



ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ
ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ ΓΙΑ ΤΙΣ
ΑΚΑΔΗΜΙΕΣ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Ζ. ΠΑΓΩΝΑΡΗ

Επιμέλεια δ' έκδοσης Νικόλαος Τσίτσος

δ' έκδοση

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: Εισαγωγή

Γενικά	1
------------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: Ορισμοί και μονάδες μέτρησης μεγεθών

2.1 Γενικά	2
2.2 Ουσία ή ύλη στη θερμοδυναμική	2
2.3 Η έννοια του Θερμοδυναμικού Συστήματος ή Συστήματος	3
2.4 Ιδιότητες της ύλης	5
2.5 Διεργασία και θερμοδυναμικός κύκλος	5
2.6 Βασικές μονάδες του Διεθνούς Συστήματος (SI)	6
2.7 Πίεση (P)	7
2.8 Θερμοκρασία (T)	10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: Έργο και θερμότητα

3.1 Γενικά	15
3.2 Έργο (W)	15
3.2.1 Έργο κλειστού συστήματος	17
3.2.2 Δυναμική και κινητική ενέργεια (E_δ και E_k)	20
3.3 Θερμότητα (Q)	21
3.4 Η εσωτερική ενέργεια (U)	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: Ο Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής

4.1 Γενικά	27
4.2 Ο Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής ή το Αξίωμα (Αρχή) Διατήρησης της Ενέργειας	27
4.2.1 Κλειστό Θερμοδυναμικό Σύστημα (ΚΘΣ)	27
4.2.2 Αρχή της Διατήρησης της παροχής Μάζας ($\dot{m}$)	29
4.2.3 Ανοιχτά Θερμοδυναμικά Συστήματα (ΑΘΣ)	34
4.3 Στραγγαλισμός	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: Ιδιότητες καθαρής ουσίας

5.1 Γενικά	45
5.2 Το νερό ως καθαρή ουσία	45
5.3 Στερεά, υγρή και αέρια φάση	45
5.4 Ιδιότητες υδρατμών	46
5.5 Ισορροπία στερεάς, υγρής και αέριας φάσης	48
5.6 Πίνακες θερμοδυναμικών ιδιοτήτων νερού και ατμού	48
5.6.1 Κεκορεσμένο νερό και ατμός	49

5.6.2 Υγρός ατμός	49
5.6.3 Υπέρθερμος ατμός	53
5.6.4 Υπόψυκτο νερό	58
5.7 Πίνακες θερμοδυναμικών ιδιοτήτων ψυκτικών ρευστών	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ: Ιδανικό αέριο – Διεργασίες

6.1 Γενικά	61
6.2 Νόμος του Boyle	61
6.3 Νόμος του Charles	62
6.4 Καταστατική Εξίσωση Τέλειου Αερίου (ΚΕΤΑ)	62
6.5 Ειδική θερμότητα	65
6.6 Διεργασίες αερίων	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ: Ο Δεύτερος Νόμος της Θερμοδυναμικής και ο κύκλος Carnot

7.1 Γενικά	83
7.2 Κυκλικές διεργασίες (θερμοδυναμικός κύκλος)	83
7.3 Ο Δεύτερος Θερμοδυναμικός Νόμος σε έναν κύκλο	85
7.4 Η αρχή της αναστρεψιμότητας	86
7.4.1 Κίνηση ενός σώματος χωρίς τριβή	87
7.4.2 Αδιαβατική εκτόνωση αερίου	87
7.4.3 Ισοθερμοκρασιακή συμπίεση ατμού	87
7.5 Θερμικός βαθμός απόδοσης μηχανής	88
7.6 Ο κύκλος και η μηχανή Carnot	89
7.7 Βαθμός απόδοσης κύκλου Carnot	91
7.8 Ο αντίστροφος ή ανάστροφος κύκλος Carnot (reversed Carnot cycle)	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ: Εντροπία

8.1 Η έννοια της εντροπίας	101
8.2 Η εντροπία συστήματος	102
8.3 Η εντροπία σε κλειστό και σε ανοικτό ΘΣ	102
8.4 Υπολογισμός της εντροπίας για τέλεια αέρια σε κλειστό ΘΣ	104
8.5 Η εντροπία καθαρής ουσίας	107
8.5.1 Διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας (T-s)	108
8.5.2 Διάγραμμα Mollier ενθαλπίας – εντροπίας (h-s)	110
8.5.3 Αλλαγή εντροπίας στερεών και υγρών ουσιών	114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ: Κύκλοι ισχύος ατμού

9.1 Γενικά	117
9.2 Ο κύκλος Carnot με ατμό	118
9.3 Ο κύκλος ισχύος ατμού ή κύκλος Rankine	118
9.3.1 Περιγραφή μηχανικού κύκλου	119
9.3.2 Μελέτη του θερμοδυναμικού κύκλου Rankine	123
9.3.3 Θερμικός βαθμός απόδοσης θερμοδυναμικού κύκλου	130
9.3.4 Σύγκριση μεταξύ θεωρητικού και πραγματικού κύκλου	132

9.4	Αναγεννητικοί κύκλοι	133
9.4.1	Αναγεννητικός κύκλος με έναν προθερμαντήρα	134
9.4.2	Αναγεννητικός κύκλος με τρεις προθερμαντήρες	139
9.5	Κύκλος με αναθέρμανση	143
9.6	Αναγεννητικός κύκλος με αναθέρμανση	146
9.7	Πραγματικοί κύκλοι ατμού	148

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ: Κύκλοι ισχύος μηχανών εσωτερικής καύσης

10.1	Γενικά	153
10.2	Ο κύκλος Diesel με αέρα	153
10.2.1	Θερμοδυναμικός κύκλος – Σημαντικές παρατηρήσεις	153
10.2.2	Στοιχειώδης περιγραφή μηχανής ντήζελ – Μηχανικός κύκλος	154
10.2.3	Ανάλυση θερμοδυναμικού κύκλου	155
10.3	Ο κύκλος Otto με αέρα	163
10.3.1	Στοιχειώδης περιγραφή βενζινομηχανής. Μηχανικός κύκλος	163
10.3.2	Ανάλυση θερμοδυναμικού κύκλου	164
10.4	Μικτός κύκλος	167
10.5	Σύγκριση πραγματικών κύκλων βενζινομηχανής και ντήζελ	170

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΔΕΚΑΤΟ: Αεριοστρόβιλοι

11.1	Γενικά	173
11.2	Ο κύκλος Brayton (ή κύκλος Joule)	173
11.2.1	Περιγραφή μηχανικού κύκλου	174
11.2.2	Ανάλυση θερμοδυναμικού κύκλου	177
11.3	Κύκλος Brayton με προθερμαντήρα αέρα	185
11.4	Κύκλος Brayton με προθερμαντήρα αέρα και αναθερμαντήρα καυσαερίων	187
11.5	Συνδυασμένοι κύκλοι αεριοστροβίλου	189

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΩΔΕΚΑΤΟ: Αεροσυμπιεστές

12.1	Γενικά	191
12.2	Παλινδρομικός αεροσυμπιεστής	191
12.2.1	Αεροσυμπιεστής χωρίς διάκενα	193
12.2.2	Αεροσυμπιεστής με διάκενα	195
12.3	Ογκομετρικός βαθμός απόδοσης	199
12.4	Πολυβάθμιοι αεροσυμπιεστές	202
12.5	Συντελεστές απόδοσης αεροσυμπιεστών	207
12.6	Περιστροφικός αεροσυμπιεστής	209

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΤΡΙΤΟ: Ο ψυκτικός κύκλος

13.1	Γενικά	213
13.2	Ψυκτικά ρευστά	213
13.3	Ψυκτικός κύκλος με μηχανική συμπίεση ατμών ψυκτικού ρευστού	213
13.4	Ανάλυση θερμοδυναμικού κύκλου	215

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: Ροή ρευστού σε προφύσια

14.1 Γενικά	219
14.2 Ροή ρευστού	219
14.3 Στάσιμες ιδιότητες	221
14.4 Αριθμός Mach	222
14.5 Προφύσια	224
14.5.1 Ροή ρευστού μέσα σε προφύσια	224
14.5.2 Ταχύτητα εκτόνωσης	225
14.5.3 Καθορισμός μορφής προφυσίου	227
14.5.4 Κρίσιμη πίεση	227
14.5.5 Βαθμός απόδοσης προφυσίου	230
14.4 Διασκορπιστήρας	232

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΠΕΜΠΤΟ: Μετάδοση θερμότητας

15.1 Γενικά	235
15.2 Τρόποι μετάδοσης θερμότητας	235
15.2.1 Μετάδοση θερμότητας με αγωγιμότητα	236
15.2.2 Μετάδοση θερμότητας με μεταφορά	241
15.2.3 Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία	242
15.3 Μετάδοση θερμότητας με αγωγιμότητα και μεταφορά	245
15.3.1 Επίπεδη πλάκα με μεταφορά θερμότητας στις εξωτερικές επιφάνειες	245
15.3.2 Κυλινδρικός σωλήνας με μεταφορά θερμότητας στην εσωτερική και εξωτερική του επιφάνεια	248
15.3.3 Κρίσιμο πάχος μόνωσης	251
15.4 Μετάδοση θερμότητας σε σφαιρικά κελύφη (δεξαμενές)	253
15.5 Ροή ρευστού και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας α	255

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΕΚΤΟ: Εναλλακτές θερμότητας

16.1 Γενικά	257
16.2 Συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας	257
16.3 Τύποι εναλλακτών θερμότητας	259
16.4 Συντελεστές ρύπανσης	261
16.5 Μέση Λογαριθμική Θερμοκρασιακή Διαφορά (ΜΛΘΔ)	262
16.6 Αποδοτικότητα εναλλακτών	269
Παραρτήματα	275
Ευρετήριο	289
Βιβλιογραφία	292

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Εισαγωγή

Γενικά

Ο όρος **Θερμοδυναμική** (thermodynamics) αποτελείται από τις δύο ελληνικές λέξεις: **θερμο**: θερμό (ζεστό)/θερμότητα + **δυναμική** (έργο). Δηλαδή εκφράζει την δυνατότητα που έχει η θερμότητα να παράγει έργο, «μετακινούμενη» μέσω και μαζί με την ύλη.

Πρόκειται για τον επιστημονικό κλάδο που αντικείμενο εξέτασης του αποτελεί η θερμότητα ως ενεργειακό φαινόμενο και η μεταβολή της σε ποικίλες μορφές ενέργειας.¹

Η μηχανική εγκατάσταση πρόωσης ενός πλοίου, ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και γενικά κάθε μηχανικό σύστημα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελούνται από διάφορες συσκευές και μονάδες που έχουν ως σκοπό την ανταλλαγή και μετατροπή μιας μορφής ενέργειας σε άλλη. Για να γίνει αυτή η ανταλλαγή ή μετατροπή, απαιτείται ένα μέσο μεταφοράς της ενέργειας, το οποίο μπορεί να έχει υγρή, αέρια ή στερεά μορφή. Έτσι για παράδειγμα, όπως θα δούμε αναλυτικότερα παρακάτω, η προωστήρια εγκατάσταση ενός πλοίου με ατμοστρόβιλο αποτελείται από τον λέβητα, τον στρόβιλο, τις αντλίες και άλλες μονάδες όπου μετατρέπεται η ενέργεια. Το μέσο μεταφοράς είναι ο ατμός, που μεταφέρει τη θερμική ενέργεια από τον λέβητα στον ατμοστρόβιλο για την παραγωγή μηχανικού έργου. Η θερμική αυτή ενέργεια μπορεί να προέρχεται είτε από την καύση ενός συμβατικού καυσίμου (π.χ. πετρέλαιο ντήζελ, μαζούτ κ.λπ.) είτε από πυρηνικές αντιδράσεις (π.χ. από σχάσεις U-235 με νετρόνια, σε πυρηνικό αντιδραστήρα). Η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανικό έργο έχει ως αποτέλεσμα την περιστροφή της έλικας που κινεί το πλοίο. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και σε μία εγκατάσταση πρόωσης με μηχανή ντήζελ. Στην περίπτωση αυτή, η πιο πάνω μετατροπή γίνεται στη μηχανή ντήζελ (πετρελαιομηχανή). Το μέσο μεταφοράς της ενέργειας είναι τα προϊόντα της καύσης του καυσίμου με τον αέρα (καυσαέρια) και το τελικό αποτέλεσμα είναι και πάλι η περιστροφή της έλικας που κινεί το πλοίο. Φυσικά, εκτός απ' αυτές τις μετατροπές ενέργειας που αφορούν στην πρόωση ενός πλοίου, έχουμε και δευτερεύουσες μετατροπές, που είναι εξίσου σημαντικές για τη λειτουργία του. Έτσι η θερμική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται με τη βοήθεια κατάλληλων μηχανημάτων σε ηλεκτρική ενέργεια, που με τη σειρά της, εκτός από τον φωτισμό, εξυπηρετεί ζωτικά μηχανήματα ενός πλοίου, όπως το πηδάλιο, την ψυκτική εγκατάσταση, τις κλιματιστικές συσκευές, τα όργανα ναυσιπλοΐας κ.λπ. Βλέπουμε λοιπόν ότι σε μία εγκατάσταση μπορεί να συναντήσουμε μία, δύο ή και περισσότερες μετατροπές ενέργειας, ανάλογα με το τι θέλουμε να πετύχουμε.

Ο κλάδος της Θερμοδυναμικής που ενδιαφέρει περισσότερο τους μηχανικούς ονομάζεται συνήθως **Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική**: αυτή ασχολείται με βασικά λειτουργικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά μηχανών και μηχανημάτων όπως: μηχανές εσωτερικής καύσης, στρόβιλοι, λέβητες, αεροσυμπιεστές, ψυκτικές και κλιματιστικές εγκαταστάσεις κ.λπ., στα οποία μετατρέπεται η ενέργεια για να επιτευχθεί κάποιος συγκεκριμένος σκοπός.

¹ Λεξικό της Νέας Ελληνικής Γλώσσας, Γ. Μπαμπινιώτη, Κέντρο Λεξικολογίας, Αθήνα, 1998.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1
Παραδείγματα καθαρής ουσίας και μείγματος

Υλη	Ομογενής σε φυσική σύσταση	Ομογενής σε χημική σύσταση	Απουσία χημικής αντίδρασης	Καθαρή ύλη
Ατμός	✓	✓	✓	✓
Ατμός Νερό	✓	✓	✓	✓
Αέρας (O ₂ + N ₂ αέριο)	✓	✓	✓	✓
Αέρας + ατμός καυσίμου Χωρίς αντίδραση	✓	✓	✓	✓
Αέρας + ατμός καυσίμου Υγρό καύσιμο Χωρίς αντίδραση	✗	✓	✓	✗
Αέρας + ατμός καυσίμου Καυσάερια Φλόγα	✓	✗	✗	✗
Καυσάερια	✓	✓	✓	✓

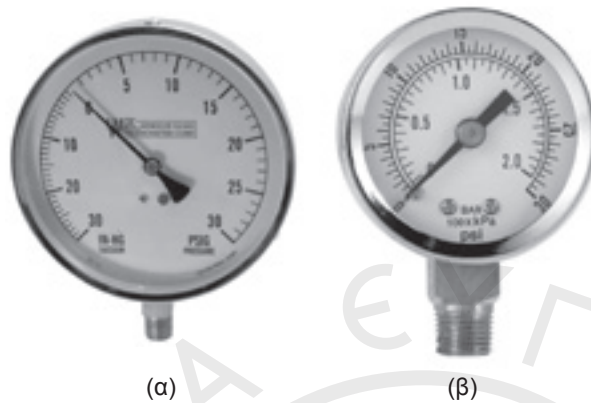
2.3 Η έννοια του Θερμοδυναμικού Συστήματος ή Συστήματος

Η μετατροπή μιας μορφής ενέργειας σε άλλη προϋποθέτει την ύπαρξη ενός μέσου μεταφοράς της ενέργειας. Το μέσο μεταφοράς δεν είναι παρά ύλη που βρίσκεται μέσα σε κάποιο μηχανικό μέσο, π.χ. σε έναν λέβητα, σε έναν στρόβιλο, σε μία αντλία νερού κ.λπ. Για να μελετήσουμε τη μετατροπή της ενέργειας, εισάγουμε έναν καινούργιο όρο, το **θερμοδυναμικό σύστημα** (ΘΣ). Η σπουδαιότητα του όρου αυτού οφείλεται στο γεγονός ότι, όπως θα δούμε παρακάτω, για να εξετάσουμε θερμοδυναμικά μία μηχανική εγκατάσταση, θα πρέπει να ορίσουμε το αντίστοιχο ΘΣ.

Ένα ΘΣ μπορεί να οριστεί ως ένας **κλειστός χώρος** που περιέχει **ύλη**. Τα όρια του συστήματος μπορεί να είναι σταθερά ή μπορεί να μεταβάλλονται σε μορφή, σχήμα και θέση. Η ύλη μέσα στο σύστημα μπορεί να βρίσκεται σε μία από τις τρεις μορφές –στερεή, υγρή ή αέρια– ή σε κάποιον συνδυασμό αυτών των μορφών και ονομάζεται **εργαζόμενο μέσον**. Καθετί έξω από το σύστημα το ονομάζουμε **περιβάλλον**. Το ΘΣ επικοινωνεί με το περιβάλλον του μέσω του **ορίου** του ή του **περιβλήματός** του. Το περιβάλλον είναι επίσης ένα ΘΣ, οπότε οι συναλλαγές γίνονται μεταξύ δύο ΘΣ. Τα όρια του συστήματος δεν έχουν καμιά φυσική σημασία, αλλά τα χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε και να αναγνωρίσουμε το σύστημα που πρόκειται να εξετάσουμε· η εκλογή του συστήματος γίνεται από εμάς και εξαρτάται από το αντικείμενο της μελέτης μας. Έτσι, σε ορισμένες περιπτώσεις διάφορες μονάδες όπως μηχανές, αντλίες, λέβητες κ.λπ., μπορούμε να τις θεωρήσουμε ως «ύλη» που περιέχεται σ' ένα ΘΣ. Σε άλλες περιπτώσεις κάθε μία απ' αυτές τις μονάδες μπορεί να

ακόμα και μέσα σε εργαστήρια. Τα όργανα μέτρησης του κενού ονομάζονται **κενόμετρα** (vacuum gages).

Στο σχήμα 2.6 φαίνεται ένα μανόμετρο-κενόμετρο και ένα απλό κενόμετρο. Η ατμοσφαιρική πίεση μετριέται με συσκευές που ονομάζονται **βαρόμετρα**, γι' αυτό συχνά αναφέρεται και ως **βαρομετρική πίεση** (barometric pressure).



Σχ. 2.6
Τύποι μανομέτρων:
α) μανόμετρο - κενόμετρο, β) κενόμετρο

Η αρχή λειτουργίας ενός μανομέτρου⁶ φαίνεται στο σχήμα 2.7. Ένας σωλήνας σε σχήμα U συνδέεται με δύο σφαιρικά δοχεία με αέρια, που έχουν πίεση P_1 και P_2 . Ο σκοπός του μανομέτρου είναι να μας δώσει τη διαφορά μεταξύ P_1 και P_2 . Μέσα στον σωλήνα υπάρχει υγρό πυκνότητας ρ , που είναι πολύ μεγαλύτερη από τις πυκνότητες των αερίων των δοχείων.

Στο σχήμα 2.7 ισχύουν για τις επιφάνειες στα σημεία A, B:

$$P_A = P_B \quad (2.4)$$

$$P_B = \rho g h + P_2 \quad (2.5)$$

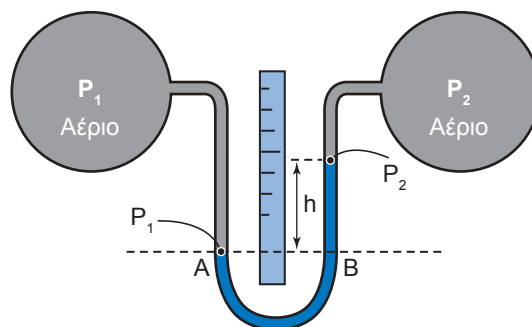
όπου: ρ η πυκνότητα και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

$$\text{και } \rho g h = P_g \quad (2.5a)$$

η υδροστατική πίεση στο B λόγω του ύψους h της στήλης υγρού. Για το σχήμα 2.8 έχουμε

$$P_{\text{υδροστατική}} = P_g = \rho g h \quad (2.6)$$

πάνω στην επιφάνεια ΓΔ. Πολλές φορές αντί για την πίεση P_g μας δίνεται το ύψος h (ύψος



Σχ. 2.7
Παράσταση αρχής λειτουργίας μανομέτρου

⁶ Περισσότερα στο βιβλίο *Μηχανική των Ρευστών*, Ν. Πάντζαλη (επιμ. Ν. Τσίτσος), εκδ. Ίδρυμα Ευγενίδου, 2017.

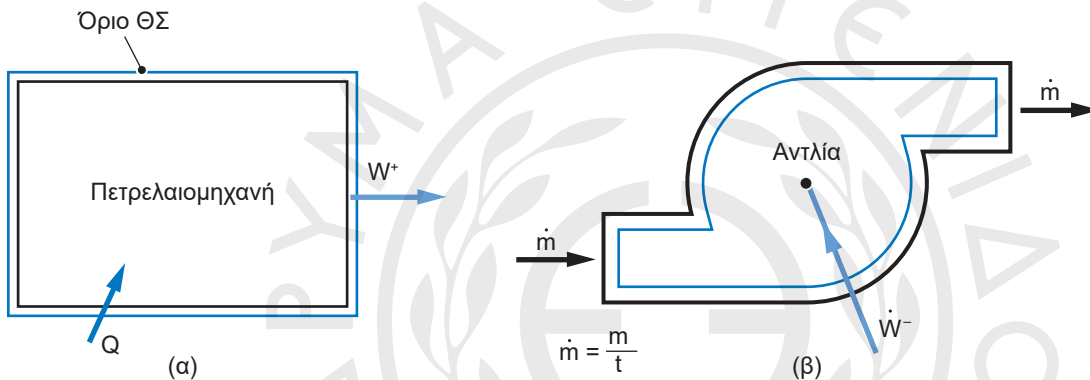


Σχ. 3.3
Συμβατική απεικόνιση θετικού και αρνητικού έργου

θετικό το έργο που παράγεται από το σύστημα [σχ. 3.3(α)] και **αρνητικό** το έργο που δίνεται προς το σύστημα [σχ. 3.3(β)].

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Στο σχήμα 3.4(α) έχουμε παραγωγή μηχανικού έργου (αποδίδεται στο περιβάλλον) και στο σχήμα 3.4(β) απορροφάται έργο (ισχύς) από το περιβάλλον.



Σχ. 3.4

3.2.1 Έργο κλειστού συστήματος

Θα εξετάσουμε τώρα το έργο που παράγεται από ένα κλειστό ΘΣ, **ένα σύστημα δηλαδή όπου δεν έχουμε ροή μάζας** και το οποίο θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στα επόμενα κεφάλαια. Ένα τέτοιο σύστημα είναι ο κύλινδρος με το έμβολο (σχ. 3.5). Με διακεκομμένη γραμμή καθορίζονται τα όρια του συστήματος, τα οποία περικλείουν το αέριο που υπάρχει μέσα στον κύλινδρο. Κάθε τι έξω απ' αυτά είναι το περιβάλλον του συστήματος. Το αέριο του κυλίνδρου έχει αρχικά πίεση P_1 και όγκο V_1 [σχ. 3.5(α)]. Η πίεση αυτή ωθεί το έμβολο μέχρι κάποια άλλη θέση, όπου έχουμε πίεση P_2 και όγκο V_2 [σχ. 3.5(β)]. Είχαμε έτσι την εκτέλεση μιας διεργασίας από το σύστημα, κατά την οποία η πίεση του αερίου μειώθηκε, $P_1 > P_2$, και ο όγκος αυξήθηκε, $V_2 > V_1$, καθώς και την παραγωγή μηχανικού έργου, το οποίο πήραμε με τη μετακίνηση του εμβόλου. Το έργο αυτό είναι θετικό, γιατί έγινε **από** το σύστημα προς το περιβάλλον, δηλαδή από τη μάζα του αερίου προς το έμβολο.

Η ακριβής μαθηματική σχέση για τον υπολογισμό του μηχανικού έργου ενός συστήματος είναι πιο πολύπλοκη από τη σχέση που δώσαμε με την εξίσωση (3.1). Σε κάποια τυχαία θέση του εμβόλου, **η πίεση P του αερίου ασκεί δύναμη F επάνω στο έμβολο ίση με $F = PA$, όπου A η επιφάνεια του εμβόλου**. Εάν από τη θέση αυτή το έμβολο μετακινηθεί κατά μία πολύ μικρή απόσταση ds , τότε το πολύ μικρό έργο dW που παίρνουμε από το έμβολο είναι:

$$dW = F ds \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_a q + \dot{m}_a (h_1 - h_2) = 0 \quad (2)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_2 - h_1) = \frac{34.100}{3600} \text{ kg/s} \times (160 - 2565) 10^3 \text{ J/kg}$$

$$\dot{Q} = 9,47 \text{ kg/s} \times (-2405) \times 10^3 \text{ J/s} = -22.775 \times 10^3 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = -22.775 \text{ kW}$$

β) Εξετάζοντας τον εναλλακτήρα θερμότητας του νερού θάλασσας, ισχύουν σύμφωνα με τις παραδοχές του ερωτήματος (α):

$$\dot{m}_\theta q + \dot{m}_\theta h_3 = \dot{m}_\theta h_4 \quad (3)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_\theta (h_4 - h_3) \quad (4)$$

$$\text{ισχύει:} \quad h_4 - h_3 = C_p (T_4 - T_3) \quad (5)$$

όπως θα δούμε σε επόμενα κεφάλαια. Από τις (4) και (5) έχουμε:

$$\dot{m}_\theta = \frac{\dot{Q}}{C_p (T_4 - T_3)} \quad (6)$$

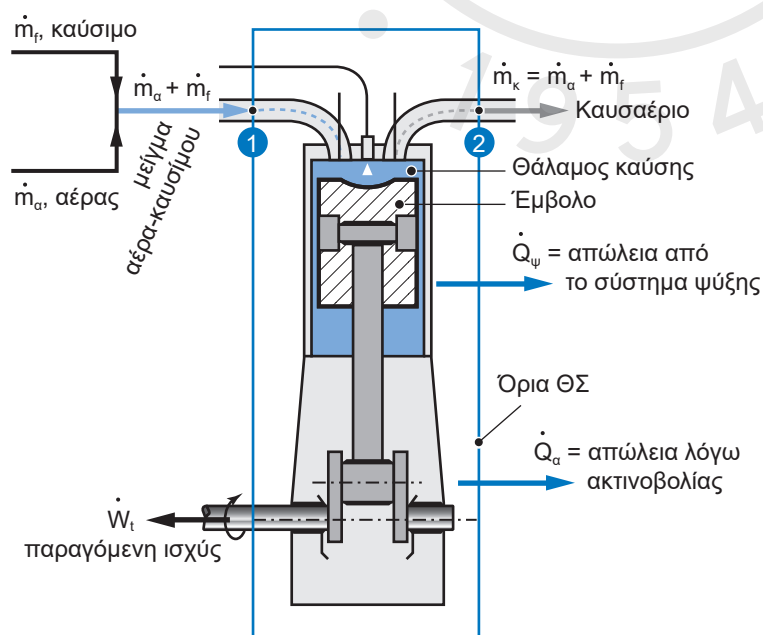
Το C_p δίνεται στην εκφώνηση: $C_p = 4,19 \text{ kJ/kgK}$.

Το $\dot{Q}$ ισούται με το ποσό θερμικής ισχύος που φεύγει από τον ατμό του νερού.

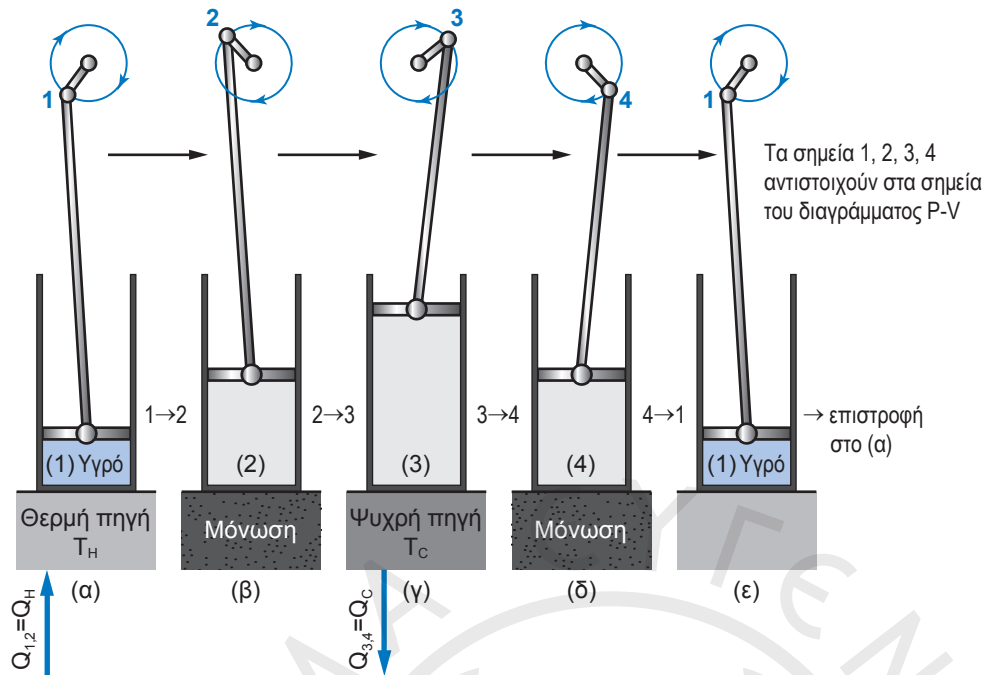
$$\text{Άρα:} \quad \dot{m}_\theta = \frac{22.775 \times 10^3 \text{ W}}{4,19 \times 10^3 \text{ J/kgK} [(24 + 273) - (13 + 273)] \text{ K}} \quad (7)$$

$$\dot{m}_\theta = 494,14 \text{ kg/s}$$

4. Η βενζινομηχανή ενός μηχανήματος (σχ. 4.12) επάνω σε ένα πλοίο έχει ισχύ 50 kW. Στον θάλαμο καύσης εισέρχονται 15 kg/h καύσιμο και 215 kg/h αέρας. Το νερό που ψύχει τη μηχανή απορροφά θερμότητα 42 kJ/s, ενώ λόγω ακτινοβολίας έχουμε απώλεια θερμότητας



Σχ. 4.12
Βενζινομηχανή



Σχ. 7.10

Σχηματική παράσταση μηχανής Carnot

7.7 Βαθμός απόδοσης κύκλου Carnot

Από την ανάλυση του κύκλου Carnot αποδεικνύεται ότι το καθαρό έργο (W ή W_{net} ή $W_{\omega\phi}$) που παράγεται δίνεται από τη σχέση:

$$W = m R T_H \ln \frac{V_2}{V_1} + m R T_C \ln \frac{V_4}{V_3} \quad (7.14)$$

Απόδειξη της (7.14).

Από την (7.11) έχουμε:

$$W_{\omega\phi} = Q_H - Q_C$$

και αν αντικαταστήσουμε τις (7.15) και (7.16) παίρνουμε την (7.14). Σύμφωνα με το σχήμα 7.9, ισχύουν:

$$W_{1,2,3,4,1} = \int_{1,2,3,4,1} P dV = \int_1^2 P dV + \int_2^3 P dV + \int_3^4 P dV + \int_4^1 P dV$$

$$\int_1^2 P dV = P_1 V_1 \cdot n \frac{V_2}{V_1} = m R T_H \cdot n \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (\text{ισόθερμη}) \quad (\alpha)$$

$$\int_2^3 P dV = \frac{P_3 V_3 - P_2 V_2}{1-k} = \frac{m R T_C - m R T_H}{1-k} \quad (\text{αδιαβατική}) \quad (\beta)$$

$$\int_3^4 P dV = P_3 V_3 \cdot n \frac{V_4}{V_3} = m R T_C \cdot n \left(\frac{V_4}{V_3} \right) \quad (\text{ισόθερμη}) \quad (\gamma)$$

$$\int_4^1 P dV = \frac{P_1 V_1 - P_4 V_4}{1-k} = \frac{m R T_H - m R T_C}{1-k} \quad (\text{αδιαβατική}) \quad (\delta)$$

8.5.1 Διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας (T-s)

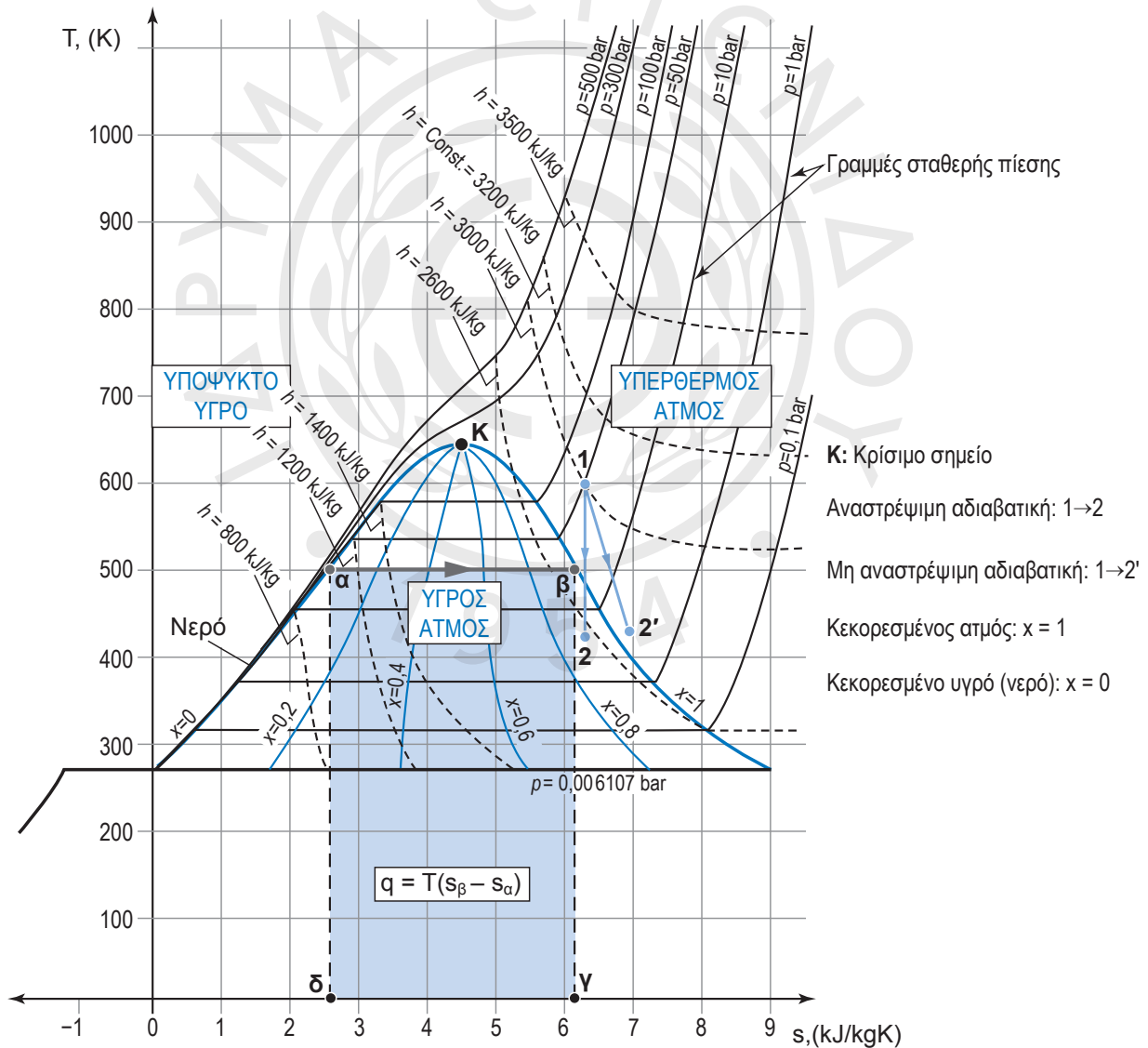
Στο σχήμα 8.3 φαίνεται το διάγραμμα θερμοκρασίας – εντροπίας (T-s) του ατμού, όπου περιλαμβάνονται οι περιοχές του κεκορεσμένου νερού, υγρού ατμού και υπέρθερμου ατμού. Είναι πολύ χρήσιμο, γιατί περιέχει τα εξής βασικά στοιχεία:

- 1) Οι επιφάνειες επάνω στο διάγραμμα έχουν τις μονάδες του έργου (kJ).
- 2) Στην περιοχή του υγρού ατμού οι γραμμές σταθερής πίεσης είναι οριζόντιες.
- 3) Σε μία αναστρέψιμη διεργασία, η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη είναι ίση με τη μεταφορά της θερμότητας κατά τη διάρκεια της διεργασίας αυτής.

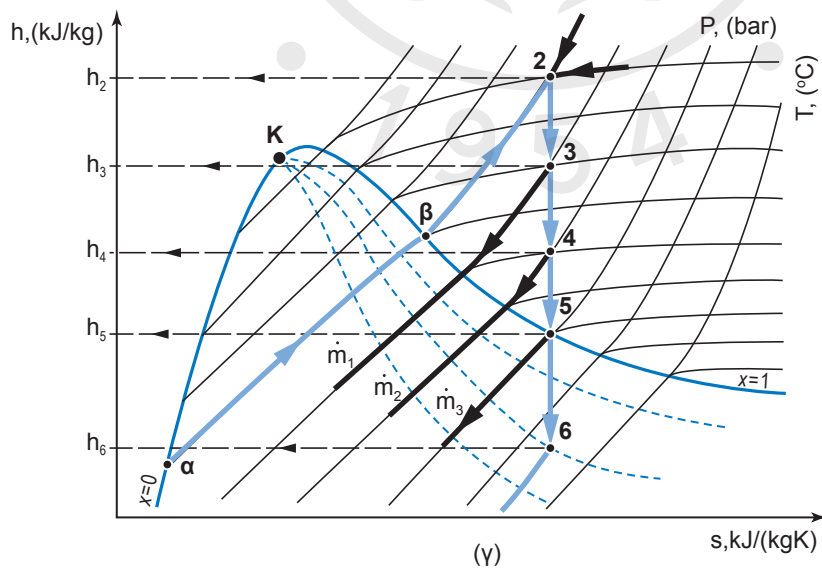
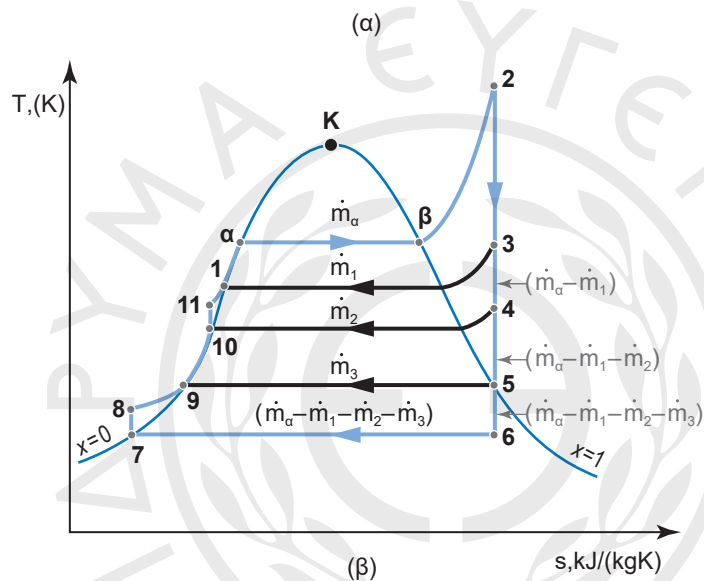
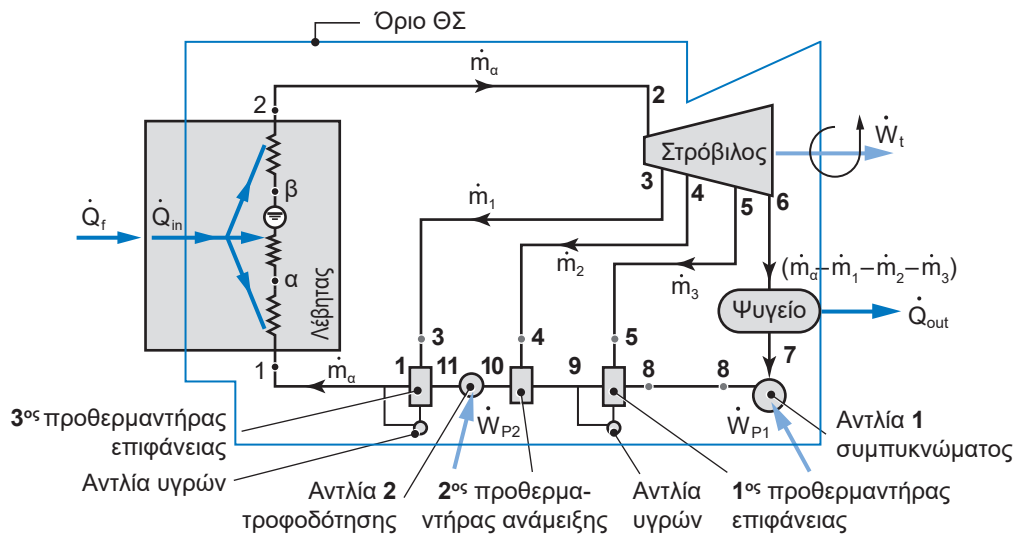
Στη διάρκεια της αναστρέψιμης ισοθερμοκρασιακής διεργασίας αβ (σχ. 8.3) το ποσό της θερμότητας q που μεταφέρεται, ισούται με:

$$q = T (s_\beta - s_\alpha) \quad (8.8)$$

Στο διάγραμμα T-s (σχ. 8.3) η ποσότητα $T (s_\beta - s_\alpha)$ είναι φυσικά η επιφάνεια αβγδ κάτω από τη γραμμή αβ.



Σχ. 8.3
Διάγραμμα ατμού T-s



Σχ. 9.28

Εγκατάσταση ατμού με τρεις προθερμαντήρες.

α) Σχηματικό διάγραμμα, β) διάγραμμα T-s και γ) διάγραμμα Mollier

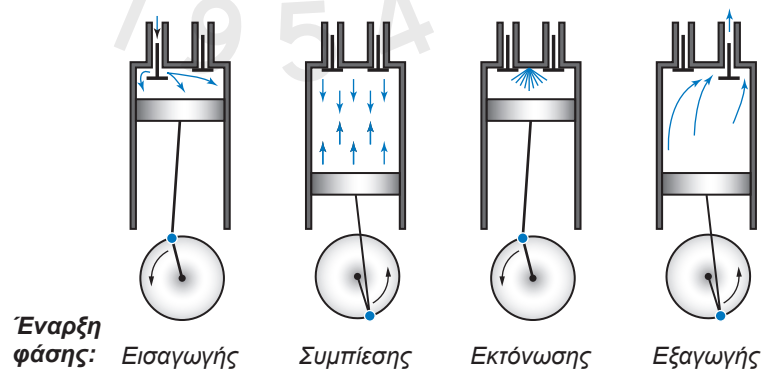
3) **Ο κύκλος είναι «κλειστός».** Στην πράξη, βέβαια, ο κύκλος μιας μηχανής ντήζελ είναι «ανοικτός», γιατί στην αρχή του δίνουμε αέρα για την καύση και στο τέλος τα καυσαέρια, που είναι προϊόντα της καύσης, οδηγούνται στην ατμόσφαιρα· ενώ στον «κλειστό» κύκλο, το εργαζόμενο μέσο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Αφού όμως θεωρήσαμε ότι το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας (ατμοσφαιρικός), μπορούμε προσεγγιστικά να δεχτούμε αυτή την απλοποίηση.

10.2.2 Στοιχειώδης περιγραφή μηχανής Diesel – Μηχανικός κύκλος²

Ένας κύλινδρος μηχανής ντήζελ φαίνεται στο σχήμα 10.1. Στο επάνω μέρος του κυλίνδρου είναι τοποθετημένες οι βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής· από τις βαλβίδες εισαγωγής εισέρχεται ο αέρας που χρειάζεται για την καύση και από τις βαλβίδες εξαγωγής εξέρχονται τα προϊόντα της καύσης, δηλαδή τα καυσαέρια (σχ. 10.1). Ανάμεσα από τις βαλβίδες βρίσκεται ο καυστήρας, ο οποίος δίνει το καύσιμο στη μηχανή. Αν η μηχανή προορίζεται για την πρόωση ενός πλοίου, τότε ο στροφαλοφόρος άξονας συνδέεται με τον ελικοφόρο άξονα, ο οποίος στην άκρη του φέρει την έλικα που δίνει κίνηση στο πλοίο. Αν η μηχανή προορίζεται για την παραγωγή της ηλεκτρικής ισχύος του πλοίου, τότε ο στροφαλοφόρος άξονας συνδέεται με τη γεννήτρια.

Η λειτουργία της μηχανής αρχίζει με την εισαγωγή του αέρα μέσα στον χώρο καύσης, όπου μετά την παροχή του καυσίμου γίνεται η ανάφλεξη. Το αποτέλεσμα της ανάφλεξης είναι η παραγωγή των καυσαερίων και συγχρόνως η αύξηση της θερμοκρασίας στον χώρο καύσης. Με την αύξηση της θερμοκρασίας έχουμε αύξηση και της πίεσης, η οποία αναγκάζει το έμβολο να κινηθεί. Η κίνηση του εμβόλου μεταφέρεται μέσω του διωστήρα στον στροφαλοφόρο άξονα, ο οποίος αρχίζει να κινείται περιστροφικά, παρασύροντας, ανάλογα με την περίπτωση, τον ελικοφόρο άξονα ή τον άξονα της γεννήτριας. Έτσι η παλινδρομική κίνηση του εμβόλου μετατρέπεται σε περιστροφική κίνηση του στροφαλοφόρου άξονα, που μας δίνει το ωφέλιμο έργο της μηχανής. Για να συνεχίσει η μηχανή τη λειτουργία της, τα καυσαέρια, από τον χώρο καύσης οδηγούνται μέσω των βαλβίδων εξαγωγής στην ατμόσφαιρα, ενώ μια νέα ποσότητα αέρα και καυσίμου εισέρχεται στον ίδιο χώρο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται (σχ. 10.1).

Από την πιο πάνω περιγραφή βλέπουμε ότι από την εισαγωγή του αέρα και του καυσίμου μέχρι την εξαγωγή των καυσαερίων και τη νέα εισαγωγή αέρα-καυσίμου, περνάμε από διάφορες φάσεις που έχουν σχέση τόσο με τον μηχανισμό της μηχανής όσο και με τη μετατροπή των ενεργειών.



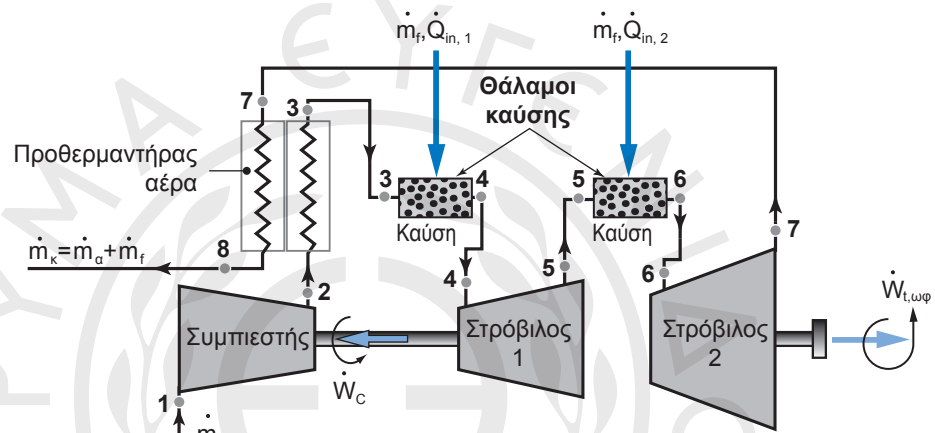
Σχ. 10.1

Φάσεις λειτουργίας μηχανής ντήζελ

² Περισσότερα στο βιβλίο *Μηχανές Εσωτερικής Καύσης*, Λ. Κλιάνη–Ν. Ιωάννη–Ι.Σιδέρη, εκδ. Ιδρύματος Ευγενίδου, 2018.

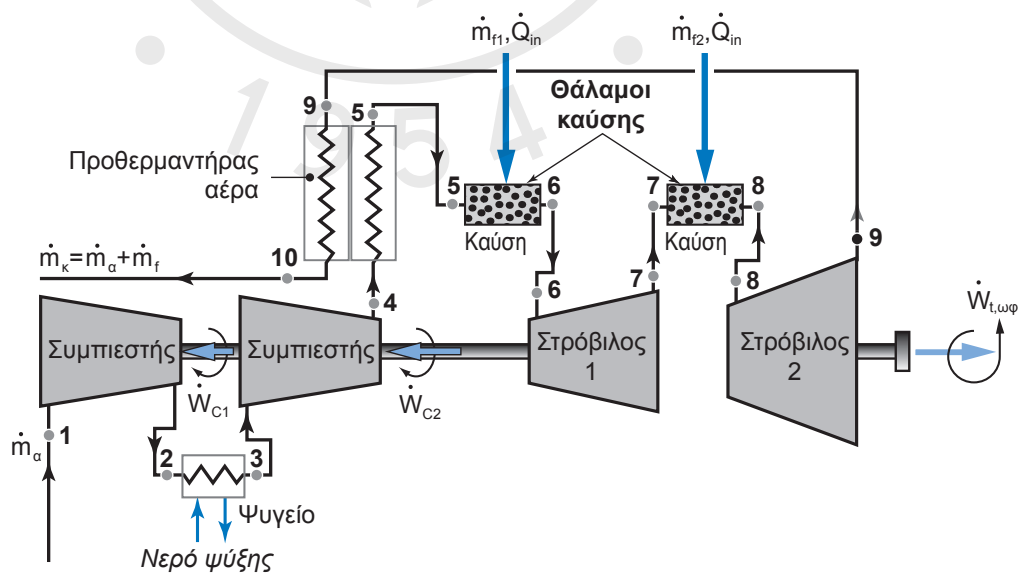
Στην ανάλυση του κύκλου Rankine είχαμε δει ότι ο βαθμός απόδοσης του κύκλου μπορεί να βελτιωθεί με την **αναθέρμανση** του ατμού μετά από μερική εκτόνωση στον στρόβιλο. Το ίδιο μπορεί να γίνει και στον αεριοστρόβιλο αν χωριστεί ο στρόβιλος σε δύο μέρη και περάσουν τα καυσαέρια του πρώτου στρόβιλου μέσα από δεύτερο θάλαμο καύσης (αναθερμαίνονται). Μετά την αναθέρμανση (reheat), τα καυσαέρια μπαίνουν στον δεύτερο στρόβιλο όπου εκτονώνονται μέχρι την ατμοσφαιρική πίεση. Στο σχήμα 11.19 φαίνεται η σχηματική παράσταση ενός αεριοστρόβιλου με προθερμαντήρα αέρα και αναθερμαντήρα καυσαερίων.

Ένας άλλος τρόπος βελτίωσης του βαθμού απόδοσης του αεριοστρόβιλου είναι η μείωση του έργου του συμπιεστή. Αυτό μπορεί να γίνει με τη συμπίεση του αέρα σε δύο στάδια και την ψύξη του, καθώς περνά από το ένα στάδιο στο άλλο. Στο σχήμα 11.20 φαίνεται παραστατικά η διάταξη των μονάδων αυτών σε έναν αεριοστρόβιλο.



Σχ. 11.19

Σχηματική παράσταση αεριοστρόβιλου με προθερμαντήρα αέρα και αναθερμαντήρα καυσαερίων

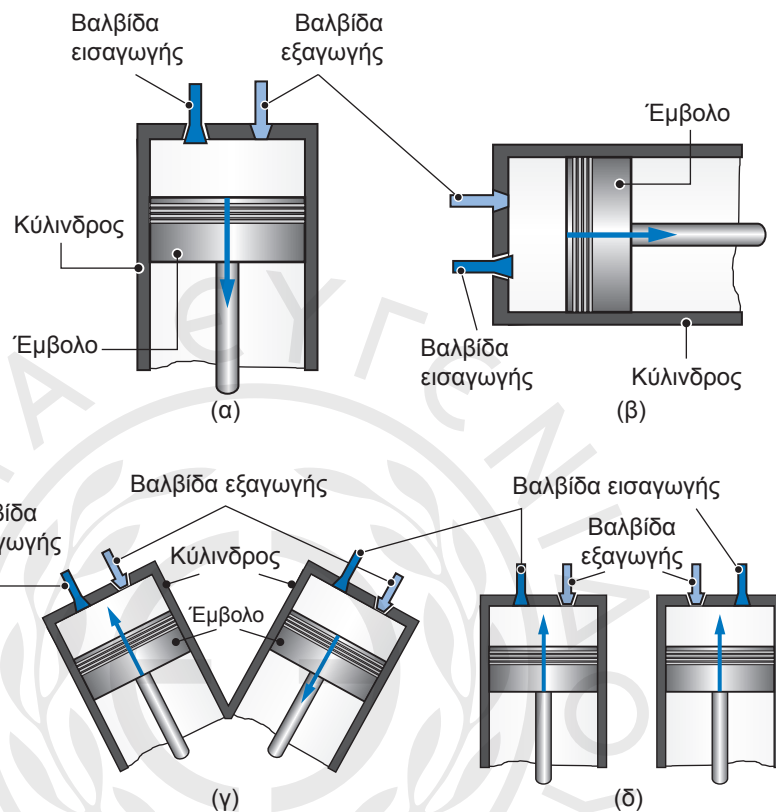


Σχ. 11.20

Σχηματική παράσταση αεριοστρόβιλου με προθερμαντήρα αέρα, αναθερμαντήρα καυσαερίων

μορφής του σχήματος 12.3 ονομάζονται και **αεροσυμπιεστές απλής ενέργειας**, γιατί συμπιέζουν τον αέρα **μόνο** κατά τη μία διαδρομή του εμβόλου. Υπάρχουν όμως αεροσυμπιεστές που συμπιέζουν τον αέρα και στις δύο διαδρομές του εμβόλου (σχ. 12.4), τους οποίους ονομάζουμε **αεροσυμπιεστές διπλής ενέργειας**.

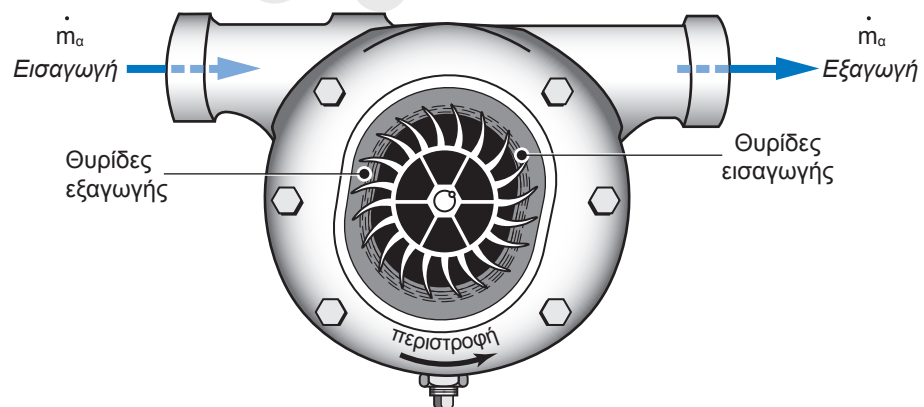
Στη θερμοδυναμική ανάλυση που ακολουθεί, θα εξετάσουμε μόνο τον αεροσυμπιεστή



Σχ. 12.1

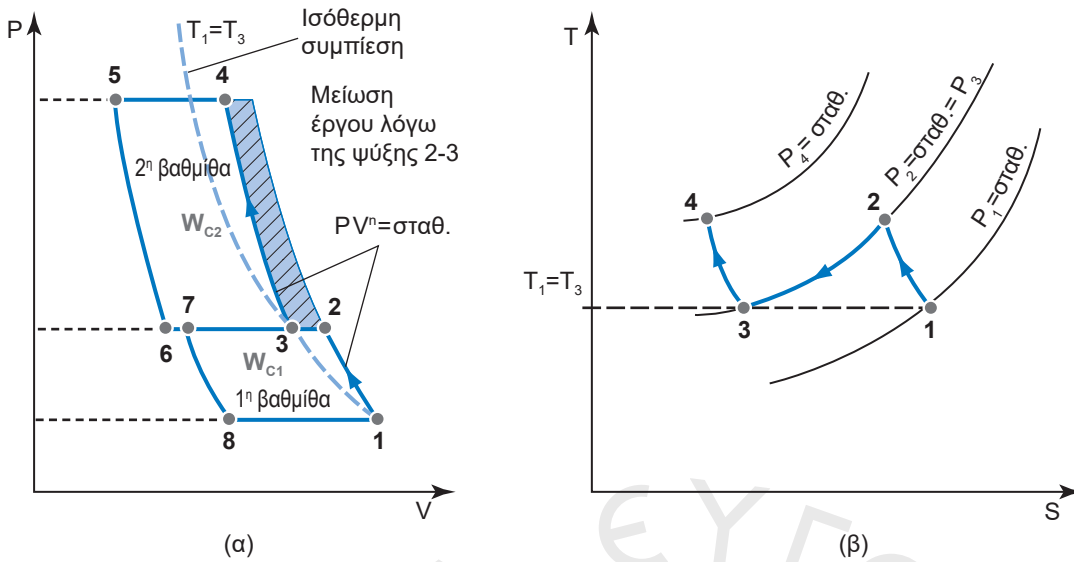
Είδη παλινδρομικών αεροσυμπιεστών:

α) Κατακόρυφος, β) οριζοντιος, γ) υπό γωνία και δ) δύο βαθμίδων



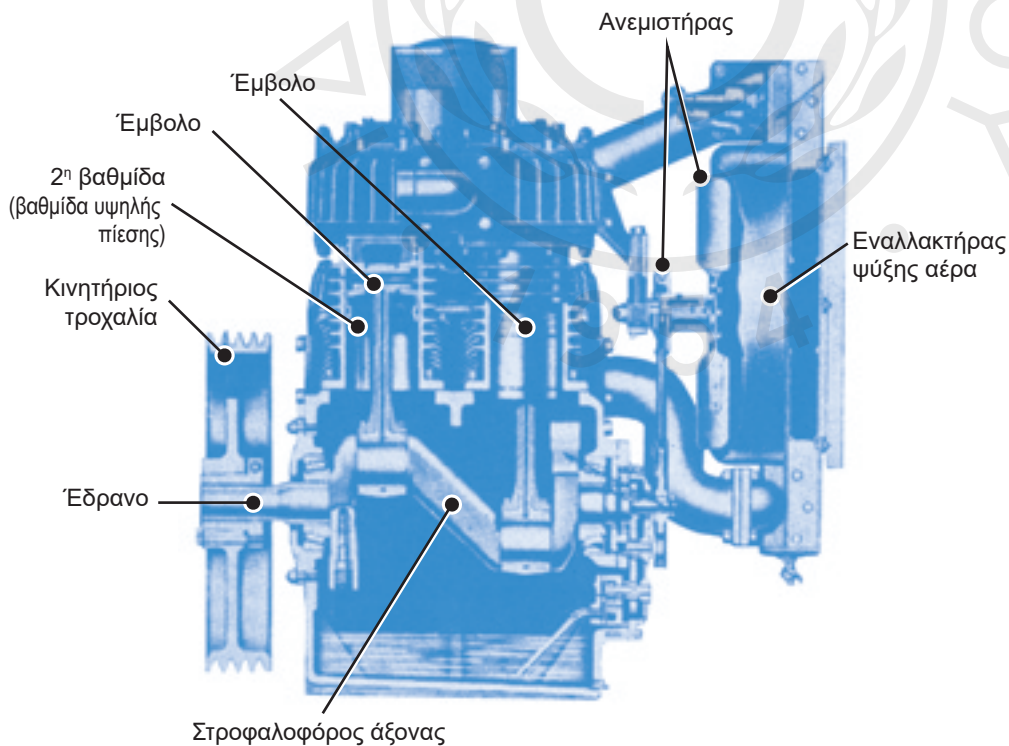
Σχ. 12.2

Περιστροφικός αεροσυμπιεστής



Σχ. 12.11

α) Διάγραμμα P-V για διβάθμιο παλινδρομικό αεροσυμπιεστή,
β) διάγραμμα T-S για διβάθμιο αεροσυμπιεστή και ενδιάμεση ψύξη



Σχ. 12.12

Διβάθμιος αεροσυμπιεστής με ενδιάμεση ψύξη

ΠΙΝΑΚΑΣ 12.3
Αντιστοίχιση των θέσεων
των βαλβίδων των
δύο κυλίνδρων

1η βαθμίδα	2η βαθμίδα
2 → 6	↓
↓	↓
7 → 3	↓
↓	↓
8 → 4	↓
↓	↓
1 → 5	↓
↓	↓
2 → 6	↓

Βασική παρατήρηση συγχρονισμού βαλβίδων: Όταν ανοίξει η βαλβίδα εξαγωγής της 1ης βαθμίδας (σημείο 2), τότε πρέπει να ανοίξει και η βαλβίδα εισαγωγής της 2ης βαθμίδας (σημείο 6).

12.6 Περιστροφικός αεροσυμπιεστής⁵

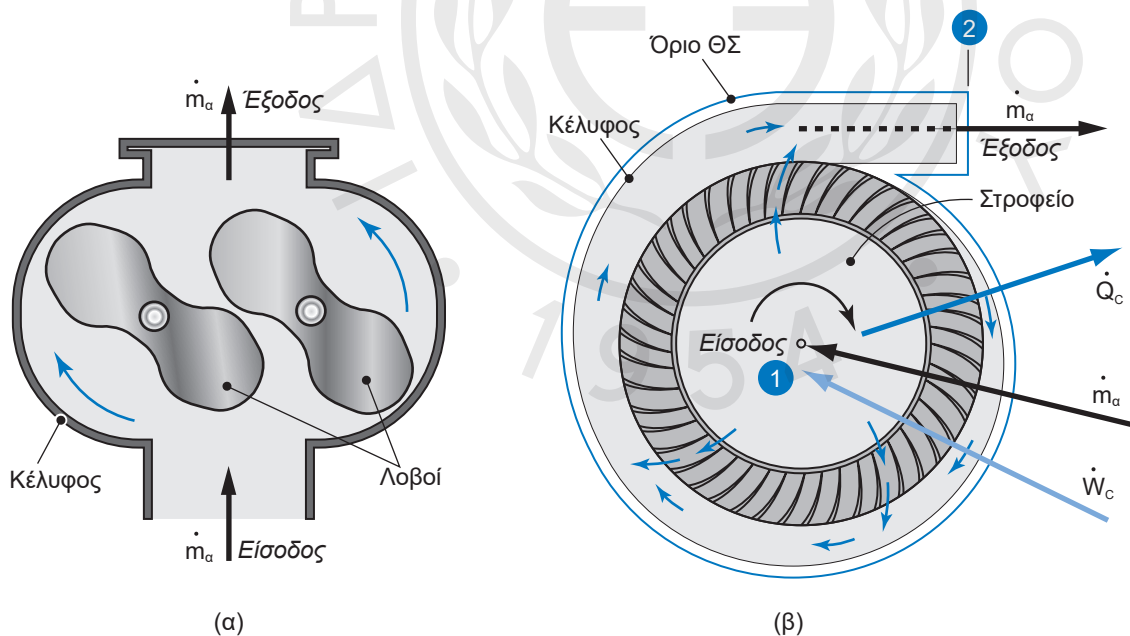
Υπάρχουν δύο ειδών περιστροφικοί αεροσυμπιεστές: ο **περιστροφικός συμπιεστής με λοβούς** [σχ. 12.17(α)] και ο **περιστροφικός συμπιεστής με στροφέιο** [σχ. 12.17(β)]. Ο περιστροφικός αεροσυμπιεστής με λοβούς χρησιμοποιείται κυρίως για την υπερπλήρωση των μηχανών ντήζελ. Ο αέρας παγιδεύεται από τους λοβούς και το κέλυφος και συμπιέζεται μέχρι την πίεση κατάθλιψης. Η ελευθερία μεταξύ των λοβών και του κελύφους και μεταξύ των ίδιων των λοβών είναι πολύ μικρή, ώστε να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες του αέρα από τον χώρο της κατάθλιψης προς τον χώρο της αναρρόφησης. Από το σχήμα 12.17(α) παρατηρούμε επίσης ότι οι λοβοί στρέφουν με αντίθετη φορά.

Ο περιστροφικός (ή φυγοκεντρικός) αεροσυμπιεστής με στροφέιο [σχ. 12.17(β)] έχει διαφορετική αρχή λειτουργίας. Ο αέρας εισέρχεται από το κέντρο του στροφείου, δηλαδή κατά τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής, και περνά μέσα από σταθερά και κινητά πτερύγια όπου και συμπιέζεται. **Αυτό το είδος των αεροσυμπιεστών χρησιμοποιείται στους αεροστρόβιλους που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έχουν μεγάλο όγκο παροχής αέρα, αλλά η αύξηση της πίεσης είναι μικρή.**

Κάνοντας ενεργειακό ισολογισμό⁶ στον συμπιεστή του σχήματος 12.17β, **αμελώντας την δυναμική και κινητική ενέργεια και θεωρώντας το κέλυφος αδιαβατικά μονωμένο** $\dot{Q} = 0$, καθώς **και ότι βρισκόμαστε σε συνθήκες σταθερής ροής (steady flow) και σε σταθερή κατάσταση (steady state)**, τότε ισχύουν:

$$\dot{W}_{c,πρ} + \dot{m}_a h_1 = \dot{m}_a h_2' \quad (12.20)$$

$$\text{ή } \dot{W}_{c,πρ} = \dot{m}_a (h_2' - h_1) = \dot{m}_a c_p (T_2' - T_1) \quad (12.21)$$



Σχ. 12.17

Περιστροφικός αεροσυμπιεστής: α) Με λοβούς και β) με στροφέιο

⁵ Περισσότερα στο βιβλίο *Βοηθητικά Μηχανήματα Πλοίων* Γ. Δάγκινη - Α. Γλύκα, εκδ. Ίδρυμα Ευγενίδου, 2017.

⁶ Υπενθυμίζουμε ότι το έργο αφορά αυτό που παραλαμβάνει το εργαζόμενο μέσο. Για να εκτιμήσουμε αυτό που πραγματικά από το περιβάλλον προσφέρεται, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τους βαθμούς απόδοσης.

14.5.3 Καθορισμός μορφής προφυσίου

Η μορφή ενός προφυσίου καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του ρευστού. Από την εξίσωση (14.7) βλέπουμε ότι για μια δεδομένη παροχή μάζας $\dot{m}$ η διατομή A εξαρτάται από τον λόγο v/u . Δηλαδή αν ο λόγος v/u αυξάνει, η διατομή A ελαττώνεται και αντίστροφα.

Ας πάρουμε την περίπτωση της ροής ατμού μέσα σε προφύσιο. Κατά την αδιαβατική εκτόνωση έχουμε πτώση της πίεσης και αύξηση της ταχύτητας v και του ειδικού όγκου u . Στην έναρξη όμως της εκτόνωσης η ταχύτητα αυξάνεται περισσότερο από ό,τι ο ειδικός όγκος, όπως φαίνεται και από το σχήμα 14.9, συνεπώς ο λόγος v/u μεγαλώνει. Άρα για να διατηρηθεί η παροχή της μάζας $\dot{m}$ σταθερή, θα πρέπει να μειωθεί η διατομή A . Με άλλα λόγια το τμήμα αυτό του προφυσίου πρέπει να είναι συγκλίνον.

Στη συνέχεια όμως, καθώς ο ατμός συνεχίζει να εκτονώνεται, ο ειδικός όγκος αυξάνεται περισσότερο από ό,τι αυξάνεται η ταχύτητα, όπως επίσης φαίνεται από το σχήμα 14.9. Επομένως ο λόγος v/u μειώνεται και η διατομή αυξάνει για να έχουμε την ίδια παροχή μάζας. Έτσι, το τμήμα αυτό του προφυσίου πρέπει να είναι το αποκλίνον.

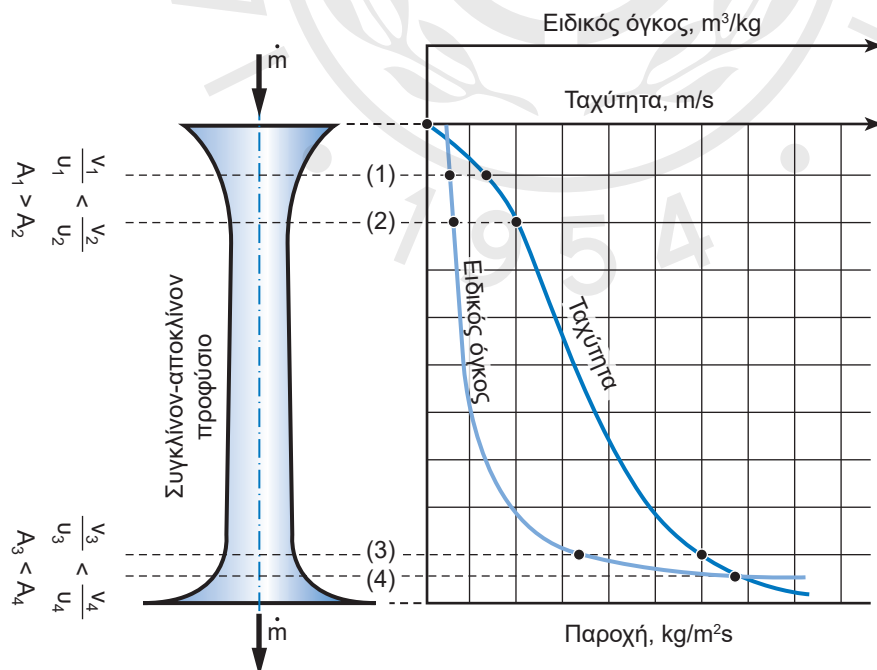
Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση που το ρευστό είναι υγρό, ας πούμε νερό. Όπως είναι γνωστό, ο ειδικός όγκος του νερού σε μία εκτόνωση δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά. Επομένως, **για μια δεδομένη παροχή νερού μέσα σε ένα προφύσιο**, μπορούμε να γράψουμε την εξίσωση (14.7) ως:

$$\dot{m} = \text{σταθ.}, \quad \text{ή} \quad \dot{m} = \frac{A v}{u} \quad \text{ή} \quad \dot{m} u = A v = \text{σταθερό} \quad (14.30)$$

Αυτό σημαίνει ότι όσο αυξάνει η ταχύτητα τόσο μειώνεται η διατομή A για σταθερό $\dot{m}$. Άρα το προφύσιο που χρησιμοποιείται για το νερό, γενικά για τα ρευστά, είναι πάντα συγκλίνον.

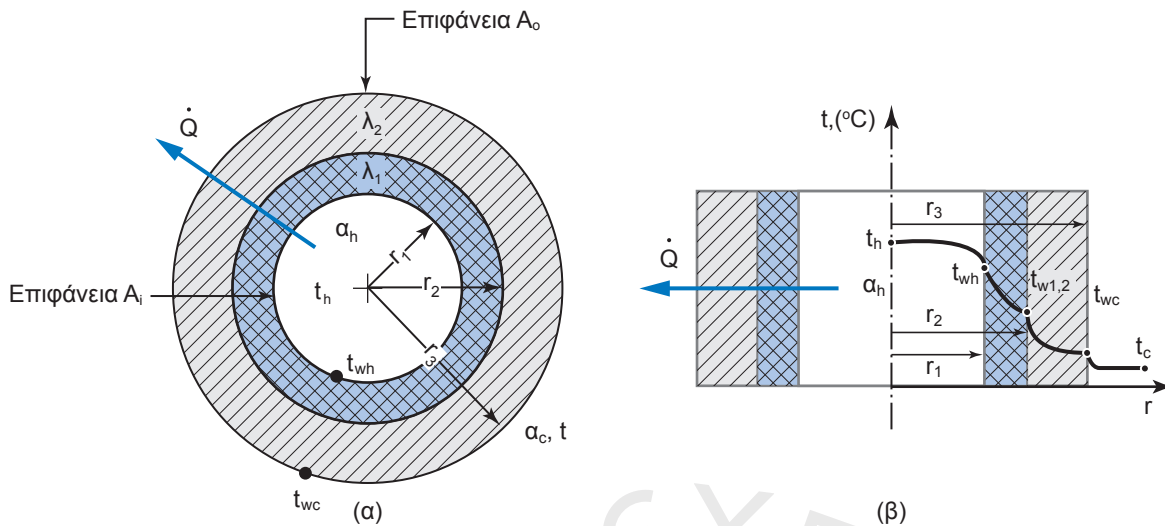
14.5.4 Κρίσιμη πίεση

Η πίεση του ρευστού P_k που επικρατεί στην ελάχιστη διατομή (λαιμός) A_k του προφυσίου



Σχ. 14.9

Μεταβολή της ταχύτητας και του ειδικού όγκου κατά μήκος συγκλίνοντος-αποκλίνοντος προφυσίου



Σχ. 15.12

Μετάδοση θερμότητας με αγωγιμότητα και μεταφορά σε σωλήνα

εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια του σωλήνα και με αγωγιμότητα μέσα από τα στρώματα των υλικών. Επίσης και εδώ αυτό που γνωρίζουμε συνήθως είναι οι θερμοκρασίες των δύο ρευστών. Ας πούμε π.χ. ότι στον πιο πάνω σωλήνα κυκλοφορεί ο ατμός ενός λέβητα και ότι ο σωλήνας αυτός βρίσκεται μέσα στο μηχανοστάσιο ενός πλοίου. Τα δύο ρευστά είναι ο ατμός και ο αέρας του περιβάλλοντος τού μηχανοστασίου, των οποίων τις θερμοκρασίες γνωρίζουμε σχεδόν πάντοτε. Έτσι, τη ροή της θερμότητας θα πρέπει να την εκφράσουμε σε συνάρτηση των δύο αυτών θερμοκρασιών.

Ας υποθέσουμε ότι το ρευστό που κυκλοφορεί μέσα στον σωλήνα είναι σε υψηλότερη θερμοκρασία από το ρευστό της εξωτερικής επιφάνειας.

Τότε, σύμφωνα με την εξίσωση (15.6), το ποσό της θερμότητας από το ζεστό ρευστό προς τον σωλήνα είναι:

$$\dot{Q} = \alpha_h A_i (t_h - t_{wh}) \quad (15.22\alpha)$$

όπου: A_i η εσωτερική επιφάνεια $= 2\pi r_1 L$, L το μήκος του σωλήνα, t_h η θερμοκρασία του ρευστού μέσα στον σωλήνα, t_{wh} η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του σωλήνα και α_h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια του σωλήνα.

Η μετάδοση της θερμότητας με αγωγιμότητα μέσα από τα στρώματα αποδεικνύεται ότι είναι (σχ. 15.12) με προσαρμογή της (15.21):

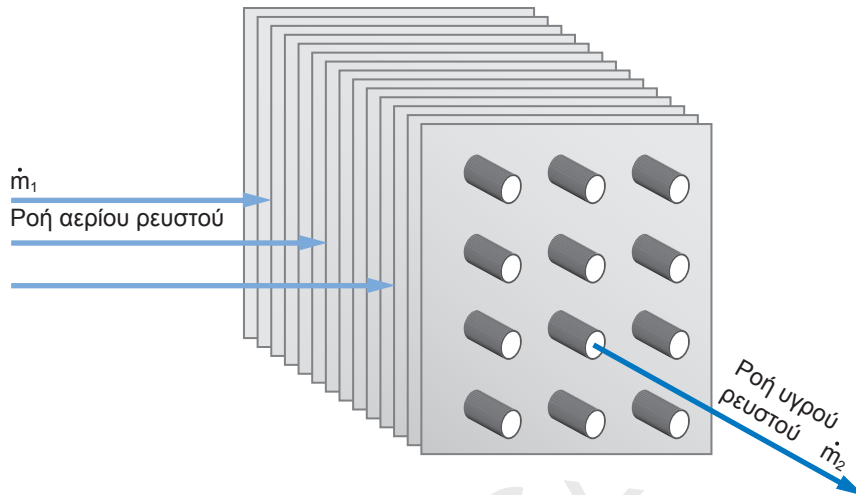
$$Q = \frac{2\pi L(t_{wh} - t_{wc})}{\frac{n(r_2/r_1)}{\lambda_1} + \frac{n(r_3/r_2)}{\lambda_2}} \quad (15.23)$$

όπου: t_{wc} η θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια του εξωτερικού στρώματος και λ_1, λ_2 οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των υλικών.

Με όμοιο τρόπο, για τη μετάδοση θερμότητας με μεταφορά από την εξωτερική επιφάνεια έχουμε, εξίσωση (15.6):

$$\dot{Q} = \alpha_c A_o (t_{wc} - t_c) \quad (15.24)$$

όπου: t_c η θερμοκρασία του ρευστού έξω από τον σωλήνα, A_o η εξωτερική επιφάνεια $= 2\pi r_3 L$ και α_c ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στην εξωτερική επιφάνεια του τελευταίου στρώματος.



Σχ. 16.5
Εναλλάκτηρας σταυρορροής

Στο σχήμα 16.5 φαίνεται ένας διαφορετικός τύπος εναλλακτήρα σταυρορροής. Εδώ το αέριο ρέει έξω από τους αυλούς και ανάμεσα από λεπτά ελάσματα, τα οποία είναι στερεωμένα στους αυλούς. Δεν μπορεί να κινηθεί προς οποιαδήποτε διεύθυνση, γιατί περιορίζεται από τις διόδους που σχηματίζουν τα ελάσματα. Αυτός ο τύπος εναλλακτήρα χρησιμοποιείται κυρίως στις εγκαταστάσεις κλιματισμού⁴ και στα ψυγεία αυτοκινήτων.

Ανακεφαλαιώνοντας, μπορούμε να θυμηθούμε ότι οι τρεις τύποι εναλλακτών είναι:

- 1) **Εναλλακτήρες ομορροής, όπου τα δύο ρευστά ρέουν προς την ίδια διεύθυνση.**
- 2) **Εναλλακτήρες αντιρροής, όπου τα δύο ρευστά ρέουν προς αντίθετες διευθύνσεις.**
- 3) **Εναλλακτήρες σταυρορροής, όπου τα δύο ρευστά ρέουν προς διασταυρούμενες κατευθύνσεις.**

Υπάρχουν βέβαια και άλλοι τύποι εναλλακτών, οι οποίοι είτε μπορούν να υπαχθούν στους πιο πάνω τύπους είτε είναι συνδυασμοί τους. Υπάρχει π.χ., όπως θα δούμε πιο κάτω, ο εναλλακτήρας μονορροής, ο οποίος μπορεί να υπαχθεί στον τύπο εναλλακτήρα ομορροής.

16.4 Συντελεστές ρύπανσης

Σε όλους τους παραπάνω εναλλακτήρες θερμότητας μετά από μία περίοδο λειτουργίας παρουσιάζεται το φαινόμενο της ρύπανσης ή της διάβρωσης των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας. **Και στις δύο περιπτώσεις παρουσιάζεται μια πρόσθετη αντίσταση στη ροή της θερμότητας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του εναλλακτήρα.** Την πρόσθετη αυτή αντίσταση την λαμβάνουμε υπόψη μας με τον συντελεστή ρύπανσης R_f , τον οποίο συμπεριλαμβάνουμε στον υπολογισμό του ολικού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας K_o .

Ο συντελεστής R_f προσδιορίζεται πειραματικά από τις τιμές του K_o για καθαρές και ρυπασμένες επιφάνειες του εναλλακτήρα. Έτσι, ο R_f ορίζεται ως:

$$R_f = \frac{1}{K_{op}} - \frac{1}{K_{ok}} \quad (16.3)$$

όπου: οι δείκτες p και k αναφέρονται σε ρυπασμένο και καθαρό εναλλακτήρα αντίστοιχα.

Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ρύπανσης για διάφορα ρευστά δίνονται στον πίνακα

⁴ Περισσότερα στο βιβλίο *Ψυκτικές – Κλιματιστικές Εγκαταστάσεις – Αερισμός*, Ε. Κανακάκη, εκδ. Ιδρύματος Ευγενίδου, 2017.

για εναλλακτήρες αντιρροής με αυλούς σε κέλυφος, γιατί αυτός ο τύπος εναλλακτήρα έχει τη μεγαλύτερη πρακτική εφαρμογή. Στα διαγράμματα αυτά υπάρχουν δύο αδιάστατοι όροι: Ο ένας είναι ο λόγος $C_{\min} / C_{\max}$ που είναι ίσος με:

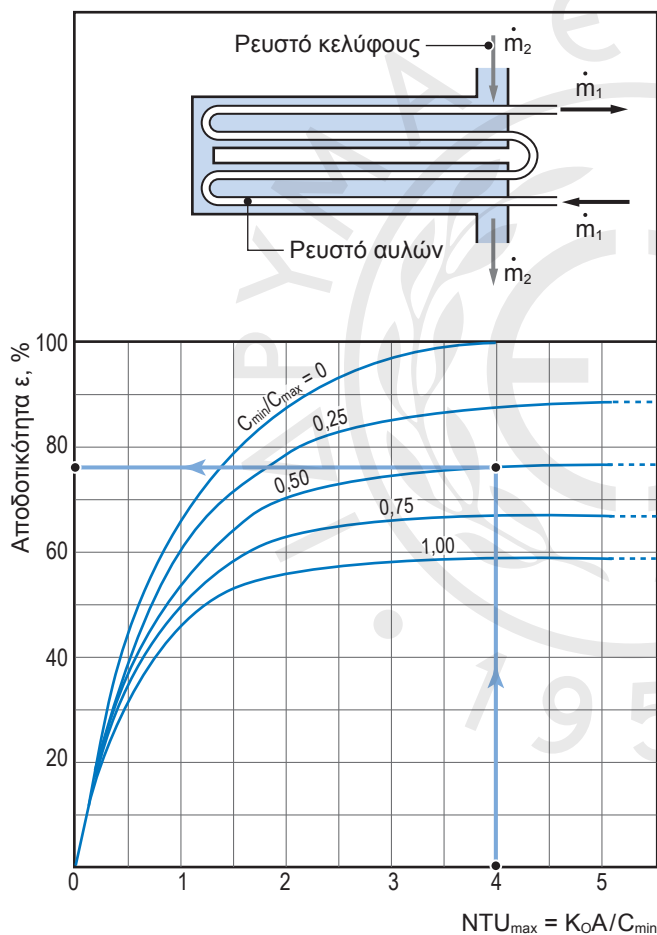
$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{(\dot{m}c_p)_{\min}}{(\dot{m}c_p)_{\max}} \quad (16.12)$$

και ο άλλος είναι ο $NTU_{\max}$ που είναι ίσος με:

$$NTU_{\max} = \frac{K_o A}{C_{\min}} \quad (16.13)$$

(NTU: Number of Transfer Units)

Ας δούμε όμως πώς χρησιμοποιούνται αυτά τα διαγράμματα στην περίπτωση π.χ. ενός ψυγείου λαδιού μιας μηχανής Diesel, με στοιχεία όπως παρουσιάζονται στην πράξη.



Σχ. 16.19
Αποδοτικότητα εναλλακτήρα
αντιρροής με δύο διαδρομές
κελύφους και 4, 8, 12 κ.λπ.
διαδρομές αυλών

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Το ψυγείο λαδιού μιας μηχανής ντήζελ είναι εναλλακτήρας αντιρροής με κέλυφος και δύο διαδρομές αυλών (σχ. 16.20). Το λάδι ψύχεται από θαλασσινό νερό που κυκλοφορεί μέσα στους αυλούς και έχει θερμοκρασία εισόδου 25°C και παροχή $1,1 \text{ kg/s}$. Το λάδι ($c_p = 1,9 \text{ kJ/kgK}$) κυκλοφορεί μέσα στο κέλυφος σε μία διαδρομή και έχει θερμοκρασία εισόδου 80°C και παροχή $2,5 \text{ kg/s}$. Η επιφάνεια των αυλών του ψυγείου είναι 16 m^2 και ο συνολικός

Η Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική περιλαμβάνει τα στοιχεία που θεωρούνται απαραίτητα για την κατανόηση της λειτουργίας μηχανών, μηχανημάτων και συσκευών όπως οι ναυτικές πετρελαιομηχανές, οι ατμοστρόβιλοι, οι ατμολέβητες, οι αεριοστρόβιλοι, οι αεροσυμπιεστές, τα ψυκτικά συστήματα, οι εναλλακτήρες θερμότητας κ.ά.

Αποτελεί επίσης βοήθημα για την γνώση της λειτουργίας θερμικών εγκαταστάσεων και συστημάτων απαραίτητων για την κίνηση και υποστήριξη των μηχανών πρόωσης των πλοίων.

