

ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΨΥΚΤΙΚΩΝ



ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΟΥΛΙΑΝΟΣ



ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΙΚΡΩΝ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ
ΓΕΝΙΚΗ ΣΥΝΟΜΟΣΠΟΝΔΙΑ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΩΝ
ΒΙΟΤΕΧΝΩΝ ΕΜΠΟΡΩΝ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΨΥΚΤΙΚΩΝ

ΔΡΑΣΕΙΣ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗΣ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΚΠΡΟΣΩΠΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΓΣΕΒΕΕ ΣΤΑ
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΡΙΣΗΣ ΔΙΑΜΕΣΟΥ ΠΙΛΟΤΙΚΩΝ ΣΧΕΔΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗΣ - ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΩΠΩΝ

ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΨΥΚΤΙΚΩΝ

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΟΥΛΙΑΝΟΣ



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ, ΚΟΙΝΩΝΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ



**ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
"ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ"**
Προσανατολισμός στον Άνθρωπο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

ΙΜΕ ΓΣΕΒΕΕ

Ινστιτούτο Μικρών Επιχειρήσεων

Γενική Συνομοσπονδία Επαγγελματιών Βιοτεχνών Εμπόρων Ελλάδας

Αριστοτέλους 46

104 33, Αθήνα

Τηλ.: 210 8846 852

Φαξ: 210 8846 853

E-mail: info@imegsevee.gr

www.imegsevee.gr

Εκδότης: **ΙΜΕ ΓΣΕΒΕΕ**

Χρονολογία έκδοσης: **2014**

Τίτλος: **ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΨΥΚΤΙΚΩΝ**

Συγγραφέας: **Δημήτριος Πουλιανός**

Επιμέλεια-Διόρθωση: **Αναστασία Σακελλαρίου**

Σχεδιασμός – παραγωγή:

 **ACCESS ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΕΧΝΕΣ Α.Ε.**

Ποσειδώνος 23 & Συντ. Δαβάκη

144 51 Μεταμόρφωση

Τηλ.: 210 3804 460 - Fax: 210 3847 447

e-mail: access@access.gr

www.access.gr

 **ΙΜΕ ΓΣΕΒΕΕ**

ISBN: 978-618-5025-38-0

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΞΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ (P-H, T-S) 11

1.1	Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s), κύκλου ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών	12
1.2	Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h), κύκλου ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών	14
1.3	Σύνοψη κεφαλαίου	16
1.4	Ασκήσεις αυτοαξιολόγησης	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΞΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ 23

2.1	Βασικός θεωρητικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.....	25
2.1.1	Περιγραφή βασικού θεωρητικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών	25
2.1.2	Θερμοδυναμικές μεταβολές βασικού θεωρητικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s).....	26
2.1.3	Θερμοδυναμικές μεταβολές βασικού θεωρητικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h)	31
2.1.4	Θεωρητικός Συντελεστής Συμπεριφοράς (COP _{th}) του βασικού θεωρητικού ψυκτικού κύκλου με μηχανική συμπίεση ατμών	32
2.2	Θεωρητικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη συμπυκνώματος και αναρρόφηση υπέρθερμου ατμού	35
2.2.1	Περιγραφή θεωρητικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη συμπυκνώματος και αναρρόφηση υπέρθερμου ατμού	35
2.2.2	Θερμοδυναμικές μεταβολές θεωρητικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη συμπυκνώματος και αναρρόφηση υπέρθερμου ατμού σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) και πίεσης-ενθαλπίας (P-h)	39
2.2.3	Θεωρητικός Συντελεστής Συμπεριφοράς (COP _{th}) του ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη και υπερθέρμανση.....	45
2.3	Πραγματικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη συμπυκνώματος και αναρρόφηση υπέρθερμου ατμού	46
2.3.1	Χαρακτηριστικά ψυκτικής διάταξης με υπόψυξη συμπυκνώματος και αναρρόφηση υπέρθερμου ατμού	46

2.3.2	Θερμοδυναμικές μεταβολές πραγματικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη συμπυκνώματος και αναρρόφηση υπέρθερμου ατμού σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) και πίεσης-ενθαλπίας (P-h).....	47
2.3.3	Πραγματικός Συντελεστής Συμπεριφοράς (COP) του ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη και υπερθέρμανση.....	48
2.4	Σύνοψη κεφαλαίου	49
2.5	Ασκήσεις αυτοαξιολόγησης	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΧΑΡΑΞΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΞΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ

59

3.1	Χάραξη θερμοδυναμικών μεταβολών βασικού θεωρητικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).....	60
3.2	Χάραξη θερμοδυναμικών μεταβολών πραγματικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h)	62
3.3	Σύνοψη κεφαλαίου	65
3.4	Ασκήσεις αυτοαξιολόγησης	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΞΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ

69

4.1	Παραδείγματα υπολογισμών ενεργειακών μεγεθών εγκαταστάσεων μηχανικής συμπίεσης ατμών.....	69
4.2	Σύνοψη κεφαλαίου	76
4.3	Ασκήσεις αυτοαξιολόγησης	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ

79

5.1	Κλίμακες και μεγέθη ψυχομετρικού χάρτη	81
5.2	Σύνοψη κεφαλαίου	86
5.3	Ασκήσεις αυτοαξιολόγησης	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΟΝ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟ ΧΑΡΤΗ

89

6.1	Θέρμανση υγρού αέρα με σταθερή την ειδική υγρασία (αισθητή θέρμανση).....	90
6.2	Θέρμανση και ύγρανση υγρού αέρα	91
6.3	Ψύξη υγρού αέρα χωρίς αφύγρανση.....	93
6.4	Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα.....	94
6.5	Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα που καταλήγει σε μη κορεσμένο αέρα.....	96
6.6	Αδιαβατική ψύξη υγρού αέρα	97
6.7	Συντελεστής αισθητής θερμότητας (SHF).....	98
6.8	Σύνοψη κεφαλαίου	99
6.9	Ασκήσεις αυτοαξιολόγησης	100

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΑΕΡΑ
ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟΝ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟ ΧΑΡΤΗ 103**

7.1	Παράδειγμα υπολογισμού ψυχομετρικών μεγεθών ψύξης αέρα με αφύγρανση σε μη κορεσμένο αέρα.....	104
7.2	Παράδειγμα υπολογισμού ψυχομετρικών μεγεθών θέρμανσης αέρα με ύγρανση και σταθερή τη σχετική υγρασία.....	105
7.3	Παράδειγμα υπολογισμού ψυχομετρικών μεγεθών θέρμανσης αέρα με ύγρανση και μεταβολή της σχετικής υγρασίας.....	107
7.4	Σύνοψη κεφαλαίου	108
7.5	Ασκήσεις αυτοαξιολόγησης	109

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 111

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1. Απαντήσεις ασκήσεων αυτοαξιολόγησης 113

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2. Πίνακες και διαγράμματα 135

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΞΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ (P-h, T-s)



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα διαγράμματα των κύκλων ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών, πίεσης-ενθαλπίας (P-h) και θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s), είναι πολύ σημαντικά, διότι πάνω σε αυτά απεικονίζονται οι θερμοδυναμικές μεταβολές και τα ποσά της μεταφερόμενης θερμότητας-ενέργειας των κύκλων ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών.



ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η περιγραφή των δύο βασικών διαγραμμάτων (P-h) και (T-s), έτσι ώστε να μπορούν να διακριθούν οι κλίμακες και τα θερμοδυναμικά μεγέθη τους.



ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΤΟΧΟΙ

Μετά τη μελέτη του κεφαλαίου, θα είσαι ικανός/ικανή:

1. Να αναγνωρίζεις τις κλίμακες που απεικονίζονται στα διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) και πίεσης-ενθαλπίας (P-h).
2. Να αναγνωρίζεις τα θερμοδυναμικά μεγέθη που απεικονίζονται στα διαγράμματα θερμοκρασίας- εντροπίας (T-s) και πίεσης-ενθαλπίας (P-h).
3. Να γνωρίζεις τις έννοιες των θερμοδυναμικών μεγεθών που αντιπροσωπεύουν τα διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) και πίεσης-ενθαλπίας (P-h).



ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ/ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

- Ειδική εντροπία (s)
- Πίεση (P)
- Θερμοκρασία (T)
- Γραμμή κορεσμού
- Γραμμή κορεσμένου υγρού
- Υπόψυκτο υγρό
- Διφασική περιοχή
- Γραμμή κορεσμένου ατμού
- Υπέρθερμος ατμός
- Ειδικός όγκος (v)
- Ειδική ενθαλπία (h)
- Κορεσμένο υγρό
- Κορεσμένος ατμός
- Ξηρός κορεσμένος ατμός
- Κρίσιμο σημείο (K)
- Βαθμός ξηρότητας (x)

1.1 Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s), κύκλου ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών

Η χρησιμότητα και το μεγάλο πλεονέκτημα του διαγράμματος θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) είναι ότι τα εμβαδά του **απεικονίζουν ποσά ενέργειας ανηγμένα στη μονάδα μάζας του ψυκτικού μέσου**, δηλαδή σε kJ/kg (θα γίνει ανάλυση στο Κεφάλαιο 2). Ο κάθετος άξονας απεικονίζει τις τιμές θερμοκρασίας T σε μονάδες Kelvin (K), ενώ ο οριζόντιος απεικονίζει τις τιμές ειδικής εντροπίας S σε μονάδες kJ/kg · K (Kelvin).

Οι κλίμακες (γραμμές) στο διάγραμμα θερμοκρασίας-ειδικής εντροπίας (T-s) (Διάγραμμα 1) απεικονίζουν τα παρακάτω **θερμοδυναμικά μεγέθη**:

1. Ο κάθετος άξονας απεικονίζει τις τιμές **θερμοκρασίας T** σε μονάδες Kelvin (K).
2. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τις τιμές **ειδικής εντροπίας S** σε μονάδες kJ/kg · K.
3. Η καμπύλη (καμπάνα) απεικονίζει τη **γραμμή κορεσμού**. Η γραμμή της καμπύλης από την κορυφή της (**κρίσιμο σημείο K**) και αριστερά ονομάζεται **γραμμή κορεσμένου υγρού** και διαχωρίζει το **υπόψυκτο υγρό** που βρίσκεται αριστερά της από τη **διφασική περιοχή** μέσα στην περιοχή της καμπύλης (καμπάνας) όπου ατμός και υγρό συνυπάρχουν. Η γραμμή της καμπύλης από την κορυφή της (σημείο K) και δεξιά ονομάζεται **γραμμή κορεσμένου ατμού** και διαχωρίζει τη διφασική περιοχή μέσα στην καμπύλη (καμπάνα) από τον **υπέρθερμο ατμό** που βρίσκεται δεξιά της.
4. Οι κόκκινες γραμμές που διασχίζουν το διάγραμμα απεικονίζουν τον **ειδικό όγκο (v)** m³/kg.
5. Οι μαύρες γραμμές που διασχίζουν το διάγραμμα σχεδόν κάθετα απεικονίζουν την **πίεση (p)** MPa.
6. Οι μαύρες γραμμές που διασχίζουν το διάγραμμα σχεδόν οριζόντια απεικονίζουν την **ειδική ενθαλπία (h)** kJ/kg.
7. Οι μαύρες γραμμές που διασχίζουν εσωτερικά και σχεδόν κάθετα την καμπύλη κορεσμού απεικονίζουν το **βαθμό ξηρότητας (x) %**.

Εντροπία είναι το μέγεθος που εκφράζει τη δυνατότητα ενός θερμοδυναμικού συστήματος να παράγει έργο, μέσω της μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας (αταξία μορίων), η οποία καθορίζεται από το αλγεβρικό άθροισμα του ποσού της θερμότητας που απορροφά το σύστημα από το περιβάλλον και του έργου των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν πάνω στο σύστημα (kJ/K).

Ειδική εντροπία είναι η εντροπία ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου (kJ/kg · K).

Η γραμμή κορεσμού είναι η οριακή γραμμή όπου το ψυκτικό μέσο αλλάζει φάση από την κατάσταση υπόψυκτου υγρού σε κατάσταση κορεσμού και κατάσταση υπέρθερμου ατμού.

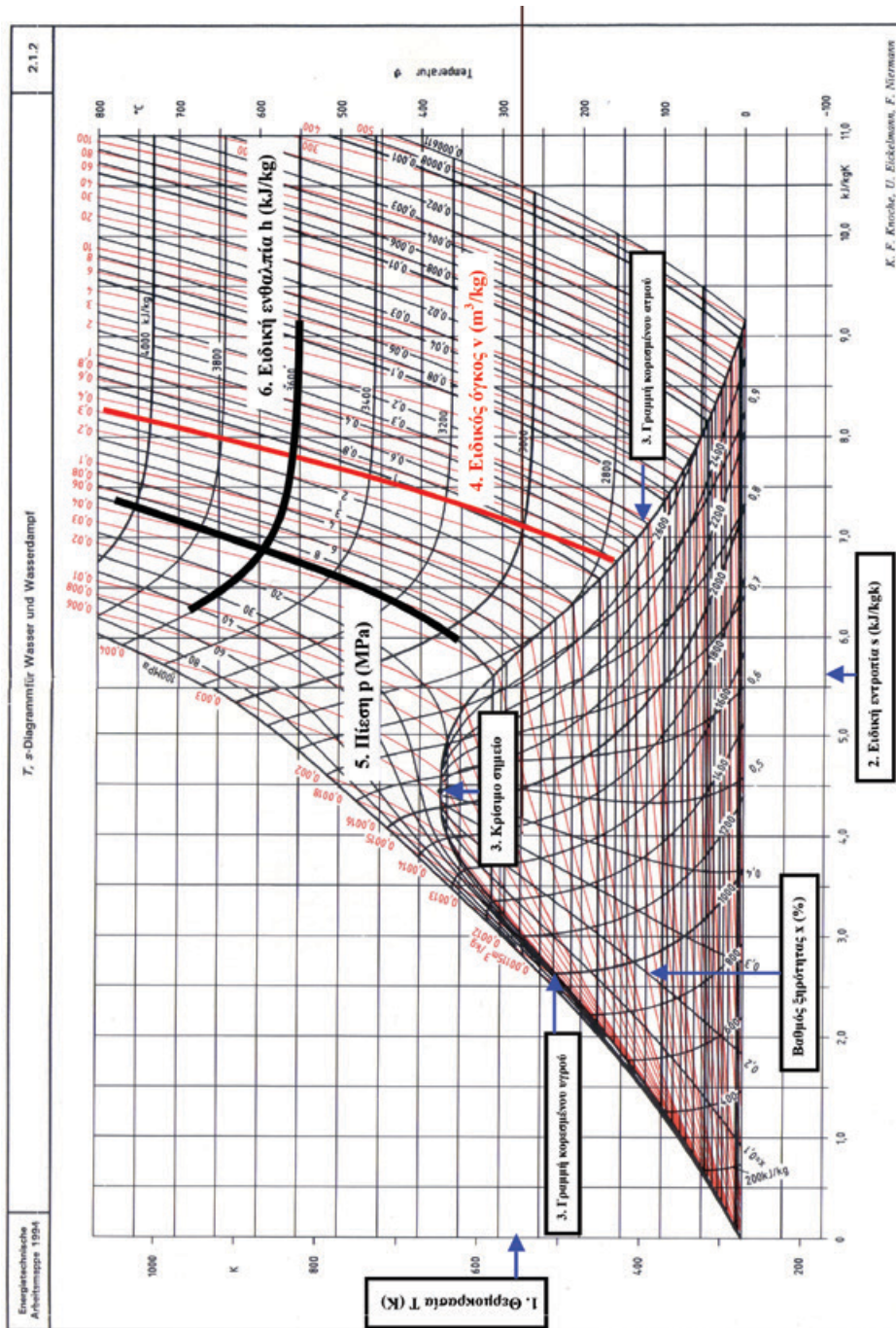
Υπόψυκτο υγρό είναι το υγρό που βρίσκεται κάτω από τη θερμοκρασία ατμοποίησης.

Κορεσμένο υγρό είναι το υγρό που βρίσκεται σε πίεση και θερμοκρασία ατμοποίησης.

Κορεσμένος ατμός είναι ο ατμός που βρίσκεται σε πίεση και θερμοκρασία ατμοποίησης και περιέχει μείγμα υγρού (σταγονίδια) και ατμού. Η αναλογία των δύο φάσεων καθορίζεται από το βαθμό ξηρότητας.

Ξηρός κορεσμένος ατμός είναι ο ατμός που βρίσκεται σε θερμοκρασία ατμοποίησης και είναι 100% ατμός (χωρίς σταγονίδια υγρού).

Υπέρθερμος ατμός είναι ο ατμός που βρίσκεται πλέον σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία ατμοποίησης.



Διάγραμμα 1: Ενδεικτικό διάγραμμα θερμοκρασίας - ειδικής εντροπίας (T-s)

Κρίσιμο σημείο είναι το σημείο εκείνο στο οποίο το κορεσμένο υγρό μετατρέπεται απευθείας σε ξηρό κορεσμένο ατμό.

Βαθμός ξηρότητας (x) είναι ο αριθμός που παίρνει τιμές από το 0 έως το 1 και μας δείχνει πόσος ατμός βρίσκεται στο σύνολο της μάζας υγρού-ατμού. Π.χ. βαθμός ξηρότητας 0,2 σημαίνει 20% ατμός και 80% υγρό. Βαθμός ξηρότητας 0,7 σημαίνει 70% ατμός και 30% υγρό.

Ειδικός όγκος (v) είναι ο όγκος ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου (m^3/kg).

Ενθαλπία (h). Αντιπροσωπεύει το ολικό ποσό θερμότητας που περιέχει ένα θερμοδυναμικό σύστημα. Ειδικότερα αποτελεί το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας ενός σώματος και του γινομένου της εξωτερικής πίεσης επί του όγκου που καταλαμβάνει μια ουσία. Στη χημεία χαρακτηρίζεται ως η ενέργεια που προσφέρεται κατά τη θέρμανση ουσιών και που εγκλωβίζεται στα μόριά τους, ιδίως σ' εκείνα των υδρατμών τους (kJ). **Ειδική ενθαλπία** είναι η ενθαλπία ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου (kJ/kg).

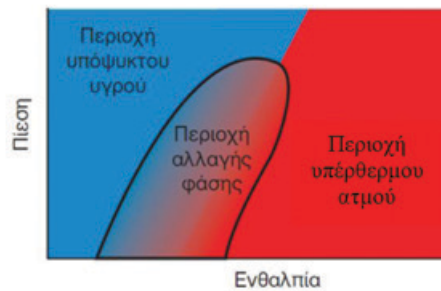
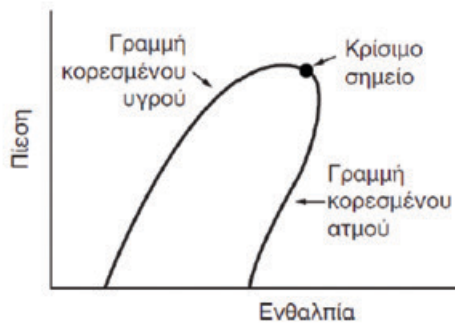
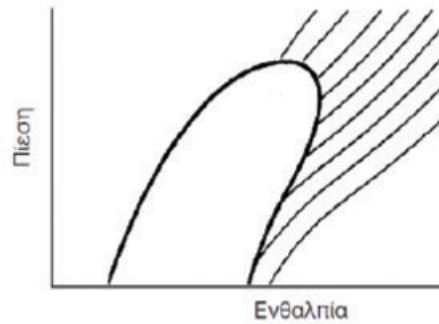
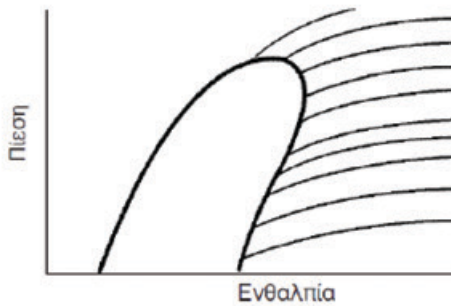
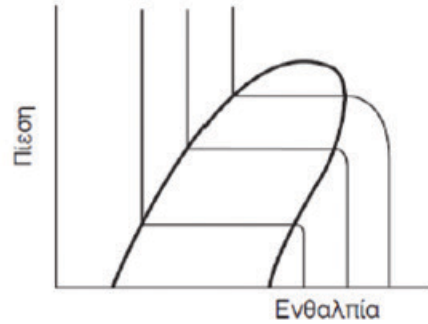
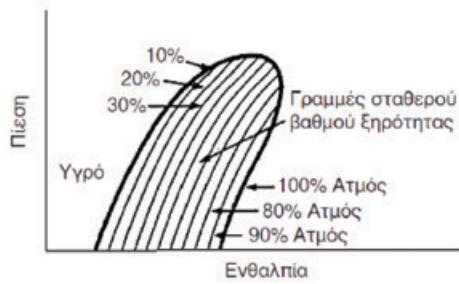
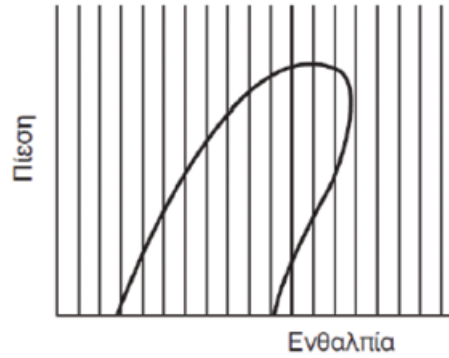
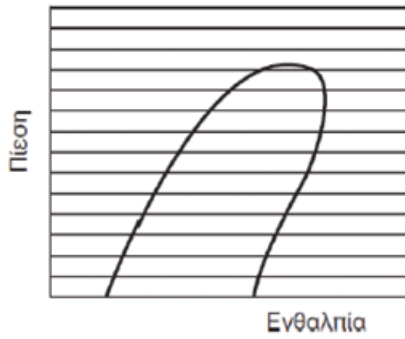
1.2 Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h), κύκλου ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών

Η χρήση του διαγράμματος πίεσης-ενθαλπίας (P-h) είναι αναγκαία για τον υπολογισμό της μεταφερόμενης θερμότητας και την ανάλυση της ενεργειακής συμπεριφοράς του ψυκτικού κύκλου. Είναι το διάγραμμα που θα χρησιμοποιήσουμε περισσότερο, διότι οι ισόθλιπτες μεταβολές, όπως η ατμοποίηση και η συμπύκνωση που συμβαίνουν σε κάθε ψυκτικό κύκλο (θα γίνει ανάλυση στο Κεφάλαιο 2), απεικονίζονται με ευθείες κάθετες στον άξονα των πιέσεων και η διαφορά των ενθαλπιών στον οριζόντιο άξονα απεικονίζει άμεσα τα ανηγμένα μεγέθη θερμότητας (q_w , q_z) και τεχνικού έργου (w_{th}), κάτι που μας παρέχει απλότητα και ευκολία στην πραγματοποίηση των ενεργειακών υπολογισμών.

Οι κλίμακες (γραμμές) στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) (Διάγραμμα 2, σελ. 17) απεικονίζουν τα παρακάτω **θερμοδυναμικά μεγέθη**:

1. Ο κάθετος άξονας απεικονίζει την **πίεση P** σε μονάδες Bar.
2. Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει τις τιμές **ειδικής ενθαλπίας h** σε μονάδες kJ/kg.
3. Η καμπύλη (καμπάνα) απεικονίζει τη **γραμμή κορεσμού**. Η γραμμή της καμπύλης από την κορυφή της (**κρίσιμο σημείο K**) και αριστερά ονομάζεται **γραμμή κορεσμένου υγρού** και διαχωρίζει το **υπόψυκτο υγρό** που βρίσκεται αριστερά της από τη **διφασική περιοχή** μέσα στην περιοχή της καμπύλης (καμπάνας) όπου ατμός και υγρό συνυπάρχουν. Η γραμμή της καμπύλης από την κορυφή της (σημείο K) και δεξιά ονομάζεται **γραμμή κορεσμένου ατμού** και διαχωρίζει τη διφασική περιοχή μέσα στην καμπύλη (καμπάνα) από τον **υπέρθερμο ατμό** που βρίσκεται δεξιά της.
4. Οι πράσινες γραμμές που διασχίζουν το διάγραμμα απεικονίζουν τον **ειδικό όγκο (v)** m^3/kg .
5. Οι καφέ γραμμές που διασχίζουν το διάγραμμα απεικονίζουν τη **θερμοκρασία (T)** $^{\circ}\text{C}$.
6. Οι μπλε γραμμές που διασχίζουν το διάγραμμα απεικονίζουν την **ειδική εντροπία (s)** (kJ/kg · K).
7. Οι μαύρες γραμμές που διασχίζουν την εσωτερική καμπύλη κορεσμού σχεδόν κάθετα απεικονίζουν το **βαθμό ξηρότητας x (%)**.

Ενθαλπία (h). Αντιπροσωπεύει το ολικό ποσό θερμότητας που περιέχει ένα θερμοδυναμικό σύστημα. Ειδικότερα αποτελεί το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας ενός σώματος και



του γινομένου της εξωτερικής πίεσης επί του όγκου που καταλαμβάνει μια ουσία. Στη χημεία χαρακτηρίζεται ως η ενέργεια που προσφέρεται κατά τη θέρμανση ουσιών και που εγκλωβίζεται στα μόριά τους, ιδίως σ' εκείνα των υδρατμών τους (kJ).

Ειδική ενθαλπία είναι η ενθαλπία ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου (kJ/kg).

Η γραμμή κορεσμού είναι η οριακή γραμμή όπου το ψυκτικό μέσο αλλάζει φάση από την κατάσταση υπόψυκτου υγρού σε κατάσταση κορεσμού και κατάσταση υπέρθερμου ατμού.

Υπόψυκτο υγρό είναι το υγρό που βρίσκεται κάτω από τη θερμοκρασία ατμοποίησης.

Κορεσμένο υγρό είναι το υγρό που βρίσκεται σε πίεση και θερμοκρασία ατμοποίησης.

Κορεσμένος ατμός είναι ο ατμός που βρίσκεται σε πίεση και θερμοκρασία ατμοποίησης και περιέχει μείγμα υγρού (σταγονίδια) και ατμού. Η αναλογία των δύο φάσεων καθορίζεται από το βαθμό ξηρότητας.

Ξηρός κορεσμένος ατμός είναι ο ατμός που βρίσκεται σε θερμοκρασία ατμοποίησης και είναι 100% ατμός (χωρίς σταγονίδια υγρού).

Υπέρθερμος ατμός είναι ο ατμός που βρίσκεται πλέον σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία ατμοποίησης.

Κρίσιμο σημείο είναι το σημείο εκείνο στο οποίο το κορεσμένο υγρό μετατρέπεται απευθείας σε ξηρό κορεσμένο ατμό.

Βαθμός ξηρότητας (x) είναι ο αριθμός που παίρνει τιμές από το 0 έως το 1 και μας δείχνει πόσος ατμός βρίσκεται στο σύνολο της μάζας υγρού-ατμού. Π.χ. βαθμός ξηρότητας 0,2 σημαίνει 20% ατμός και 80% υγρό. Βαθμός ξηρότητας 0,7 σημαίνει 70% ατμός και 30% υγρό.

Ειδικός όγκος (v) είναι ο όγκος ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου (m^3/kg).

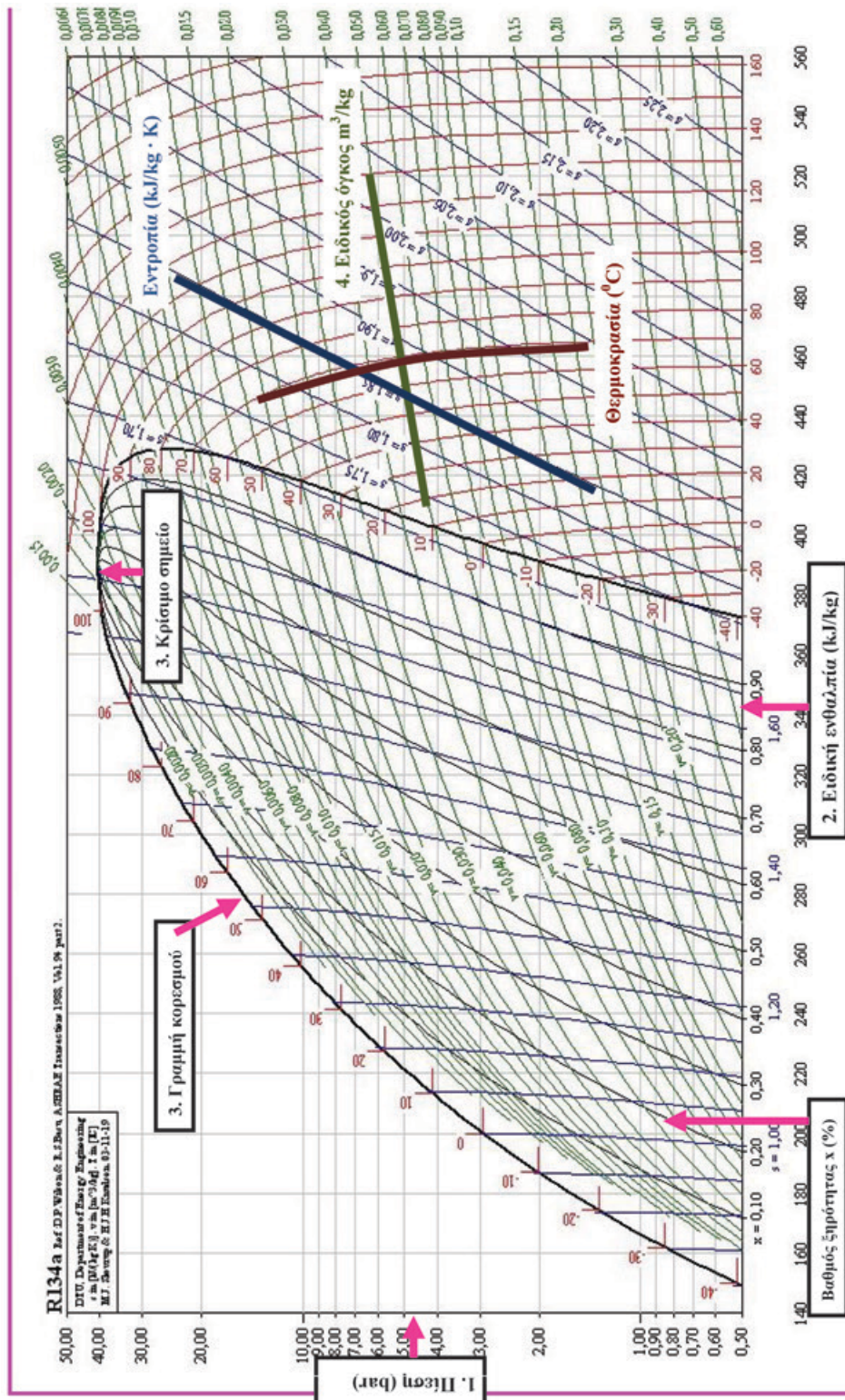
Εντροπία είναι το μέγεθος που εκφράζει τη δυνατότητα ενός θερμοδυναμικού συστήματος να παράγει έργο, μέσω της μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας (αταξία μορίων), η οποία καθορίζεται από το αλγεβρικό άθροισμα του ποσού της θερμότητας που απορροφά το σύστημα από το περιβάλλον και του έργου των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν πάνω στο σύστημα (kJ/K).

Ειδική εντροπία είναι η εντροπία ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου (kJ/kg · K).

1.3 ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στα διαγράμματα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) και θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) απεικονίζονται οι θερμοδυναμικές μεταβολές στις οποίες επιβάλλεται το ψυκτικό μέσο διαγράφοντας τον ψυκτικό κύκλο (ατμοποίηση, υπερθέρμανση συμπίεση, συμπύκνωση, υπόψυξη, εκτόνωση).

Η γνώση των δύο παραπάνω διαγραμμάτων είναι απαραίτητη για την κατανόηση του κύκλου ψύξης, τη χάραξη των θερμοδυναμικών μεταβολών και τους απαραίτητους ενεργειακούς υπολογισμούς των ψυκτικών εγκαταστάσεων μηχανικής συμπίεσης ατμών.



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα πίεσης - ενθαλπίας (P-h)

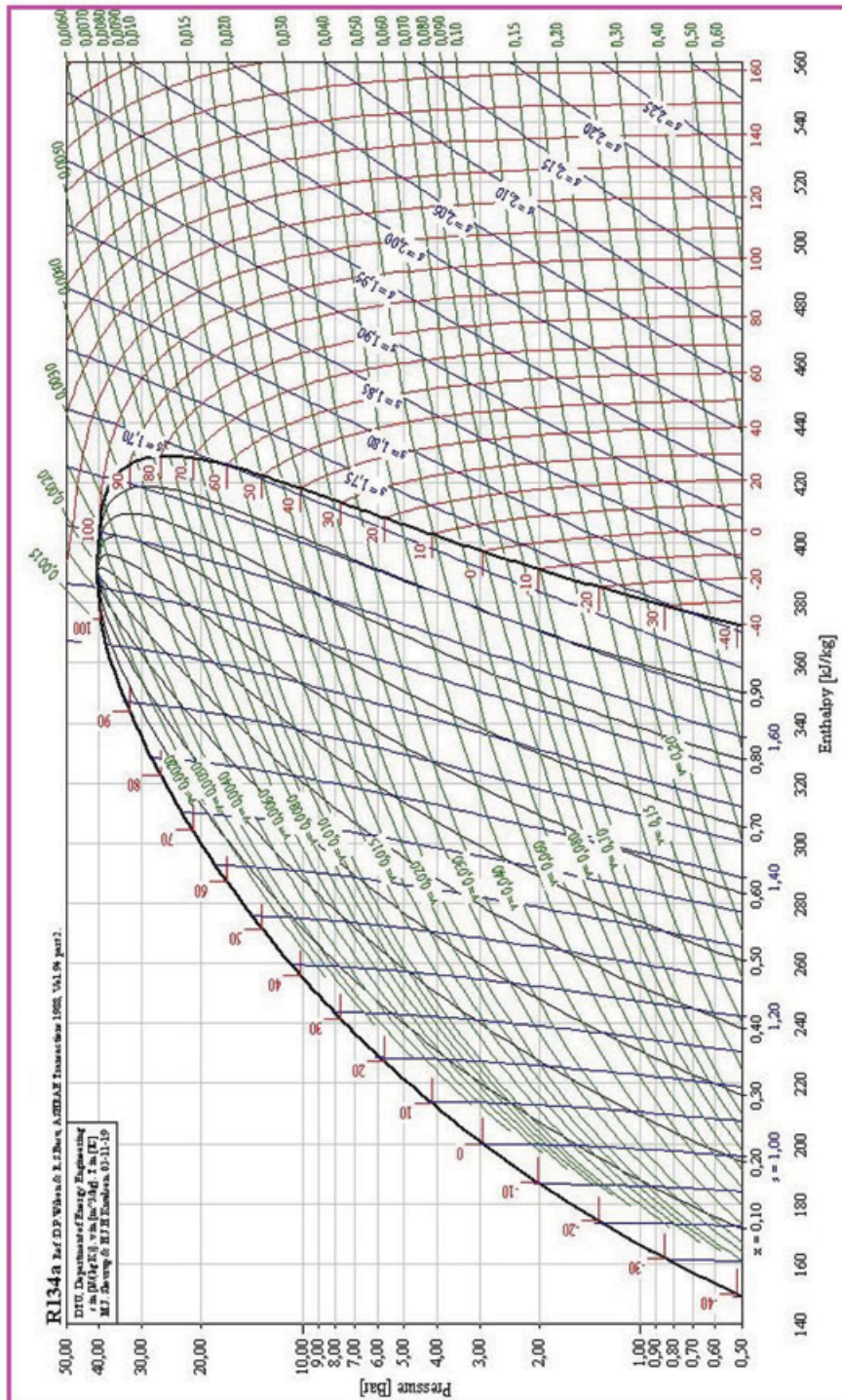


1.4 ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

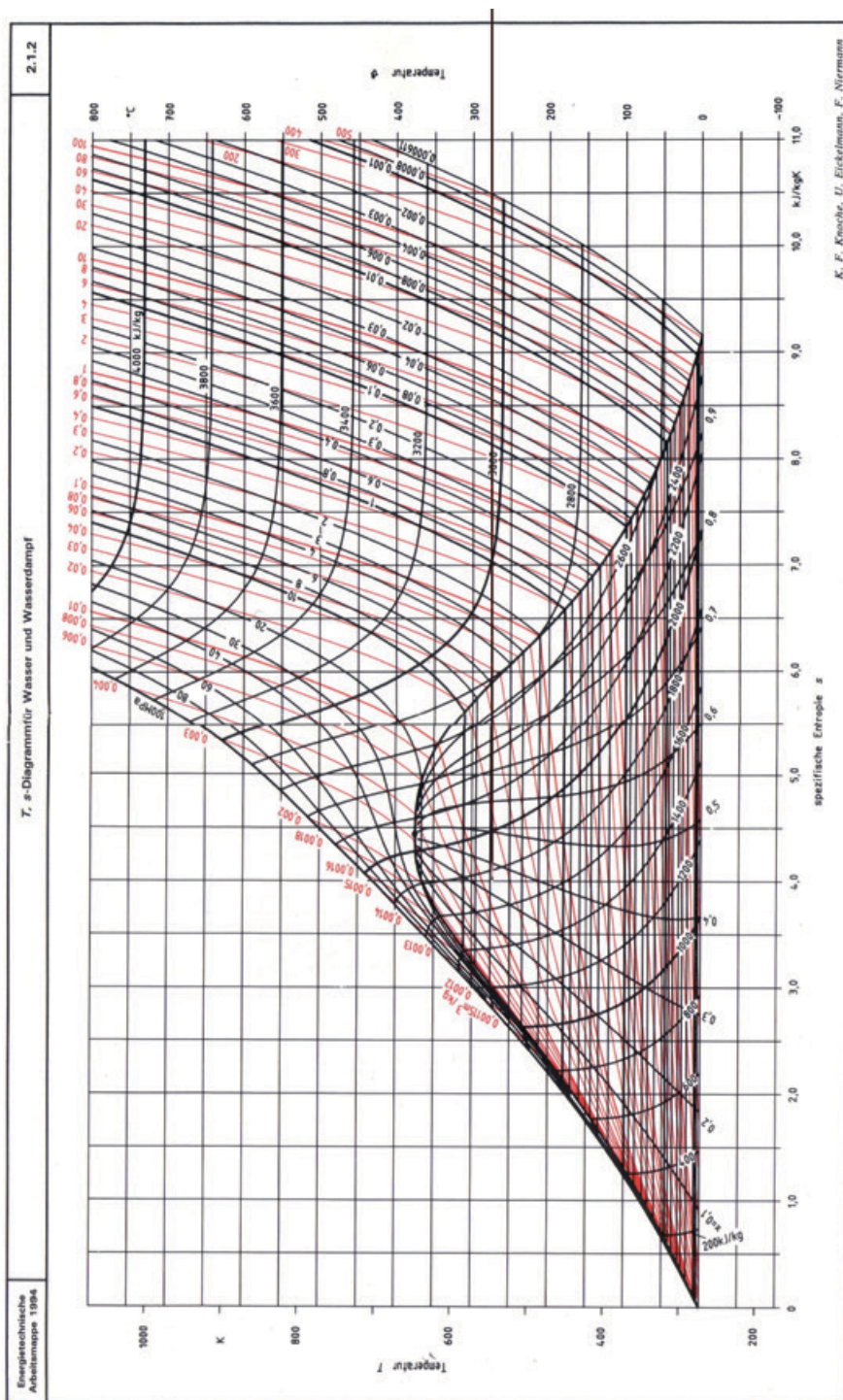
1. Αντιστοίχισε τις προτάσεις που ταιριάζουν στα παρακάτω θερμοδυναμικά μεγέθη.

Η γραμμή κορεσμού •	• Εκφράζει τη δυνατότητα ενός θερμοδυναμικού συστήματος να παράγει έργο μέσω της μεταβολής της εσωτερικής του ενέργειας, η οποία καθορίζεται από το αλγεβρικό άθροισμα του ποσού της θερμότητας που απορροφά το σύστημα από το περιβάλλον και του έργου των εξωτερικών δυνάμεων που επιδρούν πάνω στο σύστημα ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$).
Κρίσιμο σημείο •	• Το σύνολο της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου (kJ/kg).
Ξηρός κορεσμένος ατμός •	• Το οριακό σημείο όπου το ψυκτικό μέσο αλλάζει φάση από την κατάσταση υπόψυκτου υγρού σε κατάσταση κορεσμού και κατάσταση υπέρθερμου ατμού.
Υπόψυκτο υγρό •	• Βρίσκεται σε πίεση και θερμοκρασία ατμοποίησης και περιέχει μείγμα υγρού (σταγονίδια) και ατμού. Η αναλογία των δύο φάσεων καθορίζεται από το βαθμό ξηρότητας.
Βαθμός ξηρότητας (x) •	• Βρίσκεται σε πίεση και θερμοκρασία ατμοποίησης.
Ειδική εντροπία •	• Ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου (m^3/kg).
Κορεσμένος ατμός •	• Βρίσκεται κάτω από τη θερμοκρασία ατμοποίησης.
Κορεσμένο υγρό •	• Παίρνει τιμές από το 0 έως το 1 και μας δείχνει πόσος ατμός βρίσκεται στο σύνολο της μάζας υγρού-ατμού.
Ειδικός όγκος (v) •	• Βρίσκεται σε θερμοκρασία ατμοποίησης και είναι 100% ατμός (χωρίς σταγονίδια υγρού).
Υπέρθερμος ατμός •	• Το κορεσμένο υγρό μετατρέπεται απευθείας σε ξηρό κορεσμένο ατμό.
Ειδική ενθαλπία (h) •	• Βρίσκεται πλέον σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία ατμοποίησης.

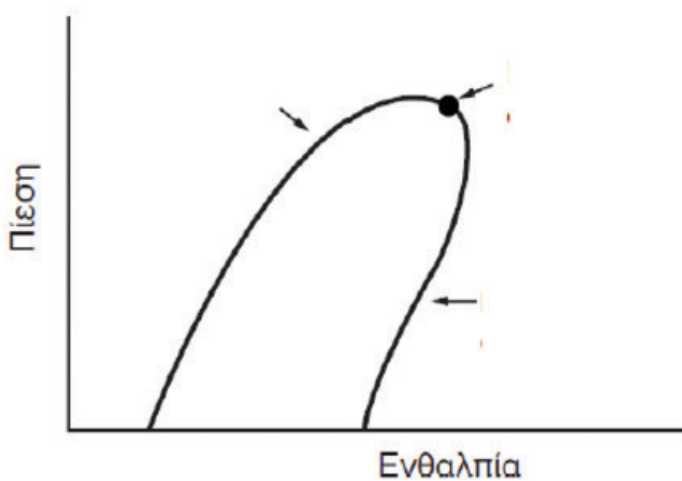
2. Σημείωσε πάνω στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) τα θερμοδυναμικά μεγέθη που απεικονίζουν οι κλίμακές του.



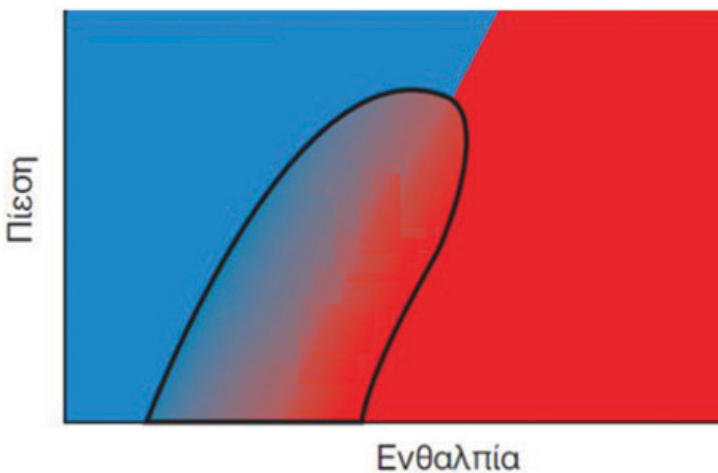
3. Σημείωσε πάνω στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) τα θερμοδυναμικά μεγέθη που απεικονίζουν οι κλίμακές του.



4. Σημείωσε πάνω στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) τα οριακά σημεία της καμπύλης στα οποία το ψυκτικό μέσο λαμβάνει χώρα ανάλογα με την κατάσταση του (γραμμή κορεσμένου υγρού, κρίσιμο σημείο, γραμμή κορεσμένου ατμού).



5. Σημείωσε πάνω στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) τις περιοχές στις οποίες το ψυκτικό μέσο λαμβάνει χώρα ανάλογα με την κατάστασή του (περιοχή υπόψυκτου υγρού, περιοχή κορεσμού, περιοχή υπέρθερμου ατμού).



ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΞΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την κατανόηση της λειτουργίας, την ανάλυση και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων της ενεργειακής συμπεριφοράς των ψυκτικών εγκαταστάσεων μηχανικής συμπίεσης ατμών, ο ψυκτικός κύκλος χωρίζεται σε:

1. Βασικό θεωρητικό ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών.
2. Θεωρητικό ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη συμπίκνωματος και αναρρόφηση υπέρθερμου ατμού.
3. Πραγματικό ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών.

Στην πράξη δεν συναντάμε ποτέ τις ιδανικές θερμοδυναμικές καταστάσεις των θεωρητικών κύκλων ψύξης (1 & 2), αλλά τους χρησιμοποιούμε ως πρότυπα μέγιστης απόδοσης και ως μέτρο σύγκρισης για το σχεδιασμό των ενεργειακών προδιαγραφών μιας νέας εγκατάστασης ή ως πρότυπα σύγκρισης για την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κύκλου ψύξης (**πραγματικού κύκλου ψύξης**) εγκατάστασης που βρίσκεται ήδη σε λειτουργία. Εξετάζοντας λοιπόν τη λειτουργία του πραγματικού κύκλου ψύξης, παρατηρούμε κάποιες διαφορές (σε σχέση με τη θεωρητική κατάσταση), τις οποίες πρέπει να εξηγήσουμε γιατί γίνονται **ή γιατί φροντίζουμε να γίνονται**.



ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η ανάλυση των θερμοδυναμικών μεταβολών του κύκλου ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών στα διαγράμματα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) και θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s), έτσι ώστε να διακρίνεις τις θερμικές και ενεργειακές μεταβολές, καθώς και τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στον κάθε κύκλο όταν μεταβάλλουμε τα όριά τους (βασικό θεωρητικό – θεωρητικό με υπόψυξη και υπερθέρμανση – πραγματικό κύκλο ψύξης).



ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΤΟΧΟΙ

Μετά τη μελέτη του κεφαλαίου, θα είσαι ικανός/ικανή:

1. Να αναγνωρίζεις και να περιγράφεις τις θερμοδυναμικές μεταβολές των κύκλων ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διαγράμματα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s).

2. Να αναγνωρίζεις και να περιγράφεις τις θερμοδυναμικές μεταβολές των κύκλων ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διαγράμματα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).
3. Να γνωρίζεις το λόγο για τον οποίο επιθυμούμε την ύπαρξη των θερμοδυναμικών μεταβολών, καθώς και από τι εξαρτώνται τα όριά τους.
4. Να γνωρίζεις και να περιγράφεις τις συναλλασσόμενες ποσότητες ενέργειας μεταξύ του συστήματος (κυκλοφορούμενου ψυκτικού μέσου) και περιβάλλοντος στον ψυκτικό κύκλο.



ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ/ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

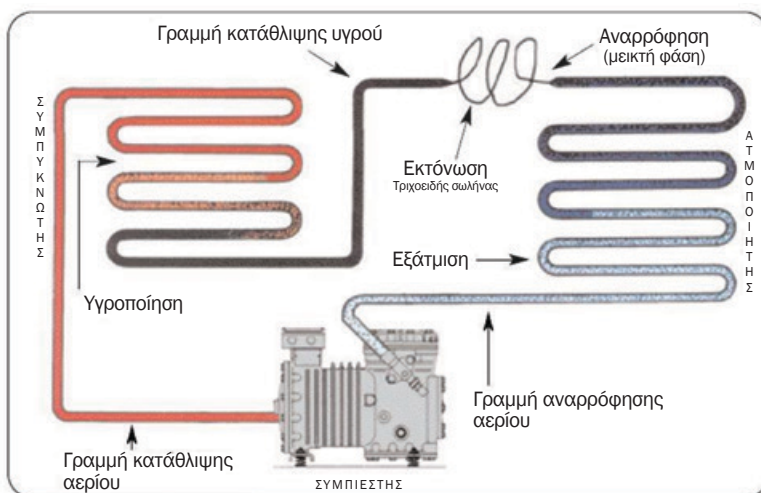
- Κλειστό σύστημα
- Ανοιχτό σύστημα
- Ανηγμένη ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα ατμοποίησης q_{ψ} (ψυκτική ικανότητα)
- Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποιήσεως
- Ψυκτική ισχύς Q_{ψ} (απορροφώμενη ψυκτική ισχύς)
- Ανηγμένο ανά kg ψυκτικού μέσου θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο (w_{th})
- Θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο W_{th} (συνολικό έργο συμπίεσης)
- Θεωρητική μηχανική ισχύς του συμπιεστή P_{th} (W_{th})
- Ανηγμένη ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα συμπυκνώσεως q_z
- Λανθάνουσα θερμότητα συμπυκνώσεως
- Ισχύς συμπυκνώσεως Q_z (απορριπτόμενη θερμική ισχύς)
- Αδιαβατική αναστρέψιμη συμπίεση
- Ισόθλιπτη αποβολή θερμότητας
- Αδιαβατικός στραγγαλισμός πίεσεως
- Ισόθλιπτη ατμοποίηση
- Ισοθερμοκρασιακή ατμοποίηση
- Θεωρητικός Συντελεστής Συμπεριφοράς COP_{th}
- Υπόψυξη κυκλώματος
- Υπερθέρμανση κυκλώματος
- Βαθμός απόδοσης συμπιεστή

2.1 Βασικός θεωρητικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών

2.1.1 Περιγραφή βασικού θεωρητικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών

Ο βασικός θεωρητικός κύκλος ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών μάς δίνει **την απόλυτη έννοια λειτουργίας** των ψυκτικών κυκλωμάτων **σε ιδανικές συνθήκες λειτουργίας** και χωρίς παρεμβολές από εξωτερικούς παράγοντες. Έτσι, σε αυτόν:

- Η συμπύκνωση και η ατμοποίηση είναι ισόθλιπτες διαδικασίες (χωρίς τριβές) και λαμβάνουν χώρα χωρίς υπόψυξη και υπερθέρμανση.
- Η συμπίεση είναι αναστρέψιμη αδιαβατική διαδικασία και κατ' επέκταση ισεντροπική, ενώ η εκτόνωση είναι άεργος αδιαβατική και κατ' επέκταση ισενθαλπική διαδικασία.



Σχήμα 1:

Σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής διάταξης μηχανικής συμπίεσης ατμών που περιέχει ατμοποιητή, συμπιεστή, συμπυκνωτή και τριχοειδή σωλήνα

- Ο κλάδος υψηλής πίεσης (ΥΠ) είναι αυτός με το κόκκινο-μαύρο χρώμα που περιέχει το συμπυκνωτή (αριστερή πλευρά στο σχήμα).
- Ο κλάδος χαμηλής πίεσης (ΧΠ) είναι αυτός με το μαυρογαλανό χρώμα που περιέχει τον ατμοποιητή (δεξιά πλευρά στο σχήμα).
- Ο κλάδος υγρού ψυκτικού μέσου ξεκινά ουσιαστικά από τα μέσα του συμπυκνωτή ενώ εκτείνεται και μετά την εκτονωτική βαλβίδα και έως τα μέσα του ατμοποιητή. Στο σχήμα απεικονίζεται όπου εμφανίζεται έντονο μαύρο χρώμα.
- Ο κλάδος ατμώδους φάσης ξεκινά ουσιαστικά από τα μέσα του ατμοποιητή (εμφάνιση γαλάζιου χρώματος) ενώ εκτείνεται και μετά την κατάθλιψη του συμπιεστή και έως τα μέσα του συμπυκνωτή (όπου εμφανίζεται έντονο κόκκινο χρώμα).

2.1.2 Θερμοδυναμικές μεταβολές βασικού θεωρητικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s)

Πριν ξεκινήσουμε να αναλύουμε τις θερμοδυναμικές μεταβολές, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε στις παρακάτω θεμελιώδεις έννοιες της θερμοδυναμικής:

Το θερμοδυναμικό σύστημα

Ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι μια περιοχή στο χώρο, ένα τμήμα της φυσικής ύλης, πάνω στο οποίο συγκεντρώνουμε την προσοχή μας για να το μελετήσουμε (στην περίπτωση μας, το ψυκτικό μέσο). Κάθε σημείο ή περιοχή έξω από αυτό το σύστημα ονομάζεται *περιβάλλον*. Το θερμοδυναμικό σύστημα χωρίζεται στην πράξη από το περιβάλλον με τοιχώματα ύλης (τα τοιχώματα των σωληνώσεων κ.λπ.) και στη θεωρία με υποθετικές γραμμές. Η ύλη στην πράξη (π.χ. σωληνώσεις) και οι γραμμές στη θεωρία που χωρίζουν το θερμοδυναμικό σύστημα από το περιβάλλον ονομάζονται *όρια* του συστήματος. Ο ακριβής καθορισμός τους είναι απαραίτητος για να προσδιορίσουμε επακριβώς το θερμοδυναμικό σύστημα που θέλουμε να μελετήσουμε. Τα όρια του συστήματος δεν είναι απαραίτητο να είναι σταθερά και ακίνητα ως προς το περιβάλλον. Μπορούν να μετακινηθούν ανάλογα με τις μεταβολές που υφίσταται το θερμοδυναμικό σύστημα. Τα θερμοδυναμικά συστήματα χωρίζονται στις παρακάτω μεγάλες κατηγορίες:

Ένα θερμοδυναμικό σύστημα ονομάζεται **κλειστό** αν τα όριά του επιτρέπουν τη συναλλαγή θερμότητας ή και έργου με το περιβάλλον αλλά δεν επιτρέπουν την ανταλλαγή μάζας (π.χ. ψυκτικό μέσο). Το σύστημα, δηλαδή, διατηρεί σταθερή τη μάζα του, την ποσότητα της ύλης (π.χ. ψυκτικό μέσο) που περιέχει. Το κλειστό σύστημα χωρίζεται σε αδιαβατικό και σε απομονωμένο ή μονωμένο.

Αδιαβατικό ονομάζεται το κλειστό σύστημα αν τα όριά του δεν επιτρέπουν την ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον, αλλά μπορεί όμως να του δίνεται ενέργεια με διαφορετικό τρόπο (π.χ. θερμότητα μέσω μηχανικού έργου που προσφέρει ο συμπιεστής).

Απομονωμένο ή μονωμένο ονομάζεται το κλειστό σύστημα αν τα όριά του δεν επιτρέπουν τη συναλλαγή θερμότητας ή και έργου με το περιβάλλον αλλά ούτε και την ανταλλαγή μάζας. Δηλαδή δεν ανταλλάσσει ύλη και ενέργεια με το περιβάλλον.

Ένα θερμοδυναμικό σύστημα ονομάζεται **ανοικτό** όταν τα όριά του επιτρέπουν τη συναλλαγή θερμότητας ή και έργου με το περιβάλλον αλλά και την ανταλλαγή μάζας. Δηλαδή ανταλλάσσει ύλη και ενέργεια με το περιβάλλον.

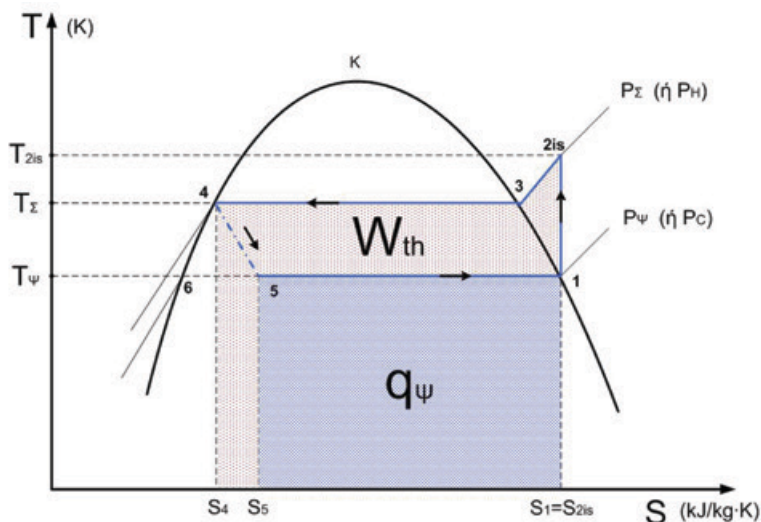
Αντιστρεπτή μεταβολή ενός συστήματος (δηλαδή ύλης με προσδιορισμένα σαφή όρια) λέγεται όταν σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια μιας μεταβολής το σύστημα μπορεί να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση με ταυτόχρονη επαναφορά του περιβάλλοντος ομοίως στην αρχική του κατάσταση. Ειδικότερα στη θερμοδυναμική, αντιστρεπτή καλείται η μεταβολή κατά την οποία το σύστημα μεταβαίνοντας από την αρχική σε άλλη κατάσταση ή περνώντας από διαδοχικές καταστάσεις θερμοδυναμικής ισορροπίας, τούτο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Η αντιστρεπτή μεταβολή μπορεί να σημειωθεί σε οποιοδήποτε χρονικό στάδιο αλλαγής κατάστασης. Προϋπόθεση γι' αυτό είναι να θεωρήσουμε ότι η μεταβολή γίνεται πολύ αργά και κάθε βήμα της είναι απειροστικά μικρό. Π.χ. αν φουσκώσουμε ένα μπαλόνι αργά αργά, μπορούμε κατόπιν να το ξεφουσκώσουμε και να ξαναγυρίσει στην αρχική του κατάσταση. Αν το φουσκώσουμε απότομα, θα σκάσει και δεν υπάρχει περίπτωση να επανέλθει όπως ήταν πριν. Αν συμπίεσουμε πολύ αργά μια ποσότητα αερίου μέσα σ' ένα δοχείο κλεισμένο με έμβολο, μπορούμε, τραβώντας σιγά

σιγά πάλι πίσω το έμβολο στην αρχική του θέση, να ξαναγουρίσουμε στην πίεση, όγκο και θερμοκρασία που είχε το αέριο στην αρχή.

Αντιστρεπτές μεταβολές δεν υπάρχουν στη φύση. Πρόκειται για ιδανικές θεωρητικές κατασκευές, για να μπορούμε να μελετήσουμε ευκολότερα τα φαινόμενα των μεταβολών. Εκτός από τις ενεργειακές απώλειες, που πάντα έχουμε στα πραγματικά φαινόμενα, ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής, που συνεπάγεται αυστηρά η αύξηση της εντροπίας κάθε συστήματος, αποκλείει την ύπαρξη αντιστρεπτών μεταβολών.

Παρά ταύτα, επειδή στη θερμοδυναμική η **αντιστρεπτή μεταβολή αποτελεί θεμελιώδη έννοια που αποτελεί το μηχανικό ανάλογο της κίνησης χωρίς τριβή**, μπορούμε να προσεγγίσουμε τις πραγματικές μεταβολές με αντιστρεπτές μεταβολές ορίζοντας μια «πρότυπη κατάσταση» με εσωτερική ενέργεια μηδέν, όπου με αυτήν υπολογίζεται η εσωτερική ενέργεια του συστήματος σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση. Επ' αυτού βασίζεται το πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα και κατ' επέκταση η ειδική θερμότητα, ο ορισμός της ενθαλπίας κ.λπ.

Ο βασικός θεωρητικός κύκλος παρακάτω ξεκινά από την έξοδο ξηρού κορεσμένου ατμού καταστάσεως 1 (θερμοκρασίας T_ψ , πίεσης P_ψ) από τον ατμοποιητή, ο οποίος αναρροφάται έπειτα απ' το συμπιεστή. Με την προϋπόθεση ότι γίνεται αναστρεψίμη ισηντροπική συμπίεση, το υπέρθερμο ψυκτικό μέσο καταστάσεως 2_{is} στην έξοδό του από το συμπιεστή έχει πίεση ίση με την πίεση συμπυκνώσεως P_Σ , ειδική εντροπία ίδια με αυτήν της καταστάσεως 1 στην είσοδο του συμπιεστή και θερμοκρασία T_{2is} , την υψηλότερη του κύκλου. Το σημείο-2_{is} βρίσκεται με τομή της διά του σημείου-1 ισηντροπικής καμπύλης με την ισόθλιπτη P_Σ =σταθ. Στην υπέρθερμη αυτή κατάσταση οι ατμοί ψυκτικού μέσου εισέρχονται στο συμπυκνωτή, όπου ψύχονται ισόθλιπτα μέχρι το σημείο-3 και την ξηρή κορεσμένη κατάσταση 3 (θερμοκρασίας T_Σ , πίεσης P_Σ), επάνω στην οριακή καμπύλη ξηρού κορεσμένου ατμού.



Διάγραμμα 3:

Βασικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών σε Διάγραμμα θερμοκρασίας-ειδικής εντροπίας (T-s)

Στη συνέχεια οι ατμοί συμπυκνώνονται ισόθλιπτα, με συνεχή αποβολή θερμότητας μέχρι την υγρή κεκορεσμένη κατάσταση 4, η οποία βρίσκεται ακριβώς επί της οριακής γραμμής κεκορεσμένου υγρού ($x=0$). Εν συνεχεία το κεκορεσμένο συμπύκνωμα ρέει διαμέσου της στραγγαλιστικής διάταξης (συνήθως εκτονωτικής βαλβίδας) και εξέρχεται ως διφασικό μείγμα καταστάσεως 5, η οποία αντιστοιχεί στη χαμηλή πίεση ατμοποίησης P_ψ και στη θερμοκρασία ατμοποίησης T_ψ . Η μεταβολή 4~5 είναι ως γνωστόν μη αναστρέψιμη λόγω του στραγγαλισμού και ως άεργη, αδιαβατική εκτόνωση είναι και ισενθαλπική. Επομένως, στο διάγραμμα T-s η μεταβολή 4~5 συμπίπτει με την ισενθαλπική που διέρχεται από το σημείο-4. Το σημείο-5 λοιπόν προκύπτει ως τομή της ισενθαλπικής διά του σημείου-4 καμπύλης με την ισόθλιπτη $P_\psi = \text{σταθ.}$ Ο ψυκτικός μας κύκλος ολοκληρώνεται στην κατάσταση 1 απ' όπου ξεκίνησε με το ψυκτικό μέσο να παραλαμβάνει από τον ψυχόμενο χώρο, ισόθλιπτα και ισοθερμοκρασιακά (P_ψ, T_ψ), την ποθούμενη θερμότητα ατμοποίησης.

Το μεγάλο πλεονέκτημα του θερμοδυναμικού διαγράμματος T-s είναι ότι τα εμβαδά κάτω απ' τις καμπύλες του κύκλου απεικονίζουν τις ανηγμένες ανά kg ψυκτικού μέσου συναλλασσόμενες ποσότητες ενέργειας μεταξύ συστήματος (κυκλοφορούμενου ψυκτικού μέσου) και περιβάλλοντος (που είναι τα δύο θερμοδοχεία T_ψ, T_Σ και ο συμπιεστής που παρέχει εξωτερικά το απαραίτητο τεχνικό έργο). Η συναλλαγή ενέργειας λαμβάνει χώρα είτε με μορφή θερμότητας (q_ψ, q_Σ) είτε με μορφή τεχνικού έργου (w_{th}).

Έτσι διακρίνουμε:

- Την ανηγμένη ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα ατμοποίησης q_ψ (ψυκτική ικανότητα) του ατμοποιητή και όλης της διάταξής μας, σε μονάδες kJ/kg, από το εμβαδόν ($S_5, 5, 1, S_1, S_5$).
- Το ανηγμένο ανά kg ψυκτικού μέσου θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο (w_{th}) που προσδίδει στον κύκλο ο συμπιεστής (έργο συμπίεσης), σε μονάδες kJ/kg, από το εμβαδόν ($S_4, 4, 3, 2_{is}, 1, 5, S_5, S_4$).
- Την ανηγμένη ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα συμπυκνώσεως q_Σ σε μονάδες kJ/kg, από το συνολικό εμβαδό ($S_4, 4, 3, 2_{is}, S_1, S_4$), που είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω.

Η ανηγμένη ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα ατμοποίησης q_ψ (ψυκτική ικανότητα) του ατμοποιητή και όλης της διάταξής μας, σε μονάδες kJ/kg, από το εμβαδόν ($S_5, 5, 1, S_1, S_5$). Μια τυπική ψυκτική διάταξη μηχανικής συμπίεσης ατμών μεταφέρει (αντλεί) θερμότητα από το «ψυχροδοχείο (ψυχόμενο χώρο-ατμοποιητή)» στο «θερμοδοχείο (συμπυκνωτή-εξωτερικό περιβάλλον)» μέσω του ψυκτικού μέσου, καταναλώνοντας μηχανική ενέργεια. Το ποσό θερμότητας **ανά μονάδα μάζας (kg)** ψυκτικού μέσου που αφαιρείται από τον ψυχόμενο χώρο το λέμε ψυκτική ικανότητα ή ανηγμένη ψυκτική ισχύς (ανά παροχή ψυκτικής μάζας) και συμβολίζεται με q_ψ , ενώ παρίσταται με εμβαδόν στο διάγραμμα T-s και εκφράζεται συνήθως σε μονάδες kJ/kg. Το ψυκτικό μέσο εισέρχεται στον ατμοποιητή με αρχική ενθαλπία h_5 ενώ εξέρχεται με αυξημένη τελική ενθαλπία h_1 , επειδή απορρόφησε θερμότητα από το ψυχόμενο περιβάλλον. Η ψυκτική ικανότητα είναι επομένως η διαφορά αυτών των ενθαλπιών. Δηλαδή ισχύει:

ΤΑ ΜΕΓΕΘΗ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ
ΧΡΩΜΑ ΕΙΝΑΙ ΑΝΑ
ΜΟΝΑΔΑ ΧΡΟΝΟΥ

$$q_\psi = Q_\psi / m = \dot{Q}_\psi / \dot{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.1)$$

Τη θερμότητα ατμοποίησης Q_ψ (συνολικό ψυκτικό αποτέλεσμα). Η παραπάνω ανηγμένη θερμότητα ατμοποίησης q_ψ εκφράζει την ποσότητα θερμότητας που απάγει κάθε kg ψυκτικού μέσου από τον ατμοποιητή, επομέ-

νως αν θέλουμε να υπολογίσουμε τη συνολική θερμότητα Q_{ψ} που απάγει το ψυκτικό μέσο, τότε αρκεί να **πολλαπλασιάσουμε την ψυκτική ικανότητα q_{ψ} με την ποσότητα της μάζας m (kg)**. Δηλαδή ισχύει:

$$Q_{\psi} = m \cdot q_{\psi} = m \cdot (h_1 - h_3) \quad (\text{kJ}) \quad (2.2)$$

Την **ψυκτική ισχύς Q_{ψ} (απορροφώμενη ψυκτική ισχύς)**. Εκείνο όμως που έχει για μας πρακτική σημασία, μας ενδιαφέρει και κυρίως χαρακτηρίζει μια ψυκτική εγκατάσταση είναι ο ρυθμός με τον οποίο απορροφά θερμότητα από το «ψυχοδοχείο (ψυχόμενος χώρος-ατμοποιητής)» η μάζα του ψυκτικού μέσου που κυκλοφορεί στην εγκατάσταση, στη μονάδα του χρόνου (δηλαδή η παροχή μάζας). Η παροχή μάζας **m (kg/s)** του ψυκτικού μέσου της εγκατάστασης απορροφά, επομένως, ορισμένη θερμότητα **στη μονάδα του χρόνου**, που ονομάζουμε ψυκτική ισχύ Q_{ψ} της εγκατάστασής μας, και συνήθως εκφράζεται σε $\text{kJ/s}=\text{kW}$ ενώ δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{\psi} = m \cdot (h_1 - h_3) \quad (\text{kW}) \quad (2.3)$$

Το **ανηγμένο ανά kg ψυκτικού μέσου θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο (w_{th}) που προσδίδει στον κύκλο ο συμπιεστής (έργο συμπίεσης)**, σε μονάδες kJ/kg , από το εμβαδόν ($S_4, 4, 3, 2_{is}, 1, 5, S_5, S_4$). Το θεωρητικό μηχανικό έργο που χρειάζεται ο ψυκτικός μας κύκλος για να λειτουργήσει δίδεται στη φάση της αδιαβατικής και κατ' επέκταση ισεντροπικής συμπίεσης $1 \sim 2_{is}$, κατά την οποία αυξάνει η ενθαλπία του μέσου απ' την αρχική κατάσταση h_1 στην τελική h_{2is} . Η ενθαλπική διαφορά ($h_{2is} - h_1$) αποτελεί το ανηγμένο **ανά μονάδα μάζας (kg)** θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο w_{th} , είτε την ανηγμένη ανά παροχή μάζας θεωρητική μηχανική ισχύς P_{th} , παρίσταται με εμβαδόν στο διάγραμμα T-s και εκφράζεται συνήθως σε μονάδες kJ/kg και δίδεται από τη σχέση:

$$w_{th} = h_{2is} - h_1 \quad \text{ή} \quad w_{th} = W_{th} / m = P_{th} / \dot{m} = \dot{W}_{th} / \dot{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.4)$$

Το **θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο W_{th} (συνολικό έργο συμπίεσης)**. Το παραπάνω ανηγμένο θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο εκφράζει την ποσότητα τεχνικού έργου που προσδίδει εξωτερικά ο συμπιεστής σε κάθε kg ψυκτικού, επομένως αν θέλουμε να υπολογίσουμε το συνολικό θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο που προσδίδεται στο ψυκτικό μέσο, τότε αρκεί να **πολλαπλασιάσουμε το ανηγμένο τεχνικό έργο (w_{th}) με την ποσότητα της μάζας (kg)**. Δηλαδή ισχύει:

$$W_{th} = m \cdot w_{th} \quad \text{ή} \quad W_{th} = m \cdot (h_{2is} - h_1) \quad (\text{kJ}) \quad (2.5)$$

Η **θεωρητική μηχανική ισχύς του συμπιεστή P_{th} ($\dot{W}_{th}$)**. Εκείνο όμως που έχει για μας πρακτική σημασία, μας ενδιαφέρει και κυρίως χαρακτηρίζει μια ψυκτική διάταξη είναι η **ισχύς του συμπιεστή**. Η παροχή μάζας **m (kg/s)** του ψυκτικού μέσου της εγκατάστασης απορροφά, επομένως, ορισμένη ποσότητα εξωτερικά προσδιδόμενου τεχνικού έργου **στη μονάδα του χρόνου**, που συνήθως εκφράζεται σε $\text{kJ/s}=\text{kW}$ και δίνεται από τη σχέση:

ΤΑ ΜΕΓΕΘΗ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ
ΧΡΩΜΑ ΕΙΝΑΙ ΑΝΑ
ΜΟΝΑΔΑ ΧΡΟΝΟΥ

$$\dot{m} \cdot (h_{2is} - h_1) \quad (\text{kW}) \quad (2.6)$$

Την **ανηγμένη ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα συμπεκνώσεως q_x** σε μονάδες kJ/kg , από το συνολικό εμβαδόν ($S_4, 4, 3, 2_{is}, S_1, S_4$). Είναι το άθροισμα του ανηγμένου ανά kg ψυκτικού μέσου θεωρητικού μηχανικού τεχνικού έργου w_{th} (έργο συμπίεσης) και της ανηγμένης ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα ατμοποίησης q_{ψ} (ψυκτική ικανότητα). Έτσι, το ποσό θερμότητας (ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου) που απορρίπτεται στο «θερμοδοχείο

(συμπυκνωτή-εξωτερικό περιβάλλον)» το ονομάζουμε ανηγμένη θερμότητα συμπυκνώσεως ή ανηγμένη ισχύς συμπυκνώσεως (ανά παροχή ψυκτικής μάζας) και συμβολίζεται με q_Σ , ενώ παρίσταται με εμβადόν στο διάγραμμα T-s και εκφράζεται συνήθως σε μονάδες kJ/kg. Το ψυκτικό μέσο εισέρχεται στο συμπυκνωτή με αρχική υψηλή ενθαλπία h_{2is} ενώ εξέρχεται με μειωμένη τελική ενθαλπία h_4 , έχοντας αποβάλει τη θερμότητα συμπυκνώσεως στο θερμοδοχείο. Η ενθαλπική διαφορά ($h_{2is} - h_4$) αποτελεί την ανηγμένη **ανά μονάδα μάζας (kg)** ψυκτικού μέσου θερμότητα συμπυκνώσεως q_Σ :

$$q_\Sigma = h_{2is} - h_4 \quad \text{ή} \quad q_\Sigma = Q_\Sigma / m = \mathbf{Q_\Sigma / m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.7)$$

Τη θερμότητα συμπυκνώσεως Q_Σ (συνολική θερμότητα συμπυκνώσεως).

Η παραπάνω ανηγμένη θερμότητα συμπυκνώσεως εκφράζει την ποσότητα θερμότητας που απορρίπτει κάθε kg ψυκτικού μέσου από το συμπυκνωτή, επομένως αν θέλουμε να υπολογίσουμε τη συνολική θερμότητα που απορρίπτει το ψυκτικό μέσο, τότε αρκεί να πολλαπλασιάσουμε την ανηγμένη θερμότητα συμπυκνώσεως q_Σ με την **ποσότητα της μάζας (kg)**. Δηλαδή ισχύει:

$$Q_\Sigma = m \cdot q_\Sigma \quad \text{ή} \quad Q_\Sigma = m \cdot (h_{2is} - h_4) \quad (\text{kJ}) \quad (2.8)$$

Ισχύς συμπυκνώσεως Q_Σ (απορριπτόμενη θερμική ισχύς). Εκείνο όμως που έχει για μας πρακτική σημασία και στην περίπτωση του συμπυκνωτή, το μέγεθος που κυρίως μας ενδιαφέρει είναι ο ρυθμός με τον οποίο απορρίπτεται η θερμότητα του ψυκτικού μέσου που κυκλοφορεί στην εγκατάσταση προς το «θερμοδοχείο (συμπυκνωτή-εξωτερικό περιβάλλον)». Έτσι, η παροχή μάζας **m (kg/s)** του ψυκτικού μέσου της εγκατάστασης που απορρίπτει, επομένως, ποσότητα θερμότητας **στη μονάδα του χρόνου** ονομάζεται και ισχύς συμπυκνώσεως της εγκατάστασής μας και συνήθως εκφράζεται σε kJ/s=kW, ενώ δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{Q_\Sigma = m \cdot (h_{2is} - h_4)} \quad (\text{kW}) \quad (2.9)$$

Στον θεωρητικό βασικό ψυκτικό κύκλο, στους ορισμούς των ανηγμένων και συνολικών μεγεθών (σχέσεις 2.1 μέχρι και 2.9) ατύπως θεωρήσαμε τα μεγέθη θετικά, σαν να ήταν με τις απόλυτες τιμές τους. Αν θέλουμε δηλαδή να ακριβολογήσουμε, η σχέση (2.6), που μας δίνει την ισχύ του συμπιεστή, δεν θα έπρεπε να είναι $P_{th} = \mathbf{W_{th}} = \mathbf{m \cdot (h_{2is} - h_1)}$ αλλά $P_{th} = \mathbf{W_{th}} = \mathbf{m \cdot (h_1 - h_{2is})}$ και επειδή $h_{2is} > h_1$ η ισχύς του συμπιεστή, θα προέκυπτε αρνητική (όπως πραγματικά είναι) και όχι θετική, όπως μας δίνει η σχέση (2.6). Διευκρινίζουμε λοιπόν ότι οι εκφράσεις όλης της παραπάνω ομάδας σχέσεων (από 2.1 μέχρι 2.9) δόθηκαν εν γνώση μας έτσι, με σκοπό την απλοποίηση των υπολογισμών, όπως αυτή βέβαια παρέχεται με χρήση των απόλυτων (θετικών) τιμών των μεγεθών.

Έτσι, λοιπόν, από εδώ και πέρα όπου συναντούμε τα μεγέθη q_ψ , Q_ψ , $\mathbf{Q_\psi}$, w_{th} , W_{th} , P_{th} , $\mathbf{W_{th}}$, q_Σ , Q_Σ , $\mathbf{Q_\Sigma}$, αυτά θα λογίζονται θετικά σαν να είναι οι απόλυτες τιμές. Σε κάθε βασική θεωρητική ψυκτική διάταξη, η ισχύς του συμπυκνωτή θα ισούται με το άθροισμα της ισχύος του συμπιεστή και της ψυκτικής ισχύος της διάταξης.

$$Q_\Sigma = Q_\psi + W_{th}$$

Αν οι ενθαλπίες του ψυκτικού μας μέσου δίδονται σε kJ/kg, τότε η ψυκτική ισχύς θα υπολογίζεται σε kW.

Αν η παροχή δίδεται σε άλλες μονάδες, πρέπει να μετατρέπεται σε kg/s.

Την ψυκτική ισχύ, επειδή αφορά μεταφορά θερμότητας, την εκφράζουμε συνήθως σε μονάδες θερμικής ισχύος, δηλαδή σε kcal/h (ή Btu/h ή RT), ενώ την ισχύ του συμπιεστή σε kW (ή PS).

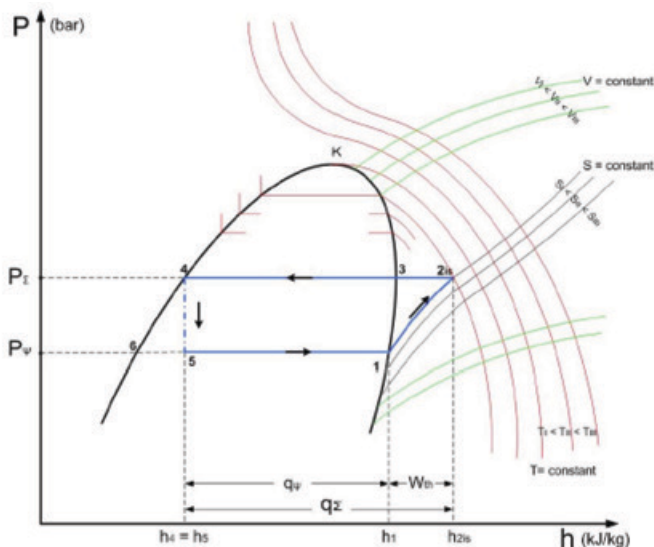
Υπενθυμίζουμε τις μετατροπές:

$$1 \text{ kcal} = 4,1858 \text{ kJ} = 3,9683 \text{ Btu}$$

$$1 \text{ kW} \approx 860 \text{ kcal/h} = 1,36 \text{ PS}$$

$$1 \text{ Kcal/h} = 3,9683 \text{ Btu/h} = 0,0003305 \text{ R}$$

2.1.3 Θερμοδυναμικές μεταβολές βασικού θεωρητικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h)



Διάγραμμα 4:

Βασικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών σε Διάγραμμα πίεσης-ειδικής ενθαλπίας (P-h)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η χρησιμότητα και το μεγάλο πλεονέκτημα του παραπάνω διαγράμματος πίεσης-ενθαλπίας (P-h) είναι ότι οι ισόθλιπτες μεταβολές, όπως η ατμοποίηση και η συμπύκνωση που συμβαίνουν σε κάθε ψυκτικό κύκλο, απεικονίζονται με ευθείες κάθετες στον άξονα των πιέσεων και η διαφορά των ενθαλπιών στον οριζόντιο άξονα απεικονίζει άμεσα τα ανηγμένα μεγέθη θερμότητας (q_{ψ} , q_z) και τεχνικού έργου (w_{th}), κάτι που μας παρέχει απλότητα και ευκολία στην πραγματοποίηση ενεργειακών υπολογισμών.

Έτσι, διακρίνουμε:

- Το ανηγμένο ανά kg θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο w_{th} που προσδίδει στον κύκλο ο συμπιεστής μας, σε μονάδες kJ/kg, από τη διαφορά των τμημάτων $h_{2is} - h_1$.
- Την ανηγμένη ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα συμπακνώσεως q_z του συμπυκνωτή μας, σε μονάδες kJ/kg, από τη διαφορά των ευθύγραμμων τμημάτων $h_{2is} - h_4$.
- Την ανηγμένη ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα ατμοποίησης q_{ψ} (ψυκτική ικανότητα) του ατμοποιητή μας, σε μονάδες kJ/kg, από τη διαφορά των ευθύγραμμων τμημάτων $h_1 - h_5$.

Η θεωρητικά αδιαβατική αναστρέψιμη συμπίεση 1~2_{is} βρίσκεται επί της ισεντροπικής γραμμής που διέρχεται από το σημείο-1, με το οποίο χαρακτηρίζεται η κατάσταση του ψυκτικού μέσου στην αναρρόφηση του συμπιεστή. Η τομή της ισεντροπικής αυτής με την ισόθλιπτη P_z προσδιορίζει την κατάσταση και θέση του σημείου-2_{is}. Και ονομάζουμε 2_{is} το σημείο στην έξοδο του συμπιεστή ακριβώς για να τονίσουμε ότι είναι ισεντροπικό με το σημείο-1 της αναρρόφησης του. Οι ισεντροπικές καμπύλες στην υπέρθερμη περιοχή φαίνονται με αχνό γκρι χρώμα ενώ με πράσινο οι ισόογκες. Επίσης στην ίδια περιοχή βλέπουμε και τις ισοθερμοκρασιακές καμπύλες με κόκκινο χρώμα. Κατά τη συμπίεση λοιπόν είναι εμφανής και η θέρμανση του ατμού, καθώς το σημείο-2_{is} βρίσκεται επί δεξιότερων σε σχέση με το σημείο-1 ισοθερμοκρασιακών. Το ανηγμένο θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο w_{th} προφανώς δίνεται από τη σχέση (2.4) $w_{th} = h_{2is} - h_1$.

Η ισόθλιπτη αποβολή θερμότητας 2_{is}~4 στο συμπυκνωτή χωρίζεται σε δύο στάδια. Σε πρώτο στάδιο την ψύξη του υπέρθερμου ατμού καταστάσεως 2_{is} μέχρι την ξηρή κεκορεσμένη κατάσταση 3 επί της οριακής γραμμής ($x=1$) και στη συνέχεια τη συμπύκνωσή του μέχρι του σημείου 4, επί της οριακής γραμμής ($x=0$) και την κεκορεσμένη υγρή κατάσταση, πίεσης P_z . Η ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου αποβαλλόμενη θερμότητα, κατά τη μεταβολή 2_{is}~4, δίνεται από τη σχέση (2.7), και επί του άξονα των ενθαλπιών ως μεταβολή μήκους, δηλαδή ισχύει η σχέση: $q_z = h_{2is} - h_4$.

Ο αδιαβατικός στραγγαλισμός πιέσεως 4~5, ο οποίος προσεγγίζεται με ισηνθαλπική μεταβολή, παρίσταται με την κατακόρυφο που διέρχεται από το σημείο 4. Η τομή αυτής με την ισόθλιπτη P_w ορίζει το σημείο 5, το οποίο παριστά την κατάσταση του διαφαικού μείγματος ατμός/υγρό, που εισέρχεται στο στοιχείο ατμοποίησης. Το ότι η διεργασία παριστάνεται με κατακόρυφο τμήμα, χωρίς μεταβολή μήκους επί του οριζόντιου άξονα των ενθαλπιών, είναι κάτι που περιμέναμε, γιατί με μεταβολή μήκους επί του οριζόντιου άξονα παριστάνονται μόνο οι μη ισηνθαλπικές διεργασίες. Προφανώς λοιπόν ισχύει η ακόλουθη σχέση: $dh_{45} = 0$.

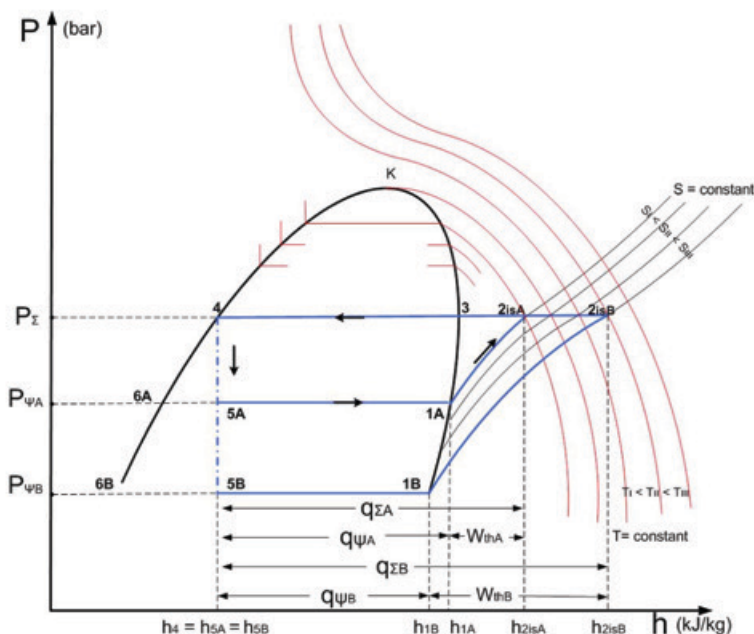
Η ισόθλιπτη και ταυτόχρονα ισοθερμοκρασιακή ατμοποίηση 5~1, που πραγματοποιείται εντός του ατμοποιητή, παρίσταται από τμήμα της ισόθλιπτης P_w . Η ανά μονάδα μάζας ψυκτικού μέσου απορροφώμενη θερμότητα, κατά τη μεταβολή 5~1, δίνεται από τη σχέση (2.1), και επί του άξονα των ενθαλπιών ως μεταβολή μήκους, δηλαδή ισχύει: $q_w = h_1 - h_5$.

Το μόνο που απομένει για να ολοκληρωθεί η θεωρητική προσέγγιση του παραπάνω στοιχειώδους βασικού κύκλου είναι ο ορισμός του συντελεστή λειτουργικής συμπεριφοράς του, που είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος ενδεικτικό της αποδοτικότητάς του και μέτρο της οικονομικής του λειτουργίας (COP_{th}).

2.1.4 Θεωρητικός Συντελεστής Συμπεριφοράς (COP_{th}) του βασικού θεωρητικού ψυκτικού κύκλου με μηχανική συμπίεση ατμών

Το περιβάλλον στο οποίο απορρίπτεται η θερμότητα έχει μια θερμοκρασία η οποία λίγο πολύ είναι καθορισμένη. Αν είναι καλοκαίρι, τότε η θερμοκρασία αυτή είναι υψηλότερη, αν είναι χειμώνας, είναι χαμηλότερη.

Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι η λειτουργία εγκατάστασης εξετάζεται το καλοκαίρι. Στο Διάγραμμα 5 που ακολουθεί η πίεση P_z καθορίζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.



Διάγραμμα 5:

Βασικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με δύο συνθήκες λειτουργίας σε
Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h)

Αν η εγκατάσταση λειτουργεί έτσι ώστε να εξυπηρετεί μια χαμηλή θερμοκρασία T_A για την οποία η ατμοποίηση γίνεται κατά τη μεταβολή 5A~1A, τότε το θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο που χρειάζεται ο συμπιεστής είναι ίσο με:

$$w_{thA} = h_{2isA} - h_{1A}$$

Για αυτή τη λειτουργία, η θερμότητα η οποία απάγεται από το ψυκτικό μέσο στο στοιχείο ατμοποίησης είναι:

$$q_{\psi A} = h_{1A} - h_{5A}$$

Αν όμως η εγκατάσταση πρέπει να εξυπηρετήσει μία χαμηλότερη θερμοκρασία στο θάλαμο του ψυγείου, τότε η ατμοποίηση πρέπει να γίνει σε χαμηλότερη πίεση. Στην περίπτωση αυτή η ατμοποίηση ακολουθεί τη μεταβολή 5B~1B, και είναι φανερό ότι στη χαμηλότερη αυτή θερμοκρασία ατμοποίησης το ψυκτικό μέσο απορροφά λιγότερη θερμότητα, κάτι που φαίνεται προφανώς και στο Διάγραμμα 5, με το μειωμένο ευθύγραμμο τμήμα που απεικονίζει την καινούργια μεταβολή σε χαμηλότερη πίεση. Πράγματι, το ποσό θερμότητας για την ατμοποίηση που δίνεται τώρα είναι:

$$q_{\psi B} = h_{1B} - h_{5B}$$

σαφώς μικρότερο από το ποσό ατμοποίησης $q_{\psi A}$ στην υψηλότερη πίεση. Εξάλλου, για τη λειτουργία με χαμηλότερη θερμοκρασία ατμοποίησης, απαιτείται και περισσότερο μηχανικό έργο, αφού πρέπει η συμπίεση να αρχίσει από χαμηλότερη πίεση. Έτσι, στην περίπτωση αυτή το θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο που χρειάζεται ο συμπιεστής θα είναι ίσο με:

$$w_{thB} = h_{2isB} - h_{1B}$$

Από όσα αναφέραμε είναι φανερό ότι το ίδιο μηχανικό έργο δεν αποδίδει πάντοτε το ίδιο αποτέλεσμα. Όσο περισσότερο απέχουν οι θερμοκρασίες (ή οι πιέσεις) ατμοποιήσεως και συμπυκνώσεως, τόσο δυσκολότερα γίνονται τα πράγματα και τόσο περισσότερο μηχανικό έργο απαιτείται. Για να υπάρξει ένα μέτρο σύγκρισης της δυσκολίας αυτής ή, καλύτερα, για να υπολογίζεται το μηχανικό έργο το οποίο καταναλώνεται για τη λειτουργία της εγκατάστασης, εισάγεται ένας ειδικός αδιάστατος συντελεστής, ο **(Θεωρητικός) Συντελεστής Συμπεριφοράς COP_{th} (Coefficient of Performance)**, που ορίζεται ως το πηλίκο της (θεωρητικής) ψυκτικής ισχύος Q_{ψ} προς την (θεωρητικά) απορροφώμενη μηχανική ισχύ P_{th} ή W_{th} και δίνεται από τη σχέση:

$$COP_{th} = (\Psi\kappa\tau\iota\kappa\eta\ I\sigma\chi\acute{\upsilon}\varsigma)_\theta / (I\sigma\chi\acute{\upsilon}\varsigma\ S\upsilon\mu\pi\iota\epsilon\sigma\tau\acute{\eta})_\theta = Q_{\psi} / P_{th} = Q_{\psi} / W_{th} \quad (2.10)$$

Ο συντελεστής συμπεριφοράς είναι αδιάστατος θετικός αριθμός και σε αντίθεση με το βαθμό απόδοσης μιας θερμικής μηχανής, ο οποίος παίρνει τιμές από 0 έως 1, ο συντελεστής συμπεριφοράς μπορεί να παίρνει και τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Πράγματι, δεν πρέπει να συγχέεται με το βαθμό απόδοσης μιας θερμικής μηχανής ή μιας ενεργειακής μετατροπής (ακριβώς επειδή η ψυκτική διάταξη δεν μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε άλλη, αλλά απλώς «κουβαλάει» τη θερμότητα από ένα χώρο σε άλλο). Ο συντελεστής συμπεριφοράς δείχνει το ποσό θερμότητας που «αντλείται» από τη χαμηλή θερμοκρασία την οποία εξυπηρετεί η εγκατάσταση, για κάθε μονάδα μηχανικού έργου την οποία καταναλώνει. Οι αριθμητικές τιμές του COP δεν είναι σταθερές.

Όταν η θερμοκρασία ατμοποίησης είναι κοντά στη θερμοκρασία συμπυκνώσεως, τότε προκύπτουν τιμές αρκετά μεγαλύτερες της μονάδας. Όσο απομακρύνονται οι θερμοκρασίες, τόσο ο συντελεστής συμπεριφοράς μικραίνει, διότι τότε με την ίδια μηχανική (ηλεκτρική) ισχύ η εγκατάσταση καλείται να «υπερνικήσει» μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά.

Ο συντελεστής συμπεριφοράς που δίνεται από την παραπάνω σχέση (2.10) είναι ο θεωρητικός συντελεστής συμπεριφοράς ο οποίος προκύπτει από τον θεωρητικό ψυκτικό κύκλο. Και αυτό το τονίζουμε διότι υπάρχει και πραγματικός συντελεστής συμπεριφοράς που θα αναφερθεί παρακάτω μετά την ανάλυση του πραγματικού ψυκτικού κύκλου.

Η αριθμητική τιμή πάντως του θεωρητικού συντελεστή συμπεριφοράς εξαρτάται κυρίως από το ψυκτικό μέσο, τη θερμοκρασία ατμοποίησης και τη θερμοκρασία συμπεκνώσεως.

Έτσι, για τις ίδιες θερμοκρασίες ατμοποίησης και συμπυκνώσεως, αν χρησιμοποιηθεί άλλο ψυκτικό μέσο, θα προκύψουν άλλες τιμές για το συντελεστή συμπεριφοράς.

Εκτός από τους τρεις παράγοντες που αναφέραμε παραπάνω, η τιμή του θεωρητικού συντελεστή συμπεριφοράς εξαρτάται ακόμα και από την υπόψυξη του συμπυκνώματος, καθώς και την υπερθέρμανση του ατμού στο τέλος της ατμοποίησης (δηλαδή απ' την ακριβή μορφή του κύκλου), καταστάσεις για τις οποίες όμως δεν έχουμε μιλήσει ακόμα.

Ο συντελεστής συμπεριφοράς χαρακτηρίζει και την ποιότητα μιας εγκατάστασης από ενεργειακής πλευράς, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο οικονομικότερη είναι η λειτουργία της, δηλαδή τόσο λιγότερη ενέργεια καταναλώνει για το ίδιο ψυκτικό αποτέλεσμα.

Αν στη σχέση (2.10), που ορίζει τον COP_{th} , εκφράσουμε την ψυκτική ισχύ και την ισχύ του συμπιεστή με τις τιμές των ενθαλπιών, τότε έχουμε:

Υπόψυξη κυκλώματος ονομάζουμε τη διαφορά θερμοκρασίας από την υγροποίηση έως το τέλος της γραμμής κατάθλιψης υγρού (συνήθως από 3~8 °C).

Υπερθέρμανση κυκλώματος ονομάζουμε τη διαφορά θερμοκρασίας από την εξάτμιση έως το τέλος της γραμμής αναρρόφησης (συνήθως μέχρι 10 °C).

Υπερθέρμανση

Στον βασικό θεωρητικό κύκλο που μέχρι τώρα εξετάσαμε υποθέσαμε ότι ο ατμός στην έξοδο του εξατμιστή είναι ξηρός κορεσμένος (σημείο-1) και σ' αυτή την κατάσταση αναρροφάται από το συμπιεστή. Δηλαδή και η τελευταία σταγόνα ψυκτικού ρευστού έχει εξατμιστεί ακριβώς στη χαμηλή θερμοκρασία εξάτμισης του κύκλου T_{ψ} . Στην πράξη όμως φροντίζουμε ν' απάγονται και μικρά φορτία αισθητής θερμότητας κοντά στο τέλος του εξατμιστή, ώστε να δημιουργούμε μια μικρή άνοδο της θερμοκρασίας, την οποία ονομάζουμε υπερθέρμανση και η οποία μας βεβαιώνει για την πλήρη εξάτμιση του ψυκτικού ρευστού. Και αυτό διότι δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που παρασύρονται επικίνδυνες και ανεπιθύμητες σταγόνες ψυκτικού μέσου ικανές να βλάψουν την ασφαλή λειτουργία του συμπιεστή. Οι ατμοί λοιπόν του ψυκτικού μας μέσου πριν αναρροφηθούν από το συμπιεστή έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία εξάτμισης T_{ψ} που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη πίεση και ακολουθούν ψυκτικό κύκλο με υπερθέρμανση.

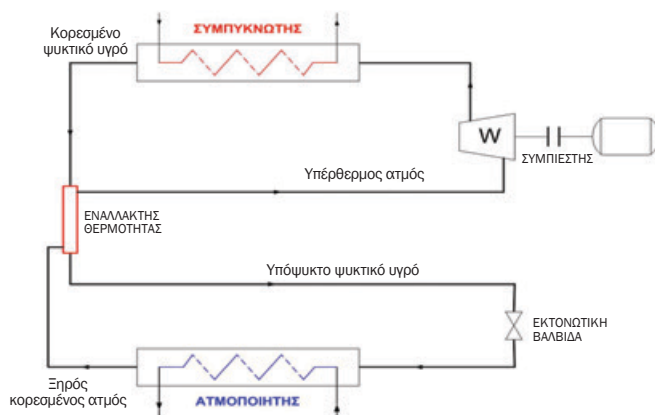
Εκτός αυτής της σημαντικής πρώτης προσφοράς της διαδικασίας υπερθέρμανσης, προσθέτουμε ότι εάν αυτή συμβαίνει μέσα στον ατμοποιητή, τότε η επιπλέον θερμότητα υπερθέρμανσης προστίθεται σαν ψυκτικό κέρδος στη διάταξή μας και μαζί με την υπόψυξη (αν αυτή βέβαια συμβαίνει μέσα στο συμπυκνωτή διαμέσου του περιβάλλοντος και όχι μέσω εσωτερικού εναλλάκτη) αυξάνουν την ψυκτική ισχύ που μας παρέχει αυτή. Στην πράξη όμως, αν και η υπερθέρμανση του ατμού πριν από την είσοδό του στο συμπιεστή επιβάλλεται εκ των πραγμάτων, συνήθως πραγματοποιείται εντός του σωληνωτού αγωγού που συνδέει το στοιχείο ατμοποίησης με το συμπιεστή και γι' αυτόν ακριβώς το λόγο δεν μπορεί να συμβάλει στην παραγωγή ωφέλιμης ψύξης.

Για τις διάφορες συνθήκες της ψυκτικής μηχανής που συναντώνται στην πράξη, καθώς και λόγω των χρησιμοποιούμενων μεθόδων ρυθμίσεως και ελέγχου της λειτουργίας της, είναι πρακτικά αδύνατο να υπάρχει στην είσοδο του συμπιεστή συνεχώς ξηρός κορεσμένος ατμός. Γενικά μια μικρή υπερθέρμανση του ψυκτικού μέσου στην είσοδο του συμπιεστή δε συνεπάγεται κανένα σημαντικό μειονέκτημα, πλην της ελαφρώς μικρότερης ογκομετρικής πληρώσεως του συμπιεστή, λόγω αυξήσεως του ειδικού όγκου του ατμού καθώς αυτός υπερθερμαίνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εισέρχεται μέσα στο συμπιεστή μικρότερη ποσότητα συμπιεσμένων ατμών σε κάθε κύκλο συμπίεσης, οπότε και ανεπιθύμητη αύξηση του τεχνικού έργου που προστίθεται σε κάθε κιλό (kg) ψυκτικού μέσου που συμπιέζεται. Γι' αυτό στην πράξη σε κύκλους με υπόψυξη και υπερθέρμανση (ακόμα και αυτόνομες χωρίς εσωτερικό εναλλάκτη), ενώ θα περιμέναμε αύξηση του COP λόγω αυξήσεως της ψυκτικής ισχύος, αντιθέτως ο COP εμφανίζεται μειωμένος σε σχέση με αυτόν του κλασικού κύκλου, κυρίως λόγω αυξήσεως του εξωτερικά επιβαλλόμενου τεχνικού έργου που συμβαίνει με την υπερθέρμανση.

Το φαινόμενο επιτείνεται όταν χρησιμοποιείται μέρος της θερμότητας υπερθερμάνσεως (που είναι χαμηλότερης θερμοκρασίας) για την πραγματοποίηση επιπλέον υπόψυξης του συμπυκνώματος, στην έξοδό του από το συμπυκνωτή, με χρήση εσωτερικού θερμοεναλλάκτη. Η χρήση εσωτερικού θερμοεναλλάκτη πρέπει να διερευνάται κατά περίπτωση, γιατί το αποτέλεσμα από ενεργειακής πλευράς δεν είναι πάντοτε μονοσή-

μαντα θετικό. Τις περισσότερες φορές πάντως επιλέγουμε τη χρήση εσωτερικού εναλλάκτη υπερθέρμανσης-υπόψυξης αδιαφορώντας για τη μείωση που πιθανόν επέλθει στον COP, διότι αποσκοπούμε με τη χρήση του στην αύξηση της ψυκτικής ισχύος της διάταξής μας έστω καταβάλλοντας μικρή επιπλέον δαπάνη για την κίνηση του ηλεκτροκινητήρα του συμπιεστή (επιπλέον κατανάλωση ρεύματος). Ο ρόλος της υπόψυξης στην αύξηση της ψυκτικής ισχύος θα φανεί αμέσως παρακάτω.

Στο Σχήμα 3 που ακολουθεί φαίνεται η σχηματική απεικόνιση μιας ψυκτικής διάταξης με χρήση εσωτερικού θερμοεναλλάκτη.



Σχήμα 3:

Ψυκτική διάταξη με χρήση εσωτερικού θερμοεναλλάκτη

ΥΠΟΨΥΞΗ

Στον βασικό ψυκτικό μας κύκλο θεωρήσαμε ότι το συμπύκνωμα που εισέρχεται στην εκτονωτική διάταξη (σημείο 4) είναι σε κατάσταση κορεσμένου υγρού, δηλαδή και η τελευταία ποσότητα ατμού του ψυκτικού ρευστού έχει υγροποιηθεί ακριβώς στη θερμοκρασία συμπύκνωσης T_z . Στην πράξη όμως συνήθως το συμπύκνωμα μετά την έξοδό του από το στοιχείο συμπυκνώσεως και πριν από την είσοδό του στη στραγγαλιστική διάταξη ψύχεται σε θερμοκρασία κατώτερη της θερμοκρασίας συμπυκνώσεως T_z , απορρίπτοντας επιπλέον θερμότητα προς το θερμοδοχείο (περιβάλλον). Η όλη μεταβολή χαρακτηρίζεται ως **υπόψυξη του συμπυκνώματος**, γιατί το υγρό βρίσκεται μεν υπό πίεση συμπυκνώσεως P_z , όχι όμως και σε θερμοκρασία T_z , συνεπώς δεν είναι πλέον σε κατάσταση κορεσμού και επί της αριστερής παρειάς της καμπύλης του διαγράμματος θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s), αλλά ακόμα αριστερότερα αυτής και συγκεκριμένα στην περιοχή υπόψυκτου υγρού.

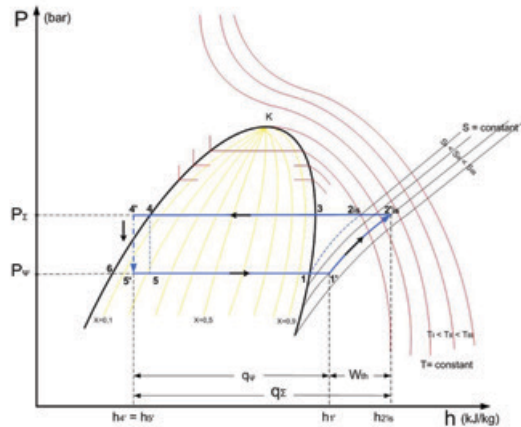
Ας δούμε όμως ποιο το όφελος από την υπόψυξη. Στη γενική περίπτωση που δεν έχουμε υπόψυξη και το υγρό εισέρχεται ως κορεσμένο μέσα στη διάταξη εκτόνωσης ή στραγγαλισμού, εμφανίζονται αμέσως φυσαλίδες ατμού που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της μερικής ατμοποίησης του υγρού κατά τη διέλευσή του μέσα από την εκτονωτική βαλβίδα, διαδικασία που συνοδεύεται μάλιστα (εκτός απ' την πτώση της πίεσής του) και από ταυτόχρονη ελάττωση της θερμοκρασίας του, δηλαδή την ψύξη του. Αυτό που συμβαίνει ουσιαστικά είναι ότι κατά την είσοδο του ρευστού διαμέσου της βαλβίδας διέρχεται διαδοχικά από όλο και μικρότερες πιέσεις απ' την πίεση συμπύκνωσης-ατμοποίησης με την οποία

Ξεκίνησε και στην οποία αντιστοιχεί, μονοσήμαντα βέβαια, η αφετηριακή θερμοκρασία κεκορεσμένου υγρού.

Αποτέλεσμα είναι να ξεκινήσει αμέσως η ατμοποίηση μέρους του ψυκτικού υγρού **απορροφώντας θερμότητα από το ίδιο το ρευστό**, ρίχνοντας τη θερμοκρασία του και ψύχοντάς το. Και αυτό συμβαίνει επειδή, όπως έχουμε ήδη πει, η διαδικασία μέσα στην εκτονωτική βαλβίδα γίνεται γρήγορα και **αδιαβατικά** χωρίς να συναλλάσσεται θερμότητα με το περιβάλλον. Έτσι, η **απαιτούμενη θερμότητα για την ατμοποίηση λαμβάνεται από το ίδιο το ρευστό**. Το εντυπωσιακό είναι ότι αυτή η θερμότητα, ενώ οδηγεί σε ατμοποίηση του ρευστού, δεν είναι ούτε μπορεί να λογίζεται ως λανθάνουσα, διότι παραδόξως συνοδεύεται από μεταβολή (πώση) της θερμοκρασίας καθ' όλη τη διαδικασία της ατμοποίησης. Είναι ένα σπάνιο αλλά ενδιαφέρον φαινόμενο, γι' αυτό και το εξηγήσαμε ιδιαίτερα.

Και επιστρέφουμε στη σημασία της υπόψυξης. **Αυτή η ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου μέσα στην εκτονωτική βαλβίδα είναι σαφώς πρόωρη** και καθόλου επιθυμητή, διότι εμείς προτιμούμε το ψυκτικό μέσο να ατμοποιείται σχεδόν όλο μέσα στο στοιχείο ατμοποίησης, γιατί από την ατμοποίηση αυτή, ως γνωστόν, προέρχεται και το ωφέλιμο αποτέλεσμα της ψυκτικής μας διάταξης, δηλαδή η ψυκτική ισχύς της. **Είναι, επομένως, προς όφελος της ψυκτικής εγκατάστασής μας να έχουμε στο τέλος του στραγγαλισμού και στο μείγμα υγρού-ατμού μεγάλο ποσοστό υγρού ψυκτικού μέσου**, να βρισκόμαστε δηλαδή όσο το δυνατόν κοντύτερα στην αριστερή καμπύλη κεκορεσμένου υγρού και σε καταστάσεις μικρού βαθμού ξηρότητας $x=0,1 \sim x=0,2$ (κίτρινες καμπύλες μέσα στη διφασική περιοχή του Διαγράμματος 7). Αυτό ακριβώς μας παρέχει η διαδικασία της υπόψυξης. Ξεκινώντας δηλαδή το στραγγαλισμό από σημείο όσο το δυνατόν αριστερότερα στην υπόψυκτη περιοχή, τόσο αργούν να εμφανιστούν φυσαλίδες ατμού μέσα στην εκτονωτική βαλβίδα (καθώς κατά την ισηenthalπική ελάττωση της πίεσης καθυστερούμε να προσεγγίσουμε τα όρια της καμπάνας) και τόσο αριστερότερα κατά την έξοδο απ' τη βαλβίδα, θα βρισκόμαστε στη διφασική περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ψυκτικής ισχύος της εγκατάστασής μας, που είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο πραγματοποιούμε την υπόψυξη. Όσο μεγαλύτερη είναι η υπόψυξη, τόσο περιορίζεται το ανεπιθύμητο φαινόμενο της ατμοποίησης μέσα στην εκτονωτική βαλβίδα, που κατά κόρον συμβαίνει (όπως είδαμε) στον βασικό κύκλο ψύξης χωρίς υπόψυξη, όπου η πώση πίεσης συνοδεύεται από την πρώτη κιόλας στιγμή εισόδου στην εκτονωτική βαλβίδα, με ατμοποίηση.

Άμεσο λοιπόν αποτέλεσμα και κέρδος μας από την εφαρμογή υπόψυξης στις εγκαταστάσεις μας είναι η αύξηση της επιθυμητής ψυκτικής ισχύος, κάτι που ταυτόχρονα βέβαια συμβάλλει και στην αύξηση του συντελεστή συμπεριφοράς COP της διάταξής μας, αφού, όπως φαίνεται και από τη σχέση (2.11), αυτός μεταβάλλεται ανάλογα με την ψυκτική ισχύ της διάταξής μας. Ο COP όμως εξαρτάται αντιστρόφως και από το τεχνικό έργο του συμπιεστή, γι' αυτό, εφόσον η υπόψυξη δεν γίνεται με τη βοήθεια του ίδιου του ψυκτικού μέσου (μέσω κατάλληλου εναλλάκτη και μετάδοσης θερμότητας, Σχήμα 3), αλλά από το περιβάλλον και μόνο μέσα στον συμπυκνωτή, τότε έχουμε ως **αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ψύξης και κατ' επέκταση του COP, χωρίς να απαιτείται αύξηση της προσδιδόμενης εξωτερικά μηχανικής ενέργειας**, όπως εύκολα προκύπτει από το T-s Διάγραμμα 6 και το P-h Διάγραμμα 7 που ακολουθούν. Το πλεονέκτημα όμως της υπόψυξης δεν είναι η αύξηση της αποδόσεως της εγκατάστασης αλλά η βελτίωση του ψυκτικού αποτελέσματος. Σε ορισμένες εγκαταστάσεις δε, η υπόψυξη μπορεί να επιτευχθεί και μέσα στο συμπυκνωτή, ειδικά αν αυτός είναι αυξημένων διαστάσεων.



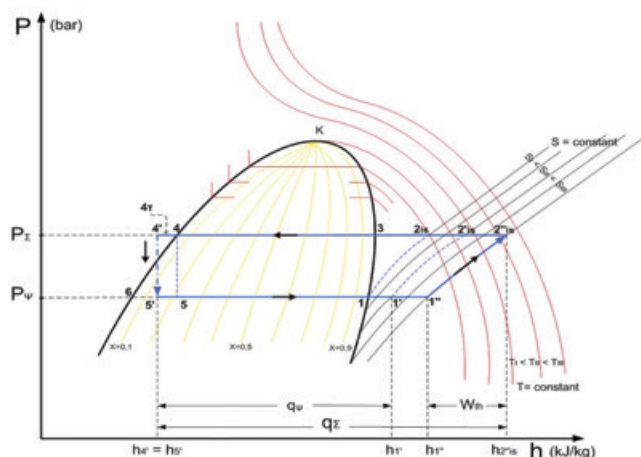
Διάγραμμα 7:

Θεωρητικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με
υπόψυξη και υπερθέρμανση –
Διάγραμμα πίεσης-ειδικής ενθαλπίας (P-h)

Στον παραπάνω ψυκτικό κύκλο η υπόψυξη του συμπυκνώματος παρίσταται με την ισόθλιπτη μεταβολή 4~4' και η υπερθέρμανση με την ισόθλιπτη μεταβολή 1~1'. Ο στραγγαλισμός πίεσεως δίνεται με τη μεταβολή 4' ~5' τώρα και όχι με τη μεταβολή 4~5, όπως στον θεωρητικό κύκλο του Διαγράμματος 7.

Η ανηγμένη ψυκτική ισχύ q_{ψ} παριστάνεται από το μήκος: $q_{\psi} = h_{1'} - h_{5'}$, που είναι μεγαλύτερο του $q_{\psi} = h_{1'} - h_{5'}$ του βασικού κύκλου κατά τα τμήματα 5~5' της υπόψυξης και 1~1' της υπερθέρμανσης.

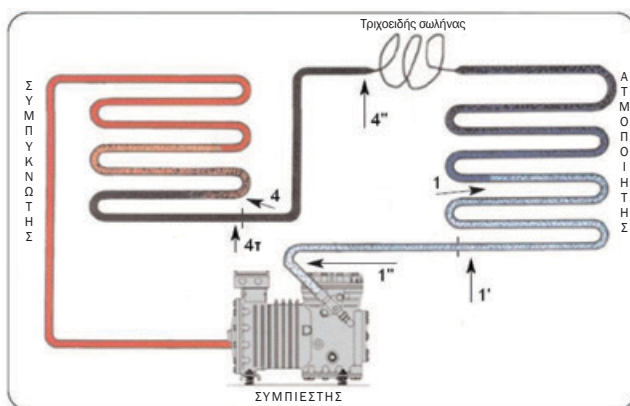
Βέβαια, τα παραπάνω δύο διαγράμματα προϋποθέτουν ότι η υπερθέρμανση ξεκίνησε μέσα και τελείωσε στην έξοδο από τον ατμοποιητή (χωρίς εσωτερικό θερμοεναλλάκτη) διότι μόνο τότε μπορούν να ληφθούν υπόψη μας ως ενεργειακά ωφέλιμες οι ποσότητες $q_{\psi\text{ΠΟΨ}}$ και $q_{\psi\text{ΠΕΘ}}$. Στην πράξη όμως (όπως θα δούμε και λίγο παρακάτω), υπερθέρμανση συναντάμε και στο σωληνωτό τμήμα που συνδέει τον ατμοποιητή με το συμπιεστή. Αυτό το τμήμα της υπερθέρμανσης οφείλεται σε εξωτερικά προσδιδόμενη θερμότητα από το περιβάλλον και όχι από το χώρο που θέλουμε να ψύξουμε και βρίσκεται σε επαφή με τον ατμοποιητή. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο και η ποσότητα αυτή δεν μπορεί να υπολογιστεί στην ωφέλιμη ανηγμένη ψυκτική ισχύ, κάτι που θα φανεί και στα παρακάτω διαγράμματα. Για την υπόψυξη δεν μας απασχολεί αν γίνεται μέσα ή έξω από το συμπυκνωτή. Αυτό εξαρτάται, όπως αναφέραμε και πιο πάνω, από το μέγεθος της συσκευής και μόνο. Αν δηλαδή οι διαστάσεις του συμπυκνωτή είναι επαρκείς, τότε σίγουρα η υπόψυξη του συμπυκνώματος θα ξεκινήσει πριν από την έξοδό του από αυτόν, ενώ όπου και να ολοκληρωθεί αυτή (ακριβώς στην έξοδο του συμπυκνωτή ή στο τέλος του σωληνωτού τμήματος που συνδέει συμπυκνωτή και εκτονωτική βαλβίδα), η συνολική θερμότητα της υπόψυξης θα προστεθεί στην ψυκτική ισχύ του κύκλου, ανεξάρτητα εάν χρησιμοποιείται εσωτερικός θερμοεναλλάκτης ή όχι. Όσον όμως αφορά την υπερθέρμανση (και εφόσον δεν χρησιμοποιούμε εναλλάκτη), είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε το πού γίνεται και λαμβάνει χώρο αυτή. Και αυτό διότι:



Διάγραμμα 9:

Θεωρητικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη και υπερθέρμανση μέχρι τον ατμοποιητή και έπειτα από αυτόν μέχρι και το συμπιεστή – Διάγραμμα πίεσης-ειδικής ενθαλπίας (P-h)

Για την καλύτερη κατανόηση όλων των παραπάνω, εξετάζουμε το Σχήμα 4 ενός ενδεικτικού ψυκτικού κυκλώματος με υπόψυξη και υπερθέρμανση χωρίς εσωτερικό εναλλάκτη. Η **υπόψυξη που ξεκινά μέσα στο συμπυκνωτή** ολοκληρώνεται στο τέλος του σωληνωτού, δηλαδή στην είσοδο της εκτονωτικής βαλβίδας, ενώ η **υπερθέρμανση που ξεκινά μέσα στον ατμοποιητή** ολοκληρώνεται στο τέλος του σωληνωτού, δηλαδή στην αναρρόφηση του συμπίεστή. Στο σχήμα της ψυκτικής διάταξης που ακολουθεί είναι εμφανή τα σημεία από όπου ξεκινούν η υπόψυξη και η υπερθέρμανση (μέσα στις δύο συσκευές), το πέρας των διαδικασιών (έξω από τις συσκευές), καθώς και τα σημεία εξόδου κάθε συσκευής που μας βοηθούν να καταλάβουμε τη σημασία των δύο σωληνωτών τμημάτων που ακολουθούν.



Σχήμα 4:

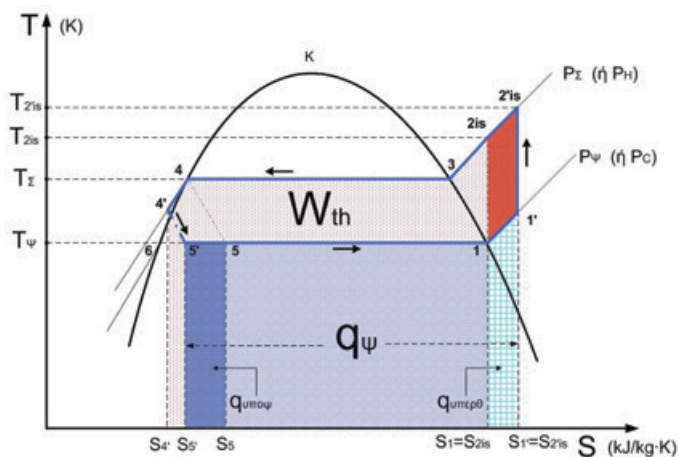
Σχηματική απεικόνιση μιας τυπικής διάταξης μηχανικής συμπίεσης ατμών που περιέχει ατμοποιητή, συμπίεστή, συμπυκνωτή και τριχοειδή σωλήνα με υπόψυξη και υπερθέρμανση

- | | | | |
|-----|---------------------------------|-----------|--------------------------|
| 4 | Σημείο απόλυτης υγροποίησης. | 4 έως 4τ | Υπόψυξη συμπυκνωτή. |
| 4τ | Έξοδος συμπυκνωτή. | 4 έως 4'' | Υπόψυξη κυκλώματος. |
| 4'' | Τελευταίο σημείο υπόψυξης. | 1 έως 1' | Υπερθέρμανση εξατμιστή. |
| 1 | Σημείο απόλυτης εξατμίσης. | 1 έως 1'' | Υπερθέρμανση κυκλώματος. |
| 1' | Έξοδος εξατμιστή. | | |
| 1'' | Τελευταίο σημείο υπερθέρμανσης. | | |

Η υπερθέρμανση ξεκινά μέσα στον ατμοποιητή στη θέση 1. Σε αυτή τη θέση το ψυκτικό μας μέσο βρίσκεται σε κατάσταση ξηρού κορεσμένου ατμού, ακριβώς πάνω στη δεξιά πλευρά της καμπάνας. Μέχρι τότε έχει παραλάβει την αισθητή θερμότητα ατμοποιήσεως υπό σταθερή πίεση και θερμοκρασία έως ότου να κορεστεί. Από αυτό το σημείο και μετά λοιπόν ο ξηρός κορεσμένος ατμός συνεχίζει να παραλαμβάνει θερμότητα μέσα στον ατμοποιητή από τον ψυχόμενο χώρο μεταπίπτοντας σε υπέρθερμο ατμό καταστάσεως -1' με την οποία εξέρχεται του ατμοποιητή. Η διαδρομή 1~1', επειδή ακριβώς είναι μέσα στον ατμοποιητή, υπολογίζεται ως πρόσθετη ανηγμένη ψυκτική ισχύς που ισούται με το ευθύγραμμο τμήμα ($h_1 - h_1'$) του P-s Διαγράμματος Θ, και σαν μοβ εμβαδόν ($S_{1,1,1}, S_1 S_1$) του T-s Διαγράμματος 8. Μετά την έξοδο του από τον ατμοποιητή ως υπέρθερμος ατμός (θέση 1'), οδηγείται στο συμπιεστή διαμέσου του σωληνωτού τμήματος 1' ~1'' που λαμβάνει εξωτερική θερμότητα περιβάλλοντος, μεταπίπτοντας σε ακόμα πιο υπέρθερμο ρευστό (ατμός) απ' ό,τι ήταν όταν βγήκε από τον ατμοποιητή. Αυτή η θερμότητα δεν είναι ωφέλιμη γιατί δεν προέρχεται από τον ατμοποιητή μας και τον ψυχόμενο χώρο. Γι' αυτό και στο P-s διάγραμμα η διαφορά ($h_1'' - h_1'$) δεν συνυπολογίζεται στην ωφέλιμη ανηγμένη ψυκτική ισχύ q_{ψ} , κάτι που φαίνεται καλύτερα στο T-s διάγραμμα με το φαιογάλανο χρώματος εμβαδόν ($S_{1'}, 1', 1'', S_{1''}, S_1$), σε σχήμα κάρναβου που βρίσκεται έξω από το ωφέλιμο εμβαδόν. Ο υπέρθερμος λοιπόν ατμός καταστάσεως 1'' οδηγείται στο συμπιεστή έχοντας παραλάβει δύο πρόσθετα ποσά υπερθέρμανσης. Ένα χρήσιμο και ένα περιττό. Αφού αναφερόμαστε στον θεωρητικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών ψυκτικού μέσου με υπόψυξη και υπερθέρμανση, όπως είναι λογικό θεωρούμε ότι η συμπίεση γίνεται ισεντροπικά, δηλαδή αδιαβατικά και χωρίς απώλειες. Έτσι, ο υπέρθερμος ατμός καταστάσεως 1'' συμπίεζεται ισεντροπικά ανεβάζοντας την πίεση και τη θερμοκρασία του στα υψηλότερα επίπεδα που συναντάμε στον κύκλο (κατάσταση $S_{2''is}$). Από εκείνο το σημείο ξεκινά η συμπύκνωσή του (αναρρόφηση συμπυκνωτή) μέχρι το σημείο πλήρους υγροποίησης (Σχήμα 4, θέση 4) που είναι μέσα στη συσκευή. Από αυτό το σημείο ξεκινά η υπόψυξη του μέσου που συνεχίζεται και μετά την έξοδο από τη συσκευή (Σχήμα 4, σημείο 4τ), αλλά και μέσα στο σωληνωτό που συνδέει το συμπυκνωτή με την εκτονωτική βαλβίδα έως το τελικό σημείο υπόψυξης (θέση 4') και την είσοδο στην εκτονωτική βαλβίδα.

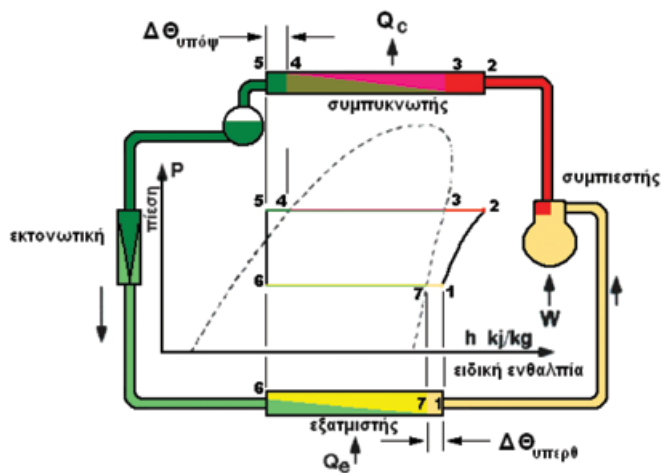
Το υπόψυκτο υγρό ψυκτικό μέσο εκτονώνεται στη συνέχεια μέχρι το σημείο 5' που βρίσκεται αριστερότερα από το σημείο 5 του κλασικού κύκλου, όπως έχουμε δει, προσθέτοντας την επιθυμητή ψυκτική ισχύ, που είναι και ο απώτερος σκοπός μας. Έτσι ολοκληρώνεται ο κύκλος μέσα στον ατμοποιητή απ' όπου ξεκίνησε.

Αν τώρα θεωρήσουμε ότι η υπερθέρμανση ξεκινά ακριβώς στην έξοδο του ατμοποιητή και εξελίσσεται μέσα στο σωληνωτό τμήμα που ακολουθεί, τότε προκύπτουν τα δύο παρακάτω διαγράμματα (που συναντούμε πολλές φορές στην πράξη) και με τα οποία θα προχωρήσουμε και στον ορισμό του θεωρητικού συντελεστή συμπεριφοράς.



Διάγραμμα 10

Θεωρητικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη και υπερθέρμανση από τον ατμοποιητή μέχρι και το συμπιεστή –
Διάγραμμα θερμοκρασίας-ειδικής εντροπίας (T-S)



Σχήμα 5

2.3 Πραγματικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη συμπυκνώματος και αναρρόφηση υπέρθερμου ατμού

2.3.1 Χαρακτηριστικά ψυκτικής διάταξης με υπόψυξη συμπυκνώματος και αναρρόφηση υπέρθερμου ατμού

Τις διαφορές που εμφανίζονται στις συνθήκες λειτουργίες ενός πραγματικού κύκλου ψύξης που συναντάμε στην πράξη, σε σχέση με αυτές ενός ιδανικού θεωρητικού ψυκτικού, μπορούμε να τις κατατάξουμε σε αυτές που συμβαίνουν άθελά μας (κυρίως λόγω μη αναστρεψιμότητας και απωλειών των μεταβολών) και σε αυτές που επιθυμούμε την ύπαρξή τους (πολλές φορές και χωρίς να τις έχουμε προκαλέσει εμείς), γιατί μας αποφέρουν ποικιλοτρόπως και γι' αυτόν το λόγο είναι επιθυμητές. Έτσι, στην πρώτη κατηγορία μπορούμε να κατατάξουμε κυρίως δύο περιπτώσεις διαφοροποίησης:

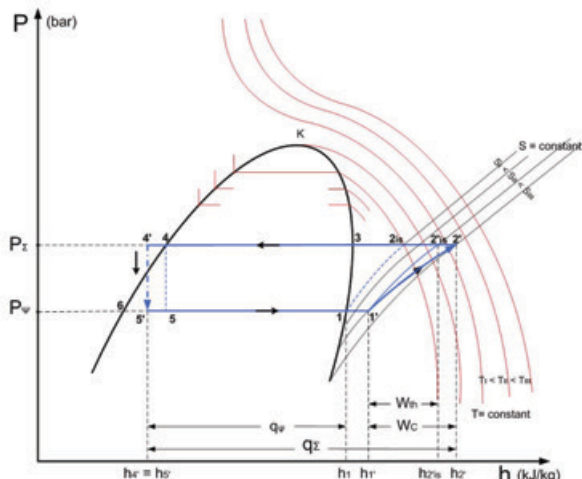
- Οι θερμικές **διαδικασίες ατμοποίησης και συμπυκνώσεως** που λαμβάνουν χώρα μέσα στον ατμοποιητή και στο συμπυκνωτή αντίστοιχα **δεν μπορούν να θεωρηθούν ισόθλιπτες**, λόγω των τριβών που επικρατούν στις σωληνώσεις των στοιχείων τους. Μέσα λοιπόν στις δύο συσκευές λαμβάνει χώρα πτώση πίεσης (έστω και μικρή), κάτι που σίγουρα διαφοροποιεί τον πραγματικό κύκλο από τις αντίστοιχες μεταβολές του θεωρητικού. Σε αυτή την κατηγορία μπορούμε να θεωρήσουμε και τις επιμέρους πτώσεις πιέσεων κατά μήκος και των λοιπών σωληνώσεων του κυκλώματος.
- Λόγω φυσικών απωλειών μέσα στο συμπιεστή (π.χ. τριβές των εμβόλων, μικροδιαρροές ψυκτικού μέσου και λαδιού, μη αδιαβατική διαδικασία λόγω μικρής μεταφοράς θερμότητας από το συμπιεζόμενο ρευστό στα τοιχώματα των κυλίνδρων κ.λπ.), **η συμπίεση δεν γίνεται ούτε μπορεί να λογίζεται ως ισεντροπική**. Η μη αδιαβατική διαδικασία συμπίεσης συνοδεύεται λοιπόν από αύξηση της εντροπίας του μέσου, το μέτρο της οποίας μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί με χρήση του ισεντροπικού βαθμού απόδοσης του συμπιεστή που δίνεται από τη σχέση:

$$n_{is} = h_{2'is} - h_1 / h_{2s} - h_1 \quad (2.15)$$

Όπως εύκολα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ισχύει και από το Διάγραμμα 12 που ακολουθεί. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο στους θεωρητικούς κύκλους που αναλύσαμε μέχρι τώρα επιλέξαμε να αριθμούμε συνεχώς την έξοδο του συμπιεστή ως 2_{is} ή $2'_{is}$ ή $2''_{is}$ (τονίζοντας την ισεντροπικότητα) σε αντίθεση με την πραγματική μη ισεντροπική έξοδο 2 ή $2'$ ή $2''$ του συμπιεστή.

Στη δεύτερη κατηγορία κατατάσσουμε τις δύο γνωστές μας μεταβολές της υπόψυξης και της υπερθέρμανσης που αναλύσαμε εκτενώς παραπάνω. Είναι διαδικασίες που συναντούμε σε όλες σχεδόν τις ψυκτικές διατάξεις, και κυρίως στα δύο σωληνωτά τμήματα στην έξοδο συμπυκνωτή και ατμοποιητή αντίστοιχα. Είναι επιθυμητή η ύπαρξή τους και σε πολλές περιπτώσεις ενισχύουμε το φαινόμενο με χρήση εσωτερικού θερμοεναλλάκτη για επιπλέον ψυκτική ισχύ και ταυτόχρονη προστασία του συμπιεστή από την υγρασία των ψυκτικών ατμών.

2.3.2 Θερμοδυναμικές μεταβολές πραγματικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη συμπυκνώματος και αναρρόφηση υπέρθερμου ατμού σε διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) και πίεσης-ενθαλπίας (P-h)



Διάγραμμα 12:

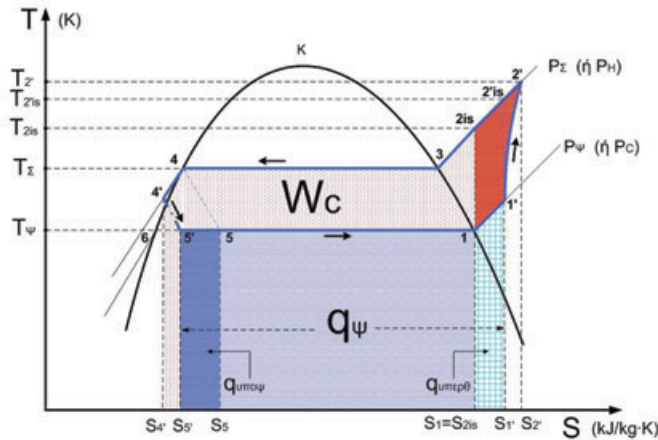
Πραγματικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη και υπερθέρμανση –
Διάγραμμα πίεσης-ειδικής ενθαλπίας (P-h)

Στον παραπάνω ψυκτικό κύκλο η υπόψυξη του συμπυκνώματος παρίσταται με την ισόθλιπτη μεταβολή 4~4' και η υπερθέρμανση με την ισόθλιπτη μεταβολή 1~1', που επειδή ξεκινά με την έξοδο από τον ατμοποιητή δεν συμμετέχει σαν επιπλέον ανηγμένη ψυκτική ισχύ. Ο στραγγαλισμός πίεσεως δίνεται με τη μεταβολή 4' ~5', ενώ η διαδικασία της συμπίεσης παριστάνεται με τη μεταβολή 1' ~2'. Στο διάγραμμα όμως φαίνεται και η **ισεντροπική μεταβολή 1' ~2'is** που συναντούσαμε συνεχώς σε όλους τους θεωρητικούς κύκλους μέχρι τώρα. Η πραγματική μεταβολή συμπίεσης 1' ~2' απεικονίζεται με το ευθύγραμμο τμήμα $w_c = h_{2'} - h_{1'}$, όπου w_c ή w_{ef} το **ανηγμένο πραγματικό μηχανικό τεχνικό έργο του συμπίεστή μας**.

Η μεταβολή συνοδεύεται με αύξηση της εντροπίας λόγω των γνωστών απωλειών μέσα στο συμπίεστή. Καλύτερη απεικόνιση αυτής της αύξησης φαίνεται στο Διάγραμμα 13 που ακολουθεί.

Το μέγεθος αυτής της μεταβολής, που εξαρτάται από το είδος του συμπίεστή και τις συνθήκες αναρρόφησης και κατάθλιψής του, καταδεικνύεται από τον **ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του συμπίεστή και τη σχέση (2.16)**.

$$\eta_{is} = h_{2'is} - h_{1'} / h_{2'} - h_{1'} \quad (2.16)$$



Διάγραμμα 13:

Πραγματικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με
υπόψυξη και υπερθέρμανση –

Διάγραμμα θερμοκρασίας-ειδικής εντροπίας (T-s)

2.3.3 Πραγματικός Συντελεστής Συμπεριφοράς (COP) του ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη και υπερθέρμανση

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε πλέον να συνοψίσουμε τις διάφορες σχέσεις που διέπουν τον πραγματικό ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμών, με υπόψυξη συμπυκνώματος και συμπίεση υπέρθερμου ατμού, ανηγμένες ανά kg ψυκτικού μέσου ή ανά μονάδα παροχής μάζας ψυκτικού μέσου. Οι σχέσεις αυτές είναι:

Ανηγγμμένη ψυκτική ισχύς

ΤΑ ΜΕΓΕΘΗ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ $\mathbf{q}_{\psi} = \mathbf{Q}_{\psi} / \mathbf{m} = (\mathbf{h}_1 - \mathbf{h}_{5'}) = (\mathbf{h}_1 - \mathbf{h}_{4'})$ (2.17)
ΧΡΩΜΑ ΕΙΝΑΙ ΑΝΑ
ΜΟΝΑΔΑ ΧΡΟΝΟΥ

Ανηγγεμένη πραγματική μηχανική ισχύς (ανηγμένο πραγματικό μηχανικό έργο)

$$\mathbf{w}_c = \mathbf{P}_c / \mathbf{m} = \mathbf{W}_c / \mathbf{m} = (\mathbf{h}_{2'} - \mathbf{h}_{1'}) \quad (2.18)$$

Ο Πραγματικός Συντελεστής Συμπεριφοράς, ή απλά **Συντελεστής Συμπεριφοράς COP**, ορίζεται με τη βοήθεια του **ανεγμένου πραγματικού μηχανικού έργου** w_c ή w_{ef} (ανεγμένη πραγματική μηχανική ισχύς), που προσδίδεται στην άτρακτο του μηχανικού συμπιεστή, αντί του θεωρητικού w_{th} , και δίνεται από τη σχέση (2.19), που είναι και από τις πιο σημαντικές:

TA METEΓΘΗ ME KOKKINO
XΡΩΜΑ EINAI ANA
MONADA XRONOY

$$\begin{aligned} \text{COP} &= Q_{\psi} / P_c = Q_{\psi} / W_c = Q_{\psi} / W_{ef} \\ &= (\mathbf{m} \cdot q_{\psi}) / (\mathbf{m} \cdot w_c) = (h_1 - h_5) / (h_2 - h_1) \\ &= (h_1 - h_4) / (h_7 - h_1) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Στο συντελεστή αυτόν περιλαμβάνονται και όλες οι πάσης φύσεως απώλειες του συμπίεστη της ψυκτικής εγκατάστασης. Προκειμένου για ηλεκτροκίνητους ερμητικά κλειστούς συμπίεστες, συνήθως για τον ορισμό του συντελεστή συμπεριφοράς χρησιμοποιείται η ηλεκτρική ισχύς P_{el} , η οποία προσδίδεται στους ακροδέκτες του ηλεκτροκινητήρα κινήσεως του συμπίεστη. Ο ορισμός αυτός περιλαμβάνει και τις απώλειες του ηλεκτροκινητήρα. Ο

συντελεστής αυτός καλείται και **Ακροδεκτικός Συντελεστής Συμπεριφοράς** COP_{el} , ενώ δίδεται από την παρακάτω σχέση:

$$COP_{el} = Q_{\psi} / P_{el} \quad (2.20)$$

Τέλος, ειδικά για τους συμπιεστές ορίζονται οι παρακάτω τρεις χρήσιμοι βαθμοί απόδοσης, ενδεικτικοί της λειτουργικής απόκρισής τους.

Πραγματικός Βαθμός Απόδοσης

Ορίζεται ως ο λόγος της θεωρητικής ισχύος P_{th} (μεταβολή με ισεντροπική συμπίεση) με την πραγματική ισχύ P_{ef} της ατράκτου του συμπιεστή:

$$\eta_{ef} = P_{th} / P_{ef} \quad (2.21)$$

Ηλεκτρικός Βαθμός Απόδοσης

Αφορά ηλεκτροκίνητους συμπιεστές και ορίζεται από το λόγο της πραγματικής P_{ef} προς την ηλεκτρική ισχύ P_{el} , η οποία προσδίδεται στους ακροδέκτες του ηλεκτροκινητήρα:

$$\eta_{el} = P_{ef} / P_{el} \quad (2.22)$$

Ακροδεκτικός Βαθμός Απόδοσης

Ορίζεται ως ο λόγος της θεωρητικής ισχύος P_{th} (μεταβολή με ισεντροπική συμπίεση) με την ηλεκτρική ισχύ P_{el} που προσδίδεται στους ακροδέκτες του ηλεκτροκινητήρα:

$$\eta_{kl} = P_{th} / P_{el} \quad (2.23)$$

2.4 ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύσαμε τις θερμοδυναμικές μεταβολές και την ενεργειακή συμπεριφορά των ψυκτικών εγκαταστάσεων μηχανικής συμπίεσης ατμών με τη χρήση των διαγραμμάτων πίεσης-ενθαλπίας (P-h) και θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s). Εξηγήσαμε τις θερμοδυναμικές μεταβολές που συμβαίνουν στους θεωρητικούς ψυκτικούς κύκλους για να καταλήξουμε στον πραγματικό ψυκτικό κύκλο και στις θερμοδυναμικές μεταβολές που συμβαίνουν στην πράξη, με τη χρήση των δυο βασικών διαγραμμάτων.

Διακρίναμε και αναλύσαμε τις θερμοδυναμικές μεταβολές του ψυκτικού μέσου στα διαγράμματα (P-h) και (T-s), ξεκινώντας από τον βασικό θεωρητικό κύκλο ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών («Συμπίεση», «Συμπύκνωση», «Στραγγαλισμός», «Ατμοποίηση»), ο οποίος μας δίνει την **απόλυτη έννοια λειτουργίας** των ψυκτικών κυκλωμάτων **σε ιδανικές συνθήκες λειτουργίας** και χωρίς παρεμβολές από εξωτερικούς παράγοντες. Έτσι, σε αυτόν:

- Η συμπύκνωση και η ατμοποίηση είναι ισόθλιπτες διαδικασίες (χωρίς τριβές) και λαμβάνουν χώρα χωρίς υπόψυξη και υπερθέρμανση.
- Η συμπίεση είναι αναστρέψιμη αδιαβατική διαδικασία και κατ' επέκταση ισεντροπική, ενώ η εκτόνωση είναι άεργος αδιαβατική και κατ' επέκταση ισενθαλπική διαδικασία.

Στη συνέχεια διακρίναμε και αναλύσαμε τις θερμοδυναμικές μεταβολές του ψυκτικού μέσου, του βασικού θεωρητικού κύκλου ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών στα διαγράμματα (P-h) και (T-s), με υπόψυξη και υπερθέρμανση («Συμπίεση», «Συμπύκνωση», «Υπόψυξη», «Στραγγαλισμός», «Ατμοποίηση», «Υπερθέρμανση»), τη συμπεριφορά του ψυκτικού κύκλου με αύξηση ή μείωση της υπόψυξης και υπερθέρμανσης και καταλήξαμε στον πραγματικό ψυκτικό κύκλο, όπου περιλαμβάνονται όλες οι πάσης φύσεως απώλειες του συμπιεστή της ψυκτικής εγκατάστασης. Στον πραγματικό κύκλο οι θερμικές διαδικασίες ατμοποίησης και συμπύκνωσης που λαμβάνουν χώρα μέσα στον ατμοποιητή και στο συμπυκνωτή αντίστοιχα δεν μπορούν να θεωρηθούν ισόθλιπτες, λόγω των τριβών που επι-

κρατούν στις σωληνώσεις των στοιχείων τους. Μέσα λοιπόν στις δύο συσκευές λαμβάνει χώρα πτώση πίεσης (έστω και μικρή), κάτι που σίγουρα διαφοροποιεί τον πραγματικό κύκλο από τις αντίστοιχες μεταβολές του θεωρητικού. Σε αυτή την κατηγορία μπορούμε να θεωρήσουμε και τις επιμέρους πτώσεις πιέσεων κατά μήκος και των λοιπών σωληνώσεων του κυκλώματος. Λόγω φυσικών απωλειών μέσα στο συμπιεστή (π.χ. τριβές των εμβόλων, μικροδιαρροές ψυκτικού μέσου και λαδιού, μη αδιαβατική διαδικασία λόγω μικρής μεταφοράς θερμότητας από το συμπιεζόμενο ρευστό στα τοιχώματα των κυλίνδρων κ.λπ.), **η συμπίεση δεν γίνεται ούτε μπορεί να λογίζεται ισεντροπική**. Η μη αδιαβατική διαδικασία συμπίεσης συνοδεύεται λοιπόν από αύξηση της εντροπίας του ψυκτικού μέσου.

Η συναλλαγή ενέργειας στον ψυκτικό κύκλο λαμβάνει χώρα είτε με μορφή θερμότητας (q_w, q_z) είτε με μορφή τεχνικού έργου (w_{th}).

Έτσι, διακρίναμε και αναλύσαμε:

- **Την ανηγμένη ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα ατμοποίησης q_w (ψυκτική ικανότητα) του ατμοποιητή και όλης της διάταξής μας, σε μονάδες kJ/kg, από το εμβαδόν ($S_5, 5, 1, S_1, S_5$).**
- **Το ανηγμένο ανά kg ψυκτικού μέσου θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο (w_{th}) που προσδίδει στον κύκλο ο συμπιεστής (έργο συμπίεσης), σε μονάδες kJ/kg, από το εμβαδόν ($S_4, 4, 3, 2_{is}, 1, 5, S_5, S_4$).**
- **Την ανηγμένη ανά kg ψυκτικού μέσου θερμότητα συμπυκνώσεως q_z σε μονάδες kJ/kg, από το συνολικό εμβαδόν ($S_4, 4, 3, 2_{is}, S_1, S_4$), που είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω.**

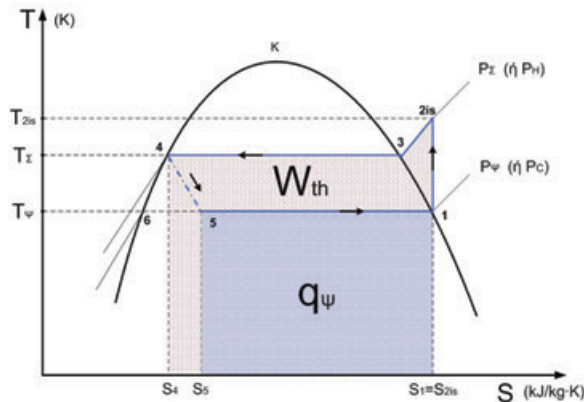
Τέλος, αναλύσαμε το συντελεστή λειτουργικής συμπεριφοράς, που είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος, ενδεικτικό της αποδοτικότητας του ψυκτικού κύκλου και μέτρο της οικονομικής του λειτουργίας (COP_{th}).



2.5 ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

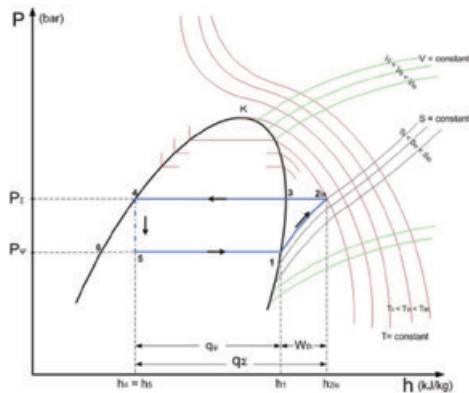
1. Αντιστοίχισε τα εμβάδα που απεικονίζουν τις ανηγμένες ανά kg ψυκτικού μέσου συναλλασσόμενες ποσότητες ενέργειας kJ μεταξύ συστήματος (κυκλοφορούμενου ψυκτικού μέσου) και περιβάλλοντος στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s).

1-2 _{is} •	• Ισόθλιπτη και ταυτόχρονα ισοθερμοκρασιακή ατμοποίηση.
2 _{is} - 4 •	• Θεωρητικά αδιαβατικά αναστρέψιμη συμπίεση.
4-5 •	• Διαβατικός στραγγαλισμός πίεσεως (εκτόνωση).
5-1 •	• Ισόθλιπτη αποβολή θερμότητας (συμπύκνωση).



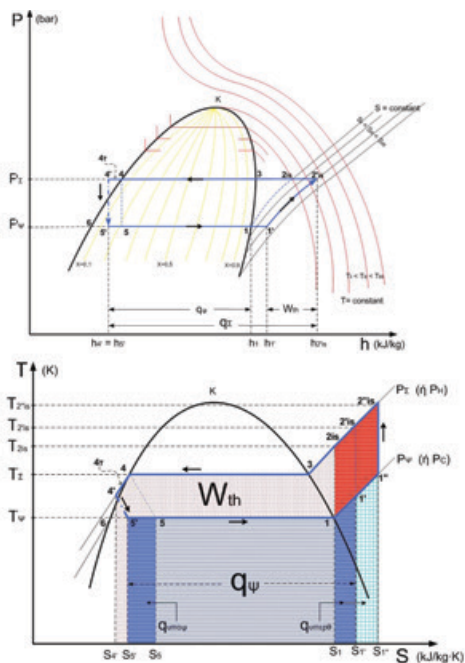
2. Αντιστοίχισε τις θερμοδυναμικές μεταβολές του θεωρητικού κύκλου ψύξης στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).

1-2 _{is} •	• Ισόθλιπτη και ταυτόχρονα ισοθερμοκρασιακή ατμοποίηση.
2 _{is} - 4 •	• Θεωρητικά αδιαβατικά αναστρέψιμη συμπίεση.
4-5 •	• Διαβατικός στραγγαλισμός πίεσεως (εκτόνωση).
5-1 •	• Ισόθλιπτη αποβολή θερμότητας (συμπύκνωση).

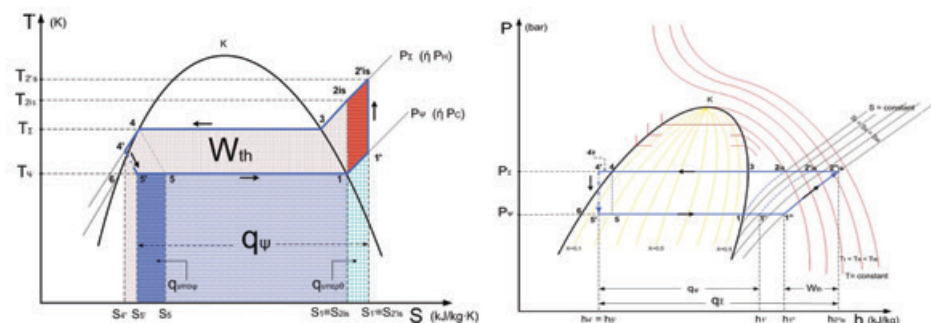


3. Σημείωσε με ν το σωστό στο καθένα από τα παρακάτω διαγράμματα θερμοκρασίας-ειδικής εντροπίας (T-s) και πίεσης-ενθαλπίας (P-h).

- | | |
|---|--------------------------|
| • Η υπερθέρμανση ξεκινά από και μέχρι τον ατμοποιητή και έπειτα από αυτόν μέχρι και το συμπιεστή. | ☐ |
| • Η υπερθέρμανση ξεκινά από τον ατμοποιητή μέχρι και το συμπιεστή. | ☐ |
| • Η υπερθέρμανση ξεκινά από και μέχρι τον ατμοποιητή και έπειτα από αυτόν μέχρι και το συμπιεστή. | ☐ |
| • Η υπερθέρμανση ξεκινά από τον ατμοποιητή μέχρι και το συμπιεστή. | ☐ |

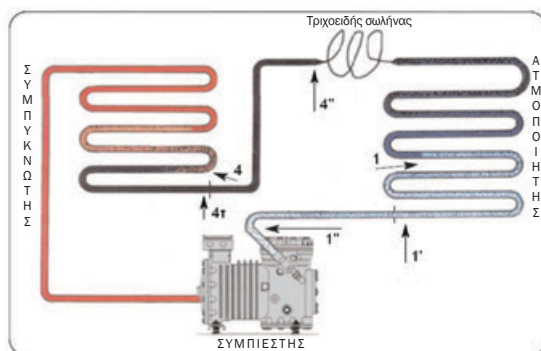


- | | |
|---|--------------------------|
| • Η υπερθέρμανση ξεκινά από και μέχρι τον ατμοποιητή και έπειτα από αυτόν μέχρι και το συμπιεστή. | ☐ |
| • Η υπερθέρμανση ξεκινά από τον ατμοποιητή μέχρι και το συμπιεστή. | ☐ |
| • Η υπερθέρμανση ξεκινά από και μέχρι τον ατμοποιητή και έπειτα από αυτόν μέχρι και το συμπιεστή. | ☐ |
| • Η υπερθέρμανση ξεκινά από τον ατμοποιητή μέχρι και το συμπιεστή. | ☐ |



4. Αντιστοίχισε τις μεταβολές του ψυκτικού μέσου με τα αριθμημένα σημεία της ψυκτικής διάταξης του παρακάτω σχήματος.

- | | |
|------------|----------------------------------|
| 4 • | • Έξοδος εξατμιστή |
| 4τ • | • Έξοδος συμπυκνωτή |
| 4 έως 4τ • | • Σημείο απόλυτης υγροποίησης |
| 4' • | • Υπερθέρμανση εξατμιστή |
| 1 έως 1' • | • Τελευταίο σημείο υπερθέρμανσης |
| 4 έως 4' • | • Υπόψυξη συμπυκνωτή |
| 1 • | • Σημείο απόλυτης εξάτμισης |
| 1 έως 1' • | • Υπερθέρμανση κυκλώματος |
| 1' • | • Τελευταίο σημείο υπόψυξης |
| 1' • | • Υπόψυξη κυκλώματος |



5. Αντιστοίχισε τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τον θεωρητικό και τον πραγματικό κύκλο ψύξης.

• Θεωρητικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών με υπόψυξη συμπυκνώματος και αναρρόφηση υπερθερμού ατμού.	• Η συμπύκνωση και η ατμοποίηση είναι ισόθλιπτες διαδικασίες χωρίς τριβές και απώλειες. • Η υπόψυξη και η υπερθέρμανση είναι επιθυμητές και σε πολλές περιπτώσεις ενισχύουμε το φαινόμενο με χρήση εσωτερικού θερμοεναλλάκτη για επιπλέον ψυκτική ισχύ και ταυτόχρονη προστασία του συμπιεστή από την υγρασία των ψυκτικών ατμών. • Η συμπίεση είναι αναστρέψιμη αδιαβατική διαδικασία και κατ' επέκταση ισεντροπική, ενώ η εκτόνωση είναι άεργος αδιαβατική και κατ' επέκταση ισενθαλπική διαδικασία. • Η μη αδιαβατική διαδικασία συμπίεσης συνοδεύεται από αύξηση της εντροπίας του ψυκτικού μέσου.
• Πραγματικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.	• Οι θερμικές διαδικασίες ατμοποίησης και συμπύκνωσης που λαμβάνουν χώρα μέσα στον ατμοποιητή και στο συμπυκνωτή αντίστοιχα δεν μπορούν να θεωρηθούν ισόθλιπτες, λόγω των τριβών που επικρατούν στις σωληνώσεις των στοιχείων τους. • Πτώσεις πιέσεων κατά μήκος και των σωληνώσεων του κυκλώματος. • Λόγω φυσικών απωλειών μέσα στο συμπιεστή (π.χ. τριβές των εμβόλων, μικροδιαρροές ψυκτικού μέσου και λαδιού, μη αδιαβατική διαδικασία λόγω μικρής μεταφοράς θερμότητας από το συμπιεζόμενο ρευστό στα τοιχώματα των κυλίνδρων κ.λπ.), η συμπίεση δεν γίνεται ούτε μπορεί να λογίζεται ως ισεντροπική.

6. Αντιστοίχισε τις θερμοδυναμικές μεταβολές με τους τρεις κύκλους ψύξης.

• Βασικός θεωρητικός ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμών.	1. Είσοδος συμπίεστή: Υπέρθερμος ατμός. 2. Έξοδος συμπίεστή: Ξηρός υπέρθερμος ατμός. Αύξηση της εντροπίας. 3. Είσοδος συμπυκνωτή: Ξηρός υπέρθερμος ατμός. 4. Αρχή συμπύκνωσης: Ξηρός κορεσμένος ατμός. 5. Τέλος συμπύκνωσης: Κεκορεσμένο υγρό. 6. Έξοδος συμπυκνωτή: Υπόψυκτο υγρό. 7. Σωληνωτό τμήμα μεταξύ συμπυκνωτή και στραγγαλιστικής διάταξης: Ακόμα πιο υπόψυκτο υγρό. 8. Είσοδος στραγγαλιστικής διάταξης: Υπόψυκτο υγρό. 9. Έξοδος στραγγαλιστικής διάταξης: Κορεσμένο υγρό (υγρό ατμός). 10. Είσοδος ατμοποιητή: Κορεσμένο υγρό. 11. Αρχή ατμοποίησης: Κορεσμένο υγρό. 12. Τέλος ατμοποίησης: Ξηρός κορεσμένος ατμός. 13. Έξοδος ατμοποιητή: Υπέρθερμος ατμός (ωφέλιμη υπερθέρμανση). 14. Σωληνωτό τμήμα μεταξύ ατμοποιητή και συμπίεστή: Ακόμα πιο υπέρθερμος ατμός (περιττή υπερθέρμανση).
---	--

•
Πραγματικός
ψυκτικός κύκλος
μηχανικής
συμπύεσης
ατμών.

1. Είσοδος συμπίεστή: Υπέρθερμος ατμός. Αδιαβατική αναστρέψιμη συμπίεση.
2. Έξοδος συμπίεστή: Ξηρός υπέρθερμος ατμός. Αδιαβατική αναστρέψιμη συμπίεση. Πίεση ίση με την πίεση συμπίκνωσης και εντροπία ίδια με την είσοδο στο συμπίεστή.
3. Είσοδος συμπυκνωτή: Ξηρός υπέρθερμος ατμός, πίεση και εντροπία ίδιες με την είσοδο στο συμπίεστή.
4. Αρχή συμπύκνωσης: Ξηρός κορεσμένος ατμός.
5. Τέλος συμπύκνωσης: **Κεκορεσμένο υγρό.**
6. Έξοδος συμπυκνωτή: Υπόψυκτο υγρό. Πίεση ίδια με πίεση στην είσοδο του συμπυκνωτή.
7. Έξοδος συμπυκνωτή: Υπόψυκτο υγρό. Πίεση ίδια με πίεση στην είσοδο του συμπυκνωτή.
8. Είσοδος στραγγαλιστικής διάταξης: Υπόψυκτο υγρό.
9. Έξοδος στραγγαλιστικής διάταξης: **Κορεσμένο υγρό (υγρό ατμός). Ενθαλπία ίδια με την είσοδο στη στραγγαλιστική διάταξη, αδιαβατικός στραγγαλισμός.**
10. Είσοδος ατμοποιητή: **Κορεσμένο υγρό.**
11. Αρχή ατμοποίησης: **Κορεσμένο υγρό.**
12. Τέλος ατμοποίησης: Ξηρός κορεσμένος ατμός.
13. Έξοδος ατμοποιητή: Υπέρθερμος ατμός (ωφέλιμη υπερθέρμανση). Πίεση ίση με την πίεση στην είσοδο του ατμοποιητή.

•
Θεωρητικός
ψυκτικός κύκλος
μηχανικής
συμπύεσης
ατμών με
υπόψυξη
συμπυκνώματος
και
αναρρόφηση
υπέρθερμου
ατμού.

1. Είσοδος συμπίεστή: Ξηρός κορεσμένος ατμός.
2. Έξοδος συμπίεστή: Ξηρός υπέρθερμος ατμός. Αδιαβατική αναστρέψιμη συμπίεση. Πίεση ίση με την πίεση συμπίκνωσης και εντροπία ίδια με την είσοδο στο συμπίεστή.
3. Είσοδος συμπυκνωτή: Ξηρός υπέρθερμος ατμός και εντροπία ίδια με την είσοδο στο συμπίεστή.
4. Έξοδος συμπυκνωτή: **Κορεσμένο υγρό.** Πίεση ίση με την πίεση στην είσοδο του συμπυκνωτή.
5. Είσοδος στραγγαλιστικής διάταξης: **Κορεσμένο υγρό.**
6. Έξοδος στραγγαλιστικής διάταξης: **Διφασικό μείγμα (υγρό ατμός). Ενθαλπία ίδια με την είσοδο στη στραγγαλιστική διάταξη, αδιαβατικός στραγγαλισμός.**
7. Είσοδος ατμοποιητή: **Διφασικό μείγμα.**
8. Έξοδος ατμοποιητή: Ξηρός κορεσμένος ατμός. Πίεση ίση με την πίεση στην είσοδο του ατμοποιητή.

7. Σημείωσε με ν το σωστό στις παρακάτω ερωτήσεις:

1. Η υπόψυξη ή η υπερθέρμανση μας βεβαιώνει για την πλήρη εξάτμιση του ψυκτικού χωρίς επικίνδυνες σταγόνες πριν από την είσοδο στο συμπιεστή;

ΥΠΟΨΥΞΗ ☐ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗ ☐

2. Αν η διαδικασία της υπερθέρμανσης συμβαίνει μόνο μέσα στον ατμοποιητή (δεν ισχύει στην πράξη), τότε η υπερθέρμανση χαρακτηρίζεται ωφέλιμη ή μη ωφέλιμη;

ΩΦΕΛΙΜΗ ☐ΜΗ ΩΦΕΛΙΜΗ ☐

3. Αν η διαδικασία της υπερθέρμανσης (θεωρητικά) συμβαίνει μόνο μέσα στον ατμοποιητή, τότε η επιπλέον θερμότητα υπερθέρμανσης προστίθεται ή όχι σαν ψυκτικό κέρδος;

ΠΡΟΣΤΙΘΕΤΑΙ ΨΥΚΤΙΚΟ ΚΕΡΔΟΣ ☐ΔΕΝ ΠΡΟΣΤΙΘΕΤΑΙ ΨΥΚΤΙΚΟ ΚΕΡΔΟΣ ☐

4. Αν η διαδικασία της υπερθέρμανσης (θεωρητικά) συμβαίνει μόνο μέσα στον ατμοποιητή και η υπόψυξη πραγματοποιείται (θεωρητικά) μόνο μέσα στο συμπυκνωτή, τότε αυξάνεται ή μειώνεται η ψυκτική ισχύς;

ΑΥΞΑΝΕΤΑΙ ☐ΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ☐

5. Στην πράξη η διαδικασία της υπερθέρμανσης συμβαίνει εντός του σωληνωτού αγωγού που συνδέει το στοιχείο ατμοποίησης με το συμπιεστή. Η υπερθέρμανση αυτή είναι ωφέλιμη ή όχι στην παραγωγή ωφέλιμης ψύξης;

ΩΦΕΛΙΜΗ ☐ΜΗ ΩΦΕΛΙΜΗ ☐

6. Όσο μεγαλύτερη είναι η υπερθέρμανση του ψυκτικού μέσου κατά την είσοδό του στο συμπιεστή, ο ογκομετρικός βαθμός (η ποσότητα συμπιεσμένων ατμών) του ψυκτικού μέσου στο συμπιεστή μικραίνει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή τη μείωση του τεχνικού έργου (κατανάλωση ρεύματος συμπιεστή) που προστίθεται σε κάθε kg ψυκτικού μέσου που συμπιέζεται;

ΑΥΞΗΣΗ ☐ΜΕΙΩΣΗ ☐

7. Σε αρκετές περιπτώσεις πραγματικών ψυκτικών κύκλων, λόγω υπόψυξης και υπερθέρμανσης, έχουμε μεγαλύτερη ψυκτική ισχύ σε σχέση με τους αντίστοιχους βασικούς θεωρητικούς κύκλους. Ενώ θα περιμέναμε αύξηση του COP λόγω αύξησης της ψυκτικής ισχύος, αντιθέτως ο COP εμφανίζεται μειωμένος σε σχέση με τους θεωρητικούς κύκλους. Η μείωση του COP του πραγματικού κύκλου σε σχέση με τον θεωρητικό οφείλεται ή όχι στην αύξηση του τεχνικού έργου συμπίεσης που συμβαίνει λόγω της υπερθέρμανσης στον πραγματικό κύκλο;

ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ☐ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ☐

8. Παρατηρούμε αύξηση ή μείωση στον COP πραγματικού κύκλου ψύξης εγκατάστασης όταν αυξήσουμε μόνο την ψυκτική ισχύ αυξάνοντας την υπερθέρμανση;

ΑΥΞΗΣΗ ☐ΜΕΙΩΣΗ ☐

9. Η υπερθέρμανση του ψυκτικού μέσου στην είσοδο του συμπιεστή στον πραγματικό κύκλο έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη ογκομετρική του είσοδο στο συμπιεστή (μικρότερη ποσότητα συμπιεσμένων ατμών) σε σχέση με τον θεωρητικό κύκλο, λόγω αύξησης του ειδικού όγκου του ατμού καθώς αυτός υπερθερμαίνεται. Με αυτή την κατάσταση και σε σύγκριση με τον θεωρητικό κύκλο, έχουμε αύξηση ή μείωση τεχνικού έργου που προστίθεται σε κάθε κιλό (kg) ψυκτικού μέσου που συμπιέζεται στον πραγματικό κύκλο; Έχουμε αύξηση ή μείωση του COP;

ΑΥΞΗΣΗ ☐ΜΕΙΩΣΗ ☐

10. Για την αύξηση της ψυκτικής ισχύς μιας εγκατάστασης, φροντίζουμε την αύξηση ή τη μείωση της υπερθέρμανσης και της υπόψυξης;

ΑΥΞΗΣΗ ☐

ΜΕΙΩΣΗ ☐

11. Η πρόωρη ατμοποίηση μέρους του ψυκτικού μέσου εντός της εκτονωτικής βαλβίδας λόγω της θερμοκρασίας του κορεσμένου υγρού δεν είναι καθόλου επιθυμητή διότι μας μειώνει την ψυκτική ισχύ. Η αύξηση ή η μείωση της υπόψυξης ελαττώνει το ανεπιθύμητο αυτό φαινόμενο;

ΑΥΞΗΣΗ ☐

ΜΕΙΩΣΗ ☐

12. Είναι προς όφελος της ψυκτικής εγκατάστασης ή όχι να υπάρχει στο τέλος του στραγγαλισμού και στο μείγμα υγρού-ατμού μεγάλο ποσοστό υγρού ψυκτικού μέσου, να βρισκόμαστε δηλαδή όσο το δυνατόν κοντύτερα στην αριστερή καμπύλη κεκορεσμένου υγρού και σε καταστάσεις μικρού βαθμού ξηρότητας ή όχι;

ΩΦΕΛΙΜΟ ☐

ΜΗ ΩΦΕΛΙΜΟ ☐

13. Όσο αριστερότερα στην υπόψυκτη περιοχή ξεκινά ο στραγγαλισμός (εκτόνωση) του ψυκτικού μέσου, οι ανεπιθύμητες φουσαλίδες ατμού μέσα στην εκτονωτική βαλβίδα μειώνονται ή αυξάνονται;

ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ☐

ΜΕΙΩΝΟΝΤΑΙ ☐

14. Όσο αριστερότερα βρισκόμαστε στη διφασική περιοχή κατά την έξοδο του ψυκτικού μέσου από την εκτονωτική βαλβίδα αυξάνεται ή μειώνεται η ψυκτική ισχύς μιας εγκατάστασης;

ΑΥΞΑΝΕΤΑΙ ☐

ΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ☐

15. Η αύξηση της υπόψυξης αυξάνει ή μειώνει την ψυκτική ισχύ της εγκατάστασης;

ΑΥΞΑΝΕΙ ☐

ΜΕΙΩΝΕΙ ☐

16. Όταν η υπόψυξη πραγματοποιείται από το περιβάλλον (χωρίς τη βοήθεια κάποιου επιπλέον εναλλάκτη) και μόνο μέσα στο συμπυκνωτή, τότε έχουμε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ψύξης και κατ' επέκταση του COP, χωρίς να απαιτείται αύξηση της προσδιδόμενης εξωτερικά μηχανικής ενέργειας ή όχι;

ΑΥΞΗΣΗ ☐

ΜΕΙΩΣΗ ☐

17. Όσο χαμηλότερη θερμοκρασία ατμοποίησης έχουμε, τόσο χαμηλότερη είναι και η πίεση. Το μηχανικό έργο συμπίεσης θα είναι περισσότερο ή λιγότερο όσο πέφτει η θερμοκρασία ατμοποίησης;

ΛΙΓΟΤΕΡΟ ☐

ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΟ ☐

18. Όσο περισσότερο απέχουν οι θερμοκρασίες ή οι πιέσεις ατμοποίησης και συμπύκνωσης το μηχανικό έργο συμπίεσης (άρρα και κατανάλωση ενέργειας) μεγαλώνει ή μικραίνει;

ΜΙΚΡΑΙΝΕΙ ☐

ΜΕΓΑΛΩΝΕΙ ☐

ΧΑΡΑΞΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΞΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καλή γνώση, η σωστή και ακριβής χάραξη των θερμοδυναμικών μεταβολών του κύκλου ψύξης εγκατάστασης μηχανικής συμπίεσης ατμών στο διάγραμμα (P-h) παίζουν σημαντικό ρόλο στη λήψη των σωστών θερμοδυναμικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν αρχικά μία εγκατάσταση, αφού χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τους ενεργειακούς υπολογισμούς και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων της ενεργειακής συμπεριφοράς.



ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η περιγραφή του τρόπου χάραξης των θερμοδυναμικών μεταβολών του κύκλου ψύξης εγκατάστασης μηχανικής συμπίεσης ατμών στα διαγράμματα πίεσης-ενθαλπίας (P-h), έτσι ώστε να σχεδιάζεις τον κύκλο ψύξης και να σημειώνεις τα απαραίτητα θερμοδυναμικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν αρχικά μια ψυκτική εγκατάσταση.



ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΤΟΧΟΙ

Μετά τη μελέτη του κεφαλαίου, θα είσαι ικανός/ικανή:

1. Να χαράζεις τις θερμοδυναμικές μεταβολές του κύκλου ψύξης εγκατάστασης μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).
2. Να σημειώνεις τα θερμοδυναμικά μεγέθη του κύκλου ψύξης εγκατάστασης μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διαγράμματα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).



ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ/ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

- Πίνακας θερμοκρασιών πιέσεων ψυκτικού μέσου R134a
- Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας για ψυκτικό μέσο R134a

3.1 Χάραξη θερμοδυναμικών μεταβολών βασικού θεωρητικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h)

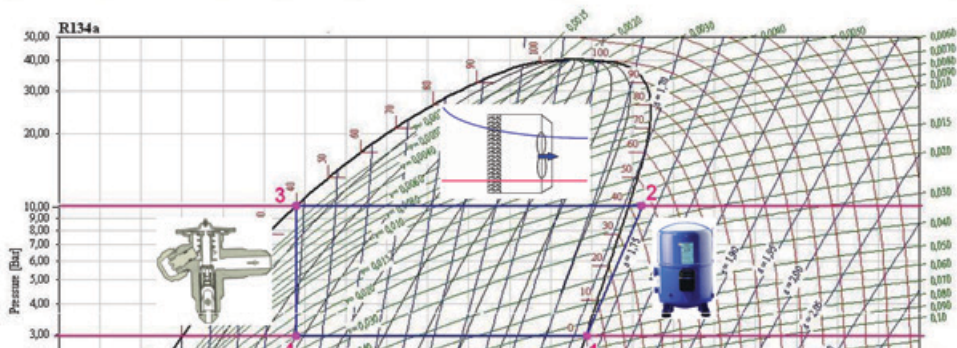
Παράδειγμα 1. Ψυκτική εγκατάσταση λειτουργεί με συμπίεση ατμών ψυκτικού 134a σε κατάσταση κορεσμού στην έξοδο του συμπυκνωτή και την έξοδο του εξατμιστή, με θερμοκρασία εξατμίσης 0°C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 40°C. Ζητείται η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) και η εύρεση των θερμοδυναμικών μεγεθών.

Βήμα 1. Βρίσκουμε τις πιέσεις που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες εξατμίσης και συμπύκνωσης για R134A, από τον Πίνακα 3.1.

T	P	T	P	T	P	T	P	T	P
°C	Bar	°C	Bar	°C	Bar	°C	Bar	°C	Bar
-40,00	0,516	-11,00	1,929	18,00	5,371	47,00	12,211	76,00	24,154
-39,00	0,544	-10,00	2,007	19,00	5,541	48,00	12,526	77,00	24,683
-38,00	0,572	-9,00	2,088	20,00	5,716	49,00	12,848	78,00	25,221
-37,00	0,602	-8,00	2,170	21,00	5,895	50,00	13,176	79,00	25,768
-36,00	0,633	-7,00	2,256	22,00	6,078	51,00	13,510	80,00	26,324
-35,00	0,665	-6,00	2,344	23,00	6,265	52,00	13,851	81,00	26,890
-34,00	0,699	-5,00	2,434	24,00	6,457	53,00	14,198	82,00	27,465
-33,00	0,734	-4,00	2,527	25,00	6,653	54,00	14,552	83,00	28,050
-32,00	0,770	-3,00	2,623	26,00	6,853	55,00	14,912	84,00	28,645
-31,00	0,808	-2,00	2,722	27,00	7,058	56,00	15,278	85,00	29,250
-30,00	0,847	-1,00	2,824	28,00	7,267	57,00	15,652	86,00	29,866
-29,00	0,888	0,00	2,930	29,00	7,482	58,00	16,032	87,00	30,491
-28,00	0,930	1,00	3,036	30,00	7,701	59,00	16,419	88,00	31,128
-27,00	0,974	2,00	3,146	31,00	7,924	60,00	16,813	89,00	31,776
-26,00	1,020	3,00	3,260	32,00	8,153	61,00	17,215	90,00	32,435
-25,00	1,067	4,00	3,376	33,00	8,386	62,00	17,623	91,00	33,105
-24,00	1,116	5,00	3,496	34,00	8,625	63,00	18,039	92,00	33,788
-23,00	1,167	6,00	3,619	35,00	8,868	64,00	18,462	93,00	34,482
-22,00	1,219	7,00	3,746	36,00	9,117	65,00	18,893	94,00	35,190
-21,00	1,274	8,00	3,876	37,00	9,371	66,00	19,331	95,00	35,910
-20,00	1,330	9,00	4,009	38,00	9,630	67,00	19,777	96,00	36,644
-19,00	1,388	10,00	4,145	39,00	9,894	68,00	20,231	97,00	37,393
-18,00	1,448	11,00	4,286	40,00	10,164	69,00	20,692	98,00	38,158
-17,00	1,511	12,00	4,429	41,00	10,439	70,00	21,162	99,00	38,940
-16,00	1,575	13,00	4,577	42,00	10,720	71,00	21,640	100,00	39,742
-15,00	1,641	14,00	4,728	43,00	11,007	72,00	22,126	101,00	40,570
-14,00	1,710	15,00	4,883	44,00	11,299	73,00	22,620	101,10	40,670
-13,00	1,781	16,00	5,042	45,00	11,597	74,00	23,123		
-12,00	1,854	17,00	5,204	46,00	11,901	75,00	23,634		

Πίνακας 3.1

Βήμα 2. Βρίσκουμε τα σημεία πιέσεων 2.9 bar και 10.1 bar (Πίνακας 3.1) στον άξονα της πίεσης του διαγράμματος P-h, χαράσσουμε τις γραμμές και σημειώνουμε το σημείο 1 εκεί όπου ενώνεται η γραμμή της πίεσης εξατμίσης με τη γραμμή ξηρού κορεσμένου ατμού θερμοκρασίας 0°C της καμπάνας πάνω στο διάγραμμα.





Βήμα 3. Βρίσκουμε το σημείο 2 χαράσσοντας από το σημείο 1 γραμμή παράλληλη στον άξονα της εντροπίας του διαγράμματος P-h, μέχρι το σημείο που ενώνεται με τη γραμμή της πίεσης συμπύκνωσης. Στη συνέχεια το σημείο 3. Το σημείο 4 βρίσκεται χαράσσοντας κάθετη γραμμή από το σημείο 3.

Τέλος, ο κύκλος κλείνει στο σημείο 1.

Έχοντας σχεδιάσει τον κύκλο ψύξης, σημειώνουμε τα θερμοδυναμικά μεγέθη του κύκλου.

Πίεση (P):	$P_{εξ} = P_1 = P_4 = 2,92 \text{ bar}$
	$P_{συμ} = P_2 = P_3 = 10,16 \text{ bar}$
Θερμοκρασία (θ):	$\theta_{εξ} = \theta_1 = \theta_4 = 0^\circ \text{C}$
	$\theta_2 = 45^\circ \text{C}$
	$\theta_{συμ} = \theta_3 = 40^\circ \text{C}$
Ειδική ενθαλπία (h):	$h_1 = 397 \text{ kJ/kg}$
	$h_2 = 423 \text{ kJ/kg}$
	$h_3 = h_4 = 256 \text{ kJ/kg}$
Ειδικός όγκος (v):	$v_1 = 0,069 \text{ m}^3/\text{kg}$
	$v_2 = 0,020 \text{ m}^3/\text{kg}$
Εντροπία (s):	$s_1 = s_2 = 1,72535 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

Με ακρίβεια, η περιγραφή της χάραξης και εύρεσης των θερμοδυναμικών μεγεθών του παραπάνω κύκλου έχει ως εξής:

Από τον πίνακα θερμοκρασιών-πίεσεων έχουμε τις δύο πιέσεις λειτουργίας του συστήματος, που είναι $P_{συμ} = 10,164 \text{ bar}$ και πίεση εξάτμισης $P = 2,928 \text{ bar}$. Από τον άξονα των πιέσεων του διαγράμματος, στις αντίστοιχες πιέσεις, φέρουμε τις καθέτους προς τον άξονα και όπου είναι οι γραμμές των πιέσεων συμπύκνωσης και εξάτμισης, δηλαδή οι μεταβολές κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης, όπως και της εξάτμισης, γίνονται σε αυτές τις γραμμές πιέσεων.

Με αφετηρία τα δεδομένα στοιχεία (πίεση και κατάσταση) θα προσδιορίσουμε σημεία του διαγράμματος όπου βρίσκεται το ψυκτικό, έτσι:

Το ψυκτικό όταν αναρροφάται από το συμπιεστή είναι σε κατάσταση κορεσμού με πίεση εξάτμισης. Με αυτά τα δυο στοιχεία προσδιορίζουμε στο διάγραμμα το σημείο που είναι το σημείο τομής της χαμηλής πίεσης και της πίεσης ξηρού κορεσμένου ατμού. Σημειώνουμε και χαρακτηρίζουμε το σημείο ως σημείο 1. Το 1 είναι σημείο του διαγράμματος που προσδιορίζει το ψυκτικό ρευστό όταν περνάει τη βαλβίδα της αναρρόφησης του συμπιεστή. Στο συμπιεστή γίνεται ισεντροπική συμπίεση, δηλαδή το ψυκτικό συμπιέζεται

(μικραίνει ο όγκος του και αντιστρόφως ανάλογα μεγαλώνει η πίεσή του), χωρίς συναλλαγή θερμότητας. Αυτό βεβαίως είναι μια παραδοχή που γνωρίζουμε ότι δεν είναι αλήθεια, όμως το παραδεχόμαστε για να κάνουμε τη μελέτη μας και δεν αποκλίνουμε καθοριστικά αλλά αμελητέα. Το δεύτερο στοιχείο στην περίπτωση είναι ότι η μεταβολή γίνεται τόσο γρήγορα, που δεν δίνεται περιθώριο συναλλαγής, ελαχιστοποιείται δε το περιθώριο συναλλαγής όσο γρηγορότερα (πολύστροφοι συμπίεστές) γίνεται η συμπίεση.

Σημειώνουμε τα χαρακτηριστικά του ψυκτικού στο 1 και κρατούμε ότι η μεταβολή είναι ισεντροπική, αυτό σημαίνει ότι η εντροπία του ψυκτικού είναι αμετάβλητη και κατά συνέπεια όση εντροπία έχει στην είσοδο προ της συμπίεσης έχει και στην έξοδο μετά τη συμπίεση.

Με την εντροπία που βρίσκουμε από την ισεντροπική καμπύλη που περνάει από το σημείο 1 και την πίεση που έχει στην έξοδο του συμπίεστή (υψηλή) σημειώνουμε στο διάγραμμα ένα δεύτερο σημείο που ανταποκρίνεται στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, δηλαδή υψηλή πίεση και εντροπία όση και στο σημείο 1. Το δεύτερο αυτό σημείο είναι το σημείο τομής της υψηλής πίεσης και της ισεντροπικής καμπύλης και το χαρακτηρίζουμε σημείο 2.

Από τα δεδομένα στοιχεία, όταν το ψυκτικό ρευστό μπαίνει στην εκτονωτική είναι σε κατάσταση κορεσμού. Με αυτό το στοιχείο, καθώς και ότι το ψυκτικό ρευστό στην είσοδο της εκτονωτικής είναι με πίεση υψηλή, προσδιορίζουμε στο διάγραμμα το σημείο όπου βρίσκεται το ψυκτικό ρευστό και που είναι το σημείο τομής της υψηλής πίεσης και της καμπύλης κορεσμένου υγρού. Το σημείο το χαρακτηρίζουμε ως σημείο 3.

Η μεταβολή του ρευστού μέσα στην εκτονωτική είναι η εκτόνωσή του, δηλαδή μεγαλώνει στην έξοδό του ο χώρος (όγκος) και συνεπώς μικραίνει η πίεσή του. Η μεταβολή αυτή γίνεται με το στραγγαλισμό του ψυκτικού μέσα στη βαλβίδα και είναι και η μοναδική μεταβολή, συνεπώς η ενθαλπία του στη βαλβίδα παραμένει ίση και η μεταβολή μπορεί να χαρακτηριστεί ως ισενθαλπική εκτόνωση. Με τα χαρακτηριστικά της εξόδου του ψυκτικού από την εκτονωτική (πίεση και ενθαλπία) προσδιορίζουμε στο διάγραμμα το σημείο όπου βρίσκεται το ψυκτικό, δηλαδή με ενθαλπία όση και στο σημείο 3 και πίεση εξάτμισης. Το σημείο το χαρακτηρίζουμε ως σημείο 4.

Αν ενώσουμε τα σημεία μεταξύ τους ξεκινώντας από το 1 με τη διαδοχή των αριθμών και καταλήξουμε στο 1, τότε έχουμε χαράξει στο διάγραμμα τον κύκλο που κάνει το ψυκτικό ρευστό. Οι μηχανισμοί και τα μηχανήματά μας δείχνουν τις μεταβολές που γίνονται στο ψυκτικό μέσα στο καθένα από αυτά και το αντίστροφο, δηλαδή για να γίνουν οι μεταβολές που μας δείχνει το διάγραμμα από ένα σημείο στο επόμενο χρησιμοποιείται το μηχανήμα που απεικονίζεται.

3.2 Χάραξη θερμοδυναμικών μεταβολών πραγματικού ψυκτικού κύκλου μηχανικής συμπίεσης ατμών σε διάγραμμα πίεσης–ενθαλπίας (P-h)

Παράδειγμα 2. Ψυκτική εγκατάσταση R134a λειτουργεί με υπερθέρμανση και υπόψυξη κατά 10°C σε θερμοκρασία εξάτμισης 0°C και θερμοκρασία συμπύκνωσης 40°C. Ζητείται η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) και η εύρεση των θερμοδυναμικών μεγεθών.

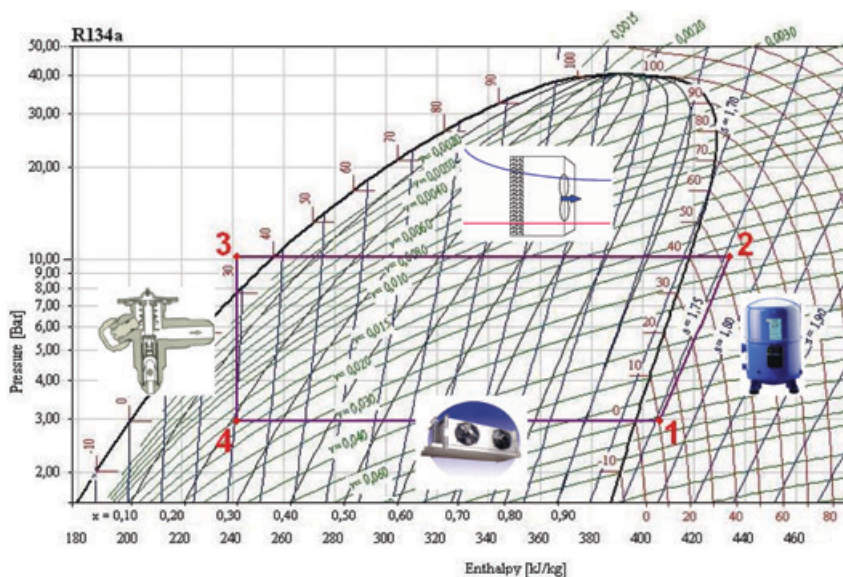
Βήμα 1. Βρίσκουμε την πίεση από τον Πίνακα 3.2 που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία εξάτμισης (0°C = 2,92 bar) και την πίεση που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία συμπύκνωσης (40°C = 10.16 bar), προσθέτουμε τους 10°C της υπερθέρμανσης στη θερμοκρασία της

εξάτμισης ($10^{\circ}\text{C} + 0^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C}$) και αφαιρούμε τους 10°C της υπόψυξης από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης ($40^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C} = 30^{\circ}\text{C}$).

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Pressure (bar)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Pressure (bar)
-40	0.51209	20	5.7171
-39	0.53955	21	5.8959
-38	0.56817	22	6.0789
-37	0.59801	23	6.2662
-36	0.62908	24	6.4578
-35	0.66144	25	6.6538
-34	0.69512	26	6.8543
-33	0.73015	27	7.0592
-32	0.76658	28	7.2688
-31	0.80444	29	7.483
-30	0.84378	30	7.702
-29	0.88463	31	7.9257
-28	0.92703	32	8.1543
-27	0.97104	33	8.3878
-26	1.0167	34	8.6263
-25	1.064	35	8.8698
-24	1.113	36	9.1185
-23	1.1639	37	9.3724
-22	1.2165	38	9.6315
-21	1.271	39	9.896
-20	1.3273	40	10.166
-19	1.3857	41	10.441
-18	1.446	42	10.722
-17	1.5084	43	11.009
-16	1.5728	44	11.301
-15	1.6394	45	11.599
-14	1.7082	46	11.903
-13	1.7792	47	12.213
-12	1.8524	48	12.529
-11	1.928	49	12.851
-10	2.006	50	13.179
-9	2.0864	51	13.513
-8	2.1693	52	13.854
-7	2.2548	53	14.201
-6	2.3428	54	14.555
-5	2.4334	55	14.915
-4	2.5268	56	15.282
-3	2.6228	57	15.656
-2	2.7217	58	16.036
-1	2.8234	59	16.423
0	2.928	60	16.818
1	3.0356	61	17.219
2	3.1462	62	17.628
3	3.2598	63	18.044
4	3.3768	64	18.467
5	3.4966	65	18.898
6	3.6198	66	19.337
7	3.7463	67	19.783
8	3.8761	68	20.237
9	4.0094	69	20.698
10	4.1461	70	21.168
11	4.2863	71	21.646
12	4.4301	72	22.132
13	4.5776	73	22.627
14	4.7288	74	23.13
15	4.8837	75	23.641
16	5.0425	76	24.161
17	5.2052	77	24.69
18	5.3718	78	25.228
19	5.5424	79	25.776

Πίνακας 3.2

Βήμα 2. Βρίσκουμε τα σημεία πιέσεων 2.92 bar και 10.16 bar στον άξονα των πιέσεων του διαγράμματος P-h, χαράσσουμε τις γραμμές και σημειώνουμε το σημείο 1 εκεί όπου ενώνεται η γραμμή πίεσης εξάτμισης με τη γραμμή της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης που έχουμε υπολογίσει στο Βήμα 1 ($0^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}\text{C} = 10^{\circ}\text{C}$) πάνω στο διάγραμμα.



Βήμα 3. Βρίσκουμε το σημείο 2 χαράσσοντας από το σημείο 1 γραμμή παράλληλη στον άξονα της εντροπίας του διαγράμματος P-h εκεί όπου ενώνεται με τη γραμμή της πίεσης συμπίκνωσης. Στη συνέχεια το σημείο 3 βρίσκεται αφού έχουμε αφαιρέσει (στο Βήμα 1) τους 10°C της υπόψυξης από τη θερμοκρασία συμπίκνωσης (40°C - 10°C = 30°C). Το σημείο 4 βρίσκεται χαράσσοντας κάθετη γραμμή από το σημείο 3. Τέλος, ο κύκλος κλείνει στο σημείο 1.

Έχοντας σχεδιάσει τον κύκλο ψύξης, σημειώνουμε τα θερμοδυναμικά μεγέθη του κύκλου.

Πίεση (P):	$P_{εξ}=P_1=P_4=2,92 \text{ bar}$
	$P_{συμ}=P_2=P_3=10,16 \text{ bar}$
Θερμοκρασία (θ):	$\theta_{εξ}=\theta_4=0^\circ\text{C}$
	$\theta_1=10^\circ\text{C}$
	$\theta_2=53^\circ\text{C}$
	$\theta_3=30^\circ\text{C}$
	$\theta_{συμ}=40^\circ\text{C}$
Ειδική ενθαλπία (h):	$h_1=407 \text{ kJ/kg}$
	$h_2=433,15 \text{ kJ/kg}$
	$h_3=h_4=241 \text{ kJ/kg}$
Ειδικός όγκος (v):	$v_1=0,073\text{m}^3/\text{kg}$
	$v_2=0,022\text{m}^3/\text{kg}$
Εντροπία (s):	$s_1=s_2=1,75\text{kJ}/(\text{kg K})$

Με ακρίβεια, η περιγραφή της χάραξης και εύρεσης των θερμοδυναμικών μεγεθών του παραπάνω κύκλου έχει ως εξής:

Για το ψυκτικό ρευστό R134a σε θερμοκρασία κορεσμού 0°C η αντίστοιχη πίεση κορεσμού είναι 2,93 bar και για θερμοκρασία κορεσμού 40°C η αντίστοιχη πίεση κορεσμού είναι 10,164 bar. Αφού φέρουμε στο διάγραμμα P-h τις γραμμές των πιέσεων, προσδιορίζουμε το σημείο αναρρόφησης υπέρθερμου ατμού στο συμπιεστή. Ο προσδιορισμός γίνεται με το σκεπτικό ότι το σημείο βρίσκεται επί της γραμμής πίεσης της χαμηλής (εξάτμισης) και έχει θερμοκρασία κατά 10°C μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία εξάτμισης, είναι δηλαδή θερμοκρασίας 10°C , συνεπώς είναι στην τομή της πίεσης εξάτμισης και της ισοθερμοκρασιακής καμπύλης των 10°C . Μόνο αυτό το σημείο ανταποκρίνεται στην προϋπόθεση της πίεσης 2,928 bar και θερμοκρασίας 10°C . Χαρακτηρίζουμε το σημείο ως 1 και βρίσκουμε όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη.

Από το σημείο 1 ακολουθώντας την ισεντροπική χαράσσουμε μέχρι να φτάσουμε την πίεση της συμπύκνωσης, όπου στην τομή είναι το ρευστό που εξέρχεται από το συμπιεστή, το σημείο τομής το χαρακτηρίζουμε ως σημείο 2 και βρίσκουμε και για αυτό όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη.

Προκειμένου να προσδιορίσουμε το σημείο στο διάγραμμα όπου βρίσκεται το ψυκτικό με το σκεπτικό ότι έχουμε δεδομένο στοιχείο την κατάσταση του ρευστού που βγαίνει από το συμπυκνωτή, δηλαδή υπόψυκτο 10°C και πίεση συμπύκνωσης, θα βρίσκεται συνεπώς στην περιοχή του υπόψυκτου υγρού και έχει θερμοκρασία μικρότερη κατά 10°C από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης που είναι 40°C , έχει δηλαδή $40^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C} = 30^{\circ}\text{C}$ θερμοκρασία και είναι αριστερά της γραμμής κορεσμένου υγρού. Ακολουθώντας την ισοθερμοκρασιακή των 30°C από τη γραμμή κορεσμένου υγρού (ταυτίζεται με τη γραμμή της ίσης ενθαλπίας) στην τομή της ισοθερμοκρασιακής με τη γραμμή της πίεσης συμπύκνωσης είναι ο προσδιορισμός του σημείου του διαγράμματος που ανταποκρίνεται στα δεδομένα, δηλαδή το ψυκτικό στο σημείο έχει πίεση συμπύκνωσης και είναι υπόψυκτο κατά 10°C από τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, το σημείο το χαρακτηρίζουμε ως 3 και βρίσκουμε όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη του ψυκτικού ρευστού.

Ακολουθώντας την ισενθαλπική από το σημείο 3 προς την πίεση της εξάτμισης στην τομή προσδιορίζουμε το σημείο στο διάγραμμα όπου βρίσκεται το ψυκτικό που βγαίνει από την εκτονωτική βαλβίδα (εκτόνωση με στραγγαλισμό), το σημείο το χαρακτηρίζουμε ως 4 και βρίσκουμε όλα τα θερμοδυναμικά μεγέθη του ψυκτικού ρευστού. Όταν ενώσουμε τα σημεία με τη διαδοχική σειρά, θα σχηματιστεί ο κύκλος στο διάγραμμα που κάνει το ψυκτικό που λειτουργεί με υπερθέρμανση κατά 10°C και υπόψυξη κατά 10°C .

3.3 ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

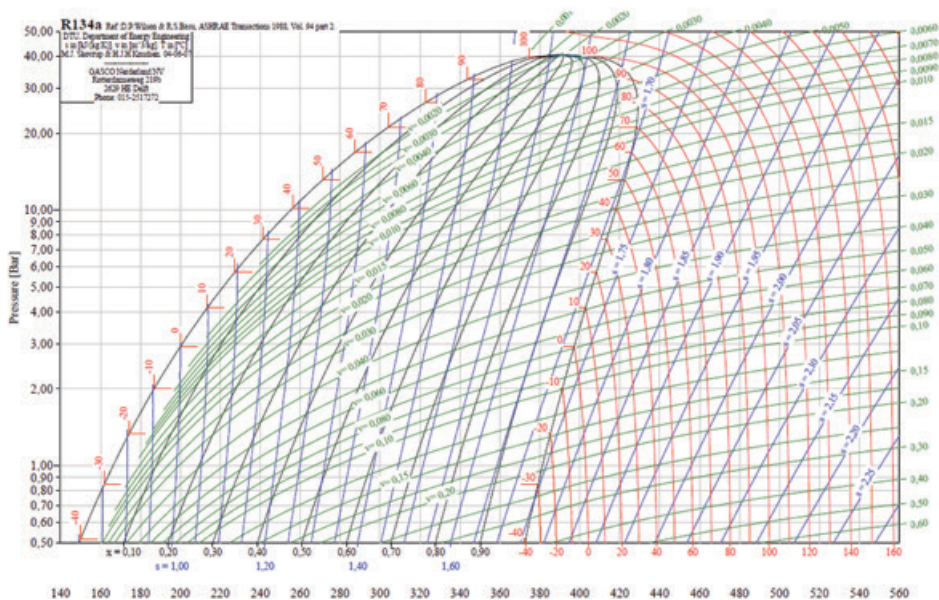
Στα δύο παραπάνω παραδείγματα, περιγράψαμε τα βήματα με τα οποία χαράσσουμε τις θερμοδυναμικές μεταβολές βασικού θεωρητικού κύκλου ψύξης εγκατάστασης και θεωρητικού κύκλου ψύξης εγκατάστασης με υπερθέρμανση και υπόψυξη. Στη συνέχεια βρίσκουμε τα θερμοδυναμικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν αρχικά μια εγκατάσταση και χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τους υπολογισμούς που χαρακτηρίζουν την ενεργειακή της απόδοση.



3.4 ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

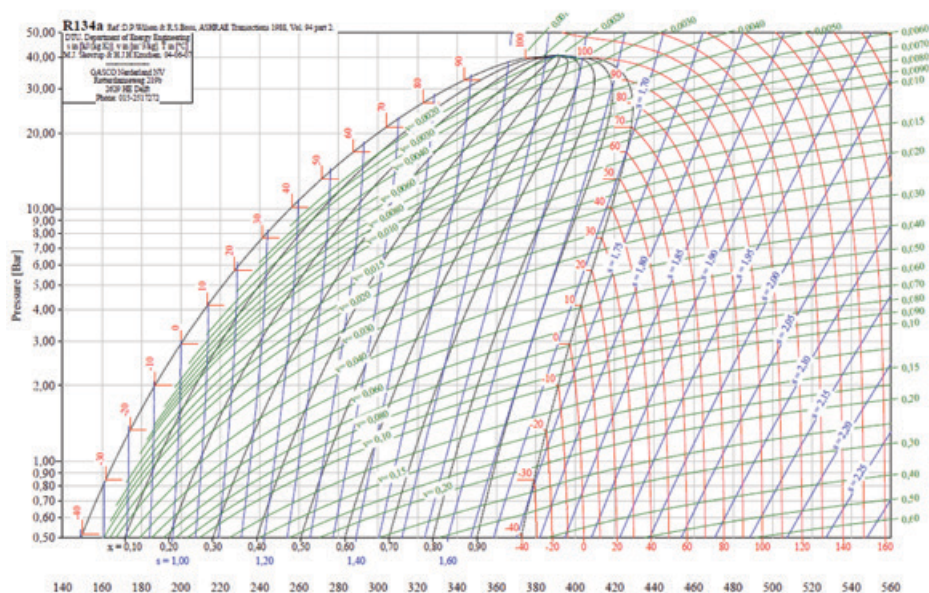
Άσκηση 1. Ψυκτική εγκατάσταση λειτουργεί με ψυκτικό R134a σε κατάσταση κορεσμού με θερμοκρασία συμπύκνωσης 25°C και θερμοκρασία εξάτμισης 0°C. Ζητείται η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) και η εύρεση των θερμοδυναμικών μεγεθών.

Temperature	Pressure	Temperature	Pressure
-7	2.2548	21	5.8959
-6	2.3428	22	6.0789
-5	2.4334	23	6.2662
-4	2.5268	24	6.4578
-3	2.6228	25	6.6538
-2	2.7217	26	6.8543
-1	2.8234	27	7.0592
0	2.928	28	7.2688
1	3.0366	29	7.483
2	3.1462	30	7.703
3	3.2598		
4	3.3788		



Άσκηση 2. Ψυκτική εγκατάσταση R134a λειτουργεί με υπερθέρμανση και υπόψυξη κατά 10°C σε πίεση συμπύκνωσης 6,6 bar και πίεση εξατμίσης 2,2 bar. Ζητείται η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) και η εύρεση των θερμοδυναμικών μεγεθών.

Temperature	Pressure	Temperature	Pressure
-7	2.2548	21	5.8959
-6	2.3428	22	6.0789
-5	2.4334	23	6.2662
-4	2.5268	24	6.4578
-3	2.6228	25	6.6538
-2	2.7217	26	6.8543
-1	2.8234	27	7.0592
0	2.928	28	7.2688
1	3.0358	29	7.483
2	3.1462	30	7.702
3	3.2598	31	7.9267
4	3.3766	32	8.1543
5	3.4966	33	8.3878
6	3.6198		
7	3.7463		



ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΞΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υπολογισμοί των ενεργειακών μεγεθών του κύκλου ψύξης εγκατάστασης είναι στην ουσία υπολογισμοί της συναλλασσόμενης ποσότητας ενέργειας μεταξύ του **συστήματος (ψυκτικό μέσο)** και του **περιβάλλοντος (ατμοποιητή, συμπυκνωτή εσωτερικού και εξωτερικά απαραίτητου τεχνικού έργου που προστίθεται από το συμπιεστή)**. Αφού υπολογιστούν τα ποσά τη συναλλασσόμενης ενέργειας, η εγκατάσταση χαρακτηρίζεται από το συντελεστή συμπεριφοράς (COP).



ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι ο υπολογισμός των ενεργειακών μεγεθών εγκατάστασης ψύξης μηχανικής συμπίεσης ατμών, έτσι ώστε να μπορείς να υπολογίζεις τα ενεργειακά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία μιας ψυκτικής εγκατάστασης.



ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΤΟΧΟΙ

Μετά τη μελέτη του κεφαλαίου, θα είσαι ικανός/ικανή:

1. Να υπολογίζεις το λόγο των πιέσεων (εξάτμισης συμπύκνωσης).
2. Να υπολογίζεις τη μάζα του κυκλοφορούντος ψυκτικού.
3. Να υπολογίζεις τη θεωρητική ισχύ του συμπιεστή.
4. Να υπολογίζεις την αποβαλλόμενη θερμότητα στο συμπυκνωτή.
5. Να υπολογίζεις την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.
6. Να υπολογίζεις το συντελεστή συμπεριφοράς (COP).



ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ/ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

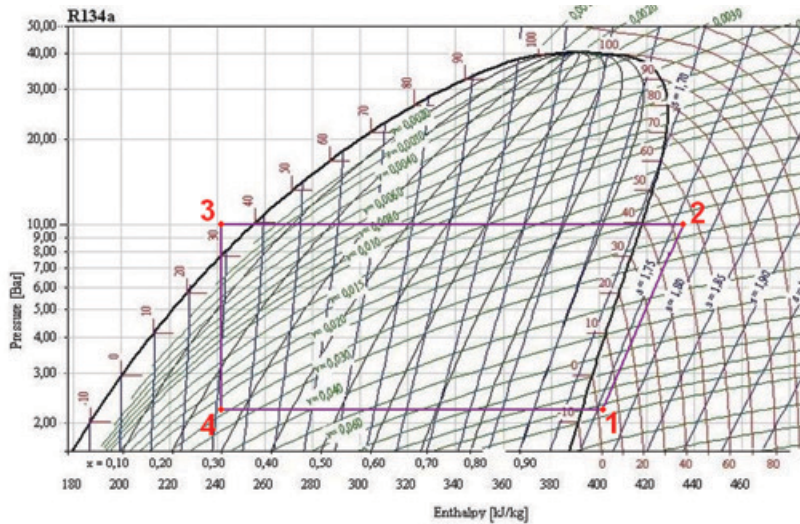
- Πίνακας θερμοκρασιών πιέσεων ψυκτικού μέσου R134a
- Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας για ψυκτικό μέσο R134a

4.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΑΤΜΩΝ

Παράδειγμα 1. Ψυκτικό σύστημα λειτουργεί με συμπίεση ατμών R134a με υπερθέρμανση και υπόψυξη κατά 10°C σε πίεση συμπύκνωσης 10 bar(a) και πίεση εξάτμισης $2,2 \text{ bar(a)}$. Το ψυκτικό φορτίο Q_e είναι 50 kW . Ζητούνται:

1. Η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).
2. Ο λόγος των πιέσεων.

3. Η μάζα του κυκλοφορούντος ψυκτικού.
4. Η θεωρητική ισχύς του συμπιεστή.
5. Η αποβαλλομένη θερμότητα στο συμπυκνωτή.
6. Ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP).



Πίεση (P):	$P_{\text{εξ}}=P_1=P_4=2,2 \text{ bar}$ $P_{\text{συμ}}=P_2=P_3=10 \text{ bar}$ $\theta_{\text{εξ}}=\theta_4= -7^{\circ}\text{C}$
Θερμοκρασία (θ):	$\theta_1=3^{\circ}\text{C}$ $\theta_2=53^{\circ}\text{C}$ $\theta_3=30^{\circ}\text{C}$ $\theta_{\text{συμ}}=40^{\circ}\text{C}$
Ειδική ενθαλπία (h):	$h_1=402\text{kJ/kg}$ $h_2=435\text{kJ/kg}$ $h_3=h_4=242\text{kJ/kg}$
Ειδικός όγκος (v):	$v_1=0,095\text{m}^3/\text{kg}$ $v_2=0,022\text{m}^3/\text{kg}$
Εντροπία (s):	$s_1=s_2=1,763\text{kJ}/(\text{kg K})$

- Ο λόγος πιέσεων.

$$\frac{P_c}{P_e} \Rightarrow \frac{10 \text{ bar(a)}}{2,2 \text{ bar(a)}} = 4,54$$

- Ανηγμένη θερμότητα ατμοποίησης ή ψυκτική ικανότητα ή ψυκτικό αποτέλεσμα.

$$q_e = h_1 - h_4 \Rightarrow q_e = 402\text{kJ/kg} - 242\text{kJ/kg} = 160\text{kJ/kg}$$

- Η μάζα του ψυκτικού που κυκλοφορεί.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{q_e} \Rightarrow \dot{m} = \frac{50\text{KW(kj/sec)}}{160\text{kJ/kg}} = 0,3125\text{kg/sec} = 1125\text{kg/h}$$

- Ανηγμένο θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο ή έργο για τη συμπίεση.

$$w = h_2 - h_1 \Rightarrow w = 435\text{kJ/kg} - 402\text{kJ/kg} = 33\text{kJ/kg}$$

- Θεωρητική ισχύς συμπίεσής.

$$P = \dot{m} \cdot w \Rightarrow P = 1125 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 33 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 37125 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} =$$

$$= \frac{37125 \text{kJ/h}}{3600 \text{sec/h}} = 10,3125 \text{kJ/sec} = 10,3125 \text{KW}$$

- Ανηγμένη θερμότητα συμπύκνωσης.

$$q_c = h_2 - h_3 \Rightarrow q_c = 435 \text{kJ/kg} - 242 \text{kJ/kg} = 193 \text{kJ/kg}$$

- Ισχύς συμπύκνωσης ή αποβαλλόμενη θερμότητα συμπύκνωσης.

$$\dot{Q}_c = q_c \cdot \dot{m} \Rightarrow \dot{Q}_c = 193 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1125 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 217125 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} =$$

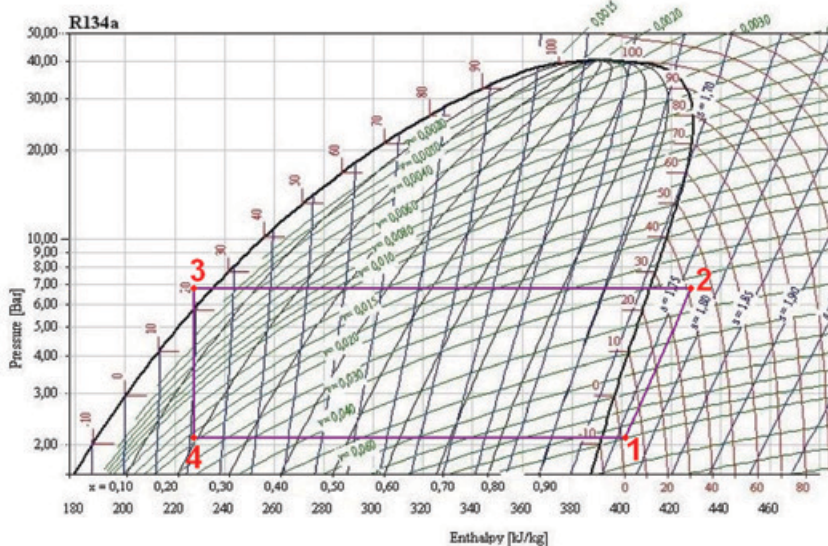
$$= \frac{217125 \text{kJ/h}}{3600 \text{sec/h}} = 60,3125 \text{kJ/sec} = 60,31 \text{KW}$$

- Συντελεστής συμπεριφοράς COP.

$$\text{COP} = \frac{q_e}{w} = \frac{160 \text{ kJ/kg}}{33 \text{ kJ/kg}} = 4,84$$

Παράδειγμα 2. Ψυκτική εγκατάσταση λειτουργεί με συμπίεση ατμών ψυκτικού ρευστού 134a σε θάλαμο με ψυκτικό φορτίο $\dot{Q}_e = 12 \text{ kW}$. Η μηχανή λειτουργεί με θερμοκρασία συμπύκνωσης 25°C , υπόψυξη κατά 5°C , θερμοκρασία εξατμίσης -8°C και υπερθέρμανση κατά 10°C . Ζητούνται:

1. Η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).
2. Ο λόγος των πιέσεων.
3. Η μάζα του κυκλοφορούντος ψυκτικού.
4. Η θεωρητική ισχύς του συμπίεσής.
5. Η αποβαλλόμενη θερμότητα στο συμπυκνωτή.
6. Ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP).



Πίεση (P):	$P_{εξ} = P_1 = P_4 = 2,168 \text{ bar}$
	$P_{συμ} = P_2 = P_3 = 6,6 \text{ bar}$
Θερμοκρασία (θ):	$\theta_{εξ} = \theta_4 = -8^\circ\text{C}$
	$\theta_1 = 2^\circ\text{C}$
	$\theta_2 = 39^\circ\text{C}$
	$\theta_3 = 20^\circ\text{C}$
	$\theta_{συμ} = 25^\circ\text{C}$
Ειδική ενθαλπία (h):	$h_1 = 402 \text{ kJ/kg}$
	$h_2 = 425 \text{ kJ/kg}$
	$h_3 = h_4 = 227 \text{ kJ/kg}$
Ειδικός όγκος (v):	$v_1 = 0,095 \text{ m}^3/\text{kg}$
	$v_2 = 0,0335 \text{ m}^3/\text{kg}$
Εντροπία (s):	$s_1 = s_2 = 1,76 \text{ kJ/(kg K)}$

- Ο λόγος πιέσεων.

$$\frac{P_ε}{P_σ} \Rightarrow \frac{6,6 \text{ bar(a)}}{2,1 \text{ bar(a)}} = 3,14$$

- Ανηγμένη θερμότητα ατμοποίησης ή ψυκτική ικανότητα ή ψυκτικό αποτέλεσμα.

$$q_e = h_1 - h_4 \Rightarrow q_e = 402 \text{ kJ/kg} - 227 \text{ kJ/kg} = 175 \text{ kJ/kg}$$

- Η μάζα του ψυκτικού που κυκλοφορεί.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{q_e} \Rightarrow \dot{m} = \frac{12 \text{ KW(kJ/sec)}}{175 \text{ kJ/kg}} = 0,06857 \text{ kg/sec} = 246.85 \text{ kg/h}$$

- Ανηγμένο θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο ή έργο για τη συμπίεση.

$$w = h_2 - h_1 \Rightarrow w = 425 \text{ kJ/kg} - 402 \text{ kJ/kg} = 23 \text{ kJ/kg}$$

- Θεωρητική ισχύς συμπίεστή.

$$P = \dot{m} \cdot w \Rightarrow P = 246 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 23 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 5658 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = \frac{5658 \text{ kJ/h}}{3600 \text{ sec/h}} = 1,57 \text{ kJ/sec} = 1,577 \text{ KW}$$

- Ανηγμένη θερμότητα συμπίκνωσης.

$$q_c = h_2 - h_3 \Rightarrow q_c = 425 \text{ kJ/kg} - 227 \text{ kJ/kg} = 198 \text{ kJ/kg}$$

- Ισχύς συμπίκνωσης ή αποβαλλόμενη θερμότητα συμπίκνωσης.

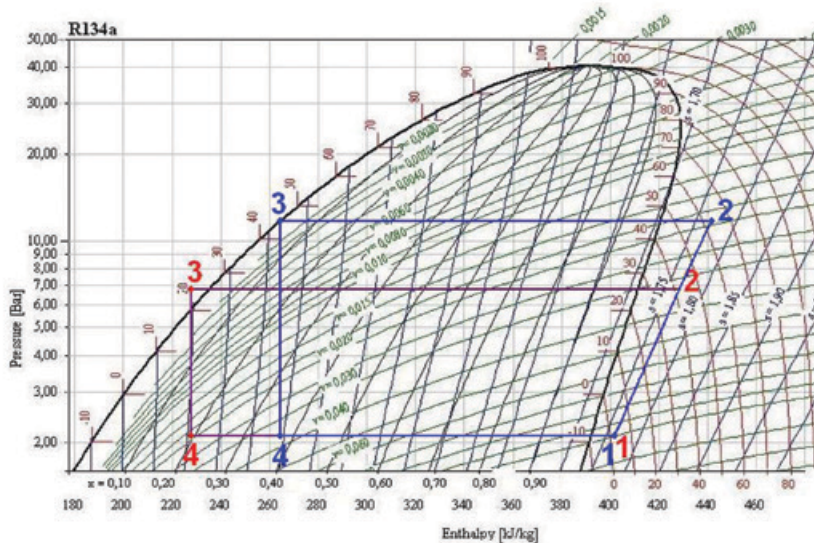
$$Q_c = q_c \cdot \dot{m} \Rightarrow Q_c = 198 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 246.85 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 48876,3 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = \frac{48876,3 \text{ kJ/h}}{3600 \text{ sec/h}} = 13,58 \text{ kJ/sec} = 13,58 \text{ KW}$$

- Συντελεστής συμπεριφοράς (COP).

$$\text{COP} = \frac{Q_e}{P} = \frac{12 \text{ kW}}{1,577 \text{ kW}} = 7,6$$

Παράδειγμα 3. Η ψυκτική εγκατάσταση του Παραδείγματος 2 λειτουργεί σε συμπύκνωση 45°C. Οι υπόλοιπες συνθήκες παραμένουν ίδιες με του Παραδείγματος 2, δηλαδή ψυκτικό ρευστό 134a, ψυκτικό φορτίο $Q_e=12\text{kW}$, υπόψυξη κατά 5°C, θερμοκρασία εξατμίσης -8°C και υπερθέρμανση κατά 10°C. Ζητούνται:

1. Η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).
2. Ο λόγος των πιέσεων.
3. Η μάζα του κυκλοφορούντος ψυκτικού.
4. Η θεωρητική ισχύς του συμπιεστή.
5. Η αποβαλλόμενη θερμότητα στο συμπυκνωτή.
6. Ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP).
7. Να συγκριθεί η λειτουργία των Παραδειγμάτων 2 και 3.



Πίεση (P):	$P_{εξ}=P_1=P_4=2,168 \text{ bar}$ $P_{συμ}=P_2=P_3=11,55 \text{ bar}$
Θερμοκρασία (θ):	$\theta_{εξ}=\theta_4= -8^{\circ}\text{C}$ $\theta_1=2^{\circ}\text{C}$ $\theta_2= 60^{\circ}\text{C}$ $\theta_3= 40^{\circ}\text{C}$ $\theta_{συμ}=45^{\circ}\text{C}$
Ειδική ενθαλπία (h):	$h_1=402 \text{ kJ/kg}$ $h_2=438 \text{ kJ/kg}$ $h_3=h_4=256 \text{ kJ/kg}$
Ειδικός όγκος (v):	$v_1=0,095\text{m}^3/\text{kg}$ $v_2=0,019\text{m}^3/\text{kg}$
Εντροπία (s):	$s_1=s_2=1,76\text{kJ}/(\text{kg K})$

- Ο λόγος πιέσεων.

$$\frac{P_c}{P_e} \Rightarrow \frac{11,55 \text{ bar(a)}}{2,1 \text{ bar(a)}} = 5,5$$

- Ανηγγμένη θερμότητα ατμοποίησης ή ψυκτική ικανότητα ή ψυκτικό αποτέλεσμα.

$$q_e = h_1 - h_4 \Rightarrow q_e = 402 \text{ kJ/kg} - 256 \text{ kJ/kg} = 146 \text{ kJ/kg}$$

- Η μάζα του ψυκτικού που κυκλοφορεί.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{q_e} \Rightarrow \dot{m} = \frac{12 \text{ KW(kJ/sec)}}{146 \text{ kJ/kg}} = 0,08219 \text{ kg/sec} = 295.89 \text{ kg/h}$$

- Ανηγγμένο θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο ή έργο για τη συμπίεση.

$$w = h_2 - h_1 \Rightarrow w = 438 \text{ kJ/kg} - 402 \text{ kJ/kg} = 36 \text{ kJ/kg}$$

- Θεωρητική ισχύς συμπίεστη.

$$P = \dot{m} \cdot w \Rightarrow P = 295.89 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 36 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 10652 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = \frac{10652 \text{ kJ/h}}{3600 \text{ sec/h}} = 2,95 \text{ kJ / sec} = 2,95 \text{ KW}$$

- Ανηγγμένη θερμότητα συμπύκνωσης.

$$q_c = h_2 - h_3 \Rightarrow q_c = 438 \text{ kJ/kg} - 256 \text{ kJ/kg} = 182 \text{ kJ/kg}$$

- Ισχύς συμπύκνωσης ή αποβαλλόμενη θερμότητα συμπύκνωσης.

$$Q_c = q_c \cdot \dot{m} \Rightarrow Q_c = 182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 295,89 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 53852 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = \frac{53852 \text{ kJ/h}}{3600 \text{ sec/h}} = 14,95 \text{ kJ / sec} = 14,95 \text{ KW}$$

- Συντελεστής συμπεριφοράς (COP).

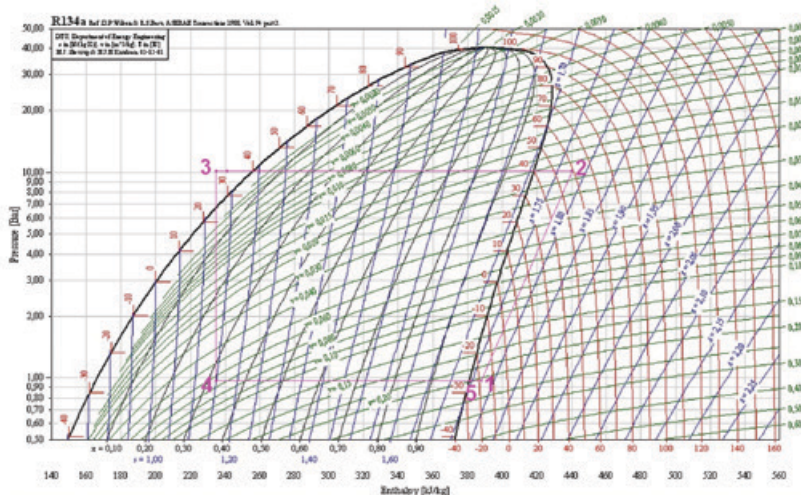
$$\text{COP} = \frac{Q_e}{P} = \frac{12 \text{ kW}}{2,95 \text{ kW}} = 4,067$$

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ

	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3
Ο ΛΟΓΟΣ ΠΙΕΣΕΩΝ	3,14	5,5
ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΑΤΜΟΠΟΙΗΣΗΣ Ή ΨΥΚΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ Ή ΨΥΚΤΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ	175 kJ/kg	146 kJ/kg
Η ΜΑΖΑ ΤΟΥ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΠΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΕΙ	246 kg/h	296 kg/h
ΑΝΗΓΜΕΝΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΡΓΟ Ή ΕΡΓΟ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ	23 kJ/kg	36 kJ/kg
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ	1,577 KW	2,95 KW
ΙΣΧΥΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ Ή ΑΠΟΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ	13,58 KW	14,95 KW
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (COP)	7,6	4,067

Παράδειγμα 4. Ψυκτική εγκατάσταση λειτουργεί με μηχανική συμπίεση ατμών ψυκτικού μέσου R134a σε θάλαμο με ψυκτικό φορτίο $Q_e=12\text{kW}$. Η μηχανή λειτουργεί με θερμοκρασία συμπύκνωσης 40°C , υπόψυξη με εσωτερικό εναλλάκτη κατά 15°C , θερμοκρασία εξάτμισης -28°C και υπερθέρμανση κατά 10°C . Ο συντελεστής απόδοσης του συμπιεστή είναι $\eta_c = 0,8$ και ο συντελεστής απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα είναι $\eta_e = 0,8$. Ζητούνται:

1. Η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).
2. Ο λόγος των πιέσεων.
3. Η μάζα του κυκλοφορούντος ψυκτικού.
4. Η θεωρητική ισχύς του συμπιεστή.
5. Η αποβαλλόμενη θερμότητα στο συμπυκνωτή.
6. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.
7. Ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP).



Πίεση (P):	$P_{εξ} = P_4 = P_5 = 0,92 \text{ bar}$
	$P_{συμ} = P_2 = P_3 = 11,55 \text{ bar}$
Θερμοκρασία (θ):	$\theta_{εξ} = \theta_4 = -28^\circ\text{C}$
	$\theta_1 = -18^\circ\text{C}$
	$\theta_2 = 60^\circ\text{C}$
	$\theta_3 = 25^\circ\text{C}$
	$\theta_{συμ} = 40^\circ\text{C}$
Ειδική ενθαλπία (h):	$h_1 = 389 \text{ kJ/kg}$
	$h_2 = 443 \text{ kJ/kg}$
	$h_3 = h_4 = 234 \text{ kJ/kg}$
	$h_5 = 381 \text{ kJ/kg}$
Ειδικός όγκος (v):	$v_1 = 0,025 \text{ m}^3/\text{kg}$
	$v_2 = 0,023 \text{ m}^3/\text{kg}$
Εντροπία (s):	$s_1 = s_2 = 1,79 \text{ kJ/(kg K)}$

- Ο λόγος πιέσεων.

$$\frac{P_c}{P_e} \Rightarrow \frac{11,55 \text{ bar(a)}}{0,92 \text{ bar(a)}} = 12,5$$

- Ανηγγμένη θερμότητα ατμοποίησης ή ψυκτική ικανότητα ή ψυκτικό αποτέλεσμα.

$$q_e = h_5 - h_4 \Rightarrow q_e = 381 \text{ kJ/kg} - 234 \text{ kJ/kg} = 147 \text{ kJ/kg}$$

- Η μάζα του ψυκτικού που κυκλοφορεί.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{q_e} \Rightarrow \dot{m} = \frac{12 \text{ KW(kJ/sec)}}{147 \text{ kJ/kg}} = 0,0816 \text{ kg/sec} = 293,76 \text{ kg/h}$$

- Ανηγγμένο θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο ή έργο για τη συμπίεση.

$$w = h_2 - h_1 \Rightarrow w = 443 \text{ kJ/kg} - 381 \text{ kJ/kg} = 62 \text{ kJ/kg}$$

- Θεωρητική ισχύς συμπίεστή.

$$\begin{aligned} P &= \dot{m} \cdot w \Rightarrow P = 293,76 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 62 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 18213 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \\ &= \frac{18213 \text{ kJ/h}}{3600 \text{ sec/h}} = 5,059 \text{ kJ/sec} = 5,059 \text{ KW} \end{aligned}$$

- Ανηγγμένη θερμότητα συμπύκνωσης.

$$q_c = q_e + w \Rightarrow q_c = 147 \text{ kJ/kg} + 62 \text{ kJ/kg} = 209 \text{ kJ/kg}$$

- Ισχύς συμπύκνωσης ή αποβαλλόμενη θερμότητα συμπύκνωσης.

$$\begin{aligned} Q_c &= q_c \cdot \dot{m} \Rightarrow Q_c = 209 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 293,76 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 61395,8 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \\ &= \frac{61395,8 \text{ kJ/h}}{3600 \text{ sec/h}} = 17,05 \text{ kJ/sec} = 17,05 \text{ KW} \end{aligned}$$

- Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

$$N = P / (\eta_{\text{συμπ.}} \cdot \eta_{\text{κιν.}}) \Rightarrow N = 5,059 / (0,8 \cdot 0,8) = 7,9 \text{ KW}$$

- Συντελεστής συμπεριφοράς (COP).

$$\text{COP} = \frac{Q_e}{N} = \frac{12 \text{ kW}}{7,9 \text{ kW}} = 1,51$$

4.2 ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Γνωρίζοντας το ψυκτικό μέσο, το ψυκτικό φορτίο Q_e , τη θερμοκρασία συμπύκνωσης, την υπόψυξη, τη θερμοκρασία εξάτμισης και την υπερθέρμανση, σχεδιάζουμε τον κύκλο ψύξης εγκατάστασης στο διάγραμμα P-h. Στη συνέχεια υπολογίζουμε το λόγο των πιέσεων, τη μάζα του κυκλοφορούντος ψυκτικού, τη θεωρητική ισχύ του συμπίεστή, την αποβαλ-

λόμενη θερμότητα στο συμπυκνωτή και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, για να καταλήξουμε στον υπολογισμό του συντελεστή συμπεριφοράς (COP) που χαρακτηρίζει μια ψυκτική εγκατάσταση.



4.3 ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

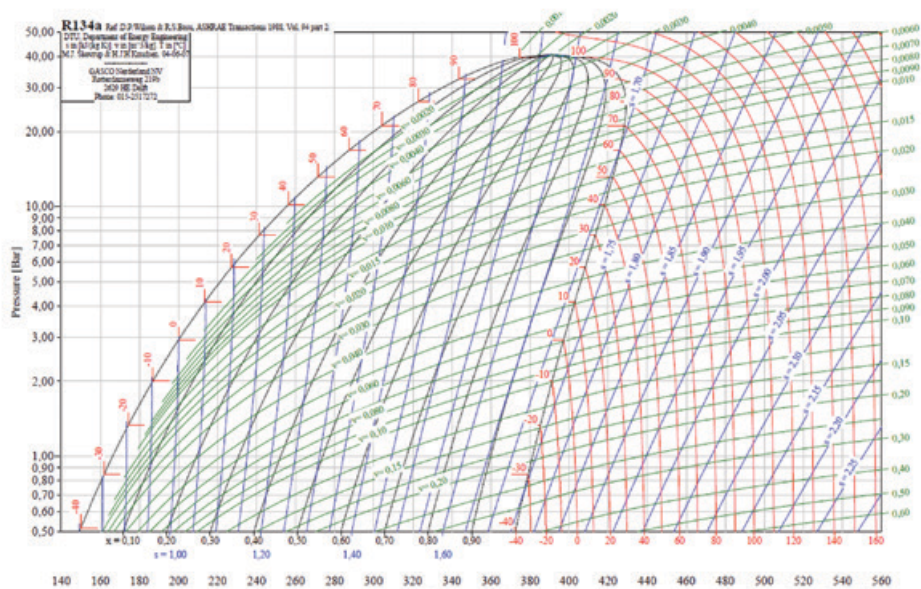
Άσκηση 1. Ψυκτική εγκατάσταση λειτουργεί με μηχανική συμπίεση ατμών ψυκτικού ρευστού R134a σε θάλαμο με ψυκτικό φορτίο $Q_e=12\text{kW}$. Η μηχανή λειτουργεί με θερμοκρασία συμπύκνωσης 40°C , υπόψυξη με εσωτερικό εναλλάκτη κατά 15°C , θερμοκρασία εξάτμισης -8°C και υπερθέρμανση κατά 10°C . Αν ο συντελεστής απόδοσης του συμπιεστή είναι $\eta_c = 0,8$ και ο συντελεστής απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα είναι $\eta_e=0,8$, ζητούνται:

1. Η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).
2. Ο λόγος των πιέσεων.
3. Η μάζα του κυκλοφορούντος ψυκτικού.
4. Η θεωρητική ισχύς του συμπιεστή.
5. Η αποβαλλόμενη θερμότητα στο συμπυκνωτή.
6. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.
7. Ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP).

R134a

T	p	T	p	T	p	T	p	T	p
$^\circ\text{C}$	Bar	$^\circ\text{C}$	Bar	$^\circ\text{C}$	Bar	$^\circ\text{C}$	Bar	$^\circ\text{C}$	Bar
-40,00	0,516	-11,00	1,929	18,00	5,371	47,00	12,211	76,00	24,154
-39,00	0,544	-10,00	2,007	19,00	5,541	48,00	12,526	77,00	24,683
-38,00	0,572	-9,00	2,088	20,00	5,716	49,00	12,848	78,00	25,221
-37,00	0,602	-8,00	2,170	21,00	5,895	50,00	13,176	79,00	25,768
-36,00	0,633	-7,00	2,256	22,00	6,078	51,00	13,510	80,00	26,324
-35,00	0,665	-6,00	2,344	23,00	6,265	52,00	13,851	81,00	26,890
-34,00	0,699	-5,00	2,434	24,00	6,457	53,00	14,198	82,00	27,465
-33,00	0,734	-4,00	2,527	25,00	6,653	54,00	14,552	83,00	28,050
-32,00	0,770	-3,00	2,623	26,00	6,853	55,00	14,912	84,00	28,645
-31,00	0,808	-2,00	2,722	27,00	7,058	56,00	15,278	85,00	29,250
-30,00	0,847	-1,00	2,824	28,00	7,267	57,00	15,652	86,00	29,866
-29,00	0,888	0	2,928	29,00	7,482	58,00	16,032	87,00	30,491
-28,00	0,930	1,00	3,036	30,00	7,701	59,00	16,419	88,00	31,128
-27,00	0,974	2,00	3,146	31,00	7,924	60,00	16,813	89,00	31,776
-26,00	1,020	3,00	3,260	32,00	8,153	61,00	17,215	90,00	32,435
-25,00	1,067	4,00	3,376	33,00	8,386	62,00	17,623	91,00	33,105
-24,00	1,116	5,00	3,496	34,00	8,625	63,00	18,039	92,00	33,788
-23,00	1,167	6,00	3,619	35,00	8,868	64,00	18,462	93,00	34,482
-22,00	1,219	7,00	3,746	36,00	9,117	65,00	18,893	94,00	35,190
-21,00	1,274	8,00	3,876	37,00	9,371	66,00	19,331	95,00	35,910
-20,00	1,330	9,00	4,009	38,00	9,630	67,00	19,777	96,00	36,644
-19,00	1,388	10,00	4,145	39,00	9,894	68,00	20,231	97,00	37,393
-18,00	1,448	11,00	4,286	40	10,165	69,00	20,692	98,00	38,158
-17,00	1,511	12,00	4,429	41,00	10,439	70,00	21,162	99,00	38,940
-16,00	1,575	13,00	4,577	42,00	10,720	71,00	21,640	100,00	39,742
-15,00	1,641	14,00	4,728	43,00	11,007	72,00	22,126	101,00	40,570
-14,00	1,710	15,00	4,883	44,00	11,299	73,00	22,620	101,10	40,670
-13,00	1,781	16,00	5,042	45,00	11,597	74,00	23,123		
-12,00	1,854	17,00	5,204	46,00	11,901	75,00	23,634		

R134a



ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ψυχομετρία είναι η επιστήμη που εξετάζει τη συμπεριφορά του νερού που περιλαμβάνεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, καθώς και τη συμπεριφορά του αέρα που οφείλεται στο εμπεριεχόμενο σε αυτόν νερό (υγρασία). Ίσως δεν έχει δοθεί από αυτούς που ασχολούνται με την ψύξη και τον κλιματισμό η δέουσα προσοχή στον κλάδο αυτό.

Το νερό αποτελεί ένα από τα συστατικά του αέρα που, ενώ είναι σε πολύ μικρή ποσότητα, επηρεάζει κατά πολύ τη συμπεριφορά του αέρα, τόσο στην άνεση που αισθάνονται οι άνθρωποι (κλιματισμός) όσο και στη διατηρησιμότητα των προϊόντων που αποθηκεύονται (βιομηχανική ψύξη). Από ενεργειακής πλευράς, η ποσότητα του νερού στον αέρα έχει μεγάλη σημασία στην κατανάλωση ενέργειας των εγκαταστάσεων κλιματισμού ή ψύξης. Ο λόγος είναι απλός:

Ο υδρατμός είναι μια «αποθήκη θερμότητας», που πρέπει να απομακρυνθεί. Όσο περισσότερος είναι, τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτείται. Αν σκεφτούμε ότι ο αέρας είναι το «μεταφορικό μέσο» που μεταφέρει το θερμικό φορτίο από το χώρο και το περιεχόμενό του προς τον εναλλάκτη, καταλαβαίνουμε πόσο σημαντικό είναι να κατανοούμε τις ιδιότητες του και τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται ως φορέας θερμότητας.

Για τους παραπάνω λόγους, ο ψυχομετρικός χάρτης είναι απαραίτητος για τη μελέτη, τη διαμόρφωση, τον έλεγχο των ιδιοτήτων του αέρα, προκειμένου να εξασφαλίζονται οι επιθυμητές συνθήκες υγιεινής και άνεσης στον κλιματισμό και διατήρησης τροφίμων στη βιομηχανική ψύξη, πετυχαίνοντας παράλληλα την αποτελεσματικότερη λειτουργία με όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Εάν δεν είχαμε τον ψυχομετρικό χάρτη, οι υπολογισμοί θα ήταν πολυπλοκότεροι και θα απαιτούσαν πολύ περισσότερο χρόνο.



ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η περιγραφή του ψυχομετρικού χάρτη, έτσι ώστε να μπορείς να διακρίνεις τις κλίμακες και τα ψυχομετρικά μεγέθη του.



ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΤΟΧΟΙ

Μετά τη μελέτη του κεφαλαίου, θα είσαι ικανός/ικανή:

1. Να αναγνωρίζεις τις κλίμακες που απεικονίζονται στον ψυχομετρικό χάρτη.
2. Να αναγνωρίζεις τα ψυχομετρικά μεγέθη που απεικονίζονται στον ψυχομετρικό χάρτη.
3. Να γνωρίζεις τις έννοιες των ψυχομετρικών μεγεθών του ψυχομετρικού χάρτη.



ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ/ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

- Θερμοκρασία ξηρού βολβού ($\theta_{\xi.β.}$ ή T_{DB}) (°C)
- Θερμοκρασία υγρού βολβού ($\theta_{υ.β.}$ ή T_{WB}) (°C)
- Ειδική υγρασία (w) ($kg_{υερ}/kg_{\xi.α.}$ ή gr/kg)
- Απόλυτη υγρασία (kg ή gr/m^3)
- Κατάσταση κορεσμού αέρα
- Σημείο δρόσου (T_{DP}) (°C)
- Σχετική υγρασία (ϕ) (m^3/kg)
- Ανηγγμένος όγκος αέρα (m^3/kg)
- Ενθαλπία (h)
- Ανηγγμένη ενθαλπία (h)

5.1 ΚΛΙΜΑΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΗ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ

Ο ψυχομετρικός χάρτης μάς βοηθά να προσδιορίσουμε όλα τα ψυχομετρικά χαρακτηριστικά του αέρα πάνω σε μια σελίδα. Με τη βοήθειά του γίνονται πολύ εύκολα όλοι οι θερμοδυναμικοί υπολογισμοί των μεταβολών του αέρα.

Οι υπολογισμοί αυτοί, αν δεν είχε επινοηθεί ο ψυχομετρικός χάρτης, θα ήταν μεν δυνατοί, αλλά θα παρουσίαζαν πολύ μεγάλη δυσκολία στην εκτέλεσή τους. Έτσι, ο ψυχομετρικός χάρτης είναι πολύ σημαντικός, διότι πάνω σε αυτόν απεικονίζονται οι ψυχομετρικές μεταβολές και μας βοηθά να υπολογίσουμε τα ποσά θερμότητας που πρέπει να αφαιρεθούν ή να προστεθούν στον υγρό αέρα (ατμοσφαιρικό) προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες με αποτελεσματικότητα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επομένως, η γνώση των κλιμάκων και των ψυχομετρικών μεγεθών του είναι απαραίτητη.

Οι κλίμακες (γραμμές) στον ψυχομετρικό χάρτη (Διάγραμμα 14) απεικονίζουν τα παρακάτω **ψυχομετρικά μεγέθη**:

1. Οι κάθετες γραμμές απεικονίζουν τις τιμές **θερμοκρασίας ξηρού βολβού** ($\theta_{\text{ε.β.}}$ ή T_{DB}) στο κάτω μέρος του χάρτη, σε μονάδες Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$).
2. Οι οριζόντιες γραμμές δεξιά του χάρτη απεικονίζουν τις τιμές της **ειδικής υγρασίας** (w) σε μονάδες $\text{kg}_{\text{υερό}}/\text{kg}_{\text{ε.α.}}$ ή gr/kg και τις τιμές του **σημείου δρόσου** (T_{DP}) αριστερά του χάρτη, σε μονάδες Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$).
3. Οι μικρής κλίσης διαγώνιες γραμμές αριστερά του χάρτη απεικονίζουν τις τιμές **θερμοκρασίας υγρού βολβού** ($\theta_{\text{υ.β.}}$ ή T_{WB}), σε μονάδες Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$).
4. Οι μεγάλης κλίσης διαγώνιες γραμμές απεικονίζουν τις τιμές **ειδικού όγκου αέρα** (v), σε μονάδες (m^3/kg).
5. Οι καμπύλες γραμμές απεικονίζουν τη **σχετική υγρασία** (ϕ) %.
6. Η προέκταση των γραμμών της θερμοκρασίας υγρού θερμομέτρου αριστερά του χάρτη απεικονίζουν την **ειδική ενθαλπία** (h), σε μονάδες kJ/kg .
7. Το ημικύκλιο αριστερά του χάρτη απεικονίζει στο άνω μέρος την τιμή του **συντελεστή αισθητής θερμότητας (SHF)** και στο κάτω μέρος το **λόγο της μεταβολής της κατάστασης του αέρα** (διαφορά ενθαλπίας διά τη διαφορά της ειδικής υγρασίας των σημείων του αέρα).

Θερμοκρασία ξηρού βολβού ($\theta_{\text{ε.β.}}$ ή T_{DB}): Είναι η θερμοκρασία που δείχνει ένα κοινό θερμομέτρο που ο βολβός του είναι στεγνός ($^{\circ}\text{C}$).

Θερμοκρασία υγρού βολβού ($\theta_{\text{υ.β.}}$ ή T_{WB}): Είναι η κατώτερη θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει ένα κοινό θερμομέτρο που ο βολβός του είναι υγρός, λόγω της εξάτμισης του νερού ($^{\circ}\text{C}$).

Ειδική υγρασία (w): Ονομάζεται ο λόγος της μάζας των υδρατμών προς τη μάζα του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα στην οποία περιέχεται ($\text{kg}_{\text{υερό}}/\text{kg}_{\text{ε.α.}}$ ή gr/kg).

Απόλυτη υγρασία: Ονομάζεται ο λόγος της μάζας των υδρατμών που περιέχεται στον όγκο του ατμοσφαιρικού αέρα προς τον όγκο αυτό (kg ή gr/m^3).

Κατάσταση κορεσμού αέρα: Είναι η κατάσταση στην οποία μπορεί να βρεθεί ο αέρας, κατά την οποία έστω και η ελάχιστη ψύξη του προκαλεί υγροποίηση των υδρατμών που περιέχονται στη μάζα του.

Σημείο δρόσου (T_{DP}): Είναι το σημείο της θερμοκρασίας στερεού σώματος που έχει τοποθετηθεί σε μη κορεσμένο υγρό αέρα, κατά το οποίο μειώνοντας τη θερμοκρασία του εμφανίζονται σταγονίδια υγροποιημένου υδρατμού πάνω στην επιφάνειά του ($^{\circ}\text{C}$). Γι' αυτό,

όταν ο κορεσμένος αέρας ψυχθεί έστω και λίγο, οπότε η θερμοκρασία του πέσει κάτω από το σημείο δρόσου του, τότε δημιουργούνται σταγονίδια που αιωρούνται μέσα στον κορεσμένο αέρα και δημιουργούν ομίχλη.

Σχετική υγρασία (ϕ): Είναι ο λόγος της μερικής πίεσης υδρατμών που περιέχονται σε υγρό ατμοσφαιρικό αέρα προς τη μερική πίεση των υδρατμών στον ίδιο αέρα όταν αυτός είναι κορεσμένος στην ίδια πίεση και θερμοκρασία (%). Για παράδειγμα, ο αέρας με σχετική υγρασία 40% έχει 40% της μέγιστης ποσότητας υγρασίας που θα μπορούσε να έχει σε αυτή την πίεση και θερμοκρασία.

Ειδικός όγκος αέρα (v): Ονομάζεται ο λόγος του όγκου του υγρού αέρα προς τη μάζα του ξηρού αέρα (m^3/kg).

Ανηγμένος όγκος αέρα: Ονομάζεται ο λόγος του όγκου του υγρού αέρα προς τη μάζα του υγρού αέρα (m^3/kg).

Ειδική ενθαλπία (h): Είναι το σύνολο της περιεχόμενης θερμότητας στη μάζα του υγρού αέρα kJ/kg .

Ανηγμένη ενθαλπία: Ονομάζεται ο λόγος της ενθαλπίας του υγρού αέρα προς τη μάζα του ξηρού αέρα (kJ/kg ή m^3/kg).

Αισθητή θερμότητα q_s ή h_s ή Q_s : Ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που μπορεί να προστεθεί ή να αφαιρεθεί από τη μάζα του υγρού αέρα, χωρίς να επιφέρει αλλαγή στη φυσική του κατάσταση. Με την αύξηση της αισθητής θερμότητας στη μάζα του αέρα, έχουμε ανάλογη αύξηση της θερμοκρασίας του και αντιστρόφως ($kJ/kg_{\xi.a.}$).

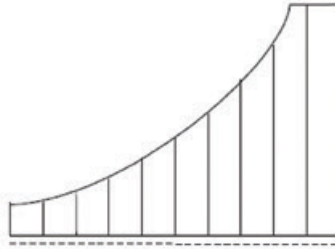
Λανθάνουσα θερμότητα q_L ή h_L ή Q_L : Ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που πρέπει να προστεθεί ή να αφαιρεθεί από τη μάζα του αέρα, όταν αυτός βρίσκεται ήδη στη θερμοκρασία αλλαγής, ώστε να αλλάξει κατάσταση χωρίς την αύξηση της θερμοκρασίας του ($kJ/kg_{\xi.a.}$).

Ολική θερμότητα: Το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας $Q_s + Q_L$ ονομάζεται ολική θερμότητα Q_T (Τ από το Total = Ολικός).

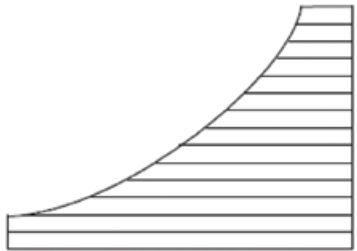
Αισθητή διαφορά ενθαλπίας Δh_s : Ονομάζεται το ποσό της ενθαλπίας που απομακρύνεται κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας μιας ποσότητας αέρα, αλλά χωρίς μεταβολή της υγρασίας του αέρα ονομάζεται αισθητή διαφορά ενθαλπίας (S από το Sensible = Αισθητός).

Λανθάνουσα διαφορά ενθαλπίας Δh_L : Ονομάζεται το ποσό της ενθαλπίας που απομακρύνεται κατά την υγροποίηση των υδρατμών μιας ποσότητας αέρα, αλλά χωρίς μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα ονομάζεται λανθάνουσα διαφορά ενθαλπίας (L από το Latent = Λανθάνων).

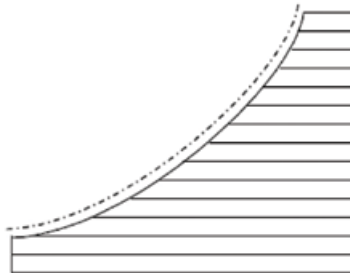
Συντελεστής αισθητής θερμότητας (SHF ή SHR): Ονομάζεται ο λόγος της αισθητής διαφοράς ενθαλπίας προς την ολική διαφορά ενθαλπίας $\Delta h_s / \Delta h_T$ (για συντομία το γράφουμε SHR από τα αρχικά του αντίστοιχου αγγλικού όρου Sensible Heat Ratio ή SHF από τα αρχικά Sensible Heat Factor).



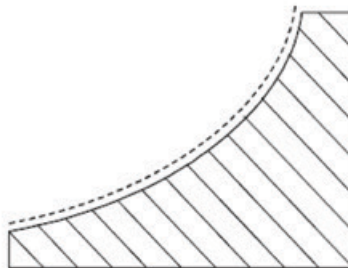
Ευθείες σταθερής θερμοκρασίας ξηρής σφαίρας, T_{db} , είναι παράλληλες μεταξύ τους και έχουν μικρή απόκλιση από την κατακόρυφη.



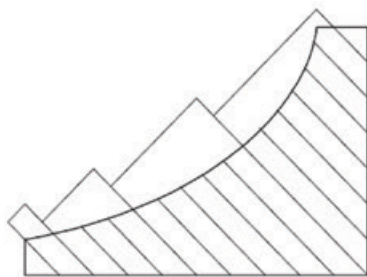
Ευθείες σταθερής ειδικής υγρασίας, w , είναι οριζόντιες και παράλληλες μεταξύ τους.



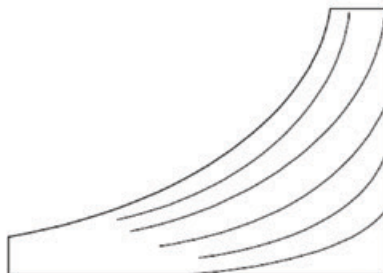
Ευθείες σταθερού σημείου δρόσου, T_{dp} , είναι οριζόντιες και παράλληλες μεταξύ τους.



Ευθείες σταθερής θερμοκρασίας υγρής σφαίρας, T_{wb} , είναι υπό κλίση και δεν είναι ακριβώς παράλληλες μεταξύ τους.



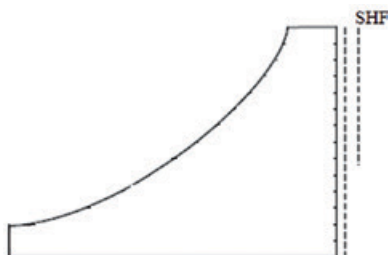
Ευθείες σταθερής ολικής ειδικής ενθαλπίας, h , είναι παράλληλες μεταξύ τους και υπό κλίση με την οριζόντια. Έχουν μικρή απόκλιση από τις ευθείες σταθερής θερμοκρασίας υγρής σφαίρας.



Καμπύλες σταθερής σχετικής υγρασίας, ϕ , κυμαίνονται από $\phi=0\%$ (ευθεία που ταυτίζεται με την οριζόντια $w=0$, καθαρά ξηρός αέρας), μέχρι την τιμή $\phi=100\%$ (καμπύλη κορεσμού).

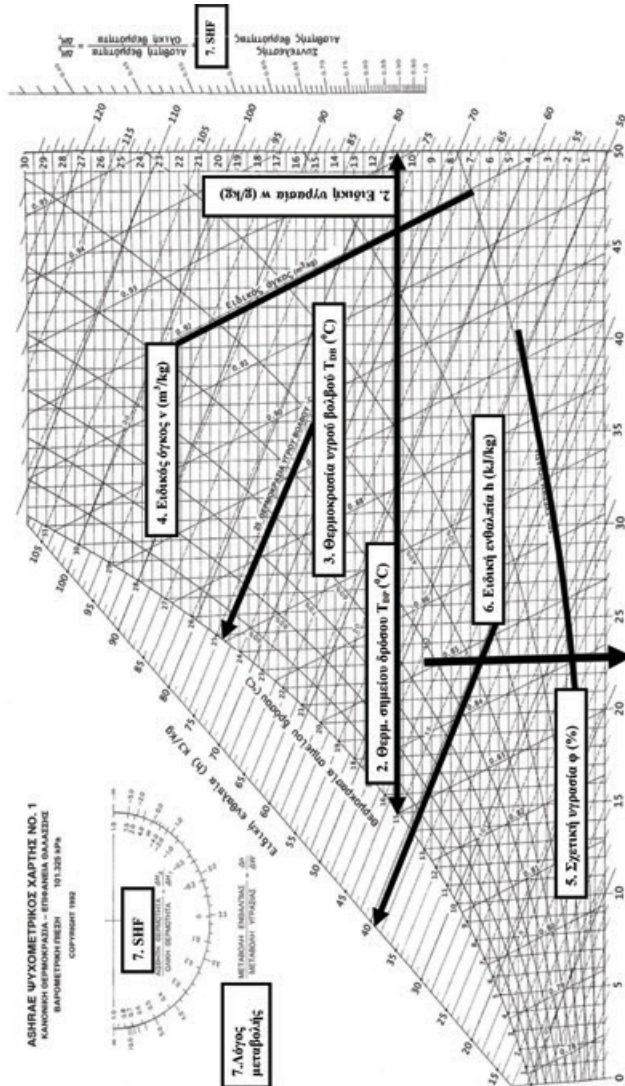


Άνω μέρος ημικύκλιου για τη χάραξη της γραμμής που ορίζει το συντελεστή αισθητής θερμότητας (SHF).



Κάθετη ευθεία συντελεστή αισθητής θερμότητας (SHF).

Κάτω μέρος ημικύκλιου για τη χάραξη της γραμμής που ορίζει το λόγο της μεταβολής της ενθαλπίας με τη μεταβολή της ειδικής υγρασίας.



Διάγραμμα 14.
Ψυχομετρικός χάρτης

5.2 ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Ο ψυχομετρικός χάρτης είναι πολύ σημαντικός, διότι πάνω σε αυτόν απεικονίζονται οι ψυχομετρικές μεταβολές που αποτελούν τη βάση για να υπολογίσουμε τα ποσά της θερμότητας που πρέπει να αφαιρεθούν ή να προστεθούν στον υγρό αέρα (ατμοσφαιρικό) προκειμένου να εξυπηρετεί τις επιθυμητές συνθήκες του χώρου που κλιματίζει με αποτελεσματικότητα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Τα ψυχομετρικά μεγέθη που απεικονίζονται στις κλίμακές του είναι:

- **Θερμοκρασία ξηρού βολβού ($\theta_{\text{ε.β.}}$ ή T_{DB})** σε μονάδες Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$).
- **Ειδική υγρασία (w)** σε μονάδες $\text{kg}_{\text{υερό}}/\text{kg}_{\text{ε.α.}}$ ή gr/kg .
- **Σημείου δρόσου (T_{DP})**, σε μονάδες Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$).
- **Θερμοκρασία υγρού βολβού ($\theta_{\text{υ.β.}}$ ή T_{WB})**, σε μονάδες Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$).
- **Ειδικός όγκος αέρα (v)**, σε μονάδες (m^3/kg).
- **Σχετική υγρασία (ϕ)** %.
- **Ειδική ενθαλπία (h)** σε μονάδες kJ/kg .
- **Συντελεστής αισθητής θερμότητας (SHF)**: Είναι ο λόγος της αισθητής προς τη συνολική θερμότητα (αισθητή και λανθάνουσα).

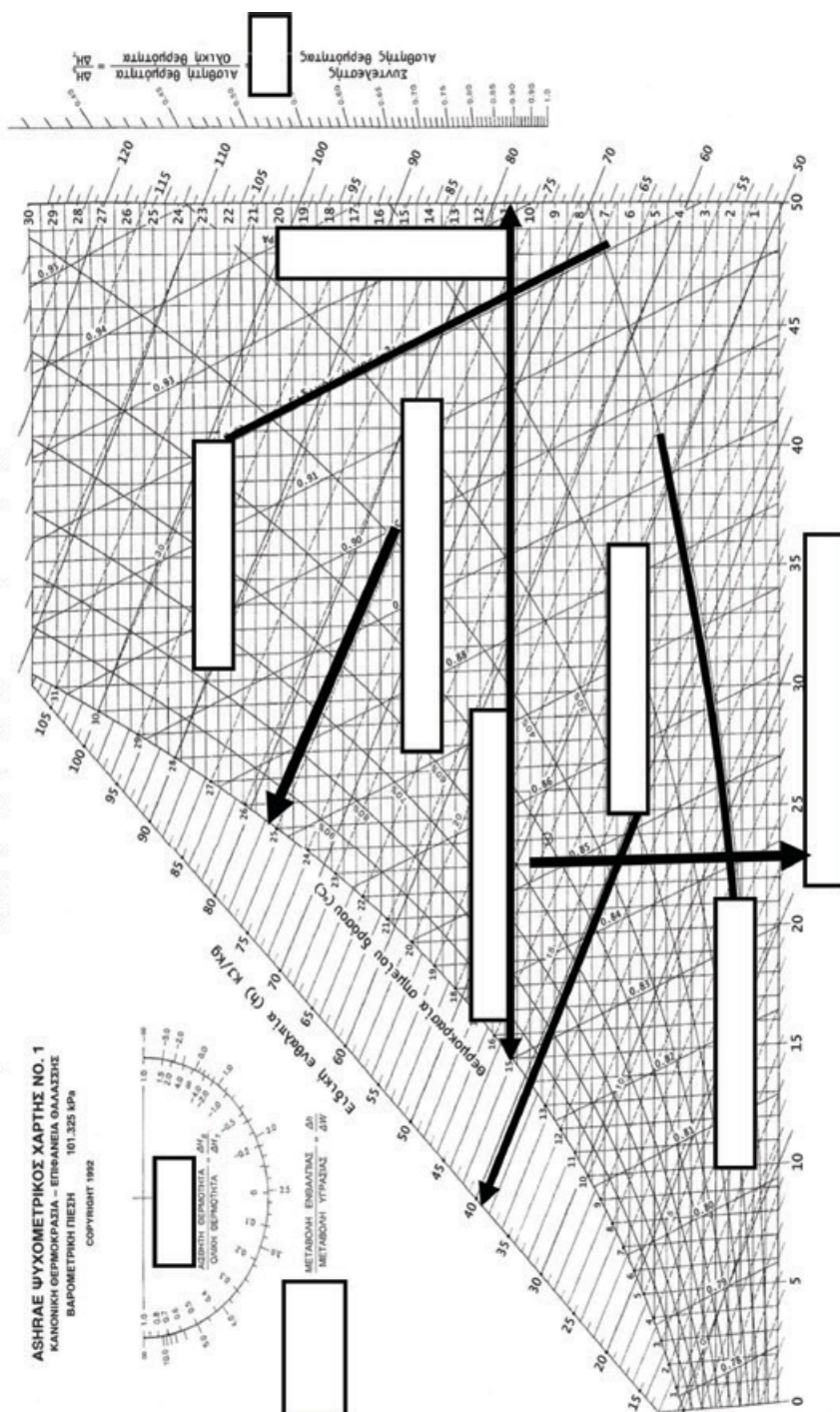


5.3 ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Αντιστοίχισε τις έννοιες στα παρακάτω ψυχομετρικά μεγέθη.

Απόλυτη υγρασία •	• Η θερμοκρασία που δείχνει ένα κοινό θερμόμετρο, που ο βολβός του είναι στεγνός ($^{\circ}\text{C}$).
Σημείο δρόσου (T_{dp}) •	• Η κατάσταση που μπορεί να βρεθεί ο αέρας, κατά την οποία έστω και η ελάχιστη ψύξη του προκαλεί υγροποίηση των υδρατμών που περιέχονται στη μάζα του.
Θερμοκρασία ξηρού βολβού ($\theta_{\text{ε.β.}}$ ή T_{DB}) •	• Ο λόγος της μερικής πίεσης υδρατμών που περιέχονται σε υγρό ατμοσφαιρικό αέρα προς τη μερική πίεση των υδρατμών στον ίδιο αέρα όταν αυτός είναι κορεσμένος στην ίδια πίεση και θερμοκρασία (%).
Ανηγμένος όγκος αέρα •	• Η κατώτερη θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει ένα κοινό θερμόμετρο που ο βολβός του είναι υγρός, λόγω της εξάτμισης του νερού ($^{\circ}\text{C}$).
Κατάσταση κορεσμού αέρα •	• Ο λόγος της μάζας των υδρατμών που περιέχεται στον όγκο του ατμοσφαιρικού αέρα προς τον όγκο αυτό (kg ή gr/m^3).
Θερμοκρασία υγρού βολβού ($\theta_{\text{υ.β.}}$ ή T_{WB}) •	• Το σημείο της θερμοκρασίας στερεού σώματος που έχει τοποθετηθεί σε μη κορεσμένο υγρό αέρα, κατά το οποίο μειώνοντας τη θερμοκρασία του εμφανίζονται σταγονίδια υγροποιημένου υδρατμού πάνω στην επιφάνειά του ($^{\circ}\text{C}$).
Ενθαλπία (h) •	• Ο λόγος της ενθαλπίας του υγρού αέρα προς τη μάζα του ξηρού αέρα (kJ/kg ή m^3/kg).
Σχετική υγρασία (ϕ) •	• Είναι το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας ενός σώματος και του γινομένου της εξωτερικής πίεσης επί του όγκου που καταλαμβάνει (kJ/kg ή m^3/kg).
Ειδικός όγκος αέρα (v) •	• Ονομάζεται ο λόγος του όγκου του υγρού αέρα προς τη μάζα του υγρού αέρα (m^3/kg).
Ειδική υγρασία (w) •	• Ο λόγος του όγκου του υγρού αέρα προς τη μάζα του ξηρού αέρα (m^3/kg).
Ανηγμένη ενθαλπία •	• Ο λόγος της μάζας των υδρατμών προς τη μάζα του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα στην οποία περιέχεται ($\text{kg}_{\text{νερό}}/\text{kg}_{\text{ε.α.}}$ ή gr/kg).

2. Σημείωσε πάνω στον ψυχρομετρικό χάρτη τα μεγέθη που απεικονίζουν οι κλίμακες του.



ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΟΝ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟ ΧΑΡΤΗ



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ψυχομετρικές μεταβολές αντιπροσωπεύουν τις μεταβολές της ψυχομετρικής κατάστασης του αέρα, δηλαδή την κατάσταση και τις ιδιότητες του αέρα πριν και έπειτα από το στοιχείο κλιματισμού. Η μελέτη τους είναι σημαντική, διότι μόνο έτσι μπορούμε να πετύχουμε τις επιθυμητές συνθήκες (συνθήκες άνεσης ή συνθήκες διατήρησης προϊόντων του αέρα στους χώρους που επιθυμούμε, με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας).

Οι ψυχομετρικές μεταβολές στον ψυχομετρικό χάρτη χαρακτηρίζονται από δύο βασικά σημεία. Την αρχική κατάσταση του αέρα πριν από το στοιχείο κλιματισμού και την τελική κατάσταση μετά την έξοδο του από το στοιχείο. Με βάση τα στοιχεία της αρχικής και τελικής κατάστασης του αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη υπολογίζονται τα ποσά θερμότητας που πρέπει να προστεθούν ή να αφαιρεθούν στον αέρα προκειμένου να πετύχουμε τις επιθυμητές συνθήκες.

Οι ψυχομετρικές μεταβολές είναι απαραίτητες για τη μελέτη, τη διαμόρφωση και τον έλεγχο των ιδιοτήτων του αέρα, προκειμένου να εξασφαλίζονται οι επιθυμητές συνθήκες υγιεινής και άνεσης στον κλιματισμό και διατήρησης τροφίμων στη βιομηχανική ψύξη, με όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Οι ψυχομετρικές μεταβολές είναι:

- Θέρμανση υγρού αέρα με σταθερή την υγρασία (αισθητή θέρμανση).
- Θέρμανση και ύγρανση υγρού αέρα.
- Ψύξη υγρού αέρα, χωρίς αφύγρανση (με σταθερή ειδική υγρασία w).
- Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα.
- Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα που καταλήγει σε μη κορεσμένο αέρα.
- Αδιαβατική ψύξη υγρού αέρα (ψύξη με σταθερή την ενθαλπία h_t).



ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η ανάλυση των ψυχομετρικών μεταβολών στον ψυχομετρικό χάρτη, έτσι ώστε να διακρίνεις τις μεταβολές του αέρα που προκύπτουν όταν αφαιρούνται ή προστίθενται σε αυτόν ποσά θερμότητας, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες των χώρων σε ψύξη ή θέρμανση.



ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΤΟΧΟΙ

Μετά τη μελέτη του κεφαλαίου, θα είσαι ικανός/ικανή:

1. Να αναγνωρίζεις και να περιγράφεις τις ψυχομετρικές μεταβολές στον ψυχομετρικό χάρτη.
2. Να γνωρίζεις το λόγο για τον οποίο επιθυμούμε την ύπαρξη των ψυχομετρικών μεταβολών, καθώς και από τι εξαρτώνται τα όριά τους.
3. Να γνωρίζεις και να περιγράφεις τις συναλλασσόμενες ποσότητες ενέργειας του αέρα που συμβαίνουν στις ψυχομετρικές μεταβολές.
4. Να γνωρίζεις τους τύπους-σχέσεις με τους οποίους υπολογίζονται τα συναλλασσόμενα ποσά θερμότητας στον αέρα.



ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ/ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

- Παροχή μάζας αέρα $\dot{m}_a$ (kg/s)
- Αφαιρούμενη μάζα νερού $\dot{m}_w$ (kg/s)
- Ειδική ενθαλπία συμπυκνωμένων υδρατμών h_w (kJ/kg)
- Ειδική υγρασία w ($\text{kg}_{\text{νερό}}/\text{kg}_{\text{ξ.α.}}$)
- Ειδική ενθαλπία αέρα h_A (kJ/kg $_{\text{ξ.α.}}$)
- $\dot{V}$: παροχή όγκου αέρα (m^3/s ή m^3/h)
- Ειδικός όγκος αέρα v_a (m^3/kg)
- Συνολική θερμότητα ανά μονάδα μάζας $\dot{Q}_t$ (kW)
- Αισθητή θερμότητα ανά μονάδα μάζας $\dot{Q}_s$ (kW)
- Λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας $\dot{Q}_L$ (kW)

6.1 Θέρμανση υγρού αέρα με σταθερή την ειδική υγρασία (αισθητή θέρμανση)

Η θέρμανση χωρίς ύγρανση πραγματοποιείται όταν ο χώρος θερμαίνεται από ηλεκτρικές αντιστάσεις ή από άλλες θερμικές πηγές χωρίς όμως να προστίθεται υγρασία στον αέρα. Αυτό σημαίνει ότι η μεταβολή της ειδικής υγρασίας του αέρα είναι μηδέν, δηλαδή ότι η μεταβολή που εξετάζουμε κινείται πάνω σε οριζόντια ευθεία παράλληλη με τον άξονα των θερμοκρασιών ξηρού βολβού.

Κατά τη μεταβολή αυτή τα ψυχομετρικά στοιχεία τα οποία διατηρούνται σταθερά είναι η ειδική υγρασία του αέρα, η λανθάνουσα θερμότητα και η θερμοκρασία υγροποίησης του αέρα (σημείο δρόσου). Αντίθετα, μεταβάλλονται η ενθαλπία του αέρα (διαπιστώνεται αύξηση της ενθαλπίας κατά τη μεταβολή), οι θερμοκρασίες ξηρού και υγρού θερμομέτρου (αυξάνονται κατά τη διάρκεια της μεταβολής), η αισθητή θερμότητα (παρατηρείται αύξηση της ενθαλπίας) και τέλος η σχετική υγρασία η οποία ελαττώνεται.

Το ποσό της θερμότητας $\dot{Q}_t$ που προσδίδεται στον αέρα είναι μόνο αισθητό $\dot{Q}_s$, και είναι:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_t &= \dot{Q}_s = \dot{m}_a \cdot h_t = \dot{m}_a \cdot (h_B - h_A) \quad (\text{kW}) \\ h_t &= h_s = h_B - h_A \quad (\text{kJ/kg}_{\text{ξ.α.}}) \\ \dot{m}_a &= \frac{\dot{V}_a}{v_a} \quad (\text{kg/s}) \quad \text{—}\end{aligned}$$

όπου:

$\dot{m}_a$: παροχή μάζας αέρα πριν από τη θέρμανση, σημείο A (kg/s).

h_A : ειδική ενθαλπία αέρα πριν από τη θέρμανση, σημείο A (kJ/kg_{ε.α.}).

h_B : ειδική ενθαλπία αέρα μετά τη θέρμανση, σημείο B (kJ/kg_{ε.α.}).

h_S : ειδική ενθαλπία αισθητής θερμότητας υγρού αέρα (kJ/kg_{ε.α.}).

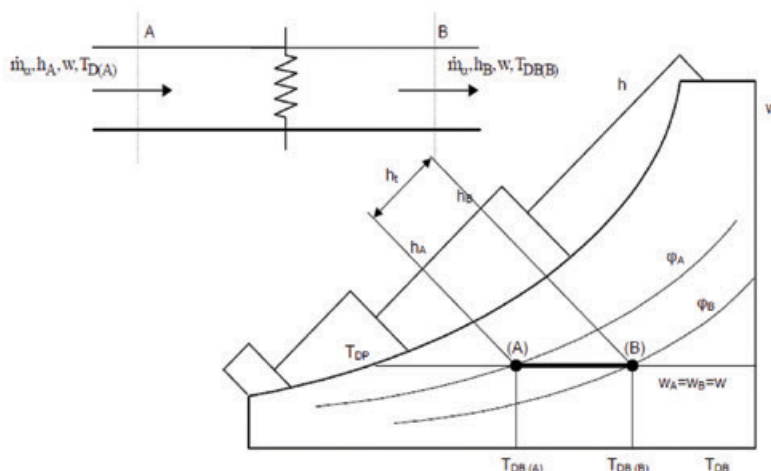
h_t : συνολική ενθαλπία υγρού αέρα (kJ/kg_{ε.α.}).

$\dot{V}_a$: παροχή όγκου αέρα πριν από τη θέρμανση, σε m³/s (m³/s διὰ 3600 = m³/h).

v_a : ειδικός όγκος αέρα πριν από τη θέρμανση, σημείο A (m³/kg).

$\dot{Q}_t$: συνολική θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).

$\dot{Q}_S$: αισθητή θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).



Σχήμα 6:

Θέρμανση υγρού αέρα με σταθερή την ειδική υγρασία

6.2 Θέρμανση και ύγρανση υγρού αέρα

Η ύγρανση στη θέρμανση είναι απαραίτητη όταν θέλουμε να εξασφαλίσουμε συνθήκες θερμικής άνεσης στους χώρους διαμονής των ανθρώπων. Επειδή ο αέρας του χειμώνα είναι χαμηλής θερμοκρασίας, μπορεί να συγκρατήσει μικρό ποσό υγρασίας (είναι μικρής ειδικής υγρασίας). Επίσης, ο χαμηλής θερμοκρασίας αέρας παρουσιάζεται με υψηλό ποσοστό σχετικής υγρασίας. Έτσι, όταν ο αέρας περάσει από το στοιχείο θερμάνσεως και αυξηθεί η θερμοκρασία του, θα μειωθεί η σχετική υγρασία. Όμως η σχετική υγρασία του κλιματιζόμενου χώρου πρέπει να διατηρείται γύρω στα 50%, αλλιώς η ξηρή ατμόσφαιρα του κλιματιζόμενου χώρου θα γίνει αποπνικτική και ανθυγιεινή. Για να διατηρήσουμε τη σχετική υγρασία του χώρου στα επιθυμητά επίπεδα, εφοδιάζουμε μια εγκατάσταση κλιματισμού με σύστημα υγρανσεως του αέρα. Αυτοί οι υγραντήρες του αέρα τοποθετούνται μετά το στοιχείο θερμάνσεως του αέρα. Η λειτουργία των υγραντήρων ελέγχεται με ένα εξάρτημα που βρίσκεται μέσα στον κλιματιζόμενο χώρο και ονομάζεται υγροστάτης.

Το ποσό της θερμότητας $\dot{Q}_t$ που προσδίδεται στον αέρα είναι αισθητό $\dot{Q}_S$ και λανθάνον $\dot{Q}_L$ και είναι:

- Το ποσό της αισθητής θερμότητας $\dot{Q}_S$ που προσδίδεται στον αέρα είναι:

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_a \cdot h_S = \dot{m}_a \cdot (h_K - h_A) \quad (\text{kW})$$

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_a} \quad (\text{kg/s})$$

$$h_S = h_K - h_A \quad (\text{kJ/kg}_{\xi.a.})$$

- Το ποσό της λαμβάνουσας θερμότητας $\dot{Q}_L$ που προσδίδεται στον αέρα είναι:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_a \cdot h_L = \dot{m}_a \cdot (h_B - h_K) \quad (\text{kW})$$

$$h_L = h_B - h_K \quad (\text{kJ/kg}_{\xi.a.})$$

- Το συνολικό ποσό της θερμότητας που προσδίδεται στον αέρα είναι:

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_S + \dot{Q}_L \quad \text{ή} \quad \dot{Q}_t = \dot{m}_a \cdot h_t = \dot{m}_a \cdot (h_B - h_A) \quad (\text{kW})$$

$$h_t = h_S + h_L = h_B - h_A \quad (\text{kJ/kg}_{\xi.a.})$$

- Το προστιθέμενο ποσό νερού κατά τη μεταβολή A-B είναι:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a \cdot (w_B - w_A) \quad (\text{kg/s})$$

όπου:

$\dot{m}_a$: παροχή μάζας αέρα πριν από τη θέρμανση, σημείο A (kg/s).

$\dot{m}_w$: προσπιθέμενη μάζα νερού μετά τη θέρμανση, σημείο B (kg/s).

h_A : ειδική ενθαλπία αέρα πριν από τη θέρμανση, σημείο A (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_B : ειδική ενθαλπία αέρα μετά τη θέρμανση, σημείο B (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_S : ειδική ενθαλπία αισθητής θερμότητας αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_L : ειδική ενθαλπία λαμβάνουσας θερμότητας αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_t : συνολική ενθαλπία υγρού αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

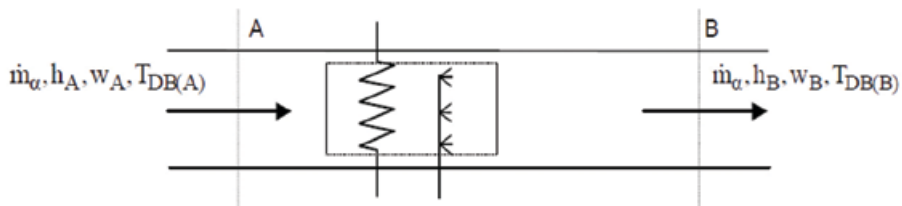
$\dot{V}_a$: παροχή όγκου αέρα πριν από τη θέρμανση, σε m³/s (m³/s διá 3600 = m³/h).

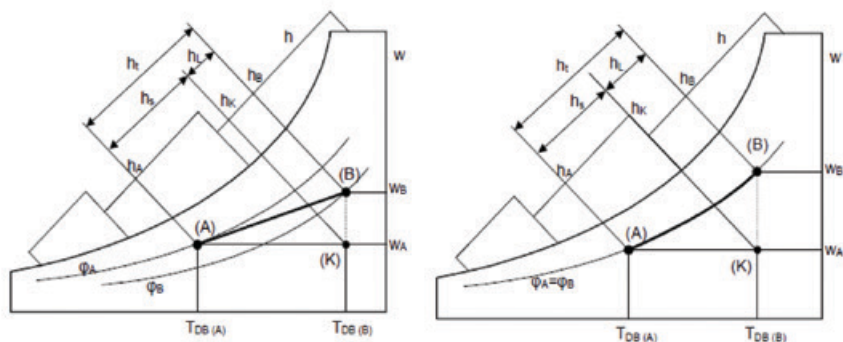
v_a : ειδικός όγκος αέρα πριν από τη θέρμανση, σημείο A (m³/kg).

$\dot{Q}_t$: συνολική θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).

$\dot{Q}_S$: αισθητή θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).

$\dot{Q}_L$: λαμβάνουσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW)





Σχήμα 7:

- α) Θέρμανση με ύγρανση με μεταβολή της σχετικής υγρασίας
 β) Θέρμανση με ύγρανση με διατήρηση σταθερής σχετικής υγρασίας

6.3 Ψύξη υγρού αέρα χωρίς αφύγρανση

Η ψύξη χωρίς αφύγρανση μπορεί να θεωρηθεί η αντίθετη μεταβολή της αισθητής θέρμανσης. Η μεταβολή παρίσταται στον ψυχομετρικό χάρτη από οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα. Καθώς δεν υπάρχει αφύγρανση, δηλαδή κορεσμός του αέρα, η ειδική υγρασία παραμένει σταθερή και το ευθύγραμμο τμήμα δεν συναντά την καμπύλη κορεσμού στο χάρτη.

Το ποσό της θερμότητας $\dot{Q}_t$ που αφαιρείται από τον αέρα είναι μόνο αισθητό $\dot{Q}_s$ και είναι:

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_s = \dot{m}_a \cdot h_t = \dot{m}_a \cdot (h_B - h_A) \quad (\text{kW})$$

$$h_t = h_s = h_A - h_B \quad (\text{kJ/kg}_{\text{ξ.α.}})$$

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_a} \quad (\text{kg/s}) \quad \text{—}$$

όπου:

$\dot{m}_a$: παροχή μάζας αέρα πριν από την ψύξη, σημείο A (kg/s).

h_A : ειδική ενθαλπία αέρα πριν από την ψύξη, σημείο A (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_B : ειδική ενθαλπία αέρα μετά την ψύξη, σημείο B (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_s : ειδική ενθαλπία αισθητής θερμότητας αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

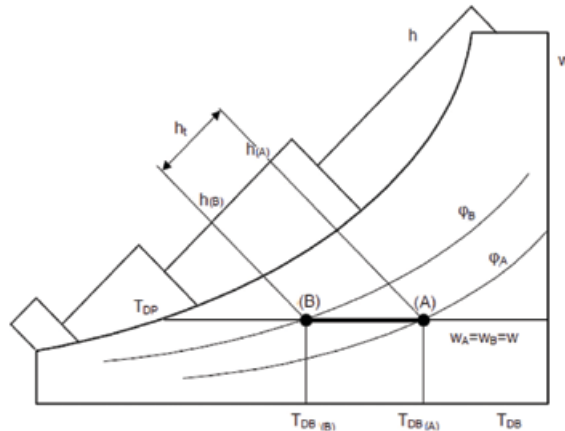
h_t : συνολική ενθαλπία αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

$\dot{V}_a$: παροχή όγκου αέρα πριν από την ψύξη, σε m³/s (m³/s διὰ 3600 = m³/h).

v_a : ειδικός όγκος αέρα πριν από την ψύξη, σημείο A (m³/kg).

$\dot{Q}_t$: συνολική θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).

$\dot{Q}_s$: αισθητή θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).



Σχήμα 8:

Ψύξη υγρού αέρα χωρίς αφύγρανση

6.4 Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα

Όταν ο αέρας περνά από το ψυκτικό στοιχείο και έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια των πτερυγίων που η θερμοκρασία τους είναι μικρότερη της θερμοκρασίας κορεσμού του αέρα, τότε γίνεται συμπύκνωση μέρος των υδρατμών που περιέχει ο αέρας και ταυτόχρονα γίνεται και αφαίρεση αισθητής θερμότητας απ' αυτόν (διάστημα C-B, Σχήμα 8). Πάνω στον ψυχομετρικό χάρτη (Σχήμα 8) παρατηρούμε ότι ψύχοντας τον αέρα αρχικά η ειδική υγρασία παραμένει σταθερή ενώ αυξάνεται η σχετική υγρασία, με αποτέλεσμα κάποια στιγμή να φτάνει στο σημείο κορεσμού του. Τότε ο ψυχόμενος αέρας, μη μπορώντας να διατηρήσει την ποσότητα υγρασίας που του προστίθεται, την αποβάλλει υπό μορφή σταγονιδίων. Η αφύγρανση είναι προφανές ότι γίνεται στο διάστημα (C-B) στον ψυχομετρικό χάρτη. Η υγρασία που συμπυκνώνεται και φεύγει από τον αέρα μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί από τη διαφορά της ειδικής υγρασίας. **Η μεταβολή αυτή δεν ισχύει στην πράξη**, είναι θεωρητική, διότι προϋποθέτει την απευθείας επαφή όλης της ποσότητας του αέρα με την ψυχρή επιφάνεια του στοιχείου με την οποία πραγματοποιείται η ψύξη.

Όπως είναι γνωστό και θα δούμε παρακάτω, ένα μόνο μέρος του αέρα έρχεται σε άμεση επαφή με το στοιχείο ψύξεως (περίπου το 80%), ενώ ο υπόλοιπος αέρας περνά χωρίς να έχει επαφή με την επιφάνεια του στοιχείου και επομένως το ποσοστό αυτό του αέρα ποτέ δεν φτάνει στο σημείο κορεσμού.

Το ποσό της θερμότητας $\dot{Q}_t$ που αφαιρείται από τον αέρα είναι αισθητό $\dot{Q}_s$ και λανθάνον $\dot{Q}_L$ και είναι:

- Το ποσό της αισθητής θερμότητας $\dot{Q}_s$ που αφαιρείται από τον αέρα.

$$\dot{Q}_s = m_a \cdot h_s = m_a \cdot (h_k - h_B) \quad (\text{kW})$$

$$m_a = \frac{\dot{V}_a}{v_a} \quad (\text{kg/s})$$

$$h_s = h_k - h_B \quad (\text{kJ/kg}_{\text{ξ.α.}})$$

- Το ποσό της λανθάνουσας θερμότητας $\dot{Q}_L$ που αφαιρείται από τον αέρα.

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_a \cdot h_L = \dot{m}_a \cdot (h_A - h_K) \quad (\text{kW})$$

$$h_L = h_A - h_K \quad (\text{kJ/kg}_{\xi.a.})$$

- Το συνολικό ποσό της θερμότητας που αφαιρείται από τον αέρα.

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_s + \dot{Q}_L \quad \text{ή} \quad \dot{Q}_t = \dot{m}_a \cdot h_t = \dot{m}_a \cdot (h_A - h_B) \quad (\text{kW})$$

$$h_t = h_s + h_L = h_A - h_B \quad (\text{kJ/kg}_{\xi.a.})$$

- Το αποβαλλόμενο ποσό νερού κατά τη μεταβολή C-B.

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a \cdot (w_A - w_B) \quad (\text{kg/s})$$

- Η συνολική θερμική ισχύς.

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_a \cdot [(h_A - h_B) - h_w \cdot (w_A - w_B)] \quad (\text{kJ/s})$$

όπου:

$\dot{m}_a$: παροχή μάζας αέρα πριν από την ψύξη, σημείο A (kg/s).

$\dot{m}_w$: αφαιρούμενη μάζα νερού μετά την ψύξη, σημείο B (kg/s).

h_w : ειδική ενθαλπία συμπυκνωμένων υδρατμών (kJ/kg).

w_A : ειδική υγρασία στο σημείο A.

w_B : ειδική υγρασία στο σημείο B.

h_A : ειδική ενθαλπία αέρα πριν από την ψύξη, σημείο A (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_B : ειδική ενθαλπία υγρού μετά την ψύξη, σημείο B (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_s : ειδική ενθαλπία αισθητής θερμότητας αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_L : ειδική ενθαλπία λανθάνουσας θερμότητας αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_t : συνολική ενθαλπία αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

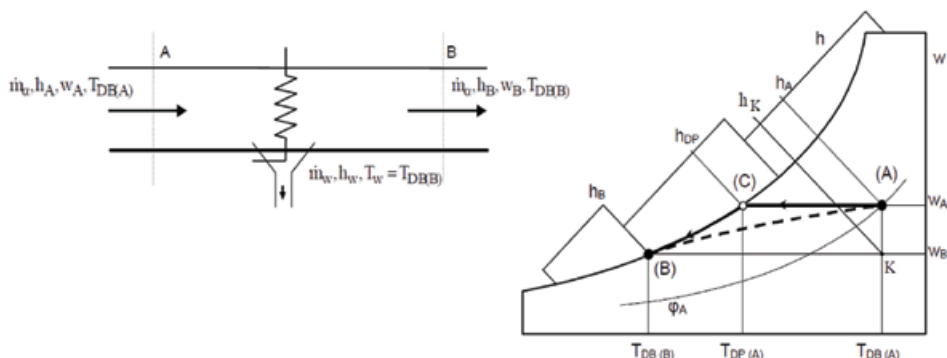
$\dot{V}_a$: παροχή όγκου αέρα πριν από την ψύξη, σε m³/s (m³/s διὰ 3600 = m³/h).

$\dot{V}_a$: ειδικός όγκος αέρα πριν από την ψύξη, σημείο A (m³/kg).

$\dot{Q}_t$: συνολική θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).

$\dot{Q}_s$: αισθητή θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).

$\dot{Q}_L$: λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW)



Σχήμα 9:

Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα

6.5 Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα που καταλήγει σε μη κορεσμένο αέρα

Στην πράξη, η ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα (μεταβολή A-B, Σχήμα 9) καταλήγει σε μη κορεσμένο αέρα (κατάσταση C, Σχήμα 9), διότι ένα ποσοστό της μάζας του διερχόμενου από το στοιχείο αέρα δεν έρχεται σε επαφή με τις σωληνώσεις και τα πτερύγια του στοιχείου, παρακάμπτοντάς το, με αποτέλεσμα να μην ψυχθεί. Έτσι, μετά την έξοδο από το στοιχείο δημιουργείται μια νέα ψυχομετρική κατάσταση (κατάσταση C) από τη μείξη της μάζας του αέρα που δεν πρόλαβε να ψυχθεί και της μάζας του ψυχόμενου αέρα που έχει κορεστεί περνώντας από το στοιχείο (μεταβολή A-B). Το ποσοστό της μάζας του αέρα που θεωρούμε ότι δεν έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του στοιχείου και περνά αμετάβλητο ορίζεται ως **συντελεστής παράκαμψης (By pass Factor)**. Η τιμή του συντελεστή παρακάμψης εξαρτάται από το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία της κλιματιστικής εγκατάστασης. Η αλλαγή των λειτουργικών χαρακτηριστικών της εγκατάστασης επιφέρει αλλαγή του συντελεστή παρακάμψης άλλοτε περισσότερο και άλλοτε λιγότερο. Έτσι, η αλλαγή του μεγέθους ή της επιφάνειας του στοιχείου, η αλλαγή της ταχύτητας ή του όγκου του αέρα επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το συντελεστή παρακάμψης, την απόδοση και τα ψυχομετρικά χαρακτηριστικά του αέρα του χώρου που κλιματίζουμε.

Το ποσό της θερμότητας $\dot{Q}_t$ που αφαιρείται από τον αέρα είναι αισθητό $\dot{Q}_s$ και λανθάνον $\dot{Q}_L$ και είναι:

- Το ποσό της αισθητής θερμότητας $\dot{Q}_s$ που αφαιρείται κατά τη μεταβολή A-C από τον αέρα.

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_a \cdot h_s = \dot{m}_a \cdot (h_{K'} - h_C) \quad (\text{kW})$$

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_a} \quad (\text{kg/s})$$

$$h_s = h_{K'} - h_C \quad (\text{kJ/kg}_{\xi,a})$$

- Το ποσό της λανθάνουσας θερμότητας $\dot{Q}_L$ που αφαιρείται κατά τη μεταβολή A-C από τον αέρα.

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_a \cdot h_L = \dot{m}_a \cdot (h_A - h_{K'}) \quad (\text{kW})$$

$$h_L = h_A - h_{K'} \quad (\text{kJ/kg}_{\xi,a})$$

- Το συνολικό ποσό της θερμότητας που αφαιρείται κατά τη μεταβολή A-C από τον αέρα.

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_s + \dot{Q}_L \quad \text{ή} \quad \dot{Q}_t = \dot{m}_a \cdot h_t = \dot{m}_a \cdot (h_A - h_C) \quad (\text{kW})$$

$$h_t = h_s + h_L = h_A - h_C \quad (\text{kJ/kg}_{\xi,a})$$

- Το αποβαλλόμενο ποσό νερού κατά τη μεταβολή A-C.

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a \cdot (w_A - w_C) \quad (\text{kg/s})$$

- Η συνολική θερμική ισχύς.

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_a \cdot [(h_A - h_B) - h_w \cdot (w_A - w_B)] \quad (\text{kg/s})$$

- Ο συντελεστής παράκαμψης B.P.F.

$$\text{B.P.F} = (h_C - h_B) / (h_A - h_B) \quad (\%)$$

όπου:

$\dot{m}_a$: παροχή μάζας αέρα πριν από την ψύξη, σημείο A (kg/s).

$\dot{m}_w$: αφαιρούμενη μάζα νερού μετά την ψύξη, σημείο B (kg/s).

h_w : ειδική ενθαλπία συμπυκνωμένων υδρατμών (kJ/kg).

w_A : ειδική υγρασία στο σημείο A.

w_B : ειδική υγρασία στο σημείο B.

h_A : ειδική ενθαλπία αέρα πριν από την ψύξη, σημείο A (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_B : ειδική ενθαλπία αέρα μετά την ψύξη, σημείο B (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_S : ειδική ενθαλπία αισθητής θερμότητας υγρού αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_L : ειδική ενθαλπία λανθάνουσας θερμότητας αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

h_t : συνολική ενθαλπία αέρα (kJ/kg_{ξ.α.}).

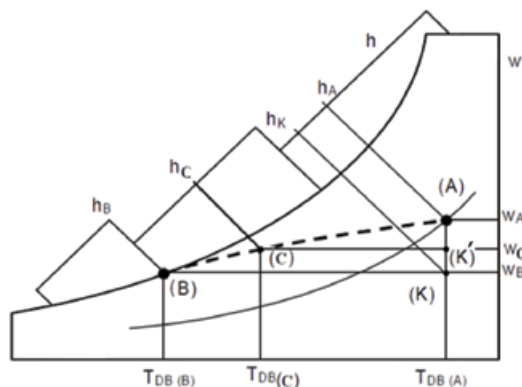
$\dot{V}_a$: παροχή όγκου αέρα πριν από την ψύξη, σε m³/s (m³/s διá 3600 = m³/h).

$\dot{V}_a$: ειδικός όγκος αέρα πριν από την ψύξη, σημείο A (m³/kg).

$\dot{Q}_t$: συνολική θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).

$\dot{Q}_S$: αισθητή θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).

$\dot{Q}_L$: λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW)

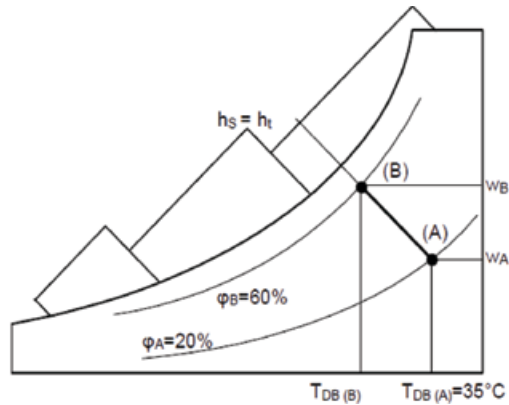


Σχήμα 10:

Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα που καταλήγει σε μη κορεσμένο αέρα

6.6 Αδιαβατική ψύξη υγρού αέρα

Η ψυχρομετρική αλλαγή της ψύξεως με σταθερή την ενθαλπία (h_t) λέγεται και αδιαβατική ψύξη, διότι δεν συμβαίνει καμία συναλλαγή θερμότητας. Η ψύξη του αέρα γίνεται μόνο με την προσθήκη υγρασίας στον αέρα, άρα με δαπάνη λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης. Η λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης της προστιθέμενης υγρασίας υπολογίζεται από το σταθερό ολικό ποσό της θερμότητας Q_t που υπάρχει στον αέρα. Έτσι, αφού το ολικό ποσό της θερμότητας που υπάρχει στον αέρα παραμένει σταθερό και προσθέτουμε λανθάνουσα θερμότητα Q_L , ελαττώνεται η αισθητή θερμότητα Q_S . Ελάττωση όμως της αισθητής θερμότητας σημαίνει και πτώση της θερμοκρασίας ξηρού βολβού. Άρα έχουμε και ψύξη του αέρα. Κατά την ψύξη με σταθερή την ενθαλπία η θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου παραμένει σταθερή.

**Σχήμα 11:**

Αδιαβατική ψύξη υγρού αέρα

6.7 Συντελεστής αισθητής θερμότητας (SHF)

Συντελεστής αισθητής θερμότητας ή αισθητού φορτίου είναι ο λόγος της αισθητής θερμότητας που προστέθηκε στον αέρα προς το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας (ενθαλπία) του αέρα αυτού.

$$SHF = \dot{Q}_s / (\dot{Q}_s + \dot{Q}_L) \quad \text{ή} \quad SHF = h_s / (h_s + h_L)$$

όπου:

h_s : ειδική ενθαλπία αισθητής θερμότητας υγρού αέρα ($\text{kJ/kg}_{\text{ξ.α.}}$).

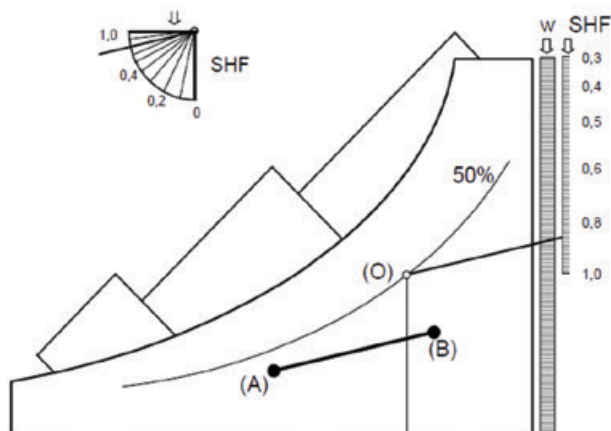
h_L : ειδική ενθαλπία λανθάνουσας θερμότητας αέρα ($\text{kJ/kg}_{\text{ξ.α.}}$).

$\dot{Q}_s$: αισθητή θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).

$\dot{Q}_L$: λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα μάζας (kW).

Γενικά ο SHF θα πρέπει να ξεπερνά το 50%. Ο SHF συναντάται στη λύση των προβλημάτων κλιματισμού, με άλλους δυο τεχνικούς όρους που είναι μεγάλης πρακτικής σημασίας:

- Ως συντελεστής αισθητού φορτίου του κλιματιζόμενου χώρου (RSHF).
- Ως συντελεστής αισθητού φορτίου κλιματιστικής εγκατάστασης (GSHF).



Σχήμα 12:
Συντελεστής SHF

6.8 Σύνοψη κεφαλαίου

Οι ψυχομετρικές μεταβολές είναι απαραίτητες για τη μελέτη, τη διαμόρφωση και τον έλεγχο των ιδιοτήτων του αέρα, προκειμένου να εξασφαλίζονται οι επιθυμητές συνθήκες υγιεινής και άνεσης στον κλιματισμό και διατήρησης τροφίμων στη βιομηχανική ψύξη, με όσο το δυνατόν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

Οι ψυχομετρικές μεταβολές είναι:

- Θέρμανση υγρού αέρα με σταθερή την υγρασία (αισθητή θέρμανση).
- Θέρμανση και ύγρανση υγρού αέρα.
- Ψύξη υγρού αέρα χωρίς αφύγρανση (με σταθερή ειδική υγρασία w).
- Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα.
- Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα που καταλήγει σε μη κορεσμένο αέρα.
- Αδιαβατική ψύξη υγρού αέρα (ψύξη με σταθερή την ενθαλπία ht).



6.9 ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Αντιστοίχισε τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τις ψυχομετρικές μεταβολές.

Αδιαβατική ψύξη υγρού αέρα. •	Κατά την ψύξη, η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται ενώ παρατηρείται στον ψυχομετρικό χάρτη αύξηση της σχετικής υγρασίας, με αποτέλεσμα κάποια στιγμή να φτάνει στο σημείο κορεσμού του. Πέφτοντας κάτω από τη θερμοκρασία κορεσμού του, δεν μπορεί να συκρατήσει την υγρασία στη μάζα του και την αποβάλλει με μορφή σταγόνων.
Θέρμανση και ύγρανση υγρού αέρα •	Κατά την ψύξη η ειδική υγρασία παραμένει σταθερή.
Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα που καταλήγει σε μη κορεσμένο αέρα •	Η ψύξη του αέρα γίνεται μόνο με την προσθήκη υγρασίας, άρα με δαπάνη λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης. Η ενθαλπία και η θερμοκρασία υγρού θερμομέτρου παραμένουν σταθερές.
Ψύξη υγρού αέρα χωρίς αφύγρανση •	Κατά τη θέρμανση του αέρα η σχετική υγρασία μειώνεται και απαιτείται η προσθήκη υγρασίας μετά το στοιχείο θέρμανσης, για άνετο και υγιεινό περιβάλλον.
Αισθητή θέρμανση •	Η θέρμανση του αέρα γίνεται με σταθερή την ειδική υγρασία, τη λανθάνουσα θερμότητα και τη θερμοκρασία υγροποίησης (σημείο δρόσου).
Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα •	Κατά την ψύξη του αέρα, μετά την έξοδο από το στοιχείο δημιουργείται μια νέα ψυχομετρική κατάσταση από τη μείξη της μάζας του αέρα που δεν πρόλαβε να ψυχθεί (B.P.F.) και της μάζας του ψυχόμενου αέρα που έχει κορεστεί περνώντας από το στοιχείο.

2. Σημείωσε με ν το σωστό

Ο συντελεστής αισθητής θερμότητας ή αισθητού φορτίου είναι:

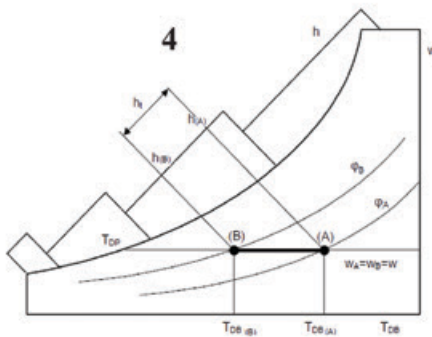
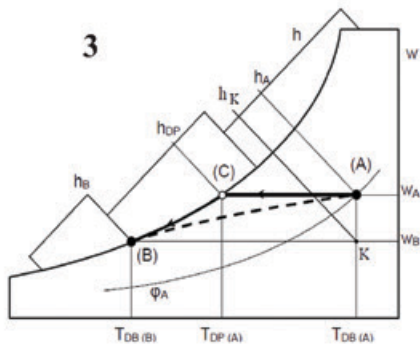
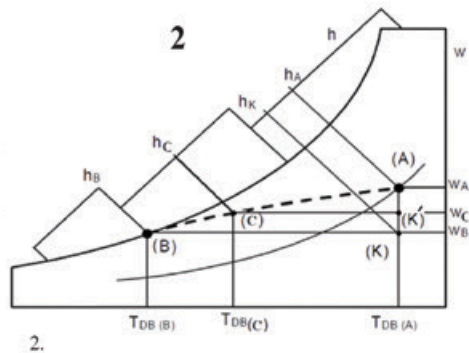
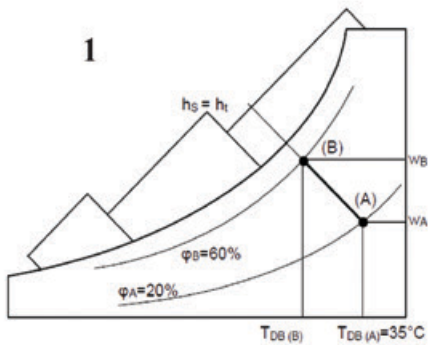
- Ο λόγος της αισθητής θερμότητας που προστέθηκε στον αέρα προς το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας (ενθαλπία) του αέρα αυτού.
- Ο λόγος της λανθάνουσας θερμότητας που προστέθηκε στον αέρα προς το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας (ενθαλπία) του αέρα αυτού.

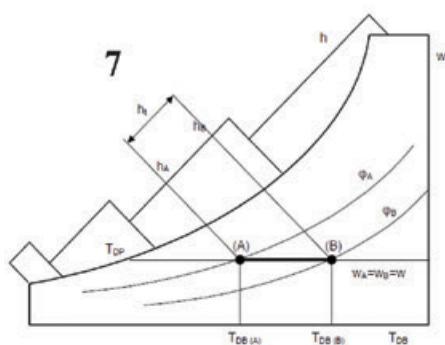
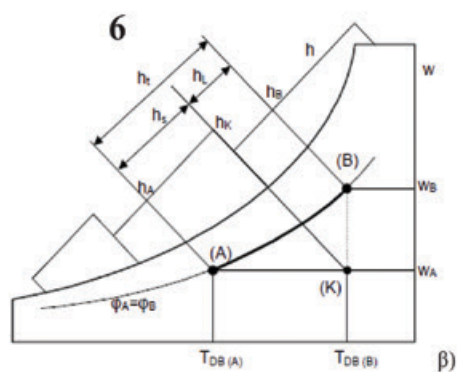
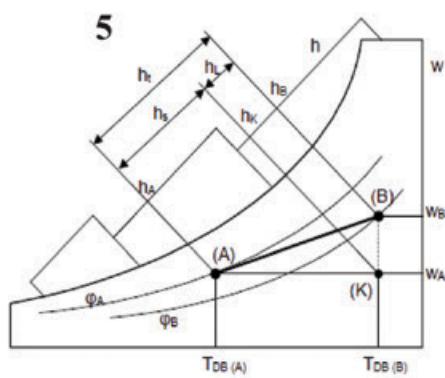
Ο συντελεστής παράκαμψης (By pass Factor) είναι:

- Το ποσοστό της μάζας του αέρα που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του στοιχείου και ψύχεται.
- Το ποσοστό της μάζας του αέρα που θεωρούμε ότι δεν έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του στοιχείου και περνά αμετάβλητο από αυτό.

3. Αντιστοίχισε τις ψυχομετρικές μεταβολές που απεικονίζονται στους παρακάτω ψυχομετρικούς χάρτες.

- | | |
|-----|--|
| 1 • | • Θέρμανση με υγρανση με μεταβολή της σχετικής υγρασίας. |
| 2 • | • Θέρμανση υγρού αέρα με σταθερή την ειδική υγρασία. |
| 3 • | • Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα που καταλήγει σε μη κορεσμένο αέρα. |
| 4 • | • Αδιαβατική ψύξη υγρού αέρα. |
| 5 • | • Ψύξη υγρού αέρα χωρίς αφύγρανση. |
| 6 • | • Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα. |
| 7 • | • Θέρμανση με υγρανση με διατήρηση της σχετικής υγρασίας. |





ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΑΕΡΑ ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΟΝ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΟ ΧΑΡΤΗ



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υπολογισμοί των ενεργειακών μεγεθών του αέρα κλιματισμού είναι στην ουσία υπολογισμοί της συναλλασσόμενης ποσότητας ενέργειας μεταξύ του αέρα και του συστήματος της ψυκτικής-κλιματιστικής εγκατάστασης, προκειμένου να αποκτήσει τις επιθυμητές ψυχομετρικές συνθήκες για τον κλιματισμό ενός χώρου.



ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι ο υπολογισμός των ενεργειακών μεγεθών του αέρα εγκατάστασης, έτσι ώστε να μπορείς να υπολογίζεις τα ποσά θερμότητας που απαιτούνται για τη διαμόρφωση των ψυχομετρικών μεγεθών του αέρα του χώρου που κλιματίζει.



ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΤΟΧΟΙ

Μετά τη μελέτη του κεφαλαίου, θα είσαι ικανός/ικανή:

1. Να σημειώνεις τα σημεία εισόδου Α και εξόδου Β του αέρα στον ψυχομετρικό χάρτη.
2. Να σημειώνεις τα ψυχομετρικά στοιχεία του αέρα στην είσοδο Α και στην έξοδο Β στον ψυχομετρικό χάρτη.
3. Να υπολογίζεις την παροχή μάζας του εισερχόμενου αέρα.
4. Να σημειώνεις το σημείο δρόσου T_{DP} του στοιχείου ψύξης.
5. Να υπολογίζεις την απορροφούμενη ή προστιθέμενη θερμική ισχύ της μεταβολής του αέρα.
6. Να υπολογίζεις το ποσό του νερού που συμπυκνώνεται και αποβάλλεται ή προστίθεται στον αέρα.
7. Να υπολογίζεις το συντελεστή παράκαμψης B.P.F.



ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ/ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

- Παροχή μάζας αέρα
- Θερμική ισχύς
- Σημείο δρόσου
- Συντελεστής παράκαμψης

7.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΨΥΞΗΣ ΑΕΡΑ ΜΕ ΑΦΥΓΡΑΝΣΗ ΣΕ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟ ΑΕΡΑ

Σε κλιματιστική συσκευή μετρήθηκαν:

Στην είσοδο Α: T_{DB} (ξηρού βολβού) = 26,7°C

$$T_{WB} \text{ (υγρού βολβού)} = 22,1^{\circ}\text{C}$$

Στην έξοδο Β: T_{DB} (ξηρού βολβού) = 13,3°C

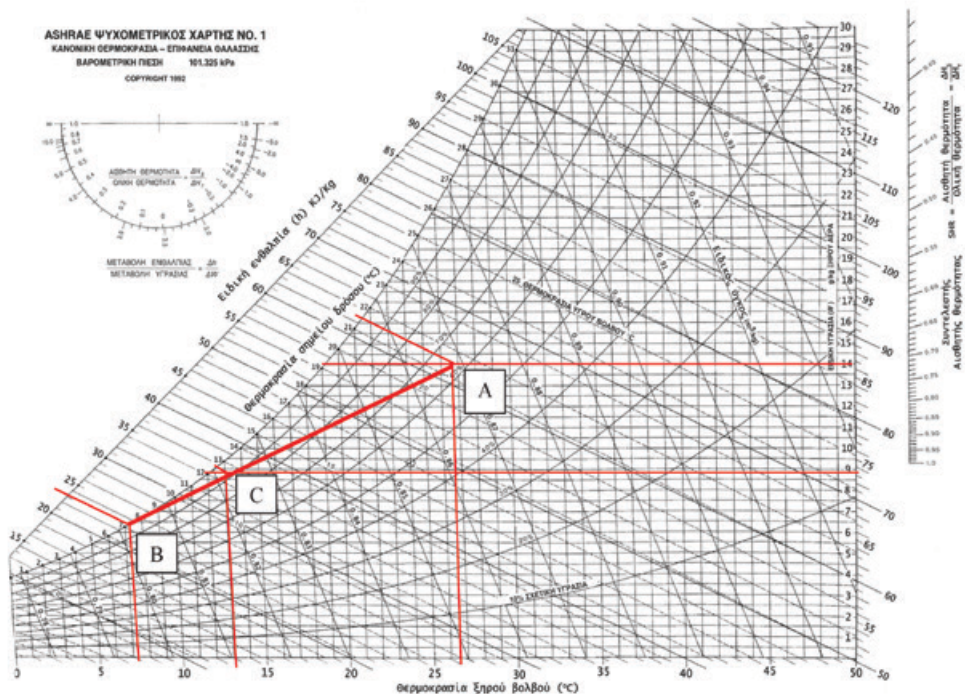
$$T_{WB} \text{ (υγρού βολβού)} = 12,8^{\circ}\text{C}$$

ταχύτητα αέρα $u = 4,5 \text{ m/sec}$

κυκλικός αγωγός ακτίνας $r = 0,12 \text{ m}$

Ζητούνται:

1. Τα σημεία εισόδου Α και εξόδου Β στον ψυχομετρικό χάρτη.
 2. Τα ψυχομετρικά στοιχεία στην είσοδο Α και στην έξοδο Β.
 3. Το σημείο δρόσου T_{dp} του στοιχείου ψύξης.
 4. Η παροχή μάζας του εισερχόμενου αέρα.
 5. Η απορροφούμενη θερμική ισχύς από τον αέρα.
 6. Το ποσό του νερού που συμπυκνώνεται και αποβάλλεται από τον αέρα.
 7. Ο συντελεστής παράκαμψης B.P.F.
- Τα σημεία εισόδου Α και εξόδου Β στον ψυχομετρικό χάρτη είναι:



- Τα ψυχομετρικά στοιχεία στην είσοδο Α και στην έξοδο Β είναι:

Αρχική κατάσταση Α	Τελική κατάσταση C
$T_{DB} = 26,7$	$T_{DB} = 13,3$
$T_{WB} = 22,1$	$T_{WB} = 12,8$
$\phi = 67\%$	$\phi = 93\%$
$w = 14,9 \text{ gr υδρ/kg ξηρ αέρ ή } 14,9/1000 = 0,0149 \text{ kg/kg}$	$w = 9 \text{ gr υδρ/kg ξηρ αέρ ή } 9/1000 = 0,009 \text{ kg/kg}$
$v = 0,869 \text{ m}^3/\text{kg}$	$v = 0,869 \text{ m}^3/\text{kg}$
$h = 65,3 \text{ kJ/kg}$	$h = 35,8 \text{ kJ/kg}$
	$u \text{ (ταχύτητα)} = 4,5 \text{ m/s}$

- Το σημείο δρόσου T_{DP} (σημείο Β) του στοιχείου ψύξης βρίσκεται με προέκταση της ευθείας Α-С έως την καμπύλη κορεσμού. Έτσι $T_{DP} = 7,22^\circ\text{C}$.
- Η παροχή μάζας του εισερχόμενου αέρα.

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_a} = \frac{0,20 \text{ m}^3/\text{sec}}{0,839 \text{ m}^3/\text{kg}} = \underline{\underline{0,23 \text{ kg/sec}}}$$

όπου $\dot{V}_a = u \cdot E = 4,5 \text{ m/s} \cdot 0,045 \text{ m}^2 = 0,20 \text{ m}^3/\text{sec}$ ή $0,20 \text{ m}^3 \cdot 3600 \text{ sec} = 720 \text{ m}^3/\text{h}$
 και $E = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 0,12 \text{ m}^2 = 3,14 \cdot 0,12 \text{ m} \cdot 0,12 \text{ m} = 0,045 \text{ m}^2$
 π = περίμετρος κύκλου (πάντα 3,14)

- Το συνολικό ποσό της θερμότητας (αποβαλλόμενη θερμική ισχύς) που αφαιρείται κατά τη μεταβολή Α-С από τον αέρα.

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_s + \dot{Q}_L \quad \dot{Q}_t = \dot{m}_a \cdot h_t = \dot{m}_a \cdot (h_a - h_c) = 0,23 \text{ kg/sec} \cdot (65,3 - 35,8) \text{ kJ/kg} = \underline{\underline{6,785 \text{ kW}}}$$

- Το αποβαλλόμενο ποσό νερού κατά τη μεταβολή Α-С.

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a \cdot (w_a - w_c) = 0,23 \cdot (0,0149 - 0,009) \text{ kg/kg} = \underline{\underline{0,001357 \text{ kg/sec}}}$$

- Ο συντελεστής παρόκαμψης B.P.F.

$$\text{B.P.F} = h_c - h_B = \frac{35,8 - 28,1}{h_A - h_B} = \frac{20,70}{65,3 - 28,1} = \underline{\underline{20,70 \%}}$$

7.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΑΕΡΑ ΜΕ ΥΓΡΑΝΣΗ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΗ ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

Σε κλιματιστική συσκευή μετρήθηκαν:

Στην είσοδο Α: T_{DB} (ξηρού βολβού) = 10°C

Στην έξοδο Β: T_{DB} (ξηρού βολβού) = 20°C

$\phi = 50\%$

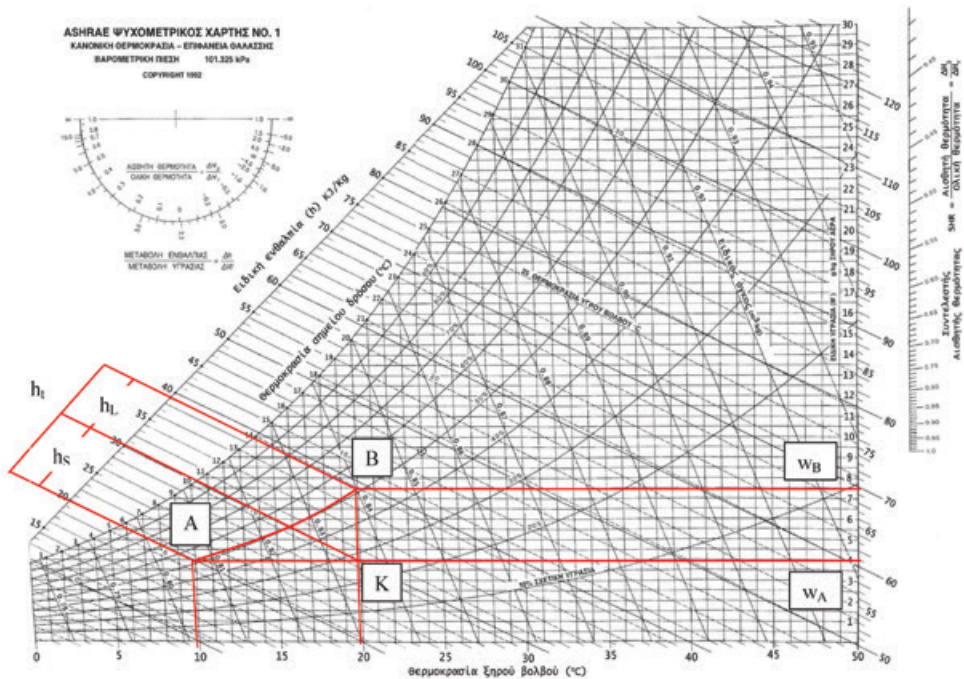
ταχύτητα αέρα $u = 4,5 \text{ m/sec}$

κυκλικός αγωγός ακτίνας $r = 0,12 \text{ m}$

Αν στη θέρμανση του αέρα γίνεται ταυτόχρονα και ύγρανση έτσι ώστε να παραμείνει σταθερή η σχετική υγρασία 50%, να υπολογιστούν:

- Τα σημεία εισόδου Α και εξόδου Β στον ψυχομετρικό χάρτη.

2. Το ποσό της υγρασίας που προστίθεται στον αέρα προκειμένου η σχετική υγρασία να παραμείνει σταθερή.
 3. Το ποσό της αισθητής θερμότητας που προστίθεται στον αέρα.
 4. Το ποσό της λανθάνουσας θερμότητας που προστίθεται στον αέρα.
 5. Το ποσό της ολικής θερμότητας που πρέπει να προστεθεί σε κάθε kg αέρα.
- Τα σημεία εισόδου A και εξόδου B στον ψυχομετρικό χάρτη.



- Τα ψυχομετρικά στοιχεία στην είσοδο A και στην έξοδο B είναι:

Αρχική κατάσταση A	Τελική κατάσταση B
$T_{DB} = 10$	$T_{DB} = 20$
$T_{WB} = 5,8$	$T_{WB} = 15$
$\phi = 50\%$	$\phi = 50\%$
$w = 3,8 \text{ gr υδρ/kg ξηρ. Αέρ. ή } 3,8/1000 = 0,0038 \text{ kg/kg}$	$w = 7,4 \text{ gr υδρ/kg ξηρ. αέρ ή } 7,4/1000 = 0,0074 \text{ kg/kg}$
$v = 0,807 \text{ m}^3/\text{kg}$	$v = 0,841 \text{ m}^3/\text{kg}$
$h = 20 \text{ kJ/kg}$	$h = 39 \text{ kJ/kg}$

- Το ποσό της υγρασίας που προστίθεται στον αέρα προκειμένου η σχετική υγρασία να παραμείνει σταθερή 50% είναι:

$$\Delta w = w_B - w_A = 0,0074 \text{ kg/kg} - 0,0038 \text{ kg/kg} = 0,0036 \text{ kg υδρ./ kg}_{\xi.α.}$$

- Τα ψυχομετρικά στοιχεία στην είσοδο Α και στην έξοδο Β είναι:

Αρχική κατάσταση Α	Τελική κατάσταση Β
$T_{DB} = 20$	$T_{DB} = 26.5$
$T_{WB} = 13.5$	$T_{WB} = 20$
$\phi = 48 \%$	$\phi = 53\%$
$w = 7 \text{ gr/kg ή } 7/1000 = 0,007 \text{ kg/kg}$	$w = 12 \text{ gr/kg ή } 12/1000 = 0,012 \text{ kg/kg}$
$v = 0,839 \text{ m}^3/\text{kg}$	$v = 0,864 \text{ m}^3/\text{kg}$
$h = 38 \text{ kJ/kg}$	$h = 57,5 \text{ kJ/kg}$
	$u \text{ (ταχύτητα)} = 4,5 \text{ m/s}$

- Η παροχή μάζας είναι:

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_a} = \frac{0,45 \text{ m}^3/\text{sec}}{0,839 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0,536 \text{ kg/sec}$$

$$\text{όπου } \dot{V} = u \cdot E = 4,5 \text{ m/s} \cdot 0,1 \text{ m}^2 = 0,45 \text{ m}^3/\text{sec} \text{ ή } 0,45 \text{ m}^3 \cdot 3600 \text{ sec} = 1620 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{και } E = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 0,18 \text{ m}^2 = 3,14 \cdot 0,18 \text{ m} \cdot 0,18 \text{ m} = 0,1 \text{ m}^2$$

π = περίμετρος κύκλου (πάντα 3,14)

Το συνολικό ποσό θερμότητας που δίνεται στον αέρα ή η ισχύς του μηχανήματος θέρμανσης είναι:

$$\dot{Q}_t = \dot{m} \cdot (h_B - h_A) = 0,536 \text{ kg/sec} \cdot 19,5 \text{ kJ/kg} = 10,45 \text{ kJ/sec} = 10,45 \text{ kW}$$

7.4 ΣΥΝΟΨΗ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Γνωρίζοντας τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του αέρα από το στοιχείο κλιματισμού, βρίσκουμε πάνω στον ψυχομετρικό χάρτη και τα υπόλοιπα ψυχομετρικά μεγέθη της μεταβολής, όπως σχετική υγρασία ϕ , ειδική υγρασία h , ειδικό όγκο v , σημείο δρόσου T_{DP} , ενθαλπία h . Στη συνέχεια υπολογίζουμε αναλόγως, με ή χωρίς την παροχή μάζας του αέρα, το ποσό της αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας που προστίθεται ή αφαιρείται από τον αέρα, το ποσό των υδρατμών που προστίθενται ή αφαιρούνται από τον αέρα, το συντελεστή αισθητής θερμότητας SHF και γενικότερα την ενεργειακή και ψυχομετρική συμπεριφορά του αέρα της εγκατάστασης που μετρήσαμε ή της εγκατάστασης που σχεδιάζουμε προκειμένου να έχουμε τις επιθυμητές συνθήκες του χώρου που κλιματίζουμε.

7.5 ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Άσκηση 1. Σε κλιματιστική συσκευή μετρήθηκαν:

Στην είσοδο A: T_{DB} (ξηρού βολβού) = 32°C

T_{WB} (υγρού βολβού) = $23,7^{\circ}\text{C}$

Στην έξοδο B: T_{DB} (ξηρού βολβού) = 20°C

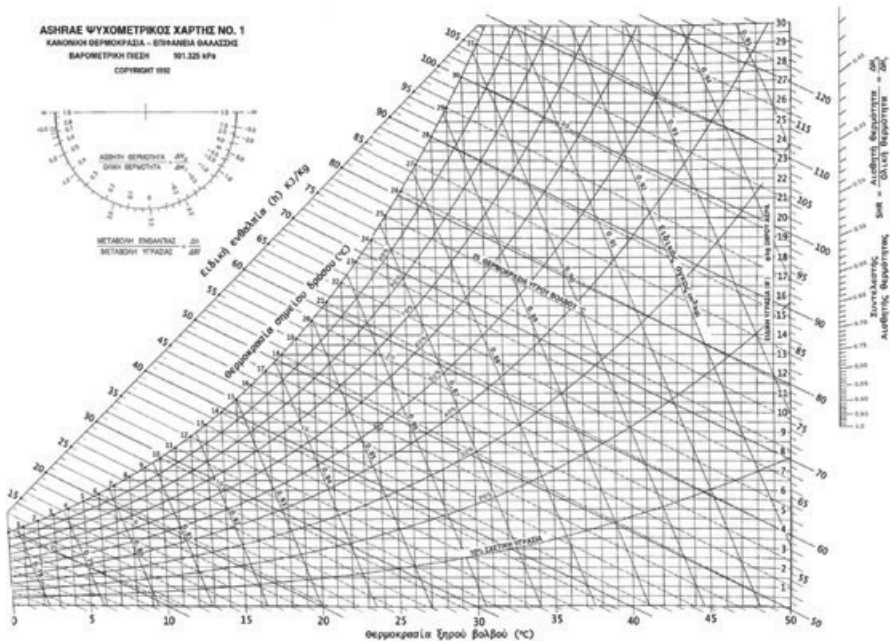
T_{WB} (υγρού βολβού) = 14°C

ταχύτητα αέρα $u = 6\text{ m/sec}$

κυκλικός αγωγός ακτίνας $r = 0,5\text{ m}$

Ζητούνται:

1. Τα σημεία εισόδου A και εξόδου B στον ψυχομετρικό χάρτη.
2. Τα ψυχομετρικά στοιχεία στην είσοδο A και στην έξοδο B.
3. Η παροχή μάζας του εισερχόμενου αέρα.
4. Η απορροφούμενη θερμική ισχύς από τον αέρα.
5. Το ποσό του νερού που συμπυκνώνεται και αποβάλλεται από τον αέρα.





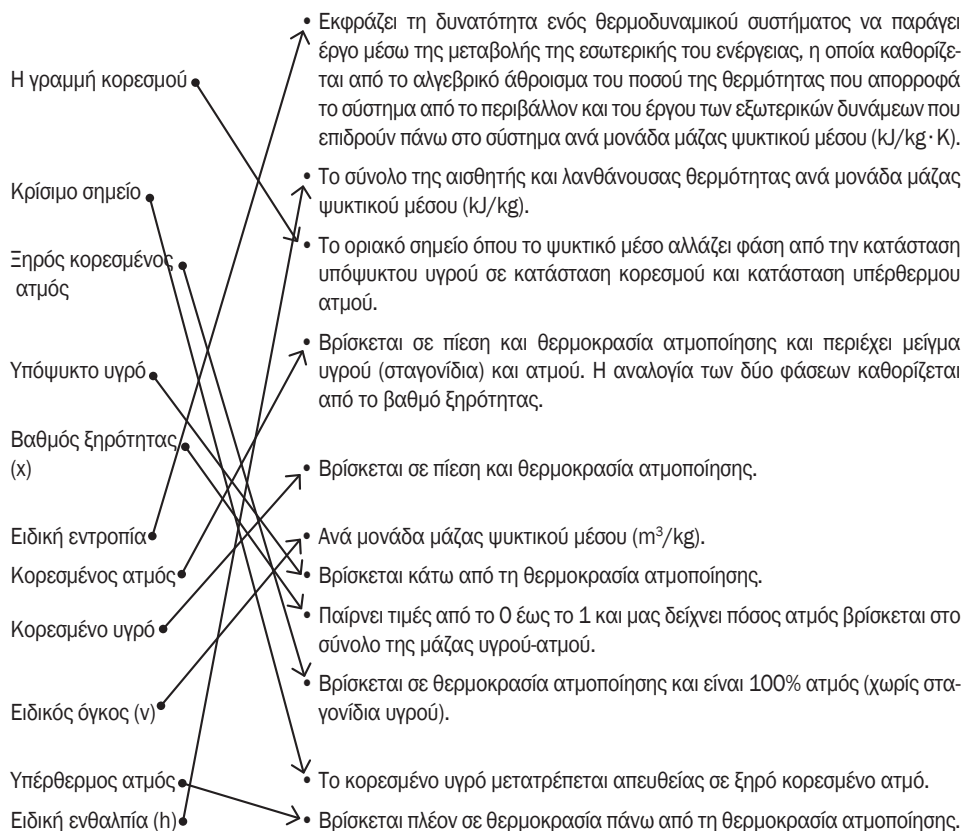
1. Σπυρίδων Αθ. Καλοζούμης, Μηχ/γος ΕΜΠ, Διπλωματική Εργασία με τίτλο: ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΨΥΚΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΨΥΚΤΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ R-134, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2011.
2. Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας, ΘΕΡΜΑΝΗΣ-ΨΥΞΗ-ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ II, ΨΥΞΗ, ΤΕΙ Κρήτης.
3. Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας, ΘΕΡΜΑΝΗΣ-ΨΥΞΗ-ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ II, ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΑ, ΤΕΙ Κρήτης.
4. Ευάγγελος Αν. Αναγνώστου, Τεχνικός Ψυκτικός, ΚΥΚΛΟΣ ΨΥΞΗΣ ΣΤΟ ΕΝΘΑΛΠΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ, Αθήνα 1999.
5. Ευάγγελος Αν. Αναγνώστου, Τεχνικός Ψυκτικός, ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΑ, ΣΩΜΑΤΕΙΟ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΩΝ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ, Αθήνα 2000.
6. Κατάρτιση Ενεργειακών Επιθεωρητών, Εκπαιδευτικό Υλικό, Θεματική Ενότητα: ΨΕ2, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΨΥΞΗΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΤΙΡΙΩΝ, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, Ιούνιος 2011.
7. Μηνάς Ιατρίδης, Ενεργειακός Μηχανικός MSc, ΟΔΗΓΟΣ ΨΥΞΗΣ, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Αθήνα, Ιούλιος 1996.



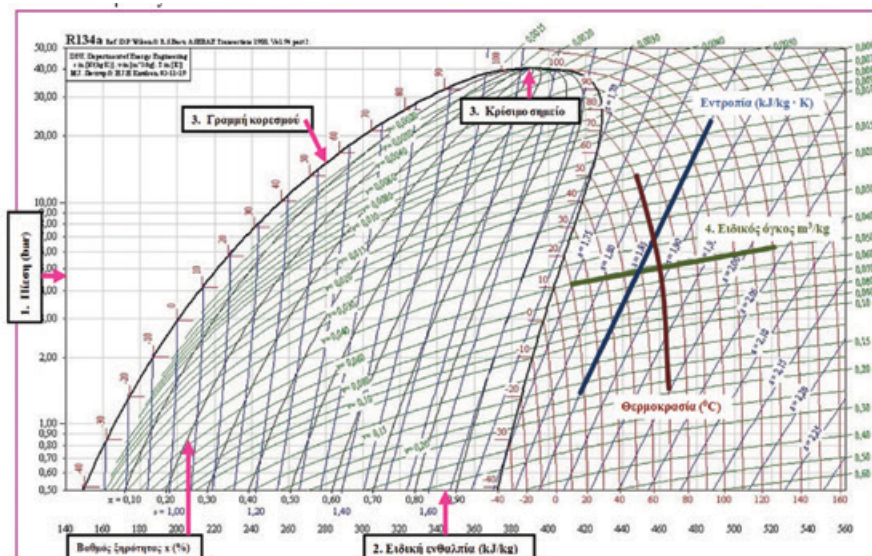
ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1

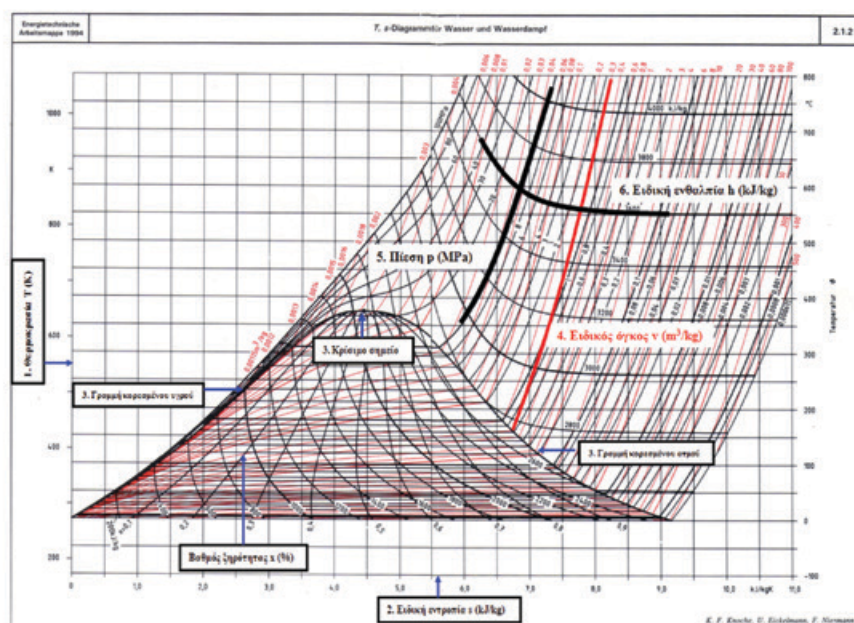
1. Αντιστοίχισε τις προτάσεις που ταιριάζουν στα παρακάτω τα θερμοδυναμικά μεγέθη.



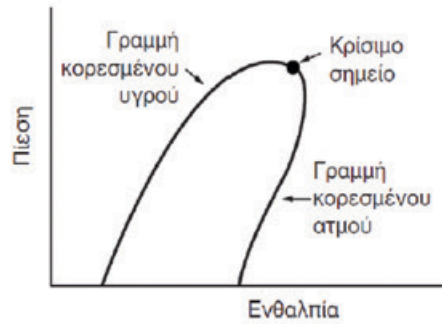
2. Σημείωσε πάνω στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) τα θερμοδυναμικά μεγέθη που απεικονίζουν οι κλίμακές του.



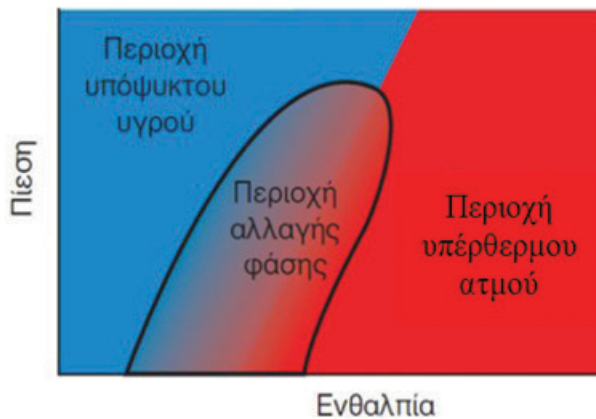
3. Σημείωσε πάνω στο διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s) τα θερμοδυναμικά μεγέθη που απεικονίζουν οι κλίμακές του.



4. Σημείωσε πάνω στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) τα οριακά σημεία της καμπύλης στα οποία το ψυκτικό μέσο λαμβάνει χώρα ανάλογα με την κατάσταση του (γραμμή κορεσμένου υγρού, κρίσιμο σημείο, γραμμή κορεσμένου ατμού).



5. Σημείωσε πάνω στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) τις περιοχές στις οποίες το ψυκτικό μέσο λαμβάνει χώρα ανάλογα με την κατάστασή του (περιοχή υπόψυκτου υγρού, περιοχή κορεσμού, περιοχή υπέρθερμου ατμού).



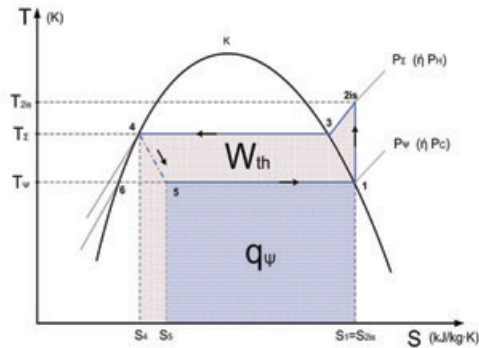


ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2

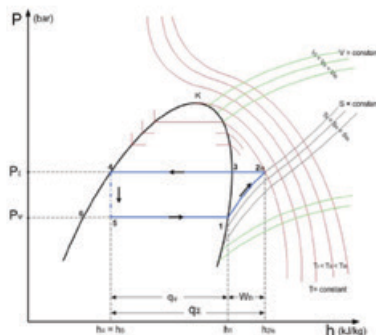
1. Αντιστοίχισε τα εμβλαδά που απεικονίζουν τις ανηγμένες ανά kg ψυκτικού μέσου συναλλασσόμενες ποσότητες ενέργειας kJ μεταξύ συστήματος (κυκλοφορούμενου ψυκτικού μέσου) και περιβάλλοντος στο διάγραμμα θερμοκρασίας εντροπίας (T-s).

- | | |
|---------------------|---|
| 1-2 _{is} | • Ισόθλιπτη και ταυτόχρονα ισοθερμοκρασιακή ατμοποίηση. |
| 2 _{is} - 4 | • Θεωρητικά αδιαβατικά αναστρέψιμη συμπίεση. |
| 4-5 | • Διαβατικός στραγγαλισμός πίεσεως (εκτόνωση). |
| 5-1 | • Ισόθλιπτη αποβολή θερμότητας (συμπύκνωση). |



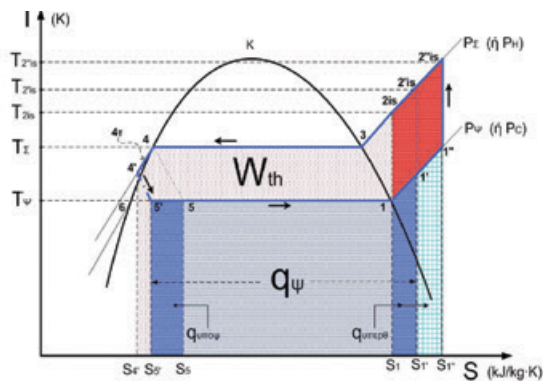
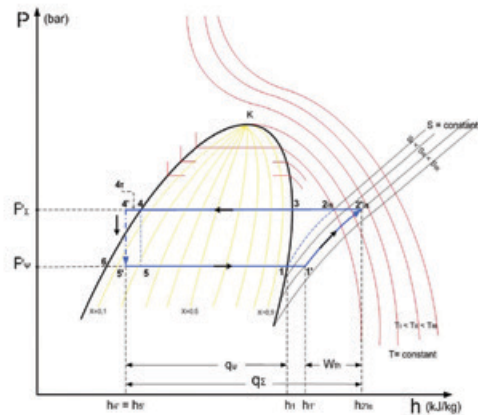
2. Αντιστοίχισε τις θερμοδυναμικές μεταβολές του θεωρητικού κύκλου ψύξης στο διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h).

- | | |
|---------------------|---|
| 1-2 _{is} | • Ισόθλιπτη και ταυτόχρονα ισοθερμοκρασιακή ατμοποίηση. |
| 2 _{is} - 4 | • Θεωρητικά αδιαβατικά αναστρέψιμη συμπίεση. |
| 4-5 | • Διαβατικός στραγγαλισμός πίεσεως (εκτόνωση). |
| 5-1 | • Ισόθλιπτη αποβολή θερμότητας (συμπύκνωση). |

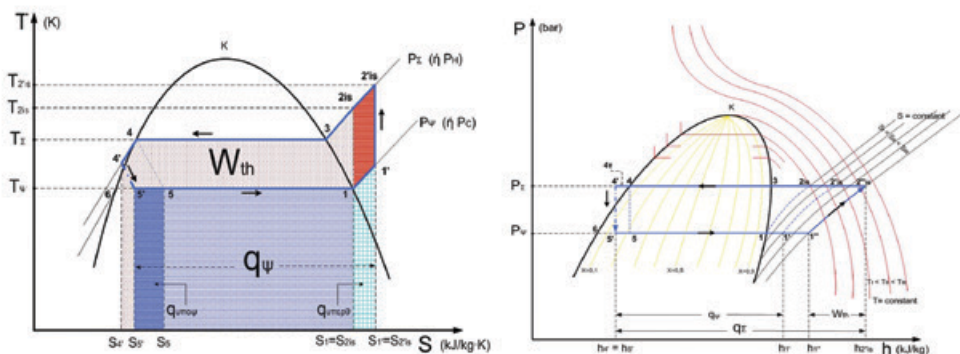


3. Σημείωσε με ν το σωστό στο καθένα από τα παρακάτω διαγράμματα θερμοκρασίας-ειδικής εντροπίας (T-s) και πίεσης-ενθαλπίας (P-h).

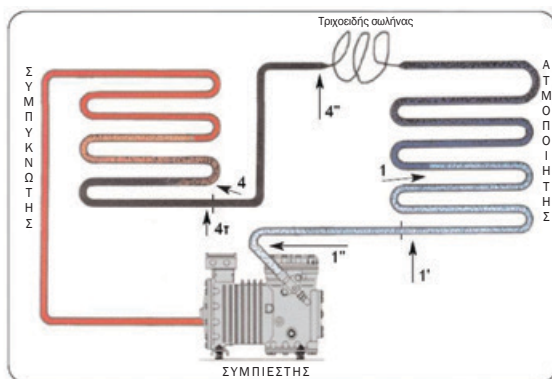
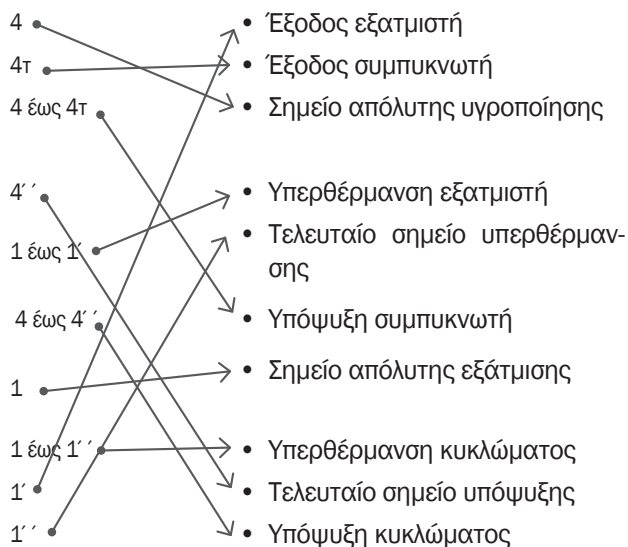
- Η υπερθέρμανση ξεκινά από και μέχρι τον ατμοποιητή και έπειτα από αυτόν μέχρι και το συμπιεστή. ☐
- Η υπερθέρμανση ξεκινά από τον ατμοποιητή μέχρι και το συμπιεστή. ☒
- Η υπερθέρμανση ξεκινά από και μέχρι τον ατμοποιητή και έπειτα από αυτόν μέχρι και το συμπιεστή. ☒
- Η υπερθέρμανση ξεκινά από τον ατμοποιητή μέχρι και το συμπιεστή. ☐



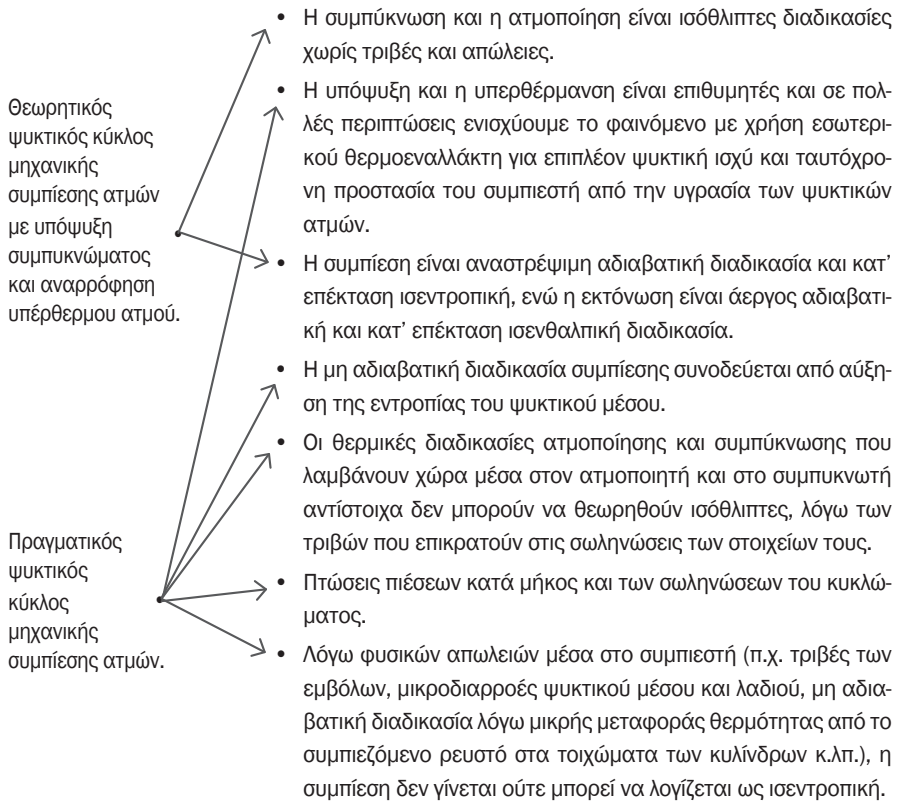
- Η υπερθέρμανση ξεκινά από και μέχρι τον ατμοποιητή και έπειτα από αυτόν μέχρι και το συμπιεστή. ☐
- Η υπερθέρμανση ξεκινά από τον ατμοποιητή μέχρι και το συμπιεστή. ☒
- Η υπερθέρμανση ξεκινά από και μέχρι τον ατμοποιητή και έπειτα από αυτόν μέχρι και το συμπιεστή. ☒
- Η υπερθέρμανση ξεκινά από τον ατμοποιητή μέχρι και το συμπιεστή. ☐



4. Αντιστοίχισε τις μεταβολές του ψυκτικού μέσου με τα αριθμημένα σημεία της ψυκτικής διάταξης του παρακάτω σχήματος.



5. Αντιστοίχισε τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τον θεωρητικό και τον πραγματικό κύκλο ψύξης.



6. Αντιστοίχισε τις θερμοδυναμικές μεταβολές με τους τρεις κύκλους ψύξης.

Βασικός
θεωρητικός
ψυκτικός
κύκλος
μηχανικής
συμπίεσης
ατμών.

Πραγματικός
ψυκτικός
κύκλος
μηχανικής
συμπίεσης
ατμών.

1. Είσοδος συμπιεστή: **Υπέρθερμος ατμός.**
2. Έξοδος συμπιεστή: **Ξηρός υπέρθερμος ατμός. Αύξηση της εντροπίας.**
3. Είσοδος συμπυκνωτή: **Ξηρός υπέρθερμος ατμός.**
4. Αρχή συμπύκνωσης: **Ξηρός κορεσμένος ατμός.**
5. Τέλος συμπύκνωσης: **Κεκορεσμένο υγρό.**
6. Έξοδος συμπυκνωτή: **Υπόψυκτο υγρό.**
7. Σωληνωτό τμήμα μεταξύ συμπυκνωτή και στραγγαλιστικής διάταξης: **Ακόμα πιο υπόψυκτο υγρό.**
8. Είσοδος στραγγαλιστικής διάταξης: **Υπόψυκτο υγρό.**
9. Έξοδος στραγγαλιστικής διάταξης: **Κορεσμένο υγρό (υγρό ατμός).**
10. Είσοδος ατμοποιητή: **Κορεσμένο υγρό.**
11. Αρχή ατμοποίησης: **Κορεσμένο υγρό.**
12. Τέλος ατμοποίησης: **Ξηρός κορεσμένος ατμός.**
13. Έξοδος ατμοποιητή: **Υπέρθερμος ατμός (ωφέλιμη υπερθέρμανση).**
14. Σωληνωτό τμήμα μεταξύ ατμοποιητή και συμπιεστή: **Ακόμα πιο υπέρθερμος ατμός (περιττή υπερθέρμανση).**
1. Είσοδος συμπιεστή: **Υπέρθερμος ατμός. Αδιαβατική αναστρέψιμη συμπίεση.**
2. Έξοδος συμπιεστή: **Ξηρός υπέρθερμος ατμός. Αδιαβατική αναστρέψιμη συμπίεση. Πίεση ίση με την πίεση συμπύκνωσης και εντροπία ίδια με την είσοδο στο συμπιεστή.**
3. Είσοδος συμπυκνωτή: **Ξηρός υπέρθερμος ατμός, πίεση και εντροπία ίδιες με την είσοδο στο συμπιεστή.**
4. Αρχή συμπύκνωσης: **Ξηρός κορεσμένος ατμός.**
5. Τέλος συμπύκνωσης: **Κεκορεσμένο υγρό.**
6. Έξοδος συμπυκνωτή: **Υπόψυκτο υγρό. Πίεση ίδια με πίεση στην είσοδο του συμπυκνωτή.**
7. Έξοδος συμπυκνωτή: **Υπόψυκτο υγρό. Πίεση ίδια με πίεση στην είσοδο του συμπυκνωτή.**
8. Είσοδος στραγγαλιστικής διάταξης: **Υπόψυκτο υγρό.**
9. Έξοδος στραγγαλιστικής διάταξης: **Κορεσμένο υγρό (υγρό ατμός). Ενθαλπία ίδια με την είσοδο στη στραγγαλιστική διάταξη, αδιαβατικός στραγγαλισμός.**
10. Είσοδος ατμοποιητή: **Κορεσμένο υγρό.**
11. Αρχή ατμοποίησης: **Κορεσμένο υγρό.**
12. Τέλος ατμοποίησης: **Ξηρός κορεσμένος ατμός.**
13. Έξοδος ατμοποιητή: **Υπέρθερμος ατμός (ωφέλιμη υπερθέρμανση). Πίεση ίση με την πίεση στην είσοδο του ατμοποιητή.**

Θεωρητικός
ψυκτικός κύκλος
μηχανικής
συμπίεσης ατμών
με υπόψυξη
συμπυκνώματος
και αναρρόφηση
υπέρθερμου ατμού.

1. Είσοδος συμπίεστή: Ξηρός κορεσμένος ατμός.
2. Έξοδος συμπίεστή: Ξηρός υπέρθερμος ατμός. Αδιαβατική αναστρέψιμη συμπίεση. Πίεση ίση με την πίεση συμπύκνωσης και εντροπία ίδια με την είσοδο στο συμπίεστή.
3. Είσοδος συμπυκνωτή: Ξηρός υπέρθερμος ατμός και εντροπία ίδια με την είσοδο στο συμπίεστή.
4. Έξοδος συμπυκνωτή: Κορεσμένο υγρό. Πίεση ίση με την πίεση στην είσοδο του συμπυκνωτή.
5. Είσοδος στραγγαλιστικής διάταξης: Κορεσμένο υγρό.
6. Έξοδος στραγγαλιστικής διάταξης: Διφασικό μείγμα (υγρό ατμός). Ενθαλπία ίδια με την είσοδο στη στραγγαλιστική διάταξη, αδιαβατικός στραγγαλισμός.
7. Είσοδος ατμοποιητή: Διφασικό μείγμα.
8. Έξοδος ατμοποιητή: Ξηρός κορεσμένος ατμός. Πίεση ίση με την πίεση στην είσοδο του ατμοποιητή.

7. Σημείωσε με ν το σωστό στις παρακάτω ερωτήσεις:

1. Η υπόψυξη ή η υπερθέρμανση μας βεβαιώνει για την πλήρη εξάτμιση του ψυκτικού χωρίς επικίνδυνες σταγόνες πριν από την είσοδο στο συμπίεστή;

ΥΠΟΨΥΞΗ ☐

ΥΠΕΡΘΕΡΜΑΝΣΗ ☒

2. Αν η διαδικασία της υπερθέρμανσης συμβαίνει μόνο μέσα στον ατμοποιητή (δεν ισχύει στην πράξη), τότε η υπερθέρμανση χαρακτηρίζεται ωφέλιμη ή μη ωφέλιμη;

ΩΦΕΛΙΜΗ ☒

ΜΗ ΩΦΕΛΙΜΗ ☐

3. Αν η διαδικασία της υπερθέρμανσης (θεωρητικά) συμβαίνει μόνο μέσα στον ατμοποιητή, τότε η επιπλέον θερμότητα υπερθέρμανσης προστίθεται ή όχι σαν ψυκτικό κέρδος;

ΠΡΟΣΤΙΘΕΤΑΙ ΨΥΚΤΙΚΟ ΚΕΡΔΟΣ ☒ **ΔΕΝ ΠΡΟΣΤΙΘΕΤΑΙ ΨΥΚΤΙΚΟ ΚΕΡΔΟΣ** ☐

4. Αν η διαδικασία της υπερθέρμανσης (θεωρητικά) συμβαίνει μόνο μέσα στον ατμοποιητή και η υπόψυξη πραγματοποιείται (θεωρητικά) μόνο μέσα στο συμπυκνωτή, τότε αυξάνεται ή μειώνεται η ψυκτική ισχύς;

ΑΥΞΑΝΕΤΑΙ ☒

ΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ☐

5. Στην πράξη η διαδικασία της υπερθέρμανσης συμβαίνει εντός του σωληνωτού αγωγού που συνδέει το στοιχείο ατμοποίησης με το συμπίεστή. Η υπερθέρμανση αυτή είναι ωφέλιμη ή όχι στην παραγωγή ωφέλιμης ψύξης;

ΩΦΕΛΙΜΗ ☐

ΜΗ ΩΦΕΛΙΜΗ ☒

6. Όσο μεγαλύτερη είναι η υπερθέρμανση του ψυκτικού μέσου κατά την είσοδό του στο συμπίεστή, ο ογκομετρικός βαθμός (η ποσότητα συμπιεσμένων ατμών) του ψυκτικού μέσου στο συμπίεστή μικραίνει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή τη μείωση του τεχνικού έργου (κατανάλωση ρεύματος συμπίεσης) που προστίθεται σε κάθε kg ψυκτικού μέσου που συμπιέζεται;

ΑΥΞΗΣΗ ☒

ΜΕΙΩΣΗ ☐

7. Σε αρκετές περιπτώσεις πραγματικών ψυκτικών κύκλων, λόγω υπόψυξης και υπερθέρμανσης, έχουμε μεγαλύτερη ψυκτική ισχύ σε σχέση με τους αντίστοιχους βασικούς θεωρητικούς κύκλους. Ενώ θα περιμέναμε αύξηση του COP λόγω αύξησης της ψυκτικής ισχύος, αντιθέτως ο COP εμφανίζεται μειωμένος σε σχέση με τους θεωρητικούς κύκλους. Η μείωση του COP του πραγματικού κύκλου σε σχέση με τον θεωρητικό οφείλεται ή όχι στην αύξηση του τεχνικού έργου συμπίεσης που συμβαίνει λόγω της υπερθέρμανσης στον πραγματικό κύκλο;

ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ☒

ΟΦΕΙΛΕΤΑΙ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ☐

8. Παρατηρούμε αύξηση ή μείωση στον COP πραγματικού κύκλου ψύξης εγκατάστασης όταν αυξήσουμε μόνο την ψυκτική ισχύ αυξάνοντας την υπερθέρμανση;

ΑΥΞΗΣΗ ☐

ΜΕΙΩΣΗ ☒

9. Η υπερθέρμανση του ψυκτικού μέσου στην είσοδο του συμπιεστή στον πραγματικό κύκλο έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη ογκομετρική του είσοδο στο συμπιεστή (μικρότερη ποσότητα συμπιεσμένων ατμών) σε σχέση με τον θεωρητικό κύκλο, λόγω αυξήσεως του ειδικού όγκου του ατμού καθώς αυτός υπερθερμαίνεται. Με αυτή την κατάσταση και σε σύγκριση με τον θεωρητικό κύκλο, έχουμε αύξηση ή μείωση τεχνικού έργου που προστίθεται σε κάθε κιλό (kg) ψυκτικού μέσου που συμπιέζεται στον πραγματικό κύκλο; Έχουμε αύξηση ή μείωση του COP;

ΑΥΞΗΣΗ ☐

ΜΕΙΩΣΗ ☒

10. Για την αύξηση της ψυκτικής ισχύς μιας εγκατάστασης, φροντίζουμε την αύξηση ή τη μείωση της υπερθέρμανσης και της υπόψυξης;

ΑΥΞΗΣΗ ☒

ΜΕΙΩΣΗ ☐

11. Η πρόωρη ατμοποίηση μέρους του ψυκτικού μέσου εντός της εκτονωτικής βαλβίδας λόγω της θερμοκρασίας του κορεσμένου υγρού δεν είναι καθόλου επιθυμητή διότι μας μειώνει την ψυκτική ισχύ. Η αύξηση ή η μείωση της υπόψυξης ελαττώνει το ανεπιθύμητο αυτό φαινόμενο;

ΑΥΞΗΣΗ ☒

ΜΕΙΩΣΗ ☐

12. Είναι προς όφελος της ψυκτικής εγκατάστασης ή όχι να υπάρχει στο τέλος του στραγγαλισμού και στο μείγμα υγρού-ατμού μεγάλο ποσοστό υγρού ψυκτικού μέσου, να βρισκόμαστε δηλαδή όσο το δυνατόν κοντύτερα στην αριστερή καμπύλη κεκορεσμένου υγρού και σε καταστάσεις μικρού βαθμού ξηρότητας ή όχι;

ΩΦΕΛΙΜΟ ☐

ΜΗ ΩΦΕΛΙΜΟ ☒

13. Όσο αριστερότερα στην υπόψυκτη περιοχή ξεκινά ο στραγγαλισμός (εκτόνωση) του ψυκτικού μέσου, οι ανεπιθύμητες φυσαλίδες ατμού μέσα στην εκτονωτική βαλβίδα μειώνονται ή αυξάνονται;

ΑΥΞΑΝΟΝΤΑΙ ☐

ΜΕΙΩΝΟΝΤΑΙ ☒

14. Όσο αριστερότερα βρισκόμαστε στη διφασική περιοχή κατά την έξοδο του ψυκτικού μέσου από την εκτονωτική βαλβίδα αυξάνεται ή μειώνεται η ψυκτική ισχύς μιας εγκατάστασης;

ΑΥΞΑΝΕΤΑΙ ☒

ΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ☐

15. Η αύξηση της υπόψυξης αυξάνει ή μειώνει την ψυκτική ισχύ της εγκατάστασης;

ΑΥΞΑΝΕΙ ☒

ΜΕΙΩΝΕΙ ☐

16. Όταν η υπόψυξη πραγματοποιείται από το περιβάλλον (χωρίς τη βοήθεια κάποιου επιπλέον εναλλάκτη) και μόνο μέσα στο συμπυκνωτή, τότε έχουμε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγόμενης ψύξης και κατ' επέκταση του COP, χωρίς να απαιτείται αύξηση της προσδιδόμενης εξωτερικά μηχανικής ενέργειας ή όχι;

ΑΥΞΗΣΗ ☒

ΜΕΙΩΣΗ ☐

17. Όσο χαμηλότερη θερμοκρασία ατμοποίησης έχουμε, τόσο χαμηλότερη είναι και η πίεση. Το μηχανικό έργο συμπίεσης θα είναι περισσότερο ή λιγότερο όσο πέφτει η θερμοκρασία ατμοποίησης;

ΛΙΓΟΤΕΡΟ ☐

ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΟ ☒

18. Όσο περισσότερο απέχουν οι θερμοκρασίες ή οι πιέσεις ατμοποίησης και συμπύκνωσης το μηχανικό έργο συμπίεσης (άρα και κατανάλωση ενέργειας) μεγαλώνει ή μικραίνει;

ΜΙΚΡΑΙΝΕΙ ☐

ΜΕΓΑΛΩΝΕΙ ☒



ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

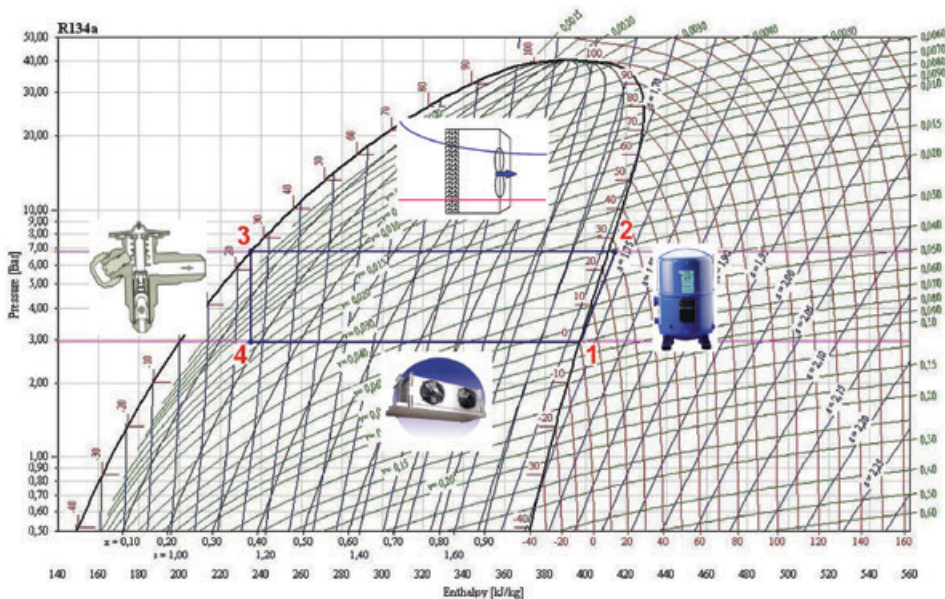
ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3

Άσκηση 1. Ψυκτική εγκατάσταση λειτουργεί με ψυκτικό R134a σε κατάσταση κορεσμού με θερμοκρασία συμπύκνωσης 25°C και θερμοκρασία εξάτμισης 0°C . Ζητείται η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) και η εύρεση των θερμοδυναμικών μεγεθών.

Βήμα 1. Βρίσκουμε τις πιέσεις που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες εξάτμισης και συμπύκνωσης για R134a, από τον πίνακα.

Temperature	Pressure	Temperature	Pressure
-7	2.2548	21	5.8959
-6	2.3428	22	6.0789
-5	2.4334	23	6.2662
-4	2.5268	24	6.4578
-3	2.6228	25	6.6538
-2	2.7217	26	6.8543
-1	2.8234	27	7.0592
0	2.928	28	7.2688
1	3.0366	29	7.483
2	3.1482	30	7.702
3	3.2598	31	7.9257
4	3.3766	32	8.1543
5	3.4966	33	8.3878
6	3.6198		
7	3.7463		

Βήμα 2. Βρίσκουμε τα σημεία πίεσης για θερμοκρασία εξάτμισης $0^{\circ}\text{C} = 2.92 \text{ bar}$ και θερμοκρασία συμπύκνωσης $25^{\circ}\text{C} = 6.65 \text{ bar}$ στον άξονα της πίεσης του διαγράμματος P-h, χαράσσουμε τις γραμμές και σημειώνουμε το σημείο 1 εκεί όπου ενώνεται η γραμμή της πίεσης εξάτμισης με τη γραμμή ξηρού κορεσμένου ατμού θερμοκρασίας 0°C της καμπάνας πάνω στο διάγραμμα.



Βήμα 3. Βρίσκουμε το σημείο 2 χαράσσοντας από το σημείο 1 γραμμή παράλληλη στον άξονα της εντροπίας του διαγράμματος P-h, μέχρι το σημείο όπου ενώνεται με τη γραμμή της πίεσης συμπίκνωσης. Στη συνέχεια το σημείο 3. Το σημείο 4 βρίσκεται χαράσσοντας κάθετη γραμμή από το σημείο 3. Τέλος βρίσκουμε και τα υπόλοιπα θερμοδυναμικά μεγέθη πάνω στο χάρτη.

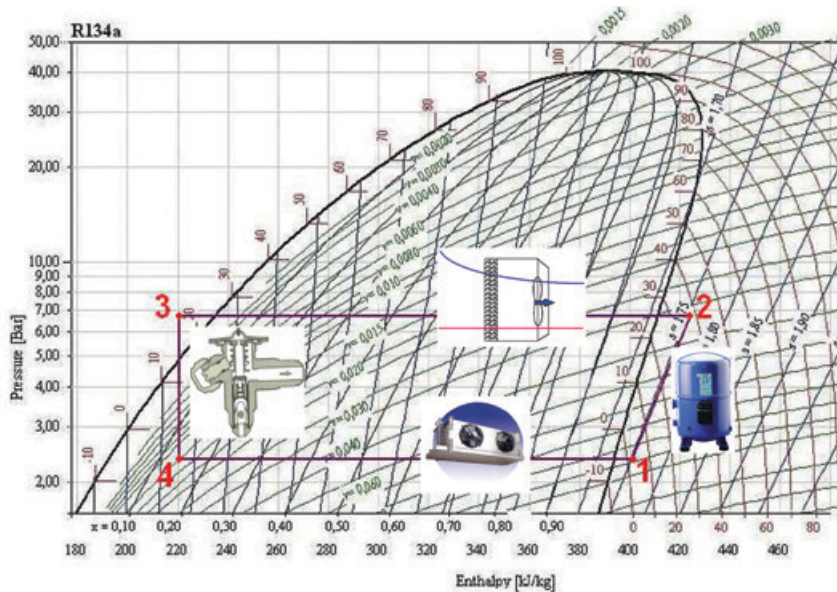
Πίεση (P):	$P_{εξ}=P_1=P_4=2,92 \text{ bar}$
	$P_{συμ}=P_2=P_3=6,65 \text{ bar}$
Θερμοκρασία (θ):	$\theta_{εξ}=\theta_1=\theta_4=0^\circ\text{C}$
	$\theta_2=28^\circ\text{C}$
	$\theta_{συμ}=\theta_3=25^\circ\text{C}$
	$h_1=397 \text{ kJ/kg}$
Ειδική ενθαλπία (h):	$h_2=415 \text{ kJ/kg}$
	$h_3=h_4=234 \text{ kJ/kg}$
Ειδικός όγκος (v):	$v_1=0,069 \text{ m}^3/\text{kg}$
	$v_2=0,029 \text{ m}^3/\text{kg}$
Εντροπία (s):	$s_1=s_2=1,722 \text{ kJ/(kg K)}$

Άσκηση 2. Ψυκτική εγκατάσταση R134a λειτουργεί με υπερθέρμανση και υπόψυξη κατά 10°C σε πίεση συμπίκνωσης 6,6 bar και πίεση εξάτμισης 2,2 bar. Ζητείται η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (P-h) και η εύρεση των θερμοδυναμικών μεγεθών.

Βήμα 1. Βρίσκουμε από τον πίνακα τη θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην πίεση εξάτμισης (2.2 bar = -7°C) και πίεση συμπίκνωσης (6.6 bar = 25°C), και προσθέτουμε τους 10°C της υπερθέρμανσης στη θερμοκρασία της εξάτμισης ($-7^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C} = 3^\circ\text{C}$) και αφαιρούμε τους 10°C της υπόψυξης από τη θερμοκρασία συμπίκνωσης ($25^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 15^\circ\text{C}$).

Temperature	Pressure	Temperature	Pressure
-7	2.2548	21	5.8959
-6	2.3428	22	6.0789
-5	2.4334	23	6.2662
-4	2.5268	24	6.4578
-3	2.6228	25	6.6538
-2	2.7217	26	6.8543
-1	2.8234	27	7.0592
0	2.928	28	7.2688
1	3.0356	29	7.483
2	3.1462	30	7.702
3	3.2598	31	7.9257
4	3.3766	32	8.1543
5	3.4966	33	8.3878
6	3.6198		
7	3.7463		

Βήμα 2. Βρίσκουμε τα σημεία πιέσεων 2.2 bar και 6.6 bar στον άξονα των πιέσεων του διαγράμματος P-h, χαράσσουμε τις γραμμές και σημειώνουμε το σημείο 1 εκεί όπου ενώνεται η γραμμή πίεσης εξάτμισης με τη γραμμή της θερμοκρασίας υπερθέρμανσης που έχουμε υπολογίσει στο βήμα 1 ($-7^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C} = 3^\circ\text{C}$).



Βήμα 3. Βρίσκουμε το σημείο 2 χαράσσοντας από το σημείο 1 γραμμή παράλληλη στον άξονα της εντροπίας του διαγράμματος P-h εκεί όπου ενώνεται με τη γραμμή της πίεσης συμπίκνωσης. Στη συνέχεια το σημείο 3 βρίσκεται αφού έχουμε αφαιρέσει (στο Βήμα 1) τους 10°C της υπόψυξης από τη θερμοκρασία συμπίκνωσης (25°C - 10°C = 15°C). Το σημείο 4 βρίσκεται χαράσσοντας κάθετη γραμμή από το σημείο 3. Τέλος βρίσκουμε και τα υπόλοιπα θερμοδυναμικά μεγέθη πάνω στο χάρτη.

Πίεση (P):	$P_{εξ}=P_1=P_4=2,2 \text{ bar}$
	$P_{συμ}=P_2=P_3=6,6 \text{ bar}$
Θερμοκρασία (θ):	$\theta_{εξ}=\theta_4=-7^\circ\text{C}$
	$\theta_1=3^\circ\text{C}$
	$\theta_2=37^\circ\text{C}$
	$\theta_3=15^\circ\text{C}$
	$\theta_{συμ}=25^\circ\text{C}$
Ειδική ενθαλπία (h):	$h_1=402 \text{ kJ/kg}$
	$h_2=424 \text{ kJ/kg}$
	$h_3=h_4=220 \text{ kJ/kg}$
Ειδικός όγκος (v):	$v_1=0,095 \text{ m}^3/\text{kg}$
	$v_2=0,033 \text{ m}^3/\text{kg}$
Εντροπία (s):	$s_1=s_2=1,75 \text{ kJ/(kg K)}$

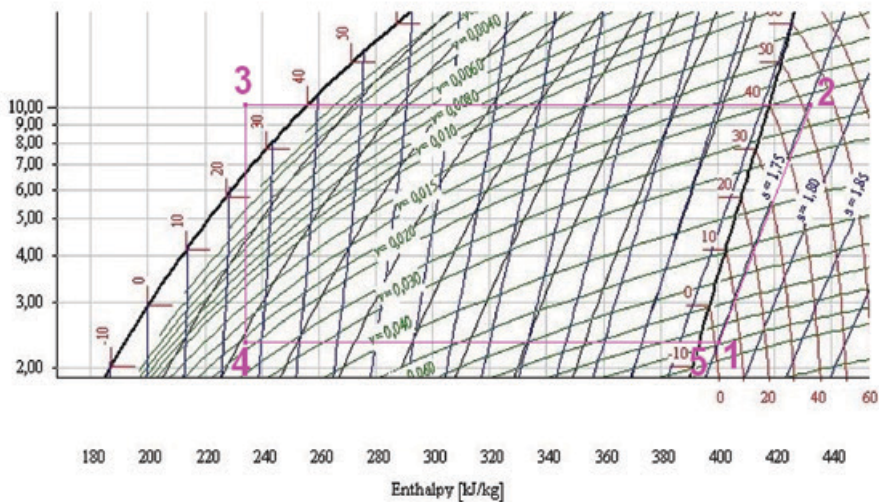


ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

Άσκηση 1. Ψυκτική εγκατάσταση λειτουργεί με μηχανική συμπίεση ατμών ψυκτικού ρευστού R134a σε θάλαμο με ψυκτικό φορτίο $Q_e=12\text{ kW}$. Η μηχανή λειτουργεί με θερμοκρασία συμπύκνωσης 40°C , υπόψυξη με εσωτερικό εναλλάκτη κατά 15°C , θερμοκρασία εξαέρωσης -8°C και υπερθέρμανση κατά 10°C . Αν ο συντελεστής απόδοσης του συμπιεστή είναι $\eta_c = 0,8$ και ο συντελεστής απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα είναι $\eta_e = 0,8$, ζητούνται:

1. Η χάραξη του κύκλου ψύξης σε διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας (Ph).
2. Ο λόγος των πιέσεων.
3. Η μάζα του κυκλοφορούντος ψυκτικού.
4. Η θεωρητική ισχύς του συμπιεστή.
5. Η αποβαλλόμενη θερμότητα στο συμπυκνωτή.
6. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.
7. Ο συντελεστής συμπεριφοράς (COP).



Πίεση (P):	$P_{εξ}=P_1=P_4=P_5=2,168\text{ bar}$
	$P_{συμ}=P_2=P_3=11,55\text{ bar}$
	$\theta_{εξ}=\theta_4=-8^\circ\text{C}$
Θερμοκρασία (θ):	$\theta_1=2^\circ\text{C}$
	$\theta_2=60^\circ\text{C}$
	$\theta_3=25^\circ\text{C}$
	$\theta_{συμ}=40^\circ\text{C}$

	$h_1=402 \text{ kJ/kg}$
Ειδική ενθαλπία (h):	$h_2=438 \text{ kJ/kg}$
	$h_3=h_4=234 \text{ kJ/kg}$
	$h_5=393 \text{ kJ/kg}$
Ειδικός όγκος (v):	$v_1=0,095 \text{ m}^3/\text{kg}$
	$v_2=0,019 \text{ m}^3/\text{kg}$
Εντροπία (s):	$s_1=s_2=1,76 \text{ kJ}/(\text{kg K})$

- Ο λόγος πιέσεων.

$$\frac{P_c}{P_e} \Rightarrow \frac{11,55 \text{ Bar(a)}}{2,1 \text{ Bar(a)}} = 5,5$$

- Ανηγμένη θερμότητα ατμοποίησης ή ψυκτική ικανότητα ή ψυκτικό αποτέλεσμα.

$$q_e = h_5 - h_4 \Rightarrow q_e = 393 \text{ kJ/kg} - 234 \text{ kJ/kg} = 159 \text{ kJ/kg}$$

- Η μάζα του ψυκτικού που κυκλοφορεί.

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{q_e} \Rightarrow \dot{m} = \frac{12 \text{ KW(kJ/sec)}}{159 \text{ kJ/kg}} = 0,0755 \text{ kg/sec} = 271,8 \text{ kg/h}$$

- Ανηγμένο θεωρητικό μηχανικό τεχνικό έργο ή έργο για τη συμπίεση.

$$w = h_2 - h_1 \Rightarrow w = 438 \text{ kJ/kg} - 402 \text{ kJ/kg} = 36 \text{ kJ/kg}$$

- Θεωρητική ισχύς συμπίεσής.

$$P = \dot{m} \cdot w \Rightarrow P = 271,8 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 36 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 9784,8 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = \frac{9784,8 \text{ kJ/h}}{3600 \text{ sec/h}} = 2,718 \text{ kJ/sec} = 2,718 \text{ KW}$$

- Ανηγμένη θερμότητα συμπύκνωσης.

$$q_c = q_e + w \Rightarrow q_c = 159 \text{ kJ/kg} + 36 \text{ kJ/kg} = 195 \text{ kJ/kg}$$

- Ισχύς συμπύκνωσης ή αποβαλλόμενη θερμότητα συμπύκνωσης.

$$Q_c = q_c \cdot \dot{m} \Rightarrow Q_c = 195 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 271,8 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 53001 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = \frac{53001 \text{ kJ/h}}{3600 \text{ sec/h}} = 14,72 \text{ kJ/sec} = 14,72 \text{ KW}$$

- Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

$$N = P / (n_{\text{συμ.}} \cdot n_{\text{κιν.}}) \Rightarrow N = 2,718 \text{ kW} / (0,8 \cdot 0,8) = 4,25 \text{ KW}$$

- Συντελεστής συμπεριφοράς (COP).

$$\text{COP} = \frac{Q_e}{N} = \frac{12 \text{ kW}}{4,25 \text{ kW}} = 2,82$$



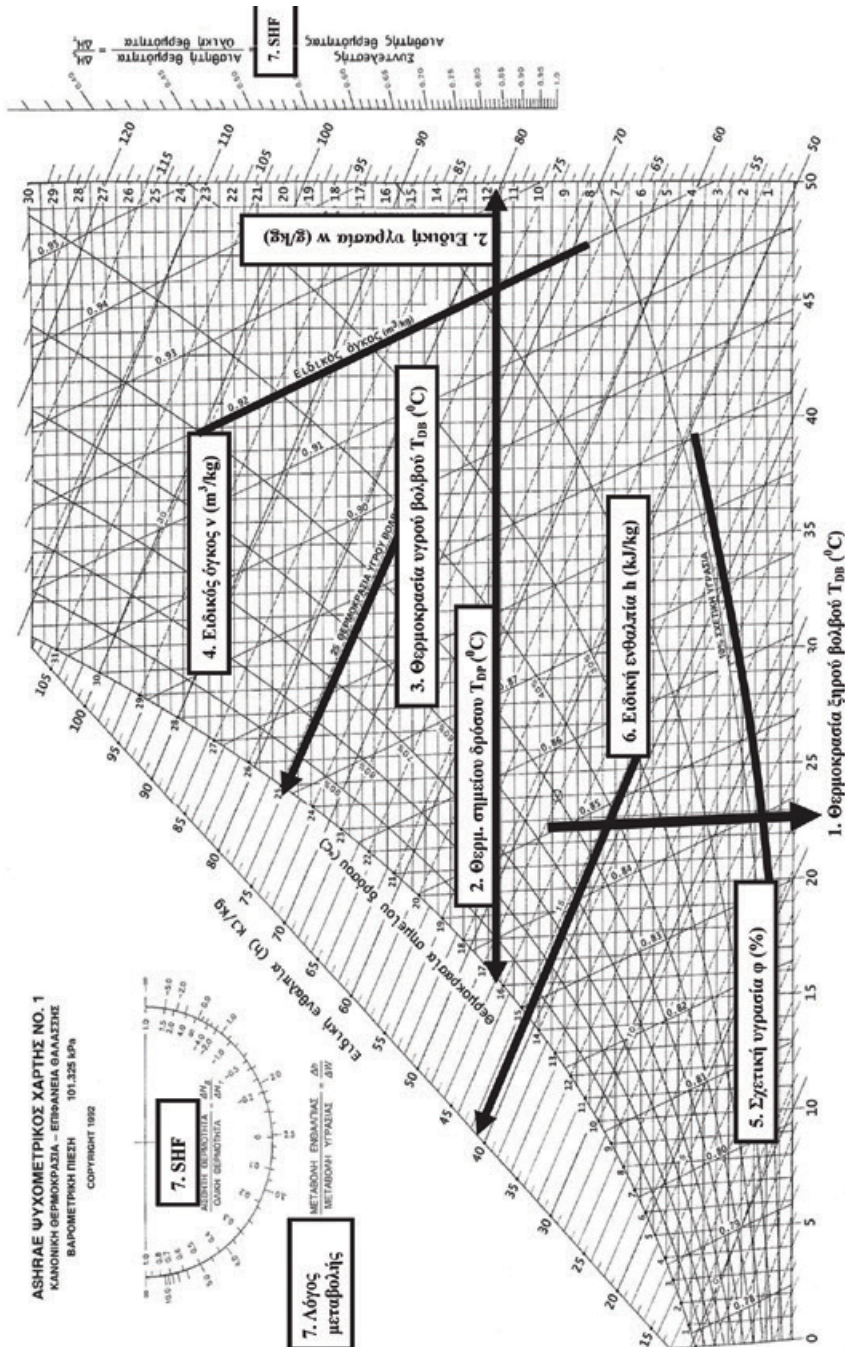
ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5

1. Αντιστοίχισε τις έννοιες στα παρακάτω ψυχομετρικά μεγέθη.

- | | |
|--|---|
| Απόλυτη υγρασία | • Η θερμοκρασία που δείχνει ένα κοινό θερμόμετρο που ο βολβός του είναι στεγνός ($^{\circ}\text{C}$). |
| Σημείο δρόσου (T_{DP}) | • Η κατάσταση που μπορεί να βρεθεί ο αέρας, κατά την οποία έστω και η ελάχιστη ψύξη του προκαλεί υγροποίηση των υδρατμών που περιέχονται στη μάζα του. |
| Θερμοκρασία ξηρού βολβού ($\theta_{\text{ε.β.}}$ ή T_{DB}): | • Ο λόγος της μερικής πίεσης υδρατμών που περιέχονται σε υγρό ατμοσφαιρικό αέρα προς τη μερική πίεση των υδρατμών στον ίδιο αέρα όταν αυτός είναι κορεσμένος στην ίδια πίεση και θερμοκρασία (%). |
| Ανηγμένος όγκος αέρα | • Η κατώτερη θερμοκρασία που μπορεί να φτάσει ένα κοινό θερμόμετρο που ο βολβός του είναι υγρός, λόγω της εξάτμισης του νερού ($^{\circ}\text{C}$). |
| Κατάσταση κορεσμού αέρα | • Ο λόγος της μάζας των υδρατμών που περιέχεται στον όγκο του ατμοσφαιρικού αέρα προς τον όγκο αυτό (kg ή gr/m^3). |
| Θερμοκρασία υγρού βολβού ($\theta_{\text{υ.β.}}$ ή T_{WB}): | • Το σημείο της θερμοκρασίας στερεού σώματος που έχει τοποθετηθεί σε μη κορεσμένο υγρό αέρα, κατά το οποίο μειώνοντας τη θερμοκρασία του εμφανίζονται σταγονίδια υγροποιημένου υδρατμού πάνω στην επιφάνειά του ($^{\circ}\text{C}$). |
| Ενθαλπία (h) | • Ο λόγος της ενθαλπίας του υγρού αέρα προς τη μάζα του ξηρού αέρα (kJ/kg ή m^3/kg). |
| Σχετική υγρασία (ϕ) | • Είναι το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας ενός σώματος και του γινομένου της εξωτερικής πίεσης επί του όγκου που καταλαμβάνει (kJ/kg ή m^3/kg). |
| Ειδικός όγκος αέρα (v) | • Ονομάζεται ο λόγος του όγκου του υγρού αέρα προς τη μάζα του υγρού αέρα (m^3/kg). |
| Ειδική υγρασία (w) | • Ο λόγος του όγκου του υγρού αέρα προς τη μάζα του ξηρού αέρα (m^3/kg). |
| Ανηγμένη ενθαλπία (h) | • Ο λόγος της μάζας των υδρατμών προς τη μάζα του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα στην οποία περιέχεται ($\text{kg}_{\text{νερό}}/\text{kg}_{\text{ε.α.}}$ ή gr/kg). |

2. Σημείωσε πάνω στον ψυχρομετρικό χάρτη τα μεγέθη που απεικονίζουν οι κλίμακές του.

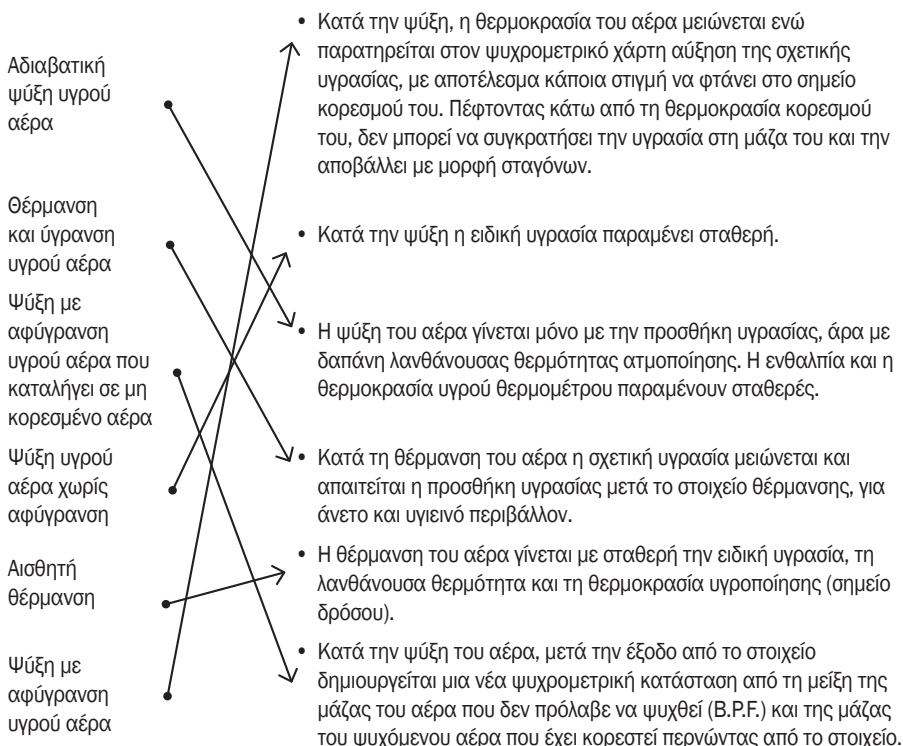




ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6

1. Αντιστοίχισε τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τις ψυχομετρικές μεταβολές.



2. Σημείωσε με ν το σωστό

Ο συντελεστής αισθητής θερμότητας ή αισθητού φορτίου είναι:

- Ο λόγος της αισθητής θερμότητας που προστέθηκε στον αέρα προς το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας (ενθαλπία) του αέρα αυτού.
- Ο λόγος της λανθάνουσας θερμότητας που προστέθηκε στον αέρα προς το άθροισμα της αισθητής και της λανθάνουσας θερμότητας (ενθαλπία) του αέρα αυτού.

ν

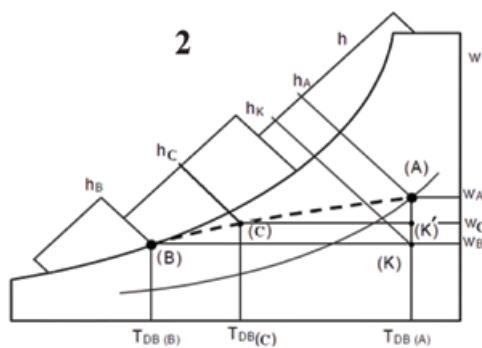
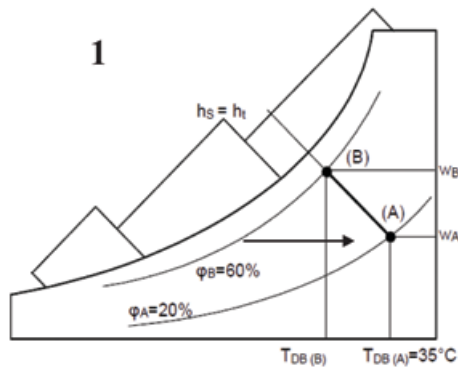
Ο συντελεστής παράκαμψης (By pass Factor) είναι:

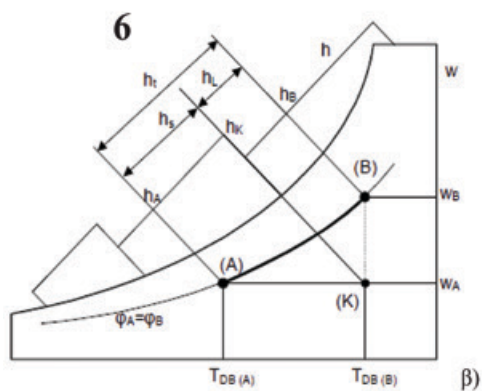
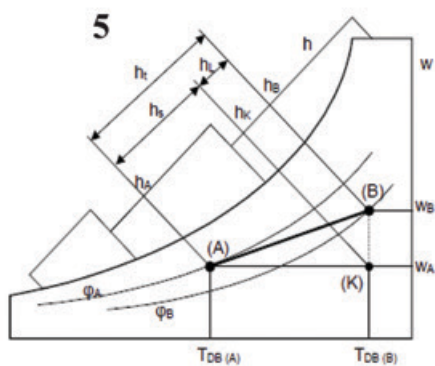
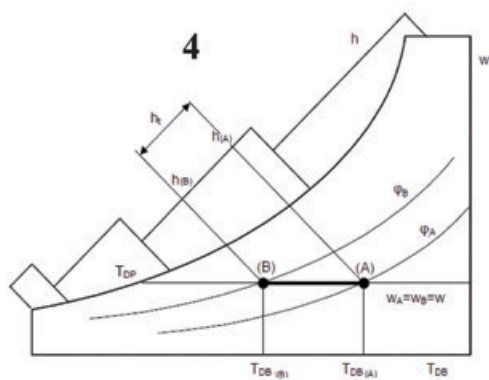
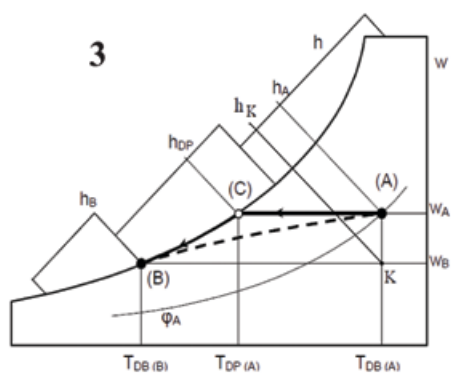
- Το ποσοστό της μάζας του αέρα που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του στοιχείου και ψύχεται.
- Το ποσοστό της μάζας του αέρα που θεωρούμε ότι δεν έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του στοιχείου και περνά αμετάβλητο από αυτό.

ν

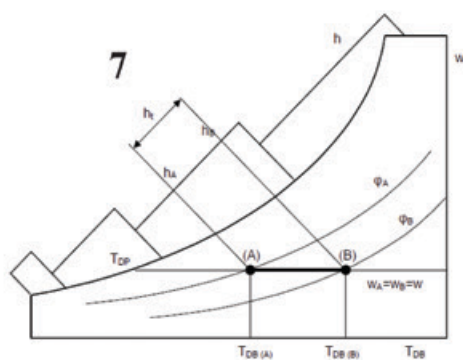
3. Αντιστοίχισε τις ψυχομετρικές μεταβολές που απεικονίζονται στους παρακάτω ψυχομετρικούς χάρτες.

- | | | |
|-----|---|--|
| 1 • | → | • Θέρμανση με ύγρανση με μεταβολή της σχετικής υγρασίας. |
| 2 • | → | • Θέρμανση υγρού αέρα με σταθερή την ειδική υγρασία. |
| 3 • | → | • Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα που καταλήγει σε μη κορεσμένο αέρα. |
| 4 • | → | • Αδιαβατική ψύξη υγρού αέρα. |
| 5 • | → | • Ψύξη υγρού αέρα χωρίς αφύγρανση. |
| 6 • | → | • Ψύξη με αφύγρανση υγρού αέρα. |
| 7 • | → | • Θέρμανση με ύγρανση με διατήρηση της σχετικής υγρασίας. |





β)





ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΑΥΤΟΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 7

Άσκηση 1. Σε κλιματιστική συσκευή μετρήθηκαν:

Στην είσοδο A: T_{DB} (ξηρού βολβού) = 32°C

T_{WB} (υγρού βολβού) = $23,7^{\circ}\text{C}$

Στην έξοδο B: T_{DB} (ξηρού βολβού) = 20°C

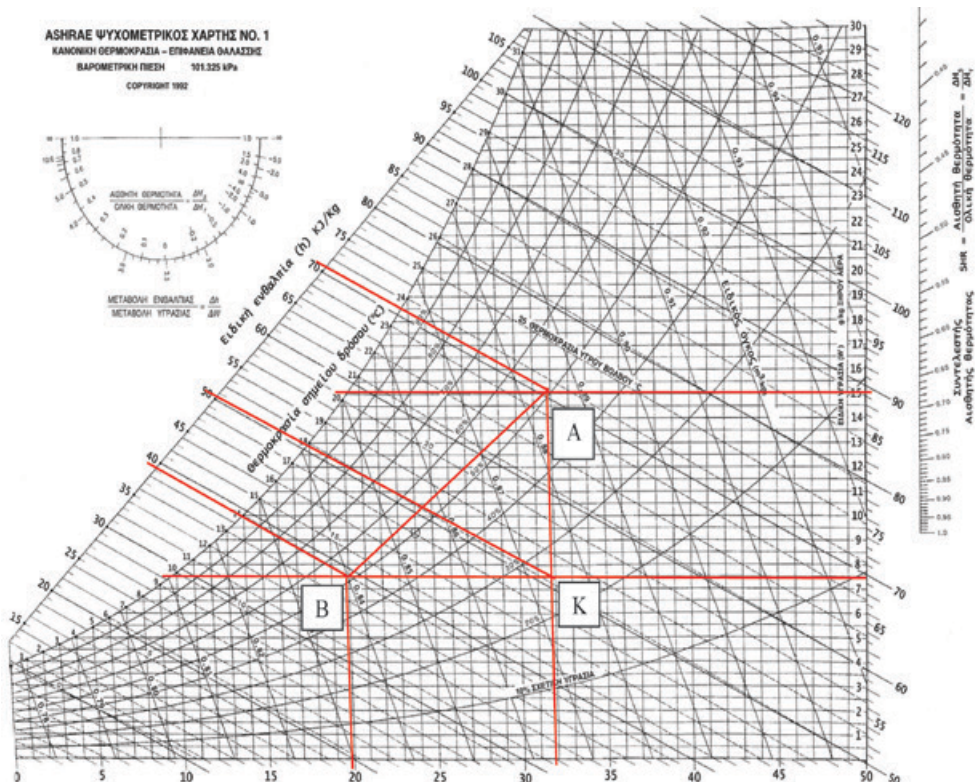
T_{WB} (υγρού βολβού) = 14°C

ταχύτητα αέρα $u = 6\text{m/sec}$

κυκλικός αγωγός ακτίνας $r = 0,5\text{m}$

Ζητούνται:

1. Τα σημεία εισόδου A και εξόδου B στον ψυχομετρικό χάρτη.
 2. Τα ψυχομετρικά στοιχεία στην είσοδο A και στην έξοδο B.
 3. Η παροχή μάζας του εισερχόμενου αέρα.
 4. Η απορροφούμενη θερμική ισχύς από τον αέρα.
 5. Το ποσό του νερού που συμπυκνώνεται και αποβάλλεται από τον αέρα.
- Τα σημεία εισόδου A και εξόδου B στον ψυχομετρικό χάρτη είναι:



- Τα ψυχομετρικά στοιχεία στην είσοδο Α και στην έξοδο Β είναι:

Αρχική κατάσταση Α	Τελική κατάσταση C
$T_{DB} = 32^{\circ}\text{C}$	$T_{DB} = 20^{\circ}\text{C}$
$T_{WB} = 23,7^{\circ}\text{C}$	$T_{WB} = 14^{\circ}\text{C}$
$\phi = 50\%$	$\phi = 50\%$
$w = 15 \text{ gr υδρ/kg ξηρ αέρ ή } 15/1000 = 0,015 \text{ kg/kg}$	$w = 7,5 \text{ gr υδρ/kg ξηρ αέρ ή } 9/1000 = 0,0075 \text{ kg/kg}$
$v = 0,886 \text{ m}^3/\text{kg}$	$v = 0,84 \text{ m}^3/\text{kg}$
$h = 71 \text{ kJ/kg}$	$h = 39 \text{ kJ/kg}$
	$u \text{ (ταχύτητα)} = 6 \text{ m/s}$

- Η παροχή μάζας του εισερχόμενου αέρα.

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{V}_a}{v_a} = \frac{4,71 \text{ m}^3/\text{sec}}{0,886 \text{ m}^3/\text{kg}} = 5,31 \text{ kg/sec}$$

$$\text{όπου } \dot{V}_a = u \cdot E = 6 \text{ m/s} \cdot 0,785 \text{ m}^2 = 4,71 \text{ m}^3/\text{sec} \text{ ή } 4,71 \text{ m}^3 \cdot 3600 \text{ sec} = 16956 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$\text{και } E = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 0,5^2 = 3,14 \cdot 0,25 \text{ m}^2 = 0,785 \text{ m}^2$$

$$\pi = \text{περίμετρος κύκλου (πάντα } 3,14)$$

- Το συνολικό ποσό της θερμότητας (αποβαλλόμενη θερμική ισχύς) που αφαιρείται κατά τη μεταβολή A-C από τον αέρα.

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_s + \dot{Q}_L \text{ ή } \dot{Q}_t = \dot{m}_a \cdot h_t = \dot{m}_a \cdot (h_a - h_B) = 5,31 \text{ kg/sec} \cdot (71 - 39) \text{ kJ/kg} = \mathbf{169,92 \text{ kW}}$$

- Το αποβαλλόμενο ποσό νερού κατά τη μεταβολή A-B.

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a \cdot (w_a - w_B) = 5,31 \text{ kg/sec} \cdot (0,015 - 0,0075) \text{ kg/kg} = \mathbf{0,03982 \text{ kg/sec}}$$

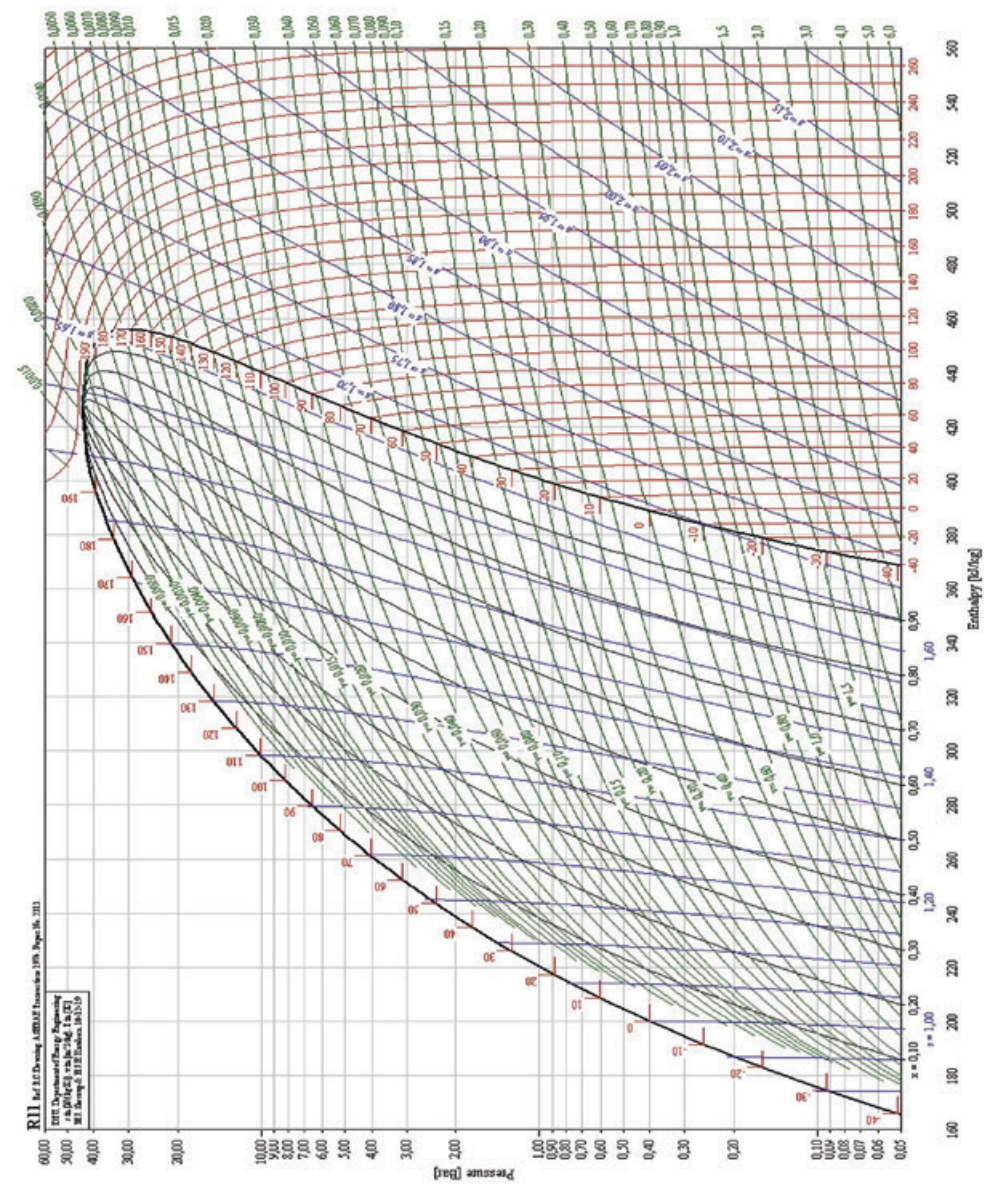


ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

1. Πίνακας και διάγραμμα P-h για ψυκτικό μέσο R11

Χαρακτηριστικά του R-11 (CCl₃F) στη γραμμή κορεσμού

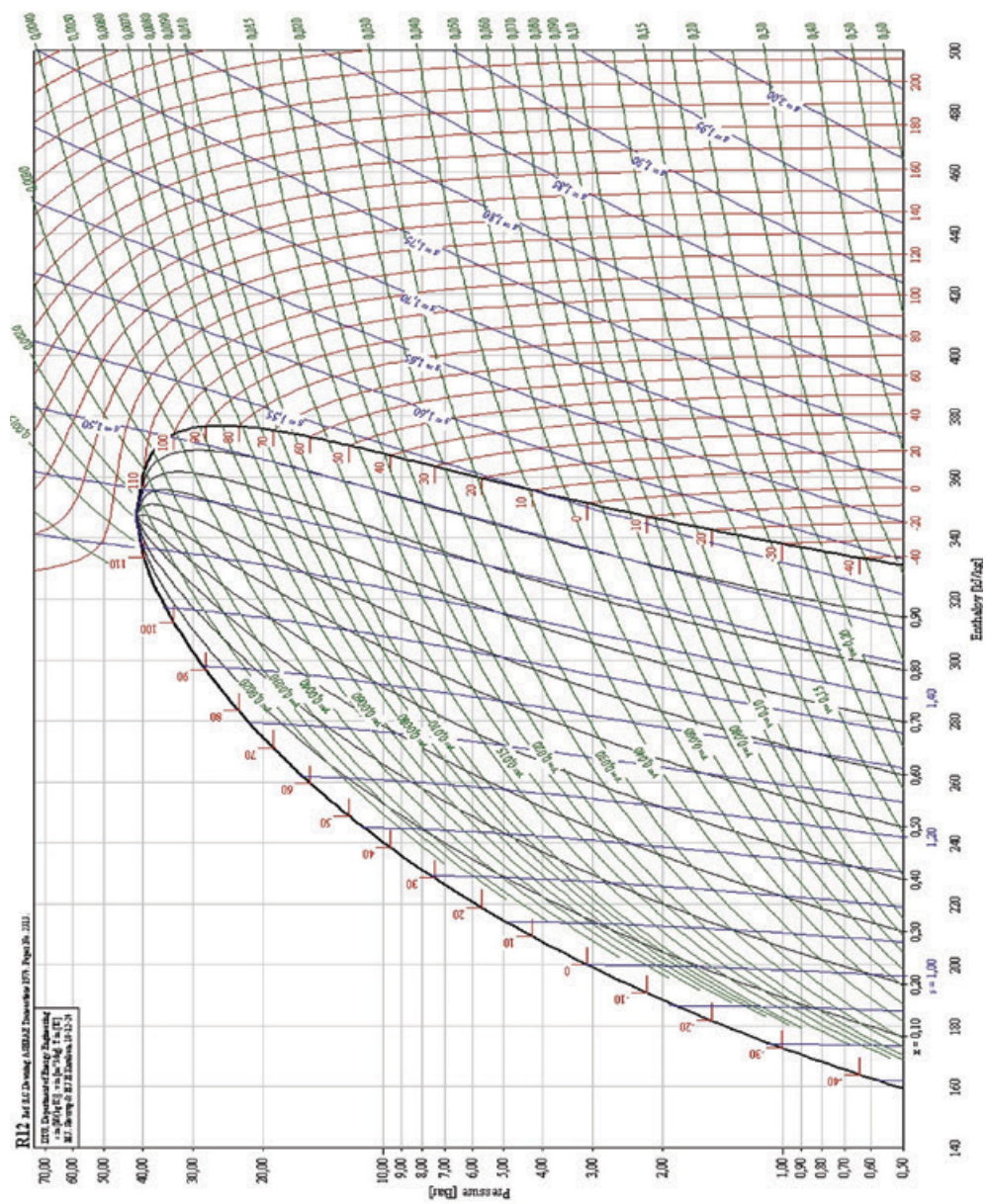
Temperature °C	Absolute pressure 10 ⁵ Pa (bar)	Specific volume, dm ³ /kg		Specific weight, kg/m ³		Specific enthalpy, kJ/kg		Specific heat of vaporization kJ/kg	Specific entropy, kJ/(kg·K)	
		liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor		liquid	vapor
-50	0,027	0,608	5044,685	1643,686	0,198	157,3	363,6	206,3	0,827	1,752
-45	0,037	0,612	3688,446	1633,082	0,271	161,5	366,1	204,5	0,846	1,743
-40	0,051	0,616	2740,828	1622,411	0,365	165,8	368,6	202,8	0,865	1,734
-35	0,069	0,620	2067,394	1611,672	0,484	170,0	371,1	201,0	0,883	1,727
-30	0,092	0,625	1581,239	1600,860	0,632	174,3	373,6	199,3	0,900	1,720
-25	0,122	0,629	1225,105	1589,972	0,816	178,6	376,1	197,6	0,918	1,714
-20	0,158	0,633	960,628	1579,005	1,041	182,8	378,7	195,8	0,935	1,708
-15	0,203	0,638	761,963	1567,955	1,313	187,1	381,2	194,1	0,952	1,703
-10	0,257	0,642	610,258	1556,818	1,639	191,4	383,7	192,4	0,968	1,699
-5	0,323	0,647	493,683	1545,589	2,026	195,7	386,3	190,6	0,984	1,695
0	0,402	0,652	402,955	1534,264	2,481	200,0	388,9	188,9	1,000	1,691
5	0,495	0,675	331,745	1522,837	3,014	204,3	391,4	187,1	1,016	1,688
10	0,606	0,662	275,246	1511,304	3,633	208,6	393,9	185,3	1,031	1,685
15	0,734	0,667	230,052	1499,659	4,347	213,0	396,5	183,5	1,046	1,683
20	0,884	0,672	193,601	1487,896	5,165	217,3	399,0	181,7	1,061	1,681
25	1,056	0,678	163,973	1476,008	6,099	221,7	401,5	179,8	1,076	1,679
30	1,254	0,683	139,714	1463,989	7,157	226,1	404,0	177,9	1,090	1,677
35	1,479	0,689	119,714	1451,829	8,353	230,5	406,5	176,0	1,105	1,676
40	1,735	0,695	103,116	1439,522	9,698	234,9	409,0	174,1	1,119	1,675
45	2,023	0,701	89,256	1427,058	11,204	239,3	411,5	172,1	1,133	1,674
50	2,347	0,707	77,614	1414,427	12,884	243,8	413,9	170,1	1,147	1,673



2. Πίνακας και διάγραμμα P-h για ψυκτικό μέσο R12

Χαρακτηριστικά του R-12 στη γραμμή κορεσμού

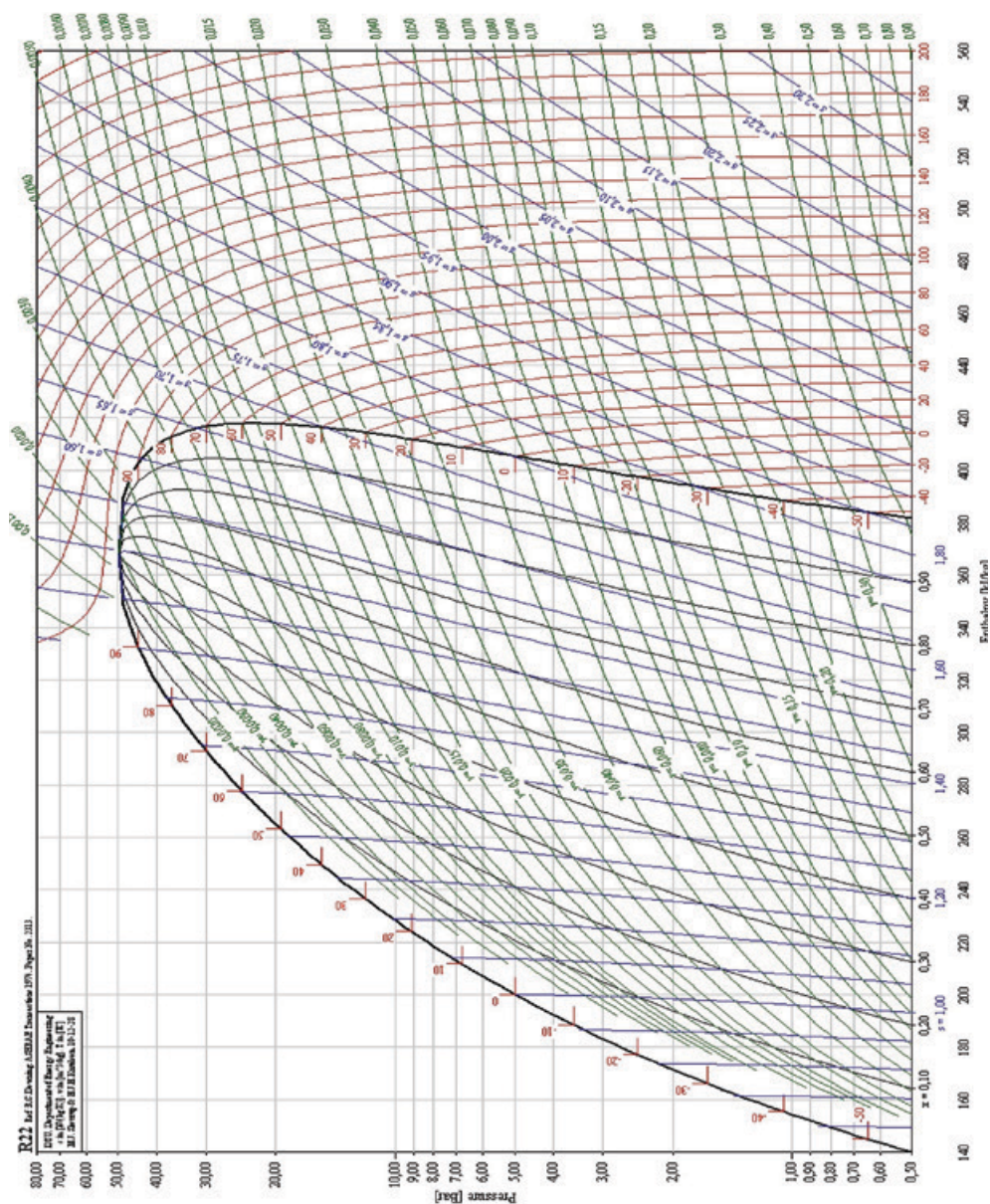
Temperature °C	Absolute pressure 10 ⁵ Pa (bar)	Specific volume, dm ³ /kg		Specific weight, kg/m ³		Specific enthalpy, kJ/kg		Specific heat of vaporization kJ/kg	Specific entropy, kJ/(kg*K)	
		liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor		liquid	vapor
-50	0,391	0,648	383,537	1543,674	2,607	155,1	328,9	173,8	0,819	1,598
-45	0,504	0,654	303,012	1530,123	3,300	159,5	331,2	171,7	0,839	1,591
-40	0,641	0,659	242,164	1516,354	4,129	163,9	333,6	169,7	0,858	1,585
-35	0,806	0,666	195,596	1502,358	5,113	168,3	335,9	167,5	0,877	1,580
-30	1,003	0,672	159,532	1488,122	6,268	172,8	338,2	165,4	0,895	1,575
-25	1,236	0,679	131,291	1473,635	7,617	177,2	340,5	163,2	0,913	1,571
-20	1,508	0,685	108,949	1458,881	9,179	181,7	342,7	161,0	0,931	1,567
-15	1,825	0,693	91,101	1443,845	10,977	186,3	345,0	158,7	0,949	1,563
-10	2,190	0,700	76,714	1428,511	13,035	190,8	347,2	156,4	0,966	1,560
-5	2,608	0,708	65,019	1412,858	15,380	195,4	349,4	154,0	0,983	1,557
0	3,084	0,716	55,436	1396,867	18,039	200,0	351,5	151,5	1,000	1,555
5	3,624	0,724	47,525	1380,513	21,042	204,6	353,7	149,0	1,017	1,552
10	4,231	0,733	40,947	1363,770	24,422	209,3	355,8	146,4	1,033	1,550
15	4,911	0,743	35,442	1346,608	28,215	214,1	357,8	143,7	1,050	1,548
20	5,670	0,752	30,804	1328,992	32,463	218,8	359,8	141,0	1,066	1,547
25	6,513	0,763	26,875	1310,884	37,209	223,7	361,8	138,1	1,082	1,545
30	7,446	0,774	23,526	1292,238	42,506	228,6	363,6	135,1	1,098	1,544
35	8,474	0,786	20,656	1273,001	48,411	233,5	365,5	132,0	1,114	1,542
40	9,603	0,798	18,184	1253,113	54,993	238,6	367,2	128,7	1,130	1,541
45	10,839	0,811	16,044	1232,499	62,331	243,7	368,9	125,2	1,146	1,539
50	12,189	0,826	14,181	1211,072	70,519	248,9	370,5	121,6	1,162	1,538



3. Πίνακας και διάγραμμα P-h για ψυκτικό μέσο R22

Χαρακτηριστικά του R-22 στη γραμμή κορεσμού

Temperature °C	Pressure 10 ⁵ Pa (bar)		Specific volume, dm ³ /kg		Specific weight, kg/m ³		Specific enthalpy, kJ/kg		Specific heat of vaporization kJ/kg	Specific entropy, kJ/(kg·K)	
	absolute	manometer	liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor		liquid	vapor
-100	0,020	-0,993	0,636	8,008	1,570	0,124	95,87	359,35	263,48	0,5310	2,0526
-90	0,048	-0,965	0,647	3,581	1,545	0,279	105,32	364,23	258,91	0,5840	1,9976
-80	0,104	-0,909	0,658	1,763	1,519	0,567	114,90	369,15	254,25	0,6349	1,9512
-70	0,205	-0,808	0,669	0,9409	1,493	1,062	124,66	374,08	249,42	0,6841	1,9118
-60	0,374	-0,639	0,682	0,5372	1,466	1,861	134,63	378,98	244,35	0,7320	1,8783
-50	0,643	-0,370	0,695	0,3246	1,438	3,080	144,85	383,81	238,96	0,7788	1,8496
-41	1,002	-0,011	0,707	0,2149	1,412	4,653	154,27	388,05	233,78	0,8200	1,8270
-40	1,049	+0,036	0,709	0,2057	1,409	4,861	155,32	388,52	233,20	0,8245	1,8247
-30	1,635	+0,622	0,724	0,1358	1,380	7,363	166,07	393,07	227,00	0,8695	1,8030
-20	2,448	+1,435	0,740	0,09284	1,349	10,771	177,10	397,42	220,32	0,9137	1,7840
-10	3,543	+2,530	0,758	0,06534	1,317	15,304	188,40	401,53	213,13	0,9572	1,7670
0	4,976	+3,963	0,778	0,04714	1,284	21,213	200,00	405,36	205,36	1,0000	1,7518
10	6,807	+5,794	0,800	0,03471	1,250	28,810	211,90	408,86	196,96	1,0423	1,7378
20	9,099	+8,086	0,824	0,02600	1,213	38,461	224,14	411,97	187,83	1,0841	1,7248
30	11,92	+10,90	0,851	0,01974	1,173	50,658	236,75	414,62	177,87	1,1256	1,7123
40	15,34	+14,32	0,883	0,01514	1,131	66,050	249,81	416,69	166,88	1,1670	1,6999
50	19,42	+18,40	0,921	0,01167	1,084	85,689	263,43	418,01	154,58	1,2087	1,6870
60	24,27	+23,25	0,968	0,009001	1,032	111,098	277,81	418,30	140,49	1,2511	1,6728
70	29,26	+28,94	1,030	0,006889	0,970	145,158	293,30	417,07	123,77	1,2952	1,6559
80	36,62	+35,60	1,118	0,005149	0,894	194,212	310,74	413,22	102,48	1,3432	1,6334
90	44,43	+43,41	1,182	0,003564	0,780	280,583	332,99	403,03	70,04	1,4027	1,5956



4. Πίνακας και διάγραμμα P-h για ψυκτικό μέσο R502

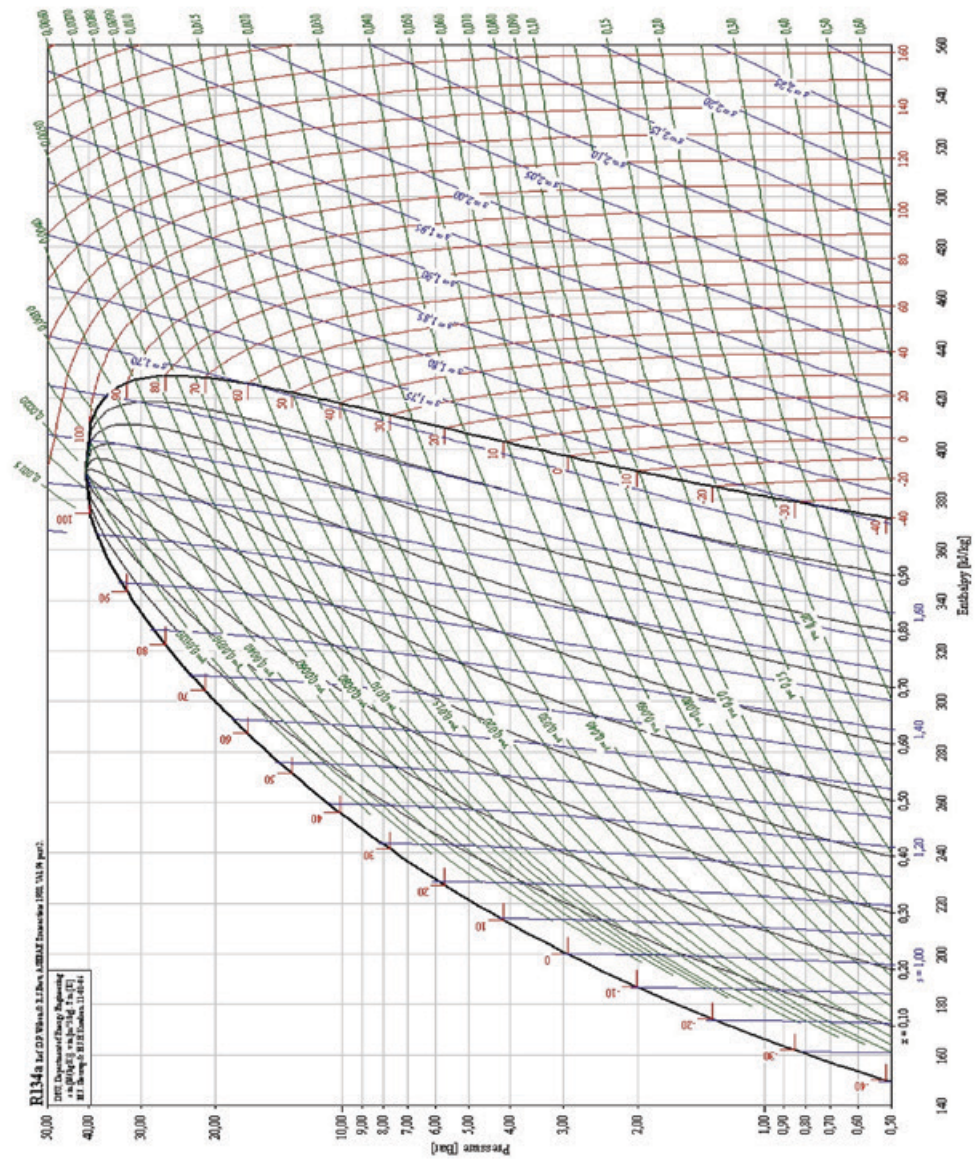
Χαρακτηριστικά του R-502 στη γραμμή κορεσμού

Temperature °C	Absolute pressure 10 ⁵ Pa (bar)	Specific volume, dm ³ /kg		Specific weight, kg/m ³		Specific enthalpy, kJ/kg		Specific heat of vaporization kJ/kg	Specific entropy, kJ/(kg*K)	
		liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor		liquid	vapor
-50	0,814	0,668	197,337	1496,061	5,067	148,1	322,5	174,5	0,792	1,574
-45	1,033	0,676	157,973	1480,146	6,330	152,7	325,1	172,4	0,813	1,568
-40	1,296	0,683	127,734	1463,98	7,829	157,5	327,6	170,1	0,833	1,563
-35	1,610	0,691	104,243	1447,542	9,593	162,4	330,2	167,7	0,854	1,559
-30	1,979	0,699	85,801	1430,811	11,655	167,5	332,7	165,2	0,875	1,554
-25	2,410	0,707	71,181	1413,759	14,049	172,6	335,1	162,5	0,896	1,551
-20	2,910	0,716	59,483	1396,359	16,811	177,9	337,5	159,7	0,917	1,547
-15	3,486	0,725	50,041	1378,577	19,983	183,2	339,9	156,7	0,938	1,544
-10	4,143	0,735	42,358	1360,376	23,608	188,7	342,2	153,5	0,958	1,542
-5	4,889	0,745	36,057	1341,712	27,734	194,3	344,5	150,2	0,979	1,539
0	5,731	0,756	30,851	1322,537	32,414	200,0	346,7	146,7	1,000	1,537
5	6,676	0,768	26,519	1302,793	37,708	205,8	348,8	143,0	1,021	1,535
10	7,730	0,780	22,892	1282,412	43,684	211,7	350,9	139,2	1,041	1,533
15	8,092	0,793	19,834	1261,312	50,419	217,6	352,8	135,2	1,062	1,531
20	10,197	0,807	17,240	1239,398	58,005	223,7	354,7	131,0	1,082	1,529
25	11,623	0,822	15,026	1216,550	66,551	229,9	356,5	126,6	1,103	1,528
30	13,189	0,838	13,125	1192,624	76,188	236,1	358,1	122,0	1,123	1,526
35	14,901	0,857	11,483	1167,435	87,083	242,4	359,6	117,2	1,143	1,524
40	16,770	0,877	10,056	1140,756	99,445	248,8	360,9	112,1	1,164	1,521
45	18,803	0,899	8,806	1112,243	113,553	255,4	362,0	106,6	1,184	1,519
50	21,013	0,925	7,705	1081,495	129,785	262,0	362,9	100,9	1,204	1,516

5. Πίνακας και διάγραμμα P-h για ψυκτικό μέσο R134a

Χαρακτηριστικά του R-134a στη γραμμή κορεσμού

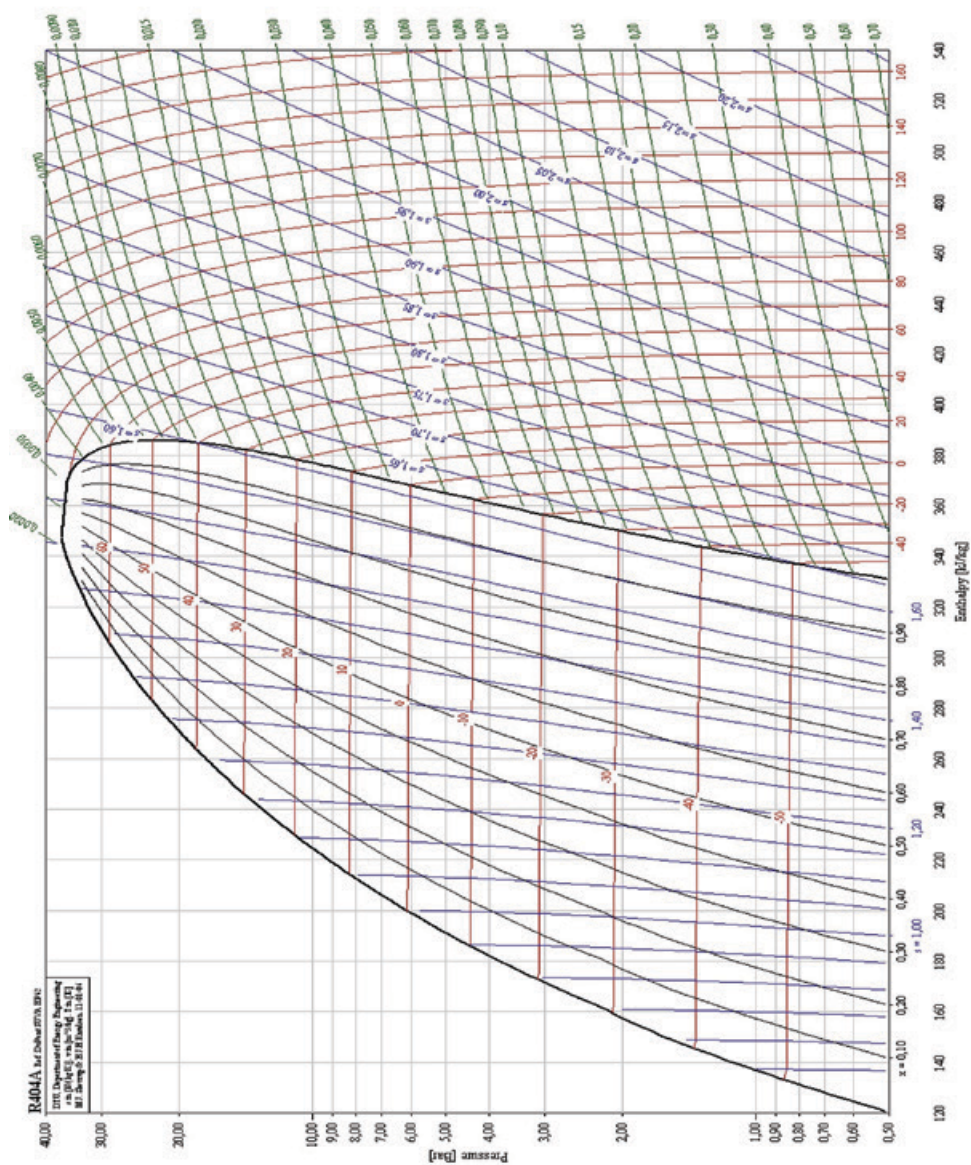
Temperature °C	Absolute pressure 10 ⁵ Pa (bar)	Specific volume, dm ³ /kg		Specific weight, kg/m ³		Specific enthalpy, kJ/kg		Specific heat of vaporization kJ/kg	Specific entropy, kJ/(kg*K)	
		liquid	vapor	liquid	vapor	liquid	vapor		liquid	vapor
-50	0,295	0,693	604,615	1442,547	1,654	136,0	367,3	231,3	0,742	1,779
-45	0,391	0,700	463,457	1428,411	2,158	142,3	370,5	228,2	0,770	1,770
-40	0,512	0,707	360,036	1414,175	2,777	148,5	373,6	225,0	0,797	1,762
-35	0,661	0,714	283,15	1399,816	3,532	154,9	376,7	221,8	0,824	1,755
-30	0,844	0,722	225,21	1385,306	4,44	161,2	379,7	218,5	0,850	1,749
-25	1,064	0,730	180,995	1370,619	5,525	167,6	382,8	215,2	0,876	1,743
-20	1,327	0,738	146,855	1355,725	6,809	174,0	385,8	211,8	0,901	1,738
-15	1,638	0,746	120,204	1340,593	8,319	180,4	388,8	208,4	0,927	1,734
-10	2,004	0,755	99,186	1325,19	10,082	186,9	391,7	204,8	0,951	1,730
-5	2,431	0,764	82,45	1309,479	12,129	193,4	394,6	201,2	0,976	1,726
0	2,925	0,773	69,005	1293,424	14,492	200,0	397,4	197,4	1,000	1,723
5	3,492	0,783	58,111	1276,98	17,209	206,6	400,2	193,6	1,024	1,720
10	4,141	0,794	49,214	1260,104	20,32	213,3	403,0	189,6	1,048	1,717
15	4,878	0,805	41,893	1242,744	23,87	220,1	405,6	185,5	1,071	1,715
20	5,710	0,816	35,827	1224,845	27,912	227,0	408,2	181,3	1,095	1,713
25	6,647	0,829	30,766	1206,345	32,503	233,9	410,8	176,8	1,118	1,711
30	7,695	0,842	26,517	1187,173	37,712	241,0	413,2	172,2	1,141	1,709
35	8,863	0,857	22,927	1167,25	43,617	248,1	415,6	167,4	1,164	1,707
40	10,159	0,872	19,876	1146,481	50,313	255,4	417,8	162,4	1,187	1,706
45	11,594	0,889	17,268	1124,757	57,911	262,9	419,9	157,0	1,210	1,704
50	13,176	0,907	15,026	1124,757	66,551	270,5	421,9	151,3	1,234	1,702



6. Πίνακας και διάγραμμα P-h για ψυκτικό μέσο R404A

Χαρακτηριστικά του R-404A στη γραμμή κορεσμού

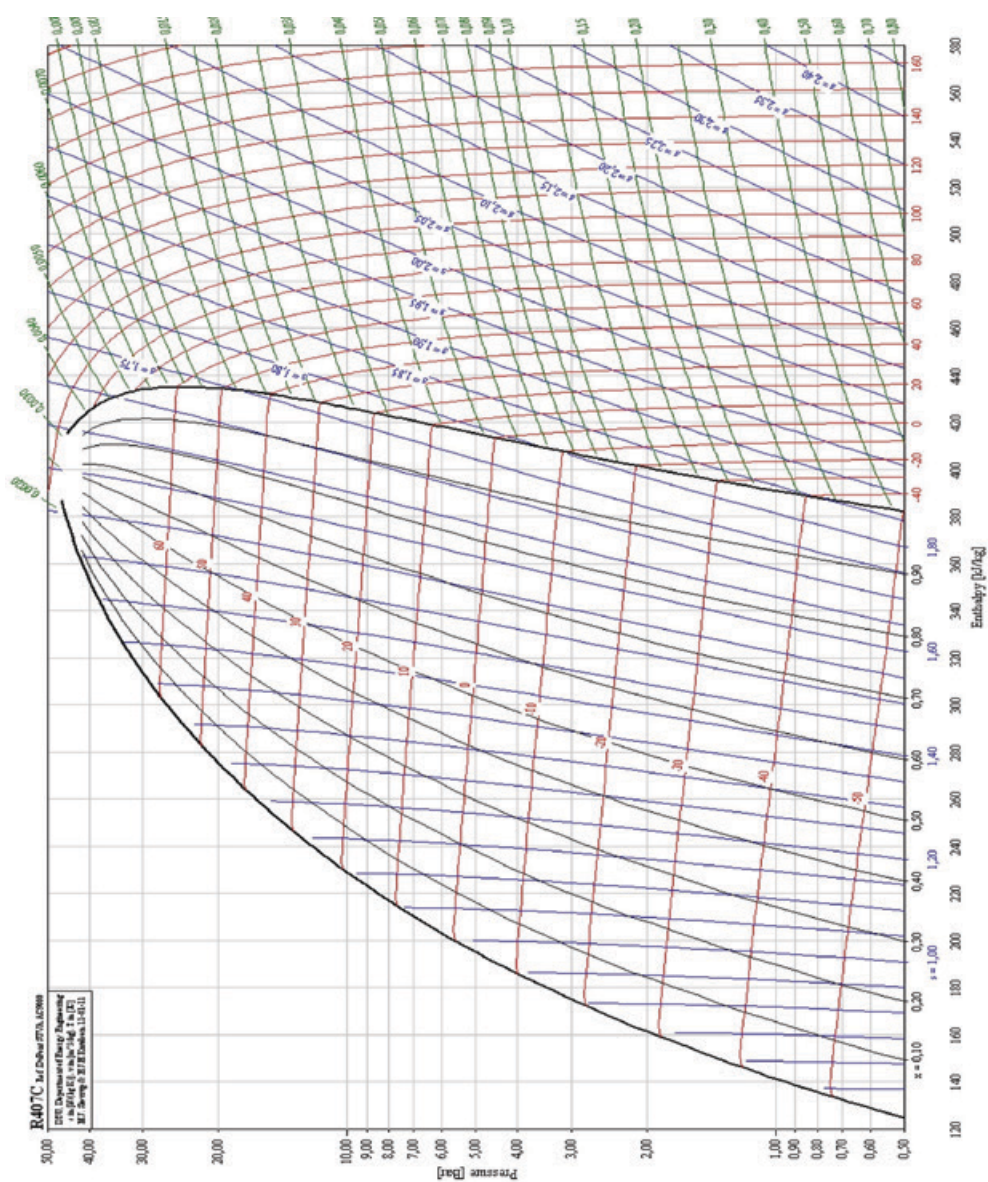
Temperature °C	Saturated liquid				Saturated liquid				Specific heat of vaporization kJ/kg
	Saturation Pressure, 10 ⁵ Pa (bar)	Specific weight, kg/m ³	Specific enthalpy kJ/kg	Specific entropy kJ/ (kg*K)	Saturation Pressure, 10 ⁵ Pa (bar)	Specific weight, kg/m ³	Specific enthalpy kJ/kg	Specific entropy kJ/ (kg*K)	
-50	0,851	1314,120	137,8	0,751	0,814	4,407	339,2	1,657	201,3
-45	1,081	1299,839	143,5	0,777	1,038	5,532	342,4	1,651	198,9
-40	1,358	1285,173	149,3	0,802	1,309	6,873	345,7	1,646	196,3
-35	1,688	1270,100	155,3	0,827	1,632	8,457	348,9	1,642	193,6
-30	2,077	1254,598	161,3	0,851	2,015	10,316	352,1	1,638	190,8
-25	2,532	1238,637	167,4	0,876	2,463	12,484	355,3	1,635	187,9
-20	3,061	1222,189	173,6	0,901	2,986	14,999	358,4	1,632	184,7
-15	3,671	1205,217	180,0	0,926	3,590	17,902	361,4	1,630	181,4
-10	4,371	1187,681	186,5	0,950	4,283	21,242	364,4	1,628	177,9
-5	5,167	1169,535	193,2	0,975	5,074	25,070	367,4	1,626	174,2
0	6,070	1150,724	200,0	1,000	5,970	29,447	370,2	1,624	170,2
5	7,088	1131,185	207,0	1,025	6,982	34,443	372,9	1,622	165,9
10	8,229	1110,838	214,2	1,050	8,118	40,141	375,5	1,621	161,4
15	9,504	1089,592	221,6	1,076	9,387	46,637	378,0	1,619	156,4
20	10,922	1067,331	229,2	1,101	10,800	54,048	380,3	1,617	151,1
25	12,493	1043,909	237,1	1,127	12,366	62,517	382,4	1,615	145,3
30	14,229	1019,138	245,3	1,154	14,096	72,226	384,3	1,613	139,0
35	16,140	992,770	253,8	1,181	16,000	83,404	385,9	1,610	132,1
40	18,237	964,463	262,7	1,209	18,090	96,357	387,2	1,607	124,5
45	20,533	933,725	272,1	1,238	20,377	111,504	388,0	1,603	115,9
50	23,041	899,803	282,2	1,268	22,875	129,450	388,4	1,597	106,2



7. Πίνακας και διάγραμμα P-h για ψυκτικό μέσο R407C

Χαρακτηριστικά του R-407C στη γραμμή κορεσμού

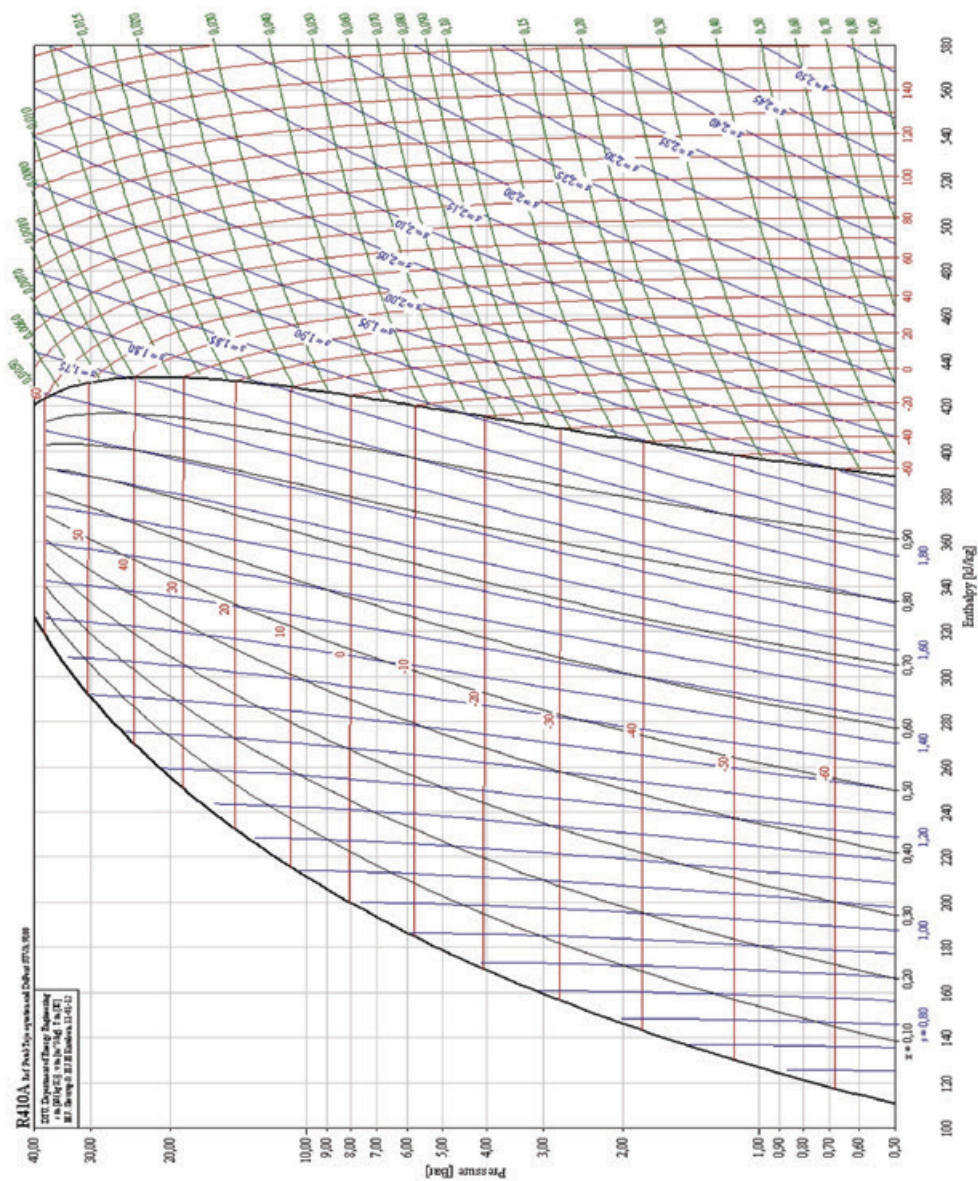
Temperature °C	Saturated liquid				Saturated liquid				Specific heat of vaporization kJ/kg
	Saturation Pressure, 10 ⁵ Pa (bar)	Specific weight, kg/m ³	Specific enthalpy kJ/kg	Specific entropy kJ/ (kg*K)	Saturation Pressure, 10 ⁵ Pa (bar)	Specific weight, kg/m ³	Specific enthalpy kJ/kg	Specific entropy kJ/ (kg*K)	
-50	0,735	1399,335	136,0	0,743	0,492	2,322	384,9	1,878	248,9
-45	0,939	1384,623	141,9	0,770	0,646	2,997	388,1	1,866	246,2
-40	1,187	1369,646	148,0	0,796	0,838	3,822	391,3	1,856	243,3
-35	1,483	1354,386	154,1	0,822	1,074	4,821	394,5	1,846	240,4
-30	1,833	1338,825	160,4	0,848	1,361	6,017	397,7	1,837	237,3
-25	2,246	1322,942	166,7	0,873	1,704	7,437	400,8	1,829	234,2
-20	2,728	1306,713	173,1	0,899	2,112	9,108	403,9	1,822	230,8
-15	3,288	1290,112	179,6	0,924	2,593	11,061	407,0	1,815	227,3
-10	3,933	1273,110	186,3	0,949	3,153	13,328	410,0	1,809	223,7
-5	4,673	1255,673	193,1	0,975	3,801	15,944	412,9	1,803	219,8
0	5,518	1237,761	200,0	1,000	4,545	18,947	415,7	1,797	215,7
5	6,475	1219,330	207,1	1,025	5,394	22,383	418,4	1,792	211,4
10	7,557	1200,329	214,3	1,051	6,357	26,299	421,1	1,788	206,8
15	8,772	1180,695	221,7	1,076	7,444	30,755	423,6	1,783	201,9
20	10,132	1160,357	229,3	1,102	8,663	35,817	426,0	1,779	196,7
25	11,647	1139,227	237,1	1,128	10,028	41,568	428,2	1,774	191,1
30	13,327	1117,197	245,2	1,154	11,549	48,108	430,3	1,770	185,1
35	15,182	1094,138	253,5	1,180	13,241	55,561	432,1	1,765	178,7
40	17,222	1069,880	262,1	1,207	15,119	64,088	433,8	1,760	171,7
45	19,455	1044,209	271,0	1,235	17,200	73,896	435,1	1,755	164,1
50	21,891	1016,836	280,3	1,263	19,504	85,269	436,0	1,749	155,7



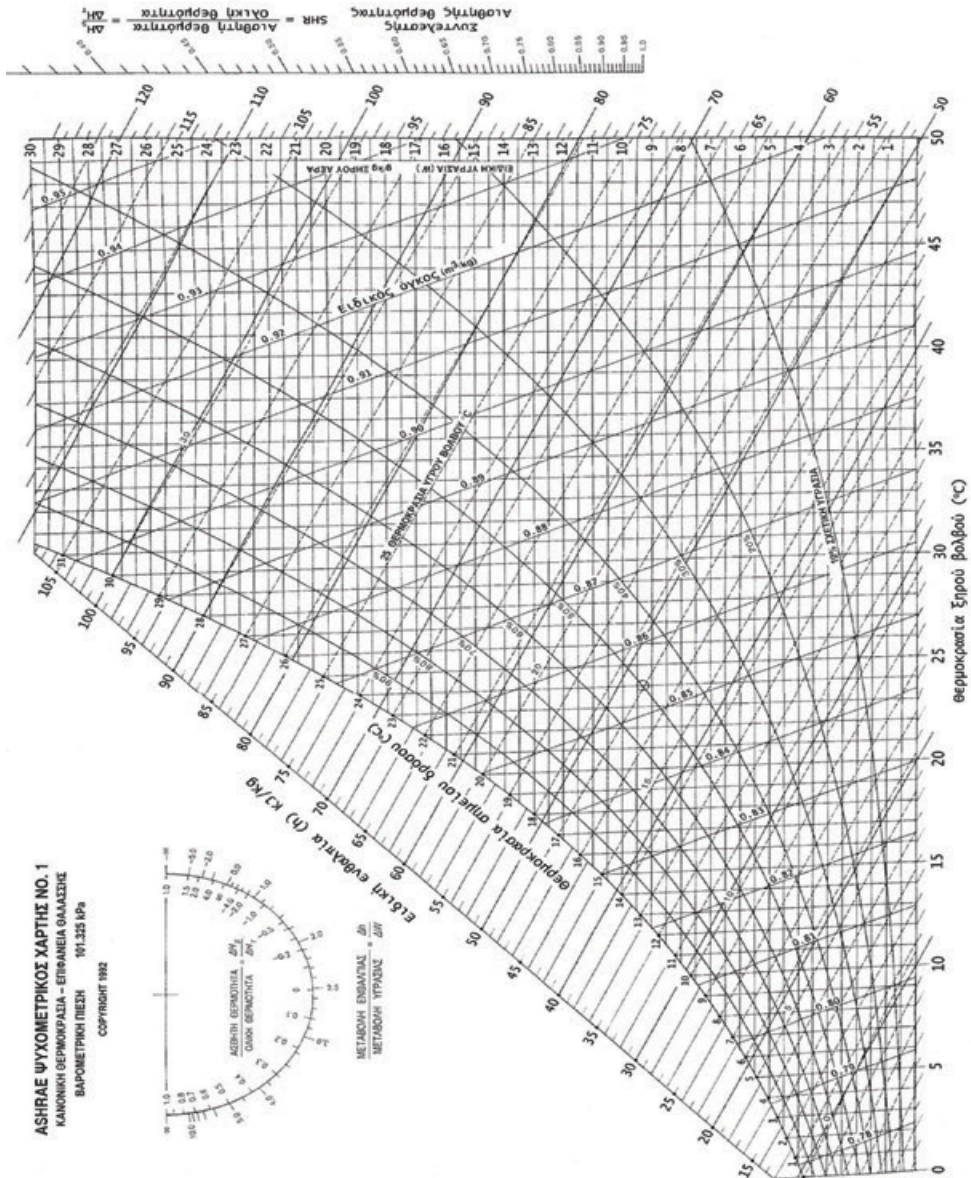
8. Πίνακας και διάγραμμα P-h για ψυκτικό μέσο R410A

Χαρακτηριστικά του R-410A στη γραμμή κορεσμού

Temperature °C	Saturated liquid				Saturated liquid				Specific heat of vaporization kJ/kg
	Saturation Pressure, 10 ⁵ Pa (bar)	Specific weight, kg/m ³	Specific enthalpy kJ/kg	Specific entropy kJ/ (kg*K)	Saturation Pressure, 10 ⁵ Pa (bar)	Specific weight, kg/m ³	Specific enthalpy kJ/kg	Specific entropy kJ/ (kg*K)	
-50	1,123	1339,761	131,4	0,726	1,122	4,526	401,5	1,936	270,1
-45	1,417	1325,036	137,8	0,754	1,415	5,616	404,6	1,924	266,8
-40	1,770	1309,941	144,2	0,782	1,767	6,909	407,5	1,913	263,4
-35	2,191	1294,450	150,7	0,809	2,187	8,435	410,5	1,902	259,8
-30	2,689	1278,534	157,3	0,837	2,683	10,224	413,3	1,891	256,0
-25	3,273	1262,162	164,0	0,864	3,265	12,312	416,1	1,882	252,0
-20	3,954	1245,297	170,9	0,891	3,944	14,738	418,8	1,872	247,8
-15	4,743	1227,897	177,9	0,918	4,730	17,546	421,3	1,863	243,4
-10	5,651	1209,914	185,1	0,945	5,635	20,785	423,8	1,854	238,7
-5	6,690	1191,292	192,5	0,973	6,670	24,511	426,1	1,846	233,6
0	7,872	1171,968	200,0	1,000	7,849	28,790	428,3	1,837	228,3
5	9,211	1151,863	207,7	1,028	9,184	33,696	430,2	1,829	222,5
10	10,719	1130,887	215,7	1,055	10,688	39,317	432,0	1,821	216,3
15	12,410	1108,928	223,9	1,084	12,375	45,759	433,6	1,812	209,6
20	14,299	1085,849	232,5	1,112	14,260	53,149	434,8	1,803	202,4
25	16,399	1061,481	241,3	1,141	16,357	61,643	435,8	1,794	194,5
30	18,725	1035,603	250,5	1,171	18,681	71,440	436,4	1,785	185,9
35	21,293	1007,926	260,2	1,202	21,247	82,798	436,6	1,774	176,4
40	24,116	978,057	270,4	1,233	24,070	96,062	436,2	1,763	165,9
45	27,211	945,435	281,2	1,266	27,165	111,722	435,2	1,750	154,0
50	30,592	909,218	292,8	1,301	30,549	130,504	433,4	1,736	140,6



9. Ψυχομετρικός χάρτης



ΤΕΧΝΙΚΗ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ **ΨΥΚΤΙΚΩΝ**

- Θερμοδυναμικές μεταβολές κύκλου ψύξης με μηχανική συμπίεση ατμών
- Ψυχομετρία



Ινστιτούτο Μικρών Επιχειρήσεων
Γενική Συνομοσπονδία Επαγγελματιών Βιοτεχνών Εμπόρων Ελλάδας
Αριστοτέλους 46, 104 33 Αθήνα, Τηλ. 210 8846852, Fax. 210 8846853
www.imegseevee.gr • info@imegseevee.gr



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ, ΚΟΙΝΩΝΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΝΟΙΑΣ



**ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
"ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ"**
Προσανατολισμός στον Άνθρωπο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

