

5. ΚΥΚΛΟΙ ΙΣΧΥΟΣ ΑΤΜΟΥ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής έργου με ατμό λειτουργούν με μηχανές που ονομάζονται **μηχανές εξωτερικής καύσης**, δεδομένου ότι το ρευστό – φορέας ενέργειας δεν συμμετέχει στην χημική αντίδραση της καύσης, αλλά το ποσό θερμότητας που παράγεται από την καύση μεταδίδεται από το περιβάλλον στο ρευστό σύστημα.

Η θερμότητα προσδίδεται στο ρευστό σε μια διάταξη ξεχωριστή από τη μηχανή. Η διάταξη αυτή αποτελείται από την εστία (διάταξη για την κάυση και πρόσδοση της θερμότητας), το δοχείο μέσα στο οποίο το νερό μετατρέπεται σε ατμό (κοινώς **λέβητας**), και από τα διάφορα εξαρτήματα – μηχανήματα που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία της εγκατάστασης.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των μηχανών εξωτερικής καύσης είναι ότι η χημική σύσταση του εργαζόμενου μέσου δεν αλλάζει, οπότε δεν χρειάζεται να ανανεώνεται σε κάθε κύκλο. Απλώς συμπληρώνεται εάν η στάθμη πέσει κάτω από την πίεση λειτουργίας.

Οι μηχανές εξωτερικής καύσεως διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- μηχανές με χρήση ατμού
- σε μηχανές με χρήση αερίου.

Στην πρώτη κατηγορία το ρευστό σύστημα κατά τη διάρκεια του κύκλου, υπόκειται σε αλλαγή καταστάσεων. Αρχικά ευρίσκεται σε υγρή κατάσταση, ακολούθως σε κατάσταση μίγματος και στη συνέχεια σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού. Μετά την ολοκλήρωση του κύκλου επανέρχεται στην αρχική κατάσταση.

Στην δεύτερη κατηγορία το σύστημα είναι αέριο, κυρίως αέρας που δέχεται θερμότητα από εξωτερική πηγή, εκτονώνεται σε ένα στρόβιλο και στη συνέχεια αποβάλλει θερμότητα. Στις εγκαταστάσεις αυτές το σύστημα δεν υπόκειται σε αλλαγή φάσεων και στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι στρόβιλοι ανοικτού κυκλώματος.

Θεωρητικά κάθε στοιχείο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν σύστημα σε μια εγκατάσταση με μηχανή ατμού, διατηρώντας βέβαια την χημική του ισορροπία σε όλο το διάστημα της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των μεταβολών που υπόκειται.

Στην πράξη όμως οι περιορισμοί είναι πολύ περισσότεροι οπότε μια ουσία για να χρησιμοποιηθεί σε μια τέτοια εγκατάσταση πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

1. το σημείο τήξης να είναι χαμηλότερο από την ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου
2. η πίεση κορεσμού του ατμού δεν πρέπει να είναι πολύ μικρή ως προς την ελάχιστη θερμοκρασία του κύκλου.
3. η πίεση κορεσμού του ατμού δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη ως προς τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου
4. το σύστημα (= ουσία, φορέας της ενέργειας που συμμετέχει στον κύκλο) πρέπει να έχει μεγάλη κρίσιμη θερμοκρασία και η θερμότητα ατμοποίησης πρέπει να είναι η μέγιστη δυνατή

5. η ανώτερη οριακή καμπύλη (καμπύλη δρόσου, καμπύλη που αναπτύσσεται δεξιά τω κρίσιμου σημείου K) στο διάγραμμα (T – S) πρέπει να είναι πολύ κεκλιμένη. Αυτό σημαίνει ότι το ρευστό πρέπει να παρουσιάζει μικρές μεταβολές εντροπίας όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται.
6. στις χαμηλές πιέσεις ο ειδικός όγκος του ατμού πρέπει να είναι πολύ μεγάλος
7. εκτός από τη χημική σταθερότητα στις περιοχές της θερμοκρασίας που εξελίσσεται ο κύκλος, πρέπει το σύστημα (συνθήκη τεχνολογικά απαραίτητη) να μην συνδυάζεται ή να μην αντιδρά χημικά με τα εξαρτήματα που αποτελούν τα όργανα της εγκατάστασης.

Οι προαναφερόμενες συνθήκες είναι απαραίτητες στην πράξη και σε ότι αφορά στην μηχανική αντίσταση των υλικών και σε ότι αφορά σε πρακτική ωφέλεια.

Συγκεκριμένα, κυρίως με αναφορά στο νερό :

Η πρώτη συνθήκη είναι απαραίτητη για την απρόσκοπτη διέλευση του ρευστού μέσα από τα όργανα της εγκατάστασης. Για να εξασφαλίζεται αυτό, πρέπει το σύστημα να μην στερεοποιείται κατά την πορεία του στα όργανα της εγκατάστασης, κάτι που το νερό το ικανοποιεί.

Η δεύτερη συνθήκη είναι απαραίτητη ώστε να διατηρηθεί στον συμπυκνωτή η πίεση ισορροπίας με τη θερμοκρασία της συμπύκνωσης :

όσο μικρότερη είναι η πίεση (και εδώ οι πιέσεις είναι μικρότερες από την ατμοσφαιρική) τόσο μεγαλύτερη δυσκολία στην πραγματοποίηση και διατήρηση της ισορροπίας κατά τη συμπύκνωση.

Επίσης, όσο μικραίνει η πίεση τόσο μεγαλώνει ο ειδικός όγκος και αυτό προξενεί προβλήματα όγκου στις μεγαλύτερες διαστάσεις της μηχανής. Σε αυτό το θέμα, το νερό δεν παρουσιάζει ευνοϊκά χαρακτηριστικά, όμως οι απαιτούμενες συνθήκες πίεσης στον συμπυκνωτή μπορούν να πραγματοποιηθούν.

Η τρίτη συνθήκη επιβάλλεται από τις ανάγκες της εφαρμογής. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία μειώνονται οι μηχανικές αντιστάσεις των υλικών.

Είναι επομένως απαραίτητο η μέγιστη πίεση του κύκλου να μην είναι πολύ αυξημένη γεγονός που οδηγεί για λόγους βελτίωσης του βαθμού αποδόσεως στην αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας.

Εδώ το νερό δεν έχει ευνοϊκά χαρακτηριστικά.

Εάν η κρίσιμη θερμοκρασία (4^η συνθήκη) είναι αυξημένη, τότε μπορεί να δοθεί θερμότητα στις συνήκες κορεσμού, δηλαδή p και T σταθερές και αντίστοιχες, ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες με ευνοϊκό πρακτικό αποτέλεσμα.

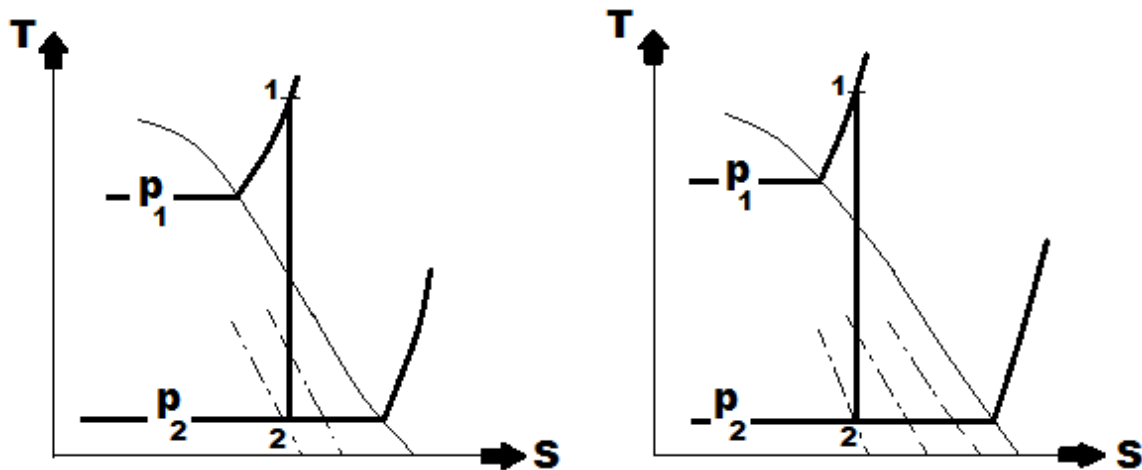
Το νερό έχει κρίσιμη θερμοκρασία μάλλον χαμηλή (374,1 °C), οπότε δεν ικανοποιεί πλήρως αυτή τη συνθήκη. Επιπροσθέτως εάν η θερμότητα ατμοποίησης είναι μεγάλη, μειώνεται (με ίση εναλλαγή ποσού θερμότητας) το βάρος του ρευστού που κυκλοφορεί στον κύκλο.

Στο τέλος της εκτόνωσης του ατμού το σύστημα συνήθως ευρίσκεται στην περιοχή του μίγματος.

Με ίδια αρχική και τελική πίεση (σημεία 1 και 2 στο παρακάτω διάγραμμα) ο βαθμός ξηρότητας του συστήματος είναι μικρότερος όσο περισσότερο μεταβάλλεται η εντροπία του ξηρού ατμού στη

χαμηλή πίεση, δηλαδή όσο μικρότερη κλίση ως προς τον άξονα της εντροπίας έχει η κατώτερη οριακή καμπύλη.

Το νερό στην περίπτωση αυτή έχει πλεονέκτημα, δεδομένου ότι η κατώτερη οριακή του καμπύλη παρουσιάζει μεγάλη κλίση (αριστερό διάγραμμα στο παρακάτω σχήμα).



ΣΧΗΜΑ 106

Όσον αφορά στην 6^η συνθήκη, μπορεί να παρατηρηθεί ότι το σύστημα στο τέλος της εκτόνωσης βρίσκεται σε χαμηλή πίεση (στις μοντένες εγκαταστάσεις και κάτω από την ατμοσφαιρική). Εάν ο αντίστοιχος ειδικός όγκος είναι μεγάλος, τότε ο εκτομωτής έχει μεγάλες διαστάσεις. Το νερό στην περίπτωση αυτή έχει σαφές μειονέκτημα, γι α παράδειγμα σε $p = 0,12 \text{ ata}$ ο ειδικός όγκος του ξηρού ατμού είναι $v = 12,60 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kp}} \right)$.

Η τελευταία συνθήκη για τη χημική σταθερότητα στην περιοχή θερμοκρασιών που ενδιαφέρουν τον κύκλο, ικανοποιείται όταν το σύστημα είναι ατμός, αλλά δεν ικανοποιείται όταν το σύστημα είναι στην κατάσταση μίγματος ή στην καθαρά υγρή κατάσταση, δεδομένου ότι το νερό διαβρώνει τα σιδηρούχα υλικά. Υπάρχουν σήμερα μέθοδοι για την αντιμετώπιση της διάβρωσης με κατάλληλη επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας του λέβητα.

Συμπερασματικά, μπορεί να ειπωθεί ότι το νερό δεν έχει πλήρως όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ώστε να χρησιμοποιείται σε μια εγκατάσταση παραγωγής έργου με ατμό.

Παγκοσμίως όμως είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο σύστημα.

Αυτό συμβαίνει διότι υπάρχει άφθονο και ότι έχει σχετικά μικρό κόστος.

5.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΚΥΚΛΟΙ ΙΣΧΥΟΣ ΑΤΜΟΥ

για εγκαταστάσεις παραγωγής έργου με ατμό νερού

Ως κύκλωμα ισχύος , νοείται κάθε μηχανική διάταξη ή σύστημα , που παράγει ισχύ από μια ενεργειακή πηγή.

Η παραγωγή ισχύος κατά τη λειτουργία της μηχανικής διάταξης , υλοποιείται από την κυκλοφορία σε αυτή , ενός ρευστού που ονομάζεται ΦΟΡΕΑΣ της ενέργειας (ή λειτουργούν μέσο) και υποβάλλεται σε συνεχείς κυκλικές μεταβολές , δηλαδή σε θερμοδυναμικούς κύκλους.

Ο φορέας της ενέργειας (ή λειτουργούν μέσο) κατά τη διάρκεια του κύκλου , είτε ευρίσκεται σε διαφορετικές φάσεις , δηλαδή ατμοποιείται και συμπυκνώνεται διαδοχικά , είτε παραμένοντας στην αέρια φάση.

Χαρακτηρίζονται ως :

- μηχανικές διατάξεις (κυκλώματα) ισχύος ατμού όπου το λειτουργούν μέσο ατμοποιείται και συμπυκνώνεται διαδοχικά (κύκλοι ατμού , ψυκτικοί κύκλοι συμπίεσης ατμού).
- μηχανικές διατάξεις (κυκλώματα) ισχύος αερίου , όπου το λειτουργούν μέσο παραμένει στην αέρια φάση (ΜΕΚ , αεριοστρόβιλοι).

Εξετάζεται ο κύκλος παραγωγής έργου, όπου σαν εργαζόμενο μέσο είναι το νερό σε υγρή φάση, σε μίγμα και υπέρθερμο ατμό. Το νερό έχει ορισμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά : ευρίσκεται άφθονα με χαμηλό κόστος , δεν έχει τοξικότητα και έχει μεγάλη (θερμότητα) ενθαλπία ατμοποίησης .

Ο κύκλος ισχύος ατμού αποτελεί τη βάση λειτουργίας των ναυτικών ατμοστρόβιλων που χρησιμοποιούνται για την πρόωση των πλοίων, αλλά και για εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ποσότητα του εργαζόμενου μέσου δεν μεταβάλλεται (εκτός από τις περιπτώσεις απωλειών) κατά τη διάρκεια του κύκλου και την πορεία του μέσα από τα μηχανήματα.

Στο τέλος κάθε κύκλου το σύστημα όχι μόνο χαρακτηρίζεται από τα καταστατικά μεγέθη που είχε στην αρχική του κατάσταση, δεν έχει υποστεί μεταβολές στη χημική του σύσταση δεδομένου ότι δεν συμμετέχει σε χημικές αντιδράσεις, αλλά θα έχει την ίδια ποσότητα για να εκτελέσει τον επόμενο κύκλο.

Ο κύκλος αποτελείται από μια σειρά διαδοχικών μεταβολών στις οποίες υποβάλλεται το κλειστό σύστημα (σταθερή ποσότητα), όπου σε κάθε μια από αυτές ευρίσκεται σε συγκεκριμένη φυσική κατάσταση.

Οι διαδοχικές αυτές μεταβολές θεωρούνται κατ'αρχήν ιδανικές (αντιστρέψιμες) χωρίς να λαμβάνονται υπ'όψιν απώλειες οπότε προκύπτει ο ιδανικός κύκλος αναφοράς, στον οποίο βεβαίως δεν αποτυπώνονται τα προβλήματα που υπάρχουν στην πραγματικότητα.

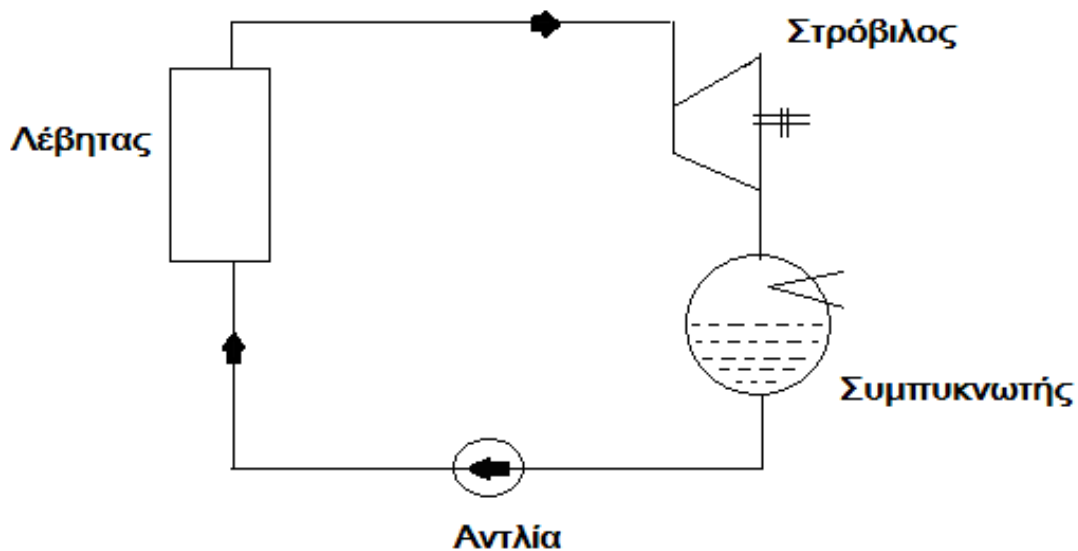
Για παράδειγμα, ο στρόβιλος θεωρείται αδιαβατικό σύστημα, οπότε ενεργώντας σε κύκλο με ιδανικές (= αντιστρέψιμες) μεταβολές, η εκτόνωση είναι μια μεταβολή αδιαβατική ισοεντροπική (απεικονίζεται δηλαδή κατακόρυφα σε ένα διάγραμμα T – S).

Στην πραγματικότητα, παρ'ότι ο στρόβιλος εξακολουθεί να θεωρείται αδιαβατικό σύστημα (επομένως δεν εναλλάσσονται ποσά θερμότητας μεταξύ του στρόβιλου και του περιβάλλοντος), κατά τη διάρκεια της εκτόνωσης υπάρχουν τριβές οπότε η εκτόνωση πρέπει να παρασταθεί σαν μια μεταβολή αδιαβατική πραγματική επομένως μεταβολή αυξανόμενης εντροπίας.

Ο ιδανικός κύκλος αναφοράς, δίδει τη δυνατότητα υπολογισμού του βαθμού απόδοσης αναφοράς, δηλαδή του μέγιστου δυνατού από ένα κύκλο με τις συγκεκριμένες θεωρητικές μεταβολές.

Στη συνέχεια αντικαθίστώνται οι δυναμικές μεταβολές, δηλαδή η εκτόνωση και η συμπίεση, με τις αδιαβατικές πραγματικές μεταβολές, οπότε στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης λαμβάνονται υπ'όψιν οι απώλειες, κυρίως λόγω τριβών, κατά τις μεταβολές αυτές.

Πρίν την αναφορά και την περιγραφή του θερμοδυναμικού κύκλου, δίδεται μια περιγραφή των μηχανημάτων που συνθέτουν μια εγκατάσταση παραγωγής έργου με ατμό νερού, η οποία αποτελείται από τα εξής στοιχεία :



ΣΧΗΜΑ 106 α

- **ΛΕΒΗΤΑΣ ή ΑΤΜΟΠΟΙΗΤΗΣ** : το νερό ατμοποιείται υπό σταθερή πίεση και η απαιτούμενη θερμότητα προσφέρεται στο νερό από την καύση του χρησιμοποιούμενου καυσίμου σε χώρο εκτός του θαλάμου που το νερό περιέχεται.
- **ΕΚΤΟΝΩΤΗΣ ή ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ** : ο ατμός εκτονώνεται και προσφέρει έργο στον άξονα του στρόβιλου.
- **ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ ή ΨΥΓΕΙΟ** : ο ατμός μετά την εκτόνωση στο στρόβιλο, σε κατάσταση μίγματος, διοχετεύεται στο συμπυκνωτή όπου αποβάλλει τη λανθάνουσα θερμότητα στο νερό ψύξεως του συμπυκνωτή και μετατρέπεται σε κεκορεσμένο υγρό.
- **ΑΝΤΛΙΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΜΑΤΟΣ** : συμπιέζει το κεκορεσμένο υγρό από την πίεση του συμπυκνωτή μέχρι την πίεση του λέβητα, ώστε να γίνει πάλι ο κύκλος.

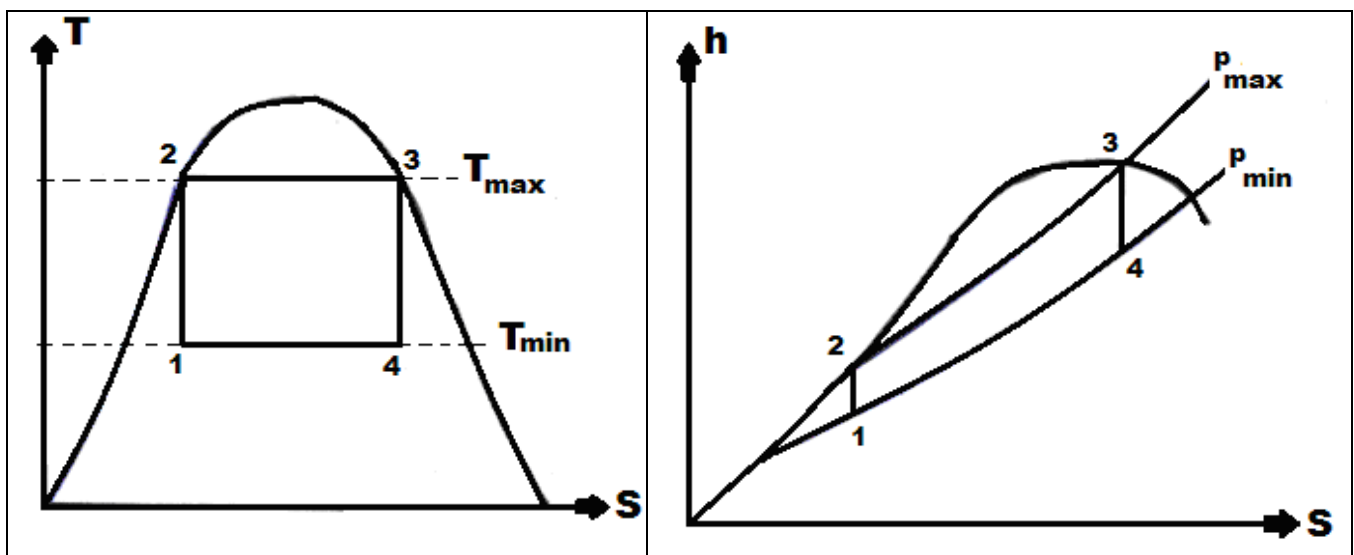
5.3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ CARNOT

Μια θερμική μηχανή Carnot που λειτουργεί σύμφωνα με τον αντίστοιχο θερμοδυναμικό κύκλο, έχει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από όλους τους κύκλους που λειτουργούν μεταξύ δύο θερμικών πηγών με συγκεκριμένες θερμοκρασίες και ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι ανεξάρτητος από τη φύση του φορέα της ενέργειας (λειτουργούν μέσο) όπως φαίνεται από τη σχέση :

$$\eta_{CARNOT} = 1 - \frac{T_{MIN}}{T_{MAX}}$$

Γίνεται προσπάθεια να διερευνηθεί η δυνατότητα υλοποίησης θερμοδυναμικού κύκλου ατμού παραγωγής ισχύος χρησιμοποιώντας (εφαρμόζοντας) τον θερμοδυναμικό κύκλο (άρα και τη θερμική μηχανή) Carnot.

Ο θερμοδυναμικός κύκλος Carnot αποτελείται από δύο ισόθερμες και δύο αδιαβατικές μεταβολές και στην περιοχή του μίγματος ατμού – νερού παριστάνεται παρακάτω στα δύο διαγράμματα (T – S) και (I – S) :



ΣΧΗΜΑ 107

Το νερό, ο φορέας της ενέργειας (= λειτουργούν μέσο) εμφανίζεται σε δύο φάσεις δηλαδή σε υγρό και ατμό κατά τη διάρκεια των διαφόρων διαδοχικών μεταβολών όπου :

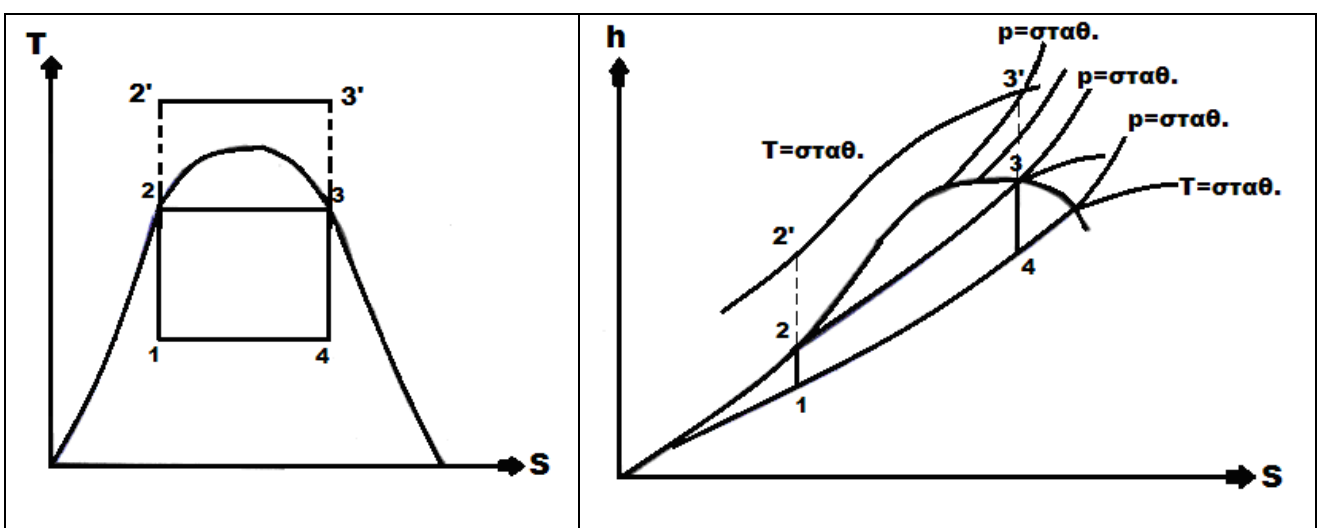
- συμπιέζεται ισοεντροπικά στο συμπιεστή (μεταβολή 12),
- ατμοποιείται αντιστρεπτά και ισόθερμα στο λέβητα (μεταβολή 23),
- εκτονώνεται ισοεντροπικά στο στρόβιλο (μεταβολή 34),
- και τέλος αποδίδει τη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης αντιστρεπτά και ισόθερμα στο συμπυκνωτή (μεταβολή 41).

Η υλοποίηση του κύκλου ισχύος ατμού με βάση τον κύκλο του Carnot, παρουσιάζει προβλήματα :

1. δύσκολα ελέγχεται ο βαθμός ξηρότητας του μίγματος στο τέλος της εκτόνωσης. Πάντως ο βαθμός ξηρότητας μειώνεται κατά την εκτόνωση, οπότε ο στρόβιλος λειτουργεί με αυξημένη ποσότητα υγρασίας γεγονός που έχει σαν συνέπεια τη σπυλαίωση, φαινόμενο που δημιουργεί βλάβες στα πτερύγια του στρόβιλου και μείωση του βαθμού απόδοσης αυτού. Για τις εγκαταστάσεις αυτές, ο βαθμός ξηρότητας στο τέλος της εκτόνωσης δεν πρέπει να είναι μικρότερος από 0,88 – 0,90.
2. η συμπίεση υγρού ατμού, δηλαδή η μεταβολή 1-2, είναι πρακτικά αδύνατη, δεδομένου ότι είναι πολύ δύσκολη η λειτουργία ενός συμπιεστή με ρευστό που ευρίσκεται ταυτόχρονα σε δύο φάσεις (υγρό και ατμός).
3. εάν ο θερμοδυναμικός κύκλος Carnote είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί στην περιοχή κορεσμού (περιοχή μίγματος) η T_{\max} περιορίζεται από τη θερμοκρασία του κρίσιμου σημείου δηλαδή $T_{\text{ΚΡΙΣΙΜΗ}} = 374^{\circ}\text{C}$ για υδρατμό, θερμοκρασία που είναι πολύ μικρότερη από τη θερμοκρασία αντοχής των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπότε είναι χαμηλός ο βαθμός απόδοσης.

Δεδομένου ότι ο κύκλος του Carnot έχει το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από όλους τους κύκλους που λειτουργούν μεταξύ δύο θερμικών πηγών με συγκεκριμένες θερμοκρασίες, γίνεται προσπάθεια υλοποίησης κύκλου ατμού με βάση τον κύκλο αυτό.

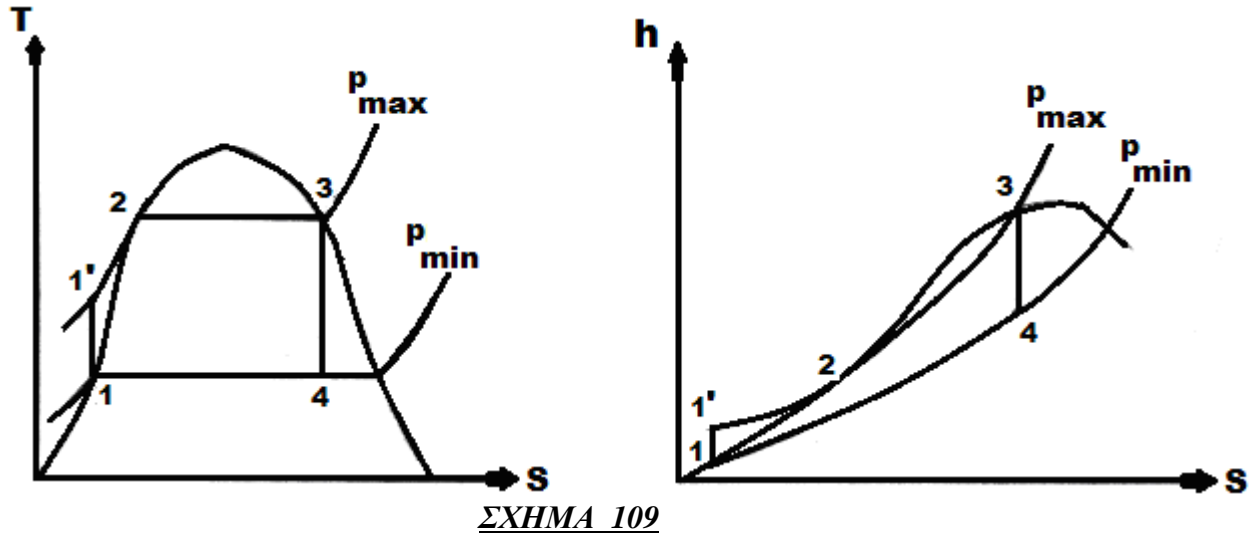
Μια πρώτη σκέψη για βελτίωση του θερμικού βαθμού απόδοσης είναι η συνέχιση της συμπίεσης πάνω από την καμπύλη του κεκορεσμένου υγρού, δημιουργώντας τον κύκλο του επόμενου σχήματος. Στη λύση αυτή παρουσιάζονται προβλήματα, αφ' ενός στην ισοεντροπική συμπίεση του συστήματος (αρχικά δύο φάσεων, μεταβολή 1 1') μέχρι πολύ υψηλές πιέσεις, και αφ' ετέρου στη θέρμανση του συστήματος κατά μια μεταβολή ισόθερμη αλλά με μεταβλητή πίεση (μεταβολή 2' 3').



ΣΧΗΜΑ 108

5.4 ΚΥΚΛΟΣ RANKINE - ΚΥΚΛΟΣ HIRN

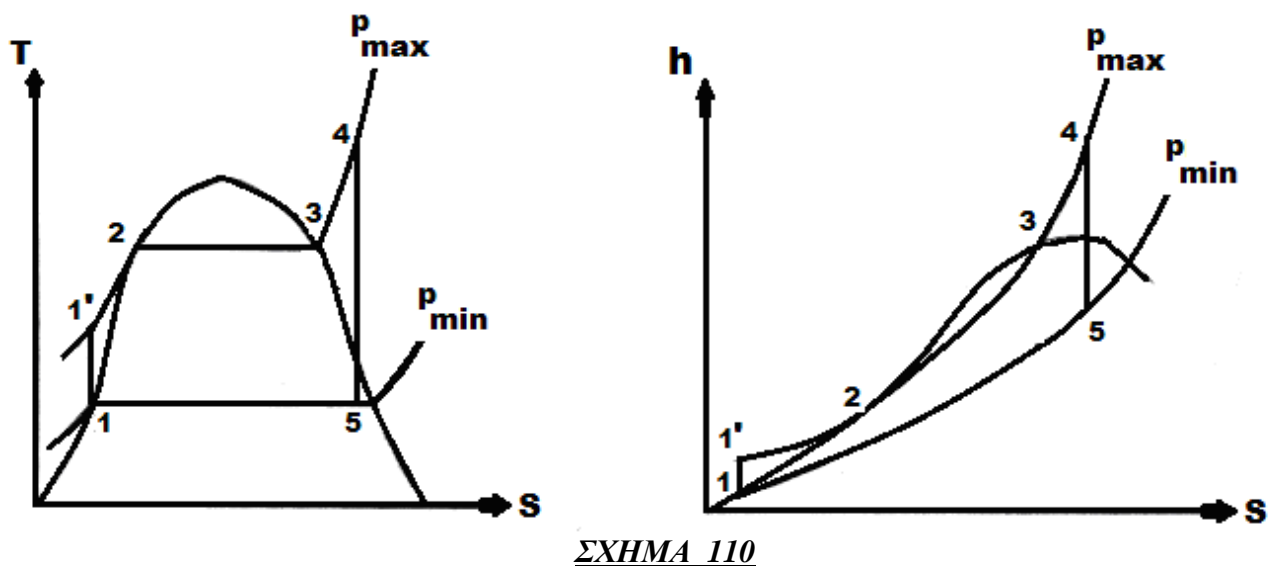
Για τη βελτίωση της κατάστασης, συνεχίστηκε η συμπίκνωση μέχρι το σύστημα να γίνει κεκορεσμένο υγρό στη χαμηλή πίεση, δηλαδή το σημείο 1 ευρίσκεται επάνω στην καμπύλη του κεκορεσμένου υγρού, οπότε προέκυψε ο **ΚΥΚΛΟΣ RANKINE**



όπου λύθηκε μεν το πρόβλημα της συμπίεσης 1- 2 δεδομένου ότι τώρα συμπιέζεται υγρό χωρίς παρουσία ατμού, όπως όταν ήταν μίγμα, *παρέμεινε όμως το πρόβλημα στην εκτόνωση*, διότι εξακολουθεί η έντονη παρουσία υγρού στο στρόβιλο, μεταβολή 3-4, αλλά και η μειωμένη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε έργο κατά την εκτόνωση 3-4.

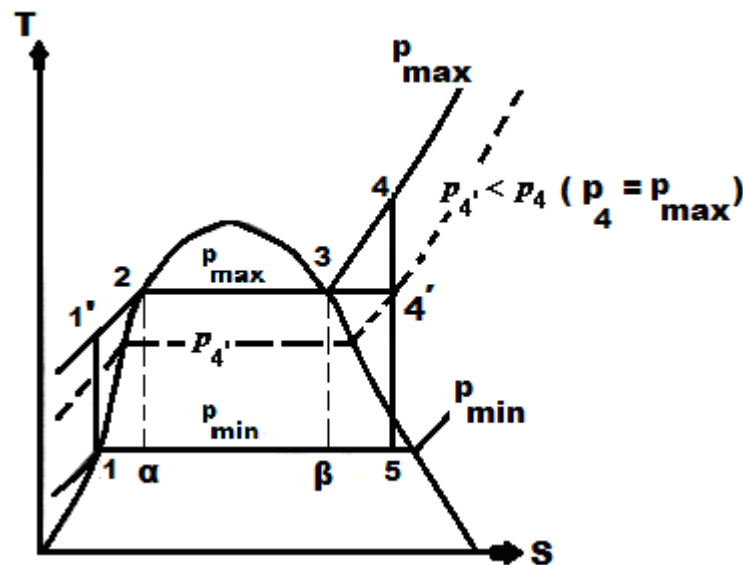
Τα προβλήματα αυτά ξεπεράσθηκαν, συνεχίζοντας τη θέρμανση του συστήματος από κεκορεσμένο (ξηρό) ατμό στην ίδια πίεση και παράγοντας υπέρθερμο ατμό.

Προέκυψε έτσι ο **ΚΥΚΛΟΣ RANKINE ΜΕ ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗ** ή **ΚΥΚΛΟΣ HIRN**



Παρατηρήσεις :

1. εάν η υπερθέρμανση 34 γίνει προσπάθεια να υλοποιηθεί ακολουθώντας κύκλο Carnot, θα έπρεπε η μεταβολή αυτή να είναι η 34', ως συνέχεια δηλαδή της ισόθερμης T₂₃. όμως στην περίπτωση αυτή κατά τη μεταβολή 34' γίνεται και πτώση της πίεσης : δηλαδή το ποσό θερμότητας που πρόκειται να προσδοθεί στον κεκορεσμένο ατμό καταστάσεως 3 ώστε αυτός να γίνει υπέρθερμος καταστάσεως 4' θα πρέπει να γίνεται κατά μια εκτόνωση (αποδίδεται και έργο ταυτόχρονα) επειδή $p_{4'} < p_4$, διαδικασία η οποία στην πράξη είναι πολύ δύσκολο να υλοποιηθεί. Επομένως ούτε με αναθέρμανση μπορεί να υλοποιηθεί ο κύκλος Carnot (α 1 3 4' 5).



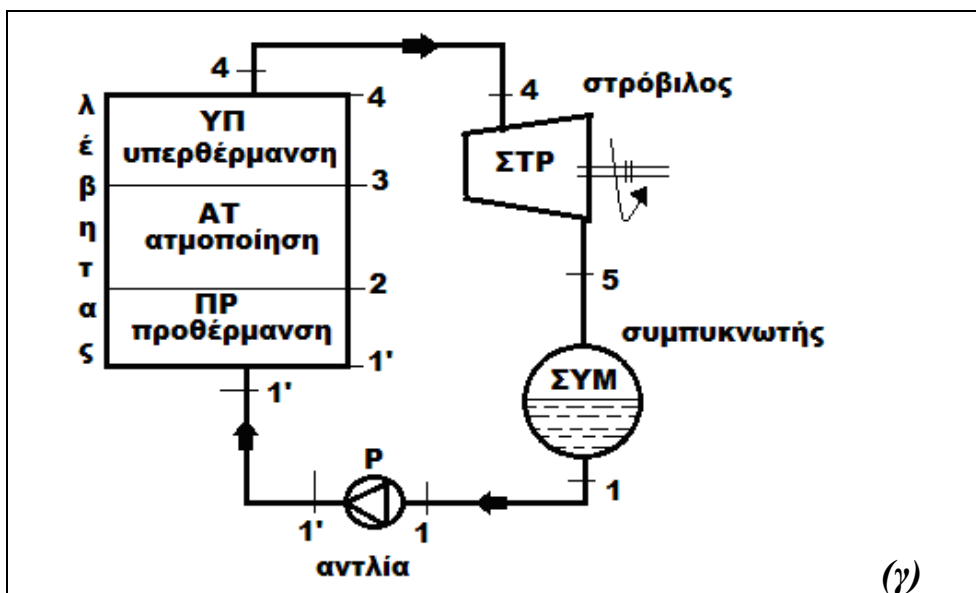
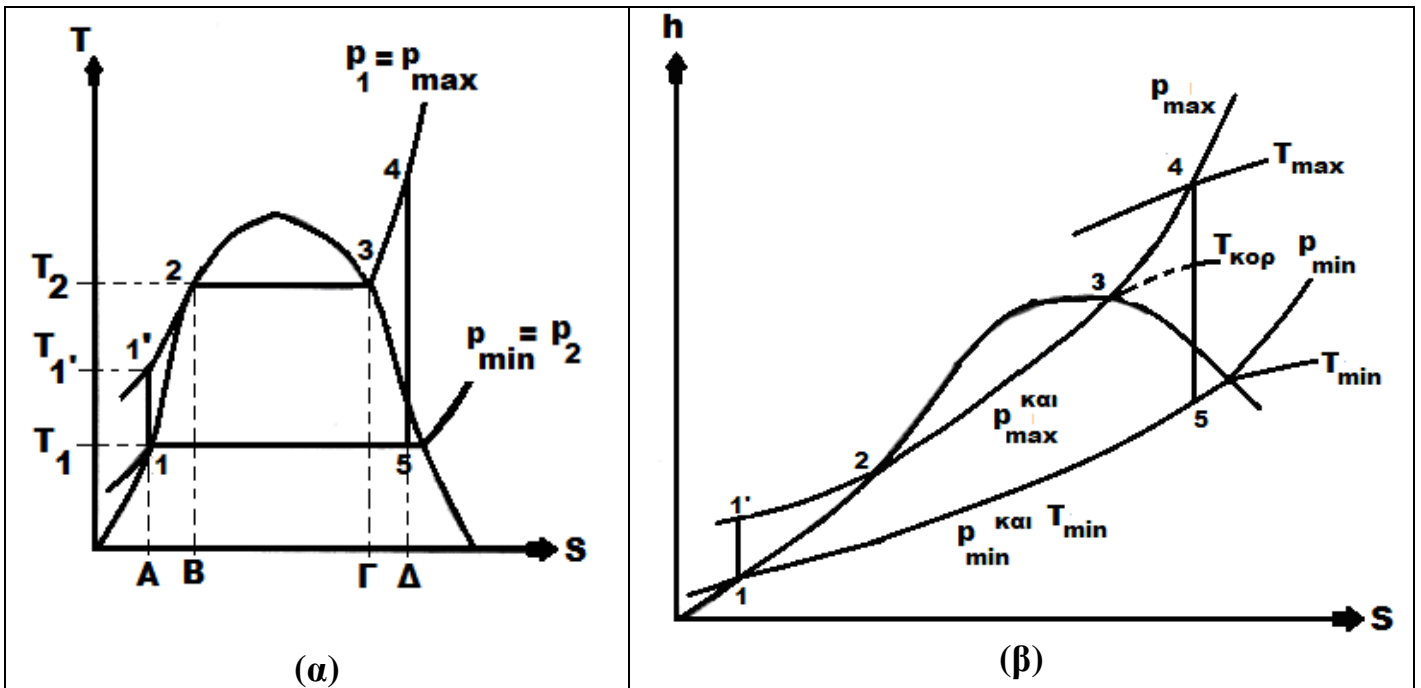
2. σημειώνεται ότι κατά την εκτόνωση διαπιστώνεται αύξηση της υγρασίας στη μάζα του ατμού που εκτονώνεται. Η αύξηση αυτή συνεχίζεται όσο μειώνεται η πίεση οπότε τα υγρά μόρια κτυπούν τα πτερύγια του στροβίλου και προκαλούν φθορές, εξ αιτίας του φαινομένου της σπηλκίωσης. Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων, ο βαθμός ξηρότητας στο τέλος της εκτόνωσης στη χαμηλή πίεση πρέπει να έχει τιμή τουλάχιστον $x \geq (0,88 \div 0,90)$.
3. σημειώνεται επίσης ότι το ίδιο πρόβλημα παρουσιάζεται στις αντλίες του συστήματος. Για να είναι λοιπόν ομοιογενής η υγρή φάση, η συμπίκνωση 5-1 διαρκεί τόσο ώστε το συμπυκνούμενο σύστημα να γίνει κεκορεσμένο υγρό, δηλαδή να είναι καταστάσεως 1, με βαθμό ξηρότητας $x = 0$.

5.4.1 Περιγραφή του θεωρητικού κύκλου

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ο θερμοδυναμικός κύκλος σε διάγραμμα (T-S) και διάγραμμα (I-S), καθώς και ένα σχήμα με τα όργανα – μηχανήματα που συνθέτουν την εγκατάσταση.

Για να πραγματοποιηθεί ο κύκλος υδρατμού ο οποίος παρουσιάζεται στο επόμενο **σχήμα 116 (α)** (διάγραμμα T-S) και **σχήμα 116 (β)** (διάγραμμα I-S) απαιτείται ένα σύνολο μηχανημάτων / οργάνων που παριστάνονται στο διαγραμματικό **σχήμα 116 (γ)**.

Στο σχήμα **116 (α)** φαίνονται τα σημεία / καταστάσεις που το σύστημα (νερό – ατμός) έχει στον θερμοδυναμικό κύκλο και στο **σχήμα 116 (β)** υπάρχει η αντιστοιχία της κάθε κατάστασης του συστήματος (νερό – ατμός) στο διαγραμματικό σχήμα της εγκατάστασης.



ΣΧΗΜΑ 11

Στις εγκαταστάσεις αυτού του τύπου :

A) τα όργανα όπου γίνονται οι θερμικές εναλλαγές είναι :

1. λέβητας που αποτελείται από :
 - προθερμαντήρας (ΠΡ)
 - ατμοποιητής (ΑΤ)
 - υπερθερμαντήρας (ΥΠ)
2. συμπυκνωτής (ΣΥΜ., ή Ψ)

B) τα όργανα όπου γίνονται οι μηχανικές εναλλαγές, δηλαδή :

1. εκτονωτής ή στρόβιλος (ΣΤΡ.)
2. συμπιεστής ή αντλία (Ρ).

Εξετάζονται τώρα οι επιμέρους μεταβολές :

Στο σημείο 1 το σύστημα ευρίσκεται στην κατάσταση κεκορεσμένου υγρού στη χαμηλή πίεση p_1 (πίεση συνήθως μικρότερη από την ατμοσφαιρική πίεση) και στην αντίστοιχη θερμοκρασία ισορροπίας (συνθήκη κορεσμού) T_1 .

Η αντλία P_1 συμπιέζει το υγρό από τον συμπυκνωτή (ΣΥΜ) στην πίεση p_2 που είναι η μέγιστη του κύκλου και το τροφοδοτεί στο λέβητα.

Στις πραγματικές εφαρμογές, μια αντλία απορροφά το υγρό από το συμπυκνωτή σε πίεση μικρότερη από την ατμοσφαιρική και το μεταφέρει σε μια δεξαμενή ανοικτή στην ατμόσφαιρα από όπου μια δεύτερη αντλία το μεταφέρει στο λέβητα συμπιέζοντάς το από την ατμοσφαιρική πίεση μέχρι την μέγιστη πίεση του κύκλου.

Στο τέλος της συμπίεσης το υγρό ευρίσκεται στην πίεση p_2 αλλά σε μια θερμοκρασία, T_1' μικρότερη από εκείνη του κορεσμού που αντιστοιχεί σε αυτή την πίεση.

Στον προθερμαντήρα (ΠΡ) το υγρό θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση (την πίεση p_2) μέχρι την αντίστοιχη (στην πίεση p_2) θερμοκρασία κορεσμού T_2 .

Οπότε τώρα το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση κορεσμού στην μέγιστη πίεση του κύκλου και στο διάγραμμα αυτή η κατάσταση παριστάνεται από το σημείο 2.

Στο σημείο 2 προσδίδεται η θερμότητα ατμοποίησης, το νερό ατμοποιείται πλήρως και στο τέλος αυτής της μεταβολής 23 είναι σε κατάσταση ξηρού (κεκορεσμένου) ατμού.

Στη συνέχεια στο ξηρό ατμό προσδίδεται περισσότερη θερμότητα (στην ίδια πίεση p_2) στον υπερθερμαντήρα (ΥΠ) και ο (ξηρός) ατμός μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό καταστάσεως 4.

Από την κατάσταση 4 ο υπέρθερμος ατμός αποστέλλεται στον (ατμο) στρόβιλο όπου εκτονώνεται αδιαβατικά μέχρι την ελάχιστη πίεση p_1 στην κατάσταση 5 όπου είναι μίγμα νερού – ατμού.

Το μίγμα αυτό στην ίδια ελάχιστη πίεση p_1 ρέει στον συμπυκνωτή (ΣΥΜ) όπου αποδίδει τη λανθάνουσα θερμότητα και μετατρέπεται σε κεκορεσμένο υγρό καταστάσεως 1 όπου και κλείνει ο κύκλος.

Τα ποσά θερμότητας (στο διάγραμμα $T-S$ η επιφάνεια κάτω από καμπύλη μεταβολής παριστάνει θερμότητα) που εναλλάσσονται κατά την πραγματοποίηση του κύκλου, παριστάνονται από τα εμβαδά :

(A 1 1' 2 B) = θερμότητα προθέρμανσης του υγρού (q)

(B 2 3 Γ) = θερμότητα για την ατμοποίηση (r)

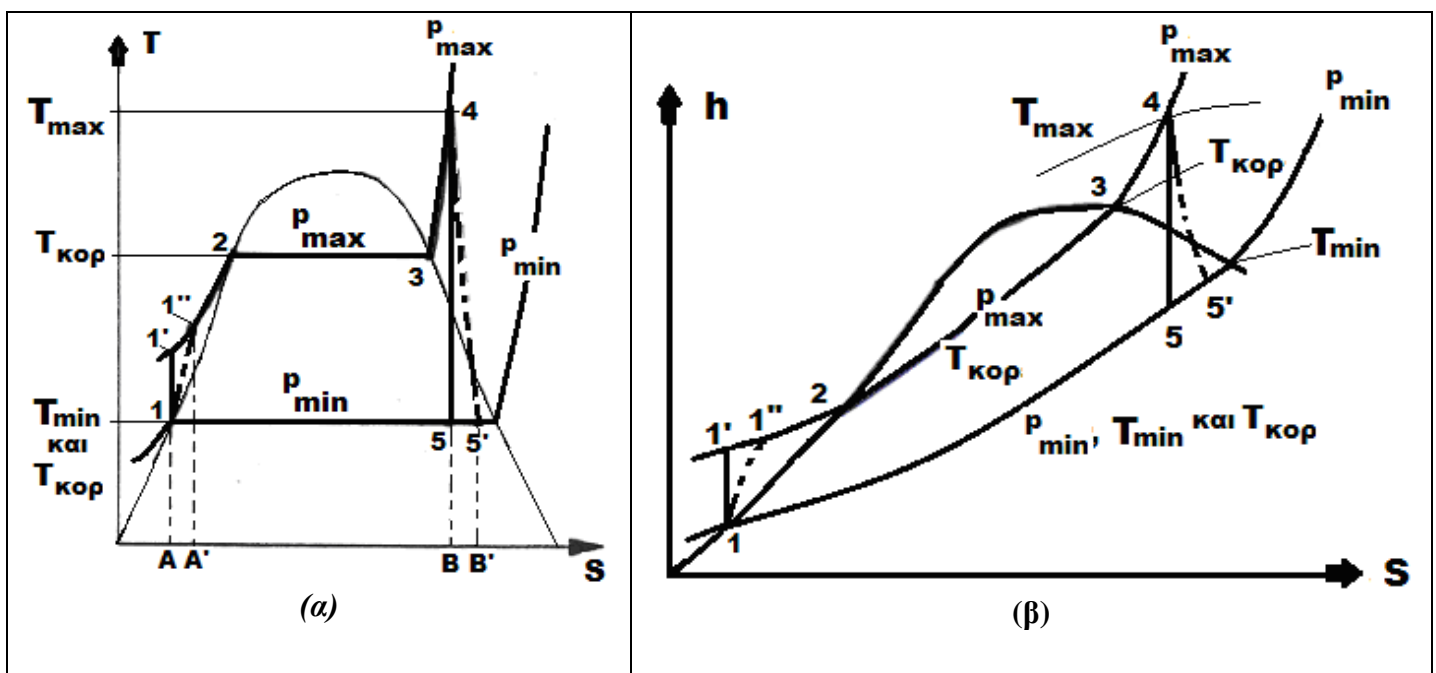
(Γ 3 4 5 Δ) = θερμότητα για την υπερθέρμανση $Q = \int_{T_3}^{T_4} c_p \cdot dT$

(A 1 5 Δ) = θερμότητα που αφαιρείται στον συμπυκνωτή κατά τη συμπύκνωση

(1 1' 2 3 4 5 1) = θερμικό ισοδύναμο του έργου που εναλλάσσεται κατά την πραγματοποίηση ενός κύκλου (αυτό το εμβαδόν μόνο στο θεωρητικό κύκλο)

5.4.2 Περιγραφή του πραγματικού κύκλου

Στη συνέχεια, εξετάζεται ο ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ με αναφορά στο παρακάτω σχήμα 112 και στα διαγράμματα (α) και (β) :



ΣΧΗΜΑ 112

- Στο τμήμα (1 – 1') που αντιστοιχεί στη συμπίεση του υγρού στην αντλία και το οποίο στον θεωρητικό κύκλο αυτή προσδιορίζεται από μια ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ – ΙΣΟΕΝΤΡΟΠΙΚΗ, *τόρα στον πραγματικό κύκλο η συμπίεση παριστάνεται από* τη μεταβολή (1 – 1'') δηλαδή μια *ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ – ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ μεταβολή*, στην οποία το σημείο 1'' (= τέλος πραγματικής συμπίεσης) βρίσκεται δεξιότερα του σημείου 1' (= τέλος της ιδανικής συμπίεσης) λόγω του ότι τώρα, υπάρχει αύξηση εντροπίας.

- Η *φάση της εκτόνωσης, στον πραγματικό κύκλο παριστάνεται από μια ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ – ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ μεταβολή*, την (4 – 5') όπου το σημείο 5' είναι δεξιότερα του 5, λόγω της αυξημένης εντροπίας.

Είναι :

(A' 1'' 2 3 4 B) = θερμότητα που προσφέρεται στο ρευστό

(A 1 5' B) = θερμότητα που αφαιρείται από το ρευστό

Το εμβαδόν (1 1'' 2 3 4 5' 1) δεν παριστάνει πλέον το έργο L_r , που εναλλάσσεται (ισχύει πάντα $L_r = Q_1 - Q_2$) όπου L_r είναι το άθροισμα όλων των έργων που εναλλάσσονται μεταξύ του ρευστού και των οργάνων της μηχανής σε επαφή με το ρευστό), αλλά είναι το έργο στον άξονα της μηχανής, ή όπως συνηθίζεται να ονομάζεται, το ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΕΡΓΟ $L_{\pi\rho} < L_r$.

Το χρήσιμο έργο L_u μπορεί να είναι $L_u \leq L_r$, οπότε ορίζεται ο

ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

$$\eta_m = \frac{L_u}{L_{\pi\rho}}$$

Τέλος, ορίζεται ο ΟΛΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ή ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ, ως :

$$\eta_{ολ} = \eta_b \cdot \eta_\theta \cdot \eta_m,$$

όπου :

$$\eta_b = \frac{Q_1}{M_c \cdot H_i} = \text{βαθμός απόδοσης της καύσεως}$$

$$\eta_\theta = \frac{L_1}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \text{θερμικός βαθμός απόδοσης}$$

$$\eta_m = \frac{L_u}{L_{\pi\rho}} = \text{μηχανικός βαθμός απόδοσης}$$

5.4.3 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ

ΣΤΡΟΒΙΛΟΣ

Είναι ένα ανοικτό σύστημα που θεωρείται αδιαβατικό και η εκτόνωση μπορεί να είναι ιδανική αδιαβατική (= αντιστρέψιμη) άρα και ισοεντροπική, ή αδιαβατική πραγματική με αυξημένη εντροπία στο τέλος της εκτόνωσης λόγω της μη αντιστρεψιμότητας.

Εάν θεωρηθούν αμελητέες η κινητική και η δυναμική ενέργεια του συστήματος στο στρόβιλο, τότε :

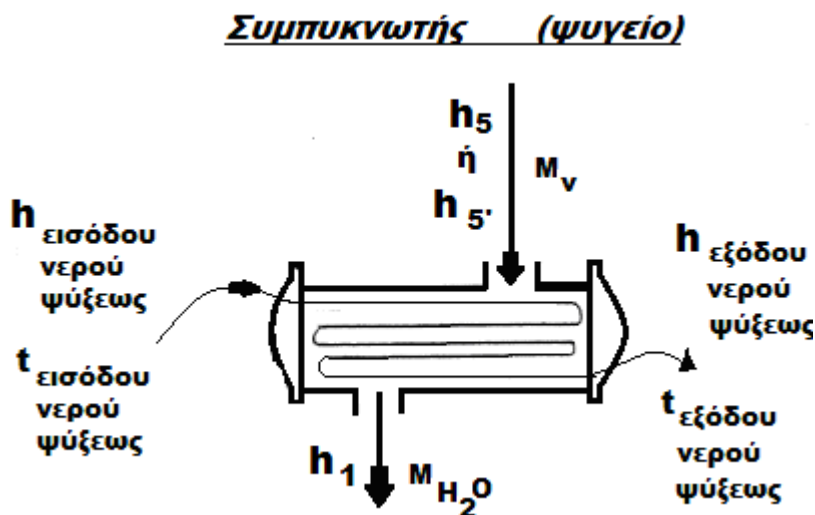
$$(l_{στρ})_{I\Delta} = M_V \cdot (\Delta h)_{I\Delta} = M_V \cdot (h_4 - h_5)$$

ή

$$(l_{στρ})_{πραγμ.} = M_V \cdot (\Delta h)_{πραγμ.} = M_V \cdot (h_4 - h_{5'})$$

ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ (εναλλάκτης θερμότητας)

Σε έναν εναλλάκτη θερμότητας η θερμότητα που έχει το σύστημα μετά την εκτόνωση (μίγμα επιθυμητού βαθμού ξηρότητας $x > 0,90$) μεταδίδεται στο νερό ψύξεως του εναλλάκτη λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.



ΣΧΗΜΑ 113

Ο θερμικός ισολογισμός είναι :

θερμότητα που αποβάλλεται από το μίγμα = θερμότητα που παραλαμβάνει το νερό ψύξεως του εναλλάκτη

$$\begin{aligned} M_V \cdot (h_5 - h_1) &= M_{H_2O} \cdot (h_{\text{εξόδου}} - h_{\text{εισόδου}}) = \\ &= M_{H_2O} \cdot (c_p)_{H_2O} \cdot (\Delta T)_{H_2O} \end{aligned}$$

Στις προηγούμενες σχέσεις η εκτόνωση θεωρείται ιδανική.

Εάν η εκτόνωση αντιμετωπιστεί ως πραγματική, τότε στο τέλος της εκτόνωσης υπολογίζεται η ενθαλπία της πραγματικής μεταβολής, δηλαδή η προηγούμενη σχέση γράφεται :

$$M_V \cdot (h_5' - h_1) = M_{H_2O} \cdot (h_{\text{εξόδου}} - h_{\text{εισόδου}}) = M_{H_2O} \cdot (c_p)_{H_2O} \cdot (\Delta T)_{H_2O}$$

ΑΝΤΛΙΑ

Η θερμική ισχύς της αντλίας υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$N_{\text{αντλ.}} = M_V \cdot (h_1' - h_1) \text{ όταν θεωρείται ιδανική η συμπίεση}$$

$$N_{\text{αντλ.}} = M_V \cdot (h_1'' - h_1) \text{ όταν θεωρείται πραγματική η συμπίεση}$$

Γίνονται δύο υποθέσεις :

α) δεν μεταβάλλεται κατά τη συμπίεση η εσωτερική ενέργεια του νερού :

$$U_1' \cong U_1 \text{ όταν θεωρείται ιδανική η συμπίεση}$$

$$U_1'' \cong U_1 \text{ όταν θεωρείται πραγματική η συμπίεση}$$

β) δεν μεταβάλλεται ο ειδικός όγκος του νερού :

$$v_1' \cong v_1 \text{ όταν θεωρείται ιδανική η συμπίεση}$$

$$v_1 \cong v_1'' \text{ όταν θεωρείται πραγματική η συμπίεση}$$

Οπότε :

$$N_{\alpha\nu\tau\lambda.} = M_V \cdot (h_{1'} - h_1) = M_V \cdot v_1 \cdot (p_{1'} - p_1) \quad \text{όταν θεωρείται ιδανική η συμπίεση}$$

$$\text{και : } h_{1'} = h_1 + v_1 \cdot (p_{1'} - p_1)$$

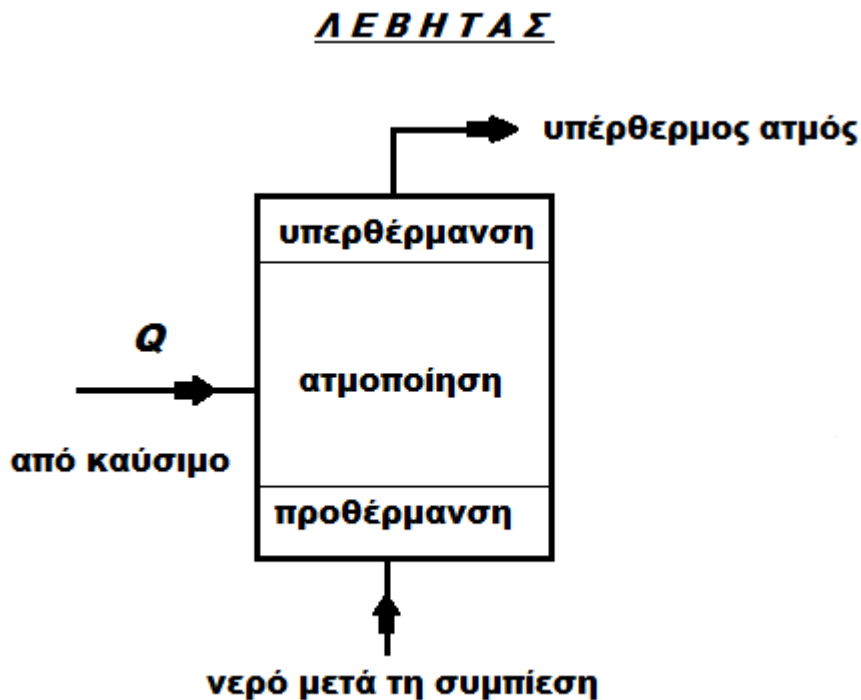
$$N_{\alpha\nu\tau\lambda.} = M_V \cdot (h_{1''} - h_1) = M_V \cdot v_1 \cdot (p_{1''} - p_1) \quad \text{όταν θεωρείται πραγματική η συμπίεση}$$

$$\text{και : } h_{1''} = h_1 + v_1 \cdot (p_{1''} - p_1) h$$

ΛΕΒΗΤΑΣ

Στο λέβητα περιέχεται η απαραίτητη για την εγκατάσταση ποσότητα νερού, το οποίο μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό. Για το σκοπό αυτό προσδίδεται η αναγκαία θερμότητα που προέρχεται από τη μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε θερμική ενέργεια.

Η πρόσδοση της θερμότητας στο νερό γίνεται υπό σταθερή πίεση, το νερό μετατρέπεται σε κεκοκρεσμένο, στη συνέχεια ατμοποιείται και μετατρέπεται σε κεκορεσμένο ατμό.

**ΣΧΗΜΑ 114**

Η ανάλυση λειτουργίας του λέβητα είναι πολύπλοκη, μια απλή όμως σχέση για την ανάλυση του κύκλου Rankine, είναι η ακόλουθη :

$$Q + M_V \cdot H_{1'} = M_V \cdot H_4 \quad \text{θεωρώντας ιδανική τη συμπίεση (εδώ συνολική ποσότητα συστήματος)}$$

$$Q + M_V \cdot H_{1''} = M_V \cdot H_4 \quad \text{θεωρώντας πραγματική τη συμπίεση (εδώ συνολική ποσότητα συστήματος)}$$

όπου :

$H_{1'}$ = η ενθαλπία στο τέλος της ιδανικής αδιαβατικής συμπίεσης

$H_{1''}$ = η ενθαλπία στο τέλος της πραγματικής αδιαβατικής συμπίεσης

H_4 = η ενθαλπία του υπέρθερμου ατμού

M_v = η ποσότητα του νερού στον κύκλο

Q = η προσφερόμενη από το καύσιμο θερμότητα

Η θερμότητα που απαιτείται είναι η θερμότητα για τη λειτουργία του λέβητα από το σημείο 1' (ή 1'') (= είσοδος στο λέβητα) μέχρι το σημείο 4 (= υπέρθερμος ατμός) δηλαδή $Q_1 = M_v \times (h_4 - h_{1'})$ (= για ιδανική συμπίεση) [ή $M_v \times (h_4 - h_{1''})$ για πραγματική συμπίεση] .

Τη θερμότητα αυτή την προσφέρει το καύσιμο και το ποσό θερμότητας είναι $Q_{\text{καυσ.}} = M_{\text{καυσ.}} \cdot H$ και ο λόγος των δύο αυτών ποσών θερμότητας είναι :

$\eta_g = \frac{Q_1}{M_{\text{καυσ.}} \cdot H} = \text{βαθμός απόδοσης της καύσης} < 1$, όπου $H = \text{θερμογόνος δύναμη (δες σελίδα 290)}$.

5.5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗ

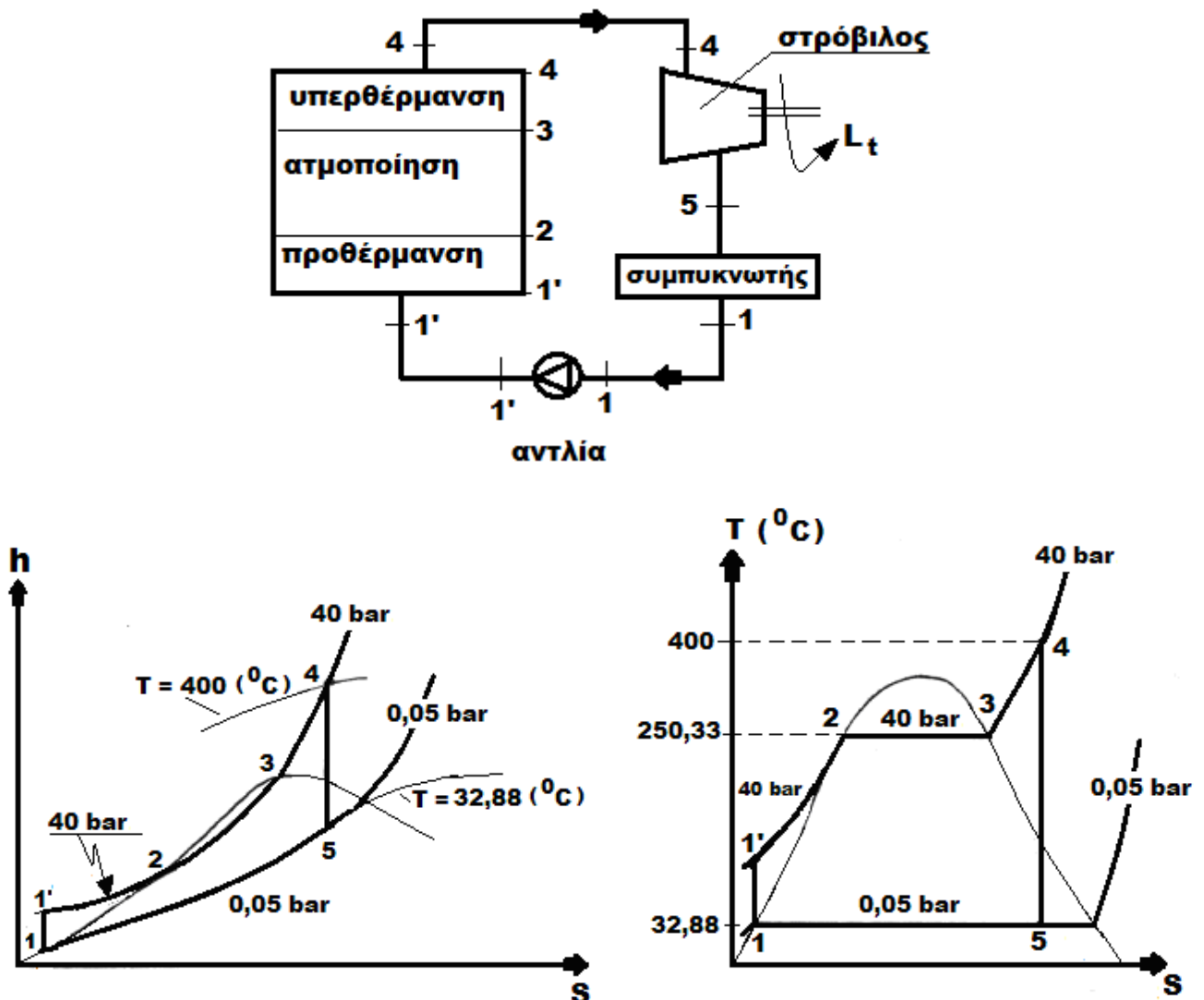
Σε ένα κύκλο RANKINE με υπερθέρμανση, το σύστημα (1 kg) εισέρχεται στο στρόβιλο σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού σε πίεση 40 bar και θερμοκρασία 400 °C, η δε πίεση στο συμπυκνωτή είναι 0,05 bar. Να υπολογισθούν :

α) το χορηγούμενο ποσό θερμότητας, β) το αποβαλλόμενο ποσό θερμότητας, γ) το παραγόμενο έργο, δ) το έργο της αντλίας, ε) ο θερμοκός βαθμός απόδοσης, στ) η μέση θερμοκρασία κατά την οποία χορηγείται η θερμότητα.

Λύση

5.5. Α. ΙΔΑΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ

Στο παρακάτω **σχήμα 115** παρουσιάζεται το διαγραμματικό της εγκατάστασης και η απεικόνιση αυτής στο διάγραμμα (I-S) και στο διάγραμμα (T-S) θεωρώντας *ιδανικές μεταβολές τη συμπίεση και την εκτόνωση*.



ΣΧΗΜΑ 115

Έχουν σημειωθεί οι θερμοκρασίες κορεσμού :

στην ελάχιστη πίεση 0,05 bar είναι 32,88 °C και στη μέγιστη πίεση 40 bar είναι 250,33 °C.

Ακολουθούν οι υπολογισμοί των ζητούμενων στοιχείων.

α) Το ποσό θερμότητας που πρέπει να χορηγηθεί στην εγκατάσταση δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$$q_1 = h_4 - h_1$$

Από το διάγραμμα (I-S) για πίεση 40 bar και θερμοκρασία 400 °C, είναι : $h_4 = 3211 \left(\frac{KJoule}{kg} \right)$, τιμή που αναγράφεται και στον πίνακα του υπέρθερμου ατμού (ΠΙΝΑΚΑΣ 8) και είναι :

$$h_4 = 3215,7 \left(\frac{KJoule}{kg} \right)$$

Η τιμή της ενθαλπίας h_1 , υπολογίζεται από τη σχέση της αντλίας :

$$N_{αντλ.} = m \cdot (h_1' - h_1) = m \cdot v_1 \cdot (p_1' - p_1) \Rightarrow h_1' = h_1 + v_1 \cdot (p_1' - p_1)$$

Από τον πίνακα -5- για πίεση κορεσμού 0,05 bar είναι :

$h_1 = 137,83 \left(\frac{KJoule}{kg} \right)$, $v_1 = 0,0010053 \left(\frac{m^3}{kg} \right)$, οπότε η ενθαλπία στο τέλος της συμπίεσης είναι :

$$h_1' = 137,83 + 0,0010053 \cdot (40 - 0,05) \cdot 10^2 = 141,846 \left(\frac{KJoule}{kg} \right)$$

Οπότε το ποσό θερμότητας είναι :

$$q_1 = (3211 - 141,846) = 3069,154 \left(\frac{KJoule}{kg} \right), \text{ και συνολικά :}$$

$$Q_1 = q_1 \cdot m = 3069,154 \left(\frac{KJoule}{kg} \right) \cdot 1(kg) = 3069,154(kJ)$$

β) Το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται, ευρίσκεται από τη μεταβολή της συμπύκνωσης, ήτοι :

$$q = h_{τελ.} - h_{αρχ.} = I_1 - I_5$$

Η ενθαλπία I_5 είναι η ενθαλπία του μίγματος στην κατάσταση 5. Η κατάσταση αυτή είναι το τέλος της εκτόνωσης στο στρόβιλο και μπορεί να προσδιοριστεί γραφικά και αναλυτικά.

Γραφικός προσδιορισμός :

Χρησιμοποιείται το διάγραμμα (I-S), δεδομένου ότι στο διάγραμμα αυτό δίδονται απ' ευθείας οι τιμές της ενθαλπίας στον άξονα. Ο προσδιορισμός γίνεται ως εξής :

Από το σημείο 4 (κατάσταση υπέρθερμου ατμού) χαράσσεται κατακόρυφη γραμμή (κατακόρυφη διότι η εκτόνωση είναι ιδανική, άρα μεταβολή σταθερής εντροπίας) και το σημείο τομής αυτής με την οριζόντιο $p = 0,05 \text{ bar}$ είναι το ζητούμενο σημείο 5. Στον κατακόρυφο άξονα του

διαγράμματος δίδονται οι τιμές της ενθαλπίας και στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι :

$$h_5 \cong 2065 \left(\frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right)$$

Αναλυτικός υπολογισμός :

Η κατακόρυφη από το σημείο 4 [είτε χαραχθεί στο διάγραμμα (T-S) είτε στο διάγραμμα (h-S)], τέμνει την ισοβαρή 0,05 bar στην περιοχή του μίγματος.

Η ενθαλπία του μίγματος δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$$h_5 = h_1 + r \cdot x_5$$

Ο βαθμός ξηρότητας στο σημείο -5- δεν δίδεται. Εάν από το σημείο -5- επί της ισοβαρούς 0,05 bar διέρχεται κάποια καμπύλη βαθμού ξηρότητας, τότε αυτή η τιμή είναι το x_5 .

Εάν δεν είναι εφικτό να προσδιοριστεί το x_5 από το διάγραμμα, τότε υπολογίζεται αναλυτικά ως εξής :

Η εκτόνωση 45 έχει θεωρηθεί ιδανική, οπότε είναι και ισοεντροπική, δηλαδή :

Η τιμή της εντροπίας του υπέρθερμου ατμού (πίεση 40 bar και θερμοκρασία 400 °C) υπολογίζεται από τον πίνακα -8-, ήτοι $S_4 = 6,762 \left(\frac{\text{KJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$ και αυτή η εντροπία ισούται με την εντροπία στο σημείο 5 : $S_4 = S_5 = 6,762 \left(\frac{\text{KJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right)$. Στο σημείο 5 το σύστημα είναι μίγμα και η εντροπία μίγματος σούται με :

$$S_4 = S_5 = S_1 + \left(\frac{r}{T} \right) \cdot x_5 \text{ και λύνοντας ως προς βαθμό ξηρότητας είναι : } x_5 = \frac{S_5 - S_1}{\left(\frac{r}{T} \right)},$$

όπου για πίεση κορεσμού = 0,05 bar από τον πίνακα νερού – ατμού σε συνθήκες κορεσμού (ΠΙΝΑΚΑΣ 5) είναι :

$$S_1 = 0,4761 \left(\frac{\text{KJoule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \right), \quad r = 2423 \left(\frac{\text{KJoule}}{\text{kg}} \right), \quad T = 32,88 + 273,15 = 306,03 \text{ (} ^\circ\text{K)}$$

και αντικαθιστώντας προκύπτει : $x_5 = 0,794$

Οπότε η ενθαλπία του μίγματος είναι :

$$h_5 = h_1 + r \cdot x_5 = 137,83 + 2423 \cdot 0,794 = 2061,692 \left(\frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right)$$

Και το ζητούμενο ποσό θερμότητας είναι :

$$q = h_{\text{τελ.}} - h_{\text{αρχ.}} = h_1 - h_5 = 137,83 - 2061,692 = -1923,862 \left(\frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right), \text{ και συνολικά :}$$

$$Q_2 = q \cdot m = -1923,862 \left(\frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right) \cdot 1(\text{kg}) = -1923,862(\text{kJ})$$

Σημ. : το σημείο (-) δικαιολογείται διότι σύμφωνα με τη σύμβαση το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται από το σύστημα θεωρείται αρνητικό.

γ) Το ποσό θερμικής ενέργειας στην εκτόνωση που διατίθεται για μηχανική ενέργεια, δίδεται από τη σχέση :

$$l_{45} = h_4 - h_5 = 3211 - 2061,692 = 1149,308 \left(\frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right)$$

δ) Το απαιτούμενο έργο για τη λειτουργία της αντλίας, είναι :

$$l_{\text{αντλ.}} = h_1' - h_1 = 141,846 - 137,830 = 4,016 \left(\frac{\text{kJoule}}{\text{kg}} \right)$$

ε) Ο θερμικός βαθμός απόδοσης, είναι :

$$\eta_{\theta} = \frac{(h_4 - h_5) - (h_1' - h_1)}{h_4 - h_1} = \frac{1149,308 - 4,016}{3211 - 141,846} = \frac{1145,292}{3069,154} = 0,373, \text{ ή } 37,3 \%$$

στ) Η θερμότητα χορηγείται κατά τη μεταβολή (1' 4). Από τη σχέση ορισμού της εντροπίας, είναι :

$$T = \frac{Q}{\Delta S} = \frac{h_4 - h_1'}{S_4 - S_1'} = \frac{3211 - 141,846}{6,762 - 0,4761} = 488,26 \text{ } ^{\circ}\text{K}$$

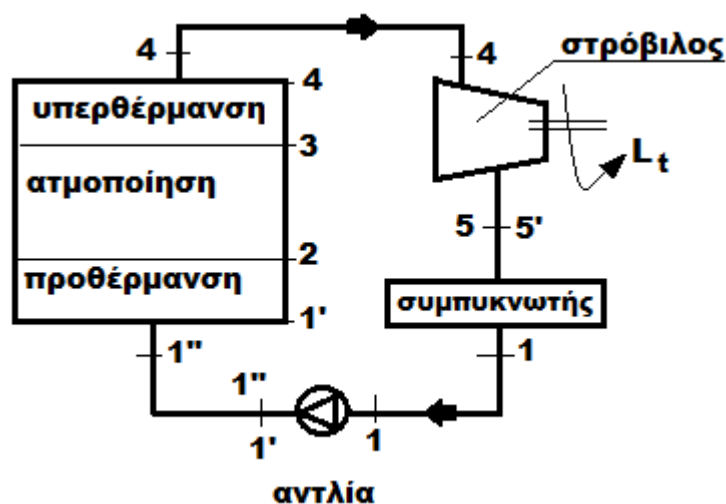
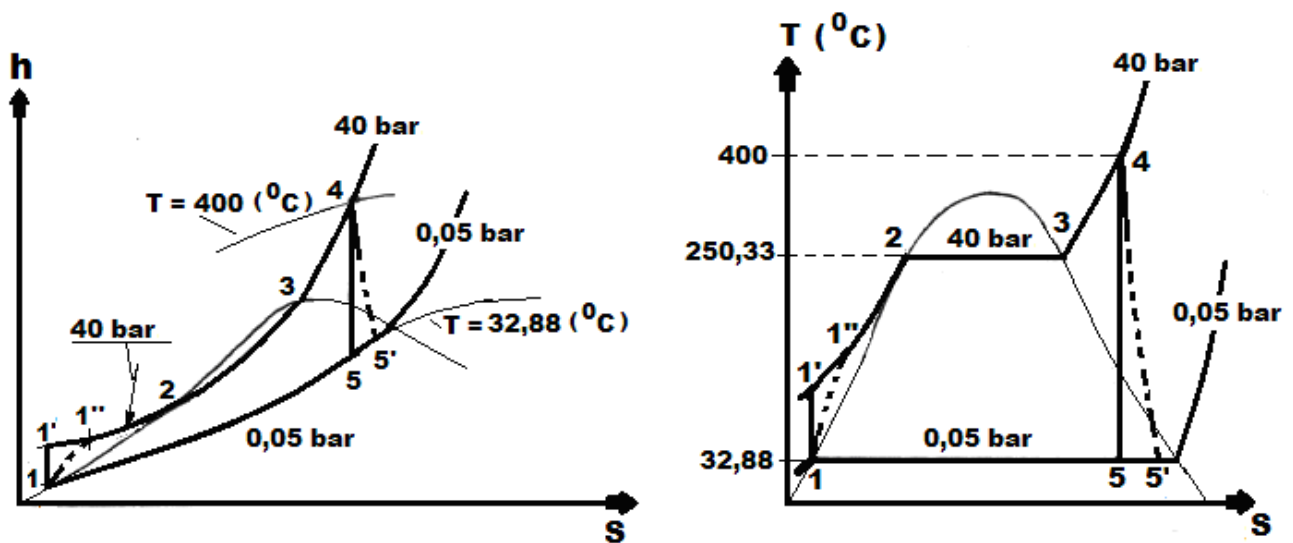
5.5. Β. ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ

Θεωρώντας πραγματικές την εκτόνωση και τη συμπίεση, με βαθμούς απόδοσης 0,85 και 0,80, επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί των ίδιων μεγεθών σε κάθε ερώτημα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διαγραμματικό της εγκατάστασης και η απεικόνιση αυτής στο διάγραμμα (T-S) και στο διάγραμμα (I-S). Θεωρώντας τώρα πραγματικές μεταβολές τη συμπίεση και την εκτόνωση.

Έγουν σημειωθεί οι θερμοκρασίες κορεσμού :

στην ελάχιστη πίεση 0,05 bar είναι 32,88 °C και στη μέγιστη πίεση 40 bar είναι 250,33 °C.



ΣΧΗΜΑ 116

α) Το ποσό θερμότητας που πρέπει να χορηγηθεί στην εγκατάσταση δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$$q_1 = h_4 - h_1.$$

Για την εύρεση της h_1 χρησιμοποιείται η σχέση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της αντλίας :

$$\eta_{αντλ.} = \frac{h_1' - h_1}{h_1' - h_1} \Rightarrow h_1' = h_1 + \frac{h_1' - h_1}{\eta_{αντλ.}} = 137,83 + \frac{141,846 - 137,830}{0,80} = 142,85 \left(\frac{KJoule}{kg} \right)$$

Οπότε το ποσό θερμότητας είναι :

$$q_1 = 3211 - 142,85 = 3068,15 \left(\frac{KJoule}{kg} \right)$$

β) Το ποσό θερμότητας που αποβάλλεται, ευρίσκεται από τη μεταβολή της συμπύκνωσης, ήτοι :

$$q = h_{τελ.} - h_{αρχ.} = h_1 - h_5$$

Η ενθαλπία I_5 χρησιμοποιείται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του στροβίλου :

$$\eta_{στρ.} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_5} \Rightarrow h_5 = h_4 - (h_4 - h_5) \cdot \eta_{στρ.} = 3211 - (3211 - 2061,692) \cdot 0,85 = 2234,088 \left(\frac{KJoule}{kg} \right)$$

Οπότε είναι :

$$q = 137,83 - 2234,088 = -2096,258 \left(\frac{KJoule}{kg} \right), \text{ που είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της ιδανικής κατάστασης, σελίδα 256.}$$

Στο σημείο 5' ποιά είναι η κατάσταση του συστήματος ;

Η θέση του σημείου 5' που αντιστοιχεί στο τέλος της πραγματικής εκτόνωσης, μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής :

Συγκρίνοντας την τιμή της ενθαλπίας h_5 με την τιμή της ενθαλπίας του κεκορεσμένου(ξηρού) ατμού στην πίεση $p = 0,50 \text{ bar}$ μέχρι την οποία γίνεται η εκτόνωση, φαίνεται η θέση του σημείου 5', δηλαδή :

$$h_5 = 2234,088 \left(\frac{KJoule}{kg} \right) < 2561,00 \left(\frac{KJoule}{kg} \right) = (h_V)_{p=0,05 \text{ bar}}$$

συνεπώς το σημείο 5' ευρίσκεται στην περιοχή του μίγματος.

Ο βαθμός ξηρότητας που αντιστοιχεί στο σημείο 5' ευρίσκεται ως εξής :

$$h_5 = h_1 + r \cdot x_5 \Rightarrow x_5 = \frac{h_5 - h_1}{r} \Rightarrow x_5 = \frac{2234,088 - 137,83}{2423} = 0,865$$

Ο βαθμός ξηρότητας μπορεί να βρεθεί και γραφικά :

Με την τιμή της ενθαλπίας $h_5 = 2234,088 \left(\frac{KJoule}{kg} \right)$ στο διάγραμμα του Mollier από τον άξονα των ενθαλπιών χαράσσεται ευθεία παράλληλη προς τον άξονα της εντροπίας μέχρι να βρεθεί η καμπύλη $p = 0,05 \text{ bar}$ οπότε το σημείο αυτής της τομής είναι το σημείο 5' και η καμπύλη του βαθμού ξηρότητας που περνά από το σημείο αυτό είναι η ζητούμενη τιμή του x_5 .

Εάν δεν διέρχεται κάποια καμπύλη, τότε υπολογίζεται με αναλογίες η τιμή αυτή ή υπολογίζεται με τον αναλυτικό τρόπο που προηγουμένως περιγράφηκε.

γ) Το ποσό θερμικής ενέργειας στην εκτόνωση που διατίθεται για μηχανική ενέργεια, δίδεται από τη σχέση :

$$l_{45} = h_4 - h_5 = 3211 - 2234,088 = 976,912 \left(\frac{KJoule}{kg} \right)$$

δ) Το απαιτούμενο έργο για τη λειτουργία της αντλίας, είναι :

$$l_{αντλ.} = h_{1''} - h_1 = 142,85 - 137,830 = 5,02 \left(\frac{KJoule}{kg} \right)$$

ε) Ο θερμικός βαθμός απόδοσης, είναι :-

$$(\eta_\theta)_{πραγματ.} = \frac{(h_4 - h_5) - (h_{1''} - h_1)}{h_4 - h_1} = \frac{975,4}{3072,912} = 0,3175 \Rightarrow 31,75\% < 37,4\% = (\eta_\theta)_{ιδανικ}$$

στ) Η θερμότητα χορηγείται κατά τη μεταβολή (1'' 4). Από τη σχέση ορισμού της εντροπίας, είναι :

$$T = \frac{q}{\Delta S} = \frac{h_4 - h_{1''}}{S_4 - S_{1''}} = \frac{3211 - 142,85}{6,762 - 0,4776} = 488,21 \text{ } ^\circ K < 488,26 \text{ } ^\circ K \text{ (σελ. 259)}$$

Είναι σωστή αυτή η μικρότερη μέση θερμοκρασία :

Είναι η μέση θερμοκρασία που χορηγείται η θερμότητα , και στην πραγματική κατάσταση είναι μικρότερη από την αντίστοιχη μέση θερμοκρασία της ιδανικής , διότι η θερμοκρασία εισόδου στο λέβητα (= θερμοκρασία μετά από τη συμπίεση) T_1 , στο τέλος της ιδανικής συμπίεσης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη T_1 στο τέλος της πραγματικής συμπίεσης και επειδή η μέγιστη θερμοκρασία είναι η ίδια , η μέση θερμοκρασία είναι μικρότερη στη πραγματική κατάσταση .

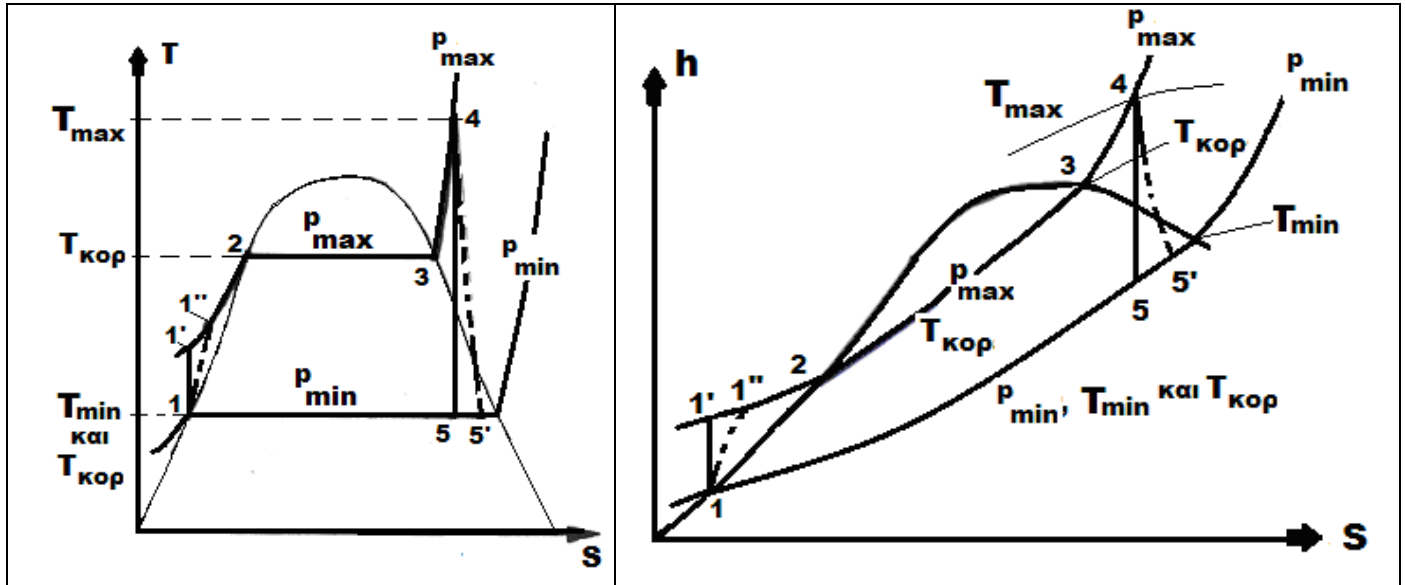
Ο προσδιορισμός των δύο αυτών θερμοκρασιών γίνεται :

Από τον ΠΙΝΑΚΑ 7 : για πίεση πίεση 40 bar υπολογίζονται οι τιμές της θερμοκρασίας που αντιστοιχούν στην τιμή της ενθαλπίας στις καταστάσεις 1' και 1'' :

Ενθαλπία $\left(\frac{KJoule}{kg} \right)$	Θερμοκρασία $^{\circ}C$
87,6	20
137,77	$20 + \frac{40 - 20}{171,0 - 87,6} \times (137,77 - 87,6) = 32,03$
142,788	$20 + \frac{40 - 20}{171,0 - 87,6} \times (142,788 - 87,6) = 53,23$
171,0	40

5.6. ΙΣΧΥΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΑΤΜΟΥ - ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ**5.6. Α. Ισχύς**

Στα δύο παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ο κύκλος Hirn (Rankine με υπερθέρμανση).

**ΣΧΗΜΑ 117**

Θεωρητική ισχύς : είναι η ισχύς που ο ατμός θα μπορούσε να αποδώσει στον άξονα του στροβίλου, εάν το ρευστό ελάμβανε μέρος σε αντιστρέψιμες μεταβολές και εάν υπήρχε έλλειψη τριβών οιασδήποτε μορφής.

Η πτώση ενθαλπίας στη φάση της εκτόνωσης είναι (στην ιδανική κατάσταση) :

$$(\Delta h)_{\text{ιδ.}} = (h_4 - h_5)$$

Η σχέση που δίνει την ισχύ διαμορφώνεται ανάλογα με το σύστημα μονάδων.

Α. Τεχνικό Σύστημα

Εάν από το στρόβιλο διέρχονται $M_V \left(\frac{kp}{h} \right)$ και η ενθαλπία δίδεται σε $\left(\frac{Kcal}{kp} \right)$, τότε η ισχύς είναι :

$$N_{\text{ιδ.}} = M_V \cdot (h_4 - h_5) \left(\frac{Kcal}{h} \right)$$

και επειδή : α) $1 Kcal = \frac{1}{632,2} (PS \cdot h)$ είναι : $N_{\text{ιδ.}} = \frac{M_V \cdot (\Delta h)_{\text{ιδ.}}}{632,2} (PS)$

$$\beta) 1 KW = 860 \left(\frac{Kcal}{l} \right), \text{ είναι : } N_{\text{ιδ.}} = \frac{M_V \cdot (\Delta h)_{\text{ιδ.}}}{860} (KW)$$

B. Διεθνές Σύστημα

Εάν από το στρόβιλο διέρχονται $M_v \left(\frac{kg}{h} \right)$ και η ενθαλπία δίδεται σε $\left(\frac{KJoule}{kg} \right)$, τότε η ισχύς είναι :

$$N_{I\Delta.} = M_v \cdot (h_4 - h_5) \left(\frac{KJoule}{h} \right)$$

και επειδή : α) $1 KW = 3600 \left(\frac{KJoule}{h} \right)$ είναι : $N_{I\Delta.} = \frac{M_v \cdot (\Delta h)_{I\Delta.}}{3600} (KW)$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την ισχύ της αντλίας τροφοδοσίας η οποία συμπιέζει το κεκορεσμένο υγρό από τη χαμηλή πίεση στην υψηλή πίεση του κύκλου, είναι :

A) Τεχνικό Σύστημα :

$$N_{I\Delta} = \frac{[(h_4 - h_5) - (h_1' - h_1)] \cdot M_v}{860} (KW)$$

$$N_{I\Delta} = \frac{[(h_4 - h_5) - (h_1' - h_1)] \cdot M_v}{632,2} (PS)$$

$$N_{I\Delta} = \frac{[(h_4 - h_5) - (h_1' - h_1)] \cdot M_v}{3600} (KW)$$

B) Διεθνές Σύστημα :

Θεωρώντας τώρα τις πραγματικές μεταβολές (συμπύεση και εκτόνωση), οι προηγούμενες σχέσεις είναι :

A) Τεχνικό Σύστημα :

$$N_{\text{Πραγμ.}} = \frac{[(h_4 - h_5') - (h_1'' - h_1)] \cdot M_v}{860} (KW)$$

$$N_{\text{Πραγμ.}} = \frac{[(h_4 - h_5') - (h_1'' - h_1)] \cdot M_v}{632,2} (PS)$$

B) Διεθνές Σύστημα :

$$N_{\text{Πραγμ.}} = \frac{[(h_4 - h_5') - (h_1'' - h_1)] \cdot M_v}{3600} (KW)$$

5.6.B ΘΕΡΜΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Διαχωρίζοντας τις ιδανικές και τις πραγματικές μεταβολές, ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι :

$$\text{A)} \text{ Ιδανικές μεταβολές : } \eta_{\theta} = \frac{(h_4 - h_5) - (h_1' - h_1)}{(h_4 - h_1)}$$

$$\text{B)} \text{ Πραγματικές μεταβολές : } \eta_{\theta} = \frac{(h_4 - h_5') - (h_1'' - h_1)}{(h_4 - h_1'')}$$

Για να προσδοθεί στο υγρό μια θερμική ισχύς :

$$\alpha) M_v \cdot (h_4 - h_1) \left(\frac{\text{Kcal}}{h} \text{ ή } \frac{\text{KJoule}}{h} \right) \text{ με ιδανική συμπίεση}$$

$$\beta) M_v \cdot (h_4 - h_1) \left(\frac{\text{Kcal}}{h} \text{ ή } \frac{\text{KJoule}}{h} \right) \text{ με πραγματική συμπίεση}$$

πρέπει να δοθεί στο λέβητα (για να αντιμετωπιστούν οι απώλειες εξ αιτίας μη πλήρους καύσεως, οι απώλειες στην καπνοδόχο και εν γένει οι θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον) ποσό θερμικής ενέργειας μεγαλύτερο από το προαναφερόμενο, ήτοι ποσό θερμότητας που προσφέρει το καύσιμο :

$$M_{\text{καυσ.}} \cdot H_i > M_v \cdot (h_4 - h_1) \text{ (ιδανική συμπίεση)}$$

$$M_{\text{καυσ.}} \cdot H_i > M_v \cdot (h_4 - h_1'') \text{ (πραγματική συμπίεση)}$$

Οπότε ορίζεται **ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ της ΚΑΥΣΕΩΣ** :

$$\eta_g = \frac{M_v \cdot (h_4 - h_1)}{M_{\text{καυσίμου}} \cdot H_i} \text{ (ιδανική συμπίεση)}, \quad \eta_g = \frac{M_v \cdot (h_4 - h_1'')}{M_{\text{καυσίμου}} \cdot H_i} \text{ (πραγματική συμπίεση)}$$

Ο βαθμός απόδοσης της καύσεως λαμβάνει τιμές : $0,60 < \eta_g < 0,92$

5.6.Γ ΟΛΙΚΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Ο ολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης, δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$$\eta_{ολ.} = \eta_{θερμ.} \cdot \eta_g \cdot \eta_m \text{ με τιμές που κυμαίνονται : } 0,20 < \eta_{ολ.} < 0,35$$

Διακρίνονται οι περιπτώσεις :

α) Θερμοηλεκτρική εγκατάσταση

Στην περίπτωση αυτή, η σχέση του ολικού βαθμού απόδοσης είναι :

$$\eta_{ολ.} = \eta_{θερμ.} \cdot \eta_g \cdot (\eta_m \cdot \eta_{ηλ.}), \text{ όπου } (\eta_m \cdot \eta_{ηλ.}) = 0,98$$

β) Εγκατάσταση ναυτικής πρόωσης :

$$\eta_{ολ.} = \eta_{θερμ.} \cdot \eta_g \cdot \eta_m \cdot (\eta_{πρόωσης}), \text{ όπου } \eta_{πρόωσης} = (0,50 - 0,65),$$

ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση :

$$\eta_{πρόωσης} = 0,836 - 0,000165 \cdot D^{1/6}, \text{ όπου } \eta = \text{αριθμός στροφών της έλικας,}$$

$$D = \text{όγκος της γάστρας σε (m}^3\text{).}$$

Σημείωση

Στην έκφραση του ολικού βαθμού απόδοσης, εμφανίζεται ο βαθμός απόδοσης της καύσης :

$$\eta_g = \frac{Q_1}{M_{καυσ.} \cdot H} < 1, \text{ δεδομένου ότι το ποσό της θερμότητας που μπορεί να δώσει το καύσιμο είναι}$$

$(M_{καυσ.} \cdot H)$ και είναι πάντοτε μεγαλύτερο από το ποσό θερμότητας που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση δηλαδή το Q_1 , για λόγους ατελούς καύσης, απώλεια στα καυσαέρια, και άλλες αιτίες απωλειών.

Καύσιμο, είναι η ουσία η οποία κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες (διαφορετικές για κάθε ουσία) αντιδρά με το οξυγόνο παράγοντας θερμότητα.

Χαρακτηριστικό κάθε καυσίμου είναι η **θερμαντική ικανότητα H ή θερμογόνος δύναμη**.

Ορίζεται **θερμογόνος δύναμη ή θερμαντική ικανότητα**, το ποσό της θερμότητας που ελευθερώνεται κατά την πλήρη καύση ενός kg ή kp καυσίμου.

Κατά την καύση παράγεται ατμός νερού, που οφείλεται :

1. στην αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου
2. στην παρουσία νερού υπό μορφή υγρασίας σε όλα τα καύσιμα

Εάν υπολογισθεί η θερμογόνος δύναμη με τρόπον ώστε ο ατμός που περιέχεται στα καυσάερια να έχει συμπυκνωθε πλήρως, τότε ορίζεται η ανωτέρα θερμογόνος δύναμη H_S στην οποία περιλαμβάνεται και το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για τη συμπύκνωση.

Εάν ο ατμός δεν είναι συμπυκνωμένος κατά τον υπολογισμό της H , τότε ορίζεται η κατωτέρα θερμογόνος δύναμη H_i που υπολογίζεται από την :

$$H_i = H_S - m \cdot r, \text{ όπου :}$$

m = το βάρος του νερού που παράγεται από 1 kg ή 1kp καυσίμου

r = συντελεστής που μεταβάλλεται με την ποσοστιαία αναλογία του υδρογόνου στο κάυσιμο, την υγρασία του αέρα και τη θερμοκρασία στην οποία ψύχονται τα παράγωγα της καύσης.

Είναι :

$$H_i = H_S - \frac{600 \cdot (U\% + 9 \cdot H_2\%)}{100}, \text{ όπου } U\% = \text{ποσοστιαία παρουσία της υγρασίας, και}$$

$$H_S = 10^{-2} \cdot \left[8100 \cdot C\% + 34.500 \cdot \left(H_2\% - \frac{O_2\%}{8} \right) + 2250 \cdot S\% \right] \text{ σχέση του } \mathbf{DOYLONG}$$

5.7. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Να υπολογιστεί η ανωτέρα και η κατωτέρα θερμογόνος δύναμη καυσίμου με την παρακάτω σύνθεση :

$$C = 83,5\% \quad H_2 = 4,6\% \quad O_2 = 4,7\% \quad S = 0,2\% \quad U = 2,5\% \quad (\text{υγρασία})$$

Λύση

Εφαρμόζοντας τη σχέση του **DOYLONG** είναι :

$$H_S = 10^{-2} \cdot \left[8100 \cdot 83,5 + 34.500 \cdot \left(4,6 - \frac{4,7}{8} \right) + 2250 \cdot 0,2 \right] = 8152 \left(\frac{kcal}{kp} \right)$$

$$\text{Οπότε : } H_i = 8152 - \frac{600 \cdot (2,5 + 9 \cdot 4,6)}{100} \cong 7890 \left(\frac{kcal}{kp} \right)$$

5.8. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΤΜΟΥ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟΝ ΒΑΘΜΟ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ RANKINE ΜΕ ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗ

Εξετάζοντας τη σχέση του θερμικού βαθμού απόδοσης της σελίδας 266, είτε για την περίπτωση Α για ιδανικές μεταβολές συμπίεσης και εκτόνωσης, είτε για την περίπτωση Β για πραγματικές μεταβολές συμπίεσης και εκτόνωσης, σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των περιπτώσεων γ) και δ) των περιπτώσεων Α) και Β) του παραδείγματος στις σελίδες (254 – 260), προκύπτει ότι το ποσό θερμικής ενέργειας για τη λειτουργία της αντλίας είναι πολύ - πολύ μικρό σε σχέση με το ποσό θερμικής ενέργειας που διατίθεται κατά την εκτόνωση.

Έτσι, θεωρώντας για το βαθμό απόδοσης τις σχέσεις

$$\mathbf{A)} \text{ Ιδανικές μεταβολές : } \eta_{\theta} = \frac{(h_4 - h_5) - (h_{1'} - h_1)}{(h_4 - h_{1'})}$$

$$\mathbf{B)} \text{ Πραγματικές μεταβολές : } \eta_{\theta} = \frac{(h_4 - h_{5'}) - (h_{1''} - h_1)}{(h_4 - h_{1''})}$$

συνεπάγεται ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης είναι τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερη είναι η θερμική πτώση $(h_4 - h_5)$ (για ιδανική εκτόνωση) ή $(h_4 - h_{5'})$ (για πραγματική εκτόνωση) και όσο μικρότερη είναι η προσδιδόμενη θερμότητα $(h_4 - h_{1'})$ (για ιδανική συμπίεση) ή $(h_4 - h_{1''})$ (για πραγματική συμπίεση), επομένως όσο μεγαλύτερη είναι η αισθητή θερμότητα του νερού άρα και η θερμοκρασία του νερού τροφοδοτήσεως του λέβητα δηλαδή το σημείο 1' για την ιδανική συμπίεση ή το σημείο 1'' για την πραγματική συμπίεση.

Τελικά ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine με υπερθέρμανση μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας τη θερμική πτώση, στην εκτόνωση, με κατάλληλη εκλογή της αρχικής και τελικής κατάστασης του ατμού.

Οι αρχικές και τελικές συνθήκες του ατμού επιδρούν στο βαθμό απόδοσης και αυτό φαίνεται από τη σχέση του βαθμού απόδοσης του κύκλου αυτού συγκρίνοντάς τον με τον βαθμό απόδοσης του (αντίστοιχου) κύκλου Carnot.

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Carnot δίδεται από την σχέση :

$$(\eta)_{\text{CARNOT}} = 1 - \frac{(T_{\text{ελάχιστη}})}{(T_{\text{μέγιστη}})}$$

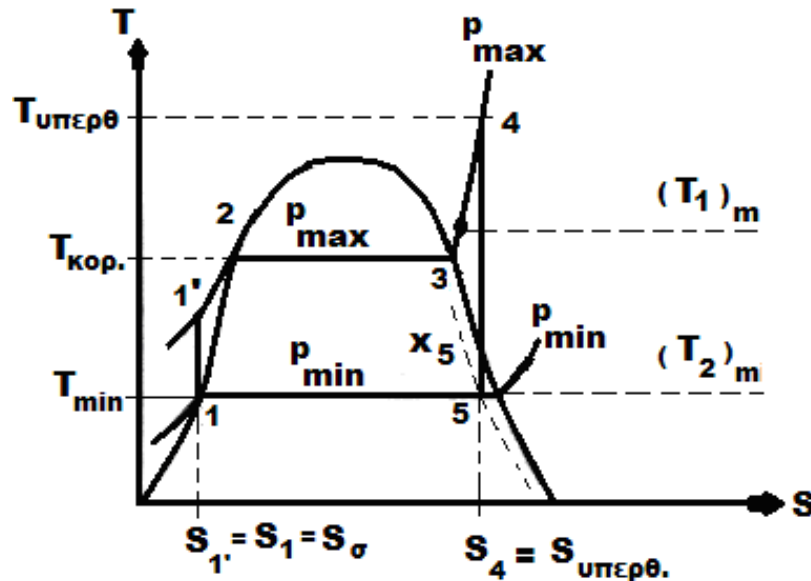
Επομένως για να γίνει σύγκριση με το θερμικό βαθμό απόδοσης του αντίστοιχου κύκλου CARNOT, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine με υπερθέρμανση εκφράζεται με τις

αντίστοιχες μέσες θερμοκρασίες, δηλαδή εκείνη στην οποία χορηγείται η θερμότητα κατά τη μεταβολή 4-1' και εκείνη στην οποία αποβάλλεται η θερμότητα κατά τη μεταβολή 5-1.

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου Rankine με υπερθέρμανση εκφράζεται με την παρακάτω σχέση :

$$\eta = 1 - \frac{(T_2)_m}{(T_1)_m},$$

όπου $(T_1)_m$ και $(T_2)_m$ είναι οι μέσες ακραίες (ελάχιστη και μέγιστη) θερμοκρασίες του κύκλου Rankine με υπερθέρμανση, και οι οποίες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



ΣΧΗΜΑ 118

Οι θερμοκρασίες αυτές υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$(T_1)_m = \frac{Q_1}{\Delta S} = \frac{h_{\text{υπερθ}} - h_{1'}}{S_{\text{υπερθ}} - S_{1'}} = \frac{h_4 - h_{1'}}{S_4 - S_{1'}}$$

$$(T_2)_m = \frac{Q_2}{\Delta S} = \frac{h_{\text{εκτον}} - h_{\sigma}}{S_{\text{εκτον}} - S_{\sigma}} = \frac{h_5 - h_1}{S_5 - S_1}$$

Από τη σχέση $\eta = 1 - \frac{(T_2)_m}{(T_1)_m}$, φαίνεται ότι ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται :

I. με την αύξηση της θερμοκρασίας $(T_1)_m$

II. με τη μείωση της ελάχιστης θερμοκρασίας $(T_2)_m$

III. με τα δύο ταυτόχρονα

Εξετάζονται οι παραπάνω περιπτώσεις :

I. Η αύξηση της θερμοκρασίας $(T_1)_m$ μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους :

I.A. με την αύξηση της πίεσης στο λέβητα (μέγιστη πίεση p_{\max})

I.B. με την αύξηση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης $T_{\text{υπερθ}} = T_4$

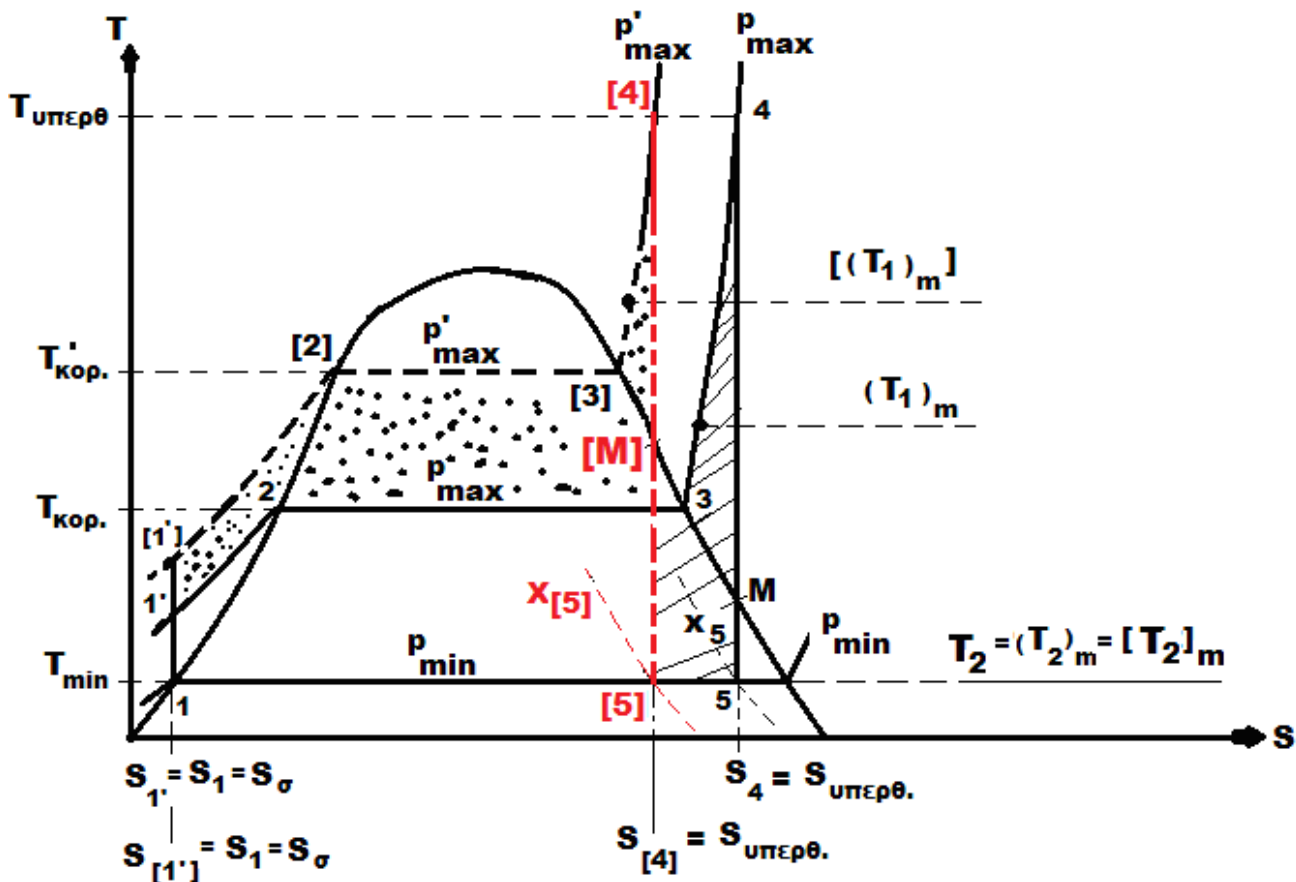
I.A. αύξηση της πίεσης στο λέβητα

Η μέθοδος αυτή εξετάζεται διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία υπερθέρμανσης T_4 καθώς και την πίεση συμπύκνωσης p_{\min} .

Η αύξηση της μέγιστης πίεσης έχει ως συνέπεια την **αύξηση της πίεσης στο λέβητα** οπότε αυξάνεται η θερμοκρασία κορεσμού $T_{\text{κορ}}' = T_{[2]}$ **τώρα** (από $T_{\text{κορ}} = T_2$), δηλαδή η θερμοκρασία βρασμού (= ατμοποίησης) του νερού.

Έτσι, **αυξάνεται η ΜΕΣΗ ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ** $(T_1)_m$ στην οποία προσδίδεται θερμότητα στον ατμό νερού με συνέπεια την αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης που τώρα είναι μεγαλύτερος.

Στο διάγραμμα η σκιαγραφημένη (επιφάνεια με τελίτσες) επιφάνεια παριστάνει την αύξηση του έργου και η διαγραμμισμένη επιφάνεια παριστάνει την μείωση του έργου.



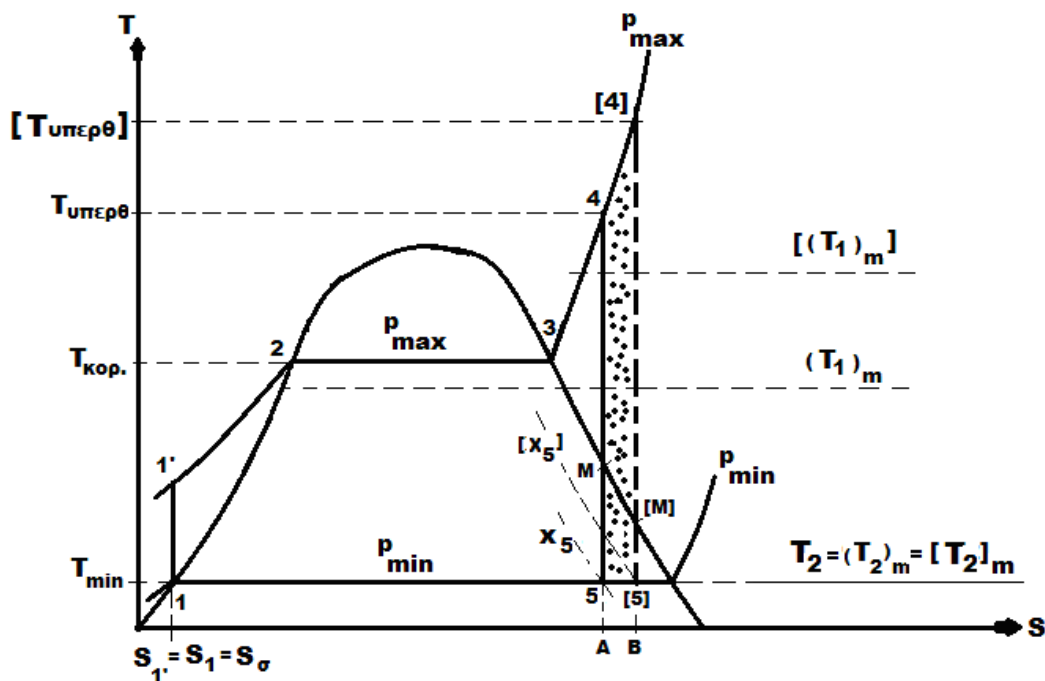
ΣΧΗΜΑ 119

Στο διάγραμμα (T-S) φαίνεται ότι η εκτόνωση μετατοπίζεται προς τα αριστερά = [4][5] με αποτέλεσμα στο τέλος της εκτόνωσης ο ατμός εγκαταλείπει στο στρόβιλο, σημείο [5], με βαθμό ξηρότητας μικρότερο από πριν, $x_{[5]} < x_5$, δηλαδή αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας στο στρόβιλο (άλλωστε φαίνεται ότι το σύστημα εισέρχεται τώρα νωρίτερα στην περιοχή του μίγματος στο σημείο [M] αντί M, κάτι που είναι ανεπιθύμητο διότι από το σημείο [M] και μετά το ποσοστό υγρασίας είναι μεγαλύτερο και προκαλείται φθορά στα πτερύγια του στρόβιλου.

Οι τιμές της πίεσης στο λέβητα είναι ένα κριτήριο διάκρισης των λεβήτων :

- λέβητες χαμηλής πίεσης όταν η πίεση στο λέβητα είναι $\leq 1 \text{ bar}$
- λέβητες μέσης πίεσης όταν η πίεση στο λέβητα είναι $1 \text{ bar} < p_{\text{λεβητα}} \leq 15 \text{ bar}$
- υψηλής πίεσης όταν η πίεση στο λέβητα είναι $15 \text{ bar} < p_{\text{λεβητα}} \leq 100 \text{ bar}$
- πολύ υψηλής πίεσης $p_{\text{λεβητα}} > 100 \text{ bar}$

I.B. με την αύξηση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης $T_{\text{υπερθ}} = T_4$



ΣΧΗΜΑ 120

Αυξάνεται η θερμοκρασία υπερθέρμανσης του ατμού χωρίς να αυξηθεί η μέγιστη πίεση.

Η σκιαγραφημένη περιοχή του διαγράμματος παριστάνει την αύξηση του έργου και η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη 4 [4], δηλαδή η επιφάνεια $A4 [4] B$ παριστάνει το πρόσθετο ποσό θερμότητας για την παραπάνω υπεθέρμανση.

Η συνολική επίδραση της περαιτέρω υπερθέρμανσης είναι η αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης, δεδομένου ότι αυξάνεται η μέση θερμοκρασία χορήγησης της θερμότητας που τώρα είναι η $[(T_1)_m]$ από την $(T_1)_m$ που ήταν πριν την νέα υπερθέρμανση.

Επιπροσθέτως υδαπιστώνεται και ένα ακόμη επιθυμητό αποτέλεσμα που είναι η αύξηση του βαθμού ξηρότητας στο τέλος της εκτόνωσης (= έξοδο του στροβίλου) που τώρα είναι το $[x_5] > x_5$ (= βαθμός ξηρότητας πριν την περαιτέρω υπερθέρμανση).

Αυτό σημαίνει ότι μειώνεται το ποσοστό υγρασίας στο στρόβιλο κατά την εκτόνωση και αυτό φαίνεται στο διάγραμμα διότι το σύστημα στην φάση της εκτόνωσης τώρα εισέρχεται στην περιοχή του μίγματος αργότερα από πριν : με την περαιτέρω υπερθέρμανση η είσοδος στην περιοχή του μίγματος γίνεται στο σημείο **[M]** που είναι χαμηλότερα του σημείου **M** (χωρίς την περαιτέρω υπερθέρμανση) .

Η θερμοκρασία υπερθέρμανσης περιορίζεται από την αντοχή των μετάλλων που θα χρησιμοποιηθούν στα πτερύγια των βαθμίδων του στροβίλου και μπορεί να φθάσει μέχρι περίπου 600°C .

Για υψηλότερες θερμοκρασίες πρέπει να χρησιμοποιηθούν προηγμένα υλικά (πχ κεραμικά) για την κατασκευή των πτερυγίων του στροβίλου , κάτι που αυξάνει το κόστος.

Γενικά πάντως , η αύξηση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης (που ασφαλώς τα όριά της εξαρτώνται από την αντοχή των κατασκευαστικών υλικών και τα οκόστος τους) συνεπάγεται την αύξηση του παραγώμενου έργου σχετικά μεγαλύτερη του ποσού της απαιτούμενης θερμότητας , άρα διαπιστώνεται άυξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης.

II. με τη μείωση της ελάχιστης θερμοκρασίας $(T_2)_m$: αυτή η διαδικασία γίνεται με την ελάττωση της πίεσης στη φάση της συμπίκνωσης.

Για λόγους σύγκρισης έχει διατηρηθεί η μέγιστη θερμοκρασία στην οποία γίνεται η είσοδος στο στρόβιλο δηλαδή η θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού στο σημείο 4.

Η μείωση της πίεσης συμπίκνωσης από p_{\min} σε $(p_{\min})_a$ συνεπάγεται ελάττωση της αντίστοιχης θερμοκρασίας κορεσμού από T_{\min} σε $(T_{\min})_a$ και προφανώς διαπιστώνεται αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσεως.

Στο διάγραμμα **121 α** η σκιαγραφημένη επιφάνεια παριστάνει την αύξηση του έργου στον κύκλο και στο διάγραμμα **121 β** η επιφάνεια $[1_a' 1' 1 B A 1_a 1_a']$ παριστάνει το πρόσθετο ποσό θερμότητας που είναι πολύ μικρό στο συνολικό προσφερόμενο ποσό θερμότητας.

Έτσι, η μείωση της χαμηλής πίεσης στο συμπυκνωτή, συνεπάγεται ως συνολικό αποτέλεσμα, την αύξηση του θερμικού βαθμού άποδοσης.

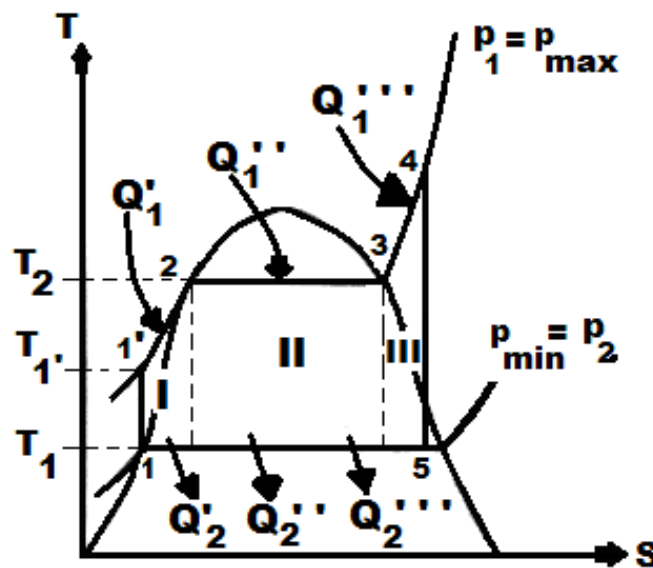
**5.10. ΕΠΙΛΟΓΗ ΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΣΕ ΕΝΑ ΚΥΚΛΟ RANKINE ΜΕ ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗ**

Μετά την ανάλυση των παραπάνω περιπτώσεων , αναζητείται η καλύτερη λύση για τηναύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι :

$$\eta_g = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} , \quad \text{όπου } Q_1 = \text{ποσό θερμότητας που προσδίδεται}$$

$$Q_2 = \text{ποσό θερμότητας που αποβάλλεται}$$



Με αναφορά στο παραπάνω σήμα είναι :

$Q_1 =$ είναι το άθροισμα των ποσοτήτων θερμότητας που προσδίδονται για :

$$(\text{την προθέρμανση } 1'2) + (\text{για την ατμοποίηση } 23) + (\text{για την υπερθέρμανση } 34) =$$

$$Q_1' + Q_1'' + Q_1''' =$$

$Q_2 =$ είναι το άθροισμα των ποσοτήτων θερμότητας που αποβάλλονται στις αντίστοιχες μεταβολές :

$$Q_2' + Q_2'' + Q_2''' =$$

Χωρίζοντας τον κύκλο του σχήματος σε επιμέρους κύκλους, ο βαθμός παόδοσης του κάθε επιμέρους κύκλου ξεχωριστά είναι :

$$\text{Κύκλος I: } \eta_I = \frac{Q_1' - Q_2'}{Q_1'}$$

$$\text{Κύκλος II: } \eta_{II} = \frac{Q_1'' - Q_2''}{Q_1''}$$

$$\text{Κύκλος III: } \eta_{III} = \frac{Q_1''' - Q_2'''}{Q_1'''}$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση του η_g είναι :

$$\begin{aligned} \eta_g &= \frac{(Q_1' + Q_1'' + Q_1''') - (Q_2' + Q_2'' + Q_2''')}{(Q_1' + Q_1'' + Q_1''')} = \\ &= \frac{(Q_1' - Q_2') + (Q_1'' - Q_2'') + (Q_1''' - Q_2''')}{Q_1' + Q_1'' + Q_1'''} = \\ &= \frac{\eta_I \cdot Q_1' + \eta_{II} \cdot Q_1'' + \eta_{III} \cdot Q_1'''}{Q_1' + Q_1'' + Q_1'''} = \frac{\Sigma(\eta_i \cdot Q_{1i})}{\Sigma(Q_{1i})} \end{aligned}$$

Επειδή είναι $\eta_I < \eta_{II} < \eta_{III}$ και επειδή ο βαθμός απόδοσης η_{II} δεν μεταβάλεται, γίνεται προσπάθεια :

- να μειωθεί ο βαθμός απόδοσης η_I του κύκλου I
- και να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης η_{III} του κύκλου III.

Ειδικότερα, διακρίνονται οι περιπτώσεις :

- A.** γίνεται προσπάθεια να αυξηθεί το εμβαδόν του κύκλου III και αυτό μπορεί να επιτευχθεί με :
- μείωση της πίεσης συμπυκνώσεως
 - αύξηση της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης
 - αύξηση της πίεσης υπερθέρμανσης

- B.** γίνεται προσπάθεια να μειωθεί η έκταση του κύκλου I και αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση ποσότητας ατμού για προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας του λέβητα.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Α

Έχοντας αναλύσει τις τρεις αυτές λύσεις, θεωρείται ότι έχουν εξαντληθεί οι δυνατότητες σε κάθε μια από αυτές. Συνεπώς η αύξηση του κύκλου ΙΙΙ επιτυγχάνεται με περαιτέρω υπερθέρμανση του ατμού. Αυτό οδηγεί στη μέθοδο της **ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗΣ** του ατμού μετά την εκτόνωση στο στρόβιλο.

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Β

Η λύση χρησιμοποίησης ποσότητας ατμού, οδηγεί στη μέθοδο της **ΑΠΟΜΑΣΤΕΥΣΗΣ**.