



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Δ Ι Π Λ Ω Μ Α Τ Ι Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α

Προσομοίωση συμπεριφοράς θερμοκινητήρα LiBr-H₂O που
αξιοποιεί θερμικές πηγές χαμηλού δυναμικού

ΜΠΟΥΡΤΣΑΛΑΣ Γ. ΑΛΕΞΙΟΣ
99131

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΡΟΓΔΑΚΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	3
A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
A.1. ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	4
B. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
B.1. ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΠΗΓΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	10
B.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ RANKINE & KALINA	14
B.3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	17
B.4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ	23
B.5. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ $LiBr-H_2O$	28
B.6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ	29
Γ. ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
Γ.1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ	31
Γ.1.1. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ	35
Γ.1.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΑΓΚΑΙΩΝ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΕΩΝ	38
Γ.2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ	39
Γ.2.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ (FLOWCHART)	40
Γ.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΤΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	43
Γ.2.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΩΝ	44
Γ.2.4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ	46
Γ.2.5. ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ	47

Γ.3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	48
Γ.3.1.	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ - ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ	50
Γ.3.2.	ΓΡΑΦΙΚΟΣ ΙΣΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ	53
Γ.3.3.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΚΥΚΛΟ RANKINE	58
Γ.4.	ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ	59
Γ.4.1.	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	69
Γ.5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
Δ.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	
Δ.1.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ $\text{LiBr-H}_2\text{O}$	77
Δ.2.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΚΛΟΥ ΣΕ MathCAD	81
Δ.2.1.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ $\text{LiBr-H}_2\text{O}$	81
Δ.2.2.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΑΤΟΣ LiBr ΣΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ $\text{LiBr-H}_2\text{O}$	94
Δ.2.3.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ	97
Δ.2.4.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	106
Δ.3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	107
	ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ	119
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	120

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ένας κύκλος παραγωγής ενέργειας με τη χρήση ως λειτουργικού μέσου, το μίγμα βρωμιούχου λιθίου – νερού (LiBr-H₂O). Ο κύκλος είναι κατάλληλος για πηγές θερμότητας χαμηλού δυναμικού όπως είναι η θερμότητα που παράγεται από γεωθερμικές εγκαταστάσεις και βιομηχανικά απόβλητα. Στην περίπτωσή μας χρησιμοποιούμε θερμική εγκατάσταση που κάνει χρήση ηλιακής ενέργειας.

Η εργασία είναι χωρισμένη σε δύο μέρη, το θεωρητικό και το πρακτικό. Στο θεωρητικό μέρος γίνεται μια εισαγωγή στην εκμετάλλευση πηγών θερμότητας χαμηλού δυναμικού, παρουσιάζονται οι ιδιότητες του διαλύματος LiBr-H₂O, καθώς και τεχνολογίες που κάνουν χρήση τέτοιων διαλυμάτων ως λειτουργικών μέσων. Έπειτα συγκρίνουμε τον κύκλο που διερευνούμε με τους κύκλους Kalina και Rankine και γίνεται σύντομη περιγραφή του μηχανισμού απορρόφησης, που αποτελεί βασική διεργασία του κύκλου. Τέλος παρουσιάζονται κάποιες εφαρμογές μεγάλης αλλά και μικρής κλίμακας.

Στο πρακτικό μέρος παρουσιάζεται η εγκατάσταση στην οποία λειτουργεί ο κύκλος και επεξηγούνται οι θερμοδυναμικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Έπειτα διερευνάται η λειτουργία του κύκλου παραμετροποιώντας ως προς τις εξής συνθήκες λειτουργίας:

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} , που καθορίζει και την ελάχιστη θερμοκρασία T_{min} λειτουργίας του κύκλου
- Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου T_{max}
- Συγκέντρωση διαλύματος X% σε LiBr
- Μεταβολή της διαφοράς της σύστασης σε βρωμιούχο λίθιο (LiBr) μεταξύ πλούσιου και φτωχού διαλύματος ($\Delta X\%$) που επιτυγχάνεται στον κύκλο.

και παρουσιάζεται σε διαγράμματα:

- Ενθαλπίας – συγκέντρωσης h-X
- Θερμοκρασίας – εντροπίας T-s
- Συντελεστή συμπεριφοράς PF σε συνάρτηση με την μέγιστη θερμοκρασία T_{max} , την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} και την συγκέντρωση X του διαλύματος LiBr-H₂O.

Στη συνέχεια, συγκρίνεται η απόδοση του κύκλου με τον κύκλο Rankine και παρουσιάζεται ο υπολογιστικός κώδικας με τον οποίο αναπαραστήσαμε τον κύκλο.

Με τη βοήθεια υπολογιστικών δεδομένων που προέκυψαν από την επίλυση μαθηματικού μοντέλου προτείνεται μια προσεγγιστική εξίσωση που δίνει το μέγιστο συντελεστή συμπεριφοράς του κύκλου για κάθε θερμοκρασία λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, γνωρίζοντας την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την μέγιστη θερμοκρασία που επιλεγούμε να λειτουργήσει ο κύκλος μπορεί να προγνωστεί ο μέγιστος δυνατός συντελεστής συμπεριφοράς του κύκλου χωρίς να είναι αναγκαία η γνώση της συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O που χρησιμοποιείται.

A. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

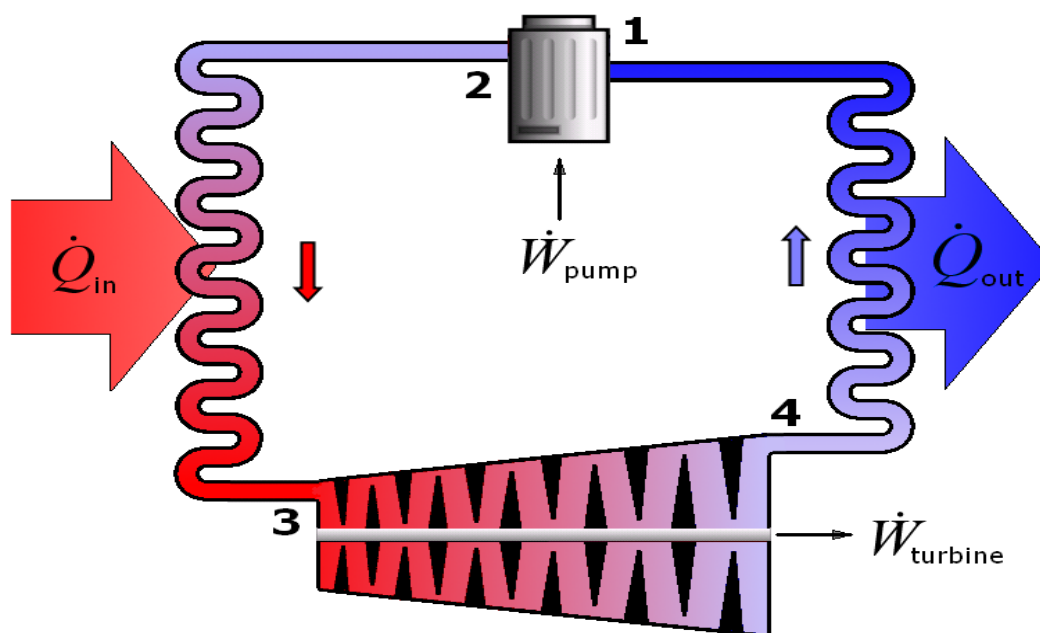
A.1. ΕΝΕΡΓΕΙΑ – ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Το υψηλό κόστος της παραγωγής ενέργειας στις μέρες μας και τα εντεινόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα επιβάλλουν την αναζήτηση μεθόδων παραγωγής της πιο προσοδοφόρων οικονομικά και πιο φιλικών με το περιβάλλον. Οι πηγές χαμηλού δυναμικού, των οποίων χρήση γίνεται σε αυτό το σύγγραμμα, βρίσκουν στις μέρες μας ολοένα και περισσότερες εφαρμογές μικρής κλίμακας και η βελτιστοποίηση της χρήσης τους γίνεται αντικείμενο έρευνας σε αυτήν την μελέτη.

Η είσοδος στον 21 αιώνα κατέστησε σαφές πως η μέχρι πρότινος διαχείριση των ενεργειακών πόρων του πλανήτη δε γίνεται με σωστό, αποδοτικό και φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο. Γι' αυτό η στροφή σε ποιο «ήπιες» μορφές ενέργειας θεωρείται πλέον μονόδρομος.

Η ευρωπαϊκή ένωση κατέχοντας τον ηγετικό ρόλο παγκοσμίως στην ανάπτυξη νέων ενεργειακών τεχνολογιών με εξαιρετικά χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, επιβάλλει διαρκώς νέα μέτρα για την εξυγίανση του πλανήτη και για ενέργεια που θα είναι φιλική προς το περιβάλλον, ώστε μακροπρόθεσμα να αντιστραφούν οι αρνητικές μεταβολές που έχει υποστεί το κλίμα. Ακόμη η έρευνα, η τεχνολογική πρόοδος και η οικονομική ενίσχυση του τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από την αγορά οδήγησε στην καθιέρωση είκοσι μίας διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τον 21 αιώνα, όταν παλαιότερα μόνο η ηλιακή ενέργεια θεωρείτο πως μπορούσε να αποδώσει άμεση και καθαρή ενέργεια. Έτσι σήμερα, οι υδροηλεκτρικές, οι υποθερμικές, οι γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και η χρήση βιομάζας αποτελούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με πολλές δυνατότητες ανάπτυξης για το μέλλον.

Η διαρκής ανάπτυξη της τεχνολογίας και η διεύρυνση των επιστημονικών μας ορίων συντείνουν στην εφαρμογή νέων μεθόδων και προσεγγίσεων όσον αφορά στην εκμετάλλευση πηγών ενέργειας από διάφορες εφαρμογές που παλαιότερα δεν ήταν εφικτή. Έτσι, πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή και η γεωθερμία, τις οποίες μέχρι πρότινος, μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε σε πολύ μικρό βαθμό και σε λίγες εφαρμογές, είναι δυνατό, πλέον, να αποτελέσουν λύσεις οικονομικά και οικολογικά βιώσιμες, δεδομένου ότι με τη χρήση κατάλληλων και ειδικά σχεδιασμένων εργαζόμενων μέσων και διατάξεων, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε ποσά θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών με τα οποία επιτυγχάνονται μεγάλοι βαθμοί απόδοσης. Επίσης, μπορούμε να ανακτήσουμε την αποβαλλόμενη θερμότητα από τα καυσαέρια των στροβίλων ή από διάφορα άλλα βιομηχανικά απόβλητα και να παράγουμε έργο ή κατ' ανάγκη ψυκτική ισχύ αυξάνοντας την συνολική απόδοση της διαδικασίας παραγωγής ισχύος.

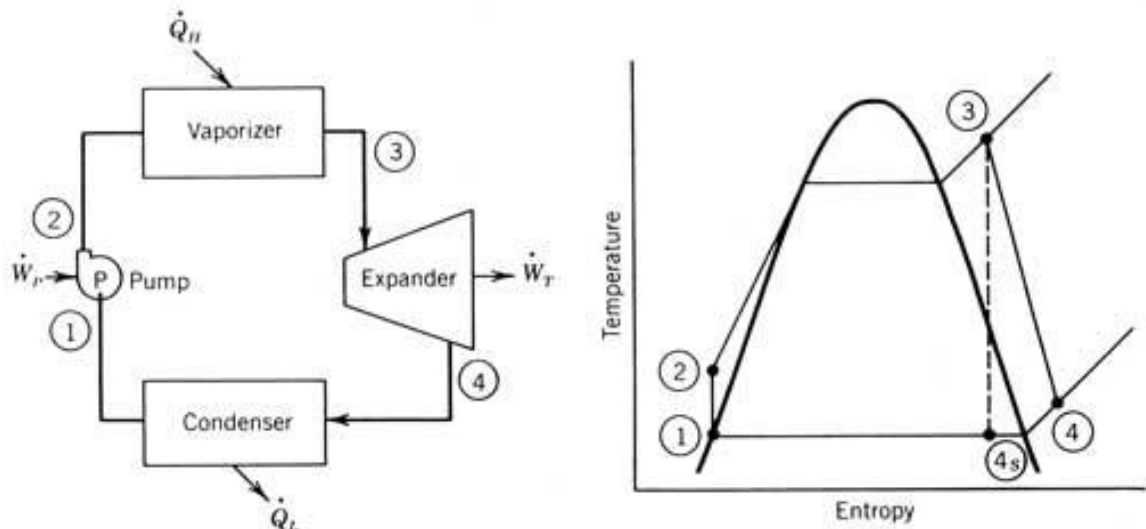


Σχήμα 1. Ποσά ενέργειας συναλασσόμενα σε θερμοδυναμικό κύκλο παραγωγής ισχύος

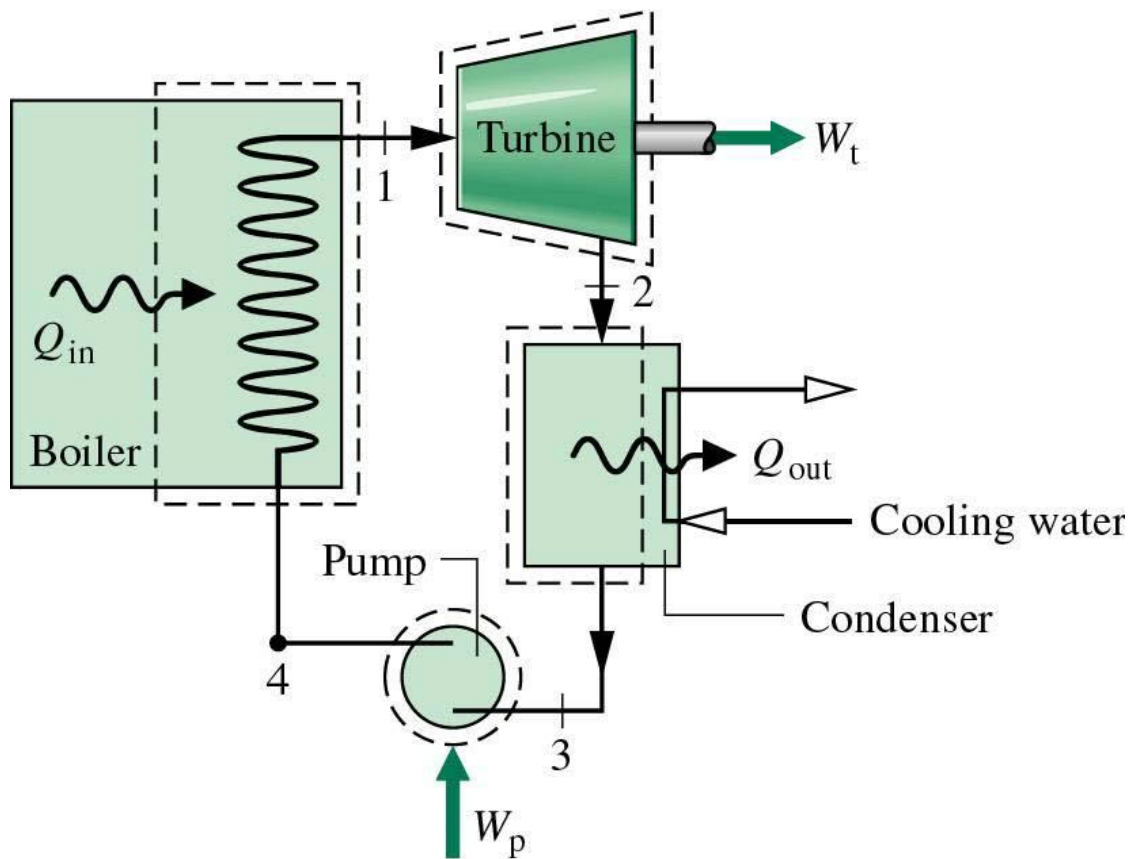
Διατάξεις που κάνουν χρήση και των προαναφερθέντων ποσών θερμότητας αποτελούν με την ευρεία έννοια οι μηχανές θερμότητας. Οι θερμοδυναμικοί κύκλοι Rankine και Kalina με τη χρήση καθαρού νερού ή μιγμάτων σε συγκεκριμένες συγκεντρώσεις όπως είναι το διάλυμα αμμωνίας - νερού (NH₃ - H₂O) ή το διάλυμα βρωμιούχου λιθίου - νερού (LiBr-H₂O) εφαρμόζονται ως επί το πλείστον, αλλά αρκετές φορές συναντώνται με κάποιες αλλαγές ή προσθήκες συσκευών που βελτιώνουν τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά των κύκλων, αυξάνοντας έτσι την απόδοσή τους.

Ο όρος μηχανή θερμότητας περιγράφει μια μηχανή η οποία παράγει έργο δουλεύοντας μεταξύ ενός δοχείου υψηλής θερμοκρασίας και ενός δοχείου χαμηλής θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τον 2^ο θερμοδυναμικό νόμο, μια μηχανή θερμότητας έχει τη μέγιστη απόδοση όταν δουλεύει με κύκλο Carnot. Ωστόσο, πρακτικές δυσκολίες που προκύπτουν κατά τη συμπίεση του υγρού ατμού (υψηλή ογκομετρική ροή, μη ομογενές μέσο που δημιουργεί δυσκολίες στην συναλλαγή θερμότητας στους ευμάλακτες μα και προβλήματα διάβρωσης σε ευπαθή μέρη, όπως οι στρόβιλοι) οδήγησαν στην χρήση του κύκλου Rankine, στον οποίο το εργαζόμενο ρευστό συμπυκνώνεται πλήρως (μεταβολή 2→3, σχήμα 1) και επαναφέρεται στην πίεση του λέβητα με μια τροφοδοτική αντλία (μεταβολή 3→4, σχήμα 1). Το έργο που δαπανάται από την αντλία είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με αυτό του συμπιεστή και σε χαμηλές πιέσεις πολλές φορές, όπως και στον κύκλο που διαπραγματεύεται η παρούσα διπλωματική, αμελείται.

Ο κύκλος Rankine, που πήρε το όνομά του από τον σκωτσέζο επιστήμονα William John Macquorn Rankine, είναι ένας θερμοδυναμικός κύκλος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σταθμούς παραγωγής ισχύος.

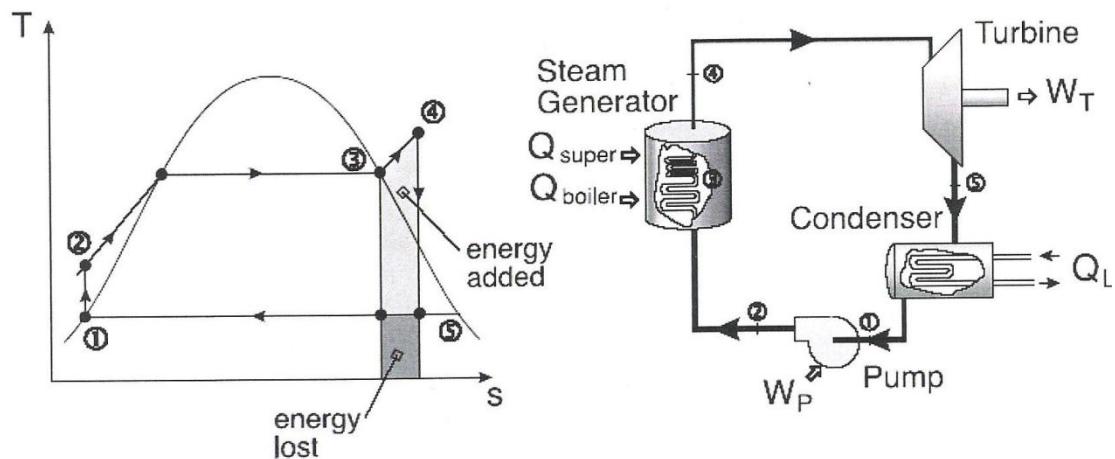


Σχήμα 2. Αναπαράσταση απλού κύκλου Rankine

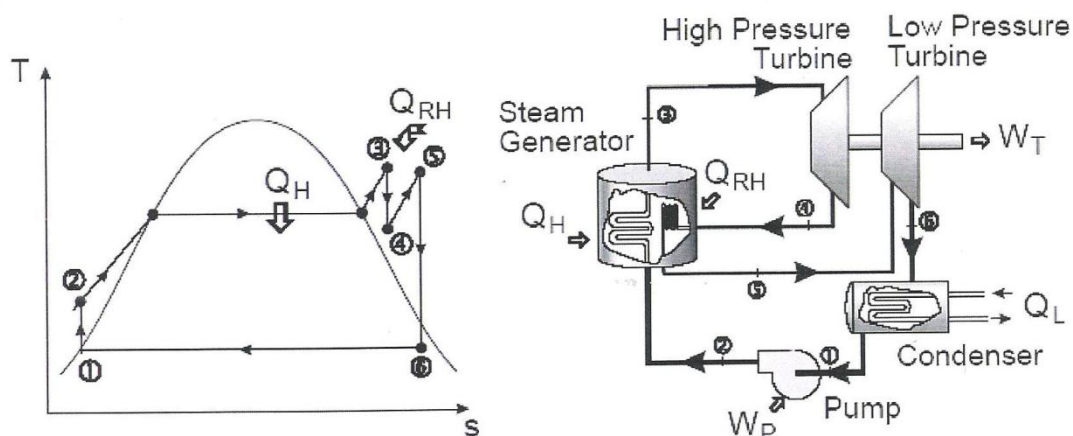


Σχήμα 3. Διάταξη ενός απλού κύκλου Rankine

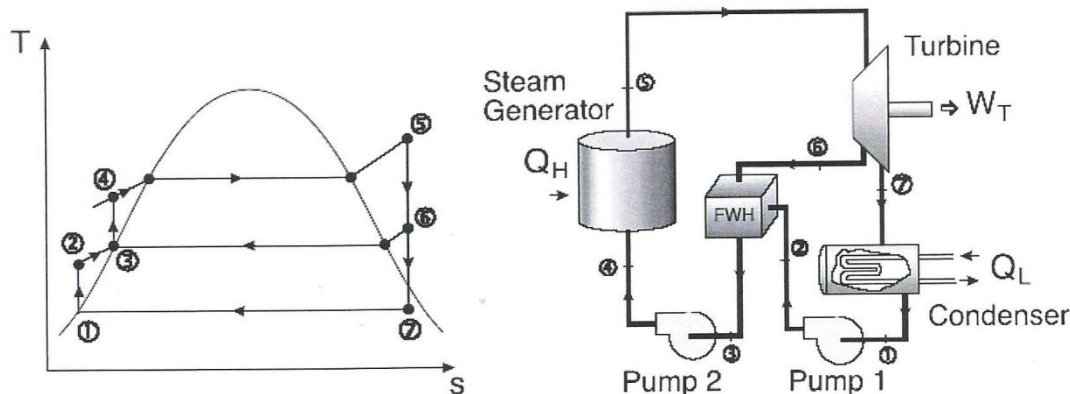
Προκειμένου να βελτιώσουμε την απόδοση του κύκλου μπορούμε να αυξήσουμε την μέγιστη θερμοκρασία που θερμαίνουμε τον ατμό προσθέτοντας έναν υπερθερμαντή (μεταβολή 3→4, σχήμα 4). Επιπλέον βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη αναθερμαντή (μεταβολή 4→5, σχήμα 5), όπου ο ατμός εκτονώνεται μέχρι μια ενδιάμεση πίεση (μεταβολή 3→4, σχήμα 5) και μετά αναθερμαίνεται έως την υψηλή θερμοκρασία του λέβητα. Ο ιδανικός θερμοκός βαθμός απόδοσης που θα μπορούσε να επιτύχει μία εγκατάσταση κύκλου Rankine με αναθέρμανση είναι μέχρι και 55%. Ο κύκλος Rankine κερδίζει πάρα πολύ σε απόδοση όταν το τροφοδοτικό νερό προθερμανθεί από ατμό που προέρχεται από τον ατμοστρόβιλο με αναγέννηση (μεταβολή 2→3, σχήμα 6).



Σχήμα 4. Αναπαράσταση κύκλου Rankine με υπερθερμαντήρα.



Σχήμα 5. Αναπαράσταση κύκλου Rankine με υπερθερμαντήρα και αναθερμαντήρα.



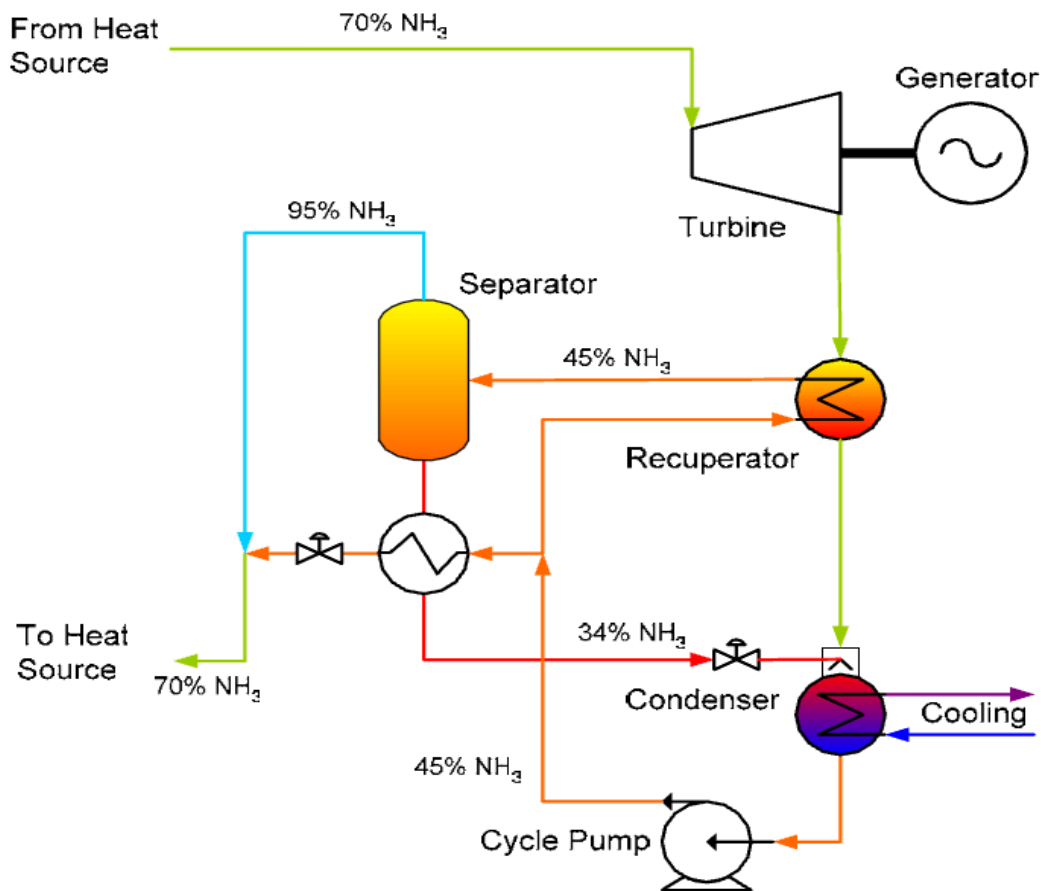
Σχήμα 6. Αναπαράσταση κύκλου Rankine με αναγέννηση.

Δυνατότητα για ακόμη μεγαλύτερη απόδοση του κύκλου δίνει η χρήση υλικών κατασκευής που επιτρέπουν την επίτευξη υψηλότερων θερμοκρασιών ή διαφορετικών εργαζόμενων μέσων. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο παράδειγμα αποτελεί ο οργανικός κύκλος Rankine, στον οποίο χρησιμοποιούνται εργαζόμενα μέσα με χλωροφθοριούχους άνθρακες ή άλλα μέσα με χαμηλή κρίσιμη θερμοκρασία που είναι πιο εκμεταλλεύσιμα σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Κύκλοι Rankine με εργαζόμενο μέσο αμμωνία – νερό ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$), που ονομάζονται και διμερείς, έχουν μελετηθεί και έχει αποδειχθεί η καλύτερη απόδοσή τους σε σχέση με ένα απλό κύκλο ατμού. Σε κύκλο Rankine με αμμωνία – νερό ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$), το εργαζόμενο μέσο διατηρεί σταθερή τη σύνθεσή του σε όλες τις φάσεις του κύκλου.

Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα για υψηλότερους βαθμούς απόδοσης με τον κύκλο Kalina. Παρότι δεν έχει την απλότητα του κύκλου Rankine, η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του εργαζόμενου μέσου αμμωνίας – νερού ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$) με μία κατάλληλη εγκατάσταση είναι εφικτή.

Η αλλαγή της σύνθεσης του εργαζόμενου μέσου είναι απαραίτητη σε αρκετά στάδια στον κύκλο Kalina και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται μια σαφώς πιο πολύπλοκη διάταξη. Το σύστημα διύλισης συμπύκνωσης που εμπεριέχει, αποτελείται από διαχωριστή, συμπυκνωτές και εναλλάκτη θερμότητας (Σχήμα 7). Επιτυγχάνεται με αυτόν τον τρόπο η μείωση της υψηλής συγκέντρωσης του μίγματος σε αμμωνία στην έξοδο του στροβίλου με την απορρόφησή του από το φτωχό μίγμα και την εκτόνωση του στροβίλου σε χαμηλότερες πιέσεις αποδίδοντας περισσότερο έργο.



Σχήμα 7. Διάγραμμα κύκλου Kalina

Επιπλέον, η δυνατότητα ρύθμισης της σύνθεσης του μίγματος αμμωνίας – νερού ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$) επιτρέπει τον έλεγχο των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του εργαζόμενου μέσου ανά πασα στιγμή και υπό οποιοσδήποτε συνθήκες. Έτσι, εφόσον για κάθε κύκλο Kalina υπάρχει μια βέλτιστη σύνθεση του μίγματος για δεδομένη θερμοκρασία ψύξης και θερμότητα ατμοποίησης, με την παραπάνω διάταξη μπορεί να ρυθμιστεί όλη η εγκατάσταση στη βέλτιστη απόδοση.

Γίνεται λοιπόν κατανοητό πως η χρήση μειγμάτων αντί ενός καθαρού υγρού, βοηθά στη βελτίωση της θερμοδυναμικής απόδοσης, αφού η συνεργασία μεταξύ της δοθείσας πηγής θερμότητας και του εργαζόμενου μέσου είναι αποδοτικότερη. Οι κύκλοι Rankine και Kalina μπορούν να βελτιστοποιήσουν την παράγωγή ισχύος και συγκεκριμένα σε παραδοσιακές εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος με ατμό. Συνεπώς οι εγκαταστάσεις είναι πιο αποδοτικές και η ελάττωση των ρύπων καθίσταται εφικτή.

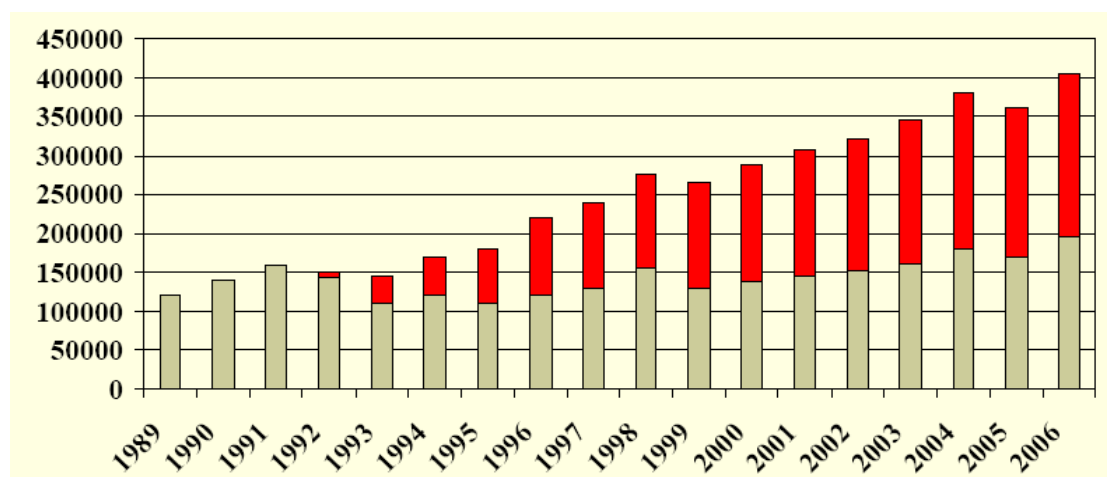
B. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

B.1. ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΠΗΓΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Η παράγωγή ισχύος από πηγές χαμηλού δυναμικού αποτελεί ένα εγχείρημα που βρίσκεται πολλές δεκαετίες υπό έρευνα και απαριθμεί στις μέρες μας αρκετές λειτουργικές ενεργειακές εγκαταστάσεις. Μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις αποτελούσαν το σύνηθες πεδίο εφαρμογής, εξαιτίας της καλής αναλογίας μεταξύ κόστους μελέτης, κατασκευής και μακροπρόθεσμης απόδοσης, μα πλέον σήμερα τις συναντάμε και σε μικρές εγκαταστάσεις, ακόμη και σε οικιστικό επίπεδο.

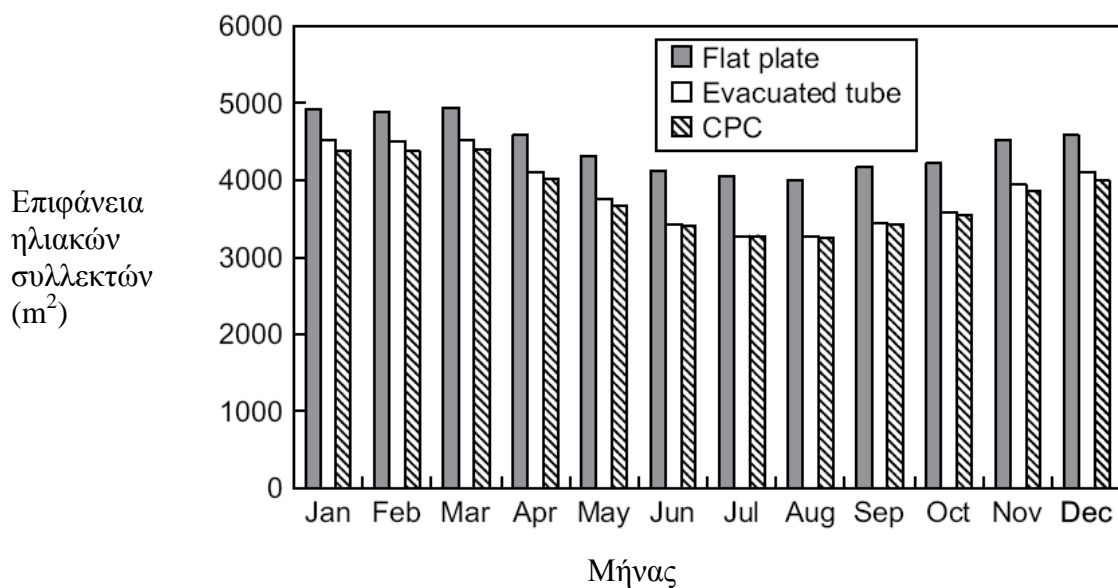
Η Ισλανδία επωφελούμενη από το φυσικό πλούτο της περιοχής σε θερμά νερά, που οφείλεται στα ιδιόμορφα γεωλογικά χαρακτηριστικά του νησιού, εδώ και πολλά χρόνια κατέχει τον πρώτο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Η πρωτοπόρος χώρα στον τομέα της γεωθερμίας και τεχνολογικών λύσεων συνυφασμένων με το περιβάλλον, έχοντας τεχνογνωσία και εμπειρία οδήγησε σε μια αλλαγή στον τρόπο που παραγόταν ενέργεια μέχρι πρότινος, δίνοντας το παράδειγμα για μια καθολική ανάπτυξη των τεχνολογιών που έκαναν χρήση πηγών θερμότητας χαμηλών θερμοκρασιών. Η θεωρία που κρύβεται πίσω από την πράξη είναι η σταθερή, υψηλή, ακόρεστη κι αμετάβλητη θερμοκρασία του υπεδάφους που επικρατεί στα αβαθή υποστρώματα της γης.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον εδώ και πολλές δεκαετίες, όχι μόνο εξαιτίας της άμεσης εκμετάλλευσής της σε εφαρμογές θέρμανσης και ηλεκτροδότησης, αλλά και σε εφαρμογές παραγωγής ψυκτικής και ηλεκτρικής ισχύος. Βασικός εκπρόσωπος της εφαρμογής αυτής είναι οι μηχανές απορρόφησης. Με σημαντικές διαφορές ως προς τον τρόπο κατασκευής, λειτουργίας και το εργαζόμενο μέσο που κάνουν χρήση, οι μηχανές αυτές μπορούν να καλύψουν από μικρές ανάγκες παραγωγής ισχύος μέχρι και ισχύς αρκετών MW.



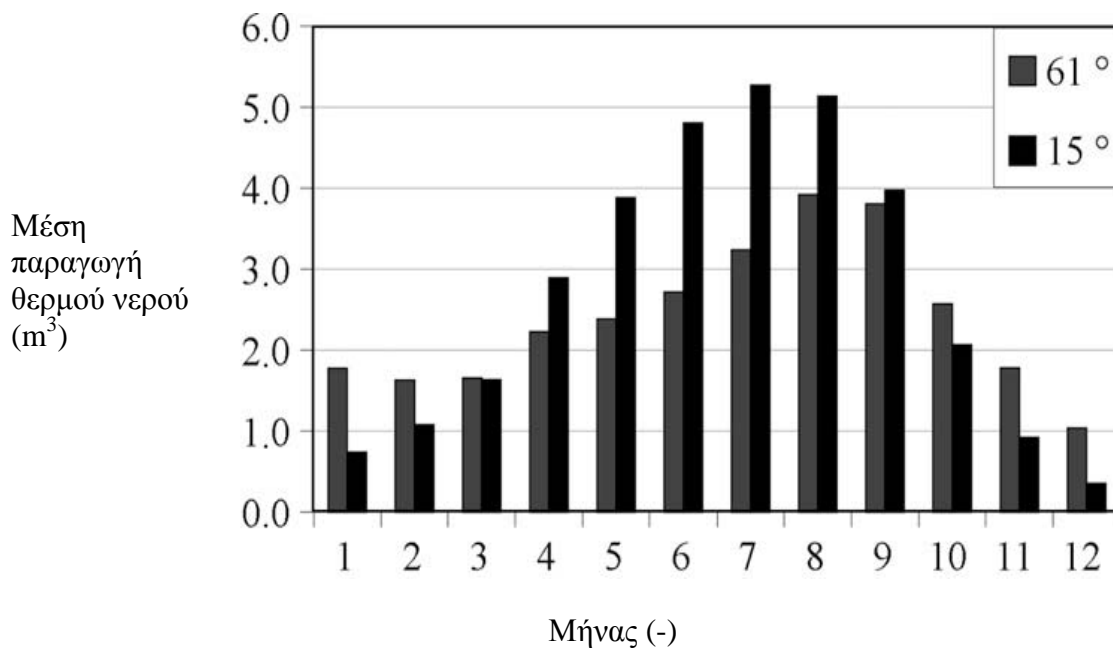
Σχήμα 8. Νέες εγκαταστάσεις ηλιακών κατόπτρων (σε m²) στην Ελλάδα

Συγκεκριμένα στην Ελλάδα, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει κυρίως λόγω της χρήσης κλιματιστικών μηχανών. Αυτή η χρήση είναι μεν λογική αλλά και πηγή πολλών προβλημάτων για την τοπική κοινωνία, την ενεργειακή και οικονομική πολιτική ενός τόπου. Αυτά τα μέγιστα καλύπτονται κυρίως από μονάδες αεριοστρόβιλων που η χρήση τους είναι αντιοικονομική και ρυπαρή ενώ και ο χρόνος ζωής τους είναι περιορισμένος με αποτέλεσμα την συχνή αλλαγή τους. Πρέπει να πούμε ότι το πρόβλημα αυτό αυξάνει κατά πολύ τα ξηρά έτη όπου τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας τίθενται πολλούς μήνες εκτός λειτουργίας. Αντιλαμβανόμαστε συνεπώς το μεγάλο οικονομικό κόστος που έρχεται να καλύψει ο πολίτης το οποίο και δυσανάλογο θα είναι με την κατανάλωσή του και υπερβολικά μεγάλο. Παρατηρείται μάλιστα, την εποχή με την πιο έντονη ηλιοφάνεια, πως η επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών που απαιτείται για τη σταθερή παροχή ενέργειας όλο το χρόνο, μειώνεται έως και 25% κατά τους θερινούς μήνες.



Σχήμα 9. Αναγκαία επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών για την αποτελεσματική αύξηση της θερμοκρασίας των 20°C σε εγκατάσταση της τάξεως των 100 KWe.

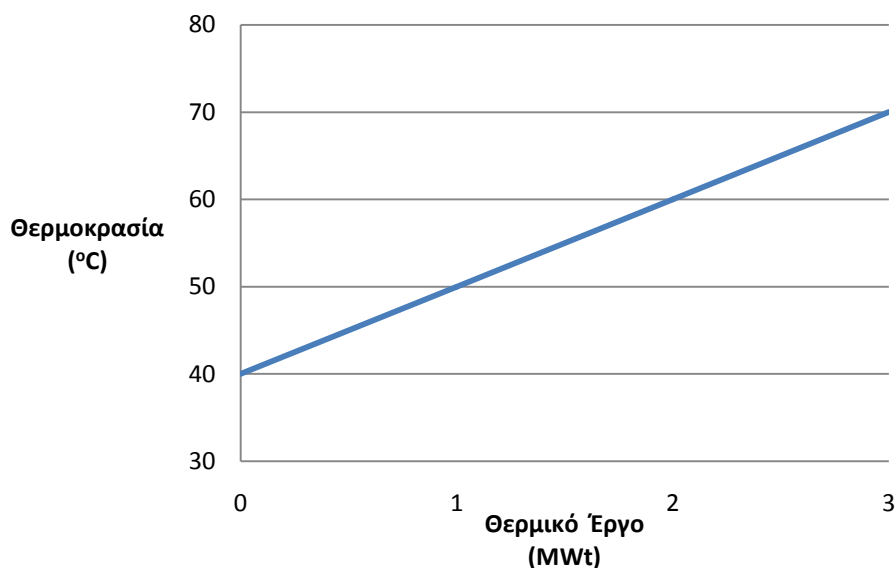
Στη χώρα μας η θερμοκρασία περιβάλλοντος έχει άμεσο αντίκτυπο στην ενεργειακή ζήτηση. Έρευνες έχουν δείξει ότι αυξάνει κατά 3-4% κάθε χρόνο το οποίο αντιστοιχεί σε κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας περίπου 1000GWh και συνεπώς απαιτεί την εγκατάσταση ενός νέου εργοστασίου ηλεκτρικής ενέργειας των 300MW κάθε 18-24 μήνες. Από αυτήν την αύξηση το 7% αντιστοιχεί σε ψύξη και θέρμανση όμως σε αυτό το ποσοστό οφείλεται το 29% των εκπομπών CO₂. Το 1970 οι εκπομπές CO₂ ήταν 22 εκατομμύρια τόνοι ενώ μέχρι το τέλος του 1990 έφτασαν τα 83 εκατομμύρια.



Σχήμα 10. Επίδραση της κλίσης των ηλιακών συλλεκτών στην μέση παραγωγή θερμού νερού.

Προς το παρόν μόνο η μεγάλης κλίμακας απολιθωμένων καυσίμων παραγωγή ενέργειας είναι πιο φθηνή από τις διαθέσιμες ηλιακές εναλλακτικές. Όμως η παραπάνω παραγωγή ενέργειας έχει φτάσει το όριο ωριμότητας της και δεν μπορούμε να αναμένουμε σημαντικές βελτιώσεις άρα και μείωση του κόστους ενέργειας. Τουναντίον λόγω μείωσης των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων μόνο αύξηση μπορούμε να προσδοκούμε.

Στο παρακάτω σχήμα αποδίδεται γραφικά η πρόσδοση θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο, που είναι το διάλυμα βρωμιούχου λιθίου – νερού LiBr - H₂O. Το θερμό νερό από την ηλιακή εγκατάσταση ψύχεται προκειμένου να θερμάνει το διάλυμα από τους 40°C μέχρι τους 70°C.



Σχήμα 11. Πρόσδοση Θερμότητας στο εργαζόμενο μέσο

Η αξιοποίηση του ενεργειακού αποθέματος από πηγές θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας γίνεται με την απορρόφηση μέρους της θερμότητας που εμπεριέχει και με μετατροπή της σε ωφέλιμο έργο. Ωστόσο, ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος περιορίζει την ολοκληρωτική μετατροπή της θερμότητας από πηγή χαμηλής θερμοκρασίας σε έργο. Επίσης υπάρχει και ένα κατώτερο όριο εκμετάλλευσής της, κάτω από το οποίο η απορρόφηση περαιτέρω θερμότητας καθίσταται ασύμφορη, καθώς απαιτούνται μεγάλες και δαπανηρές εγκαταστάσεις.

B.2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΝ RANKINE & KALINA

Οι κύκλοι Kalina και Rankine διαφοροποιούνται κυρίως στη χρήση του εργαζομένου μέσου. Στον κύκλο Kalina, η σύσταση του μίγματος αμμωνίας – νερού ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$) μεταβάλλεται, πετυχαίνοντας έτσι τη βέλτιστη δυνατή εκμετάλλευση της πηγής θερμότητας και συνεπώς έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, έναντι του κύκλου Rankine. Ο κύκλος Carnot επιτυγχάνει την υψηλότερη απόδοση μιας και οι μεταβολές που πραγματοποιούνται σε αυτόν είναι ιδανικές και συνεπώς οι μέγιστες δυνατές. Ακόμη, η απόδοση υγρού (Liquid) είναι η μέγιστη απόδοση λαμβάνοντας υπόψη ότι η πηγή θερμότητας ψύχεται όσο αφαιρούμε θερμότητα από αυτή.

Ο κύκλος Carnot ορίζει την ιδανική μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε έργο. Οι μηχανές Carnot, που είναι και αναστρέψιμες μηχανές θερμότητας, είναι οι πιο αποδοτικές εργοπαραγωγές μηχανές. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί μια θερμική μηχανή η όποια εκμεταλλεύεται μια πηγή θερμότητας για πρόσληψη ενέργειας και μια καταβόθρα για το ποσό της απορριπτόμενης ενέργειας.

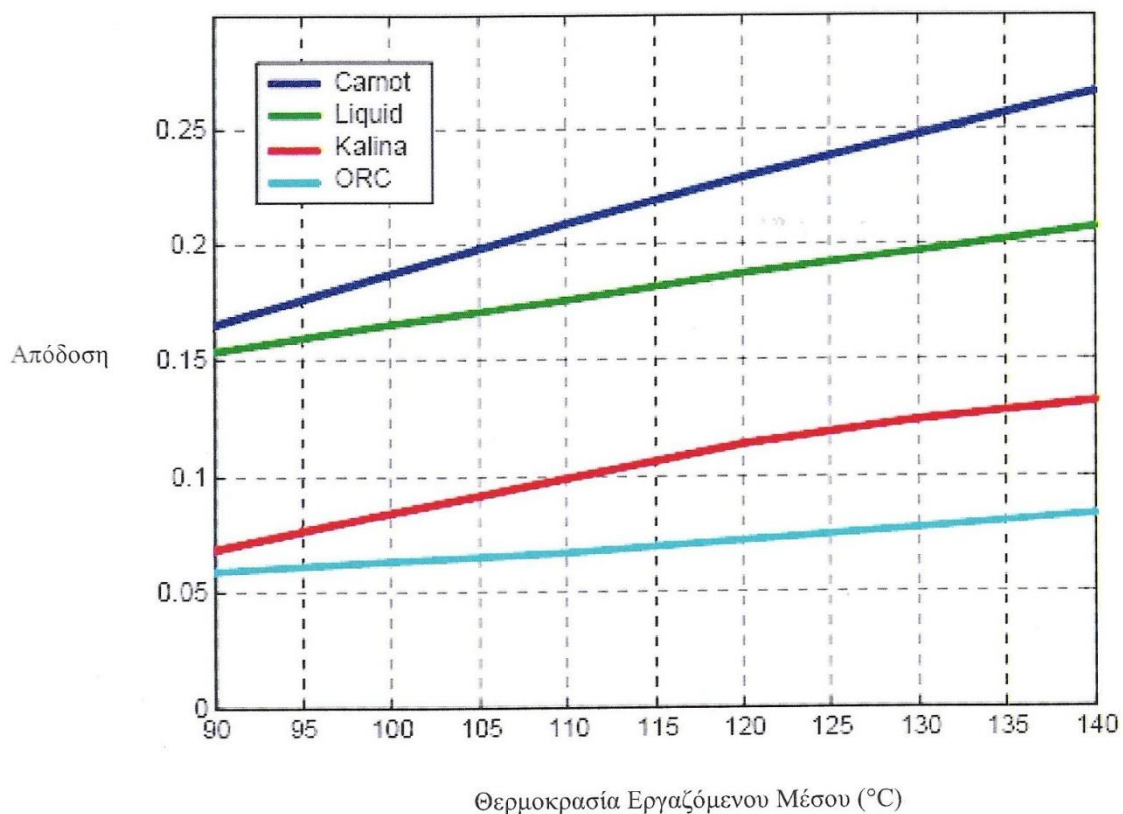
Οι πηγές θερμότητας χαμηλού δυναμικού αποτελούν πηγές ενέργειας περιορισμένης εκμετάλλευσης εξαιτίας του μικρού ποσού θερμότητας που εμπεριέχουν ανά μονάδα όγκου. Όταν γίνεται εκμετάλλευση αυτής της ενέργειας με απλά εργαζόμενα μέσα, όπως είναι το νερό, τότε η απόδοσή της είναι πολύ μικρή και καθίσταται οικονομικά ασύμφορη.

Ο κύκλος Kalina αποτελεί μια προσέγγιση στην αύξηση της απόδοσης στην ενεργειακή αυτή μετατροπή. Το βασικό όφελος από τη χρήση διαλύματος αμμωνίας – νερού ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$) στον κύκλο Kalina, αποτελεί το γεγονός ότι η πρόσδωση της θερμότητας γίνεται με παράλληλη μεταβολή της θερμοκρασίας. Γι' αυτό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί σε πηγές με καθορισμένη θερμοκρασιακή ικανότητα όπου η θερμοκρασία μειώνεται συνεχώς. Έτσι όμως, περιορίζεται και η αύξηση της εντροπίας κατά την εναλλαγή θερμότητας με το κύριο ρευστό.

Ο οργανικός κύκλος Rankine με εργαζόμενο μέσο διμερές μείγμα (ORC) είναι μια εναλλακτική λύση του κύκλου Kalina και έχει ευρύτετη εφαρμογή στις μέρες μας. Η σύσταση του διμερούς μίγματος είναι σταθερή. Η διαφορά με τον κύκλο Kalina (μεταβλητή σύσταση του διαλύματος αμμωνίας νερού) είναι στο παραγόμενο έργο όπου ο κύκλος Kalina υπερέχει. Οι δυο παραπάνω κύκλοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δευτερεύοντες σε εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου, όπως για παράδειγμα σε αεριοστρόβιλο. Η ατμοποίηση πραγματοποιείται με μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας του διαλύματος, γεγονός που επιτρέπει την εκμετάλλευση της θερμότητας της πηγής θέρμανσης. Η καλή συνεργασία του εργαζομένου μέσου, που συνήθως είναι διάλυμα βρωμιούχου λιθίου – νερού $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$, με ήπιες μορφές ενέργειας, όπως είναι οι πηγές θερμότητας χαμηλού δυναμικού, μειώνει το κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης, αφού δεν είναι αναγκαία η χρήση δαπανηρών καυσίμων υψηλής θερμικής απόδοσης. Ακόμη η λειτουργία της εγκατάστασης δεν απαιτεί τη συνεχή παρουσία και υποστήριξη ανθρώπινου δυναμικού, αφού μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Παρακάτω συγκρίνεται η αποδοτικότητα των τριών κύκλων, Carnot, Rankine, Kalina, βάσει της θερμοκρασίας (σε °C) υπό τις εξής συνθήκες:

- Η πηγή θερμότητας είναι της τάξης των 10 MW, η όποια ψύχεται μέχρι τους 80 °C,
- η παροχή νερού για τη συμπύκνωση είναι 120 kg/s και η θερμοκρασία του στους 20 °C,
- Η ελαχίστη θερμοκρασιακή διαφορά στους εναλλάκτες θερμότητας είναι 3 °C
- και η ελαχίστη θερμοκρασιακή διαφορά στον συμπυκνωτή αέρα είναι 10 °C.



Σχήμα 12. Σύγκριση απόδοσης κύκλων βάση της θερμοκρασίας.

Οι δύο κύκλοι δεν διαφέρουν σημαντικά από άποψη κόστους, ωστόσο χρησιμοποιούνται για εφαρμογές διαφορετικής κλίμακας. Έτσι ο κύκλος Kalina απαντάται σε μικρές εγκαταστάσεις με εργαζόμενο μέσο το μίγμα αμμωνίας – νερού, (NH₃ – H₂O) το οποίο λόγω της ιδιαίτερης φύσης του απαιτεί μεγαλύτερο κόστος χειρισμού. Ωστόσο, η αποδοτικότητα της εγκατάστασης είναι μεγαλύτερη από αυτή του κύκλου Rankine, εξαιτίας της καλύτερης συνεργασίας του εργαζόμενου μέσου με την πηγή θερμότητας. Η συνεχής μεταβολή της σύστασης καθ' όλη την πορεία του κύκλου επιτρέπει την βέλτιστη απορρόφηση ενέργειας με την μικρότερη μεταβολή της εντροπίας. Έτσι, η πρόσληψη θερμότητας είναι μεγαλύτερη και αντίστοιχα οι παραγόμενες KWh ανά μονάδα καυσίμου ή παροχή θερμότητας είναι περισσότερες.

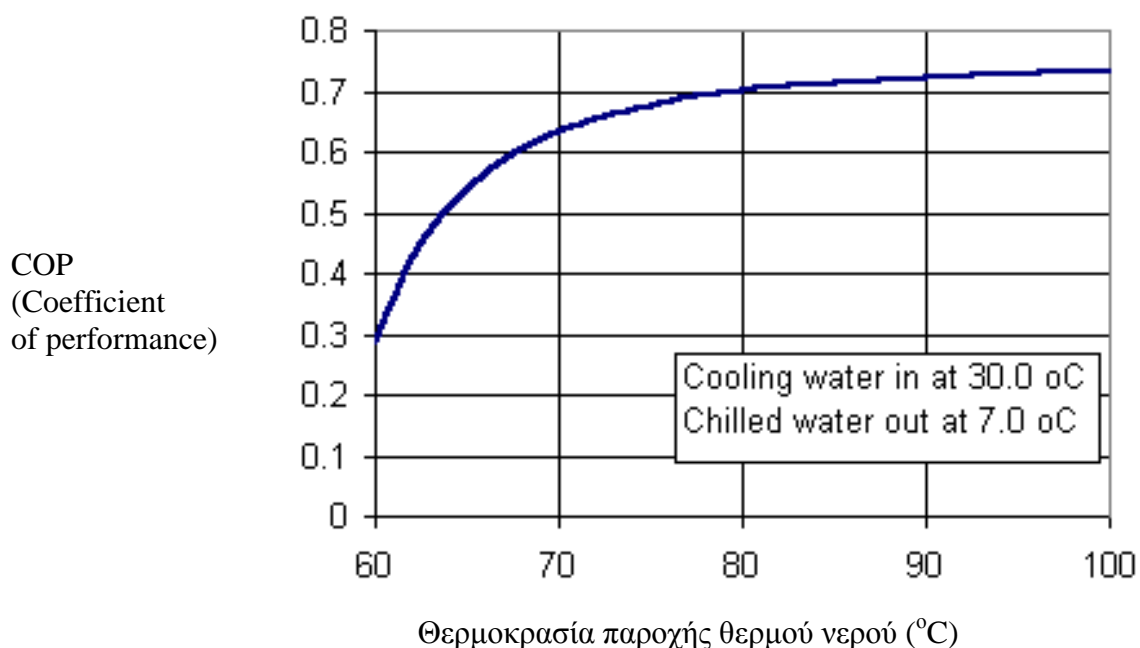
Οργανικοί κύκλοι (ORC) με φιλικά προς το περιβάλλον εργαζόμενα μέσα, συναντώνται σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, καθώς είναι πιο οικονομικό και πιο ασφαλές μέσο από το μίγμα αμμωνίας – νερού (NH₃ – H₂O) και επίσης δεν είναι επικίνδυνο σε περίπτωση διαρροών ή διαβρωτικό για τις συσκευές και τις σωληνώσεις της εγκατάστασης. Ακόμη, η επένδυση σε μια εγκατάσταση που λειτουργεί με τον κύκλο Rankine στοιχίζει λιγότερο, ενώ η αντοχή της εγκατάστασης στο χρόνο αποδεικνύεται ικανή ώστε να υπάρξει σίγουρη απόσβεση της επένδυσης.

B.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι θερμοδυναμικοί κύκλοι παραγωγής ισχύος Rankine & Kalina, που προλογίσαμε παραπάνω, βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς διαφορετικούς ενεργειακούς τομείς. Ειδικότερα, ο κύκλος Rankine χρησιμοποιείται ευρέως σε εγκαταστάσεις ψύξης, αφού σε συνεργασία με τις ιδιότητες του εργαζομένου μέσου βρωμιούχου λιθίου LiBr - H₂O δίνει πολύ υψηλούς βαθμούς απόδοσης. Ωστόσο βρίσκει και πολλές εφαρμογές σε εγκαταστάσεις που κάνουν χρήση ηπίων μορφών ενέργειας αλλά και που εκμεταλλεύονται την αποβαλλομένη θερμότητα από βιομηχανικά λήμματα και διεργασίες, προκειμένου να παραχθεί «καθαρή» ηλεκτρική ενέργεια. Παρακάτω θα αναφέρουμε μερικές εγκαταστάσεις που κάνουν χρήση της τεχνολογίας αυτής.

Μία εφαρμογή παραγωγής ενέργειας μεγάλης κλίμακας με εργαζόμενο μέσο διάλυμα LiBr-H₂O που κάνει χρήση ηλιακής ενέργειας αποτελεί η κατασκευή ενός συστήματος κλιματισμού ισχύος 700KW ψύξεως που κατασκευάστηκε κατά την περίοδο 1975 - 1982 στο νοσοκομείο Tel-Hashomer στο Τελ Αβίβ του Ισραήλ. Το σύστημα λειτούργησε πλήρως από το 1980 και μέχρι το 1982 γινόταν συνεχή έρευνα για την βελτιστοποίησή του. Έπειτα, για αρκετά χρόνια συνεχίστηκε η πλήρης λειτουργία του συστήματος, ώσπου η περιοχή των συλλεκτών ηλιακής ενέργειας έπαψε να είναι αποδοτική. Από τότε και μέχρι σήμερα ο απορροφητής συνεχίζει να λειτουργεί με πηγή θερμότητας ατμό που προέρχεται από τους λέβητες του νοσοκομείου.

Παρακάτω παρατίθεται διάγραμμα που δείχνει την συμπεριφορά του βαθμού θερμικής απόδοσης COP_{th} σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία της πηγής θερμότητας.



Σχήμα 13. Επίδραση της θερμοκρασίας παροχής θερμού νερού στον συντελεστή ψυκτικής απόδοσης (COP)

Παρότι στην συγκεκριμένη εφαρμογή παράγουμε ψύξη και όχι ενέργεια από τον στρόβιλο η διάταξη του απορροφητή είναι πανομοιότυπη. Μάλιστα πέρα από την χρήση ηλιακής ενέργειας υπάρχει και ένα δεύτερο υποσύστημα στην ατμογεννήτρια που σε περίπτωση που δεν επαρκεί η ηλιακή ενέργεια, γίνεται χρήση ατμού προερχόμενου από εξωτερική πηγή, ώστε το σύστημα να αποδίδει πάντα το μέγιστο δυνατό βαθμό.

Στην περίπτωση της παραπάνω εφαρμογής απαιτούνταν μόνο 25KW ηλεκτρικής ενέργειας για πλήρη λειτουργία και είχε βαθμό θερμικής απόδοσης $COP_{th} = 0,72$.

Στοιχεία εγκατάστασης:

Εφαρμογή: Κλιματισμός σε νοσοκομείο Kiriyat Ono

Εταιρεία εγκατάστασης: Tadiran ASD

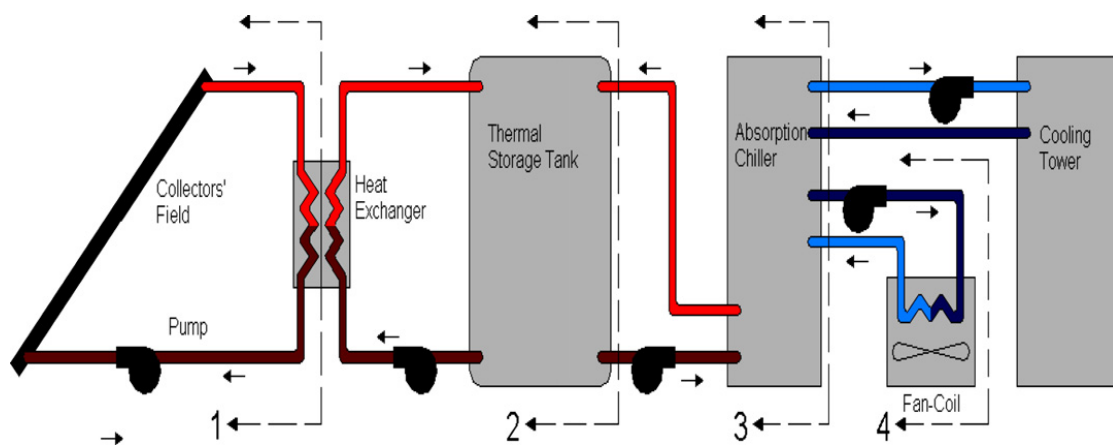
Τοποθεσία: Τελ Αβίβ, Ισραήλ

Παραγόμενη Ισχύς: 700 KW

Ανάθεση Έργου: Δεκέμβριος 1980

2. Η χρήση του κύκλου Rankine με εργαζόμενο μέσο διάλυμα βρωμιούχου λιθίου LiBr - H₂O χρησιμοποιείται ευρύτατα σε εφαρμογές ψύξης μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, στη Μαδρίτη της Ισπανίας έγινε μια αξιόλογη προσπάθεια για παροχή ψυκτικής ισχύος για κλιματισμό ορισμένων ισπανικών νοικοκυριών, κατά τους θερινούς μήνες. Το όλο εγχείρημα πραγματοποιήθηκε το καλοκαίρι του 2004, όπου η ηλιακή ακτινοβολία μεγιστοποιείται. Όμως, παράλληλα με την άνοδο της θερμοκρασίας του καλοκαιριού, αυξάνουν κατακόρυφα και οι απαιτήσεις για ισχυρό κλιματισμό. Μάλιστα, η ενέργεια ανά τον κόσμο ειδικά στις χώρες που βρίσκονται κοντά στον Ισημερινό αγγίζει κατά τους θερινούς μήνες έως και το 30% της συνολικά παραγόμενης ενέργειας από συμβατικά καύσιμα.

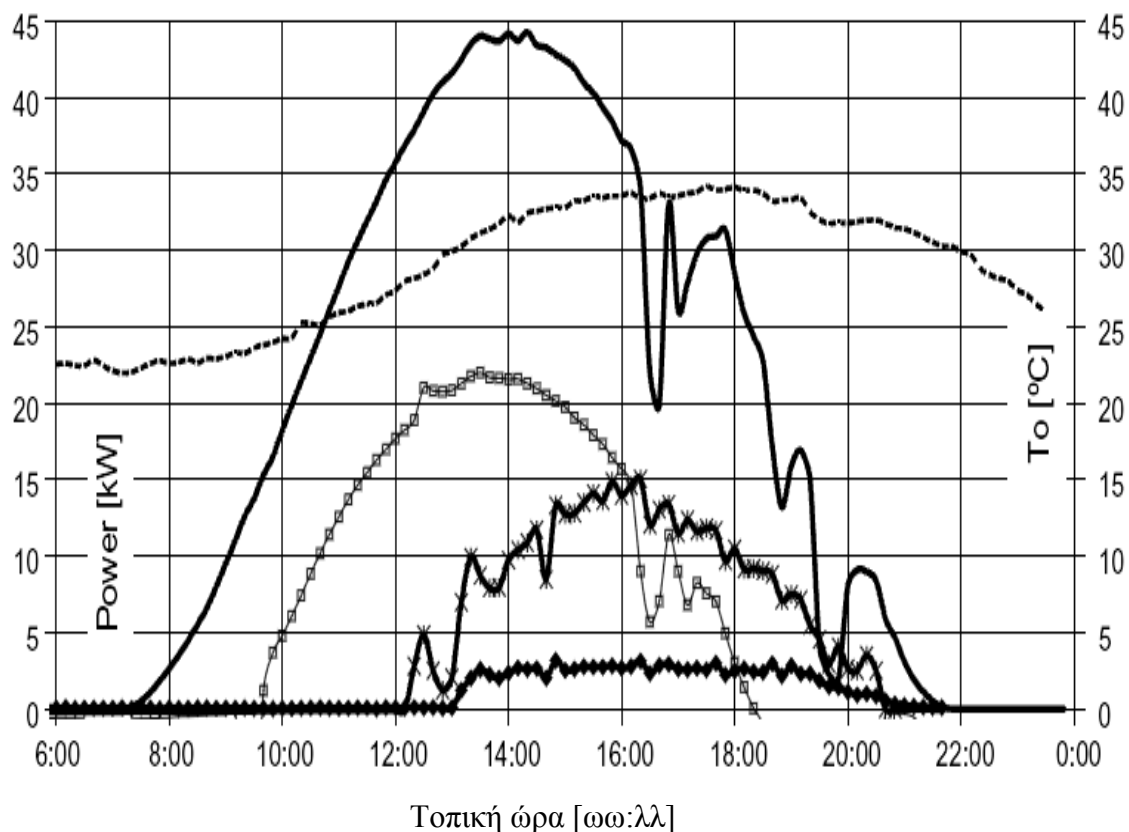
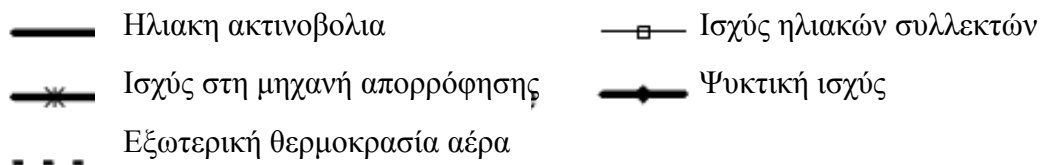
Το όλο εγχείρημα στέφτηκε με επιτυχία, αφού ήταν δυνατός ο πλήρης αυτόνομος κλιματισμός αρκετών νοικοκυριών από μικρές εγκαταστάσεις απορρόφησης με εργαζόμενο μέσο διάλυμα βρωμιούχου λιθίου, που είχαν ως αποκλειστική πηγή ενέργειας την ηλιακή.



Σχήμα 14. Σχέδιο της εγκατάστασης απορρόφησης διαλύματος LiBr - H₂O με ηλιακούς συλλέκτες.

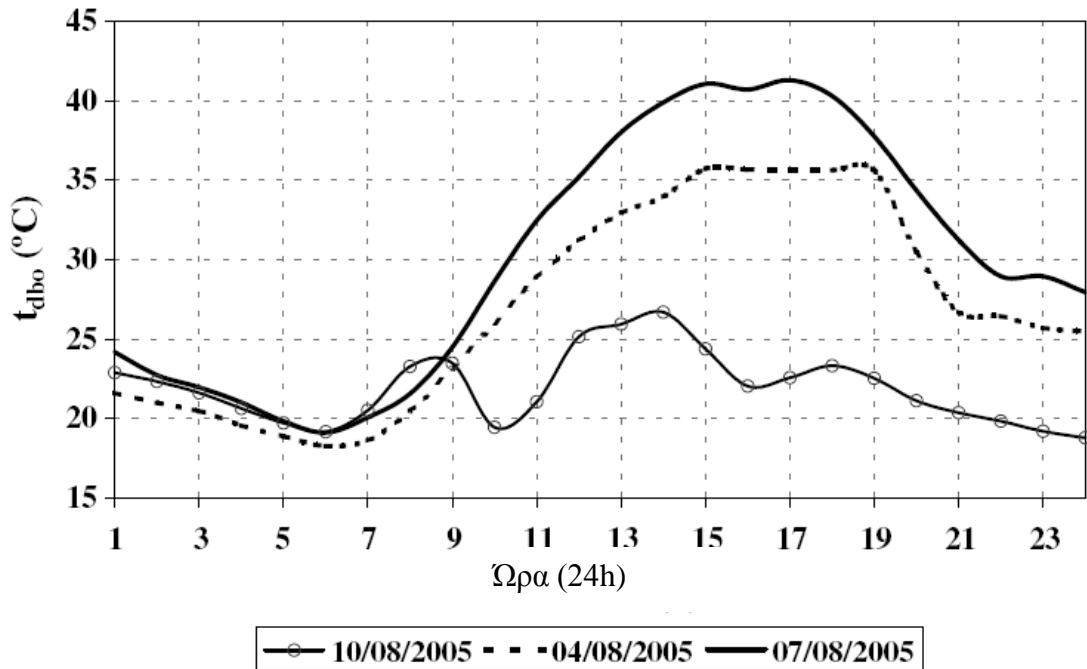
Ο βασικός λόγος που το εγχείρημα στέφτηκε με επιτυχία και αυτό είναι πολύ σημαντικό παρά τη μικρή του κλίμακα, είναι ότι η ανάγκη για ψυκτική ισχύ μεγιστοποιείται κατά τις ώρες που μεγιστοποιείται περίπου και η εκπομπή ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. Τότε είναι που η απαίτηση για ψυκτική ισχύ κορυφώνεται και η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος σημειώνει κάθε χρόνο και υψηλότερες τιμές.

Παρακάτω, ακολουθεί διάγραμμα από τις αυξομειώσεις διαφόρων ενεργειακών μεγεθών κατά τη διάρκεια της ημέρας, προκειμένου να γίνει αντιληπτή η παράλληλη πορεία και κορύφωση που αυτά ακολουθούν, αλλά και το κατά πόσο το πρόβλημα που είναι η έντονη ηλιακή ακτινοβολία που θερμαίνει την επιφάνεια της γης μπορεί να μετατραπεί σε λύση του προβλήματος που η ίδια προκαλεί.

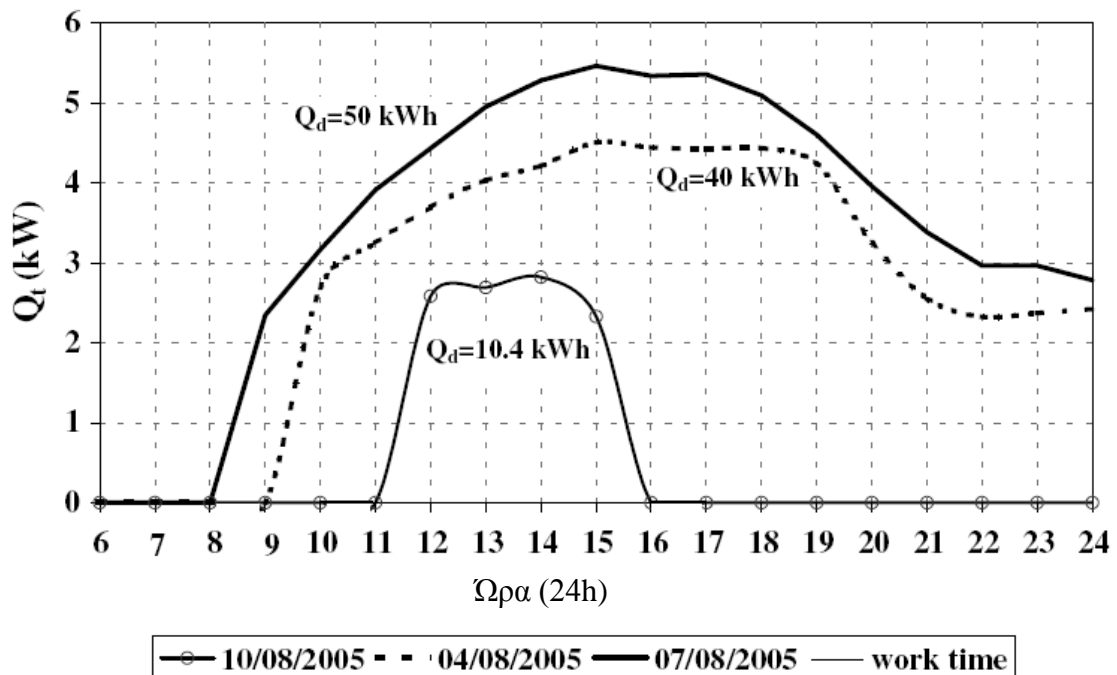


Σχήμα 15. Μετρήσεις στιγμιαίας θερμικής ενέργειας και εξωτερικής θερμοκρασίας στις 28 Ιουλίου 2004.

Μια παρόμοια μελέτη που έδειξε την συσχέτιση που υπάρχει για ηλεκτρική ενέργεια κατά την περίοδο που μεγιστοποιείται η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στη γη αποτελεί η μελέτη εφαρμογής μικρής κλίμακας που έγινε και πάλι στη Μαδρίτη τον Αύγουστο του 2005.

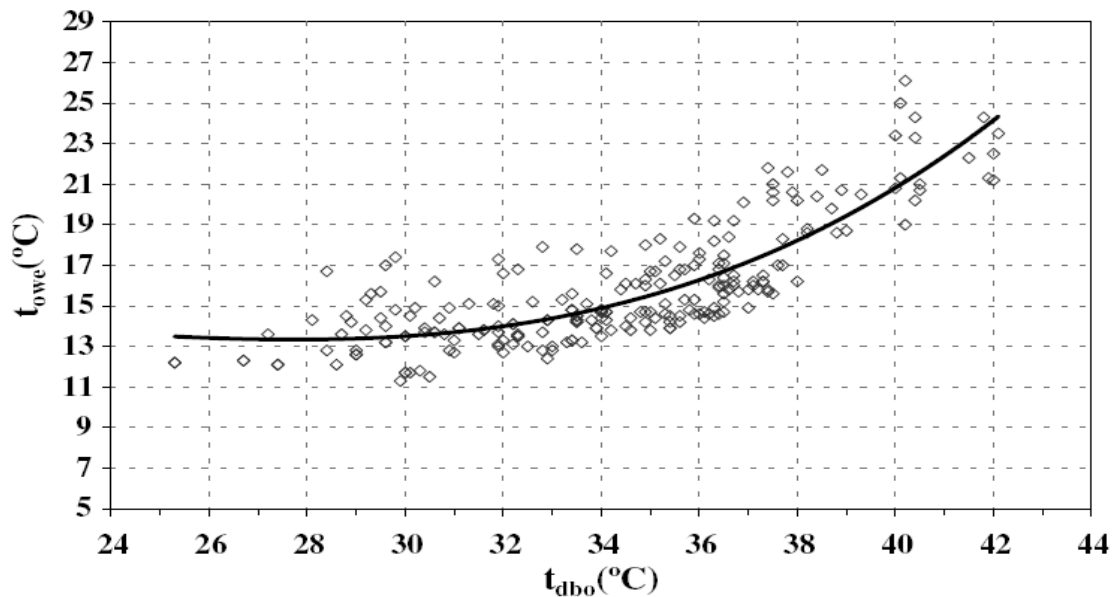


Σχήμα 16. Θερμοκρασία εξωτερικού αέρα τριών διαφορετικών ημερών.

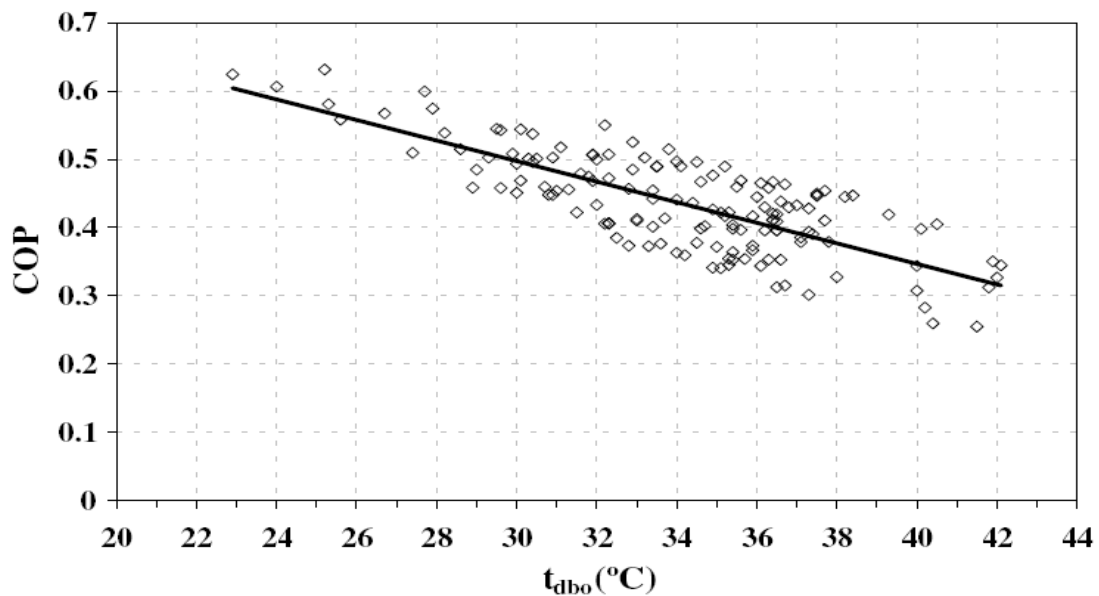


Σχήμα 17. Απόδοση ψυκτικής μηχανής με απορροφητή σε διάστημα τριών διαφορετικών ημερών.

Με τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται φανερή η συσχέτιση μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας και της ανάγκης για ψυκτική ισχύ. Μάλιστα, είναι αξιοσημείωτο ότι τις μέρες που η ηλιοφάνεια ήταν περιορισμένη και η απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από τους συλλέκτες περιορισμένη, η ψυκτική ισχύς επαρκούσε οριακά, σε αντίθεση με τις ημέρες όπου η υψηλή ακτινοβολία ανέβαζε τη θερμοκρασία της περιοχής αλλά έδινε τη δυνατότητα για λειτουργία της ψυκτικής μηχανής με απορροφητή σε μέγιστη απόδοση.



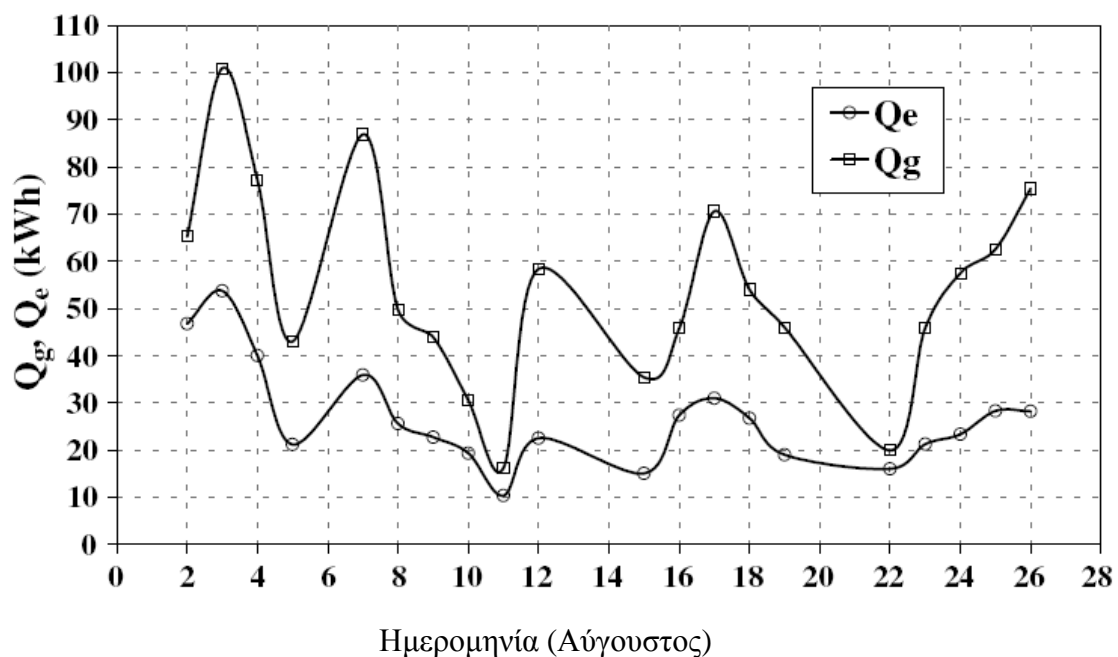
Σχήμα 18. Θερμοκρασία εξόδου νερού ψύξης σε σχέση με την εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 19. Θερμοκρασία συντελεστού απόδοσης ψυκτικής ισχύος (COP) σε συνάρτηση με την εξωτερική θερμοκρασία του αέρα.

Γίνεται σαφές από τα διαγράμματα, πως ενώ η ισχύς των ψυκτικών μηχανών με απορρόφηση διαλύματος βρωμιούχου λιθίου – νερού LiBr - H₂O, γίνεται όλο και πιο μεγάλη με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας, δεν συμβαίνει το ίδιο και με τον βαθμό ψυκτικής απόδοσης. Η οριακή λειτουργία του συστήματος σε πλήρες φορτίο ευθύνεται για την μείωση αυτή.

Παρακάτω, παρουσιάζεται διάγραμμα της θερμικής ενέργειας που δίνεται από τους ηλιακούς συλλέκτες στον απορροφητή σε αντιδιαστολή με την ψυκτική ισχύ που αυτός παρέχει.

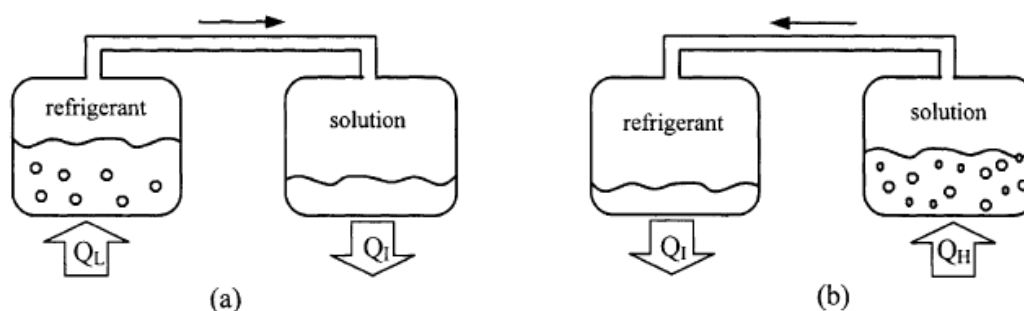


Σχήμα 20. Θερμική ενέργεια παρεχομένη στον απορροφητή σε συνάρτηση με την ψυκτική ισχύ που παράγεται..

B.4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

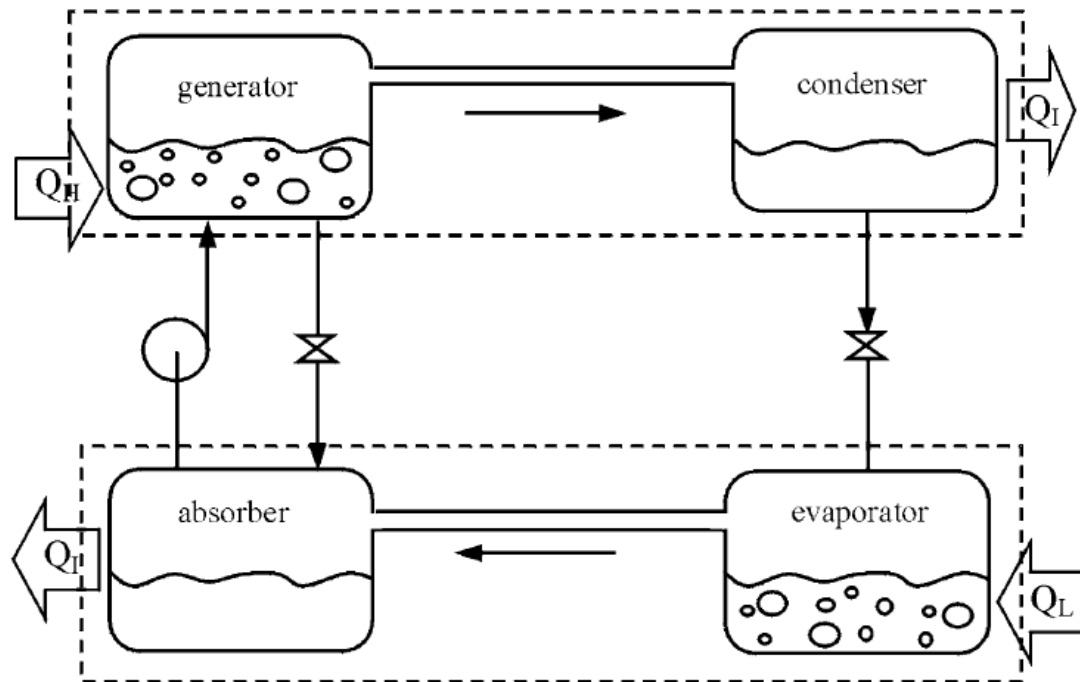
Η διεργασία της απορρόφησης είναι ένας από τους βασικότερους μηχανισμούς που συναντώνται σε ένα τυπικό κύκλο Rankine. Οι περισσότερες βιομηχανικές διεργασίες χρησιμοποιούν αρκετή θερμική ενέργεια μέσω της καύσης φυσικών καυσίμων προς παραγωγή ατμού ή θερμότητας. Μετά τις διεργασίες, η πλεονάζουσα θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον μαζί με τα βιομηχανικά απόβλητα. Αυτή η αποβαλλομένη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την συμπαραγωγή ενέργειας και ψυκτικής ισχύος αναλόγως με τις ανάγκες, με τη χρήση ενός συστήματος ψύξης που λειτουργεί με πηγή θερμότητας. Ένα τέτοιο σύστημα είναι γνωστό ως ψυκτικός κύκλος απορρόφησης.

Ο ψυκτικός κύκλος με απορρόφηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία το ψυκτικό αποτέλεσμα παράγεται μέσα από την χρήση δύο ρευστών και μιας ποσότητας θερμότητας σαν είσοδο στο σύστημα, αντί ηλεκτρικής ενέργειας που θα τροφοδοτούσε έναν μηχανικό συμπιεστή.



Σχήμα 21. Στο σχέδιο (a) η διαδικασία της απορρόφησης προκύπτει στο δεξιό δοχείο προκαλώντας πτώση της θερμοκρασίας στο άλλο δοχείο. Στην αντίθετη διαδικασία, στο σχέδιο (b), το ψυκτικό μέσο διαχωρίζεται από το διάλυμα στο δεξιό δοχείο σαν αποτέλεσμα της προσδιδόμενης θερμότητας από την εξωτερική πηγή ενέργειας.

Η βασική διαφορά όμως των παραπάνω δύο (απορρόφηση και μηχανική συμπίεση) είναι ότι στη δεύτερη περίπτωση έχουμε την δημιουργία μιας διαφοράς πίεσης και άρα την κυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου, ενώ στην πρώτη έχουμε διάλυση (απορρόφηση) του εργαζόμενου μέσου στο δεύτερο ρευστό, εν συνεχεία την μεταφορά του και τέλος την απομάκρυνσή του, δηλαδή μια κυκλοφορία τριών σταδίων αντί ενός. Πιο αναλυτικά ενώ στον μηχανικό συμπιεστή δίνουμε ηλεκτρική ενέργεια για να κυκλοφορήσει το εργαζόμενο μέσο, στον ψυκτικό κύκλο με απορρόφηση χρησιμοποιούμε ένα άλλο ρευστό που θα κάνει αυτήν την εργασία αλλά αναγκαστικά σε τρία στάδια και με την βοήθεια μια μικρής αντλίας ανακυκλοφορίας.



Σχήμα 22. Μια διαρκής διαδικασία απορρόφησης, όπου δυο διεργασίες εκτελούνται παράλληλα στον ψυκτικό κύκλο.

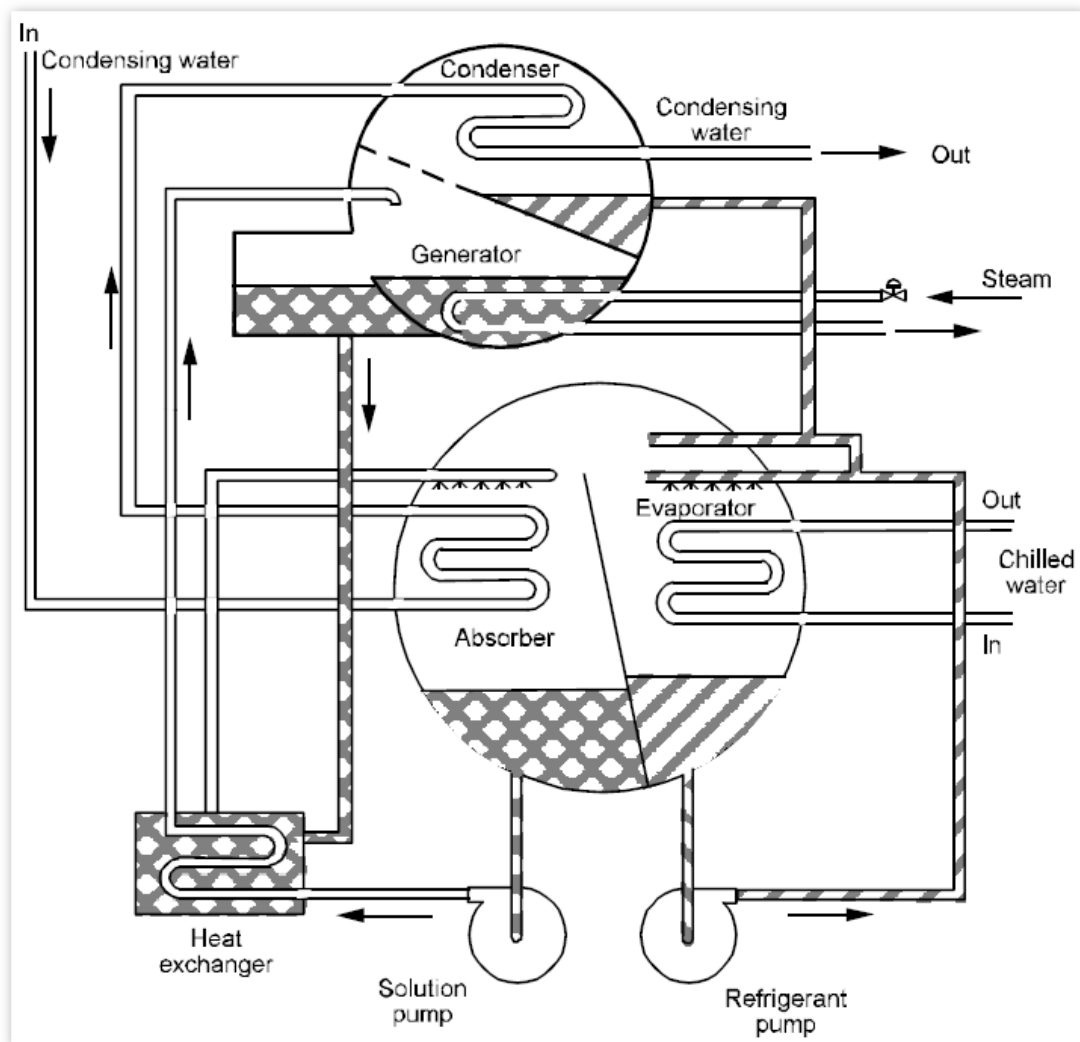
Προφανώς η αντλία καταναλώνει σαφώς λιγότερη ενέργεια από ότι ο συμπιεστής λόγω της φύσης της εργασίας της. Επίσης την απομάκρυνση του εργαζόμενου μέσου από τον απορροφητή (2^ο ρευστό) μπορούμε να την πετύχουμε με μια είσοδο θερμότητας πολύ χαμηλής ποιότητας όπως γεωθεμίας, ηλιακής, από δευτερεύουσες διεργασίες κτλ., το κόστος των οποίων είναι πάρα πολύ μικρό. Αντιλαμβανόμαστε το σημαντικό οικονομικό κέρδος που μπορούμε να επιτύχουμε λόγω εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέτοιες μηχανές κυκλοφορούν σήμερα και εμπορικά σε δύο βασικούς συνδυασμούς:

- Για εφαρμογές πάνω από 32°F δηλ. 0°C σαν ζεύγος χρησιμοποιείται Βρωμιούχο Λίθιο (Απορροφητής) / Νερό (Εργαζόμενο μέσο-Ψυκτικό). Χημικός τύπος (LiBr - H₂O).
- Για εφαρμογές κάτω από 0C σαν ζεύγος χρησιμοποιείται Αμμωνία (Απορροφητής) / Νερό (Εργαζόμενο μέσο-Ψυκτικό).

Στο Σχήμα 23 μπορούμε να διακρίνουμε ένα κλασσικό διάγραμμα μηχανής Βρωμιούχου Λιθίου / Νερού. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε δύο διαμερίσματα-δοχεία (vessels-shells). Το επάνω διαμέρισμα περιλαμβάνει τον αναγεννητή και τον συμπυκνωτή (generator), ενώ το κάτω περιλαμβάνει τον απορροφητή και τον ατμοποιητή.

Θερμότητα προσάγεται στον αναγεννητή από μια ηλιακή πηγή, γεωθερμία ή αποβάλλουσα θερμότητα από δευτερεύουσες διεργασίες. Αυτή η θερμότητα ανεβάζει την θερμοκρασία του διαλύματος και αναγκάζει σε βρασμό το ψυκτικό (νερό) το οποίο και περνά από το διαχωριστικό στον συμπυκνωτή όπου και ένα μέσο ψύξης διέρχεται δια του εικονιζόμενου σωλήνα και το συμπυκνώνει με αποτέλεσμα την συλλογή του σε σημείο του συμπυκνωτή.



Σχήμα 23

Στη συνέχεια το νερό λόγω βαρύτητας κυλά κάτω προς τον ατμοποιητή όπου και αναμειγνύεται με νερό το οποίο δεν έχει ατμοποιηθεί και ανακυκλοφορεί μέσω μικρής αντλίας και ψεκάζεται επάνω από τους αγωγούς όπου κυκλοφορεί το ρευστό που θέλουμε να ψύξουμε.

Διατηρώντας πολύ μικρή πίεση στο δοχείο του ατμοποιητή το νερό βράζει σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Αυτός ο βρασμός προκαλεί την απομάκρυνση θερμότητας από το μέσο που θέλουμε να ψύξουμε παράγοντας έτσι το ψυκτικό αποτέλεσμα.

Στη συνέχεια το ατμοποιημένο νερό περνά στην δεξιά περιοχή του κάτω δοχείου όπου εκεί συναντά το ζεύγος απορροφητή (LiBr) και νερού το οποίο βρίσκεται σε υψηλή συγκέντρωση απορροφητή και χαμηλή νερού. Αυτή η σύνθεση ονομάζεται ισχυρό διάλυμα. Τότε ο απορροφητής με φυσικές διεργασίες τείνει να απορροφήσει περισσότερο νερό από το ατμοποιηθέν και να εξισορροπήσει το διάλυμα. Αυτή η διαδικασία της απορρόφησης δίνει και στον κύκλο το όνομά της.

Αμέσως μετά το αραιό πλέον διάλυμα μεταφέρεται με μια μικρή αντλία στο πάνω δοχείο όπου και ο κύκλος ξαναρχίζει.

Όπως μπορεί να φανεί και από το Σχήμα 23 υπάρχουν τρία κυκλώματα ροής ρευστού με εξωτερικές συνδέσεις τα οποία και είναι:

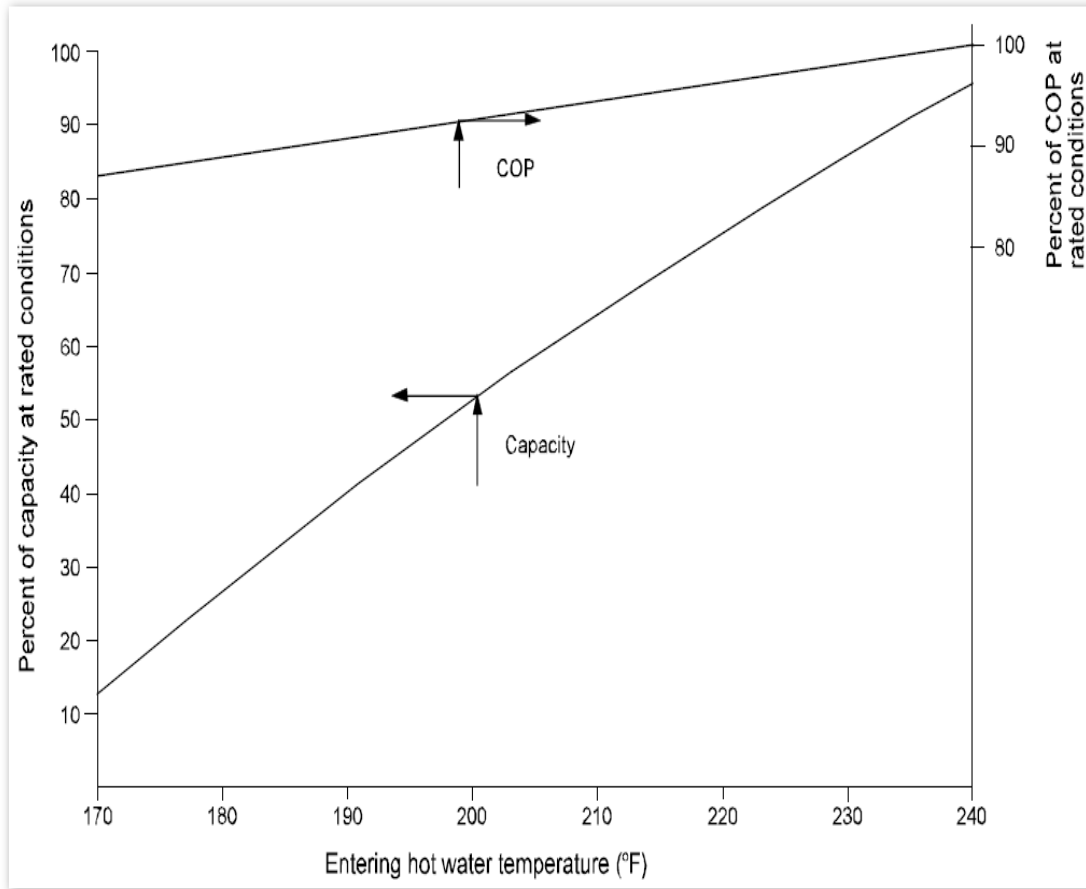
- Το θερμό ρεύμα που διαρρέει τον αναγεννητή και προέρχεται από δευτερογενή πηγή θερμότητας όπως ηλιακή ενέργεια. Κύκλωμα 1.
- Το ψυκτικό νερό που διαρρέει τον απορροφητή και τον συμπυκνωτή με σκοπό την απαγωγή θερμότητας και προέρχεται από κάποια εξωτερική πηγή. Κύκλωμα 2.
- Το νερό που προορίζεται για ψύξη (chilled water) και το οποίο προφανώς διαρρέει τον ατμοποιητή. Κύκλωμα 3.

Συνδεδεμένη με κάθε ένα από αυτά τα κυκλώματα είναι μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση πάνω στην οποία η μηχανή είναι βαθμονομημένη. Για μονάδες μιας βαθμίδας όπως η παραπάνω έχουμε τις εξής τιμές:

- 12psi Τυπική τιμή πίεσης θερμού ρεύματος στο κύκλωμα 1.
- 85F 44F Αντίστοιχα είσοδος και έξοδος κυκλώματος 3.

Αυτές είναι τυπικές τιμές οι οποίες προέρχονται από την ASHRAE 1983 και με τις οποίες μπορούμε να πετύχουμε ένα COP από 0.65 μέχρι 0.70

Στο Σχήμα 24 μπορούμε να παρατηρήσουμε την απόδοση μιας μονοβάθμιας απορροφητικής μηχανής με μεταβλητές το COP (δεξιός άξονας), ψυκτικό αποτέλεσμα (αριστερός άξονας) και την είσοδο του θερμού νερού του κυκλώματος 1 ως μεταβλητή. Παρατηρούμε ότι εάν η θερμοκρασία του είναι μικρότερη των 220F το αποτέλεσμα θα είναι πάρα πολύ μεγάλη μείωση στην απόδοση της μηχανής. Αυτό περιορίζει πάρα πολύ την λειτουργία της όσον αφορά την χρήση της με ηλιακή ενέργεια, γεωθερμία κτλ. και συνεπώς η πτώση αυτή έχει να κάνει πολύ με την φύση της ενέργειας που εισάγουμε. Το αποτέλεσμα είναι ότι πηγές θερμότητας από 180 μέχρι 230F πρέπει να είναι από 400 με 420% υπερδιαστασιοποιημένες για να έχουμε ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα σε σχέση με μια λίγο μεγαλύτερη θερμότητα εισόδου. Άρα έχουμε άνοδο του αρχικού κεφαλαίου κτήσης της μηχανής, μείωση του χρόνου αποπληρωμής, αύξηση του μεγέθους του ψυκτικού πύργου κτλ. Καταλήγουμε ότι εγκαταστάσεις με πηγές θερμότητας κάτω των 230F ή 356C είναι αντιοικονομικές.



Σχήμα 24

B.5. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ LiBr-H₂O

Τα μείγματα LiBr-H₂O χρησιμοποιούνται από το 1930 στις ψυκτικές μονάδες απορρόφησης. Είναι ευρέως γνωστό πως με τη χρήση τέτοιων διαλυμάτων επιτυγχάνονται μεγαλύτεροι βαθμοί απόδοσης σε θερμοδυναμικούς κύκλους, καθώς υπάρχει καλύτερη συμβατότητα της πηγής θερμότητας χαμηλού δυναμικού που χρησιμοποιούμε με το εργαζόμενο μέσο, το διάλυμα LiBr-H₂O.

Η χρήση μίγματος LiBr-H₂O σε σχέση με τη χρήση καθαρού νερού έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη πολύ χαμηλότερων θερμοκρασιών λειτουργίας του κύκλου. Συνεπώς, στην έξοδο των στροβίλων επικρατεί χαμηλότερη πίεση, γεγονός που επιτρέπει στον ατμό μεγαλύτερο εύρος εκτόνωσης και μεγαλύτερη παραγωγή έργου, σε σχέση με ένα συμβατικό κύκλο Rankine. Έτσι υπάρχει μία σημαντική βελτίωση στο παραγόμενο έργο σε σχέση με το ποσό θερμότητας που δίνουμε για την λειτουργία του κύκλου.

Δύο σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των διαλυμάτων LiBr-H₂O είναι αφενός η μη πτητική απορρόφηση του LiBr, καθώς το LiBr είναι άλας που δεν εξατμίζεται κατά την διάρκεια της ατμοποίησης και συνεπώς, η ανάγκη ενός διαχωριστή εξαλείφεται και δευτερευόντως, η εξαιρετικά υψηλή θερμότητα εξάτμισης του νερού που έχει σαν αποτέλεσμα κατά την ατμοποίηση του διαλύματος LiBr-H₂O, όσο περισσότερο νερό γίνεται ατμός και αυξάνει η ποσότητα του άλατος LiBr στο διάλυμα LiBr-H₂O, τόσο να ανεβαίνει και η θερμοκρασία στην οποία το νερό εξατμίζεται. Συνεπώς, η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται διαρκώς κατά την διάρκεια της ατμοποίησης παρέχοντας συνεχώς ατμό καλύτερων θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών.

Όπως θα δούμε παρακάτω, κατά την χρήση διαλύματος LiBr-H₂O, ο ατμός που παράγεται είναι καλύτερων θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών, σε σχέση με τον ατμό που προέρχεται από τη χρήση απλού νερού. Επίσης, με τη χρήση διαλυμάτων LiBr-H₂O, ελαττώνουμε την χρήση ογκωδών διατάξεων που είναι αναγκαίες όταν παράγουμε ενέργεια από διατάξεις που κάνουν χρήση ποσών θερμότητας χαμηλού δυναμικού, διότι οι ιδιότητες του διαλύματος LiBr-H₂O επιτρέπουν την ολοκλήρωση του κύκλου σε πολύ χαμηλές πιέσεις που, υπό άλλες συνθήκες θα ήταν αναγκαία η χρήση ισχυρών αντλιών κενού, προκειμένου να δημιουργείται χαμηλή πίεση στην έξοδο των στροβίλων, για να αυξήσουμε το εύρος της εκτόνωσης του ατμού. Ωστόσο, αποφεύγουμε και την χρήση δαπανηρών συμπυκνωτών, καθώς αντικαθίστανται από απορροφητές δημιουργώντας καλύτερες προϋποθέσεις μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας της εγκατάστασης.

Ένα μειονέκτημα της χρήσης διαλύματος LiBr-H₂O είναι ότι στις υψηλές συγκεντρώσεις, άνω του 70% περιεκτικότητας σε LiBr, το διάλυμα τείνει να κρυσταλλοποιηθεί και μπορεί να προκαλέσει καταστροφικές ζημιές στους στροβίλους και σε άλλες συσκευές που απαρτίζουν τον κύκλο.

B.6. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Ένα μαθηματικό υπολογιστικό μοντέλο, προκειμένου να προσομοιάσει την λειτουργία του κύκλου σε όλες τις συνθήκες που γίνεται η παραμετροποίηση και να υπολογιστούν όλες οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του διαλύματος LiBr-H₂O, προγραμματίστηκε σε υπολογιστικό περιβάλλον MathCAD.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του μείγματος LiBr-H₂O υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Patterson et al [1] που ισχύουν για συγκεντρώσεις από 0 έως 70% και για θερμοκρασίες από 0 μέχρι 180°C. Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί οι εξισώσεις Kaïta [2] που ισχύουν για συγκεντρώσεις από 45 έως 70% και για θερμοκρασίες από 45 έως 210 °C.

Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του καθαρού νερού έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις σχέσεις που περιγράφονται στην International Formulation Committee IFC 1967.

Ο κύκλος που διερευνούμε κάνει χρήση ποσών θερμότητας που λαμβάνονται από διατάξεις οι οποίες εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, προκειμένου να θερμάνουμε το διάλυμα LiBr-H₂O. Επιλεκτικά ηλιακά κάτοπτρα παρέχουν την αναγκαία θερμότητα ατμοποίησης q_{gen} του διαλύματος LiBr-H₂O και έχουν σαν αποτέλεσμα, προκειμένου τα υπολογιστικά δεδομένα να είναι άμεσα συγκρίσιμα, θερμοκρασία εξόδου $T_g=70^\circ\text{C}$ σταθερή για όλες τις συνθήκες κάτω από τις οποίες δοκιμάζεται ο εργοπαραγωγός κύκλος. Εφόσον, λοιπόν χρησιμοποιείται θερμότητα που λαμβάνεται από ηλιακή ενέργεια, η χρήση του κλασσικού βαθμού απόδοσης για τον κύκλο θα έδινε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Προκειμένου να αξιολογηθεί σωστά ο κύκλος κατά την παραμετροποίηση των συνθηκών λειτουργίας του, ορίζουμε τον Συντελεστή Συμπεριφοράς PF (Performance Factor) ως το έργο που παράγουμε κατά την εκτόνωση του εργαζόμενου μέσου στους στροβίλους προς το ποσό θερμότητας που παρέχουμε σε κάθε κύκλο για τις απαραίτητες αναθερμάνσεις.

$$PF = \frac{w_t}{q_{gen}}$$

Παράλληλα ο προτεινόμενος κύκλος συγκρίνεται με έναν συμβατικό κύκλο Rankine που έχει τις ίδιες αρχικές συνθήκες, ώστε να γίνεται άμεσα αντιληπτό το όφελος της χρήσης διαλύματος LiBr-H₂O έναντι του απλού καθαρού νερού ως εργαζόμενου μέσου.

Η παραμετροποίηση των συνθηκών λειτουργίας του κύκλου γίνεται προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά του κύκλου σε διαφορετικές καταστάσεις που βοηθούν να κατανοήσουμε πώς επηρεάζεται η απόδοση του κύκλου και πώς μπορούμε να την βελτιστοποιήσουμε. Με βάση την κρισιμότητα της κάθε παραμέτρου η διαδικασία της παραμετροποίησης γίνεται στα εξής 4 στάδια:

Αρχικά η διερεύνηση του κύκλου γίνεται για σταθερό πεδίο θερμοκρασιών, δηλαδή για σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} και σταθερή μέγιστη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου T_{max} , καθώς και για σταθερή μεταβολή της κατά μάζας συγκέντρωσης άλατος LiBr στο διάλυμα LiBr-H₂O.

Συνεπώς, η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται είναι η κατά μάζα συγκέντρωση του διαλύματος LiBr-H₂O, κατά την παραγωγή ατμού στην ατμογεννήτρια. Ο λόγος που λαμβάνεται ως πρώτη παράμετρος είναι ότι η υψηλή πίεση λειτουργίας του κύκλου εξαρτάται αποκλειστικά από την συγκέντρωση του διαλύματος LiBr-H₂O. Επιλεγούμε την μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O από 15% κατά μάζα συγκέντρωση άλατος LiBr σε διάλυμα LiBr-H₂O έως 60%, μεταβάλλοντας σε κάθε διερεύνηση την κατά μάζα σύσταση κατά 5%.

Υψηλότερες συγκεντρώσεις δεν μπορούμε να διερευνήσουμε, καθώς υπάρχει κίνδυνος κρυσταλλοποίησης του άλατος LiBr στο διάλυμα LiBr-H₂O, όπως θα δούμε παρακάτω σε διάγραμμα ενθαλπίας – συγκέντρωσης H-X.

Έπειτα, έχοντας ως δεδομένο ότι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ανάλογα με την εποχή και την τοποθεσία, μπορεί να ποικίλλει κατά πολλές δεκάδες βαθμούς κελσίου °C, μεταβάλλουμε την θερμοκρασία περιβάλλοντος του κύκλου T_{amb} με βήμα 10°C και οριακές τιμές 0°C και 40°C. Έτσι, εξομοιώνουμε και στις πιο δυσμενείς συνθήκες την λειτουργία του κύκλου και παρατηρούμε πως η αλλαγή θερμοκρασίας επηρεάζει την συμπεριφορά και την απόδοσή του.

Κατανοούμε λοιπόν πως, αφού η ελάχιστη πίεση P_1 που μπορεί να εκτονωθεί ο ατμός στους στροβίλους και συνεπώς, και η ελάχιστη πίεση λειτουργίας του κύκλου ορίζεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} , η απόδοση του κύκλου αλλάζει από εποχή σε εποχή, για παράδειγμα από χειμώνα σε καλοκαίρι.

Ακόμη, μια τρίτη παράμετρος διερεύνησης είναι η μέγιστη θερμοκρασία που θερμαίνουμε το διάλυμα LiBr-H₂O και συνεπώς και η μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_{max} . Δηλαδή καθορίζεται σε πόσο μεγάλες υπερθερμάνσεις θα υπόκειται το εργαζόμενο μέσο προτού αυτό εκτονωθεί στους στροβίλους για την παράγωγή έργου. Καθώς, ο κύκλος μας αφορά στην εκμετάλλευση ποσών θερμότητας χαμηλού δυναμικού η μέγιστη θερμοκρασία λαμβάνεται από 90°C έως 120°C μεταβάλλοντάς την σε κάθε διερεύνηση κατά 10°C.

Τέλος, διερευνούμε πώς αλλάζει η απόδοση του κύκλου, ανάλογα με το ποσοστό που μεταβάλλεται η κατά μάζα συγκέντρωση του διαλύματος LiBr-H₂O. Ως βασική ποσοστιαία διάφορα ορίζεται η μεταβολή της κατά μάζα συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O κατά 5%. Ωστόσο, εκτελούμε και μια πιο περιορισμένη διερεύνηση της απόδοσης του κύκλου μεταβάλλοντας το ποσοστό αυτό από 5% σε 3% και 7% για ένα μόνο πεδίο θερμοκρασιών, καθώς είναι αρκετό για να κατανοήσουμε την τάση που έχει η απόδοση του κύκλου μας, επηρεάζοντας την ποσοστιαία διαφορά μεταβολής της κατά μάζας σύστασης του διαλύματος LiBr-H₂O.

Γ. ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Γ.1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Παρακάτω, ο εργοπαραγωγός κύκλος παρουσιάζεται σε μονογραμμικό διάγραμμα.

Ο εργοπαραγωγός κύκλος αποτελείται από τις εξής συσκευές :

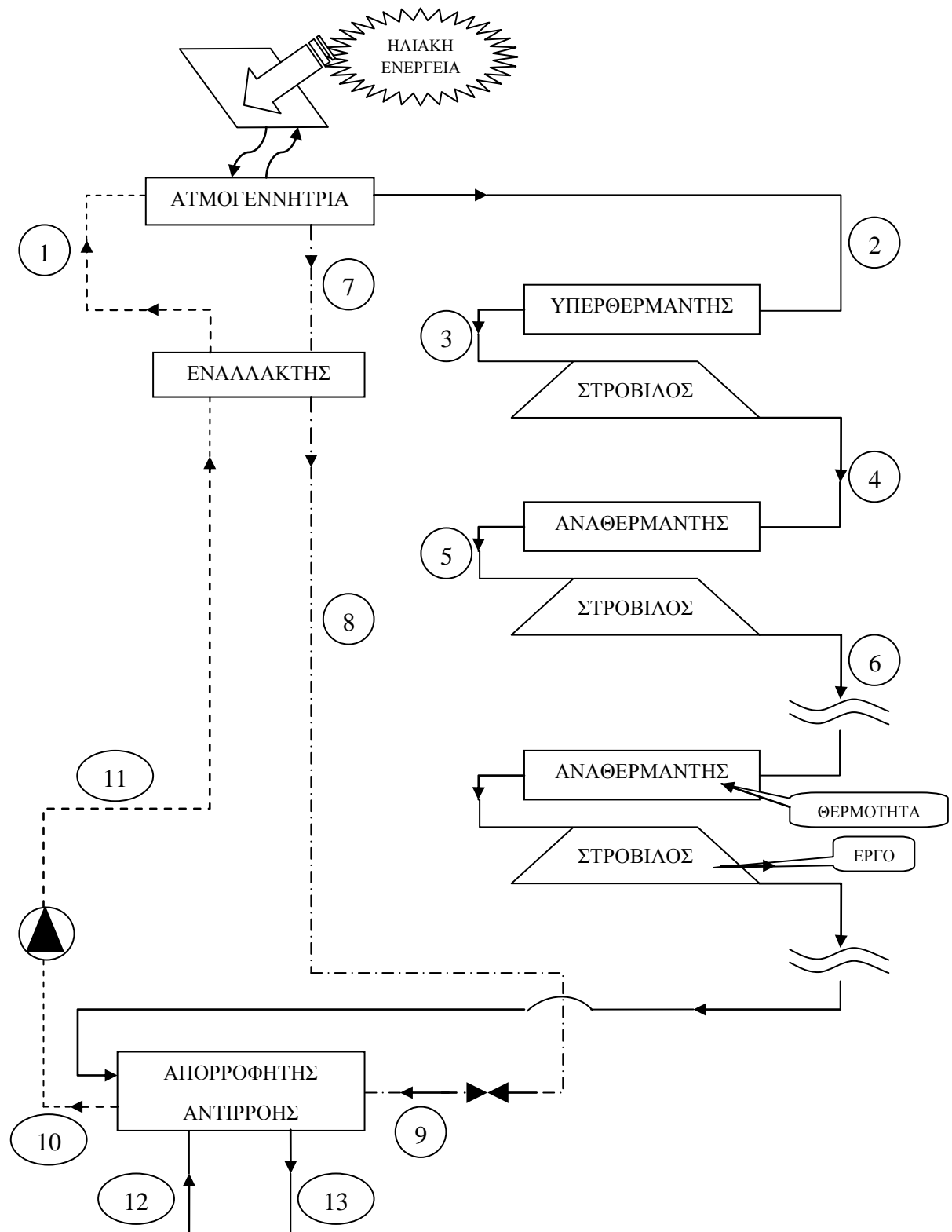
- μια ατμογεννήτρια,
- έναν αναθερμαντή 2 ή και περισσότερων σταδίων,
- ένα στρόβιλο 2 ή και περισσότερων σταδίων,
- έναν απορροφητή αντιρροής και
- έναν εναλλάκτη θερμότητας.

Υπάρχουν τρία ρεύματα που περιλαμβάνονται στη διαδικασία (Σχήμα 1):

(α) Το εργαζόμενο μέσο ή αδύναμο διάλυμα συγκέντρωσης X_w -----
(10 – 11 – 1)

(β) Το ισχυρό διάλυμα συγκέντρωσης X_s (7 – 8 – 9) -----

(γ) Ο ατμός (2 – 3 – 4 – 5 – 6) _____



Σχήμα 25 Εργοπαραγωγός κύκλος LiBr-H₂O με απορροφητή αντιπροής

Τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του κύκλου εξαρτώνται από τη συγκέντρωση του διαλύματος LiBr-H₂O, την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} , που αποτελεί και την ελάχιστη θερμοκρασία T_{min} του κύκλου στην οποία εκτονώνεται ο ατμός και καθορίζει την ελάχιστη πίεση P_1 λειτουργίας του κύκλου, καθώς και την μέγιστη θερμοκρασία T_{max} που επιλεγούμε να θερμάνουμε το μείγμα. Ακόμη η συγκέντρωση του διαλύματος LiBr-H₂O μετά την παράγωγη ατμού στην ατμογεννήτρια καθορίζει την υψηλή πίεση P_h που επιτυγχάνεται κατά την λειτουργία του κύκλου.

Συνεπώς, επειδή η διερεύνηση γίνεται σε πολλές παραμέτρους, ανάλογα με τις επιλεγμένες συνθήκες πρέπει να επιλέξουμε κατάλληλο αριθμό αναθερμάνσεων και εκτονώσεων του ατμού, ώστε να μεταβούμε από την υψηλή πίεση P_h του κύκλου στην χαμηλή P_1 , χωρίς όμως να έχουμε υγροποίηση του ατμού ή να ξεπεράσουμε την μέγιστη θερμοκρασία T_{max} λειτουργίας του κύκλου.

Ωστόσο, επειδή η διαδικασία είναι επαναληπτική και δεν αλλάζει κάτι στην λειτουργία του κύκλου ή την διάταξη των συσκευών παρουσιάζεται σε μονογραμμικό διάγραμμα η διάταξη των συσκευών του κύκλου για 3 αναθερμάνσεις και εκτονώσεις.

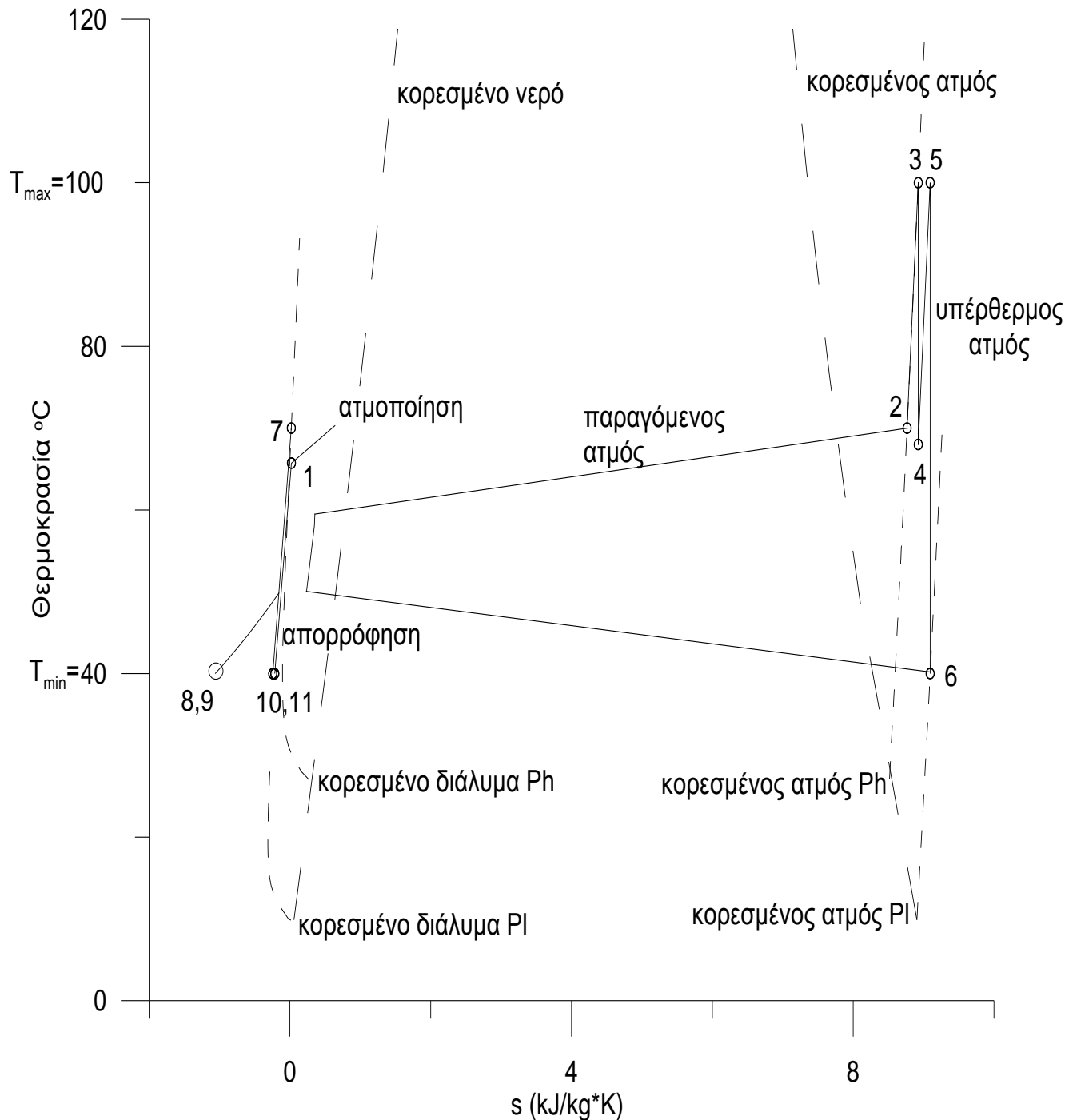
Ανάλογα με τις επιλεχθείσες παραμέτρους, οι αναγκαίες αναθερμάνσεις και υπερθερμάνσεις είναι 2 έως και 5, προκειμένου να αποφύγουμε την υγροποίηση του ατμού.

Οι θέσεις που παριστούν τις διάφορες διεργασίες που συντελούνται στον κύκλο επεξηγούνται παρακάτω:

- Η θέση 1 αντιστοιχεί στην είσοδο του φτωχού διαλύματος στην ατμογεννήτρια.
- Η θέση 2 αντιστοιχεί στον ατμό που παράγεται στην ατμογεννήτρια.
- Η θέση 3 αντιστοιχεί στον υπέρθερμο ατμο που παράγεται στον υπερθερμαντή.
- Η θέση 4 αντιστοιχεί στην έξοδο από τον στρόβιλο μετά την πρώτη υπερθέρμανση.
- Η θέση 5 αντιστοιχεί στην έξοδο από την ενδιάμεση, πρώτη στην περίπτωση μας, υπερθέρμανση ή αναθέρμανση.

- Η θέση 6 αντιστοιχεί στην έξοδο από τον στρόβιλο μετά την δεύτερη υπερθέρμανση.
Ο εναλλάκτης αντιρροής επιτρέπει στον ατμό να εκτονωθεί μέχρι την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου , που είναι και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Η θέση 7 αντιστοιχεί στην έξοδο του πλούσιου διαλύματος από την αμογεννήτρια.
- Η θέση 8 αντιστοιχεί στην έξοδο του πλούσιου διαλύματος από τον ιδανικό εναλλάκτη.
Θεωρώντας ότι η συναλλαγή θερμότητας στον εναλλάκτη γίνεται με βαθμό απόδοσης η (%) , υπολογίζουμε το πραγματικό ποσό θερμότητας που συναλλάσσεται μεταξύ των δυο ρευμάτων.
Στην περίπτωση που ο εναλλάκτης είναι ιδανικός το πλούσιο διάλυμα στη θέση 8 αποκτά την θερμοκρασία του φτωχού διαλύματος στη θέση 11.
- Η θέση 9 αντιστοιχεί στην είσοδο του πλούσιου διαλύματος στον απορροφητή μετά τον στραγγαλισμό (ισενθαλικός).
- Η θέση 10 αντιστοιχεί στο φτωχό διάλυμα που εξέρχεται από τον απορροφητή.
- Η θέση 11 αντιστοιχεί στην είσοδο του φτωχού διαλύματος στον εναλλάκτη μετά την κατάθλιψη σε πίεση P_h .
- Η θέση 12 αντιστοιχεί στην είσοδο του ψυκτικού υγρού στον απορροφητή.
- Η θέση 13 αντιστοιχεί στην έξοδο του ψυκτικού υγρού στον απορροφητή.

Γ.1.1. ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ



Σχήμα 26 Θερμοδυναμικός κύκλος του διαλύματος LiBr-H₂O σε διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας T – S

Το “Σχήμα 2” παρουσιάζει τον προτεινόμενο κύκλο σε ένα διάγραμμα θερμοκρασίας - εντροπίας.

Συγκεκριμένα:

- οι γραμμές κορεσμένου νερού και ατμού (διακεκομμένες γραμμές),
- οι γραμμές θερμοδυναμικής ισορροπίας του κορεσμένου διαλύματος LiBr-H₂O για συγκεντρώσεις από 0-70 % LiBr (στο αριστερό μέρος του διαγράμματος) καθώς και
- οι αντίστοιχες θερμοδυναμικές καταστάσεις του υπέρθερμου ατμού (στο δεξί μέρος του διαγράμματος) παριστάνονται στο διάγραμμα.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ:

Ένα μίγμα LiBr-H₂O με χαμηλή περιεκτικότητα X_w , που ονομάζουμε αδύναμο διάλυμα ή εργαζόμενο μέσο (θέση 10), συμπιέζεται ισοθερμοκρασιακά μέσω μιας αντλίας από χαμηλή πίεση P_1 σε υψηλή πίεση P_h (θέση 11) και, αφού προθερμανθεί περνώντας μέσα από τον αναθερμαντή (θέση 1), οδηγείται στην ατμογεννήτρια.

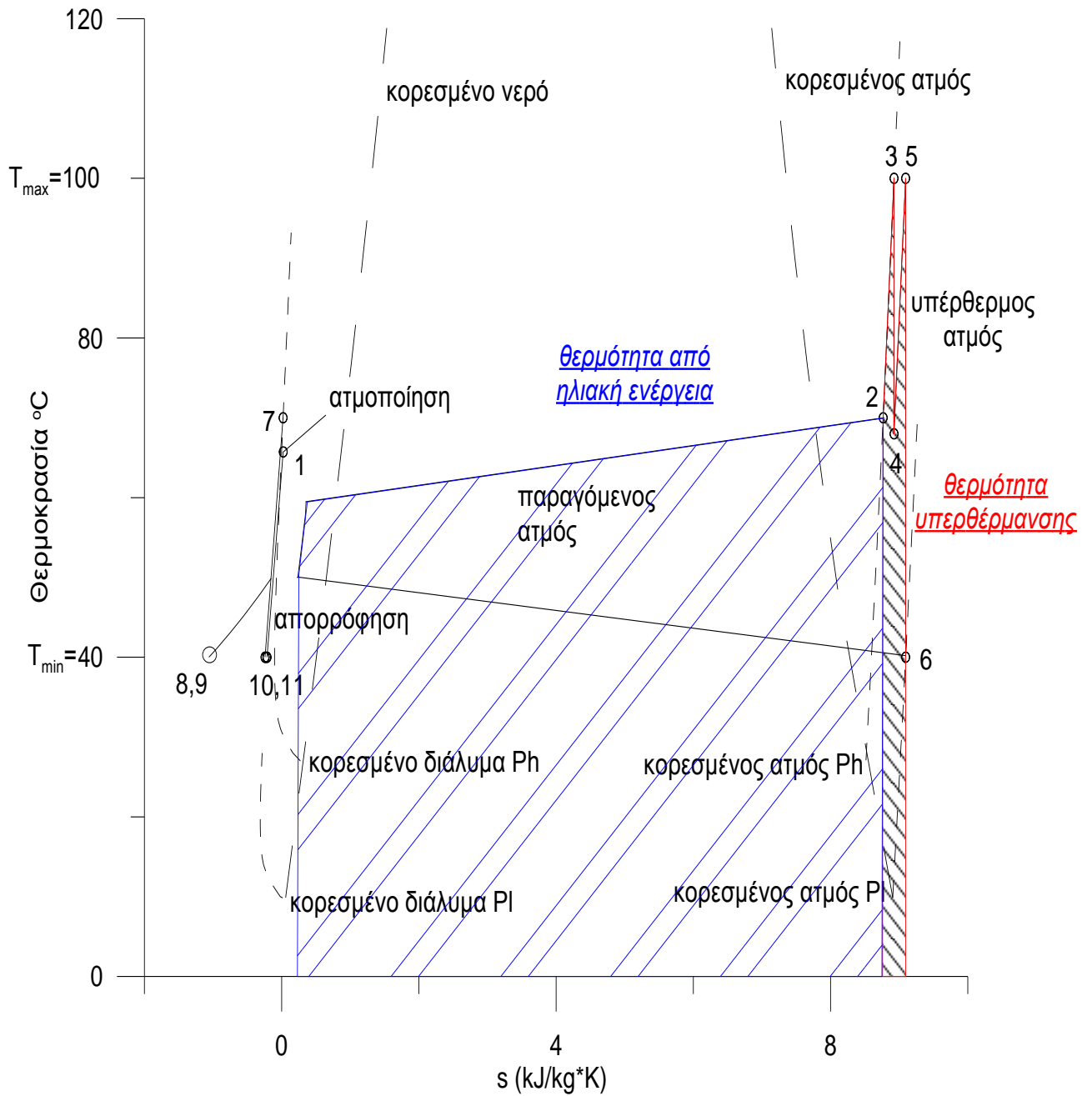
Ποσό θερμότητας προερχόμενο από ηλιακή ενέργεια θερμαίνει σε σταθερή πίεση P_h περαιτέρω το διάλυμα LiBr-H₂O στους 70°C και καθώς ο ατμός που παράγεται έχει το χαμηλότερο σημείο βρασμού από τα στοιχεία του διαλύματος είναι υπέρθερμος ατμός (θέση 2).

Έπειτα, ο υπέρθερμος ατμός που παράγεται απευθείας από την υγρή φάση στην ατμογεννήτρια, θερμαίνεται ισοβαρώς με P_h στον υπερθερμαντή (θέση 3) έως ότου φτάσει στην επιθυμητή μέγιστη θερμοκρασία T_h του κύκλου. Στη συνέχεια εκτονώνεται ισεντροπικά μέσα σε ένα στρόβιλο, παράγοντας έργο, από πίεση P_h έως την πίεση της πρώτης αναθέρμανσης (θέση 4) P_m . Μετά ο ατμός που φτάνει σε κορεσμένη κατάσταση υπερθερμαίνεται ξανά στον αναθερμαντή ισοβαρώς με P_m έως ότου φτάσει στην υψηλή θερμοκρασία T_h του κύκλου (θέση 5). Τότε εκτονώνεται για δεύτερη φορά στον στρόβιλο, έως ότου, στην περίπτωση του κύκλου που αναλύουμε, φτάσει στην ελάχιστη πίεση λειτουργίας P_1 (θέση 6).

Ο ατμός μετά από την ισεντροπική εκτόνωσή του στη χαμηλή πίεση P_1 (θέση 6) απορροφάται από το πλούσιο διάλυμα που προέρχεται από την ατμογεννήτρια και δημιουργεί το εργαζόμενο μέσο (θέση 10), δηλαδή το διάλυμα LiBr-H₂O χαμηλής συγκέντρωσης X_w .

Το υπόλοιπο διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης, που παραμένει στην ατμογεννήτρια (θέση 7 → 8), χρησιμοποιείται για να προθερμάνει το εργαζόμενο μέσο στον προθερμαντήρα (θέση 11 → 1), πριν από την εισαγωγή του στην ατμογεννήτρια.

Τέλος, το πλούσιο διάλυμα (θέση 8) εισέρχεται μέσα από μία στραγγαλιστική βαλβίδα, προκειμένου να μεταβεί αδιαβατικά από την υψηλή πίεση P_h που βρίσκεται στην χαμηλή πίεση P_1 , ώστε να εισαχθεί στον απορροφητή. Εκεί βρισκόμενο στην ίδια πίεση με τον ατμό μετά την τελευταία εκτόνωσή του στο στρόβιλο, τον απορροφά, αποβάλλοντας θερμότητα που εξάγεται από το ψυκτικό υγρό του απορροφητή, όπως θα δούμε παρακάτω.



Σχήμα 27 Γραφική απεικόνιση των ποσών θερμότητας που χρησιμοποιούνται για την λειτουργία του κύκλου.

Γ.1.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΑΓΚΑΙΩΝ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΕΩΝ

Ανάλογα με τις παραμέτρους που τροποποιούμε σε κάθε διερεύνηση, ενδέχεται να χρειαστούν περισσότερες από μία υπερθερμάνσεις. Προκειμένου να υπολογίσουμε τις αναθερμάνσεις, δηλαδή τις αναγκαίες αυτές ενδιάμεσες υπερθερμάνσεις που πρέπει να ακολουθήσει ο ατμός, ώστε να παραμείνει στα όρια πίεσης και θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει, λειτουργούμε ως εξής:

Καταρχάς, εκτελούμε τη διερεύνηση αντίστροφα από την πορεία που ακολουθεί ο υπέρθερμος ατμός, καθώς έτσι επιτυγχάνονται πιο εργοπαραγωγικές εκτόνωσεις στο στρόβιλο, δηλαδή υπολογίζουμε το σημείο μετά την τελευταία εκτόνωση του ατμού (θέση 6) και κινούμαστε αντίστροφα με ισεντροπικές εκτόνωσεις και ισοβαρείς θερμάνσεις, έως ότου φτάσουμε στο σημείο της πρώτης υπερθέρμανσης του ατμού στον υπερθερμαντή (θέση 3).

Έχοντας λοιπόν σα δεδομένο πως όλες οι εκτόνωσεις στους στρόβιλους είναι ισεντροπικές, ενώ όλες οι υπερθερμάνσεις είναι ισοβαρείς, εντοπίζουμε την εντροπία της τελευταίας εκτόνωσης του ατμού στους στρόβιλους που καθορίζεται από την ελάχιστη πίεση και θερμοκρασία του κύκλου (θέση 6: T_{\min}, P_1) s_6 . Ύστερα, υπολογίζουμε την πίεση του σημείου (θέση 5) που έχει την ίδια εντροπία με το τελικό σημείο εκτόνωσης του ατμού $s_5 = s_6$ και θερμοκρασία την μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_h . Η πίεση P_m που υπολογίστηκε αποτελεί την πίεση της τελευταίας αναθέρμανσης. Έπειτα, εξακολουθούμε να κινούμαστε αντίστροφα κατά την διερεύνηση και βρίσκουμε το σημείο (θέση 4*) για τον ατμό που είναι κορεσμένος και έχει πίεση P_m . Προφανώς το σημείο αυτό βρίσκεται πάνω στην γραμμή κορεσμένου ατμού στο διάγραμμα θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του καθαρού νερού και αφορά στην θερμοδυναμική κατάσταση του ατμού, μετά την προτελευταία εκτόνωση στο στρόβιλο και πριν την τελευταία ισοβαρή αναθέρμανσή του σε μέγιστη θερμοκρασία. Μετά, όμοια με παραπάνω, κινούμαστε ισεντροπικά και πάλι ώστε να βρεθεί η πίεση του σημείου (θέση 3*) για μέγιστη θερμοκρασία T_h και εντροπία ίση με $s_{3^*} = s_{4^*}$, η οποία αποτελεί την πίεση της προτελευταίας αναθέρμανσης του ατμού P_n .

Έτσι συνεχίζουμε υπολογίζοντας τις πιέσεις όλων των ενδιάμεσων υπερθερμάνσεων, ή πιο σύντομα αναθερμάνσεων, έως ότου βρεθεί πίεση αναθέρμανσης που είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη πίεση του κύκλου, δηλαδή για πίεση $P_m \geq P_h$. Τότε έχουμε βρει τον αναγκαίο αριθμό αναθερμάνσεων και αρκεί να υπολογίσουμε το σημείο μετά την πρώτη εκτόνωση του ατμού η οποία διαφέρει από τις υπόλοιπες, διότι ο ατμός δεν εκτονώνεται μέχρι την πίεση κορεσμένου ατμού. Συγκεκριμένα, υπολογίζουμε την θερμοκρασία της ισεντροπικής εκτόνωσης του υπέρθερμου ατμού (θέση 3) έως το σημείο όπου η εντροπία παραμένει ίδια $S_3 = S_4$ και η πίεση, μετά την εκτόνωση, είναι ίση με την πίεση της πρώτης αναθέρμανσης που έχουμε υπολογίσει παραπάνω διεξοδικά (θέση 4).

Συνεπώς, υπολογίσαμε τον αναγκαίο αριθμό των αναθερμάνσεων, καθώς και τις πιέσεις τους. Έπειτα έχοντας σαν δεδομένο πως όλες οι εκτόνωσεις είναι ισεντροπικές και όλες οι αναθερμάνσεις είναι ισοβαρείς εύκολα βρίσκονται και τα

υπόλοιπα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά όλων των σημείων της πορείας που ακολουθεί ο υπέρθερμος ατμός (θέσεις 3 – 4 – 3* – 4* – – 5 – 6).

Γ.2. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Τα παραμετρικά στοιχεία απόδοσης του κύκλου έχουν αναλυθεί χρησιμοποιώντας τις θερμοδυναμικές ιδιότητες του διαλύματος LiBr-H₂O, όπως περιγράφεται παραπάνω και με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή σε προγραμματιστικό περιβάλλον MathCAD έχουν υπολογιστεί τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του κύκλου, ώστε να προβούμε στην βελτιστοποίησή του.

Οι παρακάτω υποθέσεις χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης του κύκλου:

- το αδύναμο διάλυμα στην έξοδο του απορροφητή (θέση 10) βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού
- ο αναθερμαντής θεωρείται ως ιδανικός, δηλαδή έχει απόδοση 100%
- η εκτόνωση στο στρόβιλο θεωρείται ισεντροπική
- οι απώλειες πίεσης στις σωληνώσεις και στον υπόλοιπο εξοπλισμό θεωρούνται αμελητέες
- οι διαδικασίες εκτόνωσης και συμπίεσης στις στραγγαλιστικές βαλβίδες και τις αντλίες αντίστοιχα, θεωρούνται ως αδιαβατικές
- ο ατμός μετά από την εκτόνωσή του σε όλα τα στάδια του διβάθμιου στρόβιλου είναι σε υπέρθερμη ή κορεσμένη κατάσταση ($X > 1$)
- Όλες οι διαδικασίες θεωρούνται πως οδηγούν σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας

Γ.2.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ (FLOWCHART)

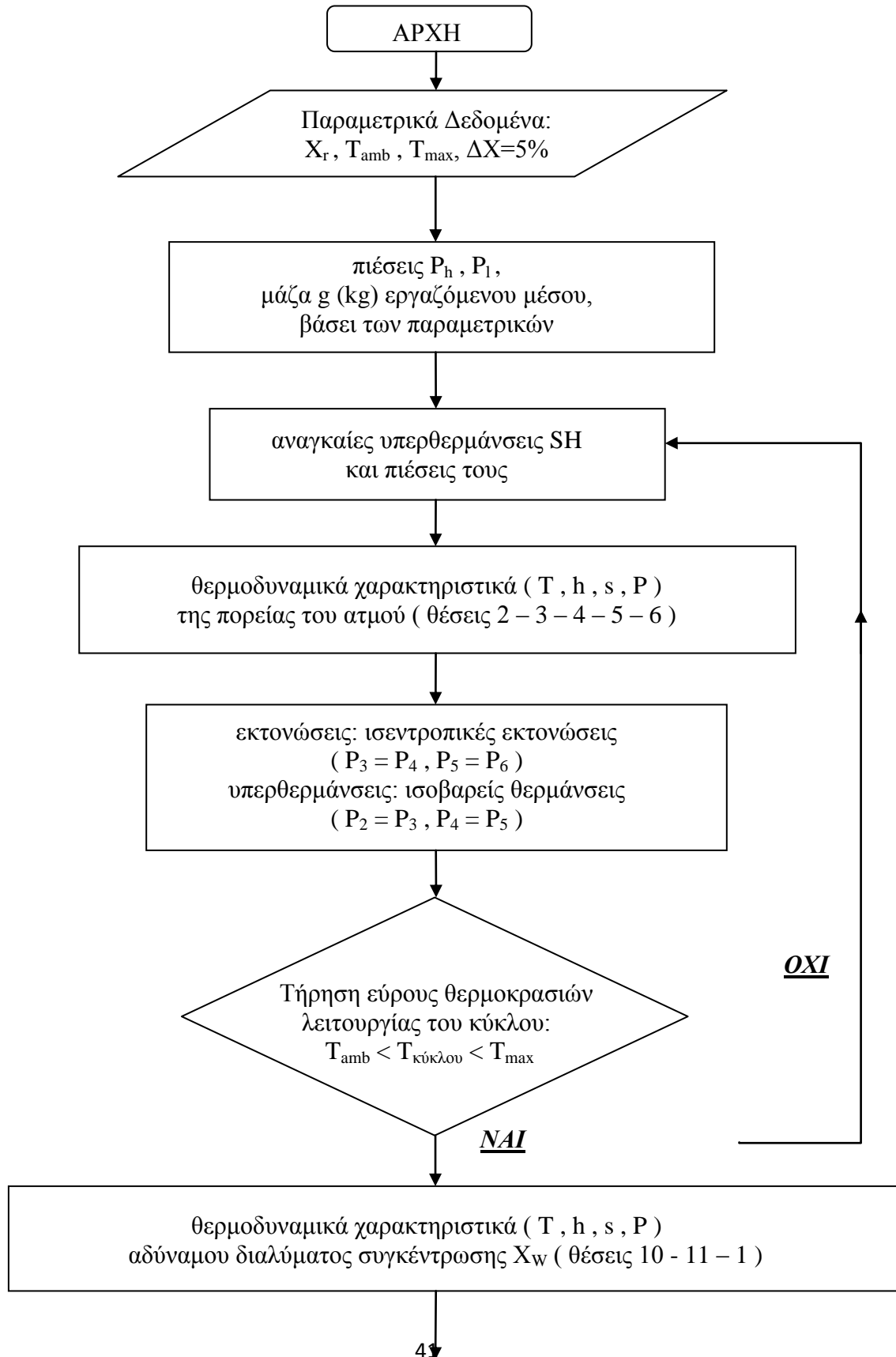
Η παραμετροποίηση των δεδομένων αναφοράς του κύκλου αλλάζει τις συνθήκες κατά τις οποίες εκτελείται. Προκειμένου να υπολογίσουμε τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του διαλύματος LiBr-H₂O, τα ποσά θερμότητας που συναλλάσσονται και το έργο που παράγεται, κατά την εκτόνωση του ατμού στους στροβίλους, υπολογίζουμε το μοντέλο για τις εξής συνθήκες αναφοράς :

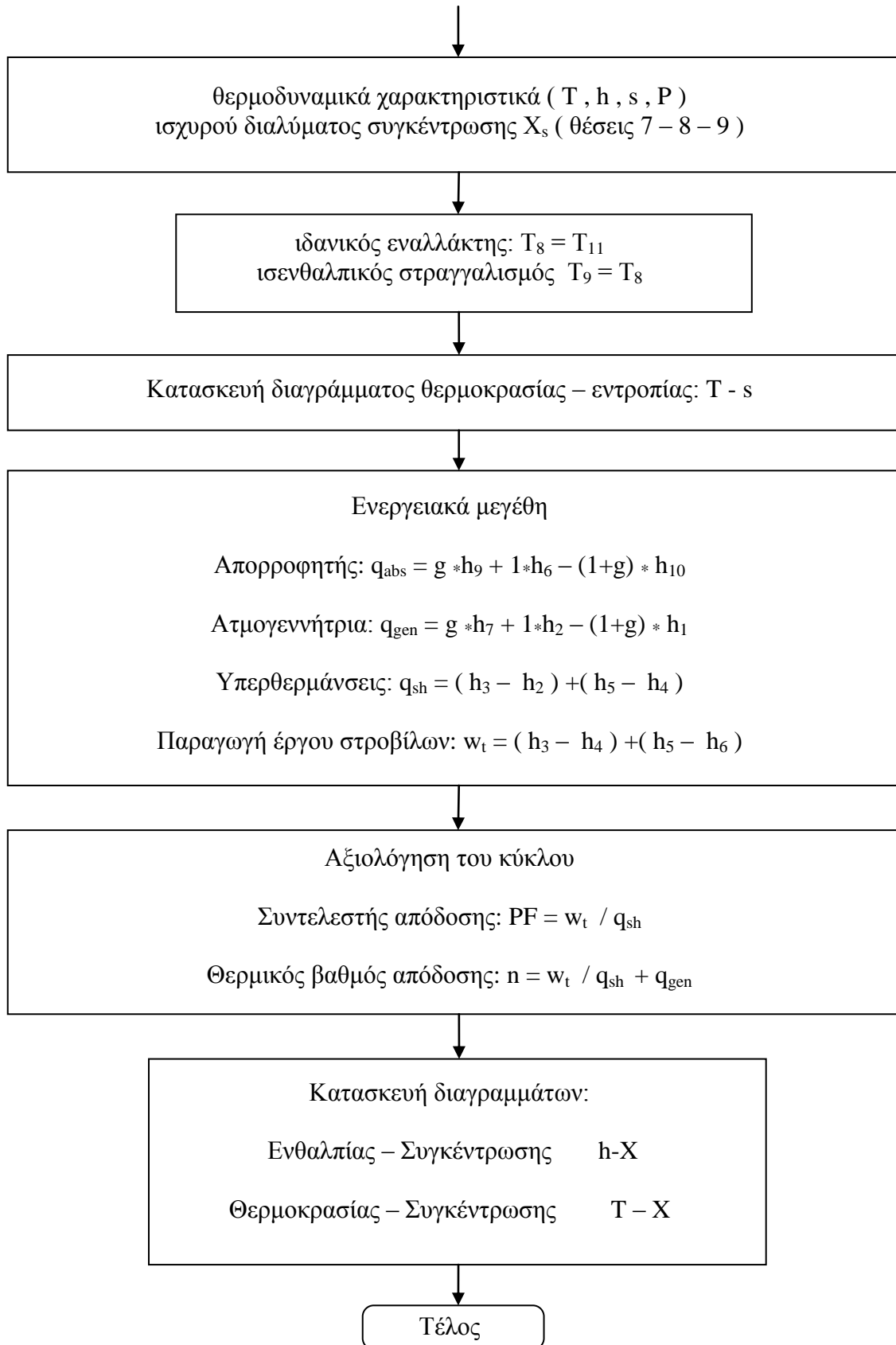
- Θερμοκρασία περιβάλλοντος και συνεπώς ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου: $T_{amb}=40^{\circ}C$
- Μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου $T_{max}=100^{\circ}C$
- Κατά μάζα σύσταση του πλούσιου διαλύματος LiBr-H₂O $X_s=60\%$
- Μεταβολή της συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O κατά τη διαδικασία της ατμοποίησης ίση με $\Delta X=5\%$ κ.β.

Όπως προαναφέραμε, η διαδικασία υπολογισμού παραμένει η ίδια για όλο το εύρος θερμοκρασιών και συγκεντρώσεων, αφού οι εξισώσεις που μας δίνουν τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του διαλύματος LiBr-H₂O και του ατμού που παράγεται, υπερκαλύπτουν το εύρος θερμοκρασιών και πιέσεων που εξετάζουμε.

Συνεπώς, παρακάτω υπολογίζουμε τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά για τις προαναφερθείσες συνθήκες αλλά και για όλες τις συνθήκες που αφορούν στην παραμετροποίηση του κύκλου, καθώς η επανάληψη της διαδικασίας για κάθε εύρος θερμοκρασίας, λειτουργίας και συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O, θα δώσει, αντίστοιχα, τα πόσα θερμότητας και έργου για τις εκάστοτε συνθήκες αναφοράς

Παρακάτω ακολουθεί ένα διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού του μαθηματικού μοντέλου που δημιουργήθηκε για τον εύκολο προσδιορισμό των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του κύκλου:





Γ.2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΤΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Στην ατμογεννήτρια ο ατμός παράγεται απευθείας σε υπέρθερμη κατάσταση. Καθώς το διάλυμα LiBr-H₂O έχει χαμηλότερη τάση ατμών από το καθαρό νερό, για ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, η πίεση του διαλύματος που είναι απαραίτητη για την εξάτμιση του νερού, είναι κατά πολύ χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού του καθαρού νερού. Συνεπώς, όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση του LiBr στο διάλυμα, τόσο χαμηλότερη είναι και η μέγιστη πίεση P_h λειτουργίας του κύκλου.

- Προσδιορισμός υψηλής πίεσης της διαδικασίας:

Η πίεση εξάτμισης έχει προσδιοριστεί για το αδύναμο διάλυμα (X_w) και για τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου T_h:

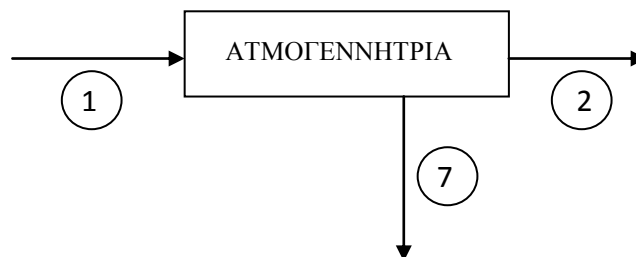
$$P_h = P(T_g, X_r) = 0.358 \text{ bar}$$

- Μεταφορά θερμότητας

Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας στην ατμογεννήτρια για κάθε 1 Kg ατμού που παράγεται από το διάλυμα LiBr-H₂O παρέχουμε στην ατμογεννήτρια ποσό θερμότητας από τους ηλιακούς συλλέκτες ίση με τη διαφορά των ενθαλπιών των ρευστών που εξέρχονται από την ατμογεννήτρια μείον αυτών που εισέρχονται:

$$q_{\text{gen}} = g \cdot h_7 + 1 \cdot h_2 - (1+g) \cdot h_1 \quad (1)$$

όπου q_{gen} είναι η θερμότητα που απαιτείται για την δημιουργία του ατμού ανά 1kg ατμού που εκτονώνεται στο στρόβιλο.

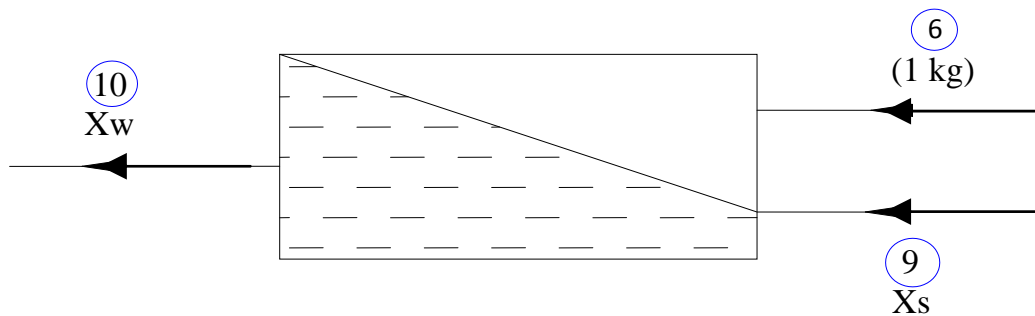


Σχήμα 28 Σχηματική διάταξη ατμογεννήτρια με τα ρεύματα εισόδου και εξόδων

Γ.2.3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΩΝ

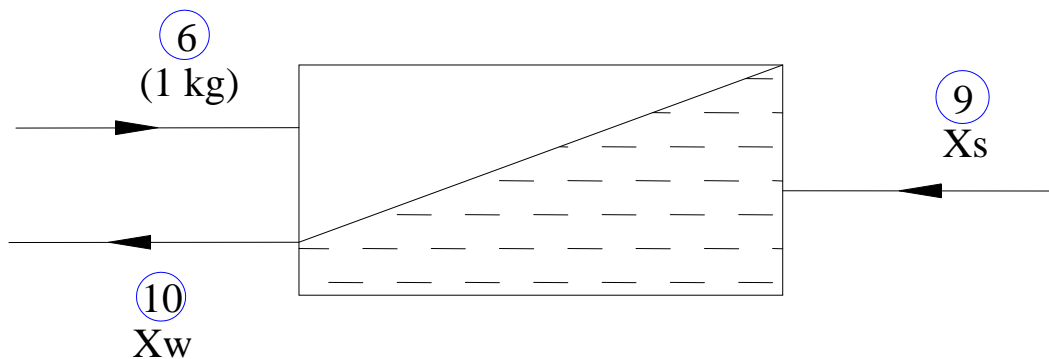
Ο ατμός μετά από την εκτόνωσή του στο στρόβιλο απορροφάται από το πλούσιο διάλυμα με συγκέντρωση κατά μάζα X_s . Η διαδικασία απορρόφησης πραγματοποιείται σε ένα απορροφητή, όπου ο ατμός και το πλούσιο διάλυμα έχουν ίδια φορά ή αντίθετη κατά την είσοδό τους στον απορροφητή (Διάγραμμα 2 , Διάγραμμα 3).

Στην περίπτωση ενός απορροφητή ομοροής (Διάγραμμα 2) ο ατμός που εκτονώνεται στο στρόβιλο εισάγεται στον απορροφητή με μια θερμοκρασία υψηλότερη από την ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου. Το μίγμα τότε κατά τη διάρκεια της διαδικασίας απορρόφησης απορρίπτει θερμότητα, έως ότου απορροφηθεί τελείως ο ατμός ($T_{min.}, X_s$).



Σχήμα 29 Σχηματική διάταξη ενός απορροφητή ομοροής

Στην περίπτωση ενός απορροφητή αντιροής (Διάγραμμα 3) ο ατμός εισάγεται στον απορροφητή με μια θερμοκρασία $T_{min.}$, διότι κατά τη διαδικασία της απορρόφησης η θερμοκρασία του ατμού εξισώνεται με τη θερμοκρασία του διαλύματος χαμηλής συγκέντρωσης. Αυτό επιτρέπει μια εκτόνωση στον στρόβιλο σε μια χαμηλότερη πίεση από ότι στη διαμόρφωση με τον απορροφητή ομοροής που οδηγεί στη συνέχεια σε ένα μεγαλύτερο εύρος εκτόνωσης στον στρόβιλο και συνεπώς σε παραγωγή μεγαλύτερου έργου.



Σχήμα 30 Σχηματική διάταξη ενός απορροφητή αντιρροής- Προσδιορισμός της χαμηλής πίεσης:

Στην περίπτωση ενός απορροφητή αντιρροής, η πίεση απορρόφησης μπορεί να καθοριστεί από τη θερμοκρασία στην έξοδο του απορροφητή ($T_{\min.}$) και τη συγκέντρωση LiBr στο τέλος της διαδικασίας απορρόφησης (X_w):

$$P_1 = P(T_{\min.}, X_w) = 0.012\text{bar}$$

- Αρχή διατήρησης μάζας

Στον απορροφητή W kg αδύναμου διαλύματος απορροφούν 1kg ατμού που εκτονώνεται στον στρόβιλο. Η διατήρηση της μάζας του LiBr στον απορροφητή δίνει τη συγκέντρωση κατά μάζα του ισχυρού διαλύματος S :

$$W = 1 + S \quad (2)$$

$$S \cdot X_s = (1 + S) \cdot X_w \Leftrightarrow$$

$$S = X_w / X_s - X_w, \quad \text{για κάθε 1kg ατμού} \quad (3)$$

Οι υπολογισμένες τιμές του W και του S είναι:

- $W=11\text{kg}$ αδύναμου διαλύματος / 1kg ατμού που εκτονώνεται
- $S=12\text{kg}$ ισχυρού διαλύματος / 1kg ατμού που εκτονώνεται

- Απόρριψη θερμότητας

Δεδομένου ότι η απορρόφηση είναι μια εξώθερμη διαδικασία, το ποσό θερμότητας που πρέπει να απορριφθεί προκύπτει από τον 1^ο θερμοδυναμικό νόμο:

$$q_{\text{abs}} = h_6 + S \cdot h_9 - W \cdot h_{10} \quad (4)$$

Στην εξίσωση (4) το q_{abs} είναι η απορριφθείσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας(kg) του ατμού που εκτονώνεται στον στρόβιλο.

Γ.2.4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ

Η χρήση ενός απορροφητή αντί ενός συμβατικού συμπυκνωτή επιτρέπει στον ατμό να εκτονωθεί στο στρόβιλο σε πολύ χαμηλές πιέσεις χωρίς ωστόσο να υγροποιείται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Το διάλυμα LiBr-H₂O που έρχεται σε επαφή με τον ατμό που εκτονώνεται στον στρόβιλο μειώνει την πίεση ατμών. Η ελάχιστη επιτεύξιμη πίεση εξαρτάται από δύο παράγοντες, την ελάχιστη θερμοκρασία T_{\min} του κύκλου που καθορίζεται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} και τη συγκέντρωση του αδύναμου διαλύματος X στην οποία ο ατμός τελικώς απορροφάται.

Στην περίπτωση τοποθέτησης ενός απορροφητή αντιρροής (Διάγραμμα 2) η χαμηλή πίεση για τις δεδομένες συνθήκες υπολογίζεται στα 0.012bar, ενώ στην περίπτωση ενός απορροφητή ομορροής υπολογίζεται στα 0.021bar, κάνοντας προφανές το όφελος της επιλογής μας

Προκειμένου να υπολογιστούν οι πιέσεις των ενδιάμεσων σταδίων εκτόνωσης στους στρόβιλους θεωρούμε ιδανικές τις μεταβολές. Άρα οι εκτονώσεις λαμβάνονται ως ισεντροπικές και οι αναθερμάνσεις ισοβαρείς όπου:

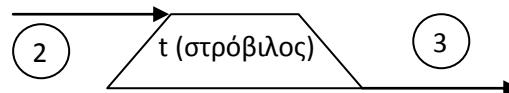
Αναθέρμανση: $P_{\text{SH}} = 0.025 \text{ bar}$

Το έργο που παράγεται στο στρόβιλο 4 σταδίων μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$w_t = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) + (h_7 - h_6) + (h_9 - h_8) \quad (5)$$

Η θερμότητα που απαιτείται για την αναθέρμανση του ατμού είναι:

$$q_{rh} = (h_4 - h_3) + (h_6 - h_5) + (h_8 - h_7) \quad (6)$$



Σχήμα 31 Σχηματική διάταξη ενός στρόβιλου (μονοβάθμιος)

Γ.2.5. ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Για τον υπολογισμό του θερμικού βαθμού απόδοσης της μονάδας, το έργο που απαιτείται για τη λειτουργία της αντλίας θεωρείται αμελητέο δεδομένου ότι είναι πολύ μικρό σε σχέση με το συνολικό ποσό θερμότητας που απαιτείται για να λειτουργήσει η μονάδα. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{w_t}{q_G + q_{rh}} \quad (7)$$

Στην εξ.(7) το w_t είναι το έργο που παράγεται, q_G είναι το ποσό θερμότητας που καταναλώνεται στην ατμογεννήτρια για κάθε 1kg ατμού που εκτονώνεται στον στρόβιλο και q_{rh} είναι η θερμότητα που απαιτείται στους αναθερμαντές.

Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, η βασική πηγή ενέργειας, για την ατμοποίηση του διαλύματος LiBr-H₂O, προέρχεται από επιλεκτικά ηλιακά κάτοπτρα. Αφού ο θερμικός βαθμός απόδοσης εμπεριέχει το προαναφερθέν ποσό θερμότητας, δεν αποτελεί αντικειμενικό κριτήριο αξιολόγησης του θερμοπαραγωγού κύκλου.

Ορίζουμε λοιπόν τον συντελεστή συμπεριφοράς PF (performance factor) ως το έργο που παράγεται κατά την εκτόνωση του ατμού στους στρόβιλους προς το ποσό θερμότητας που δαπανάται για τις αναγκαίες αναθερμάνσεις του :

$$PF = \frac{w_t}{q_{rh}} \quad (8)$$

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής συμπεριφοράς PF είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα, καθώς το έργο που παράγεται είναι μεγαλύτερο από το ποσό αναθέρμανσης που παρέχουμε, γεγονός που εξηγείται από το ότι δεν συμπεριλαμβάνεται στον τύπο του PF το ποσό θερμότητας που χρησιμοποιείται στην ατμογεννήτρια.

Γ.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα θερμοδυναμικά στοιχεία του κύκλου έχουν υπολογιστεί για διάλυμα LiBr-H₂O με τις συνθήκες αναφοράς που προαναφέρθηκαν στο 5ο κεφάλαιο και παρατίθενται στον πίνακα 1, προκειμένου να είναι εφικτός ο ενεργειακός ισολογισμός του κύκλου.

Θέση	Συνθήκες	Συγκέντρωση X (% LiBr)	Πίεση (bar)	Μάζα (kg)
1	Υγρό	55	0,0358	W
2	Υπέρθερμος ατμός	-	0,0358	1
3	Κορεσμένος ατμός	-	0,0358	1
4	Υπέρθερμος ατμός	-	0,025	1
5	Κορεσμένος ατμός	-	0,025	1
6	Υπέρθερμος ατμός	-	0,012	1
7	Κορεσμένο υγρό	60	0,0358	S
8	Κορεσμένο υγρό	60	0,0358	S
9	Κορεσμένο υγρό	60	0,012	S
10	Κορεσμένο υγρό	55	0,012	W
11	Υγρό	55	0,0358	W

Πίνακας 1. Συνθήκες λειτουργίας

Η λειτουργία του κύκλου παρουσιάζεται γραφικά παρακάτω σε ένα διάγραμμα ενθαλπίας - συγκέντρωσης $h - X$ (Διάγραμμα 7).

Στο διάγραμμα έχει σχεδιαστεί και η γραμμή κρυστάλλωσης του άλατος LiBr του διαλύματος LiBr-H₂O.

Η αξιολόγηση του κύκλου γίνεται βάσει των ενεργειακών ισολογισμών που παρατίθενται στον Πίνακα 2:

Επιπρόσθετα παρατίθενται και οι ισολογισμοί ενέργειας για τον κύκλο Rankine, πραγματοποιούμενος στις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας T_{max} και T_{amb} . (ιδιαίτερη αναφορά στην λειτουργία του κύκλου Rankine γίνεται παρακάτω)

Κατανάλωση θερμότητας ατμογεννήτριας ¹	2761
Κατανάλωση υπερθερμαντών	117,065
Αποβολή θερμότητας απορροφητή	2705
Παροχή μάζας του αδύναμου διαλύματος ²	12
Παροχή μάζας του δυνατού διαλύματος	11
Παραγωγή έργου στροβίλων	172,596
Θερμικός βαθμός απόδοσης εγκατάστασης	6%
Συντελεστής απόδοσης PF	1,4744
Θερμικός βαθμός απόδοσης εγκατάστασης Rankine	11.4%
Συντελεστής απόδοσης PF Rankine	1,3040

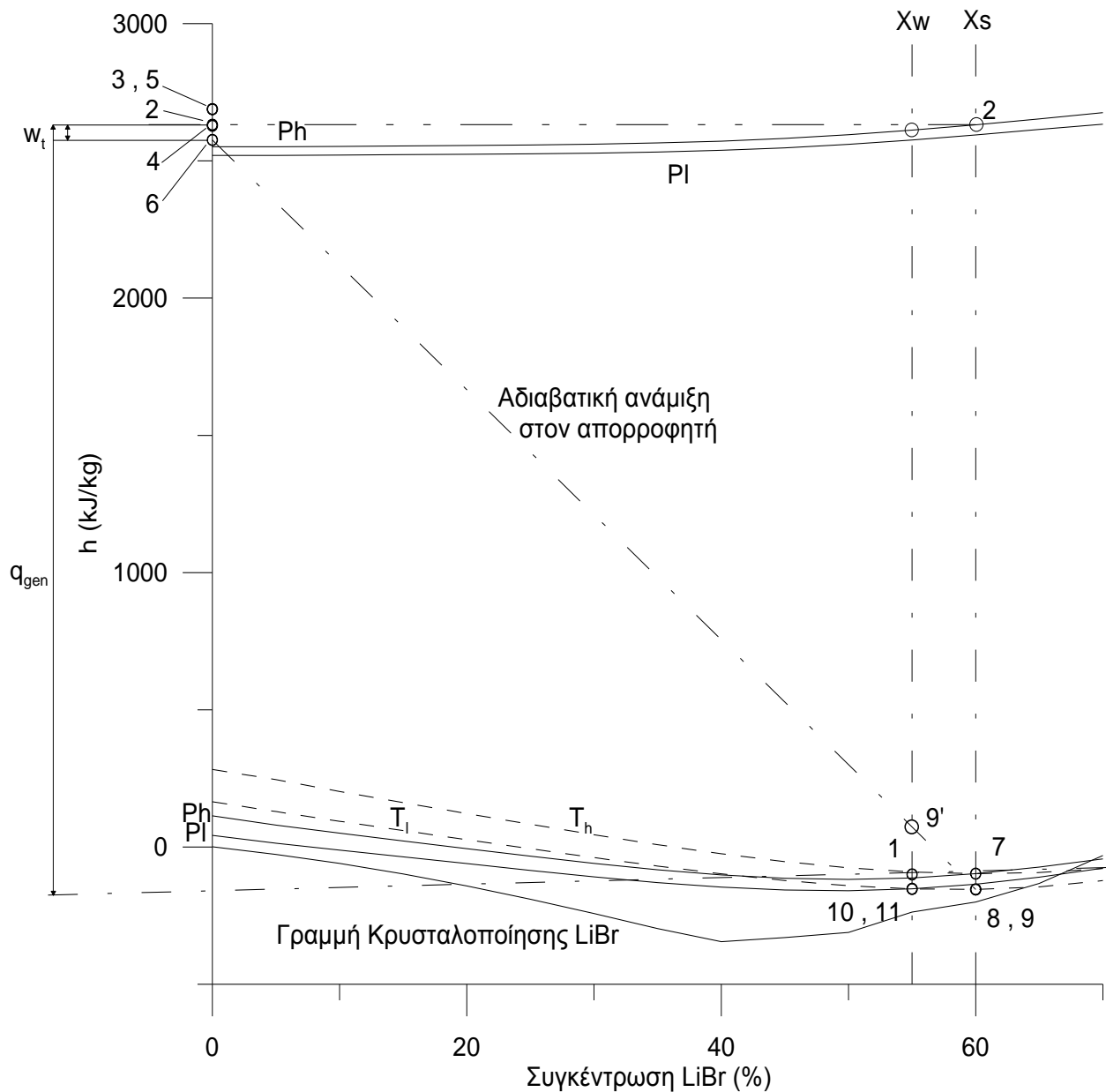
¹ Όλες οι μονάδες ενέργειας είναι kW/kg ατμού

² Όλες οι μονάδες μάζας είναι kg/kg ατμού

Πίνακας 2 Αποτελέσματα από τις συνθήκες του πίνακα 1

Γ.3.1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΝΘΑΛΠΙΑΣ – ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Όλες οι συναλλαγές θερμότητας και το έργο που παράγεται κατά τη διάρκεια του κύκλου μπορούν να απεικονιστούν σε διάγραμμα ισορροπίας ενθαλπίας-συγκέντρωσης (Διάγραμμα 4), όπως εξηγείται αναλυτικά παρακάτω:



Σχήμα 32 Θερμοδυναμικός κύκλος του διαλύματος LiBr-H₂O σε διάγραμμα ενθαλπίας-συγκέντρωσης h - X

Οι θέσεις του διαγράμματος που παριστούν τις διάφορες διεργασίες που συντελούνται στον κύκλο επεξηγούνται παρακάτω:

- Η θέση 1 αντιστοιχεί στην είσοδο του φτωχού διαλύματος στην ατμογεννήτρια.
- Η θέση 2 αντιστοιχεί στον ατμό που παράγεται στην ατμογεννήτρια.
- Η θέση 3 αντιστοιχεί στον υπέρθερμο ατμο που παράγεται στον υπερθερμαντή.
- Η θέση 4 αντιστοιχεί στην έξοδο από τον στρόβιλο μετά την πρώτη υπερθέρμανση.
- Η θέση 5 αντιστοιχεί στην έξοδο από την ενδιάμεση , πρώτη στην περίπτωση μας, υπερθέρμανση ή αναθέρμανση.
- Η θέση 6 αντιστοιχεί στην έξοδο από τον στρόβιλο μετά την δεύτερη υπερθέρμανση.
Ο εναλλάκτης αντιρροής επιτρέπει στον ατμό να εκτονωθεί μέχρι την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου , που είναι και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Η θέση 7 αντιστοιχεί στην έξοδο του πλούσιου διαλύματος από την ατμογεννήτρια.
- Η θέση 8 αντιστοιχεί στην έξοδο του πλούσιου διαλύματος από τον ιδανικό εναλλάκτη.
Θεωρώντας ότι η συναλλαγή θερμότητας στον εναλλάκτη γίνεται με βαθμό απόδοσης η (%) , υπολογίζουμε το πραγματικό ποσό θερμότητας που συναλλάσσεται μεταξύ των δυο ρευμάτων.
- Η θέση 9 αντιστοιχεί στην είσοδο του πλούσιου διαλύματος στον απορροφητή μετά τον στραγγαλισμό (ισενθαλικός).
- Η θέση 10 αντιστοιχεί στο φτωχό διάλυμα που εξέρχεται από τον απορροφητή.
- Η θέση 11 αντιστοιχεί στην είσοδο του φτωχού διαλύματος στον εναλλάκτη μετά την κατάθλιψη σε πίεση P_h .

Στον αριστερό κατακόρυφο άξονα παριστάνεται το καθαρό νερό ενώ στο δεξιό άξονα παριστάνεται το διάλυμα LiBr με σύσταση κατά μάζα 60%. Οι δύο συνεχείς γραμμές στο κάτω μέρος του διαγράμματος περιγράφουν το υγρό μίγμα για χαμηλή και υψηλή πίεση λειτουργίας της μονάδας P_l και P_h, ενώ οι δύο συνεχείς γραμμές στο άνω μέρος του διαγράμματος περιγράφουν τον υπέρθερμο ατμό σε ισορροπία με το υγρό μίγμα για πιέσεις P_l και P_h.

Περαιτέρω, όλα τα σημεία που αναπαριστούν τις διάφορες φάσεις της διεργασίας καθώς και μια ομάδα 4 ισοθερμοκρασιακών γραμμών παρουσιάζονται στο διάγραμμα.

Το "Σχήμα 8" και το "Σχήμα 9" παρουσιάζουν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια την πορεία του διαλύματος LiBr-H₂O σε διάγραμμα συγκέντρωσης-ενθαλπίας h - X.

Αρχικά στην εισαγωγή της αμογεννήτριας (θέση 1), καθώς παρέχεται θερμότητα και ανεβαίνει η θερμοκρασία, η ενθαλπία της πρώτης φυσαλίδας ατμού που διαχωρίζεται από το μίγμα LiBr-H₂O παριστάνεται στο σημείο τομής της ισοβαρούς καμπύλης πίεσης P_h, με την ευθεία της συγκέντρωσης του πλούσιου διαλύματος LiBr-H₂O. Κατά το τέλος της διαδικασίας διαχωρισμού (θέση 7) του ατμού από το διάλυμα, η ενθαλπία της τελευταίας φυσαλίδας ατμού καθορίζεται από την τομή της ισοβαρούς καμπύλης χαμηλής πίεσης P_l του κύκλου με την ευθεία της συγκέντρωσης του φτωχού διαλύματος.

Όλες οι θερμοδυναμικές καταστάσεις του ατμού παριστάνονται στον άξονα για X=0 αφού αποτελούνται από καθαρό ατμοποιημένο νερό.

Κατά τη διάρκεια της απορρόφησης, το εναπομείναν διάλυμα LiBr-H₂O χαμηλής συγκέντρωσης (θέση 1) ανάγεται σε διάλυμα υψηλής συγκέντρωσης (θέση 7) κατά μήκος της ισόβαρους καμπύλης υψηλής πίεσης P_h. Η πορεία ολόκληρης της διαδικασίας της αδιαβατικής απορρόφησης παριστάνεται γραφικά από την ευθεία που προκύπτει αν συνδέσουμε τα σημεία 6 και 9.

Μετά την εκτόνωση του ατμού στον διβάθμιο στρόβιλο, ο ατμός (θέση 6) εισέρχεται στον απορροφητή και απορροφάται από το πλούσιο διάλυμα (θέση 9) σχηματίζοντας το πλούσιο διάλυμα (θέση 9'). Προκειμένου να εντοπίσουμε το σημείο της αδιαβατικής απορρόφησης (θέση 9') συνδέουμε τα σημεία 6 και 9. Τότε το σημείο 9' βρίσκεται στο κοινό σημείο τομής αυτής της γραμμής με την ευθεία της συγκέντρωσης φτωχού διαλύματος X_w στην διφασική περιοχή.

Τέλος, για να ολοκληρωθεί η διαδικασία της απορρόφησης ένα ποσό θερμότητας q_{abs} πρέπει να απορριφθεί, το οποίο υπολογίζεται ως εξής :

$$q_{abs} = h_{9'} - h_{10} \quad (\text{KJ/Kg αδύναμου διαλύματος}) \quad (8)$$

Δηλαδή κατά τη διάρκεια της απορρόφησης το πλούσιο διάλυμα (θέση 9) ανάγεται σε φτωχό διάλυμα (θέση 10) αποβάλλοντας θερμότητα q_{abs}.

Γ.3.2. ΓΡΑΦΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΑΛΛΑΣΟΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Όλα τα ποσά θερμότητας που υπολογίζονται παραπάνω κατά τον ενεργειακό ισολογισμό του κύκλου στις εξισώσεις 4 έως και 8 μπορούν να αναπαρασταθούν γραφικά ως εξής:

α. Ατμογεννήτρια

1. Συνδέουμε τα σημεία 1 και 7 και επεκτείνουμε τη γραμμή έως τον άξονα Y. Τότε καθορίζεται το κοινό σημείο τομής G της γραμμής με τον άξονα Y και η ενθαλπία του σημείου G:

$$h_G = -130 \text{ kJ/kg}$$

2. Από την ομοιότητα των τριγώνων 1 – 7 – B και 1 – G – C έχουμε:

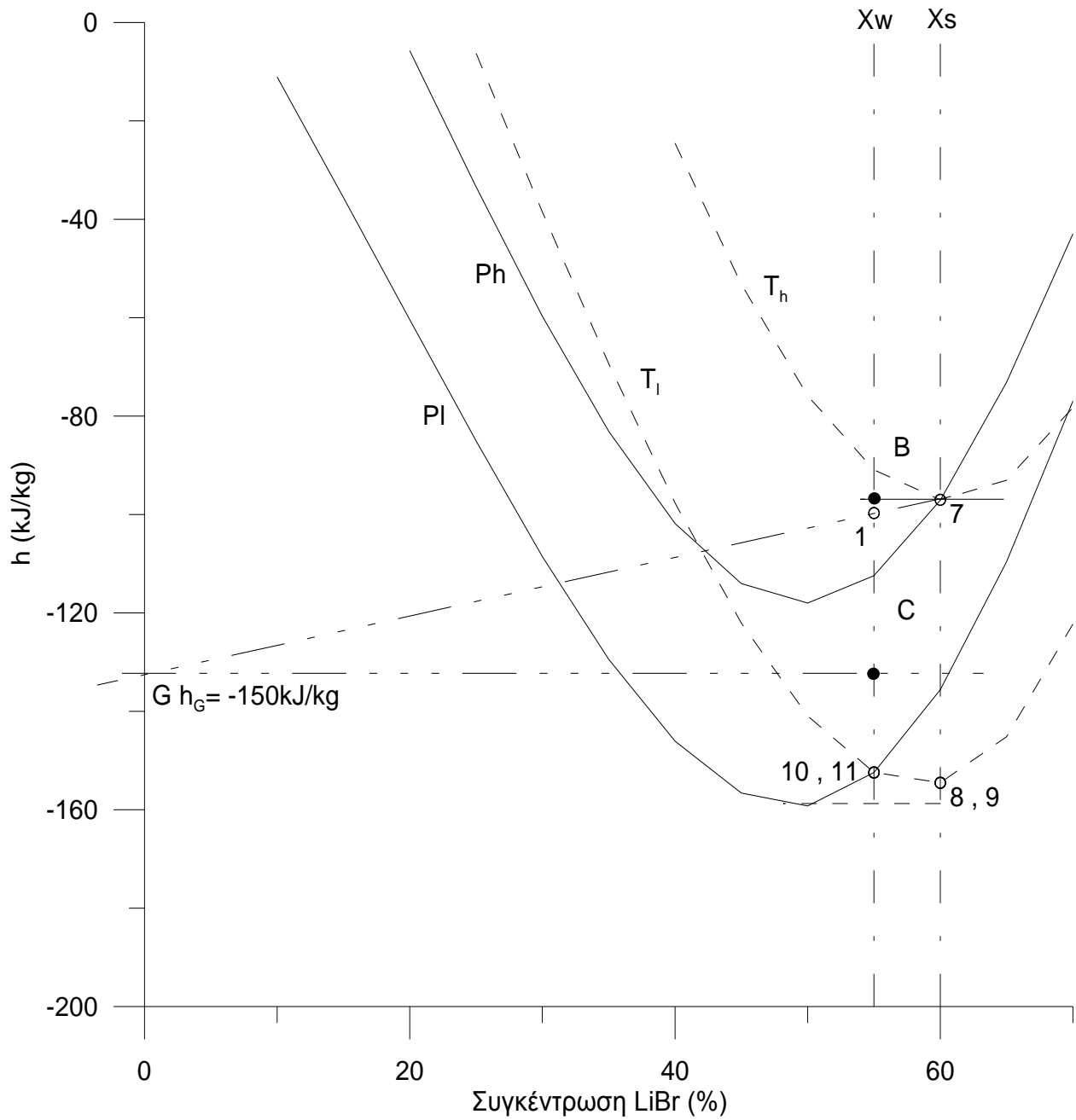
$$\frac{h_7 - h_1}{X_S - X_W} = \frac{h_1 - h_G}{X_W} \quad (9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις 1 και 3 έχουμε:

$$q_{\text{gen}} = h_2 - h_G \quad (10)$$

Από το διάγραμμα h - X βρίσκουμε την ενθαλπία h₂ στον άξονα Y: h₂=2650 KJ/kg

Από την εξίσωση 10 βρίσκουμε το q_{gen}=2780 kJ/kg (που έχει υπολογιστεί: 2761 kJ/kg).



Σχήμα 33 Γραφικός προσδιορισμός του αναγκαίου ποσού θερμότητας για την ατμογεννήτρια.

β. Απορροφητής

Συνδέοντας τα σημεία 9 και 10 (Σχήμα 9) λαμβάνουμε το σημείο Α στον άξονα Υ:

$$h_A = -130 \text{ kJ/kg}$$

Από την ομοιότητα των τριγώνων 9 – 10 – Ε και 10 – Α – F λαμβάνουμε:

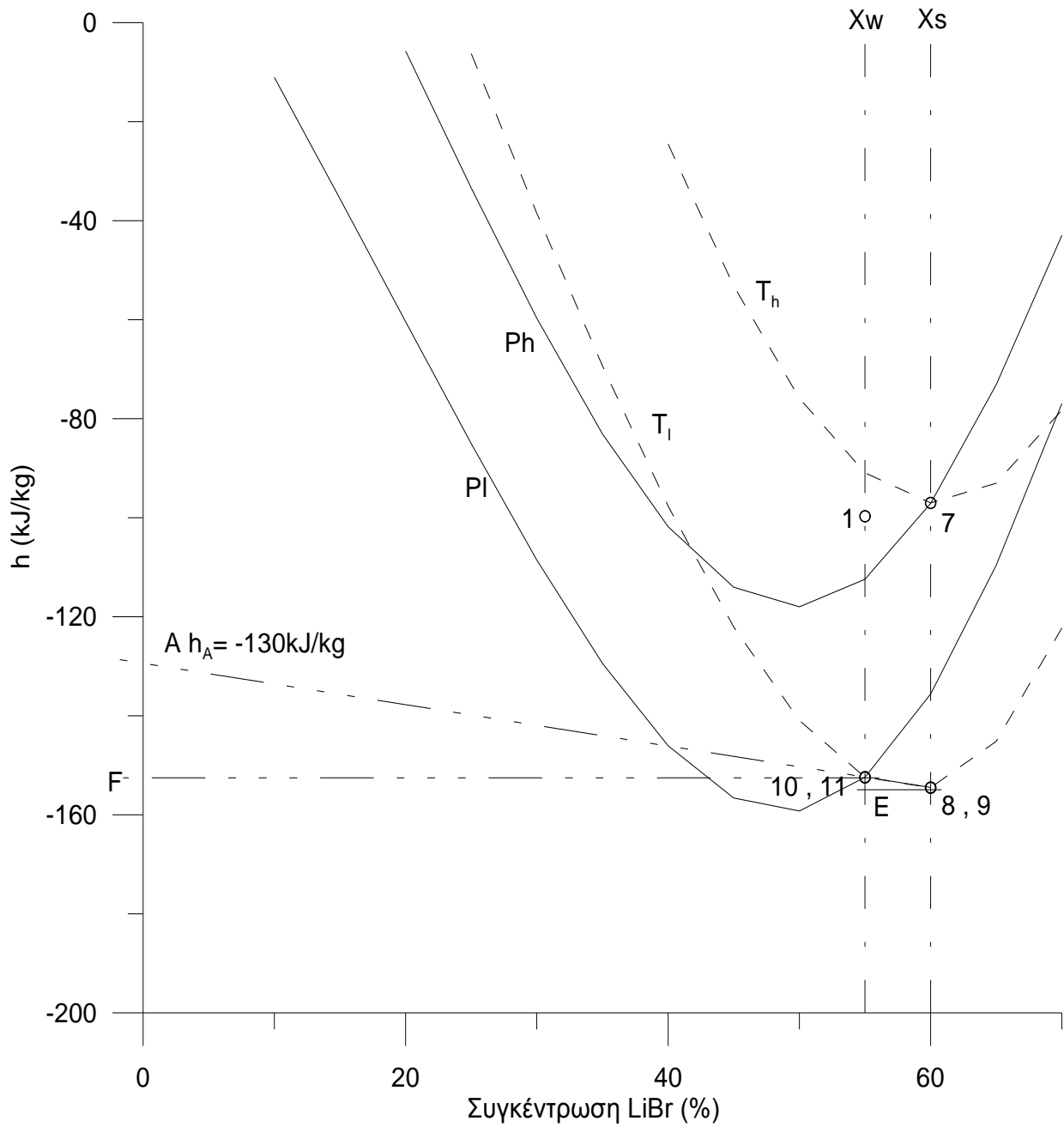
$$\frac{h_{10} - h_9}{X_S - X_W} = \frac{h_A - h_{10}}{X_W} \quad (11)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις 3 και 4 έχουμε:

$$q_{\text{abs}} = h_6 - h_A \quad (12)$$

Από το διάγραμμα h - X βρίσκουμε την ενθαλπία h₆ στον άξονα Υ: h₆ = 2600 KJ/kg

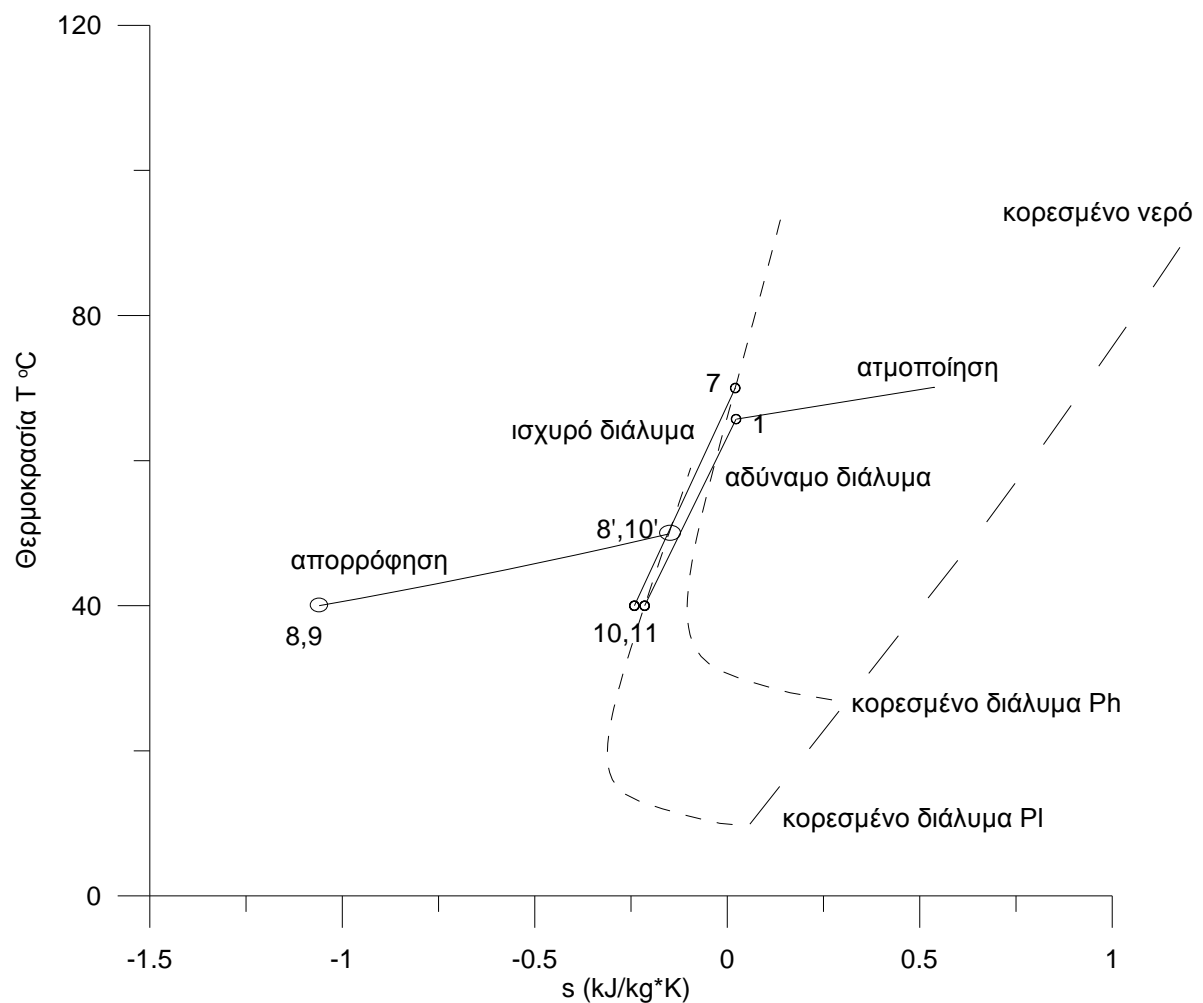
Από την εξίσωση 12 βρίσκουμε το q_{abs} = 2730 kJ/kg
(που έχει υπολογιστεί: 2705 kJ/kg).



Σχήμα 34 Γραφικός προσδιορισμός της απόρριψης θερμότητας των απορροφητών

Για λόγους σαφήνειας, η περιοχή που αναπαριστά την πορεία του διαλύματος LiBr-H₂O στο διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας T-s (Σχήμα 2) έχει μεγεθυνθεί. Στο “Σχήμα 10” η μεταβολή 7 – 8 – 9 αφορά στο πλούσιο διάλυμα LiBr-H₂O, ενώ η μεταβολή 10 – 11 – 1 στο φτωχό διάλυμα. Το ποσό θερμότητας ανά Kg ατμού αναπαριστάται από την περιοχή κάτω από την καμπύλη.

Όλα τα ποσά θερμότητας που υπολογίζονται αφορούν στην παραγωγή ενός Kg ατμού στην ατμογεννήτρια, γι’ αυτό ο συνδυασμός των δυο καμπυλών 7 – 8 – 9 και 10 – 11 – 1 δίνει μια «συνιστάμενη» των δύο καμπυλών, που αναπαριστάται στο διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας T-s για το διάλυμα LiBr-H₂O (σχήμα 10).



Σχήμα 35 Ισχυρό και αδύναμο διάλυμα LiBr-H₂O σε διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας T-s.

Γ.3.3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΚΥΚΛΟ RANKINE

Ένας κύκλος Rankine με τις ίδιες αρχικές συνθήκες λειτουργίας ($T_{\min} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$), όπως στον κύκλο LiBr-H₂O, έχει υπολογισθεί με παρόμοιο τρόπο, σε προγραμματιστικό περιβάλλον MathCAD, προκειμένου να γίνεται άμεσα αντιληπτό το όφελος από την χρήση διαλυμάτων LiBr-H₂O. Ο κύκλος έχει υπολογισθεί βασισμένος στις ίδιες υποθέσεις όπως στον κύκλο LiBr-H₂O. Σε αυτήν την περίπτωση ο συμπυκνωτής παίρνει τη θέση του απορροφητή και η χαμηλή πίεση του κύκλου καθορίζεται από τη θερμοκρασία συμπυκνωτών (T_{\min}):

$$P_1 = 0.074 \text{ bar}$$

Θεωρώντας έναν 4-βάθμιο στρόβιλο με υπερθερμαντή μετά την ατμογεννήτρια και 3 ενδιάμεσους αναθερμαντές, η υψηλή πίεση P_h καθώς επίσης και οι πιέσεις των ενδιάμεσων αναθερμάνσεων της διαδικασίας υπολογισμού είναι:

Ατμογεννήτρια και υπερθερμαντή: $P_h = \text{bar}$

Αναθέρμανση 1: $P_{RH\ 1} = \text{bar}$

Αναθέρμανση 2: $P_{RH\ 2} = \text{bar}$

Αναθέρμανση 3: $P_{RH\ 3} = \text{bar}$

Αξιολογώντας τον κύκλο για τις παραπάνω παραμέτρους έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

Κατανάλωση θερμότητας ατμογεννήτριας ¹	2653
Κατανάλωση υπερθερμαντών	446.8
Αποβολή θερμότητας συμπυκνωτή	2426
Παραγωγή έργου στρόβιλων	674.2
Θερμικός βαθμός απόδοσης εγκατάστασης Rankine	11,4%
Συντελεστής απόδοσης PF Rankine	1,304

¹ Όλες οι ενεργειακές μονάδες είναι ατμός kW/kg

Πίνακας 3. Θερμοδυναμική απόδοση ενός κύκλου Rankine

Γ.4. ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα για την παραμετροποίηση του κύκλου Rankine, ως προς την ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας T_{\min} και T_{\max} , ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα που βρέθηκαν για τη χρήση διαλύματος LiBr-H₂O

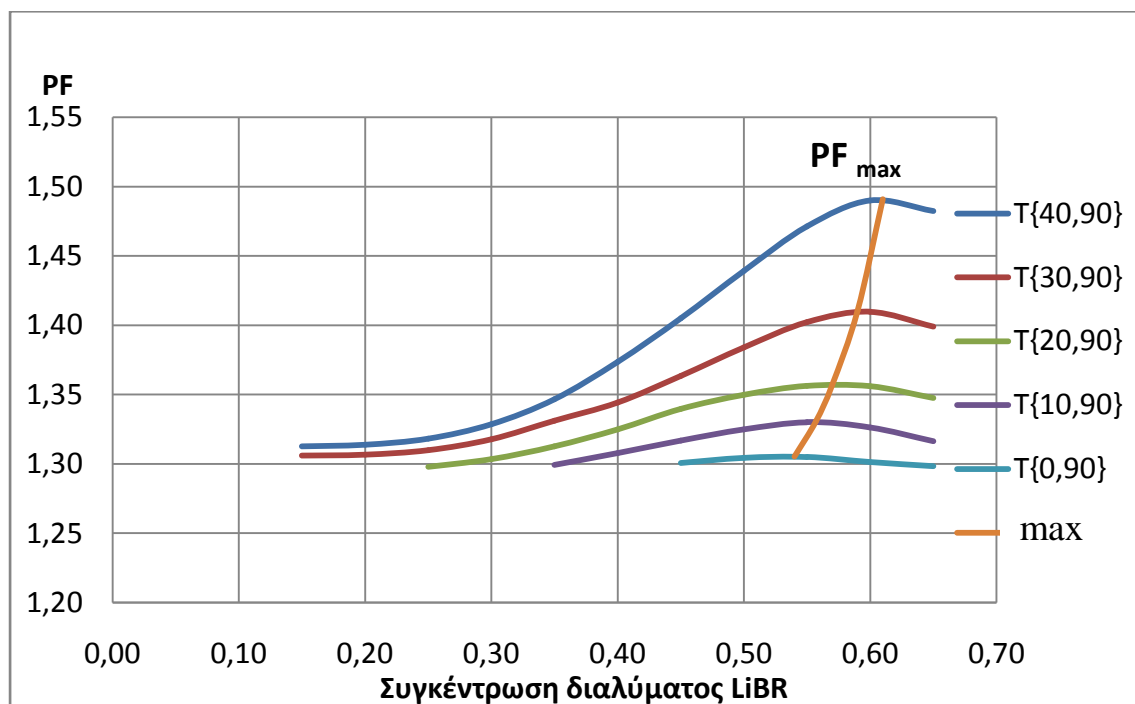
Ακολουθώντας τη διαδικασία της παραμετροποίησης των συνθηκών λειτουργίας του κύκλου στο κεφάλαιο 2 εκτελούμε το υπολογιστικό μοντέλο που διαμορφώθηκε σε περιβάλλον MathCAD για κάθε μια από τις περιπτώσεις συνθηκών λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία κατά την παραμετροποίηση είναι τα ακόλουθα:
Όλα τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν στην λειτουργία του κύκλου με μεταβολή του φτωχού διαλύματος LiBr-H₂O κατά $\Delta X = 5\%$.

Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Θερμοκρασίες περιβάλλοντος: $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{amb}} < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Πίνακας 4. Μέγιστες τιμές του συντελεστή απόδοσης PF:

T(0,90)	0,540	1,3052
T(10,90)	0,557	1,3307
T(20,90)	0,570	1,3571
T(30,90)	0,590	1,4102
T(40,90)	0,610	1,4909

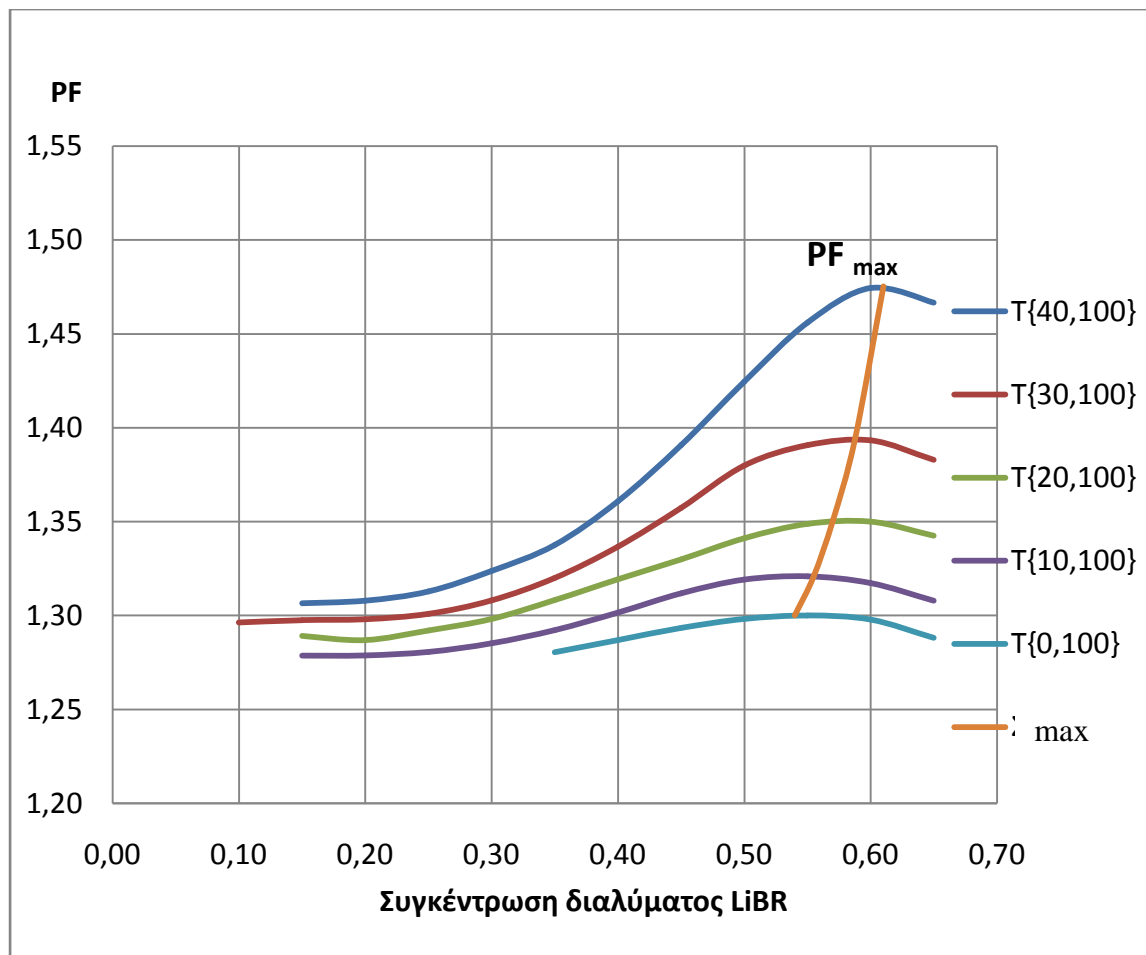


Σχήμα 36. Διάγραμμα συντελεστών συμπεριφοράς $PF_{\max} = PF(T_{\max})$ ως προς την συγκέντρωση X
 Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Θερμοκρασίες περιβάλλοντος: $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{amb}} < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$
 Θερμοκρασίες περιβάλλοντος: $0^{\circ}\text{C} < T_{\text{amb}} < 40^{\circ}\text{C}$

Πίνακας 5. Μέγιστες τιμές του συντελεστή απόδοσης PF:

T(0,100)	0,540	1,3001
T(10,100)	0,555	1,3209
T(20,100)	0,570	1,3505
T(30,100)	0,588	1,3938
T(40,100)	0,610	1,4753



Σχήμα 37. Διάγραμμα συντελεστών συμπεριφοράς $PF_{\max} = PF(T_{\max})$ ως προς την συγκέντρωση X

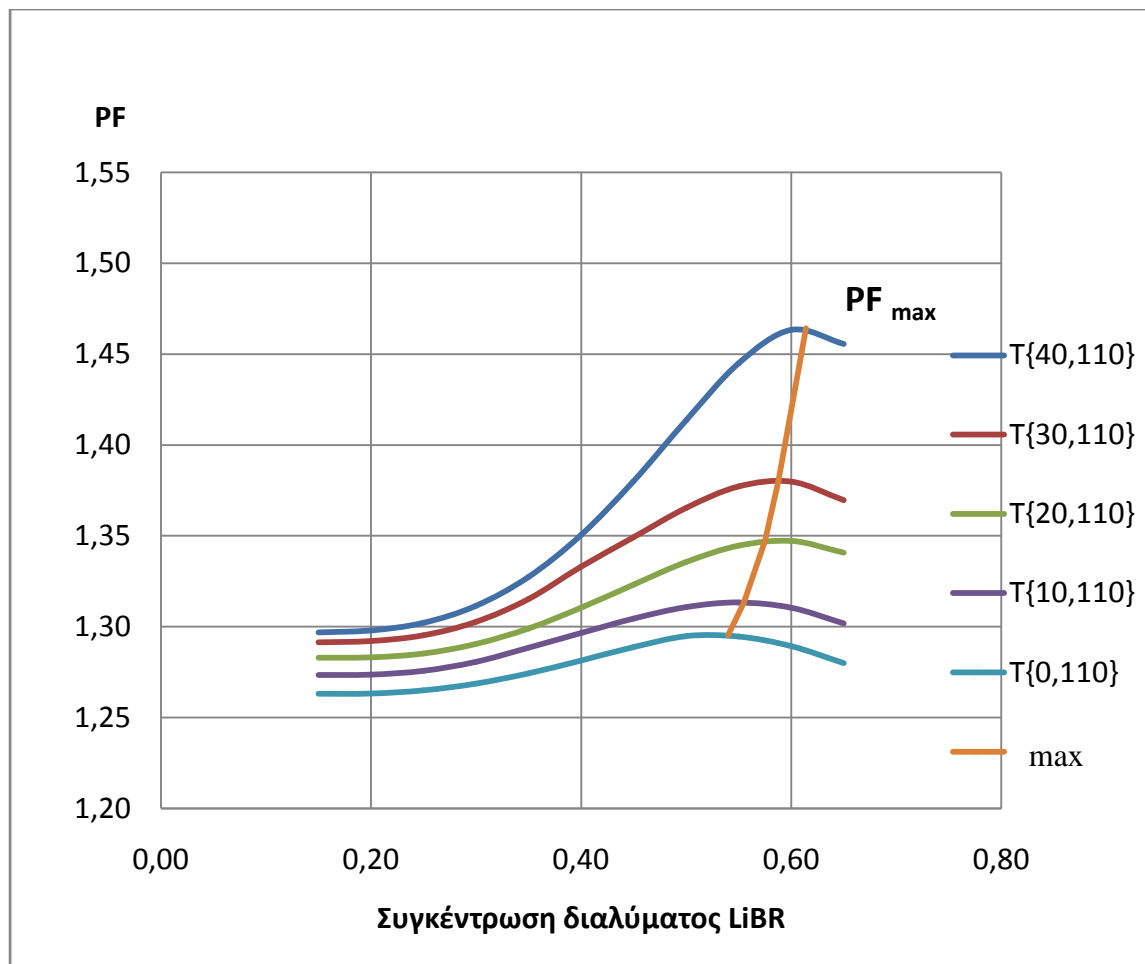
Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$
 Θερμοκρασίες περιβάλλοντος: $0^{\circ}\text{C} < T_{\text{amb}} < 40^{\circ}\text{C}$

Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 110^{\circ}\text{C}$

Θερμοκρασίες περιβάλλοντος: $0^{\circ}\text{C} < T_{\text{amb}} < 40^{\circ}\text{C}$

Πίνακας 6. Μέγιστες τιμές του συντελεστή απόδοσης PF:

T(0,110)	0,540	1,2954
T(10,110)	0,555	1,3133
T(20,110)	0,575	1,3473
T(30,110)	0,588	1,3803
T(40,110)	0,614	1,4643



Σχήμα 38. Διάγραμμα συντελεστών συμπεριφοράς $PF_{\max} = PF(T_{\max})$ ως προς την συγκέντρωση X

Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 110^{\circ}\text{C}$

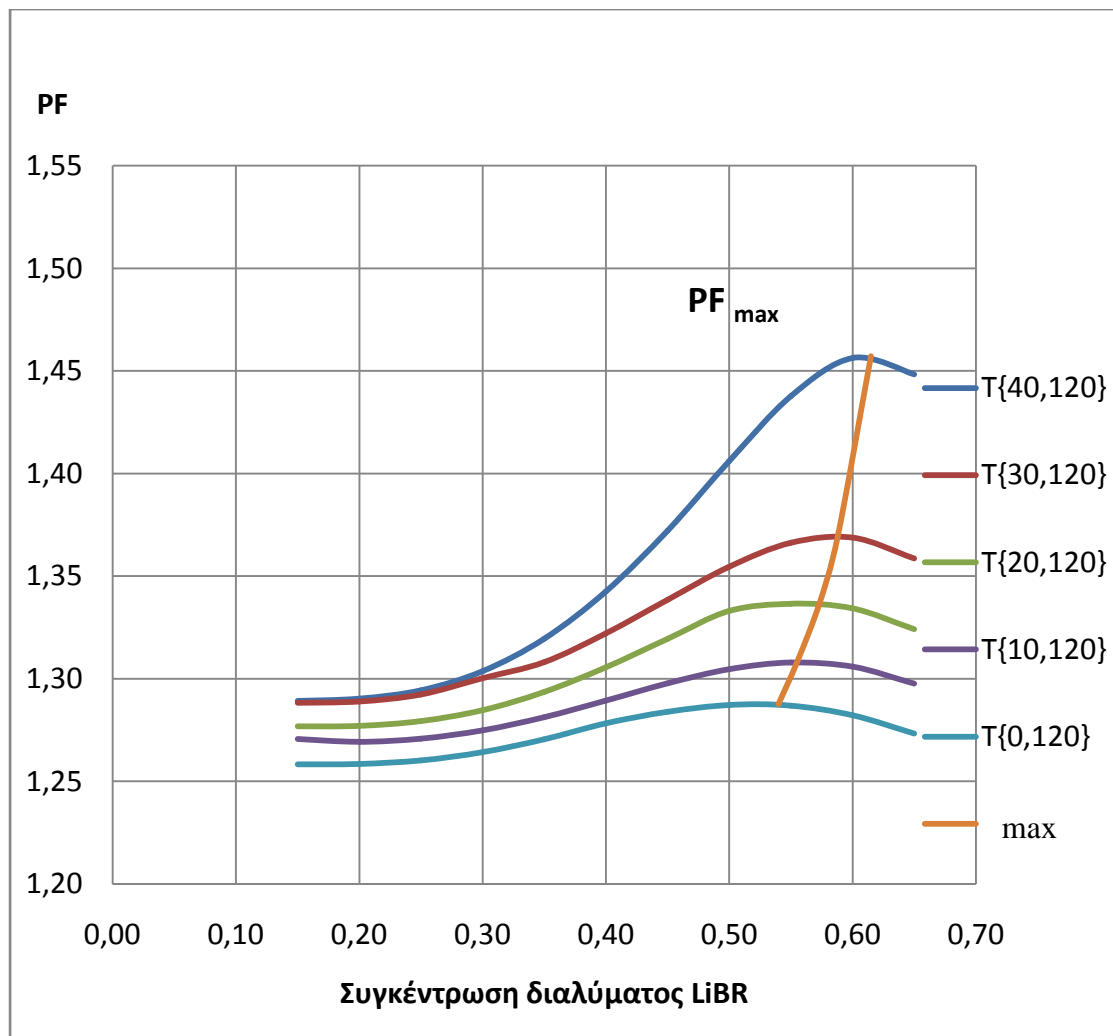
Θερμοκρασίες περιβάλλοντος: $0^{\circ}\text{C} < T_{\text{amb}} < 40^{\circ}\text{C}$

Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$

Θερμοκρασίες περιβάλλοντος: $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{amb}} < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Πίνακας 7. Μέγιστες τιμές του συντελεστή απόδοσης PF:

T(0,120)	0,540	1,2876
T(10,120)	0,555	1,308
T(20,120)	0,573	1,3366
T(30,120)	0,588	1,3692
T(40,120)	0,615	1,4572



Σχήμα 39. Διάγραμμα συντελεστών συμπεριφοράς $PF_{\max} = PF(T_{\max})$ ως προς την συγκέντρωση X

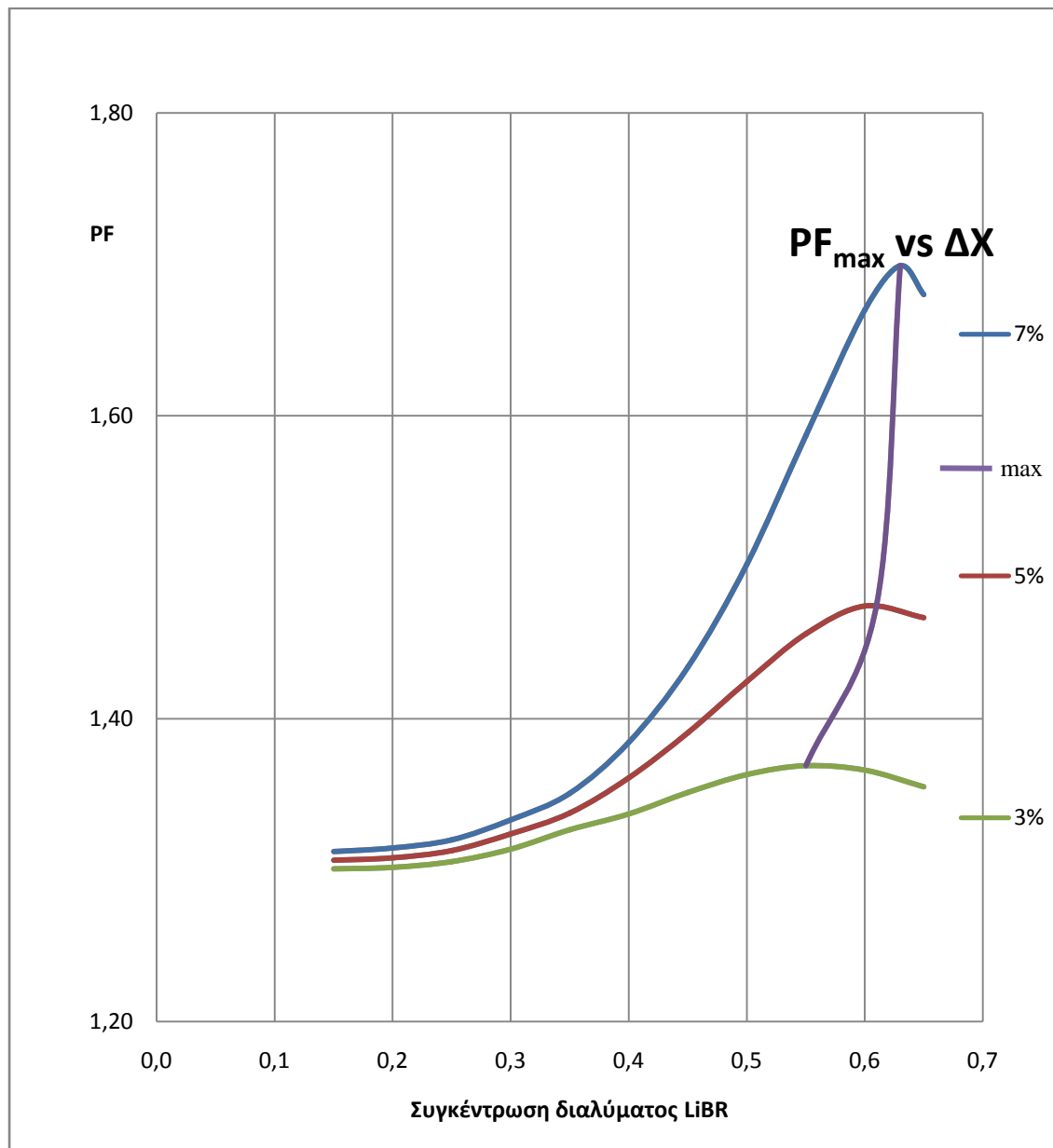
Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$

Θερμοκρασίες περιβάλλοντος: $0\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{\text{amb}} < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

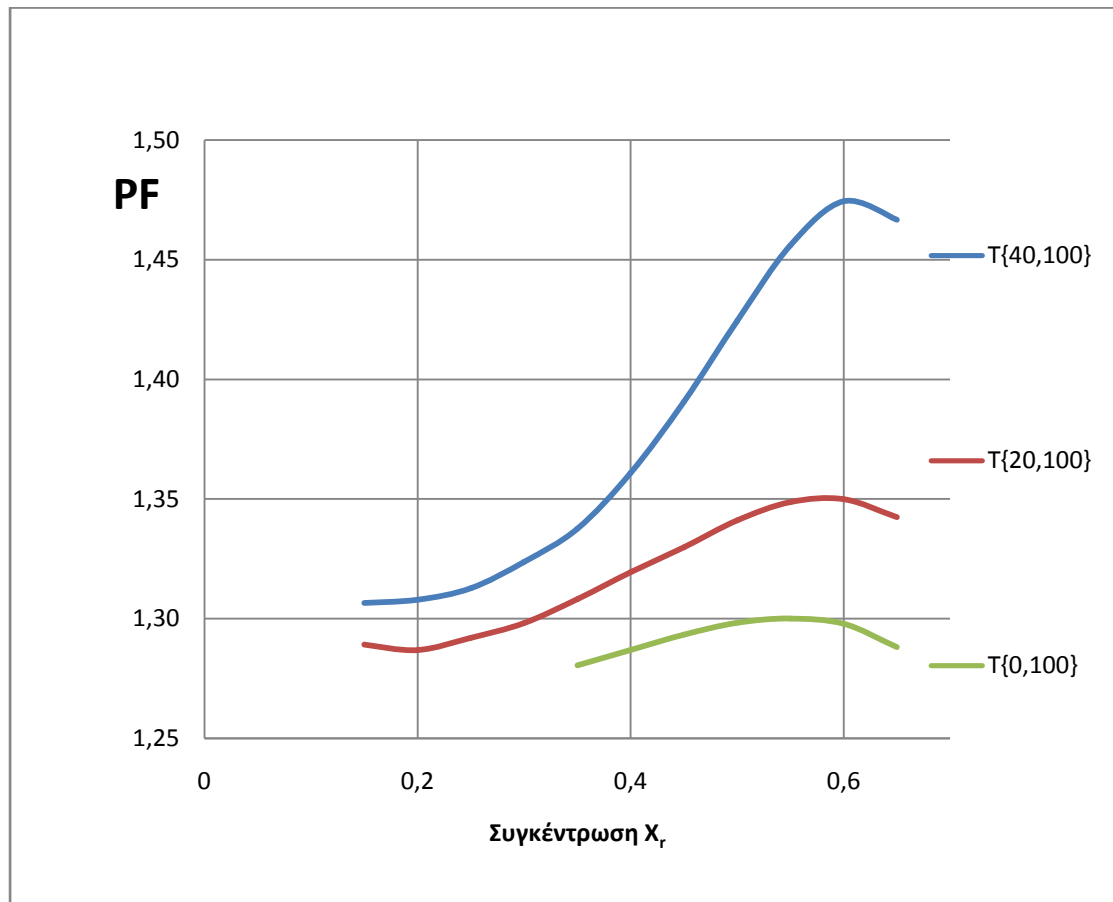
Προκειμένου να βρεθεί η τάση που παρουσιάζει ο συντελεστής συμπεριφοράς PF κατά την αυξομείωση του ποσοστού μεταβολής της συγκέντρωσης του αρχικού και του τελικού διαλύματος LiBr-H₂O, γίνεται διερεύνηση ως προς:

$\Delta X = 7\%$ και $\Delta X = 3\%$

Επειδή η περαιτέρω παραμετροποίηση ως προς το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας του κύκλου θα έδειχνε την ίδια τάση για το ποσοστό μεταβολής της συγκέντρωσης, η παραμετροποίηση επιλεγούμε να γίνει μόνο ως προς την συγκέντρωση του διαλύματος LiBr-H₂O.



Σχήμα 40. Διάγραμμα επίδρασης στον συντελεστή απόδοσης PF για διάφορα ποσοστά μεταβολής της συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O ως προς την συγκέντρωση X.

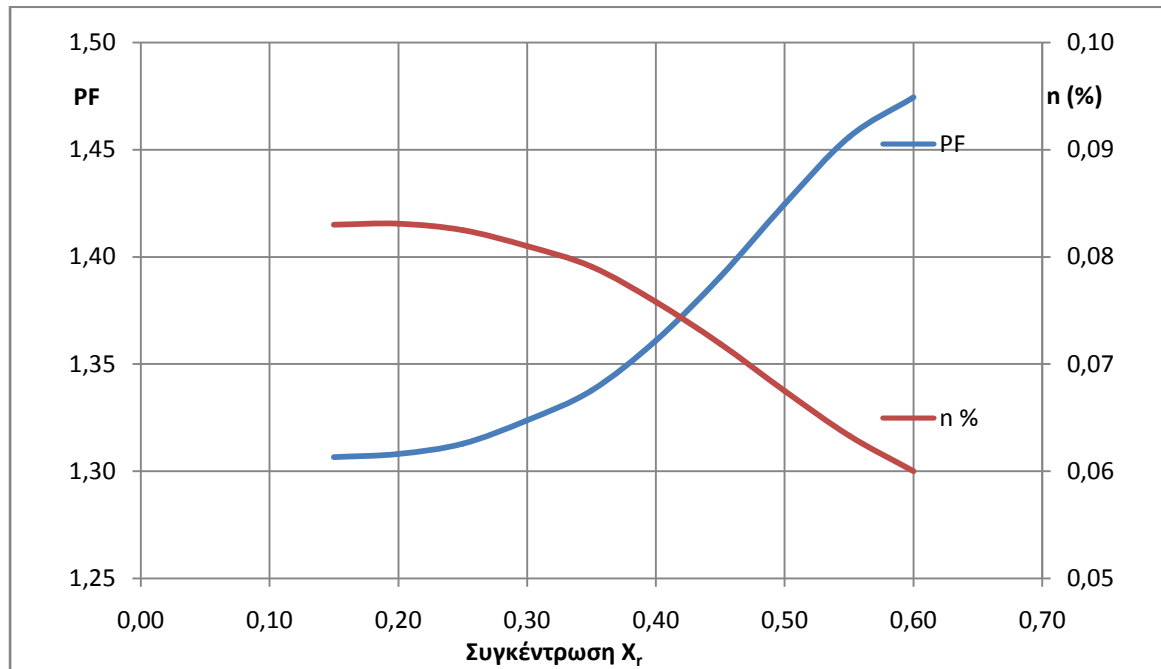


Σχήμα 41. Διάγραμμα επίδρασης στον συντελεστή απόδοσης PF για διάφορες συγκεντρώσεις X του διαλύματος LiBr-H₂O ως προς την θερμοκρασία περιβάλλοντος T_{amb} .

Γίνεται φανερή η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος $T_{amb} = T_{min}$ στον συντελεστή συμπεριφοράς PF του κύκλου διαλύματος LiBr-H₂O.

Η μείωση της ελάχιστης θερμοκρασίας, π.χ. κατά τη διάρκεια του χειμώνα ή όταν υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης σε χώρες με πιο ψυχρό κλίμα, μειώνει τον PF, διότι μειώνεται η ελάχιστη πίεση P_1 , που επιτρέπει μεγαλύτερη εκτόνωση του ατμού στους στροβίλους, μα απαιτεί αναλογικά μεγαλύτερο ποσό θερμότητας για την αναθέρμανση.

Ωστόσο η αύξηση του PF, όσο αυξάνει η συγκέντρωση X_r του διαλύματος LiBr-H₂O, οφείλεται στο γεγονός ότι παίρνουμε το ίδιο έργο W_t , ενώ χρειαζόμαστε μικρότερα πόσα αναθέρμανσης q_{RH} .

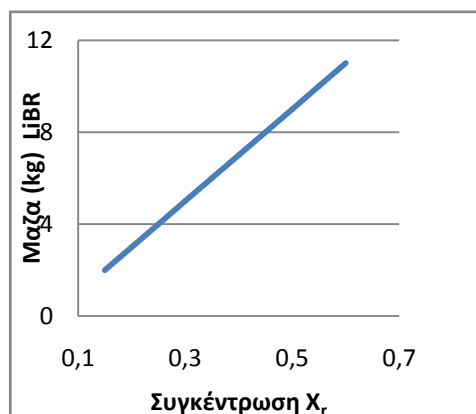


Σχήμα 42. Διάγραμμα σύγκρισης του συντελεστή απόδοσης PF για διάφορες συγκεντρώσεις X του διαλύματος LiBr-H₂O με τον βαθμό απόδοσης $n(\%)$.

Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

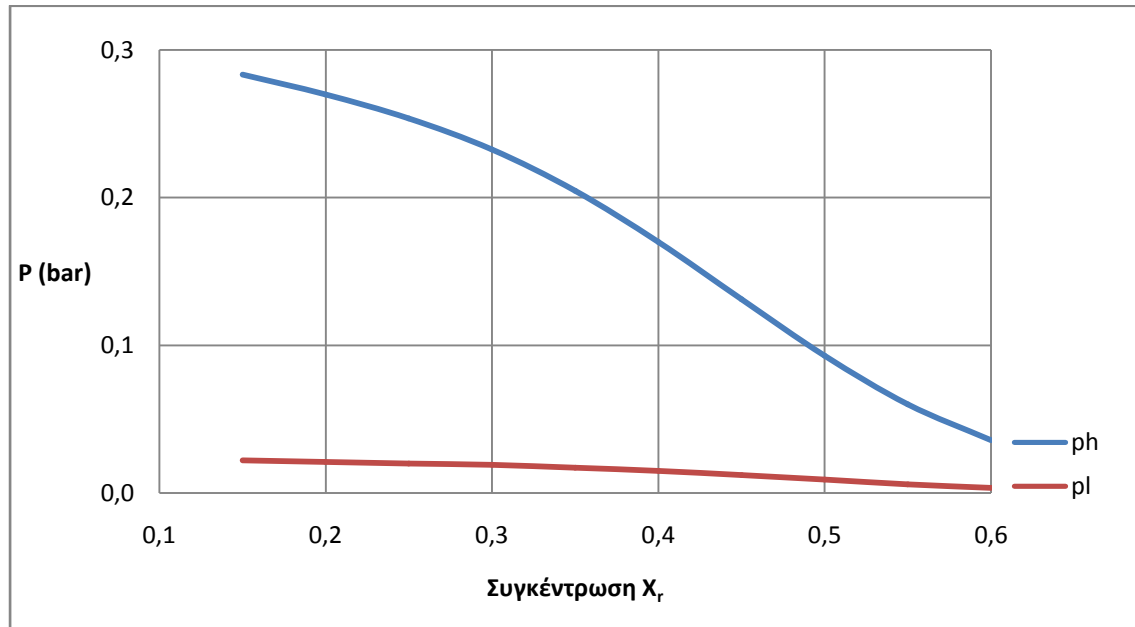
Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $T_{\text{amb}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης μειώνεται καθώς ο κύκλος βασίζεται στην παραγωγή 1 kg ατμού, σε ποσότητα διαλύματος LiBr-H₂O που αυξάνεται γραμμικά με την συγκέντρωση X_r .



Σχήμα 43. Μεταβολή της μάζας σε kg διαλύματος LiBr-H₂O που χρησιμοποιείται για την παραγωγή 1kg ατμού

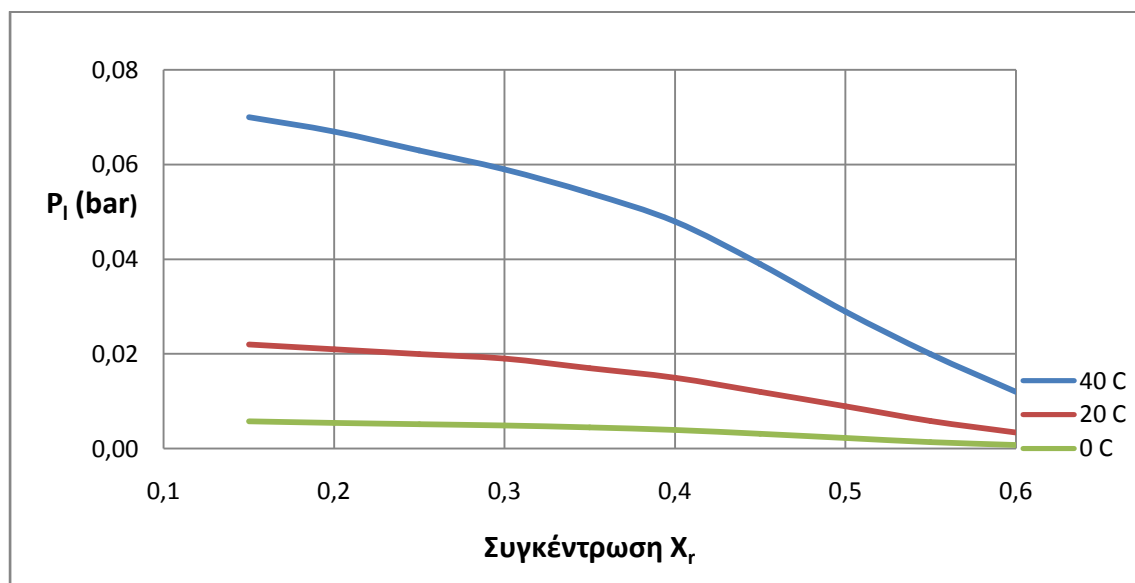
Παρατηρείται η διαφορετική τάση που έχουν ο θερμικός βαθμός απόδοσης η (%) με τον συντελεστή συμπεριφοράς PF, για διαφορετικές συγκεντρώσεις X , εξαιτίας των πολύ χαμηλών πιέσεων και θερμοκρασιών του κύκλου που δημιουργεί δυσαναλογία στο ποσό θερμότητας q_{gen} που παρέχουμε στην ατμογεννήτρια ως προς το έργο w_t που παράγεται.



Σχήμα 44. Μεταβολή της μέγιστης και ελάχιστης πίεσης του κύκλου για διάφορες συγκεντρώσεις X του διαλύματος LiBr-H₂O.

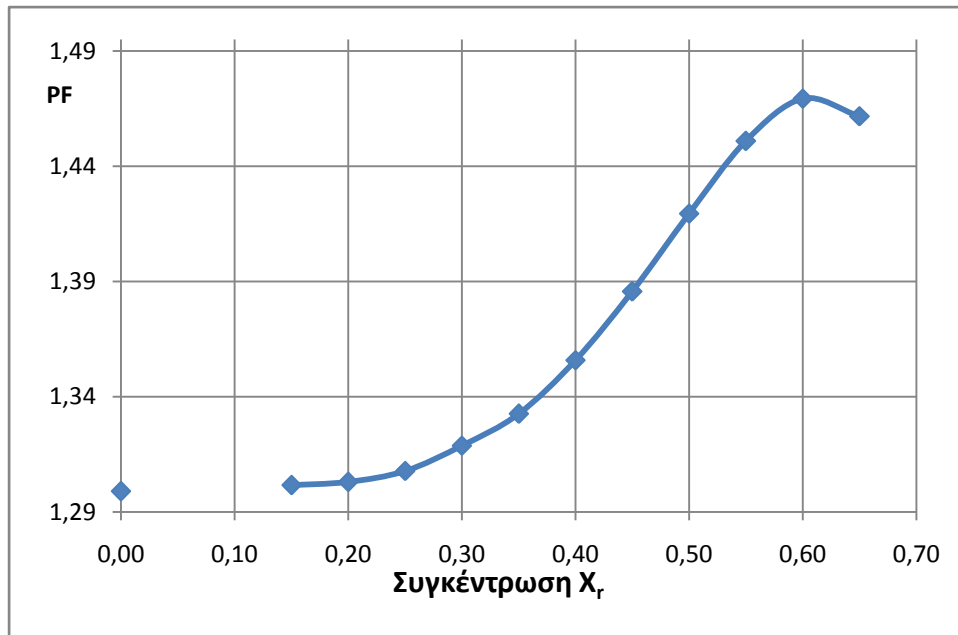
Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\text{max}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $T_{\text{amb}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$



Σχήμα 45. Μεταβολή της ελάχιστης πίεσης του κύκλου για διάφορες συγκεντρώσεις X του διαλύματος LiBr-H₂O.

Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $T_{\text{amb}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$



Σχήμα 46. Μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς PF σε διάφορες συγκεντρώσεις X_r διαλύματος LiBr και σύγκριση με το κύκλο Rankine για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας.

Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου: $T_{\max} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Θερμοκρασία περιβάλλοντος: $T_{\text{amb}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Γ.4.1. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

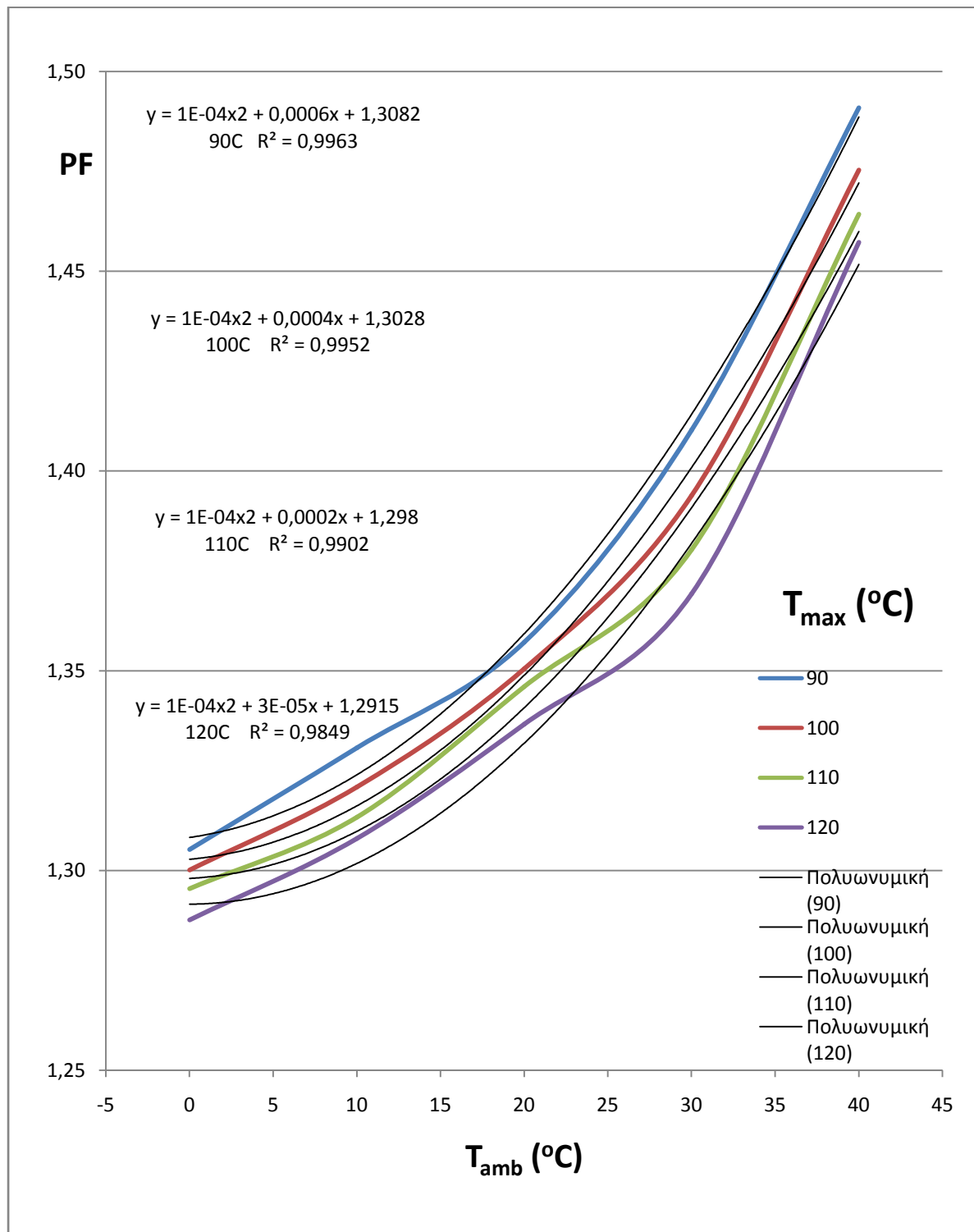
Υπολογισμός εξίσωσης του συντελεστή απόδοσης PF συναρτήσει της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου T_{\max} και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} , χωρίς όμως να γνωρίζουμε την αναγκαία συγκέντρωση X του διαλύματος $\text{LiBr-H}_2\text{O}$.

Προκειμένου να υπολογίσουμε την εξίσωση πρέπει να διασταυρώσουμε τα υπολογιστικά μας αποτελέσματα με τέτοιο τρόπο που θα μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή απόδοσης PF συναρτήσει μόνο της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου T_{\max} και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_{amb} .

Τοποθετούμε τις καμπύλες με τους συντελεστές απόδοσης για τα διάφορα πεδία θερμοκρασιών σε διάγραμμα συντελεστή συμπεριφοράς – θερμοκρασίας περιβάλλοντος PF – T_{amb} .

Έπειτα σχηματίζουμε τις γραμμές τάσης $y = \text{PF}_{\max} = \text{PF}(T_{\text{amb}})$ των καμπυλών και υπολογίζουμε τις εξισώσεις που τις εκφράζουν με τη μικρότερη δυνατή απόκλιση R^2 , χωρίς ωστόσο να δυσχεραίνονται οι υπολογισμοί μας με πολυώνυμα πολύ μεγάλου βαθμού.

Μετά, για κάθε μία από τις εξισώσεις που υπολογίστηκαν συσχετίζουμε τους συντελεστές των πολυώνυμων που δίνονται συναρτήσει της μέγιστης θερμοκρασίας του κύκλου T_{\max} .



Σχήμα 47. Μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς PF για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος T_{amb} και για διάφορες μέγιστες θερμοκρασίες T_{max} του κύκλου.

Έχουν υπολογιστεί και οι γραμμές τάσης των καμπυλών καθώς και οι αποκλίσεις τους R^2 και παριστάνονται γραφικά.

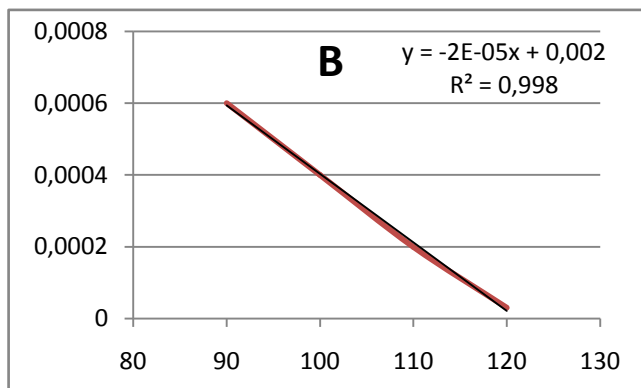
Λιαδικασία υπολογισμού εξίσωσης που προκύπτει από την συσχέτιση των συντελεστών των γραμμών τάσης που βρήκαμε παραπάνω:

Η εξίσωση είναι της μορφής:

$$PF = A * T_{amb}^2 + B * T_{amb} + C$$

Όπου: **A:f(T_{max})**

Ικανοποιείται από την εξίσωση: $y = 0.0001$



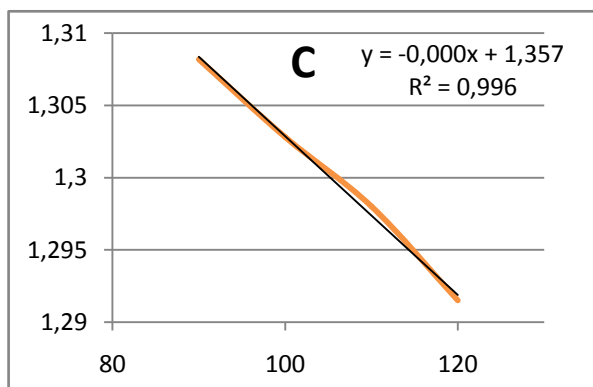
Όμοια: **B:f(T_{max})**

Εξίσωση: $y = -2E-05x + 0,0023 = -0.00002x + 0.0023$

Μέση απόκλιση: $R^2 = 0,9985$

Με συντελεστές: $a = -0.00002$
 $b = 0.0023$

Σχήμα 48. Μεταβολή του συντελεστή B για διάφορες μέγιστες θερμοκρασίες T_{max} του κύκλου.



Όμοια: **C:f(T_{max})**

Εξίσωση: $y = -0,0005x + 1,3578$

Μέση απόκλιση: $R^2 = 0,9963$

Με συντελεστές: $a = -0.0005$

$b = 1.3578$

Σχήμα 49. Μεταβολή του συντελεστή C για διάφορες μέγιστες θερμοκρασίες T_{max} του κύκλου.

Συνεπώς καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$PF_{\max} = PF(T_{\text{amb}}, T_{\text{max}}) \\ = 10^{-4} * T_{\text{amb}}^2 + (-2 * 10^{-5} * T_{\text{max}} + 0.0023) * T_{\text{amb}} - 5 * 10^{-4} \\ * T_{\text{max}} + 1.3578$$

Παρακάτω παραθέτουμε τα υπολογιστικά δεδομένα που υπολογίστηκαν από το μαθηματικό μοντέλο στο MathCAD:

Πίνακας 8. Μέγιστες τιμές του συντελεστή απόδοσης PF:

	90	100	110	120
0	1,3052	1,3001	1,2954	1,2876
10	1,3307	1,3209	1,3133	1,308
20	1,3571	1,3505	1,3460	1,3366
30	1,4102	1,3938	1,3803	1,3692
40	1,4909	1,4753	1,4643	1,4572

Και έπειτα τα δεδομένα που προκύπτουν από την εξίσωση $PF_{\max} = PF(T_{\text{amb}}, T_{\text{max}})$

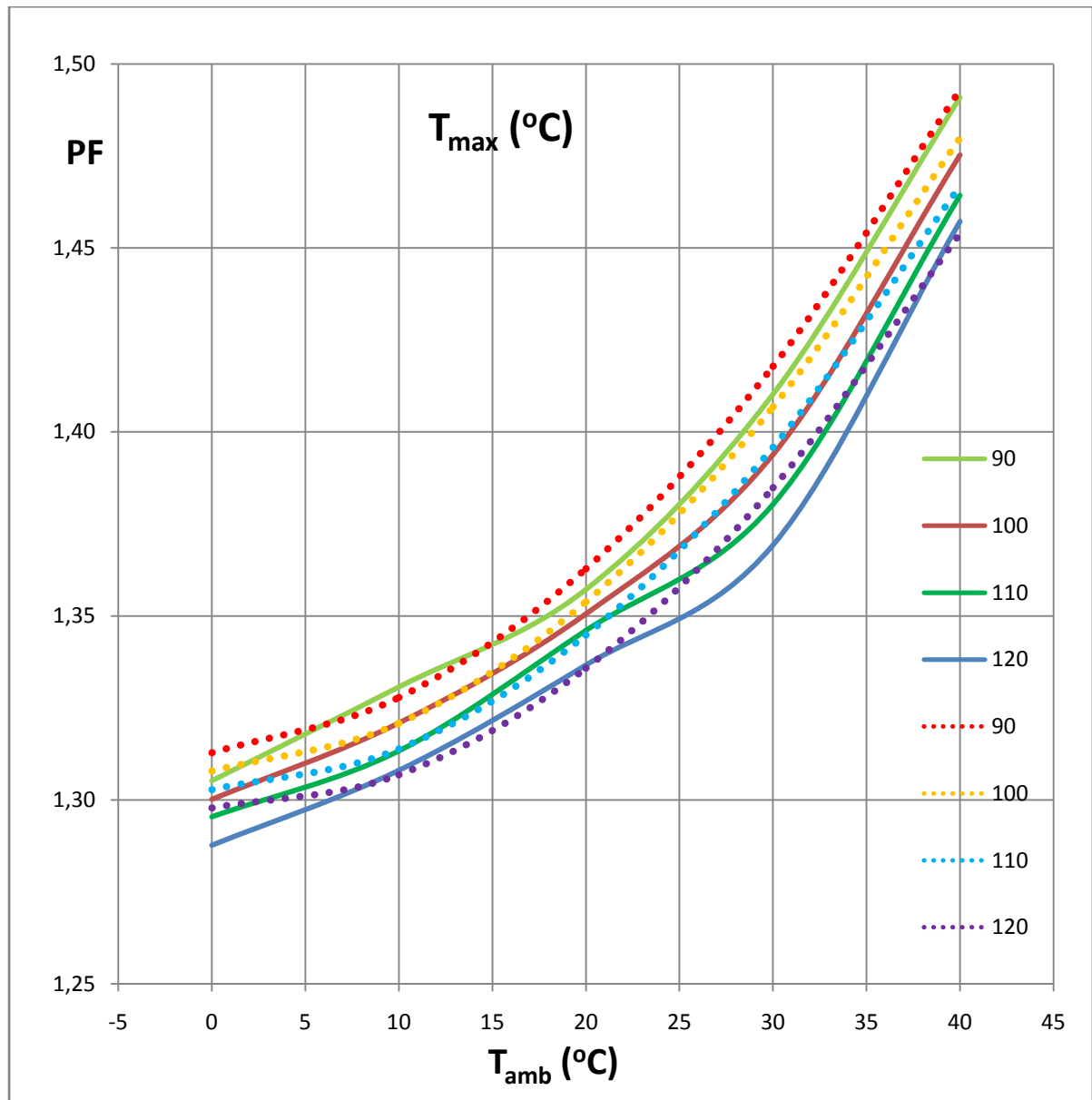
Πίνακας 9. Μέγιστες τιμές του συντελεστή απόδοσης PF:

	90	100	110	120
0	1,3128	1,3078	1,3028	1,2978
10	1,3278	1,3208	1,3138	1,3068
20	1,3628	1,3538	1,3448	1,3358
30	1,4178	1,4068	1,3958	1,3848
40	1,4928	1,4798	1,4668	1,4538

Σημείωση:

Παρατηρούμε πως οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές της τάξης του δευτέρου δεκαδικού ψηφίου δηλαδή μπορούμε να θεωρήσουμε πως η εξίσωση που υπολογίστηκε προσεγγίζει σε πολύ καλό βαθμό τα υπολογιστικά δεδομένα.

Μάλιστα θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε πιο πολύπλοκες συναρτήσεις προκειμένου να βρούμε τις γραμμές τάσης των συντελεστών απόδοσης ως προς τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Έτσι θα μειώναμε ακόμη περισσότερο την απόκλιση R^2 των γραμμών τάσης και το σφάλμα στα αποτελέσματα της νέας εξίσωσης θα ήταν ακόμη μικρότερο.

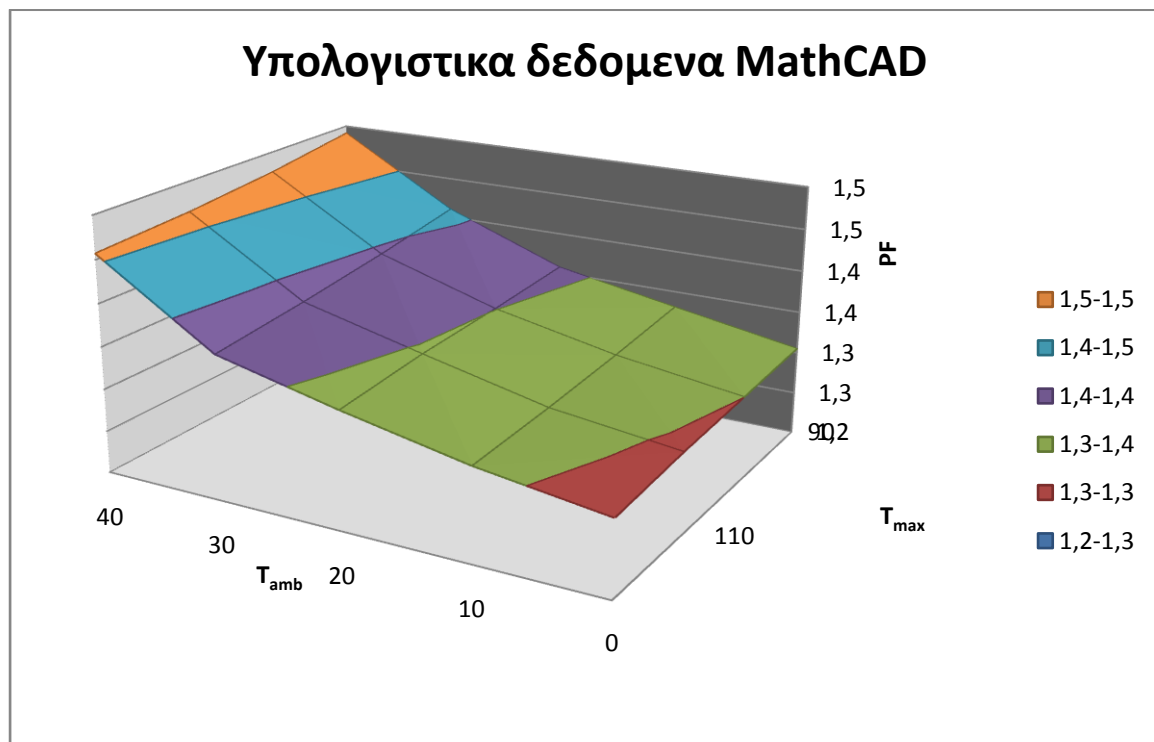
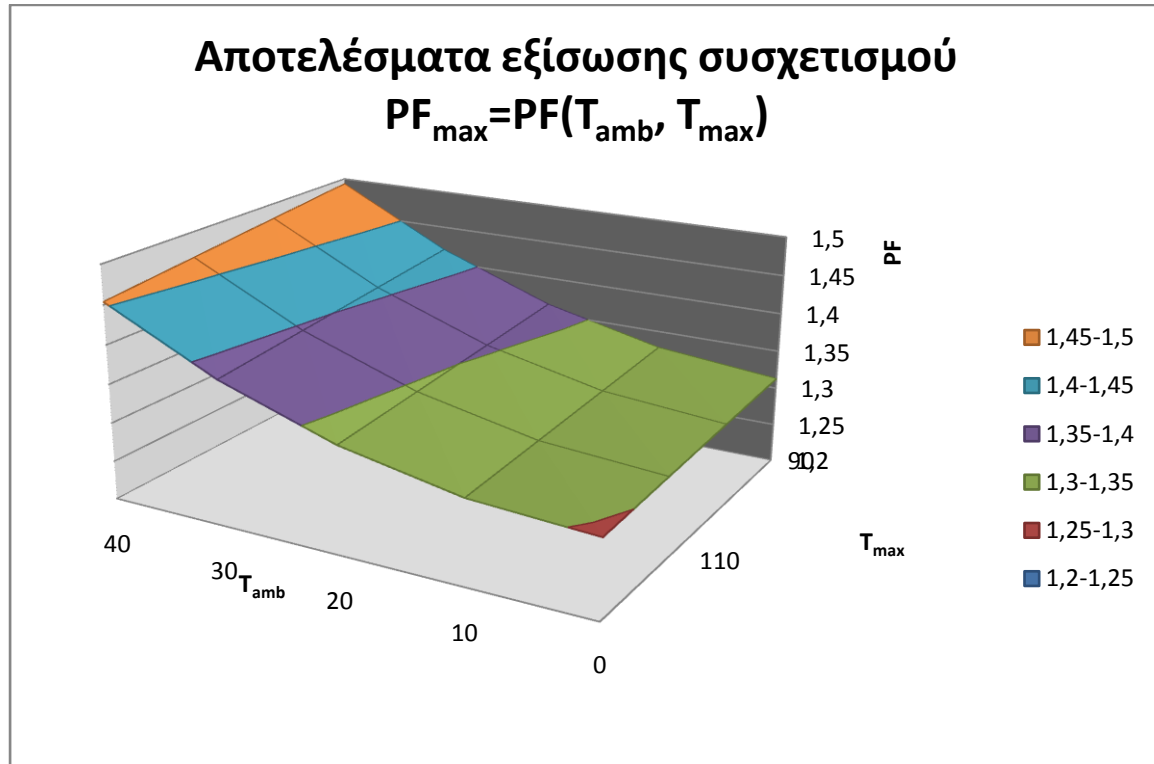


Σχήμα 50. Σύγκριση των αποτελεσμάτων που υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα MathCAD και με την εξίσωση συσχέτισης συντελεστών γραμμών τάσης $PF_{max}=PF(T_{amb},T_{max})$, που βρήκαμε παραπάνω.

Μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς PF για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος T_{amb} και για διάφορες μέγιστες θερμοκρασίες T_{max} του κύκλου.

Συνεχής γραμμή: εξίσωση $PF_{max}=PF(T_{amb},T_{max})$

Διακεκομμένη γραμμή: Υπολογιστικά δεδομένα MathCAD ————



Σχήμα 51. Σύγκριση των αποτελεσμάτων που υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα MathCAD και με την εξίσωση συσχέτισης συντελεστής γραμμών τάσης $PF_{\max} = PF(T_{\text{amb}}, T_{\text{max}})$, που βρήκαμε παραπάνω, σε διάγραμμα απεικόνισης επιφάνειας 3 διαστάσεων (PF – T_{max} – T_{amb})

Γ.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παραπάνω αναλύσαμε την λειτουργία ενός εργοπαραγωγού κύκλου που χρησιμοποιεί ένα μίγμα LiBr-H₂O ως λειτουργικό μέσο. Ο προτεινόμενος κύκλος είναι κατάλληλος για εφαρμογές με πηγές θερμότητας χαμηλού δυναμικού. Τα σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα του διαλύματος LiBr-H₂O, ως προς άλλα οργανικά μίγματα είναι ότι στην έξοδο της ατμογεννήτριας παράγεται υπέρθερμος ατμός, αποφεύγοντας έτσι τα πιθανά προβλήματα διάβρωσης στο στρόβιλο, και μειώνοντας το ποσό θερμότητας που απαιτείται για την πρώτη υπερθέρμανση. Δύο περαιτέρω πλεονεκτήματα του προτεινόμενου κύκλου είναι ότι λειτουργεί σε πολύ χαμηλές πιέσεις και έτσι ο ατμός στο στρόβιλο μπορεί να εκτονωθεί σε μικρότερες πιέσεις χωρίς να υπάρχει συμπύκνωση του ατμού, αφού εισέρχεται στον απορροφητή σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού.

Οι θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργεί ο προτεινόμενος κύκλος είναι 40 °C για τη θερμοκρασία συμπύκνωσης και 100 °C για τη θερμοκρασία υπερθέρμανσης. Τα ποσοστά θερμότητας που προέρχονται από ηλιακούς συλλέκτες αγγίζουν το 96% του συνολικού ποσού θερμότητας για τη λειτουργία του κύκλου, έναντι του ποσοστού θερμότητας ίσου με 4% που είναι αναγκαίο για την υπερθέρμανση και τις περαιτέρω αναθερμάνσεις του ατμού, από εξωτερική πηγή θέρμανσης. Γι' αυτό και ο θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης υπολογίζεται αισθητά μικρότερος, ωστόσο, όπως αναφέραμε παραπάνω, δεν αποτελεί κατάλληλο κριτήριο σύγκρισης.

Ο κύκλος προκύπτει για μια παραλλαγή του κύκλου Rankine, ο οποίος αντί για ατμό χρησιμοποιεί LiBr-H₂O, μεταβαλλόμενης σύστασης. Η ιδιαιτερότητα του κύκλου έγκειται στο γεγονός ότι το μείγμα δεν ατμοποιείται πλήρως στον ατμοποιητή. Η θερμοκρασία ατμοποίησης έχει οριστεί στους 70 °C, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση επίπεδων ηλιακών κάτοπτρων. Από τον ατμοποιητή εξέρχεται κορεσμένος ατμός και διάλυμα LiBr-H₂O υψηλής συγκέντρωσης. Το διάλυμα που διαχωρίζεται χρησιμοποιείται για την προθέρμανση του εργαζόμενου μέσου.

Στη συνέχεια, έγινε παραμετρική μελέτη του κύκλου στη οποία υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσης και το παραγόμενο έργο για ένα εύρος τιμών της σύστασης του. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο συντελεστής απόδοσης PF παρουσιάζει σαφή διαφορά (κύκλος διαλύματος LiBr-H₂O: PF =1,4744 , κύκλος Rankine: PF=1,3040) καθιστώντας σαφές το όφελος της χρήσης διαλύματος LiBr-H₂O.

Ακόμη, παρατηρείται πως ο συντελεστής συμπεριφοράς παρουσιάζει σημαντικές διαφορές ανάλογα με το πεδίο θερμοκρασιών στο οποίο εκτελείται ο κύκλος. Η αύξηση της συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O αυξάνει το συντελεστή συμπεριφοράς καθώς όλες οι μετρήσεις αφορούν στη παράγωγη 1 kg υπέρθερμου ατμού, ενώ η ποσότητα διαλύματος που χρησιμοποιείται μειώνεται ανάλογα με την αύξηση της συγκέντρωσης.

Ποσά θερμότητας (σε kW/kg ατμού) που απαιτούνται για την λειτουργία του κύκλου με διάλυμα LiBr-H₂O.

Κατανάλωση θερμότητας ατμογεννήτριας (ηλιακοί συλλέκτες)	2761
Κατανάλωση υπερθερμαντών	117,065

Ποσά θερμότητας (σε kW/kg ατμού) που απαιτούνται για την λειτουργία του κύκλου Rankine με εργαζόμενο μέσο καθαρό νερό.

Κατανάλωση θερμότητας ατμογεννήτριας	2653
Κατανάλωση υπερθερμαντών	446.8

Σύγκριση θερμικών βαθμών απόδοσης και συντελεστών συμπεριφοράς, κύκλου με εργαζόμενο μέσο διάλυμα LiBr-H₂O και κύκλου με εργαζόμενο μέσο καθαρό νερό.

Θερμικός βαθμός απόδοσης εγκατάστασης	6%
Συντελεστής απόδοσης PF	1,4744
Θερμικός βαθμός απόδοσης εγκατάστασης Rankine	11.4%
Συντελεστής απόδοσης PF Rankine	1,3040

Ακόμη, προτείνεται με τη βοήθεια υπολογιστικών δεδομένων μια προσεγγιστική εξίσωση που δίνει το μέγιστο συντελεστή συμπεριφοράς PF του κύκλου για κάθε θερμοκρασία λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, γνωρίζοντας την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την μέγιστη θερμοκρασία που επιλεγούμε να λειτουργήσει ο κύκλος μπορεί να προγνωστεί ο μέγιστος δυνατός συντελεστής συμπεριφοράς του κύκλου χωρίς να είναι αναγκαία η γνώση της συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O που χρησιμοποιείται.

$$\begin{aligned}
 PF_{\max} &= PF(T_{\text{amb}}, T_{\max}) \\
 &= 10^{-4} * T_{\text{amb}}^2 + (-2 * 10^{-5} * T_{\max} + 0.0023) * T_{\text{amb}} - 5 * 10^{-4} \\
 &\quad * T_{\max} + 1.3578
 \end{aligned}$$

Δ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Δ.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ LiBr-H₂O

Ο υπολογισμός της εντροπίας s του διαλύματος LiBr-H₂O γίνεται με τη βοήθεια των εξισώσεων Kaita. Για διαλύματα LiBr-H₂O με συγκεντρώσεις πάνω από 40% κατά μάζα σύσταση δεν υπάρχουν σχέσεις που να δίνουν τις θερμοδυναμικές του ιδιότητες. Γι' αυτό παρακάτω παρατίθενται από πειραματικά δεδομένα σχέσεις που προκύπτουν από υπολογιστικά μοντέλα, όπως είναι αυτό που ανεπτύχθη από τον Kaita.

Πρώτα εξετάζονται στοιχεία από πειραματικές διατάξεις που λειτουργούν με ατμό από διαλύματα LiBr-H₂O και υπολογίζονται οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν τις σχέσεις μεταξύ της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης και της πίεσης του διαλύματος. Έπειτα συγκρίνονται οι παραπάνω εξισώσεις με τις υπάρχουσες για άλλα πεδία θερμοκρασιών και πιέσεων των ατμών του διαλύματος LiBr-H₂O.

Δεύτερο βήμα είναι η κατάστρωση εξισώσεων για τις σχέσεις που συνδέουν την θερμοκρασία, την συγκέντρωση και την ενθαλπία του διαλύματος LiBr-H₂O από δεδομένα που αφορούν την θερμοχωρητικότητα και την θερμότητα εξάτμισης και η σύγκριση αυτών με τις υπάρχουσες εξισώσεις.

Τέλος, η εντροπία του διαλύματος LiBr-H₂O προκύπτει από τη σύγκριση των παραπάνω δεδομένων με το παρακάτω υπολογιστικό μοντέλο.

Πρώτα όμως παρατίθενται οι καταστάσεις αναφοράς της ειδικής εντροπίας:

$$s=0 \text{ kJ/kg K}$$

για νερό σε υγρή κατάσταση και για διάλυμα LiBr-H₂O με κατά μάζα σύσταση $X=50\%$ σε θερμοκρασία $T=273,15\text{K}$ (0°C)

Ορίζουμε την εντροπία του διαλύματος από την συνάρτηση

$$s = s(T, X, P),$$

όπου T η θερμοκρασία, X η κατά μάζα σύσταση και P η πίεση αντίστοιχα.

Εφόσον η διαφορά πίεσης για υγρά δεν μεταβάλλει σημαντικά την εντροπία, η μεταβολή της εντροπίας δίνεται από την παρακάτω εξίσωση για συγκέντρωση διαλύματος σταθερή, $X=\text{const}$.

$$ds = \frac{\partial S}{\partial T} dT = \frac{C_p}{T} dT$$

Συνεπώς η εντροπία για X=50% διάλυμα LiBr-H₂O για οποιαδήποτε θερμοκρασία T(°C) δίνεται από τη σχέση:

$$s(T, 50) = \int_0^T \frac{C_p(T, 50)}{T + 273.15} dt$$

για 1kg ατμού

Όπου για κάθε συγκέντρωση X, η εντροπία είναι: $s_o = s(T, X_o)$

Που λαμβάνουμε από πίνακες που παρατίθενται.

Έπειτα, η υπολογιζόμενη εντροπία του διαλύματος LiBr-H₂O βρίσκεται από την εξίσωση:

$$s = \sum_{i=0}^3 \cdot \sum_{j=0}^3 B_{ij} * X^i * T^j$$

όπου:

i	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃
0	5.127558 10 ⁻¹	-1.393954 10 ⁻²	2.924145 10 ⁻⁵	9.035697 10 ⁻⁷
1	1.226780 10 ⁻²	-9.156820 10 ⁻⁵	2820453 10 ⁻⁸	-7.991806 10 ⁻¹⁰
2	-1.364895 10 ⁻⁵	1.068904 10 ⁻⁷	-1.381109 10 ⁻⁹	1.529784 10 ⁻¹¹
3	1.021501 10 ⁻⁸	0	0	0

Συνεπώς υπολογίστηκε η εντροπία s για διαλύματα LiBr-H₂O που έχουν κατά μάζα συστάσεις από 40-65% και για θερμοκρασίες από 40-210°C.

Η θερμοκρασία του διαλύματος σύμφωνα με τον Patterson et al για το διάλυμα LiBr-H₂O δίνεται από τη σχέση αυτή :

$$T = \sum_{i=0}^5 \cdot \sum_{j=0}^2 B_{ij} * X^i * T^j$$

Όπου:

B ₀₀	-1,313448 10 ⁻¹	B ₁₀	1,820914 10 ⁻¹
B ₂₀	-5,177356 10 ⁻²	B ₃₀	2,827426 10 ⁻³
B ₄₀	-6,380541 10 ⁻⁵	B ₅₀	4,340498 10 ⁻⁷
B ₀₁	9,967944 10 ⁻¹	B ₁₁	1,778069 10 ⁻³
B ₂₁	-2,215597 10 ⁻⁴	B ₃₁	5,913618 10 ⁻⁶
B ₄₁	-7,308556 10 ⁻⁸	B ₅₁	2,788472 10 ⁻⁶
B ₀₂	1,978788 10 ⁻⁵	B ₁₂	-1,779481 10 ⁻⁵
B ₂₂	2,002427 10 ⁻⁶	B ₃₂	-7,668546 10 ⁻⁸
B ₄₂	1,201525 10 ⁻⁹	B ₅₂	-6,641716 10 ⁻¹²

Ενώ η ενθαλπία του διαλύματος LiBr-H₂O για θερμοκρασίες από 0-180 και για συγκεντρώσεις από 0-70% δίνεται από τις σχέσεις:

$$H = \sum_{i=0}^5 \cdot \sum_{j=0}^2 A_{ij} * X^i * T^j$$

$$C_p = \sum_{i=0}^5 \cdot (A_{i1} * X^i + 2A_{i2} * X^i * T)$$

Για θερμοκρασία: 0 < T < 180°C

Και σύσταση κατά μάζα διαλύματος LiBr-H₂O: 0 < X < 70% κ.β.

Όπου:

i	A _{i0}	A _{i1}	A _{i2}
0	1,134125 10 ⁰	4,124891 10 ⁰	5,743693 10 ⁻⁴
1	-4,8045 10 ⁻¹	-7,643903 10 ⁻²	5,870921 10 ⁻⁵
2	-2,161438 10 ⁻³	2,589577 10 ⁻³	-7,375319 10 ⁻⁶
3	2,336235 10 ⁻⁴	-9,500522 10 ⁻⁵	3,277592 10 ⁻⁷
4	-1,188679 10 ⁻⁵	1,708026 10 ⁻⁶	6,062304 10 ⁻⁹
5	2,291532 10 ⁻⁷	-1,102363 10 ⁻⁸	3,901897 10 ⁻¹¹

Έτσι, η εντροπία s:

$$s = A_1 + A_2 + A_3 * T^2 + A_4 * X + A_5 * X * T + A_6 * X * T^2 * + A_7 * X^2 + A_8 * X^2 * T + A_9 * X^3 + A_{10} * X^4$$

Όπου η ειδική εντροπία s του διαλύματος LiBr-H₂O (kJ * kg⁻¹ * K⁻¹)

Συνεπώς, αναπτύχθηκαν οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της ενθαλπίας h χρησιμοποιώντας δεδομένα για την θερμοχωρητικότητα διαλυμάτων LiBr-H₂O για ένα μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων και θερμοκρασιών. Ενώ η εντροπία S προέκυψε από τις παραπάνω συναρτήσεις για: συγκεντρώσεις από 40-65% κατά μάζα σύσταση και για θερμοκρασίες από 40- 210.

Δ.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΚΛΟΥ ΣΕ MathCAD

Χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις:

$P_s(T)$	$T_s(P)$	$r(T)$		
$v'(T)$		$v_{fg}(T, x)$	$v(t, p)$	
$h''(T)$	$h'(T)$	$h_{fg}(T, x)$	$s(t, p)$	$h_{sh}(t, p) := h(t, p)$
$s''(T)$	$s'(T)$	$s_{fg}(T, x)$	$h(t, p)$	$s_{sh}(t, p) := s(t, p)$

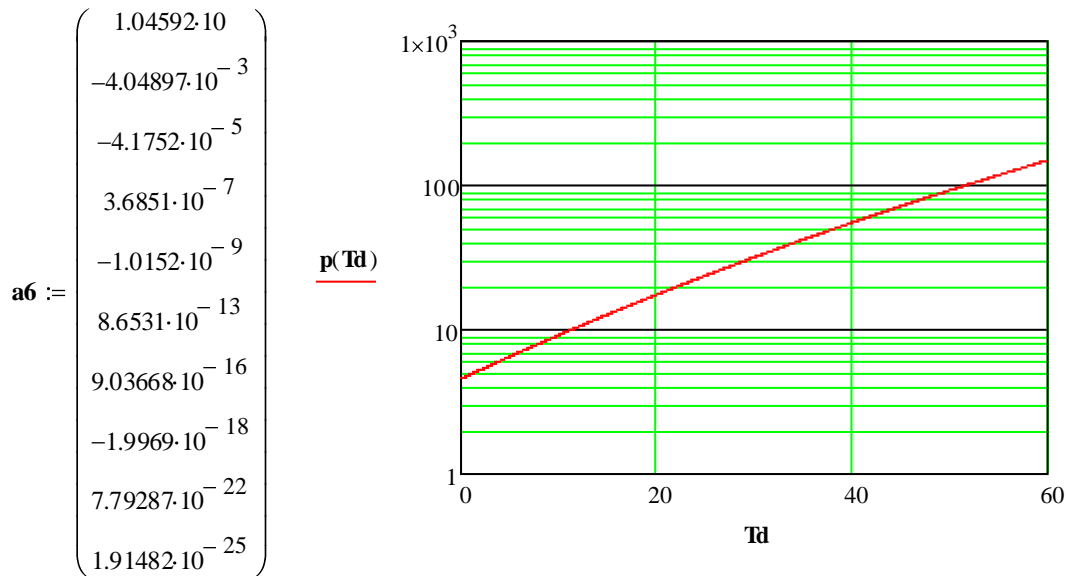
Δ.2.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ LiBr-H₂O

Συγκέντρωση διαλύματος LiBr-H₂O συναρτήσει πίεσης & εντροπίας

$$xi(s, p) := \frac{s - s'(T_s(p))}{s''(T_s(p)) - s'(T_s(p))}$$

Πίεση κορεσμένου νερού P (mm Hg) συναρτήσει της θερμοκρασίας Td (°C):

$$p(Td) := \frac{10}{1.013} \cdot 760 \cdot \exp \left[\frac{-3968.06}{Td - 39.5735 + 273.15} + \sum_{i=0}^9 \left[a6_i \cdot (Td + 273.15)^i \right] \right]$$



Διάγραμμα πίεσης – θερμοκρασίας του διαλύματος
LiBr-H₂O

Θερμοκρασία του κορεσμένου νερού Td (°C) συναρτήσει της πίεσης P (mm Hg):

$$Td(p) := \text{if} \left(p < 123.3 \frac{760}{1.013}, 42.6776 - \frac{3892.7}{\ln\left(\frac{p}{10} \cdot \frac{1.013}{760}\right) - 9.48654}, -387.592 - \frac{12587.5}{\ln\left(\frac{p}{10} \cdot \frac{1.013}{760}\right) - 15.2578} \right) - 273.15$$

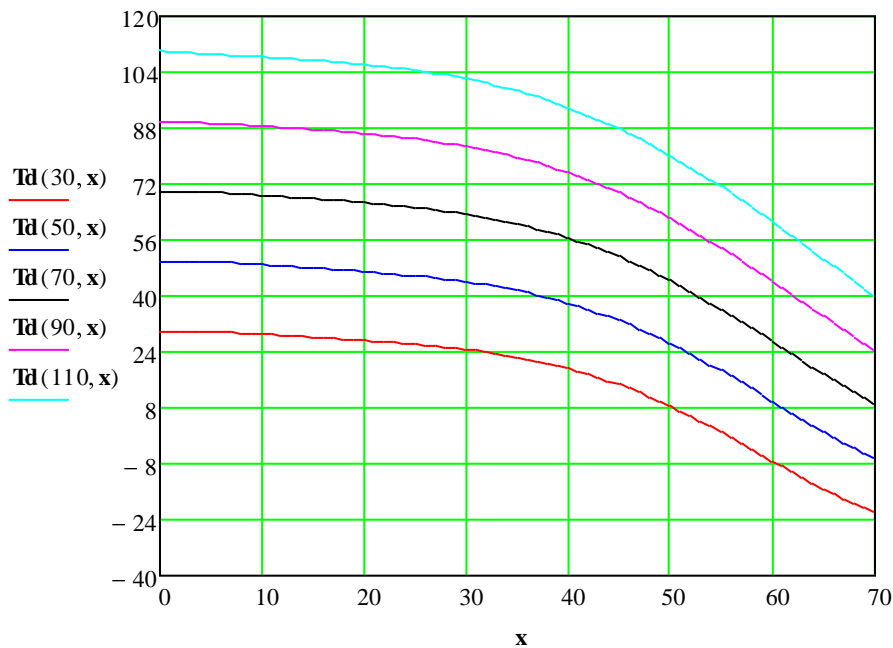
Θερμοκρασία του κορεσμένου νερού Td (°C) συναρτήσει της:

θερμοκρασίας του διαλύματος LiBr-H₂O, T (°C) και την

περιεκτικότητα του διαλύματος σε LiBr C(%):

$$Td(T, x) := \frac{\sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^2 \left[a_{3,i,j} \cdot x^i \cdot (1.8 \cdot T + 32)^j \right] - 32}{1.8}$$

$$a3 := \begin{pmatrix} -1.313448 \cdot 10^{-1} & 9.967944 \cdot 10^{-1} & 1.978788 \cdot 10^{-5} \\ 1.820914 \cdot 10^{-1} & 1.778069 \cdot 10^{-3} & -1.779484 \cdot 10^{-5} \\ -5.177356 \cdot 10^{-2} & -2.215597 \cdot 10^{-4} & 2.002427 \cdot 10^{-6} \\ 2.827426 \cdot 10^{-3} & 5.913618 \cdot 10^{-6} & -7.667546 \cdot 10^{-8} \\ -6.380541 \cdot 10^{-5} & -7.308556 \cdot 10^{-8} & 1.201525 \cdot 10^{-9} \\ 4.340498 \cdot 10^{-7} & 2.788472 \cdot 10^{-10} & -6.64171 \cdot 10^{-12} \end{pmatrix}$$



Διάγραμμα θερμοκρασίας – συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του διαλύματος T (°C), όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία του κορεσμένου νερού T_d (°C) και η περιεκτικότητα του διαλύματος σε LiBr C (%), γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$F(T, Tdp, x) := Td(T, x) - Td_i$$

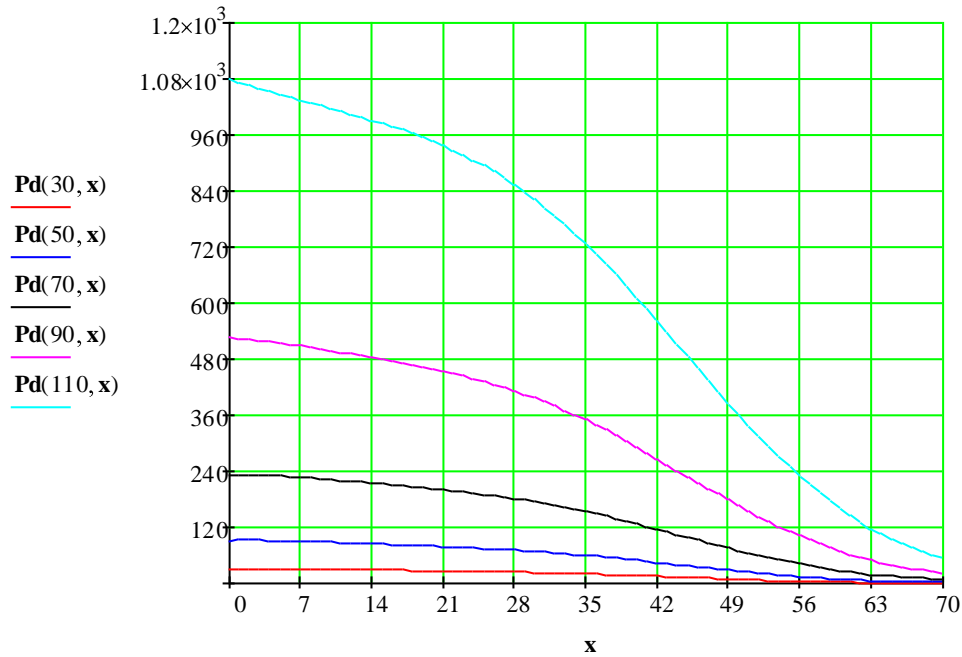
$$Tslo(T, Tdp, x) := \text{root}(F(T, Tdp, x), T)$$

$$Tsl(Tdp, x) := Tslo(Tdp, Tdp, x)$$

$$Tsl_{px}(p, x) := Tsl(Tdp(p), x)$$

Η πίεση κορεσμένου νερού P (mm Hg) που απαιτείται για την ατμοποίηση του διαλύματος LiBr-H₂O, θερμοκρασίας T (°C) και περιεκτικότητας του διαλύματος σε LiBr C (%):

$$Pd(T, x) := p(Td(T, x))$$

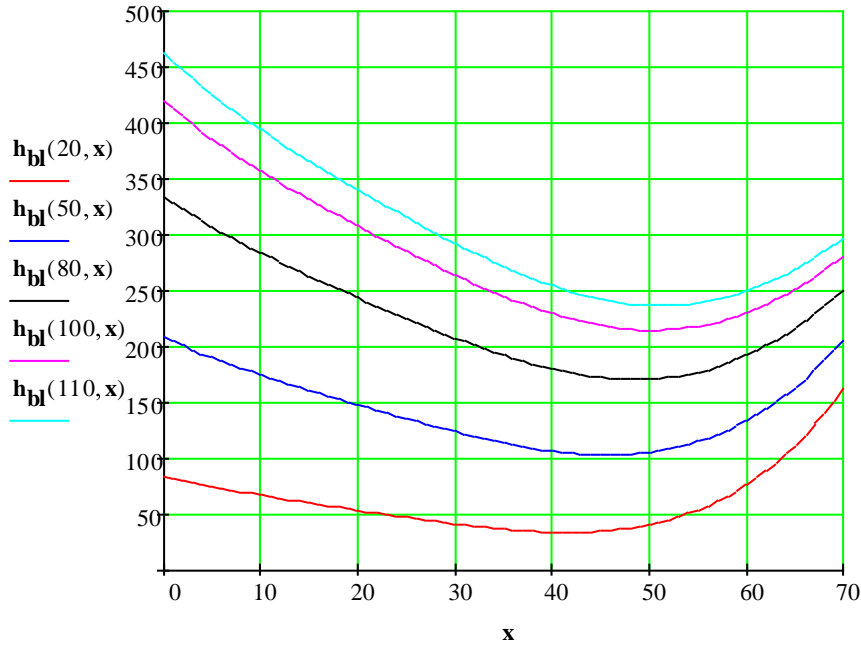


Διάγραμμα πίεσης ατμοποίησης- συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O

Ενθαλπία του διαλύματος LiBr-H₂O: H (KJ/Kg) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του, T (°C) και της περιεκτικότητας του διαλύματος σε LiBr C (%):

$$a4 := \begin{pmatrix} 1.134125 & 4.124891 & 5.743693 \cdot 10^{-4} \\ -4.80045 \cdot 10^{-1} & -7.643903 \cdot 10^{-2} & 5.870921 \cdot 10^{-5} \\ -2.161438 \cdot 10^{-3} & 2.589577 \cdot 10^{-3} & -7.375319 \cdot 10^{-6} \\ 2.336235 \cdot 10^{-4} & -9.500522 \cdot 10^{-5} & 3.277592 \cdot 10^{-7} \\ -1.188679 \cdot 10^{-5} & 1.708026 \cdot 10^{-6} & -6.062304 \cdot 10^{-9} \\ 2.291532 \cdot 10^{-7} & -1.102363 \cdot 10^{-8} & 3.901897 \cdot 10^{-11} \end{pmatrix}$$

$$h_{bl}(T, X) := \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^2 (a_{i,j} \cdot X^i \cdot T^j)$$

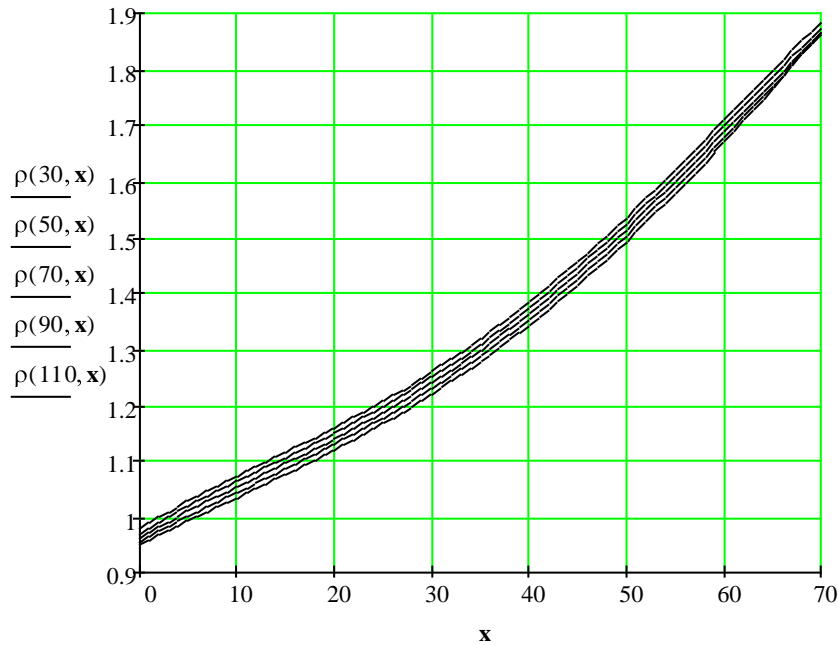


Διάγραμμα ενθαλπίας - συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O

Πυκνότητα του διαλύματος ρ , ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του διαλύματος LiBr-H₂O, T (°C) και της περιεκτικότητας του διαλύματος σε LiBr C (%):

$$a5 := \begin{pmatrix} 9.939006 \cdot 10^{-1} & -5.631094 \cdot 10^{-4} & 1.392527 \cdot 10^{-6} \\ 1.046888 \cdot 10^{-2} & 1.633541 \cdot 10^{-5} & -2.801009 \cdot 10^{-7} \\ -1.667939 \cdot 10^{-4} & -1.110273 \cdot 10^{-6} & 1.734979 \cdot 10^{-8} \\ 5.332835 \cdot 10^{-6} & 2.882292 \cdot 10^{-8} & -4.232988 \cdot 10^{-10} \\ -3.440005 \cdot 10^{-8} & -2.523579 \cdot 10^{-10} & 3.503024 \cdot 10^{-12} \end{pmatrix}$$

$$\rho(T, X) := \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^2 (a_{i,j} \cdot X^i \cdot T^j)$$

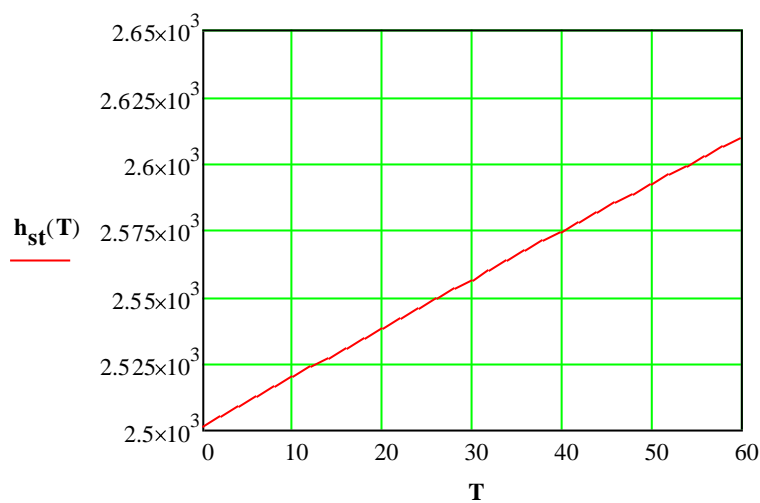


Διάγραμμα πυκνότητας – συγκέντρωσης διαλύματος LiBr-H₂O

Παρατηρούμε πως η πυκνότητα του διαλύματος ρ , για σταθερή συγκέντρωση C , δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την θερμοκρασία T .

Ενθαλπία του κορεσμένου ατμού H_{st} (KJ/Kg) που βρίσκεται σε ισορροπία κατά την υγρή φάση, με την παραδοχή ότι πρόκειται για τέλειο αέριο, συναρτήσει της θερμοκρασίας του διαλύματος LiBr-H₂O T (°C).

$$F_{st}(T) := \left[1 + b_1 \cdot \left(1 - \frac{T}{647.3}\right)^{\frac{1}{3}} + b_2 \cdot \left(1 - \frac{T}{647.3}\right)^{\frac{5}{6}} + b_3 \cdot \left(1 - \frac{T}{647.3}\right)^{\frac{7}{8}} + \sum_{i=4}^8 \left[b_i \cdot \left(1 - \frac{T}{647.3}\right)^{i-3} \right] \right]$$



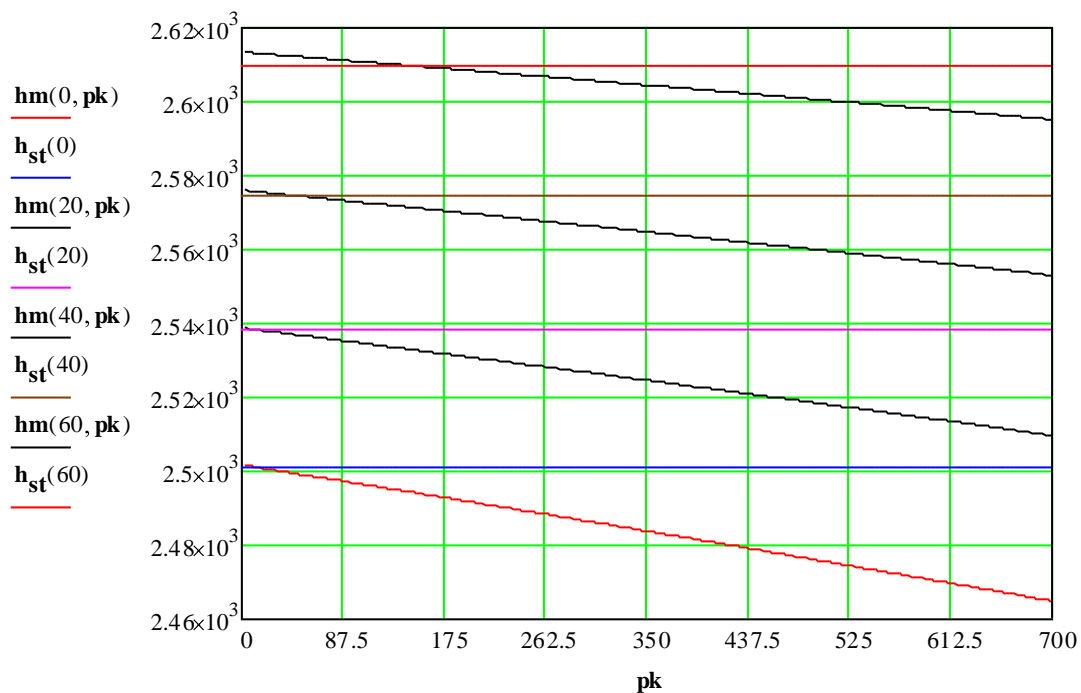
Διάγραμμα ενθαλπίας του κορεσμένου ατμού συναρτήσει της θερμοκρασίας

$$\mathbf{b} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.457874342 \\ 5.08441288 \\ -1.48513244 \\ -4.81351884 \\ 2.69411792 \\ -7.39064542 \\ 10.4961689 \\ -5.46840036 \end{pmatrix}$$

Ενθαλπία του κορεσμένου ατμού H_m (KJ/Kg) που βρίσκεται σε ισορροπία κατά την υγρή φάση με την παραδοχή ότι πρόκειται για τέλειο αέριο, συναρτήσεως της πίεσης P (mm Hg) του διαλύματος LiBr-H₂O.

$$hm(\mathbf{T}, \mathbf{p}) := h\left(\mathbf{T}, \frac{\mathbf{p}}{760} \cdot 1.01315\right)$$

Σύγκριση των ενθαλιπών H_{st} και H_m με τη βοήθεια του παρακάτω διαγράμματος:



Διάγραμμα ενθαλπίας - πίεσης του διαλύματος LiBr-H₂O

Από τις παραπάνω σχέσεις και με την εισαγωγή της θερμοκρασίας του κορεσμένου νερού T_{dp} (°C) , την πίεση P (mm Hg) και την περιεκτικότητα του διαλύματος σε LiBr C(%) προκύπτουν οι συναρτήσεις:

$$hst_{tx}(T_{dp}, x) := h_{st}(Tsl(T_{dp}, x))$$

$$hst_{px}(p, x) := h_{st}(Tsl(Tdp(p), x))$$

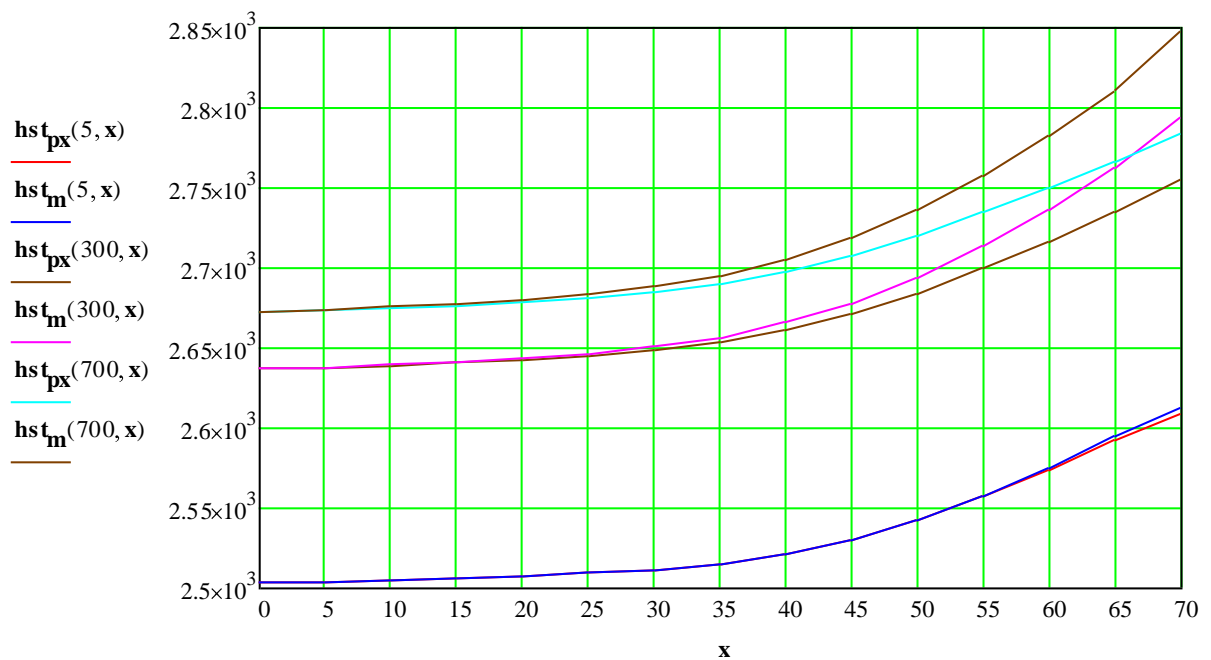
$$hst_m(p, x) := hm(Tsl(Tdp(p), x), p)$$

Αριθμητική εφαρμογή, όπου για:

$$hst_{px}(576.874, 30) = 2.676 \times 10^3$$

$$hst_m(576.874, 30) = 2.679 \times 10^3$$

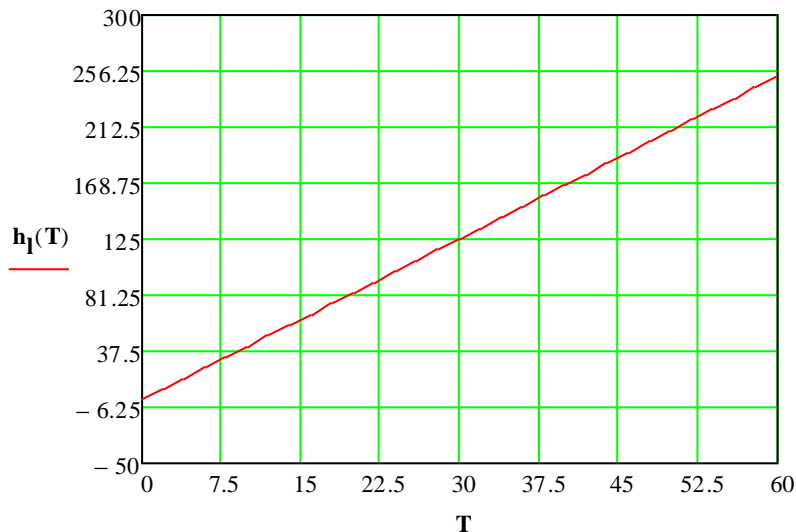
Οι ισόθλιπτες του διαγράμματος H-C που αναφέρονται στον κορεσμένο ατμό φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί



Διάγραμμα ενθαλπίας - συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O

Ενθαλπία του καθαρού κορεσμένου νερού h_1 (KJ/Kg) συναρτήσει της θερμοκρασίας του διαλύματος LiBr-H₂O, T (°C) :

$$\mathbf{a} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.8839230108 \\ -2.67172935 \\ 6.22640035 \\ -13.1789573 \\ -1.91322436 \\ 68.7937653 \\ -124.819906 \\ 72.1435404 \end{pmatrix} \quad h_1(T) := 2099.3 \cdot \left[\mathbf{a}_1 + \sum_{i=2}^8 \left[\mathbf{a}_i \cdot \left(1 - \frac{T + 273.15}{647.3} \right)^{i-1} \right] \right]$$



Διάγραμμα ενθαλπίας του καθαρού κορεσμένου νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Για την επαλήθευση των τύπων που δίνουν την ενθαλπία του διαλύματος γίνεται χρήση των αποτελεσμάτων του Grossman από την δημοσίευση: Improved property Data correlations of Absorption Fluids for computer Simulation of Heat Pump Cycles.

(PP 980..997) ASHRAE TRANSACTIONS: SYMPOSIA pp988

Η ενθαλπία ανάμιξης λόγω μη ιδανικού μίγματος δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{b} := \begin{pmatrix} -1.02161 \times 10^3 & 36.8773 & -0.186051 & -7.51277 \times \\ -533.308 & 40.2847 & -0.191198 & 0 \\ 483.628 & 39.9142 & -0.199213 & 0 \\ 1.15513 \times 10^3 & 33.3572 & -0.178258 & 0 \\ 640.622 & 13.1032 & -0.07751 & 0 \end{pmatrix}$$

Όπου:

$$\Delta h(\mathbf{T}, \mathbf{X}) := \frac{\mathbf{X}}{100} \cdot \left(1 - \frac{\mathbf{X}}{100}\right) \cdot \sum_{\mathbf{i}=0}^4 \sum_{\mathbf{j}=0}^3 \left[\mathbf{b}_{\mathbf{i},\mathbf{j}} \cdot \left(2 \cdot \frac{\mathbf{X}}{100} - 1\right)^{\mathbf{i}} \cdot \mathbf{T}^{\mathbf{j}} \right]$$

Η ενθαλπία του άλατος LiBr δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{a} := \begin{pmatrix} 5.08668 \cdot 10^2 \\ -1.86241 \cdot 10 \\ 9.85946 \cdot 10^{-2} \\ -2.50979 \cdot 10^{-5} \\ 4.15801 \cdot 10^{-8} \end{pmatrix}$$

Με σημείο αναφοράς: $q_{\text{ref}} = -450$

$$h_{\text{salt}}(\mathbf{T}) := q_{\text{ref}} + \sum_{\mathbf{i}=0}^4 \left(\mathbf{a}_{\mathbf{i}} \cdot \mathbf{T}^{\mathbf{i}} \right)$$

Έχουμε για $T = 0^\circ\text{C}$:

$$h_{\text{salt}}(0) = 58.668$$

Δηλαδή η ενθαλπία του αλατιού στους 0°C είναι διάφορη του μηδενός.

Η ενθαλπία του καθαρού νερού είναι:

$$h_{\text{wat}}(\mathbf{T}) := h_{\mathbf{l}}(\mathbf{T})$$

Έχουμε για $T = 0^\circ\text{C}$:

$$h_{\text{wat}}(0) = -0.017$$

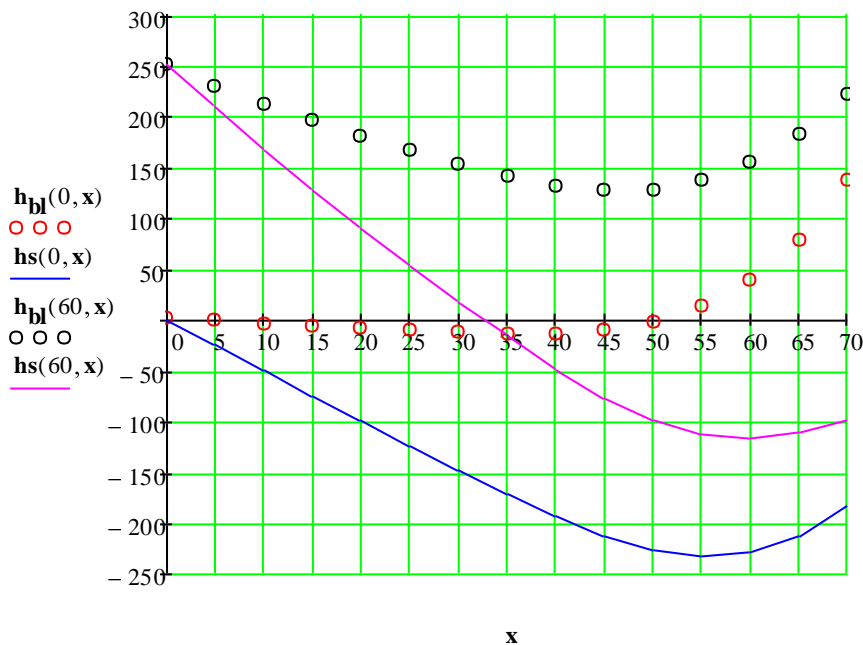
Δηλαδή η ενθαλπία αναγωγής του καθαρού νερού στους 0°C είναι:

0 KJ/Kg.

Η ενθαλπία του διαλύματος LiBr-H₂O, θερμοκρασίας T (°C) και περιεκτικότητας του διαλύματος σε LiBr C(%) είναι:

$$h_s(T, X) := \frac{X}{100} \cdot h_{\text{salt}}(T) + \left(1 - \frac{X}{100}\right) \cdot h_{\text{wat}}(T) + \Delta h(T, X)$$

Η σύγκριση των παραπάνω σχέσεων με αυτές που υπολογίστηκαν παραπάνω και ανήκουν σε άλλον ερευνητή, μας δίνουν το ακόλουθο αποτέλεσμα:



Συγκριτικό διάγραμμα ενθαλιών του διαλύματος LiBr-H₂O και του ατμού συναρτήσει της συγκέντρωσης

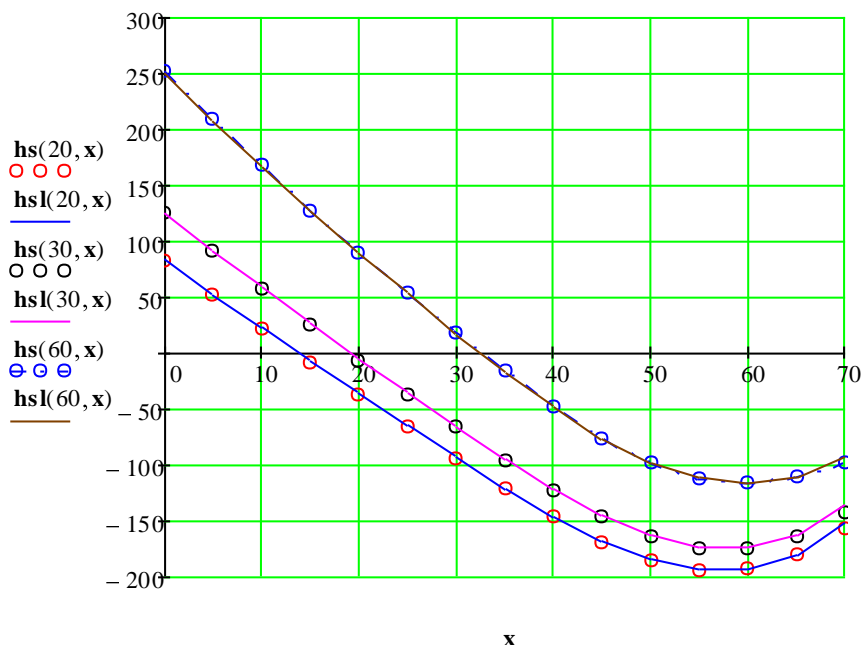
Η απόκλιση που παρατηρείται ανάμεσα στις δύο οικογένειες καμπυλών οφείλεται στη διαφορετική ενθαλπία αναγωγής του διαλύματος που χρησιμοποίησαν οι δύο ερευνητές.

Για να ταυτιστούν επομένως τα αποτελέσματά τους πρέπει να διορθώσουμε κατάλληλα τις συγκεκριμένες παραμέτρους.

Με δοκιμή βρίσκουμε πως στη σχέση του άλλου ερευνητή πρέπει να προστεθεί κατάλληλο ποσό θερμότητας: $q = -450$

Επομένως η ενθαλπία του διαλύματος συναρτήσει της θερμοκρασίας T (°C) και της περιεκτικότητας του διαλύματος σε LiBr C (%), είναι τελικώς:

$$hsl(T, X) := h_{bl}(T, X) - 450 \frac{X}{100}$$



Διάγραμμα ενθαλπίας - συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O

Αντίστοιχα η ενθαλπία του διαλύματος LiBr-H₂O, πίεσης P (mmHg) και περιεκτικότητας του διαλύματος σε LiBr C (%) είναι:

$$hsl_{px}(p, x) := hsl(Tsl(Tdp(p), x), x)$$

Σε αυτό το σημείο είμαστε πλέον έτοιμοι να κατασκευάσουμε το διάγραμμα ενθαλπίας – συγκέντρωσης H-X για το διάλυμα LiBr-H₂O. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζονται οι καμπύλες έναρξης και περάτωσης της ατμοποίησης και ισοθερμοκρασιακές καμπύλες. Επιπλέον, θα προσθέσουμε και την καμπύλη έναρξης κρυστάλλωσης του άλατος LiBr στο διάλυμα LiBr-H₂O.

Δ.2.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΑΤΟΣ LiBr ΣΤΟ ΔΙΑΛΥΜΑ LiBr-H₂O

Εξαιτίας της έλλειψης αναλυτικών σχέσεων καταφεύγουμε στην κατασκευή καμπυλών από το υπάρχον διάγραμμα με παρεμβολή ικανοποιητικών αριθμών – σημείων.

Περιοχή A

 $\mathbf{xa}_i := \mathbf{ta}_i :=$

70	100
67	80
66	60
64.6	40

Περιοχή B

 $\mathbf{xb}_i := \mathbf{tb}_i :=$

\mathbf{xa}_3	\mathbf{ta}_3
61	20
60	18
57.5	2.5

Περιοχή C

 $\mathbf{xc}_i := \mathbf{tc}_i :=$

\mathbf{xb}_3	\mathbf{tb}_3
56	0
52	-20
49.4	-48

Περιοχή D

 $\mathbf{xd}_i := \mathbf{td}_i :=$

\mathbf{xc}_3	\mathbf{tc}_3
44.2	-54
41.5	-60
39.5	-66

Περιοχή E

 $\mathbf{xe}_j := \mathbf{te}_j :=$

\mathbf{xd}_3	\mathbf{td}_3
32.5	-42
30	-34.8
24	-20
20	-14
10	-3.2
0	0

Τα αντίστοιχα

πολυώνυμα παρεμβολής είναι:

$$\mathbf{A} := \begin{vmatrix} -7.664 \times 10^3 & 218.799 & -1.541 \end{vmatrix}^{\mathbf{T}}$$

$$\mathbf{B} := (-441.544 \quad 9.966 \quad -0.039)^{\mathbf{T}}$$

$$\mathbf{C} := \begin{vmatrix} -2.599 \times 10^3 & 90.733 & -0.791 \end{vmatrix}^{\mathbf{T}}$$

$$\mathbf{D} := (-416.307 \quad 14.511 \quad -0.143)^{\mathbf{T}}$$

$$\mathbf{E} := \begin{vmatrix} -0.047 & -3.951 \times 10^{-3} & -0.026 & -4.214 \times 10^{-4} \end{vmatrix}^{\mathbf{T}}$$

$$\mathbf{T}_A(\mathbf{x}) := \mathbf{A}_0 + \mathbf{A}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{A}_2 \cdot \mathbf{x}^2$$

$$\mathbf{T}_B(\mathbf{x}) := \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B}_2 \cdot \mathbf{x}^2$$

$$\mathbf{T}_C(\mathbf{x}) := \mathbf{C}_0 + \mathbf{C}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{C}_2 \cdot \mathbf{x}^2$$

$$\mathbf{T}_D(\mathbf{x}) := \mathbf{D}_0 + \mathbf{D}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{D}_2 \cdot \mathbf{x}^2$$

$$\mathbf{T}_E(\mathbf{x}) := \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{x} + \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{x}^2 + \mathbf{E}_3 \cdot \mathbf{x}^3$$

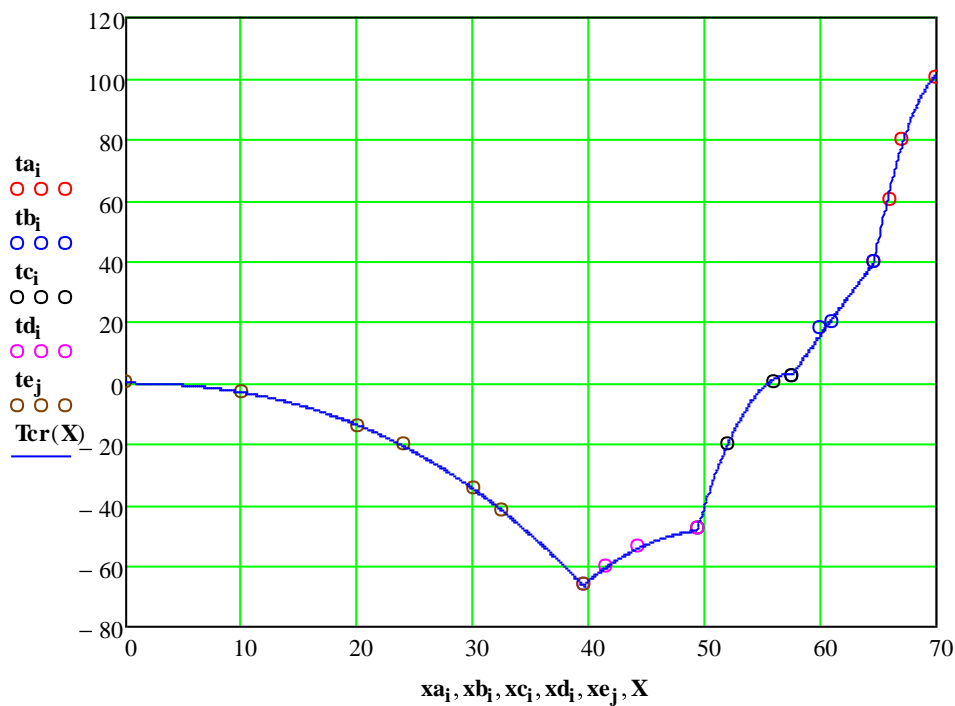
Άρα η ζητούμενη καμπύλη στο διάγραμμα θερμοκρασίας – συγκέντρωσης T – C , προκύπτει από τις σχέσεις:

$$DE(x) := \text{if } x \leq 39.5, T_E(x), T_D(x)$$

$$CDE(x) := \text{if } x \leq 49.4, DE(x), T_C(x)$$

$$BCDE(x) := \text{if } x \leq 57.5, CDE(x), T_B(x)$$

$$Tcr(x) := \text{if } x \leq 64.6, BCDE(x), T_A(x)$$

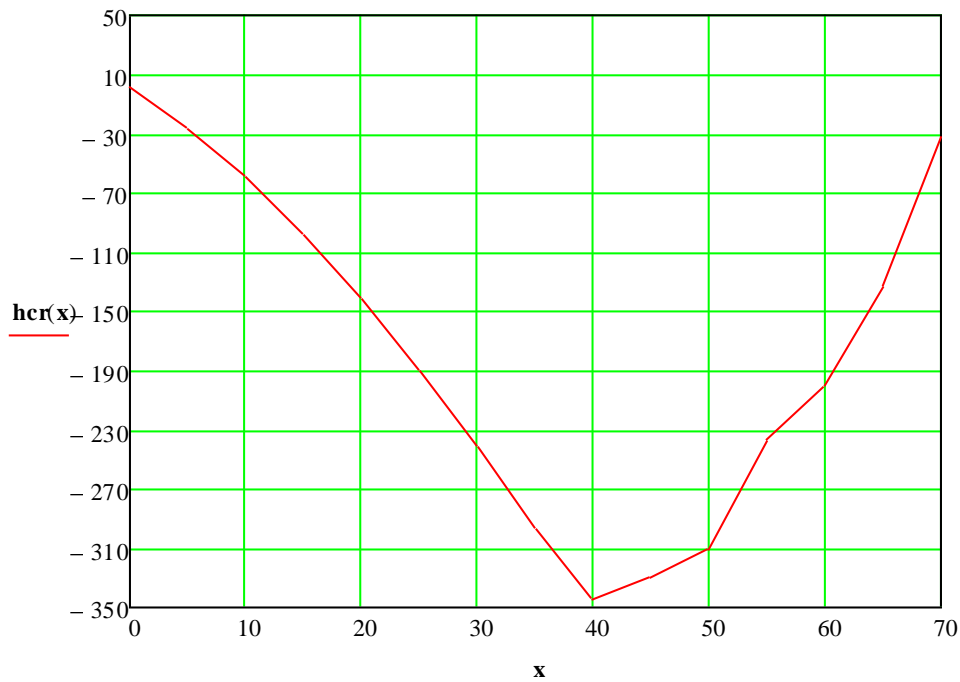


Διάγραμμα θερμοκρασίας - συγκέντρωσης του διαλύματος LiBr-H₂O

Παρατηρούμε ότι η καμπύλη παρουσιάζει 4 σημεία που αλλάζουν τα κυρτά στην περιοχή συγκεντρώσεων από 0 έως 70%.

Για να προκύψει η καμπύλη κρυστάλλωσης στο ζητούμενο διάγραμμα ενθαλπίας - συγκέντρωσης H-X , πρέπει:

$$hcr(x) := hsl(Tcr(x), x)$$



Καμπύλη κρυστάλλωσης σε διάγραμμα ενθαλπίας - συγκέντρωσης H-X

Υπολογισμός της εντροπίας κατά Kaita:

$$A4 := \begin{pmatrix} 5.127558 \cdot 10^{-1} & -1.393954 \cdot 10^{-2} & 2.924145 \cdot 10^{-5} & 9.035697 \cdot 10^{-7} \\ 1.226780 \cdot 10^{-2} & -9.156820 \cdot 10^{-5} & 1.820453 \cdot 10^{-8} & -7.991806 \cdot 10^{-10} \\ -1.364895 \cdot 10^{-5} & 1.068904 \cdot 10^{-7} & -1.381109 \cdot 10^{-9} & 1.529784 \cdot 10^{-11} \\ 1.021501 \cdot 10^{-8} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Εντροπία του διαλύματος:

$$S(T, x) := \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \left(A4_{i,j} \cdot x^j \cdot T^i \right)$$

Δ.2.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΘΕΣΕΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

Χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις

Πίεση συναρτήσει της θερμοκρασίας του διαλύματος LiBr-H₂O:

P(T)

Θερμοκρασία ατμοποίησης του διαλύματος LiBr-H₂O βάσει της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης:

T_{dp}(T, X)

Θερμοκρασία του διαλύματος LiBr-H₂O βάσει της θερμοκρασίας ατμοποίησης και της συγκέντρωσης:

T_{sl}(T_{dp}, X)

Θερμοκρασία του διαλύματος LiBr-H₂O βάσει της πίεσης και της συγκέντρωσης:

T_{sl, px}(P, X)

Ειδική ενθαλπία του διαλύματος LiBr-H₂O βάσει της θερμοκρασίας ατμοποίησης και της συγκέντρωσης:

h_{sl}(T_{dp}, X)

Ειδική ενθαλπία του διαλύματος LiBr-H₂O βάσει της πίεσης και της συγκέντρωσης:

h_{sl, px}(P, X)

Ειδική ενθαλπία του διαλύματος LiBr-H₂O βάσει της θερμοκρασίας του και της συγκέντρωσης:

$$h_m(T, X)$$

Θερμοκρασία του διαλύματος LiBr-H₂O βάσει της συγκέντρωσης X στην οποία παρατηρείται κρυστάλλωση του άλατος LiBr στο διάλυμα:

$$T_{cr}(X)$$

Πίεση που απαιτείται για την ατμοποίηση του διαλύματος LiBr-H₂O βάσει της θερμοκρασίας T και της συγκέντρωσης C:

$$P_d(T, X)$$

Πραγματοποιούμε ρύθμιση της εντροπίας με βάση τις συνθήκες αναφοράς που ορίσαμε παραπάνω:

Εντροπία s (T,0) :

$$T_1=0^\circ\text{C} \quad T_2=50^\circ\text{C} \quad T_3=100^\circ\text{C} \quad T_4=150^\circ\text{C} \quad T_5=200^\circ\text{C}$$

Ορίζουμε: $a, b, c, d, e = 1$

$$s'(T_1) = S(T_1, 0) + a \cdot T_1^4 + b \cdot T_1^3 + c \cdot T_1^2 + d \cdot T_1 + e$$

$$s'(T_2) = S(T_2, 0) + a \cdot T_2^4 + b \cdot T_2^3 + c \cdot T_2^2 + d \cdot T_2 + e$$

$$s'(T_3) = S(T_3, 0) + a \cdot T_3^4 + b \cdot T_3^3 + c \cdot T_3^2 + d \cdot T_3 + e$$

$$s'(T_4) = S(T_4, 0) + a \cdot T_4^4 + b \cdot T_4^3 + c \cdot T_4^2 + d \cdot T_4 + e$$

$$s'(T_5) = S(T_5, 0) + a \cdot T_5^4 + b \cdot T_5^3 + c \cdot T_5^2 + d \cdot T_5 + e$$

$$\text{scorr} := \text{Find}(a, b, c, d, e)$$

$$S'(T, x) := S(T, x) + \text{scorr}_0 \cdot T^4 + \text{scorr}_1 \cdot T^3 + \text{scorr}_2 \cdot T^2 + \text{scorr}_3 \cdot T + \text{scorr}_4$$

$$Sp(p, x) := S' \left(\text{Tsl}_{px}(p, x), x \right)$$

Όπου η εντροπία υπολογίζεται:

$$\mathbf{scorr} = \begin{pmatrix} -1.304 \times 10^{-11} \\ 1.445 \times 10^{-8} \\ -9.146 \times 10^{-6} \\ 3.834 \times 10^{-3} \\ -0.611 \end{pmatrix}$$

Παραμετρικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του κύκλου:

$$X_r = 60$$

$$X_w = X_r - 5$$

$$T_{\min} = T_{\text{amb}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Θερμοκρασία διαλύματος θερμαινόμενο από ηλιακή ενέργεια:

$$T_g = 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\max} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

Αρχή διατήρησης μάζας στον απορροφητή:

$$g := \frac{X_w}{X_r - X_w} \quad g = 11$$

Υπολογισμός πιέσεων του διαλύματος LiBr-H₂O:

Χαμηλή πίεση (απορροφητή και εκτόνωσης στο στρόβιλο):

Η θερμοκρασία που επικρατεί στην έξοδο από τον στρόβιλο T_{\min} είναι ίδια με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος: T_{amb}

Οπότε η πίεση εκτόνωσης του στρόβιλου είναι:

$$p_l := \text{Pd}(T_{\min}, X_w) \cdot \frac{1.013}{760} \quad p_l = 0.012$$

Υψηλή πίεση (ατμογεννήτριας)

Η πίεση που επικρατεί στην ατμογεννήτρια υπολογίζεται από την θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του πλούσιου διαλύματος LiBr-H₂O:

$$p_h := \text{Pd}(T_g, X_r) \cdot \frac{1.013}{760} \quad p_h = 0.0358$$

Η εύρεση του κατάλληλου αριθμού αναθερμάνσεων που πρέπει να πραγματοποιήσουμε, για να ολοκληρωθεί ο κύκλος, χωρίς ωστόσο να ξεπεραστούν τα όρια ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας που έχουμε ορίσει.

Εν προκειμένω ο αριθμός υπερθερμάνσεων **SH: 2**

Εφαρμόζουμε επαναληπτική μέθοδο με τυχαία τιμή $P_i = 0,01\text{bar}$, για τη διαφορά μεταξύ της εντροπίας του διαλύματος LiBr-H₂O για υψηλή πίεση και της εντροπίας για ελάχιστη πίεση και θερμοκρασία.

Αφού γνωρίζουμε πως οι εκτονώσεις γίνονται ισεντροπικά έχουμε:

$$p_m := \text{root}(s_{\text{sh}}(T_h, p_i) - s_{\text{sh}}(T_{\min}, p_l), p_i) \\ p_m = 0.025$$

Όπου p_m : πίεση αναθέρμανσης.

Σημείωση:

Ανάλογα με τα παραμετρικά δεδομένα, προκειμένου να υπολογίσουμε τον αριθμό των αναγκαίων αναθερμάνσεων καταφεύγουμε σε επαναληπτική διαδικασία και με τη χρήση της ιδιότητας ότι οι θερμάνσεις γίνονται ισοβαρώς.

Υπολογισμός θερμοκρασιών, ενθαλπιών και συγκεντρώσεων σε κάθε σημείο του κύκλου:

ΘΕΣΗ 2:

Η θέση 2 αντιστοιχεί στον ατμό που παράγεται στην ατμογεννήτρια

$$P_2 := p_h$$

$$t_2 := T_g$$

$$t_2 = 70$$

$$h_2 := h_{sh}(t_2, P_2)$$

$$h_2 = 2.632 \times 10^3$$

$$s_2 := s_{sh}(t_2, P_2)$$

$$s_2 = 8.767$$

ΘΕΣΗ 3:

Η θέση 3 αντιστοιχεί στον υπέρθερμο ατμο που παράγεται στον υπερθερμαντή:

$$P_3 := p_h$$

$$T_e := 100$$

$$t_3 := T_h$$

$$t_3 = 100$$

$$h_3 := h_{sh}(t_3, P_3)$$

$$h_3 = 2.688 \times 10^3$$

$$s_3 := s_{sh}(t_3, P_3)$$

$$s_3 = 8.925$$

ΘΕΣΗ 4:

Η θέση 4 αντιστοιχεί στην έξοδο από τον στρόβιλο μετά την πρώτη υπερθέρμανση:

$$P_4 := p_m$$

$$s_4 := s_3$$

$$t_4 := \text{root}(s_{sh}(T_e, p_m) - s_4, T_e)$$

$$t_4 = 67.991$$

$$h_4 := h_{sh}(t_4, P_4)$$

$$h_4 = 2.628 \times 10^3$$

$$s_4 := s_{sh}(t_4, p_m)$$

$$s_4 = 8.925$$

ΘΕΣΗ 5:

Η θέση 5 αντιστοιχεί στην έξοδο από την ενδιάμεση , πρώτη στην περίπτωση μας, υπερθέρμανση ή αναθέρμανση:

$$P_5 := p_m$$

$$t_5 := \text{root} \left(s_{\text{sh}}(T_e, p_m) - s_{\text{sh}}(T_{\text{min}}, p_l), T_e \right) \quad t_5 = 100$$

$$h_5 := h_{\text{sh}}(t_5, P_5) \quad h_5 = 2.688 \times 10^3$$

$$s_5 := s_{\text{sh}}(t_5, P_5) \quad s_5 = 9.094$$

ΘΕΣΗ 6:

Η θέση 6 αντιστοιχεί στην έξοδο από τον στρόβιλο μετά την δεύτερη υπερθέρμανση:

Ο εναλλάκτης αντιρροής επιτρέπει στον ατμό να εκτονωθεί μέχρι την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου , που είναι και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$$P_6 := p_l$$

$$t_6 := T_{\text{min}}$$

$$s_6 := s_{\text{sh}}(t_6, P_6) \quad t_6 = 40$$

$$s_6 = \blacksquare$$

$$h_6 := h_m(t_6, P_6) \quad h_6 = 2.576 \times 10^3$$

ΘΕΣΗ 10:

Το σημείο 10 αντιστοιχεί στο φτωχό διάλυμα που εξέρχεται από τον απορροφητή:

$$P_{10} := p_l$$

$$X_{10} := X_w$$

$$t_{10} := \text{Tsl}_{\text{px}} \left(P_{10} \cdot \frac{760}{1.013}, X_{10} \right)$$

$$h_{10} := h_{\text{sl}}(t_{10}, X_{10}) \quad t_{10} = 39.991$$

$$s_{10} := S'(t_{10}, X_{10}) \quad h_{10} = -152.43$$

$$s_{10} = -0.215$$

ΘΕΣΗ 11:

Η θέση 11 αντιστοιχεί στην είσοδο του φτωχού διαλύματος στον εναλλάκτη μετά την κατάθλιψη σε πίεση P_h :

$$P_{11} := p_h$$

$$X_{11} := X_w$$

$$h_{11} := h_{10}$$

$$t_{11} := t_{10}$$

$$s_{11} := s_{10}$$

$$t_{11} = 39.991$$

$$h_{11} = -152.43$$

$$s_{11} = -0.215$$

ΘΕΣΗ 7:

Η θέση 7 αντιστοιχεί στην έξοδο του πλούσιου διαλύματος από την ατμογεννήτρια:

$$P_7 := P_2$$

$$t_7 := T_g$$

$$X_7 := X_r$$

$$h_7 := hsl(t_7, X_7)$$

$$s_7 := S'(t_7, X_7)$$

$$t_7 = 70$$

$$h_7 = -97.009$$

$$s_7 = 0.021$$

ΘΕΣΗ 8:

Η θέση 8 αντιστοιχεί στην έξοδο του πλούσιου διαλύματος από τον ιδανικό εναλλάκτη.

Θεωρώντας ότι η συναλλαγή θερμότητας στον εναλλάκτη γίνεται με βαθμό απόδοσης η (%), υπολογίζουμε το πραγματικό ποσό θερμότητας που συναλλάσσεται μεταξύ των δυο ρευμάτων:

Στην περίπτωση που ο εναλλάκτης είναι ιδανικός το πλούσιο διάλυμα στη θέση 8 αποκτά την θερμοκρασία του φτωχού διαλύματος στη θέση 11.

$$\text{Συνεπώς } T_8 = T_{11}$$

$$X_8 := X_r$$

$$t_8 := t_{11}$$

$$t_8 = 39.991$$

$$H_i \ 8 \ i$$

$$h_8 := \text{hsl}(t_8, X_8)$$

$$h_8 = -154.526$$

$$Q_{\text{max_he1}} := g \cdot (h_7 - h_8)$$

$$Q_{\text{max_he1}} = 632.688$$

$$n1=1$$

$$Q_{\text{act_he1}} := n1 \cdot Q_{\text{max_he1}}$$

$$s_8 := S'(t_8, X_8)$$

$$s_8 = -0.241$$

ΘΕΣΗ 9:

Η θέση 9 αντιστοιχεί στην είσοδο του πλούσιου διαλύματος στον απορροφητή μετά τον στραγγαλισμό (ισενθαλπικός):

$$P_9 := p_l$$

$$t_9 := t_8$$

$$t_9 = 39.991$$

$$X_9 := X_r$$

$$h_9 := h_8$$

$$h_9 = -154.526$$

$$s_9 := s_8$$

$$s_9 = -0.241$$

ΘΕΣΗ 1:

Η θέση 1 αντιστοιχεί στην είσοδο του φτωχού διαλύματος στην ατμογεννήτρια:

$$X_1 := X_w$$

$$P_1 := p_h$$

$$h_1 := h_{11} + \frac{Q_{act_he1}}{1 + g} \quad h_1 = -99.706$$

$$t_1 := 10C \quad \text{Guess value}$$

$$t_1 := \text{root} \left(\text{hsl} \left(t_1, X_1 \right) - h_1, t_1 \right)$$

$$s_1 := S' \left(t_1, X_1 \right)$$

$$t_1 = 65.722$$

$$s_1 = 0.023$$

ΘΕΣΗ 12:

Η θέση 12 αντιστοιχεί στην είσοδο του ψυκτικού υγρού στον απορροφητή

ΘΕΣΗ 13:

Η θέση 13 αντιστοιχεί στην έξοδο του ψυκτικού υγρού στον απορροφητή

Δ.2.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Ενεργειακό ισοζύγιο στον απορροφητή:

$$Q_{\text{abs}} := g \cdot h_9 + h_6 - (1 + g) \cdot h_{10} \quad Q_{\text{abs}} = 2.705 \times 10^3$$

Ενεργειακό ισοζύγιο στην ατμογεννήτρια:

$$Q_{\text{gen}} := h_2 + g \cdot h_7 - (1 + g) \cdot h_1 \quad Q_{\text{gen}} = 2.761 \times 10^3$$

Ενεργειακό ισοζύγιο στην υπερθέρμανση:

$$Q_{\text{sh}} := |h_3 - h_2| + |h_5 - h_4| \quad Q_{\text{sh}} = 117.065$$

Παραγόμενο έργο στον στρόβιλο:

$$W_t := |h_3 - h_4| + |h_5 - h_6| \quad W_t = 172.596$$

Συντελεστής απόδοσης της εγκατάστασης:

$$\eta := \frac{W_t}{Q_{\text{sh}}} \quad \eta = 1.4744$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης:

$$\eta_{\text{ολ}} := \frac{W_t}{Q_{\text{gen}} + Q_{\text{sh}}} \quad \eta_{\text{ολ}} = 0.06$$

Δ.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ακολουθώντας τη διαδικασία της παραμετροποίησης των συνθηκών λειτουργίας του κύκλου στο κεφάλαιο 2 εκτελούμε το υπολογιστικό μοντέλο που διαμορφώθηκε σε περιβάλλον MathCAD για κάθε μια από τις περιπτώσεις συνθηκών λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία κατά τη παραμετροποίηση και έχουμε τα εξής αποτελέσματα:

Όλα τα παρακάτω αποτελέσματα αφορούν στην λειτουργία του κύκλου με μεταβολή του φτωχού διαλύματος LiBr-H₂O κατά ΔX = 5%.

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 0°C < T < 90°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,012	0,288	4				
0,05								
0,10								
0,15	2	0,005779	0,2834					
0,20	3	0,005465	0,2699					
0,25	4	0,005183	0,2537					
0,30	5	0,004895	0,2326					
0,35	6	0,004506	0,2046					
0,40	7	0,003930	0,1700					
0,45	8	0,003148	0,1312	4	554,745	1,3007	0,1791	
0,50	9	0,002252	0,0930	4	552,247	1,3045	0,176	0,076
0,55	10	0,001411	0,0601	4	553,927	1,305	0,1725	0,01
0,60	11	0,007732	0,0358	4	560,845	1,3013	0,1685	-0,074
0,65						1,2983		-0,06

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: $10^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,012	0,288	4	489,364	1,27	0,171	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,012000	0,2834	5				
0,20	3	0,011000	0,2699	5				
0,25	4	0,010000	0,2537	5				
0,30	5	0,009834	0,2326	5				
0,35	6	0,009039	0,2046	4	470,770	1,2993	0,1591	
0,40	7	0,007895	0,1700	4	463,328	1,3078	0,1563	0,17
0,45	8	0,006369	0,1312	4	455,958	1,3169	0,1528	0,182
0,50	9	0,004622	0,0930	4	450,058	1,3249	0,1489	0,16
0,55	10	0,002963	0,0601	4	446,923	1,3301	0,1446	0,104
0,60	11	0,001672	0,0358	3	452,377	1,3264	0,1411	-0,074
0,65						1,3163		-0,202

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: $20^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,023000	0,3560	4	427,991	1,2820	0,1520	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,022000	0,2834	5				
0,20	3	0,021000	0,2699	5				
0,25	4	0,020000	0,2537	4	387,997	1,2979	0,1363	
0,30	5	0,019000	0,2326	4	384,107	1,3034	0,1349	0,11
0,35	6	0,017000	0,2046	4	377,481	1,3126	0,1326	0,184
0,40	7	0,015000	0,1700	4	368,905	1,3250	0,1293	0,248
0,45	8	0,012000	0,1312	4	359,428	1,3397	0,1252	0,294
0,50	9	0,008981	0,0930	3	354,217	1,3498	0,1216	0,202
0,55	10	0,005875	0,0601	3	351,590	1,3563	0,1179	0,13
0,60	11	0,003408	0,0358	3	353,296	1,3561	0,1143	-0,004
0,65						1,3475		-0,172

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 30°C < T < 90°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,042	0,43	4	368,438	1,293	0,133	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,040	0,283	4	298,438	1,3061	0,1091	
0,20	3	0,038	0,270	4	298,99	1,3067	0,1093	0,012
0,25	4	0,036	0,254	4	297,755	1,3099	0,1088	0,064
0,30	5	0,034	0,233	4	293,633	1,3178	0,1073	0,158
0,35	6	0,031	0,205	4	286,51	1,3312	0,1047	0,268
0,40	7	0,027	0,170	3	280,714	1,3442	0,1022	0,26
0,45	8	0,022	0,131	3	272,111	1,3635	0,0983	0,386
0,50	9	0,017	0,093	3	263,788	1,3840	0,0904	0,41
0,55	10	0,011	0,060	3	257,109	1,4022	0,0895	0,364
0,60	11	0,007	0,036	2	255,185	1,4097	0,0857	0,15
0,65						1,3991		-0,212

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 40°C < T < 90°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,074	0,509	4	310,678	1,3040	0,114	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,070	0,283	3	215,397	1,3126	0,0819	
0,20	3	0,067	0,270	3	215,76	1,3138	0,082	0,024
0,25	4	0,063	0,254	3	214,616	1,3182	0,0815	0,088
0,30	5	0,059	0,233	3	210,933	1,3287	0,0801	0,21
0,35	6	0,054	0,205	3	204,528	1,3467	0,0776	0,36
0,40	7	0,048	0,170	3	195,759	1,3736	0,0741	0,538
0,45	8	0,039	0,131	2	187,064	1,4049	0,0702	0,626
0,50	9	0,029	0,093	2	178,78	1,4392	0,066	0,686
0,55	10	0,020	0,060	2	172,086	1,4712	0,062	0,64
0,60	11	0,012	0,036	2	168,879	1,4899	0,0588	0,374
0,65						1,4822		-0,154

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 0°C < T < 100°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,012	0,288	4				
0,05								
0,10								
0,15	2	0,005779	0,2834					
0,20	3	0,005465	0,2699					
0,25	4	0,005183	0,2537	5				
0,30	5	0,004895	0,2326	5				
0,35	6	0,004506	0,2046	4	579,736	1,2805	0,1878	
0,40	7	0,003930	0,1700	4	572,16	1,287	0,1851	0,13
0,45	8	0,003148	0,1312	4	565,353	1,2934	0,1819	0,128
0,50	9	0,002252	0,0930	3	561,048	1,2983	0,1783	0,098
0,55	10	0,001411	0,0601	3	560,796	1,3001	0,1743	0,036
0,60	11	0,007732	0,0358	3	565,816	1,2979	0,1697	-0,044
0,65						1,2882		-0,194

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 10°C < T < 100°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,012	0,288	4	489,364	1,27	0,171	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,012000	0,2834	4	491,357	1,2787	0,1654	
0,20	3	0,011000	0,2699	4	492,268	1,2788	0,1656	0,002
0,25	4	0,010000	0,2537	4	491,003	1,2807	0,1652	0,038
0,30	5	0,009834	0,2326	4	486,619	1,2852	0,1639	0,09
0,35	6	0,009039	0,2046	4	479,451	1,2923	0,1615	0,142
0,40	7	0,007895	0,1700	4	470,586	1,3016	0,1583	0,186
0,45	8	0,006369	0,1312	4	461,420	1,3119	0,1544	0,206
0,50	9	0,004622	0,0930	3	456,224	1,3191	0,1507	0,144
0,55	10	0,002963	0,0601	3	456,563	1,3209	0,1473	0,036
0,60	11	0,001672	0,0358	3	462,229	1,3173	0,1438	-0,072
0,65						1,3079		-0,188

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 20°C < T < 100°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,023000	0,3560	4	427,991	1,2820	0,1520	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,022000	0,2834	4	394,650	1,2892	0,1384	
0,20	3	0,021000	0,2699	4	395,301	1,2869	0,1385	-0,046
0,25	4	0,020000	0,2537	4	393,879	1,2921	0,1380	0,104
0,30	5	0,019000	0,2326	4	389,275	1,2982	0,1365	0,122
0,35	6	0,017000	0,2046	4	381,543	1,3082	0,1338	0,2
0,40	7	0,015000	0,1700	3	373,731	1,3194	0,1308	0,224
0,45	8	0,012000	0,1312	3	367,464	1,3299	0,1276	0,21
0,50	9	0,008981	0,0930	3	360,890	1,3411	0,1236	0,224
0,55	10	0,005875	0,0601	3	357,116	1,3488	0,1195	0,154
0,60	11	0,003408	0,0358	3	357,824	1,3500	0,1156	0,024
0,65						1,3425		-0,15

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 30°C < T < 100°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,042	0,43	4	368,438	1,293	0,133	
0,05								
0,10		0,042	0,296	3	305,066	1,2963	0,1114	
0,15	2	0,040	0,283	3	304,968	1,2976	0,1113	0,026
0,20	3	0,038	0,270	3	305,579	1,2981	0,1114	0,01
0,25	4	0,036	0,254	3	304,486	1,3010	0,111	0,058
0,30	5	0,034	0,233	3	300,658	1,3081	0,1096	0,142
0,35	6	0,031	0,205	3	294,081	1,3200	0,1072	0,238
0,40	7	0,027	0,170	3	285,39	1,3367	0,1037	0,334
0,45	8	0,022	0,131	3	275,584	1,3573	0,0995	0,412
0,50	9	0,017	0,093	3	265,877	1,3799	0,0946	0,452
0,55	10	0,011	0,060	2	262,545	1,3907	0,0912	0,216
0,60	11	0,007	0,036	2	262,728	1,3933	0,088	0,052
0,65						1,3830		-0,206

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 40°C < T < 100°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,074	0,509	4	310,678	1,3040	0,114	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,070	0,283	3	218,603	1,3066	0,0830	
0,20	3	0,067	0,270	3	218,847	1,3080	0,0831	0,028
0,25	4	0,063	0,254	3	217,454	1,3128	0,0825	0,096
0,30	5	0,059	0,233	3	213,298	1,3238	0,0810	0,22
0,35	6	0,054	0,205	2	208,612	1,3376	0,0791	0,276
0,40	7	0,048	0,170	2	200,787	1,3609	0,0758	0,466
0,45	8	0,039	0,131	2	191,879	1,3907	0,0719	0,596
0,50	9	0,029	0,093	2	183,097	1,4245	0,0675	0,676
0,55	10	0,020	0,060	2	176,002	1,4560	0,0633	0,63
0,60	11	0,012	0,036	2	172,596	1,4744	0,06	0,368
0,65						1,4667		-0,172

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 0°C < T < 110°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,012	0,288	4				
0,05								
0,10								
0,15	2	0,005779	0,2834	4	603,109	1,2631	0,1943	
0,20	3	0,005465	0,2699	4	604,002	1,2632	0,1946	
0,25	4	0,005183	0,2537	4	602,415	1,2649	0,1941	
0,30	5	0,004895	0,2326	4	597,507	1,2686	0,1927	
0,35	6	0,004506	0,2046	4	589,861	1,2743	0,1904	
0,40	7	0,003930	0,1700	4	580,901	1,2814	0,1874	0,142
0,45	8	0,003148	0,1312	4	572,397	1,2887	0,1837	0,146
0,50	9	0,002252	0,0930	4	566,146	1,2948	0,1796	0,122
0,55	10	0,001411	0,0601	3	569,065	1,2945	0,1764	-0,006
0,60	11	0,007732	0,0358	3	578,846	1,2892	0,1729	-0,106
0,65						1,28		-0,184

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 10°C < T < 110°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,012	0,288	4	489,364	1,27	0,171	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,012000	0,2834	4	498,893	1,2734	0,1675	
0,20	3	0,011000	0,2699	4	499,600	1,2736	0,1677	0,004
0,25	4	0,010000	0,2537	4	497,934	1,2757	0,1672	0,042
0,30	5	0,009834	0,2326	4	492,827	1,2806	0,1656	0,098
0,35	6	0,009039	0,2046	4	484,551	1,2884	0,1630	0,156
0,40	7	0,007895	0,1700	3	476,778	1,2965	0,1601	0,162
0,45	8	0,006369	0,1312	3	470,018	1,3045	0,1568	0,16
0,50	9	0,004622	0,0930	3	465,485	1,3108	0,1532	0,126
0,55	10	0,002963	0,0601	3	464,935	1,3133	0,1496	0,05
0,60	11	0,001672	0,0358	3	469,397	1,3105	0,1458	-0,056
0,65						1,3018		-0,174

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 20°C < T < 110°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,023000	0,3560	4	427,991	1,2820	0,1520	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,022000	0,2834	3	401,421	1,2830	0,1404	
0,20	3	0,021000	0,2699	3	402,235	1,2832	0,1406	0,004
0,25	4	0,020000	0,2537	3	401,144	1,2853	0,1402	0,042
0,30	5	0,019000	0,2326	3	397,161	1,2905	0,1389	0,104
0,35	6	0,017000	0,2046	3	390,473	1,2990	0,1366	0,17
0,40	7	0,015000	0,1700	3	382,010	1,3104	0,1333	0,228
0,45	8	0,012000	0,1312	3	373,113	1,3232	0,1293	0,256
0,50	9	0,008981	0,0930	3	365,326	1,3356	0,1250	0,248
0,55	10	0,005875	0,0601	3	360,339	1,3446	0,1205	0,18
0,60	11	0,003408	0,0358	3	359,986	1,3472	0,1162	0,052
0,65						1,3407		-0,13

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 30°C < T < 110°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,042	0,43	4	368,438	1,293	0,133	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,040	0,283	3	309,897	1,2914	0,1128	
0,20	3	0,038	0,270	3	310,411	1,2921	0,113	0,014
0,25	4	0,036	0,254	3	309,085	1,2952	0,1125	0,062
0,30	5	0,034	0,233	3	304,793	1,3026	0,1110	0,148
0,35	6	0,031	0,205	3	297,479	1,3152	0,1083	0,252
0,40	7	0,027	0,170	3	287,776	1,3330	0,1045	0,356
0,45	8	0,022	0,131	2	280,33	1,3491	0,101	0,322
0,50	9	0,017	0,093	2	273,498	1,3654	0,0971	0,326
0,55	10	0,011	0,060	2	269,262	1,3772	0,0933	0,236
0,60	11	0,007	0,036	2	269,438	1,3798	0,0901	0,052
0,65						1,3696		-0,204

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 40°C < T < 110°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,074	0,509	4	310,678	1,3040	0,114	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,070	0,283	2	224,122	1,2968	0,0849	
0,20	3	0,067	0,270	2	224,448	1,2980	0,085	0,024
0,25	4	0,063	0,254	2	223,299	1,3021	0,0845	0,082
0,30	5	0,059	0,233	2	219,682	1,3115	0,0832	0,188
0,35	6	0,054	0,205	2	213,482	1,3274	0,0808	0,318
0,40	7	0,048	0,170	2	205,203	1,3504	0,0774	0,46
0,45	8	0,039	0,131	2	195,78	1,3800	0,0732	0,592
0,50	9	0,029	0,093	2	186,492	1,4136	0,0687	0,672
0,55	10	0,020	0,060	2	178,986	1,4450	0,0644	0,628
0,60	11	0,012	0,036	2	175,378	1,4633	0,0609	0,366
0,65						1,4556		-0,154

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 0°C < T < 120°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,012	0,288	4				
0,05								
0,10								
0,15	2	0,005779	0,2834	4	612,202	1,2582	0,1967	
0,20	3	0,005465	0,2699	4	612,903	1,2584	0,1969	
0,25	4	0,005183	0,2537	4	610,909	1,2602	0,1963	
0,30	5	0,004895	0,2326	4	605,268	1,2642	0,1948	
0,35	6	0,004506	0,2046	4	596,519	1,2705	0,1922	
0,40	7	0,003930	0,1700	4	586,085	1,2783	0,1887	0,156
0,45	8	0,003148	0,1312	3	579,981	1,2839	0,1857	0,112
0,50	9	0,002252	0,0930	3	577,744	1,2872	0,1826	0,066
0,55	10	0,001411	0,0601	3	580,662	1,2869	0,1794	-0,006
0,60	11	0,007732	0,0358	3	590,112	1,2822	0,1757	-0,094
0,65						1,2733		-0,178

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 10°C < T < 120°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,012	0,288	4	489,364	1,27	0,171	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,012000	0,2834	4	502,901	1,2706	0,1686	
0,20	3	0,011000	0,2699	3	506,101	1,2692	0,1695	-0,028
0,25	4	0,010000	0,2537	3	504,946	1,2708	0,1691	0,032
0,30	5	0,009834	0,2326	3	500,791	1,2749	0,1679	0,082
0,35	6	0,009039	0,2046	3	494,051	1,2813	0,1657	0,128
0,40	7	0,007895	0,1700	3	485,966	1,2893	0,1627	0,16
0,45	8	0,006369	0,1312	3	478,215	1,2977	0,1591	0,168
0,50	9	0,004622	0,0930	3	472,656	1,3046	0,1552	0,138
0,55	10	0,002963	0,0601	3	471,164	1,3079	0,1513	0,066
0,60	11	0,001672	0,0358	3	475,454	1,3058	0,1473	-0,042
0,65						1,2976		-0,164

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 20°C < T < 120°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,023000	0,6330	4	535,849	1,2810	0,1830	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,022000	0,2834	3	408,436	1,2768	0,1425	
0,20	3	0,021000	0,2699	3	409,174	1,2770	0,1427	0,004
0,25	4	0,020000	0,2537	3	407,861	1,2793	0,1422	0,046
0,30	5	0,019000	0,2326	3	403,424	1,2847	0,1408	0,108
0,35	6	0,017000	0,2046	3	396,019	1,2936	0,1382	0,178
0,40	7	0,015000	0,1700	3	386,596	1,3056	0,1347	0,24
0,45	8	0,012000	0,1312	3	376,543	1,3194	0,1304	0,276
0,50	9	0,008981	0,0930	3	367,482	1,3330	0,1256	0,272
0,55	10	0,005875	0,0601	2	366,785	1,3365	0,1224	0,07
0,60	11	0,003408	0,0358	2	370,359	1,3342	0,1192	-0,046
0,65						1,3242		-0,2

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: 30°C < T < 120°C

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,042	0,43	4	368,438	1,293	0,133	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,040	0,283	3	312,611	1,2882	0,1137	
0,20	3	0,038	0,270	3	313,024	1,2889	0,1138	0,014
0,25	4	0,036	0,254	3	311,454	1,2923	0,1132	0,068
0,30	5	0,034	0,233	3	306,677	1,3002	0,1116	0,158
0,35	6	0,031	0,205	2	302,771	1,3080	0,11	0,156
0,40	7	0,027	0,170	2	295,066	1,3221	0,1069	0,282
0,45	8	0,022	0,131	2	286,847	1,3385	0,1031	0,328
0,50	9	0,017	0,093	2	279,624	1,3546	0,0991	0,322
0,55	10	0,011	0,060	2	275,141	1,3662	0,0951	0,232
0,60	11	0,007	0,036	2	275,311	1,3687	0,0919	0,05
0,65						1,3586		-0,202

Για θερμοκρασία λειτουργίας του κύκλου: $40^{\circ}\text{C} < T < 120^{\circ}\text{C}$

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx =
0,00		0,074	0,895	4	414,637	1,3020	0,146	
0,05								
0,10								
0,15	2	0,070	0,283	2	228,712	1,2892	0,0865	
0,20	3	0,067	0,270	2	229,048	1,2903	0,0866	0,022
0,25	4	0,063	0,254	2	227,827	1,2944	0,0861	0,082
0,30	5	0,059	0,233	2	224,004	1,3037	0,0847	0,186
0,35	6	0,054	0,205	2	217,456	1,3195	0,0821	0,316
0,40	7	0,048	0,170	2	208,714	1,3425	0,0786	0,46
0,45	8	0,039	0,131	2	198,766	1,3722	0,0742	0,594
0,50	9	0,029	0,093	2	188,961	1,4060	0,0695	0,676
0,55	10	0,020	0,060	2	181,038	1,4377	0,0650	0,634
0,60	11	0,012	0,036	2	177,225	1,4563	0,0615	0,372
0,65						1,4483		-0,16

Προκειμένου να βρεθεί η τάση που παρουσιάζει ο συντελεστής συμπεριφοράς PF κατά την αυξομείωση του ποσοστού μεταβολής της συγκέντρωσης του αρχικού και του τελικού διαλύματος LiBr-H₂O, γίνεται διερεύνηση ως προς:

$\Delta X = 7\%$ και $\Delta X = 3\%$

$\Delta X = 7\%$

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx=
0,00	Rankine	0,074	0,509	4	310,678	1,3040	0,114	
0,05								
0,10								
0,15	1,143	0,071	0,283	3	215,588	1,3123	0,0820	
0,20	1,857	0,068	0,270	3	215,417	1,3145	0,0819	0,044
0,25	2,571	0,065	0,254	3	213,786	1,3199	0,0813	0,108
0,30	3,286	0,061	0,233	3	208,762	1,3332	0,0794	0,266
0,35	4	0,057	0,205	2	202,784	1,3507	0,0771	0,35
0,40	4,714	0,051	0,170	2	191,76	1,3844	0,0728	0,674
0,45	5,429	0,043	0,131	2	178,148	1,4339	0,0672	0,99
0,50	6,143	0,033	0,093	2	163,238	1,5020	0,0609	1,362
0,55	6,857	0,024	0,060	2	149,006	1,5871	0,0545	1,702
0,60	7,571	0,015	0,036	2	138,439	1,6698	0,0491	1,654
0,65						1,6800		-0,38

$\Delta X = 3\%$

Xr (%)	g	pl(bar)	ph(bar)	S.H.	Wt(KW)	PF	n(%)	dPF/dx =
0,00	Rankine	0,074	0,509	4	310,678	1,3040	0,114	
0,05								
0,10								
0,15	4	0,069	0,283	3	221,857	1,3008	0,0841	
0,20	5,667	0,065	0,270	3	222,328	1,3017	0,0843	0,018
0,25	7,333	0,062	0,254	3	221,335	1,3056	0,0839	0,078
0,30	9	0,058	0,233	3	218,449	1,3138	0,0827	0,164
0,35	10,667	0,052	0,205	3	213,893	1,3266	0,0808	0,256
0,40	12,333	0,045	0,170	2	211,267	1,3370	0,0793	0,208
0,45	14	0,035	0,131	2	207,41	1,3512	0,077	0,284
0,50	15,667	0,026	0,093	2	204,835	1,3631	0,0746	0,238
0,55	17,333	0,017	0,060	2	204,511	1,3689	0,0724	0,116
0,60	19	0,097	0,036	2	207,261	1,3660	0,0706	-0,058
0,65						1,3612		

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

η	=	θερμικός βαθμός απόδοσης (%)
h	=	ειδική ενθαλπία
P	=	πίεση
q	=	ειδική θερμότητα
s	=	ειδική εντροπία
W_t	=	έργο
X	=	κατά βάρος σύσταση LiBr
S	=	μάζα του ισχυρού διαλύματος
W	=	μάζα της αδύνατης λύσης

ΔΕΙΚΤΕΣ

h	=	υψηλή πίεση
l	=	χαμηλή πίεση
s	=	ισχυρό διάλυμα
w	=	αδύναμο διάλυμα
t	=	στρόβιλος
RH	=	αναθερμαντής
ABS	=	απορροφητής
G	=	ατμογεννήτρια
abs	=	περιβάλλοντος
max	=	μέγιστο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ε.Δ.ΡΟΓΔΑΚΗΣ, ΑΘΗΝΑ 2001, “ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ 2” , Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών , Τομέας Θερμότητας , Αθήνα 1999
- [2] Ε.Δ.ΡΟΓΔΑΚΗΣ, ΑΘΗΝΑ 2003, ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΑΘΗΜΑ “ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ”
- [3] Π. ΛΩΛΟΣ, “A high efficiency absorption power cycle with «cold turbine» ”
- [4] Patterson MR, and Perez-Branco H., 1988, “Numerical fits of the properties of lithium bromide-water solutions,” ASHRAE Transactions, 94(part2), pp. 2379-88.
- [5] Kaita Y., 2001, “Thermodynamic properties of lithium bromide-water solutions at high temperatures,” International Journal of Refrigeration, 24, pp. 374-390
- [6] D.A. Kouremenos, D.A., and Rogdakis, E.D., “The temperature-entropy (or enthalpy) diagram of the Kalina cycle,” ASME Winter Annual Meeting, AES-Vol. 19, Dallas, TX, pp. 13-19
- [7] Pongsid Srihirin , Satha Aphornratana , Supachart Chungpaibulpatana , “A review of absorption refrigeration technologies” p. 30
- [8] M.A. Korobitsyn , “NEW AND ADVANCED ENERGY CONVERSION TECHNOLOGIES. ANALYSIS OF COGENERATION, COMBINED AND INTEGRATED CYCLES” p.155
- [9] Tadiran ASD/ Dr. Yehuda Landau - Project Director, Tadiran, Israel Electronics Industries Ltd., ASD (Applied Solar Devices) Division, Yad Eliyahu, Tel Aviv, Israel. Solar Air Conditioning in Europe (SACE) NATIONAL PROJECT ESHED FOR SOLAR CLIMATE CONTROL
- [10] HENRY A. MLCAK, PE An Introduction to the Kalina Cycle, ASME International
- [11] «Πηγές ανανεώσιμης ενέργειας στην Ένωση» Ψήφισμα του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου σχετικά με το μερίδιο της ανανεώσιμης ενέργειας της ΕΕ και προτάσεις για συγκεκριμένες δράσεις (2004/2153(INI)
- [12] Z.F. Li, K. Sumathy, Technology development in the solar absorption air-conditioning systems, Department of Mechanical Engineering, University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, November 1999

[13] Ε.Καστανάκης, «Ηλιακή Ενέργεια στην Ελλάδα», Εβδομάδα Ενέργειας IENE 22-26/10/2007, Αθήνα

[14] Θερμικά Ηλιακά Συστήματα - Κίμωνας Αντωνόπουλος - Εκδόσεις ΕΜΠ

[15] A. Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, H. Spliethoff
Energetic and economic investigation of Rankine Cycle applications
Institute for Energy Systems, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15,
85747 Garching, Germany
Laboratory of Steam Boilers and Thermal Power Plants, National Technical
University of Athens, Heroon Polytechniou 9, 15780 Athens, Greece, 2008

[16] P.A.Lolos, E.D.Rogdakis A Kalina power cycle driven by renewable energy sources. Laboratory of Applied Thermodynamics, Department of Thermal Engineering, School of Mechanical Engineering, NTUA, Athens, Greece, 2008

[17] Noboru Yamada, Akira Hoshi, Yasuyuki Ikegami, Performance simulation of solar-boosted ocean thermal energy conversion plant, Japan, Ιανουάριος 2008

[18] M. Izquierdo a,d,*, R. Lizarte b,d, J.D. Marcos c,d, G. Gutiérrez, Air conditioning using an air-cooled single effect lithium bromide absorption chiller: Results of a trial conducted in Madrid in August 2005.

[19] M.C. Rodríguez Hidalgo, P. Rodríguez Aumente, M. Izquierdo Milla'n, A. Lecuona Neumann, R. Salgado Mangual, Energy and carbon emission savings in Spanish housing air-conditioning using solar driven absorption system, 2004

[20] Pongsid Srihirin *, Satha Aphornratana, Supachart Chungpaibulpatana, A review of absorption refrigeration technologies, 2001

Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον κ. Περικλή Λώλο για την αμέριστη βοήθεια του.