

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, κα Ειρήνη Κορωνάκη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτή την εργασία καθώς και τις βάσεις και τα κεντρίσματα που μου έδωσε μέσω των διδασκόμενων μαθημάτων κατά την κανονική περίοδο φοίτησης σπουδών στο ΕΜΠ, δίνοντας μου έτσι την αφορμή να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο διπλωματικής

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση και τις προυποθέσεις για τη φοίτηση στη σχολή των μηχανολόγων μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Τα συστήματα παραγωγής ψύξης θέρμανσης έχουν επιδείξει σημαντική πρόοδο και δυναμική, ως διεσπαρμένες πηγές ενέργειας, για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και για την ικανοποίηση πολλαπλών ενεργειακών απαιτήσεων σε κτίρια. Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζεται ένα τροποποιημένο σύστημα τριπαραγωγής με χρήση οργανικό ψυκτικού μέσου. Το σύστημα έχει ως κύρια πηγή ενέργειας επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, ενώ όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί υπάρχει βοηθητικός λέβητας φυσικού αερίου για να συμπληρώνει την απαιτούμενη θερμότητα για το σύστημα. Το σύστημα είναι τροποποιημένο όσον αφορά τη χρησιμοποίηση διβάθμιου στρόβιλου, για την επίτευξη μεγαλύτερης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και εκμετάλλευσης μεγαλύτερου λόγου πίεσης. Επίσης στη θέση του συμπιεστή έχει επιλεγεί εγχυτήρας, ο οποίος συμμετέχει στη λειτουργία παραγωγής ψύξης. Τέλος, το εργαζόμενο μέσο που επιλέχθηκε είναι το R410a (μίγμα διφθορομεθανίου και πενταφθοροαιθανίου).

Εξετάστηκε η επίδραση βασικών θερμοδυναμικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία συμπύκνωσης, η θερμοκρασία εισόδου στο διβάθμιο στρόβιλο, η πίεση εισόδου στο διβάθμιο στρόβιλο και τέλος η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες, δηλαδή η προσδιδόμενη θερμότητα στο σύστημα. Το σύστημα τριπαραγωγής έχει χωριστεί σε τρεις βασικές λειτουργίες με βάση την εποχικότητα ζήτησης των φορτίων και των παραγώγων του. Έτσι υπάρχει λειτουργία χειμώνα, όπου παράγονται θέρμανση και ηλεκτρική ενέργεια, λειτουργία καλοκαιριού, όπου παράγονται ψύξη και ηλεκτρική ενέργεια και λειτουργία φθινοπώρου και άνοιξης που παράγεται μόνο ηλεκτρική ενέργεια. Η μοντελοποίηση και η παραμετρική ανάλυση της εγκατάστασης έγιναν με το υπολογιστικό πρόγραμμα MATHCAD.

Λέξεις κλειδιά:

τριπαραγωγή, συμπαραγωγή, θέρμανση, ψύξη, ηλεκτρισμός, R410a, παραμετρική ανάλυση

Abstract

Building cooling heating power (BCHP) systems as a kind of distributed energy resource have shown a great potential in improving energy efficiency and meeting multiple energy demands in buildings. In this thesis, we present a BCHP system driven by solar energy with flat-plate solar collectors. A modified trigeneration system with a two stage turbine and use of an organic refrigerant called R410a (a mixture of difluoromethane and pentafluoroethane) is introduced. Based on mathematical models and the program MATHCAD, we have investigated the influences of some key thermodynamic parameters, namely condensation temperature, turbine inlet temperature, turbine inlet pressure and the solar collectors' outlet temperature of water on the system performance.

Also the trigeneration system was divided into three main operation modes based on seasonal demand of loads and energy derivatives. So there is winter mode, which produces heat and electricity, summer mode, which produces cooling and electricity and autumn - spring mode, when only electricity is produced.

Key words:

trigeneration, cogeneration, heating, cooling, electricity, R410a, parametric analysis

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στη Συμπαραγωγή	17
1.1 Η έννοια της συμπαραγωγής	17
1.2 Τρόποι Εφαρμογής και Λειτουργίας της Συμπαραγωγής	20
1.3 Τεχνολογίες Τριπαραγωγής	24
1.3.1 Βασική αρχή λειτουργίας ενός ψύκτη απορρόφησης.....	25
1.4 Σύνοψη πλεονεκτημάτων - μειονεκτημάτων συμπαραγωγής	26
1.5 Εφαρμογές της συμπαραγωγής	28
1.5.1 Σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας.....	29
1.5.2 Βιομηχανικός τομέας.....	30
1.5.3 Εμπορικός – κτιριακός τομέας (τριτογενής τομέας)	31
1.5.4 Αγροτικός τομέας	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βασικοί Κύκλοι Εργαζόμενου Μέσου	34
2.1 Κύκλος Rankine.....	34
2.2 Βασικές Παραλλαγές του απλού κύκλου Rankine	38
2.2.1 Ο ιδανικός κύκλος Rankine με αναθέρμανση	38
2.2.2 Ιδανικός κύκλος Rankine με αναγέννηση (προθέρμανση).....	39
2.3 Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC).....	40
2.3.1 Ο απλός οργανικός κύκλος Rankine	41
2.3.2 Επιλογή Εργαζόμενου Μέσου	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ψυκτικός κύκλος	55
3.1 Εισαγωγή.....	55
3.2 Περιγραφή βασικής ψυκτικής διάταξης	57
3.2.1 Ροή ψυκτικού μέσου σε ψυκτική συσκευή.....	58
3.2.2 Έργο και θερμότητα στον ψυκτικό κύκλο.....	59
3.2.3 Θερμοδυναμική προσέγγιση βασικού ψυκτικού κύκλου	59
3.3 Ψυκτικά μέσα.....	61
3.4 Ψυκτικός κύκλος εγχυτήρα	64

3.4.1	Περιγραφή της τεχνολογίας και εξέλιξη των συστημάτων ψύξης με εγχυτήρα	64
3.4.2	Αρχή λειτουργίας συστήματος ψύξης με εγχυτήρα	66
3.4.3	Ανάλυση των θερμοδυναμικών κύκλων του συστήματος	67
3.5	Πλεονεκτήματα συστημάτων ψύξης με εγχυτήρα και προοπτικές ανάπτυξης	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιγραφή της εγκατάστασης.....		72
4.1	Εισαγωγικά	72
4.2	Πληροφορίες για το R410a	74
4.2.1	Ιδιότητες του R410a	74
4.2.2	Σταθερότητα και συμβατότητα υλικών	75
4.2.3	Σχεδιασμός και εγκατάσταση συστημάτων με R410a	75
4.2.4	Εναλλάκτες θερμότητας	75
4.2.5	Σωλήνωση σύνδεσης και εξαρτήματα	77
4.2.6	Αρχές χειρισμού	77
4.3	Ηλιακοί συλλέκτες.....	78
4.4	Σύστημα δεξαμενής αποθήκευσης	79
4.5	Τροφοδοτική αντλία.....	80
4.6	Διβάθμιος στρόβιλος.....	81
4.7	Συμπυκνωτής	82
4.8	Εγχυτήρας	84
4.9	Εναλλάκτες θερμότητας.....	85
4.9.1	Λειτουργία Ατμοποιητή.....	86
4.9.2	Λειτουργία Εξαμιστή	87
4.10	Σενάριο αναφοράς.....	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Παραμετρική ανάλυση της εγκατάστασης.....		96
5.1	Εισαγωγή.....	96
5.2	Επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο στις επιδόσεις και στην απόδοση του συστήματος.....	96
5.2.1	Συμπαράγωγή θέρμανσης- ηλεκτρισμού (λειτουργία χειμώνα)...	96

5.2.2	Συμπαγωγή ψύξης- ηλεκτρισμού (λειτουργία καλοκαιριού) .	100
5.2.3	Παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου).....	103
5.3	Επίδραση της πίεσης εισόδου στο στρόβιλο στις επιδόσεις και στην απόδοση του συστήματος.....	105
5.3.1	Συμπαγωγή θέρμανσης- ηλεκτρισμού (λειτουργία χειμώνα).	106
5.3.2	Συμπαγωγή ψύξης- ηλεκτρισμού (λειτουργία καλοκαιριού) .	109
5.3.3	Παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου).....	113
5.4	Επίδραση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του οργανικού ψυκτικού μέσου R410a στις επιδόσεις και στην απόδοση του συστήματος.....	115
5.4.1	Συμπαγωγή θέρμανσης- ηλεκτρισμού (λειτουργία χειμώνα).	115
5.4.2	Συμπαγωγή ψύξης- ηλεκτρισμού (λειτουργία καλοκαιριού) .	120
5.4.3	Παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου).....	123
5.5	Επίδραση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες στις επιδόσεις και στην απόδοση του συστήματος.	125
5.5.1	Συμπαγωγή θέρμανσης- ηλεκτρισμού (λειτουργία χειμώνα).	125
5.5.2	Συμπαγωγή ψύξης- ηλεκτρισμού (λειτουργία καλοκαιριού) .	130
5.5.3	Παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου).....	135
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	Συμπεράσματα	139
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	Βιβλιογραφία.....	142
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8:	Παράρτημα: Νομικό πλαίσιο για τη λειτουργία της συμπαγωγής στην Ελλάδα	145

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση του συμβατικού τρόπου κάλυψης των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων [5]	17
Εικόνα 1.2: Χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [1].....	18
Εικόνα 1.3: Χωριστή παραγωγή θερμικής ενέργειας [1]	19
Εικόνα 1.4: Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από σύστημα Σ.Η.Θ.[2].....	19
Εικόνα 1.5: Σχηματική απεικόνιση συστήματος τριπαραγωγής με ενδεικτικές αποδόσεις [5].....	24
Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση διάταξης ενός ψύκτη απορρόφησης [2] ...	26
Εικόνα 1.7: Ατμοηλεκτρικός σταθμός της Δ.Ε.Η. στην Πτολεμαΐδα που συμπαράγει ηλεκτρισμό και θερμότητα για τη τηλεθέρμανση της πόλης [5]..	30
Εικόνα 1.8: Εφαρμογή Συμπαραγωγής στο νοσοκομείο ΜΗΤΕΡΑ, Ηλεκτρική Ισχύς: 490kw, Θερμική Ισχύς:890kw, Ψυκτική Ισχύς: 180 RT [27]	32
Εικόνα 1.9: Μονάδα Συμπαραγωγής σε θερμοκήπιο της AGRITEX στη Δράμα ηλεκτρικής ισχύος 4,8 MWel και θερμικής ισχύος 5,22 MWth (επίσης χρησιμοποιείται το CO2 που παράγεται για επιτάχυνση της ωρίμανσης). [26]33	
Εικόνα 2.1: Διάγραμμα T – s του κύκλου Rankine και διάταξη υλοποίησής του [21].....	34
Εικόνα 2.2: Ιδανικός κύκλος Rankine με αναθέρμανση [4].....	38
Εικόνα 2.3: Το πρώτο τμήμα της διεργασίας προσθήκης θερμότητας στον ατμοποιητή πραγματοποιείται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. [4].....	40
Εικόνα 2.4: Απλός οργανικός κύκλος Rankine [14].....	42
Εικόνα 2.5: (a) Απλός ORC, (b) κύκλος Rankine ατμού- νερού [3].....	43
Εικόνα 2.6: Φάση της εκτόνωσης σε υπερκρίσιμο κύκλο [10]	44
Εικόνα 2.7: Διάγραμμα T- s και εγκατάσταση απλού ORC με αναγεννητή [11]	45
Εικόνα 2.8: Διάγραμμα T- s και εγκατάσταση υπερκρίσιμου ORC [11].....	45
Εικόνα 2.9: Διάγραμμα T- s και εγκατάσταση ORC με δύο πηγές θερμότητας [11].....	45
Εικόνα 2.10: Μοριακή δομή νερού και οργανικού ρευστού [29]	47
Εικόνα 2.11: Σχηματική παράσταση ρευστών ανάλογα με την κλίση dT/ds [29]	50

Εικόνα 2.12: Οι “καμπάνες” για τρία ρευστά το νερό, το πεντάνιο και το R11 [29].....	51
Εικόνα 2.13: Επίδραση της γραμμής κορεσμένου ατμού κατά την φάση της εκτόνωσης [24]	51
Εικόνα 2.14: (α) σύγκριση διάφορων ρευστών σε διάγραμμα T-s (b) και σε διάγραμμα T-u [23].....	52
Εικόνα 2.15: Σύγκριση διάφορων μέσων με το νερό [24].....	52
Εικόνα 2.16: Θερμοκρασιακές περιοχές χρησιμοποίησης οργανικών εργαζόμενων μέσων [23]	53
Εικόνα 3.1: Συσκευή παραγωγής ψύχους ανοικτού δοχείου [3]	55
Εικόνα 3.2: Συσκευή παραγωγής ψύχους με κλειστό κύκλωμα ψυκτικού μέσου [30].....	56
Εικόνα 3.3: Βασική περιγραφή ψυκτικής διάταξης [30].....	57
Εικόνα 3.4: Παράδειγμα εφαρμογής βασικού κυκλώματος συμπίεσης ατμών σε μια κλιματιστική μονάδα [30].....	58
Εικόνα 3.5: Βασικός ψυκτικός κύκλος σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας [4]...	60
Εικόνα 3.6: Βασικός ψυκτικός κύκλος με εγχυτήρα [18].....	65
Εικόνα 3.7: Σύστημα ψύξης με εγχυτήρα [19]	66
Εικόνα 3.8: Τομή εγχυτήρα και κατανομή της πίεσης [7].....	67
Εικόνα 3.9: Διάγραμμα θερμοδυναμικού κύκλου [16].....	67
Εικόνα 3.10: Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος ψύξης με εγχυτήρα [19]	69
Εικόνα 3.11: Συμβατικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμών [19]	69
Εικόνα 3.12: Σύστημα ψύξης με εγχυτήρα [19]	70
Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης	73
Εικόνα 4.2: Πτώση πίεσης κατά τη διαδικασία ψύξης στην πλευρά του ψυκτικού. Για δεδομένη πτώση πίεσης, το R410a επιτρέπει μεγαλύτερη παροχή μάζας ψυκτικού. [22]	76
Εικόνα 4.3: Πτώση πίεσης κατά τη διαδικασία συμπύκνωσης στην πλευρά του ψυκτικού. Για δεδομένη πτώση πίεσης, το R410a επιτρέπει μεγαλύτερη παροχή μάζας ψυκτικού. [22]	76
Εικόνα 4.4: Σχεδιάγραμμα του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη υγρού [10].....	78

Εικόνα 4.5: Μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας πλήρως αναμειγμένου υγρού [10]	80
Εικόνα 4.6: Ζώνες του συμπυκνωτή [32]	83
Εικόνα 4.7: Προφίλ θερμοκρασιών στον συμπυκνωτή [32]	84
Εικόνα 4.8: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του εγχυτήρα [12]	85
Εικόνα 4.9: Ζώνες του εξατμιστή [32]	88
Εικόνα 4.10: Προφίλ θερμοκρασιών ψυκτικού μέσου και ψυχόμενου αέρα [5]	88
Εικόνα 4.11: Αύξηση του έργου και μείωση του υγρασιακού περιεχομένου λόγω της υπερθέρμανσης σε ORC με «wet» οργανικό μέσο [20].....	89
Εικόνα 5.1: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης θέρμανσης (Q_{heat}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)	96
Εικόνα 5.2: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (W_{el}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$).....	98
Εικόνα 5.3: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ψύξης (Q_{cold}) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)	100
Εικόνα 5.4: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ($W_{el\psi}$) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$).....	101
Εικόνα 5.5: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (W_{elH}) κατά τη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$).....	103
Εικόνα 5.6: Συσχέτιση της μεταβολής του βαθμού απόδοσης (η) της εγκατάστασης κατά τη λειτουργία άνοιξης- φθινοπώρου ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$) Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	
Εικόνα 5.7: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης θέρμανσης (Q_{heat}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($p_{3\Theta}$)..	106
Εικόνα 5.8: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (W_{el}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($p_{3\Theta}$).....	107

Εικόνα 5.9: : Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ψύξης (Q_{cold}) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)	110
Εικόνα 5.10: Συσχέτιση της μεταβολής της ηλεκτρικής ενέργειας ($W_{ελ}$) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($p_{3\Theta}$)	111
Εικόνα 5.11: Συσχέτιση της μεταβολής της ηλεκτρικής ενέργειας ($W_{ελ}$) κατά τη λειτουργία άνοιξης- φθινοπώρου ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($p_{3\Theta}$)	113
Εικόνα 5.12: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης θέρμανσης (Q_{heat}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του R410a ($T_{6\Theta}$)	116
Εικόνα 5.13: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (W_{el}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του R410a ($T_{6\Theta}$)	117
Εικόνα 5.14: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ψύξης (Q_{cold}) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του R410a ($T_{6\Theta}$)	120
Εικόνα 5.15: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ($W_{el\Psi}$) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του R410a ($T_{6\Theta}$)	121
Εικόνα 5.16: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (W_{elH}) κατά τη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του R410a ($T_{6\Theta}$)	123
Εικόνα 5.17: Διάγραμμα συσχέτισης της μεταβολής της παραγόμενης θέρμανσης κατά τη λειτουργίας του Χειμώνα σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες	126
Εικόνα 5.18: Διάγραμμα συσχέτισης της μεταβολής του παραγόμενου ηλεκτρισμού κατά τη λειτουργίας του Χειμώνα σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακού συλλέκτες	128
Εικόνα 5.19: Διάγραμμα συσχέτισης της μεταβολής της παραγόμενης ψύξης κατά τη λειτουργία του Καλοκαιριού σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες	131
Εικόνα 5.20: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ($W_{el\Psi}$) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες	133

Εικόνα 5.21: Διάγραμμα συσχέτισης της μεταβολής του παραγόμενου ηλεκτρισμού κατά τη λειτουργία της Άνοιξης και του Φθινοπώρου σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες..... 136

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Θερμοδυναμικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά διαφόρων οργανικών ρευστών [24].....	48
Πίνακας 2.2: Κατηγορίες ασφάλειας ASHRAE 34 [24]	49
Πίνακας 2.3: Ιδιότητες για την επιλογή του οργανικού μέσου και το σχεδιασμό του συστήματος ORC [29].....	53
Πίνακας 4.1: Συνθήκες Λειτουργίας του Κύκλου για Συμπαραγωγή Θέρμανσης – Ηλεκτρισμού (Κατά το χειμώνα).....	92
Πίνακας 4.2: Συνθήκες Λειτουργίας του Κύκλου για Συμπαραγωγή Ψύξης – Ηλεκτρισμού (Κατά το καλοκαίρι).....	94
Πίνακας 4.3: Συνθήκες Λειτουργίας του Κύκλου για Παραγωγή μόνο Ηλεκτρισμού (Κατά το φθινόπωρο και την άνοιξη).....	95
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη θέρμανση στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο	97
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο	99
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο	99
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ψύξη στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο	101
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο	102
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο	103
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο	104

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία άνοιξης- φθινοπώρου με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο.....	105
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη θέρμανση στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο	107
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο	108
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο	109
Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ψύξη στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο	111
Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο	112
Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο	113
Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο	114
Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο	115
Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη θέρμανση στη λειτουργία χειμώνα με μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a	117
Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία χειμώνα για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a	118
Πίνακας 5.19: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία χειμώνα για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a	119

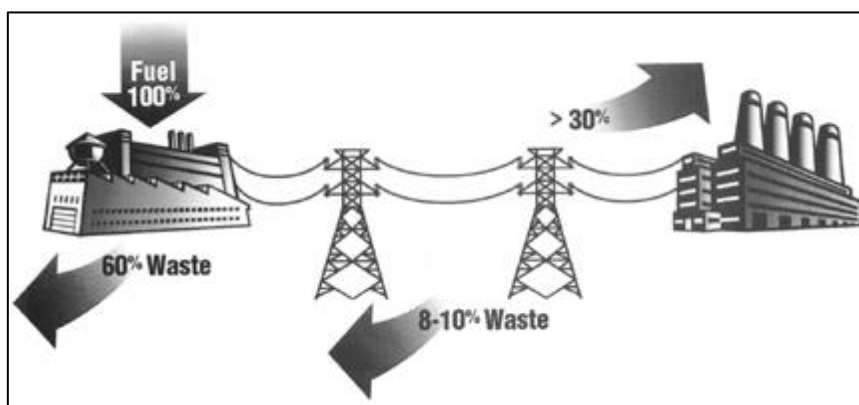
Πίνακας 5.20: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ψύξη στη λειτουργία καλοκαιριού για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a	121
Πίνακας 5.21: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία καλοκαιριού για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a	122
Πίνακας 5.22: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία καλοκαιριού για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a	123
Πίνακας 5.23: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a	124
Πίνακας 5.24: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία άνοιξης- φθινοπώρου για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a	124
Πίνακας 5.25: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη θέρμανση στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες	127
Πίνακας 5.26: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες	129
Πίνακας 5.27: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες.....	130
Πίνακας 5.28: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ψύξη στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες	132
Πίνακας 5.29: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο	134
Πίνακας 5.30: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες	135
Πίνακας 5.31: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες	137

Πίνακας 5.32: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία άνοιξης- φθινοπώρου με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες..... 138

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή στη Συμπαραγωγή

1.1 Η έννοια της συμπαραγωγής

Ο συμβατικός τρόπος κάλυψης των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων ενός καταναλωτή (ή μιας ομάδας καταναλωτών) είναι η αγορά ηλεκτρισμού από το εθνικό δίκτυο και η καύση κάποιου καυσίμου (σε λέβητα ή κλίβανο, κ.λ.π.) για την παραγωγή θερμότητας. Οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης 30-45% εκπέμποντας μεγάλες ποσότητες ρύπων από την κατανάλωση των καυσίμων. Οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τον σταθμό στον καταναλωτή είναι της τάξεως του 8-10%.



Εικόνα 1.1: Σχηματική απεικόνιση του συμβατικού τρόπου κάλυψης των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων [5]

Συνεπώς μια τεχνολογία ικανή να μειώσει την συνολική κατανάλωση των καυσίμων με ταυτόχρονη αύξηση του βαθμού απόδοσης από την ανεξάρτητη παραγωγή καθεμίας από τις ανωτέρω μορφές ενέργειας είναι ιδιαίτερα επιθυμητή.

Λύση στα παραπάνω έρχεται να δώσει η τεχνολογία της συμπαραγωγής, η οποία εάν εφαρμοστεί σωστά, όχι μόνο βελτιώνει σημαντικά τον ενεργειακό βαθμό απόδοσης αλλά και συμβάλλει στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων ανά μονάδα χρήσιμης μορφής ενέργειας.

Συμπαραγωγή ονομάζουμε την συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας.

Ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης σημαίνει κατανάλωση μικρότερης ποσότητας καυσίμων για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας με προφανή οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Η απόδοση των συστημάτων συμπαραγωγής φτάνει το 80-85%, εξοικονομώντας ενέργεια κατά 15%-40%, σε σχέση με την παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς και λέβητες αντίστοιχα. Η εξοικονόμηση

αυτή προκύπτει από την ανάκτηση και αξιοποίηση θερμότητας, που διαφορετικά θα αποβαλλόταν στο περιβάλλον κατά την λειτουργία των συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Επιπροσθέτως, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια μονάδα συμπαραγωγής συνήθως καλύπτει τις τοπικές ανάγκες για ηλεκτρισμό, με συνέπεια οι απώλειες μεταφοράς και διανομής να είναι αμελητέες.

Η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη ή κλιματισμό. Η ψύξη ή ο κλιματισμός επιτυγχάνονται με μηχανές απορρόφησης, που λειτουργούν με ατμό ή θερμό νερό (τριπαραγωγή). Επειδή η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ευκολότερη και φτηνότερη από την μεταφορά θερμικής, οι εγκαταστάσεις συμπαραγωγής βρίσκονται συνήθως όσο πιο κοντά γίνεται στο χώρο όπου θα καταναλωθεί η θερμική ενέργεια και διαστασιοποιούνται έτσι ώστε να καλύπτουν το θερμικό φορτίο. Όταν παράγεται λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια από αυτή που απαιτείται, είναι απαραίτητο να αγοραστεί επιπρόσθετη από το δίκτυο. Όμως όταν η μονάδα σχεδιάζεται έτσι ώστε να καλύπτει το θερμικό φορτίο, συνήθως παράγεται πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί είτε να πουληθεί στο δίκτυο είτε να παρασχεθεί σε άλλον καταναλωτή μέσω του συστήματος διανομής (wheeling).

Όταν οι συμπαραγωγικοί σταθμοί καλύπτουν τις θερμικές (ή ψυκτικές) ανάγκες πόλεων ή οικισμών, ο όρος που χρησιμοποιείται είναι η τηλεθέρμανση (ή τηλεψύξη). Η τηλεθέρμανση (ή η τηλεψύξη) είναι η εφαρμογή μεθόδων κεντρικής παραγωγής θερμότητας (ή ψύξης) και η διανομή της (συνήθως με τη μορφή ζεστού ή ψυχρού νερού) για θέρμανση ή ψύξη σε κατοικίες ή άλλες εφαρμογές.



Εικόνα 1.2: Χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [1]



Εικόνα 1.3: Χωριστή παραγωγή θερμικής ενέργειας [1]



Εικόνα 1.4: Παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας από σύστημα Σ.Η.Θ. [2]

Ως ενεργειακή πηγή μπορεί να είναι οποιοδήποτε καύσιμο, ωστόσο στα πλαίσια εξοικονόμησης φυσικών πόρων και προώθησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κρίνεται αποδοτικότερη και πιο συμφέρουσα η χρήση καυσίμων φιλικότερων προς το περιβάλλον, όπως το φυσικό αέριο και η βιομάζα.

Οι επιπτώσεις της συμπαραγωγής σε οικονομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό επίπεδο είναι πολλαπλές. Οι εφαρμογές της διακρίνονται σε τέσσερις κύριους τομείς: στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας, τον βιομηχανικό τομέα, τον εμπορικό- κτιριακό τομέα (τριτογενής) και τον αγροτικό.

Η εξοικονόμηση της ενέργειας και η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, σε σφαιρική κλίμακα, δεν είναι αρκετά κίνητρα για μια επένδυση σε σύστημα συμπαραγωγής, εάν και η ίδια η επένδυση δεν είναι οικονομικά βιώσιμη. Οι οικονομικές και νομοθετικές ρυθμίσεις εκ μέρους της πολιτείας, η εξεύρεση πόρων για τις σχετικές επενδύσεις και οι οικονομικές συνθήκες κάτω από τις οποίες θα λειτουργήσει μια μονάδα συμπαραγωγής, είναι κρίσιμης σημασίας για την βιωσιμότητα της επένδυσης. [1][6]

1.2 Τρόποι Εφαρμογής και Λειτουργίας της Συμπαραγωγής

Η συμπαραγωγή δεν απαρτίζει μία συγκεκριμένη τεχνολογία, αλλά εφαρμογή τεχνολογιών που σε συνδυασμό καλύπτουν ηλεκτρικές και θερμικές ανάγκες, με σκοπό την βελτίωση του βαθμού απόδοσης. Οι ανάγκες αυτές διαφοροποιούνται από εγκατάσταση σε εγκατάσταση, συνεπώς ο τύπος και ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος θα πρέπει να επιλεχθούν προσεκτικά.

Ένα σύστημα συμπαραγωγής αποτελείται κυρίως από τέσσερα στοιχεία:

- Τον κινητήρα (prime mover):

Ο κινητήρας μπορεί να είναι αμοστρόβιλος, αεριοστρόβιλος, παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης, συνδυασμένος κύκλος, κυψέλες καυσίμου, μηχανή Stirling ή micro-turbine. Ο κινητήρας κινεί τη γεννήτρια.

- Τη γεννήτρια :

Αυτή μπορεί να είναι σύγχρονη, ασύγχρονη ή αυτοδιεγειρόμενη ασύγχρονη και παράγει την ηλεκτρική ενέργεια.

- Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας :

Αυτό ανακτά την απορριπτόμενη θερμότητα από τα ρευστά που έχουν σχέση με τη λειτουργία της μηχανής (με εναλλάκτες ανάκτησης θερμότητας) και από τα καυσαέρια (με λέβητα ανάκτησης θερμότητας που αποκαλείται και λέβητας καυσαερίων).

- Το σύστημα ελέγχου :

Αυτό διασφαλίζει την ασφαλή και ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος συμπαραγωγής.

Οι μονάδες συμπαραγωγής γενικά κατατάσσονται με βάση το είδος του κινητήρα, της γεννήτριας και του καυσίμου που χρησιμοποιείται

Η συνολική απόδοση του συστήματος προκύπτει από μια αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων βαθμών απόδοσης των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής και ανάκτησης θερμότητας. Δεδομένου ότι από ένα σύστημα συμπαραγωγής προκύπτουν δύο ή περισσότερα χρησιμοποιήσιμα ενεργειακά προϊόντα, ο καθορισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης των συστημάτων αυτών είναι πιο σύνθετος απ' ό,τι στα απλά συστήματα. Το όλο σύστημα μπορεί να αντιμετωπισθεί ως δύο υποσυστήματα, το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος (συνήθως μια μηχανή ή ένας στρόβιλος) και το σύστημα ανάκτησης θερμότητας (συνήθως κάποιος τύπος λέβητα).

Η απόδοση του συνολικού συστήματος προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ των μεμονωμένων βαθμών απόδοσης των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής και ανάκτησης θερμότητα.

Ο τρόπος λειτουργίας χαρακτηρίζεται από το κριτήριο στο οποίο βασίζεται η ρύθμιση της παραγωγής του ηλεκτρισμού και της ωφέλιμης θερμότητας ενός συστήματος συμπαραγωγής. Οι πιθανοί τρόποι λειτουργίας αναλύονται ως εξής:

- **Κάλυψη του θερμικού φορτίου** (“heat match” operation mode): Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, η ωφέλιμη παραγωγή θερμότητας του συστήματος συμπαραγωγής επιδιώκεται να είναι ίση με το θερμικό φορτίο (χωρίς υπέρβαση της δυναμικότητας του συστήματος). Εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το φορτίο η πλεονάζουσα ενέργεια πωλείται στο δίκτυο, ενώ εάν είναι μικρότερη η συμπληρωματική ηλεκτρική ενέργεια αγοράζεται από το δίκτυο.

- **Κάλυψη του θερμικού φορτίου βάσης**: Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα Σ.Η.Θ. διαστασιοποιείται ώστε να παρέχει την ελάχιστη απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την εγκατάσταση. Εφεδρικοί λέβητες ή καυστήρες χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των περιόδων που η ζήτηση θερμότητας είναι υψηλότερη. Ο κύριος κινητήρας της μονάδας λειτουργεί πάντα υπό πλήρες φορτίο. Εάν η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια της εγκατάστασης υπερβαίνει αυτήν που μπορεί να παρέχει ο κύριος κινητήρας, τότε η υπόλοιπη ποσότητα μπορεί να αγοραστεί από το δίκτυο. Αντίστοιχα, εάν το επιτρέπουν οι ισχύοντες νόμοι, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να πωληθεί στην ηλεκτρική εταιρεία.

- **Κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου** (“electricity match” operation mode):

Κάθε χρονική στιγμή η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση με το ηλεκτρικό φορτίο (χωρίς υπέρβαση της δυναμικότητας του συστήματος Σ.Η.Θ.). Εάν η συμπαραγόμενη θερμότητα είναι μικρότερη από το θερμικό φορτίο ένας βοηθητικός λέβητας υποβοηθά στην κάλυψη των αναγκών, ενώ εάν είναι μεγαλύτερη η πλεονάζουσα θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον μέσω συσκευών ψύξης ή μέσω των καυσαερίων

- **Κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου βάσης**: Σε αυτήν τη διάταξη, η μονάδα

Σ.Η.Θ. διαστασιολογείται ώστε να ικανοποιεί την ελάχιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης, βάσει της καμπύλης των ιστορικών αναγκών. Οι υπόλοιπες ανάγκες σε ηλεκτρισμό καλύπτονται από το δίκτυο. Οι θερμικές ανάγκες της εγκατάστασης θα μπορούσαν να καλυφθούν από το σύστημα συμπαραγωγής μόνο ή με πρόσθετους λέβητες. Εάν η θερμική ενέργεια που παράγεται σύμφωνα με το ηλεκτρικό φορτίο βάσης υπερβαίνει τις απαιτήσεις της εγκατάστασης, και εάν το επιτρέπουν οι συνθήκες, η πλεονάζουσα θερμική ενέργεια μπορεί να πωληθεί σε γειτονικούς πελάτες.

- **Μικτή κάλυψη:** Σε ορισμένες χρονικές περιόδους ακολουθείται ο τρόπος κάλυψης του θερμικού φορτίου, ενώ σε άλλες περιόδους ακολουθείται ο τρόπος κάλυψης του ηλεκτρικού φορτίου. Η απόφαση βασίζεται στην εκτίμηση παραμέτρων όπως είναι τα επίπεδα των φορτίων, η τιμή των καυσίμων και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας κατά την συγκεκριμένη ημέρα και ώρα.

- **Αυτόνομη λειτουργία:** Υφίσταται πλήρης κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή χωρίς σύνδεση με το δίκτυο. Αυτός ο τρόπος απαιτεί να διαθέτει το σύστημα ηλεκτρική και θερμική δυναμικότητα εφεδρείας, έτσι ώστε στην περίπτωση που μια μονάδα τεθεί εκτός λειτουργίας για οποιοδήποτε λόγο, οι υπόλοιπες μονάδες να είναι σε θέση να καλύψουν το ηλεκτρικό και το θερμικό φορτίο. Αυτή είναι και η πιο δαπανηρή στρατηγική, τουλάχιστον από την άποψη του αρχικού κόστους του συστήματος.

Γενικά, η λειτουργία κάλυψης του θερμικού φορτίου οδηγεί στον υψηλότερο βαθμό αξιοποίησης του καυσίμου (λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμων – F.E.S.R.) και ίσως στην καλύτερη οικονομική απόδοση της συμπαραγωγής, τόσο στο βιομηχανικό όσο και στον κτιριακό τομέα. Στον τομέα των εταιριών ηλεκτροπαραγωγής, ο τρόπος λειτουργίας εξαρτάται από το συνολικό φορτίο του δικτύου, τη διαθεσιμότητα των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και τις υποχρεώσεις της εταιρίας προς τους πελάτες της, όσον αφορά την τροφοδοσία τους με ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Εντούτοις, εφαρμογή γενικών κανόνων δεν είναι η συνετότερη προσέγγιση για την περίπτωση της συμπαραγωγής. Κάθε εφαρμογή έχει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της, υπάρχει μια πληθώρα συστημάτων Σ.Η.Θ. (ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας, το μέγεθος, τη διαμόρφωση), ενώ η σχεδίαση ενός συστήματος συμπαραγωγής μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες του χρήστη και έχει επιπτώσεις στους

δυνατούς τρόπους λειτουργίας του, και το αντίστροφο. Εξάλλου, κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος μπορεί να μεταβάλλονται οι διάφορες τεχνικές και οικονομικές παράμετροι με την ημέρα και τη χρονική στιγμή.

Όλες αυτές οι πτυχές καθιστούν αναγκαία τη λήψη αποφάσεων όχι βάσει γενικών κανόνων μόνο, αλλά με τη χρήση συστηματικών διαδικασιών βελτιστοποίησης που βασίζονται στο μαθηματικό προγραμματισμό, τόσο για το σχεδιασμό όσο και για τη λειτουργία του συστήματος. Για τη λειτουργία των συστημάτων συμπαραγωγής, ειδικότερα, διατίθενται συστήματα ελέγχου βασισμένα σε μικροεπεξεργαστές. Αυτά παρέχουν τη δυνατότητα τα διάφορα συστήματα Σ.Η.Θ. να λειτουργούν για την κάλυψη κάποιου φορτίου βάσης, να παρακολουθούν τα ηλεκτρικά ή τα θερμικά φορτία, είτε να λειτουργούν κατά ένα οικονομικοτεχνικά βέλτιστο τρόπο (τρόπος μικτής κάλυψης). Στην τελευταία περίπτωση, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίβλεψη της απόδοσης του συστήματος συμπαραγωγής, περιλαμβανομένων:

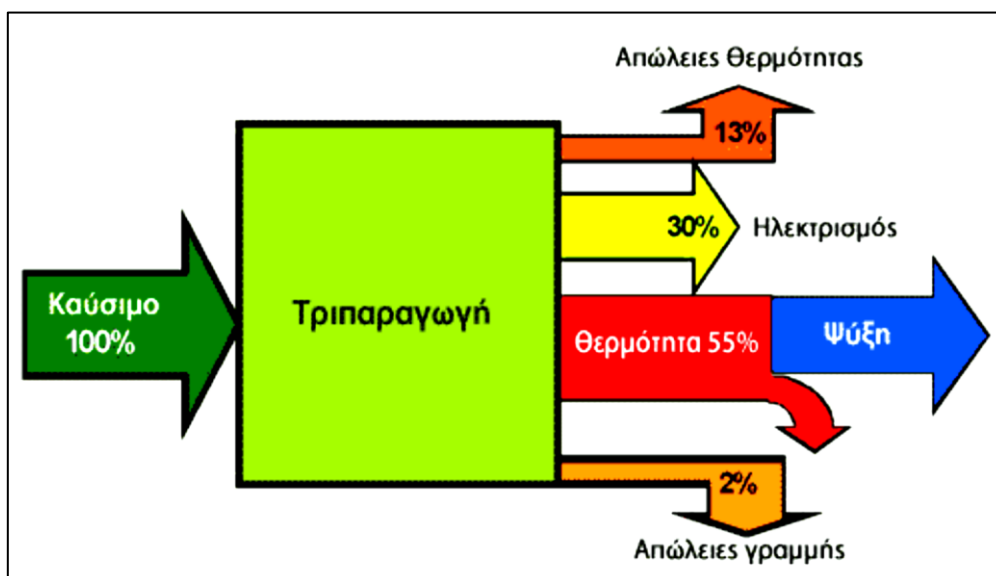
- του βαθμού απόδοσης του συστήματος και του ποσού της διαθέσιμης ωφέλιμης θερμότητας,
- των ηλεκτρικών και των θερμικών αναγκών του χρήστη, της ποσότητας της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να αποδοθεί στο δίκτυο και του ποσού της θερμότητας που πρέπει να απορριφθεί στο περιβάλλον,
- του κόστους της αγοραζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και της αξίας των πωλήσεων ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου ότι αυτά μπορεί να μεταβάλλονται ανάλογα με την ώρα της ημέρας, την ημέρα της εβδομάδας, ή την εποχή.

Με βάση τα δεδομένα αυτά, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να καθορίσει ποιος τρόπος λειτουργίας είναι ο πιο οικονομικός, ακόμη και το κατά πόσο η μονάδα πρέπει να διακόψει τη λειτουργία της. Επιπλέον, με την παρακολούθηση των παραμέτρων λειτουργίας, όπως είναι η αποδοτικότητα, οι ώρες λειτουργίας, η θερμοκρασία των καυσαερίων, οι θερμοκρασίες του νερού ψύξης, κλπ., ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να βοηθήσει στον προγραμματισμό της συντήρησης του συστήματος. Εάν το σύστημα λειτουργεί χωρίς άμεση επίβλεψη, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να συνδεθεί μέσω τηλεφωνικής γραμμής με ένα κέντρο τηλεπαρακολούθησης, όπου η ανάλυση των δεδομένων μέσω Η/Υ μπορεί να προειδοποιήσει το εξειδικευμένο προσωπικό για μία επικείμενη ανάγκη προγραμματισμένης ή μη συντήρησης. Επιπλέον, ως τμήμα ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων, ο μικροεπεξεργαστής μπορεί να συντάσσει εκθέσεις για την τεχνική και την οικονομική απόδοση του συστήματος. [3] [6]

1.3 Τεχνολογίες Τριπαραγωγής

Τα συστήματα Σ.Η.Θ. που αναφέρθηκαν θα πρέπει να λειτουργούν περισσότερο από 3500 ώρες ετησίως, ώστε να συμφέρει οικονομικά η λειτουργία τους. Στις χώρες της νότιας Ευρώπης, όπως η Ελλάδα, λόγω του εύκρατου κλίματος που επικρατεί, δεν είναι εύκολο να συμπληρωθούν πολλές ώρες λειτουργίας, καθώς η ανάγκη για θέρμανση περιορίζεται σε λίγους χειμερινούς μήνες. Αντίθετα, παρουσιάζουν εντονότερη ανάγκη για ψύξη κατά τη διάρκεια των θερμών καλοκαιρινών μηνών. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, τα συστήματα συμπαραγωγής θα πρέπει να λειτουργούν και κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, για την παραγωγή ψυχρού νερού / ψυχρού αέρα για τον κλιματισμό χώρων. Στην περίπτωση αυτή, τα συστήματα ονομάζονται συστήματα τριπαραγωγής.

Η τριπαραγωγή (trigeneration) ή συνδυασμένη παραγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας και Ψύξης (Σ.Η.Θ.Ψ. - Combined Heat Cooling and Power Generation, C.H.C.P.), αποτελεί επέκταση της έννοιας της συμπαραγωγής. Η διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι εκτός από τη παραγωγή μηχανικής ενέργειας (που συχνά μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια) και της θερμότητας, έχουμε επιπλέον την παραγωγή ψύξης. Το σύστημα χρησιμοποιώντας κι εδώ μία και μόνη πηγή ενέργειας, όπως αυτές των καυσίμων ή της ηλιακής ενέργειας, παράγει θερμότητα, από την οποία στη συνέχεια παράγεται ψύξη, μέσω ενός ψύκτη απορρόφησης. [5][27]



Εικόνα 1.5: Σχηματική απεικόνιση συστήματος τριπαραγωγής με ενδεικτικές αποδόσεις [5]

1.3.1 Βασική αρχή λειτουργίας ενός ψύκτη απορρόφησης

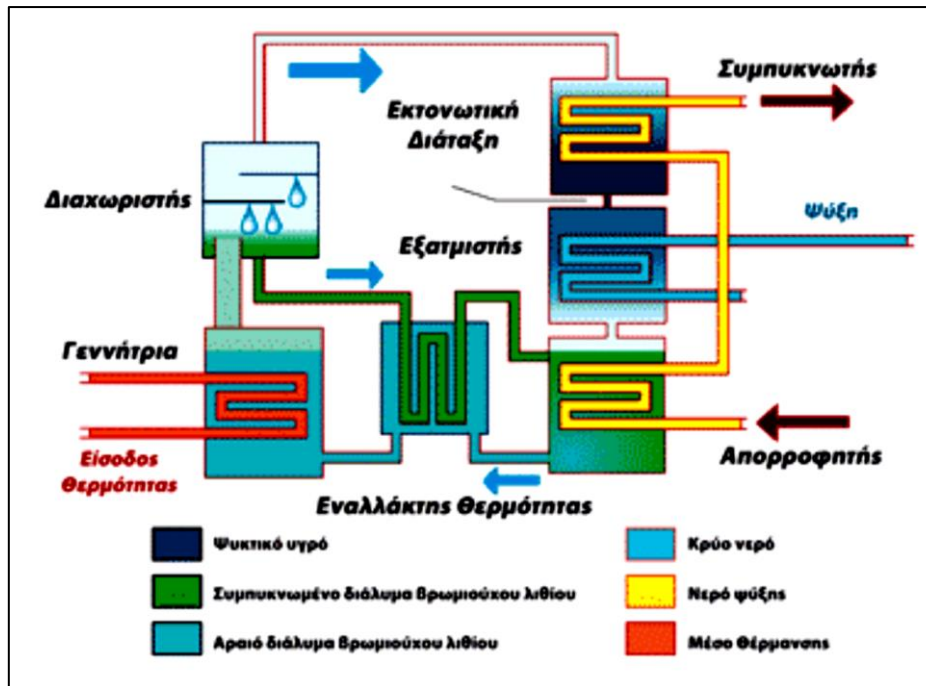
Το βασικό τμήμα μιας εγκατάστασης ΣΗΘ είναι η μηχανή που παράγει ηλεκτρισμό και θερμότητα. Η μηχανή αυτή χαρακτηρίζει την εγκατάσταση. Οι ψύκτες απορρόφησης, ο μηχανισμός που παράγει ψύξη, χρησιμοποιώντας τη θερμότητα της διαδικασίας συμπαραγωγής, είναι το δεύτερο σημαντικότερο κομμάτι σε μια εγκατάσταση τριπαραγωγής.

Οι ψύκτες απορρόφησης βασίζονται στη συμπύκνωση και την εξάτμιση για να παράγουν ψύξη. Όπως οι ψύκτες που λειτουργούν με αέριο, έχουν έναν εξατμιστή και έναν συμπυκνωτή, που διαστέλλει το ψυκτικό μέσο για να παράγει ψύξη. Αντί για μηχανικό συμπιεστή, αυτοί οι ψύκτες χρησιμοποιούν μια πηγή θερμότητας που είναι είτε άμεσα προωθούμενη με τη χρήση ενός καυστήρα, είτε έμμεσα προωθούμενη με τη χρήση ατμού, ζεστού νερού ή απορριπτόμενης θερμότητας. Οι ψύκτες απορρόφησης που παρέχονται στο εμπόριο λειτουργούν με ατμό, ζεστό νερό ή αέρια καύσης.

Στην απλή του μορφή, ένας ψύκτης απορρόφησης αποτελείται από έναν εξατμιστή, έναν συμπυκνωτή, έναν απορροφητή, μια γεννήτρια και μια αντλία διαλύματος. Στον κύκλο συμπίεσης η ψύξη παράγεται στον εξατμιστή όπου το ψυκτικό μέσο εξατμίζεται και θερμότητα μεταφέρεται στον συμπυκνωτή όπου και το μέσο συμπυκνώνεται. Η απαιτούμενη ενέργεια για την μεταφορά θερμότητας από χαμηλότερη προς υψηλότερη θερμοκρασία παρέχεται από τον συμπιεστή.

Στον κύκλο ψύξης, η συμπίεση του ατμοποιημένου ψυκτικού μέσου πραγματοποιείται στον απορροφητή, στην αντλία και την γεννήτρια σε συνδυασμό, αντί για μηχανική συμπίεση. Ο ατμός που παράγεται στον εξατμιστή απορροφάται από το υγρό μέσο απορρόφησης στον απορροφητή, το οποίο στη συνέχεια αντλείται στην γεννήτρια από όπου το ψυκτικό μέσο απελευθερώνεται ως ατμός και εν συνεχεία συμπυκνώνεται. Το αναγεννημένο ισχυρό διάλυμα του μέσου απορρόφησης οδηγείται πάλι στον απορροφητή για να ανακτήσει και πάλι το ψυκτικό μέσο.

Θερμότητα παρέχεται στην γεννήτρια σε σχετικά υψηλή θερμοκρασία και απορρίπτεται από τον απορροφητή σε χαμηλή θερμοκρασία. [16]



Εικόνα 1.6: Σχηματική απεικόνιση διάταξης ενός ψύκτη απορρόφησης [2]

1.4 Σύνοψη πλεονεκτημάτων - μειονεκτημάτων συμπαραγωγής

Ακολουθώς συνοψίζονται τα βασικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Σ.Η.Θ:

- Αυξημένη απόδοση μετατροπής και χρήσης της ενέργειας. Η Σ.Η.Θ. είναι η πλέον αποτελεσματική και αποδοτική μορφή ηλεκτροπαραγωγής με την ταυτόχρονη παραγωγή θερμικής ενέργειας.
- Μικρότερες εκπομπές προς το περιβάλλον, ιδιαίτερα του CO₂, του σημαντικότερου αερίου στο οποίο οφείλεται η κλιματική αλλαγή.
- Σημαντική εξοικονόμηση οικονομικών πόρων, παρέχοντας πρόσθετη ανταγωνιστικότητα στη βιομηχανία και στις εμπορικές επιχειρήσεις, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα παρέχονται σε προσιτές τιμές.
- Σημαντική ευκαιρία ώστε να προωθηθούν αποκεντρωμένες λύσεις ηλεκτροπαραγωγής, όπου οι σταθμοί Σ.Η.Θ. σχεδιάζονται να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των τοπικών καταναλωτών, παρέχοντας υψηλή απόδοση, αποφεύγοντας απώλειες μεταφοράς και αυξάνοντας την ευελιξία στη χρήση του συστήματος. Το πλεονέκτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, όταν το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται ως κύριο καύσιμο.
- Βελτιωμένη ασφάλεια παροχής, που μειώνει τις πιθανότητες οι καταναλωτές να μείνουν χωρίς ηλεκτρική ή/ και θερμική ενέργεια.
- Μειωμένη ανάγκη καυσίμων, σε σχέση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, μειώνοντας την εξάρτηση από εισαγωγές.

- Αυξημένη απασχόληση, αφού η ανάπτυξη των συστημάτων ΣΗΘ δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας.
- Η συμπαραγωγή μειώνει το σύνολο των δαπανών για εισαγόμενα καύσιμα, επιδρώντας θετικά στην εθνική οικονομία.

Αντίστοιχα, τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας ΣΗΘ είναι:

- Όλα τα συστήματα συμπαραγωγής εξοικονομούν το καύσιμο διότι έχουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης από την χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Όμως αν ένα σύστημα συμπαραγωγής εξοικονομεί ακριβό εισαγόμενο καύσιμο, πχ πετρέλαιο, εξαρτάται από το καύσιμο που το ίδιο το σύστημα συμπαραγωγής χρησιμοποιεί, και τα καύσιμα που χρησιμοποιούν τα συστήματα χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, τα οποία θα αντικατασταθούν από το σύστημα συμπαραγωγής. Η επιλογή των συστημάτων συμπαραγωγής και των καυσίμων, που αυτά χρησιμοποιούν είναι σκόπιμο να εναρμονίζεται με μια γενικότερη εθνική ενεργειακή πολιτική.
- Είναι ενδεχόμενο να δημιουργήσουν προβλήματα αστάθειας του δικτύου. Τα προβλήματα αυτά περιορίζονται ή αποφεύγονται όταν το σύστημα συμπαραγωγής και η σύνδεση του με το δίκτυο πληρούν ορισμένες προδιαγραφές. Η συνεννόηση με τις αρμόδιες υπηρεσίες της ΔΕΗ είναι απαραίτητη προς το σκοπό αυτό.
- Η εξάπλωση της συμπαραγωγής θα μπορούσε να έχει αρνητικές οικονομικές επιπτώσεις στο εθνικό σύστημα ηλεκτρισμού, αν αυτό έχει ικανότητα παραγωγής μεγαλύτερη από τη ζήτηση ή αν ο ρυθμός αύξησης της ικανότητας με κατασκευή νέων σταθμών είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό αύξησης της ζήτησης και για διάφορους λόγους δεν μπορεί να επιβραδυνθεί. Τότε, το κόστος κεφαλαίου μοιράζεται σε μικρότερη ποσότητα παραγόμενου ηλεκτρισμού, με αποτέλεσμα την αύξηση του μοναδιαίου κόστους. Ένα τέτοιο ενδεχόμενο δεν φαίνεται να υπάρχει για την Ελλάδα διότι αφ' ενός μεν μέρος των αναγκών καλύπτεται με εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αφ' ετέρου δε το αναπτυξιακό πρόγραμμα της ΔΕΗ είναι κυλιόμενο, δηλαδή αναθεωρείται σε τακτά χρονικά διαστήματα και επομένως μπορεί να προσαρμόζεται στις νέες συνθήκες.
- Όταν πολλές μικρές και διεσπαρμένες μονάδες συμπαραγωγής αντικαθιστούν μεγάλους κεντρικούς σταθμούς με υψηλές καπνοδόχους, τότε δεν είναι εξασφαλισμένη η βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Οι κεντρικοί σταθμοί βρίσκονται κατά κανόνα έξω από τα αστικά κέντρα και οι υψηλές καπνοδόχοι συντελούν σε ικανοποιητικό διασκορπισμό των ρύπων. Αντίθετα, οι μικρές μονάδες συμπαραγωγής, που έχουν και σχετικά χαμηλότερες

καπνοδόχους, είναι εγκατεστημένες κοντά ή και μέσα στις κατοικημένες περιοχές επιβαρύνοντας το περιβάλλον τους.

- ο Η διακίνηση των καυσίμων και η απομάκρυνση των στερεών καταλοίπων της καύσης μπορεί να προκαλέσει ρύπανση του εδάφους και των υδάτων της περιοχής. Τέλος, ο θόρυβος τόσο από τη λειτουργία του ίδιου του συστήματος συμπαραγωγής όσο και από την κίνηση, που αναπτύσσεται για την εξυπηρέτησή του, αυξάνει την ηχητική ρύπανση.[1][6]

1.5 Εφαρμογές της συμπαραγωγής

Η συμπαραγωγή πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 1890 στον βιομηχανικό τομέα, κυρίως σε χημικές βιομηχανίες και χάρτου, όπου υπάρχει συνεχής ζήτηση ηλεκτρισμού και θερμότητας. Σήμερα οι διαθέσιμες τεχνολογίες προσφέρουν μεγάλη δυνατότητα επιλογών οπότε και την δυνατότητα να εφαρμοστούν σε περισσότερους τομείς.

Οι εφαρμογές της συμπαραγωγής μπορούν να καταταγούν βάσει της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος των συστημάτων συμπαραγωγής και της περιοχής κατανάλωσης της παραγόμενης θερμικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ισχύς των συστημάτων συμπαραγωγής κυμαίνεται από 1 kWe έως 500 MWe. Για την συμπαραγωγή μεγάλης κλίμακας, δηλαδή για ισχύς μεγαλύτερες των 1 MWe, τα χαρακτηριστικά των συστημάτων προσδιορίζονται με σκοπό την βελτιστοποίηση της εφαρμογής για κάθε ξεχωριστή περίπτωση και συνήθως αφορούν εγκατάσταση τηλεθέρμανσης. Για εφαρμογές συμπαραγωγής μικρής κλίμακας, δηλαδή για ισχύς μικρότερες των 1 MWe, τα συστήματα έχουν τυποποιημένη μορφή («πακέτα»), γεγονός που διευκολύνει την εγκατάστασή τους.

Τα συστήματα για βιομηχανικές εφαρμογές έχουν εύρος 1-50 MWe, αν και υπάρχουν εξαιρέσεις. Είναι δύσκολη η διάκριση ανάμεσα σε μικρή και μεγάλη κλίμακα, καθώς αυτή διαφοροποιείται από χώρα σε χώρα. Σε γενικές γραμμές όμως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι από 1 MWe έως 10 MWe μιλάμε για συμπαραγωγή μεσαίας κλίμακας και άνω των 10 MWe για συμπαραγωγή μεγάλης κλίμακας. Οι μη βιομηχανικές εφαρμογές έχουν μεγάλο εύρος, από 1 kWe (οικιακή εφαρμογή) μέχρι 10 MWe (εφαρμογές τηλεθέρμανσης). Ισχύς μικρότερες των 1 MWe θεωρούνται εφαρμογές μικρής κλίμακας. “Mini” κλίμακα έχουμε για εφαρμογές μικρότερες των 500 kWe και “micro” για εφαρμογές μικρότερες των 20 kWe.

Οι εφαρμογές της συμπαραγωγής διακρίνονται σε τέσσερις κύριους τομείς :

- σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας

- βιομηχανικός τομέας
- εμπορικός - κτιριακός τομέας
- αγροτικός τομέας

Ο ετεροχρονισμός μεταξύ ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου στις κατοικίες, καθώς και η μεταβολή της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια του 24ώρου, κάνουν συχνά αναγκαία την ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης θερμότητας, προκειμένου να επιτευχθεί οικονομική εκμετάλλευση του συστήματος συμπαραγωγής.

Από αναλύσεις έχει αποδειχτεί ότι τα κατάλληλα κτίρια για εφαρμογές συμπαραγωγής είναι τα κέντρα υγείας, τα ξενοδοχεία συνεχούς λειτουργίας και γενικότερα τα μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα, ενώ μακροπρόθεσμα η χρήση μπορεί να επεκταθεί και στον οικιακό τομέα.

1.5.1 Σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας

Σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να κατασκευαστούν ή να μετατραπούν σε συμπαραγωγούς και να καλύψουν τις θερμικές ανάγκες πόλεων ή οικισμών, βιομηχανιών, μονάδων αφαλάτωσης νερού, θερμοκηπίων κτλ., που βρίσκονται στην περιοχή τους. Η απόσταση των καταναλωτών θερμότητας από τον σταθμό και η διασπορά τους είναι κρίσιμης σημασίας για τη σκοπιμότητα του όλου έργου.

Ειδικότερα για τη θέρμανση πόλεων και οικισμών (τηλεθέρμανση) επιπλέον της απόστασης και διασποράς, κρίσιμης σημασίας είναι και ο ετήσιος αριθμός βαθμοημερών και η απαιτούμενη θερμική ισχύς. Στις περισσότερες περιπτώσεις η οικονομική απόσταση μεταφοράς θερμικής ενέργειας δεν ξεπερνά τα 10km. Σε θερμά κλίματα, η τηλεψύξη κατά την διάρκεια του θέρους, θα μπορούσε να είναι οικονομικά εφικτή. Σε αυτή την περίπτωση η παραγόμενη θερμική ενέργεια από το σταθμό μπορεί να τροφοδοτεί έναν ψύκτη απορρόφησης ή μια μονάδα κλιματισμού. Ενδέχεται είτε οι ψύκτες να είναι κεντρικοί και να διανέμεται το κρύο νερό στους καταναλωτές, είτε να υπάρχουν τοπικές ψυκτικές μονάδες, οπότε στην τελευταία περίπτωση δεν απαιτείται ξεχωριστό δίκτυο κρύου νερού, καθώς το δίκτυο ζεστού νερού ή ατμού, θα χρησιμοποιείται όλο το χρόνο.



Εικόνα 1.7: Ατμοηλεκτρικός σταθμός της Δ.Ε.Η. στην Πτολεμαΐδα που συμπαράγει ηλεκτρισμό και θερμότητα για τη τηλεθέρμανση της πόλης [5]

1.5.2 Βιομηχανικός τομέας

Πολλές βιομηχανικές διεργασίες απαιτούν θερμότητα, παράλληλα με τις ανάγκες για ηλεκτρισμό, για να ολοκληρωθούν. Κατατάσσονται ανάλογα με την απαιτούμενη θερμοκρασία:

- Διεργασίες χαμηλών θερμοκρασιών (<100°C)
- Διεργασίες μέτριων θερμοκρασιών (100-300°C)
- Διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών (300-700°C)
- Διεργασίες πολύ υψηλών θερμοκρασιών (>700°C)

Οι περισσότερες βιομηχανίες με σημαντικό δυναμικό παραγωγής έχουν ορισμένες παραγωγικές διεργασίες, που παράγουν ή αποβάλλουν θερμότητα σε ικανοποιητική ποσότητα και ποιότητα (θερμοκρασιακή στάθμη), η οποία μπορεί να προστεθεί σε εκείνη που παράγεται άμεσα από το σύστημα συμπαραγωγής, με ανάκτησή της. Ορισμένες χημικές διεργασίες παράγουν καύσιμα αέρια, που μπορούν να αποτελέσουν καύσιμο είτε για τους λέβητες είτε για το ίδιο το σύστημα συμπαραγωγής.

Στην Ελλάδα το σύνολο της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος των μονάδων βιομηχανικής συμπαραγωγής είναι 245MW και αποτελεί περίπου το 2,4% τη συνολικής εγκατεστημένης ισχύος.

Οι εφαρμογές της συμπαραγωγής στη βιομηχανία αναφέρονται κυρίως σε μεγάλα βιομηχανικά συστήματα (>50MWe) και μόνο στο μέλλον μπορούμε να

αναμένουμε την ανάπτυξη μικρότερου και μεσαίου μεγέθους συστημάτων (1MWe – 50MWe), με την ανάπτυξη νέων μικρότερων τεχνολογιών, καινοτόμων σχημάτων ενεργειακών υπηρεσιών, κ.α.

1.5.3 Εμπορικός – κτιριακός τομέας (τριτογενής τομέας)

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα συστήματα συμπαραγωγής μικρής κλίμακας που εγκαθίστανται σε μεγάλα ξενοδοχεία, νοσοκομεία, πανεπιστημιούπολεις, κολυμβητήρια, γυμναστήρια, εμπορικά κτίρια, σχολεία, κτίρια γραφείων, κατοικίες, κτλ. Κατάλληλες για την εξυπηρέτηση των κτιρίων είναι οι μονάδες συμπαραγωγής σε μορφή πακέτου.

Από πλευρά αναγκών θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας ο τομέας διακρίνεται σε τρεις υποτομείς:

- Νοσοκομεία και ξενοδοχεία
- Πολυκατοικίες
- Κτίρια γραφείων

Ο καθένας από αυτούς χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη μορφή της καμπύλης φορτίου. Άλλου είδους κτίρια έχουν καμπύλες φορτίου, που προκύπτουν με συνδυασμό των τριών υποτομέων. Η συμπαραγωγή εδώ μπορεί να καλύπτει ανάγκες ηλεκτρισμού, θέρμανσης και ψύξης (τριπαραγωγή). Η μελέτη σκοπιμότητας και ο τελικός σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να βασίζονται στην καμπύλη φορτίου του συγκεκριμένου κτιρίου. Οι μέγιστες τιμές ή ένας μέσος όρος των τιμών που αφορούν το φορτίο δεν επαρκούν καθώς ενδέχεται να οδηγήσουν σε λανθασμένα αποτελέσματα και επιλογές.

Μελέτες σκοπιμότητας έχουν δείξει ότι στα ψυχρά κλίματα, οι μεγάλες χρονικές περίοδοι ζήτησης θερμικής ενέργειας για θέρμανση συμβάλλουν στην βιωσιμότητα των συστημάτων συμπαραγωγής. Στα θερμά κλίματα, η απαίτηση ψυκτικής ισχύος με ταυτόχρονη κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρισμό και θερμότητα, είναι οι παράγοντες που κάνουν ένα σύστημα συμπαραγωγής βιώσιμο.

Η διαθεσιμότητα του φυσικού αερίου και των μονάδων συμπαραγωγής σε μορφή πακέτου, καθώς επίσης και η δυνατότητα παρακολούθησης εξ αποστάσεως της λειτουργίας των συστημάτων έχουν συντελέσει στην προώθηση των εφαρμογών της συμπαραγωγής στον τριτογενή τομέα.

Ο ετεροχρονισμός μεταξύ ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου στις κατοικίες καθώς και η μεταβολή της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια του 24-ώρου, καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης

θερμότητας, προκειμένου να επιτευχθεί οικονομική εκμετάλλευση του συστήματος συμπαραγωγής.



Εικόνα 1.8: Εφαρμογή Συμπαραγωγής στο νοσοκομείο ΜΗΤΕΡΑ, Ηλεκτρική Ισχύς: 490kw, Θερμική Ισχύς:890kw, Ψυκτική Ισχύς: 180 RT [27]

Στην Ελλάδα υπάρχουν, προς το παρόν, δύο πειραματικές εγκαταστάσεις, στο Ηλιακό χωριό της Λυκόβρυσης και στο Αμερικάνικο Κολλέγιο της Αγ. Παρασκευής στην Αττική. Επίσης έχει εγκατασταθεί μονάδα συμπαραγωγής στο ιδιωτικό νοσοκομείο ΜΗΤΕΡΑ στην Αθήνα. Αλλαγές στο νομοθετικό πλαίσιο διαμορφώνουν ένα πιο ευνοϊκό κλίμα για περαιτέρω μελέτες στον τριτογενή τομέα. Συγκεκριμένα μελέτες σκοπιμότητας σε ελληνικά νοσοκομεία δείχνουν ότι η εγκατάσταση μονάδων συμπαραγωγής είναι συμφέρουσα όταν η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται τόσο τον χειμώνα (για θέρμανση) όσο και το καλοκαίρι (για δροσισμό).

1.5.4 Αγροτικός τομέας

Αν και δεν είναι πολύ διαδεδομένη η συμπαραγωγή σε αυτόν τον τομέα, η εφαρμογή της ωστόσο μπορεί να εξοικονομήσει καύσιμα και να έχει θετικές οικονομικές επιπτώσεις σε αγροτικές κοινότητες. Υπολείμματα αγροτικών διεργασιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο. Πολλά υποσχόμενες εφαρμογές περιλαμβάνουν την παραγωγή αιθανόλης, την ξήρανση γεωργικών προϊόντων και την θέρμανση θερμοκηπίων, οικιών κτλ.



Εικόνα 1.9: Μονάδα Συμπαραγωγής σε θερμοκήπιο της AGRITEX στη Δράμα ηλεκτρικής ισχύος 4,8 MWel και θερμικής ισχύος 5,22 MWth (επίσης χρησιμοποιείται το CO₂ που παράγεται για επιτάχυνση της ωρίμανσης). [26]

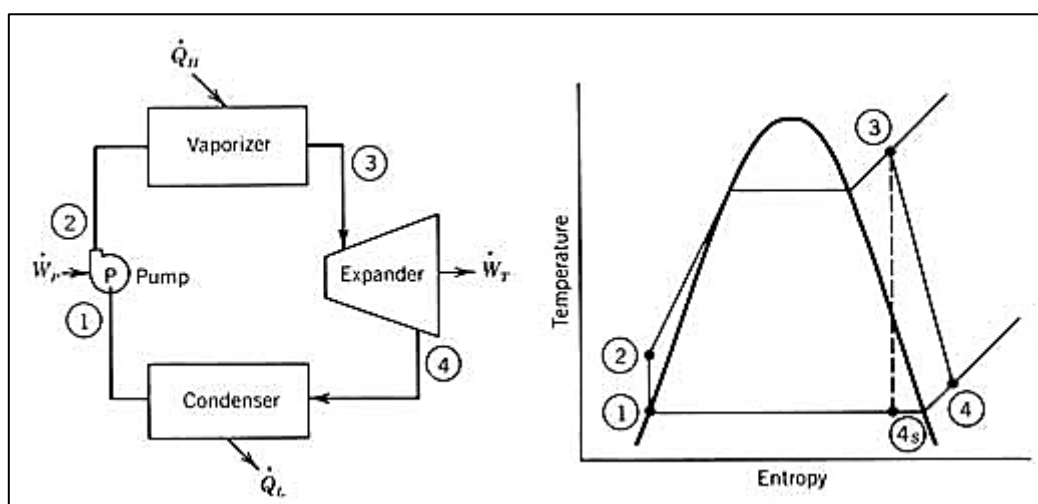
Ενισχύει την οικονομική ανάπτυξη του τόπου, καθώς χρησιμοποιεί τοπικές πηγές ενέργειας και δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας. Τέλος έχει ευνοϊκή επίδραση στο περιβάλλον με πολλαπλούς τρόπους. [11][26]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Βασικοί Κύκλοι Εργαζόμενου Μέσου

2.1 Κύκλος Rankine

Το κύκλος Rankine αντιστοιχεί σε μια θερμική μηχανή με κύκλο ισχύος ατμού. Το πιο κοινό εργαζόμενο μέσο είναι το νερό. Ο κύκλος συνίσταται από τέσσερις διεργασίες όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1.

- 1 έως 2 : ισεντροπική συμπίεση στην αντλία
- 2 έως 3 : θέρμανση υπό σταθερή πίεση στον λέβητα
- 3 έως 4s : ισεντροπική εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο
- 4 έως 1 : αποβολή της θερμότητας υπό σταθερή πίεση στον συμπυκνωτή



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα T – s του κύκλου Rankine και διάταξη υλοποίησής του [21]

Η διάταξη του κύκλου Rankine αποτελείται με τη σειρά από τον ατμοποιητή, το στρόβιλο, το συμπυκνωτή, και την τροφοδοτική αντλία και αποτελεί το πρότυπο για κύκλους παραγωγής ισχύος με ατμό. Συγκεκριμένα:

- Ατμοποιητής: Είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που προσδίδει τη θερμότητα από το περιβάλλον στο θερμικό μέσο με τη βοήθεια θερμικού ελαίου
- Στρόβιλος: Πραγματοποιεί την εκτόνωση του θερμικού μέσου που έρχεται από τον ατμοποιητή μετατρέποντας. Είναι συνδεδεμένος στον ίδιο άξονα με ηλεκτρική γεννήτρια και έτσι η ενθαλπική πτώση του θερμικού μέσου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια
- Συμπυκνωτής: Συλλέγει και συμπυκνώνει τον ατμό εξόδου του στροβίλου απορρίπτοντας την απαραίτητη θερμότητα στο περιβάλλον. Πρόκειται για έναν

εναλλάκτη θερμότητας στον οποίο ανταλλάσσεται θερμότητα μεταξύ δύο ρευμάτων, του ατμού εξόδου του στρόβιλου, που συμπυκνώνεται και οδηγείται προς το σύστημα τροφοδοσίας και του μέσου ψύξης (συνήθως νερό ή αέρας) που παραλαμβάνει την απορριπτόμενη θερμότητα.

- Τροφοδοτική αντλία: Οι αντλία ανυψώνει την πίεση του κορεσμένου μέσου που επιστρέφει από το συμπυκνωτή, για να τη φέρει στην τιμή πίεσης τροφοδοσίας του ατμοποιητή.

Πιο συγκεκριμένα για τα παραπάνω κομμάτια του κύκλου Rankine:

❖ *Εκτονωτής*

Οι δύο κύριες συσκευές για την παραγωγή έργου από ένα κύκλο Rankine είναι ο στρόβιλος και ο εκτονωτής θετικής εκτόπισης. Οι στρόβιλοι είναι μια εφαρμοσμένη τεχνολογία, αρκεί η εκτόνωση να λαμβάνει χώρα πλήρως μέσα στην υπέρθερμη περιοχή. Η εκτόνωση μέσα στη διφασική περιοχή είναι μη επιθυμητή γιατί τα σταγονίδια νερού τείνουν να διαβρώσουν τα πτερύγια του στρόβιλου. Από τους εκτονωτές θετικής εκτόπισης, ο πιο ελπιδοφόρος είναι ο εμβολοφόρος.

❖ *Συμπυκνωτής*

Χρησιμεύει για τη συμπύκνωση του ατμού που εξέρχεται από τον στρόβιλο δηλαδή είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας όπου ατμός υπό χαμηλή πίεση και θερμοκρασία συμπυκνώνεται με τη βοήθεια ψυκτικού μέσου που μπορεί να είναι αέρας ή νερό. Όσο χαμηλότερη είναι η πίεση ατμού στο συμπυκνωτή τόσο αυξάνει ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος αφού αυξάνει η διαθέσιμη ενθαλπική πτώση στο στρόβιλο, επομένως ο συμπυκνωτής είναι βασικό τμήμα του συστήματος αλλά και ο φορέας μέγιστης θερμικής απώλειας.

Από ένα συμπυκνωτή έχουμε τις παρακάτω απαιτήσεις:

1. Ο βαθμός καθαρότητας του ατμού πρέπει να διατηρείται και στο συμπύκνωμα.
2. Η θερμοκρασία του συμπυκνώματος δεν πρέπει να είναι μικρότερη της θερμοκρασίας κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση του ατμού για να αποφύγουμε μία επιπλέον απώλεια και εμπλουτισμό του συμπυκνώματος σε οξυγόνο.

3. Το συμπύκνωμα πρέπει να περιέχει όσο το δυνατό λιγότερο οξυγόνο για να αποφεύγονται οι διαβρώσεις.

4. Αέρας που εισέρχεται στον συμπυκνωτή καθώς και αέρας που τυχόν περιέχεται στον ατμό πρέπει να απομακρύνεται.

Θεωρούμε ότι από το συμπυκνωτή το εργαζόμενο μέσο εξέρχεται ως κορεσμένο υγρό, ανεξάρτητα από την κατάσταση στην οποία εισέρχεται ενώ η πίεση συμπύκνωσης μπορεί να είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική. Στην περίπτωση αυτή υπεισέρχονται δύο παράγοντες:

- Μεγάλη υποπίεση προϋποθέτει καλή στεγανοποίηση, για να μην εισέλθει στο συμπυκνωτή του συστήματος αέρας από το περιβάλλον.
- Δεδομένου ότι η θερμοκρασία συμπύκνωσης μειώνεται με τη ελάττωση της πίεσης συμπύκνωσης, πρέπει να επιλεγεί τέτοια τιμή για τη δεύτερη ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά θερμότητας. Για το λόγο αυτό και για να αποφύγουμε υπερβολικά μεγάλο μέγεθος συμπυκνωτή, η θερμοκρασία συμπύκνωσης πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 °C υψηλότερη από την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Να σημειωθεί ότι μείωση της πίεσης συμπύκνωσης είναι επιθυμητή από τη πλευρά του στροβίλου διότι αυξάνεται ο λόγος πιέσεων, με αποτέλεσμα την αύξηση της ωφέλιμης ισχύος.

❖ Τροφοδοτική αντλία

Είναι εκείνη που καταθλίβει το εργαζόμενο μέσο στον εναλλάκτη θερμότητας και ανυψώνει την πίεση στην υψηλή επιθυμητή. Οι αντλίες πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν τη μέγιστη παροχή εργαζόμενου μέσου στον εναλλάκτη. Στις τροφοδοτικές αντλίες συνήθως διαφέρουν το σημείο υπολογισμού από το σημείο βέλτιστου βαθμού απόδοσης, δεδομένου ότι το περισσότερο χρονικό διάστημα η αντλία δουλεύει σε φορτίο μικρότερου του μεγίστου. Από την τροφοδοτική αντλία έχουμε τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Να έχει όσο το δυνατόν καλύτερο βαθμό απόδοσης σε όσο το δυνατό ευρύτερη περιοχή φορτίου.
- Γρήγορη εκκίνηση από ψυχρή σε θερμή κατάσταση.
- Όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ασφάλεια λειτουργίας.

Το παραγόμενο έργο του κύκλου στον αμοστρόβιλος W_{34} και το εισαγόμενο έργο του κύκλου στην αντλία W_{12} , είναι αντίστοιχα:

$$W_{34} = \dot{m}(h_3 - h_4) \quad (2.1)$$

$$W_{12} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.2)$$

Η παρεχόμενη θερμότητα στον κύκλο από το λέβητα Q_{23} και η απορριπτόμενη από τον κύκλο στο συμπυκνωτή Q_{41} είναι αντίστοιχα :

$$Q_{23} = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (2.3)$$

$$Q_{41} = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (2.4)$$

Το ωφέλιμο έργο του κύκλου είναι $W_{34} - W_{12}$ και ο θερμικό βαθμός απόδοσης ενός κύκλου Rankine ορίζεται τότε ως :

$$n = \frac{W_{34} - W_{12}}{Q_{23}} \quad (2.5)$$

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine δεν είναι τόσο υψηλός όπως αυτός του κύκλου Carnot, αλλά ο κύκλος αυτός παρουσιάζει λιγότερες πρακτικές δυσκολίες και είναι πιο οικονομικός.

Οι συνθήκες λειτουργίας μπορούν να ποικίλουν σε μεγάλο βαθμό. Για τις εφαρμογές συμπαραγωγής, η πίεση ατμού μπορεί να κυμανθεί από μερικά bar μέχρι και 100 bar καθώς και ακόμα υψηλότερες πιέσεις. Η θερμοκρασία ατμού μπορεί να πλησιάσει τους 450 °C ενώ σε ορισμένες εφαρμογές έως και 540 °C. Η ισχύς εξόδου είναι συνήθως από 0.5 έως 100 MW, αν και ακόμα μεγαλύτερη ισχύς εξόδου είναι δυνατή.

Τα συστήματα στροβίλων ατμού έχουν υψηλή αξιοπιστία, που μπορεί να φθάσει σε 95%, υψηλή διαθεσιμότητα 90-95% και μακροχρόνιο κύκλο ζωής 25-35 έτη. Η περίοδος εγκαταστάσεων είναι μάλλον μεγάλη: 12-18 μήνες για τις μικρές μονάδες, μέχρι τρία έτη για τα μεγάλα συστήματα. Παρακάτω φαίνονται αναλυτικά οι κατηγορίες των ατμοστροβίλων και μερικά στοιχεία για την κάθε κατηγορία .

Η συνολική ενεργειακή απόδοση είναι σχετικά υψηλή 60–85% και μειώνεται μόνο ελαφρώς σε μερικό φορτίο. Εντούτοις, η ηλεκτρική αποδοτικότητα είναι χαμηλή 15–20%, το οποίο οδηγεί σε χαμηλό power to heat ratio $PHR = 0,1-0.5$. Γενικά, όσο υψηλότερη η θερμοκρασία που απαιτείται για τον ατμό , τόσο χαμηλότερη είναι η ηλεκτρική απόδοση. Η ηλεκτρική αποδοτικότητα μπορεί να αυξηθεί μέχρι ένα σημείο με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του ατμού στον στρόβιλο. [4][21][13]

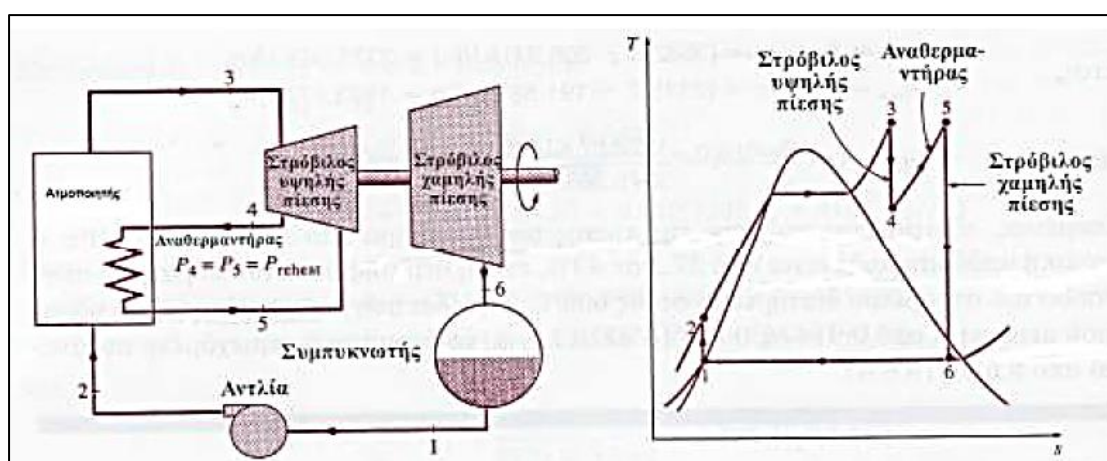
2.2 Βασικές Παραλλαγές του απλού κύκλου Rankine

Η αναζήτηση διατάξεων που επιτρέπουν την αύξηση του βαθμού απόδοσης του κύκλου ή την αντιστάθμιση των διαφόρων απωλειών και ιδιοκαταναλώσεων που υπάρχουν στον κύκλο, οδήγησε στην ανάπτυξη εγκαταστάσεων που υλοποιούν βασικές παραλλαγές του απλού κύκλου Rankine. Μερικές παραλλαγές είναι ο κύκλος Rankine με προθέρμανση, ο κύκλος Rankine με αναθέρμανση και ο διβάθμιος κύκλος Rankine.

2.2.1 Ο ιδανικός κύκλος Rankine με αναθέρμανση

Μια πρακτική λύση για να αυξηθεί ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου και να αποφευχθεί η υγρασία στο στρόβιλο είναι η εκτόνωση του ατμού στο στρόβιλο σε δύο στάδια με ενδιάμεση αναθέρμανση.

Το διάγραμμα T-s του ιδανικού κύκλου Rankine με αναθέρμανση και η σχηματική παράσταση της μονάδας απεικονίζονται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Ιδανικός κύκλος Rankine με αναθέρμανση [4]

Ο ιδανικός κύκλος Rankine με αναθέρμανση διαφέρει από τον απλό ιδανικό κύκλο Rankine στο ότι η διεργασία της εκτόνωσης πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο (στο στρόβιλο υψηλής πίεσης), ο ατμός εκτονώνεται ισεντροπικά σε μια ενδιάμεση πίεση και στέλνεται ξανά στον ατμοποιητή όπου αναθερμαίνεται σε μια σταθερή πίεση, συνήθως στη θερμοκρασία εισόδου του πρώτου σταδίου του στροβίλου. Στη συνέχεια, ο ατμός εκτονώνεται ισεντροπικά στο δεύτερο στάδιο (στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης), στην πίεση του συμπυκνωτή. Έτσι, για ένα κύκλο με αναθέρμανση, η συνολική προσθήκη θερμότητας και το συνολικό έργο εξόδου των στροβίλων γίνονται:

$$q_{in} = q_{primary} + q_{reheat} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad (2.6)$$

και

$$w_{turb,out} = w_{turb,I} + w_{turb,II} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \quad (2.7)$$

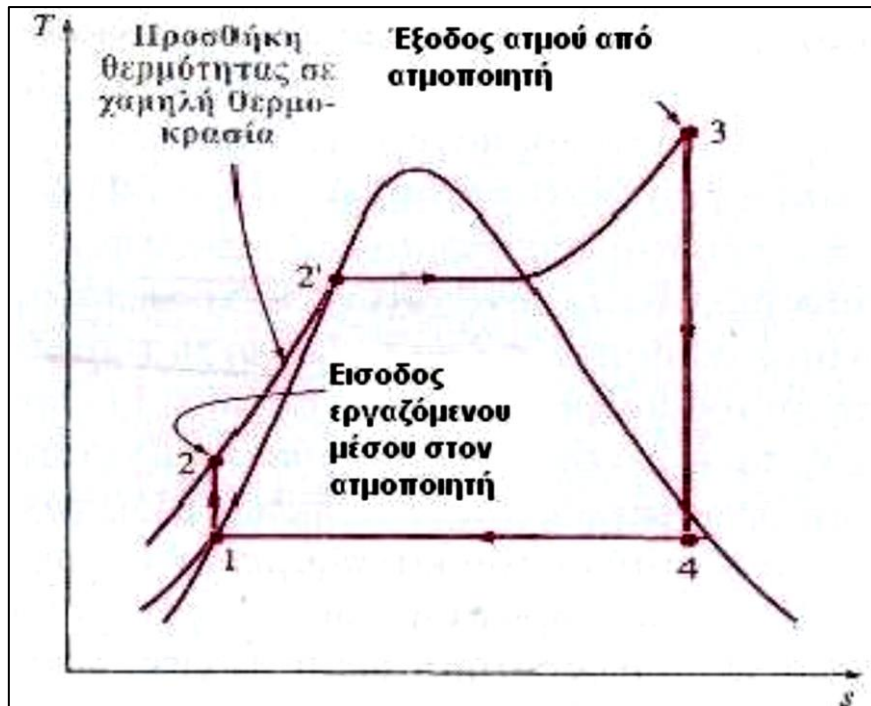
Η ενσωμάτωση της απλής αναθέρμανσης σε μια σύγχρονη μονάδα παραγωγής ισχύος με ατμό βελτιώνει την απόδοση κύκλου κατά 4 έως 5%, με αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στην οποία η θερμότητα προστίθεται στον ατμό.

Υπενθυμίζεται ότι μοναδικός στόχος του κύκλου με αναθέρμανση είναι η μείωση του υγρασιακού περιεχομένου του ατμού στα τελικά στάδια της εκτόνωσης. Εάν υπήρχαν διαθέσιμα υλικά που θα μπορούσαν να ανταπεξέλθουν ικανοποιητικά σε υψηλές θερμοκρασίες, δε θα υπήρχε ανάγκη χρήσης του κύκλου αναθέρμανσης.

2.2.2 Ιδανικός κύκλος Rankine με αναγέννηση (προθέρμανση)

Από μια προσεκτική εξέταση των διαγραμμάτων T-s του κύκλου Rankine που παρατίθενται στην Εικόνα 2.3, διαπιστώνεται ότι κατά τη διάρκεια της διεργασίας 2-2' προστίθεται θερμότητα στο εργαζόμενο μέσο σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία. Αυτό προκαλεί τη μείωση της μέσης θερμοκρασίας στην οποία προστίθεται θερμότητα και κατά συνέπεια και του βαθμού απόδοσης του κύκλου.

Για να διορθωθεί αυτό το μειονέκτημα αναζητούνται τρόποι αύξησης της θερμοκρασίας του υγρού που εγκαταλείπει την αντλία (π.χ. νερού τροφοδοσίας) πριν εισέλθει στον ατμοποιητή. Μια πρακτική διεργασία αναγέννησης, σε μονάδες παραγωγής ισχύος με ατμό, επιτυγχάνεται αφαιρώντας ατμό από το στρόβιλο σε διαφορετικά σημεία. Ο ατμός αυτός, ο οποίος θα μπορούσε να παράγει επιπλέον έργο, εάν εκτονωνόταν στο στρόβιλο, χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του εργαζόμενου μέσου τροφοδοσίας. Η συσκευή στην οποία πραγματοποιείται η θέρμανση αυτή με αναγέννηση ονομάζεται αναγεννητήρας ή θερμαντήρας του εργαζόμενου μέσου τροφοδοσίας.



Εικόνα 2.3: Το πρώτο τμήμα της διεργασίας προσθήκης θερμότητας στον ατμοποιητή πραγματοποιείται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. [4]

Η αναγέννηση δε βελτιώνει μόνο την απόδοση του κύκλου, αλλά επιπλέον παρέχει μέσα εξαέρωσης του εργαζόμενου μέσου τροφοδοσίας (αφαιρώντας τον αέρα που εισρέει στο συμπυκνωτή) για να αποφευχθεί η διάβρωση στον ατμοποιητή. Επιπλέον, βοηθά στον έλεγχο της μεγάλης ογκομετρικής παροχής του υγρού ατμού στα τελικά στάδια (βαθμίδες) του στροβίλου (εξαιτίας των υψηλών ειδικών όγκων στις χαμηλές πιέσεις). Έτσι η αναγέννηση χρησιμοποιείται σε όλες τις σύγχρονες μονάδες παραγωγής ισχύος με ατμό από τις αρχές τη δεκαετίας του '20, οπότε και πρωτοεμφανίστηκε. Ο θερμοαντήρας εργαζόμενου μέσου τροφοδοσίας είναι βασικά ένας εναλλάκτης θερμότητας με τη βοήθεια του οποίου η θερμότητα μεταφέρεται από τον ατμό στο εργαζόμενο μέσο τροφοδοσίας, είτε αναμιγνύοντας τα ρεύματα ροής των δύο ρευστών (ανοικτοί θερμοαντήρες), είτε χωρίς ανάμιξή τους (κλειστοί θερμοαντήρες). [9][12][23]

2.3 Οργανικός Κύκλος Rankine (ORC)

Το σύνηθες θερμικό μέσο του κύκλου Rankine είναι το νερό υπό πίεση. Στην περίπτωση που ο κύκλος έχει χαμηλή μέγιστη θερμοκρασία, το νερό/ατμός δεν είναι ιδανικό λόγω της χαμηλής απόδοσης σε αυτές τις συνθήκες. Το νερό

επίσης παρουσιάζει μεγάλο ειδικό όγκο, πράγμα που απαιτεί μεγαλύτερες εγκαταστάσεις.

Αυτό οδηγεί στη χρήση ψυκτικών μέσων ή υδρογονανθράκων για θερμικά μέσα. Οι φυσικές ιδιότητες του θερμικού μέσου είναι υψηλής σημασίας για την συνολική συμπεριφορά και απόδοση του κύκλου. [ανάλυση διαφορών,23]

Η παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας με ανάκτηση θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας 80-300 °C είναι δυνατή εάν χρησιμοποιηθούν οργανικά ρευστά, π.χ. τολουένη, που έχουν θερμοκρασία βρασμού αρκετά χαμηλότερη εκείνης του νερού. Έτσι, πηγές θερμότητας μπορούν να είναι η ηλιακή ενέργεια, βιομηχανικά απόβλητα, γεωθερμική ενέργεια, καυσαέρια ή θερμότητα ψύξης μηχανών, κ.λπ.

Η ισχύς των συστημάτων αυτών κυμαίνεται στην περιοχή 2 kW – 10 MW. Ο βαθμός απόδοσης είναι μικρός, 10-30%, αλλά σημασία έχει το γεγονός ότι ένα τέτοιο σύστημα παράγει πρόσθετη ισχύ χωρίς να ξοδεύει καύσιμο. Από κατασκευαστικής πλευράς, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των υλικών, ώστε να μην παθαίνουν διάβρωση από το οργανικό ρευστό π.χ. χρήση ανοξείδωτου χάλυβα, και στη στεγανότητα των στοιχείων του συστήματος, ώστε να μην διαφεύγει το οργανικό ρευστό στην ατμόσφαιρα.

Ο χρόνος εγκατάστασης μικρών συστημάτων μέχρι 50 kW, και ιδιαίτερα εκείνων που είναι κατάλληλα για χρήση στον εμπορικό – κτιριακό τομέα, είναι 4-8 μήνες, ενώ για μεγαλύτερες μονάδες είναι 1-2 έτη. Καθώς η τεχνολογία αυτή είναι σχετικά νέα, δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες για την αξιοπιστία των συστημάτων.

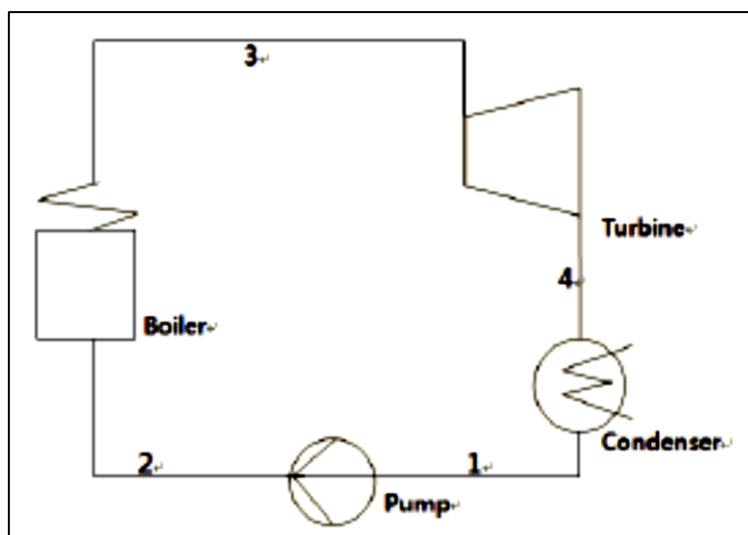
Εκτιμάται ότι η μέση ετήσια διαθεσιμότητά τους είναι 80-90%. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 20 έτη.

Οι κυριότερες εταιρίες της αγοράς είναι οι αμερικάνικες εταιρίες (ORMAT, Pratt&Whitney, GE Heat Recovery), η ιταλική αλλά αμερικάνικων συμφερόντων (Turboden ιδιοκτησίας της Pratt&Whitney), οι γερμανικές (Maxxtec, GMK) και η δανέζικη (Tri-O-Gen).

2.3.1 Ο απλός οργανικός κύκλος Rankine

Ο απλός Οργανικός Κύκλος Rankine περιλαμβάνει τα βασικά μέρη του κύκλου Rankine με ατμό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.4. Το οργανικό μέσο εισέρχεται στην αντλία σε κατάσταση κορεσμένου υγρού προκειμένου να αυξηθεί η πίεση του σε P_{high} και να μπορέσει να κυκλοφορήσει στον κύκλο. Μετά την έξοδο από την αντλία, το οργανικό μέσο οδηγείται στον εξατμιστή όπου θερμαίνεται μέχρι την κατάσταση του κορεσμένου ατμού απορροφώντας

θερμότητα από τη θερμή πηγή. Σε κατάσταση κορεσμένου ατμού εισέρχεται στην εκτονωτική διάταξη στην οποία εκτονώνεται μέχρι την χαμηλή πίεση P_{low} και παράγεται ισχύς. Εξερχόμενο από την εκτονωτική διάταξη βρίσκεται σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού και τότε εισέρχεται στον συμπυκνωτή όπου αποβάλλει θερμότητα, αλλάζει φάση και εξέρχεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού. Μετά οδηγείται και πάλι στην αντλία για να επαναληφθεί ο κύκλος.

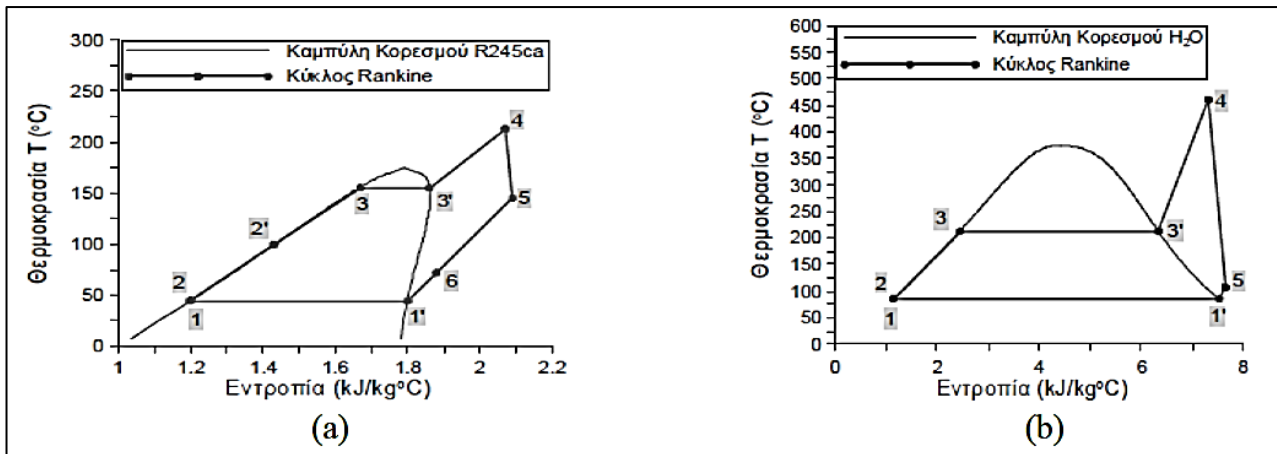


Εικόνα 2.4: Απλός οργανικός κύκλος Rankine [14]

Οι διεργασίες που εκτελούνται στον απλό ισεντροπικό ORC είναι οι εξής:

- α) 1-2, αύξηση της πίεσης από P_{low} σε P_{high} στην αντλία
- β) 2-3, θέρμανση του μέσου μέσα στον εξατμιστή
- γ) 3-4, εκτόνωση στην εκτονωτική διάταξη από P_{high} σε P_{low}
- δ) 4-1, απόρριψη θερμότητας στον συμπυκνωτή.

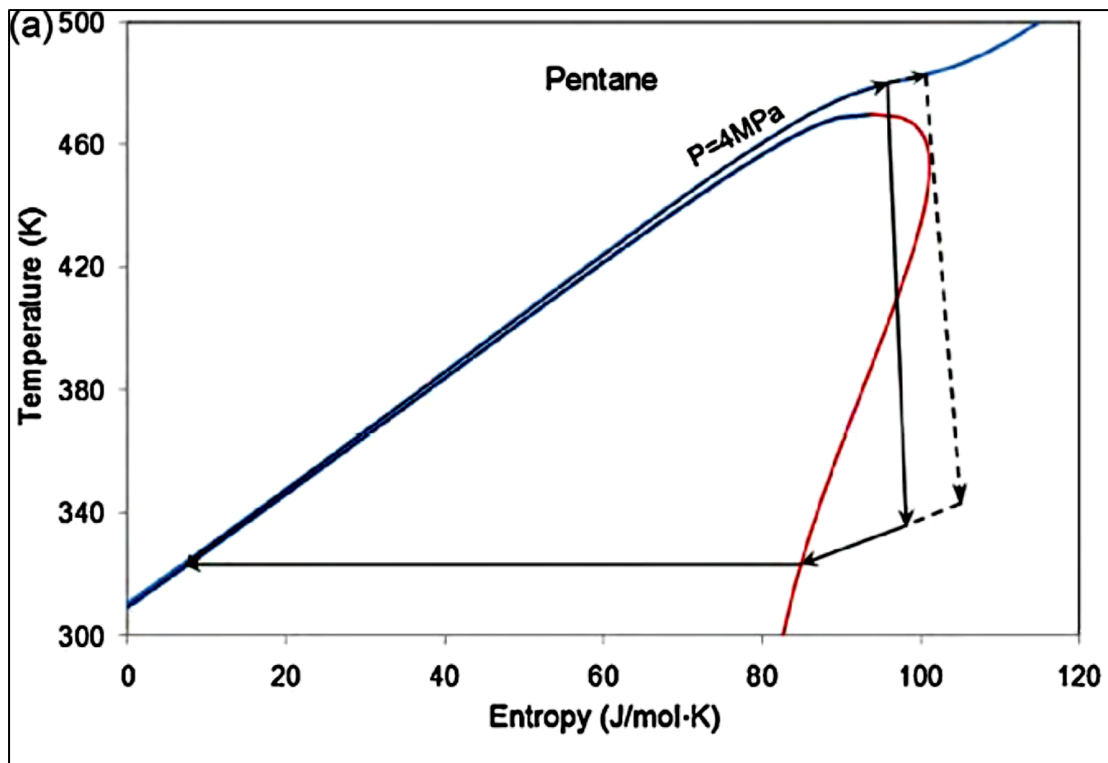
Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζεται ένας απλός ORC (α) και ένας κύκλος Rankine νερού – ατμού (β).



Εικόνα 2.5: (a) Απλός ORC, (b) κύκλος Rankine ατμού- νερού [3]

Πιο συγκεκριμένα για τα παραπάνω στοιχεία του κύκλου Rankine:

Η αντλία αναλαμβάνει να καταθλίψει το εργαζόμενο μέσο στον εναλλάκτη θερμότητας και ανυψώνει την πίεση στην επιθυμητή πίεση λειτουργίας. Πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει την απαιτούμενη ποσότητα του εργαζόμενου μέσου στον εξατμιστή. Έτσι, θα πρέπει να έχει καλό βαθμό απόδοσης και όσο το δυνατόν ευρύτερη περιοχή λειτουργίας. Ο εξατμιστής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που τοποθετείται μετά την αντλία. Το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται σε αυτόν σε υγρή κατάσταση και, αφού απορροφήσει θερμότητα από την πηγή, τότε εξέρχεται από αυτόν σε κατάσταση κορεσμένου ατμού. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στον υπερκρίσιμο ORC, όπου η έξοδος του εργαζόμενου μέσου από τον εξατμιστή θα πρέπει να είναι σε τέτοια θερμοκρασία ώστε κατά την φάση της εκτόνωσης να μην περάσει μέσα από την διφασική περιοχή (Εικόνα 2.6). Πριν από τον εξατμιστή μπορεί να γίνει προθέρμανση του εργαζόμενου μέσου, είτε με αξιοποίηση κάποιας άλλης πηγής θερμότητας (προθερμαντήρας), είτε με εκμετάλλευση της κατάστασης του εργαζόμενου μέσου μετά την εκτόνωση (αναγεννητής ή ανακομιστής). Στην περίπτωση του αναγεννητή, ο θερμός ατμός από την έξοδο του εκτονωτή χρησιμοποιείται για να θερμάνει το μέσο, το οποίο έχει βγει από την αντλία και βρίσκεται σε υγρή κατάσταση.



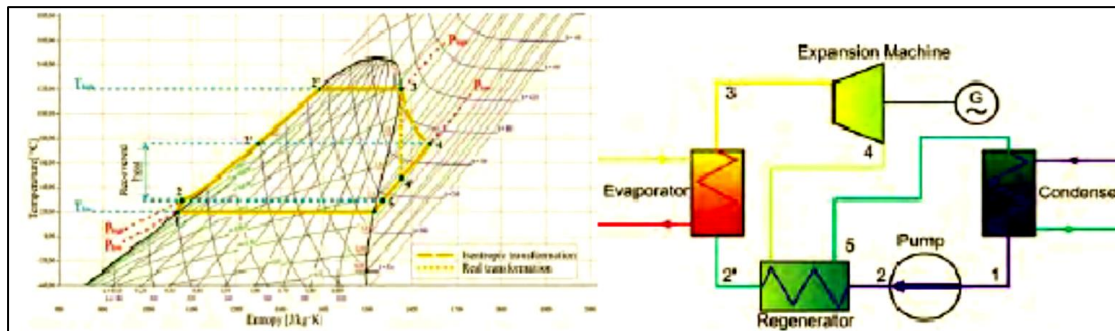
Εικόνα 2.6: Φάση της εκτόνωσης σε υπερκρίσιμο κύκλο [10]

Οι δύο κύριες συσκευές που χρησιμοποιούνται ως εκτονωτικές διατάξεις είναι ο στρόβιλος και ο εκτονωτής θετικού εκτοπίσματος. Στους στρόβιλους, η εκτόνωση θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μόνο στην περιοχή του υπέρθερμου ατμού, διότι υπάρχει ο κίνδυνος δημιουργίας σταγονιδίων τα οποία οδηγούν στη φθορά του. Στους εκτονωτές θετικού εκτοπίσματος συγκαταλέγονται οι scroll, screw, οι εμβολοφόροι και άλλοι, οι οποίοι δεν αντιμετωπίζουν τόσο έντονο πρόβλημα από την παρουσία σταγονιδίων κατά την φάση της εκτόνωσης. Έτσι, μπορούν να λειτουργούν σε κατάσταση κορεσμένου ή υπέρθερμου ατμού και να περνούν από την υγρή περιοχή χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Ακόμα, η ταχύτητα περιστροφής των στρόβιλων είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι των εκτονωτών θετικού εκτοπίσματος. Έτσι, σε μερικές εφαρμογές, για την περίπτωση χρησιμοποίησης στρόβιλου, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση ενός μειωτήρα στροφών στην έξοδο του στρόβιλου.

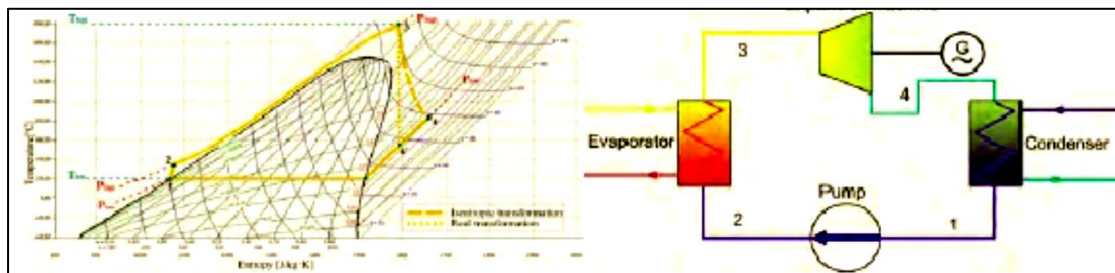
Μετά τον εκτονωτή το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στον συμπυκνωτή, το οποίο βρίσκεται σε κατάσταση χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Ο συμπυκνωτής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας όπου συμπυκνώνεται το εργαζόμενο μέσο με τη βοήθεια ψυκτικού υγρού ή αέρα. Στην έξοδο του συμπυκνωτή το μέσο βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμένου υγρού. Όσο μικρότερη είναι η πίεση στον συμπυκνωτή τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγόμενη ισχύς διότι αυξάνεται η μέγιστη διαθέσιμη ενθαλπική πτώση μέσα

στην εκτονωτική διάταξη. Όμως, από την άλλη, η πίεση στον συμπυκνωτή δεν πρέπει να είναι μικρότερη από αυτήν του περιβάλλοντος, διότι υπάρχει ο κίνδυνος εισόδου αέρα στην εγκατάσταση. Επιπλέον, όσο μειώνεται η χαμηλή πίεση τόσο μειώνεται και η θερμοκρασία συμπύκνωσης, η οποία όταν βρίσκεται πολύ κοντά στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος δυσχεραίνει τη μεταφορά θερμότητας, γι' αυτό και είναι καλό να υπάρχει μια θερμοκρασιακή διαφορά τουλάχιστον 20C μεταξύ της θερμοκρασίας συμπύκνωσης και θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

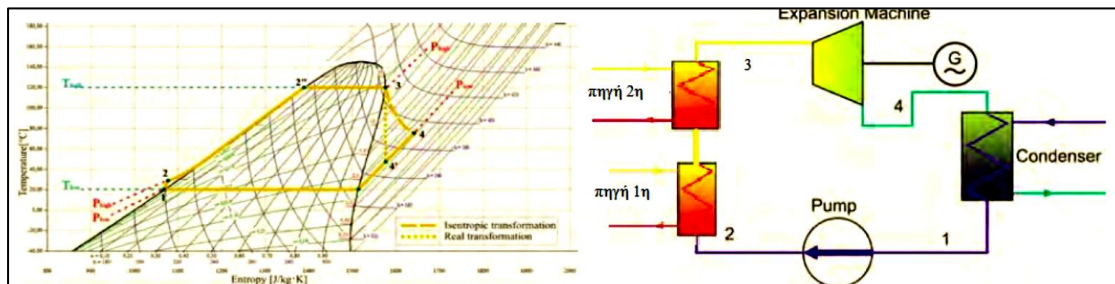
Εκτός από την απλή εγκατάσταση του ORC είναι διαθέσιμοι και όλοι τύποι εγκαταστάσεων, όπως η μη κρίσιμη απλή εγκατάσταση με αναγεννητή (Εικόνα 2.7), η εγκατάσταση με υπερκρίσιμο εξατμιστή (Εικόνα 2.8) και η εγκατάσταση ORC με αξιοποίηση δύο διαφορετικών πηγών θερμότητας (Εικόνα 2.9).[8][10][14][15]



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα T- s και εγκατάσταση απλού ORC με αναγεννητή [11]



Εικόνα 2.8: Διάγραμμα T- s και εγκατάσταση υπερκρίσιμου ORC [11]



Εικόνα 2.9: Διάγραμμα T- s και εγκατάσταση ORC με δύο πηγές θερμότητας [11]

2.3.2 Επιλογή Εργαζόμενου Μέσου

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στη χρήση ενός οργανικού κύκλου Rankine είναι η σωστή επιλογή εργαζόμενου μέσου για να επιτευχθεί ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του κύκλου. Παρόλα αυτά όμως, τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά δεν είναι τα μόνα που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας. Το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, μία διεθνής συνθήκη για την προστασία του στρώματος του όζοντος, και η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2037/2000 απαγορεύουν τη χρήση ουσιών που καταστρέφουν το όζον και επιδεινώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου αποτελεί τον παράγοντα “κλειδί” που επηρεάζει άμεσα τη λειτουργία και την απόδοση του συστήματος. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία οργανικών μέσων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές παραγωγής ισχύος του κύκλου Rankine. Τα προβλήματα ασφάλειας, διαθεσιμότητας και κόστους μειώνουν σημαντικά τον αριθμό των υποψηφίων οργανικών μέσων. Οι κυριότεροι παράγοντες στους οποίους βασίζεται η επιλογή του εργαζόμενου μέσου είναι οι ακόλουθοι :

i) Η θερμοκρασία του κρίσιμου σημείου, δεδομένου ότι το εξεταζόμενο σύστημα είναι ένας υποκρίσιμος κύκλος Rankine, δηλαδή το εργαζόμενο μέσο διαπερνά την διφασική περιοχή κατά τη μετάβασή του από την υγρή στην αέρια φάση. Οι πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας απαιτούν χαμηλές τιμές της κρίσιμης θερμοκρασίας. Ωστόσο, η μεγιστοποίηση του θερμοδυναμικού βαθμού απόδοσης του κύκλου απαιτεί υψηλή κρίσιμη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου και χαμηλή πίεση της κατώτερης πίεσης P_{low} λειτουργίας του κύκλου. Όμως αυτό εξαρτάται από τον σχεδιασμό της εγκατάστασης και συγκεκριμένα από το μέγεθος του εκτονωτή.

ii) Η πολυπλοκότητα της μοριακής δομής του οργανικού μέσου. Τα εργαζόμενα μέσα απλής μοριακής δομής είναι παρόμοια με το νερό ως προς τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες. Τα καταλληλότερα οργανικά μέσα για εφαρμογές παραγωγής ισχύος παρουσιάζουν πιο σύνθετη μοριακή δομή συγκριτικά με το νερό. Στην εικόνα 2.15 φαίνεται η μοριακή δομή του νερού και οργανικών ρευστών.

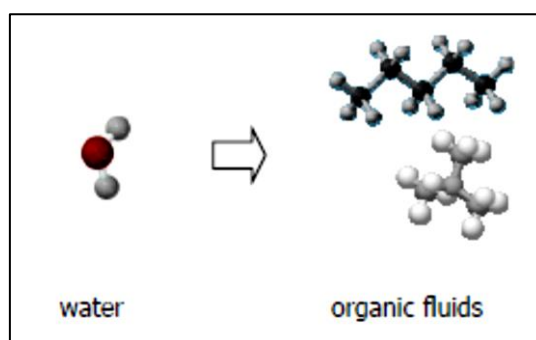
iii) Το μοριακό βάρος του εργαζόμενου μέσου επηρεάζει τη λειτουργία του εκτονωτή. Συγκεκριμένα, οι στρόβιλοι – εκτονωτές έχουν χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και μικρό αριθμό βαθμίδων, όταν χρησιμοποιούν εργαζόμενα μέσα μεγάλου μοριακού βάρους.

iv) Η ευφλεκτότητα και η τοξικότητα του υποψηφίου εργαζόμενου μέσου είναι σημαντικοί παράμετροι, που καθορίζουν την ασφάλεια της χρήσης αυτού στον κύκλο Rankine.

v) Η θερμική και χημική σταθερότητα του υποψηφίου εργαζόμενου μέσου του κύκλου Rankine.

vi) Η περιβαλλοντική επιβάρυνση λόγω της χρήσης του εργαζόμενου μέσου στην εφαρμογή του κύκλου Rankine.

vii) Η διαθεσιμότητα και χαμηλό κόστος.



Εικόνα 2.10: Μοριακή δομή νερού και οργανικού ρευστού [29]

Στη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη χρήση των οργανικών μέσων αποτελούν μείζον ζήτημα για την βιομηχανία ψύξης και κλιματισμού. Η καταστροφική επίδραση κάποιων εργαζόμενων μέσων στο προστατευτικό στρώμα του όζοντος οδήγησε στην αναζήτηση νέων λιγότερο βλαβερών ουσιών. Ωστόσο, στη συνέχεια διαπιστώθηκε ότι μερικά από τα οργανικά μέσα συμβάλλουν στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και κατά συνέπεια στην παγκόσμια υπερθέρμανση του πλανήτη. Έτσι, η περιβαλλοντική συμπεριφορά των οργανικών μέσων προσδιορίζεται από το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ και Κιότο, που θεσπίστηκαν για την προστασία του στρώματος του όζοντος και την αποτροπή των κλιματικών αλλαγών αντίστοιχα. Οι επιπτώσεις των εργαζόμενων μέσων στο περιβάλλον καθορίζονται από τα μεγέθη GWP και ODP, τα οποία αντιστοιχούν στο δυναμικό όξυνσης του φαινομένου του θερμοκηπίου και στην ικανότητα μείωσης του όζοντος. [Χαρίτος, 23]

Η ικανότητα μείωσης του όζοντος ODP για το εργαζόμενο μέσο του κύκλου Rankine είναι η δυνατότητα ενός μεμονωμένου μορίου του μέσου να καταστρέφει το στρώμα του όζοντος στην ατμόσφαιρα. Σημείο αναφοράς για όλα τα μέσα αποτελεί το οργανικό μέσο R11, όπου ο συντελεστής ODP ισούται με την μονάδα. Το φιλικότερο εργαζόμενο μέσο ως προς την επίδραση του στο ατμοσφαιρικό στρώμα του όζοντος είναι εκείνο με τη χαμηλότερη τιμή του συντελεστή ODP.

Το δυναμικό υπερθέρμανσης ή όξυνσης του φαινομένου του θερμοκηπίου GWP είναι ο δείκτης μέτρησης των επιπτώσεων ενός συγκεκριμένου εργαζόμενου μέσου στην υπερθέρμανση του πλανήτη συγκρινόμενο με το CO₂, όπου ο συντελεστής ισούται με την μονάδα. Ο δείκτης GWP μετριέται σε χρονική περίοδο εκατονταετίας. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη GWP για ένα οργανικό μέσο τόσο φιλικότερο είναι το μέσο αυτό για το περιβάλλον.

Στον Πίνακα 2.1 δίνονται τα χαρακτηριστικά ορισμένων οργανικών ρευστών:

Πίνακας 2.1: Θερμοδυναμικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά διαφόρων οργανικών ρευστών [24]

ρευστό	T _c (°C)	p _c (bar)	σημείο ζέσης (°C)	GWP	ODP
R143a	72,73	37,64	- 47,60	μέσο	όχι
R134a	101,10	40,60	- 26,10	μέσο	όχι
R227ea	101,70	29,30	- 16,50	υψηλό	όχι
R236fa	124,90	32,00	- 1,40	υψηλό	όχι
R236ea	139,00	35,00	-	μέσο	όχι
R245fa	154,10	36,40	15,10	μέσο	όχι
R123	184,00	36,60	27,80	πολύ χαμηλό	πολύ χαμηλό
R601	196,50	33,70	37,00	-	-
R113	214,10	33,90	47,60	υψηλό	υψηλό
Ισοβουτάνιο	134,66	36,23	-159.6	μέσο	όχι
Πεντάνιο	196,6	33,7	36,1	μέσο	όχι
Τολουένιο	318	41,26	-93	μέσο	όχι

Στον Πίνακα 2.1 τα μεγέθη GWP (Global Warming Potential) και ODP (Ozone Depletion Potential) αναφέρονται στο ποσοστό συνεισφοράς του ρευστού στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στο ποσοστό της υποβάθμισης που μπορούν να προκαλέσουν στο στρώμα του όζοντος, αντίστοιχα.

Επίσης, ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό των οργανικών μέσων είναι η κατηγοριοποίηση ασφάλειας. Μετά από πολύ προσεκτική ανάλυση η ASHRAE ταξινόμησε τα οργανικά ρευστά σύμφωνα της τοξικότητας τους και της ικανότητας ανάφλεξης.

Όσον αφορά την τοξικότητα, η ταξινόμηση γίνεται σε δύο κατηγορίας, Α και Β, η οποία βασίζεται στην επιτρεπτή έκθεση. Στην Κατηγορία Α, όπου το OEL (Occupational Exposure Limit) είναι ίσο ή μεγαλύτερο από 400ppm. Ενώ στην

Κατηγορία Β, το OEL είναι μικρότερο από 400ppm. Το OEL είναι ο μέσος σταθμικός χρόνος συγκέντρωσης κοντά σε όλους στους εργαζόμενους, οι οποίοι εργάζονται υπό κανονικές συνθήκες σε οκτάωρη και σαραντάωρη εβδομαδιαία εργασία, και μπορούν να εκτεθούν επανειλημμένα χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις. Βασίζεται στο PEL (Permissible Exposure Limit, επιτρεπόμενο όριο έκθεσης), TLV-TWA (Threshold Limit Value, κατώφλι οριακής τιμής, είναι η μέγιστη έκθεση σε οποιαδήποτε τιμή) (Time-Weighted Average, μέσος σταθμικός χρόνος) ή σχετικές τιμές.

Η αναφλεξιμότητα είναι ένας δείκτης που επιτρέπει την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών ανάφλεξης των ρευστών. Διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες. Στην Κατηγορία 1, είναι τα μη εύφλεκτα, στα οποία δεν παρατηρείται ανάφλεξη σε οποιαδήποτε συγκέντρωση με αέρα θερμοκρασίας 21°C και 1,01bar. Στην Κατηγορία 2, είναι ελεγχόμενα εύφλεκτα, με χαμηλότερο όριο ανάφλεξης μεγαλύτερο από 0,1kg/m³ σε θερμοκρασία 21°C και πίεση 1,01bar, καθώς και θερμότητα καύσης μικρότερη από 19MJ/kg. Στην Κατηγορία 2 όταν η ταχύτητα της καύσης είναι μικρότερη από 10cm/s τότε αυτή χαρακτηρίζεται 2L. Τέλος, στην Κατηγορία 3, είναι τα ιδιαίτερα εύφλεκτα ρευστά, όπου σε συνθήκες θερμοκρασίας 21°C και πίεσης 1,01bar το όριο ανάφλεξης είναι μικρότερο από 0,1kg/m³ και η θερμότητα καύσης μεγαλύτερη από 19MJ/kg. Στον Πίνακα 2.2 φαίνεται η κατηγοριοποίηση ασφάλειας κατά ASHRAE 34.

Πίνακας 2.2: Κατηγορίες ασφάλειας ASHRAE 34 [24]

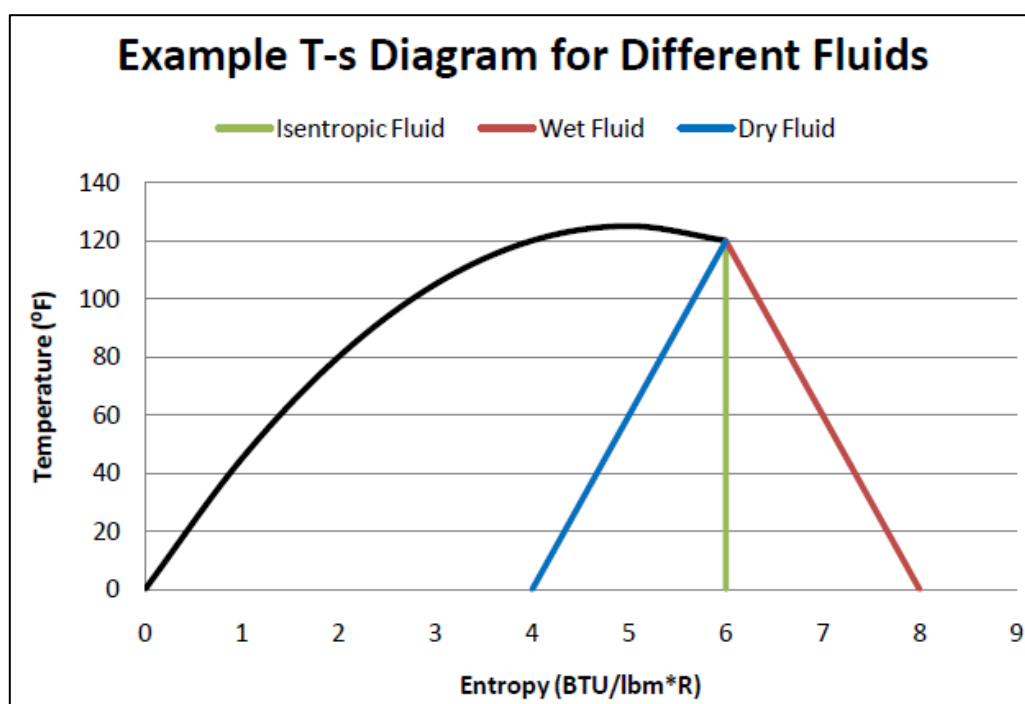
Αναφλεξιμότητα @ 60°C & 101.3 kPa	ASHRAE 34 κατηγορίες ασφάλειας	
Υψηλή αναφλεξιμότητα LFL OR ETFL ₆₀ ≤ 100g/m ³ OR HOC ≥ 19MJ/kg	A3	B3
Χαμηλή αναφλεξιμότητα LFL OR ETFL ₆₀ > 100g/m ³ & HOC < 19MJ/kg	A2	B2
Χαμηλή αναφλεξιμότητα LFL OR ETFL ₆₀ > 100 g/m ³ & HOC < 19MJ/kg	A2L	B2L
Με μέγιστη ταχύτητα φλόγας ≤ 10 cm/s		
Μη μετάδοση φλόγας	A1	B1
	Χαμηλή τοξικότητα OEL ≥ 400 ppm	Υψηλή τοξικότητα OEL < 400 ppm

*LFL = Lower Flammability Limit, HOC = Heat Of Combustion,
ETFL₆₀ = Elevated Temperature Flame Limit @ 60°C, OEL = Occupational Exposure Limit*

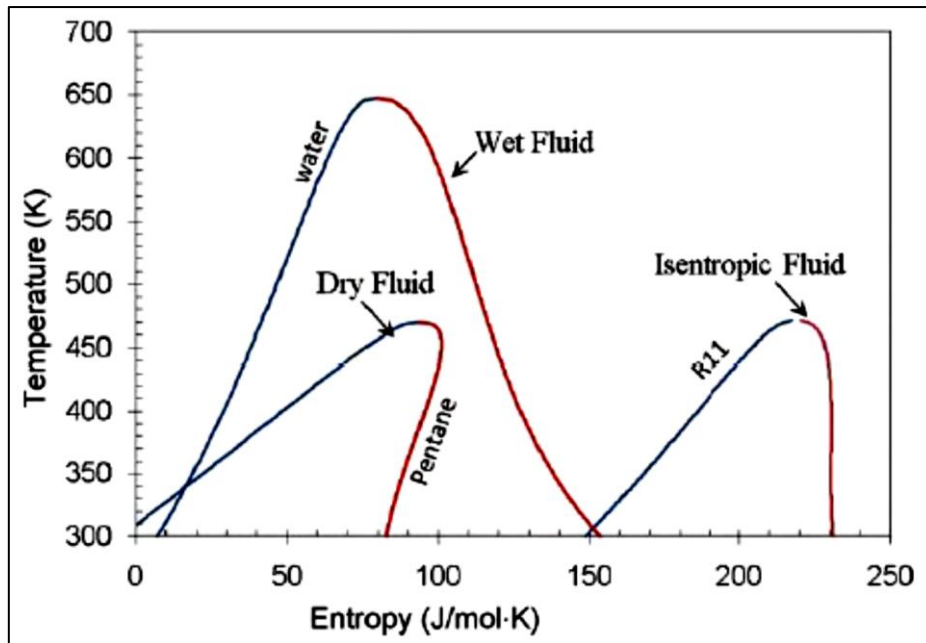
Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι τα οργανικά μέσα μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τη χημική τους σύνθεση στις ακόλουθες γενικές ομάδες:

- 1) Στους χλωροφθοράνθρακες (CFCs) και υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs), που κρίνονται ως ακατάλληλοι για την χρήση τους στο σύστημα του κύκλου Rankine εξαιτίας της παρουσίας του χλωρίου στη σύνθεσή τους.
- 2) Στους αρωματικούς υδρογονάνθρακες, που παρουσιάζουν πολύ καλές θερμικές ιδιότητες αλλά είναι ιδιαίτερα εύφλεκτοι, όπως τουλένιο, βουτάνιο και πεντάνιο.
- 3) Στους υδροφθοράνθρακες (HFCs), οι οποίοι είναι εξαιρετικά αδρανείς και σταθεροί αλλά παρουσιάζουν μοριακή πολυπλοκότητα.

Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης των εργαζόμενων μέσων γίνεται με βάση την καμπύλη κορεσμένου ατμού. Συγκεκριμένα, το εργαζόμενο μέσο χαρακτηρίζεται «ξηρό» ή «υγρό» όταν η τιμή της παραγώγου dT/ds είναι θετική ή αρνητική αντίστοιχα. Στην περίπτωση που η κλίση dT/ds είναι άπειρη, τότε το εργαζόμενο μέσο αποκαλείται «ισεντροπικό» (Εικόνα 2.11, Εικόνα 2.12). Τα «υγρά» εργαζόμενα μέσα είναι παρόμοια με το νερό, όπου η εκτόνωση από την κατάσταση κορεσμένου ατμού οδηγεί στην συμπύκνωση του μέσου. Αντιθέτως, στα ξηρά και ισεντροπικά μέσα οποιαδήποτε εκτόνωση κορεσμένου ατμού οδηγεί σε υπέρθερμο ατμό.

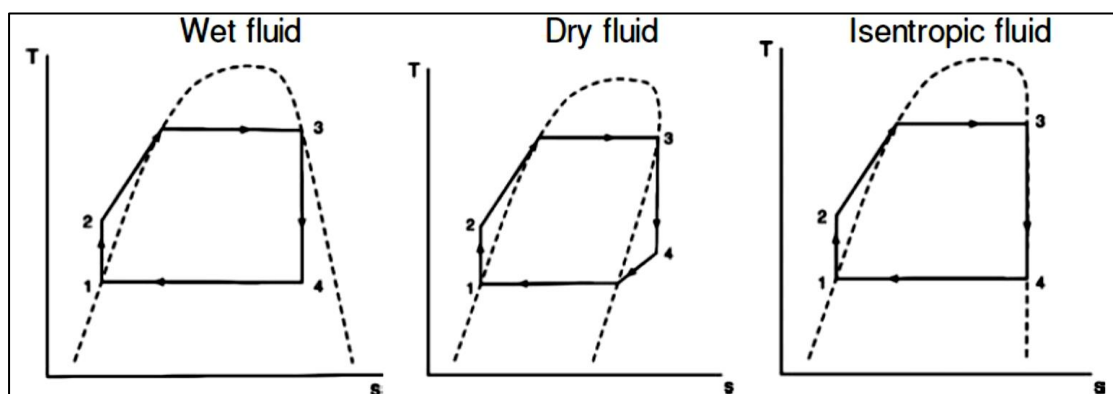


Εικόνα 2.11: Σχηματική παράσταση ρευστών ανάλογα με την κλίση dT/ds [29]



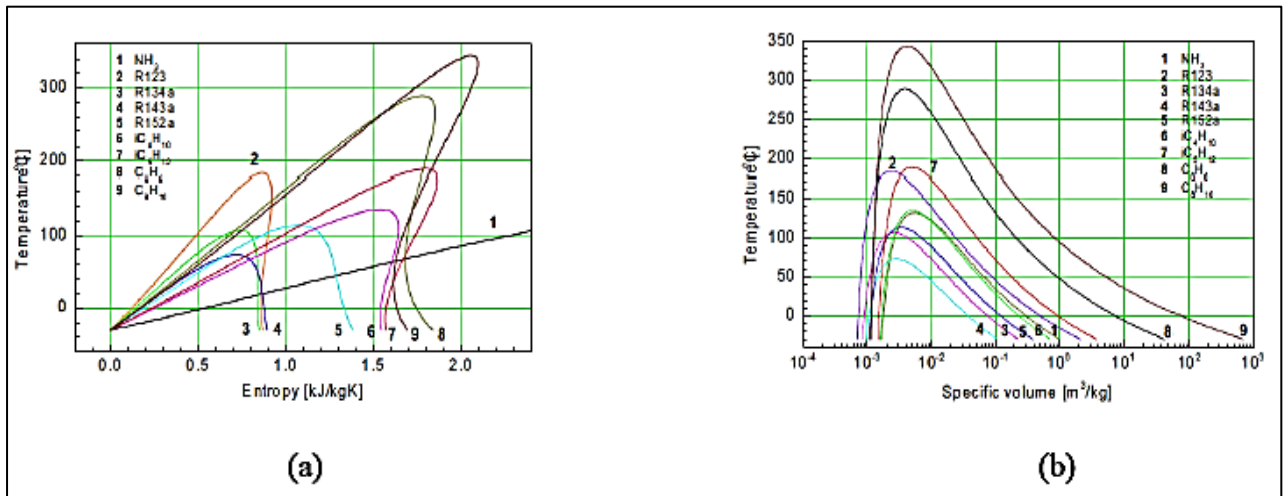
Εικόνα 2.12: Οι “καμπάνες” για τρία ρευστά το νερό, το πεντάνιο και το R11 [29]

Η προηγούμενη επισήμανση είναι σημαντική για την επιλογή του είδους του εκτονωτή στον κύκλο Rankine. Έτσι, τα «υγρά» μέσα είναι ακατάλληλα στον στρόβιλο-εκτονωτή, όταν η εκτόνωση αρχίζει από την κατάσταση του κορεσμένου ατμού, διότι εμφανίζονται συμπυκνώματα στα πτερύγια του κυρίως στο τέλος της εκτόνωσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.13. Ακόμα πρέπει να προστεθεί ότι στην περίπτωση που δεν πραγματοποιείται υπερθέρμανση και χρησιμοποιείται ξηρό ρευστό, στο τέλος της εκτόνωσης υπάρχει ακόμα διαθέσιμη θερμότητα από τον υπέρθερμο ατμό που κάνει εφικτή τη χρήση αναγεννητή θερμότητας.

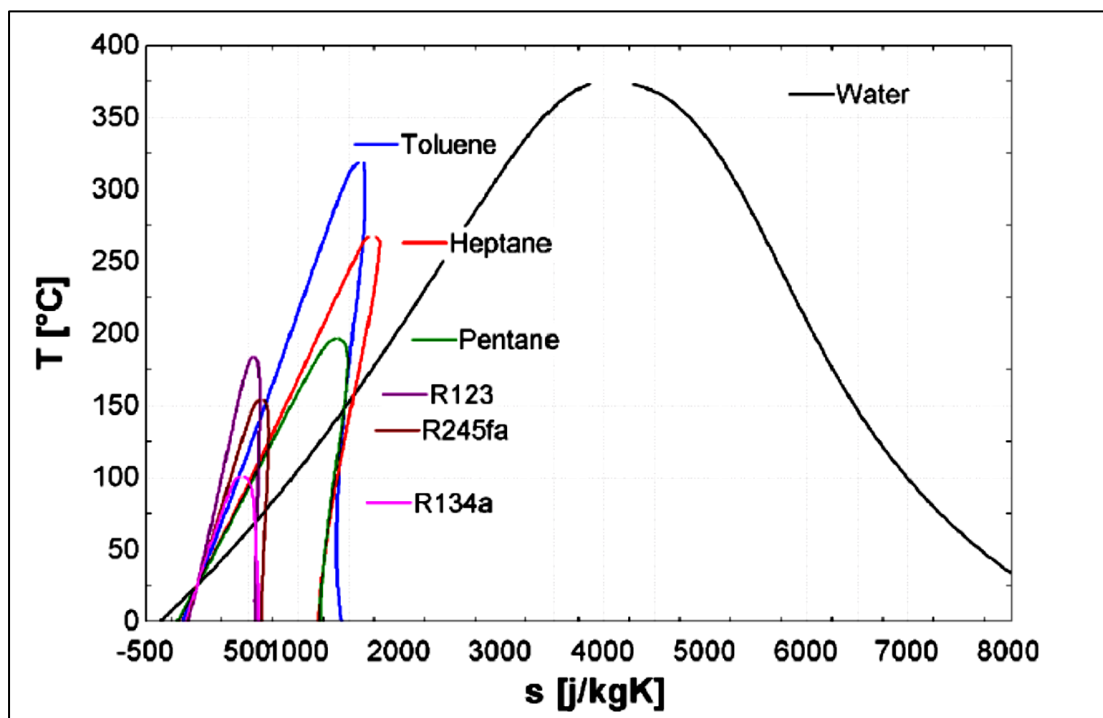


Εικόνα 2.13: Επίδραση της γραμμής κορεσμένου ατμού κατά την φάση της εκτόνωσης [24]

Στις Εικόνες 2.14 και 2.15, γίνεται σύγκριση διαφόρων ρευστών σε διάγραμμα T-s.

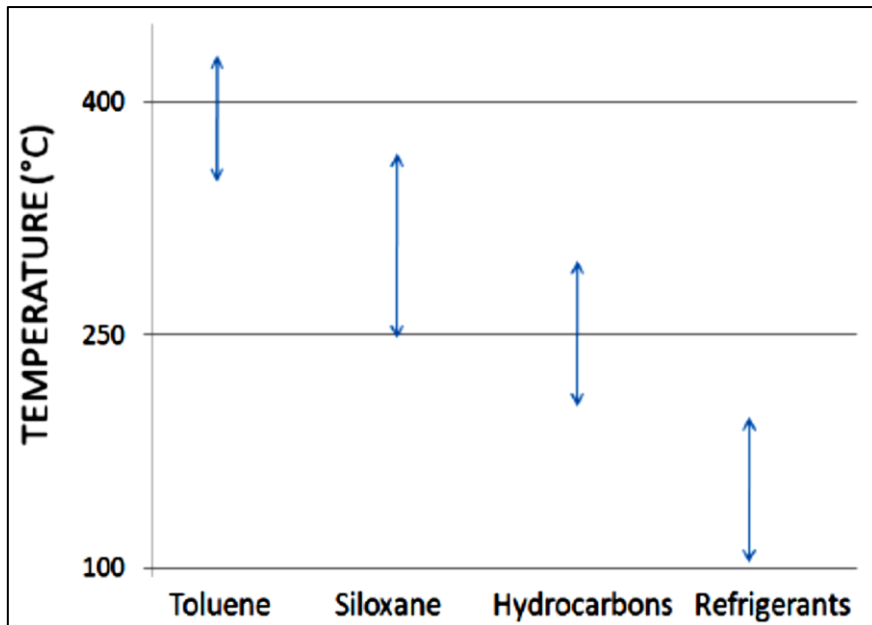


Εικόνα 2.14: (α) σύγκριση διάφορων ρευστών σε διάγραμμα T-s (β) και σε διάγραμμα T-v [23]



Εικόνα 2.15: Σύγκριση διάφορων μέσων με το νερό [24]

Στην Εικόνα 2.16 απεικονίζονται τα θερμοκρασιακά πεδία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα οργανικά μέσα.



Εικόνα 2.16: Θερμοκρασιακές περιοχές χρησιμοποίησης οργανικών εργαζόμενων μέσων [23]

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η επιλογή του οργανικού μέσου και ο σχεδιασμός συστήματος ORC είναι μια πολύ δύσκολη υπόθεση, η οποία εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες. Έτσι θα πρέπει να συνεξεταστούν πολλές ιδιότητες, μερικές από αυτές φαίνονται στον Πίνακα 2.3, προτού γίνει η επιλογή του μέσου και του συστήματος.

Πίνακας 2.3: Ιδιότητες για την επιλογή του οργανικού μέσου και το σχεδιασμό του συστήματος ORC [29]

Θερμοδυναμικές	Περιβαλλοντικές	Ασφάλειας	Διεργασίας
πυκνότητα	ODP	τοξικότητα	λόγος πιέσεων
ενθαλπία εξάτμισης	GWP	αναφλεξιμότητα	κρίσιμη πίεση
ιξώδες			παροχή μάζας
θερμική αγωγιμότητα			θερμότητα συμπίκνωσης
κρίσιμη θερμοκρασία			

Τέλος, συγκρίνοντας τους κύκλους Rankine με ατμό και οργανικό μέσο μπορούμε να πούμε ότι το μεγαλύτερο μειονέκτημα που παρουσιάζει ο ORC είναι η μικρή μετατροπή ενέργειας (10~20%), η οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο στην χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Τα κυριότερα πλεονέκτημα του ORC σε σχέση με τον κύκλο Rankine με ατμό είναι:

- 1) Μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας (100~450 °C)
- 2) Εύκολη εγκατάσταση, εύκολη λειτουργία και πολύ ευπροσάρμοστο

- 3) Προϋποθέτει μικρή συντήρηση
- 4) Μικρές μονάδες μπορούν να προσαρμοστούν σε διάφορες θερμικές πηγές
- 5) Έχουν εύρος από μερικά kWe μέχρι αρκετά MWe. Για παραγωγή μικρότερη των 2MW η παραγωγή με ατμό δεν υιοθετείται. Στην πράξη, το λειτουργικό και κατασκευαστικό κόστος για την εγκατάσταση του εργοστασίου παραγωγής ενέργειας με ατμό είναι μεγαλύτερο και η απόδοση μικρότερη. [23][29]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ψυκτικός κύκλος

3.1 Εισαγωγή

Ο απλούστερος τρόπος παραγωγής ψύξης είναι η εξάτμιση ή η ατμοποίηση ενός ψυκτικού υγρού. Σε μια στοιχειώδη συσκευή παραγωγή ψύχους, το πτητικό υγρό εξατμίζεται απορροφώντας θερμότητα αρχικά από την ίδια τη μάζα του, έως ότου η θερμοκρασία του μειωθεί και γίνει ίση με τη θερμοκρασία ατμοποίησής του. Στη συνέχεια απορροφά θερμότητα από τον περιβάλλοντα χώρο, ο οποίος ψύχεται.

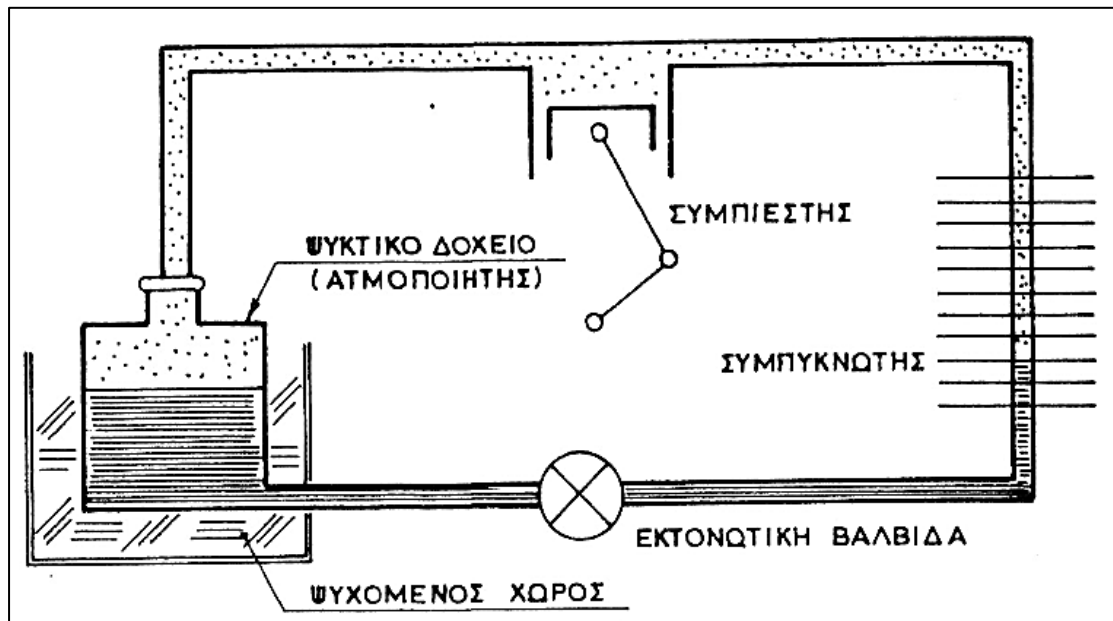


Εικόνα 3.1: Συσκευή παραγωγής ψύχους ανοικτού δοχείου [3]

Η θερμοκρασία ατμοποίησης ενός υγρού εξαρτάται, ως γνωστόν από τη Μηχανική των Ρευστών, από την πίεση των ατμών του. Στην περίπτωση του ανωτέρω παραδείγματος, αν υποθέσουμε ότι η επικρατούσα πίεση στον περιβάλλοντα χώρο είναι η ατμοσφαιρική, η θερμοκρασία του πτητικού υγρού θα μειωθεί έως τη θερμοκρασία ατμοποίησής του που αντιστοιχεί στην ατμοσφαιρική πίεση.

Η ψυκτική συσκευή που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι απλή και φτηνή στην κατασκευή της, όμως πολύ δαπανηρή στη λειτουργία της, αφού απαιτούνται τεράστιες ποσότητες ψυκτικού μέσου. Για το λόγο αυτό έχουν επινοηθεί συσκευές συνθετότερες στις οποίες το δοχείο του ψυκτικού υγρού δεν επικοινωνεί με το περιβάλλον και, επομένως, το ψυκτικό μέσο δε χάνεται. Οι συσκευές αυτές συλλέγουν τους ατμούς του ψυκτικού μέσου, τους

συμπυκνώνουν σε υγρή φάση και τους επαναφέρουν στο δοχείο εξάτμισης στην αρχική τους κατάσταση.



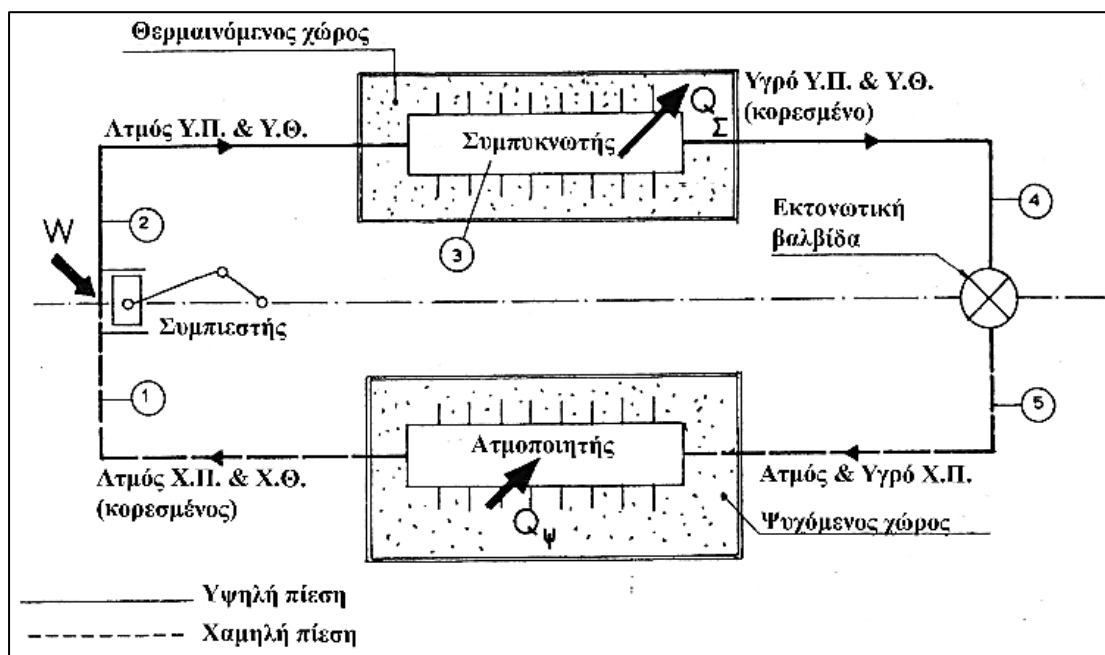
Εικόνα 3.2: Συσκευή παραγωγής ψύχους με κλειστό κύκλωμα ψυκτικού μέσου [30]

Για την ψύξη και τη συμπύκνωση των ατμών του ψυκτικού μέσου πρέπει να υπάρχει ένα άλλο σώμα ή ρεύμα χαμηλότερης θερμοκρασίας, που ερχόμενο σε επαφή με αυτούς να τους ψύχει. Καθώς επιδιώκεται ως ψυχρό μέσο να χρησιμοποιείται το περιβάλλον, πρέπει η θερμοκρασία συμπύκνωσης των ατμών να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για να είναι δυνατή η ψύξη, οι ατμοί οδηγούνται αρχικά σε συμπιεστή, όπου συμπιέζονται ώστε να ανεβεί η θερμοκρασία τους πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Οι ατμοί, μετά τη συμπίεσή τους, οδηγούνται σε εναλλάκτη θερμότητας που ονομάζεται «στοιχείο συμπύκνωσης» ή «συμπυκνωτής». Εκεί ψύχονται από τον αέρα του περιβάλλοντος, ή από νερό και συμπυκνώνονται σε υγρό. Η υγρή φάση που προκύπτει μετά τη συμπύκνωση βρίσκεται σε πολύ ψηλότερη πίεση από την πίεση του δοχείου ατμοποίησης. Γι' αυτό το υγρό οδηγείται σε εκτονωτική συσκευή όπου εκτονώνεται (στραγγαλίζεται) και μειώνεται η πίεσή του ώστε να μπορεί να ατμοποιηθεί. Τέλος, οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας που ονομάζεται «στοιχείο ατμοποίησης» ή «ατμοποιητής», όπου ατμοποιείται. Ο κύκλος ψύξης επαναλαμβάνεται συνεχώς.

3.2 Περιγραφή βασικής ψυκτικής διάταξης

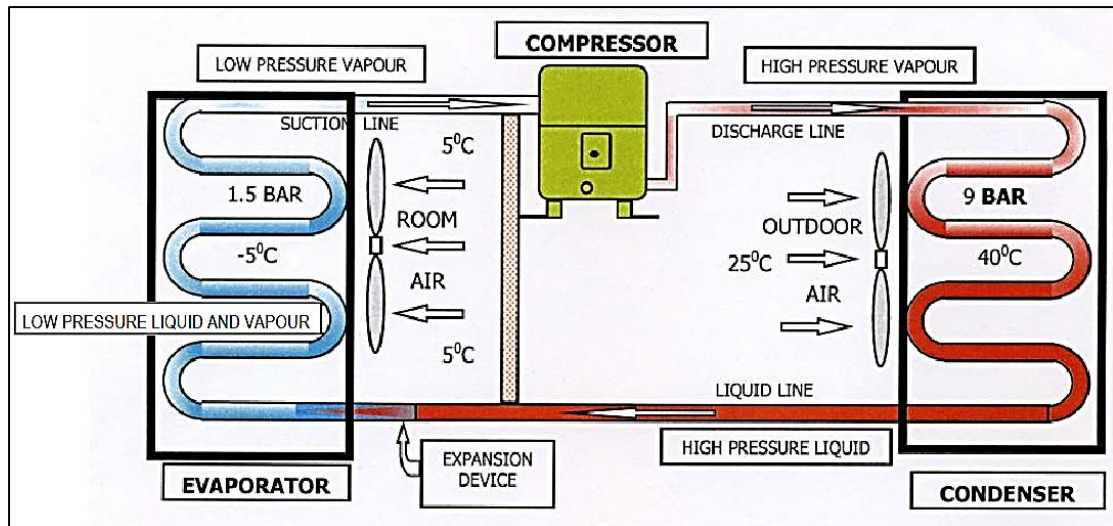
Με βάση τα προαναφερόμενα, μια ψυκτική διάταξη πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα μέρη:



Εικόνα 3.3: Βασική περιγραφή ψυκτικής διάταξης [30]

Συνεπώς, μια ψυκτική διάταξη αποτελείται από:

- μηχανικό συμπιεστή (εμβολοφόρο ή περιστροφικό)
- συμπυκνωτή (εναλλάκτη θερμότητας αερόψυκτο ή υδρόψυκτο)
- διάταξη εκτόνωσης ή στραγγαλισμού (τριχοειδή σωλήνα ή βαλβίδα)
- ατμοποιητή (εναλλάκτη θερμότητας)
- διατάξεις αυτόματης λειτουργίας και ασφάλειας και άλλα λειτουργικά όργανα.



Εικόνα 3.4: Παράδειγμα εφαρμογής βασικού κυκλώματος συμπίεσης ατμών σε μια κλιματιστική μονάδα [30]

3.2.1 Ροή ψυκτικού μέσου σε ψυκτική συσκευή

- *Συμπίεση:*

Το ψυκτικό μέσο σε κατάσταση ξηρού κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης απορροφάται από το συμπιεστή (σημείο 1). Μετά τη συμπίεση ο ατμός εξέρχεται από το συμπιεστή σε αέρια φάση υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (σημείο 2).

- *Συμπύκνωση:*

Ο ατμός κατάστασης 2 εισάγεται στο συμπυκνωτή. Στο σημείο 3 αρχίζει η συμπύκνωση που τελειώνει στο σημείο 4, οπότε όλο το ψυκτικό μέσο έχει μετατραπεί σε κορεσμένο υγρό. Ο συμπυκνωτής είναι εναλλάκτης θερμότητας αερόψυκτος ή υδρόψυκτος. Στο συμπυκνωτή το ψυκτικό μέσο ψύχεται αποβάλλοντας τη θερμότητα Q_S . Θεωρητικά η ψύξη $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ είναι ισοβαρής με σταθερή πίεση συμπύκνωσης P_S , την πίεση εξόδου από το συμπιεστή.

- *Εκτόνωση:*

Το ψυκτικό υγρό εισάγεται στη διάταξη εκτονώσεως ή στραγγαλισμού στο σημείο 4 και εξάγεται από αυτή, μετά την εκτόνωση (σημείο 5), σε κατάσταση διμερούς φάσης (υπερτερεί η υγρή φάση) και χαμηλής πίεσης.

- *Ατμοποίηση:*

Το ψυκτικό μέσο εισάγεται στον ατμοποιητή (σημείο 5). Απορροφά θερμότητα από το περιβάλλον του ατμοποιητή, ατμοποιείται και εξέρχεται από αυτόν σε κατάσταση ψυχρού κορεσμένου ατμού χαμηλής πίεσης (σημείο 1). Η θερμότητα που αναρροφάται από το ψυκτικό μέσο στον ατμοποιητή είναι η

θερμότητα ατμοποίησης Q_{ψ} . Θεωρητικά η θέρμανση του ψυκτικού μέσου 5→1 είναι ισοβαρής μεταβολή με πίεση P_{α} . [16][26]

3.2.2 Έργο και θερμότητα στον ψυκτικό κύκλο

Κατά την ατμοποίηση γίνεται απορρόφηση θερμότητας Q_{ψ} από το χώρο που περιβάλλει τον ατμοποιητή, ο οποίος και ψύχεται. Κατά τη συμπύκνωση αποβάλλεται θερμότητα Q_{Σ} στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα ο χώρος που περιβάλλει το συμπυκνωτή να θερμαίνεται. Συνεπώς, η ψυκτική διάταξη λειτουργεί σαν αντλία θερμότητας που αφαιρεί θερμότητα από ένα χώρο που είναι επιθυμητή η ψύξη (χώρος γύρω από τον ατμοποιητή) και την αποβάλλει σε ένα άλλο χώρο όπου είναι αδιάφορο το ότι θερμαίνεται (περιβάλλον συμπυκνωτή).

Τα ποσά θερμότητας Q_{ψ} και Q_{Σ} δεν είναι ίσα διότι υπάρχει και η ενέργεια που καταναλώνεται στο συμπιεστή.

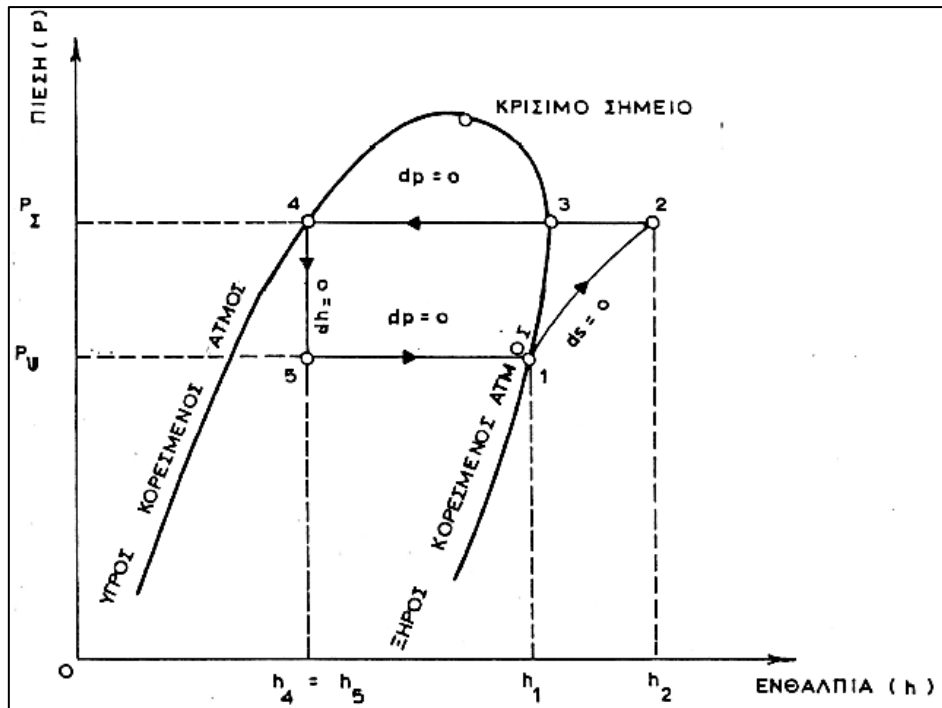
Θεωρητικά ισχύει η σχέση:

$$Q_{\Sigma th} = Q_{\psi th} + W_{th} \quad (3.1)$$

όπου W_{th} η ενέργεια που καταναλώνει ο συμπιεστής.

3.2.3 Θερμοδυναμική προσέγγιση βασικού ψυκτικού κύκλου

Ο ψυκτικός κύκλος με μηχανική συμπίεση ατμού αναπαρίσταται γραφικά σε διάγραμμα πίεσης – ενθαλπίας του ψυκτικού μέσου που χρησιμοποιείται. Για τη σχεδίαση του διαγράμματος αυτού θεωρείται ότι ο ατμός του ψυκτικού μέσου στην είσοδο του συμπιεστή (σημείο 1) είναι σε κατάσταση κορεσμού και ότι η υγρή φάση στην είσοδο της εκτονωτικής βαλβίδας (σημείο 4) βρίσκεται επίσης σε κατάσταση κορεσμού.



Εικόνα 3.5: Βασικός ψυκτικός κύκλος σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας [4]

Μεταβολή 1→2:

Παριστάνει τη συμπίεση από το συμπιεστή (ισεντροπική μεταβολή $ds=0$). Η μηχανική ισχύς που θεωρητικά καταναλώνεται από το συμπιεστή είναι ίση με:

$$\dot{W}_{th} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (3.2)$$

όπου \dot{m} η παροχή μάζας του ψυκτικού μέσου που κυκλοφορεί στην ψυκτική διάταξη

Μεταβολή 2→3→4:

Παριστάνει την ψύξη του ψυκτικού μέσου στο συμπυκνωτή μέχρι την πλήρη υγροποίησή του. Η μεταβολή γίνεται με σταθερή πίεση ($dP_{\Sigma}=0$) συμπύκνωσης (ισοβαρής μεταβολή). Η αποβαλλόμενη θερμική ισχύς στο περιβάλλον θεωρητικά είναι ίση με:

$$\dot{Q}_{\Sigma th} = \dot{m}(h_2 - h_4) \quad (3.3)$$

Μεταβολή 4→5:

Παριστάνει τον ισενθαλπικό στραγγαλισμό ($dh=0$). Η θεωρητική καταναλισκόμενη μηχανική ισχύς

$$\dot{W}_{th} = \dot{m}(h_5 - h_4) \quad (3.4)$$

ισούται με 0, γιατί $h_5=h_4$.

Μεταβολή 5→1:

Παριστάνει την πλήρη ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου. Θεωρητικά η μεταβολή γίνεται υπό σταθερή πίεση ($dP_{\psi}=0$). Η απορροφούμενη θερμική ισχύς από το περιβάλλον του ατμοποιητή, δηλαδή η ψυκτική ισχύς της εγκατάστασης, είναι ίση με:

$$\dot{Q}_{\psi th} = \dot{m}(h_1 - h_5) \quad (3.5)$$

Η διαφορά των ενθαλπών $q=h_1-h_5=h_1-h_4$ ονομάζεται «ψυκτική ικανότητα» και είναι ίση με την ψυκτική ισχύ της εγκατάστασης ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου.

Από τις ανωτέρω σχέσεις είναι προφανής ο ενεργειακός ισολογισμός:

$$\dot{Q}_{\Sigma th} = \dot{Q}_{\psi th} + \dot{W}_{th} \quad (3.6)$$

Συντελεστής συμπεριφοράς

Η απόδοση μιας ψυκτικής συσκευής εκφράζεται μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς (Coefficient of Performance – C.O.P.). Ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς ορίζεται από τη σχέση:

$$C.O.P._{th} = \frac{\dot{Q}_{\psi th}}{\dot{W}_{th}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (3.7)$$

Ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς είναι πολύ σημαντικό μέγεθος στις ψυκτικές διατάξεις, αφού εκφράζει την απόδοση της μηχανής και, συνεπώς, την κατανάλωση ισχύος ανά μονάδα παραγόμενης ψυκτικής ισχύος.

Αντίστοιχα με το θεωρητικό συντελεστή συμπεριφοράς ορίζεται και ο πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς C.O.P. ως το πηλίκο της πραγματικής αποδιδόμενης ψυκτικής ισχύος προς την πραγματική κατανάλωση μηχανικής ισχύος. Ο πραγματικός C.O.P. είναι αρκετά μικρότερος σε σχέση με το θεωρητικό C.O.P._{th}

3.3 Ψυκτικά μέσα

Η βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ψυκτικών εγκαταστάσεων επιβάλλει τη χρησιμοποίηση σε κάθε περίπτωση ψυκτικών μέσων ειδικών ιδιοτήτων. Συνέπεια τούτου είναι η χρήση πλήθους διαφορετικών ψυκτικών μέσων. Δεν υπάρχουν ιδανικά ψυκτικά μέσα που να πληρούν όλες τις απαιτήσεις. Γι' αυτό, σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να γίνεται εκλογή του καταλληλότερου ψυκτικού μέσου.

Τα ψυκτικά μέσα θα πρέπει να έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- ✓ Να παρουσιάζουν χημική ευστάθεια και να μην αλλοιώνονται στις πιέσεις και στις θερμοκρασίες που χρησιμοποιούνται.
- ✓ Να μην προσβάλλουν τα μεταλλικά ή μη μεταλλικά υλικά της ψυκτικής εγκατάστασης, καθώς και τα λιπαντικά λάδια, τους υδρατμούς και το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα.
- ✓ Να μην αναφλέγονται και να μην σχηματίζουν εκρηκτικά μίγματα.
- ✓ Να μην συμπυκνώνονται σε πολύ υψηλές πιέσεις, γιατί απαιτούνται πολύ βαριές εγκαταστάσεις.
- ✓ Να μην ατμοποιούνται, σε πολύ χαμηλές πιέσεις, γιατί σε περίπτωση δημιουργίας κενού υπάρχει κίνδυνος εισροής αέρα στην εγκατάσταση με πολύ δυσμενείς συνέπειες για τη λειτουργία της.
- ✓ Η θερμοκρασία τήξεώς τους να είναι πολύ χαμηλότερη από τις θερμοκρασίες λειτουργίας της ψυκτικής εγκατάστασης.
- ✓ Να μην προσβάλουν το αναπνευστικό σύστημα και να μην είναι δηλητηριώδη, ώστε να μην προκύπτουν βλαβερές συνέπειες σε περίπτωση διαρροής τους.
- ✓ Να έχουν όσο το δυνατό μεγαλύτερη θερμοκρασία ατμοποίησης.
- ✓ Να είναι διαθέσιμα στην αγορά και να έχουν χαμηλό κόστος.

Τα ψυκτικά μέσα που χρησιμοποιούνται κυρίως σήμερα είναι η αμμωνία και κυρίως τα χλωριομένα και φθοριομένα παράγωγα του μεθανίου και του αιθανίου (R-ψυκτικά).[4] [9][30]

R-ψυκτικά

Στην πράξη χρησιμοποιούνται κυρίως τα χλωριομένα και φθοριομένα παράγωγα του μεθανίου (CH_4) και του αιθανίου (C_2H_6), των οποίων ο γενικός τύπος είναι: $\text{C}_a\text{H}_b\text{F}_c\text{Cl}_d$

Αυτά τα ψυκτικά αναφέρονται στην Αμερική ως freon και στη Γερμανία ως frigen και συμβολίζονται με το γενικό τύπο: R_{nmp}

όπου τα n, m, p είναι τα ψηφία τριψηφίου ακέραιου που έχουν τις ακόλουθες σχέσεις με τους δείκτες a, b, c, d:

$$a = n + 1$$

$$b = m - 1$$

$$c = p$$

$$d = 2a + 2 - c - b$$

Παράδειγμα συμβολισμού: Το ψυκτικό μέσο R12 θεωρείται ως R012, οπότε

$n=0$, $m=1$, $p=2$, συνεπώς

$$a = n + 1 = 0 + 1 = 1$$

$$b = m - 1 = 1 - 1 = 0$$

$$c = p = 2$$

$$d = 2a + 2 - c - b = 2 \cdot 1 + 2 - 2 - 0 = 2$$

Άρα ο χημικός τύπος είναι ο $C_1H_0F_2Cl_2$, δηλαδή ο CF_2Cl_2 (διφθοριοχλωριομεθάνιο)



Ιδιότητες για τα R-ψυκτικά

- Τα R-ψυκτικά δεν αναφλέγονται, δεν είναι τοξικά και δεν προσβάλλουν τα αναπνευστικά όργανα.
- Δεν δημιουργούν εκρηκτικά μίγματα.
- Σε μικρές ποσότητες στον αέρα είναι άοσμο.
- Δεν αλλοιώνουν τα τρόφιμα.
- Είναι χημικά σταθερά στις συνηθισμένες θερμοκρασίες και πιέσεις που χρησιμοποιούνται.
- Με τη βοήθεια φλόγας διασπώνται σε υδροφθόριο και υδροχλώριο, που γίνονται αντιληπτά μέσω οσμής.
- Η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση διαρροής, η οποία, ωστόσο, μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια με τη βοήθεια ηλεκτρονικών συσκευών.
- Τα R-ψυκτικά δεν προσβάλλουν το σίδηρο, το χαλκό και τα κράματα αυτού, το αλουμίνιο, τον ψευδάργυρο και τον κασσίτερο.
- Η υγρασία επιτρέπεται στα R-ψυκτικά μέσα μόνο σε πολύ μικρές ποσότητες (ενδεικτικά για το R12 αναφέρεται μέγιστη περιεκτικότητα 10-60mgr H₂O ανά 1kgr ψυκτικού μέσου, ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας).
- Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις υγρασίας στα R-ψυκτικά μέσα οδηγεί σε διάσπασή τους σε HCl και HF, που καταστρέφουν τις κολλήσεις των

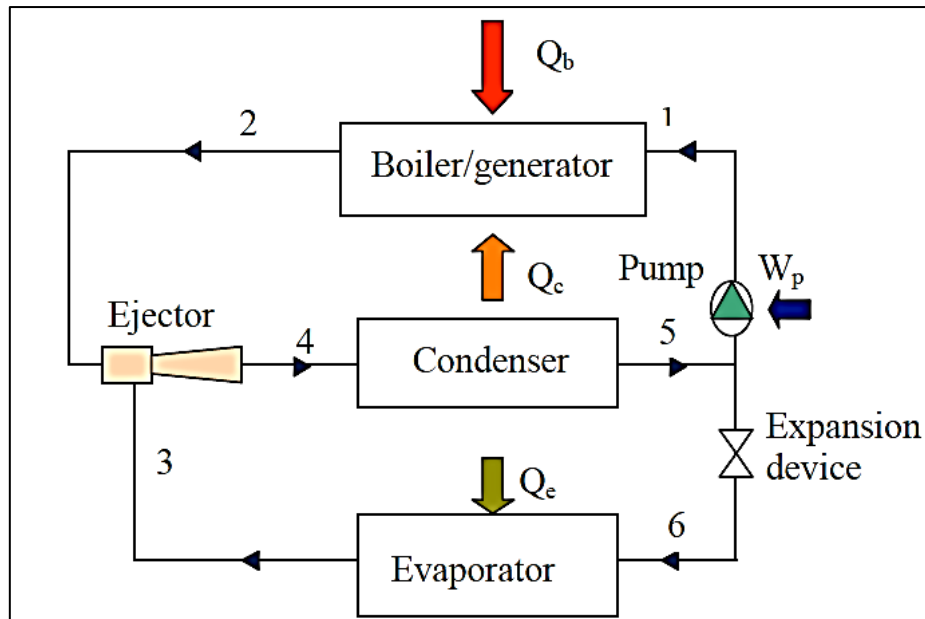
χαλκοσωλήνων, τα λιπαντικά λάδια του συμπιεστή και τους αγωγούς των ηλεκτροκινητήρων.

- Επίσης το νερό στις χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας πήζει και φράζει τις στενές διόδους του ψυκτικού μέσου, και κυρίως των εκτονωτικών οργάνων.
- Για να αποφευχθεί η υγρασία σε μια ψυκτική εγκατάσταση τοποθετούνται ξηραντήρες (ουσίες όπως *sibica gell*, ζεόλιθος κλπ που κρατούν την υγρασία του ψυκτικού).
- Πριν την πρώτη λειτουργία μιας ψυκτικής εγκατάστασης αφαιρείται όλος ο αέρας, πριν την εισαγωγή του ψυκτικού, λόγω του ότι περιέχει πάντα κάποια ποσότητα υγρασίας.
- Ο έλεγχος της υγρασίας εντός των ψυκτικών εγκαταστάσεων γίνεται με ειδικούς δείκτες που βρέχονται από το ψυκτικό και βρίσκονται πίσω από διαφανή επιφάνεια. Ο δείκτης αυτός αλλάζει χρώμα αν η περιεχόμενη υγρασία υπερβεί ένα ανώτατο όριο.
- Για να αποφεύγεται η είσοδος αέρα στην ψυκτική εγκατάσταση επιδιώκεται η χαμηλή πίεση (ατμοποίησης) να είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση. [22][23]

3.4 Ψυκτικός κύκλος εγχυτήρα

3.4.1 Περιγραφή της τεχνολογίας και εξέλιξη των συστημάτων ψύξης με εγχυτήρα

Η ψύξη με εγχυτήρα είναι μια τεχνολογία η οποία εκμεταλλεύεται τη θερμότητα από διάφορες πηγές και χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια σε εφαρμογές ψύξης. Στην παρούσα κατάσταση έχουν αρκετά χαμηλότερο COP σε σχέση με τα συστήματα συμπίεσης ατμών, αλλά προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα απλότητας και απουσία κινούμενων μερών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους είναι η ικανότητα τους να παράγουν ψύξη, χρησιμοποιώντας απορριπτόμενη θερμότητα ή ηλιακή ενέργεια ως πηγή θερμότητας σε θερμοκρασίες πάνω από 80 °C. Αναφερόμενοι στο βασικό ψυκτικό κύκλο με εγχυτήρα της Εικόνας 3.6, το σύστημα αποτελείται από 2 κύκλους, τον κύκλο ισχύος και το ψυκτικό κύκλο.



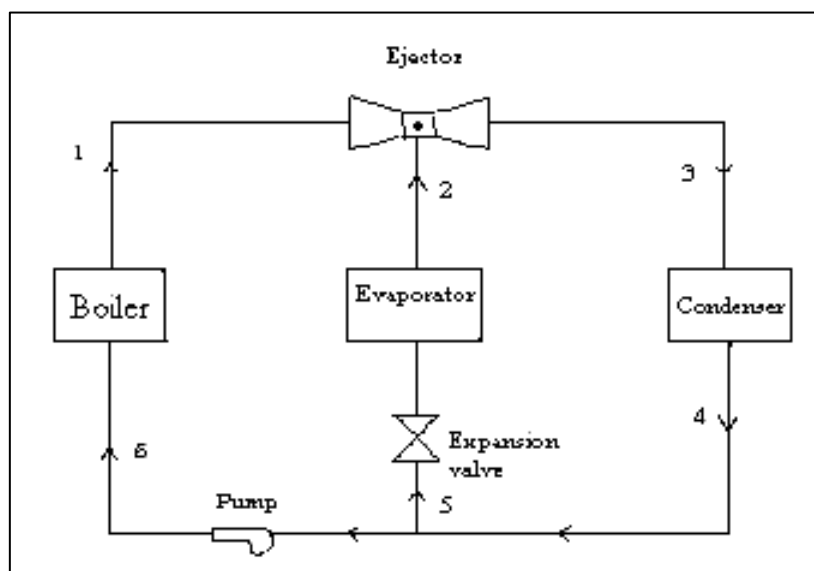
Εικόνα 3.6: Βασικός ψυκτικός κύκλος με εγχυτήρα [18]

Το πρώτο σύστημα ψύξης με εγχυτήρα ατμών αναπτύχθηκε από τον Maurice Leblanc το 1910 και χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε εφαρμογές κλιματισμού μέχρι την ανάπτυξη των ψυκτικών χλωροφθορανθράκων και τη χρήση τους στον κύκλο συμπίεσης ατμών, ο οποίος ήταν πολύ πιο αποτελεσματικός σε σχέση με εναλλακτικούς κύκλους που βασίζονται στη θερμότητα. Η έρευνα και ανάπτυξη συνεχίστηκαν, παρόλα αυτά και η τεχνολογία του εγχυτήρα βρήκε αρκετές εφαρμογές μηχανικής, ειδικά στις βιομηχανίες χημικών και επεξεργασίας. Τα συστήματα που αναπτύχθηκαν έχουν ψυκτική δυνατότητα μερικών kW έως 60.000 kW, αλλά παρόλη την προσπάθεια ανάπτυξης που έγινε, ο συντελεστής COP του συστήματος, ο οποίος είναι ο λόγος της παραγόμενης ψύξης προς την εισαγόμενη θερμότητα στο λέβητα, αν αμεληθεί το έργο της αντλίας το οποίο είναι πολύ μικρό, είναι πολύ χαμηλός και μικρότερος από 0,2. Τα συστήματα ψύξης με εγχυτήρα δεν είναι διαθέσιμα εμπορικά, αλλά ένας αριθμός εταιρειών ειδικεύεται στο σχεδιασμό και στην εφαρμογή συστημάτων με εγχυτήρα ατμών που χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο, για ψυκτικές εφαρμογές πάνω από 0 °C.

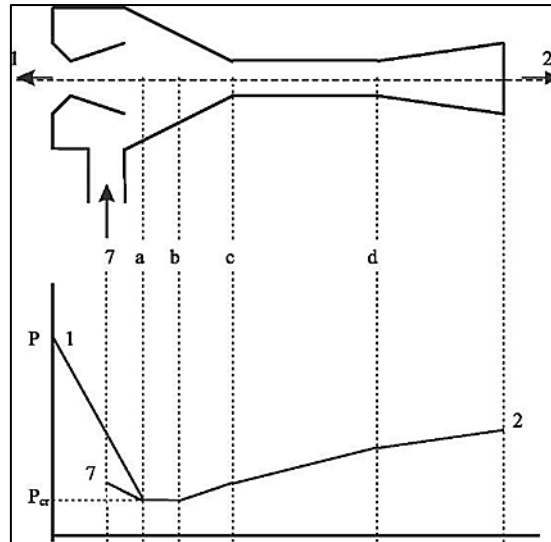
Για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του απλού κύκλου με εγχυτήρα έχουν προταθεί και εξεταστεί πιο πολύπλοκοι κύκλοι, όπως η ενσωμάτωση του εγχυτήρα σε συστήματα συμπίεσης ατμών ή απορρόφησης. Επίσης σημαντική προσπάθεια έχει καταβληθεί στην ανάπτυξη συστημάτων ψύξης με εγχυτήρα με πηγή θερμότητας την ηλιακή ενέργεια.

3.4.2 Αρχή λειτουργίας συστήματος ψύξης με εγχυτήρα

Ο ψυκτικός κύκλος με εγχυτήρα που φαίνεται στην Εικόνα, αποτελείται από ένα λέβητα, ένα συμπυκνωτή, έναν εγχυτήρα, μια αντλία, έναν ατμοποιητή και μια εκτονωτική βαλβίδα. Το πρωτεύον ρευστό χαμηλής πίεσης εισέρχεται σε ένα λέβητα, όπου απορροφά θερμότητα χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου και μετατρέπεται σε ατμό υψηλής πίεσης. Ο κορεσμένος ατμός υψηλής πίεσης εισέρχεται στον εγχυτήρα, όπου εκτονώνεται σε ένα συγκλίνον-αποκλίνον ακροφύσιο και μετατρέπεται σε ρεύμα υψηλής ταχύτητας. Η διαφορά πίεσης που παράγεται από το πρωτεύον ρεύμα ρευστού, προκαλεί την αναρρόφηση δευτερεύοντος κορεσμένου ατμοποιημένου ρευστού από τον ατμοποιητή. Το πρωτεύον και το δευτερεύον ρεύμα ρευστού αναμιγνύονται στο θάλαμο ανάμιξης και η πίεση αυξάνεται λόγω των κρουστικών κυμάτων, καθώς η ροή διέρχεται μέσω του διαχύτη. Το ρευστό υψηλής πίεσης συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή, αποβάλλοντας θερμότητα. Ένα μέρος του ρευστού οδηγείται στο λέβητα μέσω της αντλίας, για την ολοκλήρωση του κύκλου ισχύος. Το υπόλοιπο ρευστό εισέρχεται στον ατμοποιητή μέσω της εκτονωτικής βαλβίδας, ως μίγμα υγρού και ατμού. Το ψυκτικό μέσο στη συνέχεια ατμοποιείται και παράγει το φαινόμενο της ψύξης. Το ψυκτικό αναμιγνύεται με το πρωτεύον ρεύμα ρευστού στον εγχυτήρα και συμπιέζεται στο τμήμα του διαχύτη, προτού εισέλθει στο συμπυκνωτή. Το συμπυκνωμένο ρευστό εξέρχεται από το συμπυκνωτή για την επανάληψη του κύκλου ψύξης.



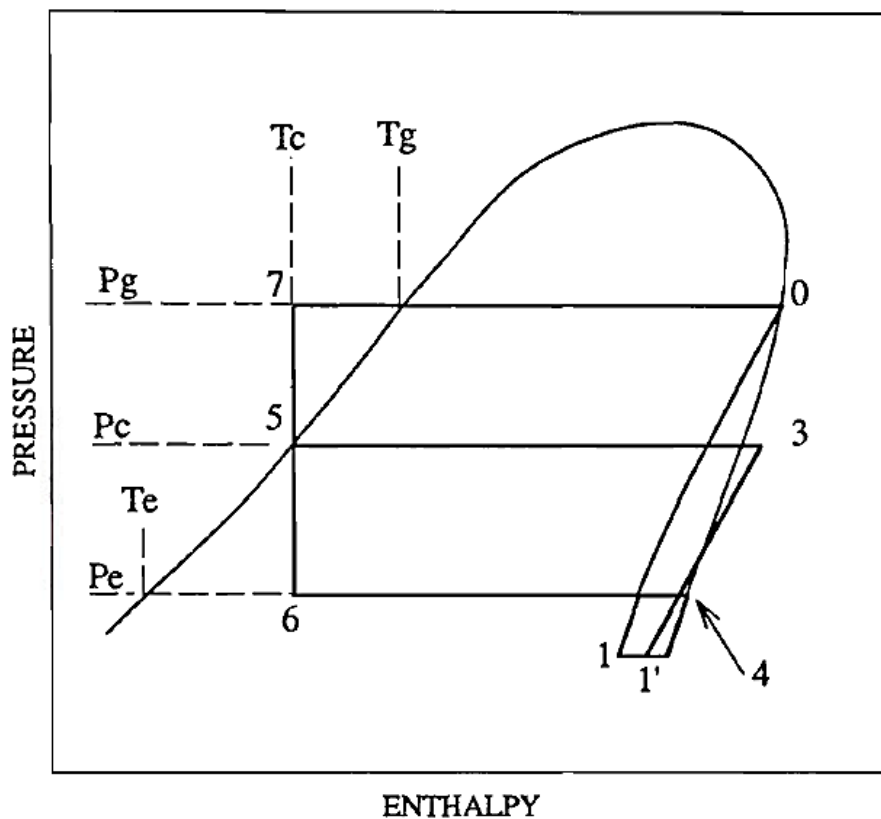
Εικόνα 3.7: Σύστημα ψύξης με εγχυτήρα [19]



Εικόνα 3.8: Τομή εγχυτήρα και κατανομή της πίεσης [7]

3.4.3 Ανάλυση των θερμοδυναμικών κύκλων του συστήματος

Όπως αναφέρθηκε, το σύστημα αποτελείται από δύο θερμοδυναμικούς κύκλους, τον κύκλο ισχύος και τον κύκλο ψύξης. Και στους δύο κύκλους χρησιμοποιείται το ίδιο εργαζόμενο ρευστό.



Εικόνα 3.9: Διάγραμμα θερμοδυναμικού κύκλου [16]

Οι κύκλοι αυτοί περιγράφονται στη συνέχεια ως εξής:

(1) Κύκλος ισχύος

α. Στη διεργασία 7-0 της Εικόνας , η θερμότητα μεταφέρεται στο εργαζόμενο ρευστό. Το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στο λέβητα ως συμπιεσμένο υγρό και εξέρχεται ως κορεσμένος ή υπέρθερμος ατμός.

β. Κατά τη διεργασία 0-1, ο ατμός εκτονώνεται μέσω του ακροφυσίου κίνησης και παράγεται ένα υπερηχητικό ρεύμα ή ρεύμα κίνησης. Το υπερηχητικό ρεύμα παρασύρει τον ατμό από τον ατμοποιητή ή το δευτερεύον ρεύμα, και τα δύο ρεύματα συνενώνονται στο σημείο 1', όπου ξεκινά η ανάμειξη. Η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε στατική πίεση στο διαχύτη. Η συμπίεση πραγματοποιείται κατά μήκος της γραμμής 1' -3, όπως φαίνεται στην Εικόνα . Έτσι, ο εγχυτήρας δρα ως συμπιεστής.

γ. Στη συνέχεια, κατά τη διεργασία 3-5, το ρευστό διέρχεται μέσω του συμπυκνωτή υπό σταθερή πίεση, όπου απομακρύνεται η αισθητή θερμότητα υπερθέρμανσης και η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης.

δ. Κατά τη διεργασία 5-7, το κορεσμένο υγρό που εξέρχεται από το συμπυκνωτή επιστρέφει στο λέβητα, , για να ολοκληρωθεί ο κύκλος.

(2) Ο ψυκτικός κύκλος

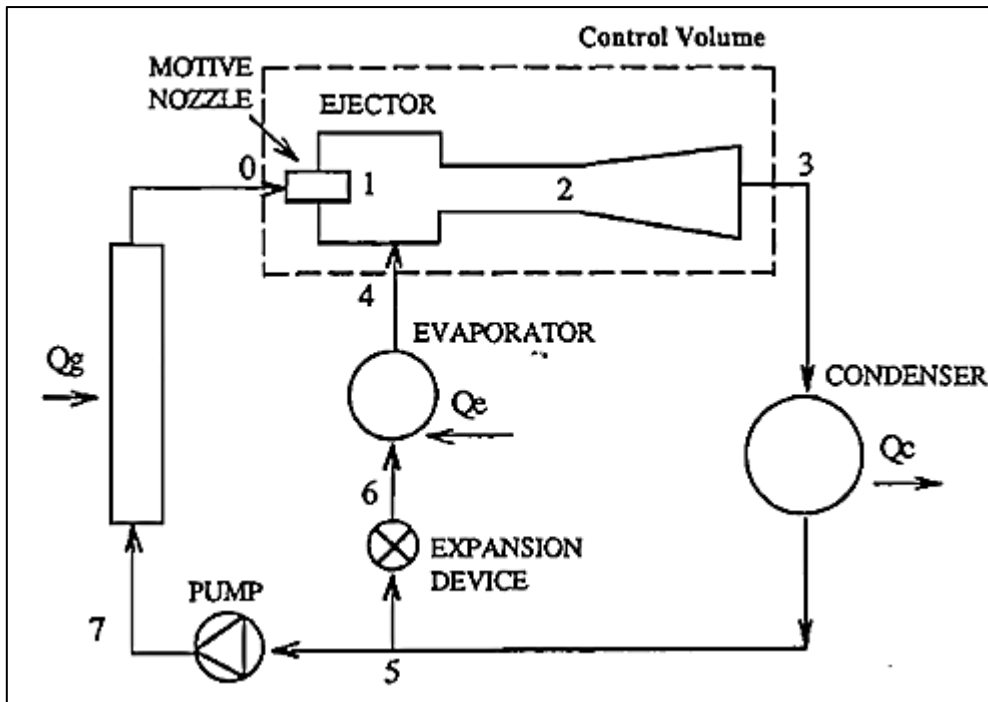
Ο ψυκτικός κύκλος ολοκληρώνεται οδηγώντας το εργαζόμενο ρευστό μέσω της ακόλουθης διεργασίας, όπου δρα ως ψυκτικό.

α. Κατά τη διεργασία 6-4 το ρευστό ατμοποιείται στον ατμοποιητή, απορροφώντας θερμότητα από το περιβάλλον.

β. Κατά τη διεργασία 4-1', ο ατμός παρασύρεται μέσα στον εγχυτήρα ώστε να αναμιχθεί με τον υπερηχητικό κινητήριο ατμό και στη συνέχεια συμπιέζεται στην πίεση που αντιστοιχεί στην πίεση συμπίεσης, κατά τη διεργασία 1'-3.

γ. Το ρευστό ακολουθεί την ίδια διεργασία 3-5, που περιγράφηκε παραπάνω.

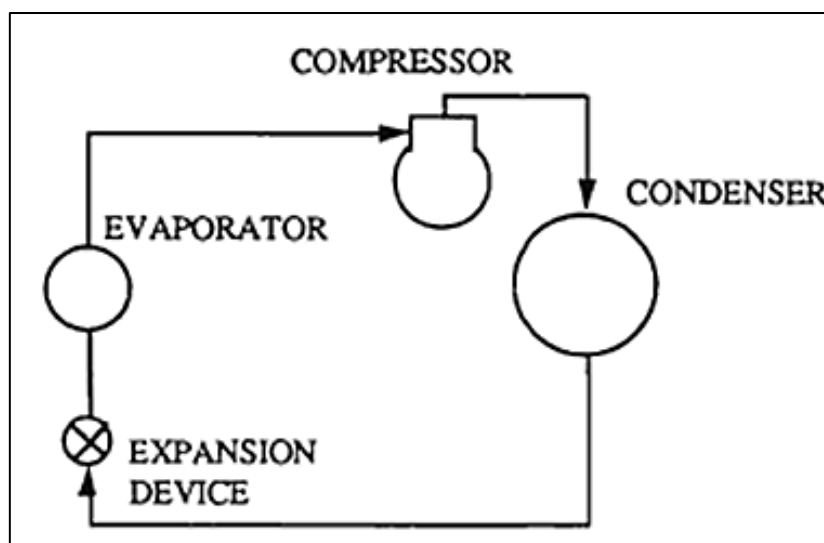
δ. Κατά τη διεργασία 5-6, το κορεσμένο υγρό που εξέρχεται από το συμπυκνωτή στη συνέχεια εκτονώνεται μέσω μιας στραγγαλιστικής βαλβίδας, και οδηγείται στον ατμοποιητή. [7][18][19]



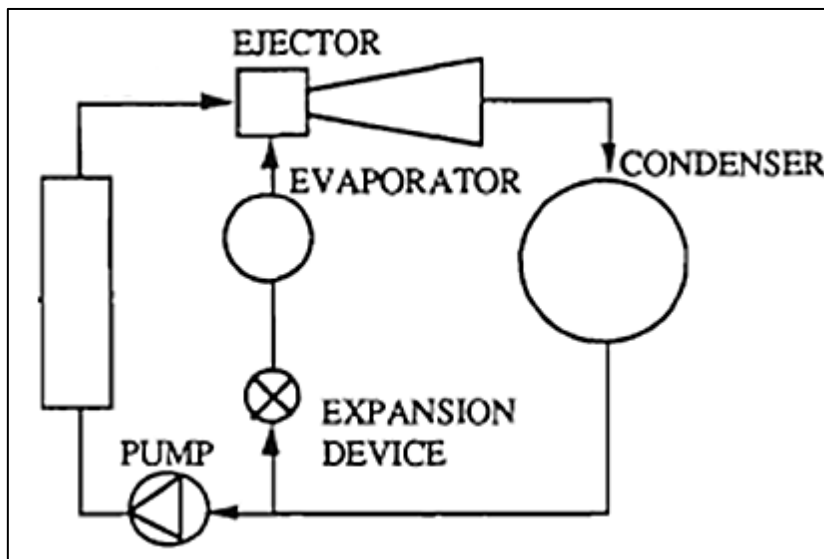
Εικόνα 3.10: Σχηματική απεικόνιση ενός συστήματος ψύξης με εγχυτήρα [19]

3.5 Πλεονεκτήματα συστημάτων ψύξης με εγχυτήρα και προοπτικές ανάπτυξης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σχηματικά ένας συμβατικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμού και ένα σύστημα ψύξης με αισθητήρα, για λόγους σύγκρισης. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος ψύξης με εγχυτήρα συνοψίζονται παρακάτω.



Εικόνα 3.11: Συμβατικός κύκλος ψύξης με συμπίεση ατμών [19]



Εικόνα 3.12: Σύστημα ψύξης με εγχυτήρα [19]

(1) Το σύστημα ψύξης με εγχυτήρα χρησιμοποιεί έναν υπερηχητικό εγχυτήρα στη θέση του μηχανικού συμπιεστή, ο οποίος χρησιμοποιείται σε ένα συμβατικό σύστημα. Ο εγχυτήρας λειτουργεί με τη βοήθεια του κινητήριου ρεύματος υψηλής πίεσης που παράγεται στο λέβητα, όπου η θερμική ενέργεια προσδίδεται στο ρεύμα. Ο εγχυτήρας είναι η βασικότερη συνιστώσα του συστήματος αυτού και έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Είναι μια απλή μηχανικά συσκευή χωρίς κινούμενα μέρη. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχουν προβλήματα λίπανσης.
- Η λειτουργία της είναι απλή και δεν υπάρχει κίνδυνος φθοράς λόγω εισαγωγής υγρού ψυκτικού, το οποίο αποτελεί πρόβλημα στους συμβατικούς συμπιεστές.
- Απαιτεί λιγότερη συντήρηση σε σχέση με τους συμβατικούς συμπιεστές.

(2) Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει πηγή θερμότητας χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 80°C . Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα σε σύγκριση με τα συστήματα κύκλου Rankine και τα συστήματα ψύξης με απορρόφηση, όπως LiBr-νερού ή NH_3 - νερού, τα οποία απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες για να λειτουργήσουν ικανοποιητικά, παρόλο που έχουν καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τα συστήματα ψύξης με εγχυτήρα σε αυτές τις θερμοκρασίες.

Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα και η ευρεία εφαρμογή των συστημάτων ψύξης με εγχυτήρα απαιτείται έρευνα και ανάπτυξη στον υφιστάμενο τομέα στα εξής πεδία:

- Να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα της σταθερής ροής του εγχυτήρα και ειδικότερα κατά τη λειτουργία μακριά από το σημείο σχεδιασμού.
- Να αναπτυχθούν εναλλακτικοί τύποι εγχυτήρων, όπως περιστροφικοί εγχυτήρες που προσφέρουν δυναμικό για υψηλότερες αποδόσεις.
- Να αναπτυχθούν εγχυτήρες που μπορούν να λειτουργήσουν και με άλλα φυσικά ψυκτικά μέσα εκτός του νερού, όπως το CO₂ και άλλους υδρογονάνθρακες, ώστε να επεκταθούν και σε εφαρμογές που απαιτούν και θερμοκρασίες κάτω από 0 °C.
- Να ερευνηθεί η βελτιστοποίηση των κύκλων και η ενσωμάτωση των εγχυτήρων σε συστήματα συμπίεσης ατμών ή απορρόφησης. [7][15][16]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιγραφή της εγκατάστασης

4.1 Εισαγωγικά

Η συγκεκριμένη εγκατάσταση αποτελείται από δύο υποσυστήματα: το υποσύστημα των ηλιακών συλλεκτών και το υποσύστημα της τριπαραγωγής. Το οργανικό ψυκτικό R410a έχει επιλεγεί ως εργαζόμενο μέσο για το σύστημα τριπαραγωγής, λόγω των εξαιρετικών θερμοδυναμικών του ιδιοτήτων και της περιβαλλοντικά φιλικής συμπεριφοράς του.

Το υποσύστημα των ηλιακών συλλεκτών αποτελείται από τρία κύρια τμήματα, δηλαδή, τους ηλιακούς συλλέκτες (flat plate collectors), μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας (thermal storage tank) και έναν βοηθητικό θερμαντήρα (auxiliary heater). Οι **ηλιακοί συλλέκτες** επιλέχθηκαν να είναι επίπεδοι και δρουν ως πηγή ενέργειας του συστήματος, λόγω του χαμηλού κόστους τους και της ευρείας εφαρμογής τους. Η **δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας** χρησιμοποιείται για να καλύπτει τις ανάγκες κάθε εφαρμογής, όταν δεν υπάρχει διαθεσιμότητα ηλιακής ενέργειας. Ο **βοηθητικός θερμαντήρας** εγκαθίσταται ως εφεδρική πηγή ενέργειας, ώστε να ανυψώνει τη θερμοκρασία της δεξαμενής αποθήκευσης θερμότητας στην επιθυμητή στάθμη αναφοράς, όταν η θερμοκρασία της δεξαμενής μειώνεται κάτω από το όριο που έχει τεθεί από το σχεδιασμό του συστήματος.

Το υποσύστημα της τριπαραγωγής αποτελείται από έναν ατμοποιητή (vapor generator), ο οποίος είναι εναλλάκτης θερμότητας που ατμοποιεί το εργαζόμενο μέσο, ένα διβάθμιο στρόβιλο υψηλής και χαμηλής πίεσης (two-stage turbine), έναν εξατμιστή (evaporator), ένα θερμαντήρα (heater), ένα τροφοδοτικό δοχείο (recuperator), ένα συμπυκνωτή (condenser), έναν εγχυτήρα (ejector), μια τροφοδοτική αντλία (pump) και μια στραγγαλιστική βαλβίδα (throttle valve). Ολόκληρη η εγκατάσταση παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1.

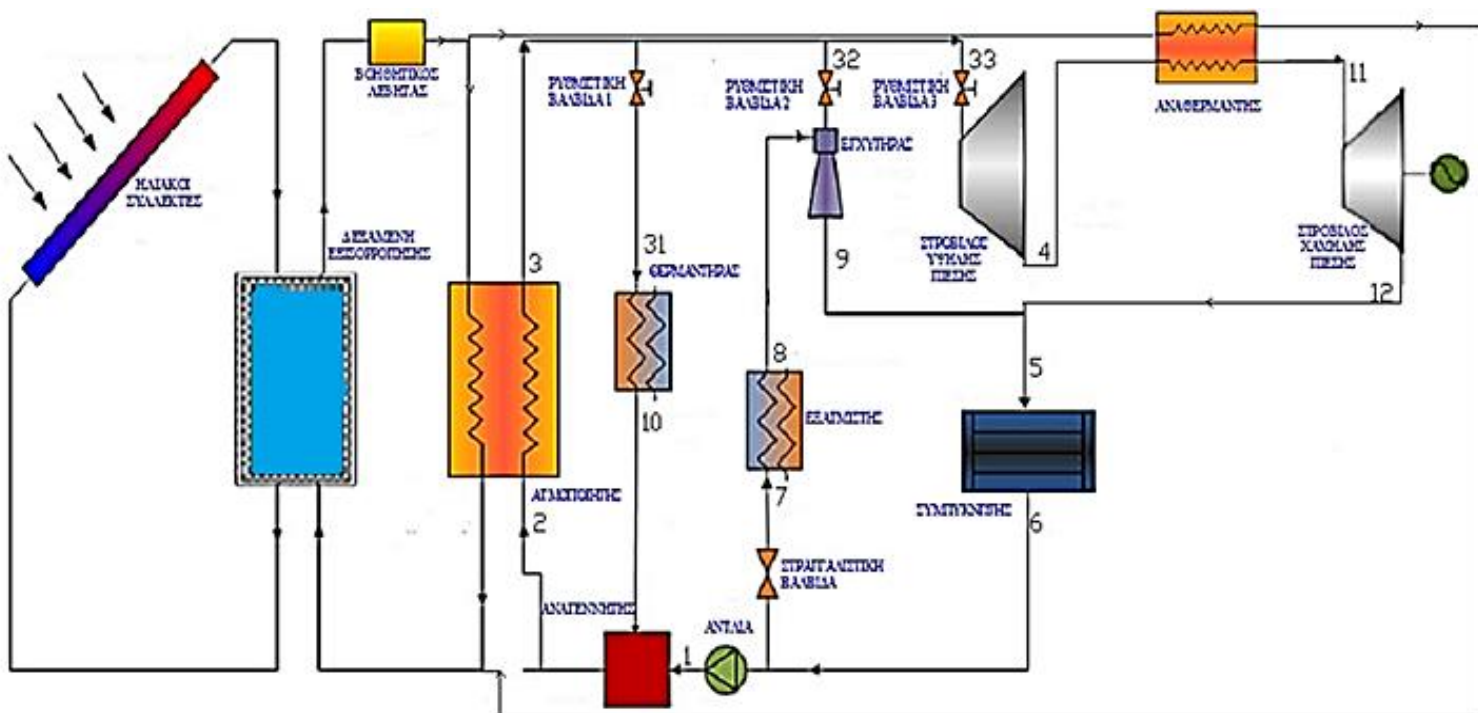
Το εργαζόμενο μέσο εισέρχεται στον **ατμοποιητή** και μετατρέπεται σε ατμό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, απορροφώντας θερμότητα από το εργαζόμενο μέσο των ηλιακών συλλεκτών, δηλαδή το νερό. Η πίεση του οργανικού ψυκτικού έχει ανυψωθεί λόγω της διέλευσής του από την αντλία. Στη συνέχεια διαχωρίζεται σε τρία ρεύματα:

- το ένα διέρχεται μέσω του **θερμαντήρα** για την παραγωγή της θέρμανσης,
- το δεύτερο εισέρχεται στο υπερηχητικό ακροφύσιο του **εγχυτήρα** και
- το τελευταίο εκτονώνεται στο **διβάθμιο στρόβιλο** για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Η ταχεία ροή στην έξοδο του εγχυτήρα δημιουργεί κενό, το οποίο παρασύρει ένα δευτερεύον ρεύμα από τον **ατμοποιητή** μέσα στο θάλαμο του εγχυτήρα, το οποίο παράγει **ψύξη**. Τα δύο ρεύματα αναμειγνύονται στη θάλαμο του εγχυτήρα και ρέουν μέσω του διαχύτη.

Τα καυσαέρια του στροβίλου και το ρεύμα που εξέρχεται από τον εγχυτήρα, αναμειγνύονται πριν από το **συμπυκνωτή**, όπου και μετατρέπονται σε υγρή μορφή, αποβάλλοντας θερμότητα στο περιβάλλον τους. Ένα από τα εξερχόμενα του συμπυκνωτή ρεύματα ρέει μέσω της **στραγγαλιστικής βαλβίδας** και εισέρχεται στον **ατμοποιητή**, ενώ το υπόλοιπο εισέρχεται στο **τροφοδοτικό δοχείο**, αφού πρώτα διέλθει από την **αντλία**. Το πρώτο βρίσκεται σε χαμηλή πίεση και θερμοκρασία και ατμοποιείται στον ατμοποιητή, απορροφώντας θερμότητα από το ψυχόμενο μέσο, οδηγώντας σε παραγωγή ψύξης. Το δεύτερο θερμαίνεται από το ρεύμα που προέρχεται από το θερμαντήρα, μέσω της ανάμειξής τους. Στη συνέχεια, το οργανικό ψυκτικό οδηγείται μέσω της αντλίας στη μονάδα παραγωγής ατμού, για να ολοκληρωθεί ο κύκλος λειτουργίας.

Κάθε συνιστώσα του κύκλου μπορεί να αντιμετωπισθεί ως όγκος ελέγχου. Η ανάλυση βασίζεται στην εφαρμογή της διατήρησης μάζας και διατήρησης ενέργειας σε κάθε συνιστώσα. [8]



Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση της εγκατάστασης

4.2 Πληροφορίες για το R410a

Πριν προχωρήσουμε στη θερμοδυναμική ανάλυση του κύκλου, θα αναφέρουμε κάποιες βασικές πληροφορίες για το ψυκτικό που έχει επιλεγεί, δηλαδή το R410a, το οποίο θέτει διάφορες προϋποθέσεις και περιορισμούς για το σχεδιασμό του συστήματος.

Το R410a θεωρείται ένα αναγνωρισμένο ψυκτικό για εφαρμογές κλιματισμού και θέρμανση μέσω αντλιών θερμότητας στην Ευρώπη. Το R410a είναι ένα σχεδόν αζεοτροπικό μείγμα που αποτελείται από δύο συνιστώσες, το R32 και το R125 σε αναλογίες 50-50 κατά βάρος. Το R410a έχει πολύ υψηλότερες πιέσεις από το R22, ένα από τα πιο χρησιμοποιούμενα ψυκτικά σε εφαρμογές κλιματισμού. Οι πιέσεις συμπύκνωσης του συστήματος είναι 9- 10 bar υψηλότερες από του R22. Η απόδοση του συστήματος είναι παρόμοια με το R22. Για να εκμεταλλευτούμε πλήρως τα πλεονεκτήματα του R410a, ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να αξιοποιεί τις καλύτερες θερμικές ιδιότητες του ψυκτικού. Για το λόγο αυτό, το R410a, χρησιμοποιείται μόνο σε νέες και όχι σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν R410a έχουν συμπιεστές που λειτουργούν με λιπαντικό πολυολεστέρα (POE).

4.2.1 Ιδιότητες του R410a

Η υψηλή πίεση του R410a απαιτεί ότι όλες οι συνιστώσες του συστήματος είναι σχεδιασμένες για κατάλληλες υψηλές πιέσεις. Όταν αυτό εξασφαλιστεί το σύστημα έχει τον ίδιο βαθμό ασφάλειας με ένα οποιοδήποτε άλλο σύστημα υπό πίεση. Κανονικά όμως η ανατροφοδότηση ενός συστήματος R22 με R410a δεν είναι εφικτή.

Το R410a έχει κρίσιμη θερμοκρασία 71.8 °C, σημαντικά χαμηλότερη από αυτή του R22 και έχει υψηλότερη πυκνότητα (χαμηλότερο ειδικό όγκο) από το R22 σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας των συστημάτων κλιματισμού. Απαιτείται παρόμοια παροχή μάζας για να επιτευχθεί το ίδιο αποτέλεσμα ψύξης. Όσο μικρότερη είναι η παροχή μάζας σημαίνει ότι απαιτούνται μικρότερες διάμετροι σωληνώσεων και εξαρτημάτων.

4.2.2 Σταθερότητα και συμβατότητα υλικών

Η σταθερότητα του R410a υπό την παρουσία μετάλλων είναι εξαιρετική. Εργαστηριακοί έλεγχοι έχουν δείξει ότι είναι συμβατό με χάλυβα, χαλκό, αλουμίνιο και ορείχαλκο. Όπως συμβαίνει και με όλα τα HFCs, η συμπεριφορά του R410a υπό την παρουσία πλαστικών υλικών και ελαστομερών ποικίλει. Κάποια υλικά έχουν αξιολογηθεί ως πλήρως κατάλληλα, κάποια εξαρτώνται από τη σύσταση και μπορεί να μην είναι κατάλληλα.

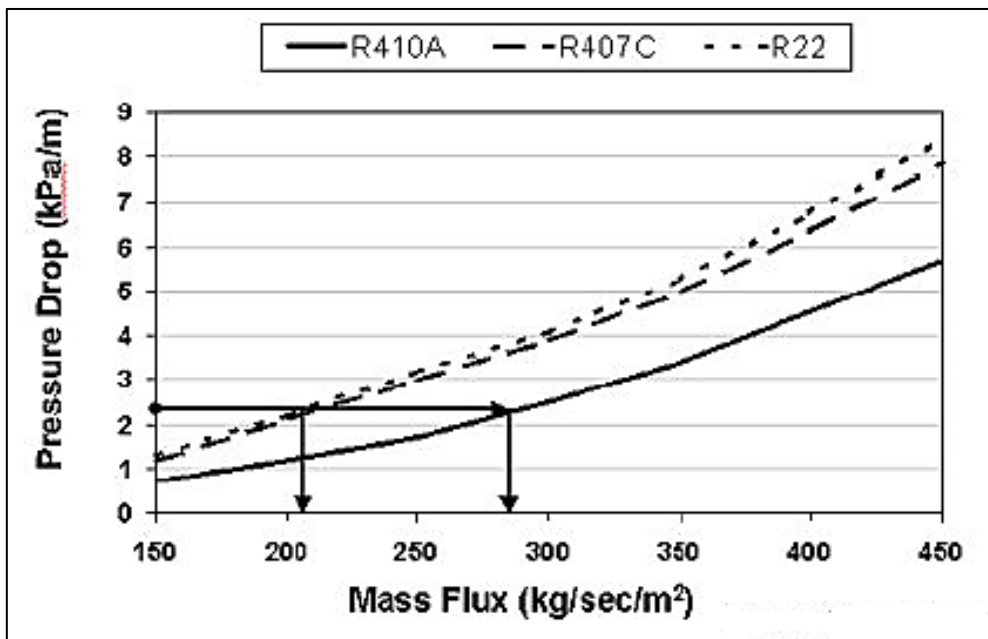
4.2.3 Σχεδιασμός και εγκατάσταση συστημάτων με R410a

Οι σχεδιαστές πρέπει να λάβουν υπόψη τους ότι οι υψηλότερες πιέσεις μειώνουν την επίδραση της πτώσης πίεσης στην απόδοση του συστήματος. Λόγω της ύπαρξης μεγάλης διαφοράς πίεσης μεταξύ της πλευράς υψηλής και της πλευράς χαμηλής πίεσης του συστήματος σε σύγκριση με το R22, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα μήκη σωλήνων και μικρότερες διαμέτρους για τη ροή του ατμού.

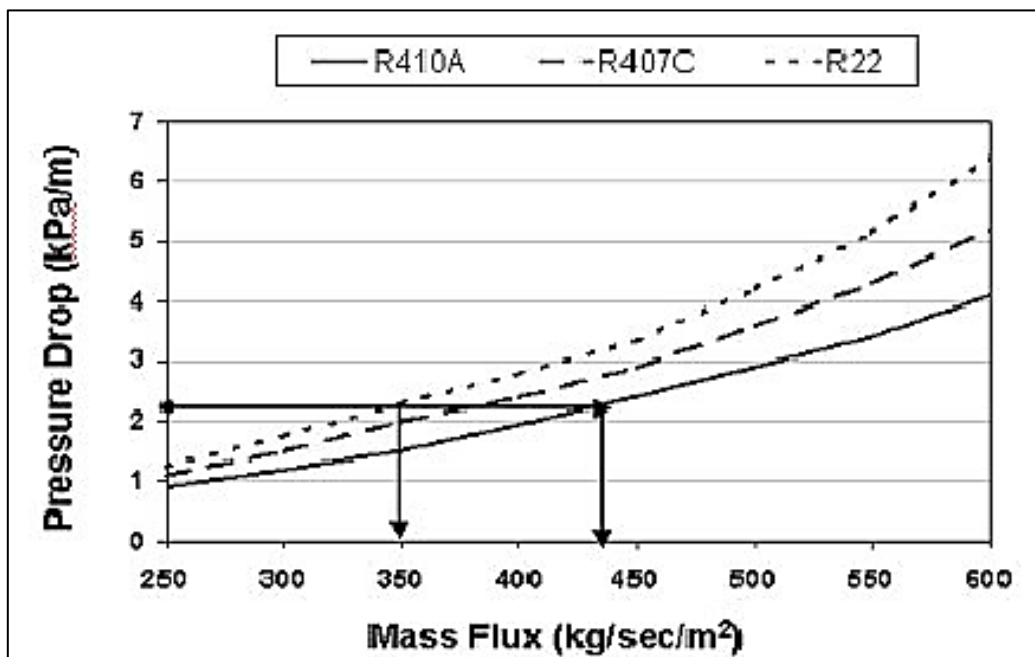
Ο σχεδιασμός του εξοπλισμού για το R410a (καθώς και η εγκατάσταση και η συντήρησή του) απαιτεί τη χρήση κατάλληλων συνιστωσών υδροχλωροφθορανθράκων (HCFC) για να αποφευχθεί ο πιθανός κίνδυνος μόλυνσης του κυκλώματος. [22]

4.2.4 Εναλλάκτες θερμότητας

Οι σπείρες των εναλλακτών θερμότητας (ατμοποιητής ή συμπυκνωτής) που σχεδιάζονται για εφαρμογές με R410a, λόγω των ιδιοτήτων του R410a, απαιτούν μικρότερες διαμέτρους σωληνώσεων για δεδομένη φόρτιση. Το πλήθος των κυκλωμάτων των σπειρών μπορεί συνήθως να μειωθεί κατά 1/3 σε σύγκριση με το R22. Το R410a έχει σημαντικά υψηλότερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας σε σύγκριση με άλλα ψυκτικά, όπως το R22, τόσο κατά την εξάτμιση όσο και κατά τη συμπύκνωση, πράγμα το οποίο οδηγεί σε καλύτερη απόδοση. Για την ίδια θερμική ικανότητα (ψυκτική ικανότητα) απαιτείται μικρότερη επιφάνεια εναλλάκτη από την πλευρά του ψυκτικού, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται πιο συμπαγής σχεδιασμός και να απαιτείται λιγότερο υλικό.



Εικόνα 4.2: Πτώση πίεσης κατά τη διαδικασία ψύξης στην πλευρά του ψυκτικού. Για δεδομένη πτώση πίεσης, το R410a επιτρέπει μεγαλύτερη παροχή μάζας ψυκτικού. [22]



Εικόνα 4.3: Πτώση πίεσης κατά τη διαδικασία συμπύκνωσης στην πλευρά του ψυκτικού. Για δεδομένη πτώση πίεσης, το R410a επιτρέπει μεγαλύτερη παροχή μάζας ψυκτικού. [22]

Κατά το *σχεδιασμό* του υπό μελέτη συστήματος όμως θεωρήθηκε ότι *δεν υπάρχει πτώση πίεσης* κατά τη ροή του οργανικού ψυκτικού εντός των σωληνώσεων και των εναλλακτών θερμότητας.

4.2.5 Σωλήνωση σύνδεσης και εξαρτήματα

Όπως και στην περίπτωση των εναλλακτών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρότερες διάμετροι για τους σωλήνες του ατμού. Οι υψηλότερες πιέσεις του R410a απαιτούν σωλήνες με μεγαλύτερο πάχος τοιχώματος. Οι σωλήνες χαλκού είναι ευρέως διαθέσιμοι και καλύπτουν τις ανάγκες χρήσης του R410a. Όταν δεν είναι διαθέσιμοι, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν σωλήνες και εξαρτήματα από άνθρακα ή ανοξείδωτο χάλυβα. Επίσης εξαρτήματα όπως βαλβίδες εκτόνωσης κλπ πρέπει να ελεγχθούν τόσο για τη συμβατότητα του ψυκτικού όσο και για τη συμβατότητα της πίεσης, καθώς δεν είναι όλα κατάλληλα. Σε οποιοδήποτε νέο σύστημα πρέπει να πραγματοποιείται έλεγχος διαρροής.

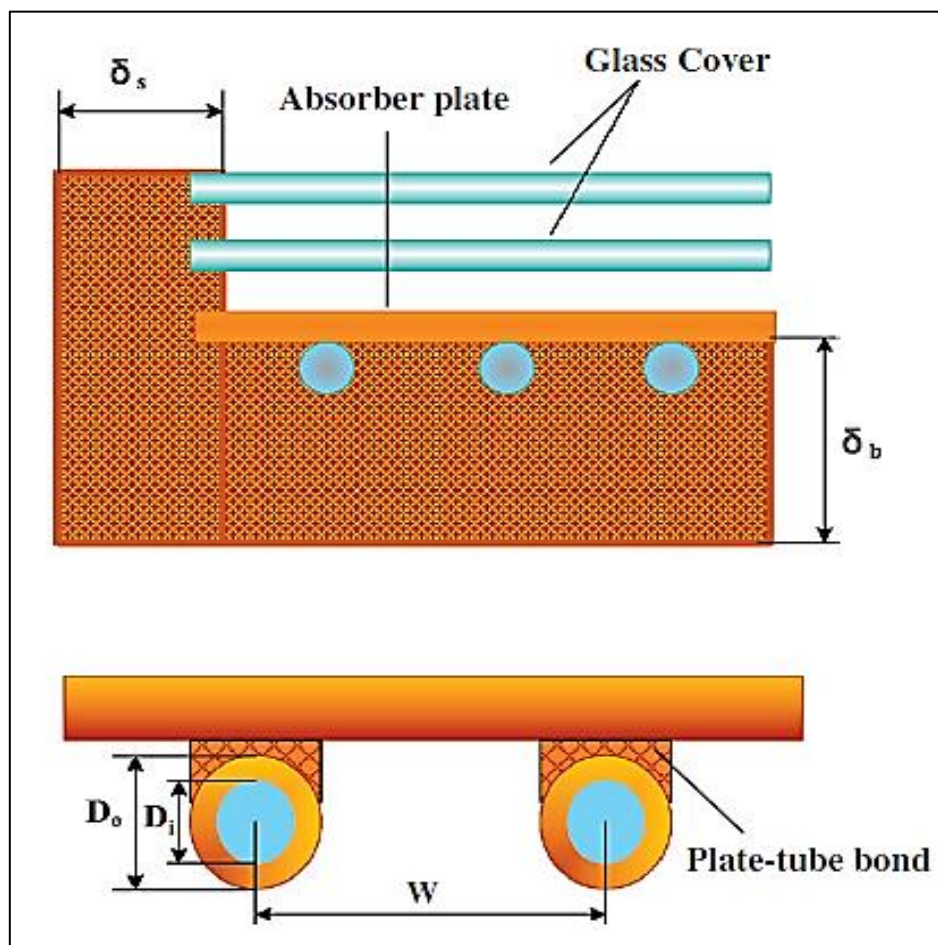
4.2.6 Αρχές χειρισμού

Το R410a είναι μη εύφλεκτο σε ατμοσφαιρική πίεση (π.χ. σε περίπτωση διαρροής) αλλά μπορεί να γίνει εύφλεκτο, αν αναμειχθεί με αέρα υπό πίεση. Κατά συνέπεια, το R410a δεν πρέπει ποτέ να αναμειγνύεται σε κυλίνδρους ή σωλήνες παροχής ή να αποθηκεύεται σε δεξαμενές.

Το R410a είναι, όπως αναφέρθηκε, σχεδόν αζεοτροπικό μείγμα ψυκτικού. Αυτό σημαίνει ότι όταν το υγρό και ο ατμός βρίσκονται σε ισορροπία, π.χ. σε συνθήκες κορεσμού, η σύσταση του ατμού διαφέρει ελάχιστα από τη σύσταση του υγρού. Το R410a πρέπει να μεταφέρεται σε υγρή φάση, όταν φορτώνουμε ένα σύστημα. Η μεταφορά πρέπει να σταματήσει προτού μεταφερθεί όλο το υγρό. Στην ιδανική περίπτωση, όταν η τελευταία σταγόνα υγρού έχει αφαιρεθεί, η δεξαμενή θα έχει ακόμα περίπου 5% του βάρους των καθαρών συστατικών σε φάση ατμών. Είναι σημαντικό να σταματήσει η μεταφορά, χωρίς να εισέλθει ατμός στο σύστημα. Η δεξαμενή θα έχει θετική πίεση και δεν πρέπει να εκκενωθεί. Πρέπει να επιστραφεί στον πάροχο με την εναπομένουσα πίεση. [21][22]

4.3 Ηλιακοί συλλέκτες

Στην Εικόνα 4.2 απεικονίζονται η διαμόρφωση μιας πλάκας επίπεδου συλλέκτη υγρού. Καθώς η ηλιακή ενέργεια διέρχεται μεταξύ των δύο γυάλινων καλυμμάτων, απορροφάται από την πλάκα απορρόφησης και από το ρευστό στους προσαρτημένους στην πλάκα σωλήνες.



Εικόνα 4.4: Σχεδιάγραμμα του επίπεδου ηλιακού συλλέκτη υγρού [10]

Ο συνολικός συντελεστής απωλειών U_1 εισάγεται για να εκφράσει τις απώλειες θερμότητας από το συλλέκτη

$$q_1 = U_1 A_p (T_{pm} - T_a) \quad (4.1)$$

όπου το A_p αναπαριστά την επιφάνεια της πλάκας απορρόφησης, T_{pm} είναι η μέση θερμοκρασία της πλάκας απορρόφησης και T_a είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Καθώς οι απώλειες θερμότητας από τους συλλέκτες αποτελούνται από τρία μέρη, δηλαδή, απώλειες κορυφής, πλευρικές απώλειες και απώλειες βάσης, ο συνολικός συντελεστής απωλειών είναι το άθροισμα τριών συνιστωσών:

$$U_1 = U_t + U_s + U_b \quad (4.2)$$

Εισάγοντας τον παράγοντα απολαβής θερμότητας F_R , ο ρυθμός παραγωγής ωφέλιμης θερμότητας του συλλέκτη είναι:

$$q_u = F_R A_p \left[S - U_1 (T_{fi} - T_a) \right] \quad (4.3)$$

4.4 Σύστημα δεξαμενής αποθήκευσης

Μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού με εξωτερική μόνωση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα εισάγεται στο σύστημα με σκοπό να δράσει ως απομονωτής μεταξύ των ηλιακών συλλεκτών και του φορτίου. Θεωρούμε ότι μέσα στη δεξαμενή επικρατεί κατάσταση πλήρους ανάμειξης και ότι η ομοιόμορφη θερμοκρασία T_1 μεταβάλλεται μόνο με το χρόνο. Η ακόλουθη εξίσωση προκύπτει από τον ενεργειακό ισολογισμό στη δεξαμενή:

$$\left[(\rho V C_p)_w + (\rho V C_p)_t \right] \frac{dT_1}{dt} = Q_u - Q_{load} - (UA)_t (T_1 - T_a) \quad (4.4)$$

όπου ο όρος $(\rho C_p V)_w$ αναπαριστά τη θερμοχωρητικότητα του νερού στη δεξαμενή, ο όρος $(\rho C_p V)_t$ αναπαριστά τη θερμοχωρητικότητα του υλικού της δεξαμενής (στην περίπτωση αυτή χάλυβας), T_a είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος γύρω από τη δεξαμενή και $(UA)_t$ είναι το γινόμενο του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και του εμβαδού της επιφάνειας της δεξαμενής. Υποθέτοντας ότι τα q_u , q_{load} και T_a είναι σταθερά σε λογικά χρονικά διαστήματα (1h ή λιγότερο), η Εξίσωση 4.4 μπορεί να ολοκληρωθεί στη μορφή:

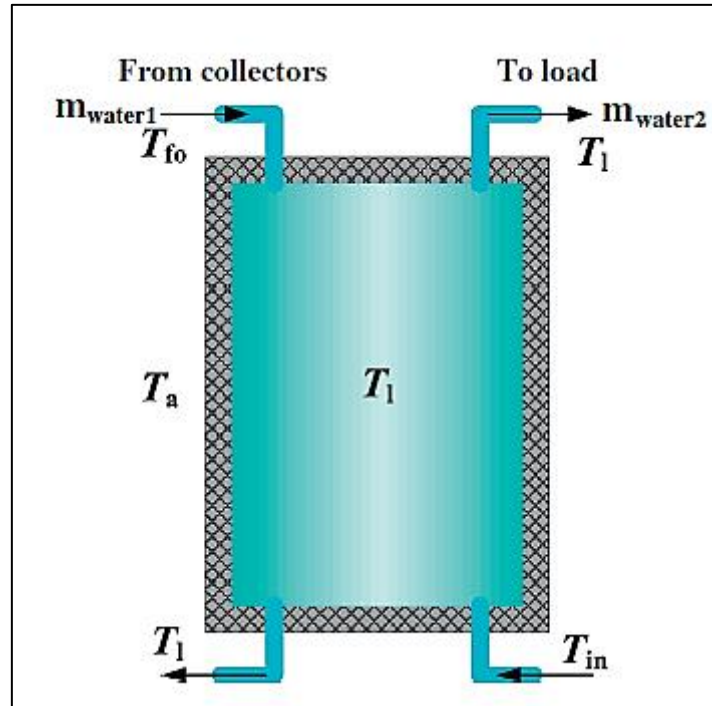
$$\frac{Q_u - Q_{load} - (UA)_t (T_1 - T_a)}{Q_u - Q_{load} - (UA)_t (T_{li} - T_a)} = \exp \left[- \frac{(UA)_t t}{(\rho V C_p)_e} \right] \quad (4.5)$$

όπου το άθροισμα των δύο θερμοχωρητικοτήτων αντικαθίσταται από το $(\rho C_p V)_e$ και ως αρχική συνθήκη λαμβάνουμε για $t=0$, $T_1=T_{li}$.

Επιπλέον τα Q_u και Q_{load} τα οποία αναπαριστούν το χρήσιμο κέρδος από τους ηλιακούς συλλέκτες και την ενέργεια που μεταφέρεται στο κύκλωμα της τριπαραγωγής, αντίστοιχα, μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$Q_u = m_{water} C_p (T_{fo} - T_1) \quad (4.6)$$

$$Q_{load} = m_{water2} C_p (T_1 - T_i) \quad (4.7)$$



Εικόνα 4.5: Μια δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας πλήρως αναμειγμένου υγρού [10]

4.5 Τροφοδοτική αντλία

Είναι εκείνη που καταθλίβει το εργαζόμενο μέσο στον εναλλάκτη θερμότητας (ατμοποιητής) και ανυψώνει την πίεση στην υψηλή επιθυμητή. Οι αντλίες πρέπει να είναι σε θέση να παρέχουν τη μέγιστη παροχή εργαζόμενου μέσου στον εναλλάκτη. Στις τροφοδοτικές αντλίες συνήθως διαφέρει το σημείο υπολογισμού από το σημείο βέλτιστου βαθμού απόδοσης, δεδομένου ότι το περισσότερο χρονικό διάστημα η αντλία δουλεύει σε φορτίο μικρότερου του μεγίστου. Από την τροφοδοτική αντλία έχουμε τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Να έχει όσο το δυνατόν καλύτερο βαθμό απόδοσης σε όσο το δυνατό ευρύτερη περιοχή φορτίου
- Γρήγορη εκκίνηση από ψυχρή σε θερμή κατάσταση
- Όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ασφάλεια λειτουργίας.

Ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης μιας αντλίας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\eta_p = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (4.8)$$

Η κατανάλωση ενέργειας μιας αντλίας δίνεται από τη σχέση:

$$W_p = \dot{m}_3 (h_2 - h_1) \quad (4.9)$$

όπου \dot{m}_3 η μάζα που διέρχεται μέσω της αντλίας.

Στη συγκεκριμένη ανάλυση, θεωρούμε ότι η αντλία προκαλεί αύξηση της πίεσης με αμελητέα αύξηση της θερμοκρασίας, διότι η συμπίεση αφορά οργανικό ρευστό σε υγρή μορφή και άρα η μεταβολή 1→2 μπορεί να θεωρηθεί ισενθαλπική και το έργο που καταναλώνει η αντλία είναι μηδενικό. [10]

4.6 Διβάθμιος στρόβιλος

Ο στρόβιλος είναι η συσκευή στην οποία θα εκτονωθεί το οργανικό μέσο για να παράγει την ισχύ. Το τέλος της εκτόνωσης, για τα «dry» ρευστά, βρίσκεται το μέσο σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού. Τα ισεντροπικά ρευστά, στο τέλος της εκτόνωσης είναι σε οριακή κατάσταση, ενώ τα «wet» ρευστά είναι στην διφασική περιοχή, δηλαδή υπάρχει υγρασιακό περιεχόμενο στον ατμό. [1paper]

Στην παρούσα εγκατάσταση θα χρησιμοποιηθεί στρόβιλος δύο βαθμίδων, με σκοπό την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης τριπαραγωγής. Στην περίπτωση αυτή, το εργαζόμενο στο στρόβιλο μέσο, δηλαδή το οργανικό ψυκτικό R410a αναθερμαίνεται προτού εισέλθει στη δεύτερη βαθμίδα του στρόβιλου. Η αύξηση των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του (θερμοκρασία και ενθαλπία) παρέχει τη δυνατότητα μεγαλύτερης εκτόνωσης και επιπλέον παραγόμενου έργου.

Στις περισσότερες εγκαταστάσεις, είναι επιθυμητό η αναθέρμανση να γίνεται με εκμετάλλευση της απορριπτόμενης στη συμπυκνωτή θερμότητας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως, η θερμότητα για την αναθέρμανση παρέχεται μέσω εναλλάκτη από το κύκλωμα των ηλιακών συλλεκτών, διότι η ενέργεια που αποβάλλεται στο συμπυκνωτή βρίσκεται σε θερμοκρασία μικρότερη από τη θερμοκρασία με την οποία εξέρχεται το εργαζόμενο μέσο από την πρώτη βαθμίδα του στρόβιλου.

Η εκτόνωση δεν είναι ισεντροπική και δίνεται για την πρώτη βαθμίδα στροβίλου από τη σχέση:

$$\eta_{T_1} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (4.10)$$

και για τη δεύτερη βαθμίδα στροβίλου από τη σχέση:

$$\eta_{T_2} = \frac{h_{11} - h_{12}}{h_{11} - h_{12s}} \quad (4.11)$$

Το συνολικό παραγόμενο έργο και η ισχύς του στροβίλου είναι:

$$w_T = \dot{m}_{33}[(h_3 - h_4) + (h_{11} - h_{12})] \quad (4.12)$$

όπου \dot{m}_{33} η μάζα του οργανικού ρευστού που εκτονώνεται στο διβάθμιο στρόβιλο.

Η θερμοκρασία στην έξοδο του στροβίλου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_{t_{out}} = T_{t_{in}} \left(\frac{P_{t_{out}}}{P_{t_{in}}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (4.13)$$

με

$$\frac{n-1}{n} = \eta_{p_r} \frac{\gamma-1}{\gamma} \quad (4.14)$$

όπου

$$\eta_{p_r} = -\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{\ln \left(1 - \eta_T \left(1 - \Pi_T^{-\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \right)}{\ln \Pi_T} \quad (4.15)$$

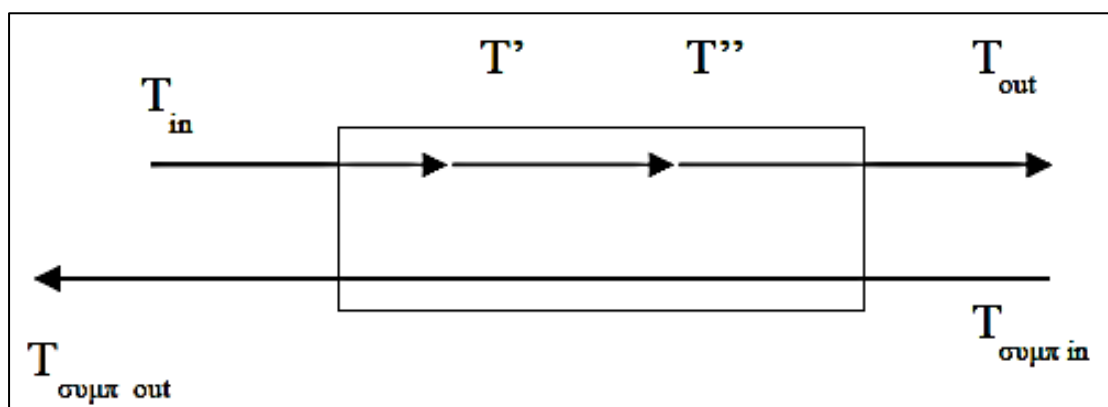
είναι ο πολυτροπικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου και Π_T είναι ο λόγος πίεσης ($p_{\text{εισόδου}}/p_{\text{εξόδου}}$). [13][31]

4.7 Συμπυκνωτής

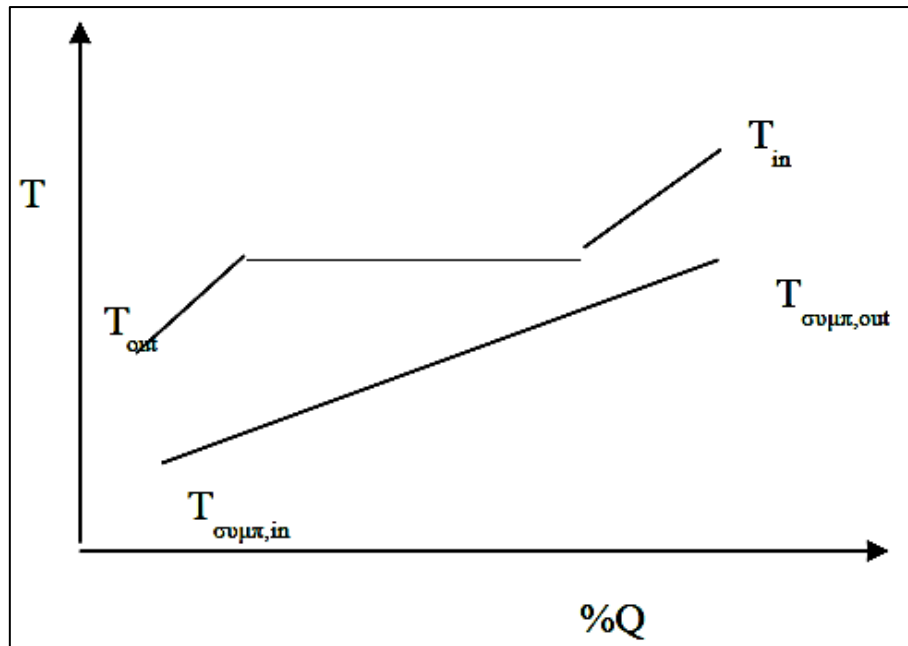
Σκοπός του συμπυκνωτή είναι να αποβάλει τη θερμότητα από τον ORC. Καθώς αποβάλλει την θερμότητα το οργανικό μέσο αλλάζει φάση και στην έξοδο του συμπυκνωτή βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Και σε αυτήν την περίπτωση μεγάλη σημασία έχει το pinch point. Μικρό pinch συνεπάγεται χαμηλότερη πίεση συμπύκνωσης με αποτέλεσμα να αυξάνεται το όριο εκτόνωσης και άρα η παραγωγή έργου. Καλό θα είναι η πίεση λειτουργίας του

συμπυκνωτή να είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική για να αποκλείεται η είσοδος του αέρα μέσα στον συμπυκνωτή. Το μέσο στην είσοδο του συμπυκνωτή βρίσκεται σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού. Καθώς αποβάλλει θερμότητα περνάει στην διφασική περιοχή και στην έξοδο του είναι σε κατάσταση κορεσμένου υγρού ή υπόψυκτου υγρού.

Για την μελέτη του θα χωριστεί σε τρεις περιοχές ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται το μέσο. Στην πρώτη περιοχή του υπέρθερμου ατμού, στην δεύτερη τη διφασική περιοχή και τέλος στο τμήμα του υπόψυκτου υγρού, (Εικόνα 4.4). Ενώ στην Εικόνα 4.5 παρουσιάζεται το προφίλ των θερμοκρασιών του οργανικού μέσου και του μέσου συμπύκνωσης. Ένας συμπυκνωτής βέβαια λειτουργεί ιδανικά όταν βγαίνει από την έξοδό του κορεσμένο υγρό.



Εικόνα 4.6: Ζώνες του συμπυκνωτή [32]



Εικόνα 4.7: Προφίλ θερμοκρασιών στον συμπυκνωτή [32]

Η ενεργειακή ανάλυση του συμπυκνωτή είναι παρόμοια με αυτήν του ατμοποιητή, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο, καθώς και ο συμπυκνωτής αποτελεί έναν εναλλάκτη θερμότητας, μόνο που σε αυτήν την περίπτωση το θερμό ρεύμα είναι το οργανικό μέσο και το ψυχρό είναι το μέσο συμπύκνωσης, έτσι προκύπτει:

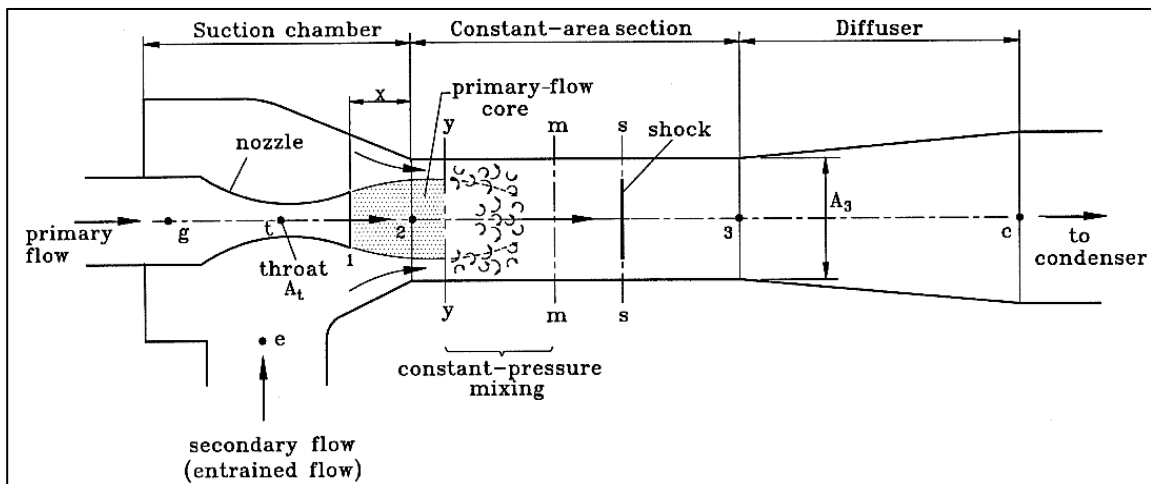
$$\dot{m}_{ORC} (h_5 - h_6) = \dot{m}_{\sigma\mu\pi\tau} (h_{\sigma\mu\pi\tau, out} - h_{\sigma\mu\pi\tau, in}) \quad (4.16)$$

4.8 Εγχυτήρας

Η ενσωμάτωση ενός εγχυτήρα (ejector) στις συμβατικές εγκαταστάσεις απορρόφησης εκτιμήθηκε ότι βελτιώνει τον αντίστοιχο, του συμβατικού κύκλου απορρόφησης, συντελεστή συμπεριφοράς COP κατά 1,6% έως 90,4%, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του ρέοντος ρευστού μέσα στον εγχυτήρα χρησιμοποιήθηκε η θεωρία των δύο διακεκριμένων ρευμάτων: α) του πρωτεύοντος που εκτονώνεται μέσα στο συγκλίνον/ αποκλίνον ακροφύσιο (Εικόνα 4.6) μέχρι την κρίσιμη πίεση που αντιστοιχεί στο δευτερεύον ρεύμα και β) του δευτερεύοντος ρεύματος που και αυτό εκτονώνεται ισεντροπικά μέχρι την εν λόγω πίεση. Τα δύο ρεύματα αναμιγνύονται υπό σταθερή πίεση και με ισχύουσα την αρχή διατηρήσεως της ορμής. Στη συνέχεια, το μίγμα των

δύο ρευμάτων συμπίεζεται μέσα σε συγκλίνον ακροφύσιο μέχρι κάποια πίεση, της οποίας η τιμή εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας, διατηρουμένης δε της ταχύτητας σε υπερηχητικό επίπεδο. Στη συνέχεια, η υπερηχητική ροή του μίγματος εισέρχεται σε αγωγό σταθερής διατομής και μεταπίπτει ακαριαίως σε υποηχητική ροή με ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης, δηλαδή δημιουργία κάθετου κρουστικού κύματος. Λόγω του μικρού εύρους της περιοχής αυτής, η ροή επιτρέπεται να θεωρηθεί χωρίς τριβές και ταυτοχρόνως αδιαβατική. [7]



Εικόνα 4.8: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του εγχυτήρα [12]

4.9 Εναλλάκτες θερμότητας

Ο εναλλάκτης θερμότητας αποτελείται από τρεις διακριτούς τομείς: τον προθερμαντήρα, τον ατμοποιητή και τον υπερθερμαντήρα. Σε πρώτη προσέγγιση η ενεργειακή ανάλυση που θα γίνει θεωρεί τον εναλλάκτη ως ενιαίο στοιχείο. Εναλλάκτες θερμότητας είναι οι συσκευές στις οποίες έχουμε μεταφορά ενέργειας, με τη μορφή θερμότητας, μεταξύ δύο ρευστών που βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες και διαχωρίζονται συνήθως από κάποιο τοίχωμα. Οι εναλλάκτες θερμότητας χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας, τον τύπο της ροής και την κατασκευαστική τους διάταξη.

Ανάλογα με τον τρόπο μεταφοράς θερμότητας, οι εναλλάκτες θερμότητας διακρίνονται σε εναλλάκτες άμεσης, έμμεσης ή ημιάμεσης μετάδοσης. Στους εναλλάκτες άμεσης μετάδοσης, η θερμότητα μεταφέρεται από το θερμό ρευστό στο ψυχρό με άμεση επαφή ή ανάμιξη των δύο ρευστών. Οι πύργοι ψύξης του νερού των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαρακτηριστικό δείγμα αυτού του τύπου εναλλακτών.

Στους εναλλάκτες έμμεσης μετάδοσης, το θερμό και το ψυχρό ρευστό ρέουν ταυτόχρονα μέσα στον εναλλάκτη, διαχωρίζονται δε από ενδιάμεσα τοιχώματα μέσω των οποίων και γίνεται η μεταφορά θερμότητας. Η πλειοψηφία των εμπορικών εναλλακτών ανήκουν στην κατηγορία αυτή, γι' αυτό και αναφέρονται ως εναλλάκτες κλασσικού τύπου. Οι ατμολέβητες, οι συμπυκνωτές τα θερμαντικά σώματα είναι χαρακτηριστικά δείγματα εναλλακτών έμμεσης μετάδοσης.

Οι εναλλάκτες ημιάμεσης μετάδοσης είναι διατάξεις στις οποίες η ίδια επιφάνεια θέρμανσης εκτίθεται διαδοχικά στο θερμό και το ψυχρό ρευστό. Η επιφάνεια αυτή απάγει και αποθηκεύει θερμότητα από το θερμό ρευστό όταν βρίσκεται σε επαφή μ' αυτό. Όταν στη συνέχεια διακοπεί η ροή του θερμού ρευστού και ακολουθήσει η ροή του ψυχρού, η επιφάνεια αποδίδει στο ψυχρό ρευστό την αποθηκευμένη θερμότητα. Οι εναλλάκτες αυτού του τύπου είναι γνωστοί σαν αναγεννητές. Οι προθερμαντές αέρα τύπου Ljungstrom είναι ένα χαρακτηριστικό δείγμα εναλλακτών ημιάμεσης μετάδοσης.

4.9.1 Λειτουργία Ατμοποιητή

Ο ατμοποιητής είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας και συνήθως αποτελείται από διαφορετικούς διακριτούς τομείς. Η ενεργειακή ανάλυση που θα γίνει θεωρεί τον εναλλάκτη ως ενιαίο στοιχείο. Το ποσό της ενέργειας που αφαιρείται από το θερμικό έλαιο υπολογίζεται από την επόμενη σχέση:

$$Q_{exh} = \dot{m}_{exh} C_p (T_{ex,in} - T_{ex,out}) \quad (4.17)$$

όπου:

Q_{exh} : η ενέργεια που εξάγεται από τα καυσαέρια (J/kg)

\dot{m}_{exh} : παροχή θερμικού ελαίου (kg/s)

C_p : ειδική θερμοχωρητικότητα (J/kg °C)

T_{exh} : θερμοκρασία ρευμάτων (°C)

Επιπλέον η θερμοκρασία του θερμικού ελαίου μετά τον εναλλάκτη πρέπει να είναι συμβατή με το κρίσιμο σημείο του εναλλάκτη (pitch point). Σύμφωνα με

αυτή την απαίτηση η θερμοκρασία του θερμικού ελαίου μετά των εναλλάκτη πρέπει να είναι το λιγότερο 10°C υψηλότερη από την θερμοκρασία εισόδου του θερμικού μέσου στον εναλλάκτη δηλαδή:

$$T_{ex,out} \geq T_2 + 10^{\circ} \text{C} \quad (4.18)$$

όπου T_2 είναι η θερμοκρασία εισόδου του θερμικού μέσου στον εναλλάκτη.

Προφανώς για να διασφαλιστεί η μεταφορά θερμότητας από την θερμή στη κρύα πλευρά του εναλλάκτη, η θερμοκρασία του θερμού ρευστού θα πρέπει να είναι υψηλότερη από αυτή του κρύου καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Όταν η θερμοκρασία του θερμικού ελαίου είναι μικρή, η συναλλαγή θερμότητας διασφαλίζεται μειώνοντας την πίεση στην τροφοδοτική αντλία του κυκλώματος επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο μικρότερη θερμοκρασία εργαζόμενου μέσου. Στον ατμοποιητή το θερμικό μέσο μετατρέπεται σε κορεσμένο ατμό και κατευθύνεται για να εισέλθει στον εκτονωτή σε κατάσταση T_{in}, P_{in} . Ο ενεργειακός ισολογισμός έχει ως ακολούθως:

$$Q_H = \dot{m}_{wfl} (h_{in} - h_2) \quad (4.19)$$

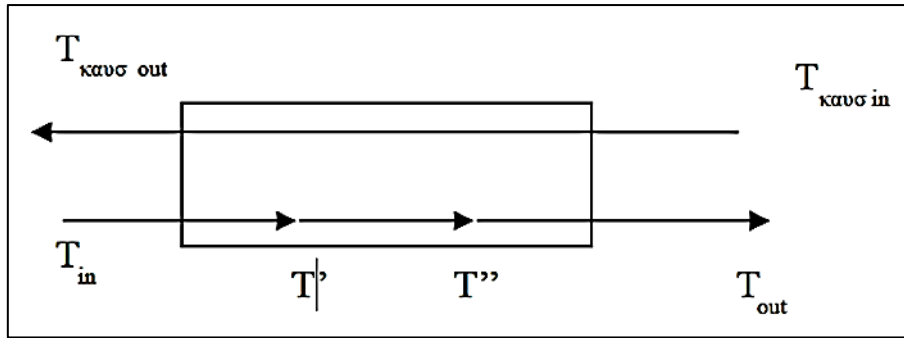
όπου:

Q_H : Ανακτηθείσα θερμική ενέργεια που ανακτάται από το θερμικό έλαιο

h_{in}, h_2 : ειδική ενθαλπία του θερμικού μέσου πριν και μετά τον ατμοποιητή (J/kg) [20]

4.9.2 Λειτουργία ατμοποιητή

Ο ρόλος του ατμοποιητή είναι να παράγει ψύξη στο χώρο που μας ενδιαφέρει. Το μέσο εισέρχεται σε υγρή κατάσταση και υψηλή πίεση στον ατμοποιητή και εξέρχεται σε υψηλή πίεση και σε κατάσταση ατμού. Για την ανάλυση του ατμοποιητή θα τον χωρίσουμε σε τρία μέρη ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται το οργανικό μέσο: στο μέρος όπου το μέσο βρίσκεται μόνο σε υγρή κατάσταση, στο τμήμα που βρίσκεται σε διφασική κατάσταση και στο τμήμα όπου το μέσο βρίσκεται σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού. Ο διαχωρισμός αυτός παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.7.



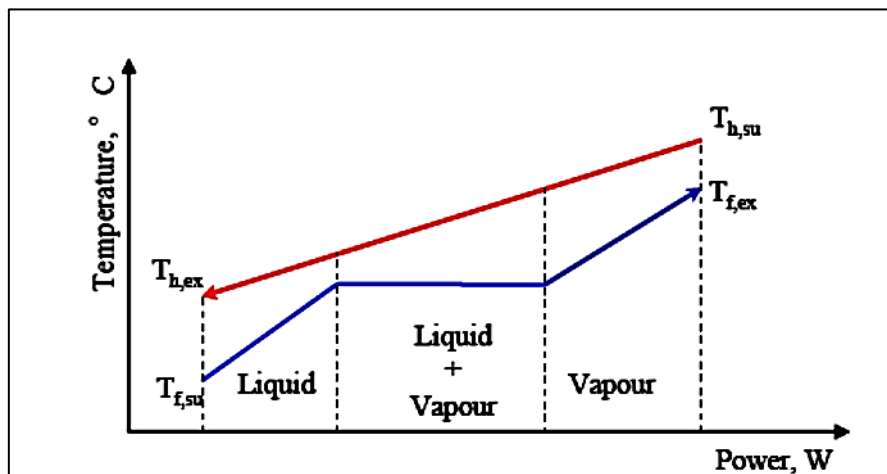
Εικόνα 4.9: Ζώνες του εξατμιστή [32]

Στο τμήμα $T_{in} - T'$, το μέσο βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, στο τμήμα $T' - T''$ το μέσο βρίσκεται σε κατάσταση αλλαγής φάσης, ενώ στο τμήμα $T'' - T_{out}$ το οργανικό μέσο βρίσκεται σε κατάσταση ατμού.

Για τον εναλλάκτη, έχουμε σταθεροποιημένη ροή και αδιαβατική διεργασία, και ισχύει:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \Rightarrow \dot{m}_{ORC} (h_{out} - h_{in}) = \dot{m}_{air} (h_{air,in} - h_{air,out}) \quad (4.20)$$

Στην Εικόνα 4.8 φαίνεται το προφίλ θερμοκρασίας του μέσου και του ψυχόμενου αέρα.



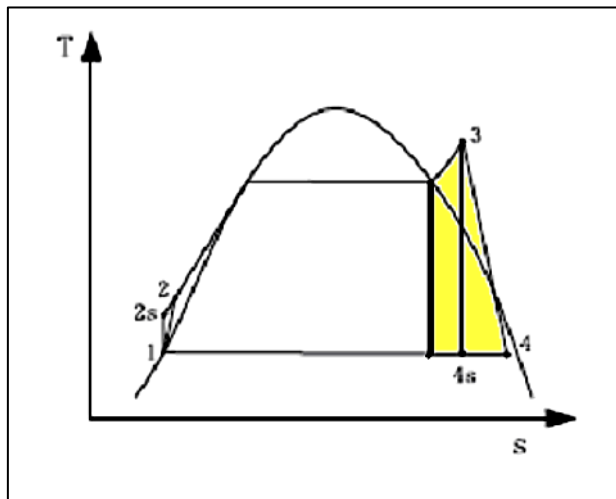
Εικόνα 4.10: Προφίλ θερμοκρασιών ψυκτικού μέσου και ψυχόμενου αέρα [5]

Όπως αναφέρθηκε, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας (pinch point) των δύο μέσων, η οποία είναι η διαφορά θερμοκρασίας του ψυχόμενου αέρα και της θερμοκρασίας βρασμού του μέσου

στην πίεση του εναλλάκτη. Το pinch point είναι σημαντική παράμετρος στον σχεδιασμό συστημάτων ORC. Αυτή η διαφορά πρέπει να είναι θετική για να κάνει δυνατό τον εναλλάκτη. Πολύ μικρή τιμή του pinch point συνεπάγεται πιο δύσκολη εναλλαγή θερμότητας με αποτέλεσμα μεγαλύτερο εναλλάκτη. Η απόδοση του εναλλάκτη αυξάνεται, διότι το προφίλ του μέσου προσεγγίζει καλύτερα το προφίλ της θερμοκρασίας του αέρα, και οδηγούμαστε σε μεγαλύτερη ανάκτηση θερμότητας στον ατμοποιητή. Μεγάλη τιμή του pinch point οδηγεί σε μικρότερους και οικονομικότερους ατμοποιητές. Μηδενική τιμή συνεπάγεται άπειρη επιφάνεια συναλλαγής.

Για τα ψυκτικά, ένας καλός κανόνας για το pinch point είναι περίπου 5~10 K. Στις εφαρμογές ORC το pinch point είναι στενά συνδεδεμένο από τον τύπο του συστήματος και από την θερμοκρασία του θερμοδοχείου.

Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω, ο εναλλάκτης χωρίζεται σε τρεις ζώνες. Η ζώνη της υπερθέρμανσης εξαρτάται από το τύπο του μέσου, δηλαδή εάν είναι «wet», «dry» ή ισεντροπικό. Στα «wet» ρευστά η υπερθέρμανση είναι απαραίτητη διότι αυξάνει τον βαθμό απόδοσης του κύκλου και μειώνει την περιοχή έκθεσης του εκτονωτή σε σταγονίδια, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.11: Αύξηση του έργου και μείωση του υγρασιακού περιεχομένου λόγω της υπερθέρμανσης σε ORC με «wet» οργανικό μέσο [20]

Για τα «dry» ρευστά η υπερθέρμανση επιδρά αρνητικά στον βαθμό απόδοσης ενός κύκλου ORC και δεν συστήνεται. Για τα ισεντροπικά ρευστά η υπερθέρμανση είναι αδιάφορη. [8][14]

4.10 Σενάριο αναφοράς

Παραδοχές

- ➔ Η παρούσα εγκατάσταση λειτουργεί θεωρώντας ότι λαμβάνουμε από το υποσύστημα των ηλιακών συλλεκτών σταθερό ποσό ενέργειας $Q_u = 199 \text{ kW}$ για χρήση στο κύκλωμα της τριπαραγωγής και σταθερό $Q_{\text{αναθέρμανσης}} = 23.9 \text{ kW}$ για την πραγματοποίηση της αναθέρμανσης πριν την είσοδο του εργαζόμενου μέσου στη δεύτερη βαθμίδα του στροβίλου.
- ➔ Η μάζα του νερού στους συλλέκτες για το είναι 0.5 kg/s , εισέρχεται στους σωλήνες με θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$ και εξέρχεται με θερμοκρασία $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού έχει ληφθεί ίση με $C_{pw} = 4.187 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$. Θεωρούμε ότι η εγκατάσταση λειτουργεί συνεχώς με σταθερό προσδιδόμενο ποσό ενέργειας, αφού όταν οι ηλιακοί συλλέκτες δε λειτουργούν (νύχτα) ή όταν έχουν μειωμένη απόδοση (ημέρες με νέφωση), το επιπλέον ποσό θερμότητας λαμβάνεται από το βοηθητικό θερμαντήρα με καύση φυσικού αερίου.
- ➔ Η μάζα του νερού που οδηγείται στο κύκλωμα της αναθέρμανσης είναι 0.06 kg/s , εισέρχεται στους σωλήνες με θερμοκρασία $25 \text{ }^\circ\text{C}$ και εξέρχεται με θερμοκρασία $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού έχει ληφθεί ίση με $C_{pw} = 4.187 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$.
- ➔ Η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για να θερμάνει το οργανικό ρευστό της τριπαραγωγής, μέσω του ατμοποιητή. Θεωρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης του ατμοποιητή είναι $\eta_{\text{εναλ}} = 0.9$. Η πίεση λειτουργίας είναι 30 bar . Η θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τον ατμοποιητή είναι $T_3 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, ενώ η μάζα εξαρτάται από την περίπτωση λειτουργίας:
 - Στην περίπτωση συμπαραγωγής θέρμανση- ηλεκτρισμού (περίπτωση χειμώνα), η μάζα του ORC που διέρχεται από τον ατμοποιητή είναι $m_{3\theta} = 0.868 \text{ kg/s}$
 - Στην περίπτωση συμπαραγωγής ψύξης-ηλεκτρισμού (περίπτωση καλοκαιριού) η μάζα του ORC που διέρχεται από τον ατμοποιητή είναι $m_{3\psi} = 0.626 \text{ kg/s}$ και η θερμοκρασία εισόδου στον ατμοποιητή είναι $T_{2\psi} = -8.85 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - Στην περίπτωση παραγωγής μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (περίπτωση άνοιξης και φθινοπώρου) η μάζα του ORC που διέρχεται από τον

ατμοποιητή είναι $m_{3H} = 0.626 \text{ kg/s}$ και η θερμοκρασία εισόδου στον ατμοποιητή είναι $T_{2\psi} = -8.85 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Στην περίπτωση συμπαραγωγής θέρμανσης- ηλεκτρισμού και στην περίπτωση συμπαραγωγής ψύξης-ηλεκτρισμού θεωρούμε ότι το 40% της μάζας για παραγωγή θέρμανσης και ψύξης, αντίστοιχα, και το υπόλοιπο 60% θα οδηγηθεί στο στρόβιλο για παραγωγή ηλεκτρισμού.
- Θεωρούμε ότι η πίεση του ρεύματος στην έξοδο του εγχυτήρα (σημείο 9) είναι ίση με την πίεση του ρεύματος εξόδου από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης (σημείο 12), ώστε να μπορεί να γίνει η ανάμειξη. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλης γεωμετρίας του εγχυτήρα.
- Το λόγος των θερμοχωρητικοτήτων $\gamma = C_p / C_v$ θεωρείται ίσος με 5.28.
- Κατά το σχεδιασμό του υπό μελέτη συστήματος όμως θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχει πτώση πίεσης κατά τη ροή του οργανικού ψυκτικού εντός των σωληνώσεων και των εναλλακτών θερμότητας.
- Για τους βαθμούς απόδοσης της εγκατάστασης έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές:
 - ισεντροπικός βαθμός απόδοσης στροβίλου υψηλής πίεσης και στροβίλου χαμηλής πίεσης: $\eta_{Tis} = 0.7$
 - βαθμός απόδοσης γεννήτριας: $\eta_G = 0.98$
 - βαθμός απόδοσης εναλλάκτη: $\eta_{\text{εναλ}} = 0.9$
- Μετά τη στραγγαλιστική βαλβίδα η πίεση είναι 1 bar.

Συμπαραγωγή θέρμανσης-ηλεκτρισμού

Το R410a εισέρχεται στο θερμαντήρα και στο στρόβιλο με $T_3 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ και πίεση 30 bar. Η παραγόμενη θέρμανση είναι $Q_{\text{heat}} = 27.02 \text{ kW}$ και ο παραγόμενος ηλεκτρισμός είναι $W_{\text{el}} = 10.82 \text{ kW}$, αντίστοιχα. Η αποβαλλόμενη στο συμπυκνωτή θερμότητα είναι $Q_{\text{συμπυκνωτή}} = 154.81 \text{ kW}$.

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος για συμπαραγωγή θέρμανσης – ηλεκτρισμού είναι $\eta_{\Theta-H} = (Q_{\text{heat}} + W_{\text{el}}) / Q_u = 0.19$ ή 19%.

Συγκεντρωτικά η λειτουργία του συστήματος για συμπαραγωγή θέρμανσης-ηλεκτρισμού (περίπτωση χειμώνα) φαίνεται στον Πίνακα

Πίνακας 4.1: Συνθήκες Λειτουργίας του Κύκλου για Συμπαραγωγή Θέρμανσης – Ηλεκτρισμού (Κατά το χειμώνα)

Ηλιακοί Συλλέκτες			
Παροχή μάζας νερού	\dot{m}_w	0.5	kg/s
Θερμοκρασία εισόδου νερού	$T_{\text{εισόδου}}$	25	°C
Θερμοκρασία εξόδου νερού	$T_{\text{εισόδου}}$	120	°C
Προσδιδόμενη θερμότητα	Q_u	199	kW
Παροχή μάζας νερού για αναθέρμανση	\dot{m}_{w2}	0.06	kg/s
Προσδιδόμενη θερμότητα αναθέρμανσης	$Q_{\text{αναθέρμανσης}}$	23.9	kW
Ατμοποιητής (2→3)			
Παροχή μάζας	\dot{m}	0.868	kg/s
Πίεση	$p_2=p_3$	30	bar
Θερμοκρασία εξόδου	T_3	80	°C
Θερμαντήρας (31→10)			
Παροχή μάζας	\dot{m}_{31}	0.363	kg/s
Πίεση	$p_{31}=p_{10}$	30	bar
Θερμοκρασία εισόδου	T_{31}	80	°C
Θερμοκρασία εξόδου	T_{10}	37	°C
Παραγόμενη θέρμανση	Q_{heat}	27.02	kW
Στρόβιλος (33→4 και 11→12)			
Παροχή μάζας	\dot{m}_{33}	0.545	kg/s
Πίεση εισόδου στην πρώτη βαθμίδα	p_{33}	30	bar
Λόγος πίεσης στην πρώτη βαθμίδα	Π_{T1}	3	-
Πίεση εισόδου στη δεύτερη βαθμίδα	p_{11}	10	bar
Λόγος πίεσης στη δεύτερη βαθμίδα	Π_{T2}	1.67	-
Συνολικός λόγος πίεσης στρόβιλου	$\Pi_T = \Pi_{T1} * \Pi_{T2}$	5	-
Πίεση εξόδου	P_4	6	bar
Θερμοκρασία εισόδου	T_{31}	80	°C
Θερμοκρασία εξόδου	T_{12}	61.01	°C
Παραγόμενος ηλεκτρισμός	W_{el}	10.82	kW
Συμπυκνωτής (12→6)			
Παροχή μάζας	\dot{m}_{33}	0.545	kg/s
Πίεση λειτουργίας	$P_{12}=P_6$	6	bar
Θερμοκρασία εισόδου	T_{12}	61.01	°C
Θερμοκρασία εξόδου	T_6	-8.85	°C
Αποβαλλόμενη θερμότητα	$Q_{\text{συμπυκνωτή}}$	154.81	kW
Αναγεννητής			
Παροχή μάζας	\dot{m}_3	0.868	kg/s
Πίεση λειτουργίας	$P_1=P_2$	30	bar
Θερμοκρασία εισόδου του ρεύματος 1 από την αντλία	T_1	-8.85	°C
Θερμοκρασία εισόδου του ρεύματος 10 από το θερμαντήρα	T_{10}	37	°C
Βαθμός απόδοσης συμπαραγωγής θέρμανσης-ηλεκτρισμού	$\eta_{\text{χειμώνα}}$	0.19	

Συμπαραγωγή ψύξης-ηλεκτρισμού

Η παραγωγή ψύξης γίνεται σε πίεση 1bar καθώς το εργαζόμενο μέσο έχει διέλθει από τη στραγγαλιστική βαλβίδα. Η παραγόμενη ψύξη είναι $Q_{\text{cold}}=50.54$ kW. Η μάζα που εκτονώνεται στο στρόβιλο παράγει ηλεκτρική ενέργεια $W_{\text{el}}=7.80$ kW. Η αποβαλλόμενη στο συμπυκνωτή θερμότητα είναι $Q_{\text{συμπυκνωτή}}=258$ kW.

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος για συμπαραγωγή ψύξης –ηλεκτρισμού είναι $\eta_{\psi\text{-H}} = (Q_{\text{cold}} + W_{\text{el}})/Q_{\text{u}}=0.29$ ή 29%.

Συγκεντρωτικά η λειτουργία του συστήματος για συμπαραγωγή ψύξης-ηλεκτρισμού (περίπτωση καλοκαιριού) φαίνεται στον Πίνακα

Πίνακας 4.2: Συνθήκες Λειτουργίας του Κύκλου για Συμπαραγωγή Ψύξης – Ηλεκτρισμού (Κατά το καλοκαίρι)

Ηλιακοί Συλλέκτες			
Παροχή μάζας νερού κύριου κυκλώματος	\dot{m}_w	0.5	kg/s
Θερμοκρασία εισόδου νερού	$T_{\text{εισόδου}}$	25	°C
Θερμοκρασία εξόδου νερού	$T_{\text{εισόδου}}$	120	°C
Προσδιδόμενη θερμότητα	Q_u	199	kW
Παροχή μάζας νερού για αναθέρμανση	\dot{m}_{w2}	0.06	kg/s
Προσδιδόμενη θερμότητα αναθέρμανσης	$Q_{\text{αναθέρμανσης}}$	23.9	kW
Ατμοποιητής (2→3)			
Παροχή μάζας	\dot{m}	0.626	kg/s
Πίεση	$P_2=P_3$	30	bar
Θερμοκρασία εξόδου	T_3	80	°C
Ατμοποιητής (7→8)			
Παροχή μάζας	$\dot{m}_{\text{ανακ}}$	0.242	kg/s
Πίεση	$P_7=P_8$	1	bar
Θερμοκρασία εισόδου	T_7	-8.85	°C
Θερμοκρασία εξόδου	T_8	-8.85	°C
Παραγόμενη ψύξη	Q_{cold}	50.54	kW
Στροβίλος (33→4 και 11→12)			
Παροχή μάζας	\dot{m}_{33}	0.375	kg/s
Πίεση εισόδου στην πρώτη βαθμίδα	P_{33}	30	bar
Λόγος πίεσης στην πρώτη βαθμίδα	Π_{T1}	3	-
Πίεση εισόδου στη δεύτερη βαθμίδα	p_{11}	10	bar
Λόγος πίεσης στη δεύτερη βαθμίδα	Π_{T2}	1.67	-
Συνολικός λόγος πίεσης στροβίλου	$\Pi_T = \Pi_{T1} * \Pi_{T2}$	5	-
Πίεση εξόδου	P_4	6	bar
Θερμοκρασία εισόδου	T_{31}	80	°C
Θερμοκρασία εξόδου	T_{12}	61.01	°C
Παραγόμενος ηλεκτρισμός	W_{el}	7.8	kW
Συμπυκνωτής (12→6)			
Παροχή μάζας	\dot{m}_3	0.868	kg/s
Πίεση λειτουργίας	$P_{12}=P_6$	6	bar
Θερμοκρασία εισόδου	T_{12}	24	°C
Θερμοκρασία εξόδου	T_6	-8,74	°C
Αποβαλλόμενη θερμότητα	$Q_{\text{συμπυκνωτή}}$	258.02	kW
Βαθμός απόδοσης συμπαραγωγής ψύξης-ηλεκτρισμού	$\eta_{\text{καλοκαίρι}}$	0.29	

Παραγωγή μόνο ηλεκτρισμού

Στην περίπτωση αυτή όλη η μάζα εκτονώνεται στο στρόβιλο ως τα 6 bar και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι: $W_{elH} = 13 \text{ kW}$. Η αποβαλλόμενη στο συμπυκνωτή θερμότητα είναι $Q_{\text{συμπυκνωτή}} = 186 \text{ kW}$.

Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος για απλή παραγωγή ηλεκτρισμού είναι $\eta_H = W_{el}/Q_u = 0.065$ ή 6.5%.

Συγκεντρωτικά η λειτουργία του συστήματος για απλή παραγωγή ηλεκτρισμού (περίπτωση άνοιξης- φθινοπώρου) φαίνεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Συνθήκες Λειτουργίας του Κύκλου για Παραγωγή μόνο Ηλεκτρισμού (Κατά το φθινόπωρο και την άνοιξη)

Ηλιακοί Συλλέκτες			
Παροχή μάζας νερού	\dot{m}_{w2}	0.5	kg/s
Θερμοκρασία εισόδου νερού	$T_{\text{εισόδου}}$	25	°C
Θερμοκρασία εξόδου νερού	$T_{\text{εισόδου}}$	120	°C
Προσδιδόμενη θερμότητα	Q_u	199	kW
Παροχή μάζας νερού για αναθέρμανση	\dot{m}_{w2}	0.06	kg/s
Προσδιδόμενη θερμότητα αναθέρμανσης	$Q_{\text{αναθέρμανσης}}$	23.9	kW
Ατμοποιητής (2→3)			
Παροχή μάζας	\dot{m}	0.626	kg/s
Πίεση	$P_2=P_3$	30	bar
Θερμοκρασία εξόδου	T_3	80	°C
Στρόβιλος (33→4 και 11→12)			
Παροχή μάζας	\dot{m}_3	0.626	kg/s
Πίεση εισόδου στην πρώτη βαθμίδα	P_{33}	30	bar
Λόγος πίεσης στην πρώτη βαθμίδα	Π_{T1}	3	-
Πίεση εισόδου στη δεύτερη βαθμίδα	p_{11}	10	bar
Λόγος πίεσης στη δεύτερη βαθμίδα	Π_{T2}	1.67	-
Συνολικός λόγος πίεσης στρόβιλου	$\Pi_T = \Pi_{T1} * \Pi_{T2}$	5	-
Πίεση εξόδου	P_4	6	bar
Θερμοκρασία εισόδου	T_{31}	80	°C
Θερμοκρασία εξόδου	T_{12}	61.01	°C
Παραγόμενος ηλεκτρισμός	W_{el}	13.00	kW
Συμπυκνωτής (12→6)			
Παροχή μάζας	\dot{m}_3	0.626	kg/s
Πίεση λειτουργίας	$P_{12}=P_6$	6	bar
Θερμοκρασία εισόδου	T_{12}	24	°C
Θερμοκρασία εξόδου	T_6	-8,74	°C
Αποβαλλόμενη θερμότητα	$Q_{\text{συμπυκνωτή}}$	186.01	kW
Βαθμός απόδοσης παραγωγής μόνο ηλεκτρισμού	$\eta_{\text{άνοιξη-φθινόπωρο}}$	0.065	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Παραμετρική ανάλυση της εγκατάστασης

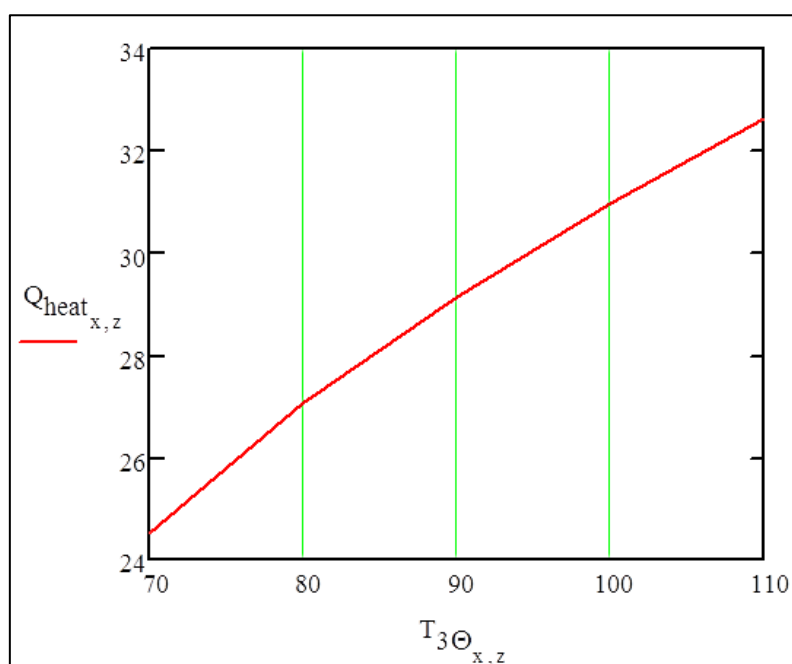
5.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα μελετηθεί η συμπεριφορά του κύκλου, όταν μεταβάλλονται ορισμένες παράμετροι του συστήματος. Συγκεκριμένα θα εξεταστεί η μεταβολή των επιδόσεων του συστήματος σε κάθε κατάσταση λειτουργίας και αντίστοιχα ο βαθμός απόδοσης του συστήματος. Τα λεπτομερή στοιχεία της παραμετρικής ανάλυσης ακολουθούν στο Παράρτημα της εργασίας.

5.2 Επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο στις επιδόσεις και στην απόδοση του συστήματος

5.2.1 Συμπαγωγή θέρμανσης- ηλεκτρισμού (λειτουργία χειμώνα)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.1 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο στην παραγόμενη θέρμανση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η θερμοκρασία εισόδου του ρευστού στο στρόβιλο είναι ίση με τη θερμοκρασία εξόδου του ρευστού από τον ατμοποιητή.



Εικόνα 5.1: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης θέρμανσης (Q_{heat}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)

Από το συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρούμε ότι καθώς η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο αυξάνεται, αυξάνεται και το ποσό της παραγόμενης θέρμανσης. Αυτό οφείλεται στο ότι, καθώς η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο αυξάνεται, αυξάνεται αντίστοιχα και η ενθαλπία του ψυκτικού στην έξοδο του ατμοποιητή. Κατά συνέπεια, η διαφορά ενθαλπίας του ψυκτικού στον ατμοποιητή αυξάνεται. Με ενεργειακό ισολογισμό στον ατμοποιητή προκύπτει ότι η παροχή μάζας του ατμού μειώνεται.

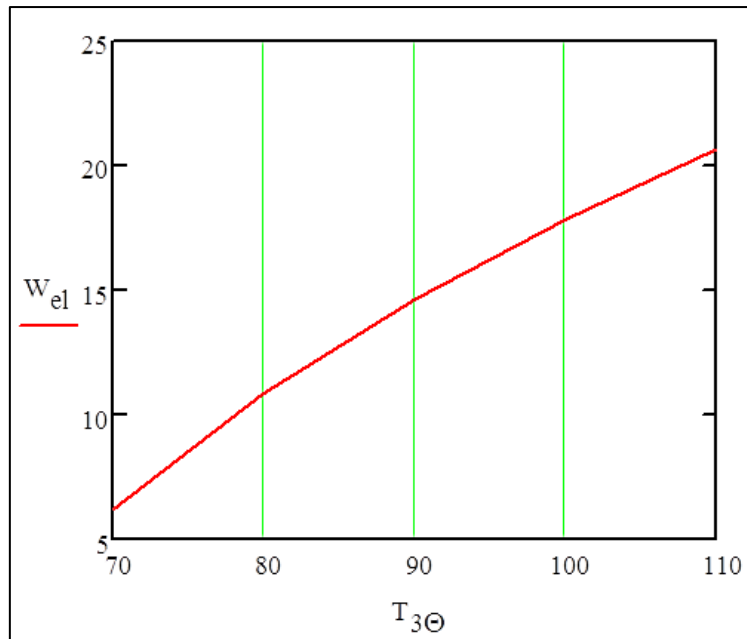
Η αύξηση όμως της ενθαλπίας εισόδου στο θερμαντήρα αντισταθμίζει τη μείωση της μάζας και άρα η παραγόμενη θέρμανση αυξάνεται, αφού η θερμοκρασία εξόδου από το θερμαντήρα διατηρείται σταθερή.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη θέρμανση στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο

Θερμαντήρας (31→10)				
Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\theta}$)	Ενθαλπία εισόδου R410a (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου R410a (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη Θέρμανση (kW)
70	461.20	387.82	0.371	24.48
80	474.33		0.347	27.02
90	486.76		0.327	29.15
100	498.74		0.31	30.98
110	510.42		0.295	32.60

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.2 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 5.2: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (W_{el}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)

Από το διάγραμμα της Εικόνας 5.2 παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, αυξάνεται και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην αύξηση της ενθαλπίας εισόδου στο στρόβιλο, τόσο στη βαθμίδα υψηλής πίεσης όσο και στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης, λόγω της αναθέρμανσης.

Παρόλο που, η μάζα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, όπως ήδη αναφέρθηκε, η αύξηση της ενθαλπίας αποτελεί σημαντικότερο παράγοντα και, εν τέλει, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)						
Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\theta}$)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη ηλεκτρικισμός (kW)
70	461.20	460.82	489.36	478.41	0.556	10.82
80	474.33	466.73	499.16	485.55	0.521	11.96
90	486.76	472.62	508.98	492.73	0.491	13.1
100	498.74	478.50	518.85	499.96	0.466	14.23
110	510.42	484.40	528.78	507.25	0.443	15.38

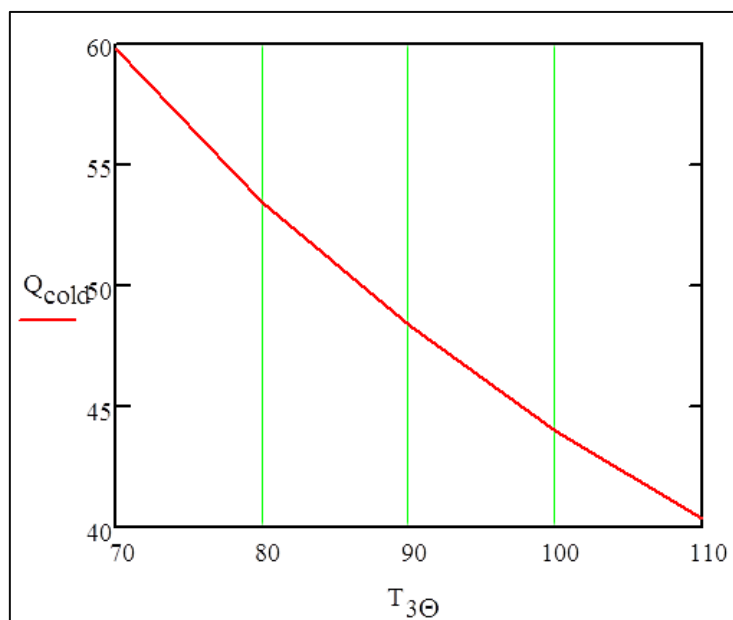
Ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης αυξάνεται, καθώς αυξάνεται τόσο η παραγόμενη θέρμανση όσο και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο

Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\theta}$)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Χειμώνα
70	0.154
80	0.19
90	0.22
100	0.246
110	0.268

5.2.2 Συμπαγωγή ψύξης- ηλεκτρισμού (λειτουργία καλοκαιριού)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.3 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο στην παραγόμενη ψύξη.



Εικόνα 5.3: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ψύξης (Q_{cold}) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο, η παραγόμενη ψύξη μειώνεται.

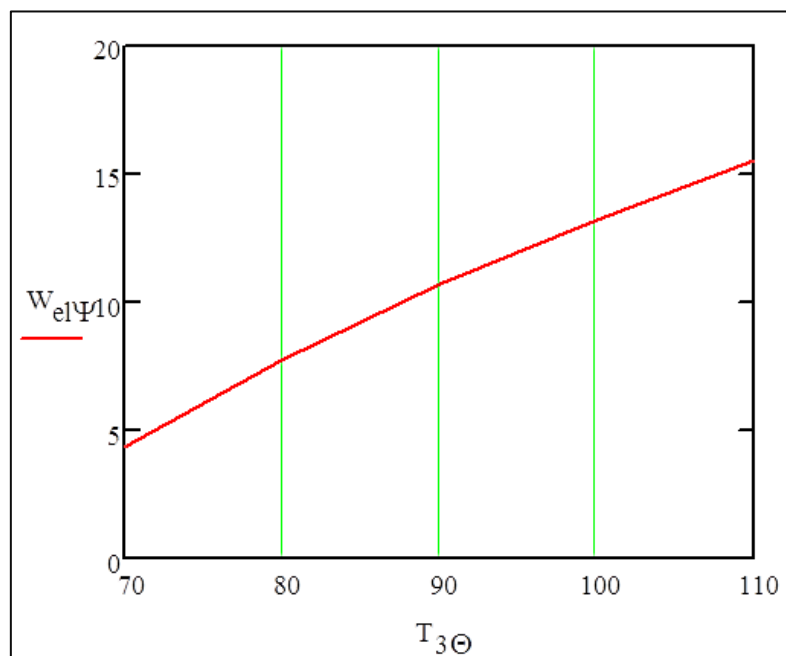
Η μείωση αυτή οφείλεται στη μείωση της μάζας ανακυκλοφορίας, η οποία διέρχεται από τον ατμοποιητή και παράγει την ψύξη. Στον ατμοποιητή θεωρούμε ότι το ψυκτικό εισέρχεται ως κορεσμένο υγρό και εξέρχεται ως κορεσμένος ατμός, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ψύξη στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο

Ατμοποιητής (7→8)				
Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)	Ενθαλπία εισόδου R410a (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου R410a (kJ/kg)	Παροχή μάζας ανακυκλοφορίας (kg/s)	Παραγόμενη Ψύξη (kW)
70	188.19	433.40	0.271	59.82
80			0.242	53.44
90			0.219	48.30
100			0.199	44.03
110			0.183	40.39

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.4 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 5.4: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ($W_{ελψ}$) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο, αυξάνεται και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια τόσο από το στρόβιλο υψηλής πίεσης όσο και από το στρόβιλο χαμηλής πίεσης. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της ενθαλπίας εισόδου στις βαθμίδες του στροβίλου, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας, η οποία αντισταθμίζει τη μείωση της μάζας.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)						
Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\theta}$)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενος ηλεκτρισμός (kW)
70	461.20	460.82	489.36	478.41	0.393	4.36
80	474.33	466.73	499.16	485.55	0.375	7.80
90	486.76	472.62	508.98	492.73	0.360	10.72
100	498.74	478.50	518.85	499.96	0.346	13.26
110	510.42	484.40	528.78	507.25	0.333	15.53

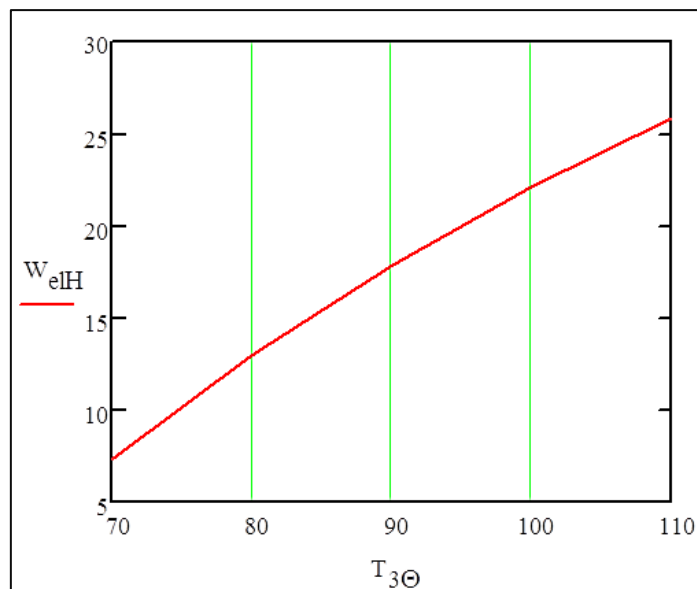
Ο βαθμός απόδοσης μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο, καθώς η μείωση της παραγόμενης ψύξης είναι πολύ μεγαλύτερη από την αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο

Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Καλοκαιριού
70	0.323
80	0.308
90	0.297
100	0.288
110	0.281

5.2.3 Παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.5 παρουσιάζεται η μεταβολή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο.



Εικόνα 5.5: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (W_{elH}) κατά τη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου ως προς τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο. Όπως και στις

προηγούμενες περιπτώσεις, η αύξηση αυτή οφείλεται στην αύξηση της ενθαλπίας εισόδου στο στρόβιλο, η οποία αντισταθμίζει τη μείωση της μάζας.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)						
Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\theta}$)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενος ηλεκτρισμός (kW)
70	461.20	460.82	489.36	478.41	0.656	7.27
80	474.33	466.73	499.16	485.55	0.626	13.00
90	486.76	472.62	508.98	492.73	0.6	17.86
100	498.74	478.50	518.85	499.96	0.576	22.10
110	510.42	484.40	528.78	507.25	0.555	25.89

Ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο, καθώς αυξάνεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία άνοιξης- φθινοπώρου με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο

Θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Φθινοπώρου και της Άνοιξης
70	0.037
80	0.065
90	0.09
100	0.111
110	0.13

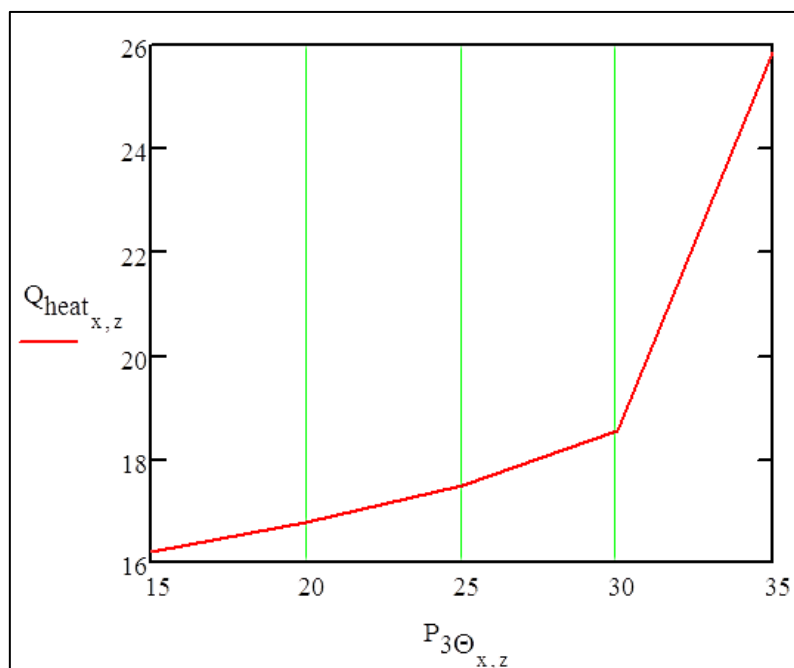
5.3 Επίδραση της πίεσης εισόδου στο στρόβιλο στις επιδόσεις και στην απόδοση του συστήματος

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που διέπει τη λειτουργία του συστήματος είναι η πίεση εισόδου στο στρόβιλο. Όταν η πίεση του συστήματος αυξάνεται, η ενθαλπία του ψυκτικού που εισέρχεται στο στρόβιλο μειώνεται. Με βάση τον ενεργειακό ισολογισμό στον ατμοποιητή, συνεπάγεται η παροχή μάζας του ψυκτικού αυξάνεται, καθώς η θερμοκρασία εισόδου του ψυκτικού στον ατμοποιητή δεν αυξάνεται αισθητά.

Όπως έχει αναφερθεί η πίεση εισόδου στο στρόβιλο ισούται με την πίεση στην οποία λειτουργεί ο ατμοποιητής και ο θερμοαντήρας.

5.3.1 Συμπαραγωγή θέρμανσης- ηλεκτρισμού (λειτουργία χειμώνα)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.6 παρουσιάζεται η μεταβολή της παραγόμενης θέρμανσης ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($p_{3\Theta}$).



Εικόνα 5.6: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης θέρμανσης (Q_{heat}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($p_{3\Theta}$)

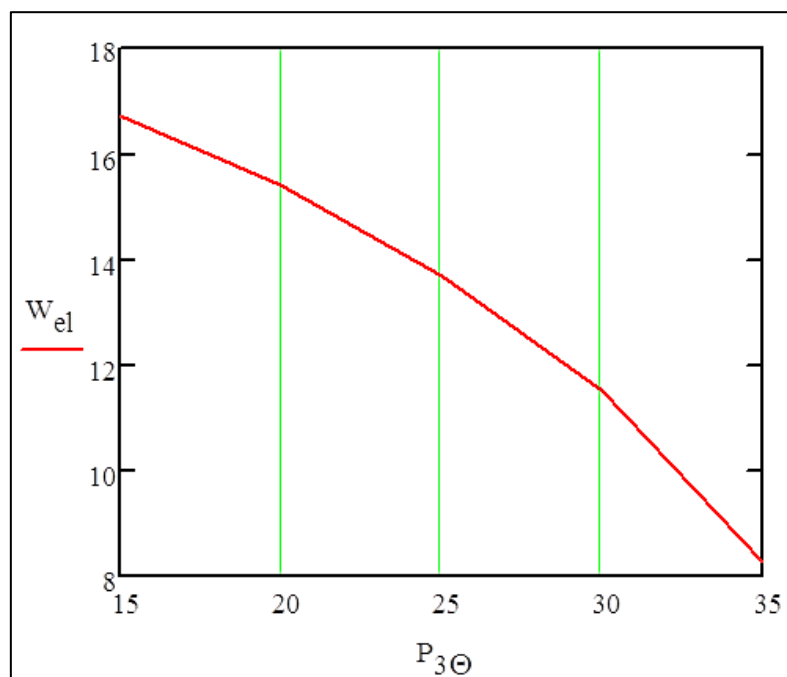
Παρατηρούμε από το διάγραμμα, ότι η παραγόμενη θέρμανση αυξάνεται με αύξηση της πίεσης εισόδου στο στρόβιλο, καθώς έχουμε αύξηση της μάζας και αύξηση της ενθαλπικής διαφοράς μεταξύ της εισόδου και της εξόδου στο θερμαντήρα. Από το διάγραμμα είναι επίσης εμφανές ότι μετά τα 30 bar, το γινόμενο της μάζας με την ενθαλπική διαφορά, οδηγεί σε ραγδαία αύξηση της παραγόμενης θέρμανσης.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη θέρμανση στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο

Θερμαντήρας (31→10)					
Πίεση εισόδου στρόβιλου υψηλής (bar)	Πίεση λειτουργίας θερμαντήρα (bar)	Ενθαλπία εισόδου R410a (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου R410a (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη Θέρμανση (kW)
15	15	493.64	438.43	0.325	16.16
20	20	487.74	432.92	0.34	16.76
25	25	481.35	426.62	0.354	17.46
30	30	474.33	418.52	0.369	18.53
35	35	466.45	388.48	0.368	25.85

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.7 παρουσιάζεται η μεταβολή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($p_{3\Theta}$).



Εικόνα 5.7: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (W_{el}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($p_{3\Theta}$)

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα της Εικόνας 5.10, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται με αύξηση της πίεσης εισόδου στο στρόβιλο, διότι μειώνεται η ενθαλπία εισόδου του ρεύματος στο στρόβιλο υψηλής πίεσης, πράγμα το οποίο οδηγεί σε αύξηση της παραγόμενης ψύξης.

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)					
Πίεση εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Πίεση εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Πίεση εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Πίεση εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενος ηλεκτρισμός (kW)
15	5	5	3	0.488	16.71
20	6.67	6.67	4	0.51	15.41
25	8.33	8.33	5	0.532	13.72
30	10	10	6	0.554	11.51
35	11.67	11.67	7	0.552	8.29

Ο βαθμός απόδοσης μειώνεται ως τα 30 bar, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζει σημαντική αύξηση. Αυτό οφείλεται στη ραγδαία αύξηση της παραγόμενης θέρμανσης, ύστερα από την πίεση αυτή. Πριν από την πίεση των 30 bar, η μικρή αύξηση της παραγόμενης θέρμανσης δε μπορεί να αντισταθμίσει τη μείωση της παραγόμενης ψύξης, και άρα παρουσιάζεται μείωση του βαθμού απόδοσης.

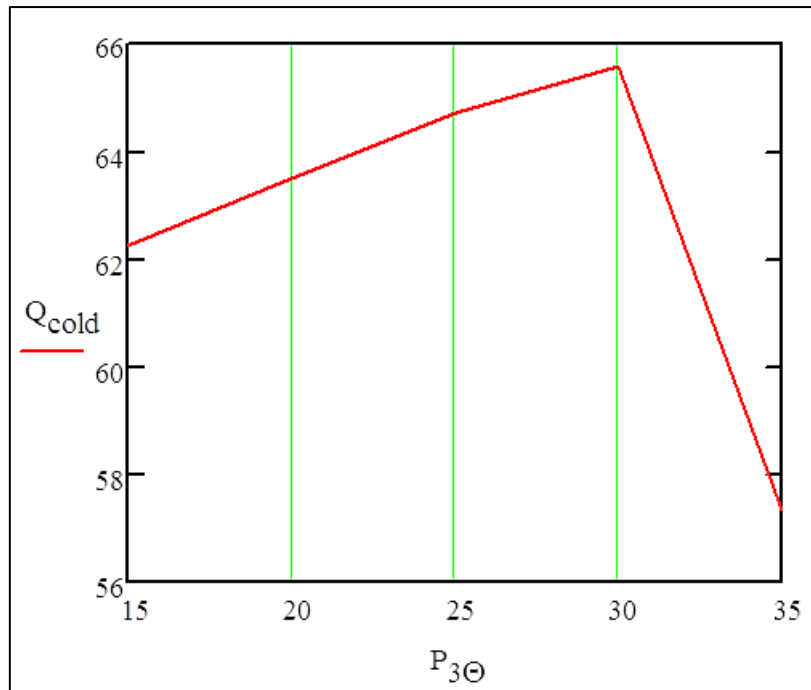
Η απόδοση του συστήματος σε κάθε πίεση εισόδου στο στρόβιλο παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.11.

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο

Πίεση εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Χειμώνα
15	0.165
20	0.162
25	0.157
30	0.151
35	0.172

Συμπαράγωγή ψύξης- ηλεκτρισμού (λειτουργία καλοκαιριού)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.8 παρουσιάζεται η μεταβολή της παραγόμενης ψύξης ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο.



Εικόνα 5.8: : Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ψύξης (Q_{cold}) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($T_{3\Theta}$)

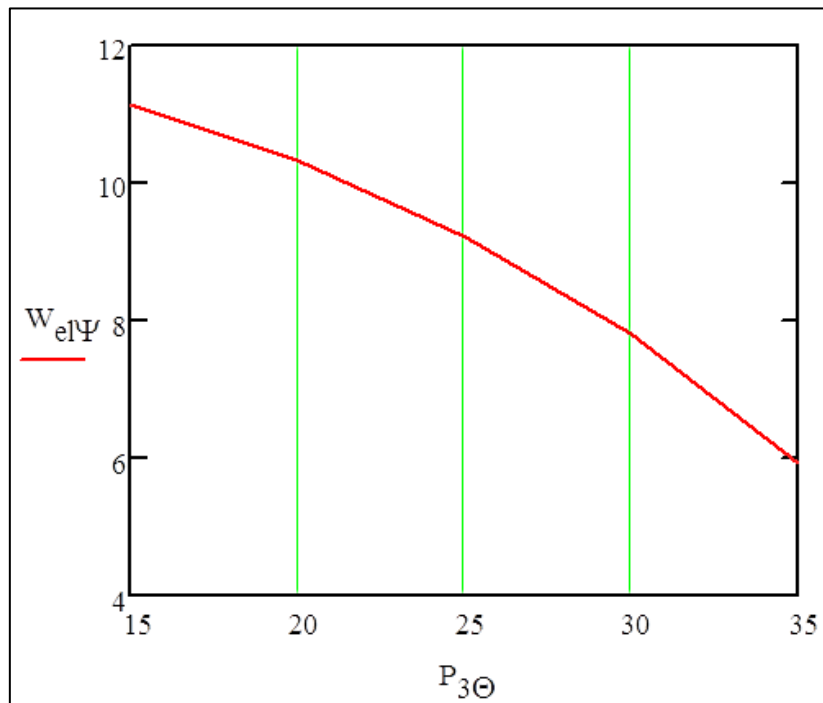
Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η παραγόμενη ψύξη παρουσιάζει ανοδική τάση ως την πίεση των 30 bar ενώ με περαιτέρω αύξηση της πίεσης εισόδου στο στρόβιλο παρουσιάζει δραματική μείωση. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι, σύμφωνα με το σχεδιασμό του συστήματος, η ψύξη πραγματοποιείται σε σταθερή πίεση (1 bar), μέσω στραγγαλιστικής βαλβίδας, ανεξάρτητα από την πίεση εισόδου του ψυκτικού στο στρόβιλο

Όμως, η μεταβολή της πίεσης στην έξοδο του στροβίλου, οδηγεί σε μεταβολή της ενθαλπίας και της θερμοκρασίας στην έξοδο του στροβίλου και η μεταβολή στην θερμοκρασία και στην οποία πραγματοποιείται η ψύξη.

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ψύξη στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο

Ατμοποιητής (7→8)					
Πίεση εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Πίεση λειτουργίας R410a (bar)	Ενθαλπία εισόδου (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου (kJ/kg)	Παροχή μάζας ανακυκλοφορίας (kg/s)	Παραγόμενη Ψύξη (kW)
15	1	163.41	418.82	0.271	62.24
20		173.06	424.54	0.281	63.50
25		181.15	429.29	0.29	64.73
30		188.18	433.39	0.297	65.56
35		194.45	437.03	0.263	57.36

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.9 παρουσιάζεται η μεταβολή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο.



Εικόνα 5.9: Συσχέτιση της μεταβολής της ηλεκτρικής ενέργειας (W_{el}) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($p_{3\theta}$)

Η παρατηρούμενη μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας με αύξηση της πίεσης εισόδου στο στρόβιλο, οφείλεται στη μείωση της ενθαλπίας εισόδου στο στρόβιλο υψηλής και στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης.

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)					
Πίεση εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Πίεση εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Πίεση εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Πίεση εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενος ηλεκτρισμός (kW)
15	5	5	3	0.325	11.14
20	6.67	6.67	4	0.341	10.32
25	8.33	8.33	5	0.358	9.23
30	10	10	6	0.375	7.80
35	11.67	11.67	7	0.395	5.93

Ο βαθμός απόδοσης παραμένει σχεδόν σταθερός ως την πίεση των 30 bar, ενώ με περαιτέρω αύξηση της πίεσης παρουσιάζει ραγδαία πτώση. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, αφού μετά τα 30 bar τόσο η παραγόμενη ψύξη όσο και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μειώνονται. Όταν η πίεση εισόδου στο στρόβιλο είναι μικρότερη από 30 bar, η πτώση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αντισταθμίζεται από την αύξηση της παραγόμενης ψύξης, πράγμα το οποίο διατηρεί το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης για τη συγκεκριμένη λειτουργία σε σχεδόν σταθερό επίπεδο.

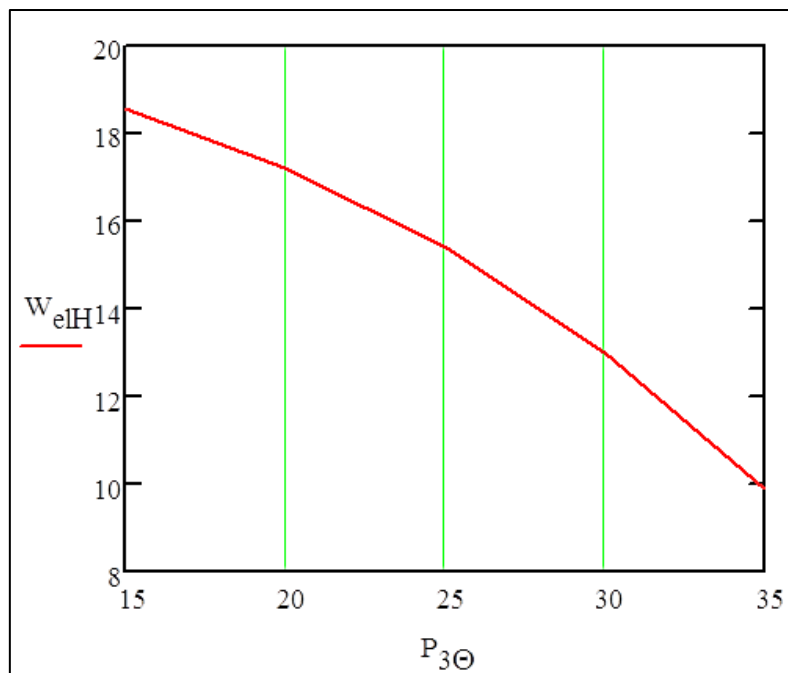
Οι τιμές του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο

Πίεση εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Καλοκαιριού
15	0.369
20	0.371
25	0.372
30	0.369
35	0.318

5.3.2 Παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.10 παρουσιάζεται η μεταβολή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο.



Εικόνα 5.10: Συσχέτιση της μεταβολής της ηλεκτρικής ενέργειας ($W_{ελ}$) κατά τη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου ως προς την πίεση εισόδου στο στρόβιλο ($p_{3\theta}$)

Παρατηρούμε ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται με αύξηση της πίεσης εισόδου στο στρόβιλο, καθώς μειώνεται η ενθαλπία εισόδου στο στρόβιλο με αύξηση της πίεσης.

Η τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε πίεση εισόδου στο στρόβιλο παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.15.

Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)					
Πίεση εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Πίεση εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Πίεση εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Πίεση εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενος ηλεκτρισμός (kW)
15	5	5	3	0.542	18.57
20	6.67	6.67	4	0.569	17.20
25	8.33	8.33	5	0.596	15.38
30	10	10	6	0.626	13.00
35	11.67	11.67	7	0.658	9.88

Όπως είναι αναμενόμενο, ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης μειώνεται αφού η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται με αύξηση της πίεσης εισόδου στο στρόβιλο.

Η τιμή του βαθμού απόδοσης ανάλογα με την πίεση εισόδου στο στρόβιλο παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.16.

Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου με αύξηση της πίεσης εισόδου στον στρόβιλο

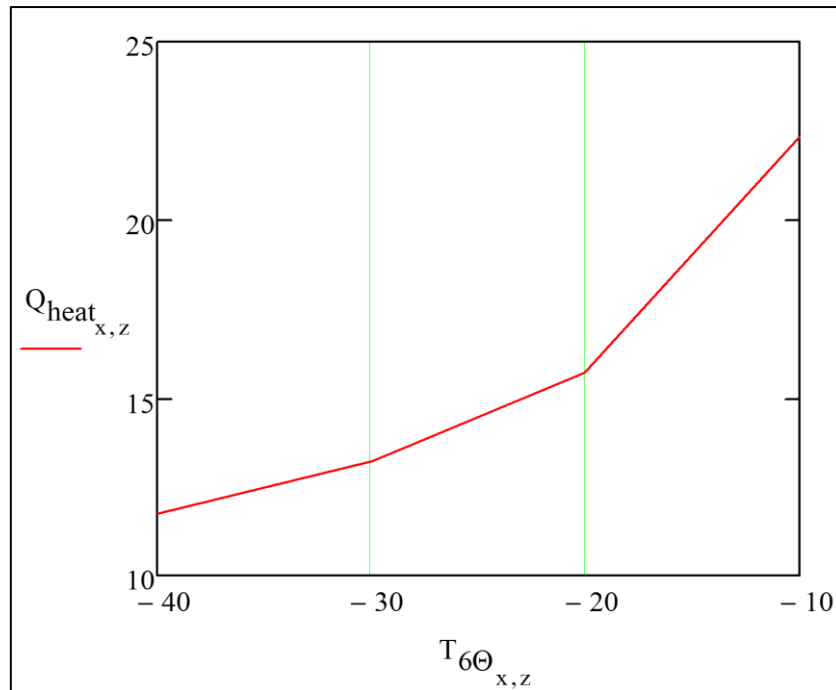
Πίεση εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Φθινοπώρου και της Άνοιξης
15	0.093
20	0.087
25	0.077
30	0.065
35	0.05

5.4 Επίδραση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του οργανικού ψυκτικού μέσου R410a στις επιδόσεις και στην απόδοση του συστήματος.

Η τρίτη σημαντική παράμετρος που εξετάστηκε στη μοντελοποίηση του συστήματος είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του οργανικού ψυκτικού μέσου R410a. Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας μεταβάλλει ανάλογα και την πίεση συμπύκνωσης, συνεπώς κατ'επέκταση μεταβάλλεται και η πίεση εισόδου στο διβάθμιο στρόβιλο, καθώς λειτουργεί με σταθερό λόγο πίεσης, άρα και σταθερές θερμοκρασίες εξόδου και από τις δυο βαθμίδες του στρόβιλου (υψηλής και χαμηλής πίεσης). Οι ενθαλπίες παρόλα αυτά μεταβάλλονται καθώς ο ατμός που οδηγείται στο διβάθμιο στρόβιλο είναι υπέρθερμος και εξαρτάται και από την αντίστοιχη πίεση σε κάθε σημείο.

5.4.1 Συμπαγωγή θέρμανσης- ηλεκτρισμού (λειτουργία χειμώνα)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.11 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του οργανικού ψυκτικού μέσου R410a στην παραγόμενη θέρμανση.



Εικόνα 5.11: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης θέρμανσης (Q_{heat}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του R410a ($T_{6\Theta}$)

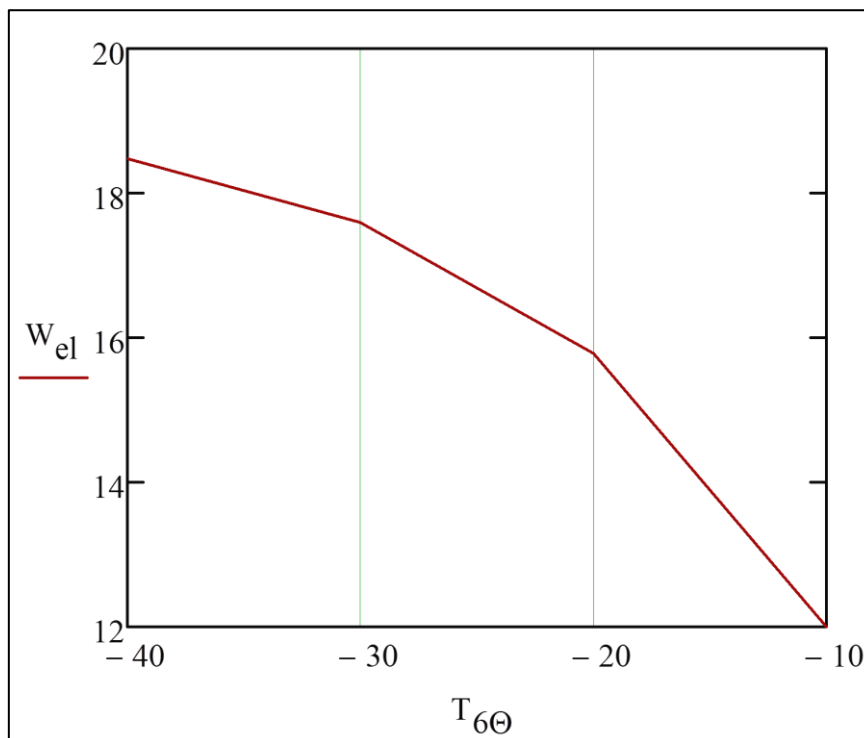
Από το συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρούμε ότι καθώς η θερμοκρασία συμπύκνωσης αυξάνεται, αυξάνεται και το ποσό της παραγόμενης θέρμανσης. Αυτό οφείλεται στο ότι, καθώς η θερμοκρασία συμπύκνωσης του ρευστού αυξάνεται, αυξάνεται αντίστοιχα και η ενθαλπία του ψυκτικού στην είσοδο του ατμοποιητή και από τον ισολογισμό, έχουμε μεγαλύτερη παροχή μάζας του οργανικού μέσου. Έτσι η διαθέσιμη μάζα του μέσου αυξάνεται και επακόλουθα έχουμε και μεγαλύτερη παραγόμενη θέρμανση.

Στη λειτουργία της θέρμανσης, δίνεται η δυνατότητα προθέρμανσης του ρεύματος του R410a καθώς, το ρεύμα μετά την ανύψωση της πίεσης του από την αντλία, μπορεί να θερμανθεί μέσω του ρεύματος εξόδου από το θερμαντήρα. Ο Πίνακας 5.17 παρουσιάζει αναλυτικά τα αποτελέσματα.

Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη θέρμανση στη λειτουργία χειμώνα με μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a

Θερμαντήρας (31→10)				
Θερμοκρασία συμπύκνωσης R410a (οC)	Ενθαλπία εισόδου R410a (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου R410a (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη Θέρμανση (kW)
-10	476.03	406.23	0.355	22.32
-20	487.60	436.73	0.343	15.69
-30	495.26	450.43	0.327	13.20
-40	500.43	458.79	0.314	11.75

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.12 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 5.12: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (W_{el}) κατά τη λειτουργία του χειμώνα ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του R410a ($T_{6\Theta}$)

Από το διάγραμμα της Εικόνας 5.12 παρατηρούμε ότι καθώς η θερμοκρασία συμπύκνωσης αυξάνεται, η παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας μειώνεται. Η

μείωση αυτή οφείλεται στη μικρότερη διαθέσιμη ενθαλπική πτώση στο στρόβιλο. Όπως έχει σχεδιασθεί η εγκατάσταση, ο διβάθμιος στρόβιλος λειτουργεί με σταθερό λόγο πίεσης, συνεπώς για κάθε διαφορετική πίεση συμπύκνωσης έχουμε και υψηλότερη πίεση εισόδου στο στρόβιλο. Έτσι με σταθερή θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο και ακολουθώντας την ισοθερμοκρασιακή καμπύλη του R410a, η διαθέσιμη ενθαλπία εισόδου στο στρόβιλο, και στις δυο βαθμίδες, είναι μικρότερη για κάθε μεγαλύτερη θερμοκρασία συμπύκνωσης. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στον ακόλουθο Πίνακα 5.18.

Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία χειμώνα για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)						
Θερμοκρασία συμπύκνωσης R410a (oC)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kW)
-10	476.03	467.31	499.57	485.28	0.533	12.01
-20	487.60	471.54	502.61	487.38	0.514	15.76
-30	495.26	474.58	504.83	488.92	0.491	17.59
-40	500.43	476.72	506.42	490.03	0.470	18.75

Παρατηρούμε ότι ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης αυξάνεται, παράλληλα με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του οργανικού ψυκτικού μέσου. Εδώ φαίνεται ότι η αύξηση της παραγόμενης θέρμανσης σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, αντισταθμίζει τη μείωση που προκαλείται στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

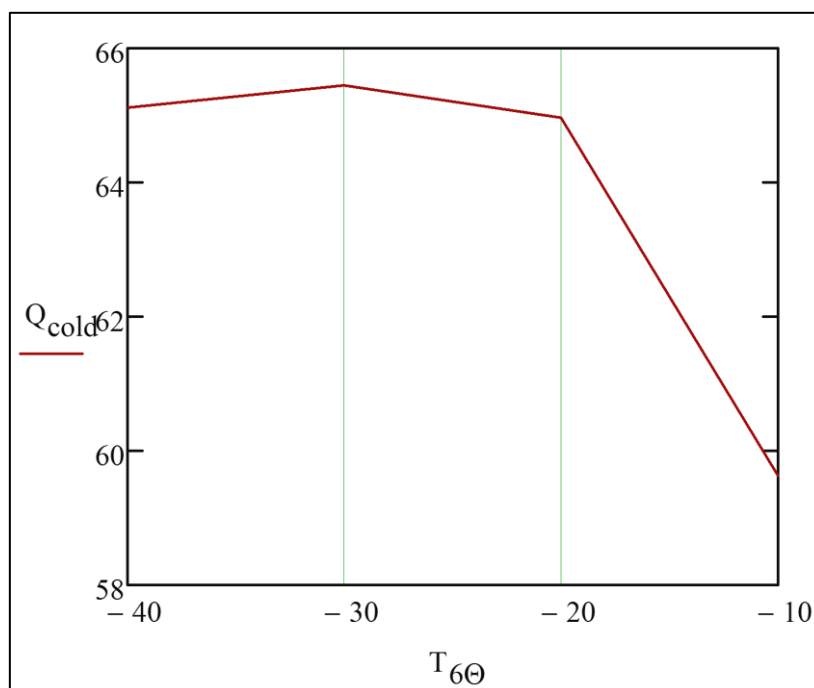
Οι τιμές του βαθμού απόδοσης ανάλογα με τη θερμοκρασία συμπύκνωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.19.

Πίνακας 5.19: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία χειμώνα για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a

Θερμοκρασία συμπύκνωσης R410a (°C)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Χειμώνα
-10	0.173
-20	0.158
-30	0.155
-40	0.152

5.4.2 Συμπαγωγή ψύξης- ηλεκτρισμού (λειτουργία καλοκαιριού)

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα της παραγόμενης ψύξης, κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού, και η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας συμπύκνωσης σε αυτή.



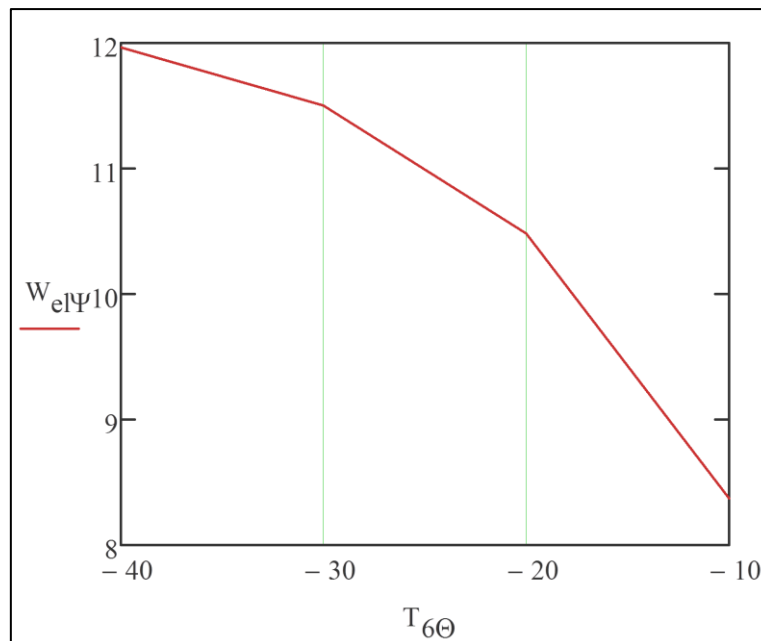
Εικόνα 5.13: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ψύξης (Q_{cold}) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του R410a ($T_{6\Theta}$)

Παρατηρούμε από το διάγραμμα της Εικόνας 5.13 ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης μειώνει την παραγόμενη ψύξη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όσο χαμηλότερη θερμοκρασία έχουμε στο συμπυκνωτή, αυτή θα είναι και η διαθέσιμη θερμοκρασία εισόδου στον εξατμιστή για την παραγωγή της ψύξης. Έτσι για την ίδια πίεση έχουμε σχεδόν ίδια ενθαλπική αύξηση στον ατμοποιητή, αλλά με αρχικά αυξανόμενη μάζα ανακυκλοφορίας και στη συνέχεια σταδιακά μειωμένη παροχή. Συνεπώς, επακόλουθα μειώνεται και η παραγόμενη ψύξη από την εγκατάσταση.

Πίνακας 5.20: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ψύξη στη λειτουργία καλοκαιριού για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a

Ατμοποιητής (7→8)				
Θερμοκρασία συμπύκνωσης R410a (οC)	Ενθαλπία εισόδου R410a (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου R410a (kJ/kg)	Παροχή μάζας ανακυκλοφορίας (kg/s)	Παραγόμενη Ψύξη (kW)
-10	186.63	432.49	0.270	59.64
-20	173.26	424.66	0.287	64.98
-30	160.23	416.92	0.283	65.43
-40	147.57	409.25	0.277	65.12

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του οργανικού ψυκτικού μέσου.



Εικόνα 5.14: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ($W_{eI\Psi}$) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του R410a ($T_{6\Theta}$)

Από το διάγραμμα της Εικόνας 5.14 είναι εμφανές ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης έχει και σε αυτή τη λειτουργία αρνητική

επίδραση στον παραγόμενο ηλεκτρισμό. Συγκεκριμένα αυτό οφείλεται στο ότι η διαθέσιμη ενθαλπική πτώση στο στρόβιλο μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης, παρόλο που η παροχή μάζας που οδηγείται στο διβάθμιο στρόβιλο είναι αυξανόμενη για μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Η εξήγηση της μείωσης της ενθαλπικής πτώσης παρουσιάστηκε στη λειτουργία του χειμώνα. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης φαίνονται στον Πίνακα 5.21.

Πίνακας 5.21: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία καλοκαιριού για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)						
Θερμοκρασία συμπύκνωσης R410a (oC)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kW)
-10	476.03	467.31	499.57	485.28	0.371	8.37
-20	487.60	471.54	502.61	487.38	0.342	10.48
-30	495.26	474.58	504.83	488.92	0.321	11.50
-40	500.43	476.72	506.42	490.03	0.304	11.96

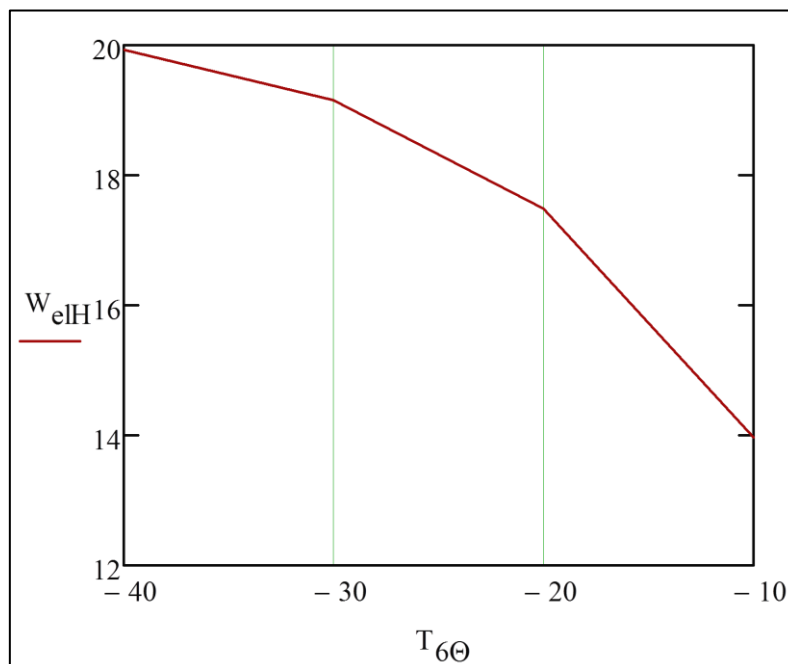
Ο βαθμό απόδοσης, όπως ήταν αναμενόμενο, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a, καθώς έχει αρνητικό αντίκτυπο και στη συμπαράγωγή ψύξης – ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλη τη μείωση του βαθμού απόδοσης σε αυτή τη λειτουργία, παραμένει αισθητά μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν του χειμώνα, καθώς τα ωφέλιμα παράγωγα είναι συνολικά μεγαλύτερα, κυρίως λόγω της ψύξης. Τέλος αυτό επιβεβαιώνεται και με τα αναλυτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.22.

Πίνακας 5.22: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία καλοκαιριού για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a

Θερμοκρασία συμπύκνωσης R410a (°C)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Καλοκαιριού
-10	0.342
-20	0.379
-30	0.387
-40	0.388

5.4.3 Παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.16 φαίνεται η επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του οργανικού ρευστού στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, κατά τη λειτουργία του φθινοπώρου και της άνοιξης.



Εικόνα 5.15: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (W_{eH}) κατά τη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης του R410a ($T_{6\theta}$)

Από το διάγραμμα της Εικόνας 5.15 παρατηρούμε αντίστοιχα με τις άλλες λειτουργίες της εγκατάστασης (χειμώνα και καλοκαίρι), και εδώ η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης εμφανίζει αρνητική κλίση στον παραγόμενο ηλεκτρισμό.

Πίνακας 5.23: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)						
Θερμοκρασία συμπύκνωσης R410a (oC)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη ηλεκτρικότητα (kW)
-10	476.03	467.31	499.57	485.28	0.619	13.95
-20	487.60	471.54	502.61	487.38	0.569	17.47
-30	495.26	474.58	504.83	488.92	0.534	19.16
-40	500.43	476.72	506.42	490.03	0.507	19.93

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.24, δείχνουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης έχει αρνητικό αντίκτυπο στο βαθμό απόδοσης του συστήματος, αφού και το μοναδικό παράγωγο της εγκατάστασης, που είναι η ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται.

Πίνακας 5.24: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία άνοιξης- φθινοπώρου για μεταβολή της θερμοκρασίας συμπύκνωσης του R410a

Θερμοκρασία συμπύκνωσης R410a (°C)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Φθινοπώρου και της Άνοιξης
-10	0.07
-20	0.088
-30	0.096
-40	0.1

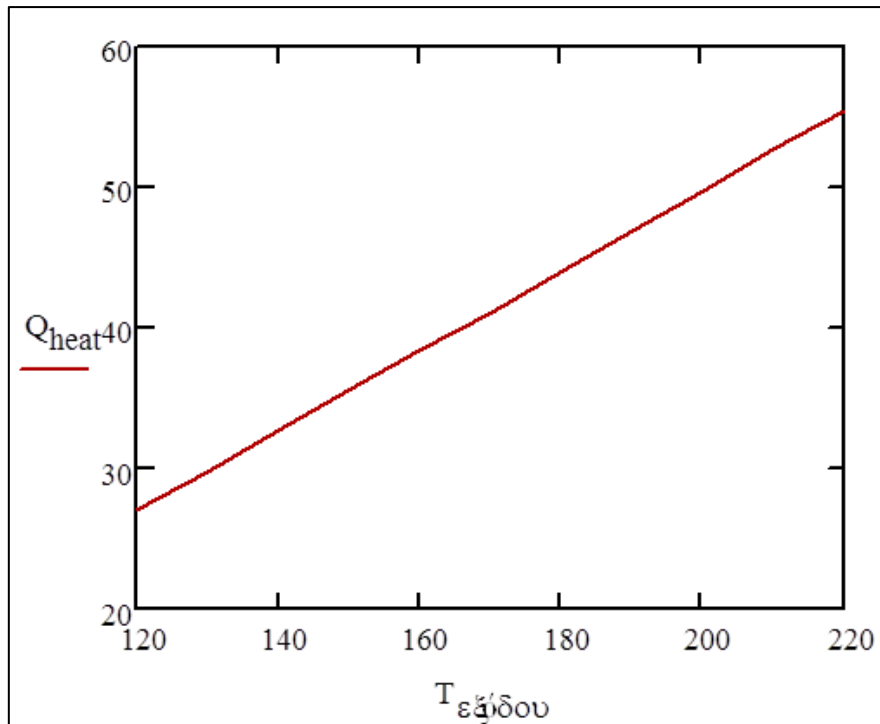
5.5 Επίδραση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες στις επιδόσεις και στην απόδοση του συστήματος.

Η τελευταία παράμετρος που εξετάστηκε κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος τριπαραγωγής, ήταν η θερμοκρασία εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες, και κατ'επέκταση η προσφερόμενη θερμότητα στον ατμοποιητή για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού του εργαζόμενο μέσου του συστήματος. Η παράμετρος αυτή κρίθηκε σημαντική να εξεταστεί κυρίως λόγω της ιδιαίτερης φύσης της διαθεσιμότητας της ηλιακής ενέργειας, αφού έχει αυξομείωση ανάλογα με την εποχή του χρόνου, αλλά και εν γένει του κλίματος της περιοχής εγκατάστασης του συστήματος. Συνεπώς εξετάζουμε πως θα αποδώσει το σύστημα υπό πολύ ευνοϊκές ή και λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες προσφοράς της διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας, που θα θερμάνει τελικά το κύκλωμα του νερού.

Με βάση τον ενεργειακό ισολογισμό στον ατμοποιητή, διατηρώντας σταθερή την ενθαλπική διαφορά του οργανικού ρευστού (σημείο 2-3), με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες και παράλληλα της προσδιδόμενης θερμότητας, αυξάνεται αναλογικά και η παροχή μάζας προς τα τρία ρεύματα του συστήματος για παραγωγή θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρικής ενέργειας.

5.5.1 Συμπαραγωγή θέρμανσης- ηλεκτρισμού (λειτουργία χειμώνα)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.16 φαίνεται η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες στην παραγόμενη θέρμανση.



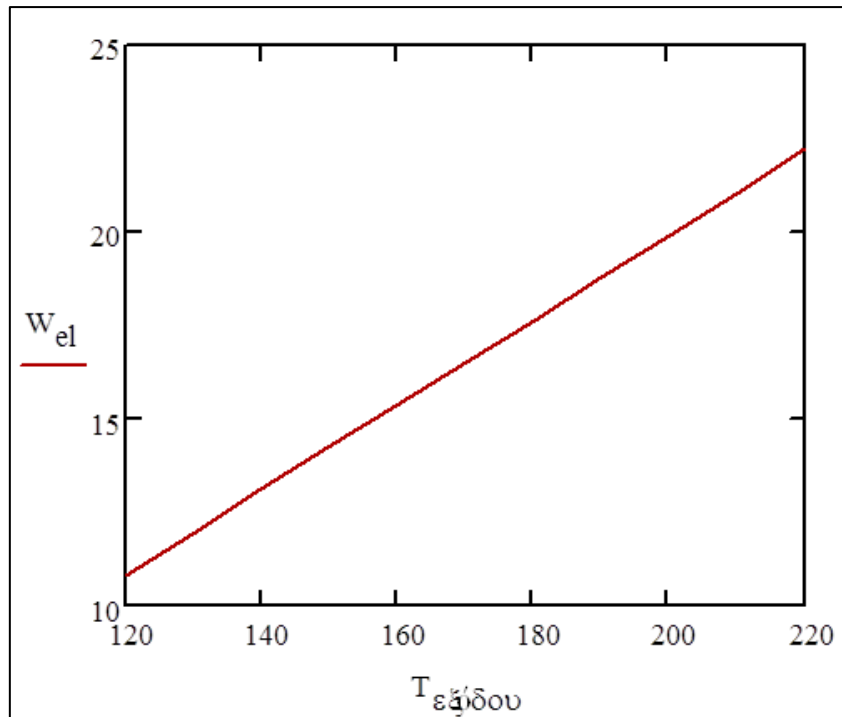
Εικόνα 5.16: Διάγραμμα συσχέτισης της μεταβολής της παραγόμενης θέρμανσης κατά τη λειτουργίας του Χειμώνα σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου αυξάνει αναλογικά την παραγόμενη θέρμανση από το θερμαντήρα. Αυτό οφείλεται ξεκάθαρα μόνο στο γεγονός της αύξησης της διαθέσιμης παροχής μάζας που οδηγείται για παραγωγή θέρμανσης, μιας και οι ενθαλπίες εισόδου και εξόδου στο θερμαντήρα διατηρούνται σταθερές. Αυτά παρουσιάζονται αναλυτικότερα και στον Πίνακα 5.25 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.25: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη θέρμανση στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Θερμαντήρας (31→10)					
Θερμοκρασία εξόδου νερού (°C)	Προσδιδόμενη θερμότητα από τους ηλιακούς συλλέκτες (kW)	Ενθαλπία εισόδου R410a (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου R410a (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη Θέρμανση (kW)
120	198.88	474.33	387.82	0.347	27.02
130	219.82			0.384	29.87
140	240.75			0.42	32.71
150	261.69			0.457	35.56
160	282.62			0.493	38.40
170	303.56			0.530	41.25
180	324.49			0.566	44.09
190	345.43			0.603	46.94
200	366.36			0.639	49.78
210	387.30			0.676	52.62
220	408.23			0.712	55.47

Στην Εικόνα 5.17 φαίνεται η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 5.17: Διάγραμμα συσχέτισης της μεταβολής του παραγόμενου ηλεκτρισμού κατά τη λειτουργία του Χειμώνα σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακού συλλέκτες

Αναλογικά με τη θέρμανση και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες, λόγω της μεγαλύτερης παροχής μάζας που οδηγείται στο διβάθμιο στρόβιλο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.26.

Πίνακας 5.26: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)						
Θερμοκρασία εξόδου νερού (°C)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη ηλεκτρικισμός (kW)
120	474.33	466.73	499.16	485.55	0.521	10.82
130					0.575	11.96
140					0.630	13.1
150					0.685	14.23
160					0.740	15.38
170					0.795	16.52
180					0.849	17.66
190					0.904	18.80
200					0.959	19.94
210					1.014	21.07
220					1.069	22.21

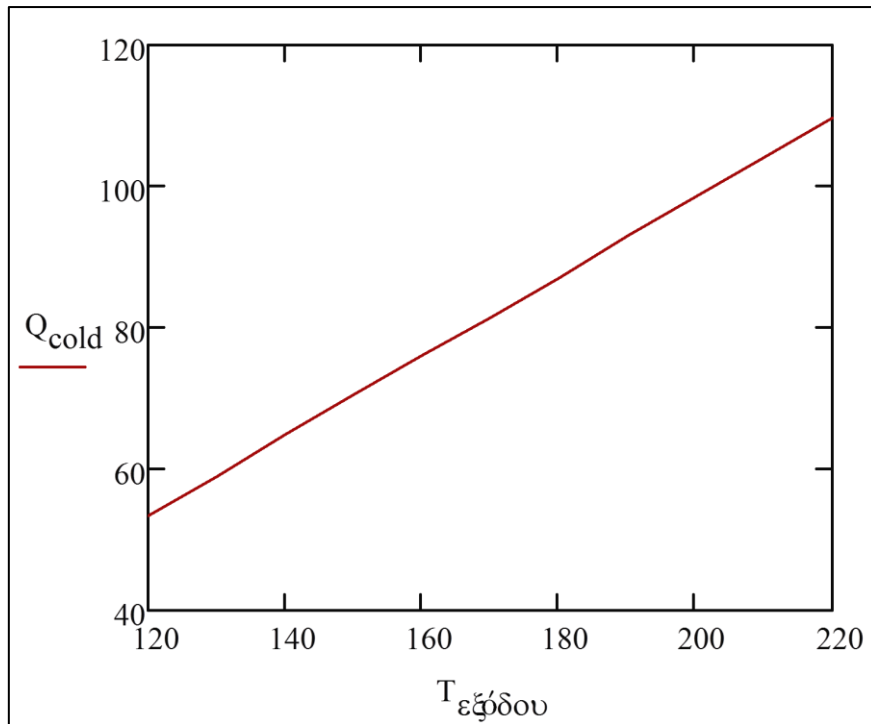
Από τον Πίνακα 5.27, φαίνεται ότι η αύξηση και των δυο παραγώγων του συστήματος, παράλληλα με τη μεγαλύτερη προσδιδόμενη θερμότητα, οδηγεί σε σταθερό βαθμό απόδοσης του συστήματος για τη συμπαραγωγή θέρμανσης θέρμανσης – ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θέρμανση και η ηλεκτρική ενέργεια αυξάνονται με ίδιο βήμα με την προσδιδόμενη θερμότητα από τους ηλιακούς συλλέκτες, συνεπώς ο λόγος τους, άρα και ο βαθμός απόδοσης του συστήματος, για αυτή τη λειτουργία, παραμένει σταθερός.

Πίνακας 5.27: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία χειμώνα με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Θερμοκρασία εξόδου νερού (°C)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Χειμώνα
120	0.19
130	0.19
140	0.19
150	0.19
160	0.19
170	0.19
180	0.19
190	0.19
200	0.19
210	0.19
220	0.19

5.5.2 Συμπαγωγή ψύξης- ηλεκτρισμού (λειτουργία καλοκαιριού)

Συνεχίζουμε με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης για τη λειτουργία του καλοκαιριού και συγκεκριμένα με το διάγραμμα της παραγόμενης ψύξης σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες.

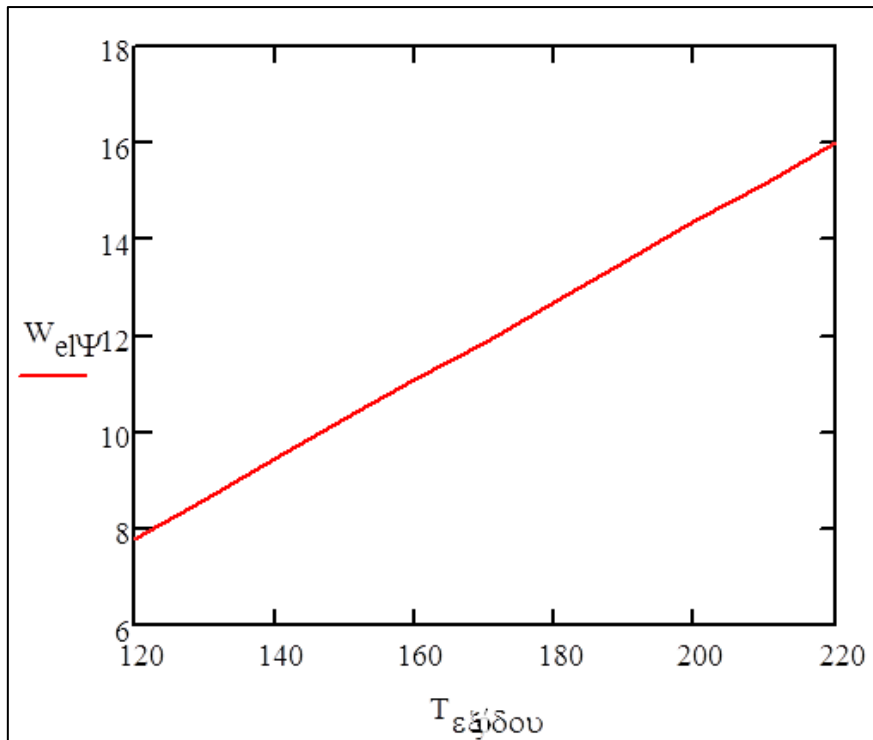


Εικόνα 5.18: Διάγραμμα συσχέτισης της μεταβολής της παραγόμενης ψύξης κατά τη λειτουργία του Καλοκαιριού σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Και εδώ, όπως και στη λειτουργία του χειμώνα για την παραγωγή της θέρμανσης, αυξάνεται η παροχή μάζα ανακυκλοφορίας που οδηγείται στον ατμοποιητή για παραγωγή ψύξης. Αυτά φαίνονται αναλυτικότερα και στον Πίνακα 5.28.

Πίνακας 5.28: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ψύξη στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Ατμοποιητής (7→8)				
Θερμοκρασία εξόδου νερού (°C)	Ενθαλπία εισόδου R410a (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου R410a (kJ/kg)	Παροχή μάζας ανακυκλοφορίας (kg/s)	Παραγόμενη Ψύξη (kW)
120	188.19	433.39	0.242	53.44
130			0.268	59.06
140			0.293	64.69
150			0.319	70.31
160			0.344	75.94
170			0.370	81.56
180			0.395	87.19
190			0.421	92.81
200			0.446	98.44
210			0.472	104.06
220			0.497	109.69



Εικόνα 5.19: Συσχέτιση της μεταβολής της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ($W_{\epsilon\lambda\psi}$) κατά τη λειτουργία του καλοκαιριού με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Αντίστοιχα και με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία του χειμώνα, ο ηλεκτρισμός αυξάνεται και στη λειτουργία του καλοκαιριού, λόγω της μεγαλύτερης παροχής μάζας που καταλήγει στο διβάθμιο στρόβιλο. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα του διαγράμματος φαίνονται αναλυτικότερα και στον Πίνακα 5.29.

Πίνακας 5.29: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)						
Θερμοκρασία εξόδου νερού (°C)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη ηλεκτρικισμός (kW)
120	474.33	466.73	499.16	485.55	0.375	7.80
130					0.415	8.62
140					0.454	9.44
150					0.494	10.27
160					0.533	11.09
170					0.573	11.91
180					0.612	12.73
190					0.652	13.55
200					0.691	14.37
210					0.731	15.19
220					0.770	16.01

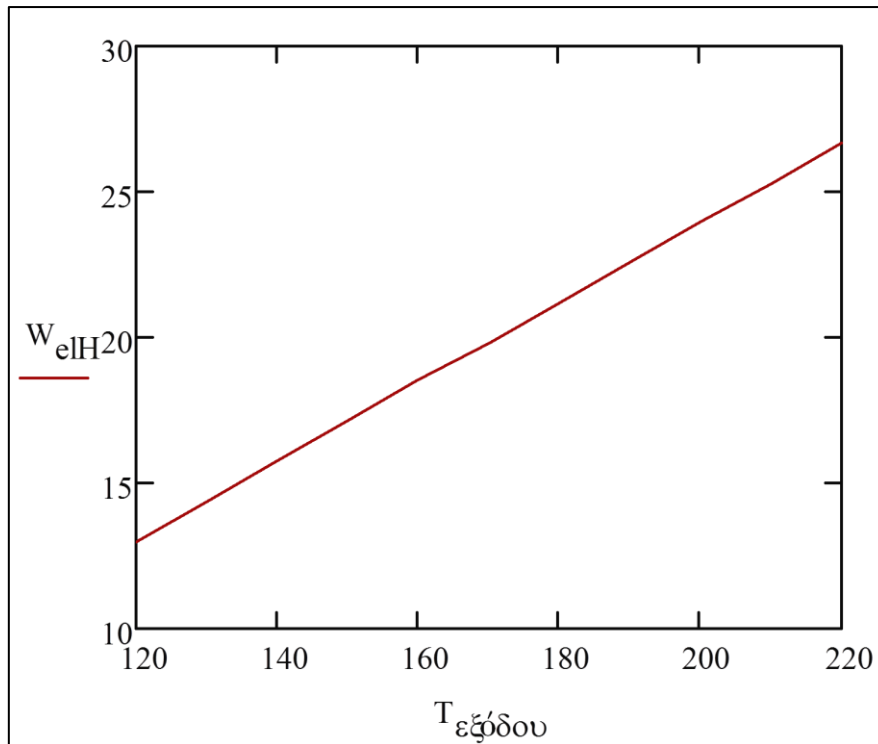
Ο βαθμός απόδοσης της λειτουργίας συμπαραγωγής ψύξης – ηλεκτρικής ενέργειας παραμένει σταθερός σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες για τους λόγους που εξηγήθηκαν και παραπάνω. Επίσης, παρατηρούμε ότι τα παράγωγα του συστήματος στη λειτουργία αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερα σε σχέση με την αντίστοιχη του χειμώνα και για αυτό έχουμε και μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης για την ίδια προσδιδόμενη θερμότητα.

Πίνακας 5.30: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία καλοκαιριού με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Θερμοκρασία εξόδου νερού (°C)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Καλοκαιριού
120	0.31
130	0.31
140	0.31
150	0.31
160	0.31
170	0.31
180	0.31
190	0.31
200	0.31
210	0.31
220	0.31

5.5.3 Παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου)

Η τρίτη λειτουργία του συστήματος είναι η παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας και θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα και τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες. Αρχικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.20 το διάγραμμα της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 5.20: Διάγραμμα συσχέτισης της μεταβολής του παραγόμενου ηλεκτρισμού κατά τη λειτουργία της Άνοιξης και του Φθινοπώρου σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Αντίστοιχα και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το φθινόπωρο και το καλοκαίρι ακολουθεί ανοδική πορεία με την αύξηση της προσδιδόμενης θερμότητας και άρα της μεγαλύτερης παροχής μάζας που οδηγείται απευθείας στο διβάθμιο στρόβιλο.

Πίνακας 5.31: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη λειτουργία άνοιξης-φθινοπώρου με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Στρόβιλος (33→4 και 11→12)						
Θερμοκρασία εξόδου νερού (°C)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εισόδου στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Ενθαλπία εξόδου από τη βαθμίδα χαμηλής πίεσης (kJ/kg)	Παροχή μάζας (kg/s)	Παραγόμενη ηλεκτρικισμός (kW)
120	474.33	466.73	499.16	485.55	0.626	13.00
130					0.691	14.37
140					0.757	15.74
150					0.823	17.11
160					0.889	18.48
170					0.955	19.85
180					1.021	21.22
190					1.087	22.58
200					1.152	23.95
210					1.218	25.32
220					1.284	26.69

Ο βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του συστήματος είναι σταθερός, αν και πολύ χαμηλός, γιατί έχουμε παραγωγή μόνο ηλεκτρικής ενέργειας για την ίδια προσδιδόμενη ηλιακή ενέργεια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.32.

Πίνακας 5.32: Αποτελέσματα μοντελοποίησης για το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης στη λειτουργία άνοιξης- φθινοπώρου με αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους ηλιακούς συλλέκτες

Θερμοκρασία εξόδου νερού (°C)	Βαθμός απόδοσης της λειτουργίας του Φθινοπώρου και της Άνοιξης
120	0.065
130	0.065
140	0.065
150	0.065
160	0.065
170	0.065
180	0.065
190	0.065
200	0.065
210	0.065
220	0.065

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ενός συστήματος τριπαραγωγής με χρήση οργανικού ψυκτικού R410a. Τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη ανάλυση είναι τα ακόλουθα:

(1) Κατά τη συμπαραγωγή ψύξης-ηλεκτρισμού το σύστημα παρουσιάζει εν γένει καλύτερο βαθμό απόδοσης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες λειτουργίες (συμπαραγωγή θέρμανσης-ηλεκτρισμού, παραγωγή μόνο ηλεκτρισμού), γιατί η παραγωγή ψύξης είναι μεγαλύτερη.

(2) Η μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης έχει γενικά θετική επίδραση στην απόδοση του συστήματος. Η παραγόμενη ψύξη και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αυξάνονται σημαντικά με μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης. Το μόνο μέγεθος που επηρεάζεται αρνητικά είναι η παραγόμενη θέρμανση στη συμπαραγωγή θέρμανσης- ηλεκτρισμού, διότι μειώνεται η μάζα που εισέρχεται στο θερμαντήρα χωρίς να αυξάνεται η ενθαλπική διαφορά μεταξύ εισόδου και εξόδου.

(3) Οι βαθμοί απόδοσης του συστήματος ακολουθούν αντίστοιχη τάση ως προς τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, δηλαδή η μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης έχει θετική επίδραση στο βαθμό απόδοσης. Μόνο στη λειτουργία συμπαραγωγής θέρμανσης-ηλεκτρισμού παρατηρείται αντίθετη τάση, γιατί η μείωση της παραγόμενης θέρμανσης δεν αντισταθμίζεται από την αύξηση στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

(4) Η αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου του ρευστού στο στρόβιλο έχει θετική επίδραση στις επιδόσεις και στην απόδοση του συστήματος. Η παραγόμενη θέρμανση και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αυξάνονται σημαντικά με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο. Μόνο η παραγόμενη ψύξη επηρεάζεται αρνητικά με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο, λόγω μείωσης της παροχής μάζας ανακυκλοφορίας, η οποία παράγει την ψύξη.

(5) Με αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου στο στρόβιλο, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος παρουσιάζει αυξητική τάση κατά τη λειτουργία συμπαραγωγής θέρμανσης-ηλεκτρισμού και κατά τη λειτουργία παραγωγής μόνο ηλεκτρισμού, ενώ μειώνεται κατά τη λειτουργία συμπαραγωγής ψύξης-ηλεκτρισμού.

(6) Η αύξηση της πίεσης εισόδου στο στρόβιλο έχει αρνητική επίδραση στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος. Η παραγόμενη θέρμανση αυξάνεται με αύξηση της πίεσης

εισόδου στο στρόβιλο, ενώ η παραγόμενη ψύξη αρχικά αυξάνεται ως την πίεση των 30 bar και στη συνέχεια μειώνεται. Υπάρχει δηλαδή μια βέλτιστη τιμή πίεσης εισόδου στο στρόβιλο, η οποία οδηγεί σε μεγιστοποίηση της παραγόμενης ψύξης.

(7) Η αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του νερού από τους συλλέκτες αυξάνει ανάλογα και την παραγόμενη θέρμανση, την παραγόμενη ψύξη και την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος στην περίπτωση αυτή παραμένει σταθερός, καθώς οι επιδόσεις του συστήματος είναι ευθέως ανάλογες της προσδιδόμενης θερμότητας από τους ηλιακούς συλλέκτες.

(8) Ως συνέχεια της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να εξεταστεί η χρησιμοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας στο συμπυκνωτή, ώστε να αυξηθούν οι επιδόσεις και ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης. Η απορριπτόμενη ενέργεια παρουσιάζει πολύ μεγάλες τιμές (περίπου 154kW για συμπαραγωγή θέρμανσης- ηλεκτρισμού, 258 kW για συμπαραγωγή ψύξης- ηλεκτρισμού και 186 kW παραγωγή ηλεκτρισμού. Για παράδειγμα, η θερμότητα αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μέσω εναλλάκτη για προθέρμανση του ρευστού πριν την είσοδό του στον ατμοποιητή, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ενθαλπική διαφορά στον ατμοποιητή, δίνοντας μεγαλύτερες παροχές μάζας στην εγκατάσταση.

(9) Επίσης θα ήταν επιθυμητό να πραγματοποιηθεί μια οικονομοτεχνική μελέτη του συστήματος, ώστε να προσδιοριστεί το βέλτιστο μέγεθος μιας τέτοιας μονάδας ανάλογα με την εφαρμογή, να κριθεί η οικονομική βιωσιμότητα μιας τέτοιας εγκατάστασης και ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Βιβλιογραφία

1. Χρίστος Αθ. Φραγκόπουλος, Ηλίας Π. Καρυδογιάννης, Γιάννης Κ. Καραλής, 'Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού & Θερμότητας', Εκδόσεις Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας ΕΛΚΕΠΑ 1994.
2. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Οδηγός Συστημάτων Συμπααραγωγής Ηλεκτρισμού & Θερμότητας.
3. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 'Συστήματα Συμπααραγωγής Μικρής Κλίμακας(micro-CHP).
4. Y. A. Çengel, M.A. Boles, 'Θερμοδυναμική για Μηχανικούς, Τόμος Β', Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Έκδοση 3η.
5. Educogen, 'A Guide To Cogeneration', Cogen Europe 2002.
6. Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-5/2012, Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας & Ψύξης: Εγκαταστάσεις σε Κτήρια, Α΄ έκδοση, Αθήνα, Απρίλιος 2012.
7. Ε. Δ. Ρογδάκης, Γ. Κ. Αλέξης, Παραμετρική Μελέτη Συνδυασμένου Κύκλου Απορρόφησης - Εγχυτήρα με Μίγμα NH₃, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, IV, τεύχ. 1-2 2000
8. Jiangfeng Wang, Zhequan Yan, Man Wang, Yuhui Song and Yiping Dai, Parametric analysis and optimization of a building cooling heating power system driven by solar energy based on organic working fluid, Institute of Turbomachinery, School of Energy Research Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, International journal of Energy , China 2012.
9. Hailei Wang, Richard Peterson, Tom Herron, Design study of configurations on system COP for a combined ORC (organic Rankine cycle) and VCC (vapor compression cycle), School of Mechanical, Industrial, & Manufacturing Engineering, Oregon State University, Elsevier, USA 2011.
10. Yuhui Song, Jiangfeng Wang, Yiping Dai, Enmin Zhou, Thermodynamic analysis of a transcritical CO₂ power cycle driven by solar energy with liquified natural gas as its heat sink, Institute of Turbomachinery, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Elsevier, China 2011.
11. Turn waste heat into electricity by using an Organic Rankine Cycle, 2nd European Conference on Polygeneration: Technologies and perspective, University College of West-Flanders, Belgium 2011.
12. Pedro J. Magoa, Anna Hueffed, Louay M. Chamra, Analysis and optimization of the use of CHP-ORC systems for small commercial buildings,

Department of Mechanical Engineering, Mississippi State University, 210 Carpenter Engineering Building, Elsevier, USA 2010.

13. Slawomir Smolen, Simulation and Thermodynamic Analysis of a Two-Stage Organic Rankine Cycle for Utilisation of Waste Heat at Medium and Low Temperature Levels, University of Applied Sciences, Bremen, J.R.Mayer Institute for Energy Engineering, Energy Science and Technology, Bremen, Germany 2011.

14. D. Wei, X. Lu, Z. Lu, J. Gu, Performance analysis and optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat recovery, *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 1113–1119

15. Mohammed Khennich and Nicolas Galanis, Optimal Design of ORC Systems with a Low-Temperature Heat Source, University of Sherbrooke, *Journal of Entropy*, Canada 2012.

16. Wimolsiri Pridasawas, Solar-Driven Refrigeration Systems with Focus on the Ejector Cycle, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration, Department of Energy Technology, School of Industrial Engineering and Management, Stockholm 2006.

17. Jiangfeng Wang, Yiping Dai, Taiyong Zhang, Shaolin Mab, Parametric analysis for a new combined power and ejector–absorption refrigeration cycle, Institute of Turbomachinery, Xi’an Jiaotong University, Elsevier, Republic of China 2009.

18. Yiping Dai, Jiangfeng Wang, Lin Gao, Exergy analysis, parametric analysis and optimization for a novel combined power and ejector refrigeration cycle, Institute of Turbomachinery, School of Energy and Power Engineering, Xi’an Jiaotong University, Elsevier, , Republic of China 2008.

19. M. Ouzzane, Z. Aidoun, Model development and numerical procedure for detailed ejector analysis and design, Centre de la technologie de l’énergie de Canmet, Applied Thermal Engineering, (Quebec), Canada 2003.

20. Aiyong Rong, Risto Lahdelma, An Efficient Linear Model and Optimization Algorithm for Trigeneration, University of Turku, Department of Information Technology, Turku, Finland 2004.

21. D. C. Bandean, S. Smolen, J. T. Cieslinski, «Working Fluid selection for Organic Rankine Cycle applied to heat recovery systems», World Renewable Energy Congress, Sweden, 2011.

22. F. de Monte, Calculation of thermodynamic properties of R407C and R410A by the Martin–Hou equation of state — part I: theoretical development, Dipartimento di Energetica, University of L’Aquila, L’Aquila, Italy 2001.
23. Huijuan Chen, D.Yogi Goswami, Elias K. Stefanakos, A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat, Clean Energy Research Center, College of Engineering, University of South Florida, Elsevier, USA 2010.
24. Thermophysical Properties of Refrigerants, Chapter 30, ASHRAE Handbook—Fundamentals 2009, pages 30-31.
25. Η. Κρητικού, «Διερεύνηση Εναλλακτικής Τιμολόγησης Μονάδων Συμπαραγωγής», ΠΑΕ, 2010.
26. Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, «Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού Θερμότητας και Ψύξης: Εγκαταστάσεις σε Κτήρια», Αθήνα, 2010.
27. Ιωάννης Σίσκος, «Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας» Ενεργειακές Τεχνολογίες, Ελλάδα, 2007.
28. Νόμος υπ αριθμόν 3851, Άρθρο 5, «Ορθολογικοποίηση της Τιμολόγησης Ενέργειας που Παράγεται από Σταθμούς ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ», Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2010.
29. Hettiarachchi Madhawa H. D., et al., Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low – temperature geothermal heat sources, Energy, 2007
30. Σημειώσεις Ψύξης Ι και ΙΙ – Σ. Χατζηδάκης - Εκδόσεις ΕΜΠ
31. Μαθιουδάκης Κωνσταντίνος, Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων, εκδόσεις Ε.Μ.Π
32. Κακαράς Εμμανουήλ, Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί, εκδόσεις Φούντας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Παράρτημα: Νομικό πλαίσιο για τη λειτουργία της συμπαραγωγής στην Ελλάδα

Η συμπαραγωγή δίνει στον καταναλωτή σημαντική δυνατότητα της κάλυψης των τελικών ενεργειακών του αναγκών, αλλά και στον παραγωγό ηλεκτρικής ενέργειας τη δυνατότητα παραγωγής με πολύ υψηλότερη θερμοδυναμική απόδοση απ' ό,τι οι παραδοσιακές μέθοδοι. Επομένως θα έπρεπε, λογικά, η ευρύτατη διάδοση των τεχνολογιών της συμπαραγωγής να εξαρτάται κυρίως από την οικονομικότητα των εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών και η προσπάθεια να κατευθύνεται προς τη σταδιακή μείωση του κόστους των συστημάτων αυτών, ώστε να αυξάνει το επιχειρηματικό ενδιαφέρον. Αυτό όμως δε συνέβαινε για αρκετά χρόνια στην Ελλάδα, αφού μόνο τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες προς αυτή την κατεύθυνση, κυρίως με τους νόμους 3468/2006 και 3851/2010. Ακολουθεί μια μικρή ανάλυση της νομοθεσίας διαχρονικά. [25]

Ο Ν. 2244/94 ουσιαστικά καθόρισε την απελευθέρωση, εν μέρει, της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες παραγωγής ισχύος μέχρι 50 MWe, οι οποίες αξιοποιούν ΑΠΕ ή είναι μονάδες ΣΗΘ. Δινόταν επίσης η δυνατότητα ΣΗΘ με φυσικό αέριο. Για τους ανεξάρτητους παραγωγούς, ο Ν. 2244/94 προέβλεπε τη δυνατότητα ΣΗΘ, με μονάδες συνδυασμένου κύκλου με καύσιμο το Φ.Α. και με ισχύ ίση το πολύ με τη θερμική και ψυκτική ισχύ των επιχειρήσεων που εξυπηρετούνται. Για τους αυτοπαραγωγούς, επιτρεπόταν η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με παραγωγή θερμότητας / ψύξης με ισχύ σταθμού το πολύ ίση με τη θερμική και ψυκτική ισχύ των εγκαταστάσεων του αυτοπαραγωγού, εφόσον πρόκειται για ΣΗΘ από συμβατικά καύσιμα, και αντίστοιχα χωρίς περιορισμό ισχύος, εφόσον πρόκειται για ενεργειακή αξιοποίηση υποπαραγών βιομηχανικού κυκλώματος ή από ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας. Στο νόμο επιδιώχθηκε η προώθηση της ΣΗΘ με την απόδοση κινήτρων και την προσπάθεια απλούστευσης των διαδικασιών και ρυθμίζονταν θέματα σχετικά με τη διάθεση της ηλεκτρικής ενέργειας και τις άδειες εγκατάστασης και λειτουργίας των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η τιμή αγοράς της Η.Ε. οριζόταν βάσει του αντίστοιχου τιμολογίου της ΔΕΗ και προβλεπόταν ίση με το 60% του σκέλους ενέργειας. Στην περίπτωση της ανεξάρτητης ηλεκτροπαραγωγής με μονάδες ΣΗΘ καύσης ΦΑ, η τιμή αγοράς καθοριζόταν βάσει του τιμολογίου της ΔΕΗ και περιείχε σκέλος ενέργειας (70% του αντίστοιχου τιμολογίου της ΔΕΗ) και σκέλος ισχύος (70% του αντίστοιχου τιμολογίου της ΔΕΗ). Σχετικά με τις άδειες ο Νόμος προέβλεπε τη

γνωμοδότηση της ΔΕΗ για την απορρόφηση της Η.Ε. και των προϋποθέσεων σύνδεσης στο Δίκτυο, οι διατάξεις του καταργήθηκαν με το Ν. 2773/99.

Με το Ν.2273/99 ρυθμίζονταν και θέματα ΣΗΘ, σύμφωνα με το πνεύμα της Οδηγίας 96/92/ΕΚ, την οποία ο νόμος ενσωμάτωσε στο εθνικό θεσμικό πλαίσιο. Με το νόμο προβλεπόταν η δυνατότητα να δίνεται προτεραιότητα από την κατανομή για τη συμπαραγόμενη ηλεκτρικής ενέργειας και καθορίζονταν τα ελάχιστα κριτήρια απόδοσης για της ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ΑΠΕ ή ΣΗΘ. [26]

Ο Ν.3175/2003 δημιούργησε τις προϋποθέσεις για την αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού αλλά και για τη διανομή της θερμικής ενέργειας μέσα από δίκτυα θερμότητας, περιγράφοντας τη διαδικασία διανομής θερμικής ενέργειας σε τρίτους και καθορίζοντας την αδειοδοτική διαδικασία για τη λειτουργία δικτύων διανομής θερμότητας και ειδικότερα αυτών που σχετίζονται με εγκαταστάσεις ΣΗΘ. Με την άδεια καθορίζονται ο χρόνος ισχύος της, η περιοχή κατασκευής του δικτύου θερμότητας, η τεχνολογία και οι όροι της διανομής θερμότητας στους καταναλωτές. Αν η θερμική ενέργεια παράγεται από εγκαταστάσεις ΣΗΘ, η Άδεια Διανομής Θερμικής Ενέργειας χορηγείται μαζί με την Άδεια Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Η ΚΥΑ αυτή τροποποιεί και συμπληρώνει την αντιστοίχιση των δραστηριοτήτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τους βαθμούς όχλησης που αναφέρονται στην πολεοδομική νομοθεσία.

Η ΚΥΑ έλυσε το χρόνιο πρόβλημα με την αδειοδότηση της ΣΗΘ σε κτήρια, που προηγούμενα απαγορευόταν λόγω όχλησης.

Η Κοινοτική Οδηγία 2004/8/ΕΚ δημιουργεί το πλαίσιο για την προώθηση συμπαραγωγής ενέργειας με βάση τη ζήτηση για χρήσιμη θερμότητα. Εισάγει την έννοια της Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Αποδοτικότητας, κατηγοριοποιώντας τα συστήματα ΣΗΘ ανάλογα με την ισχύ τους σε πολύ μικρή ΣΗΘ (εώς 50 kWe), μικρή ΣΗΘ (εώς 1 MWe) και ΣΗΘ (> 1 MWe).

Η Κοινοτική Οδηγία 2005/32/ΕΚ δημιουργεί το πλαίσιο για τον οικολογικό σχεδιασμό προϊόντων που καταναλώνουν ενέργεια και αφορά τα συστήματα πολύ μικρής και μικρής ΣΗΘ.

Ο Ν.3468/2006 εισήγαγε νέο πλαίσιο για τη χορήγηση άδειας, παραγωγής εγκατάστασης και λειτουργίας των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ Υψηλής Αποδοτικότητας (ΣΗΘΥΑ). Ο νόμος αναφέρεται ρητά στη ΣΗΘ Υψηλής Αποδοτικότητας, όπως αυτή ορίζεται από την ΚΟ 2004/8/ΕΚ, απλοποιείται η αδειοδοτική διαδικασία για επενδύσεις ΣΗΘΥΑ και τίθενται

αποκλειστικές προθεσμίες για την έκδοση των αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας για έργα ΣΗΘΥΑ. Θεσμοποιείται Κανονισμός Αδειών για την παραγωγή Η.Ε. από ΣΗΘΥΑ. Καθορίζεται η τιμολόγηση της Η.Ε. που παράγεται από ΣΗΘΥΑ και απορροφάται από το σύστημα ή το Δίκτυο, με σκοπό την απεξάρτηση από τα τιμολόγια της ΔΕΗ και τη διασφάλιση των επενδύσεων. Ο νόμος έθεσε νέες βάσεις για την αδειοδότηση έργων ΣΗΘΥΑ, ιδιαίτερα στην έγκριση περιβαλλοντικών μελετών, θέτει αυστηρότερα κριτήρια για την έγκριση των ΠΠΕ/ΜΠΕ και συντομότερο χρόνο για την έγκριση των περιβαλλοντικών όρων από τις αρμόδιες κρατικές υπηρεσίες.

Συμπαράγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Υψηλής Απόδοσης (Σ.Η.Θ.Υ.Α) ονομάζεται η συμπαράγωγή που εξασφαλίζει εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 10 %, σε σχέση με τη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στο πλαίσιο διακριτών διαδικασιών, καθώς και η παραγωγή από Μονάδες Συμπαράγωγής Μικρής και Πολύ Μικρής Κλίμακας που εξασφαλίζει εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, ανεξάρτητα από το ποσοστό της εξοικονόμησης. Ο υπολογισμός της εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας, όπου αυτός απαιτείται, γίνεται σύμφωνα με τα οριζόμενα στην περίπτωση β' του Παραρτήματος ΙΙΙ της Οδηγίας 2004/8/ΕΚ (L 52)» - Νόμος 3468/2006. [27]

Ο Ν. 3734/09 ενσωματώνει πλήρως την Κοινοτική Οδηγία 2004/8/ΕΚ. Βασικές τομές του νόμου είναι η μέθοδος υπολογισμού της ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ, ο υπολογισμός αποδοτικότητας της ΣΗΘ. Επίσης σημαντικό σημείο είναι η κατηγοριοποίηση των συστημάτων ΣΗΘΥΑ, ως προς το όριο του 1 ΜWe (μικρή ΣΗΘ), εγκρίνοντας ή όχι άπαξ, διάφορους τύπους μηχανών διαφόρων κατασκευαστών, για την περιβαλλοντική τους συμπεριφορά. Έτσι, ο κάθε επενδυτής θα υποβάλλει μόνο το έγγραφο έγκρισης της μηχανής ΣΗΘΥΑ, σχετικά με την περιβαλλοντική έγκριση.

Ο νόμος Ν. 3851/2010 με τίτλο «Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής» προωθεί την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Σ.Η.Θ.Υ.Α. (Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης) ως εξής:

α) Καθορίζει σαφώς την έννοια του παραγωγού ηλεκτρικής ενέργειας όπως φαίνεται: Παραγωγός από Α.Π.Ε. ή Σ.Η.Θ.Υ.Α. : Ο παραγωγός που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) ή από μονάδες Συμπαράγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης.

Αυτοπαραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. ή Σ.Η.Θ.Υ.Α.: Ο παραγωγός που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από μονάδες Α.Π.Ε. ή Σ.Η.Θ.Υ.Α. κυρίως για δική του χρήση και διοχετεύει τυχόν πλεόνασμα της ενέργειας αυτής στο Σύστημα ή στο Δίκτυο.

Αυτόνομος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε.: Ο παραγωγός που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από Α.Π.Ε. και του οποίου ο σταθμός δεν είναι συνδεδεμένος με το Σύστημα ή το Δίκτυο. (Ο ορισμός αυτός επεκτείνεται έμμεσα και για τις μονάδες συμπαραγωγής υψηλής απόδοσης)

β) Η άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. και Σ.Η.Θ.Υ.Α. χορηγείται για χρονικό διάστημα μέχρι είκοσι έτη και μπορεί να ανανεώνεται μέχρι ίσο χρόνο. Όμως οι παραγωγοί με Σ.Η.Θ.Υ.Α. έως 1 MW εγκατεστημένης ισχύος απαλλάσσονται από την υποχρέωση της άδειας.

γ) Καθορίζεται η τιμή της πωλούμενης στο Δίκτυο ενέργειας, συναρτήσει της τιμής του φυσικού αερίου ως εξής:

Τιμή Ενέργειας (€/MWh) = 87,85*ΣΡ.

ΣΡ είναι ο συντελεστής ρήτρας φυσικού αερίου ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\Sigma P = 1 + (M.T.\Phi.A. - 26) / (100 * \eta_{el})$$

Όπου:

M.T.Φ.Α.: η ανά τρίμηνο μέση μοναδιαία τιμή πώλησης φυσικού αερίου για συμπαραγωγή σε €/MWh ανωτέρας θερμογόνου δύναμης (Α.Θ.Δ) στους χρήστες Φ.Α. στην Ελλάδα εξαιρουμένων των πελατών ηλεκτροπαραγωγής. Η τιμή αυτή ορίζεται με μέριμνα της Δ.Ε.Π.Α. Α.Ε. και κοινοποιείται ανά τρίμηνο στον Δ.Ε.Δ.Μ.Η.Ε.

η_{el} : ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της διάταξης Σ.Η.Θ.Υ.Α. επί ανωτέρας θερμογόνου δύναμης (Α.Θ.Δ.) φυσικού αερίου, η οποία ορίζεται σε 0,33 για μονάδες Σ.Η.Θ.Υ.Α. > 1MWe και σε 0,35 για μονάδες Σ.Η.Θ.Υ.Α. > 1MWe. Η τιμή του ΣΡ δεν μπορεί να είναι μικρότερη της μονάδας. [28][25]

Όπως φαίνεται τα πλεονεκτήματα των συστημάτων Σ.Η.Θ. με καύση φυσικού αερίου στην Ελλάδα παρουσίασαν κάποια εμπόδια στη διάδοσή τους, κυρίως λόγω της ελλιπούς ενημέρωσης και υποστήριξης επενδυτών, καθώς και λόγω οικονομικής και επιχειρηματικής αδράνειας. Πλέον, όμως, υπάρχουν στελέχη επιχειρήσεων που κατέχουν την απαραίτητη γνώση του αντικειμένου, ενώ υπάρχει και εξειδικευμένο προσωπικό για τη λειτουργία αυτών των συστημάτων. Οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις δε δυσκολεύονται πια στην ετοιμασία του φακέλου μιας πρότασης προς έγκριση και ενδεχομένως και χρηματοδότηση. Ακόμη, το ύψος της αρχικής επένδυσης μειώνεται διαρκώς,

ενώ στην τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει συγκεκριμένη πολιτική.

Πλέον μπορούν να λειτουργήσουν σχήματα χρηματοδότησης από τρίτους (Third Party Financing) και οι εταιρίες παροχής ενεργειακών υπηρεσιών (Ε.Π.Ε.Υ. ή στα αγγλικά Energy Service Companies). Επιπλέον λόγω του πρόσφατου νομικού πλαισίου, διευκολύνεται η συμπαραγωγή σε Βιομηχανικές Περιοχές ή κοινοπραξίες επιχειρήσεων. Η συμπαραγωγή από ανεξάρτητους παραγωγούς επιτρέπεται όχι μόνον με τη χρήση φυσικού αερίου, αλλά και με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (πχ. Βιοκαύσιμα), με το ρόλο της Δ.Ε.Η. να είναι ιδιαίτερος αποδυναμωμένος.