressure, MAWP) θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10% μεγαλύτερη από την πίεση εξόδου σχεδιασμού (τουλάχιστον 1.72 bar). Για τον λόγο αυτό τοποθετείται ένας αισθητήρας ασφαλείας υψηλής πίεσης (PSH) πάνω από την επιτρεπόμενη πίεση εξόδου σχεδιασμού και μια ανακουφιστική βαλβίδα (PSV) πάνω από τον αισθητήρα ασφαλείας υψηλής πίεσης (PSH). Επειδή ο συμπιεστής του συστήματος τριπαραγωγής είναι ικανός να εργαστεί έως και τα 300 bar, χρησιμοποιούνται κύλινδροι από σφυρήλατο χάλυβα^[4].

Το επίπεδο φθοράς των μερών που τρίβονται (δακτύλιοι εμβόλου, εσωτερική περίμετρος του κυλίνδρου, διωστήρας κ.α.) είναι επίσης ένα κριτήριο για την επιλογή του υλικού του κυλίνδρου. Οι κύλινδροι παρουσιάζουν φθορά στο σημείο επαφής με τους δακτυλίους του εμβόλου. Σε οριζόντιες τοποθετήσεις, η φθορά του κυλίνδρου είναι μεγαλύτερη στο κάτω μέρος λόγω του βάρους του εμβόλου. Για να αποφευχθεί αυτή η φθορά, στους περισσότερους εμβολοφόρους συμπιεστές, χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικοί δακτύλιοι^[4].

Οι κύλινδροι, συνήθως, παρέχονται μαζί με χιτώνιο για τη μείωση του κόστους επισκευής. Τα χιτώνια πιέζονται και συρρικνώνονται στο εσωτερικό του κυλίνδρου για να εξασφαλιστεί η μη ολίσθηση τους. Η αντικατάσταση ενός χιτωνίου κυλίνδρου είναι λιγότερο δαπανηρή από την αντικατάσταση ολόκληρου του κυλίνδρου. Επιπροσθέτως, η απόδοση του συμπιεστή μπορεί να προσαρμοστεί σε νέες απαιτήσεις μεταβάλλοντας την εσωτερική διάμετρο του χιτωνίου. Ωστόσο, το χιτώνιο του κυλίνδρου αυξάνει την απόσταση μεταξύ

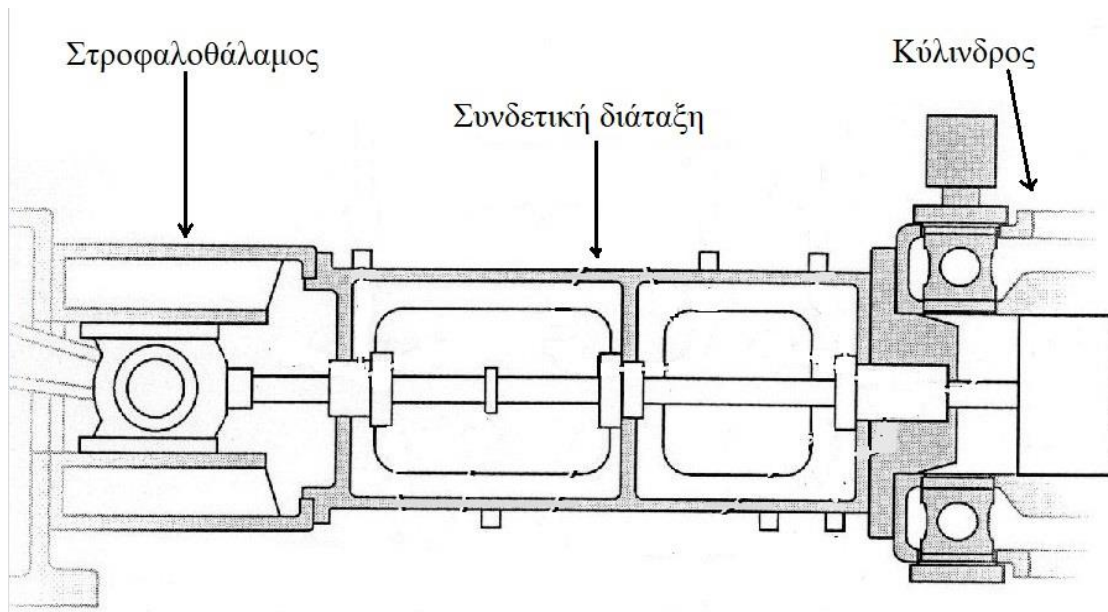
βαλβίδας και εμβόλου, μειώνει την αποτελεσματικότητα του χιτώνιου ψύξης και μειώνει τον όγκο του συμπιεστή^[4]. Στην Εικ. 9 παρουσιάζεται ένα χιτώνιο κυλίνδρου.



Εικ. 9: Χιτώνιο κυλίνδρου^[35]

Συνδετική διάταξη

Η συνδετική διάταξη δημιουργεί απόσταση μεταξύ του κυλίνδρου του συμπιεστή και του κελύφους του συμπιεστή. Οι συνδετικές διατάξεις μπορούν να τοποθετηθούν είτε σε διάταξη μονού διαμερίσματος είτε σε διάταξη διπλού διαμερίσματος. Στη διάταξη μονού διαμερίσματος ο χώρος μεταξύ του κυλίνδρου και του διαφράγματος του συμπιεστή επιμηκύνεται έτσι ώστε κανένα τμήμα του διωστήρα δεν εισέρχεται ούτε στον στροφαλοθάλαμο ούτε στον στυπιοθλίπτη του κυλίνδρου. Μεταξύ του κυλίνδρου και του στροφαλοθαλάμου κινείται λιπαντικό λάδι. Εάν υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης λόγω του λαδιού, μπορεί να τοποθετηθεί ένας εκτροπέας λαδιού για να αποφευχθεί η είσοδος του λαδιού στο κέλυφος του συμπιεστή. Σε τοξικές εφαρμογές χρησιμοποιείται διάταξη διπλού διαμερίσματος. Στη συγκεκριμένη διάταξη κανένα μέρος του διωστήρα δεν εισέρχεται ούτε στον στροφαλοθάλαμο ούτε στο διαμέρισμα που βρίσκεται πλησίον του κυλίνδρου. Στην Εικ. 10 παρουσιάζεται η διατομή μιας συνδετικής διάταξης διπλού διαμερίσματος ανάμεσα στον στροφαλοθάλαμο και τον κύλινδρο του συμπιεστή^[4].



Εικ. 10: Διατομή συνδετικής διάταξης διπλού διαμερίσματος^[4]

Η θήκη της συνδετικής διάταξης θα πρέπει να εξαερίζεται κατά την αναρρόφηση του πρώτου σταδίου ή διαμέσου ενός συστήματος εξαερισμού. Οι συνδετικές διατάξεις περιέχουν έναν αγωγό για την εκκένωση τυχόν διαρρεόμενου αερίου από τη θήκη. Το διάφραγμα και η θήκη είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να κρατάνε μακριά το αέριο από τον στροφαλοθάλαμο. Για να διασφαλιστεί ότι το εργαζόμενο αέριο δεν θα μολύνει το λάδι του στροφαλοθαλάμου απαιτείται αποτελεσματικός εξαερισμός^[4].

Κάθε συμπιεστής θα πρέπει να είναι εξοπλισμένος με ένα ξεχωριστό σύστημα εξαερισμού και αποστράγγισης για τις συνδετικές διατάξεις και τη θήκη. Οι αγωγοί στις συνδετικές διατάξεις και στη θήκη θα πρέπει να διοχετεύονται σε ανοιχτό σύστημα εξαερισμού, το οποίο καταλήγει έξω και πάνω από το σύστημα του συμπιεστή σε οριζόντια απόσταση 8 m από την εξάτμιση του κινητήρα. Το σύστημα αποστράγγισης της συνδετικής διάταξης θα πρέπει να καταλήγει σε ένα ξεχωριστό κάρτερ, το οποίο θα αποστραγγίζεται χειροκίνητα. Το κάρτερ αυτό θα πρέπει να εξαερίζεται εξωτερικά και πάνω από το περίβλημα του συμπιεστή. Λιπαντικό λάδι από το κάρτερ μπορεί να αναμιχθεί με αργό πετρέλαιο ή, υπό ορισμένες συνθήκες, να μεταφερθεί για απόρριψη ή ανακύκλωση^[4].

Στροφαλοφόρος άτρακτος

Η στροφαλοφόρος άτρακτος περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του κελύφους και δίνει κίνηση στον διωστήρα, το βάκτρο του εμβόλου και το ίδιο το έμβολο^[4].

- Ο διωστήρας συνδέει την στροφαλοφόρο άτρακτο με το ζύγωμα
- Το ζύγωμα μετατρέπει την περιστροφική κίνηση του διωστήρα σε γραμμική, παλινδρομική κίνηση του εμβόλου
- Το βάκτρο συνδέει το ζύγωμα με το έμβολο

Στην Εικ. 11 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική στροφαλοφόρος άτρακτος.



Εικ. 11: Στροφαλοφόρος άτρακτος^[36]

Έμβολο

Το έμβολο βρίσκεται στο ένα άκρο του βάκτρου και λειτουργεί ως κινητό φράγμα στον κύλινδρο του συμπιεστή. Η επιλογή του υλικού βασίζεται στην αντοχή, το βάρος και τη συμβατότητα με το αέριο που συμπιέζεται. Το έμβολο συνήθως κατασκευάζεται από ελαφρύ υλικό όπως το αλουμίνιο ή και από πιο βαρύ όπως χυτοσίδηρο ή χάλυβα με κοίλο εσωτερικό για μείωση του βάρους. Συχνά προσαρμόζονται στο έμβολο θερμοπλαστικοί δακτύλιοι φθοράς για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του εμβόλου και για να μειωθεί ο κίνδυνος επαφής

εμβόλου – κυλίνδρου. Ο χυτοσίδηρος συνήθως παρέχει ικανοποιητικά χαμηλά επίπεδα τριβής, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη χρήσης δακτυλίων φθοράς^[4]. Στην Εικ. 12 παρουσιάζεται ένα τυπικό έμβολο συμπίεστή.



Εικ. 12: Έμβολο συμπίεστή^[37]

Οι δακτύλιοι φθοράς κατανέμουν το βάρος του εμβόλου κατά μήκος του πάτου του κυλίνδρου ή κατά μήκος του τοιχώματος του κυλίνδρου. Οι δακτύλιοι του εμβόλου ελαχιστοποιούν τη διαρροή αερίου μεταξύ του εμβόλου και του κυλίνδρου ή της οπής του τοιχώματος. Οι δακτύλιοι του εμβόλου είναι κατασκευασμένοι από υλικό ελαφρύτερο από το υλικό κατασκευής του κυλίνδρου ή του τοιχώματος του κυλίνδρου και αντικαθίστανται κατά τη συντήρηση που λαμβάνει χώρα σε τακτά χρονικά διαστήματα. Καθώς το έμβολο διέρχεται από την οπή τροφοδοσίας λιπαντικού στο τοίχωμα του κυλίνδρου, ο δακτύλιος του εμβόλου συγκεντρώνει το λιπαντικό και το διανέμει σε όλο το μήκος της διαδρομής^[4].

Έδρανα

Τα έδρανα που είναι τοποθετημένα σε όλη την έκταση του κελύφους του συμπίεστή εξασφαλίζουν τη σωστή ακτινική και αξονική τοποθέτηση των εξαρτημάτων του συμπίεστή. Τα κύρια έδρανα είναι τοποθετημένα στο κέλυφος του συμπίεστή έτσι ώστε να τοποθετηθεί σωστά η στροφαλοφόρος άτρακτος. Τα έδρανα κομβίων στροφάλου – διωστήρα είναι τοποθετημένα μεταξύ κάθε διωστήρα και στροφαλοφόρου ατράκτου. Τα έδρανα πείρου

ζυγώματος είναι τοποθετημένα μεταξύ του διωστήρα και του ζυγώματος. Τα έδρανα ζυγώματος είναι τοποθετημένα στο πάνω και κάτω μέρος του κάθε ζυγώματος^[4].

Η πλειοψηφία των εδράνων στους παλινδρομικούς συμπιεστές είναι υδροδυναμικής λίπανσης. Σε κάθε έδρανο, τροφοδοτείται λιπαντικό υπό πίεση διαμέσου αυλάκωσης τροφοδοσίας λιπαντικού που βρίσκεται στην επιφάνεια κάθε εδράνου. Οι αυλακώσεις έχουν τέτοιο μέγεθος ώστε να εξασφαλίζουν επαρκή ροή λιπαντικού για την αποφυγή υπερθέρμανσης^[4]. Στην Εικ. 13 παρουσιάζονται τυπικά έδρανα εμβολοφόρου συμπιεστή.



Εικ. 13: Έδρανα παλινδρομικού συμπιεστή^{[38] [39]}

Το κάλυμμα του βάκτρου παρέχει τη δυναμική σφράγιση μεταξύ του κυλίνδρου και του βάκτρου. Το κάλυμμα του βάκτρου αποτελείται από μία σειρά μη μεταλλικών δακτυλίων που είναι τοποθετημένοι σε μία θήκη και όλα μαζί είναι βιδωμένα πάνω στον κύλινδρο. Οι δακτύλιοι του καλύμματος λειτουργούν σε ζευγάρια και είναι σχεδιασμένοι για αυτόματη αντιστάθμιση φθοράς. Επειδή κάθε ζεύγος δακτυλίων δέχεται περιορισμένη διαφορά πίεσης, απαιτούνται πολλαπλά ζεύγη ανάλογα με την πίεση που απαιτείται από την εφαρμογή. Για την ασφαλή διαρροή αερίου διαμέσου της οπής εξαερισμού του καλύμματος, η οπή εξαερισμού είναι συνήθως τοποθετημένη ανάμεσα στα δύο εξωτερικά ζεύγη δακτυλίων^[4].

Είναι δυνατό να απαιτηθούν βοηθητικές συνδέσεις στο κάλυμμα για:

- Ψυκτικό νερό
- Έλαιο λίπανσης
- Καθαρισμό με άζωτο
- Εξαερισμό
- Μέτρηση θερμοκρασίας

Το λάδι λίπανσης θα πρέπει να είναι φιλτραρισμένο λεπτομερώς για να αποφευχθεί βλάβη που θα μπορούσε να προκληθεί από την είσοδο μικρών σωματιδίων στο κάλυμμα. Το λάδι λίπανσης συνήθως εγχέεται στο δεύτερο ζεύγος δακτυλίων, με την πίεση να κινεί το λάδι κατά μήκος της διαδρομής^[4].

Βαλβίδες συμπίεστή

Η βασική λειτουργία των βαλβίδων συμπίεστή είναι να επιτρέπουν τη ροή του αερίου στην επιθυμητή κατεύθυνση και να εμποδίζουν τη ροή στην ανεπιθύμητη αντίθετη κατεύθυνση. Κάθε λειτουργικό άκρο ενός κυλίνδρου συμπίεστή θα πρέπει να έχει από δύο σετ βαλβίδων. Το σετ βαλβίδων εισαγωγής (αναρρόφησης) εισάγει αέριο στον κύλινδρο. Το σετ βαλβίδων εκκένωσης χρησιμοποιείται για την εκκένωση πεπιεσμένου αερίου από τον κύλινδρο. Ο κατασκευαστής του συμπίεστή συνήθως καθορίζει τον τύπο και το μέγεθος της βαλβίδας^[4].

Οι δισκοειδείς βαλβίδες κατασκευάζονται από δακτυλίους συνδεδεμένους με πλέγματα σε μία πλάκα και είναι ο πιο κοινός τύπος βαλβίδας. Ανάλογα με το υλικό της πλάκας στεγανοποίησης, οι δισκοειδείς βαλβίδες είναι ικανές να χειριστούν πιέσεις μέχρι και 1000 bar, διαφορική πίεση μέχρι και 670 bar, ταχύτητες μέχρι και 2000 rpm και θερμοκρασίες μέχρι 260 °C. Οι δισκοειδείς βαλβίδες δεν λειτουργούν καλά υπό την παρουσία υγρών^[4]. Στην Εικ. 14 παρουσιάζεται μια τυπική δισκοειδής βαλβίδα.



Εικ. 14: Δισκοειδής βαλβίδα^[40]

Οι δακτυλιοειδείς βαλβίδες είναι ικανές να χειριστούν πιέσεις μέχρι και 1000 bar, διαφορική πίεση μέχρι και 670 bar, ταχύτητες μέχρι και 2000 rpm και θερμοκρασίες μέχρι 260 °C. Στα πλεονεκτήματα των δακτυλιοειδών βαλβίδων περιλαμβάνονται^[4]:

- Μέτριο κόστος εξαρτημάτων
- Χαμηλό κόστος επισκευής
- Η ικανότητα να χειρίζονται τα υγρά καλύτερα από τις δισκοειδείς βαλβίδες



Εικ. 15: Δακτυλιοειδής βαλβίδα^[41]

Οι βαλβίδες poppet παρέχουν γενικά απόδοση ανώτερη από εκείνη των δισκοειδών και δακτυλιοειδών βαλβίδων. Αυτός ο τύπος βαλβίδας προσφέρει υψηλή ανύψωση και χαμηλή

πτώση πίεσης, με αποτέλεσμα την υψηλότερη απόδοση καυσίμου. Οι βαλβίδες Poppet χρησιμοποιούνται ευρέως σε αγωγούς, κλιματισμό αερίου και εγκαταστάσεις επεξεργασίας^[4]. Οι μεταλλικές βαλβίδες poppet λειτουργούν καλά σε:

- Πιέσεις έως και 200 bar
- Διαφορική πίεση έως και 97 bar
- Ταχύτητες μέχρι και 450 rpm
- Θερμοκρασίες μέχρι και 260 °C



Εικ. 16: Βαλβίδα Poppet^[42]

Οι θερμοπλαστικές βαλβίδες Poppet μπορούν να εφαρμοστούν σε^[4]:

- Πιέσεις έως και 200 bar
- Διαφορική πίεση έως και 103 bar
- Ταχύτητες μέχρι και 720 rpm
- Θερμοκρασίες μέχρι και 204 °C

Οι περισσότεροι συμπιεστές έχουν τοποθετημένες τις βαλβίδες πάνω στους κυλίνδρους. Μια σχετικά νέα σχεδίαση τοποθετεί τις βαλβίδες στο έμβολο. Ο σχεδιασμός της βαλβίδας πάνω στο έμβολο λειτουργεί με χαμηλές ταχύτητες βαλβίδων και παρέχει μεγαλύτερο κύκλο ζωής και μειωμένο χρόνο συντήρησης^[4].

Στο σύστημα τριπαραγωγής που μελετάται, λόγω των πιέσεων της τάξης των 300 bar που εφαρμόζονται, θα χρησιμοποιηθούν δισκοειδείς βαλβίδες.

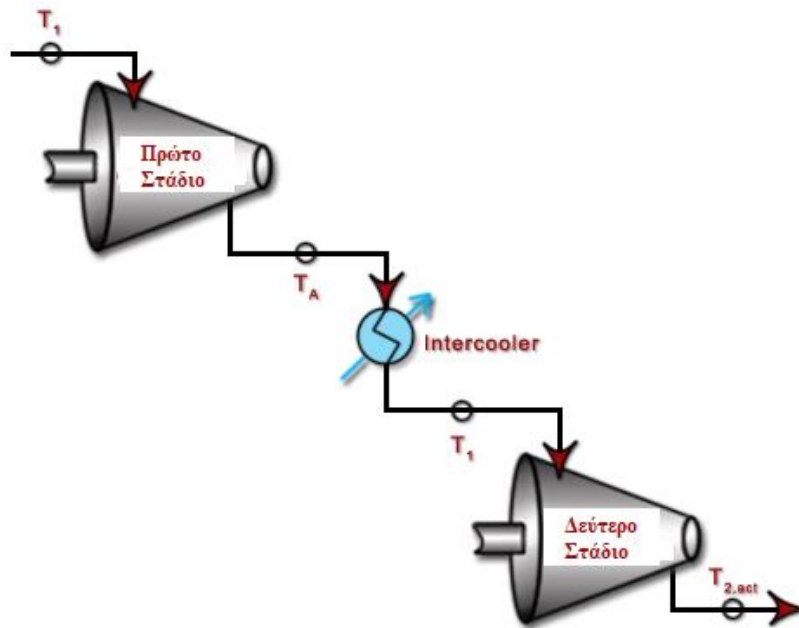
3.3.3. Ενδιάμεσος ψύκτης (Intercooler)

Intercooler ονομάζεται η μηχανική συσκευή που χρησιμοποιείται για την ψύξη ενός αερίου μεταξύ των σταδίων μιας διεργασίας συμπίεσης^[6]. Συνήθως είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που απομακρύνει τη θερμότητα που παράγεται κατά τη συμπίεση του αερίου. Εκτός από τους συμπιεστές αερίου, οι ενδιάμεσοι ψύκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κλιματιστικά, ψυγεία, αεριοστρόβιλους και κινητήρες αυτοκινήτων. Στην Εικ. 17 παρουσιάζεται ένας τυπικός intercooler.



Εικ. 17: Intercooler^[43]

Στο σύστημα τριπαραγωγής που μελετάται, ο εμβολοφόρος συμπιεστής του συστήματος αποτελείται από τέσσερα στάδια συμπίεσης. Κάθε στάδιο συμπίεσης αντιπροσωπεύεται από έναν κύλινδρο με το έμβολο του. Ανάμεσα σε κάθε στάδιο συμπίεσης τοποθετείται μια μονάδα intercooler, η οποία θα απάγει τη θερμότητα που παράγεται κατά τη συμπίεση του αερίου όπως φαίνεται στην Εικ. 18.



Εικ. 18: Ενδιάμεση ψύξη μεταξύ δύο σταδίων συμπίεσης^[44]

Κάθε intercooler είναι συνδεδεμένος με τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας του συστήματος τριπαραγωγής. Η θερμότητα που απάγεται από κάθε στάδιο συμπίεσης μεταφέρεται στη δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Ο τρόπος μεταφοράς θα αναλυθεί στην ενότητα που περιγράφεται λεπτομερώς η δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Με τη μεταφορά αυτή, η θερμότητα που αποβάλλεται δεν πάει χαμένη αλλά αξιοποιείται εάν υπάρξει ζήτηση θέρμανσης, αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης του συστήματος.

3.3.4. Αποστραγγιστής

Σε κάθε στάδιο του συμπιεστή προσαρμόζεται ένας αποστραγγιστής που σκοπός του είναι η αφαίρεση των ρύπων από τον αέρα κατά τη διάρκεια της διεργασίας της συμπίεσης^[7]. Αυτοί οι ρύποι μπορούν να εισέλθουν στον κύλινδρο του συμπιεστή κατά τη διάρκεια της διεργασίας της εισαγωγής του αέρα ή να εισαχθούν στον αέρα από το ίδιο το σύστημα. Το λιπαντικό λάδι, τα μεταλλικά σωματίδια, η σκουριά, η διάβρωση των σωληνώσεων διαχωρίζονται και φιλτράρονται με τη βοήθεια του αποστραγγιστή. Οι αποστραγγιστές μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης στους ενδιάμεσους ψύκτες (intercoolers), στους μεταψύκτες (aftercoolers), στα φίλτρα, στους στεγνωτήρες και στους συλλέκτες. Επίσης,

κυκλοφορούν σε αρκετούς τύπους και παραλλαγές. Στην περίπτωση του συστήματος τριπαραγωγής που μελετάται χρησιμοποιείται ένας αποστραγγιστής τύπου φλοτέρ.

Ένας αποστραγγιστής τύπου φλοτέρ αποβάλλει τους συλλεχθέντες ρύπους χωρίς να αποβάλλει παράλληλα συμπιεσμένο αέρα, ενώ παράλληλα προσαρμόζεται αυτόματα στις αλλαγές του συστήματος. Ο αποστραγγιστής τύπου φλοτέρ είναι μια καλή επιλογή για πολλές εφαρμογές φιλτραρίσματος. Τη σημερινή εποχή, αυτού του είδους οι αποστραγγιστές είναι ακόμα πιο αξιόπιστοι. Κυκλοφορούν με ένα ενσωματωμένο φίλτρο μικρών σωματιδίων, που τα εμποδίζει να συγκεντρώνονται στον πυθμένα του. Επίσης, η αύξηση της χρήσης καθαρότερων σωληνώσεων (από χαλκό και αλουμίνιο) βοήθησε στην αξιοπιστία αυτού του τύπου αποστραγγιστή. Η συντήρηση τους περιλαμβάνει απλά την αντικατάσταση τους κάθε χρόνο, μιας και το κόστος τους είναι πολύ χαμηλό. Επίσης, ο αποστραγγιστής θα πρέπει να είναι ο κατάλληλος για τις πιέσεις που εφαρμόζονται μέσα στον συμπιεστή^[7]. Στην Εικ. 19 παρουσιάζεται ένας τυπικός αποστραγγιστής τύπου φλοτέρ.



Εικ. 19: Τυπικός αποστραγγιστής τύπου φλοτέρ^[7]

3.3.5. Ξηραντήρας πεπιεσμένου αέρα

Οι ξηραντήρες πεπιεσμένου αέρα είναι ειδικοί τύποι συστημάτων φιλτραρίσματος οι οποίοι είναι ειδικά σχεδιασμένοι να απομακρύνουν το νερό που βρίσκεται στον πεπιεσμένο αέρα.

Όπως έχει προαναφερθεί, η διεργασία της συμπίεσης του αέρα αυξάνει τη θερμοκρασία του και συγκεντρώνει ρύπους όπως επίσης και υδρατμούς. Συνεπώς, ο πεπιεσμένος αέρας βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και σε 100% σχετική υγρασία. Καθώς ο συμπιεσμένος αέρας ψύχεται, με τη βοήθεια των intercoolers, ο υδρατμός συμπυκνώνεται στους κυλίνδρους του συμπιεστή και στη συνέχεια στις σωληνώσεις και στις δεξαμενές που ακολουθούν τον συμπιεστή^[8].

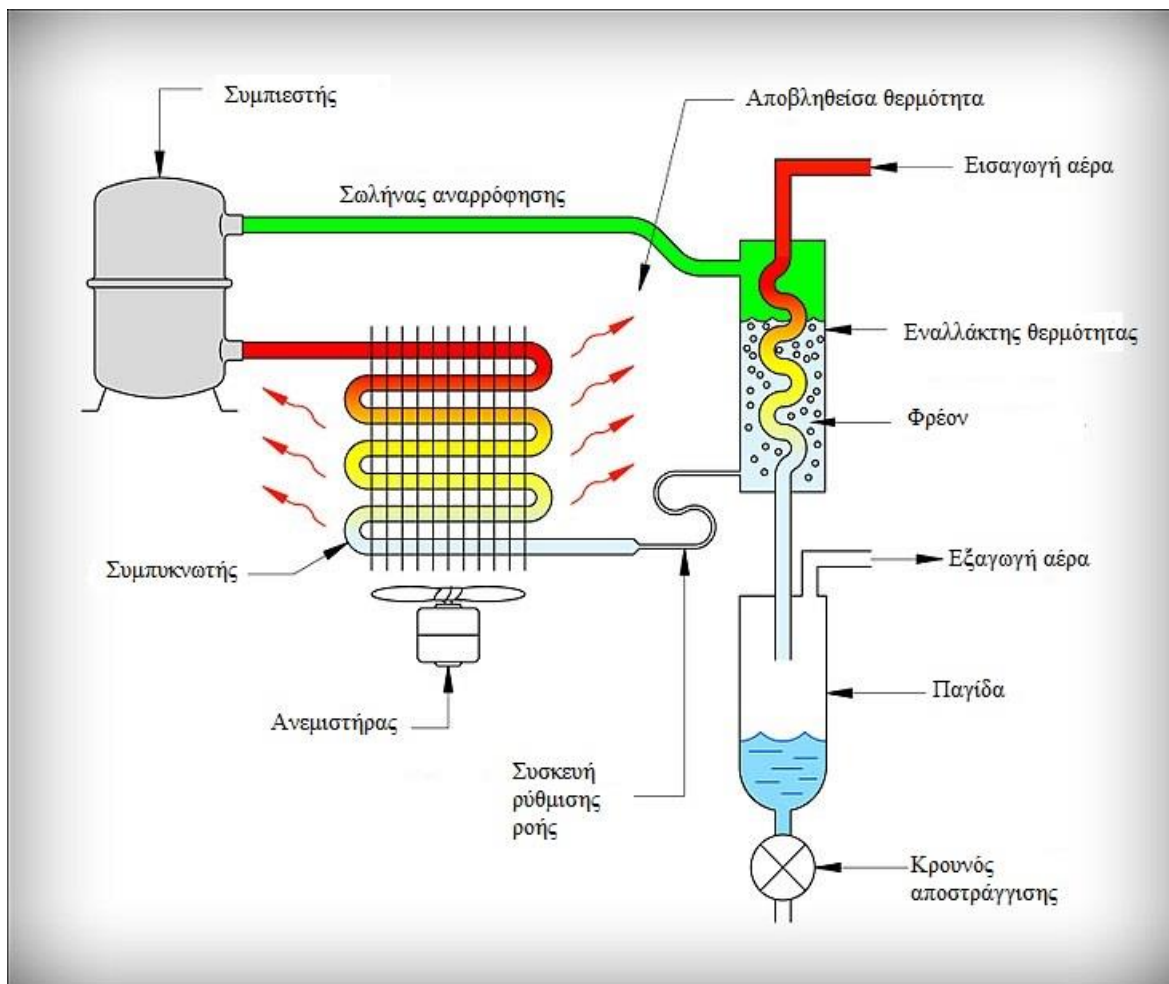
Η μεγάλη ποσότητα υγρών και το συμπυκνωμένο νερό μέσα στο ρεύμα του αέρα μπορούν να είναι εξαιρετικά επιζήμια για τον εξοπλισμό, τα εργαλεία και τις διεργασίες που βασίζονται στον πεπιεσμένο αέρα. Το νερό μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στη δεξαμενή και τις σωληνώσεις, να απομακρύνει τα λιπαντικά λάδια από τα πνευματικά εργαλεία, να ενωθεί με το λάδι μέσα στον κύλινδρο και κυρίως είναι ανεπιθύμητο στον θερμό ή ψυχρό αέρα της εξόδου. Ως εκ τούτου, είναι καλό να αφαιρεθεί η συμπυκνωμένη υγρασία από το ρεύμα του αέρα για να αποφευχθεί ζημιά στον εξοπλισμό, στα εργαλεία και στις διεργασίες. Η αφαίρεση αυτού του ανεπιθύμητου νερού γίνεται με τον ξηραντήρα πεπιεσμένου αέρα^[8].

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ξηραντήρων πεπιεσμένου αέρα. Οι ξηραντήρες αυτοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τους κύριους και τους δευτερεύοντες. Τα χαρακτηριστικά απόδοσής τους καθορίζονται κυρίως από τον ρυθμό ροής σε κανονικό πόδι ανά λεπτό (SCFM) και το σημείο δρόσου που εκφράζεται ως θερμοκρασία. Οι κύριοι ξηραντήρες είναι: οι ψυκτικοί και οι υγροσκοπικοί. Οι δευτερεύοντες ξηραντήρες είναι: οι αφυγραντικοί, οι απορρόφησης και μεμβράνης. Στο σύστημα τριπαραγωγής που μελετάται θα χρησιμοποιηθεί ένας ψυκτικός ξηραντήρας πεπιεσμένου αέρα^[8].

Ο ψυκτικός ξηραντήρας είναι ο πιο κοινός τύπος ξηραντήρα πεπιεσμένου αέρα. Οι ψυκτικοί ξηραντήρες αφαιρούν το νερό από το ρεύμα του αέρα ψύχοντας τον αέρα στους 3 °C συμπυκνώνοντας έτσι αποτελεσματικά την υγρασία σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον. Οι 3 °C είναι το ρεαλιστικό κατώτερο όριο για έναν ψυκτικό ξηραντήρα επειδή σε μια χαμηλότερη θερμοκρασία από τους 3 °C υπάρχει ο κίνδυνος στερεοποίησης του διαχωρισμένου νερού. Οι ψυκτικοί ξηραντήρες, όπως έχει προαναφερθεί, χαρακτηρίζονται ως κύριοι ξηραντήρες και παράγουν αέρα κατάλληλης ποιότητας για το 95% των εφαρμογών πεπιεσμένου αέρα. Οι ψυκτικοί ξηραντήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στις μονάδες που λειτουργούν με φρέον και στις μονάδες Joule – Thomson^[8].

Οι ψυκτικοί ξηραντήρες με φρέον παράγουν ψύξη μέσω ενός συστήματος ψύξης κλειστού κύκλου που βασίζεται σε ένα από τα τρία εμπορικά διαθέσιμα ψυκτικά υγρά, το R-22, το

R-134a ή το R410a. Το σύστημα ψύξης που χρησιμοποιούν οι ξηραντήρες αυτοί είναι παρόμοιο με των συστημάτων οικιακού και επαγγελματικού κλιματισμού. Η Εικ. 20 παρουσιάζει το σχεδιάγραμμα ενός τυπικού ψυκτικού ξηραντήρα πεπιεσμένου αέρα που βασίζεται στο φρέον^[8].



Εικ. 20: Σχεδιάγραμμα τυπικού ψυκτικού ξηραντήρα πεπιεσμένου αέρα που βασίζεται στο φρέον^[8].

Οι ψυκτικοί ξηραντήρες πεπιεσμένου αέρα που βασίζονται στο φρέον, συνήθως αποτελούνται από έναν εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος είναι παρόμοιος με έναν μεταψύκτη που λειτουργεί με νερό. Αντί να χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό, το κέλυφος του εναλλάκτη θερμότητας γεμίζεται με υγρό CFC (φθοροχλωράνθρακες). Το υγρό CFC διατηρείται σε πίεση που του επιτρέπει να βράσει στους 3 °C. Αφού βράσει το CFC, ο ατμός αντλείται μέσω του σωλήνα αναρρόφησης σε ένα συμπιεστή. Ο συμπιεστής αυτός συμπιέζει το CFC και του προσδίδεται υψηλή πίεση και θερμοκρασία. Το υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας CFC ψύχεται σε έναν συμπυκνωτή και επανέρχεται στην υγρή κατάσταση. Το υγρό CFC επανεισάγεται στον εναλλάκτη θερμότητας μέσω της συσκευής ρύθμισης ροής και σχηματίζεται έτσι ένας κλειστός κύκλος ψύξης. Όταν ο πεπιεσμένος αέρας διέρχεται από

τον εναλλάκτη θερμότητας, ψύχεται στη θερμοκρασία βρασμού του CFC. Καθώς ο πεπιεσμένος αέρας ψύχεται, χάνει την ικανότητα του στο να συγκρατεί υγρασία και ο υδρατμός συμπυκνώνεται στο εσωτερικό του σωλήνα του εναλλάκτη^[8].

Οι παραλλαγές αυτού του βασικού σχεδιασμού περιλαμβάνουν μονάδες εξοπλισμένες με εναλλάκτες επαναθέρμανσης, οι οποίοι αποσκοπούν στη βελτίωση της απόδοσης. Στις περιπτώσεις αυτές, ο ψυχρός συμπιεσμένος αέρας θερμαίνεται εκ νέου από τον εισερχόμενο αέρα^[8].

Οι ξηραντήρες υψηλής θερμοκρασίας είναι εξοπλισμένοι με πρόσθετο προψύκτη, ο οποίος απομακρύνει την υπερβολική θερμότητα μέσω ενός συστήματος εξαναγκασμένου αερισμού. Αυτές οι μονάδες είναι σχεδιασμένες έτσι, ώστε να επιτρέπουν την αποτελεσματική ξήρανση του υπερβολικά ζεστού πεπιεσμένου αέρα. Θερμοκρασίες πεπιεσμένου αέρα που υπερβαίνουν τους 37 °C είναι πολύ συχνές στις χώρες του Νότου, στις εργασίες εξόρυξης, τα χαλυβουργία, τα πλοία κλπ. Σε περιοχές και εφαρμογές που απαιτούνται εργασίες σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, οι ξηραντήρες υψηλής θερμοκρασίας είναι απαραίτητοι^[8].

Οι κυκλικοί ξηραντήρες (γνωστοί και ως ξηραντήρες θερμικής μάζας) αξιοποιούν θερμική μάζα, συνήθως μια δεξαμενή νερού, για την αποθήκευση της ενέργειας που παράγεται από το σύστημα ψύξης. Η θερμοκρασία του νερού ελέγχει το σύστημα ψύξης μέσω ενός θερμοστάτη. Ο πεπιεσμένος αέρας διέρχεται από τη θερμική μάζα, διαμέσου ενός εναλλάκτη θερμότητας ψυχόμενου με νερό. Η αξία αυτού του τύπου διαμόρφωσης είναι ότι συνήθως παράγει πιο συνεπή αποτελέσματα ψύξης^[8]. Στην Εικ. 21 παρουσιάζεται ο ψυκτικός ξηραντήρας που χρησιμοποιείται στο σύστημα τριπαραγωγής.



Εικ. 21: Ψυκτικός ξηραντήρας πεπιεσμένου αέρα με φρέον^[45]

3.3.6. Δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα

Η δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι κάθε συστήματος πεπιεσμένου αέρα. Κύριος σκοπός της είναι να λειτουργεί ως προσωρινή αποθήκη του πεπιεσμένου αέρα που θα χρησιμοποιηθεί όποτε υπάρχει μεγάλη ζήτηση ισχύος, έτσι ώστε να υπάρχει αύξηση της απόδοσης λειτουργίας της εγκατάστασης.

Θεωρητικά, μια εγκατάσταση συμπιεστή αέρα θα μπορούσε να λειτουργήσει χωρίς δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα, αλλά η έλλειψη μιας τέτοιας δεξαμενής στο σύστημα αέρα θα αύξανε τους κύκλους εισαγωγής και εξαγωγής αέρα του συμπιεστή, κάνοντας τον να λειτουργεί περισσότερο. Επίσης, οι κύκλοι εισαγωγής και εξαγωγής αέρα εξαρτώνται από τη ζήτηση ισχύος της εγκατάστασης.

Κυκλοφορούν συμπιεστές με εγκατεστημένη πάνω τους τη δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα. Αυτός ο τύπος εγκατάστασης προτιμάται όταν υπάρχει πρόβλημα με τη χωρητικότητα. Έχοντας μια δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα εγκατεστημένη πάνω στον συμπιεστή μπορεί να εξοικονομήσει χώρο όπως επίσης και αρχικό κόστος εγκατάστασης που σχετίζεται με την εγκατάσταση ξηραντήρα. Αυτό είναι συνήθως φανερό σε συμπιεστές μικρότερου εύρους μέχρι και 26 kW. Μεγαλύτεροι συμπιεστές, όπως ο συμπιεστής του συστήματος τριπαραγωγής που εξετάζεται, δεν είναι κατάλληλοι για τον συγκεκριμένο τρόπο εγκατάστασης καθώς το βάρος γίνεται μεγάλο και υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης^[9].

Το μέγεθος μιας δεξαμενής αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα εξαρτάται από τη παροχή του αέρα που εξέρχεται από τον συμπιεστή. Ένας γνωστός κανόνας είναι να θεωρείται χωρητικότητα δεξαμενής ίση με 10 – 15 λίτρα για κάθε λίτρο/δευτερόλεπτο πεπιεσμένου αέρα, σε συνάρτηση βέβαια με τον τύπο του συμπιεστή που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση^[9].

Εκτός από το μέγεθος του συμπιεστή αέρα, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή της κατάλληλης δεξαμενής αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα του συστήματος. Συνιστάται ιδιαίτερα να εξεταστούν οι ακόλουθοι παράγοντες.

Ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων πίεσης: Μια δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελαχιστοποιηθούν οι διακυμάνσεις πίεσης, οι οποίες μπορούν να έχουν αντίκτυπο κατά τη διεργασία παραγωγής και στο τελικό προϊόν. Η επιλογή της σωστής δεξαμενής για την εγκατάσταση συμπίεσης εξαρτάται από δύο

μεταβλητές: την πίεση εξόδου του συμπιεστή και την απαίτηση της εκάστοτε εγκατάστασης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πεπιεσμένος αέρας που αποθηκεύεται στη δεξαμενή είναι χρήσιμος μόνο εφόσον η πίεση του είναι επαρκής για τη διεργασία στην οποία θα χρησιμοποιηθεί. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η διάρκεια (σε λεπτά) που η δεξαμενή μπορεί να παρέχει αέρα κατάλληλης πίεσης^[9].

Αντιμετώπιση βραχυπρόθεσμων απαιτήσεων αιχμής: Εάν η ζήτηση συμπιεσμένου αέρα μεταβάλλεται δραστικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι αιχμές της ζήτησης για να διασφαλιστεί ότι η πίεση του συστήματος δεν θα μειωθεί κάτω από ένα αποδεκτό επίπεδο. Η δεξαμενή αυτή παρέχει αποθήκευση για να καλύψει βραχυπρόθεσμες απαιτήσεις αιχμής αέρα, τις οποίες ο συμπιεστής από μόνος του δεν θα μπορούσε να καλύψει. Η ζήτηση αέρα μπορεί να διαφέρει λόγω της ώρας της ημέρας, λόγω του μοτίβου λειτουργίας ή λόγω μιας ασυνήθιστης ζήτησης. Είναι σημαντικό να κατανοηθεί πλήρως η εφαρμογή και η παροχή λίτρων/δευτερόλεπτο αέρα που απαιτούνται, όπως επίσης και οι αναμενόμενες αιχμές του συστήματος, καθώς όλα αυτά καθορίζουν ποια παροχή αέρα είναι αναγκαία για να αποφευχθούν ανεπάρκειες σε κάποιο μέρος της διεργασίας^[9].

Ενεργειακές εκτιμήσεις: Η χρήση μιας δεξαμενής αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του συστήματος συμπίεσης αέρα επιτρέποντας στον συμπιεστή να λειτουργήσει με μεγαλύτερους κύκλους συμπίεσης και στενότερα εύρη πιέσεων. Η σωστή εκτίμηση του μεγέθους μιας δεξαμενής και ο περισσότερος αέρας από τον απαιτούμενο μπορούν να μειώσουν την πιθανότητα εκκίνησης του συμπιεστή, ο οποίος θα κάλυπτε την αυξημένη ζήτηση παροχής, κάτι το οποίο θα εξοικονομούσε ενέργεια. Αυτό επίσης θα απέτρεπε τη διακύμανση της πίεσης στη δεξαμενή και τις συχνές εκκινήσεις στον συμπιεστή, καθώς επίσης θα παρείχε σταθερή πίεση και θα επέκτεινε τη διάρκεια ζωής του συμπιεστή^[9].

Λόγοι ασφάλειας: Αν κριθεί απαραίτητο, μια δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα μπορεί να παρέχει αέρα για να είναι δυνατή η ασφαλής διακοπή των διεργασιών και συστημάτων παραγωγής σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης^[9].

Στην περίπτωση που απουσιάζει ξηραντήρας από το σύστημα, συγκεντρώνεται υγρασία μέσα στη δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα. Όπως έχει προαναφερθεί, η υγρασία του πεπιεσμένου αέρα μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του εξοπλισμού, να υποβαθμίσει την ποιότητα του προϊόντος και φυσικά να επηρεάσει την ίδια τη δεξαμενή. Λόγω της έλλειψης ξηραντήρα, το συμπυκνωμένο νερό θα συγκεντρωθεί στη δεξαμενή

αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα. Αν δεν αποστραγγιστεί το νερό, μπορεί να υπάρξει διάβρωση του υλικού, η οποία θα μπορούσε να απειλήσει την ακεραιότητα της δεξαμενής αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα, οδηγώντας έτσι σε πρόωρη αλλοίωση της. Στην περίπτωση αυτή, συνιστάται η αποστράγγιση της δεξαμενής τουλάχιστον μία φορά την ημέρα και ακόμα περισσότερες φορές αν ο συμπιεστής λειτουργεί σε πλήρες φορτίο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Ένας εύκολος τρόπος να εξασφαλισθεί ότι δεν θα παραμεληθεί ποτέ η ημερήσια αυτή αποστράγγιση, θα ήταν η επένδυση σε έναν αυτόματο αποστραγγιστή^[9].

Όπως έχει προαναφερθεί, η πίεση της δεξαμενής σχετίζεται άμεσα με την πίεση εξόδου του συμπιεστή. Οι περισσότεροι τυποποιημένοι συμπιεστές σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας μπορούν να παράγουν πεπιεσμένο αέρα πίεσης μέχρι και 12 bar. Ωστόσο, η πλειοψηφία των βιομηχανικών εγκαταστάσεων λειτουργεί μεταξύ 7 με 8 bar. Ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εγκατάστασης, η πίεση της δεξαμενής θα πρέπει να είναι η κατάλληλη. Για παράδειγμα, αν ο συμπιεστής σταθερής ταχύτητας παράγει αέρα με μέγιστη πίεση στα 8 bar, η πίεση της δεξαμενής θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 bar^[9].

Οι περισσότεροι συμπιεστές μεταβλητής ταχύτητας παράγουν αέρα πίεσης μέχρι και 12 bar, οπότε μια δεξαμενή πίεσης 14 bar είναι κατάλληλη για αυτόν τον συμπιεστή. Κάθε δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα θα πρέπει να είναι εφοδιασμένη με μια ανακουφιστική βαλβίδα, η οποία έχει σχεδιαστεί να απελευθερώνει πίεση από τη δεξαμενή, σε περίπτωση που η πίεση μέσα στη δεξαμενή φτάσει στο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η υψηλότερη πίεση δεν ισοδυναμεί με περισσότερη παροχή, αλλά το αντίθετο, όσο αυξάνεται η πίεση η παροχή μειώνεται^[9].

Είναι πολύ σημαντικό να κατανοηθούν οι ελάχιστες και οι μέγιστες ρυθμίσεις πιέσεων για τις μηχανές που χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα και, αν είναι δυνατόν, να χρησιμοποιηθούν ρυθμιστές πίεσης στη δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα.

Στο σύστημα τριπαραγωγής που μελετάται, εφαρμόζονται πιέσεις από 15 έως 350 bar. Μια τυπική δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα δεν θα άντεχε τις μεγάλες αυτές πιέσεις της τάξεως των 350 bar. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται μια δεξαμενή υψηλής αντοχής από ανθρακονήματα. Στην Εικ. 22 παρουσιάζονται τέτοιου είδους δεξαμενές.



Εικ. 22: Δεξαμενές αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα από ανθρακονήματα^[46]

Τα ανθρακονήματα είναι ίνες διαμέτρου 5 – 10 μm και αποτελούνται κυρίως από άτομα άνθρακα. Στα πολλά πλεονεκτήματα των ανθρακονημάτων περιλαμβάνονται η υψηλή δυσκαμψία, η υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, το χαμηλό βάρος, η υψηλή χημική αντίσταση, η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και η χαμηλή θερμική διαστολή. Αυτές οι ιδιότητες έχουν κάνει τα ανθρακονήματα πολύ δημοφιλή στην αεροδιαστημική, στον κατασκευαστικό τομέα, στον στρατιωτικό τομέα, στον μηχανοκίνητο αθλητισμό, όπως επίσης και σε άλλα αθλήματα. Ωστόσο είναι αρκετά ακριβά, σε σχέση με παρόμοιες ίνες όπως τα υαλονήματα και οι πλαστικές ίνες^[10].

Για να παραχθούν τα ανθρακονήματα, άτομα άνθρακα συνδέονται μεταξύ τους σε κρυστάλλους που είναι λίγο πολύ ευθυγραμμισμένοι παράλληλα με τον μακρύ άξονα της ίνας. Καθώς η ευθυγράμμιση των κρυστάλλων δίνει στην ίνα υψηλή αναλογία αντοχής προς όγκο, η ίνα καθίσταται πολύ ισχυρή σε σχέση με το μέγεθος της^[10].

Τα ανθρακονήματα συνήθως συνδυάζονται με άλλα υλικά για να σχηματίσουν ένα σύνθετο υλικό. Όταν εμποτίζονται με πλαστική ρητίνη και έπειτα θερμαίνονται, σχηματίζεται ένα

πολυμερές ενισχυμένο με ανθρακόνημα το οποίο έχει υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος και είναι εξαιρετικά άκαμπτο αν και κάπως ψαθυρό. Επίσης τα ανθρακονήματα συντίθενται με άλλα υλικά, όπως ο γραφίτης για να σχηματίσουν ένα σύνθετο υλικό ανθρακονημάτων και γραφίτη το οποίο έχει υψηλή θερμική αντοχή^[10].

3.3.7. Ρυθμιστής πίεσης

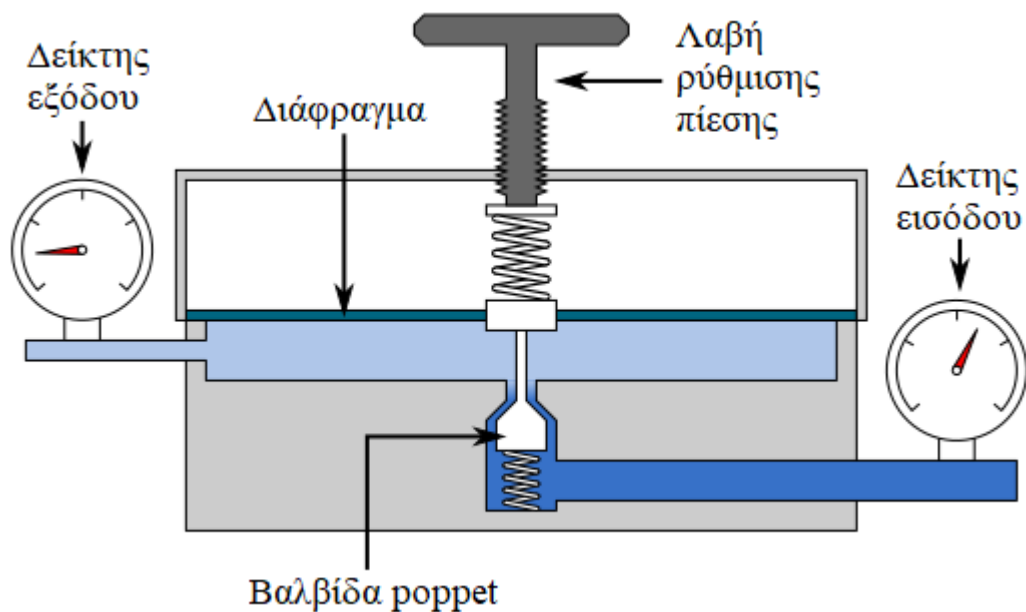
Ο ρυθμιστής πίεσης είναι μία βαλβίδα ελέγχου που μειώνει την πίεση ενός εισερχόμενου ρευστού σε μια επιθυμητή τιμή στην έξοδο. Οι ρυθμιστές πίεσης χρησιμοποιούνται σε υγρά και αέρια. Μπορούν να είναι μια ολοκληρωμένη συσκευή με ρύθμιση πίεσης εξόδου, βαλβίδα ανακοπής και έναν αισθητήρα τοποθετημένα στο ίδιο κέλυφος ή μπορούν να αποτελούνται ξεχωριστά από έναν αισθητήρα πίεσης, έναν ελεγκτή και μία βαλβίδα ροής^[11].

Η κύρια λειτουργία του ρυθμιστή πίεσης είναι να προσαρμόζει τη ροή του αερίου στην απαιτούμενη ροή, διατηρώντας παράλληλα μια σταθερή πίεση εξόδου. Αν ο ρυθμός ροής του αερίου μειωθεί, τότε ο ρυθμός ροής του ρυθμιστή πίεσης θα πρέπει να μειωθεί και αυτός. Αν ο ρυθμός ροής του αερίου αυξηθεί, τότε ο ρυθμός ροής του ρυθμιστή πίεσης θα πρέπει να αυξηθεί και αυτός έτσι ώστε να αποφευχθεί μείωση της ελεγχόμενης πίεσης λόγω της έλλειψης αερίου στο σύστημα πίεσης^[11].

Ένας ρυθμιστής πίεσης αποτελείται από ένα περιοριστικό στοιχείο, ένα στοιχείο φόρτισης και ένα στοιχείο μέτρησης^[11].

- Το περιοριστικό στοιχείο είναι μία βαλβίδα που μπορεί να παρέχει έναν μεταβλητό περιορισμό στη ροή, όπως μια σφαιρική βαλβίδα, μια βαλβίδα πεταλούδας, μια βαλβίδα poppet κλπ.
- Το στοιχείο φόρτισης είναι ένα μέρος που μπορεί να εφαρμόσει την κατάλληλη δύναμη στο στοιχείο περιορισμού. Αυτή η φόρτιση μπορεί να παρέχεται από ένα βάρος, ένα ελατήριο, έναν γρύλο εμβόλου, ή έναν γρύλο διαφράγματος σε συνδυασμό με ένα ελατήριο.
- Το στοιχείο μέτρησης καθορίζει πότε η ροή εισόδου είναι ίση με τη ροή εξόδου. Το ίδιο το διάφραγμα από μόνο του χρησιμοποιείται συχνά ως στοιχείο μέτρησης. Μπορεί δηλαδή να έχει διπλό ρόλο.

Στον ρυθμιστή πίεσης μονού σταδίου της Εικ. 23, υπάρχει μία ισορροπία δυνάμεων στο διάφραγμα για να ασκηθεί έλεγχος πάνω στη βαλβίδα poppet έτσι ώστε να ρυθμιστεί η πίεση. Χωρίς πίεση εισόδου, το ελατήριο, που βρίσκεται πάνω από το διάφραγμα, σπρώχνει κάτω το διάφραγμα προς τη βαλβίδα poppet, κρατώντας τη ανοιχτή. Μόλις παρουσιαστεί πίεση εισόδου, η ανοιχτή βαλβίδα poppet επιτρέπει τη ροή στο διάφραγμα και η πίεση στον άνω θάλαμο αυξάνεται, έως ότου το διάφραγμα να ωθηθεί προς το ελατήριο, προκαλώντας έτσι τη βαλβίδα να μειώσει τη ροή και τελικά σταματώντας την περαιτέρω αύξηση της πίεσης^[11]. Στην Εικ. 24 παρουσιάζεται ένας ρυθμιστής πίεσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σύστημα τριπαραγωγής.



Εικ. 23 : Σχεδιάγραμμα ρυθμιστή πίεσης μονού σταδίου^[11]

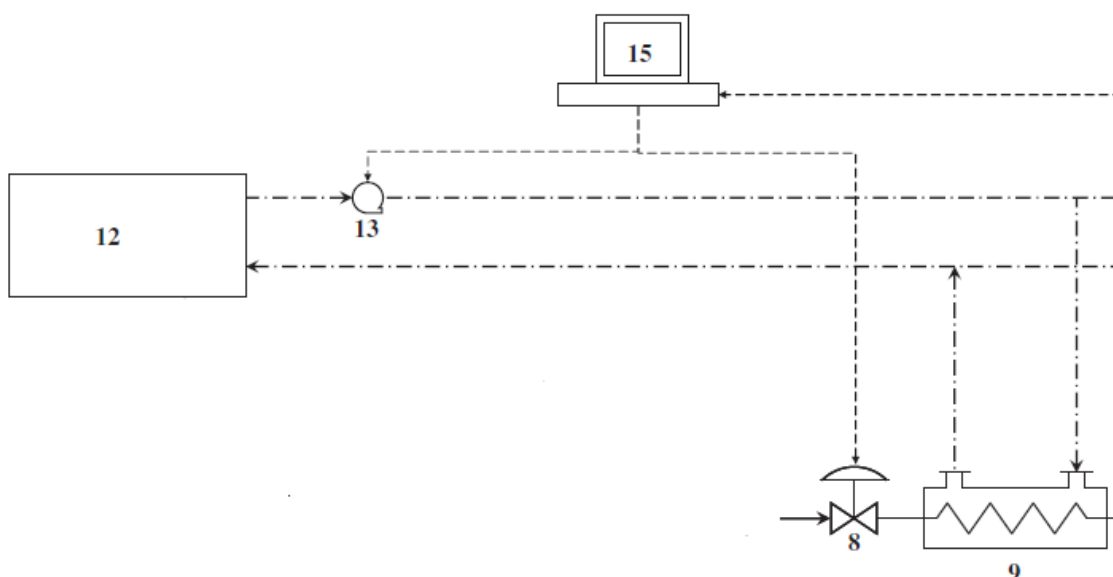


Εικ. 24: Ρυθμιστής πίεσης^[47]

3.4. Μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

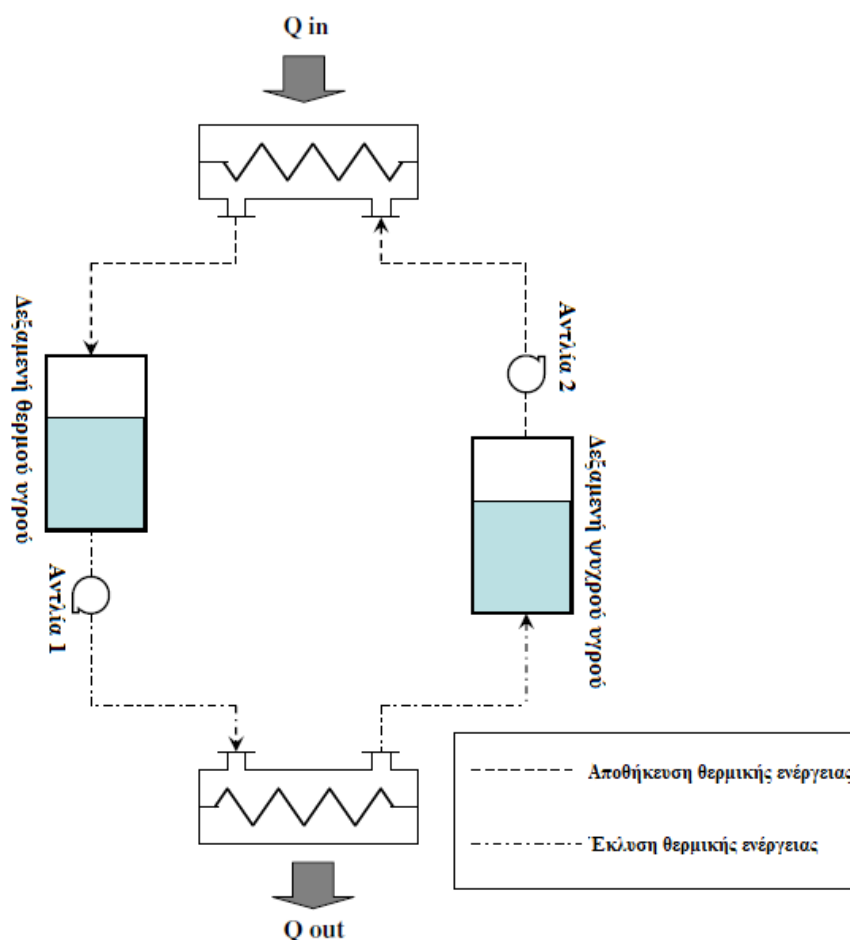
3.4.1. Γενικά για τη μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας

Η μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αποτελείται από μία σύνθεση δύο δεξαμενών, στις οποίες φυλάσσονται ξεχωριστά θερμό και ψυχρό υγρό, δύο εναλλάκτες θερμότητας, όπως επίσης και από μία αντλία θερμικού υγρού. Ο ένας εναλλάκτης βρίσκεται στην είσοδο της θερμικής ενέργειας στο σύστημα και ο άλλος αμέσως μετά τη δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα. Η μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας παρουσιάζεται στην Εικ. 25 και στην Εικ. 26. Κατά τη διεργασία αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας, το θερμικό υγρό αντλείται από την ψυχρή δεξαμενή στη ζεστή και έπειτα μεταφέρεται πίσω στην ψυχρή κατά τη διεργασία έκλυσης θερμικής ενέργειας. Η χρήση θερμικού υγρού για την αποθήκευση και τη μεταφορά θερμικής ενέργειας μπορεί να απλοποιήσει σημαντικά τον σχεδιασμό του συστήματος, αποτρέποντας τη χρήση περισσότερων εναλλακτών θερμότητας. Επίσης, ο τρόπος λειτουργίας θα μπορούσε να είναι πιο ευθύς – η θερμική ενέργεια και η θερμοκρασία θα μπορούσαν να ρυθμιστούν ελέγχοντας απλά τον ρυθμό ροής του θερμικού υγρού.



Εικ. 25: Η μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε σχέση με όλο το σύστημα

Για να λειτουργήσει ο παραπάνω τρόπος μεταφοράς και αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, απαιτείται προσεκτική επιλογή των θερμικών υγρών. Εκτός από την υψηλή θερμική σταθερότητα, βασικές απαιτήσεις είναι η πολύ χαμηλή τάση ατμών στις συνθήκες της διεργασίας και το χαμηλό σημείο πήξης. Έτσι, αποφεύγεται η χρήση δεξαμενών αποθήκευσης υψηλής πίεσης και εκμηδενίζεται ο κίνδυνος πήξης. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται μια λίστα θερμικών υγρών που κυκλοφορούν στο εμπόριο. Είναι φανερό ότι τα οργανικά ρευστά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, αλλά οι υψηλές τάσεις ατμών που αναπτύσσουν και η υψηλή αναφλεξιμότητα απαγορεύουν τη χρήση τους πάνω από τους 300 – 400 °C. Αντιθέτως, τα ανόργανα νιτρικά άλατα έχουν καλή θερμική σταθερότητα αλλά έχουν υψηλά σημεία πήξης. Στο σύστημα αυτό, η θερμοκρασία αποθήκευσης του ψυχρού υγρού θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση των 0 °C. Έτσι, τα οργανικά υγρά θεωρούνται καταλληλότερα. Λαμβάνοντας υπόψη και το οικονομικό κόστος, για την ακόλουθη προσομοίωση επιλέγονται ορυκτέλαια που έχουν μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 300 °C^[1].



Εικ. 26: Λεπτομερές σχεδιάγραμμα της μονάδας αποθήκευσης θερμικής ενέργειας^[1].

Υλικό	Εύρος θερμοκρασίας (°C)	Χαρακτηριστικά
Συνθετικά έλαια	13 - 395	Εύφλεκτα
Ορυκτέλαια	-10 έως 300	Εύφλεκτα
Έλαια σιλικόνης	-40 έως 400	Ακριβά, εύφλεκτα
Άλας (50% KNO ₃ +50% NaNO ₃ κ.β)	220 - 540	Ευσταθές σε υψ. θερμοκρασία
Τηγμένο άλας (53% KNO ₃ +40% NaNO ₂ +7% NaNO ₃ κ.β)	146 - 540	Ευσταθές σε υψ. θερμοκρασία
Υγρό νάτριο	100 - 760	Ευσταθές σε υψ. θερμοκρασία

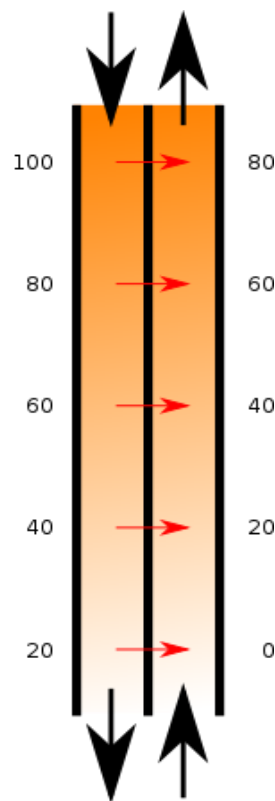
Πίνακας 1. Συχνά χρησιμοποιούμενα υγρά υλικά για την αποθήκευση σε υψηλή θερμοκρασία^[1]

3.4.2. Εναλλάκτης θερμότητας

Όπως προαναφέρθηκε, η μονάδα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αποτελείται, εκτός από τις δύο δεξαμενές, από δύο εναλλάκτες θερμότητας. Εναλλάκτης θερμότητας ονομάζεται η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ δύο ή περισσότερων ρευστών. Οι εναλλάκτες θερμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στις διεργασίες ψύξης όσο και στις διεργασίες θέρμανσης. Τα ρευστά μπορούν να είναι διαχωρισμένα από ένα στερεό τοίχωμα προς αποφυγήν ανάμειξης, όπως στο σύστημα που μελετάται, ή μπορούν να βρίσκονται σε άμεση επαφή. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού, σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε μονάδες χημικής βιομηχανίας, σε πετροχημικά εργοστάσια, σε διυλιστήρια πετρελαίου, στην επεξεργασία φυσικού αερίου και στον καθαρισμό λυμάτων. Ένα κλασικό παράδειγμα εναλλάκτη θερμότητας μπορεί να βρεθεί σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης, στην οποία το ψυκτικό υγρό κινητήρα ρέει μέσα από πηνία καλοριφέρ και ο αέρας ρέει έξω από τα πηνία, έτσι το ψυκτικό υγρό ψύχεται και ο αέρας θερμαίνεται. Ένα άλλο παράδειγμα είναι ο απαγωγέας θερμότητας, όπου ένας παθητικός εναλλάκτης θερμότητας μεταφέρει τη θερμότητα που παράγεται από μία ηλεκτρονική ή μηχανική συσκευή σε ένα ρευστό μέσο, συχνά ένα ψυκτικό υγρό ή ένα ψυκτικό αέριο^[12].

Οι εναλλάκτες θερμότητας κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο ροής των εργαζόμενων ρευστών. Στους εναλλάκτες θερμότητας **ομορροής**, τα δύο

ρευστά εισέρχονται στον εναλλάκτη από το ίδιο άκρο και κινούνται μαζί παράλληλα προς το άλλο άκρο. Στους εναλλάκτες θερμότητας **αντιρροής**, τα ρευστά εισέρχονται στον εναλλάκτη από αντίθετα άκρα. Ο σχεδιασμός αντιρροής είναι ο πιο αποδοτικός επειδή έτσι μπορεί να μεταφερθεί η μέγιστη δυνατή θερμότητα από το θερμαντικό μέσο ανά μονάδα μάζας, λόγω του γεγονότος ότι η μέση διαφορά θερμοκρασίας κατά μήκος της μονάδας είναι υψηλότερη. Για τον λόγο αυτό, οι εναλλάκτες θερμότητας του συστήματος τριπαραγωγής είναι αντιρροής. Στους εναλλάκτες θερμότητας **σταυρωτής ροής**, τα ρευστά μέσα στον εναλλάκτη κινούνται κατά προσέγγιση κάθετα μεταξύ τους^[12].



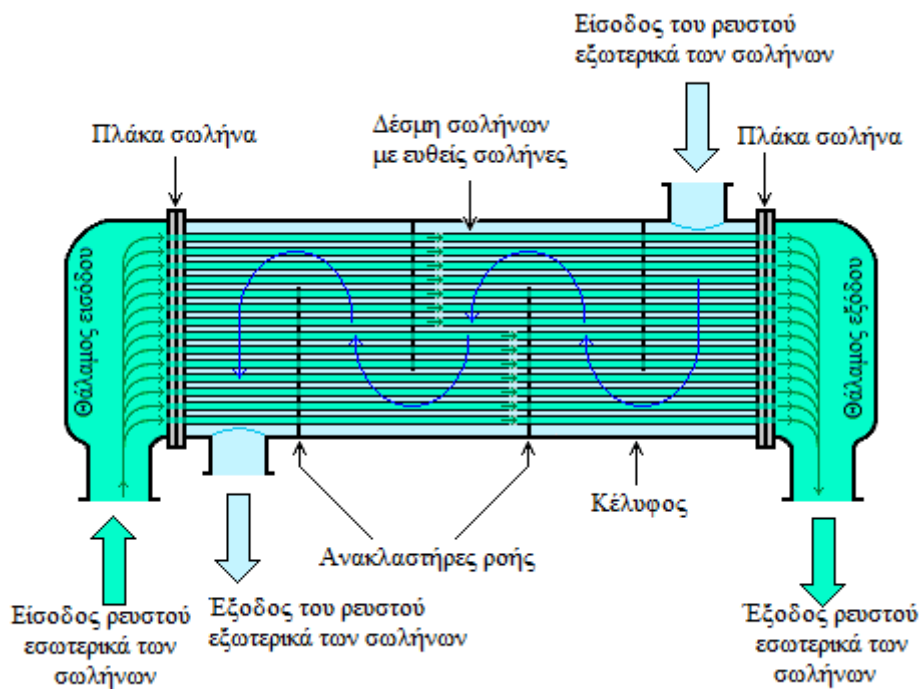
Εικ. 27: Ο μηχανισμός αντιρροής^[13]

Για καλύτερη απόδοση, οι εναλλάκτες θερμότητας σχεδιάζονται με σκοπό τη μεγιστοποίηση του τοιχώματος ανάμεσα στα δύο ρευστά και την ελαχιστοποίηση της αντίστασης της ροής των ρευστών στον εναλλάκτη. Η απόδοση του εναλλάκτη μπορεί επίσης να επηρεαστεί από την προσθήκη πτερυγίων ή αυλακώσεων σε μία ή και στις δύο κατευθύνσεις, τα οποία μπορούν να αυξήσουν την επιφάνεια και να προκαλέσουν τυρβώδη ροή^[12].

Οι εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα είναι οι πιο απλοί εναλλάκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία. Από τη μία πλευρά, αυτοί οι εναλλάκτες θερμότητας είναι φθηνοί τόσο στον σχεδιασμό όσο και στη συντήρηση, καθιστώντας τους μια καλή επιλογή για τις μικρές βιομηχανίες. Από την άλλη όμως, ο χαμηλός βαθμός απόδοσης τους σε συνδυασμό με τον μεγάλο χώρο που καταλαμβάνουν σε μεγάλες εφαρμογές, οδήγησαν τις σύγχρονες βιομηχανίες να χρησιμοποιήσουν πιο αποδοτικούς εναλλάκτες θερμότητας, όπως κελύφους - αυλών ή πλακοειδείς. Ωστόσο, μιας και οι εναλλάκτες θερμότητας διπλού σωλήνα είναι απλοί, χρησιμοποιούνται για τη διδασκαλία των βασικών χαρακτηριστικών των εναλλακτών θερμότητας σε σπουδαστές, καθώς οι θεμελιώδεις κανόνες για όλους τους εναλλάκτες θερμότητας είναι οι ίδιοι^[12].

Στο σύστημα τριπαραγωγής που μελετάται, λόγω της υψηλής πίεσης του αέρα, χρησιμοποιούνται εναλλάκτες θερμότητας κελύφους – αυλών. Οι εναλλάκτες θερμότητας κελύφους – αυλών αποτελούνται από μια σειρά σωλήνων. Μέσα σε ένα σύνολο σωλήνων κυκλοφορεί το ρευστό το οποίο ή θα ψυχθεί ή θα θερμανθεί. Το άλλο ρευστό κυκλοφορεί εξωτερικά των σωλήνων που θα ψυχθούν ή θα θερμανθούν, έτσι ώστε να απάγει ή να παρέχει τη θερμότητα που απαιτείται. Αυτό το σύνολο σωλήνων ονομάζεται δέσμη σωλήνων και μπορεί να αποτελείται από διάφορους τύπους σωλήνων όπως απλούς, κατά μήκος πτερυγοτούς κλπ. Όπως έχει προαναφερθεί, οι εναλλάκτες θερμότητας κελύφους - αυλών χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές υψηλής πίεσης (με πιέσεις μεγαλύτερες των 30 bar και θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 260 °C). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εναλλάκτες θερμότητας κελύφους – αυλών είναι ισχυροί λόγω της μορφής τους^[12]. Στην Εικ. 28 παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα ενός τυπικού εναλλακτή θερμότητας κελύφους – αυλών.

Κατά τον σχεδιασμό των σωλήνων της δέσμης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλά χαρακτηριστικά θερμικού σχεδιασμού. Μπορούν έτσι να υπάρξουν πολλές παραλλαγές στον σχεδιασμό των εναλλακτών θερμότητας κελύφους – αυλών. Συνήθως, τα άκρα κάθε σωλήνα συνδέονται με τους θαλάμους εισόδου και εξόδου διαμέσου τρυπών στις πλάκες του σωλήνα. Οι σωλήνες μπορεί να είναι ευθύγραμμοι ή λυγισμένοι σε σχήμα U^[12].



Εικ. 28: Σχεδιάγραμμα τυπικού εναλλάκτη θερμότητας κελύφους – αυλών^[12]

Διάμετρος σωλήνα: Χρησιμοποιώντας σωλήνες μικρής διαμέτρου ο εναλλάκτης θερμότητας γίνεται οικονομικός και συμπαγής. Ωστόσο, είναι πιο πιθανό ο εναλλάκτης θερμότητας να ρυπαίνεται πιο γρήγορα και το μικρό του μέγεθος να δυσχεραίνει τον καθαρισμό. Με σκοπό το ξεπέραςμα των προβλημάτων ρύπανσης και καθαρισμού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σωλήνες μεγαλύτερης διαμέτρου. Επομένως, για να προσδιοριστεί η διάμετρος των σωλήνων, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ο διαθέσιμος χώρος, το κόστος και ο τύπος ρύπανσης των ρευστών^[12].

Πάχος σωλήνα: Το πάχος του τοιχώματος των σωλήνων καθορίζεται για να εξασφαλιστεί^[12]:

- η ύπαρξη αρκετού χώρου όπου θα παρουσιαστεί διάβρωση
- η αντίσταση στους κραδασμούς που προκαλούνται από τη ροή
- η αντοχή σε αξονική καταπόνηση
- η διαθεσιμότητα ανταλλακτικών
- η αντοχή του τοιχώματος (στις πιέσεις στο εσωτερικό του σωλήνα)
- η αντοχή σε κάμψη (λόγω της υπερπίεσης στο κέλυφος)

Μήκος Σωλήνα: Οι εναλλάκτες θερμότητας είναι συνήθως φθηνότεροι όταν έχουν μικρή διάμετρο κελύφους και μεγάλο μήκος σωλήνων. Για τον λόγο αυτό, το μήκος του εναλλάκτη θερμότητας θα πρέπει να είναι όσο μεγαλύτερο γίνεται χωρίς να υπερβαίνει τις δυνατότητες της παραγωγής. Ωστόσο, υπάρχουν πολλοί περιορισμοί στην πραγματοποίηση αυτής της κατασκευής, συμπεριλαμβανομένου του διαθέσιμου χώρου στον τόπο εγκατάστασης και της ανάγκης να διασφαλιστεί ότι οι σωλήνες είναι διαθέσιμοι σε μήκη που είναι διπλάσια από το απαιτούμενο μήκος (έτσι ώστε να μπορούν να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν). Επίσης, είναι δύσκολο να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν πολύ λεπτοί και μακριοί σωλήνες^[12].

Βήμα σωλήνα: Κατά τον σχεδιασμό των σωλήνων, είναι χρήσιμο να διασφαλιστεί ότι το βήμα του σωλήνα (δηλαδή η απόσταση που απέχουν οι άξονες δύο γειτονικών σωλήνων) δεν είναι μικρότερο από 1.25 φορές την εξωτερική διάμετρο των σωλήνων. Ένα μεγαλύτερο βήμα σωλήνα οδηγεί σε μεγαλύτερη διάμετρο κελύφους, η οποία οδηγεί σε ακριβότερο εναλλάκτη θερμότητας^[12].

Αυλάκωση σωλήνα: Οι αυλακώσεις συνήθως χρησιμοποιούνται στους εσωτερικούς σωλήνες. Οι αυλακώσεις αυτές αυξάνουν την τύρβη του ρευστού και αυτό είναι πολύ σημαντικό κατά τη μεταφορά θερμότητας προσφέροντας έτσι καλύτερη απόδοση^[12].

Διάταξη σωλήνων: Η διάταξη σωλήνων αναφέρεται στο πώς είναι τοποθετημένοι οι σωλήνες εντός του κελύφους. Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι διάταξης σωλήνων: ο τριγωνικός (30°), ο περιστρεφόμενος τριγωνικός (60°), ο τετραγωνικός (90°) και ο περιστρεφόμενος τετραγωνικός (45°). Οι τριγωνικές διατάξεις χρησιμοποιούνται για να παρέχουν καλύτερη μεταφορά θερμότητας καθώς εξαναγκάζουν το ρευστό να πραγματοποιεί ακόμα εντονότερη τυρβώδη ροή. Οι τετραγωνικές διατάξεις χρησιμοποιούνται όταν αναμένεται μεγαλύτερη ρύπανση των σωλήνων και ο καθαρισμός είναι πιο τακτικός^[12].

Σχεδιασμός ανακλαστήρων ροής: Οι ανακλαστήρες ροής χρησιμοποιούνται στους εναλλάκτες θερμότητας κελύφους – αυλών και σκοπός τους είναι η κατεύθυνση του ρευστού κατά μήκος της δέσμης σωλήνων. Είναι τοποθετημένοι κάθετα στο κέλυφος, (όπως φαίνεται στην Εικ. 28) και συγκρατούν τη δέσμη, εμποδίζοντας τους σωλήνες να κλίνουν υπό το βάρος σε μεγάλο μήκος. Μπορούν επίσης να εμποδίσουν τους κραδασμούς των σωλήνων. Ο πιο συνηθισμένος τύπος ανακλαστήρων ροής, που χρησιμοποιείται και στους εναλλάκτες του συστήματος, είναι οι τμηματικοί ανακλαστήρες. Οι ημικυκλικοί τμηματικοί

ανακλαστές ροής είναι προσανατολισμένοι κατά 180° προς τους γειτονικούς ανακλαστές και εξαναγκάζουν το ρευστό να κινείται προς τα πάνω και προς τα κάτω αναμεσίζ της δέσμης σωλήνων. Η απόσταση μεταξύ των ανακλαστών έχει μεγάλη θερμοδυναμική σημασία κατά τον σχεδιασμό των εναλλακτών θερμότητας κελύφους – αυλών. Οι ανακλαστές ροής θα πρέπει να είναι τοποθετημένοι μεταξύ τους με τη σκέψη στην πτώση πίεσης και στη μεταφορά θερμότητας. Για λόγους θερμοοικονομικής βελτίωσης, προτείνεται οι ανακλαστές ροής να μην απέχουν λιγότερο από το 20% της εσωτερικής διαμέτρου του κελύφους. Η ύπαρξη ανακλαστών ροής τοποθετημένων πολύ κοντά μεταξύ τους προκαλεί μεγαλύτερη πτώση πίεσης λόγω της ανακατεύθυνσης της ροής. Επίσης, η ύπαρξη ανακλαστών ροής τοποθετημένων σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους σημαίνει ότι μπορεί να υπάρχουν ψυχρότερα σημεία στις γωνίες μεταξύ των ανακλαστών. Είναι επίσης σημαντικό να εξασφαλιστεί ότι οι ανακλαστές ροής είναι τοποθετημένοι αρκετά κοντά μεταξύ τους, έτσι ώστε οι σωλήνες να μην κλίνουν υπό το βάρος^[12].

Στην Εικ. 29 παρουσιάζεται ο εναλλάκτης θερμότητας που χρησιμοποιείται στο σύστημα τριπαραγωγής.



Εικ. 29: Εναλλάκτης θερμότητας κελύφους – αυλών^[48].

3.4.3. Δεξαμενές θερμού και ψυχρού υγρού

Όπως προαναφέρθηκε, στην εγκατάσταση αυτή χρησιμοποιούνται δύο δεξαμενές από ανοξείδωτο ατσάλι για την αποθήκευση του θερμού και του ψυχρού υγρού που θα χρησιμοποιηθεί στους εναλλάκτες θερμότητας. Στα πλεονεκτήματα των συγκεκριμένων δεξαμεμών περιλαμβάνονται^[15]:

- **Χημική αντοχή:** Οι μεταλλικές δεξαμενές μπορούν να αποθηκεύσουν επιβλαβείς χημικές ουσίες, τις οποίες οι μη μεταλλικές δεξαμενές δεν μπορούν να αντέξουν.
- **Προσαρμογή:** Οι συγκεκριμένες δεξαμενές μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα στις ανάγκες της κάθε εγκατάστασης.
- **Μακροζωία:** Οι μεταλλικές δεξαμενές είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές στις επιδράσεις της διάβρωσης και άλλων φυσικών στοιχείων
- **Ανθεκτικότητα:** Με διπλή συγκόλληση οι μεταλλικές δεξαμενές εγγυώνται ένα ασφαλές περιβάλλον χωρίς διαρροές.
- **Κόστος:** Επειδή οι συγκεκριμένες δεξαμενές αντέχουν περισσότερο από τις μη μεταλλικές, παρά το αυξημένο αρχικό τους κόστος, το κόστος ιδιοκτησίας μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.

Στην Εικ. 30 παρουσιάζονται οι μεταλλικές δεξαμενές που θα χρησιμοποιηθούν στο σύστημα τριπαραγωγής.



Εικ. 30: Δεξαμενές αποθήκευσης υγρού από ανοξείδωτο ατσάλι^[49]

3.4.4. Αντλία θερμικού υγρού

Όπως έχει προαναφερθεί το θερμικό υγρό αντλείται από τις δεξαμενές αποθήκευσης υγρού, όποτε παραστεί ανάγκη, μέσω μίας αντλίας θερμικού υγρού. Αυτή η αντλία είναι μια φυγοκεντρική αντλία. Οι φυγοκεντρικές αντλίες είναι μια υποκατηγορία δυναμικών αξονοσυμμετρικών στροβιλομηχανών που καταναλώνουν έργο. Οι φυγοκεντρικές αντλίες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ρευστών μετατρέποντας την περιστροφική κινητική ενέργεια σε υδροδυναμική ενέργεια της ροής του ρευστού. Η περιστροφική κινητική ενέργεια προέρχεται συνήθως από έναν κινητήρα. Το ρευστό εισέρχεται στην πτερωτή της αντλίας κατά μήκος ή πλησίον του άξονα περιστροφής και επιταχύνεται από την πτερωτή ρέοντας ακτινικά προς τα έξω σε έναν διαχύτη από όπου και εξέρχεται^[16]. Στην Εικ. 31 παρουσιάζεται η αντλία θερμικού υγρού που χρησιμοποιείται στο σύστημα τριπαραγωγής.

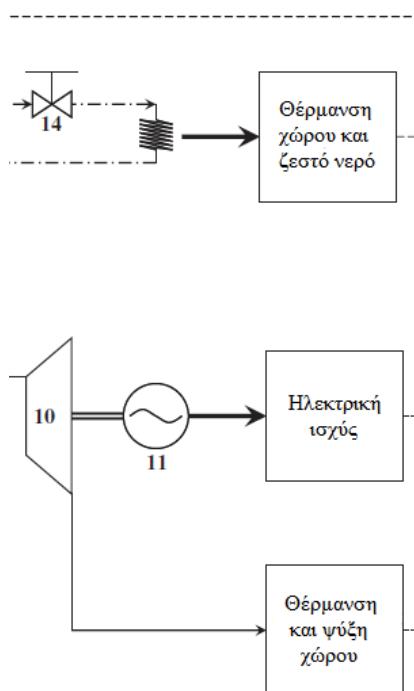


Εικ. 31: Αντλία θερμικού υγρού^[50]

3.5. Μονάδα έκλυσης και απολαβής ενέργειας

3.5.1. Γενικά για τη μονάδα έκλυσης και απολαβής ενέργειας

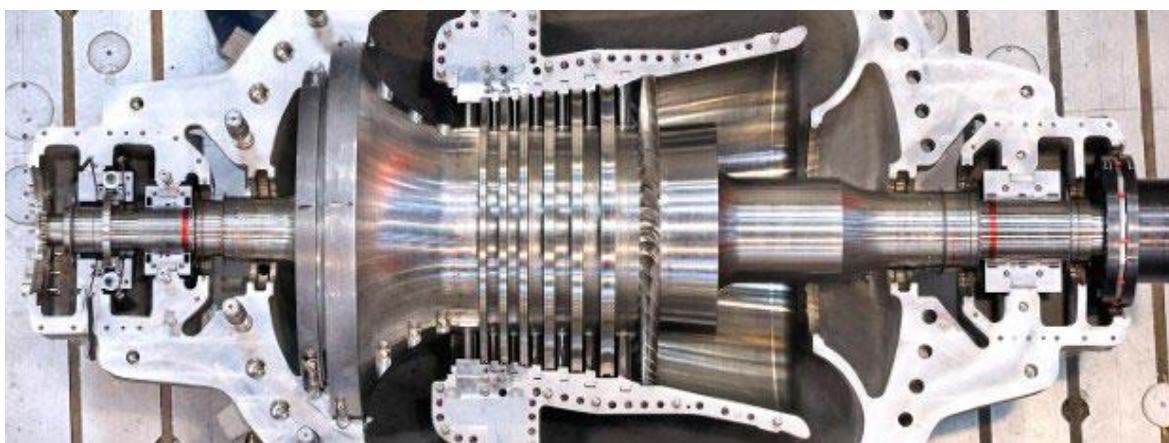
Η μονάδα έκλυσης και απολαβής ενέργειας αποτελείται από έναν στρόβιλο, μια γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος και ένα σύστημα καλοριφέρ. Μόλις ο πεπιεσμένος αέρας εξέλθει από τον εναλλάκτη θερμότητας που βρίσκεται αμέσως μετά τη δεξαμενή αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα, θα οδηγηθεί σε έναν στρόβιλο όπου η πίεση του θα εκτονωθεί και ο στρόβιλος θα κινήσει μια γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό θα παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια που ζητείται από τον καταναλωτή. Εκτός από την ηλεκτρική ενέργεια, από τον στρόβιλο θα εξέλθει θερμός ή ψυχρός αέρας (ανάλογα τη ζήτηση) ο οποίος θα θερμάνει ή θα ψύξει τον χώρο. Στην περίπτωση που δεν απαιτείται παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ψύξης, είναι ακόμα πιο αποδοτικό για το σύστημα αυτό να αντληθεί θερμικό υγρό από τη δεξαμενή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, το οποίο θα θερμάνει το νερό του καλοριφέρ και αυτό με τη σειρά του θα παρέχει ζεστό νερό και θέρμανση χώρου. Στην Εικ. 32 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα της μονάδας έκλυσης και απολαβής ενέργειας.



Εικ. 32: Μονάδα έκλυσης και απολαβής ενέργειας^[1]

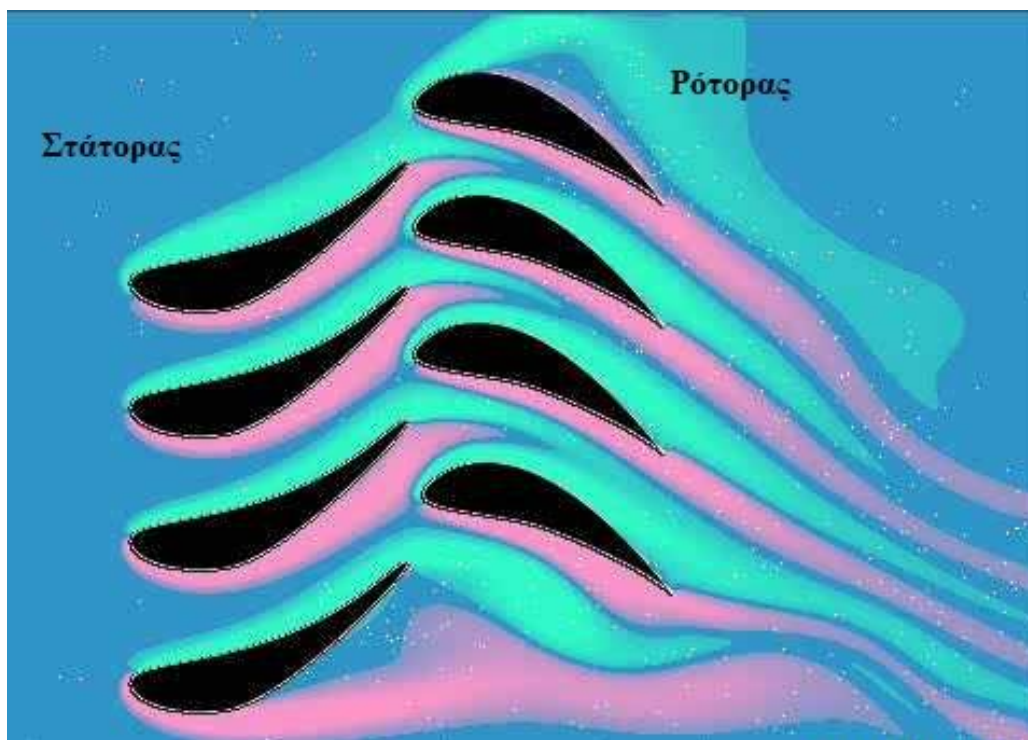
3.5.2. Στρόβιλος εκτόνωσης αερίου

Ο στρόβιλος εκτόνωσης αερίου είναι μια περιστροφική μηχανική συσκευή η οποία παραλαμβάνει ενέργεια από τη ροή ενός αερίου σε υψηλή πίεση και τη μετατρέπει σε χρήσιμη^[17]. Η ροή του στρόβιλου είναι αξονική. Το έργο που παράγεται από έναν στρόβιλο εκτόνωσης αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όταν αυτός συνδυάζεται με μία γεννήτρια ηλεκτρικής ενέργειας. Ο στρόβιλος εκτόνωσης αερίου είναι μία στροβιλομηχανή που το κινούμενο μέρος της αποτελείται από μία περιστρεφόμενη άτρακτο με προσαρτημένα πτερύγια που ονομάζεται ρότορας. Το ακίνητο μέρος της με τα προσαρτημένα πτερύγια ονομάζεται στάτορας. Το κινούμενο ρευστό επενεργεί στα πτερύγια και τα μετακινεί, προσδίδοντας έτσι περιστροφική κινητική ενέργεια στον ρότορα. Επειδή το έργο παράγεται από την εκτόνωση αερίου σε υψηλή πίεση, η εκτόνωση είναι προσεγγιστικά μία ισεντροπική διεργασία^[18]. Στην Εικ. 33 παρουσιάζεται η διατομή ενός τυπικού στρόβιλου εκτόνωσης αερίου.



Εικ. 33: Διατομή στρόβιλου εκτόνωσης αερίου^[51]

Ο στρόβιλος εκτόνωσης αποτελεί έναν στρόβιλο αντίδρασης. Οι στρόβιλοι αντίδρασης αναπτύσσουν ροπή αντιδρώντας στην πίεση του αερίου. Η πίεση του αερίου μεταβάλλεται (μειώνεται) καθώς διέρχεται από τα πτερύγια του ρότορα του στρόβιλου. Τα πτερύγια του στάτορα ανακατευθύνουν τη ροή για πιο αποτελεσματική περιστροφή του ρότορα. Στην Εικ. 34 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική ροή αερίου διαμέσου των πτερυγίων του ρότορα και του στάτορα.

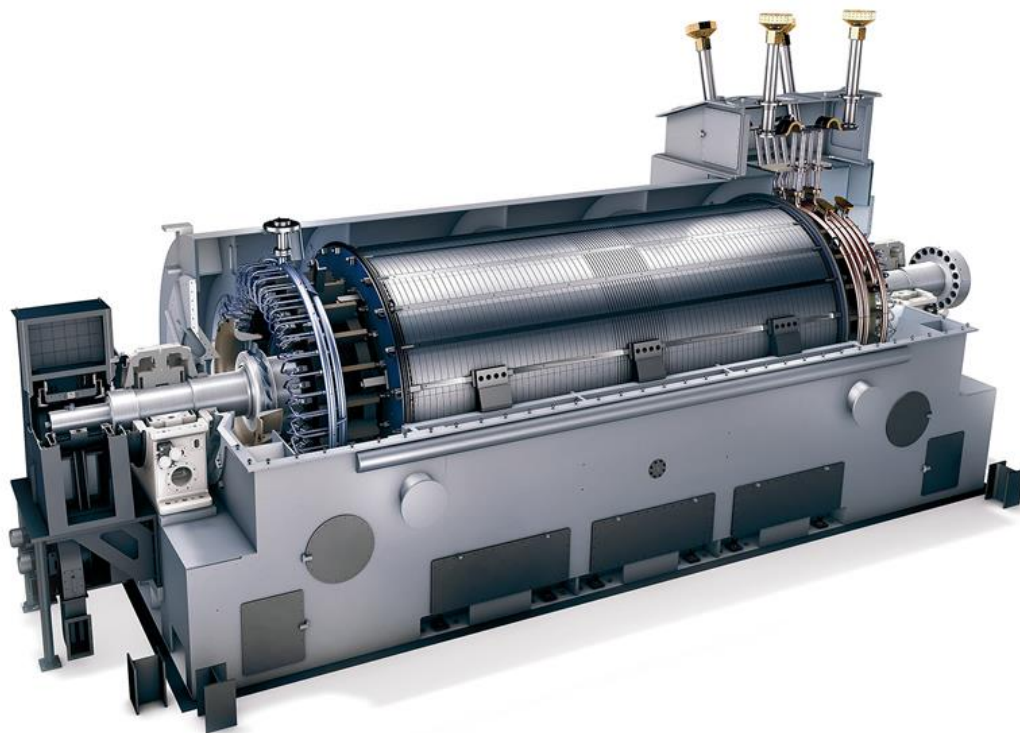


Εικ. 34: Ροή του αερίου στον στάτορα και τον ρότορα^[52]

3.5.3. Γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος

Η γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος είναι η συσκευή που μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η γεννήτρια, όπως είναι φυσικό, δεν παράγει την ηλεκτρική ενέργεια από μόνη της, θα πρέπει πρώτα να συλλέξει τη μηχανική ενέργεια από μία άλλη πηγή. Στην προκειμένη περίπτωση, η πηγή αυτή είναι ο στρόβιλος εκτόνωσης αερίου που προηγείται της γεννήτριας. Όπως προαναφέρθηκε, η κινητική ενέργεια του αερίου περιστρέφει την περιστρεφόμενη άτρακτο του στροβίλου. Η άτρακτος του στροβίλου είναι συνδεδεμένη με την άτρακτο της γεννήτριας και έτσι περιστρέφεται και η άτρακτος της γεννήτριας.

Η γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος αποτελείται από δύο μέρη. Το ακίνητο μέρος της που ονομάζεται στάτορας και στο οποίο υπάρχουν μαγνήτες και το κινητό μέρος της που ονομάζεται ρότορας και στο οποίο υπάρχει πηνίο. Όταν το πηνίο του ρότορα περιστρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο που προκαλούν οι μαγνήτες, στα άκρα του παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Στην Εικ. 35 παρουσιάζεται μια γεννήτρια που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην έξοδο του συστήματος τριπαραγωγής.



Εικ. 35: Γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος^[53]

4. Θερμοδυναμική ανάλυση του συστήματος τριπαραγωγής

4.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί θερμοδυναμική ανάλυση της μονάδας συμπίεσης αέρα και της μονάδας έκλυσης και απολαβής ενέργειας. Επίσης θα αναφερθεί, ως μελέτη περίπτωσης, η εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος τριπαραγωγής σε ένα συγκρότημα γραφείων στο Σικάγο. Τα διαγράμματα που ακολουθούν προέκυψαν με ανάλυση σε λογισμικό MATLAB των ακόλουθων εξισώσεων και από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στο συγκρότημα γραφείων από τους Yongliang Li, Xiang Wang, Dacheng Li και Yulong Ding^[1]. Οι κώδικες MATLAB που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας.

4.2. Θερμοδυναμική ανάλυση της διεργασίας συμπίεσης αέρα

Κατ' αρχάς, η συμπίεση και η αποθήκευση αέρα είναι ασταθείς διεργασίες, καθώς η τιμή της πίεσης του αέρα στη δεξαμενή αποθήκευσης μεταβάλλεται με τον χρόνο και ως εκ τούτου μεταβάλλεται και η κατανάλωση ενέργειας του συμπιεστή. Για τον λόγο αυτό, στην προσέγγιση που θα ακολουθηθεί, η διεργασία της συμπίεσης θα εκληφθεί ως μια σειρά υποδιεργασιών συμπίεσης σε συγκεκριμένους λόγους πίεσης. Επειδή η πίεση αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα είναι πολύ υψηλή (έτσι ώστε να επιτευχθεί υψηλή ενεργειακή πυκνότητα) και η κλίμακα των αντίστοιχων εφαρμογών μικρή, όπως έχει προαναφερθεί, θεωρούνται καταλληλότεροι οι εμβολοφόροι συμπιεστές. Υποθέτοντας ότι ο λόγος πίεσης είναι ο ίδιος για όλα τα στάδια της συμπίεσης και ότι η συμπίεση είναι πολυτροπική, η κατανάλωση ενέργειας της διεργασίας συμπίεσης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση^[1]:

$$w = \frac{N \cdot n}{n-1} \cdot R^* T_0 \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{N \cdot n}} - 1 \right] \quad (1)$$

όπου το N αναπαριστά τον αριθμό των σταδίων συμπίεσης με ενδιάμεση ψύξη, το R^* είναι η ειδική σταθερά για τον αέρα και ισούται με $286.69 \text{ J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$, το n είναι ο πολυτροπικός συντελεστής, ο οποίος λαμβάνει τιμές από 1.0 έως γ (αδιαβατικός δείκτης), με το $n=1.0$ να αντιστοιχεί στην ισόθερμη διεργασία και το $n=\gamma$ να αντιστοιχεί στην αδιαβατική διεργασία, τα p_0 και T_0 αντιστοιχούν στην πίεση και στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και

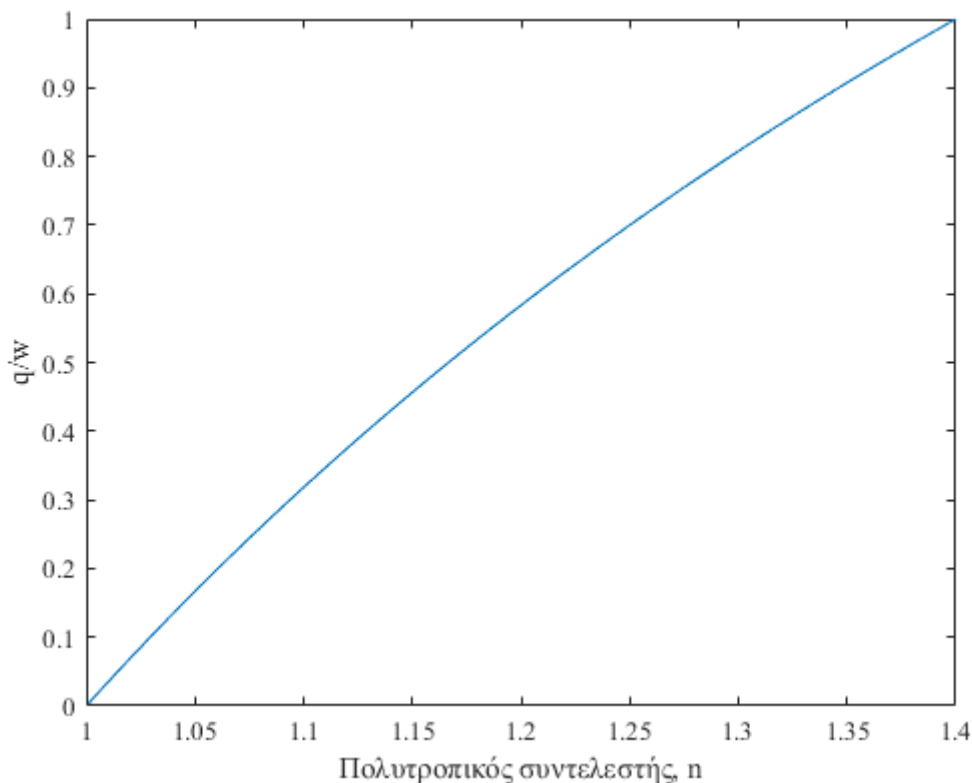
το p είναι η πίεση εξόδου. Η διεργασία ενδιάμεσης ψύξης είναι ισοβαρής και αποσκοπεί στην αφαίρεση της θερμότητας που παράγεται κατά τη συμπίεση. Η θερμότητα αυτή μπορεί να οριστεί ως^[1]:

$$q = c_p (T - T_0) = \frac{N \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot R^* T_0 \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{n-1}{N \cdot n}} - 1 \right] \quad (2)$$

όπου c_p η θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση που ισούται με 1.005 KJ/(kg·K). Από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει η σχέση:

$$\frac{q}{w} = \frac{\gamma \cdot (n-1)}{n \cdot (\gamma-1)} \quad (3)$$

που εκφράζει τον λόγο της θερμότητας που παράγεται και έπειτα αφαιρείται προς το καταναλισκόμενο έργο. Στην Εικ. 1 παρουσιάζεται το διάγραμμα του λόγου της θερμότητας που αφαιρείται προς το καταναλισκόμενο έργο σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n .



Εικ. 1: Ο λόγος της θερμότητας που αφαιρείται προς το καταναλισκόμενο έργο σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n .

Υποθέτοντας ότι η περαιτέρω διεργασία της αποθήκευσης στη δεξαμενή είναι ισόθερμη σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με τη χρήση της καταστατικής εξίσωσης των ιδανικών αερίων προκύπτει:

$$dm = d\left(\frac{pV}{R^*T_0}\right) = \frac{V}{R^*T_0} dp \quad (4)$$

όπου dm είναι η στοιχειώδης μάζα αέρα που αντιστοιχεί σε μια στοιχειώδη αύξηση της πίεσης της δεξαμενής. Ολοκληρώνοντας μεταξύ δύο καταστάσεων (1-2), 1: $p_1=15 \text{ bar}$ και 2: $p_2=300 \text{ bar}$, για $V=1 \text{ m}^3$ και για $T_0=15^\circ\text{C}$, προκύπτει η συνολική μάζα του συμπιεσμένου αέρα M_C που παράγεται κατά τη διεργασία:

$$M_C = \int_1^2 dm = \frac{V}{R^*T_0} (p_2 - p_1) = 0.3452 \text{ kg} \quad (5)$$

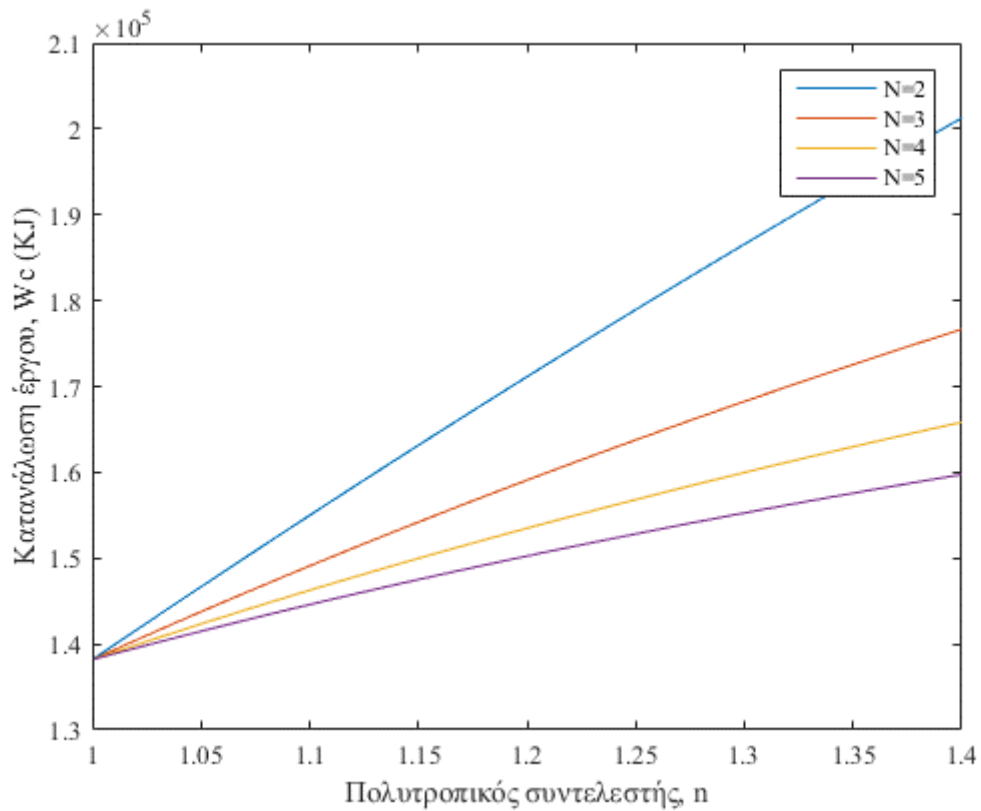
Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1), (4) και ολοκληρώνοντας μεταξύ δύο καταστάσεων (1-2), 1: $p_1=15 \text{ bar}$ και 2: $p_2=300 \text{ bar}$, προκύπτει η κατανάλωση έργου της συμπίεσης (W_C)^[1]:

$$\begin{aligned} W_C &= \int_1^2 w dm = \frac{N \cdot n V}{n-1} \int_1^2 \left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{n-1}{N-n}} - 1 \right] dp = \\ &= \frac{N \cdot n V p_0}{n-1} \left\{ \frac{N \cdot n}{n(N+1)-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{n(N+1)-1}{N-n}} - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{n(N+1)-1}{N-n}} \right] - \left[\frac{p_2 - p_1}{p_0} \right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

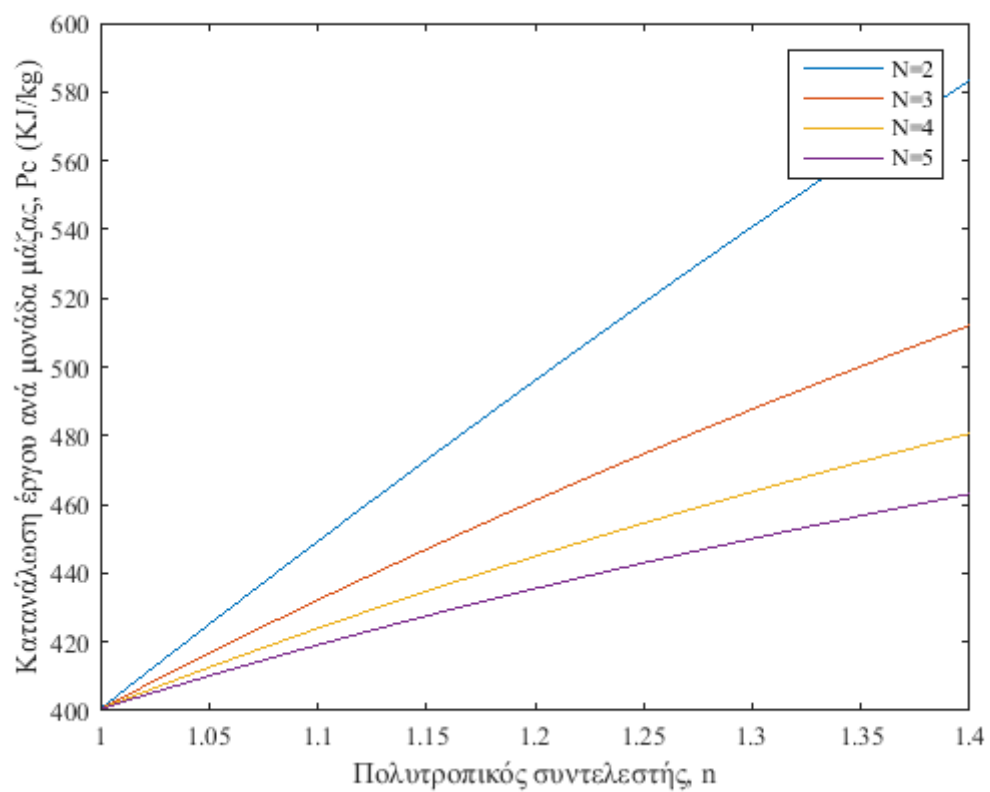
Επομένως, η κατανάλωση έργου ανά μονάδα μάζας συμπιεσμένου αέρα είναι^[1]:

$$\begin{aligned} P_C &= \frac{W_C}{M_C} = \\ &= \frac{N \cdot n R^* T_0}{n-1} \frac{p_0}{p_2 - p_1} \left\{ \frac{N \cdot n}{n(N+1)-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{n(N+1)-1}{N-n}} - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{n(N+1)-1}{N-n}} \right] - \left[\frac{p_2 - p_1}{p_0} \right] \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

Στις Εικ. 2 και 3 παρουσιάζονται αντίστοιχα τα διαγράμματα της κατανάλωσης έργου και της κατανάλωσης έργου ανά μονάδα μάζας συμπιεσμένου αέρα κατά τη διεργασία της συμπίεσης του αέρα για διάφορους αριθμούς σταδίων συμπίεσης σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n .



Εικ. 2: Κατανάλωση έργου κατά τη διεργασία της συμπίεσης του αέρα για διάφορους αριθμούς σταδίων συμπίεσης σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n .

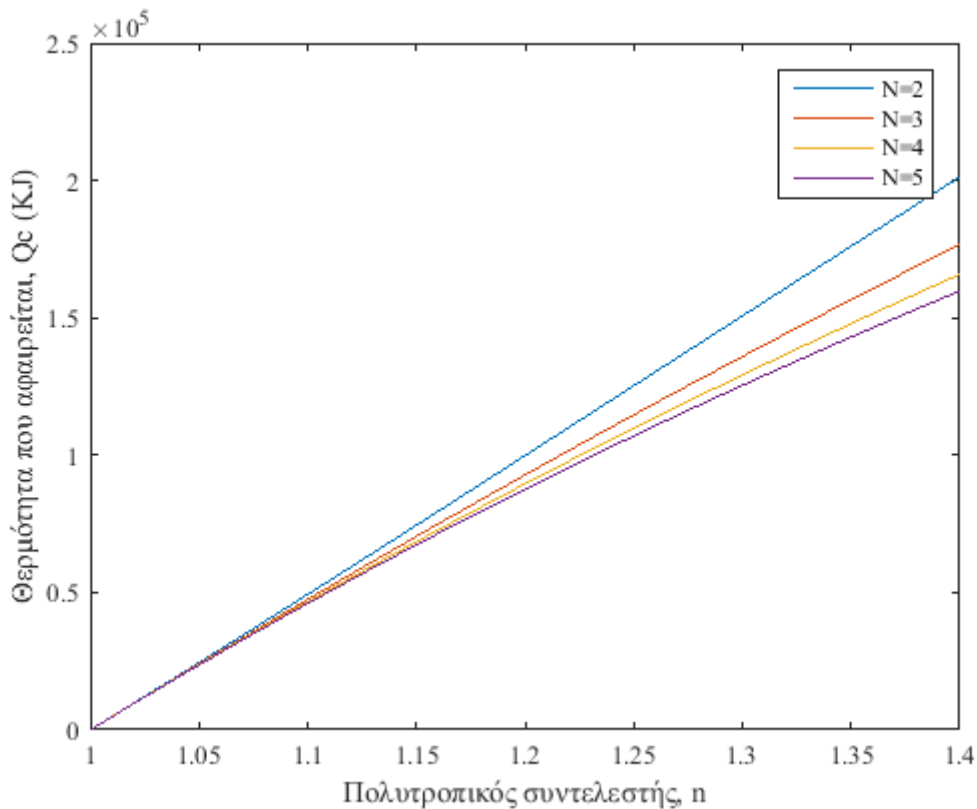


Εικ. 3: Κατανάλωση έργου ανά μονάδα μάζας πεπιεσμένου αέρα σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n .

Παρομοίως, η θερμότητα που αφαιρείται κατά τη διεργασία της συμπίεσης του αέρα, μπορεί να εκφραστεί ως^[1]:

$$Q_C = \frac{\gamma \cdot (n-1)}{n \cdot (\gamma-1)} W_C = \frac{N \cdot \gamma \cdot V}{\gamma-1} \cdot p_0 \left\{ \frac{N \cdot n}{n(N+1)-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{n(N+1)-1}{N \cdot n}} - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{n(N+1)-1}{N \cdot n}} \right] - \left[\frac{p_2 - p_1}{p_0} \right] \right\} \quad (8)$$

Στο διάγραμμα της Εικ. 4 παρουσιάζεται η θερμότητα που αφαιρείται κατά τη διεργασία συμπίεσης του αέρα σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n . Παρατηρείται ότι η θερμότητα που αφαιρείται δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα για διαφορετικούς αριθμούς σταδίων συμπίεσης.



Εικ. 4: Η θερμότητα που αφαιρείται κατά τη διεργασία συμπίεσης του αέρα σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n .

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό ότι η κατανάλωση έργου εξαρτάται πολύ από τον πολυτροπικό συντελεστή n και τον αριθμό των σταδίων συμπίεσης N . Παρατηρείται ότι για $N=4$ και για $N=5$ η κατανάλωση έργου είναι αισθητά μικρότερη και δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στην κατανάλωση ανάμεσα στις δύο αυτές τιμές σταδίων συμπίεσης. Για

το λόγο αυτό είναι προτιμότερα τα 4 στάδια συμπίεσης. Με τη χρήση 5 σταδίων συμπίεσης, να μεν η κατανάλωση έργου θα ήταν μικρότερη αλλά το οικονομικό κόστος λόγω των πέντε σταδίων θα ήταν αισθητά μεγαλύτερο.

4.3. Θερμοδυναμική ανάλυση της διεργασίας έκλυσης ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε, η βασική διαφορά μεταξύ του προτεινόμενου συστήματος και ενός συμβατικού συστήματος τριπαραγωγής, έγκειται στον τρόπο παραγωγής της ψυκτικής ισχύος. Σε μια τυπική οικιακή εφαρμογή, η θέρμανση του εσωτερικού χώρου είναι η βασική απαίτηση τον χειμώνα, ενώ η ψύξη του είναι η βασική απαίτηση το καλοκαίρι. Για τον λόγο αυτό, είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η χρήση κοινών εξαρτημάτων για την παραγωγή θέρμανσης και ψύξης. Παράλληλα, η διαμόρφωση του συστήματος θα πρέπει να παραμείνει απλή. Το προτεινόμενο σύστημα μπορεί (αν παρέχεται η κατάλληλη θερμοκρασία και πίεση στην είσοδο του στροβίλου 10) να συμπαράγει ταυτόχρονα θερμική ενέργεια (θέρμανση ή ψύξη) και ηλεκτρική ενέργεια, μέσω της εκτόνωσης του συμπιεσμένου αέρα στον στρόβιλο. Ως εκ τούτου, ο στρόβιλος εκτόνωσης αερίου 10 αποτελεί ένα βασικό στοιχείο του συστήματος και θα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί σε λόγους πίεσης από 5 έως 15 και σε θερμοκρασία εισόδου από 15 °C έως 290 °C. Η πίεση και η θερμοκρασία εισόδου ελέγχονται εύκολα, όπως έχει προαναφερθεί, μέσω του ρυθμιστή πίεσης 8 και της αντλίας θερμικού υγρού 13. Ωστόσο, για να ανταποκριθεί ο στρόβιλος 10 σε συγκεκριμένες απαιτήσεις, μπορεί να χρειαστεί να λειτουργήσει σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού. Οι ακόλουθες εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί ο διορθωμένος ρυθμός ροής μάζας και η απόδοση του στροβίλου σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού^[1].

$$\dot{m} = \dot{m}_{ref} \frac{P}{P_{ref}} \sqrt{\frac{T_{ref}}{T}} \quad (9)$$

Η απόδοση του στροβίλου αξιολογείται από τον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης η και όχι από τον πολυτροπικό συντελεστή n , καθώς η εκτόνωση του αέρα στον στρόβιλο είναι κατά προσέγγιση μια ισεντροπική διεργασία^[1].

$$\eta = \eta_{ref} \left[1 - \left(\sqrt{\frac{\Delta h_{s,ref}}{\Delta h_s}} - 1 \right)^2 \right] \quad (10)$$

όπου \dot{m} , P και T είναι αντίστοιχα ο ρυθμός ροής μάζας, η πίεση και η θερμοκρασία στην είσοδο του στροβίλου, ο δείκτης “ref” δηλώνει την τιμή αναφοράς και Δh_s είναι η μεταβολή της ενθαλπίας μέσα στον στρόβιλο κατά τη διάρκεια μιας ισεντροπικής διεργασίας. Η μεταβολή της ενθαλπίας Δh δίνεται από τη σχέση^[22]:

$$\Delta h = c_p (T_{out} - T) \quad (11)$$

Όπου T_{out} η θερμοκρασία σε μονάδες Kelvin στην έξοδο του στροβίλου.

Επειδή, όπως προαναφέρθηκε, η διεργασία της εκτόνωσης είναι κατά προσέγγιση ισεντροπική και επειδή το αέριο θεωρείται τέλει ισχύει η σχέση^[22]:

$$\frac{T}{T_{out}} = \left(\frac{P}{P_{out}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (12)$$

Όπου P_{out} η πίεση στην έξοδο του στροβίλου.

Καθώς ο στρόβιλος λειτουργεί μέσα σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασίας και πίεσης εισόδου, η εκτός σχεδιασμού απόδοση επηρεάζεται από την πίεση και τη θερμοκρασία αναφοράς. Θεωρώντας ότι ο λόγος πίεσης αναφοράς είναι 10.0, ο μέσος βαθμός απόδοσης μπορεί να οριστεί ως^[1]:

$$\bar{\eta} = \frac{\int_{P_{lower}}^{P_{upper}} \int_{T_{lower}}^{T_{upper}} \frac{\eta \cdot \dot{m}}{\eta_{ref}} dPdT}{\int_{P_{lower}}^{P_{upper}} \int_{T_{lower}}^{T_{upper}} \dot{m} dPdT} \quad (13)$$

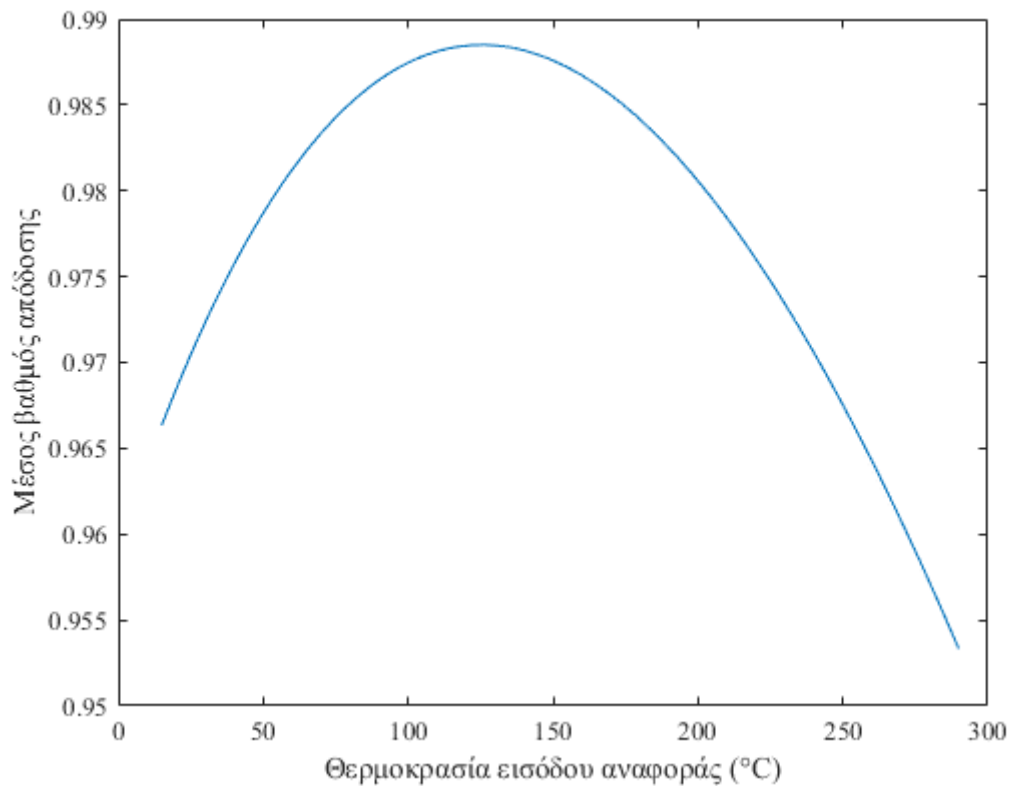
όπου τα “upper” και “lower” εκφράζουν αντίστοιχα τα άνω και κάτω όρια των συνθηκών λειτουργίας.

Επιλύοντας τα παραπάνω διπλά ολοκληρώματα προκύπτει η εξάρτηση του μέσου βαθμού απόδοσης από την T_{ref} :

$$\bar{\eta} = 0.099026 \sqrt{T_{ref}} - 0.00248007 T_{ref} \quad (14)$$

Όπου T_{ref} η θερμοκρασία εισόδου αναφοράς σε μονάδες Kelvin.

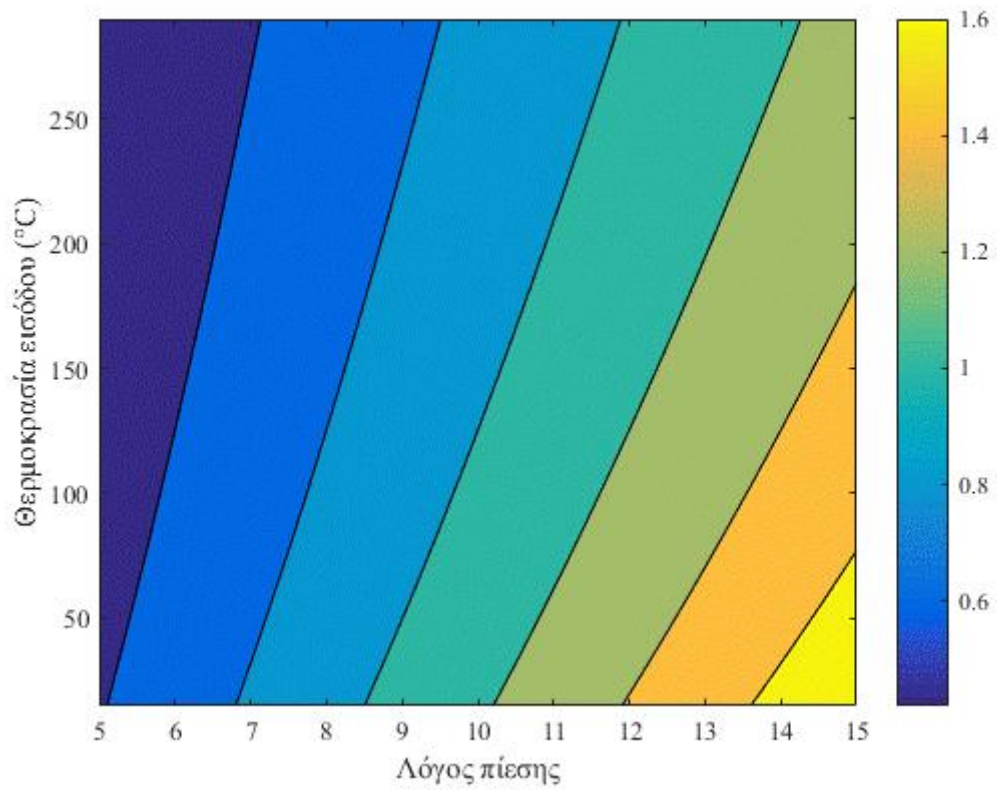
Στην Εικ. 4 παρουσιάζεται το διάγραμμα του μέσου βαθμού απόδοσης $\bar{\eta}$ σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εισόδου αναφοράς T_{ref} .



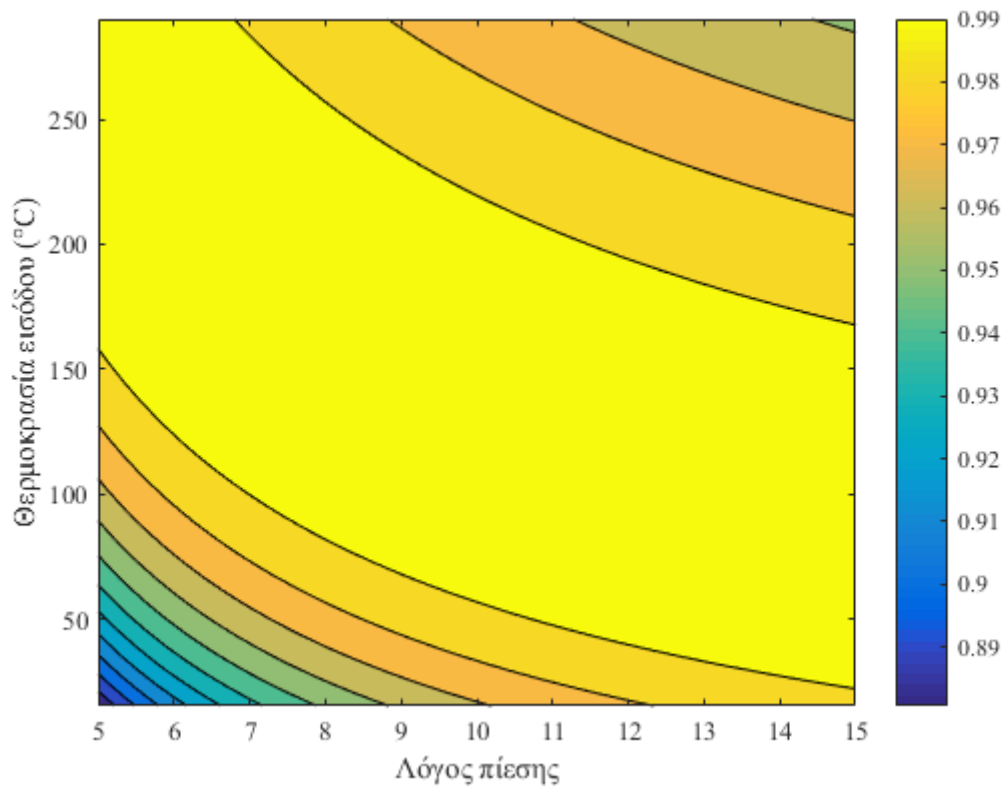
Εικ. 5: Ο μέσος βαθμός απόδοσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία αναφοράς στην είσοδο του στροβίλου

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή του μέσου βαθμού απόδοσης είναι $\bar{\eta} = 0.9885$ και αντιστοιχεί για $T_{ref} = 125.4 \text{ } ^\circ\text{C}$. Αυτή η τιμή του T_{ref} θα επιλεγεί ως η θερμοκρασία εισόδου αναφοράς στην ακόλουθη προσομοίωση.

Από τις σχέσεις (9) και (10) και για $P_{ref} = 10$ και $T_{ref} = 125.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ προκύπτουν τα διαγράμματα στις Εικ. 6 και Εικ. 7 που παρουσιάζουν τον κανονικοποιημένο ρυθμό ροής μάζας και τον κανονικοποιημένο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του στροβίλου σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού.



Εικ. 6: Κανονικοποιημένος ρυθμός ροής μάζας \dot{m} / \dot{m}_{ref} σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού



Εικ. 7: Κανονικοποιημένος ισεντροπικός βαθμός απόδοσης η / η_{ref} σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού

Από την Εικ. 6 είναι φανερό ότι ο ρυθμός ροής μάζας του στροβίλου αυξάνεται, αν αυξηθεί ο λόγος πίεσης και μειωθεί η θερμοκρασία εισόδου. Όσο ο λόγος πίεσης και η θερμοκρασία εισόδου μεταβάλλονται από 5 σε 15 και από 15 °C σε 290 °C αντίστοιχα, ο κανονικοποιημένος ρυθμός ροής μάζας κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 1.6. Αυτό υποδηλώνει ότι το σύστημα είναι ικανό να ανταπεξέλθει σε ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων. Είναι αξιοσημείωτο, ότι παρά το μεγάλο εύρος του ρυθμού ροής μάζας, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης παραμένει πάνω από το 95% του βαθμού απόδοσης αναφοράς στις περισσότερες συνθήκες εκτός σχεδιασμού, εκτός από τις συνθήκες με πολύ χαμηλούς λόγους πίεσης και χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου, όπως φαίνεται και στην Εικ. 7.

Η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του στροβίλου προκύπτει από τη σχέση^[22]:

$$T_{out} = T \cdot \left(1 - \eta_{is} \cdot \left(1 - \pi_T^{-\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)} \right) \right) \quad (15)$$

Όπου T_{out} είναι η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του στροβίλου, T είναι η θερμοκρασία του αέρα στην είσοδο του στροβίλου, η_{is} είναι ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου στην κατάσταση αναφοράς και ισούται με 0.9 και π_T είναι ο λόγος πίεσης του στροβίλου.

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από το σύστημα δίνεται από τη σχέση^[1]:

$$P_{el} = \dot{m}_{ref} \frac{P}{P_{ref}} \sqrt{\frac{T_{ref}}{T}} \cdot c_p \cdot (T - T_{out}) \quad (16)$$

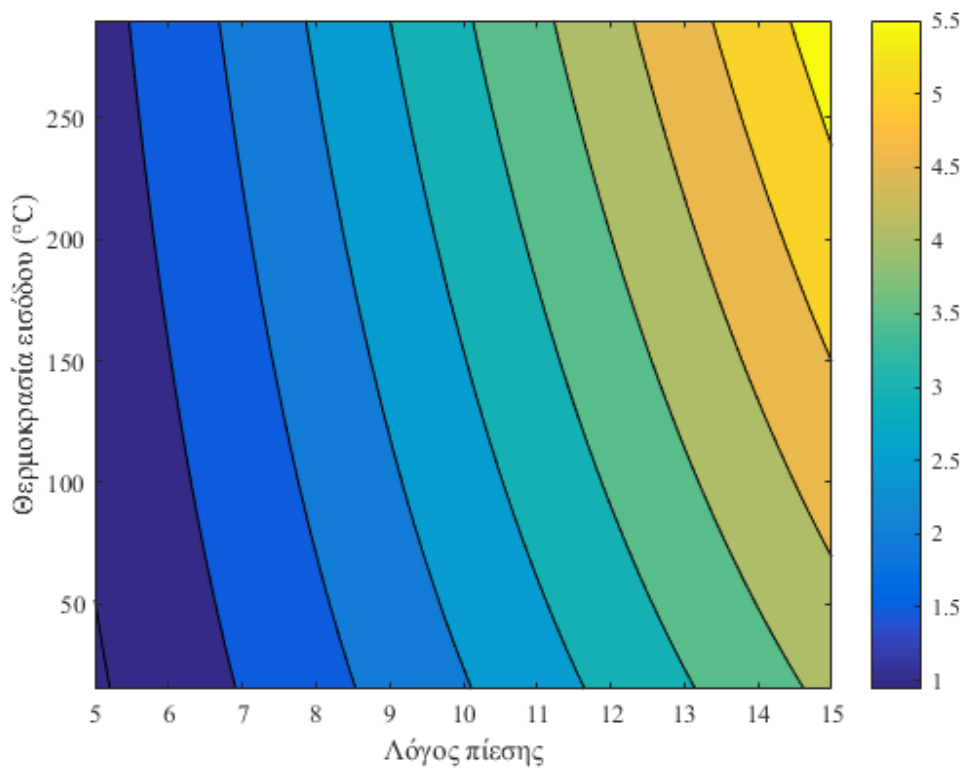
Όπου \dot{m}_{ref} είναι ο ρυθμός ροής μάζας αναφοράς και ισούται με 1 kg / min , c_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση και ισούται με 1.005 KJ / (kg · K) . Και το T_{out} ορίζεται ως:

$$T_{out} = T \cdot \left(1 - \eta_{is} \cdot \left(1 - P^{-\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)} \right) \right) \quad (17)$$

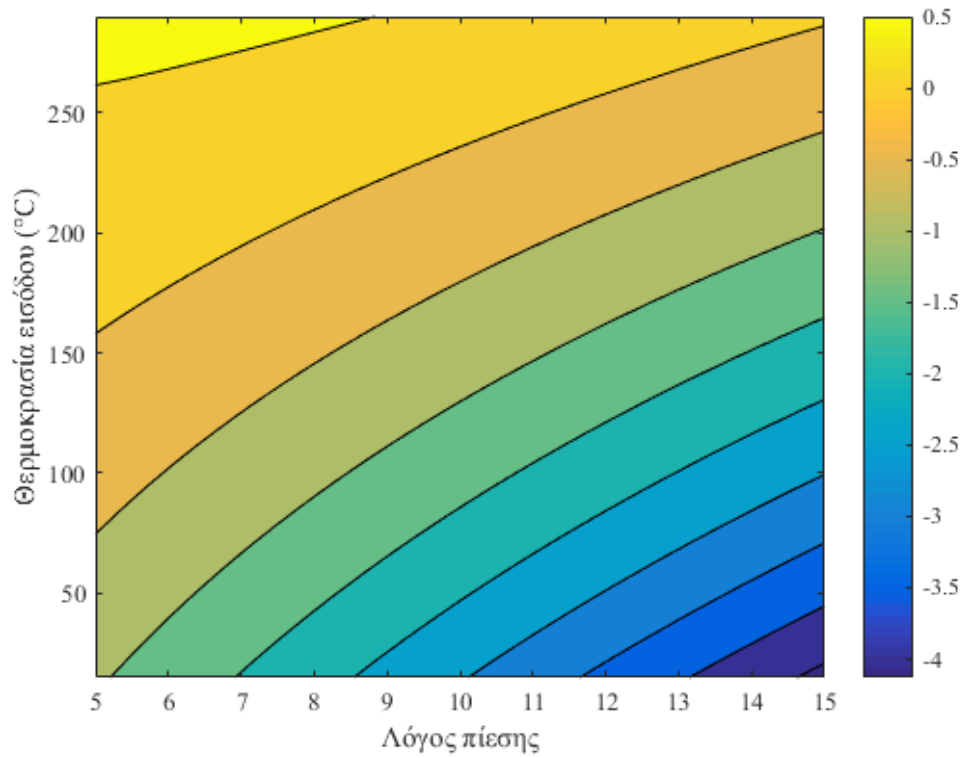
Η θερμική ισχύς που παράγεται από τον σρόβιλο δίνεται από τη σχέση^[1]:

$$Q_{out} = \dot{m}_{ref} \frac{P}{P_{ref}} \sqrt{\frac{T_{ref}}{T}} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_0) \quad (18)$$

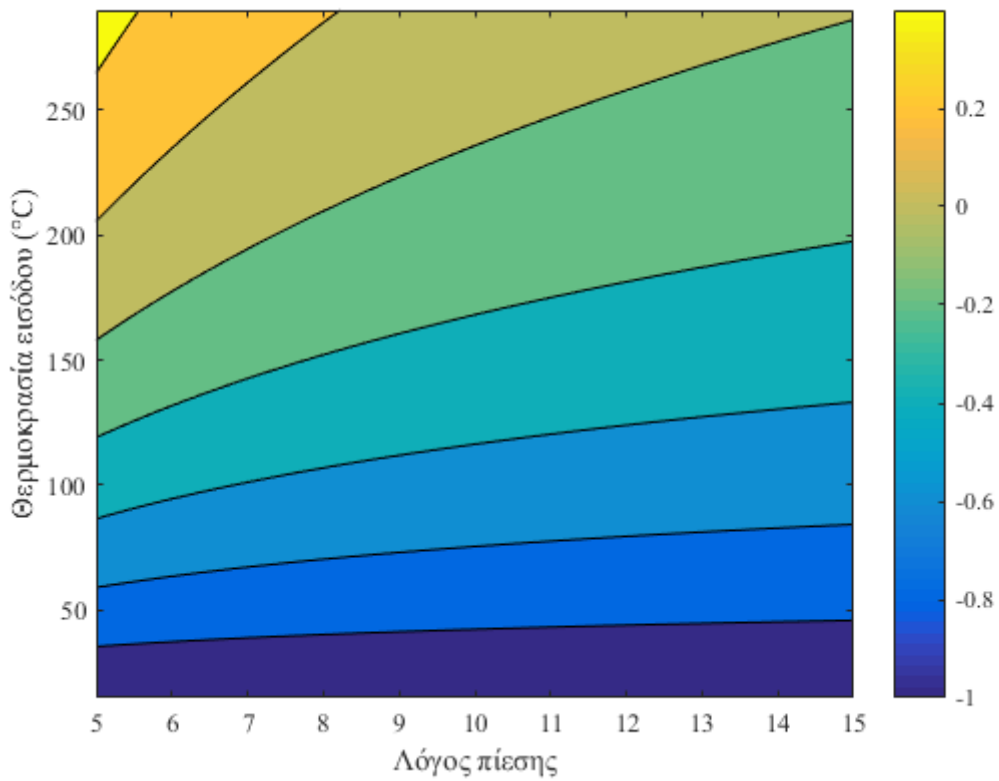
Η ηλεκτρική και η θερμική ισχύς του στροβίλου παρουσιάζονται στις Εικ. 8 και Εικ. 9, ενώ ο λόγος της θερμικής ισχύος προς την ηλεκτρική ισχύ παρουσιάζεται στην Εικ. 10.



Εικ. 8: Ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο εκτόνωσης σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο και τον λόγο πίεσης του στροβίλου



Εικ. 9: Θερμική ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο εκτόνωσης σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο και τον λόγο πίεσης του στροβίλου.



Εικ. 10: Λόγος της θερμικής ισχύος προς την ηλεκτρική ισχύ σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο και τον λόγο πίεσης του στροβίλου

Η ελάχιστη και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο είναι αντίστοιχα 1.0 kW και 5.5 kW. Μια τέτοια επίδοση είναι ικανή να καλύψει τις καθημερινά μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των περισσότερων καταναλωτών, καθώς ο λόγος των ηλεκτρικών απαιτήσεων εκτός αιχμής προς τις ηλεκτρικές απαιτήσεις αιχμής είναι συνήθως μικρότερος του 4 (εδώ οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος μετριοούνται με μέση ωριαία τιμή και παροδικές αλλαγές μπορούν να εξισορροπηθούν με τεχνικές ποιότητας ισχύος όπως πυκνωτές και συσσωρευτές)^[1]. Η θερμική ενέργεια που συμπαραάγεται από τον στρόβιλο μπορεί να είναι θέρμανση ή ψύξη, αναλόγως τη θερμοκρασία εισόδου και τον λόγο πίεσης, βλέπε Εικ. 9. Η μέγιστη ψυκτική ισχύς είναι περίπου 4 kW ενώ η μέγιστη θερμική ισχύς είναι μόλις 0.5 kW. Η χαμηλή θερμική ισχύς από τη συμπαραγωγή δε θα πρέπει να αποτελεί πρόβλημα, καθώς οι πρόσθετες απαιτήσεις θέρμανσης μπορούν να ικανοποιηθούν άμεσα από το μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Ο λόγος της θερμικής ισχύος προς την παραγόμενη από τον στρόβιλο ηλεκτρική ισχύ που φαίνεται στην Εικ. 10, δείχνει ότι η μέγιστη ψυκτική ισχύς είναι ελαφρώς υψηλότερη από την ηλεκτρική ισχύ που συμπαραάγεται. Στις περιπτώσεις όπου η ψυκτική ισχύς που απαιτείται είναι πολύ υψηλότερη από την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τεθεί σε λειτουργία ο συμπιεστής που θα παράγει πεπιεσμένο αέρα^[1].

4.4. Αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος

Για να ανταποκριθεί το προτεινόμενο σύστημα στις απαιτήσεις των καταναλωτών και παράλληλα να αποκομιστούν τα μεγαλύτερα οφέλη από την τριπαραγωγή, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ποσότητες ηλεκτρισμού (μέσω του πεπιεσμένου αέρα) και θερμικής ενέργειας που είναι ικανές να αποθηκευτούν. Εξετάζοντας το ισοζύγιο μάζας, ο πεπιεσμένος αέρας που καταναλώνεται από τον στρόβιλο $m_{t,ER}$, μείον τον αέρα που παράγεται στον συμπιεστή $m_{c,ER}$, κατά τη διεργασία έκλυσης ενέργειας, θα πρέπει να ισούται με τον αέρα που αποθηκεύεται κατά τη διεργασία αποθήκευσης ενέργειας $m_{c,ES}$ ^[1]:

$$m_{c,ES} = m_{t,ER} - m_{c,ER} \quad (19)$$

Να σημειωθεί ότι κατά τη διεργασία έκλυσης ενέργειας παράγεται συμπιεσμένος αέρας, μόνο όταν το ψυκτικό φορτίο είναι εξαιρετικά υψηλό. Τόσο, ώστε να υπερβαίνει τη συμπαραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Επίσης, κατά τη διεργασία έκλυσης ενέργειας, η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο $W_{t,ER}$ δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από τη

ζήτηση W_D και την πλεονάζουσα ηλεκτρική ισχύ $W_{c,ER}$ που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πεπιεσμένου αέρα. Επομένως, προκύπτει το ακόλουθο ισοζύγιο ενέργειας^[1]:

$$W_D = W_{t,ER} - W_{c,ER} \quad (20)$$

Παρομοίως, η παραγόμενη ψυκτική ισχύς $Q_{C,t}$ δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή ζήτησης $Q_{C,D}$. Έτσι, προκύπτει ο παρακάτω περιορισμός όσον αφορά την ψυκτική ισχύ^[1]:

$$Q_{C,D} \leq Q_{C,t} \quad (21)$$

όπου οι δείκτες ES και ER εκφράζουν αντίστοιχα τη διεργασία αποθήκευσης ενέργειας και τη διεργασία έκλυσης ενέργειας. Στη μελέτη αυτή, υποτίθεται ότι όλες οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών παράγονται κατά τη διεργασία έκλυσης ενέργειας και ότι η αποθηκευμένη και η συμπαραγόμενη θερμική ενέργεια είναι σε θέση να ανταποκριθούν στη ζήτηση. Με τη χρήση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας, αξιολογείται η απόδοση του συστήματος. Ωστόσο, η αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης με βάση τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο δεν θεωρείται έγκυρη προσέγγιση, καθώς υπερεκτιμάται πάντα η απόδοση των συστημάτων τριπαραγωγής. Από την άλλη όμως, με τη χρήση του εξεργειακού βαθμού απόδοσης (με βάση τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο) υποεκτιμάται πάντα η διεργασία της αποθήκευσης ενέργειας, καθώς παραβλέπονται οι απώλειες εξέργειας κατά την παραγωγή της ψυκτικής και της θερμικής ισχύος. Για την αξιολόγηση του συστήματος τριπαραγωγής χρησιμοποιείται ο νέος συνθετικός ολικός βαθμός απόδοσης που ισούται με^[1]:

$$\eta = \frac{W_D + \frac{Q_{H,D}}{COP_{HP}} + \frac{Q_{C,D}}{COP_{CL}}}{W_{c,ES} + Ex_{Q,ES} - (W_{t,ER} - W_D)} \quad (22)$$

όπου W_D , $Q_{H,D}$, $Q_{C,D}$ είναι αντίστοιχα οι απαιτήσεις των καταναλωτών σε ηλεκτρική, θερμική και ψυκτική ισχύ. $W_{c,ES}$ και $Ex_{Q,ES}$ είναι αντίστοιχα η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται από τον συμπιεστή και η θερμική εξέργεια που αποθηκεύεται κατά τη διεργασία αποθήκευσης ενέργειας. COP_{HP} και COP_{CL} είναι αντίστοιχα οι βαθμοί απόδοσης COP της αντλίας θερμότητας και του ηλεκτρικού ψύκτη. Στην παραπάνω εξίσωση, παρατηρείται ότι για τον ορισμό του νέου συνθετικού ολικού βαθμού απόδοσης, λαμβάνεται υπόψη ένα βασικό σενάριο όπου η θερμική και η ψυκτική ισχύς παράγονται

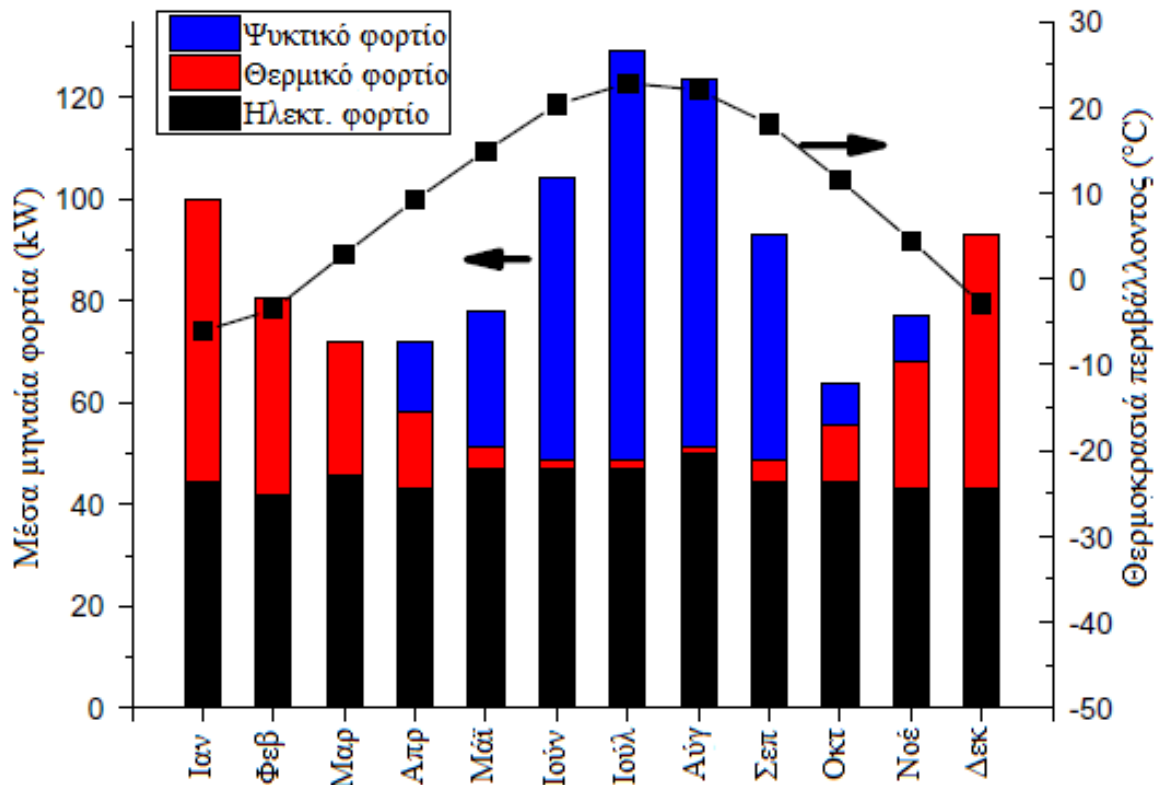
καταναλώνοντας αντίστοιχα ηλεκτρική ενέργεια στην αντλία θερμότητας και στον ηλεκτρικό ψύκτη. Ως εκ τούτου, σε ένα τέτοιο βασικό σενάριο, η παραγωγή ψυκτικής και θερμικής ισχύος σε μια διεργασία τριπαραγωγής μετατρέπεται σε ισοδύναμη μορφή ηλεκτρικής ισχύος^[1].

Με τον νέο συνθετικό ολικό βαθμό απόδοσης αξιολογείται και βελτιστοποιείται το σύστημα μικρο-τριπαραγωγής. Η βελτιστοποίηση διενεργείται (με τη βοήθεια ενός προγράμματος βελτιστοποίησης πολλών μεταβλητών) για να μεγιστοποιηθεί ο νέος συνθετικός ολικός βαθμός απόδοσης. Καθώς οι προδιαγραφές του συστήματος, οι απαιτήσεις (ηλεκτρισμού, θέρμανσης και ψύξης) και η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι δεδομένες, η πίεση και θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου μπορούν να ρυθμιστούν διαμέσου του ρυθμιστή πίεσης 8 και της αντλίας θερμικού υγρού 13, μέσω μιας μονάδας ελέγχου. Η διαδικασία βελτιστοποίησης μπορεί να ενσωματωθεί στη μονάδα ελέγχου και μπορεί να επιτευχθεί με την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με περιορισμούς (να μεγιστοποιηθεί ο νέος συνθετικός ολικός βαθμός απόδοσης κρατώντας την ηλεκτρική, θερμική και ψυκτική ισχύ μεγαλύτερες από τις απαιτήσεις των καταναλωτών)^[1].

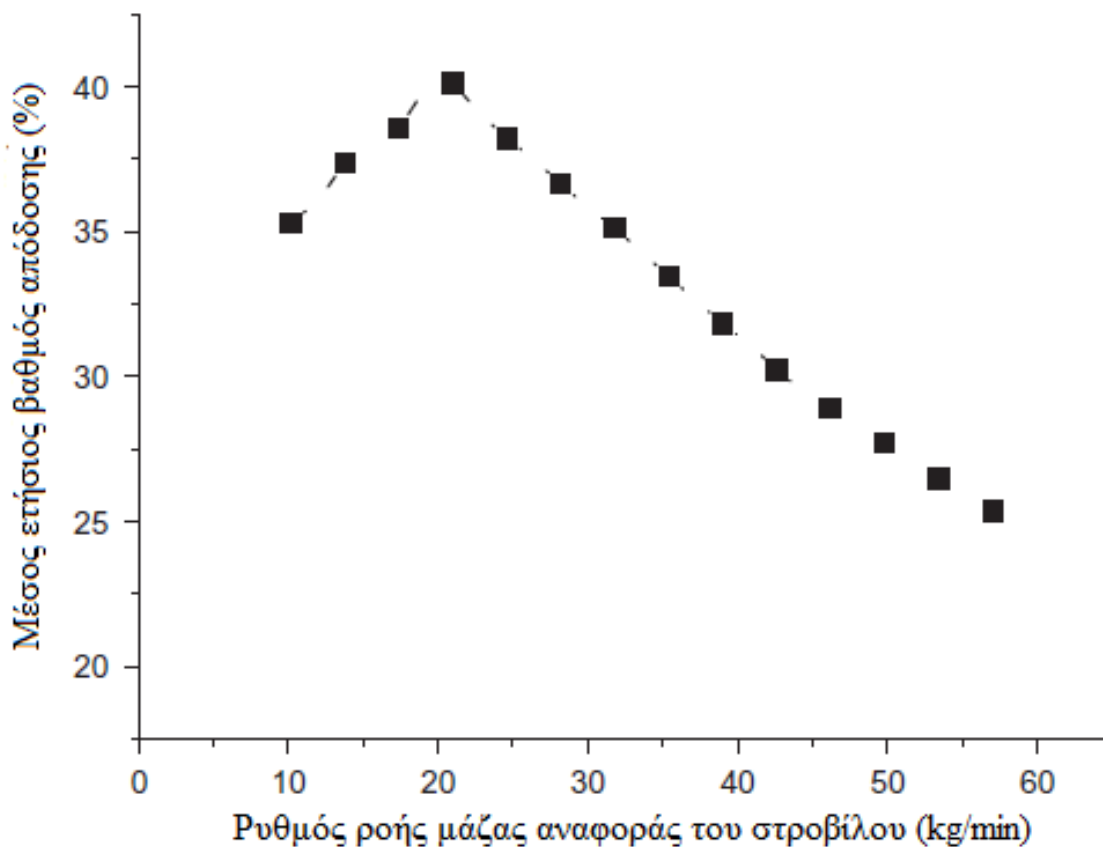
Για επεξηγηματικό λόγο, επιλέγεται ως παράδειγμα εφαρμογής του προτεινόμενου συστήματος μικρο-τριπαραγωγής, ένα μικρό συγκρότημα γραφείων στο Σικάγο. Η Εικ. 11 παρουσιάζει τα μηνιαία ηλεκτρικά, θερμικά και ψυκτικά φορτία του συγκροτήματος^[1]. Για να εφαρμοστεί η αξιολόγηση, θα πρέπει πρώτα να καθοριστεί το μέγεθος του συστήματος. Συγκεκριμένα, πρέπει να προσδιοριστεί ο ρυθμός ροής μάζας αναφοράς, κάτι που είναι απαραίτητο για την επιλογή του στροβίλου. Η Εικ. 12^[1] παρουσιάζει την επίδραση του ρυθμού ροής μάζας αναφοράς στον μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης του συστήματος τριπαραγωγής, ο οποίος ορίζεται ως μέσος όρος των μέσων μηνιαίων νέων συνθετικών ολικών βαθμών απόδοσης. Είναι φανερό ότι ένας ρυθμός ροής μάζας αναφοράς της τάξης των 21 kg/min παρέχει την καλύτερη απόδοση για το σύστημα με μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης περίπου 41%. Ο ρυθμός ροής μάζας αναφοράς είτε αυξηθεί είτε μειωθεί θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ετήσιου βαθμού απόδοσης (γραμμικά).

Αν ο ρυθμός ροής μάζας αναφοράς επιλεγθεί στα 21 kg/min, επιτυγχάνεται ο μέσος μηνιαίος νέος συνθετικός ολικός βαθμός απόδοσης^[1]. Η Εικ. 13 και ο Πίνακας 2 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα^[1]. Είναι φανερό ότι τον χειμώνα το σύστημα βρίσκεται στη λειτουργία συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θέρμανσης και ο μέσος μηνιαίος νέος συνθετικός ολικός βαθμός απόδοσης είναι περίπου 50%. Το καλοκαίρι, όπου η απαίτηση ψυκτικής ισχύος είναι υψηλή, ο μέσος μηνιαίος νέος συνθετικός ολικός βαθμός απόδοσης μειώνεται στο 30 - 40%.

Αυτό συμβαίνει επειδή το καλοκαίρι ο ρυθμός ροής μάζας αυξάνεται σημαντικά ώστε να παραχθεί αρκετή ψυκτική ισχύς. Κυρίως, η διαδικασία συμπίεσης του αέρα τους καλοκαιρινούς μήνες καταναλώνει περισσότερη ισχύ σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες, καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλότερη το καλοκαίρι. Ακόμα και έτσι, ο βαθμός απόδοσης παραμένει υψηλότερος από εκείνον των συμβατικών συστημάτων τριπαραγωγής που λειτουργούν με φυσικό αέριο.

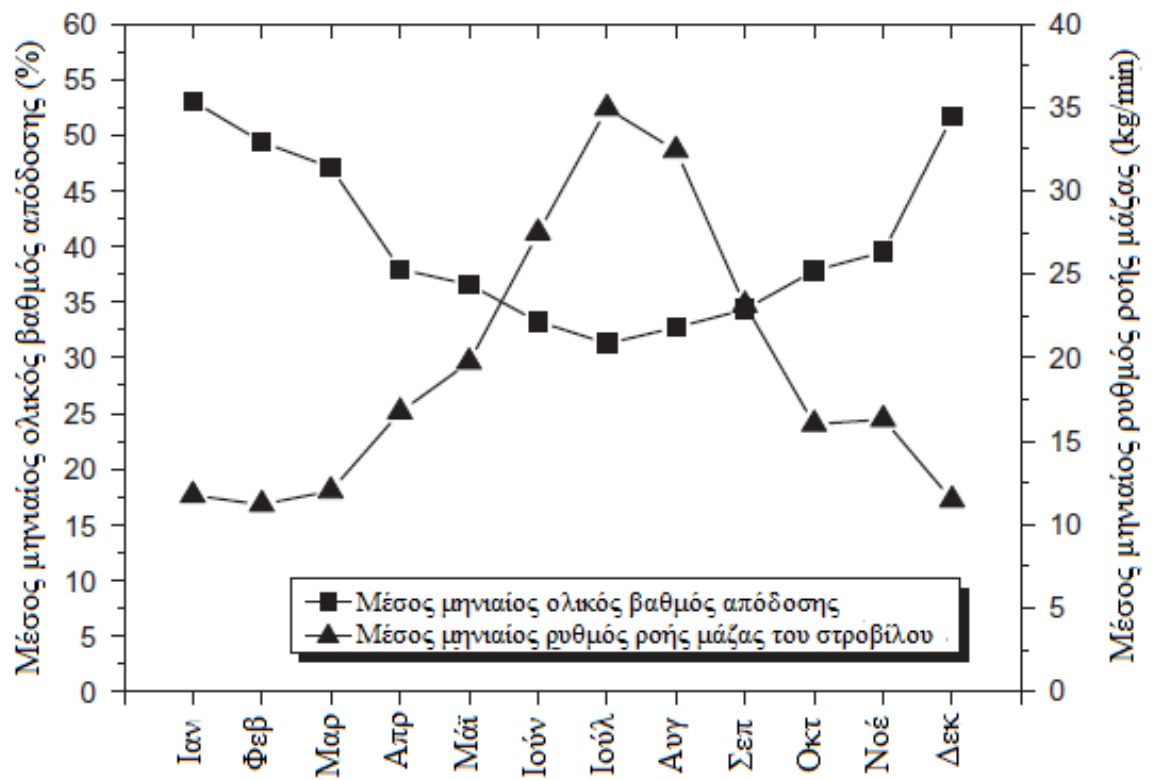


Εικ. 11: Μέσα μηνιαία ηλεκτρικά, θερμικά και ψυκτικά φορτία ενός μικρού συγκροτήματος γραφείων στο Σικάγο^[1]



Εικ. 12: Επίδραση του ρυθμού ροής μάζας αναφοράς στον μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης^[1]

Σε αντίθεση με τη συμβατική τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (CAES), η οποία απαιτεί εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας σε συγκεκριμένες γεωγραφικές τοποθεσίες για μακροχρόνια και μεγάλης χωρητικότητας αποθήκευση, ο συμπιεσμένος αέρας χρησιμοποιείται μόνο για αλλαγές μικρής διάρκειας όπως τη σταθεροποίηση της ανανεώσιμης ενέργειας στο σύστημα. Μελέτες βελτιστοποίησης μεγέθους έδειξαν ότι αποθηκευτική ικανότητα μιάμισης ημέρας μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις αξιοπιστίας ενός αυτόνομου ενεργειακού συστήματος που βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας^[1]. Εάν ληφθούν υπόψη αυτά τα δεδομένα, ο όγκος της δεξαμενής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα του προτεινόμενου συστήματος είναι περίπου 940 – 1170 λίτρα για μια οικιακή εφαρμογή με μέση ηλεκτρική κατανάλωση της τάξης των 200 – 250 W^[1]. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο για αυτή τη δουλειά σύστημα τριπαραγωγής μικρής κλίμακας είναι πιο επιθυμητό από τους συσσωρευτές οι οποίοι είναι πολύ πιο ακριβοί και έχουν μικρή διάρκεια ζωής.



Εικ. 13: Ο μέσος μηνιαίος νέος συνθετικός ολικός βαθμός απόδοσης και ο μέσος μηνιαίος ρυθμός ροής μάζας⁽¹⁾

	$\dot{m}_{t,ER}$ (kg/min)	$P_{t,inlet}$ (bar)	$T_{t,inlet}$ (°C)	$T_{t,outlet}$ (°C)	$w_{t,ER}$ (kW)	$Q_{t,ER}$ (kW)	$\dot{m}_{c,ER}$ (kg/min)
Ιανουάριος	11.7	6.8	327	106	44.4	17.0	0
Φεβρουάριος	11.2	6.5	327	110	41.7	16.9	0
Μάρτιος	12.0	7.0	327	104	45.8	17.0	0
Απρίλιος	17.1	8.0	119	-39	45.3	-17.0	0.3
Μάιος	19.6	8.7	81	-65	47.8	-28.1	0.1
Ιούνιος	27.3	11.4	40	-101	63.1	-55.4	2.1
Ιούλιος	35.4	14.8	37	-112	87.3	-78.9	5.2
Αύγουστος	32.3	13.4	32	-111	76.3	-71.1	3.4
Σεπτέμβριος	23.8	10.0	41	-94	52.9	-45.2	1.1
Οκτώβριος	16.0	7.8	149	-20	45.0	-10.6	0
Νοέμβριος	16.1	7.7	132	-29	43.2	-13.2	0
Δεκέμβριος	11.5	6.7	327	108	43.1	17.0	0

Πίνακας 2. Βασικές παράμετροι της διεργασίας έκλυσης ενέργειας^[1]

5. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Λόγω της πληθυσμιακής αύξησης και της τεχνολογικής προόδου έχει αυξηθεί η ενεργειακή κατανάλωση για την ικανοποίηση των αναγκών και τη βελτίωση του επιπέδου ζωής των ανθρώπων. Η καύση του πετρελαίου, του λιγνίτη και άλλων πηγών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας, οδήγησε σε μια αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων σε παγκόσμιο επίπεδο. Μια λύση για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση του συστήματος τριπαραγωγής πεπιεσμένου αέρα που αναλύθηκε στην παρούσα εργασία.

Το παρόν σύστημα, λόγω της χρήσης πεπιεσμένου αέρα ως εργαζόμενου μέσου, εκμηδενίζει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων στο περιβάλλον. Εκτός των μειωμένων εκπομπών ρύπων το συγκεκριμένο σύστημα τριπαραγωγής παρέχει εξαιρετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης σε σχέση με άλλα συστήματα παραγωγής ενέργειας κυρίως τους χειμερινούς μήνες. Δυστυχώς όμως, το οικονομικό κόστος του συγκεκριμένου συστήματος τριπαραγωγής είναι εξαιρετικά υψηλό εξαιτίας της αγοράς και της συντήρησης των εξαρτημάτων του. Τα εξαρτήματα με το μεγαλύτερο οικονομικό κόστος είναι ο συμπιεστής, οι εναλλάκτες θερμότητας και ο στρόβιλος εκτόνωσης.

Στη θερμοδυναμική ανάλυση της διεργασίας συμπίεσης αέρα, που διενεργήθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας, εξακριβώθηκε ότι ο βέλτιστος αριθμός σταδίων συμπίεσης είναι τέσσερα. Με λιγότερα στάδια συμπίεσης η κατανάλωση ισχύος στον συμπιεστή θα ήταν πολύ μεγαλύτερη και αυτό θα συνεπαγόταν υψηλό ενεργειακό κόστος. Με περισσότερα στάδια συμπίεσης, ναι μεν η κατανάλωση ισχύος θα ήταν ελαφρώς μικρότερη αλλά το οικονομικό κόστος λόγω των περισσότερων εξαρτημάτων θα ήταν σημαντικά μεγαλύτερο. Επίσης παρατηρήθηκε ότι η θερμότητα που αφαιρείται κατά τη διεργασία της συμπίεσης δεν παρουσιάζει σημαντική διαφορά για διάφορους αριθμούς σταδίων συμπίεσης.

Στο ίδιο κεφάλαιο, υπολογίστηκε ότι ο μέσος βαθμός απόδοσης του στρόβιλου εκτόνωσης είναι $\bar{\eta} = 0.9885$ και αντιστοιχεί για θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref} = 125.4 \text{ } ^\circ\text{C}$. Υποθέτοντας επίσης ότι ο λόγος πίεσης αναφοράς του στρόβιλου είναι 10 υπολογίστηκαν τα διαγράμματα που εκφράζουν τον κανονικοποιημένο ρυθμό ροής μάζας και τον κανονικοποιημένο ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του στρόβιλου σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού. Παρατηρήθηκε ότι ο κανονικοποιημένος ρυθμός ροής μάζας κυμαίνεται μεταξύ 0.5 και 1.6. Αυτό φανερώνει ότι το σύστημα είναι ικανό να ανταπεξέλθει σε ένα ευρύ φάσμα

απαιτήσεων. Επίσης, παρά το μεγάλο εύρος του ρυθμού ροής μάζας, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του στρόβιλου παραμένει πάνω από το 95% του βαθμού απόδοσης αναφοράς στις περισσότερες συνθήκες εκτός σχεδιασμού. Έπειτα, με βάση γνωστούς θερμοδυναμικούς τύπους στρόβιλων υπολογίστηκαν η ηλεκτρική και θερμική ισχύς που παράγει ο στρόβιλος σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού για ισεντροπικό βαθμό απόδοσης ίσο με 0.9. Από διαγράμματα, συμπεραίνουμε ότι η ελάχιστη και η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τον στρόβιλο είναι αντίστοιχα 1.0 kW και 5.5 kW. Μια τέτοια επίδοση μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις των περισσότερων καταναλωτών, καθώς ο λόγος των ηλεκτρικών απαιτήσεων εκτός αιχμής προς τις ηλεκτρικές απαιτήσεις αιχμής είναι συνήθως μικρότερος του 4. Η θερμική ενέργεια που συμπαράγεται από τον στρόβιλο μπορεί να είναι θέρμανση ή ψύξη, αναλόγως τη θερμοκρασία εισόδου και τον λόγο πίεσης. Η μέγιστη ψυκτική ισχύς είναι περίπου 4 kW ενώ η μέγιστη θερμική ισχύς είναι μόλις 0.5 kW. Η χαμηλή θερμική ισχύς από τη συμπαραγωγή δε θα πρέπει να αποτελεί πρόβλημα, καθώς οι πρόσθετες απαιτήσεις θέρμανσης μπορούν να ικανοποιηθούν άμεσα από το μέσο αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Ο λόγος της θερμικής ισχύος προς την παραγόμενη από τον στρόβιλο ηλεκτρική ισχύ, δείχνει ότι η μέγιστη ψυκτική ισχύς είναι ελαφρώς υψηλότερη από την ηλεκτρική ισχύ που συμπαράγεται. Στις περιπτώσεις όπου η ψυκτική ισχύς που απαιτείται είναι πολύ υψηλότερη από την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τεθεί σε λειτουργία ο συμπιεστής που θα παράγει πεπιεσμένο αέρα.

Το παρόν σύστημα τριπαραγωγής, εξετάστηκε πειραματικά σε ένα συγκρότημα γραφείων στο Σικάγο, από τους Yongliang Li, Xiang Wang, Dacheng Li και Yulong Ding^[1] παρατηρήθηκε ότι ο νέος συνθετικός ολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος, που εξαρτάται όπως προαναφέρθηκε από ένα πλήθος παραγόντων, τον χειμώνα που το σύστημα βρίσκεται στη λειτουργία συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θέρμανσης ο μέσος μηνιαίος νέος συνθετικός ολικός βαθμός απόδοσης είναι περίπου 50%. Το καλοκαίρι, όπου η απαίτηση ψυκτικής ισχύος είναι υψηλή, ο μέσος μηνιαίος νέος συνθετικός ολικός βαθμός απόδοσης μειώνεται στο 30 - 40%. Αυτό συμβαίνει επειδή το καλοκαίρι ο ρυθμός ροής μάζας αυξάνεται σημαντικά ώστε να παραχθεί αρκετή ψυκτική ισχύς. Κυρίως, η διαδικασία συμπίεσης του αέρα τους καλοκαιρινούς μήνες καταναλώνει περισσότερη ισχύ σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες, καθώς η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι υψηλότερη το καλοκαίρι. Ακόμα και έτσι, ο βαθμός απόδοσης παραμένει υψηλότερος από εκείνον των συμβατικών συστημάτων τριπαραγωγής που λειτουργούν με φυσικό αέριο.

Μια μελλοντική εργασία που θα μπορούσε να γίνει στο παρόν σύστημα τριπαραγωγής, θα ήταν η πλήρης εξάρτηση του από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για παράδειγμα, ο συμπιεστής να ξεκινούσε με ηλεκτρική ενέργεια που θα παραγόταν από αιολικά πάρκα και η θερμική ενέργεια να προερχόταν από τον ήλιο. Έτσι, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων θα μειώνονταν περισσότερο, αλλά το οικονομικό κόστος αυτού του συστήματος θα ήταν πολύ μεγαλύτερο.

Βιβλιογραφικές αναφορές και παραπομπές

1. Yongliang Li, Xiang Wang, Dacheng Li, Yulong Ding. *A trigeneration system based on compressed air and thermal energy storage*. Elsevier 2012.
2. M. Jradi, S. Riffat. *Tri-generation systems: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies*. Elsevier 2014.
3. H.I. Ononwiona, V.I. Ugursal: *Residential cogeneration systems: review of the current technology*. Elsevier 2004.
4. *Reciprocating compressor*. https://petrowiki.org/Reciprocating_compressor
5. Κωνστ. Δ. Ρακόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.: *Μ.Ε.Κ. ΙΙ Εμβάθυνση στην κατασκευή και λειτουργία*. Εκδόσεις Φούντας 2000.
6. *Intercooler*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Intercooler>
7. *The Importance of Condensate Drains on Air System Efficiency*.
<https://www.airbestpractices.com/technology/air-treatment/n2/importance-condensate-drains-air-system-efficiency>
8. *Compressed air dryer*. https://en.wikipedia.org/wiki/Compressed_air_dryer
9. *What is an Air Receiver?*
<https://www.atlascopco.com/en-uk/compressors/wiki/compressed-air-articles/what-is-an-air-receiver>
10. *Carbon fibers*. https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_fibers
11. *Pressure regulator*. https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_regulator
12. *Heat exchanger*. https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger
13. *Countercurrent exchange*. https://en.wikipedia.org/wiki/Countercurrent_exchange
14. *Shell and tube heat exchanger*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Shell_and_tube_heat_exchanger
15. *Stainless Steel Water / Liquids Storage Tanks*.
<https://iscsales.com/liquid-filtration/liquid-storage-tanks/metal-storage-tanks/>
16. *Centrifugal pump*. https://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_pump
17. *Turbine*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbine>
18. *Turboexpander*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Turboexpander>

19. *How Do Generators Produce Electricity?*
<https://www.electricgeneratorsdirect.com/stories/1485-How-Generators-Work.html>
20. Ε. Παπαδόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π. *Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας*. 2000.
21. Κ.Δ. Παπαηλιού, Κ.Μ. Μαθιουδάκης, Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητές Ε.Μ.Π. *Εισαγωγή στις Θερμικές Στροβιλομηχανές*. 2000.
22. Κ.Μ. Μαθιουδάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π. *Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων*. 2007.
23. G. F. C. Rogers, H. I. H. Saravanamuttoo, H. Cohen, A.C. Nix. *Gas Turbine Theory*. Pearson 2017.
24. Yunus A. Cengel Dr., Michael A. Boles. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education, 2014.
25. Fen He, Zheng Li, Pei Liu, Linwei Ma, Efstratios N. Pistikopoulos *Operation window and part-load performance study of a syngas fired gas turbine*. Elsevier 2011.
26. Tong Seop Kim, Sung Tack Ro. *Effect of control modes and turbine cooling on the part load performance in the gas turbine cogeneration system*. Pergamon 1994.
27. *Jon's Jottings* <https://jonbolster.wordpress.com/>
28. *Turbines vs. Reciprocating Engines*
<https://www.power-eng.com/articles/print/volume-120/issue-11/features/turbines-vs-reciprocating-engines.html>
29. *Frame 6 Gas Turbine Wiki* <http://kayaframe.co/frame-6-gas-turbine-wiki/>
30. *Electricity generation from heat* <http://heatcalc.com/heat-to-power/>
31. *Fuel Cell Cogeneration* http://www.thermax-europe.com/fuel_cell_cogeneration
32. *Solar Concentrator for Organic Rankine Cycle Electricity*
<https://www.energy-xprt.com/products/solar-concentrator-for-organic-rankine-cycle-electricity-615760>
33. *Cameron Reciprocating Compression*
<https://kitchendecor.club/files/cameron-reciprocating-compression.html>
34. *Crankshaft Strain in Large Integral Reciprocating Compressors*
<https://www.swri.org/crankshaft-strain-large-integral-reciprocating-compressors>

35. *Alibaba.com* <https://spanish.alibaba.com/g/cummins-6ct-cylinder-liner.html>
36. *Ccw Crankshaft* <https://www.picswe.com/pics/ccw-crankshaft-d7.html>
37. *India Pistons Limited* <http://www.indiapistons.com/prod-piston.html>
38. *Indiamart* <https://dir.indiamart.com/rajkot/deep-groove-ball-bearings.html>
39. *Engines and Parts for Yamaha YR1*
https://www.ebay.com/sch/Engines-Parts-for-Yamaha-YR1/171107/bn_51211341/i.html
40. *Indiamart* <https://www.indiamart.com/proddetail/compressor-valves-8347085891.html>
41. *Indiamart*
<https://www.indiamart.com/proddetail/hoerbiger-concentric-valves-19386785030.html>
42. *Wikiwand* http://www.wikiwand.com/en/Poppet_valve
43. *Engine Basics*
<http://www.enginebasics.com/Advanced%20Engine%20Tuning/Intercooler.html>
44. https://redsearch.org/images/p/online_scheme_tutorial
45. *Indiamart*
<https://www.indiamart.com/proddetail/air-compressor-dryer-19968416455.html>
46. *Made-in-China.com*
<https://goodair-compressor.en.made-in-china.com/product/svEnWKAjAqkl/China-1000L-Stainless-Steel-Compressed-Tank.html>
47. *Indiamart*
<https://www.indiamart.com/proddetail/pressure-regulators-18604857533.html>
48. *Indiamart* <https://www.indiamart.com/proddetail/heat-exchangers-9041682091.html>
49. *Industrial Products Supplier* <https://iscsales.com/liquid-filtration/liquid-storage-tanks/>
50. *Goulds Pumps* <https://www.gouldspumps.com/en-US/Products/ICM-ICMB/>
51. *Man Energy Solutions* <https://turbomachinery.man-es.com/products/expanders>
52. <https://novom.ru/en/watch/e8QBkVzorjo>
53. *Siemens*
<https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/generators.html>

Παράρτημα

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του λόγου της θερμότητας που αφαιρείται προς το καταναλισκόμενο έργο σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n .

```
gamma=1.4;
i1=1;
for n=1.001:0.001:1.4;
    x1(i1)=n;
    qw(i1)=gamma*(n-1)/(n*(gamma-1));
    i1=i1+1;
end
plot(x1,qw)
```

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της κατανάλωσης έργου κατά τη διεργασία της συμπίεσης του αέρα για διάφορους αριθμούς σταδίων συμπίεσης σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n .

```
V=1; % m^3
p0=1.01325*10^5; % Pa
p1=15*10^5; % Pa
p2=300*10^5; % Pa
i1=1;
i2=1;
i3=1;
i4=1;
N=2;
for n=1.001:0.001:1.4
    x1(i1)=n;
    W1(i1)=((n*N*V*p0)/(n-1))*(((N*n)/(n*(N+1))-1))*(((p2/p0)^((n*(N+1)-1)/(N*n))-((p1/p0)^((n*(N+1)-1)/(N*n)))))-((p2-p1)/p0);
    i1=i1+1;
end
N=3;
for n=1.001:0.001:1.4
    x2(i2)=n;
    W2(i2)=((n*N*V*p0)/(n-1))*(((N*n)/(n*(N+1))-1))*(((p2/p0)^((n*(N+1)-1)/(N*n))-((p1/p0)^((n*(N+1)-1)/(N*n)))))-((p2-p1)/p0);
    i2=i2+1;
end
N=4;
for n=1.001:0.001:1.4
    x3(i3)=n;
```

```

        W3(i3) = ((n*N*V*p0)/(n-1)) * ((N*n)/(n*(N+1)) -
1) * ((p2/p0)^(n*(N+1)-1)/(N*n)) - ((p1/p0)^(n*(N+1)-
1)/(N*n)))) - ((p2-p1)/p0));
        i3=i3+1;
end
N=5;
for n=1.001:0.001:1.4
        x4(i4)=n;
        W4(i4) = ((n*N*V*p0)/(n-1)) * ((N*n)/(n*(N+1)) -
1) * ((p2/p0)^(n*(N+1)-1)/(N*n)) - ((p1/p0)^(n*(N+1)-
1)/(N*n)))) - ((p2-p1)/p0));
        i4=i4+1;
end
plot(x1',W1/1000,x2',W2/1000,x3',W3/1000,x4',W4/1000)

```

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της κατανάλωσης έργου ανά μονάδα μάζας πεπιεσμένου αέρα σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n .

```

T0=288.15; % K (Kelvin)
R=8.314; % J/(mol*K)
MB_air=29; % gr/mol
Rn=R/MB_air; % J/(gr*K)
p0=1.01325; % bar
p1=15; % bar
p2=300; % bar
i1=1;
i2=1;
i3=1;
i4=1;
N=2;
for n=1.001:0.001:1.4
        x1(i1)=n;
        Pc1(i1) = ((n*N*Rn*T0)/(n-1)) * (p0/(p2-
p1)) * ((N*n)/(n*(N+1))-1) * ((p2/p0)^(n*(N+1)-1)/(N*n)) -
((p1/p0)^(n*(N+1)-1)/(N*n)))) - ((p2-p1)/p0));
        i1=i1+1;
end
N=3;
for n=1.001:0.001:1.4
        x2(i2)=n;
        Pc2(i2) = ((n*N*Rn*T0)/(n-1)) * (p0/(p2-
p1)) * ((N*n)/(n*(N+1))-1) * ((p2/p0)^(n*(N+1)-1)/(N*n)) -
((p1/p0)^(n*(N+1)-1)/(N*n)))) - ((p2-p1)/p0));
        i2=i2+1;
end
N=4;
for n=1.001:0.001:1.4
        x3(i3)=n;

```

```

        Pc3(i3)=( (n*N*Rn*T0) / (n-1) ) * (p0 / (p2-
p1) ) * ( ( (N*n) / ( (n* (N+1) ) -1) ) * ( ( (p2/p0) ^ ( (n* (N+1) ) -1) / (N*n) ) -
( ( (p1/p0) ^ ( (n* (N+1) ) -1) / (N*n) ) ) ) ) ) - ( (p2-p1) / p0 ) );
        i3=i3+1;
end
N=5;
for n=1.001:0.001:1.4
        x4(i4)=n;
        Pc4(i4)=( (n*N*Rn*T0) / (n-1) ) * (p0 / (p2-
p1) ) * ( ( (N*n) / ( (n* (N+1) ) -1) ) * ( ( (p2/p0) ^ ( (n* (N+1) ) -1) / (N*n) ) -
( ( (p1/p0) ^ ( (n* (N+1) ) -1) / (N*n) ) ) ) ) ) - ( (p2-p1) / p0 ) );
        i4=i4+1;
end
plot(x1', Pc1, x2', Pc2, x3', Pc3, x4', Pc4)

```

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της θερμότητας που αφαιρείται κατά τη διεργασία συμπίεσης του αέρα σε συνάρτηση με τον πολυτροπικό συντελεστή n .

```

gamma=1.4;
V=1; % m^3
p0=1.01325*10^5; % Pa
p1=15*10^5; % Pa
p2=300*10^5; % Pa
i1=1;
i2=1;
i3=1;
i4=1;
N=2;
for n=1.001:0.001:1.4
        x1(i1)=n;
        Qc1(i1)=( (gamma*N*V*p0) / (gamma-1) ) * ( ( (N*n) / ( (n* (N+1) ) -
1) ) * ( ( (p2/p0) ^ ( (n* (N+1) ) -1) / (N*n) ) - ( ( (p1/p0) ^ ( (n* (N+1) ) -
1) / (N*n) ) ) ) ) ) - ( (p2-p1) / p0 ) );
        i1=i1+1;
end
N=3;
for n=1.001:0.001:1.4
        x2(i2)=n;
        Qc2(i2)=( (gamma*N*V*p0) / (gamma-1) ) * ( ( (N*n) / ( (n* (N+1) ) -
1) ) * ( ( (p2/p0) ^ ( (n* (N+1) ) -1) / (N*n) ) - ( ( (p1/p0) ^ ( (n* (N+1) ) -
1) / (N*n) ) ) ) ) ) - ( (p2-p1) / p0 ) );
        i2=i2+1;
end
N=4;
for n=1.001:0.001:1.4
        x3(i3)=n;
        Qc3(i3)=( (gamma*N*V*p0) / (gamma-1) ) * ( ( (N*n) / ( (n* (N+1) ) -
1) ) * ( ( (p2/p0) ^ ( (n* (N+1) ) -1) / (N*n) ) - ( ( (p1/p0) ^ ( (n* (N+1) ) -
1) / (N*n) ) ) ) ) ) - ( (p2-p1) / p0 ) );

```

```

        i3=i3+1;
end
N=5;
for n=1.001:0.001:1.4
    x4(i4)=n;
    Qc4(i4)=(gamma*N*V*p0)/(gamma-1))*((N*n)/((n*(N+1))-1))*(((p2/p0)^((n*(N+1)-1)/(N*n)))-((p1/p0)^((n*(N+1)-1)/(N*n)))))-((p2-p1)/p0));
    i4=i4+1;
end
plot(x1',Qc1/1000,x2',Qc2/1000,x3',Qc3/1000,x4',Qc4/1000)

```

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του κανονικοποιημένου ρυθμού ροής μάζας \dot{m}/\dot{m}_{ref} σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού

```

Tref=125.4+273.15; % Celsius
Pref=10;
X = linspace(5,15);
Y = linspace(15+273.15,290+273.15);
[x,y] = meshgrid(X,Y);
z = (x/Pref).*sqrt(Tref./y);
Z = (X/Pref).*sqrt(Tref./Y);
contourf(x,y-273.15,z)

```

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του κανονικοποιημένου ιεντροπικού βαθμού απόδοσης η/η_{ref} σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού.

```

Tref=125.4+273.15;
Pref=10;
gamma=1.4;
a1=(gamma-1)/gamma;
X = linspace(5,15);
Y = linspace(288.15,563.15);
[x,y] = meshgrid(X,Y);
z=1-(sqrt(((Tref/Pref.^a1)-Tref)./(y./(x.^a1))-y))-1).^2;
contourf(x,y-273.15,z)

```

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται από τον στρόβιλο εκτόνωσης σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο και τον λόγο πίεσης του στροβίλου

```
gamma=1.4;
a1=(gamma-1)/gamma;
mref=1/60; %kg/sec
Pref=10;
Tref=125.4+273.15;
nis=0.9;
cp=1.005; %KJ/(kg*K)
X = linspace(5,15);
Y = linspace(288.15,563.15);
[x,y] = meshgrid(X,Y);
Tout=y.*(1-nis*(1-x.^(-(gamma-1)/gamma)));
z=(mref.*x./Pref).*sqrt(Tref./y)*cp.*(y-Tout);
contourf(x,y-273.15,z)
```

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της θερμικής ισχύος που παράγεται από τον στρόβιλο εκτόνωσης σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο και τον λόγο πίεσης του στροβίλου

```
T0=15+273.15;
gamma=1.4;
cp=1.005; %KJ/(kg*K)
Pref=10;
Tref=125.4+273.15;
mref=1/60; %kg/sec
nis=0.9;
X = linspace(5,15);
Y = linspace(288.15,563.15);
[x,y] = meshgrid(X,Y);
Tout=y.*(1-nis*(1-x.^(-(gamma-1)/gamma)));
z=(mref.*x./Pref).*sqrt(Tref./y)*cp.*(Tout-T0);
contourf(x,y-273.15,z)
```

Κώδικας Matlab που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του λόγου της θερμικής ισχύος προς την ηλεκτρική ισχύ σε συνθήκες εκτός σχεδιασμού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία εισόδου στον στρόβιλο και τον λόγο πίεσης του στροβίλου

```
Pref=10;
Tref=125.4+273.15;
gamma=1.4;
mref=1/60; %kg/min
nis=0.9;
X = linspace(5,15);
Y = linspace(288.15,563.15);
[x,y] = meshgrid(X,Y);
Tout=y.*(1-nis*(1-x.^(-(gamma-1)/gamma)));
cp=1.005; %KJ/(kg*K)
Pel=(mref.*x./Pref).*sqrt(Tref./y)*cp.*(y-Tout);
Q=(mref.*x./Pref).*sqrt(Tref./y)*cp.*(Tout-T0);
z=Q./Pel;
contourf(x,y-273.15,z)
```