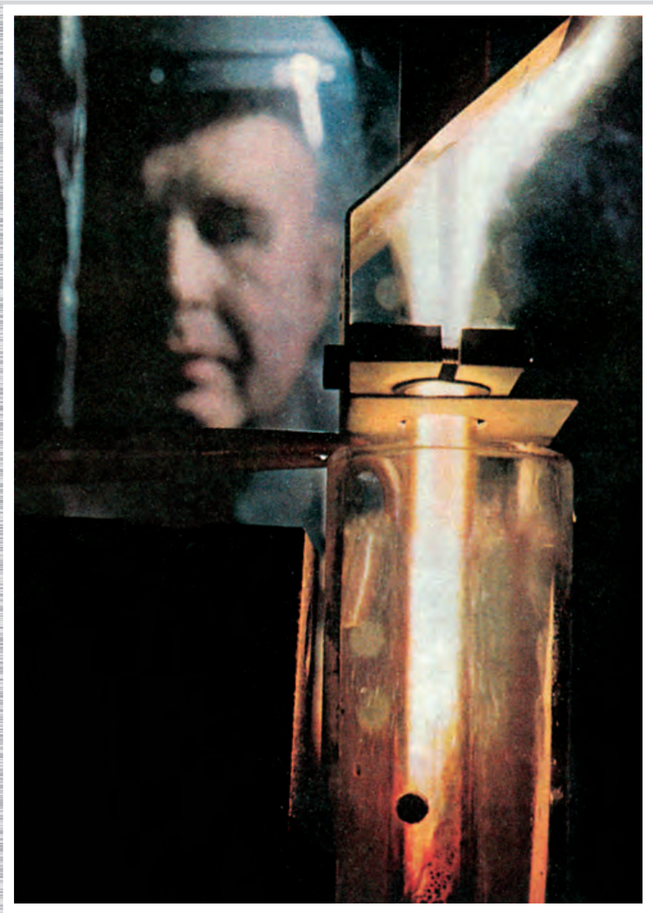
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ



Α΄ ΕΠΑ.Λ. - ΕΠΙΛΟΓΗΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

Α΄ ΕΠΑ.Λ.

ΕΠΙΛΟΓΗΣ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ:

- Ισίδωρος-Μάριος Αντωνελάκης
- Προκοπής Παπαγεωργίου

ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ:

- Νικόλαος Ροζάκος

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΚΡΙΣΗΣ:

- Γεώργιος Βλάχος
- Αναστάσιος Μπαλουκτσής
- Πέτρος Σπυρίδωνος

ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:

- Μαρία Σηφάκη

ATELIER:

- COSMOSWARE

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΝΕΚΔΟΣΗΣ

Η επανέκδοση του παρόντος βιβλίου πραγματοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων «Διόφαντος» μέσω ψηφιακής μακέτας.

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

Ισίδωρος–Μάριος Αντωνελάκης • Προκόπης Παπαγεωργίου

Η συγγραφή και η επιστημονική επιμέλεια του βιβλίου πραγματοποιήθηκε
υπό την αιγίδα του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου

Α΄ ΕΠΑ.Λ.
ΕΠΙΛΟΓΗΣ

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται στους μαθητές και στις μαθήτριες της Α΄ τάξης των ΕΠΑ.Λ. της ομάδας προσανατολισμού τεχνολογικών εφαρμογών και της Β' τάξης των ΕΠΑ.Λ. του τομέα μηχανολογίας. Το περιεχόμενό του είναι προσαρμοσμένο στο εγκεκριμένο από το ΥΠΕΠΘ αναλυτικό πρόγραμμα σπουδών του μαθήματος ***''εισαγωγή στη μηχανολογία''*** και περιλαμβάνει δύο βασικά θεματικά πεδία:

- Τη θερμοδυναμική
- Τις θερμικές μηχανές

Στο πρώτο πεδίο γίνεται προσέγγιση των βασικών εννοιών εφαρμοσμένης θερμοδυναμικής, ενώ στο δεύτερο εξετάζονται οι αρχές λειτουργίας, τα είδη και τα χαρακτηριστικά των θερμικών μηχανών.

Η θερμοδυναμική μπορεί να θεωρηθεί ως η επιστήμη της ενέργειας. Η ολοένα και περισσότερη χρήση του λιγνίτη, του πετρελαίου, του ουρανίου αλλά και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και η αύξηση της κατανάλωσής τους παγκόσμια, επιφέρει βαθιές κοινωνικοοικονομικές αλλαγές. Για το λόγο αυτό, η επαρκής κατανόηση των βασικών αρχών και των εφαρμογών της θερμοδυναμικής αποτελούν, εδώ και πολλά χρόνια, βασικά αντικείμενα εκπαίδευσης των τεχνικών.

Κάθε δραστηριότητα της μηχανικής περιλαμβάνει αλληλεπιδράσεις μεταξύ της ενέργειας και της μάζας και είναι δύσκολο να βρεθεί κάποια περιοχή εφαρμογών, η οποία δεν θα έχει σχέση, έστω και λίγο, με τη θερμοδυναμική.

Τα πεδία εφαρμογής της θερμοδυναμικής βρίσκονται μέσα στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου. Ως παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε τα *συστήματα θέρμανσης, ψύξης, κλιματισμού, τους βραστήρες νερού* και άλλα. Επίσης παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και την ανάλυση *των κινητήρων αυτοκινήτων πυραύλων, αεριωθούμενων και άλλων*. Με λίγα λόγια είναι η επιστήμη που εξετάζει τη θερμοδυναμική κατάσταση της ύλης.

Οι θερμικές μηχανές από τη μεριά τους έχουν συμβάλει αποφασιστικά στη σύγχρονη τεχνολογική πρόοδο, τόσο στο βιομηχανικό τομέα όσο και στο γεωργικό. Η εξέλιξή τους οφείλεται κυρίως στο μεγάλο εύρος του πεδίου εφαρμογής τους. Από όλα τα προηγούμενα προκύπτει η αναγκαιότητα των δυο βασικών θεματικών πεδίων του βιβλίου.

Προσπαθήσαμε να δώσουμε τις βασικές θεωρητικές γνώσεις που είναι απαραίτητες στην κατανόηση άλλων επαγγελματικών μαθημάτων, τα οποία θα ακολουθήσουν στα επόμενα έτη σπουδών (*μηχανολογία αυτοκινήτου, θερμικές και ψυκτικές εγκαταστάσεις και άλλα*), καθώς επίσης και εκείνες τις απαραίτητες γνώσεις για κάθε τεχνικό, ώστε με ευκολία να κατανοεί νέες τεχνικές, νέα εργαλεία και μηχανήματα και γενικά να παρακολουθεί τη ραγδαία εξέλιξη της επιστήμης και της τεχνολογίας.

Αγαπητέ αναγνώστη στα κεφάλαια που ακολουθούν κατεβάλαμε προσπάθεια να δώσουμε όλες εκείνες τις βασικές έννοιες και νόμους της θερμοδυναμικής με όσο το δυνατόν απλούστερο τρόπο. Είμαστε στη διάθεσή σας για τις δικές σας παρατηρήσεις με σκοπό τη βελτίωση του παρόντος βιβλίου σε μελλοντικές εκδόσεις.

Οι συγγραφείς

Οι αναγνώστες, οι οποίοι θα διαπιστώσουν πιθανές παραλείψεις, αναγκαίες προσθήκες ή επιθυμούν να διατυπώσουν γενικότερες παρατηρήσεις, που θα βελτιώσουν το βιβλίο στην επόμενη έκδοσή του παρακαλούμε να απευθύνονται προς το: Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, Τομέας Μηχανολογικός, Μεσογείων 396, Αγία Παρασκευή 153 41, Αθήνα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ 1
1.1 Γενικά 4
1.2 Εφαρμογές της θερμοδυναμικής 5
1.3 Διεθνές σύστημα μονάδων (Δ.Σ.) 7
1.4 Σύστημα - Όριο συστήματος - Περιβάλλον 11
1.5 Θερμοδυναμική ισορροπία 17
1.6 Επιλογή συστήματος.. 17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ 21
2.1 Επίλυση θερμοδυναμικών προβλημάτων 23
2.2 Παράμετροι που ορίζουν τη θερμοδυναμική κατάσταση της ύλης 24
2.3 Εξωτερικές παράμετροι προσδιορισμού της θέσης του επιλεγέντος θερμοδυναμικού συστήματος 25
2.4 Εσωτερικές παράμετροι μιας θερμοδυναμικής κατάστασης της ύλης (του συστήματος) 27
2.5 Μέθοδος επίλυσης θερμοδυναμικών προβλημάτων 29
2.6 Μαθηματικές σχέσεις 31
2.7 Καταστατική εξίσωση των αερίων 32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΚΦΡΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ........ 35
3.1 Αρχή διατήρησης της μάζας 37
3.2 Αρχή διατήρησης της ορμής 38
3.3 Νόμοι θερμοδυναμικών μεταβολών 39
3.4 Το διάγραμμα των καταστάσεων (P - v), (T - s) 39
3.5 Μεταβολή 41
3.6 Χαρακτηριστικές θερμοδυναμικές μεταβολές 42
3.7 Η θερμότητα και η θερμοκρασία 44
3.8 Οι χρήσεις και η παραγωγή της θερμικής ενέργειας 49
3.9 Εσωτερική ενέργεια 51
3.10 Ενθαλπία 52
3.11 Κυκλική μεταβολή - Θερμοδυναμικός κύκλος 53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΟΡΦΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ 57
4.1 Έργο 59
4.2 Μηχανικό έργο 61
4.3 Έργο σταθερής δύναμης 62
4.4 Έργο μεταβλητής δύναμης 67
4.5 Έργο P · V (ογκομεταβολής) 74
4.6 Έργο ροής 75
4.7 Άλλες μορφές έργου 78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΚΦΡΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 81

5.1 Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής........ 83

5.2 Αρχή της ισοδυναμίας μεταξύ έργου και θερμότητας 89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΕΛΕΙΩΝ ΑΕΡΙΩΝ........ 97

6.1 Μεταβολές τελείων αερίων........ 99

6.2 Ισόθερμη μεταβολή 103

6.3 Ισόχωρη μεταβολή 107

6.4 Ισοβαρής μεταβολή 109

6.5 Αδιαβατική μεταβολή 112

6.6 Πολυτροπική μεταβολή 117

6.7 Οι μεταβολές στο διάγραμμα (P - v) 120

6.8 Οι μεταβολές στο διάγραμμα (T - s) 122

6.9 Αντιστρεπτές και μη αντιστρεπτές μεταβολές 124

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Ο ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ 129

7.1 Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής........ 131

7.2 Υπολογισμός της εντροπίας 136

7.3 Σύγκριση των $O_{αντ}$ και $O_{μη\ αντ}$ 137

7.4 Παραδείγματα υπολογισμού της εντροπίας στις πρακτικές εφαρμογές........ 142

7.5 Παραδείγματα υπολογισμού της εντροπίας για ειδικά βιομηχανικά ρευστά 154

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΕΡΓΟ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ 161

8.1 Εισαγωγή........ 163

8.2 Ο κύκλος του Carnot 166

8.3 Εξέργεια - Εισαγωγή........ 182

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΙΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ 193
9.1 Γενικά 195
9.2 Θερμικές κινητήριες μηχανές εξωτερικής καύσης 196
9.3 Θερμοδυναμικός κύκλος θερμικής μηχανής εξωτερικής καύσης
Κύκλος Rankine 198
9.4 Κινητήριες μηχανές εσωτερικής καύσης 216

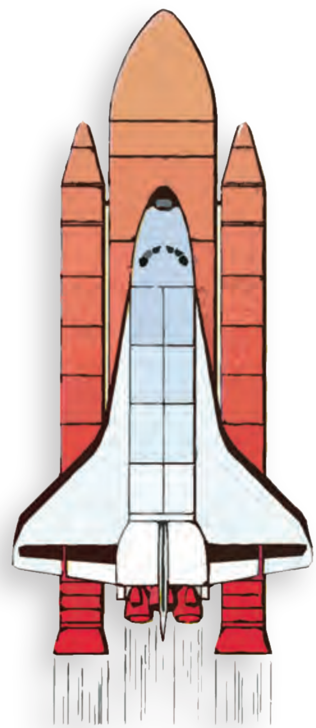
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ΑΝΤΛΙΕΣ - ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ 237
10.1 Αντλίες 239
10.2 Συμπιεστές 251

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ 257
11.1 Γενικά 259
11.2 Γραμμική διαστολή στερεών 261
11.3 Κυβική διαστολή στερεών 262
11.4 Διαστολή υγρών 263
11.5 Θερμική διαστολή του νερού 264
11.5 Διαστολή αερίων 265
11.6 Μηχανικά αποτελέσματα θερμικής διαστολής των σωμάτων 266
11.7 Λανθάνουσα θερμότητα 269
11.8 Ειδική θερμότητα 270
11.9 Θερμιδομετρία 272

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ 279
12.1 Γενικά 281
12.2 Μετάδοση με αγωγή 283
12.3 Μετάδοση με μεταφορά 286
12.4 Μετάδοση με ακτινοβολία 289

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13 ΚΑΥΣΙΜΑ - ΚΑΥΣΗ 295
13.1 Καύσιμα 297
13.2 Καύση 298
13.3 Ατμοσφαιρικός αέρας 299
13.4 Θερμογόνος δύναμη 299
13.5 Περίσσεια αέρα 301
13.6 Προϊόντα καύσης 301
13.7 Εξισώσεις καύσης 303
13.8 Ταξινόμηση καυσίμων 304
13.9 Είδη καυσίμων 305

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 313



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1 Γενικά

1.2 Εφαρμογές της θερμοδυναμικής

1.3 Διεθνές σύστημα μονάδων (Δ.Σ.)

1.4 Σύστημα - Όριο συστήματος - Περιβάλλον

1.5 Θερμοδυναμική ισορροπία

1.6 Επιλογή συστήματος

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- **Να γνωρίζετε,** ότι αντικείμενο της Θερμοδυναμικής είναι η μελέτη των φυσικών φαινομένων, που υφίσταται η ύλη, ως φορέας της ενέργειας των μηχανών , με σκοπό τη μετατροπή της ενέργειας και να αναφέρετε παραδείγματα.

- **Να εξηγείτε,** ότι η Θερμοδυναμική ασχολείται με τα φυσικά φαινόμενα, που μεταβάλλουν, εκτός από τα μηχανικά μεγέθη ενός σώματος συστήματος, τα θερμικά και χημικά μεγέθη του και να αναφέρετε παραδείγματα.

- **Να αναφέρετε** τα πεδία εφαρμογών της Θερμοδυναμικής.

- **Να εξηγείτε** και να **ορίζετε** τις βασικές έννοιες της Θερμοδυναμικής: σύστημα όριο συστήματος περιβάλλον κλειστό σύστημα μονωμένο αδιαβατικό ανοικτό σύστημα όγκος ελέγχου θερμοδυναμική ισορροπία.

- Να **διακρίνετε** τα είδη των συστημάτων, έτσι ώστε να διευκολύνεστε στην επίλυση των προβλημάτων της Θερμοδυναμικής.

- Να **γνωρίζετε** τα βασικά φυσικά μεγέθη και τις μονάδες στις οποίες βασίζεται το Διεθνές σύστημα (S.I.), τα παράγωγα μεγέθη και τις μονάδες τους, που συναντάμε συχνά στη Θερμοδυναμική, δηλ. της πίεσης, ειδικού όγκου, θερμοκρασίας, δύναμης, ενέργειας ισχύος κ.λπ., όπως επίσης και μερικές καταργημένες μονάδες άλλων συστημάτων που έχουν καθιερωθεί.

- Να **αναφέρετε** τις διάφορες μορφές ενέργειας και να **γνωρίζετε** τους τύπους που τις εκφράζουν, τις μονάδες μέτρησής τους και να **δίνετε** σύντομο ορισμό.

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η γνώση της λειτουργίας των θερμικών μηχανών, αποτελεί βασικό αντικείμενο εκπαίδευσης των τεχνικών. Ένας κινητήρας μοτοσικλέτας, ένας κινητήρας αυτοκινήτου, αεροπλάνου είναι μερικά παραδείγματα αυτού του είδους μηχανών. Πριν περάσουμε, λοιπόν, να εξετάσουμε αυτές τις **μηχανές** που πραγματοποιούν τη μετατροπή της θερμότητας σε έργο, είναι αναγκαίο να ασχοληθούμε πρώτα με τη μελέτη των φαινομένων που
Θα μελετήσουμε τους νόμους που διέπουν αυτά τα φαινόμενα και τις αρχές στις οποίες στηρίζονται· αυτό είναι, άλλωστε, το αντικείμενο μελέτης εκείνου του μέρους της φυσικής που ονομάζεται **θερμοδυναμική**.

Η Θερμοδυναμική ασχολείται, λοιπόν, με τα φυσικά φαινόμενα που μεταβάλλονται, εκτός από τα μηχανικά μεγέθη ενός σώματος, τα θερμικά και χημικά μεγέθη του. Δεν μπορούμε επομένως στη θερμοδυναμική να θεωρούμε σταθερά τον ειδικό όγκο, την πίεση, τη θερμοκρασία και τη χημική σύσταση του σώματος, που υφίσταται το φαινόμενο, π.χ. σ' ένα κινητήρα αυτοκινήτου το μίγμα αέρα βενζίνης συμπιέζεται στον κύλινδρο και ακολούθως καίγεται. Κατά τη διάρκεια της συμπίεσης μεταβάλλονται τα Φ μεγέθη **P, V, T** και ακολουθεί η καύση, όπου αλλάζει η χημική σύσταση Φ του μίγματος. Επίσης, πρέπει να λαμβάνουμε υπ'όψη μας και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ όλων των μεγεθών που υπεισέρχονται στο φαινόμενο, π.χ., όπως θα δούμε στο κεφάλαιο των αερίων, μεταξύ των μεγεθών υπάρχει η σχέση $\mathbf{P \cdot V = m \cdot R \cdot T}$. Στις μηχανές, η ύλη που είναι και ο φορέας της ενέργειας, μπορεί να είναι ένα ή ένα αέριο

Στους νόμους, που διέπουν τις φυσικές μεταβολές αυτών των δυο μορφών της ύλης, θα επικεντώσουμε τη μελέτη μας.

Επομένως, η θερμοδυναμική είναι η επιστήμη η οποία ασχολείται με τη μελέτη των ενεργειακών μετασχηματισμών και των μεταβολών των διαφόρων φυσικών ποσοτήτων ενός συστήματος οι οποίες επηρεάζονται ή προκαλούν αυτούς τους μετασχηματισμούς.

Η **εξέταση της ύλης** μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

α. με τη μικροσκοπική μέθοδο και

β. με τη μακροσκοπική

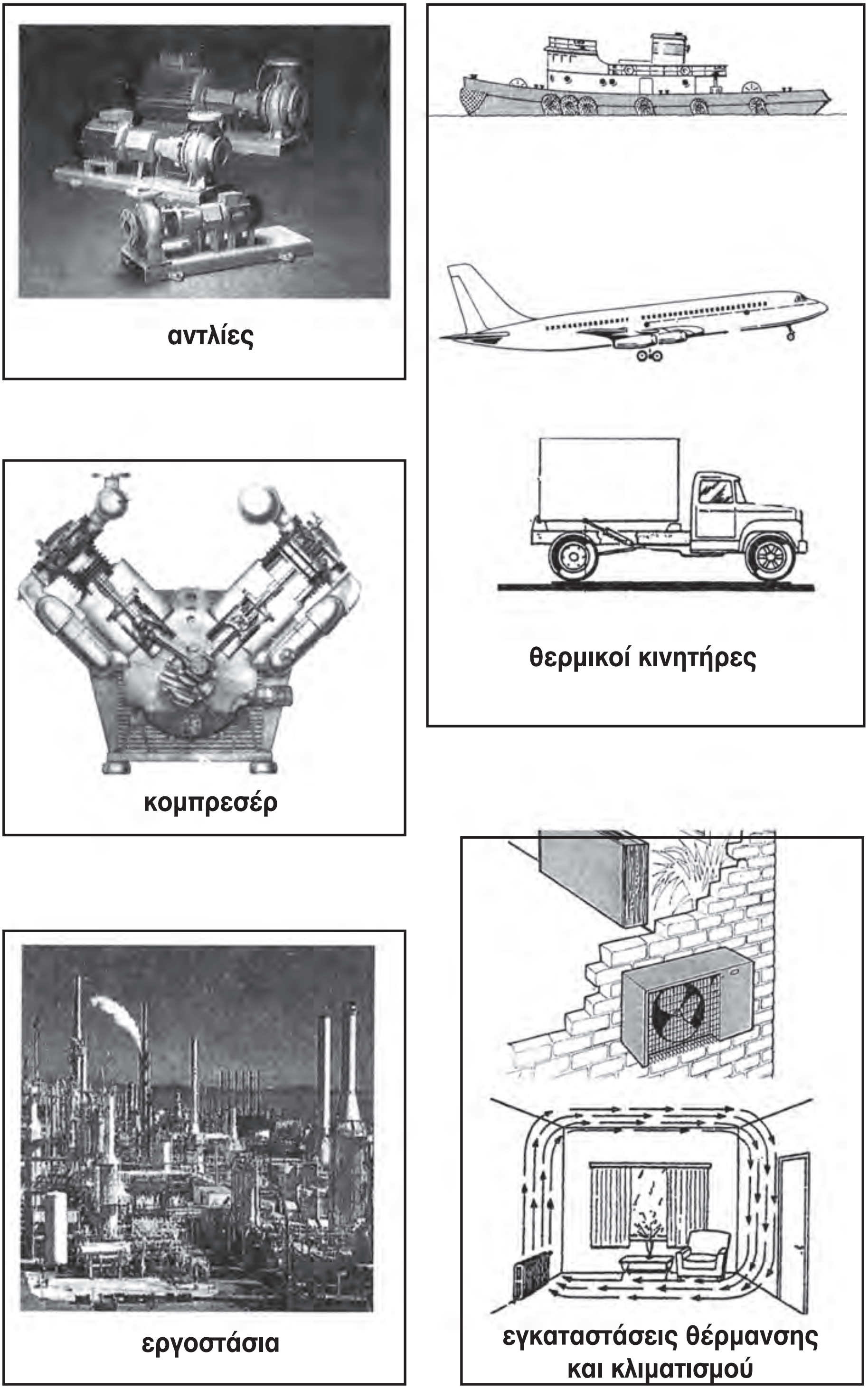
Η **μικροσκοπική μέθοδος** αφορά στη λεπτομερειακή δομή της ύλης, πραγματοποιείται με στατιστικούς τρόπους και ασχολείται με τις εφαρμογές των αρχών της μηχανικής στα άτομα και τα μόρια. Ο τρόπος αυτός της εξέτασης της ύλης ενδιαφέρει κυρίως τους φυσικούς και τους χημικούς και λιγότερο τους τεχνικούς.

Η **μακροσκοπική** εξέταση αφορά στα εξωτερικά χαρακτηριστικά του συνόλου της ύλης, δηλαδή στα γενικά χαρακτηριστικά και στις παραμέτρους εκείνες, που προσδιορίζουν την κατάσταση της ύλης, όπως η θερμοκρασία, η πίεση κ.λπ. που μπορούμε να τις αντιληφθούμε με τις αισθήσεις μας και να τις μετρήσουμε με τις μονάδες των φυσικών μεγεθών που γνωρίζουμε.

Εμείς σ' αυτό το βιβλίο θα ακολουθήσουμε τη μακροσκοπική εξέταση της ύλης. Θα μελετήσουμε προβλήματα και εφαρμογές της μηχανολογικής τέχνης. Επομένως, θα επιχειρήσουμε μια τεχνική προσέγγιση της θερμοδυναμικής.

1.2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Οι εφαρμογές της θερμοδυναμικής είναι πάρα πολλές. Τα συστήματα θέρμανσης, ψύξης, κλιματισμού, μια αντλία, ένα κομπρεσέρ είναι μερικές από αυτές που τις συναντάμε στην καθημερινή μας ζωή. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, λοιπόν η θερμοδυναμική παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό κινητήρων αυτοκινήτων, σκαφών αναψυχής, πλοίων, ελικοπτέρων, αεροπλάνων, πυραύλων. Επίσης στη βιομηχανική παραγωγή, όπου χρησιμοποιείται η θερμότητα που απελευθερώνεται από την καύση, σε βιομηχανίες κάθε μορφής π.χ., χημικές βιομηχανίες, μεταλλουργικές κλωστοϋφαντουργίες, βιομηχανίες τροφίμων.(σχ.1.2.α) Στις επόμενες παραγράφους θα μελετήσουμε τις βασικές έννοιες της Θερμοδυναμικής και θα δώσουμε χρήσιμους ορισμούς.



Σχήμα 1.2.α *Πεδία εφαρμογών της θερμοδυναμικής*

1.3. ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΑΔΩΝ (Δ.Σ.)

Σ' αυτό το βιβλίο θα χρησιμοποιηθούν μονάδες του Διεθνούς Συστήματος μονάδων (Δ.Σ.) ή SYSTEME INTERNATIONAL D' UNITES (S.I.).

Το (SI) καθιερώθηκε το 1960 από το γενικό συνέδριο μέτρων και σταθμών. Βασίζεται σε επτά φυσικά μεγέθη και δύο συμπληρωματικά. Τα σύμβολα και οι μονάδες των μεγεθών αυτών φαίνονται στον πίνακα 1.1

Πίνακας 1.1

ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ (SI): Σύμβολα φυσικών μεγεθών και μονάδες.

	Βασικά μεγέθη							Συμπληρωματικά μεγέθη	
μέγεθος	μήκος	μάζα	χρόνος	ηλ. ρεύμα	θερμο-δυναμική θερ/σία	ποσότητα ουσίας	φωτεινή ένταση	επίπεδη γωνία	στερεά γωνία
σύμβολο	ℓ	m	t	I	Τ,Θ	η	I_v	φ	Ω
μονάδα	μέτρο	χιλιό-γραμμο	δευτερό-λεπτο	Αμπέρ	Κέλβιν	μόλ	καντέλα	ακτίνιο	στερα-κτίνιο
σύμβολο	m	kg	s	A	K	mol	cd	rad	Sr

Τα μεγέθη αυτά τα ονομάζουμε **κύρια ή βασικά** και τα επιλέγουμε αυθαίρετα ως μονάδες μέτρησης

Όλα τα άλλα τα ονομάζουμε **παράγωγα ή δευτερεύοντα** και τα ορίζουμε χρησιμοποιώντας σχέσεις Φυσικής ή Γεωμετρίας που τα συνδέουν με τα βασικά. π.χ.

ταχύτητα =μήκος / χρόνος με μονάδα μετρήσεως m/s,

επιτάχυνση = ταχύτητα / χρόνο με μονάδα μετρήσεως m/s^2,

όγκος = μήκος x μήκος x μήκος με μονάδα m^3,

ειδικός όγκος = όγκος / μάζα με μονάδα m^3/kg.

1.3.1. Πίεση - ειδικός όγκος - θερμοκρασία

Η μονάδα της πίεσης (Δύναμη ανά μονάδα επιφανείας) είναι το **N/m^2** και ονομάζεται **Πασκάλ, (Pa)**

Επειδή η μονάδα πίεσης Pα, είναι πάρα πολύ μικρή, χρησιμοποιείται το **μπαρ** που ορίζεται ως εξής:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pα}$$

Το πλεονέκτημα της χρήσης αυτής της μονάδας είναι ότι η τιμή της είναι περίπου ίση με την ατμοσφαιρική πίεση.

1 κανονική ατμόσφαιρα = 1.01325 bar

1 atm = 101.325 Pα = 1013250 KPα = 1.01325 bar

Ειδικός όγκος (v) ενός συστήματος είναι ο όγκος του συστήματος ανά μονάδα μάζας του συστήματος.

Η μονάδα μέτρησης του ειδικού όγκου είναι το m3/kg.

Χρησιμοποιείται το σύμβολο V για τον όγκο του συστήματος.

Για τη θερμοκρασία και τη μέτρησή της θα γίνει λεπτομερής αναφορά στο τρίτο κεφάλαιο.

Στον παρακάτω πίνακα 1.2 φαίνονται οι αντιστοιχίες μερικών καταργημένων μονάδων με τις μονάδες του SI., οι οποίες έχουν καθιερωθεί και χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές.

Πίνακας 1.2
Μετατροπή καταργημένων μονάδων σε μονάδες του SI

Καταργημένη μονάδα	Μονάδα του SI
1 Kp	9,81 N
1 PS	0,736 KW
1 HP	0,746 KW
1 cal	4,186 J

Π.χ., όταν αναφερόμαστε στην ισχύ ενός κινητήρα αυτοκινήτου, την εκφράζουμε πάντα σε ίππους.

Παρακάτω δίνουμε μερικούς σύντομους ορισμούς για τις διάφορες μορφές της ενέργειας. Σε επόμενα κεφάλαια θα αναφερθούμε σε αυτές.

1.3.2. Δύναμη - ενέργεια - ισχύς

Για να ορίσουμε τη **μονάδα της δύναμης** στο (S.I.), χρησιμοποιούμε τη σχέση που εκφράζει το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα.

Δύναμη = μάζα x επιτάχυνση

$$F = m \cdot \alpha$$

Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση όπου m = 1 kg και α = 1 m/s2 έχομε

$$F = 1\ kg \cdot 1\ m/s^2$$

Αυτή τη σύνθετη μονάδα **1 kg · 1 m/s²** ονομάζουμε **Νιούτον, (N)** 1 N είναι η δύναμη που δίνει η επιτάχυνση 1 m/s^2 σε σώμα μάζας 1 kg.

Όπως γνωρίζουμε από τη Μηχανική, η μονάδα έργου στο (SI) είναι (Έργο = Δύναμη x Μετατόπιση) N · m.

Η **θερμότητα** και το **έργο** είναι και τα δύο μορφές ενέργειας που έχουν μονάδα μέτρησης το **Τζάουλ**, **(J)**, δηλαδή

1 Τζάουλ = 1 Νιούτον x 1 μέτρο ή **1J = 1 N m**

Η **μονάδα μέτρησης της ισχύος** στο (SI) είναι το **Βατ, (W),** δηλαδή

1 W = 1 Τζάουλ ανά δευτερόλεπτο ή 1 W = 1 J/s

1 Βατ είναι η ισχύς ενός κινητήρα που παράγει έργο 1 J σε χρόνο 1s.

Πίνακας 1.2

Μονάδες εκτός SI που επιτρέπεται η χρησιμοποίησή τους			
ISO 31			
Μέγεθος	**Μονάδα**	**Σύμβολο**	**Παρατηρήσεις**
Χρόνος	πρώτο λεπτό ώρα ημέρα έτος	min h d a	1min=60 s 1h=60 min 1d=24h 1a=365 d
Επίπεδη γωνία	μοίρα πρώτο λεπτό δεύτερο λεπτό	o ' "	1° 1=(1/60)° 1"=(1/60)'
όγκος μάζα ενέργεια πίεση ρευστού	λίτρο τόνος ηλεκτρονιοβόλτ μπαρ	ℓ t ev bar	M = 1dm =1/1000 m 1t = 103 kg 1e = 1,602x10^{-9} I 1bar = 10^5 Pα

• Μορφές ενέργειας στα Θερμοδυναμικά συστήματα

Ενέργεια ονομάζουμε την ικανότητα ενός συστήματος να παράγει έργο. Η παρουσία της ενέργειας γίνεται αντιληπτή από τα αποτελέσματα της και αυτά μπορούν να εμφανιστούν με διάφορες μορφές.

Η ενέργεια εμφανίζεται ως θερμική, μηχανική, κινητική, δυναμική, ηλεκτρική, χημική, πυρηνική.

Η θερμοδυναμική ασχολείται με τις μετατροπές της ενέργειας.

Μονάδα μέτρησης της ενέργειας σε όλες της τις μορφές είναι το **Τζάουλ, J** και τα πολλαπλάσια του **kJ** και **MJ**.

1. Δυναμική ενέργεια

Εάν ένα **ρευστό μάζας m** βρίσκεται σε ύψος Ζ από ένα επίπεδο αναφοράς, τότε αυτό έχει **δυναμική ενέργεια:**

$$E_g = mg\,Z,\ J \text{ και ανά μονάδα μάζας } E_g = g \cdot Z = 9{,}81\,Z,\ J/kg$$

2. Κινητική ενέργεια

Εάν ένα **ρευστό** βρίσκεται σε κίνηση τότε έχει κινητική ενέργεια. Εάν ρέει με ταχύτητα V, τότε θα έχει **κινητική ενέργεια** ανά μονάδα μάζας:

$$E_C = \frac{V^2}{2}, \quad J/kg$$

2. Εσωτερική ενέργεια

Όλα τα ρευστα έχουν αποθηκευμένη ενέργεια που οφείλεται στην κίνηση των ατόμων και μορίων τους δηλ στη δομή τους

Αυτή την ονομάζουμε **εσωτερική ενέργεια.**

2. Θερμότητα

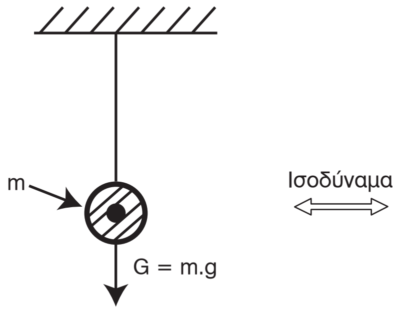
Θερμότητα είναι η ενέργεια σε μεταφορά εξ αιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας

5. Έργο

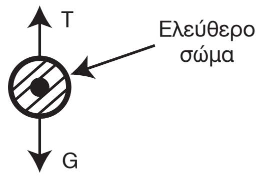
Έργο είναι ενέργεια σε μεταφορά, όπου η διαφορά θερμοκρασίας δεν εμπέκεται άμεσα.

1.4. ΣΥΣΤΗΜΑ – ΟΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

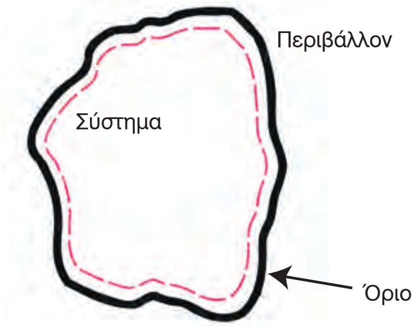
Στη Μηχανική, για να γίνει ευκολότερη η μελέτη των προβλημάτων της χρηοιμοποιήθηκε η έννοια του **“ελεύθερου σώματος”** π.χ. Για να μελετήσουμε την ισορροπία του αναρτημένου σώματος μάζας m (σχ. 1.4.α) αντικαθιστούμε τη στήριξη με την τάση του νήματος T και εφαρμόζουμε τις εξισώσεις ισορροπίας στο “ελεύθερο σώμα” (σχ. 1.4.β).



Σχήμα 1.4 -α: *Αναρτημένο σώμα μάζας m*



Σχήμα 1.4 -β: *Ελεύθερο σώμα μάζας m*



Σχήμα 1.4 -γ: *Μονωμένο σWWύστημα*

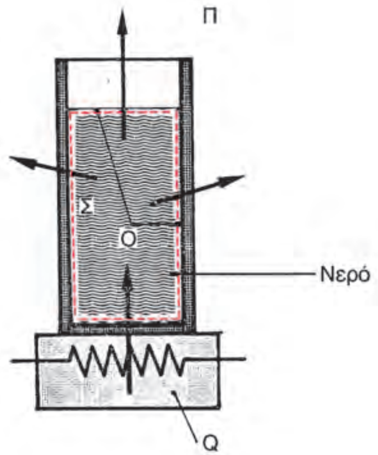
Κατ’ αναλογία, **στη Θερμοδυναμική** θα χρησιμοποιήσουμε τον όρο “σύστημα”, σχ. (1.4.-γ) ***Σύστημα ονομάζεται το σύνολο των φυσικών σωμάτων (στερεά, υγρά, αέρια) πάνω στα οποία εργαζόμαστε για να πετύ χουμε ένα συγκεκριμένο σκοπό.***

Αν, για παράδειγμα, θερμάνουμε μια ορισμένη ποσότητα νερού, τότε το σύστημά μας θα είναι αυτή η ποσότητα του νερού. Πράγματι, εμείς πάνω σ’ αυτή εργαζόμαστε, για να πετύχουμε ένα συγκεκριμένο σκοπό, δηλαδή να αυξήσουμε τη θερμοκρασία του.

Το σύστημα, επομένως, είναι μια φυσική οντότητα, η οποία έχει βάρος και καταλαμβάνει ένα ορισμένο όγκο, ο οποίος περιορίζεται από μια επιφάνεια κλειστή , που ονομάζουμε **όριο του συστήματος.**

Η περιοχή του χώρου που δεν καταλαμβάνει το σύστημα, ονομάζεται **περιβάλλον**. Το περιβάλλον του συστήματος δεν θα το θεωρούμε απεριόριστο. Το περιβάλλον του συστήματος θα αποτελείται από φυσικά σώματα, τα οποία βρίσκονται σε άμεση επαφή με το σύστημα και είναι σε θέση να αλληλεπιδράσουν φυσικώς με αυτό. Στην περίπτωση του νερού που θερμαίνουμε, όπως προαναφέραμε (σχ.1.4.δ), το σύστημα Σ αποτελείται από τη μάζα του νερού που περιέχεται στο δοχείο. Το όριο Ο απεικονίζεται στο σχήμα από την εσωτερική επιφάνεια του δοχείου και την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού. Τα περιβάλλον (π) αποτελείται από το θερμαντικό στοιχείο Q, από το υλικό του δοχείου και από τον άμεσα περιβάλλοντα αέρα του συστήματος.

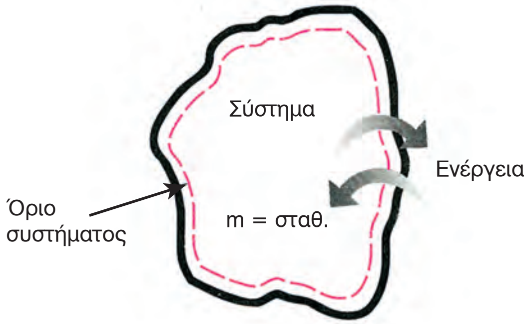
Υπάρχουν δυο κατηγορίες συστημάτων, **τα κλειστά** και τα **ανοικτά συστήματα**, που θα εξετάσουμε στη συνέχεια.



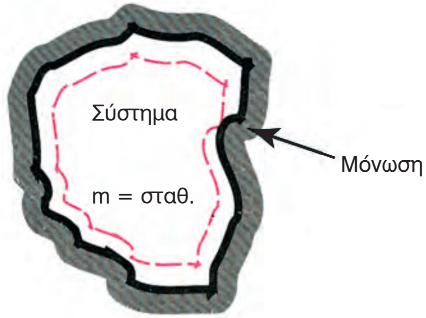
Σχήμα 1.4.δ: *Σύστημα - όριο συστήματος - περιβάλλον*

1.4.1. Κλειστά συστήματα

Τα κλειστά συστήματα περιορίζονται από επιφάνειες, που δεν επιτρέπουν τη **μεταφορά μάζας** από το σύστημα προς το περιβάλλον και αντίστροφα. Για τα κλειστά συστήματα ισχύει η σχέση: **m = σταθ** (σχ. 1.4.1 .α).



Σχήμα 1.4.1α: *Κλειστό σύστημα*

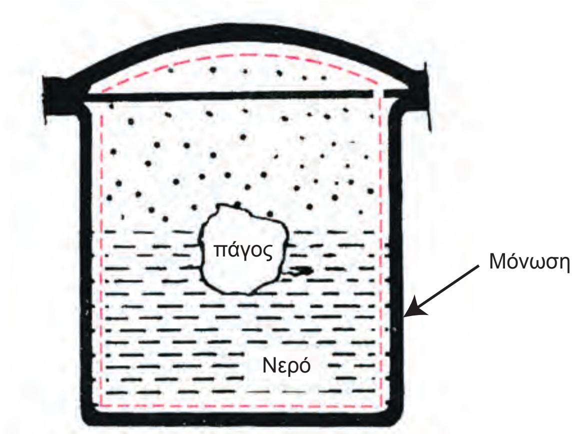


Σχήμα 1.4.1β: *Μονωμένο σύστημα*

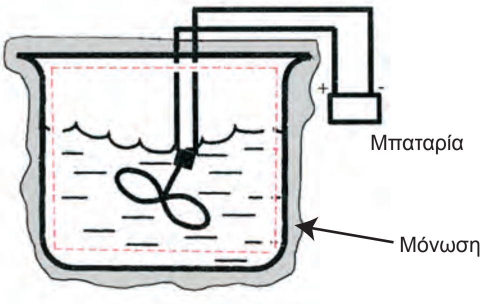
Το **κλειστό σύστημα** στο οποίο δεν υπάρχει **εναλλαγή ενέργειας** με το περιβάλλον, σε οποιαδήποτε μορφή, ονομάζεται **μονωμένο σύστημα**. Για το μονωμένο σύστημα ισχύει η σχέση **Ε = σταθ.**, όπου Ε η ολική ενέργεια του συστήματος (σχήμα 1.4.1 β και σχήμα 1.4.1 γ.)

Υπάρχουν και συστήματα που επιτρέπουν σε ορισμένες μορφές ενέργειας τη μεταφορά και σε άλλες όχι, π.χ. σε κλειστό μονωμένο δοχείο μέσω αναδευτήρα χορηγούμε έργο στο σύστημα, ενώ δεν υπάρχει εναλλαγή θερμότητας λόγω της μόνωσης.

Επομένως, τα συστήματα εκείνα που δεν επιτρέπουν την εναλλαγή θερμικής ενέργειας με το περιβάλλον τους ονομάζονται **αδιαβατικά** (σχ. 1.4.1 δ). Αντίθετα εκείνα που ανταλάσσουν ενέργεια ονομάζονται **μη αδιαβατικά.**

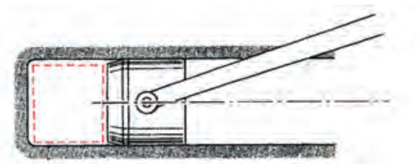


Σχήμα 1.4.1γ: *Θερμός: μονωμένο σύστημα*



Σχήμα 1.4.1δ: *Αδιαβατικό σύστημα*

Από τους παραπάνω ορισμούς προκύπτει ότι ο όγκος του συστήματος δεν είναι απαραίτητα σταθερός, που σημαίνει ότι τα όριά του μπορούν να μετακινούνται. Το αέριο μέσα στον κύλινδρο (σχ. 1.4. 1ε) αποτελεί παράδειγμα ενός κλειστού συστήματος, γιατί το έμβολο κλείνει στεγανά τον κύλινδρο, που σημαίνει ότι η ποσότητα του αερίου παραμένει σταθερή.
Στο παρακάτω σχήμα (1.4. 1στ.) φαίνονται μερικά κλειστα συστήματα



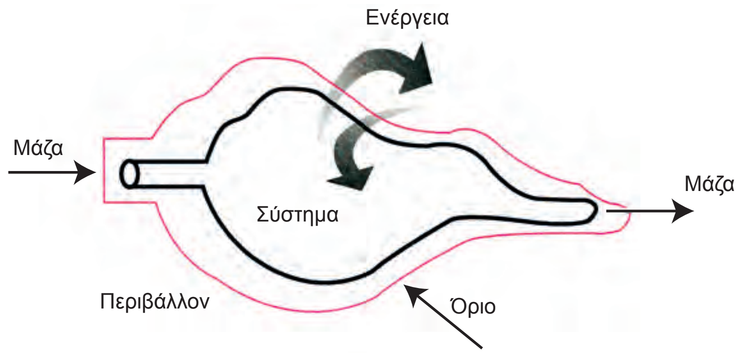
Σχήμα 1.4.1ε: *διάταξη κυλίνδρου – εμβόλου*

Σχήμα 1.4.1 στ: Κλειστά συστήματα

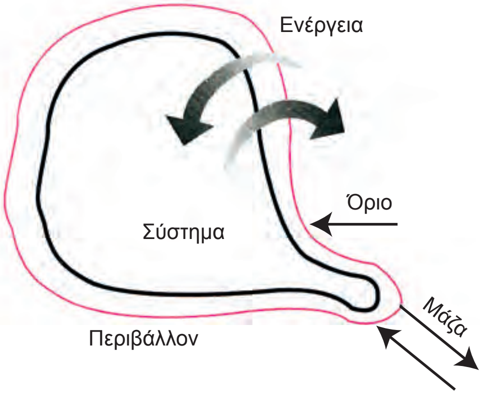
1.4.2. Ανοικτά συστήματα

Τα ανοικτά συστήματα περιορίζονται από επιφάνειες, που επιτρέπουν σε ορισμένα σημεία τη μεταφορά μάζας (σχ. 1.4.2α,β.)

Η ιδιότητα των κλειστών συστημάτων **m = σταθ.** ισχύει και για τα ανοικτά συστήματα, όταν **η μάζα που εισέρχεται** είναι ίση με **τη μάζα που εξέρχεται.**



Σχήμα 1.4.2α: *Ανοικτό σύστημα διπλής ροής*

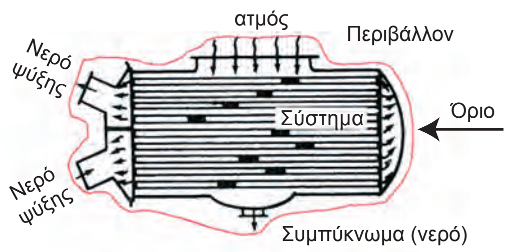


Σχήμα 1.4.2β: *Ανοικτό σύστημα μονής ροής*

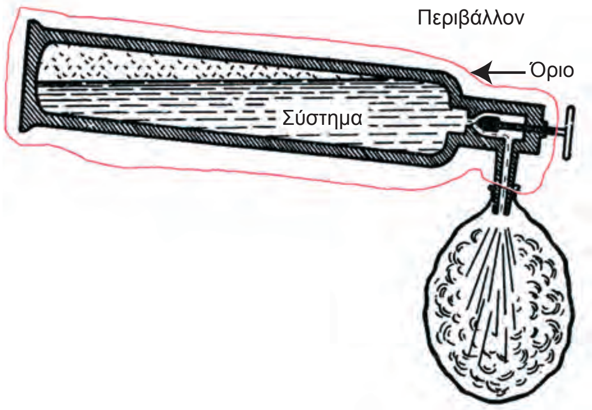
Παράδειγμα ανοικτού συστήματος διπλής ροής αποτελεί εναλλάκτης θερμότητας, πρόκειται για ένα ψυγείο (σχ. 1.4.2γ), του οποίου τα στεθερά όρια, δηλ. το περίβλημά του, επιτρέπουν μια σταθερή ροή μάζας μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντός του. Επειδή τα όρια του συστήματος είναι σταθερά, θα είναι σταθερός και ο όγκος του.

Για τα ανοικτά συστήματα, το μέρος του χώρου που καθορίζει το σύστημα, ονομάζεται **όγκος ελέγχου**.

Παράδειγμα ανοικτού συστήματος μονής ροής αποτελεί η φιάλη του σχήματος (1.4.2δ), που περιέχει ένα αέριο, που εκτονώνεται στο περιβάλλον του.



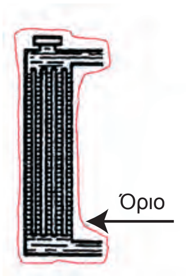
Σχήμα 1.4.2γ: *Ψυγείο ατμού ανοικτό σύστημα διπλής ροής*

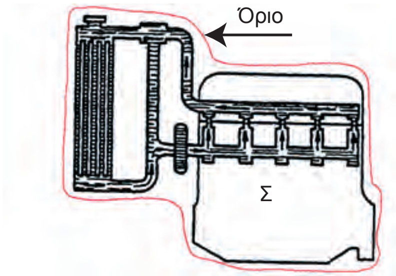


Σχήμα 1.4.1.2δ: *Εκτόνωση αερίου ανοικτό σύστημα μονής ροής*

Ενα μέρος ενός μεγαλύτερου συστήματος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ιδιαίτερο σύστημα και να εξετασθεί ξεχωριστά.

Ως παράδειγμα μεγαλύτερου συστήματος αναφέρουμε έναν κινητήρα αυτοκινήτου στον οποίο μπορούμε να απομονώσουμε το ψυγείο νερού και να το εξετάσουμε σαν ξεχωριστό σύστημα, (σχ. 1.4.2ε,στ).





1.5. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

Η **Θερμοδυναμική ισορροπία** ενός συστήματος προϋποθέτει τρία άλλα είδη ισορροπίας όπως:

α) **Θερμική ισορροπία:** Η θερμοκρασία του συστήματος είναι ίδια σε όλα τα σημεία.

β) **Μηχανική ισορροπία:** Όλες οι εσωτερικές δυνάμεις εξισορροπούνται, όπως και οι δυνάμεις μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος.

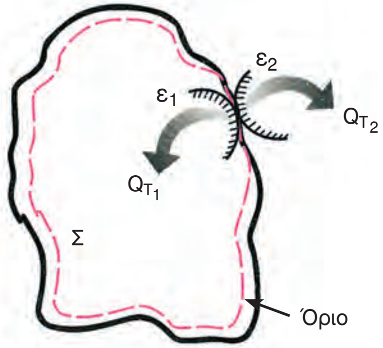
γ) **Χημική ισορροπία:** Η εσωτερική δομή και η χημική σύσταση παραμένουν σταθερά.

Επομένως, θα λέμε ότι ένα σύστημα είναι σε **Θερμοδυναμική ισορροπία**, όταν είναι σε μηχανική, θερμική και χημική ισορροπία.

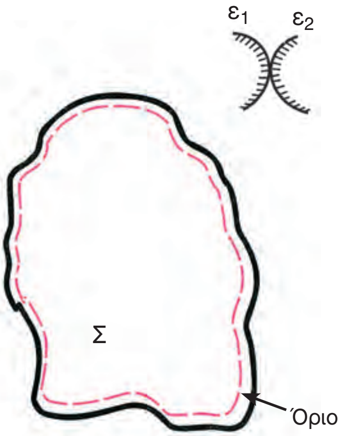
1.6. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για να λύσουμε **θερμοδυναμικά προβλήματα**, είναι απαραίτητο να **επιλέξουμε** με προσοχή το **σύστημα**. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει **να προσδιορίσουμε με ακρίβεια το σύστημα**, δηλαδή **τα όρια** αυτού και τον **περιβάλλοντα** χώρο του.

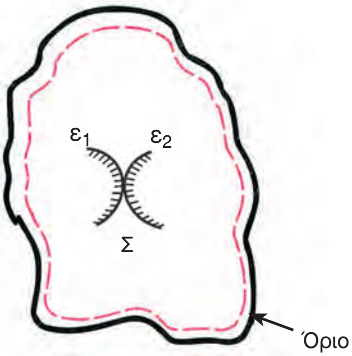
Εστω ότι έχουμε δύο επιφάνειες στερεών σωμάτων $\mathcal{E}_1$ και $\mathcal{E}_2$ σε επαφή, που βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους (σχήμα 1.6.δ.α,β,γ.) όπως



Σχήμα 1.6α: *Λανθασμένη επιλογή συστήματος*



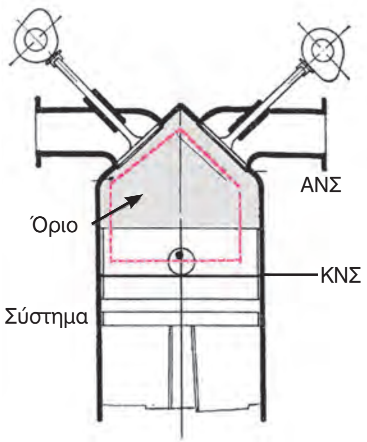
Σχήμα 1.6β: *Σωστή επιλογή συστήματος.*



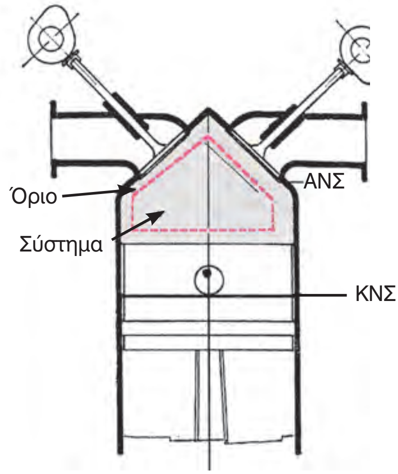
Σχήμα 1.6γ: *Σωστή επιλογή συστήματος*

Όπως γνωρίζουμε από τη Μηχανική, θα αναπτυχθεί τριβή και επομένως θερμότητα. Το ποσό της θερμότητας που παράγεται από την τριβή είναι γνωστό ότι μπορεί να υπολογιστεί. Παρατηρώντας το σχήμα 1.6α, διαπιστώνουμε ότι ένα μέρος της παραγόμενης θερμότητας από την τριβή, μπαίνει στο σύστημα και ένα άλλο μέρος μπαίνει στο εξωτερικό μέρος του συστήματος. Όμως δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν τα μεγέθη Q_T και Q_{T2} με αποτέλεσμα να υποστηρίζουμε ότι το θερμοδυναμικό πρόβλημα που παρουσιάζεται σ’ αυτό το σύστημα, είναι **άλυτο. Για την επιλογή των συστημάτων θα πρέπει να αποφεύγονται επιλογές, όπως η πιο πάνω.** Δεν ενοχλεί την επίλυση των θερμοδυναμικών προβλημάτων, εάν αυτές οι επιφάνειες βρίσκονται όλες μέσα ή όλες έξω από το σύστημα, όπως παρατηρούμε στα σχήματα 1.6.β,γ.

Ας δούμε ένα **θερμοδυναμικό πρόβλημα** που παρουσιάζεται συχνά στην πράξη. Σ’ ένα κινητήρα αυτοκινήτου, το έμβολο παλινδρομεί μέσα κύλινδρο μεταξύ του Λνω Νεκρού Σημείου (Α.Ν.Σ.) και του Κάτω Νεκρού Σημείου (Κ.Ν.Σ.) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.65. **Βρισκόμαστε στη φάση της εκτόνωσης των καυσαερίων** και ζητάμε να υπολογίσουμε **το έργο που παράγεται κατά την εκτόνωση των καυσαερίων**, που στη συνέχεια λαμβάνεται από το έμβολο και μέσω του διωστήρα μεταφέρεται στη στροφαλοφόρο άτρακτο, με τη μορφή μηχανικού έργου. Για τη λύση του θερ μοδυναμικού αυτού προβλήματος, πρώτη μας ενέργεια είναι να προσδιορίσουμε το σύστημα μελέτης του προβλήματος, δηλαδή το μέρος της ύλης στο οποίο θα επικεντρώσουμε την προσοχή μας.



Σχήμα 1.6δ: *Λανθασμένη επιλογή συστήματος.*

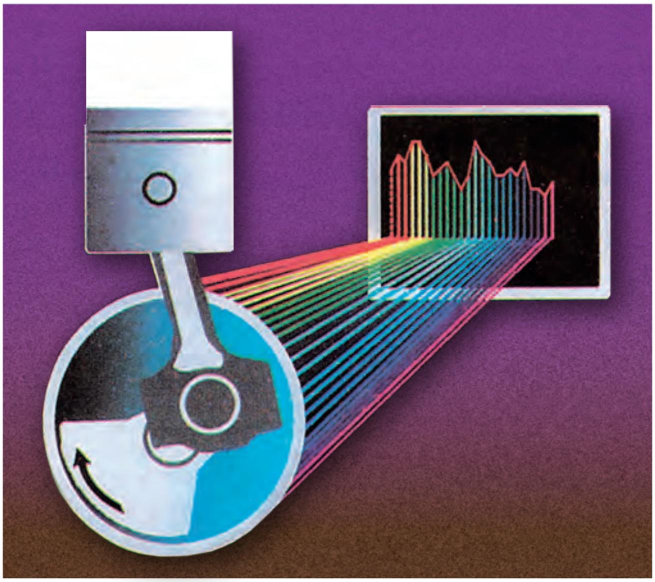


Σχήμα 1.6δ: *Σωστή επιλογή συστήματος.*

Παρατηρούμε ότι, αν επιλέξουμε το σύστημα, όπως στο (σχ. 1.6δ) στα σημεία Α και Β, δηλαδή στα όρια του συστήματος, υπάρχουν επιφάνειες σε σχετική κίνηση μεταξύ τους και, επομένως, εμπίπτουμε στην περίπτωση όπου **το πρόβλημα είναι άλυτο**. Αντίθετα, εάν παρατηρήσουμε το (σχ. 1.6ε) και επιλέξουμε το σύστημα που φαίνεται στο σχήμα, τότε δεν υπάρχει το προηγούμενο εμπόδιο και συνεπώς **το πρόβλημα έχει λύση**.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 1ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- **Η Θερμοδυναμική** ασχολείται με τα φυσικά φαινόμενα που μεταβάλλουν, εκτός από τα μηχανικά μεγέθη ενός συστήματος, τα θερμικά και χημικά μεγέθη του.
- Μονάδες μέτρησης της πίεσης στο (S.I.) είναι το **Πασκάλ (Pa)**, της ενέργειας το **Τζάουλ (J)** και της ισχύος το **Βατ, (W)**.
- Η **ενέργεια** εμφανίζεται με **διάφορες μορφές** ως θερμική, μηχανική, κινητική, δυναμική, ηλεκτρική, χημική, πυρηνική.
- Ένα σύστημα με σταθερή μάζα ονομάζεται **κλειστό σύστημα** και ένα σύστημα που επιτρέπει τη μεταφορά μάζας, μέσω των οριακών του επιφανειών, ονομάζεται **ανοικτό σύστημα** ή **όγκος ελέγχου**.
- **Η σωστή επιλογή συστήματος** διευκολύνει **την επίλυση θερμοδυναμικών προβλημάτων.**
- Η **θερμοδυναμική ισορροπία** ενός συστήματος προϋποθέτει την θερμική, μηχανική και χημική ισορροπία.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΠΙΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

2.1 Επίλυση θερμοδυναμικών προβλημάτων

2.2 Παράμετροι που ορίζουν τη θερμοδυναμική κατάσταση της ύλης

2.3 Εξωτερικές παράμετροι προσδιορισμού της θέσης του επιλεγέντος θερμοδυναμικού συστήματος

2.4 Εσωτερικές παράμετροι μιας θερμοδυναμικής κατάστασης της ύλης (του συστήματος)

2.5 Μέθοδος επίλυσης θερμοδυναμικών προβλημάτων

2.6 Μαθηματικές σχέσεις

2.7 Καταστατική εξίσωση των αερίων

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να **αναφέρετε** τα είδη των παραμέτρων που ορίζουν τη θερμοδυναμική κατάσταση της ύλης.
- Να **γνωρίζετε** τον αριθμό των παραμέτρων που απαιτούνται, για να λύσουμε θερμοδυναμικά προβλήματα.
- Να **εξηγείτε** την αναγκαιότητα της χρήσης των Η/Υ για την επίλυση των θερμοδυναμικών προβλημάτων.
- Να **αναφέρετε** τις συνθήκες που απαιτούνται για να προσδιορίζεται ένα θερμοδυναμικά πρόβλημα από την πίεση και τη θερμότητα.
- Να **γνωρίζετε** τις μεθόδους που ακολουθούμε, για να λύσουμε θερμοδυναμικά προβλημάτα και να αναφέρετε χαρακτηριστικά παραδείγματα.
- Να **αναφέρετε** τη διαδικασία που ακολουθούμε, για να λύσουμε θερμοδυναμικά προβλήματα.
- Να **αναφέρετε** τα είδη των μαθηματικών σχέσεων που εκφράζουν τα θερμοδυναμικά φαινόμενα.
- Να **ορίζετε** τις έννοιες: τέλειο αέριο, ιδεώδες, σχεδόν ιδεώδες, πραγματικό.

2.1. ΕΠΙΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Για την **επίλυση των θερμοδυναμικών προβλημάτω**ν, που είναι και το αντικείμενο αυτού του βιβλίου, θα πρέπει, όπως προαναφέραμε, **να επιλεχθεί σωστά το σύστημα**, που θα προσδιορίζει το αντικείμενο μελέτης μας. Στη συνέχεια, θα πρέπει να **γράψουμε σχέσεις** μεταξύ του συστήματος και του εξωτερικού χώρου.

Παρατηρούμε ότι όλες οι **μηχανικές σχέσεις** (δυνάμεις επιφάνειας και απόστασης), οι **θερμικές σχέσεις μετάδοσης θερμότητας** (με αγωγή μεταφορά και ακτινοβολία) και οι **θερμικές σχέσεις με παραγωγή θερμότητας με το φαινόμενο της τριβής** μεταξύ των επιφανειών στερεών σωμάτων είναι πάντοτε σχέσεις, που γράφονται μεταξύ του συστήματος και του εξωτερικού χώρου αυτού.

Οι **θερμικές σχέσεις** που γράφονται για την παραγωγή θερμότητας από χημικές αντιδράσεις (καύση) και από φυσικές αντιδράσεις γράφονται και αφορούν ή το εσωτερικό του συστήματος ή το εξωτερικό μέρος αυτού. **Η θερμοδυναμική κατάσταση της ύλης θα είναι γνωστή (λύση του προβλήματος), όταν είναι γνωστές όλες οι παράμετροι που ελέγχουν αυτή.**

2.2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΟΡΙΖΟΥΝ ΤΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ

Οι παράμετροι που ορίζουν τη **θερμοδυναμική κατάσταση της ύλης** δια κρίνονται σε δύο κατηγορίες :

α) **Εξωτερικές παράμετροι**.

Αυτές που ορίζουν τη **θέση του συστήματος**.

β) **Εσωτερικές παράμετροι.**

Αυτές διακρίνονται σε **χημικές παραμέτρους** οι οποίες καθορίζουν το βαθμό προχώρησης της χημικής αντίδρασης της καύσης που συμβολίζεται με **α**.

Το α δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\text{αριθμός moles αντιδρώντων}}{\text{συνολικός αριθμός moles που υπάρχουν}}$$

Σε **μηχανικές παραμέτρους** που ορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά της ύλης (εννέα σε αριθμό στη γενική τους έκφραση).

Για τις **θερμικές**, κεντρική παράμετρο θεωρούμε τη **θερμοκρασία T**.

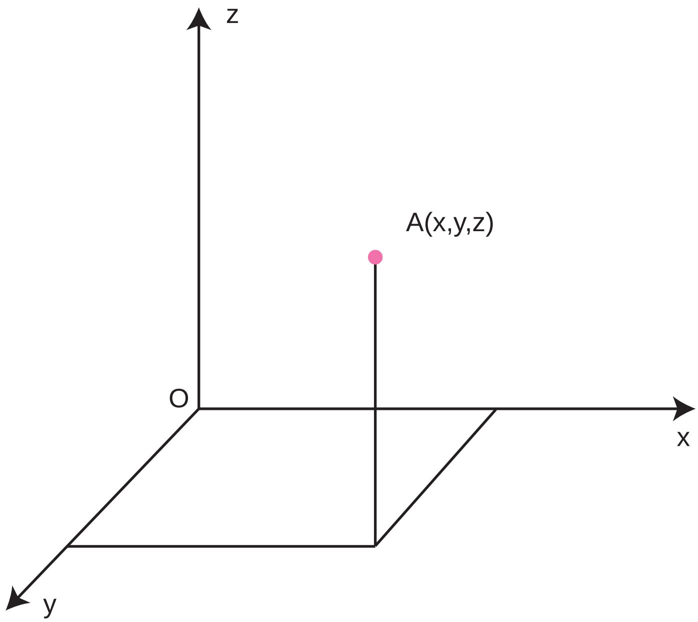
Σημειώνουμε ότι ο αριθμός των εσωτερικών παραμέτρων, που αναφέραμε και πιο πάνω, είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος δίχως να αποκλείεται να είναι περισσότερες.

2.3. ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΠΙΛΕΓΟΝΤΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Οι εξωτερικές παράμετροι της θερμοδυναμικής κατάστασης της ύλης παρουσιάζουν μικρό ενδιαφέρον στις θερμικές μηχανές, εκτός βέβαια από τις υδραυλικές μηχανές.

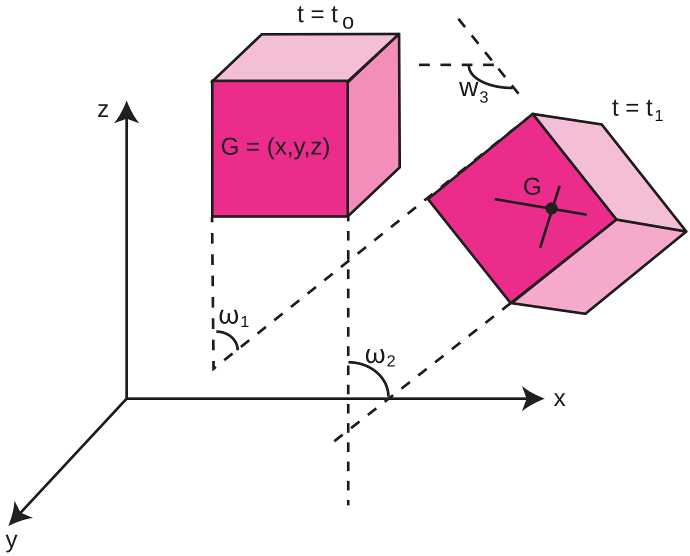
Είναι γνωστό ότι, καθορίζοντας ένα σύστημα αναφοράς **O(x, y, z)**, πρέπει να γνωρίζουμε τη θέση του επιλεγέντος συστήματος ως προς το σύστημα αναφοράς.

Εάν το **σύστημά** μας (εκεί που επικεντρώνεται η μελέτης μας) είναι ένα **σημείο Α**, για να καθοριστεί η θέση του ως προς το σύστημα αναφοράς, απαιτούνται **τρείς παράμετροι** (x, y, z) (σχ. 2.3.α.)



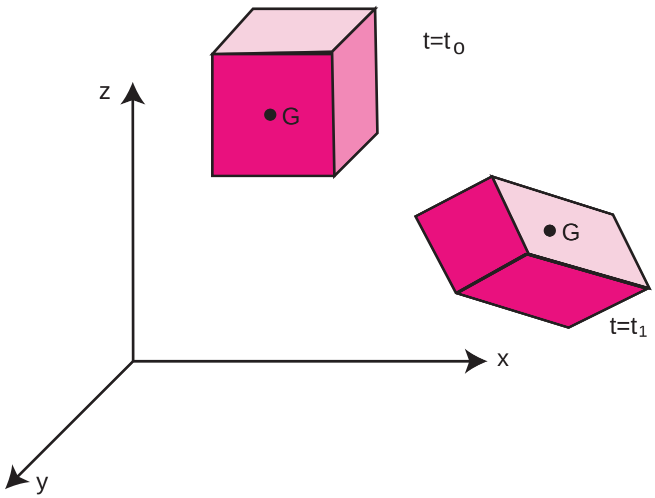
Σχήμα 2.3α. *Η θέση του συστήματος Α (υλικό σημείο) προσδιορίζεται από τις παραμέτρους x,y,z.*

Εάν το σύστημα είναι ένα **στερεό σώμα** (κύβος) που κινείται, τότε αρκούν **έξι παράμετροι**, για να καθοριστεί η θέση του ως προς το σύστημα αναφοράς. Τρεις (x, y, z) που καθορίζουν τη θέση του κέντρου βάρους του G και τρεις που καθορίζουν τη θέση που έχει αυτό, ως προς την αρχική θέση του ω_1 ω_2, ω_3, όπως φαίνονται στο (σχ. 2.3.β.).



Σχήμα 2.3β. *Η θέση του συστήματος (κύβος) προσδιορίζεται από τις παραμέτρους χ, y, z και ω_1, ω_2, ω_3.*

Εάν αντίστοιχα το σύστημά μας είναι ένα **ρευστό** που κινείται, τότε παρατηρούμε ότι αυτό συνεχώς παραμορφώνεται και, συνεπώς, θα απαιτούνται άλλες **τρεις επιπλέον παράμετροι**, που θα προσδιορίζουν την αλλαγή της μορφής του, σχετικά με την αρχική του θέση (σχ. 2.3.γ.)



Σχήμα 2.3γ. *Το σύστημα, εκτός του ότι περιστρέφεται ως προς την αρχική του θέση επιπλέον παραμορφώνεται.*

Συνεπώς, για τον προσδιορισμό του συστήματος αυτού ως προς το σύστημα αναφοράς, απαιτούνται **9 παράμετροι**.

Παρατηρούμε ότι η **θέση του συστήματος**, δηλαδή η **γνώση των εξωτερικών παραμέτρων** του ως προς ένα σύστημα αναφοράς είναι αναγκαία, γιατί από τη **θέση του συστήματος εξαρτώνται διάφορες μορφές ενέργειας** όπως για παράδειγμα η δυναμική ενέργεια. Επίσης στις περιπτώσεις που το ρευστό είναι υγρό (αντλίες, υδροστρόβιλοι).

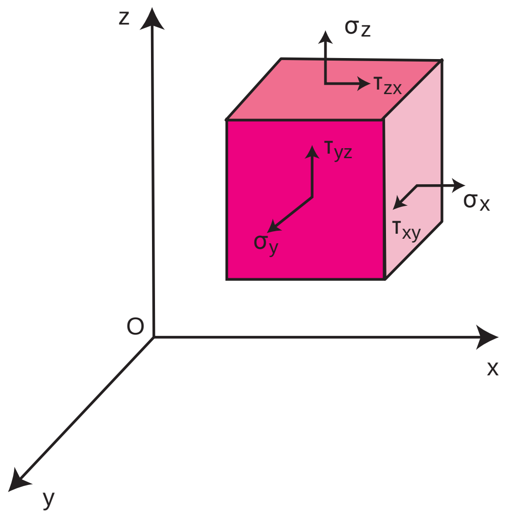
Αντίθετα, για την περίπτωση των αερίων ρευστών η ανάγκη προσδιορισμού της θέσης προκύπτει όχι από τη θέση, αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα, την ορμή, την κινητική ενέργεια του ρευστού.

2.4. ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΙΑΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ (ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ)

Οι **εσωτερικές παράμετροι** διακρίνονται, όπως προαναφέραμε, σε **χημικές**, σε **μηχανικές** και **θερμικές**.

Για τις εφαρμογές στις θερμικές μηχανές και εργομηχανές ο αριθμός των χημικών παραμέτρων του ποσοστού μετατροπής που λαμβάνονται το πολύ **δύο σε αριθμό**, γνωρίζοντας ότι υπάρχουν και άλλες. Θεωρώντας μόνο δύο πετυχαίνουμε αρκετά ακριβείς λύσεις.

Για να προσδιοριστούν οι μηχανικές εσωτερικές παράμετροι ενός ομογενούς συστήματος απαιτείται η γνώση **6 παραμέτρων**, που είναι οι εσωτερικές τάσεις που αναπτύσσονται εντός της ύλης **(σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx})** σχήμα 2.4.α.



Σχήμα 2.4α. *Για τον προσδιορισμό μηχανικών εσωτερικών παραμέτρων του συστήματος απαιτούνται έξι παράμετροι (σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xy}, τ_{yz}, τ_{zx}).*

Ο προσδιορισμός των θερμικών παραμέτρων περιορίζεται στον προσδιορισμό **μιας** μόνο παραμέτρου, εκείνης της **θερμοκρασίας T**.

Έτσι, παρατηρούμε ότι, για την **επίλυση ενός θερμοδυναμικού προβλήματος στη γενική του μορφή**, απαιτείται να προσδιοριστούν τουλάχιστον **9 εξωτερικές** και **7 εσωτερικές** παράμετροι.

Στα πιο πάνω πρέπει να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

➟ Παρατήρηση 1

Η επίλυση των 16 παραμέτρων προφανώς, απαιτεί τη λύση ενός συστήματος 16 εξισώσεων με 16 αγνώστους. Είναι κατανοητό ότι η χρήση του Η/Υ είναι αναγκαία για τη λύση τέτοιων προβλημάτων. Για το λόγο αυτό είμαστε υποχρεωμένοι να τονίσουμε ότι η ανάπτυξη της μηχανολογικής τέχνης στο εξής είναι ζήτημα ανάπτυξης των Η/Υ.

➟ Παρατήρηση 2

Όπως αναφέρθηκε, για τον προσδιορισμό των **εσωτερικών παραμέτρων απαιτούνται τουλάχιστον 7 παράμετροι. Πώς γίνεται, λοιπόν, να την καθορίζουν μόνο δύο, η πίεση P (μηχανική παράμετρος) και θερμότητα T (θερμική παράμετρος). Μπορεί ένα θερμοδυναμικό πρόβλημα να προσδιορίζεται από δύο παραμέτρους P και T όταν:**

1. Το ρευστό θεωρείται ότι δεν έχει ιξώδες (ιδανικό).
2. Το ρευστό μπορεί να θεωρηθεί πραγματικό, δηλαδή ιξώδες $\neq 0$ αλλά η ταχύτητα μεταβολής της μορφής του συστήματος γίνεται αργά.
3. Όταν στο σύστημα δεν μεταβάλλεται η μορφή του.

Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις είμαστε υποχρεωμένοι να θεωρήσουμε έξι παραμέτρους.

2.5. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Για την επίλυση θερμοδυναμικών Προβλημάτων εφαρμόζονται δύο ξεχωριστές μέθοδοι:

α) Μέθοδος κατά Lagrange

β) Μέθοδος κατά Euler

Με τη **μέθοδο του Lagrange** η προσοχή μας συγκεντρώνεται σε ορισμένο μέρος της ύλης (σύστημα) και παρακολουθούμε την εξέλιξή του στο χρόνο.

Με τη **μέθοδο του Euler** η προσοχή μας συγκεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο χώρο (όγκος ελέγχου), που ορίζεται από μια πεπερασμένη και σταθερή επιφάνεια που δεν παραμορφώνεται, και μελετάμε τι γίνεται στο χρόνο, στο εσωτερικό αυτού του όγκου και πάνω στην επιφάνεια που περιορίζει αυτόν, δίχως να ενδιαφέρει το γεγονός ότι η ύλη διέρχεται συνεχώς ή περιοδικώς από αυτόν τον όγκο.

Με τη **μέθοδο του Lagrange** ακολουθούμε την **"ιστορία"** μιας **συγκεκριμένης μάζας**, ενώ με τη μέθοδο του Euler παρακολουθούμε την **"ιστορία" του όγκου τοπικά στο χρόνο**. Είναι **δύο διαφορετικοί μέθοδο**ι επίλυσης θερμοδυναμικών προβλημάτων που όμως οδηγούν στα **ίδια αποτελέσματα**, με τη διαφορά ότι, πολλές φορές, οι χρόνοι που απαιτούνται για την επίλυση είναι διαφορετικοί.

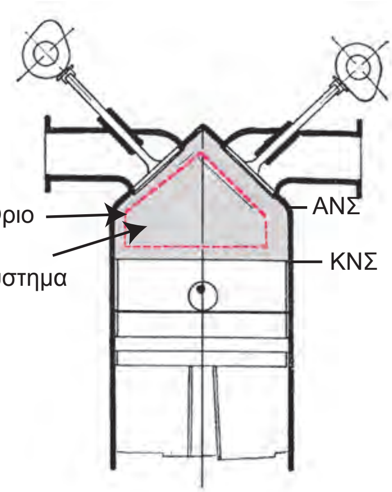
Υπάρχουν περιπτώσεις που προτιμάται ο ένας ή ο άλλος τρόπος επίλυσης η καμιά φορά και οι δύο μαζί.

Συνήθως η μέθοδος **Lagrange εφαρμόζεται σε κλειστά συστήματα**, ενώ του **Euler στα ανοικτά**.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.1

Εκτόνωση σε παλινδρομικό κινητήρα εσωτερικής καύσεως. Μελετάμε τη φάση της εκτόνωσης σε έναν παλινδρομικό τετράχρονο κινητήρα εσωτερικής καύσεως (σχ. 2.5.α.)

Επιλέγεται ως σύστημα το ρευστό μάζας m_a. Για να μελετηθεί η θερμοδυναμική μεταβολή της φάσης της εκτόνωσης και για να βρεθούν οι παράμετροι της εσωτερικής κατάστασης του ρευστού, είναι προφανές ότι θα εφαρμοστεί η μέθοδος του Lagrange. Εάν εφαρμοζόταν η μέθοδος Euler, η λύση θα ήταν περισσότερο πολύπλοκη και χρονοβόρα.

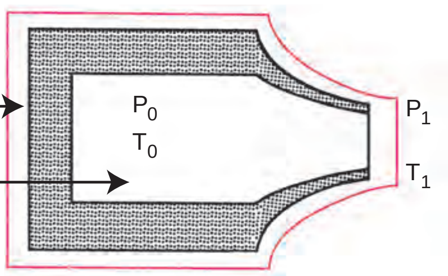


Σχήμα 2.5α. *Εκτόνωση σε παλινδρομικό κινητήρα εσωτερικής καύσης.*

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.2

Θεωρούμε ένα ακροφύσιο, όπως στο σχήμα, που τροφοδοτείται από μια δεξαμενή όπου οι παράμετροι Po, To παραμένουν σταθερές στο χρόνο και ζητούνται οι P_1, T_1 στην έξοδο (σχ. 2.5.β)

Επειδή υπάρχει μόνιμη ροή στο ακροφύσιο, επιλέγουμε ως σύστημα έναν όγκο ελέγχου, όπως φαίνεται στο σχήμα, και εφαρμόζουμε τη μέθοδο Euler. Η μέθοδος αυτή στο συγκεκριμένο πρόβλημα μας απαλλάσσει από διάφορους σύνθετους όρους και σχέσεις που πρέπει να υπολογισθούν αφήνοντας μόνο τις σχέσεις διατήρησης της ενέργειας.

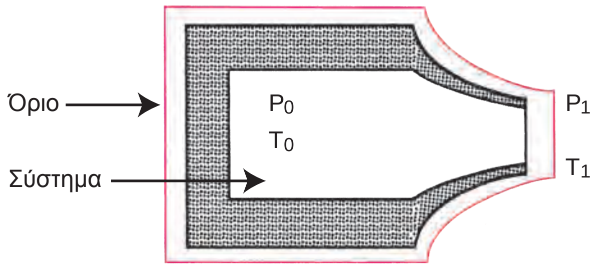


Σχήμα 2.5.6. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 2.2.*

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.3

Δίνεται το ακροφύσιο του σχήματος 2.5γ. Δίνονται οι συνθήκες της δεξαμενής Po, To, οι οποίες μεταβάλλονται με το χρόνο και ζητούνται οι παράμετροι στην έξοδο του ακροφύσιου.

Σ' αυτήν την περίπτωση οι συνθήκες μεταβάλλονται με το χρόνο. Έτσι, η ροή από το ακροφύσιο μεταβάλλεται, γιατί οι συνθήκες μεταβάλλονται από το άδειασμα της δεξαμενής. Σ' αυτήν την περίπτωση θα εφαρμόζεται η μέθοδος του Lagrange.



Σχήμα 2.5γ. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 2.3.*

2.6. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Για την **επίλυση των θερμοδυναμικών προβλημάτων**, μετά την **επιλογή του συστήματος**, μετά τον **προσδιορισμό των εξωτερικών και εσωτερικών παραμέτρων** και μετά τον **προσδιορισμό της μεθόδου επίλυσης Lagrange - Euler**, γράφονται ορισμένες **μαθηματικές σχέσεις**, που εκφράζουν τους νόμους που διέπουν τα διάφορα θερμοδυναμικά φαινόμενα.

Θα περιοριστούμε, να γράψουμε τις μαθηματικές σχέσεις, που εκφράζουν την ανάλυση των φαινομένων.

Οι σχέσεις που γράφονται για την επίλυση των θερμοδυναμικών προβλημάτων είναι:

1. Σχέσεις που εκφράζουν το **νόμο της διατήρησης της ύλης**.
2. Σχέσεις που εκφράζουν το **νόμο της διατήρησης της ορμής**.
3. Σχέσεις που εκφράζουν **την αρχή της διατήρησης της ροπής της ορμής (στροφορμή)**.
4. Σχέσεις που εκφράζουν **την αρχή διατήρησης της ενέργειας**.
5. Σχέσεις **φαινομενολογικές**, δηλαδή σχέσεις που εκφράζουν τα διάφορα φυσικά φαινόμενα.

Μεταξύ των τελευταίων διακρίνουμε :

α. Καταστατική εξίσωση των αερίων,

β. Ο νόμος διάδοσης της θερμότητας (Furrier),

γ. Ο νόμος του Ohm.

δ. Ο νόμος της ακτινοβολίας Stefan - Bolzman.

2.7. ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Η **εξίσωση** αυτή εκφράζει μια σχέση μεταξύ της **πίεσης**, της **θερμοκρασίας** και του **ειδικού όγκου**.

$$P \cdot v = R \cdot T \tag{2.7.α}$$

όπου: P : πίεση,

v : ειδικός όγκος,

T : θερμοκρασία,

R : σταθερά της ελαστικότητας των αερίων.

Όταν για ένα αέριο θεωρείται ότι η παράμετρος R αυτού είναι σταθερή, δηλ. ανεξάρτητη από τη μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας, το αέριο θεωρείται **τέλειο**.

Η σταθερά των αερίων R:

$$R = \frac{Ra}{M} \tag{2.7.β}$$

όπου: Ra η παγκόσμια σταθερά των αερίων,

M μοριακή μάζα του αερίου για το οποίο γράφεται η καταστατική εξίσωση του αερίου.

$$Ra = 8{,}3143 \text{ KJ/kgmolK} \tag{2.7.γ}$$

Στην περίπτωση που για ένα αέριο η παράμετρος αυτού είναι:

R = σταθ.

C_p = σταθ.: ειδική θερμότητα υπό ειδική σταθερή

C_v = σταθ.: ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο σταθερή

Τότε, το ρευστό συμπεριφέρεται σαν ένα **ιδεώδες αέριο**.

Εάν για ένα αέριο ισχύουν :

R = σταθ.

$C_p = C_p(T)$ συνάρτηση της θερμοκρασίας

$C_V = C_V(T)$ συνάρτηση της θερμοκρασίας

τότε μιλάμε για ένα αέριο **σχεδόν ιδεώδες**.

Συνήθως τα αέρια ρευστά που συναντάμε στη λειτουργία των θερμικών κινητήρων και εργομηχανών είναι περίπου αυτού του τύπου.

Γενικά για τα **πραγματικά αέρια** ισχύει η σχέση :

$$\mathbf{M \cdot P \cdot V = \zeta \cdot RT} \qquad (2.7.\delta)$$

όπου: M : μοριακή μάζα

R : παγκόσμια σταθερά των αερίων

z : συντελεστής συμπιεστικότητας του αερίου ρευστού.

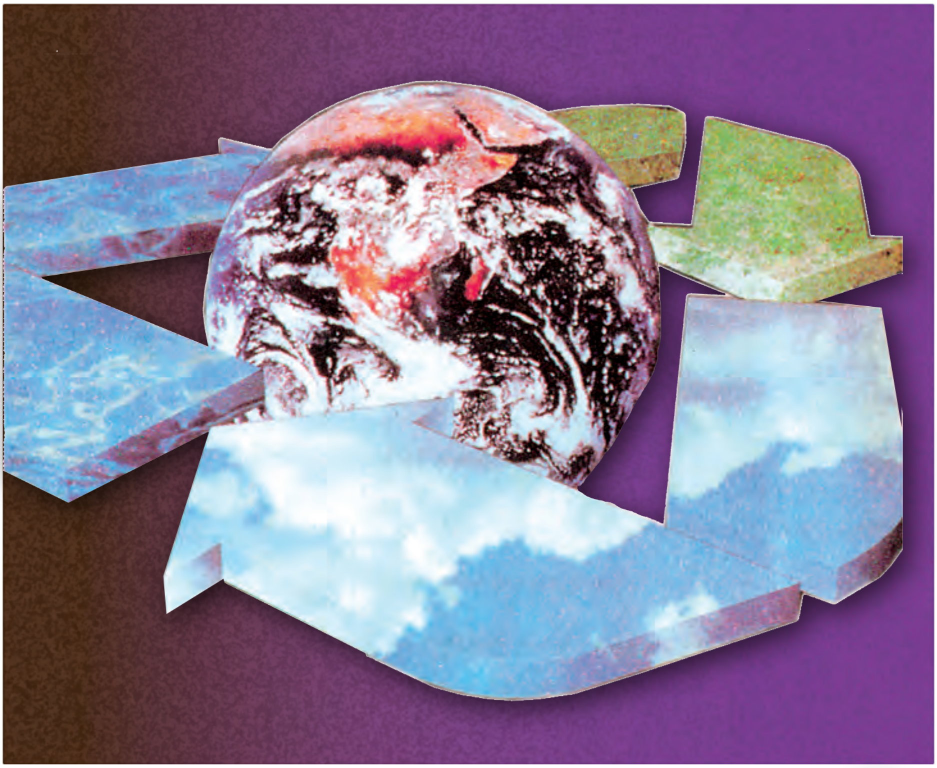
V : ειδικός όγκος

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 2ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Η **θερμοδυναμική κατάσταση της ύλης** είναι γνωστή, (λύση του προβλήματος), όταν είναι γνωστές όλες οι παράμετροι που ελέγχουν αυτή.
- Οι παράμετροι που ορίζουν τη **θερμοδυναμική κατάσταση της ύλης** διακρίνονται στις **εξωτερικές και εσωτερικές παραμέτρους**.
- Οι **εσωτερικές παράμετροι** διακρίνονται σε **χημικές, μηχανικές** και **θερμικές**.
- Ο αριθμός των εξωτερικών παραμέτρων, που απαιτούνται για τον **προσδιορισμό της θέσης ενός συστήματος**, είναι **9** σε αριθμό και παρουσιάζουν μικρό ενδιαφέρον στις θερμικές μηχανές.
- Ο αριθμός των εσωτερικών παραμέτρων, που απαιτούνται για τον **προσδιορισμό μιας θερμοδυναμικής κατάστασης** της ύλης είναι **7** σε αριθμό για ομογενές σύστημα.
- Η **ανάπτυξη** της **μηχανολογικής τέχνης** είναι ζήτημα **ανάπτυξης** των Η/Υ.
- Μπορεί ένα θερμοδυναμικό πρόβλημα να προσδιορίζεται από **δύο παραμέτρους P** και **T**, όταν ικανοποιούνται ορισμένες συνθήκες.
- Για να λύσουμε θερμοδυναμικά προβλήματα, συνήθως επιλέγουμε τη **μέθοδο του Lagrange** για τα κειστά συστήματα και τη **μέθοδο Euler** για τα ανοικτά.
- Οι **μαθηματικές** σχέσεις που γράφονται για την επίλυση των θερμοδυναμικών προβλημάτων εκφράζουν τους νόμους που διέπουν τα διάφορα θερμοδυναμικά φαινόμενα.
- Η **καταστατική εξίσωση των αερίων** εκφράζονται από τη σχέση

$$\mathbf{P \cdot v = R \cdot T.}$$

- Το αέριο θεωρείται **τέλειο** όταν R = σταθ δηλ. ανεξάρτητη από την πίεση και τη θερμοκρασία.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΚΦΡΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ

3.1 Αρχή διατήρησης της μάζας

3.2 Αρχή διατήρησης της ορμής

3.3 Νόμοι θερμοδυναμικών μεταβολών

3.4 Το διάγραμμα των καταστάσεων (P-v), (T-s)

3.5 Μεταβολή

3.7 Η Θερμότητα και η θερμοκρασία

3.8 Οι χρήσεις και η παραγωγή της θερμικής ενέργειας

3.9 Εσωτερική ενέργεια

3.10 Ενθαλπία

3.11 Κυκλική μεταβολή Θερμοδυναμικός κύκλος

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να **απεικονίζετε** γραφικά στο διάγραμμα (P-v) και (T-S) τη στιγμιαία κατάσταση την – αλλαγή καταστάσεως – την κυκλική αλλαγή.
- Να **αναφέρετε** τις χαρακτηριστικές θερμοδυναμικές μεταβολές.
- Να **εξηγείτε** και να **ορίζετε** τις έννοιες της θερμότητας και της θερμοκρασίας και να **γνωρίζετε** τις μονάδες μέτρησής τους.
- Να **γνωρίζετε** τη συμβατική φορά που καθορίζει το πρόσημο στη ροή της θερμότητας από και προς το σύστημα.
- Να **γνωρίζετε** τον τρόπο παραγωγής της θερμότητας και τη χρήση της.
- Να **εξηγείτε** τις έννοιες εσωτερική ενέργεια, ενθαλπία, ειδική ενθαλπία και να **δίνετε** σύντομο ορισμό.

3.1 ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ

Στην περίπτωση που πρέπει να γραφτούν σχέσεις που εκφράζουν την αρχή διατήρησης της μάζας, διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

α) Περιπτώσεις κατά τις οποίες **η εξέλιξη της ύλης** γίνεται κατά τρόπο **αργό** π.χ. (Μ.Ε.Κ. αεροσυμπιεστές κ.λ.π.).

β) Περιπτώσεις στις οποίες **η εξέλιξη της ύλης** γίνεται κατά τρόπο πολύ **γρήγορο**, (αεροστρόβιλοι, κινητήρες πυραύλων κ.λ.π.).

Για την πρώτη περίπτωση οι σχέσεις αυτές είναι απλές, όπως φαίνεται στο πιο κάτω παράδειγμα:

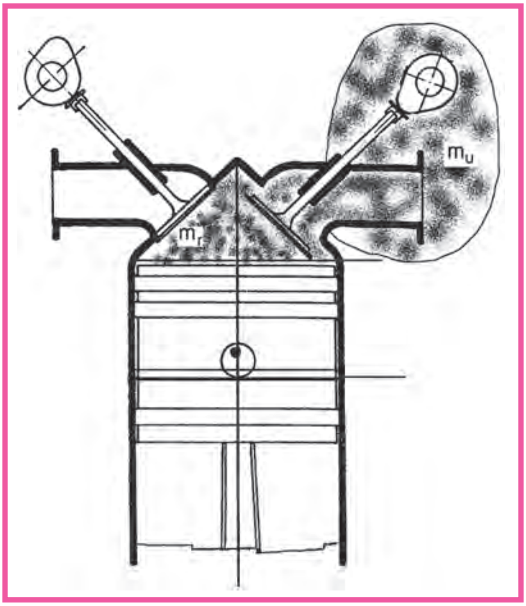
Παρατηρώντας το σχήμα 3.1α μπορούμε να γράψουμε την αρχή διατήρησης της ύλης:

$$\mathbf{m_g = m_r + m_u} \tag{3.1α}$$

όπου: m_g η μάζα στην αρχή της φάσης της βεβιασμένης εξαγωγής (έμβολο στο Κ.Ν.Σ.).

m_r το ποσό της μάζας εντός του κυλίνδρου στην τυχαία θέση αυτού.

m_u η μάζα που έχει βγει μέχρι εκείνη τη στιγμή έξω από τον κύ1λινδρο.



Σχήμα 3.1.α. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος*

Στη δεύτερη περίπτωση οι σχέσεις είναι περισσότερο πολύπλοκες και δεν θα αναφερθούν, γιατί είναι πέρα από τα όρια αυτού του βιβλίου.

3.2 ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΜΗΣ

Οι μαθηματικές σχέσεις που γράφονται στην περίπτωση αυτή είναι σύνθετες και παρουσιάζουν μεγάλη δυσκολία στην επίλυσή τους. Είναι αλήθεια ότι, μέχρι σήμερα, δεν έχουν επιλυθεί αναλυτικά, παρά μόνο αριθμητικά με τη χρήση Η/Υ και μάλιστα σε απλοποιημένες μορφές.

Το ίδιο και ακόμη περισσότερο συμβαίνει για τις εξισώσεις που εκφράζουν την αρχή διατήρησης της στροφορμής. Γ Γ αυτές τις δυσκολίες, στις θερμικές μηχανές και στις εργομηχανές, συχνά, αντικαθίσταται η εξίσωση της διατήρησης της ορμής με ένα νόμο θερμοδυναμικής μεταβολής του τύπου: PV^m = σταθερό, με εκθέτη m που λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα του ιξώδους και της ταχύτητας της παραμόρφωσης σ' ένα πραγματικό ρευστό. Ο εκθέτης m προσδιορίζεται πειραματικά.

3.3 ΝΟΜΟΙ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές, όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι του τύπου:

$$PV^m = \text{σταθερό} \qquad (3.3α)$$

Πριν αναλύσουμε την προηγούμενη σχέση θα αναπτύξουμε μερικές βασικές έννοιες της θερμοδυναμικής.

3.4 ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ (P-v), (T-s)

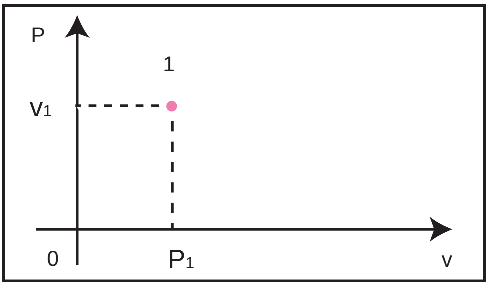
Σύμφωνα με όσα αναφέραμε σε προηγούμενη παράγραφο, για να ορίσουμε τη **θερμοδυναμική κατάσταση της ύλης**, χρειαζόμαστε **δύο παραμέτρους**, που από εδώ και στο εξής θα ονομάζουμε καταστατικά μεγέθη.

Επομένως, μπορούμε να απεικονίσουμε γραφικά τη Θερμοδυναμική κατάσταση του συστήματος σε ένα καρτεσιανό διάγραμμα, που έχει άξονες

Εστω ότι γνωρίζουμε τις τιμές P_1, v_1 πιέσεως και ειδικού όγκου του συστήματος στη κατάσταση Θερμοδυναμικής ισορροπίας 1.

Μπορούμε να απεικονίσουμε την κατάσταση 1 με ένα σημείο σε δύο άξονες, με τετμημένες τον ειδικό όγκο V και τεταγμένες την πίεση P. (σχ. 3.4.α)

Το διάγραμμα αυτό ονομάζεται διάγραμμα των **καταστάσεων** ή **καταστάσεων ή καταστατικό διάγραμμα (P-v**)

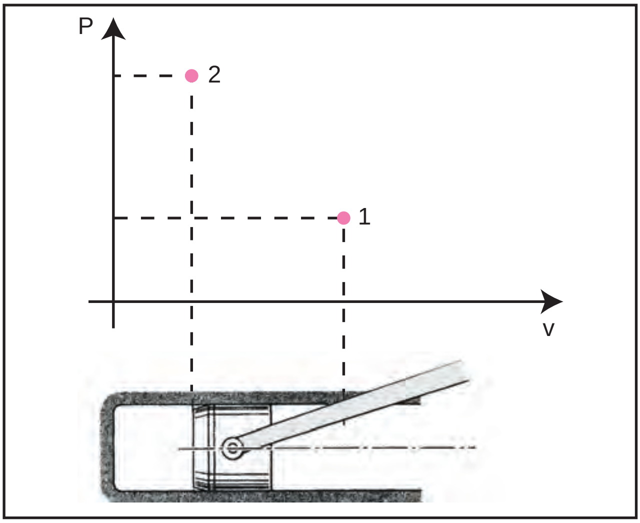


Σχήμα 3.4.α. *Καταστατικό διάγραμμα (P-v).*

Παρατηρούμε στο παρακάτω σχήμα, μια διάταξη κυλίνδρου εμβόλου που περιέχει 1 kg αέρα.

Ο αέρας στην ατμοσφαιρική πίεση και στους 20˚ C έχει ειδικό όγκο 0,83 m^3/kg. Στους 411˚ C σε πίεση 4x10^3kPa έχει ειδικό όγκο 0,5 m^3/kg όπως προκύπτει από πίνακες.

Μπορούμε να πραγματοποιήσουμε αυτές τις δύο καταστάσεις του αέρα 1 και 2 μέσα στον κύλινδρο και με κατάλληλη κλίμακα να τις απεικονίσουμε στο διάγραμμα (P-V), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4β.



Σχήμα 3.4.6. *Διάταξη εμβόλου-κυλίνδρου και καταστατικό διάγραμμα (P-V).*

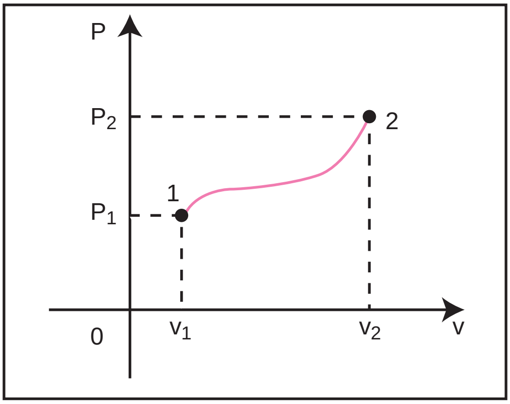
Τα σημεία 1 και 2 απεικονίζουν στο διάγραμμα (P-V) τις παραπάνω καταστάσεις του αέρα.

Επίσης ένα πάρα πολύ χρήσιμο διάγραμμα για τη μελέτη της λειτουργίας των θερμικών μηχανών και εργομηχανών είναι το διάγραμμα **θερμοκρασίας, T εντροπίας, S (T-s)**. Για τη θερμοκρασία και την εντροπία θα αναφερθούμε σε επόμενα κεφάλαια.

3.5 ΜΕΤΑΒΟΛΗ

Παρατηρούμε στο παρακάτω σχήμα 3.5α ένα Θερμοδυναμικό σύστημα στην κατάσταση ισορροπίας 1 που χαρακτηρίζεται από τις τιμές P1(νν Tr

Εάν το σύστημα πραγματοποιήσει **εναλλαγή ενέργειας** με το περιβάλλον του, **η φυσική κατάσταση του συστήματος θα αλλάξει** και θα συνεχίζει να αλλάζει, έως ότου συνεχίζεται η εναλλαγή ενέργειας με το περιβάλλον του.



Σχήμα 3.5.α. *Μεταβολή.*

Όταν **η εναλλαγή ενέργειας** με το περιβάλλον σταματήσει, το σύστημα θα βρεθεί σε μια κατάσταση Θερμοδυναμικής **ισορροπίας** 2 διαφορετική από την αρχική κατάσταση που θα χαρακτηρίζεται από τις τιμές P2, v2, T2.

Μεταβολή ονομάζεται το σύνολο των καταστάσεων από τις οποίες πρέπει να περάσει το σύστημα, από την αρχική μέχρι να βρεθεί στην τελική του κατάσταση, λόγω των συναλλαγών ενέργειας με το περιβάλλον του. Το σύνολο των καταστάσεων από την αρχική 1 έως την τελική 2 θα εκπροσωπεί μια μεταβολή και θα απεικονίζεται στο διάγραμμα (P-v) από μια γραμμή 1-2, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι, για να πραγματοποιηθεί η μεταβολή, είναι αναγκαίο το σύστημα να εναλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον του.

Η μορφή της γραμμής, μέσω της οποίας απεικονίζεται η μεταβολή, εξαρτάται από τον τρόπο που πραγματοποιείται η συναλλαγή ενέργειας του συστήματος.

3.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ

Υπάρχουν μερικές χαρακτηριστικές μεταβολές με ειδικά ονόματα όπως:

1. **Ισόθερμη μεταβολή:** Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της μεταβολής.

$$\mathbf{m = 1, (Pv = RT).}$$

2. **Ισοβαρής μεταβολή:** Η πίεση παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της μεταβολής.

$$\mathbf{m = 0, P = \text{σταθερό}.}$$

3. **Ισόχωρη μεταβολή:** Ο ειδικός όγκος παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια της μεταβολής.

$$\mathbf{m = \infty, v = \text{σταθ}.}$$

4. **Αδιαβατική μεταβολή:** Δεν υπάρχει εναλλαγή θερμικής ενέργειας του συστήματος με το περιβάλλον του, κατά τη διάρκεια της μεταβολής.

$$\mathbf{m = K, \qquad K = \frac{C_p}{C_v}.}$$

5. **Πολυτροπική μεταβολή:**

$$\mathbf{m = m.}$$

Στο πιο κάτω σχήμα 3.6α έχουμε ότι ισχύει η σχέση:

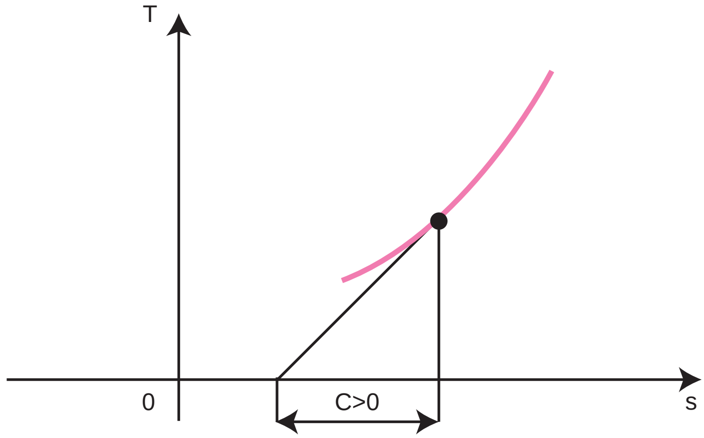
$$\boxed{\mathbf{T \cdot \Delta S = C \cdot \Delta T}} \qquad (3.6\alpha)$$

όπου: C είναι η **ειδική θερμότητα** του ρευστού που πραγματοποιεί τη θερμοδυναμική μεταβολή που παριστάνεται στα σχήματα 3.6α,β. Αυτή μπορεί να είναι θετική ή αρνητική σχ. 3.6α και σχ.3.6β αντίστοιχα.

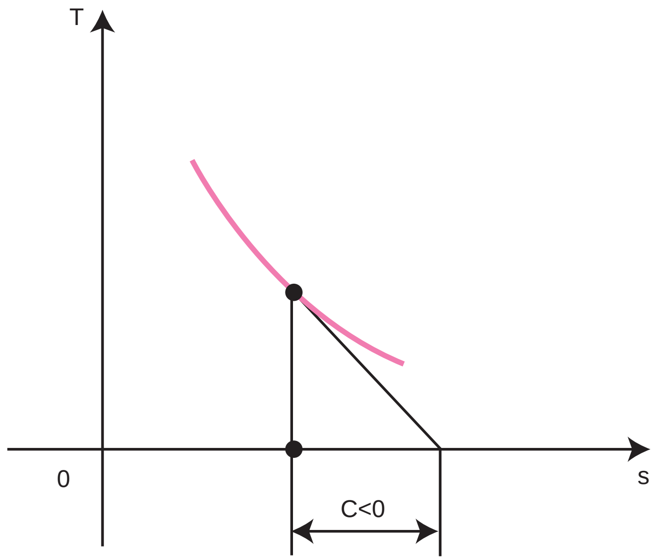
όπου T: είναι η θερμοκρασία.

ΔT: είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας.

AS: είναι η μεταβολή της εντροπίας.



Σχήμα 3.6.α. *Ειδική θερμότητα C >0.*



Σχήμα 3.6.β. *Ειδική θερμότητα C <0.*

Για περισσότερες λεπτομέρειες θα αναφερθούμε στο δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο.

Είναι **Cp > Cv ***

Γ ια την **ισόθερμη** μεταβολή έχουμε: $\mathbf{C = \pm\infty}$

Γ ια την **ισόχωρη** μεταβολή έχουμε: $\mathbf{C = C_v}$

Για την **ισοβαρή** μεταβολή έχουμε: $\mathbf{C = C_p}$

Για την **αδιαβατική** μεταβολή έχουμε: **C = 0**

Για την **πολυτροπική** μεταβολή έχουμε: **C = C**

Η ανάλυση των θερμοδυναμικών μεταβολών θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

➟ **Παρατήρηση ***

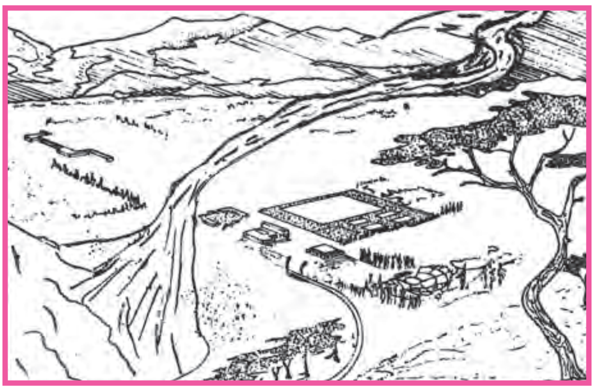
Εάν πραγματοποιήσουμε μια μεταβολή με σταθερό όγκο και μια με σταθερή πίεση σε μια διάταξη κυλίνδρου εμβόλου που τα όρια μεταβολής της θερμοκρασίας είναι τα ίδια, τότε $C_p > C_v$. Η θερμότητα που προστίθεται ή αφαιρείται, κατά τη διάρκεια της μεταβολής με σταθερή πίεση, είναι μεγαλύτερη από τη θερμότητα που προστίθεται ή αφαιρείται, κατά τη διάρκεια της μεταβολής με σταθερό όγκο.

Πράγματι, κατά τη μεταβολή με σταθερή πίεση, το ρευστό μετακινεί το έμβολο και, επομένως, παράγει έργο, ενώ, κατά τη μεταβολή με σταθερό όγκο, το έμβολο δεν μετακινείται και, άρα, δεν παράγει έργο.

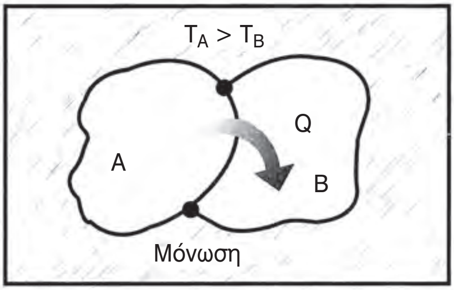
3.7 Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η θερμότητα είναι μια μορφή ενέργειας που μεταφέρεται, προστίθεται ή αφαιρείται από ένα σύστημα σώμα εξ αιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας.

Η **θερμότητα ρέει** από ένα σώμα **υψηλής θερμοκρασίας** σε ένα άλλο χαμηλής και ποτέ αντίστροφα, όπως τα ποτάμια ρέουν από τα βουνά προς τη θάλασσα, (σχ. 3.7α και σχ. 3.7β).



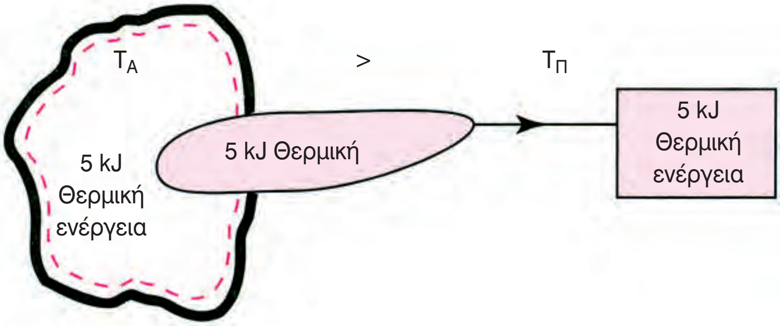
Σχήμα 3.7.α. *Αιτία της ροής των ρευστών είναι η υψομετρική διαφορά. Αιτία της ροής θερμότητας είναι η διαφορά θερμοκρασίας.*



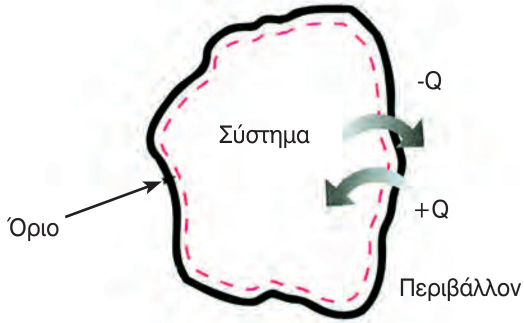
Σχήμα 3.7.β. *Θερμότητα ρέει από την υψηλή θερμοκρασία στη χαμηλή και ποτέ αντίστροφα.*

Η θερμότητα είναι, επομένως, **μορφή ενέργειας σε κατάσταση μεταφοράς** που γίνεται αντιληπτή, όταν διαπερνάει τα όρια του συστήματος.

Το σώμα Α έχει ενέργεια και, λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας με το περιβάλλον, παίρνει τη μορφή θερμότητας, μόνο εάν περάσει το όριο του συστήματος. Από τη στιγμή που θα περάσει στο περιβάλλον, γίνεται μέρος της ενέργειας του περιβάλλοντος, (σχ. 3.7γ).



Σχήμα 3.7.γ. *Η θερμότητα γίνεται αντιληπτή, όταν διαπερνάει τα όρια του συστήματος.*



Σχήμα 3.7.δ. *Η θερμότητα που χορηγούμε στο σύστημα είναι θετική και αυτή που αφαιρούμε είναι αρνητική.*

Συμβατικά θα συμβολίζουμε (**+Q**) τη ροή θερμότητας από το περιβάλλον **προς** το σύστημα (σχ. 3.7δ).

Η μονάδα θερμότητας (Q) στο (SI) είναι το **τζάουλ**, **J** .

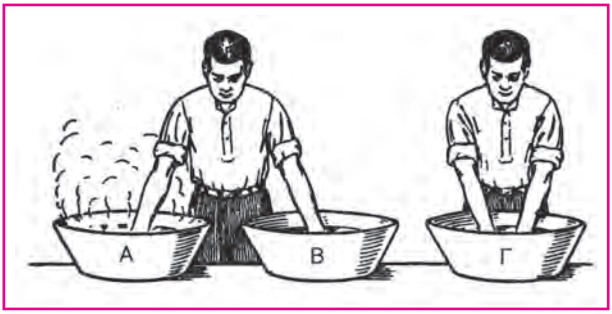
Μια μονάδα θερμότητας, που δεν ανήκει στο SI και που τη συναντάμε συχνό σε βιβλία που εκδόθηκαν πριν από την καθιέρωση του SI, είναι η Κιλοκαλορί (Kcal), που αντιπροσωπεύει την ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται, για να ανυψωθεί η θερμοκρασία 1kg καθαρού νερού 14,5˚C σε 15,5˚C. Μεταξύ Kcal και Kj υπάρχει η σχέση

$$1 \text{ Kcal} = 4{,}186 \text{ Kj}$$

Επίσης, συναντάμε συχνά σε βιβλία τη μονάδα θερμότη1τας του Αγγλικού συστήματος την B.T.U. Μια B.T.U. αντιστοιχεί περίπου σε 0,252 Kcal

$$1 \text{ B.T.U.} \approx 0{,}252 \text{ Kcal}$$

Βυθίζουμε τα χέρια μας στα τρία δοχεία του σχήματος και διαπιστώνουμε ότι το δοχείο Α έχει ζεστό νερό το δοχείο Β κρύο και το τρίτο δοχείο χλιαρό (σχ. 3.7ε).



Σχήμα 3.7.ε. *Η αφή δεν παρέχει ασφαλή εκτίμηση της θερμοκρασίας.*

Συνηθίζουμε να λέμε ότι ένα σώμα που είναι ζεστό έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από ένα άλλο χλιαρό ή κρύο.

Επομένως, η **θερμική ενέργεια** που υπάρχει σε κάθε σώμα έχει και ένα χαρακτηριστικό: τη **θερμοκρασία** που μας δείχνει πόσο ζεστό είναι κάθε σώμα.

Ετσι, λέμε ότι το νερό που βράζει έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από το νερό της βρύσης και αυτό μεγαλύτερη από το νερό του ψυγείου.

Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι: **Η θερμοκρασία είναι η ένταση της αίσθησης ζεστού κρύου, που χαρακτηρίζει τη θερμική κατάσταση των σωμάτων.**

Η ένταση της αίσθησης του ζεστού κρύου δεν μας επιτρέπει ακριβή εκτίμηση της θερμοκρασίας.

Υπάρχουν όμως μερικά φυσικά φαινόμενα, όπως η τήξη του πάγου και ο βρασμός του νερού, που έχουν χαρακτηριστικές τιμές θερμοκρασίας υπό ορισμένη πίεση. Αυτές τις τιμές χρησιμοποιούμε ως σημεία αναφοράς, για να μετρήσουμε τη θερμοκρασία.

Αυτά τα σημεία αναφοράς είναι οι τιμές του νερού στο **τριπλό σημείο**, στο οποίο συνυπάρχουν πάγος, υγρό και ατμός υπό πίεση 612,2 Pa και στο **σημείο βρασμού** υπό πίεση 981.000 Pa.

Για να μετρήσουμε τη θερμοκρασία, χρησιμοποιούμε τις παρακάτω κλίμακες:

• **Η κλίμακα Κελσίου (Celsius)** λαμβάνει υπόψη της την εξής αντιστοιχία: Στο σημείο πήξεως του νερού στην επιφάνεια της θάλασσας και στο σημείο βρασμού του νερού, πάλι στην επιφάνεια της θάλασσας αντιστοιχούν 0˚ C και 100˚ C.

• **Η κλίμακα Φαρενάιτ (Fahrenheit)** θεωρεί αντίστοιχα τους 32˚ F και 212˚ F, σημείο πήξεως και σημείο βρασμού του νερού. Η μετατροπή βαθμών Κελσίου σε βαθμούς Φαρενάιτ και αντίστροφα εκφράζεται με την παρακάτω σχέση :

$$\frac{^\circ C}{5} = \frac{^\circ F - 32}{9} \qquad (3.7\alpha)$$

• **Η κλίμακα Κέλβιν (Kelvin)**. Η θερμοκρασία ενός σώματος δεν μπορεί να κατέβει κάτω από μια ελάχιστη τιμή, ίση για όλα τα σώματα περίπου 237˚ C.

Η τιμή -273˚ C λαμβάνεται ως βάση μιας ειδικής κλίμακας θερμοκρασιών που ονομάζουμε κλίμακα Κέλβιν ή των απολύτων θερμοκρασιών και μετράει τη θερμοδυναμική θερμοκρασία ή απόλυτη θερμοκρασία.

Η τιμή -273˚ C αντιστοιχεί στο απόλυτο μηδέν (0K ή -273˚ C) της κλίμακας Κέλβιν.

Συμβολίζουμε με T την απόλυτη θερμοκρασία και με t˚ τη θερμοκρασία της κλίμακας Κελσίου.

Η μετατροπή γίνεται με τη σχέση:

$$\mathbf{T = t^\circ + 273^\circ} \qquad (3.7\beta)$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.1

Να προσδιορίσετε τη θερμοκρασία της οποίας η τιμή είναι ίδια για δύο θερμόμετρα το ένα της κλίμακας Κελσίου και το άλλο της κλίμακας Φαρενάιτ.

Λύση

Από τη σχέση μετατροπής (3.7α.) έχουμε:

$$\frac{^\circ C}{5} = \frac{^\circ F - 32}{9}$$

και βάζοντας $^\circ C = {^\circ F}$ θα έχουμε :

$$\frac{^\circ C}{5} = \frac{^\circ C - 32}{9}$$

$$9^\circ C = 5\,(^\circ C - 32)$$
$$9^\circ C = 5^\circ C - 160$$
$$4^\circ C + 5^\circ C = 5^\circ C - 160$$
$$4^\circ C = -160$$
$$^\circ C = -40$$

$$\boxed{^\circ C = {^\circ F} = -40}$$

Επομένως, και η κλίμακα Κέλσιους και η κλίμακα Φαρενάιτ δείχνουν την ίδια θερμοκρασία στους $^\circ 40$.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.2

Προσδιορίστε τους βαθμούς στην κλίμακα Φαρενάιτ που αντιστοιχούν στη θερμοκρασία 50 $^\circ$C.

Λύση

Από τη σχέση μετατροπής (3.7α.) θα έχουμε :

$$\frac{^\circ C}{5} = \frac{^\circ F - 32}{9}$$

$9^\circ C = 5\,(^\circ F - 32)$

$9^\circ C = 5^\circ F - 160$

$9^\circ C + 160 = 5^\circ F$

$$^\circ F = \frac{9 \cdot 50 + 160}{5}$$

αντικαθιστούμε και έχουμε :

$$^\circ F = \frac{9 \cdot 50 + 160}{5}$$

$$^\circ F = \frac{160}{5}$$

$$\boxed{^\circ F = 122}$$

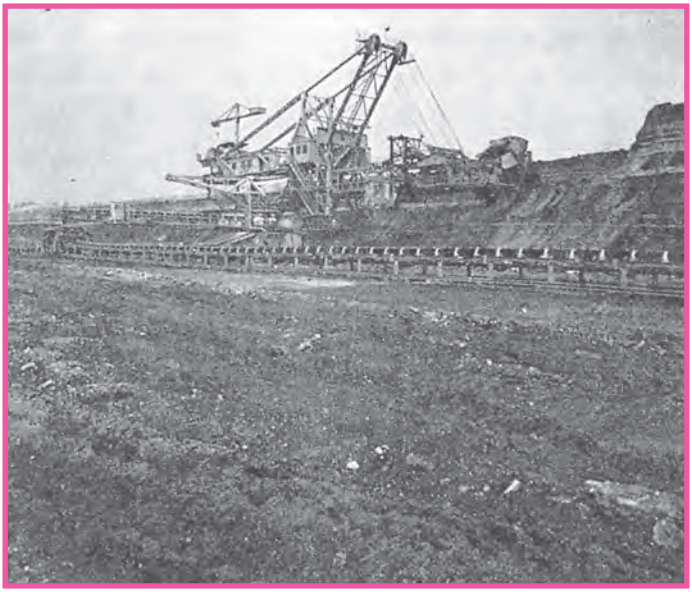
Επομένως, στους 50° C αντιστοιχούν 122° F.

3.8. ΟΙ ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα μεγαλύτερα ποσά θερμικής ενέργειας παράγονται από τα **καύσιμα** με τη μεσολάβηση της **καύσης τους**.

Η θερμότητα που απελευθερώνεται από την καύση χρησιμοποιείται στα διάφορα είδη θερμικών κινητήρων, για την παραγωγή ηλεκτρικής και μηχανικής ενέργειας, για την κίνηση αεροπλάνων και πλοίων, για τις οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές.

Η θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται σε μια μεγάλη γκάμα βιομηχανικών εγκαταστάσεων, όπως χημικές βιομηχανίες, στις μεταλλουργίες, στις κλωστουφαντουργίες, στις βιομηχανίες τροφίμων και πολλές άλλες.



Σχήμα 3.8α. *Μηχανικός εκσκαφέας με καδοφόρο τροχό, ενώ εξορύσσει λιγνίτη στο λιγνιτωρυχείο Πτολεμαΐδας.* ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

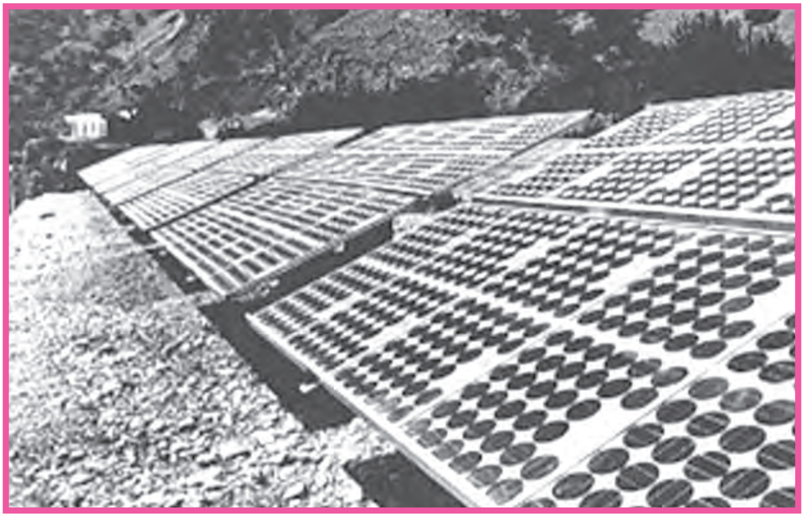
Ο **λιγνίτης**, ο **λιθάνθρακας**, ο **ανθρακίτης** και το **πετρέλαιο** είναι μερικά από τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θερμικής ενέργειας.

Θερμική ενέργεια παράγεται επίσης από τη μετατροπή της **ηλεκτρικής** και της **μηχανικής** ενέργειας.

Υπάρχουν, επίσης, φυσικές πηγές θερμικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, όπως είναι οι εγκαταστάσεις **γεωθερμικής ενέργειας**, στις οποίες η θερμότητα λαμβάνεται από μίγματα νερού - ατμού υψηλής θερμοκρασίας, που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης.

Μια τέτοια εγκατάσταση, που εξυπηρετεί βιομηχανικές ανάγκες, υπάρχει στο Larderello της Ιταλίας.

Μια άλλη φυσική πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος, από τον οποίο παίρνουμε την ηλιακή ενέργεια, που οι πολλαπλές της χρήσεις εξαπλώνονται εντυπωσιακά μέρα με τη μέρα.



Σχήμα 3.8.6. *Ηλιακός σταθμός Αγίας Ρουμέλης στην Κρήτη, ισχύος 50 KW. Είναι ο πρώτος ηλιακός σταθμός στη χώρα μας και ένας από τους μεγαλύτερους της Ευρώπης. Μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια απ' ευθείας σε ηλεκτρική και ηλεκτροδοτεί την ομώνυμη κοινότητα.*

3.9 ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Όπως γνωρίζουμε, **η ύλη** αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια **τα μόρια και τα άτομα.**

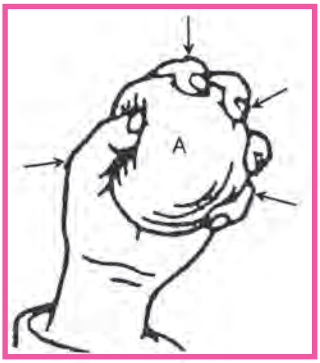
- Τα στοιχειώδη αυτά σωματίδια της ύλης **κινούνται, περιστρέφονται, ταλαντεύονται, έλκονται, απωθούνται**.

Επομένως, ένα σώμα περιέχει ενέργεια, που οφείλεται στη μοριακή και ατομική του δομή.

- Περιέχει **κινητική ενέργεια** που οφείλεται στην κίνησή τους.

- Περιέχει **δυναμική ενέργεια** που οφείλεται στις ελκτικές και απωθητικές δυνάμεις μεταξύ τους.

Αυτές οι δυνάμεις αποτελούν το μηχανισμό αποθήκευσης της ενέργειας. Για να υπερνικήσουμε αυτές τις δυνάμεις, πρέπει να καταναλώσουμε εξωτερική ενέργεια π.χ. παραμόρφωση ενός σώματος (σχ. 3.9α), υγρό που εξατμίζεται (σχ. 3.9β).



Σχήμα 3.9.α. *Εξασκούμε δυνάμεις για να παραμορφώσουμε το σώμα Α.*

Σχήμα 3.9.6. *Χορηγούμε θερμότητα, για να εξατμιστεί το υγρό του δοχείου.*

Επομένως, την ενέργεια που περιέχει ένα σώμα U, που αντιπροσωπεύει όλες τις μορφές σε μικροσκοπικό επίπεδο την ονομάζουμε εσωτερική ενέργεια.

3.10 ΕΝΘΑΛΠΙΑ

Στη **θερμοδυναμική** μάς διευκολύνει να εισαγάγουμε ένα ακόμη μέγεθος που θα το ονομάζουμε **ενθαλπία**.

$$\mathbf{H = U + pV} \tag{3.10α}$$

Η ειδική ενθαλπία ορίζεται από τη σχέση:

$$h = \frac{H}{m} = u + pv \qquad (3.10β.)$$

όπου m: η μάζα του συστήματος.

Η μονάδα μέτρησης της ενθαλπίας είναι J, KJ και της **ειδικής ενθαλπίας** J/Kg, KJ/kg.

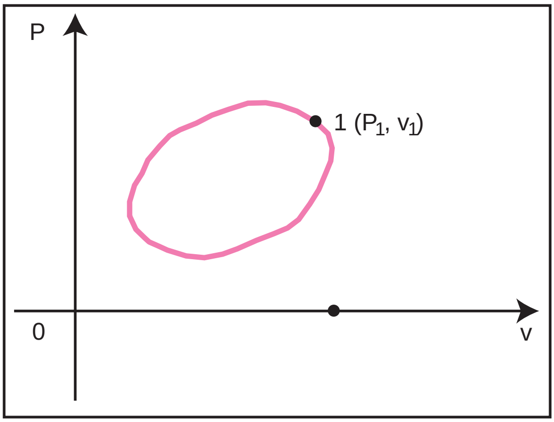
Είναι ένα μέγεθος πολύ χρήσιμο στη θερμοδυναμική και βρίσκει εφαρμογή στην αντιμετώπιση των προβλημάτων του ατμού, του νερού, του αέρα, των ψυκτικών μέσων και των εφαρμογών τους στα ανοικτά συστήματα.

3.11 ΚΥΚΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ - ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Αν με μια μεταβολή το σύστημα επαναφέρεται στην αρχική του κατάσταση, τότε η μεταβολή λέγεται **κυκλική**.

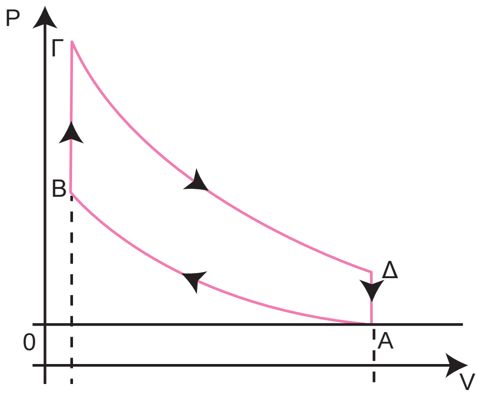
Μια τέτοια μεταβολή είναι αυτή που απεικονίζεται στο σχήμα 3.11α, η οποία ξεκινάει από την αρχική κατάσταση 1 (P_v v_1, T_1,), εξελίσσεται και πραγματοποιείται με μια σειρά διαδοχικών καταστάσεων και επαναφέρει τελικά το σύστημα στην αρχική του κατάσταση 1 (P_1, v_1, T_1, στις ίδιες, δηλαδή τιμές πίεσης, όγκου και θερμοκρασίας που είχε το σύστημα, κατά την έναρξη της μεταβολής.

Αν σ' ένα σύστημα εκτελούνται κατά προκαθορισμένη σειρά δύο ή περισσότερες μεταβολές που το επαναφέρουν στην αρχική του κατάσταση, τότε το σύνολο των μεταβολών αυτών ονομάζεται **θερμοδυναμικός κύκλος**.

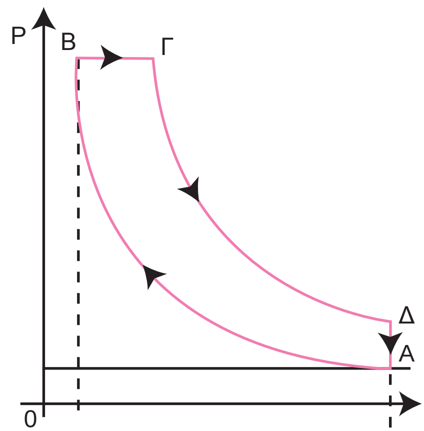


Σχήμα 3.11.α. *Κυκλική μεταβολή.*

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι **θεωρητικοί θερμοδυναμικοί "κύκλοι"** μιας τετράχρονης βενζινομηχανής και ενός πετρελαιοκινητήρα. σχ. 3.11β και σχ. 3.11γ αντίστοιχα.



Σχήμα 3.11.6. *Θεωρητικός θερμοδυναμικος κύκλος έργου βενζινομηχανής.*



Σχήμα 3.11.γ. *Θεωρητικός θερμοδυναμικος κύκλος έργου πετρελαιομηχανής.*

Στην πραγματικότητα δεν είναι ένας θερμοδυναμικος κύκλος, αλλά ένας **κύκλος έργου μηχανής**.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 3ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Οι **θερμοδυναμικές μεταβολές** είναι του τύπου **PV^m = σταθερό**.
- **Τη θερμοδυναμική κατάσταση** την απεικονίζουμε στο διάγραμμα (P-v) και (T-s) με ένα σημείο, τη μεταβολή με μια γραμμή και την κυκλική αλλαγή με μια κλειστή γραμμή.
- Οι χαρακτηριστικές θερμοδυναμικές μεταβολές είναι **η ισόθερμη**, **η ισοβαρής, η ισόχωρη, η ισοεντροπική και η πολυτροπική.**
- Η **θερμότητα** είναι μια μορφή ενέργειας που μεταφέρεται, προστίθεται ή αφαιρείται από ένα σύστημα σώμα εξ αιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας.
- Η **θερμότητα** γίνεται αντιληπτή, όταν διαπερνάει τα όρια του συστήματος και ρέει από την υψηλή προς τη χαμηλή θερμοκρασία.
- Η **θερμότητα** που χορηγούμε σ' ένα σύστημα, είναι θετική και αυτή που αφαιρούμε αρνητική.
- Η **θερμοκρασία** είναι η ένταση της αίσθησης ζεστού-κρύου που χαρακτηρίζει τη θερμική κατάσταση των σωμάτων.
- **Η ένταση της αίσθησης του ζεστούκρύου** δεν μας επιτρέπει **ακριβή εκτίμηση της θερμοκρασίας.**
- Για να **μετρήσουμε** τη θερμοκρασία, χρησιμοποιούμε τις κλίμακες Κελσίου, Φαρενάιτ και Κέλβιν.
- Τα μεγαλύτερα ποσά θερμικής ενέργειας **παράγονται** από τα **καύσιμα** με τη μεσολάβηση της καύσης τους.
- Η **θερμική ενέργεια** χρησιμοποιείται σε παρά πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις, όπως χημικές βιομηχανίες, στις μεταλλουργίες, στις κλωστουφαντουργίες, στις βιομηχανίες τροφίμων και πολλές άλλες.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

1. Να μετατρέψετε τις παρακάτω θερμοκρασίες σε βαθμούς της κλίμακας Κέλβιν:

α) 35˚ C

β) 62˚ C

γ) 100˚ C

(*Απάντηση*: α) 308K, β) 335K, γ) 373K)

2. Να μετατρέψετε σε βαθμούς Κελσίου και Φαρενάιτ, τις παρακάτω θερμοκρασίες :

α) 393 K

β) 223 K

γ) 543 K

(*Απάντηση:* α) 120˚ C, 248˚ F, β) -50˚ C, -58˚ C, γ) 270˚ C, 518˚ F)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΟΡΦΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

4.1 Έργο

4.2 Μηχανικό έργο

4.3 Έργο σταθερής δύναμης

4.4 Έργο μεταβλητής δύναμης

4.5 Έργο P·V (ογκομεταβολής)

4.6 Έργο ροής

4.7 Άλλες μορφές έργου

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να **εξηγείτε** την έννοια του έργου.
- Να **αναφέρετε** τις διάφορες μορφές έργου.
- Να **εξηγείτε** και να αναφέρετε τις διάφορες μορφές μηχανικού έργγου.
- Να **ορίζετε** τις διάφορες μορφές μηχανικού έργου.
- Να **γνωρίζετε** τους τύπους που εκφράζουν τις διάφορες μορφές μηχανικού έργου, τα μεγέθη που τους ορίζουν και τις μονάδες τους και να τους εφαρμόζετε σε απλές εφαρμογές.
- Να **γνωρίζετε** τη σύμβαση, που αφορά το πρόσημο του παραγόμε- νου έργου από ένα σύστημα στη θερμοδυναμική.

4.1. ΕΡΓΟ

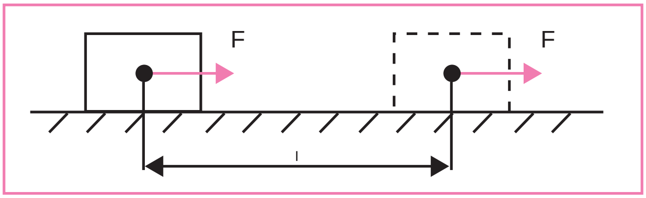
Το έργο παρουσιάζεται με **διάφορες μορφές - μηχανικό - ηλεκτρικό - χημικό έργο** κ.λ.π.

Στη μηχανική το έργο εμφανίζεται σε μεταφορές ενέργειας στις οποίες η θερμοκρασία δεν παίζει κανένα ρόλο.

Έργο είναι ενέργεια σε μεταφορά, όπου η διαφορά θερμοκρασίας δεν εμπλέκεται άμεσα.

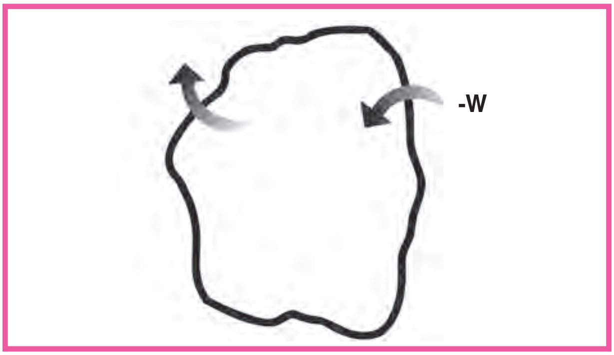
Το έργο ορίζεται σαν το γινόμενο μίας δύναμης επί τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής στη διεύθυνση της ίδιας της δύναμης (σχ. 4.1 .α)

Έργο = δύναμη x μετατόπιση

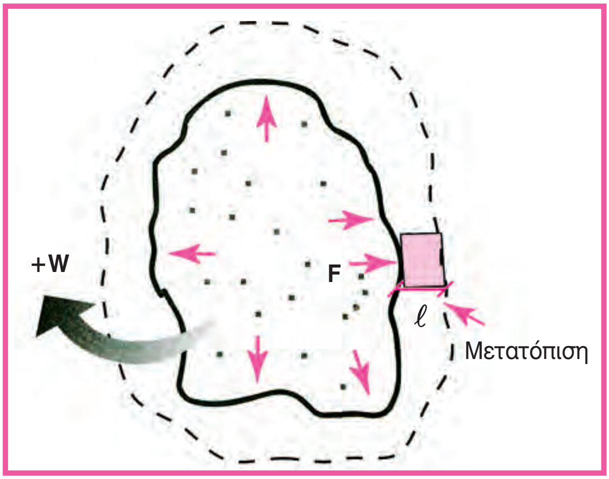


Σχήμα 4.1.α *Το έργο που παράγεται είναι ανάλογο της δύναμης και της μετατόπισης*

Στη **θερμοδυναμική** το σύστημα **παράγει έργο** όταν **η δύναμη** που εξασκεί το σύστημα και η μετατόπιση του ορίου του έχουν **την ίδια διεύθυνση και φορά** και θα συμβολίζεται συμβατικά με (+W). (σχ. 4.1-β,γ).



Σχήμα 4.1.6 *Το έργο που προσθέτουμε στο σύστημα είναι αρνητικό, και αυτό που αφαιρούμε θετικό*



Σχήμα 4.1 .γ *Το σύστημα παράγει έργο γιατί η δύναμη και η μετατόπιση έχουν ίδια διεύθυνση και φορά*

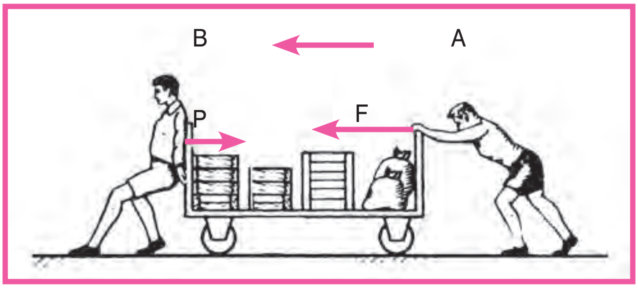
4.2. ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΕΡΓΟ

Είναι γνωστό από τη Μηχανική ότι μια δύναμη **παράγει έργο**, όταν **μετακινείται το σημείο εφαρμογής της**.

Οι δυνάμεις που προκαλούν την κίνηση ή τη βοηθούν, παράγουν **έργο κινητήριο**. Εκείνες που αντιστέκονται, παράγουν **έργο καταναλισκόμενο ή έργο αντιστάσεως**.

Στο σχήμα 4.2α τη δύναμη F του εργάτη Α, που προκαλεί την κίνηση, θα τη λέμε **κινητήρια δύναμη** και το έργο που παράγει, **κινητήριο** και θα το συμβολίζουμε συμβατικά με (+ W).

Η δύναμη P του εργάτη Β, που αντιστέκεται στην κίνηση, λέγεται **δύναμη αντιστάσεως** και το έργο που παράγει, **έργο καταναλισκόμενο ή αντιστάσεως** και θα συμβολίζεται συμβατικά με το (-W).



Σχήμα 4.2.α *Ο εργάτης Α παράγει Κινητήριο έργο και ο Β καταναλισκόμενο.*

➟ **Παρατήρηση**

Οσον αφορά τη σύμβαση για το πρόσημο του έργου, στη μηχανική γίνεται αναφορά στη δύναμη που παράγει έργο, ενώ στη θερμοδυναμική γίνεται αναφορά στο σύστημα, που παράγει έργο.

4.3. ΕΡΓΟ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

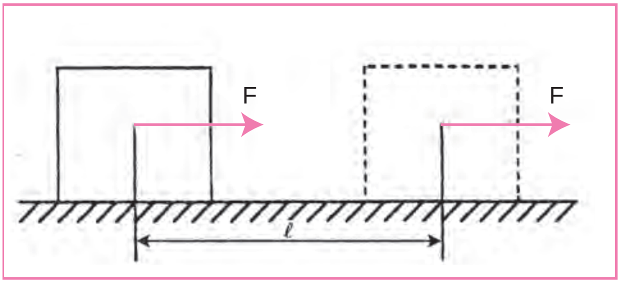
Στις παρακάτω περιπτώσεις η **δύναμη** είναι **σταθερή κατά μέτρο, διεύθυνση και φορά**.

4.3.1. Δύναμη και μετατόπιση σχηματίζουν γωνία 0°.

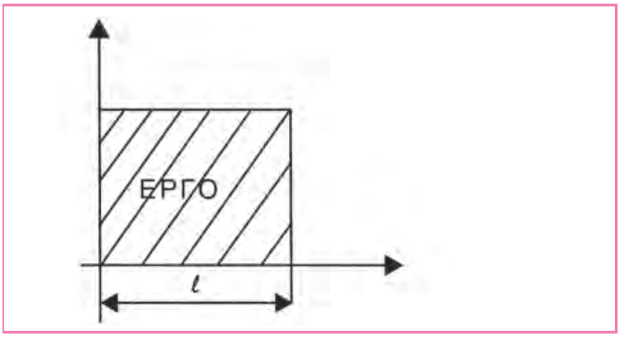
Το σημείο εφαρμογής μετατοπίζεται κατά ένα μήκος στην ευθεία ενέργειας της δύναμης και προς την κατεύθυνση της δύναμης (σχ. 4.3.1 .α).

Το παραγόμενο έργο εκφράζεται με τη σχέση :

$$\boxed{W = F \cdot \ell} \qquad (4.3.1.α.)$$



Σχήμα 4.3.1.α. *Δύναμη και μετατόπιση σχηματίζουν γωνία 0°*



Σχήμα 4.3.1.β. *Το έργο ισούται με το εμβαδόν του παραλληλόγραμμου*

Το εμβαδόν του διαγραμμισμένου παραλληλόγραμμου ισούται με το έργο (σχ. 4.3.1 .β).

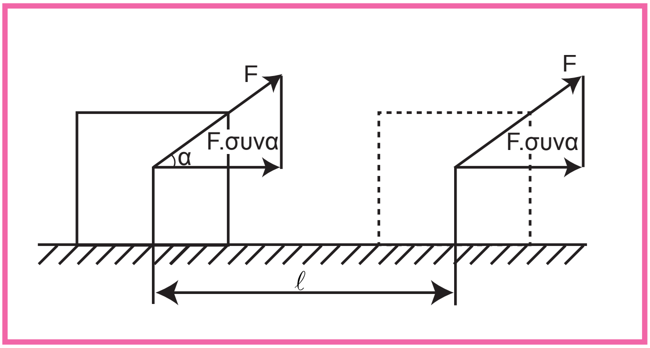
$$W = F \cdot \ell = (\text{εμβαδόν παραλληλόγραμμου})$$

4.3.2. Δύναμη και μετατόπιση σχηματίζουν γωνία α°

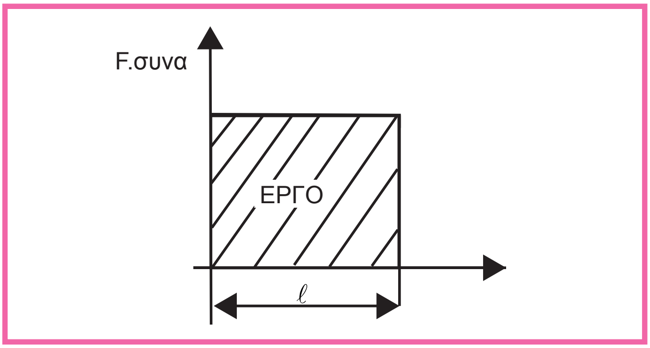
Το σημείο εφαρμογής μετατοπίζεται κατά ένα μήκος ℓ σε ευθεία, που σχηματίζει γωνία α με την κατεύθυνση της δύναμης (σχ. 4.3.2.α).

Το παραγόμενο έργο ισούται με :

$$W = F \cdot \ell \text{ συν α} \qquad (4.3.2.α.)$$



Σχήμα 4.3.2.α. *Δύναμη και μετατόπιση σχηματίζουν γωνία α°*



Σχήμα 4.3.2.β. *Το έργο ισούται με το εμβαδόν του παραλληλόγραμμου*

Το εμβαδόν του διαγραμμισμένου παραλληλόγραμμου ισούται με το έργο: (σχ. 4.3.2β).

$$W = F \cdot \ell \cdot \text{συνα} = (\text{εμβαδόν παρ / μου})$$

4.3.3. Το σημείο εφαρμογής της δύναμης ακολουθεί τυχούσα διαδρομή

Το σημείο εφαρμογής μετατοπίζεται κατά ένα μήκος ℓ σε τυχούσα ευθεία (σχ.4.3.3.α).

Το έργο εκφράζεται με τη σχέση:

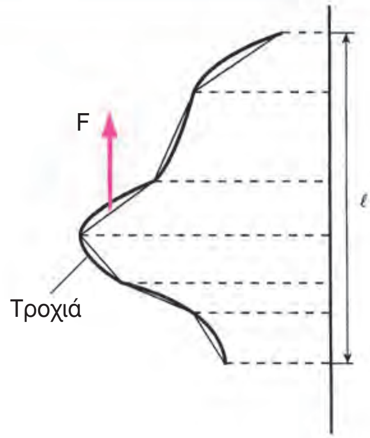
΄Εργο = Δύναμη x προβολή της τροχιάς του σημείου εφαρμογής στη διεύθυνση της δύναμης

W = F x προβ. τρ. σημ. εφαρ (4.3.3.α.)

$$\boxed{W = F \cdot \ell}$$

όπως φαίνεται στο (σχ. 4.3.3.β).

Σχήμα 4.3.3.α *Το σημείο εφαρμογής ακολουθεί τυχούσα διαδρομή*



Σχήμα 4.3.3.β. *Το έργο είναι ίσο με τη δύναμη επί την προβολή της τροχιάς*

Έργο ανύψωσης ή έργο βάρους

Το έργο ανύψωσης είναι το έργο που παράγεται ενάντια στις δυνάμεις του πεδίου βαρύτητας. Επειδή η απαιτούμενη δύναμη F είναι ίση με το βάρος, το έργο ανύψωσης (σχ. 4.3.3.γ.) θα ισούται με :

$$W = mgh = mg(Z_2 - Z_1) \qquad (4.3.1.α.)$$

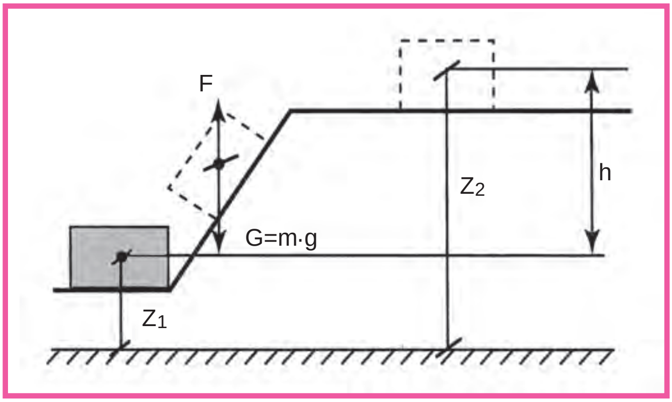
Από τη σχέση 4.3.1α θα έχουμε:

$W = F \cdot h,$ $\qquad F = G$

$W = G \cdot h,$ $\qquad G = m \cdot g$

$W = mg \cdot h,$

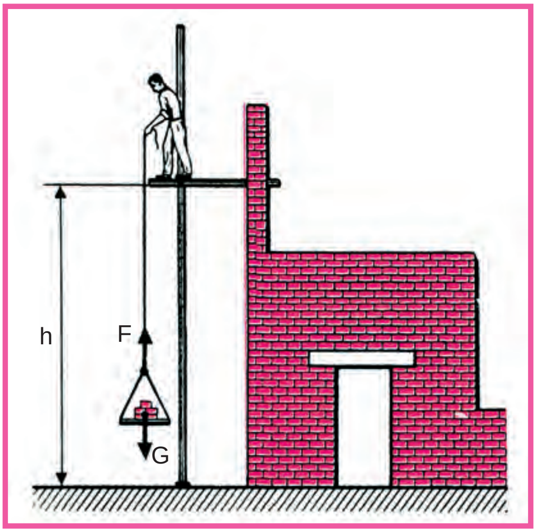
$$\boxed{W = mgh = mg\,(z_2 - z_1)} \qquad (4.3.3β)$$



Σχήμα 4.3.3.γ. *Έργο βάρους*

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.1

Να υπολογίσετε το έργο που καταναλώνει εργάτης για να ανυψώσει μάζα m = 30 kg σε ύψος h = 3 m σχήμα 4.3.3.δ.



Σχήμα 4.3.3.δ. *Εργάτης ανυψώνει βάρος G*

Λύση

Από τη σχέση (4.3.1.α.) αντικαθιστώντας και λαμβάνοντας $g \approx 10\ m/s^2$ θα έχουμε:

$W = F \cdot h,$ $\qquad$ $G = F$ $\qquad$ φ

$W = G \cdot h,$ $\qquad$ $G = m \cdot g$

$W = m \cdot g \cdot h$

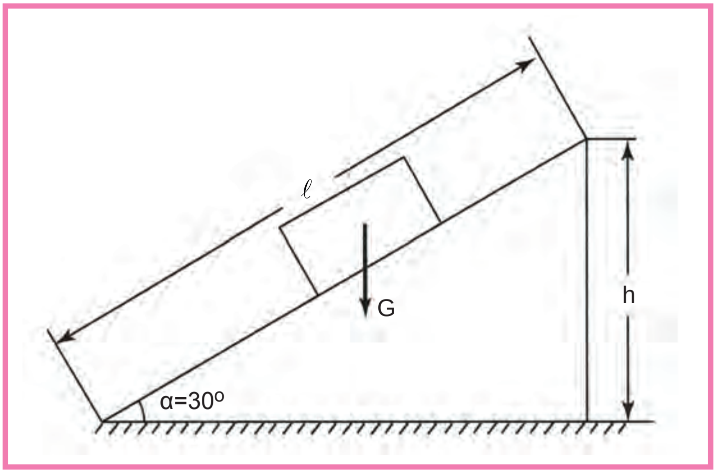
$W = 30\ kg \times 10\ m / s^2 \times 3m$

$W = 900\ J$

$\boxed{W = 900\ J}$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.2

Να υπολογίσετε το έργο που καταναλώνεται, για να μεταφερθεί μάζα $m = 200\ kg$ σε ένα κεκλιμένο επίπεδο γωνίας 30°, γνωρίζοντας το μήκος του $\ell = 5\ m$ και $g = 10\ m/s^2$ (σχ. 4.3.3.ε).



Σχήμα 4.3. 3.ε. *Σώμα μεταφέρεται σε κεκλιμένο επίπεδο*

Λύση

Από τη σχέση (4.3.1.α) αντικαθιστώντας και λαμβάνοντας $g = 10\ m/s^2$, θα έχουμε:

$W = F \cdot \ell = G \cdot h$, $\eta\mu\, 30^\circ = \dfrac{h}{\ell}$, $G = mg$

$W = G \cdot \eta\mu 30^\circ\ \ell = 200\ kg 10 m/s^2\ \chi\ 0{,}5\ \chi\ 5m$

$W = 5.000\ J$

$\boxed{W = 5K\ J}$

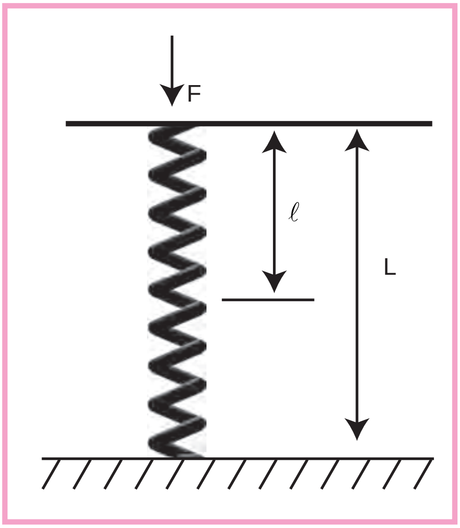
4.4. ΕΡΓΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

4.4.1. Έργο ελατηρίου

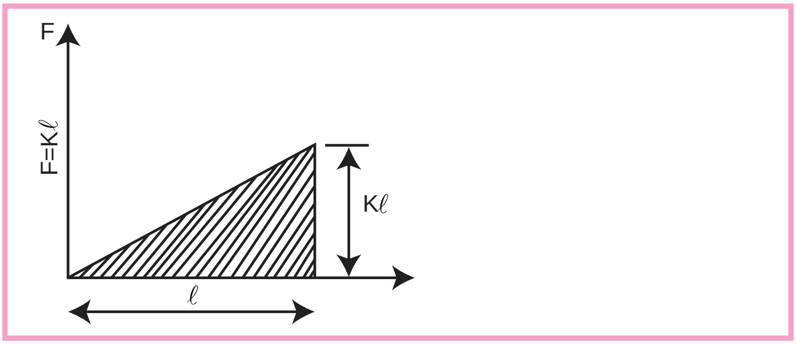
Κατά την έλξη ή συμπίεση ελατηρίου η δύναμη αυξάνεται ανάλογα με τη διαδρομή $F = K \cdot \ell$, όπου K είναι η σταθερά του ελατηρίου, (σχ. 4.4.1 α,β).

Το έργο εκφράζεται με τη σχέση:

$$w = \frac{1}{2} k \ell^2$$



Σχήμα 4.4.1.α, *Συμπίεση ελατηρίου*



Σχήμα 4.4.1.β. *Το έργο ελατηρίου είναι ίσο με το εμβαδόν του τριγώνου*

Από το σχήμα 4.4.1.β. έχουμε:

W = εμβαδόν διαγραμμισμένου τριγώνου

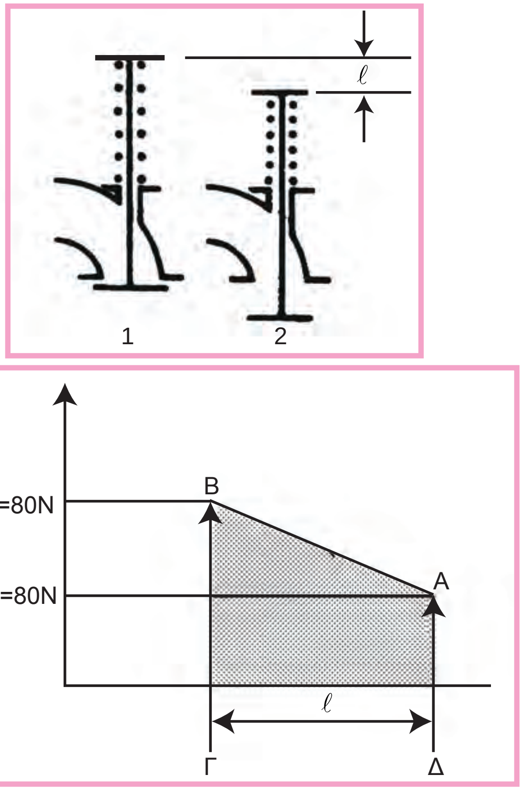
W = εμβ. Τριγώνου

$W = 1/2\ \ell \cdot K \cdot \ell$

$$\boxed{W = 1/2\ K\ \ell^2} \qquad (4.4.1\alpha)$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.3

Ελατήριο βαλβίδας μηχανής αυτοκινήτου λειτουργεί σαν ελατήριο συμπιέσεως, (σχ. 4.4.1.γ). Είναι τοποθετημένο με προένταση F_1 = 60N και κατά το άνοιγμα της βαλβίδας, συμπιέζεται επιπλέον κατά (ℓ = 1,2 cm, ενώ η δύναμη συμπίεσης του ελατηρίου παίρνει την τιμή F_2 = 80N. Να υπολογίσετε το έργο που απαιτείται, για να ανοίξει η βαλβίδα.



Σχήμα 4.4.1.δ. *Διάγραμμα ελατηρίου*

Το διάγραμμα έργου του ελατηρίου στην προκειμένη περίπτωση είναι τραπέζιο, το εμβαδόν του οποίου αντιστοιχεί στο έργο συμπίεσης του ελατηρίου (σχ. 4.4.1.δ).

Επομένως, θα έχουμε :

W = εμβαδόν τραπεζίου (ΑΒΓΔ)

$$w = \frac{F_1 + F_2}{2} x\ell$$

$$W = \frac{60+80}{2} \times 1{,}2\,\text{N cm}$$

$$W = 70 \text{ x } 1{,}2 \text{ N cm}$$

$$W = 7 \text{ x } 0{,}12 \text{ N m}$$

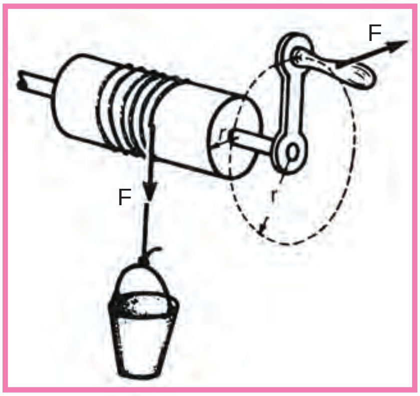
$$\boxed{W = 0{,}84 \text{ J}}$$

4.4.2. Έργο ατράκτου

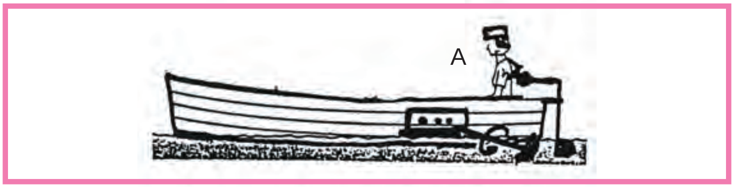
Στη μηχανολογια είναι πάρα πολύ συχνή η μεταφορά ενέργειας με ατράκτους, που περιστρέφονται, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. (σχ.4.4.2.α,β,γ).

Το έργο ατράκτου εκφράζεται με τη σχέση:

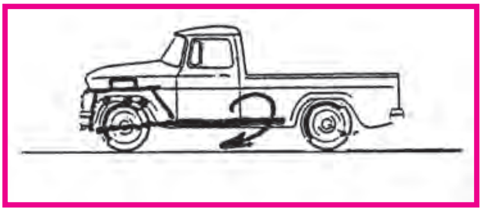
$$\mathbf{W_{\alpha\tau\rho} = 2\,\pi\nu \cdot M}$$



Σχήμα 4.4.2.α. *Βαρούλκο*



Σχήμα 4.4.2.Θ. *Βάρκα*



Σχήμα 4.4.2.γ. *Αυτοκίνητο*

Από το σχήμα 4.4.2.α. έχουμε:

$W = F \cdot \ell$, $\ell = 2\,\pi\,r$

$W = F\,2\pi r$, v = περιστροφές

$W = F\,2\pi r v$, $M = F \cdot r$ ροπή της δύναμης F

$W = M\,2\pi v$

Έργο ατράκτου: $\mathbf{W_{ατρ} = 2\,\pi v M}$ (4.4.2α)

Η ισχύς που μεταφέρεται μέσω της ατράκτου, είναι το έργο της ατράκτου στη μονάδα χρόνου.

Ισχύς ατράκτου: $P_{ατρ} = W_{atr}$ / χρόνος

Ισχύς ατράκτου: $P_{ατρ} = 2\pi v M$ (4.2.4β)

όπου: η = σ.α.λ.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.4

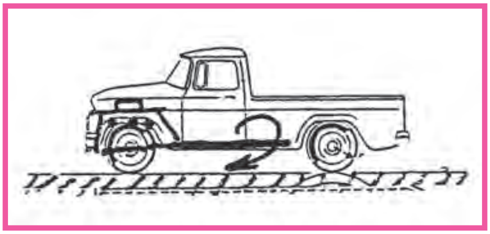
Να υπολογίσετε την ισχύ που μεταφέρεται μέσω της ατράκτου ενός αυτοκινήτου, όταν η ροπή που εφαρμόζεται στην άτρακτο είναι 300 N · m και περιστρέφεται με 3.000 σ.α.λ. (σχ. 4.4.2.δ).

Λύση

Από τη σχέση (4.4.2.β.) έχουμε :

$P_{ατρ} = 2\pi n M = 2\pi \times 3.000$ σ.αλ $\times$ 300 Nm

$\boxed{P_{ατρ} = 3{,}14 \text{ Kw}}$



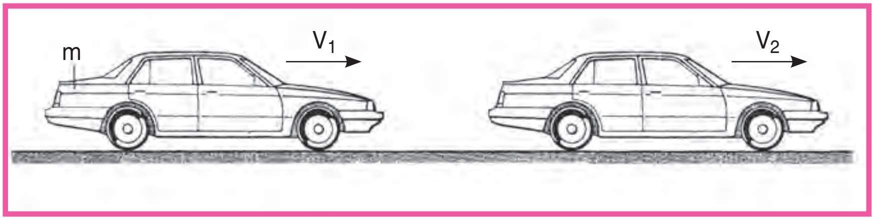
Σχήμα 4.4.2.δ. *Αυτοκίνητο*

4.4.3. Έργο επιτάχυνσης

Το έργο που παράγεται, όταν ένα σώμα μάζας m μεταβάλλει την ταχύτητά του από V_1 σε V_2 κατά τη διάρκεια διαδρομής, θα το ονομάζουμε έργο επιτάχυνσης (σχ. 4.4.3.α).

Το **έργο επιτάχυνσης** εκφράζεται με τη σχέση:

$$W = \frac{1}{2}m\left(V_2^2 - V_1^2\right)$$



Σχήμα 4.4.3.α. *Αυτοκίνητο που επιταχύνει από V1 σε V2*

$W = F \cdot \ell$
$W = m\,\alpha\ell,$
$F = m\,\alpha$

$$W = m\frac{V_2 - V_1}{t}\ell$$

$a = \dfrac{V_2 - V_1}{t}$ επιτάχυνση στην ομαλα επιταχυνόμενη κίνηση

$$W = m\frac{V_2 - V_1}{t} \times \frac{V_2 + V_1}{2}t$$

$\ell = \dfrac{V_2 + V_1}{2t}$ διάστημα στην ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση

Έργο επιτάχυνσης: $W = \dfrac{1}{2} m\left(V_2^2 - V_1^2\right)$ (4.4.3α)

Η **ισχύς επιτάχυνσης** είναι το έργο επιτάχυνσης στη μονάδα χρόνου

$$P_{ΕΠ} = \frac{W_{ΕΠ}}{\text{χρόνος}}$$

Ισχύς επιτάχυνσης: $P_{ΕΠ} = \dfrac{W_{ΕΠ}}{\text{χρόνος}}$ (4.4.3.β)

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.5

Να υπολογίσετε την ισχύ που απαιτείται, για να επιταχύνει ένα όχημα μάζας m = 2.000 kg, από την ηρεμία μέχρι να αποκτήσει ταχύτητα V = 60 km/h σε χρόνο 10s (σχ. 4.4.3.β).

Λύση

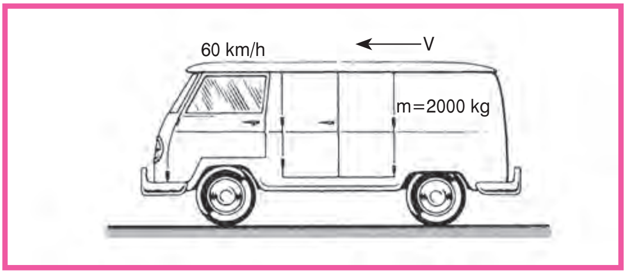
Από τη σχέση (4.4.3β) έχουμε :

$$P_{ΕΠ} = \frac{W_{ΕΠ}}{\text{χρόνος}}$$

$$W_{ΕΠ} = \frac{1}{2} m\left(V_2^2 - V_1\right) \qquad V_1 = 0$$

$$= \frac{1}{2}\, 2.000\ \text{Kg} \left(\frac{60.000\ \text{m}}{3.600\ \text{S}}\right)^2 \frac{1\,\text{KJ}}{1.000\ \text{Kg}\ \text{m}^2/\text{s}^2}$$

$$W_{επ} = 275{,}5\ \text{KJ}$$



Σχήμα 4.4.3.β. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 4.4*

Ισχύς: $\boxed{P_{ΕΠ} = \dfrac{275,5}{10\ s} = 27,55\ KW}$

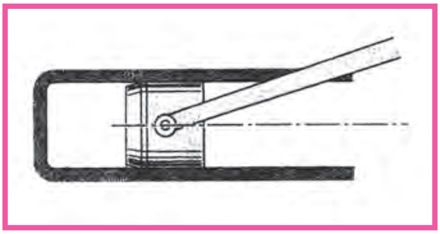
4.5 ΕΡΓΟ P · V (ΟΓΚΟΜΕΤΑΒΟΛΗΣ)

Για το έργο ογκομεταβολής θα γίνει αναφορά στο επόμενο κεφάλαιο. Το έργο εκφράζεται με τη σχέση: **W = PΔΛ**

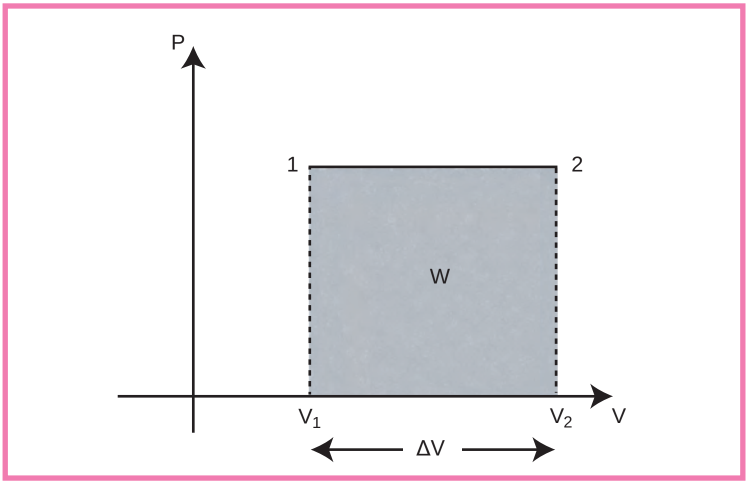
❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.6

Σε μία διάταξη κυλίνδρου - εμβόλου βρίσκεται αέριο υπό πίεση 600 KN/m^2. Το αέριο διαστέλλεται με σταθερή πίεση από 0,15 m^3 σε 1.15m^3. Να υπολογίσετε το παραγόμενο έργο σχ. 4.5.γ. και σχ. 4.5.δ.

Λύση



Σχήμα 4.5.α. *Διάταξη εμβόλου κυλίνδρου*



Σχήμα 4.5.β. *Το έργο είναι ίσο με το εμβαδόν του παραλληλογράμμου (P·V)*

Το έργο είναι ίσο με το εμβαδόν του παραλληλογράμμου ($12V_2V_1$)

$$W = P\ \Delta V$$

$$W = P\ (V_2 - V_1)$$

$$= 600 \times 10^3\ (1,15 - 0,15)$$

$$= 6 \times 10^5 \times 1$$

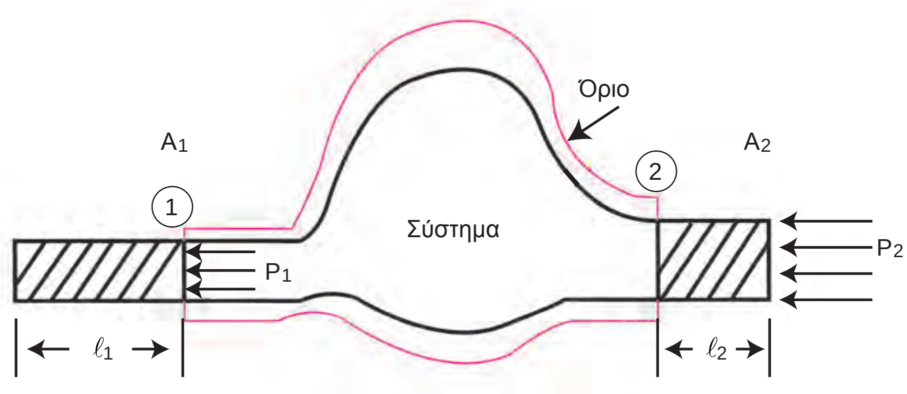
$$= 6 \times 10^5\ N\ m$$

$$= 6 \times 10^5\ J$$

$$\boxed{W = 600\ KJ}$$

4.6. ΕΡΓΟ ΡΟΗΣ

Θεωρείται το ανοικτό σύστημα του σχήματος, όπου υπάρχει σταθερή ροή ενός ρευστού, που υφίσταται μια μεταβολή ανεξάρτητη από το χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι η μάζα που μπαίνει, είναι ίση με τη μάζα που βγαίνει και ότι όλες οι ιδιότητες του σε κάθε διατομή είναι ανεξάρτητες από το χρόνο (σχ. 4.6.α).



Σχήμα 4.6.α. *Ανοικτό σύστημα σταθερής ροής -έργο ροής*

Θα υπολογιστεί το έργο που απαιτείται, για να διαπεράσει ένα στοιχειώδες τμήμα μάζας του ρευστού μήκους ℓ_1 τη διατομή A_1 του συστήματος.

Για να περάσει τη διατομή πρέπει να υπερνικήσει την πίεση που επικρατεί στη διατομή 1.

Επομένως, πρέπει να ασκήσει μια δύναμη $P_1 \cdot A_1$

Το γινόμενο $P_1 \cdot A_1 \cdot \ell_1$ είναι το έργο που απαιτείται, για να περάσει τη διατομή 1.

$$W_1 = P_1 V_1 \ell_1 = m (P_1 V_1)$$

Και το έργο ανά μονάδα μάζας : $w_1 = P_1 v_1$

Ανάλογα για τη διατομή 2 : $W_2 = P_2 Ag \ell_2 = m (P_2 V_2)$

$$w_2 = P_2 v_2$$

το καθαρό έργο ροής

εκφράζεται με τη σχέση: $w = p_2 v_2 - p_1 v_1$ (4.6.α) J/kg

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4.7

Να υπολογίσετε το έργο ροής σε ένα ανοικτό σύστημα σταθερής ροής ενός ρευστού στην είσοδο και στην έξοδο. Δίδονται πίεση εισόδου $P_{εισ}$ = 300 KPa και πυκνότητα ρευστού ρ = 1.000 kg/m^3. Στην έξοδο $P_{εξ}$ = 200 KPa και πυκνότητα ρευστού ρ = 250 kg/m^3 (σχ. 4.6.β).

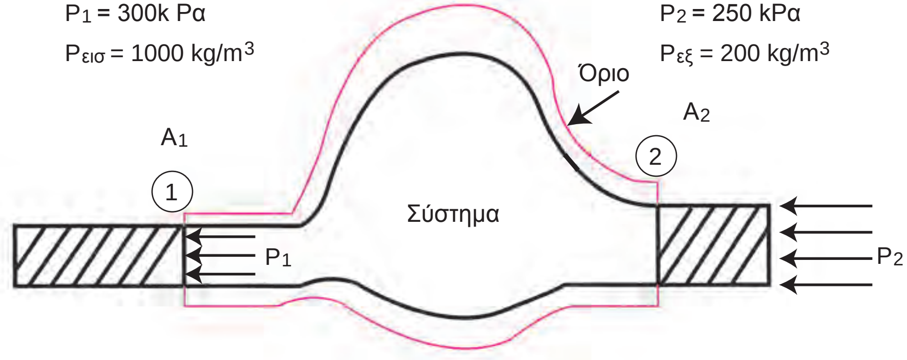
Λύση

$P_1 = 300k\ P\alpha$

$P_{\varepsilon\iota\sigma} = 1000\ kg/m^3$

$P_2 = 250\ kP\alpha$

$P_{\varepsilon\xi} = 200\ kg/m^3$



Σχήμα 4.6.β. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 4.8.*

Το έργο εισόδου θα είναι:

$$W_1 = P_1\ v_1, \qquad v_1 = \frac{V}{m} \qquad p = \frac{m}{V}$$

$$= 300\ KP\alpha \times \frac{1}{1.000\ kg/m^3}$$

$$= 300 \cdot 10^3\ \frac{N}{m^2} \cdot \frac{m^3}{100\ Kg}$$

$$= 300\ \frac{Nm}{Kg}$$

$$\boxed{W_1 = 300 \frac{N \cdot m}{kg}}$$

Το έργο εξόδου θα είναι:

$$W_2 = P_2 v_2, \qquad v_2 = \frac{V}{m} \qquad p = \frac{m}{v}$$

$$= 200\ KP\alpha \times \frac{1}{250\ kg/m_3}$$

$$= 200 \cdot 10^3\ \frac{N}{m^2} \cdot \frac{m^3}{250\ kg}$$

$$= 300 \frac{Nm}{kg}$$

$$\boxed{W_2 = 800 \frac{N \cdot m}{kg}}$$

4.7. ΑΛΛΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΡΓΟΥ

Στις προηγούμενες παραγράφους εξετάστηκαν οι περισσότερες μορφές μηχανικού έργου.

Υπάρχουν και άλλες μορφές **μη μηχανικές**, όπως το **μαγνητικό**, **ηλεκτρικό** και **χημικό έργο**.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 4ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Το **έργο** ορίζεται σαν το γινόμενο μίας δύναμης επί τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής στη διεύθυνση της ίδιας της δύναμης.
- Στη **θερμοδυναμική** το σύστημα **παράγει έργο**, όταν **η δύναμη** που εξασκεί το σύστημα **και η μετατόπιση** του ορίου του έχουν **την ίδια διεύθυνση και φορά** και θα συμβολίζεται συμβατικά με (+W).
- Οι δυνάμεις που προκαλούν την κίνηση ή τη βοηθούν, παράγουν **έργο κινητήριο**. Εκείνες που αντιστέκονται, παράγουν **έργο καταναλισκόμενο ή αντιστάσεως**.
- Όταν το σημείο εφαρμογής σταθερής δύναμης μετατοπίζεται κατά ένα μήκος ℓ στην ευθεία ενέργειας της δύναμης και προς την κατεύθυνση της δύναμης, το παραγόμενο έργο εκφράζεται με τη σχέση:

$$\mathbf{W = F \cdot \ell.}$$

- Όταν το σημείο εφαρμογής σταθερής δύναμης μετατοπίζεται κατά ένα μήκος ℓ σε ευθεία, που σχηματίζει γωνία α με την κατεύθυνση της δύναμης. Το παραγόμενο έργο ισούται με:

$$\mathbf{W = F \cdot \ell\ \sigma\upsilon\nu\alpha.}$$

- Στην περίπτωση που το σημείο εφαρμογής σταθερής δύναμης μετατοπίζεται κατά ένα μήκος ℓ σε τυχούσα ευθεία. Το έργο εκφράζεται με τη σχέση:

$$\mathbf{W = F \times \ell}\ \textbf{προβ. τρ. σημ. Εφαρ.}$$

- Το **έργο ανύψωσης** ή **έργο βάρους** εκφράζεται με τη σχέση:

$$\mathbf{W = mgh = mg\,(Z_2 - Z_1)}$$

- Το **έργο ελατηρίου** εκφράζεται με τη σχέση :

$$\mathbf{W = \frac{1}{2} k\ell^2}$$

- Το **έργο ατράκτου** εκφράζεται με τη σχέση :

$$W_{ατρ} = 2\,π\,ν \cdot M.$$

- Το **έργο επιτάχυνσης** εκφράζεται με τη σχέση :

$$W_{επ} = 1/2m(V_2^2 - V_1^2).$$

- Το **έργο ογκομεταβολής** εκφράζεται με τη σχέση:

$$W = p\Delta V$$

- Το καθαρό έργο ροής εκφράζεται με τη σχέση:

$$W = P_2\,v_2 - p_1 v_1$$

- Υπάρχουν και άλλες μορφές μη μηχανικές, όπως το **μαγνητικό, ηλεκτρικό** και **χημικό έργο**.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

1. Ενας εργάτης μεταφέρει ένα φορτίο με ένα καρότσι για μια απόσταση 1,5 km εξασκώντας μια σταθερή δύναμη 180 N. Να υπολογίσετε το παραγόμενο έργο.

(*Απάντηση:* 270KJ)

2. Ενα τρακτέρ ρυμουλκεί μια βάρκα κατά μήκος ενός ποταμού, εξασκώντας μια σταθερή δύναμη 1200 N για μια απόσταση 2 km. Εάν υποθέσουμε ότι η διεύθυνση της δύναμης σχηματίζει γωνία 30° με τη μετατόπιση, να υπολογίσετε το παραγόμενο έργο.

(*Απάντηση:* 2.070KJ)

3. Να υπολογίσετε το παραγόμενο έργο σε μια ώρα από ένα ιμάντα, που κινεί μια τροχαλία διαμέτρου 40 cm, που περιστρέφεται με 500σαλ., γνωρίζοντας ότι η κινητήρια δύναμη που εξασκεί ο ιμάντας, είναι 300 N.

(*Απάντηση:* 11.304KJ)

4. Να υπολογίσετε το έργο που καταναλώνει ένας ορειβάτης, για να μεταφέρει το σακίδιο του μάζας m = 15kg σε υψομετρική διαφορά 1.000 m.

(*Απάντηση:* 150KJ)

5. Η σταθερά ενός ελατηρίου είναι K = 10 KN/m. Να υπολογίσετε το έργο που απαιτείται, για να συμπιεσθεί το ελατήριο κατά 80 mm.

(*Απάντηση:* 32KJ)

6. Σε μια διάταξη κυλίνδρου-εμβόλου βρίσκεται αέριο υπό πίεση 500KN. Το αέριο διαστέλλεται με σταθερή πίεση από 0,1m^3 σε 1,1m^3. Να υπολογίσετε το παραγόμενο έργο.

(*Απάντηση:* 500KJ)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΚΦΡΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής

5.2 Αρχή της ισοδυναμίας μεταξύ έργου και θερμότητας

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να **διατυπώνετε** τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής για τα κλειστά συστήματα (κατά Lagrange), να **γνωρίζετε** τους τύπους που τον εκφράζουν, τα μεγέθη που τον ορίζουν και τις μονάδες τους και να τους **εφαρμόζετε** σε απλά θερμοδυναμικά προβλήματα.
- Να **διατυπώνετε** τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής για τα ανοικτά συστήματα (κατά Euler), να **γνωρίζετε** τους τύπους που τον εκφράζουν, τα μεγέθη που τον ορίζουν και τις μονάδες τους και να τους **εφαρμόζετε** σε απλά θερμοδυναμικά προβλήματα.
- Να **διατυπώνετε** την αρχή της ισοδυναμίας μεταξύ έργου και θερμότητας.

5.1. Ο ΠΡΩΤΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής είναι μια σχέση που εκφράζει την **αρχή διατήρησης της ενέργειας.**

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής εκφράζεται και με τις δύο μεθόδους επίλυσης θερμοδυναμικών προβλημάτων **κατά Lagrange και κατά Euler** (για κλειστά και ανοικτά συστήματα αντίστοιχα).

5.1.1. Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής για τα κλειστά συστήματα (κατά Lagrange)

Θα μελετηθεί κατ' αρχήν αυτός ο νόμος **κατά Lagrange:**. Συμβολίζεται με:

Q_{rs}: η ολική θερμότητα που έλαβε το σύστημα στο χρονικό διάστημα Δt.

W_{rs}: το έργο που έλαβε το σύστημα στο χρονικό διάστημα Δt.

U_0: η εσωτερική ενέργεια του συστήματος με οποιαδήποτε μορφή μηχανική, θερμική, χημική κ.λ.π.

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής για τα κλειστά συστήματα (κατά

Lagrange) είναι:

$$Q_{rs} + W_{rs} = \Delta U_0 \quad (5.1.1.α.)$$

που σημαίνει ότι: **η θερμότητα που έλαβε το σύστημα από τον εξωτερικό του χώρο δια μέσου της επαφής του με αυτό και το έργο που το σύστημα έλαβε από τον εξωτερικό χώρο, χάρη στις δυνάμεις που ανταλλάσσει με αυτό το μετατρέπει σε μια μεταβολή της εσωτερικής του ενέργειας.**

Θα **γίνει προσπάθεια να αναλυθούν τα μεγέθη** που εμφανίζονται στον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής.

Η **εσωτερική ενέργεια** θα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta U_0 = \Delta U_{th} + \Delta U_{ch} + \Delta U_{ΔΙΑΦ} \quad (5.1.1.β)$$

όπου: **ΔU_{th}** θερμική: είναι η εσωτερική ενέργεια, που οφείλεται στην κίνηση των μορίων

ΔU_{ch}: είναι η εσωτερική χημική ενέργεια.

$\Delta U_{ΔΙΑΦ}$: είναι ενέργειες που οφείλονται στις μαγνητικές, ηλεκτρικές και ατομικές κ.λ.π. ιδιότητες της ύλης.

Στις εφαρμογές των θερμικών μηχανών το $\Delta U_{ΔΙΑΦ} = 0$ συνεπώς:

$$\Delta U_0 = \Delta U_{th} + \Delta U_{ch}$$

Το ποσό της θερμότητας με δείκτη **Q_{rs}** θα δίνεται από τη σχέση :

$$Q_{rs} = Q_{es} + Q_{cws} \quad (5.1.1.γ)$$

όπου: **Q_{es}**: είναι η θερμότητα που δόθηκε από το εξωτερικό μέρος του συστήματος με διαγωγή, μεταφορά και ακτινοβολία στο σύστημα.

Q_{cws}: είναι η θερμότητα που προέρχεται από τυχόν τριβές επαφής επιφανειών στερεών σωμάτων, μεταξύ συστήματος και εξωτερι1κού χώρου.

Όπως προαναφέρθηκε, στα προβλήματα που μελετάμε, πάντοτε αποφεύγεται η ύπαρξη αυτής της τριβής επιλέγοντας κατάλληλα το σύστημα.

Το έργο W_{rs}, θα δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{W_{rs} = (W_{rs})_{fs} + (W_{rs})_{fm}} \qquad (5.1.1.\delta)$$

όπου: **$(W_{rs})_{fs}$:** είναι το έργο που λαμβάνει το σύστημα απ' το έργο που παράγουν οι δυνάμεις επιφάνειας που εφαρμόζονται στην επιφάνεια διαχωρισμού του συστήματος.

$(W_{zs})_{fm}$: είναι το **έργο** που λαμβάνει το σύστημα από **δυνάμεις απόστασης**.

Αποδεικνύεται ότι το έργο των δυνάμεων επιφάνειας που δίνει το σύστημα στον εξωτερικό χώρο (κινητήρια μηχανή) είναι το **W_e**.

Το **έργο** που δίνουν οι **δυνάμεις απόστασης** οφείλονται στις **δυνάμεις του πεδίου βαρύτητας**, στις **δυνάμεις αδράνειας του ρευστού** και στις **δυνάμεις φυγοκεντρικών πεδίων**.

Αυτό θα δίνεται από τη σχέση:

$$(W_{rs})_{fs} = -\Delta E_o - \Delta E_{ef} - \Delta E_g \qquad (5.1.1.\delta)$$

όπου: **ΔE_c**: είναι η **μεταβολή της ενέργειας** που οφείλεται στη **μεταβολή της ταχύτητάς του**.

ΔE_{cf}: είναι η **μεταβολή της ενέργειας** που οφείλεται στα **φυγοκεντρικά πεδία** που επιδρούν πάνω στο ρευστό και

ΔE_g: είναι η **μεταβολή της ενέργειας** που οφείλεται στο **πεδίο βαρύτητας**.

Το σημείο (-) μπαίνει μπροστά, γιατί οι όροι της προηγούμενης σχέσης εκφράζουν διαφορά κινητικής ενέργειας.

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής για τα κλειστά συστήματα (κατά Lagrange) γράφεται:

$$Q = \Delta U_0 + W_e + \Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g \qquad (5.1.1\ .\sigma\tau.)$$

Από την τελευταία σχέση μπορούμε να πούμε, ότι το σύστημα δέχεται ένα ποσό θερμότητας από τον εξωτερικό του χώρο και το μετατρέπει: σε θερμική ενέργεια των μορίων του ρευστού, σε χημική ενέργεια. Επίσης, ένα μέρος αυτού χρησιμοποιείται για να παράγει έργο δυνάμεων επιφάνειας στον εξωτερικό χώρο, για να αυξήσει την κινητική του κατάσταση και τέλος να κατανέμεται για να παράγει έργο ενάντια στο πεδίο των φυγοκεντρικών δυνάμεων και τέλος ένα μέρος για να κάνει έργο ενάντια στις δυνάμεις του πεδίου βαρύτητας.

Δίνεται μια άλλη έκφραση του **πρώτου θερμοδυναμικού αξιώματος κατά για τα κλειστά συστήματα (κατά Lagrange)** θέτοντας εκτός από τα πιο πάνω μεγέθη και τα μεγέθη των εσωτερικών τάσεων του ρευστού (ιξώδες)

$$Q = \Delta U_0 + P\Delta V - \Delta W_{wm} \qquad (5.1.1.ζ.)$$

$$W_e = p\Delta V - W_{wm} - \Delta E_c - \Delta E_{cf} - \Delta E_g \qquad (5.1.1.η.)$$

όπου **W_{wm}:** είναι το έργο που σχετίζεται με όλες τις δυνάμεις που δημιουργούνται από το ιξώδες του ρευστού που είναι όρος πάντα θετικός.

Ορίζεται το γινόμενο **$p \cdot \Delta V$ ως έργο αντιστρεπτό και W_{wm} των δυνάμεων τριβής από το ιξώδες ως έργο μη αντιστρεπτό.**

Οταν δεν λαμβάνεται υπόψη το ιξώδες τότε είμαστε στην ειδική περίπτωση που μπορεί να θεωρηθεί η **θερμοδυναμική μεταβολή ως αντιστρεπτή**.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Να υπολογιστεί το έργο που παράγεται από την εκτόνωση των καυσαερίων σε ένα παλινδρομικό θερμικό κινητήρα Μ.Ε.Κ.

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, επιλέγεται το σύστημα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.1α. Όπως προαναφέρθηκε το έργο W_e που παράγει το σύστημα από τις δυνάμεις επιφάνειας θα δίνεται από τη σχέση:

$$W_e = p \cdot \Delta V$$

Οι δυνάμεις επιφάνειας, που είναι κάθετες στην επιφάνεια διαχωρισμού του συστήματος στα τμήματα ΑΒ, ΒΓ και ΓΔ δεν παράγουν έργο. Δεν μετακινούν το σημείο εφαρμογής τους, γιατί οι επιφάνειες αυτές δεν μπορούν να παραμορφωθούν.

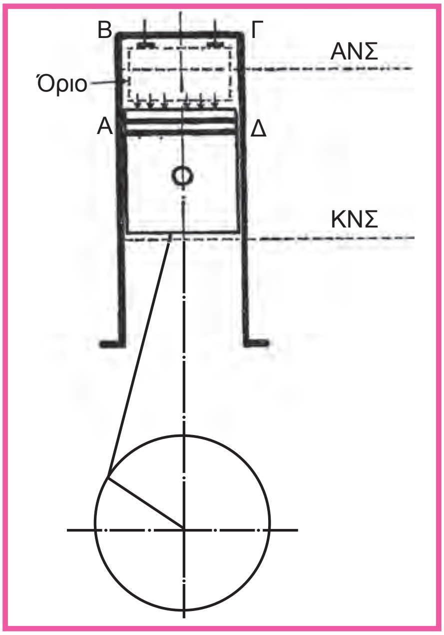
Οι κάθετες δυνάμεις στην επιφάνεια ΑΔ παράγουν έργο,. Μετακινούν το σημείο εφαρμογής τους, αφού το έμβολο μετακινείται.

Η δύναμη F που εφαρμόζεται στο έμβολο θα δίνεται από τη σχέση

$$F = P \cdot S$$

όπου: P είναι η πίεση, δηλαδή το μέγεθος των κάθετων εσωτερικών δυνάμεων και

S το εμβαδόν της επιφάνειας του εμβόλου.



Σχήμα 5.1.1α. *Διάταξη κυλίνδρου εμβόλου.*

Εάν το έμβολο μετακινηθεί κατά Μ, τότε το έργο που παράγει η δύναμη F θα είναι:

$$W_e = F \cdot \Delta\ell = p \cdot S\,\Delta\ell \; = p \cdot \Delta V$$

$$\underline{W_e = p \cdot \Delta v} \qquad (5.1.1.θ.)$$

Παρατηρούμε ότι οι εφαπτόμενες εσωτερικές τάσεις στην επιφάνεια διαχωρισμού του συστήματος δεν παράγουν έργο, γιατί στα σταθερά μέρη της επιφάνειας δεν μετακινούν το σημείο εφαρμογής τους, ενώ στην κινητή επιφάνεια αυτές έχουν διεύθυνση κάθετη στη μετακίνηση.

5.1.2. Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος για τα ανοικτά συστήματα (κατά Euler)

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής για τα ανοικτά συστήματα **(κατά Euler)** θα δίνεται από τη σχέση :

$$\boxed{Q = \Delta H + W_i + \Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g} \quad (5.1.2.α.)$$

όπου **Q:** είναι το **ποσό της θερμότητας** που δέχεται το σύστημα από τον **εξωτερικό χώρο**.

ΔH: είναι η **μεταβολή της ενθαλπίας** του συστήματος

W_i: είναι το **εσωτερικό έργο**

ΔE_c: είναι η **μεταβολή της ενέργειας** που οφείλεται στη **μεταβολή της ταχύτητας**

ΔE_{cf}: είναι η **μεταβολή της ενέργειας** που οφείλεται στα **φυγοκεντρικά** πεδία, που επιδρούν πάνω στο ρευστό

ΔE_g: είναι η **μεταβολή της ενέργειας** που οφείλεται **στο πεδίο βαρύτητας**.

➟ **Παρατήρηση 1**

Η πιο πάνω σχέση ισχύει **τότε και μόνο τότε**, εάν στο ανοικτό σύστημα υπάρχει **μόνιμη ροή**.

Υπενθυμίζουμε ότι μόνιμη ροή υπάρχει σε ένα ανοικτό σύστημα, όταν η μάζα που μπαίνει, είναι ίση με τη μάζα που βγαίνει και ότι όλες οι παράμετροι του συστήματος σε κάθε διατομή είναι ανεξάρτητες από το χρόνο.

➟ **Παρατήρηση 2**

Υπενθυμίζουμε ότι το ποσό της θερμότητας που μπαίνει στο σύστημα, θεωρείται θετικό και το έργο που παράγει το σύστημα στον εξωτερικό του χώρο είναι θετικό.

➟ **Παρατήρηση 3**

Τα πιο πάνω μεγέθη αναφέρονται ανά μονάδα μάζας του ρευστού.

5.2. ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΕΡΓΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Αποδεικνύεται πειραματικά ότι μεταξύ της ποσότητας θερμότητας Q, που δίνεται σ' ένα σύστημα, και του μηχανικού έργου W, που αποδίδεται από το σύστημα, υπάρχει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{W}{Q} = J = \text{σταθερά} \qquad (5.2.α.)$$

Το πηλίκο δηλαδή του μηχανικού έργου και της θερμότητας είναι ίσο με μια σταθερά J, που εξαρτάται μόνο από τις ,μονάδες και ονομάζεται **μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας**.

Συμβολίζεται με :

ΣW το καθαρό έργο, δηλαδή το αλγεβρικό άθροισμα των έργων που πραγματοποιήθηκαν σ' ένα θερμοδυναμικό κύκλο ενός συστήματος.

ΣQ την καθαρή θερμότητα, δηλαδή το αλγεβρικό άθροισμα των ποσοτήτων θερμότητας που ανταλλάχθηκαν στον ίδιο θερμοδυναμικό κύκλο του ίδιου συστήματος, τότε :

$$\Sigma W = J\,\Sigma Q \qquad (5.2.β.)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί **την αρχή της ισοδυναμίας μεταξύ έργου και θερμότητας ή τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής**.

Με βάση τη σχέση που αναφέρθηκε παραπάνω, ο νόμος αυτός διατυπώνεται : **σε μια κυκλική διεργασία ενός συστήματος, το καθαρό έργο είναι ανάλογο προς την καθαρή θερμότητα.**

Τιμές του μηχανικού ισοδύναμου της θερμότητας (J) :

$$J = 1\frac{N \cdot m}{J} = 1$$

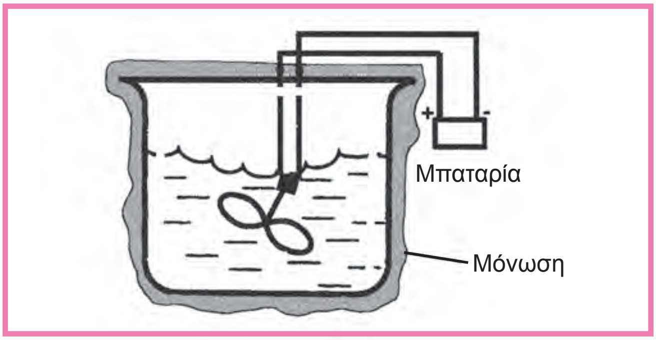
$$J = 4.186\ J/kcal$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5.1

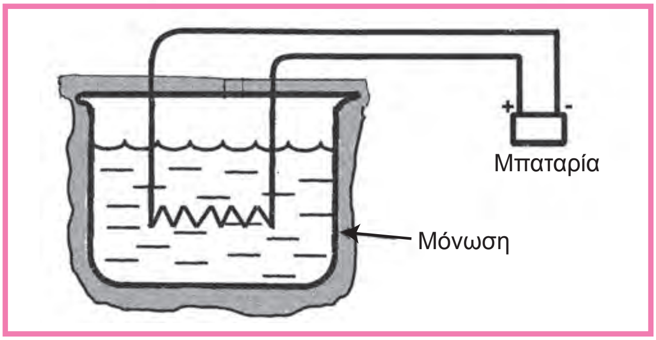
Ένα μονωμένο δοχείο με σταθερά τοιχώματα περιέχει 10kg νερού.

α. Μέσω μιας έλικας που περιστρέφεται από ένα ηλεκτροκινητήρα χορηγείται μηχανικό έργο 10KJ. σχ.4.2.α.

β. Μέσω μιας αντιστάσεως χορηγείται η ίδια θερμική ενέργεια σχ. 4.2.β. Να υπολογίσετε τη μεταβολή της ειδικής εσωτερικής ενέργειας του νερού.



Σχήμα 5.2.α. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5.1.α*



Σχήμα 5.2.β. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5.1.β*

Λύση

α. Από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής κατά Lagrange (κλειστά συστήματα) θα έχουμε:

$$Q = \Delta U_0 + W_e + \Delta E_0 + AE_{cf} + AE_g$$

Και επειδή οι ποσότητες ΔΕε, ΑΕg, Ac είναι αμελητέες προκύπτει:

$AU_0 = Q - W_e$

$\Delta U_0 = - W_e,$ $\quad Q = 0$ $\quad$ σύστημα **μονωμένο**

$\Delta U_0 = We,$ $\quad - W_e$ $\quad$ έργο **προς** το σύστημα η ειδική εσωτερική ενέργεια

$$\Delta U_0 = W_e = \frac{10\ \text{KJ}}{10\ \text{Kg}} = 100\ \text{J/kg}$$

$$\boxed{\Delta_{u0} = 1.000\ \text{J/kg}}$$

β. Επίσης έχουμε :

$\Delta U_0 = Q - W_e$

$\Delta U_0 = Q, \qquad W_e = 0$

$$\Delta u_0 = q = \frac{10\ \text{KJ}}{10\ \text{Kg}} = 100\ \text{J/kg}$$

$$\boxed{\Delta u_0 = 1.000\ \text{J/kg}}$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5.2

Σε ένα κλειστό σύστημα που αποτελείται από 5,4 kg ενός ρευστού πραγματοποιείται μια μεταβολή. Η ειδική εσωτερική ενέργεια του συστήματος μειώνεται κατά 60 KJ/kg και από το σύστημα παράγεται έργο 95 KJ/kg. Να υπολογίσετε τη μεταφερόμενη θερμότητα.

Λύση

Από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής κατά Lagrange θα έχουμε:

$Q = \Delta U_0 + W_e + \Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g$

Και επειδή οι ποσότητες ΔE_e, ΔE_g, Δ_c είναι αμελητέες προκύπτει:

$\Delta U_0 = Q - W_e$

$\Delta u_0 = q - w_e, \qquad \Delta u = -60\ \text{KJ/kg}$

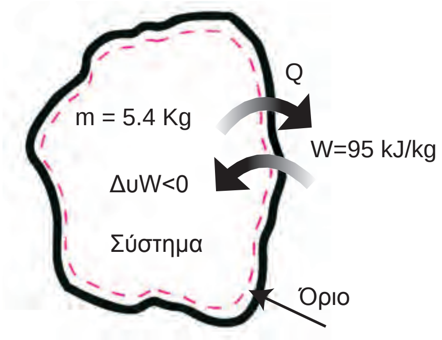
$-60 = q - w_e, \qquad w = 95\ \text{KJ/kg}$

$-60 = q - 95$

$q = 35\ \text{KJ/kg}$

$Q = 5{,}4\ \text{kg} \times 35\ \text{KJ/kg}$

$$\boxed{Q = 189\ \text{KJ}}$$



Σχήμα 5.2.γ. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5.2.*

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5.3

Σε μια διάταξη ατμοκίνητου στροβίλου αναπτύσσονται 1.000 KW. Το σύστημα διαγράφει θερμοδυναμικό κύκλο και οι εναλλαγές θερμότητας και έργου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 4.3.β.
Να υπολογίσετε τη ροή της μάζας του ατμού.

Λύση

Από την αρχή της ισοδυναμίας για κυκλική αλλαγή θα έχουμε :

$\Sigma Q + ZW = 0$

$\Sigma Q = 2.900 - 2.300$ KJ/kg $= 600$ KJ/kg

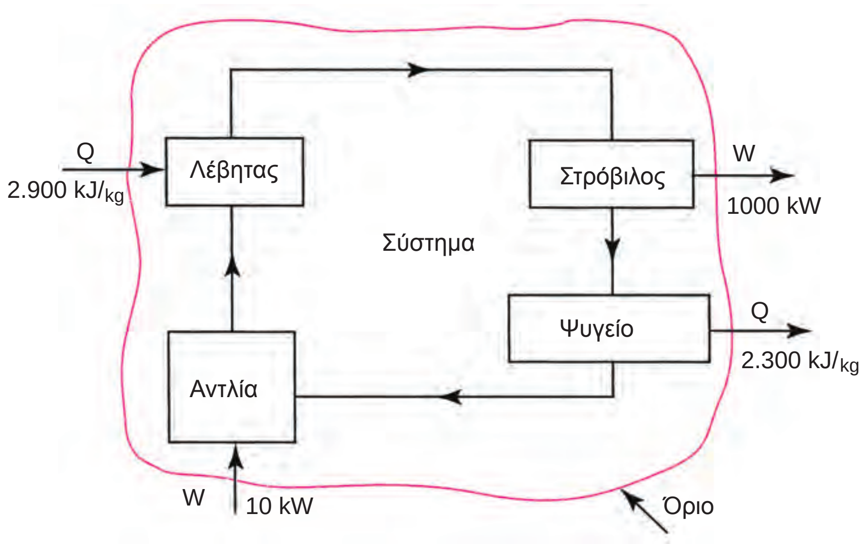
Εστω m kg/s η μάζα του ατμού

$\Sigma Q = 600\ m$ KW

$\Sigma W = 10 - 1.000$ KW $= -990$ KW

οπότε $600\ m - 990 = 0$

$$\dot{m} = \frac{990}{600} = 1{,}65\ kg/s$$



Σχήμα 5.2.d. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 5.3.*

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5.4

3 kg αέρα υφίσταται μια μεταβολή σε ένα ανοικτό σύστημα από την κατάσταση 1 ειδικής ενθαλπίας h_1 = 205 KJ/kg στην κατάσταση 2 ειδικής ενθαλπίας h_2 = 1.342 KJ/kg. Να υπολογίσετε τη χορηγούμενη θερμότητα στον αέρα.

Λύση

Από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής κατά Euler (ανοικτά συστήματα) έχουμε:

$Q = \Delta H$

$\Delta h = q$

$h_2 = h_1 = q$

$1342 KJ/kg - 205 KJ/kg = q$

$q = 1137 KJ/kg$

$Q = 3kg \cdot q$

$Q = 3.411$ KJ

$\boxed{Q = 3.411 \text{ KJ}}$

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- **Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής** είναι μια σχέση που εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας.
- **Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής για τα κλειστά συστήματα** (κατά Lagrance) εκφράζεται με τη σχέση:

$$Q_{rs} + W_{rs} = \Delta U_0$$

που σημαίνει ότι: **η θερμότητα που έλαβε το σύστημα από τον εξωτερικό του χώρο δια μέσου της επαφής του με αυτό και το έργο που το σύστημα έλαβε από τον εξωτερικό χώρο, χάρη στις δυνάμεις που ανταλλάσσει με αυτό, το μετατρέπουν σε μια μεταβολή της εσωτερι1κής του ενέργειας.**

- Μια άλλη έκφραση του **πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής** για τα **κλειστά συστήματα** (κατά Lagrance) είναι:

$$Q = \Delta u_0 + P\Delta V - \Delta W_{wm}.$$

- Ορίζεται ως **έργο αντιστρεπτό**:

$$W_e = P\Delta V.$$

- **Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής για τα ανοικτά συστήματα** (κατά Euler) δίνεται από τη σχέση:

$$Q = \Delta H + W_j + \Delta E_c + \Delta E_{cf}, + \Delta E_g.$$

- **Αποδεικνύεται πειραματικά** ότι, μεταξύ της ποσότητας θερμότητας Q, που δίνεται σ' ένα σύστημα και του μηχανικού έργου W, που αποδίδεται από το σύστημα, ισχύει η σχέση

$$\frac{W}{Q} = J = \text{σταθερά}$$

και ονομάζεται **μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας.**

- **Σε μια κυκλική μεταβολή** ενός συστήματος, το καθαρό έργο είναι ανάλογο προς την καθαρή θερμότητα.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

1. Σε μια μεταβολή που πραγματοποιείται σε ένα κλειστό σύστημα, χορηγούνται 2800 KJ θερμικής ενέργειας στο σύστημα και παίρνουμε 1600 KJ μηχανικού έργου.
   Να προσδιορίσετε τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος.

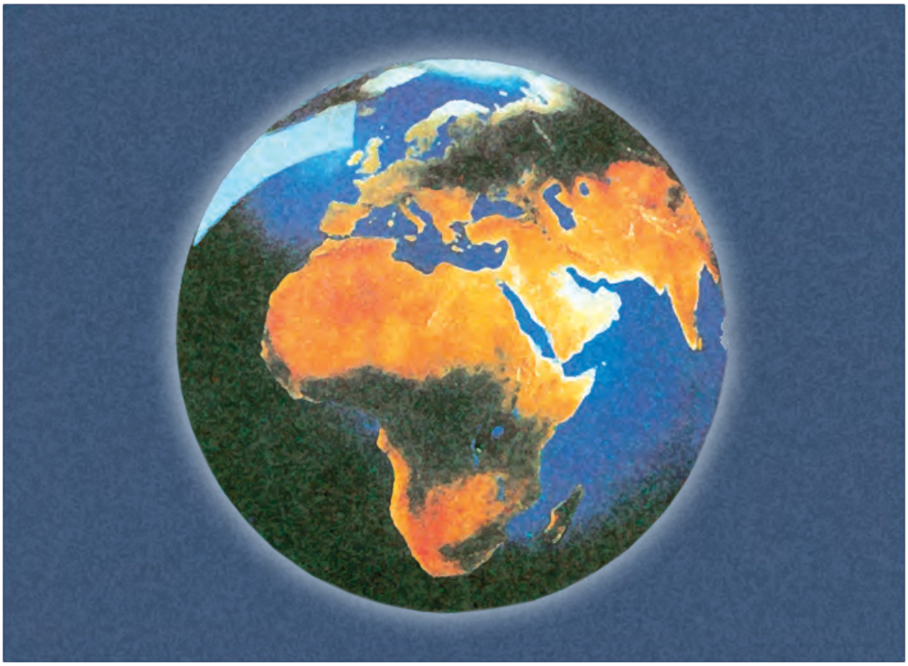
   (*Απάντηση:* 1200 KJ)

2. Σε μία μεταβολή που πραγματοποιείται σε ένα κλειστό σύστημα, χορηγούνται 4000 KJ μηχανικού έργου και έχουμε μια μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος 3200 KJ.
   Να προσδιορίσετε τη θερμική ενέργεια που μεταφέρθηκε και τη διεύθυνση μεταφοράς.

   (*Απάντηση:*-800 KJ, από το σύστημα)

3. Κατά τη διάρκεια μιας μεταβολής σε ένα κλειστό σύστημα αφαιρούνται 1.000 KJ θερμότητας και παρατηρείται αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος κατά 200 KJ.
   Να υπολογίσετε το παραγόμενο ή καταναλισκόμενο έργο και να προσδιορίσετε, εάν πρόκειται για συμπίεση ή εκτόνωση.

   (*Απάντηση:* -1.200, συμπίεση)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΕΛΕΙΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

6.1 Μεταβολές τελείων αερίων
6.2 Ισόθερμη μεταβολή
6.3 Ισόχωρη μεταβολή
6.4 Ισοβαρής μεταβολή
6.5 Αδιαβατική μεταβολή
6.6 Πολυτροπική μεταβολή

6.7 Οι μεταβολές στο διάγραμμα (P - v)

6.8 Οι μεταβολές στο διάγραμμα (T - s)

6.9 Αντιστρεπτές και μη αντιστρεπτές μεταβολές

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να **αναφέρετε** τις χαρακτηριστικές θερμοδυναμικές μεταβολές.
- Να **γνωρίζετε** τις εξισώσεις που εκφράζουν τις θερμοδυναμικές μεταβολές.
- Να **γνωρίζετε** τις σχέσεις που συνδέουν τα μεγέθη της αρχικής και της τελικής κατάστασης.
- Να **γνωρίζετε** τις σχέσεις που επιτρέπουν τον υπολογισμό των εναλλαγών έργου, θερμότητας, εσωτερικής ενέργειας και να λύνετε προβλήματα.
- Να **απεικονίζετε** στο διάγραμμα (P - v) και (T - s) τις θερμοδυναμικές μεταβολές.
- Να **εξηγείτε** την έννοια της αντιστρεπτής και μη αντιστρεπτής μεταβολής.

6.1. ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΕΛΕΙΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

Όταν το σύστημα, σ’ αυτήν την περίπτωση ένα τέλειο αέριο, εξελίσσεται εξ αιτίας των εναλλαγών ενέργειας με το περιβάλλον από μια αρχική κατάσταση, που τη συμβολίζουμε 1, σε μια τελική κατάσταση που τη συμβολίζουμε 2, τότε λέμε ότι υφίσταται μια μεταβολή.

Θα μελετήσουμε τις αναλυτικές σχέσεις που συνδέουν τις παραμέτρους της αρχικής και της τελικής κατάστασης, δηλ. τις εξισώσεις εκείνες που χαρακτηρίζουν τις μεταβολές, κάθε μία από αυτές ξεχωριστά, στις οποίες όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, έχει δοθεί ένα χαρακτηριστικό όνομα π.χ. ισόθερμη, ισόχωρη, ισοβαρής, αδιαβατική, πολυτρο πική. Σε κάθε μία από αυτές θα δώσουμε τις σχέσεις εκείνες που μας επιτρέπουν να υπολογίζουμε τις εναλλαγές ενέργειας του συστήματος με το περιβάλλον του, δηλ. την εναλλαγή έργου, θερμότητας, εσωτερικής ενέργειας.

Πριν αναλύσουμε τις θερμοδυναμικές μεταβολές θα αναφέρουμε μερικές βασικές έννοιες χρήσιμες για την καλύτερη κατανόηση αυτών.

- **Ειδική θερμότητα ονομάζεται το πηλίκο μεταξύ της στοιχειώδους θερμότητας ΔQ που εναλλάσσει η μονάδα μάζας του συστήματος, κατά τη διάρκεια μιας στοιχειώδους μεταβολής, και της μεταβολής της θερμοκρασίας ΔΤ που υφίσταται το σύστημα ως συνέπεια της εναλλαγής θερμότητας ΔQ.**

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \tag{6.1α}$$

Εάν αναφερθούμε σε μια πεπερασμένη μεταβολή 1 2 που υφίσταται το σύστημα, θα έχουμε τη μέση ειδική θερμότητα που εκφράζεται με τη σχέση:

$$C_m = \frac{Q_{12}}{T_2 - T_1} \tag{6.1 β}$$

Η ειδική θερμότητα παίρνει τιμές από $-\infty$ έως $+\infty$. Από όλες τις τιμές που η ειδική θερμότητα μπορεί να λάβει, υπάρχουν δύο που ονομάζονται **θεμελιώδεις**:

Η **ειδική θερμότητα με σταθερή πίεση** (C_p), την οποία λάμβάνουμε, όταν η εναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια μιας ισοβαρούς μεταβολής.

Η **ειδική θερμότητα με σταθερό όγκο** (C_v) την οποία λαμβάνουμε, όταν η εναλλαγή θερμότητας πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια μιας ισόχωρης μεταβολής.

Οι ειδικές θερμότητες C_p και C_v είναι ποσότητες πάντα θετικές.

Για την ίδια **χημική σύσταση** του συστήματος οι Cp και Cv μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία.

Για την **ίδια θερμοκρασία** οι C_p και C_v μεταβάλλονται με τη χημική σύσταση.

Η ειδική θερμότητα ενός ρευστού εξαρτάται εκτός από την χημική σύσταση και τη θερμοκρασία και από τη μεταβολή γιατί απ' αυτή εξαρτάται η εναλλαγή θερμότητας.

- Για τα **τέλεια αέρια** ισχύουν οι σχέσεις:

$$\boxed{C_p - C_v = R} \qquad (6.1\gamma)$$

$$\boxed{\frac{C_p}{C_v} = K} \qquad (6.1\delta)$$

Από την πρώτη (σχέση του Mayer) παρατηρούμε ότι, επειδή R είναι ποσότητα θετική, $\mathbf{C_p}$ είναι πάντα **μεγαλύτερη** της $\mathbf{C_v}$. Η δεύτερη μας δίνει τον εκθέτη της αδιαβατικής μεταβολής, που θα δούμε στη συνέχεια, ο οποίος σύμφωνα με όσα είπαμε παραπάνω είναι μεγαλύτερος της μονάδας.

Επίσης ισχύουν οι σχέσεις:

Για μια **ισοβαρή** μεταβολή $Q_{1,2} = h_2 - h_1$, και

$$C_{pm} = \frac{Q_{1,2}}{T_2 - T_1} = \frac{h_2 - h_1}{T_2 - T_1}$$

όπου: C_{pm} μέση τιμή

Για μια **ισόχωρη** μεταβολή $Q_{1,2} = U_{02} - U_{01}$ και

$$C_{pm} = \frac{Q_{1,2}}{T_2 - T_1} = \frac{U_{02} - U_{01}}{T_2 - T_1}$$

όπου: C_{vm} μέση τιμή.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

1 kg O_2 υφίσταται μια μεταβολή 1,2 και η θερμοκρασία του αυξάνεται από 773 K σε 1073 K. Να υπολογίσετε τη μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας.

Λύση

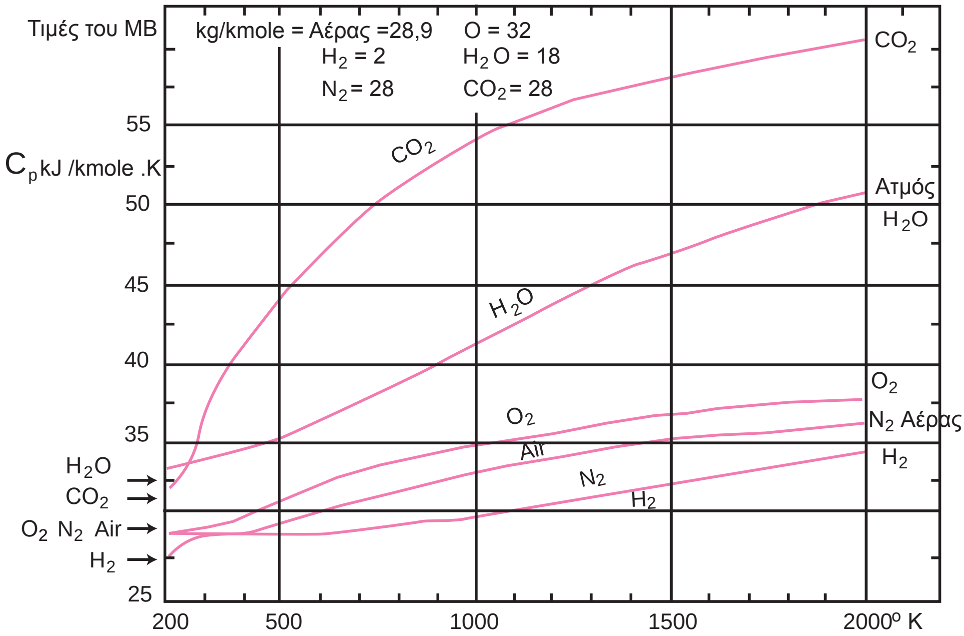
Από τη σχέση:

$$U_{02} - U_{01} = C_V\,(T_2 - T_1)$$

---

* Ο πίνακας 6.1 μας δίνει τις μεταβολές της ειδικής θερμότητας με σταθερή πίεση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τα πιο ενδιαφέροντα αέρια.

Πίνακας 6.1 Ειδική θερμότητα



Καμπύλες C_p kj /kmole .K

έχουμε: $(T_2 - T_1) = 1.073 \;\; 773 = 300$ K

Από τον πίνακα 6.1* για το O_2 έχουμε:

C_p στους 773 K = 33,4 kJ/kmole K

C_p στους 1073 K = 35 kJ/kmole K

$MB_{O_2} = 32$ kg / kmole

Υπολογίζουμε τη μέση τιμή

$$C_p = \frac{33,4 + 35}{2} = 34,2 \text{ kJ / kmol K}$$

και

$$C_p = \frac{34,2}{32} = 1,07 \text{ kJ / kg K}$$

Από τη σχέση του Mayer έχουμε

$C_p - C_v = R$ το R για το O_2 είναι 260 J/kg K

και

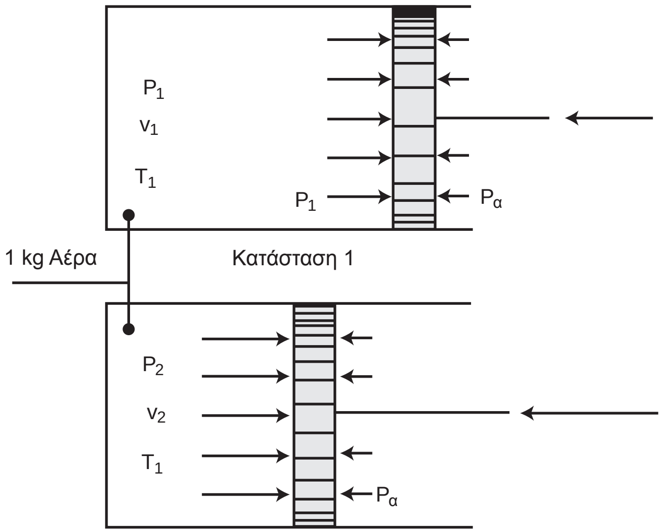
$$C_v = 1{,}07 - 0{,}26 = 0{,}81 \chi 300 = 243 \text{ kJ / kg}$$

Τελικά: $$U_{02} - U_{01} = 0{,}81 \times 300 = 243 \text{ kJ / kg}$$

6.2 ΙΣΟΘΕΡΜΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

Ισόθερμη ονομάζεται η μεταβολή κατά τη διάρκεια της οποίας η θερμοκρασία του συστήματος παραμένει σταθερή. m = 1, p · v = R · T.

Εστω μια διάταξη κυλίνδρου εμβόλου όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2α, όπου πραγματοποιούμε μια ισόθερμη μεταβολή από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2.



Σχήμα 6.2α *Διάταξη κυλίνδρου εμβόλου*

Κατάσταση 1: p_1, v_1, T_1 $\qquad p_1v_1 = RT_1$

Κατάσταση 2: $p_2, v_2, T_2,$ $\qquad p_2v_2 = RT_2$

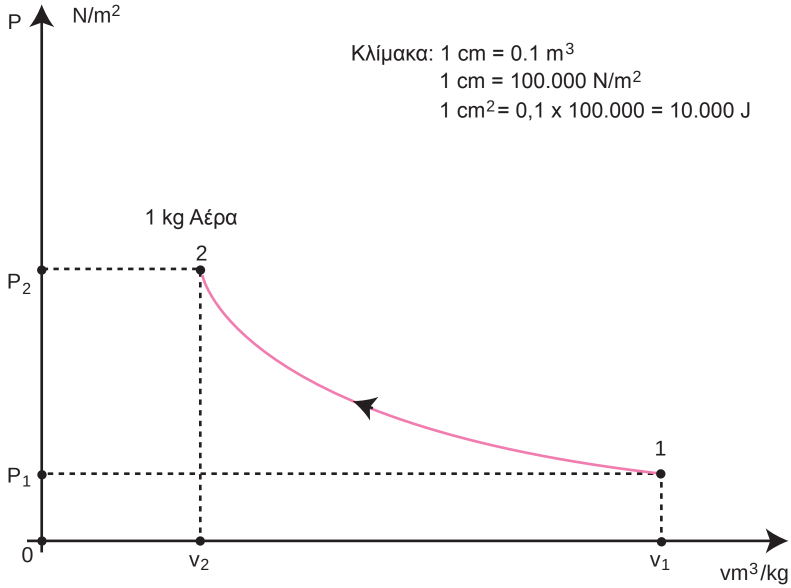
Από τις δύο εξισώσεις λαμβάνοντας υπόψη ότι $T_1 = T_2$ έχουμε:

$$p_1v_1 = p_2v_2 = \text{σταθ.}$$

και

$$p \cdot v = \text{σταθ}$$

Η σχέση αυτή **εκφράζει** την **εξίσωση της ισόθερμης μεταβολής**. Στο **διάγραμμα (P – v) απεικονίζεται** με το ένα σκέλος μιας **ισοσκελούς υπερβολής** (σχ. 6.2β).



Σχήμα 6.2β *Ισόθερμη μεταβολή*

Η εναλλαγή έργου

Η εναλλαγή έργου του στοιχειώδους έργου του συστήματος με το περιβάλλον του θα είναι:

$$\Delta W_e = p\Delta v \qquad \Delta v < 0$$

Παρατηρείται στο σχήμα 6.2β ότι, για πολύ μικρά Δv μπορεί να θεωρηθεί η πίεση σταθερή και επομένως το γινόμενο p · Δv είναι το εμβαδόν του διαγραμμισμένου παραλληλόγραμμου. Άρα, μπορούμε να πούμε ότι το στοιχειώδες έργο δίνεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του στοιχειώδους παραλληλόγραμμου, που φαίνεται στο σχήμα.

Σύμφωνα με τη σκέψη που κάναμε παραπάνω, μπορούμε να χωρίσουμε την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη της μεταβολής σε στοιχειώδη πα1ραλληλόγραμμα που αντιπροσωπεύουν τα στοιχειώδη έργα, και να πούμε ότι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη είναι το άθροισμα όλων των στοι1χειωδών έργων κατά τη διάρκεια της μεταβολής.

Αυτό είναι το έργο που εναλλάσσει το σύστημα με το περιβάλλον του κατά τη διάρκεια της μεταβολής από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2.

Αποδεικνύεται ότι η εναλλαγή του έργου ανά μονάδα μάζας του συστήματος για την ισόθερμη είναι:

$$\left(W_e\right)_T = R\,T_1 \ln\frac{v_2}{v_1} = R\,T_1 \ln\frac{P_1}{P_2}$$

Υπενθυμίζεται ότι lnx = 2,3 log1Ox

Μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας $U_{02} - U_{01}$

Γνωρίζουμε ότι:

$$U_{02} - U_{01} = C_V(T_2 - T_1)$$

$$T_2 = T_1 \text{ και } T_2 - T_1 = 0$$

$$\boxed{U_{02} - U_{01} = 0}$$

Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι η ισόθερμη p · v = σταθ είναι μια καμπύλη, όπου η εσωτερική ενέργεια παραμένει σταθερή.

Η εναλλαγή θερμότητας

Από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής για τα κλειστά συστήματα (κατά Lagrange) έχουμε:

$$Q = \Delta U_0 + W_e + \Delta E_c, + \Delta E_{cf} + \Delta E_g$$

θεωρούμε τις ποσότητες ΔE_c, ΔE_{cf}, ΔE_g ίσες με μηδέν

Επίσης, έχουμε: $U_{02} - U_{01} = 0$

οπότε

$$\boxed{Q = W_e}$$

Από τη σχέση $Q = W_e$ παρατηρούμε ότι το περιβάλλον του συστήματος δέχεται ποσότητα θερμότητας Q ίση με το έργο που δέχεται το σύστημα. Επειδή έχουμε συμπίεση, για να παραμείνει η θερμοκρασία σταθερή και, επομένως, για να πετύχουμε την ισοθερμοκρασιακή μεταβολή, θα πρέπει να ξοδέψουμε έργο π.χ. ψύχοντας το σύστημα.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

(Σχήμα 6.2α και 6.2β) Ισόθερμη συμπίεση 1 kg αέρα

Κατάσταση 1: $p_1 = 10$ N/cm^2

$v_1 =$;

$T_1 = 323°$ K

Υπολογίζουμε v_1: $p_1 v_1 = RT_1$, $v_1 = \dfrac{RT_1}{p_1}$ όπου R = 287 J/kg K

$$v_1 = \frac{287 \times 323}{100.000} = \frac{92.500}{100.000} \approx 0{,}925\ m^3/kg$$

Κατάσταση 2: $P_2 = 40$ N/cm2

$v_2 =$;

$T_2 = T_1 = 323$ K

Υπολογίζουμε v_2: $v_2 = \dfrac{287 \times 323}{400.000} = \dfrac{92.500}{100.000} \approx 0{,}231\ m^3/kg$

Η **εξίσωση** της καμπύλης είναι:

$p \cdot v = \text{σταθ} = RT_1$, $p \cdot V = 287 \times 323$, $pv = 92.500$ J/kg

Η καμπύλη είναι μια ισοσκελής υπερβολή σχήμα 6.2β.

Το **έργο** υπολογίζεται με τη σχέση:

$$W_e = R\,T_1 \ln\frac{v_2}{v_1} \approx -128.000 J/kg$$

ή μετρώντας το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη

W_e = εμβαδόν (1΄122΄) ≃ 12,8 cm^2

W_e = 12,8 x 10.000 ≃ 128.000 J/kg

Η **θερμότητα** υπολογίζεται από τη σχέση:

$Q = W_e$ αλλά W_e = -128.000 J/kg

Q = 128.000 J/kg.

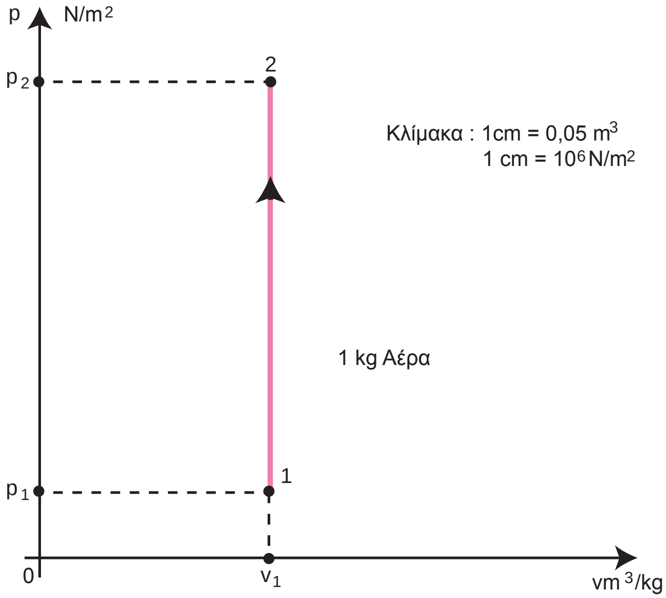
6.3 ΙΣΟΧΩΡΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

Ισόχωρη μεταβολή ονομάζεται η μεταβολή, κατά τη διάρκεια της οποίας ο ειδικός όγκος, επομένως, και ο γεωμετρικός όγκος του συστήματος παραμένει σταθερός.

Η **εξίσωση** της μεταβολής **εκφράζεται** με τη σχέση:

$$v = \text{σταθ}$$

Στο διάγραμμα (P – v) η μεταβολή **απεικονίζεται** με **ένα ευθύγραμμο τμήμα 12 παράλληλο στον άξονα P** (σχήμα 6.3α)



Σχήμα 6.3α *Ισόχωρη μεταβολή*

Από την εξίσωση $p \cdot v = RT$ και $v_1 = v_2$ για την κατάσταση 1 και 2 της μεταβολής θα έχουμε:

Κατάσταση 1: p_1, v,, T_1, $\quad p1v_1 = RT_1$

Κατάσταση 2: P_2, v_2, T_2, $\quad P_2v_2 = RT_2$

Από τις δύο εξισώσεις διαιρώντας κατά μέλη θα έχουμε:

$$\boxed{\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}}$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Μεταβολή 1 kg αέρα με σταθερό όγκο (σχήμα 6.3α)

Κατάσταση 1: $p_1 = 100\ N/cm_2$ ή $100 \times 10^4\ N/m^2$
$v_1 = ;$
$T_1 = 500\ K$ ή $227^\circ\ C$

Από την εξίσωση: $p \cdot v = RT$

Υπολογίζουμε v_1: $v_1 = \dfrac{R\,T_1}{p_1} = \dfrac{287 \times 500}{100 \times 10^4} \approx 0{,}143 m^3 / kg$

Κατάσταση 2: $T_2 = 2.500\ K$
$V_2 = V1 = 0{,}143\ m^3/kg$
$P_2 = ;$

Από την εξίσωση $\dfrac{p_1}{p_2} = \dfrac{T_1}{T_2}$

Υπολογίζουμε την p: $p_2 = p_1 \dfrac{T_2}{T_1} = 10^6 \dfrac{2500}{500} \approx 5 \times 10^6\ N/m^2$

Έργο

Η εναλλαγή του έργου του συστήματος με το περιβάλλον του θα είναι:

$$W_e = p\Delta V$$

και επειδή $\Delta V = 0$ θα έχουμε:

$$W_e = 0$$

Μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας

Γνωρίζουμε ότι:

$$U_{02} - U_{01} = Cv\ (T_2 - T_1)$$
$$T_2 - T_1 = 2.500 - 500 = 2.000\ K$$

Υπολογίζουμε Cp: Από το σχετικό πίνακα 6.1 για τον αέρα. Θα έχουμε:

$$C_{pm} = 1{,}21 \text{ kJ/kg K}$$

όπου: C_{pm} μέση τιμή, $R_{αέρα} = 0{,}287$ kJ/kg K

Από τη σχέση του Mayer: $C_p - C_v = R$ προκύπτει

$$C_v = 1{,}21 - 0{,}287 = 0{,}923 \text{ kJ/kg K}$$

Επομένως:

$$U_{02} - U_{01} = 0{,}923 \times 2.000 = 1846 \text{ kJ/kg}$$

Θερμότητα

Από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής για τα κλειστά συστήματα (κατά Lagrange) έχουμε:

$$Q = \Delta U_0 + W_e + \Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g$$

θεωρούμε τις ποσότητες ΔE_e, ΔE_{cf}, ΔE_g ίσες με μηδέν

και επειδή We = 0 προκύπτει:

$$Q = U_{02} - U_{01} = 1846 \text{ kJ/kg}$$

Η ισόογκη αλλαγή καταστάσεως εφαρμόζεται στις βενζινομηχανές γιατί μοιάζει μ’ αυτήν η καύση. Στην περίπτωση αυτή η καύση μοιάζει με έκρηξη. Η ποσότητα της θερμότητας αυξάνει τη θερμοκρασία των καυσαερίων στους 2.000° C περίπου.

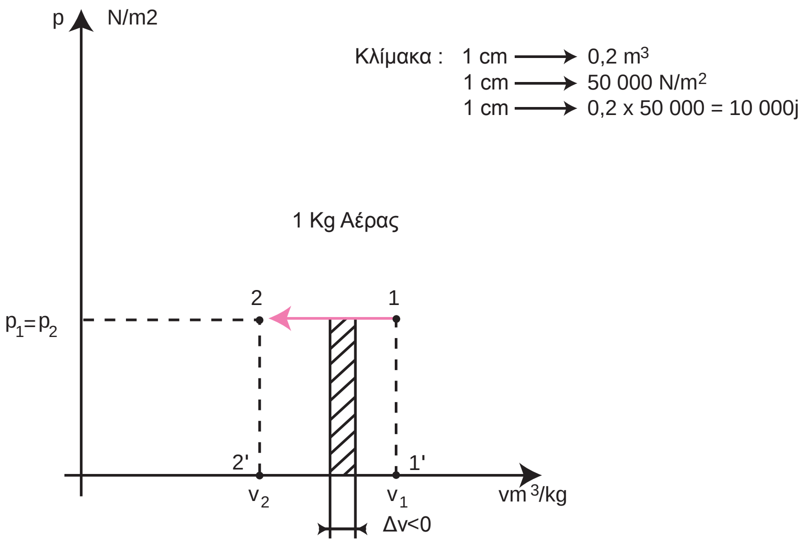
6.4 ΙΣΟΒΑΡΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

Ισοβαρής μεταβολή ονομάζεται η μεταβολή της πίεσης, κατά τη διάρκεια της οποίας η πίεση παραμένει σταθερή.

Η **εξίσωση** της μεταβολής **εκφράζεται** με τη σχέση:

$$\boxed{p = σταθ}$$

Στο διάγραμμα (P - v) η μεταβολή **απεικονίζεται** με ένα **ευθύγραμμο τμήμα παράλληλο στον άξονα v.** (σχ. 6.4α)



Σχήμα 6.4α *Ισοβαρής μεταβολή*

Από την εξίσωση $p \cdot v = RT$ και $p_1 = p_2$ για την κατάσταση 1 και 2 της μεταβολής θα έχουμε:

Κατάσταση 1: p_1, v_1, T_1, $p_1 v_1 = RT_1$

Κατάσταση 2: P_2, v_2, T_2, $P_2 v_2 = RT_2$

Από τις δύο εξισώσεις, διαιρώντας κατά μέλη, θα έχουμε:

$$\boxed{\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}}$$

≃

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Μεταβολή 1 kg αέρα με σταθερή πίεση

Κατάσταση 1: $p_1 = 101300$ N/m^2

$v_1 = ;$

$T_1 = 300$ K

Υπολογίζουμε v_1: $v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \times 300}{101\ 300} \approx 0{,}855\ m^3\ /\ kg$

Κατάσταση 2: $p_1 = p_2 = 101300\ N/m^2$

$V_2 = 0{,}5\ m^3/kg$

$T_2 =$;

Υπολογίζουμε T_2: $T_2 = T_1 \frac{v_2}{v_1} = 300 \times \frac{0{,}5}{0{,}855} \approx 175\ K$

Έργο

Η εναλλαγή του στοιχειώδους έργου του συστήματος με το περιβάλλον του θα είναι:

$$\Delta W_e = p \cdot \Delta v$$

Το έργο W_e = εμβαδόν (1 ΄I22΄) $\simeq$ 3,60 cm^2.

$$W_e = 3{,}60 \times 10.000 \simeq 36.000\ J/kg$$

Το έργο μπορούμε να το υπολογίσουμε και ως εξής:

$W_e = p \cdot \Delta v$

αλλά $\Delta v = V_2 - V_1$

Τελικά

$$W_e = p(V_2 - V_1)$$

$$W_e = 101300\ (0{,}5 - 0{,}855) = -36.000\ J/kg$$

Μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας

Γνωρίζουμε ότι:

$$U_{02} - U_{01} = Cv(T_2 - T_1)$$

όπου $C_p = 0{,}71$ kJ/kgk

τιμή του C_v για τον αέρα για συνήθεις θερμοκρασίες

$$U_{02} - U_{01} = 0{,}71\ (175 - 300) = -88{,}7\ kJ/kg$$

Θερμότητα

Από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής για τα κλειστά συστήματα (κα1τά Lagrange) θα έχουμε:

$$Q = \Delta U_0 + W_e + \Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g, \text{ αλλά } \Delta E_c, + \Delta E_{cf}, + \Delta E_g = 0$$

οπότε : $Q = \Delta U_0 + \Delta_{ολ}(p \cdot V)$

$$Q = \Delta(U_0 + p \cdot V)$$

$$Q = \Delta H$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι σε μια μεταβολή με σταθερή πίεση μεταβάλλονται η ενθαλπία του συστήματος.

$$Q = h_2 - h_1 = Cp\ (T_2 - T_1)$$

Για το παράδειγμα θα έχουμε:

$U_{02} - U_{01} = -88{,}7\ kJ/kg$

$W_e = -36.000\ J/kg$

οπότε:

$$Q = \Delta U_0 + W_e + \Delta E_c, + \Delta E_{cf}, + \Delta E_g, \quad \Delta E_c, + \Delta E_{cf} + \Delta E_g = 0$$

$$Q = -\ 88{,}7\ 36 = 124{,}7\ KJ/Kg$$

Επειδή $Cp = 1$ kJ/kg για τον αέρα για συνήθεις θερμοκρασίες

$$Q = C_p\ (T_2 - T_1) = 1\ (175 - 300) = -\ 125\ kJ/kg$$

6.5 ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

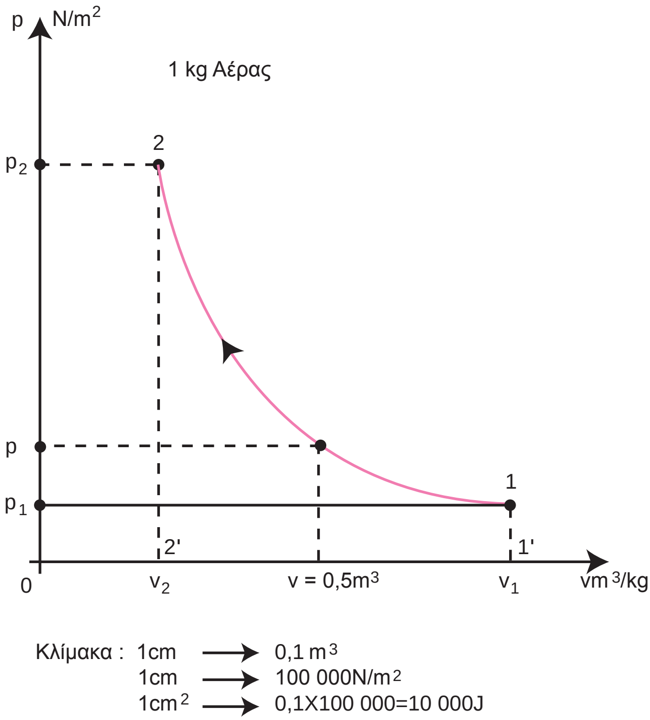
Αδιαβατική ονομάζεται η μεταβολή κατά τη διάρκεια της οποίας δεν υπάρχει εναλλαγή θερμότητας του συστήματος με το περιβάλλον του. Επομένως θα έχουμε: $(Q_{12})_{αδ} = 0$.

Η εξίσωση της μεταβολής **εκφράζεται** με τη σχέση:

$$p \cdot v^k = σταθ$$

όπου $k = \dfrac{C_p}{C_v}$

Στο διάγραμμα (P – v) η μεταβολή απεικονίζεται από μία καμπύλη (σχήμα 6.5α).



Σχήμα 6.5α *Αδιαβατική μεταβολή*

Από την εξίσωση $p1v_1^k$ = σταθ. για την κατασταση 1 και 2 της μεταβολής θα έχουμε:

Κατάσταση 1: $p_1, v_1, T_{1,}$ $\qquad p_1 v_1^k$ = σταθ.

Κατάσταση 2: P_2, v_2, T_2, $\qquad P_2 v^k$ = σταθ.

Επομένως θα έχουμε

$$\boxed{p_1 \cdot v_1^k = p_2 \cdot v_2^k}$$

$$\boxed{\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k}$$

$$\frac{v_2}{V_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/k}$$

Από τις παραπάνω και από τη σχέση:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}$$

Έχουμε:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k \frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$$

και

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \frac{p_2}{p_1}\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1-\frac{1}{k}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας και έργου

Από το πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής για τα κλειστά συστήματα (κατά Lagrange) θα έχουμε:

$$Q = \Delta U_0 + W_e + \Delta E_e + \Delta E_{cf} + \Delta E_g, \qquad \Delta E_c, + \Delta E_{cf} + \Delta E_g = 0$$

και επειδή $(Q_{1,2})_{\alpha\delta} = 0$ προκύπτει:

$$-W_e = U_{02} - U_{01}$$

Γνωρίζουμε ότι:

$$U_{02} - U_{01} = C_V(T_2 - T_1)$$

Επομένως μπορούμε να γράψουμε:

$$W_e = U_{02} - U_{01} = Cv(T_2 - T_1)$$

Υπολογίζουμε $(T_2 - T_1)$

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R}, \qquad T_1 = \frac{p_1 v_1}{R}, \qquad T_2 - T_1 = \frac{1}{R}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$-W_e = U_{02} - U_{01} = \frac{C_v}{R} \cdot (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

Από τη σχέση του Mayer : $C_p - C_v = R$ θα έχουμε :

$$-W_e = \frac{C_v}{R} \cdot (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$-W_e = \frac{C_v}{C_p - C_v} \cdot (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$-W_e = \frac{1}{\frac{c_p}{c_v} - 1} \cdot (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

όπου $\frac{C_p}{C_v} = k$

Για τον αέρα σε συνήθη θερμοκρασία είναι K = 1,40:

C_p = 1 kJ/kg K , C_v = 0,71 kJ/kg K, $k = \frac{1}{0{,}71} = 1{,}40$

Τελικά:

$$-w_e = \frac{1}{k-1} \cdot (p_2\ v_2 - p_1\ v_1)$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Αδιάβατη συμπίεση 1kg αέρα (σχήμα 6.5α)

Κατάσταση 1: p_1 = 100.000 N/m^2
V_1 =;
T_1 = 288 K

Υπολογίζουμε V_1: $v_1 = \frac{RT_1}{p_1}$, R = 287 J/kg K

$$v_1 = \frac{287 \times 288}{100.000} \approx 0{,}828\ m^3\ /\ kg$$

Κατάσταση 2: $\frac{V_1}{V_2} = 4$

P_2 = ;
T_2 = ;

Υπολογίζουμε V_2 : $v_2 = \dfrac{0,828}{4} \approx 0,207\ m^3 / kg$

Υπολογίζουμε p_2 : Από τη σχέση $\dfrac{P_2}{P_1} = \left(\dfrac{v_1}{v_2}\right)^k$

προκύπτει : $\dfrac{P_2}{P_1} = 4^{1\cdot 40}$

$$\log\frac{P_2}{P_1} = 1{,}40 \times \log 4 = 1{,}40 \times 0{,}60 = 0{,}840$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 7, \quad p_2 = 7 \times 100.000 = 700.000\ N / m^2$$

Υπολογίζουμε T_2 : από τη σχέση $\dfrac{T_2}{T_1} = \left(\dfrac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$

προκύπτει : $\dfrac{T_2}{T_1} = 4^{(1{,}40-1)} = 4^{0.40}$

$$\frac{T2}{T1} = 1.76, \quad T2 = 1{,}76 \times 288 = 510\ K$$

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας θα είναι:

$$U_{02} - U_{01} = Cv\ (T_2 - T_1)$$

όπου: $C_v = 0{,}71$ kJ/kg K

$$U_{02} - U_{01} = 0{,}71\ (510 - 288) = 158\ kJ/kg$$

Το έργο θα είναι:

$$W_e = -(U_{02} - U_{01}) = -158\ kJ/kg$$

Η αδιαβατική μεταβολή επιτυγχάνεται στις θερμικές μηχανές τόσο, όσο περισσότερο αυξάνει η ταχύτητα του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο, γιατί τότε δεν δίνεται αρκετός χρόνος στη θερμότητα να περάσει τα τοιχώματα προς το περιβάλλον. Ετσι εξηγείται και γιατί επιδιώκουμε να λει τουργούν οι σύγχρονες θερμικές μηχανές σε υψηλές ταχύτητες, να είναι δηλαδή ταχύστροφες.

6.6 ΠΟΛΥΤΡΟΠΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

Πολυτροπική ονομάζουμε τη μεταβολή του συστήματος που καθορίζεται από τη σχέση:

$$p \cdot v^m = \sigma\tau\alpha\theta$$

όπου: m ονομάζεται εκθέτης της πολυτροπικής.

Ισχύουν οι ίδιες σχέσεις που ισχύουν και για την αδιαβατική μεταβολή, αν στη θέση του k τοποθετήσουμε m.

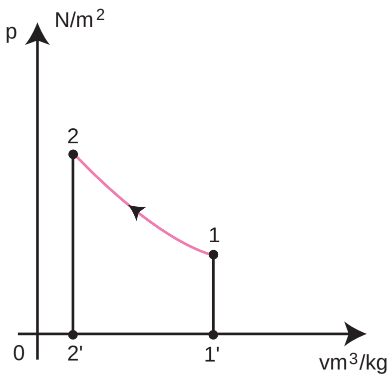
Η **μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας** εκφράζεται με τη σχέση:

$$U_{02} - U_{01} = \frac{c_v}{R}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

Το **έργο** εκφράζεται με τη σχέση:

$$-W_e = \frac{1}{m-1}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

και είναι ίσο με το εμβαδόν 1΄ 122΄, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6α



Σχήμα 6.6α *Πολυτροπική μεταβολή*

Θερμότητα

Από τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής κατά Lagrange (κλειστά συστήματα) θα έχουμε:

$$Q = \frac{c_v}{R}(p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{m-1}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$Q = \left(\frac{c_v}{R} - \frac{1}{m-1}\right)(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

Επίσης έχουμε : $Cp - Cv = R$ και

$$\frac{c_v}{R} = \frac{C_v}{c_p - c_v} = \frac{1}{\frac{c_p}{c_v} - 1} = \frac{1}{k-1}$$

Τελικά :

$$Q = \left(\frac{1}{k-1} - \frac{1}{m-1}\right)(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$Q = \frac{m-k}{(k-1)(m-1)}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$\boxed{Q = -W_e \bullet \frac{m+k}{k-1}}$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Πολυτροπική μεταβολή με εκθέτη m = 1,3.

Κατάσταση 1: $p_1 = 100.000 \text{ N/m}^2$, $T_1 = 300$ K

Κατάσταση 2: $P_2 = 400.000 \text{ N/m}^2$

Υπολογίζουμε T_2: από τη σχέση $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$

προκύπτει:

$$T_2 = 300(4)^{\frac{0,3}{1,3}} \text{ , } T_2 = 300 \text{ x } 1.37 = 413 \text{ K}$$

Το έργο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$-W_e = \frac{1}{m-1}\left(p_2 \text{ v}_2 - p_1 \text{ v}_1\right)$$

Επειδή όμως $P_2V_2 = RT_2$ και P_1V_1 m RT1 θα έχουμε:

$$-W_e = \frac{R}{m-1}\left(T_2 - T_1\right)$$

$$-W_e = \frac{287}{0,3}\left(413 - 300\right) = 108.000 \text{ J/kg}$$

Η θερμότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = -W_e \cdot \frac{m-k}{k-1}$$

$$Q = -108 \times \frac{1,3 - 1,4}{0,4} = 27 \text{ KJ/Kg}$$

Οι πολυτροπικές αλλαγές παριστάνουν ακριβέστερα την πραγματική λειτουργία των θερμικών μηχανών, κατά την οποία, για πολλούς λόγους, δεν επιτυγχάνεται τελείως καμμία από τις προηγούμενες, τις οποίες ήδη αναπτύξαμε.

6.7 ΟΙ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ (P – v)

Οι νόμοι των θερμοδυναμικών μεταβολών, όπως γνωρίζουμε, στη γενική τους μορφή **εκφράζονται** με τη σχέση:

$$p \cdot v^m = \text{σταθ}$$

Εάν μεταβάλλουμε το m από το μηδέν έως άπειρο έχουμε:

- **$m = 0$, $V^{\circ} = 1$, $p = \text{σταθ}$**
Ισοβαρής μεταβολή

- **$m = 1$, $p \cdot v = \text{σταθ.}$**
Ισόθερμη μεταβολή

- **$m = k$, $p \cdot v^k = \text{σταθ.}$**
Αδιαβατική μεταβολή

- **$m = \infty$, $v = \text{σταθ}$**
Ισόχωρη μεταβολή

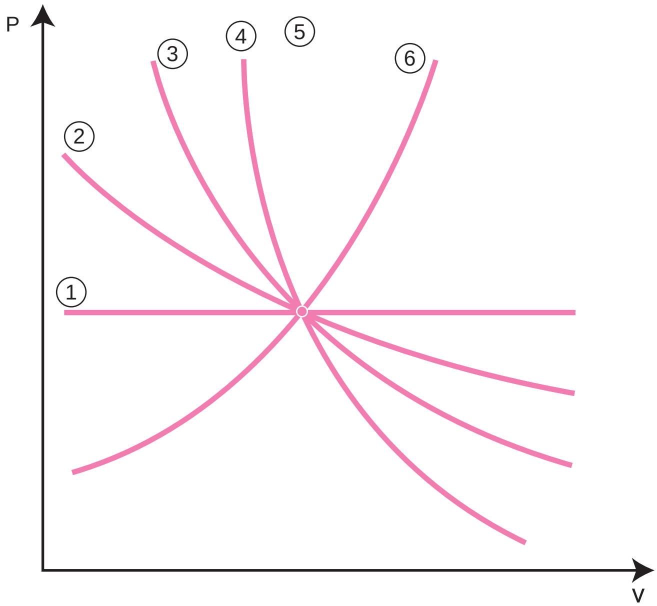
$$pv^m = k = \text{σταθ.}$$
$$\sqrt[m]{pv^m} = \sqrt[m]{K} = \text{σταθ.}$$
$$p^{1/m}\ v = \kappa^{1/m} = \text{σταθ.}$$
$$\text{για } m = \infty,\quad v = \text{σταθ.}$$

- **$m = m$, $pV^m = \text{σταθ}$**
Πολυτροπική μεταβολή

Απεικονίζουμε τις παραπάνω μεταβολές στο **διάγραμμα (P – v)**. Θεωρούμε επίσης τις πολυτροπικές με $m < 1$ και $m < 0$. (σχ. 6.7α)

- Όλες οι πολυτροπικές μεταβολές με εκθέτη θετικό έχουν κλίση αρνητική.
- Οι πολυτροπικές με εκθέτη αρνητικό έχουν κλίση θετική.
- Οι πολυτροπικές με εκθέτη μικρότερο της μονάδας βρίσκονται μεταξύ της οσοβαρούς ($m = 0$) και της ισόθερμης ($m = 1$).

- Οι πολυτροπικές με εκθέτη μεγαλύτερο της μονάδας, και μεταξύ αυτών και η αδιαβατική, βρίσκονται μεταξύ της ισόθερμης (m = 1) και της ισόχωρης (m = ∞).



Σχήμα 6.7α *Θερμοδυναμικές μεταβολές στο διάγραμμα (P – v)*

1. *p = σταθ m = 0*
2. *πολυτροπική m < 1*
3. *T= σταθ. m = 1*
4. *Αδιαβατική m = k> 1*
5. *v = σταθ. m = ∞*
6. *Πολυτροπική m <0*

Παρατηρούμε ότι:

Παρατήρηση

Όσα αναφέραμε παραπάνω αποδεικνύονται με ανώτερα μαθηματικά ως εξής:

Από τη σχέση $p \cdot V^m$ = σταθ. έχουμε:

$$mpdv + vdp = 0$$

$$\frac{dp}{dv} = -m\frac{p}{v}$$

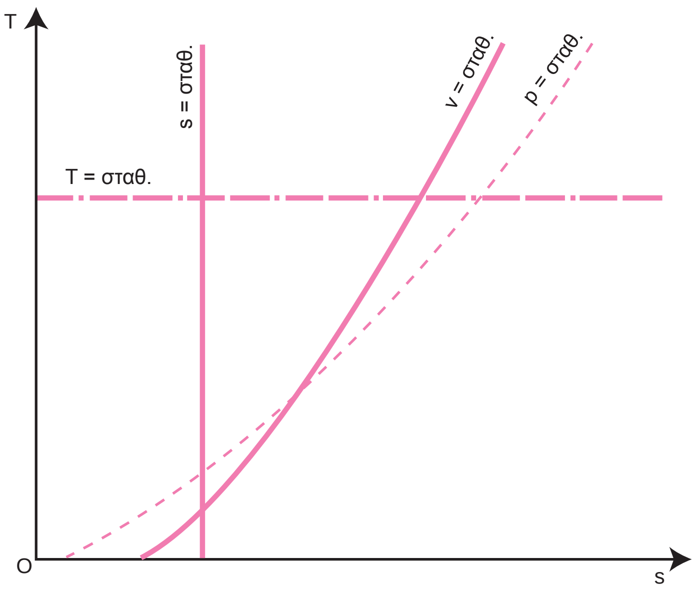
Το κλάσμα $\frac{dp}{dv}$ στο πρώτο μέλος είναι η κλίση της καμπύλης στο διάγραμμα (P – v) και, επειδή p, v είναι ποσότητες θετικές, εάν m είναι θετικό, τότε το δεύτερο μέλος είναι αρνητικό και αντίστροφα.

6.8 ΟΙ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ (T - s)

Εάν λάβουμε ως παραμέτρους την εντροπία και τη θερμοκρασία, μπορούμε να απεικονίσουμε τη θερμοδυναμική κατάσταση του συστήματος στο διάγραμμα (T – s).

Την εντροπία, την οποία εκφράζουμε σε J/kg K, τοποθετούμε στις τετμημένες, ενώ τη θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν, τοποθετούμε στις τε ταγμένες.

Οι θερμοδυναμικές μεταβολές απεικονίζονται στο διάγραμμα (T – s), όπως φαίνονται στο σχήμα 4.8α.



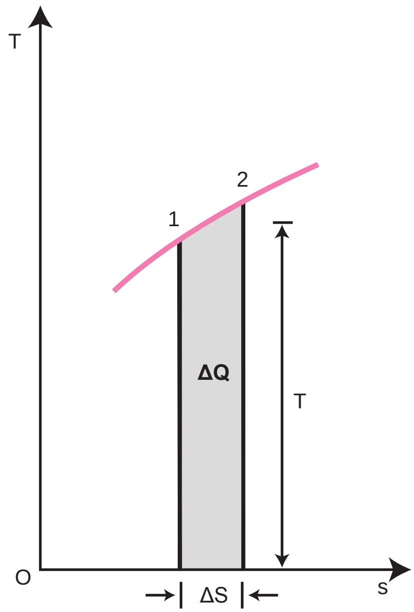
Σχήμα 4.8α Θερμοδυναμικές μεταβολές στο διάγραμμα (T–s)

Στο διάγραμμα (T – s) οι ισόθερμες είναι παράλληλες στον άξονα της εντροπίας και οι αδιαβατικές (ισοεντροπικές) είναι παράλληλες στον άξονα της θερμοκρασίας.

Οι ισοβαρείς είναι καμπύλες με θετική κλίση και οι ισόχωρες είναι και αυτές με θετική κλίση, αλλά με μεγαλύτερη από εκείνη που έχουν οι ισοβαρείς.

Στο διάγραμμα (T — s), το εμβαδόν της επιφάνειας, που προσδιορίζεται από την καμπύλη της μεταβολής, τις ακραίες τεταγμένες της μεταβολής και τον άξονα της εντροπίας, απεικονίζει τη θερμότητα που εναλλάσσει το σύστημα με το περιβάλλον του κατά τη διάρκεια της μεταβολής.

Πράγματι, θεωρούμε ένα στοιχειώδες τμήμα της μεταβολής (σχ. 4.8β) και εφαρμόζουμε το ίδιο σκεπτικό που κάναμε για το στοιχειώδες έργο $\Delta W_e = p - \Delta v$, προκειμένου να το απεικονίσουμε στο διάγραμμα (P – v). Το στοιχειώδες εμβαδόν κάτω από την καμπύλη με βάση Δs και ύψος T είναι $\Delta Q = T\Delta S$ και απεικονίζει τη στοιχειώδη θερμότητα που το σύστημα εναλλάσσει με το περιβάλλον του, κατά τη διάρκεια της στοιχειώδους μεταβολής που υφίσταται. Η θερμότητα που το σύστημα εναλλάσσει με το περιβάλλον του, δίνεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της μεταβολής.



Σχήμα 6.8β *Διάγραμμα (T–s)*

6.9 ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ ΚΑΙ ΜΗ ΑΝΤΙΣΤΡΕΠΤΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ

Θεωρούμε ένα σύστημα σε μία ορισμένη φυσική κατάσταση που χαρακτηρίζεται από τις τιμές των παραμέτρων P, v, T και αναζητούμε ποιες είναι οι αναγκαίες συνθήκες, έτσι ώστε στο σύστημα να μπορεί να εξελίσσεται αδιάφορα μια μεταβολή π.χ. μια συμπίεση ή μια εκτόνωση.

Για να συμβαίνει αυτό είναι αναγκαίες τρεις συνθήκες:

1. Να υπάρχει ισορροπία, στιγμή προς στιγμή, μεταξύ της πίεσης P του συστήματος και της πίεσης P΄ του περιβάλλοντος του.

Πράγματι, εάν η πίεση ρ ήταν διαφορετική από την P΄, το σύστημα θα έτεινε να υποστεί μια μεταβολή προς την κατεύθυνση εκείνη, έτσι ώστε να μηδενίσει τη διαφορά P – P΄.

2. Να υπάρχει ισορροπία, στιγμή προς στιγμή, μεταξύ της θερμοκρασίας T του συστήματος και της θερμοκρασίας T΄ του περιβάλλοντος του. Εάν υπήρχε διαφορά θερμοκρασίας T – T΄, το σύστημα θα έτεινε να υπο1στεί μια μεταβολή προς την κατεύθυνση εκείνη, έτσι ώστε να μηδενίσει τη διαφορά T – T΄.

3. Να μην υπάρχουν τριβές μεταξύ των σωματιδίων του ρευστού αλλά ούτε και μεταξύ των σωματιδίων του ρευστού και του ορίου του. Εάν υπήρχαν, οι τριβές αυτές θα μπορούσαν να εξουδετερωθούν μόνο ενεργώντας προς μία ορισμένη κατεύθυνση.

Εάν οι τρεις αυτές συνθήκες συνυπάρχουν στιγμή προς στιγμή η μεταβολή ονομάζεται **αντιστρεπτή** και μπορεί να εξελιχθεί αδιάφορα και στις δύο κατευθύνσεις. Π.χ. Σε μία μεταβολή που εξελίσσεται από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2, αρκεί να αλλάξουμε τα πρόσημα των εναλλαγών ενέργειας, για να εξελιχθεί από την κατάσταση 2 στην κατάσταση 1, χωρίς να αλλάξουμε τον τρόπο που πραγματοποιείται.

Επομένως μια αντιστρεπτή μεταβολή είναι μια ακολουθία απείρων στιγμιαίων καταστάσεων ισορροπίας. Τέτοιου είδους μεταβολές εμείς εξετάζουμε σ' αυτό το κεφάλαιο.

Στην πραγματικότητα οι τρεις αυτές συνθήκες δεν συνυπάρχουν ποτέ και κυρίως δεν είναι ποτέ απούσα η τριβή.

Οι πραγματικές μεταβολές ονομάζονται **μη αντιστρεπτές** και δεν μπορούν να εξελιχθούν αδιάφορα προς τις δύο κατευθύνσεις. Οι κυριότερες αιτίες που κάνουν τις μεταβολές να είναι μη αντιστρεπτές είναι οι τριβές.

Επομένως, οι αντιστρεπτές μεταβολές είναι θεωρητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να διευκολύνουν την επίλυση θερμοδυναμικών προβλημάτων.

➟ Παρατήρηση 1

Σε μια αδιαβατική αντιστρεπτή μεταβολή, όπως γνωρίζουμε, δεν υπάρχει εναλλαγή θερμότητας του συστήματος με το περιβάλλον του. Επομένως, δεν υπάρχει και μεταβολή της εντροπίας του συστήματος. Η τελική εντροπία του συστήματος είναι ίση μετ την αρχική. Στο διάγραμμα (T – s) απεικονίζεται με ένα ευθύγραμμο τμήμα παράλληλο στον άξονα της θερμοκρασίας. **Η αδιαβατική αντιστρεπτή είναι ισοεντροπική.**

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 6ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- **Ισόθερμη** ονομάζεται η μεταβολή, κατά τη διάρκεια της οποίας η θερμοκρασία του συστήματος παραμένει σταθερή.

  Η **εξίσωση της ισόθερμης** μεταβολής εκφράζεται με τη σχέση:

  $$p - v = \textbf{σταθ.}$$

- **Ισόχωρη** ονομάζεται η μεταβολή, κατά τη διάρκεια της οποίας ο ειδικός όγκος, επομένως, και ο γεωμετρικός όγκος του συστήματος παραμένει σταθερός.

  Η **εξίσωση της ισόχωρης** μεταβολής εκφράζεται με τη σχέση:

  $$v = \textbf{σταθ.}$$

- **Ισοβαρής** ονομάζεται η μεταβολή, κατά τη διάρκεια της οποίας η πίεση παραμένει σταθερή.

  Η **εξίσωση της ισοβαρούς** μεταβολής εκφράζεται με τη σχέση:

  $$p = \textbf{σταθ.}$$

- **Αδιαβατική** ονομάζεται η μεταβολή, κατά τη διάρκεια της οποίας δεν υπάρχει εναλλαγή θερμότητας του συστήματος με το περιβάλλον του.

  Η **εξίσωση της αδιαβατικής** μεταβολής εκφράζεται με τη σχέση:

  $$p \,.\, v^{k} = \textbf{σταθ.}$$

- **Πολυτροπική** ονομάζεται η μεταβολή του συστήματος που καθορίζεται από τη σχέση:

  $$p \,.\, v^{m} = \textbf{σταθ.}$$

- Στο **διάγραμμα (P – v) η ισόθερμη** απεικονίζεται με το ένα σκέλος μιας ισοσκελούς υπερβολής, **η ισόχωρη** με ένα ευθύγραμμο τμήμα παράλληλο στον άξονα P, **η ισοβαρής** με ένα ευθύγραμμο τμήμα παράλληλο στον άξονα P, η ισοβαρής με ένα ευθύγραμμο τμήμα παράλληλο στον άξονα v, η αδιαβατική και πολυτροπική με μία καμπύλη στον άξονα v, η αδιαβατική και πολυτροπική με μία καμπύλη.
- Στο **διάγραμμα (T – s)** οι ισόθερμες είναι παράλληλες στον άξονα s και οι αδιαβατικές (ισοεντροπικές) παράλληλες στον άξονα T. Οι ισοβαρείς είναι καμπύλες με θετική κλίση και οι ισόχωρες είναι και αυτές με θετική κλίση αλλά με μεγαλύτερη από εκείνη που έχουν οι ισοβαρείς.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

1. Σε μία διάταξη κυλίνδρου-εμβόλου ο αρχικός όγκος του συστήματος είναι ίσος με 0,01 m και ο τελικός 0,05 m3. Αν η αρχική πίεση είναι ίση με 180 kPa και δοθεί θερμότητα στο σύστημα υπό σταθερή θερμοκρασία, να προσδιορίσετε:

   α) Το έργο που πραγματοποιήθηκε από το σύστημα και

   β) Τη θερμότητα που δόθηκε σ’ αυτό.

   (*Απάντηση:* 2,85 kJ, 2,89 kJ).

2. Σε μια διάταξη κυλίνδρου-εμβόλου του οποίου το έμβολο έχει συγκολληθεί περιφερειακά περιέχεται αέρας υπό πίεση 340 kPa και θερμο1κρασία 10˚C. Αν δοθεί θερμότητα στον αέρα μέχρι να φθάσει η θερμοκρα1σία του στους 270 ˚C, να προσδιορίσετε την ποσότητα αυτή της θερμότη1τας. Δίνονται ακόμη: όγκος αέρα = 0,8 m^3, και για τον αέρα Cv = 0,7176 kJ/kg · K, R = 0,287 kJ/kg · K.

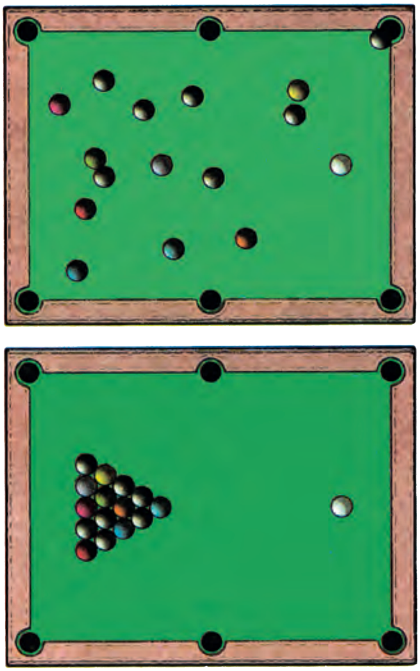
   (*Απάντηση:* 625 kJ)

3. Ένα αέριο βρίσκεται υπό πίεση 120 kPa και έχει όγκο ίσο με 0,12 m^3. Να προσδιορίσετε τον όγκο του, αν το αέριο συμπιεστεί αδιαβατικά (k = 1,4) και η πίεσή του γίνει ίση με 400 kPa.

   (*Απάντηση:* 0,05 m^3)

4. Αέριο αρχικού όγκου 0,012 m^3, και θερμοκρασίας 270 ˚C εκτονώνεται πολυτροπικά (m = 1,35) μέχρι ο όγκος του να γίνει ίσος με 0,08 m^3. Να προσδιορίσετε την τελική θερμοκρασία.

(*Απάντηση:* 279,5 K).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ο ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

7.1 Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής

7.2 Υπολογισμός της εντροπίας

7.3 Σύγκριση των $Q_{αντ}$ και $Q_{μη\ αντ}$

7.4 Παραδείγματα υπολογισμού της εντροπίας στις πρακτικές εφαρμογές

7.5 Παραδείγματα υπολογισμού της εντροπίας για ειδικά βιομηχανικά ρευστά

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να **διατυπώνετε** το δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής στις διάφορες μορφές του.

- Να **γνωρίζετε** τις σχέσεις που εκφράζουν τη μεταβολή της εντροπίας του συστήματος, του περιβάλλοντος χώρου του και τη συνολική εντροπία ((σύστημα και περιβάλλον).

- Να **γνωρίζετε** τις σχέσεις που επιτρέπουν τον υπολογισμό της μεταβολής της εντροπίας και να λύνετε προβλήματα.

7.1. Ο ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Από την **καθημερινή εμπειρία** είναι γνωστό ότι όλα τα **γεγονότα** ή τα **φαινόμενα** μεταβάλλονται, εξελίσσονται και μάλιστα προς μία κατεύθυνση φορά στο χρόνο.
Για την καλύτερη κατανόηση αυτής της πραγματικότητας δίνονται τα πιο κάτω παραδείγματα.

- Όταν **αναμείξουμε γάλα** και **καφέ** (ουσίες και οι δυο σε υγρή κατά1-σταση), παρατηρούμε ότι αυτές οι ουσίες δεν μπορούν να επανέλ θουν στην αρχική τους φυσική κατάσταση από μόνες τους.

- Όταν ένα βιβλίο **πέσει** στο **πάτωμα** από το θρανίο δεν μπορεί αυτό να ανέβει στην αρχική του θέση, δηλ. στο θρανίο από μόνο του. Αυτό μπορεί να γίνει, αφού ξοδευτεί ενέργεια, για να μεταφερθεί πάνω στο θρανίο.

- Όταν μια ποσότητα από **μαγειρικό αλάτι διαλυθεί** σε **νερό**, τότε, ως γνωστόν, δημιουργείται ένα υγρό διάλυμα.
  Παρατηρείται πως αυτά από μόνα τους δεν μπορούν να **διαχωριστούν** και να επανέλθουν στην αρχική τους φυσική κατάσταση. Αυτό μπορεί να γίνει, αφού εξατμιστεί το νερό, δηλαδή αφού ξοδευτεί θερμική ενέργεια.

- Στην περίπτωση ανάμειξης **νικελίου** και **σιδήρου**, ως γνωστόν, σχηματίζονται τα νικελιούχα κράμματα του σιδήρου (χάλυβες νικελίου).

Είναι προφανές ότι αυτά δεν μπορούν να διαχωριστούν από μόνα τους, παρά μόνο με την προσφορά ενέργειας. (τήξη και στη συνέχεια διαχωρισμός).

- Ακόμη είναι γνωστό ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει σε κατ' όγκο αναλογία 21% οξυγόνο (O_2) και 79% άζωτο (N), 1% ευγενή αέρια και άλλες ουσίες. Για να **διαχωριστούν** τα αέρια αυτά από μόνα τους, θα πρέπει να καταναλωθεί ενέργεια (παραγωγή οξυγόνου). Από τα παραπάνω παραδείγματα προκύπτει με σαφήνεια ότι τα γεγονότα ή τα φαινόμενα συμβαίνουν προς μια κατεύθυνση, φορά κατά την οποία εξελίσσονται (αλλάζουν) στο χρόνο από μόνα τους. Τα φαινόμενα αυτά χαρακτηρίζονται ως μη **"αναστρέψιμα"**, αφού από μόνα τους δεν μπορούν να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση.

Η **μηχανολογική επιστήμη**, μεταξύ των άλλων, στοχεύει να ερμηνεύσει τα γεγονότα που συμβαίνουν γύρω μας, μέσω της Θερμοδυναμικής, διατυπώνοντας ένα γενικότερο φυσικό νόμο, που να εξηγεί με σαφήνεια αυτά τα **μονόδρομα φαινόμενα** και **γεγονότα**, που συμβαίνουν γύρω μας.

Ο νόμος αυτός διατυπώνει τη δεύτερη αρχή της Θερμοδυναμικής και φέρει το όνομα «**Δεύτερος Θεμοδυναμικός νόμος**» ή νόμος της «**εξέλιξης**».

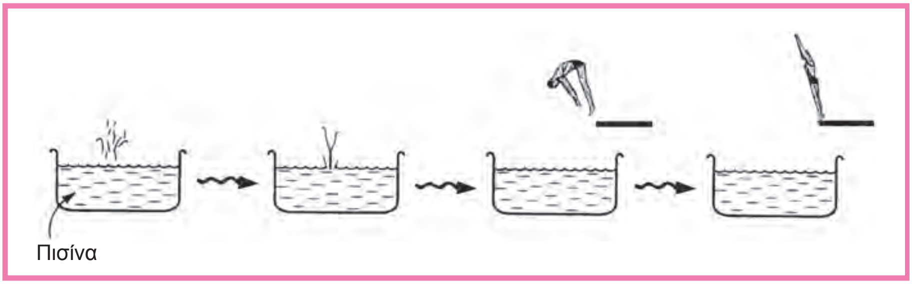
Ο νόμος αυτός έχει εφαρμογές και σε πολλές άλλες επιστήμες, όπως στην αστροφυσική, στην οικονομία, στην πληροφορία. Ετσι, ο νόμος αυτός μπορεί να διατυπωθεί με διάφορους τρόπους.

Παρακάτω δίνονται μερικές διατυπώσεις του νόμου:

1. Πρώτη γενική μορφή διατύπωσης του νόμου:

Τα γεγονότα ή φαινόμενα εξελίσσονται στο χρόνο προς μια κατεύθυνση, συγκεκριμένα γεγονότα γίνονται με κάποια σειρά στο χρόνο. Π.χ. όταν παρακολουθούμε μια ταινία στην τηλεόραση, στην πραγματικότητα παρακολουθούμε μια συγκεκριμένη διαδοχή γεγονότων (εικόνα) σε συνάρτηση με το χρόνο. Όταν παρακολουθούμε την ίδια ταινία σε ένα βίντεο, τότε είναι δυνατόν ή να σταθεροποιήσουμε την εικόνα, για να τη μελετήσουμε ή ακόμα μπορούμε να τη γυρίσουμε ανάποδα, για να δοθεί η δυνατότητα μελέτης προηγούμενων εικόνων (σχήμα 7.1.α). Μπορούμε δηλ. να έχουμε μια πλήρη γνώση του γεγονότος σε κάθε χρονική στιγμή.

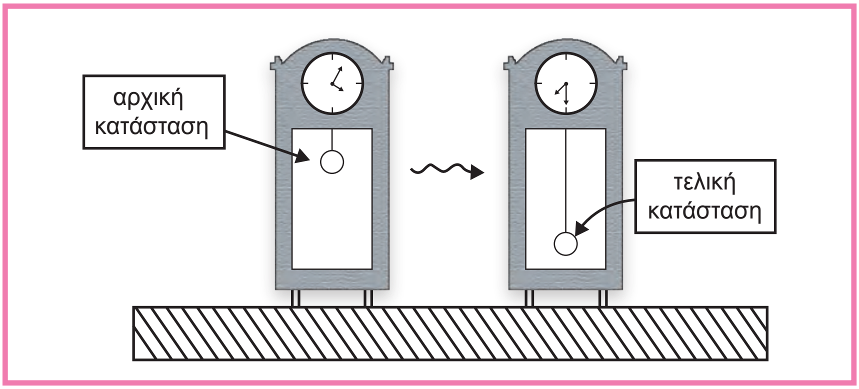
Είναι προφανές ότι, γνωρίζοντας σε κάθε χρονική στιγμή την εξέλιξη του συστήματος, γνωρίζουμε και το τελικό αποτέλεσμα.



Σχήμα 7.1 .α *Σχηματική παράσταση του δεύτερου νόμου στην πρώτη γενική του μορφή*

2. Δεύτερη γενική μορφή διατύπωσης του νόμου:

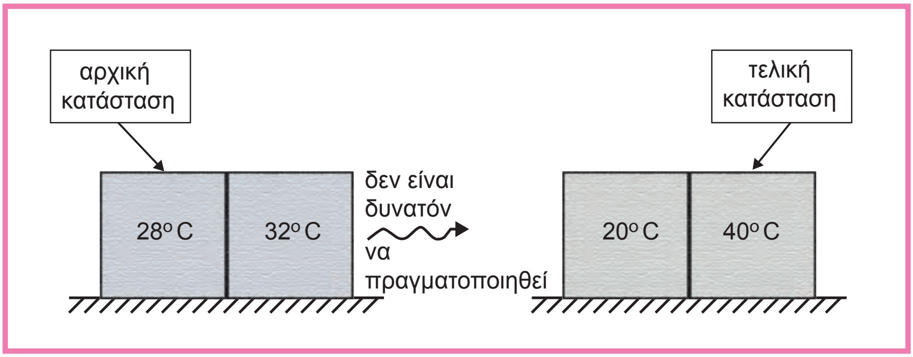
Κάθε σύστημα, όταν αφεθεί μόνο του (απομονωθεί), αλλάζει γρήγορα ή αργά και τελικά καταλήγει σε μια κατάσταση ισορροπίας. Με άλλα λό1-για, σε ένα απομονωμένο σύστημα τα γεγονότα ή τα φαινόμενα έχουν μια φορά εξέλιξης (σχήμα 7.1 .β.)



7.1.β *Σχηματική παράσταση του 2ου νόμου στη δεύτερη γενική του μορφή.*

3. Με όρους ροής θερμικής ενέργειας

Στη φύση δεν είναι δυνατόν να εξελιχθεί μια μεταβολή, της οποίας τα αποτελέσματα είναι η ροή θερμότητας από ένα σώμα με χαμηλή θερμο1κρασία σε ένα σώμα με υψηλή θερμοκρασία (σχ. 7.1 ,γ.)



7.1 .γ. *Σχηματική παράσταση του δεύτερου νόμου με όρους θερμικής ενέργειας.*

4. Με όρους θερμότητας και έργου

Η ενέργεια, εκτός του ότι διατηρείται, υπακούει και σε ένα φυσικό νόμο, που καθορίζει προς ποία κατεύθυνση η ίδια ενέργεια μετασχηματίζεται. Η ενέργεια μπορεί να μετασχηματιστεί στην πράξη σε ενέργεια της αυτής ποιότητας ή σε ενέργεια κατώτερης ποιότητας.

Η πείρα δείχνει ότι μπορεί να υποστηριχθεί γενικά ότι, κάθε φορά που η ενέργεια μετασχηματίζεται από έναν τύπο σε ένα άλλο τύπο ενέργειας, υπάρχει πάντοτε ένα μέρος αυτής, που μετασχηματίζεται σε ενέργεια κατώτερης ποιότητας.

Μπορεί για παράδειγμα, η θερμική ενέργεια να μετατραπεί σε μηχανικό έργο, όμως ένα μέρος αυτής της αρχικής θερμικής ενέργειας θα μετατραπεί σε ενέργεια κατώτερης στάθμης.

Μια ενέργεια διακρίνεται σε υψηλή ποιότητα και σε κατώτερη ποιότητα. Όσον αφορά την πρώτη, αυτή μπορεί να μετασχηματισθεί ολικά σε ενέργεια της αυτής ή κατώτερης στάθμης, ενώ, όσον αφορά τη δεύτερη, αυτή δεν μπορεί ολικά να μετατραπεί σε ενέργεια ανώτερης στάθμης.

5. Με όρους ποσοτικών μεγεθών:

Ενα σύστημα, όταν αφεθεί μόνο του μετακινείται:

- **Από μια κατάσταση αταξίας, σε μια κατάσταση μεγαλύτερης αταξίας.**
- **Από μια κατάσταση μικρότερης πιθανότητας να συμβεί ένα γεγονός, σε μια κατάσταση μεγαλύτερης πιθανότητας να συμβεί αυτό.**
- **Από μια κατάσταση αναγνώρισης ενός γεγονότος, σε μια λιγότερο αναγνωρίσιμη αυτού του γεγονότος.**
- **Από μια κατάσταση με πολλές πληροφορίες, σε μια κατάσταση με λιγότερες πληροφορίες.**

- **Από μια κατάσταση ωφέλιμης ενέργειας, σε μια κατάσταση λιγότερο ωφέλιμης ενέργειας.**

Οι παραπάνω παρατηρήσεις που αφορούν μεταβολές, μας δίνουν μια ποσοτική μέτρηση του γεγονότος στο χρόνο. Απλά υπολογίζουν το μέγεθος της αταξίας, της πιθανότητας, της πληροφορίας. Αυτές οι παρατηρήσεις είναι χρήσιμες σε διάφορα πεδία επιστημών, όπως στη θεωρία της πληροφορίας, στη στατιστική μηχανική, στη στατιστική θερμοδυναμική.

Ο νόμος μετασχηματισμού της ενέργειας που ονομάστηκε δεύτερη αρχή της θερμοδυναμικής, έδωσε τη δυνατότητα να εισαχθεί ένα νέο θερμο δυναμικό μέγεθος, που ονομάζεται **εντροπία** και συμβολίζεται με το γράμμα S. Αυτό το μέγεθος μας δίνει τη δυνατότητα να καθορίσουμε τι μπορεί να πραγματοποιηθεί και τι όχι, στο χώρο που μας περιβάλλει.

Μας δίνει πληροφορίες, για την κατεύθυνση και τον τρόπο που μπορεί να εξελιχθεί ένα φαινόμενο στο χώρο, σε συνάρτηση με το χρόνο, ποια ήταν η κατάστασή του πριν από κάποια χρονική στιγμή και ποια μετά. Μπορεί να δείξει εάν μια μεταβολή μπορεί να πραγματοποιηθεί ή δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. «Η σπουδαιότητα που έχει για τη Μηχανολογική τέχνη το Θερμοδυναμικό αυτό μέγεθος, μας υποχρεώνει να δώσουμε ένα, όσο το δυνατό, απλούστερο ορισμό του».

Για ένα συγκεκριμένο σύστημα ισχύει η πιο κάτω σχέση:

$$\Delta S_{συστ} \geq 0 \qquad (7.1.α.)$$

Αυτό σημαίνει ότι η μεταβολή της εντροπίας του συστήματος είναι πάντοτε θετική ή ίση με το μηδέν.

Όπως αναφέρθηκε, όταν ένα σύστημα περιβάλλεται από το γύρω χώρο του (περιβάλλον), τότε σ' αυτήν την περίπτωση ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\Delta S_{συστ} + \Delta S_{περ} \geq 0 \qquad (7.1.β.)$$

που σημαίνει ότι το άθροισμα της μεταβολής της εντροπίας του συστήματος και του περιβάλλοντος χώρου του μπορούν να αυξάνονται ή να μειώνονται αλλά το άθροισμά τους δεν μπορεί να μειωθεί. Από τα πιο πάνω προκύπτει ότι η ολική εντροπία ενός συγκεκριμένου συστήματος είναι πάντοτε θετική.

$$\Delta S_{ολ} \geq 0 \qquad (7.1.γ)$$

Η εντροπία είναι **καταστατικό** μέγεθος του συστήματος, όπως η εσω1τερική ενέργεια U και, όπως η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ΔU εξαρτάται από την αρχική και τελική κατάσταση που βρίσκεται το αέριο ρευστό έτσι και η μεταβολή της εντροπίας εξαρτάται από την αρχική και τελική θερμική κατάσταση.

7.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ

Η **εντροπία** ορίζεται από τη σχέση:

$$\boxed{\Delta S \geq \frac{\Delta Q}{\Delta T}} \tag{7.2.α}$$

Για τον **υπολογισμό** της σ' ένα σύστημα που βρίσκεται στην κατάσταση 1 και καταλήγει στην κατάσταση 2, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\boxed{\Delta S = \Sigma_1^2 \frac{\Delta Q}{T}} \tag{7.2.β}$$

Όπου **ΔQ**:είναι το ποσόν της θερμότητας που λαμβάνει χώρα κατά τη θερμοδυναμική μεταβολή.

T: είναι η τιμή της θερμοκρασίας που πραγματοποιείται η θερμοδυ1ναμική μεταβολή.

$\boldsymbol{\Sigma_1^2}$: είναι το άθροισμα από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 των στοιχειωδών

$$\frac{\Delta Q}{T}$$

για τη θερμοδυναμική μεταβολή. Η προηγούμενη σχέση που, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεταβολής της εντροπίας AS, ισχύει μόνο για τις περιπτώσεις των αντιστρεπτικών **θερμοδυναμικών μεταβολών**.

Για παράδειγμα, για μια ισόθερμη αντιστρεπτική μεταβολή θα ισχύει:

$$\boxed{Q = T_{συστ} \cdot \Delta S} \tag{7.2.g}$$

Για τον υπολογισμό της μεταβολής της εντροπίας ΔS ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία.

- Προσδιορίζεται ξεκάθαρα η αρχική και η τελική κατάσταση του συστήματος και υπολογίζεται το πραγματικό ποσό θερμότητας, που εισέρχεται ή αφαιρείται από το σύστημα $Q_{πραγ.}$
- Στην περίπτωση που δεν υπάρχει μηχανική αιτία, που να προκαλεί μεταβολή της δυναμικής ενέργειας $ΔE_g$, της κινητικής ενέργειας $ΔE_c$, εκτόνωση ή συμπίεση, φαινόμενα τριβής ή άλλη μορφή έργου, τότε $Q = Q_{πραγ}$. και αντικαθιστώντας στη σχέση

$$ΔS = Σ_1^2 = \frac{ΔQ}{T}$$

υπολογίζεται η AS. (υπενθυμίζεται ότι η σχέση αυτή ισχύει μόνο για αντιστρεπτές μεταβολές).

- Εάν στις μεταβολές της μηχανικής ενέργειας περιλαμβάνεται και το φαινόμενο της τριβής, τότε σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να θεωρήσουμε μια ισοδύναμη αντιστρεπτή διαδρομή, που να συμπεριλαμβάνει τις αλλαγές της μηχανικής ενέργειας που έχουν συμβεί.

Για τον υπολογισμό της μεταβολής ΔS θα εφαρμόσουμε την ίδια σχέση, αφού είναι γνωστό το ισοδύναμο Q της αντιστρεπτής μεταβολής. Ακριβώς η ίδια διαδικασία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της $ΔS_{περ}$.

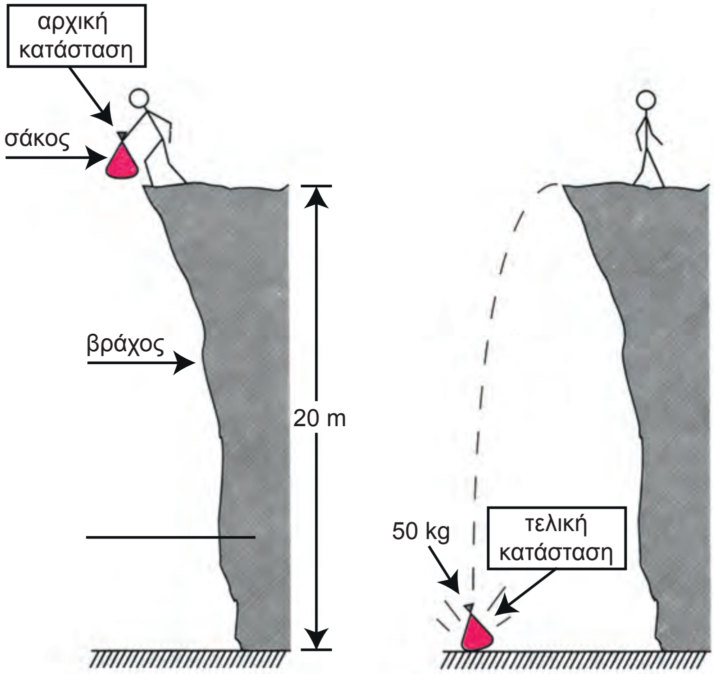
7.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ $Q_{αντ.}$ ΚΑΙ $Q_{μη\ αντ}$

Η διάκριση μεταξύ αυτών των ποσών θερμότητας είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί, παρόλο που θεωρείται πολύ σπουδαίο για την τέχνη του Μηχανολόγου η κατανόηση της διαφοράς για την επίλυση των προβλημάτων. Για το λόγο αυτό γίνεται προσπάθεια, με την παρουσίαση του πιο κάτω παραδείγματος, που έχει σα στόχο την κατανόηση αυτής της διαφοράς.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Θεωρούμε ένα σάκο που περιέχει άμμο μάζης 50 kg. Αυτός βρίσκεται σε ύψος 20 m από το έδαφος.

Θεωρούμε ότι ο σάκκος, που αποτελεί και το σύστημα μελέτης, είναι πολύ καλά μονωμένος θερμικά. Αφήνεται να πέσει προς τα κάτω, όπως στο σχήμα (7.3.α) και ζητείται να υπολογιστεί η μεταβολή ΔS της εντροπίας του συστήματος.



Σχήμα 7.3.α *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος*

Είναι προφανές ότι η πτώση του σάκου είναι ένα φαινόμενο μη αντιστρεπτό. Όμως για την εφαρμογή του τύπου που υπολογίζει τη ΔS, η μεταβολή της ΔQ (αν υπάρχει) θα πρέπει να προκύπτει από μια αντιστρεπτή μεταβολή του συστήματος. Για το λόγο αυτό είμαστε υποχρεωμένοι να θεωρήσουμε μια αντιστρεπτή ισοδύναμη μεταβολή με εκείνη που συμβαίνει στην πραγματικότητα. Πράγματι, προσφέροντας στο σύστημα θερμική ενέργεια ίση με εκείνη που παρήχθη 9.810 J* κατά την πτώση του, μπορούμε να θεωρήσουμε την ισοδύναμη μεταβολή του συστήματος.

* *Υπενθυμίζεται ότι:* $E_g = mgh = 9.810\ J$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Ενα σακί με άμμο μάζης 50 kg πέφτει από ύψος 20 m στο έδαφος κατά τη διάρκεια οικοδομικών εργασιών.

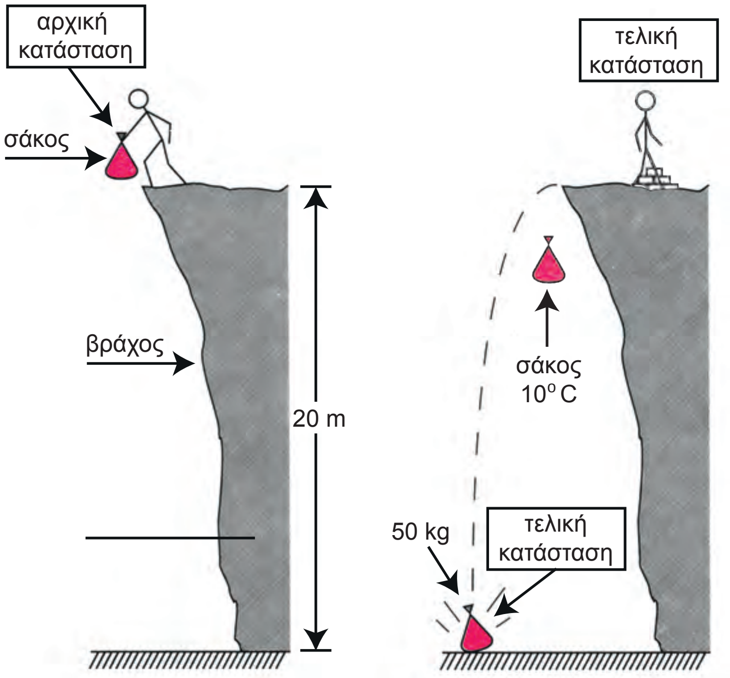
Να υπολογισθεί:

α) Η μεταβολή της εντροπίας ΔS του σακιού της άμμου.

β) Η μεταβολή της εντροπίας ΔS του περιβάλλοντος χώρου από το σακί

γ) Η ολική μεταβολή της εντροπίας ΔS που συνέβη γι’ αυτό το γεγονός.

Δίνεται ότι η θερμοκρασία του σακιού στην αρχή και στο τέλος της πτώσης είναι 10° C (σχήμα 7.3.β)



Σχήμα 7.3.β *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος*

Λύση

Για τη λύση του προβλήματος αυτού θεωρούμε το σακί με την άμμο ως το σύστημα του προβλήματος και τον γύρω από αυτό χώρο ως το περιβάλλον του συστήματος.

Παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια της πτώσης του σακιού θα θεωρηθεί ότι η αντίσταση του αέρα που συναντά αυτό, θα είναι αμελητέα.

Επίσης, η θερμότητα που παρήχθη, τη στιγμή κατά την οποία το σακί κτύπησε στο έδαφος, λόγω του φαινομένου της τριβής, θα θεωρηθεί ότι μεταφέθηκε στον περιβάλλοντα χώρο του συστήματος, καθώς η θερμοκρασία που βρέθηκε το σακί μετά την κρούση, είναι εκείνη η αρχική των 10° C. Για να υπολογίσουμε τη μεταβολή της εντροπίας ΔS για κάθε περίπτωση, θα ακολουθήσουμε τη διαδικασία που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Θεωρείται αρχική κατάσταση 1 το σακί 20 m πάνω από το έδαφος με θερμοκρασία 10° C.

α) Για το **σύστημα "σακί άμμου"** μπορεί να γραφτεί η αρχή διατήρησης της ενέργειας, «ο πρώτος Θερμοδυναμικός νόμος»:

$$Q = \underbrace{\Delta U_0 + W_e + \Delta E_c + \Delta E_{cf}}_{0} + \Delta E_g$$

Από τη σχέση αυτή παρατηρούμε ότι:

• Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ΔU_0 του συστήματος είναι ίση με μηδέν, αφού η τελική και αρχική θερμοκρασία του συστήματος είναι ίδια ($\Delta U_0 = Q \cdot \Delta T$, $\Delta T = 0$ και $\Delta U_0 = 0$).

• Η μεταβολή της κινητικής ενέργειας ΔE_c του συστήματος είναι ίση με το μηδέν, αφού η ταχύτητα του συστήματος στην αρχική θέση είναι μηδενική, όπως και στην τελική.

• Το έργο είναι ίσο με το μηδέν, γιατί το σύστημα δεν παρήγαγε έργο θεωρώντας ότι η εξωτερική επιφάνεια δεν παραμορφώθηκε.

Συνεπώς, από την πιο πάνω σχέση έχουμε:

$$Q = \Delta E_c$$

είναι όμως: $\Delta E_g = E_2 - E_1 = mgh_2 - mgh_1 = 0 - mgh_1 = -mgh_1$

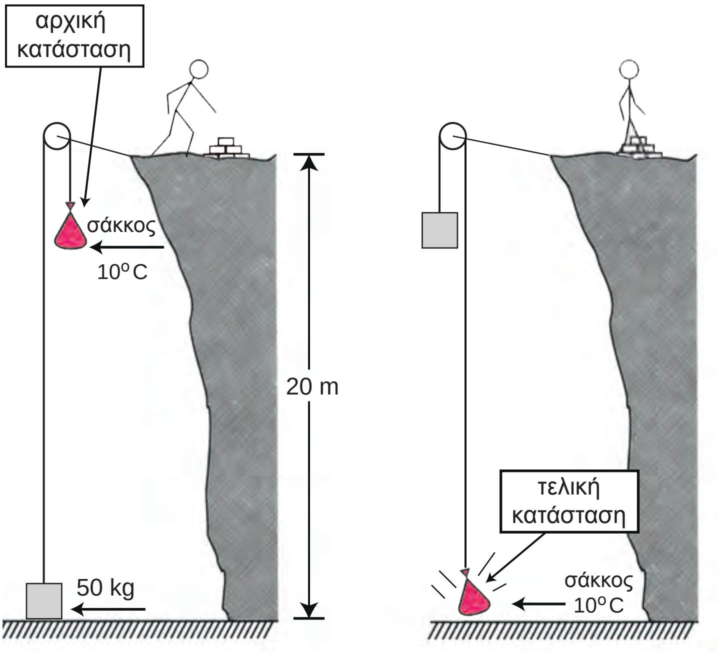
και $Q = -mgh_1 = 50\ kg \times 9{,}81\ m/s^2 \times 20\ m = -9810\ J$

Από την τελευταία σχέση παρατηρούμε ότι η θερμότητα είναι αρνητική, συνεπώς έχει φορά από το σύστημα προς το περιβάλλον (υπενθυμίζεται ότι θεωρούμε το ποσό της θερμότητας που μπαίνει στο σύστημα θετικό και αρνητικό αυτό που βγαίνει).

Για το σύστημα "**σακί άμμου**" η πτώση αυτού αντιπροσωπεύει μια μη αντιστρεπτή μηχανική διαδικασία από μόνη της και, συνεπώς, δε θα μπορούσε να εφαρμοστεί ο σχετικός τύπος για τον υπολογισμό της εντροπίας του συστήματος.

Για να υπολογιστεί αυτή, θα πρέπει να προσδιορίσουμε μια ισοδύναμη αντιστρεπτή διαδικασίοα της πτώσης

Για το λόγο αυτό, θεωρούμε ένα σύστημα με τροχαλία, όπως φαίνεται στο σχήμα (7.3.γ).



Σχήμα 7.3.γ *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος*

Σ' αυτό παρατηρείται εύκολα η ισοδύναμη αντιστρεπτή διαδικασία της πτώσης.

Σ' αυτό το σύστημα η θερμότητα που χρειάζεται το σακί, για να φτάσει στο έδαφος, είναι μηδενική και επομένως:

$$\Delta S_{\sigma\upsilon\sigma\tau} = \Sigma_1^2 \frac{\Delta Q_{\alpha\nu\tau}}{T} = \Sigma_1^2 \frac{0}{283} = 0$$

β) **Για το περιβάλλον** παρατηρείται ότι δεν υπάρχει μεταβολή της μηχανικής ενέργειας αυτού, αλλά μόνο μεταφορά θερμότητας 9810 J από το σύστημα.

Η θερμοκρασία δε αυτού θεωρείται σταθερή στους 10° C, αφού δεν επηρεάζεται, λόγω του μεγέθους του από το πιο πάνω ποσό της ενέργειας.

Επομένως, θα ισχύει:

$$\Delta S_{\pi\epsilon\rho} = \Sigma_1^2 \frac{\Delta Q_{\alpha\nu\tau}}{T} = \Sigma_1^2 \frac{9810}{283} = 34{,}6\ J/K$$

Σημείωση: Η θερμοκρασία στον τύπο είναι σε κέλβιν.

γ) **Συνολικά** η **μεταβολή της εντροπίας** του συστήματος και του περιβάλλοντος χώρου θα δίνεται με τη σχέση:

$$\Delta S_{ο\lambda} = \Delta S_{\sigma\upsilon\sigma\tau} + \Delta S_{\pi\varepsilon\rho} = 0 + 34{,}6 = 34{,}6 \text{ J/K}$$

Αποτέλεσμα που είναι **σύμφωνο** με το **«δεύτερο νόμο της Θερμοδυναμικής»**.

$$\Delta S_{ο\lambda} \geq 0$$

7.4. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΣΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

7.4.1. Παραδείγματα για τα ιδανικά αέρια

Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται να βρεθεί η μεταβολή της εντροπίας για κάθε κατηγορία αερίων ρευστών, (ιδανικά, ιδεώδη, σχεδόν ιδεώδη, πραγματικά).

Θα γίνει προσπάθεια υπολογισμού της μεταβολής της εντροπίας σε αυτές τις κατηγορίες των αερίων ρευστών, χρησιμοποιώντας τις έννοιες και τους μαθηματικούς τύπους των προηγουμένων κεφαλαίων.

Για την καλύτερη κατανόηση των παραδειγμάτων που θα αναφερθούν, θεωρούμε ότι οι μεταβολές του έργου που δίνουν οι δυνάμεις απόστασης ($\Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g$ είναι μηδενικές).

Επίσης, οι μαθηματικοί τύποι που θα αναγραφούν, θα αναφέρονται σε 1 kg μάζας αερίου. Τέλος, θα γίνει προσπάθεια τα αέρια που θα μελετηθούν, να ανήκουν στην κατηγορία του ιδεώδους (R = σταθ., C_p = σταθ., C_v σταθ.).

Παρακάτω υπενθυμίζονται οι μαθηματικές σχέσεις που θα εφαρμοστούν:

- **Καταστατική εξίσωση των αερίων** $\quad p \cdot v = R \cdot T$
- **Μεταβολή της εωτερικής ενέργειας** $\quad \Delta U = C_v \cdot \Delta T$
- **Μεταβολή της ενθαλπίας** $\quad \Delta H = C_p \cdot \Delta T$
- **Μεταβολή της εντροπίας**

$$\Delta S = \Sigma_1^2 \frac{\Delta Q}{T}$$

(Υπενθυμίζεται ότι η προηγούμενη σχέση εφαρμόζεται, όταν το ποσό της θερμοκρασίας ΔΟ αναφέρεται σε αντιστρεπτές μεταβολές).

- Αναφέρεται η σχέση $C_p - C_v = R$ με C_p και C_v = σταθ.

7.4.2. Ισόθερμη μεταβολή

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Δίνεται ένα αέριο ιδεώδες ρευστό, που βρίσκεται στις συνθήκες 1, όπως φαίνεται στο σχήμα (7.4.2α) και συμπιέζεται από την αρχική κατάσταση 1 στην τελική κατάσταση 2 **ισόθερμα**.

Είναι γνωστά η πίεση p_1 = 10N/cm^2, η θερμοκρασία t_1 = 50° C, η πίεση στο τέλος της συμπίεσης p_2 = 40N/cm^2.

Εάν είναι ακόμη γνωστά ότι R = 287 J/kg K και οι κλίμακες των μεγεθών στο σχήμα (7.4.2.α).

Ζητούνται:

1. Οι ειδικοί όγκοι του ρευστού στα σημεία 1 και 2.
2. Η θερμοκρασία του αερίου στο σημείο 2.
3. Το έργο που απαιτείται, για να συμπιεσθεί το αέριο από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2.
4. Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2.
5. Το ποσό της θερμότητας που παρήχθηκε κατά τη θερμική μεταβολή.
6. Η μεταβολή της εντροπίας ΔS κατά τη θερμική αυτή μεταβολή.
7. Η μεταβολή της πίεσης P σε συνάρτηση με τον ειδικό όγκο v.

Λύση

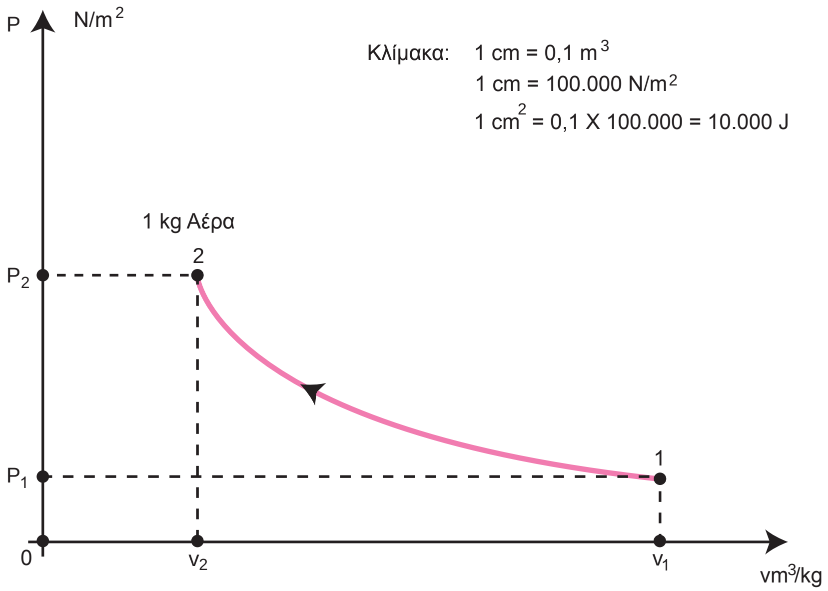
Για τη λύση αυτού του προβλήματος θεωρούμε ως σύστημα τη μάζα 1 kg αέρα.

1. Εφαρμόζουμε τη σχέση $p \cdot v = RT$* για την κατάσταση 1, λύνουμε ως προς v_1 και αντικαθιστούμε τις τιμές των μεγεθών P, R, T, οπότε θα έχουμε:

*Υπενθυμίζεται ότι η σχέση αυτή ισχύει για τα ιδανικά ρευστά.

$$p_1 \cdot v_1 = RT_1,$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1}$$



Σχήμα 7.4.2α *Ισόθερμη μεταβολή*

Πριν αντικαταστήσουμε, μετατρέπουμε τις τιμές αυτών των μεγεθών σε μονάδες του S.I.

Κατάσταση 1

$P_1 = 10\ N/cm^2$ ή $100.000\ N/m^2$

$T_1 = 273 + t = 273 + 50^\circ = 323\ K$

$R = 287\ J/kg\ K$

$$v_1 = \frac{287 \times 323}{100.000} = 0{,}92701 m^3 / kg$$

Αρα, ο ειδικός όγκος: $\boxed{v_1 = 0{,}92701\ m^3/kg}$

Κατάσταση 2

$P_2 = 40\ N/cm^2$ ή $400.000\ N/m^2$

$T_2 = T_1 = 323\ K$, γιατί η θερμοδυναμική μεταβολή είναι ισόθερμη.

Θεωρώντας στο σημείο 2 το ρευστό ως ιδανικό ή τέλειο, ισχύει η σχέση: $P_2 v_2 = RT_2$, από την οποία προκύπτει:

Άρα, ο ειδικός όγκος: $\boxed{v_2 = 0.23175\ m^3/kg}$

2. Όπως αναφέρθηκε, η μεταβολή είναι ισόθερμη και συνεπώς $T_2 = T_1 = 323\ K$

3. Για να βρεθεί το **έργο**, εφαρμόζουμε την αρχή της διατήρησης της ενέργειας (πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής κατά Lagrange).

$$Q = \Delta U_0 + \underbrace{W_e}_{\text{έργο δυνάμεων επιφάνειας}} + \underbrace{\Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g}_{\text{έργο δυνάμεων απόστασης}}$$

Στην τελευταία σχέση παρατηρούμε ότι:

$$\Delta U_0 = 0 \quad \text{γιατί} \quad \Delta U_0 = C_v \cdot \Delta T \quad \text{και} \quad \Delta T = 0$$

Θεωρούμε ακόμη ότι η μεταβολή της κινητικής ενέργειας, η μεταβολή της ενέργειας που οφείλεται στα φυγοκεντρικά πεδία και η μεταβολή της ενέργειας που οφείλεται στο πεδίο βαρύτητας, είναι ίσες με μηδέν.

Τελικά θα έχουμε:

$$Q = W_e$$

Οπως αναφέρθηκε, το έργο της συμπίεσης W_e δίνεται από τη σχέση:

$$W_e = p \cdot \Delta V$$

συνεπώς, για τη συμπίεση από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 θα έχουμε:

$$W_{e,o\lambda} = \Sigma_1^2 p \cdot \Delta V = \Sigma_1^2\, RT \frac{\Delta V}{V} = RT\, \Sigma_1^2 \frac{\Delta V}{V}$$

επειδή R και T είναι σταθερά

$$W_{e,o\lambda} = RT\,\Sigma_1^2 \frac{\Delta V}{V} = RT\,\ell n\frac{V_2}{V_1} = 287 \times 323\ \ \ell n\frac{0,23175}{0,92701} =$$
$$= 287 \times 323\left[\ell n\, 0,23175 - \ell n\, 0,92701\right] = -128.511\ J$$

$$\boxed{W_{e,o\lambda} = -128.511\ J}$$

Για να συμπιεσθεί το αέριο από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2, πρέπει να. καταναλωθούν 128.511 J (Το σημείο — σημαίνει ότι ο εξωτερικός χώρος έδωσε έργο στο σύστημα).

4. **Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας** θα δίνεται από τη σχέση:

$\Delta U_0 = U_{02} - U_{01} = C_v\, T_2 - C_v\, T_1 = C_v\,(T_2 - T_1) = 0$

γιατί $T_1 = T_2$

5. Στο ερώτημα 3 από την εφαρμογή του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής προέκυψε:

$$Q = W_e$$

συνεπώς, Q = – 128.511 J (Το σημείο – σημαίνει ότι το ποσό της θερμότητας μεταφέρεται από το σύστημα στον εξωτερικό του χώρο. Αυτό είναι αυτονόητο αφού κατά τη συμπίεση του αερίου ρευστού, για να παραμείνει η θερμοκρασία του σταθερή θα πρέπει να αφαιρείται θερμότητα κατά τη διάρκεια της μεταβολής).

6. Για τον υπολογισμό της **εντροπίας** ΑS του συστήματος θα έχουμε:

$$\Delta S = \frac{1}{T}\Sigma_1^2\ \Delta Q = \frac{1}{T}\Delta Q_{o\lambda} = \frac{\Delta Q_{o\lambda}}{T} = \frac{-128.511}{323} = -397,87\ J/kg\ K$$

Για τον υπολογισμό της ΔS μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και τη σχέση:

$$\Delta S = -R\ell n\frac{V_1}{V_2} = 287 \times \ell n\frac{0,92701}{0,23175} = -397,87J$$

7. Η **μεταβολή της πίεσης** σε συνάρτηση με το ειδικό όγκο δίνεται από τη σχέση:

$$p = RT \cdot \frac{1}{V} = 287 \times 323 \times \frac{1}{V} = \frac{92.701}{V}$$

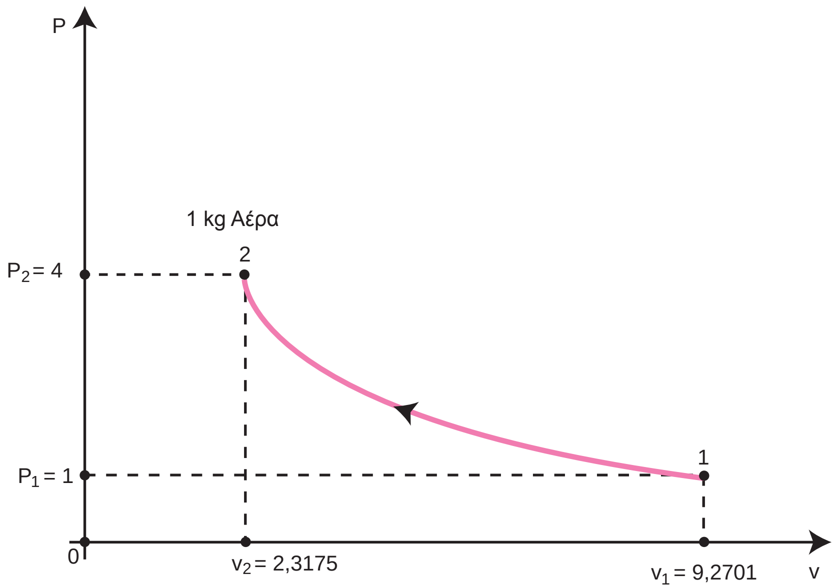
Η συνάρτηση αυτή είναι ισοσκελής υπερβολή, γιατί έχει τη μορφή

$$\boxed{y = \frac{\sigma\tau\alpha\theta}{x}}$$

1 cm $\triangleq$ 0,1 m^3

1 cm $\triangleq$ 100.000 N/m^2

1 cm^2 $\triangleq$ 0,1 x 100.000 = 10.000 J



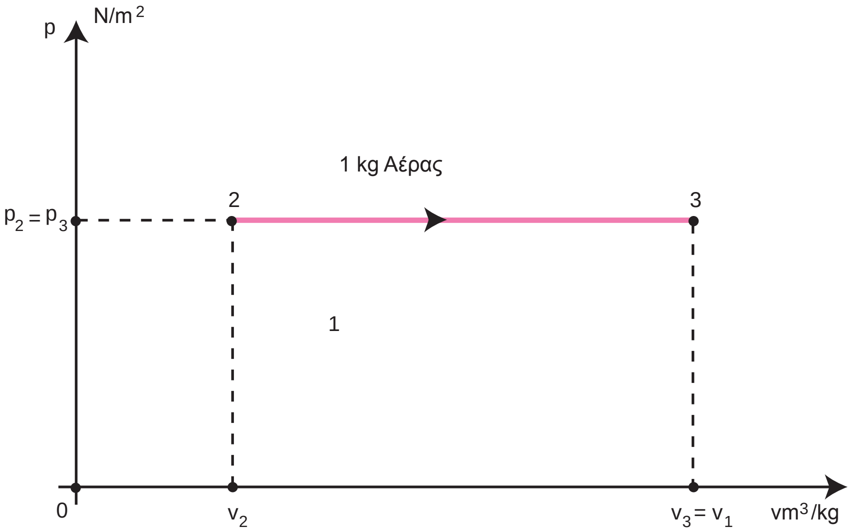
Σχήμα 7.4.2.β *Ισοσκελής υπερβολή*

Για τη σχεδίαση της μεταβολής αυτής χρησιμοποιείται μιλιμετρέ χαρτί και λαμβάνονται υπόψη οι κλίμακες:

7.4.3. Ισοβαρής Θερμοδυναμική μεταβολή

❑ **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Με τα δεδομένα της προηγούμενης άσκησης $P_1 = 10\ N/m^2$, $t_1 = 50^\circ\ C$, $P_2 = 40\ N/cm^2$, $R = 287 J/kg\ K$, $t_2 = 50^\circ\ C$ και με την παρατήρηση ότι το ρευστό από την κατάσταση 2 πηγαίνει με ισοβαρή Θερμοδυναμική μεταβολή (p = σταθ.) στην κατάσταση 3 για την οποία είναι $P_3 = P_2 = 40$ N/cm2, $V_3 = V_1 = 0{,}92701$ m3/kg και $C_p = 1$ KJ/kgK. (σχήμα 7.4.3.α)



Σχήμα 7.4.3.α *Ισοβαρής μεταβολή*

Ζητούνται:

1. Η θερμοκρασία T_3 (κατάσταση 3)
2. Η μεταβολή της εντροπίας ΔS κατά τη Θερμοδυναμική αυτή μεταβολή
3. Τη γραφική παράσταση της μεταβολής της πίεσης σε συνάρτηση με το v.

Λύση

1. Θεωρώντας το ρευστό ιδανικό ή τέλειο για 1 kg μάζας ρευστού εφαρμόζουμε τη σχέση:

$$p \cdot v = RT \text{ για την κατάσταση 3}$$

θα έχουμε:

$$P_3 \cdot v_3 = RT_3$$

$$T_3 = \frac{P_3 \cdot v_3}{R} = \frac{400.000 \times 0{,}92701}{287} = 1.292\ \text{K}$$

Συνεπώς, για την κατάσταση 3 θα έχουμε:

$$T_3 = 1292\ \text{K}$$

$$v_3 = v_1 = 0{,}92701$$

$$P_3 = P_2 = 40\ \text{N/cm}^2$$

2. Η **μεταβολή της εντροπίας** θα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta S = S_{\tau\varepsilon\lambda} - S_{\alpha\rho\chi} = S_3 - S_2 = \Sigma_2^3 \frac{\Delta Q}{T}$$

(υπενθυμίζεται ότι ΔQ αναφέρεται σε αντιστρεπτή μεταβολή).

Για την εφαρμογή της πιο πάνω σχέσης, απαιτείται να βρεθεί το ολικό ποσό της θερμότητας, που λαμβάνει χώρα κατά τη θερμοδυναμική μεταβολή.

Για τον υπολογισμό αυτού του ποσού εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία με τα προηγούμενα.

Επιλέγεται ως σύστημα το αέριο ρευστό που υφίσταται τη θερμοδυναμική μεταβολή μάζας 1 kg, η μέθοδος κατά Lagrange (κλειστά συστήματα) και εφαρμόζεται ο πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής.

$$Q = \Delta U_0 + W_e + \underbrace{\Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g}_{o}$$

Στη σχέση αυτή, για τους λόγους που αναφέραμε στην προηγούμενη άσκηση, οι μεταβολές είναι ίσες με το μηδέν.

Συνεπώς: $Q = \Delta U_0 + W_e$

Το έργο των δυνάμεων επιφάνειας W_e ως γνωστόν είναι:

$$W_3 = \Sigma_2^3 p \cdot \Delta V = p\ \Sigma_2^3\ \Delta V\ (p = \sigma\tau\alpha\theta)$$

ακόμη μπορεί να γραφτεί:

$$W_e = \Sigma_2^3 (p\ V) = \Delta_{o\lambda}(p \cdot V)$$

$$Q = \Delta U_0 + W_e = DU_0 + \Delta_{o\lambda}(p \cdot V) = \Delta(U_0 + p \cdot V) = \Delta H$$

(υπενθυμίζεται ότι $U_0 + p \cdot V = H$)

$Q = C_p \cdot \Delta T$

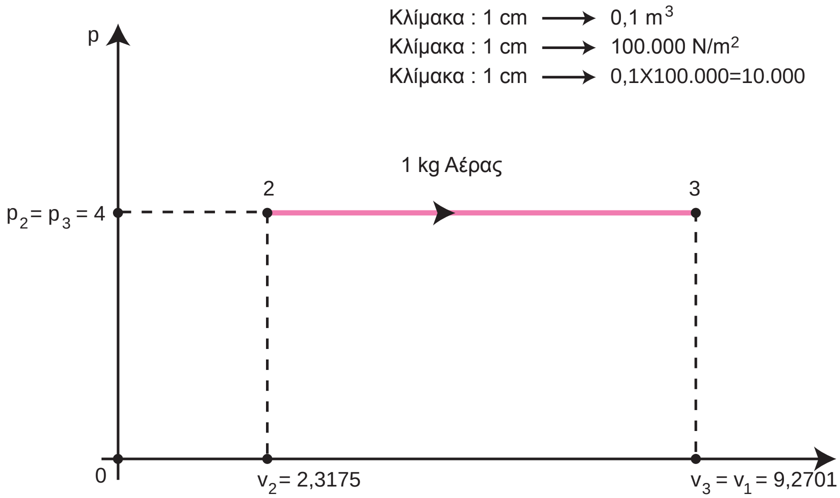
Συνεπώς

$$\Delta S = \Sigma_2^3 \frac{\Delta Q}{T} = \Sigma_2^3 \frac{C_p \Delta T}{T} = C_p\ \Sigma_2^3 \frac{\Delta T}{T} C_p \ell n \frac{T_3}{T_1}$$

(C_p = σταθ. αέριο ρευστό ιδεώδες)

$$\Delta S = C_p \ell n \frac{T_3}{T_2} = 1 \times \ell n \frac{1292}{323} = 1{,}386\ KJ/kg$$

3. Προφανώς η γραφική παράσταση είναι μια ευθεία παράλληλη ως προς τον άξονα των τετμημένων, αφού p = σταθ. σχήμα 7.4.3β



Σχήμα 7.4.3.β *Ισοβαρής μεταβολή*

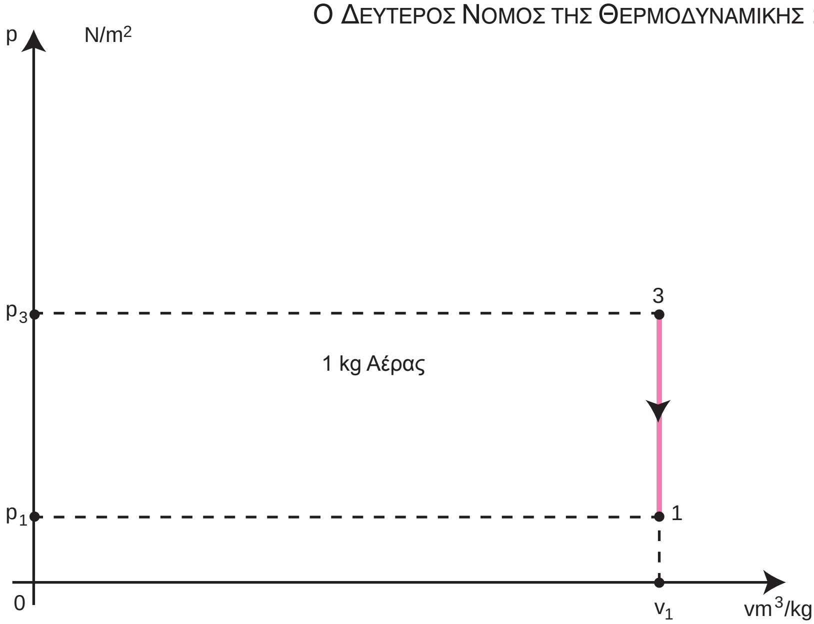
7.4.4 Ισόχωρη Θερμοδυναμική μεταβολή

❑ **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Με τα δεδομένα των προηγούμενων ασκήσεων να βρεθούν

1. Η μεταβολή της εντροπίας από τη Θερμοδυναμική κατάσταση 3 στην κατάσταση 1, όταν αυτή γίνεται ισόχωρα (σχήμα 7.4.4.α).

2. Η γραφική παράσταση



Σχήμα 7.4.4α *Ισόχωρη μεταβολή*

Λύση

1. Η **μεταβολή της εντροπίας** ΔS θα είναι:

$$\Delta S = S_{\tau\varepsilon\lambda} - S_{\alpha\rho\chi} = S_1 - S_3 = \Sigma_3^1 \frac{\Delta Q}{T}$$

Εργαζόμενοι όπως προηγούμενα, θα έχουμε:

$$Q = \Delta U_0 + W_e + \underbrace{\Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g}_{0}$$

$W_e = \Sigma_3^1 p \cdot \Delta V = 0$ γιατί $V_1 = V_3 =$ σταθ.

Συνεπώς : $Q = \Delta U_0$

$$\Delta U_0 = C_v = \Delta T$$

είναι επίσης : $C_p - C_v = R$

$C_v - C_p - R = 1000 - 287 = 713\ J/kg\ K$

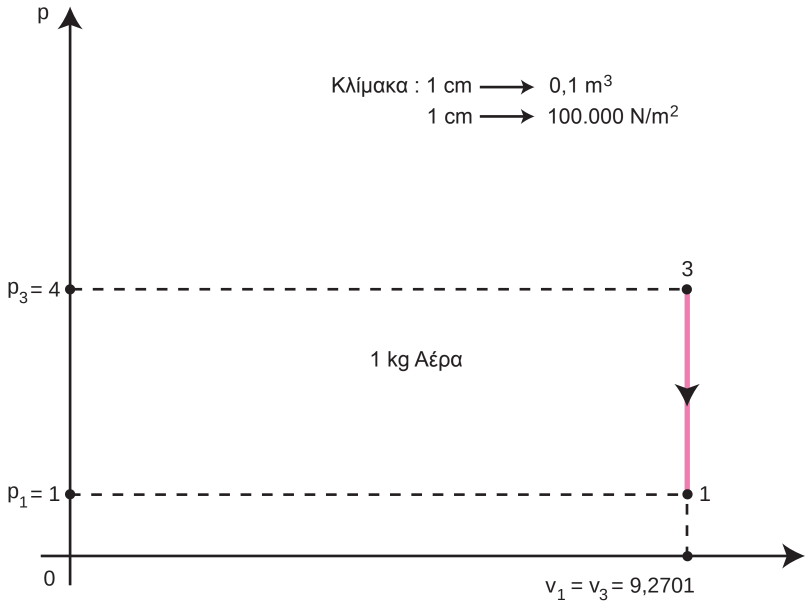
Η μεταβολή της εντροπίας ΔS θα είναι:

$$\Delta S = \Sigma_3^1 \frac{\Delta Q}{T} = \Sigma_3^1 \frac{C_v \Delta T}{T} = C_v\, \Sigma_3^1 \frac{\Delta T}{T} C_v\, \ell n \frac{T_1}{T_3}$$

$$\Delta S = C_v\, \ell n \frac{T_1}{T_3} = 713\, \ell n \frac{323}{1292} = -987{,}87\ \mathrm{J/kg} \qquad \Delta S = -987{,}87\ \mathrm{J/kg\,K}$$

$$\boxed{\Delta S = -987{,}87\ \mathrm{J/kg\,K}}$$

2. Η γραφική παράσταση θα είναι μια παράλληλη στον άξονα των τεταγμένων V = σταθ. (σχ. 7.4.4β)



Σχήμα 7.4.4.β *Ισόχωρη μεταβολή*

7.4.5 Αδιαβατική μεταβολή

❑ **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Σε ένα κινητήρα εσωτερικής καύσης το εργαζόμενο ρευστό στην αρχή της φάσης της εκτόνωσης βρίσκεται στις συνθήκες p_3 = 700.000 N/m^2 και T_3 = 2.020 K, ειδική θερμότητα των καυσαερίων C_p΄= 0,394 Kcal/kg K και R = 0,086 Kcal/kg K και εκτονώνεται μέχρι τις συνθήκες του σημείου 4 αδιαβατικά (δίχως συναλλαγή θερμότητας μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος χώρου του).

Ζητείται:
Να υπολογιστεί η μεταβολή της εντροπίας του ρευστού κατά τη διάρκεια της θερμοδυναμικής αυτής μεταβολής.

Λύση

Η μεταβολή της εντροπίας ΔS δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta S = S_{\tau\varepsilon\lambda} - S_{\alpha\rho\chi} = S_4 - S_3 = \Sigma_3^4 \frac{\Delta Q}{T} = 0$$

με δεδομένο ότι ΔQ = 0, δηλαδή δίχως ανταλλαγή θερμότητας αυτού με το περιβάλλον του.

Από τα πιο πάνω προκύπτει:

$$\Delta S = S_4 - S_3 = 0$$

$$S_4 - S_3 = 0$$

$S_4 = S_3$ δηλ. κατά τη θεμοδυναμική αυτή μεταβολή η εντροπία του συστήματος παραμένει σταθερή.

Ως συμπέρασμα προκύπτει ότι μια **αδιαβατική μεταβολή είναι και ισοεντροπική**.

Το **αντίθετο δεν ισχύει,** δηλ. μια ισοεντροπική μεταβολή δεν είναι υποχρεωτικά και αδιαβατική.

7.5. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΓΙΑ ΕΙΔΙΚΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

Σε ορισμένες εφαρμογές στην πράξη, όπως στα ψυγεία, στους καταψύκτες, στις μηχανές που κινούνται με ατμό, στα κλιματιστικά, στις αντλίες θερμότητας, αεριοστροβίλους, στα κλιματιστικά αυτοκινήτων και στους απιονιστές, χρησιμοποιούνται διάφορα ρευστά.

Για κάθε μια από τις πιο πάνω εφαρμογές χρησιμοποιείται και ένα ειδικό ρευστό, που μεταβάλλοντας τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας δίνει τα αντίστοιχα αποτελέσματα στις πιο πάνω μηχανές.

Σ' αυτήν την παράγραφο θέλουμε να επισημάνουμε ότι, για την καλύτερη απόδοση των πιο πάνω μηχανών, θα πρέπει να είναι γνωστές οι θερμοδυναμικές μεταβολές, κάτω από τις οποίες εργάζεται το θεωρούμενο ρευστό. Επίσης, βασικό μέγεθος το οποίο πρέπει να είναι γνωστό, είναι οι μεταβολές της εντροπίας που υφίσταται αυτό. Για την περίπτωση κατά την οποία τα ρευστά είναι αέρια, όπως είδαμε προηγούμενα, ο υπολογισμός της μεταβολής της εντροπίας γίνεται με την εφαρμογή μαθηματικών σχέσεων, που προέκυψαν από την εφαρμογή των νόμων της διατήρησης, (πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής).

Δυστυχώς για μερικά ρευστά, για τα οποία παρουσιάζεται το φαινόμενο του βρασμού και της υγροποίησης, δεν υπάρχουν γενικές εξισώσεις, για τις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη μεταβολή της εντροπίας σε αυτά.

Σ' αυτήν την παράγραφο παρουσιάζεται ο υπολογισμός της μεταβολής της εντροπίας των χρήσιμων αυτών ρευστών, δίνοντας χρήσιμες γραφικές παραστάσεις και πίνακες καθώς και άλλες χρήσιμες πληροφορίες.

7.5.1 Εντροπία καθαρών ουσιών

Για τις **καθαρές ουσίες** ο υπολογισμός της μεταβολής της εντροπίας γίνεται από τις πιο κάτω σχέσεις:

α) Για μεταβολές της θερμοκρασίας χωρίς αλλαγή φάσεως (υγρό–αέριο) και με σταθερή την πίεση χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\Delta S = \Sigma_1^2 \frac{\Delta Q}{T} = \Sigma_1^2 \frac{m \cdot C_p \Delta T}{T} \qquad (751\alpha)$$

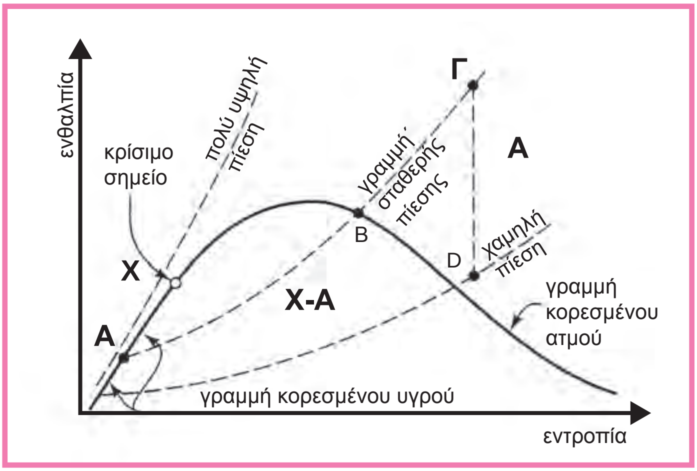
β) Για τις θερμοδυναμικές μεταβολές, στις οποίες **υπάρχουν αλλαγές** φάσεως, η μεταβολή της ΔS θα δίνεται:

$$\boxed{\Delta S = \frac{m \cdot \Delta h_{lg}}{T}} \qquad (751\beta)$$

όπου: m είναι η μάζα του ρευστού

Δh_{lg} είναι η μεταβολή της ενθαλπίας στην αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο.

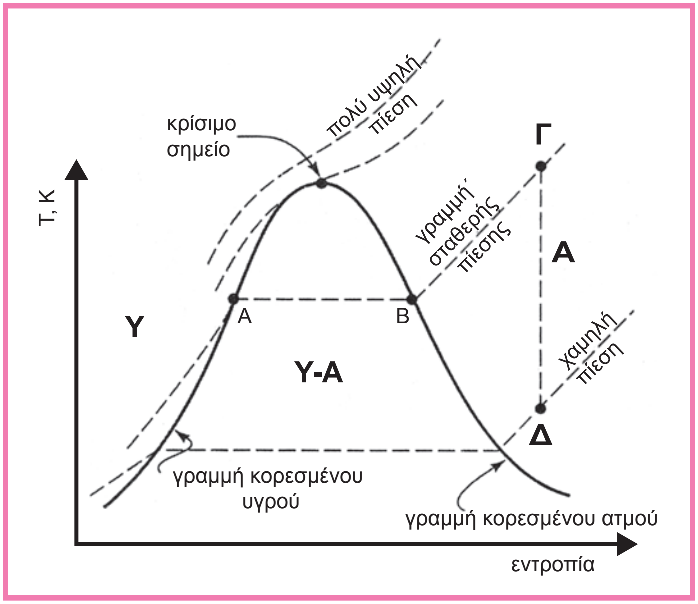
Στις πρακτικές εφαρμογές, πολλές φορές, χρησιμοποιούνται διαγράμματα, όπως στο παρακατω σχήμα 7.5.α



Σχήμα 7.5.1.α *Διάγραμμα h–s*

Αυτό είναι ένα κλασικό παράδειγμα υπολογισμού της μεταβολής της εντροπίας σε συνάρτηση με τη μεταβολή της ενθαλπίας για το νερό (διάγραμμα Mollier) h–s

Ένα άλλο παράδειγμα υπολογισμού της εντροπίας είναι και το πιο κάτω διάγραμμα T–S. (σχήμα 7.5.β)



Σχήμα 7.5.1.β *Διάγραμμα Τ–S*

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 7ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- **Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος:** Από την **καθημερινή εμπειρία** είναι γνωστό ότι όλα τα **γεγονότα** ή τα **φαινόμενα** μεταβάλλονται, εξελίσσονται και μάλιστα προς μία **κατεύθυνση-φορά** στο χρόνο.

- **1. Πρώτη γενική μορφή διατύπωσης του νόμου: Τα γεγονότα ή φαινόμενα εξελίσσονται στο χρόνο προς μια κατεύθυνση, συγκεκριμένα γεγονότα γίνονται με κάποια σειρά στο χρόνο.**

- **2. Δεύτερη γενική μορφή διατύπωσης του νόμου: Κάθε σύστημα, όταν αφεθεί μόνο του (απομονωθεί), αλλάζει γρήγορα ή αργά και τελικά καταλήγει σε μια κατάσταση ισορροπίας.**

- **3. Με όρους ροής θερμικής ενέργειας: Στη φύση δεν είναι δυνατόν να εξελιχθεί μια μεταβολή, της οποίας τα αποτελέσματα είναι η ροή θερμότητας από ένα σώμα με χαμηλή θερμοκρασία σε ένα σώμα με υψηλή θερμοκρασία**

- **4. Με όρους θερμότητας και έργου: Η ενέργεια, εκτός του ότι διατηρείται, υπακούει και σε ένα φυσικό νόμο, που καθορίζει προς ποία**

κατεύθυνση η ίδια ενέργεια μετασχηματίζεται. Η ενέργεια μπορεί να μετασχηματιστεί στην πράξη σε ενέργεια της αυτής ποιότητας ή σε ενέργεια κατώτερης ποιότητας.

Η πείρα δείχνει ότι μπορεί να υποστηριχθεί γενικά ότι, κάθε φορά που η ενέργεια μετασχηματίζεται από έναν τύπο σε ένα άλλο τύπο ενέργειας, υπάρχει πάντοτε ένα μέρος αυτής, που μετασχηματίζεται σε ενέργεια κατώτερης ποιότητας.

Μπορεί για παράδειγμα, η θερμική ενέργεια να μετατραπεί σε μηχανικό έργο, όμως ένα μέρος αυτής της αρχικής θερμικής ενέργειας θα μετατραπεί σε ενέργεια κατώτερης στάθμης.

Μια ενέργεια διακρίνεται σε υψηλή ποιότητα και σε κατώτερη ποιότητα. Όσον αφορά την πρώτη, αυτή μπορεί να μετασχηματισθεί ολικά σε ενέργεια της αυτής ή κατώτερης στάθμης, ενώ, όσον αφορά τη δεύτερη, αυτή δεν μπορεί ολικά να μετατραπεί σε ενέργεια ανώτερης στάθμης.

5. Με όρους ποσοτικών μεγεθών:

Ένα σύστημα, όταν αφεθεί μόνο του μετακινείται:

- **Από μια κατάσταση αταξίας, σε μια κατάσταση μεγαλύτερης αταξίας.**
- **Από μια κατάσταση μικρότερης πιθανότητας να συμβεί ένα γεγονός, σε μια κατάσταση μεγαλύτερης πιθανότητας να συμβεί αυτό.**
- **Από μια κατάσταση αναγνώρισης ενός γεγονότος, σε μια λιγότερο αναγνωρίσιμη αυτού του γεγονότος.**
- **Από μια κατάσταση με πολλές πληροφορίες, σε μια κατάσταση με λιγότερες πληροφορίες.**
- **Από μια κατάσταση ωφέλιμης ενέργειας, σε μια κατάσταση λιγότερο ωφέλιμης ενέργειας.**
- Για ένα συγκεκριμένο **σύστημα** ισχύει η πιο κάτω σχέση:

$$\boxed{\Delta S_{\sigma\upsilon\sigma\tau} \geq 0}$$

- Ένα σύστημα περιβάλλεται από το γύρω χώρο του (**περιβάλλον**), τότε σ' αυτήν την περίπτωση ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\boxed{\Delta S_{\sigma\upsilon\sigma\tau} + \Delta S_{per} \geq 0}$$

- Η **ολική εντροπία** ενός συγκεκριμένου συστήματος είναι πάντοτε θετική.

$$\boxed{\Delta S_{ολ} \geq 0}$$

- Η **εντροπία** ορίζεται από τη σχέση:

$$\boxed{\Delta S \geq \frac{\Delta Q}{\Delta T}} \qquad (7.2.α)$$

Για τον **υπολογισμό της** σ' ένα σύστημα που βρίσκεται στην κατάσταση 1 και καταλήγει στην κατάσταση 2, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\boxed{\Delta S = \Sigma_1^2 \frac{\Delta Q}{T}} \qquad (7.2.β)$$

Όπου **ΔQ:** είναι το ποσόν της θερμότητας που λαμβάνει χώρα κατά τη θερμοδυναμική μεταβολή.

T: είναι η τιμή της θερμοκρασίας που πραγματοποιείται η θερμοδυναμική μεταβολή.

Σ_1^2: είναι το άθροισμα από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 των στοιχειωδών

$$\frac{\Delta Q}{T}$$

για τη θερμοδυναμική μεταβολή. Η προηγούμενη σχέση που, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεταβολής της εντροπίας ΔS, ισχύει μόνο για τις περιπτώσεις των αντιστρεπτικών **θερμοδυναμικών μεταβολών**.

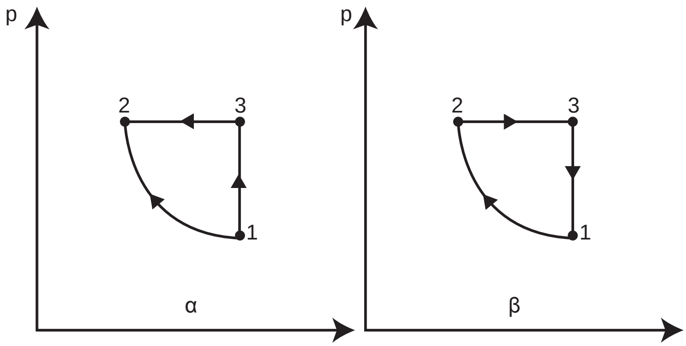
ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

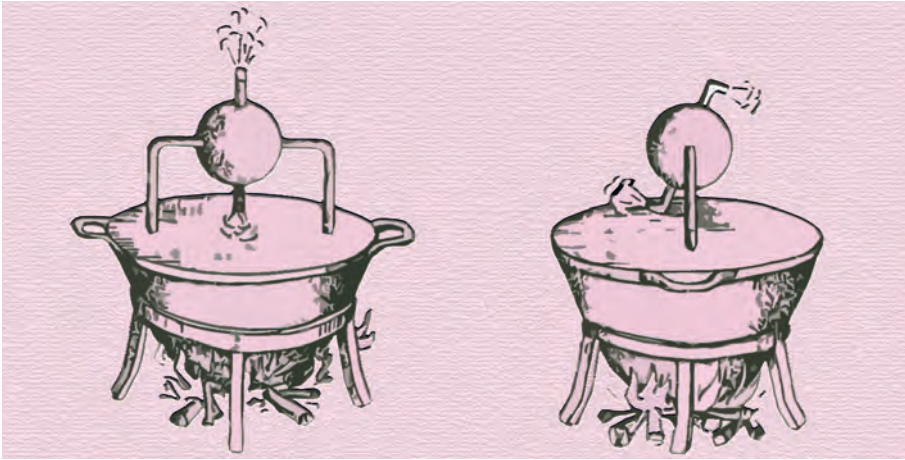
1. Για τις θερμοδυναμικές μεταβολές του σχήματος υπολογίσθηκαν $S_2 - S_1 = 40$ kJ/kgK, $S_3 - S_2 = 1{,}38$ kJ/kgK, $S_1 - S_3 = -0{,}98$ kJ/kg/K.

α) Να υπολογίσετε τη μεταβολή της εντροπίας για τη διαδρομή 1 - 2 και 1 - 3 - 2.

β) Να υπολογίσετε τη μεταβολή της εντροπίας για τον κύκλο 1 - 2 - 3 - 1.

γ) Να σχολιάσετε τα αποτελέσματα





ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΕΡΓΟ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

8.1 Εισαγωγή

8.2 Ο κύκλος του Carnot

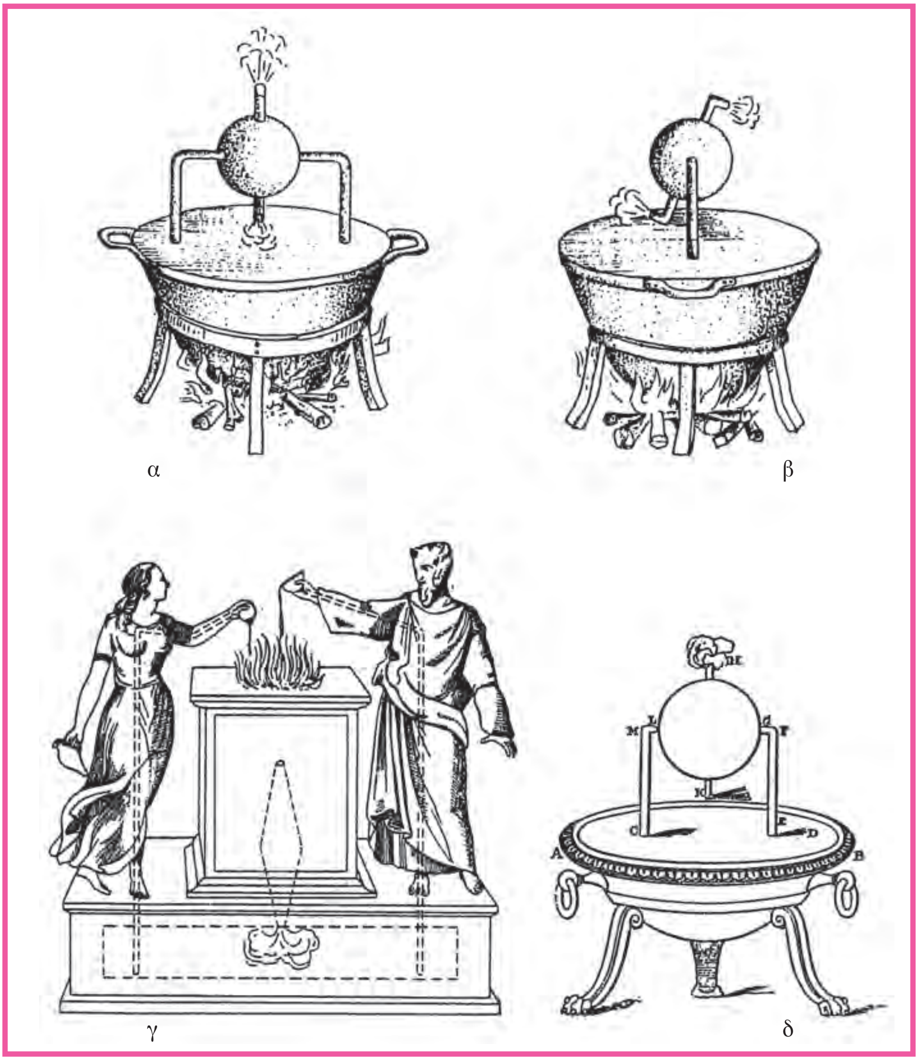
8.3 Εξέργεια - Εισαγωγή

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να αναφέρετε τον κύκλο του Carnot και να περιγράφετε τις εφαρμογές του στις θερμικές μηχανές
- Να ορίζετε το βαθμό απόδοσης των θερμικών μηχανών που ακολουθούν το νόμο του Carnot
- Να διατυπώνετε τα θεωρήματα του Carnot
- Να περιγράφετε τον αντίστροφο κύκλο του Carnot και να αναφέρετε τις εφαρμογές του
- Να εξηγείτε την αναγκαιότητα της έννοιας της εξέργειας και να υπολογίζετε αυτήν σε απλές εφαρμογές

8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πρώτες πηγές που υπάρχουν, για την παραγωγή μηχανικού έργου από τη θερμότητα, αναφέρονται στην αρχαία Ελλάδα με τη χρήση του ατμού από τον Αρχιμήδη και το Φίλωνα. Η ανακάλυψη όμως του ατμολέβητα της ατμομηχανής ανήκει στον Ήρωνα τον Αλεξανδρινό (100μ.Χ).



Σχήμα 8.1.α: *Ο πρώτος ατμολέβητας από τον Ήρωνα τον Αλεξανδρινό, καθώς επίσης και άλλες κατασκευές του*

Η περιστροφική αυτή ατμομηχανή αναφέρεται ως αιολόσφαιρα ή ατμοστήλη ή Αιόλου πύλη.

Αυτή είναι μια μικρή κοίλη σφαίρα, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω σ' ένα κλειστό λέβητα. Η επικοινωνία του λέβητα και της σφαίρας γίνεται με στρόφιγγες.

Ο ατμός που παράγεται στο λέβητα εισέρχεται στη σφαίρα μέσα από τις στρόφιγγες και εξέρχεται από δυο ακροφύσια, τα οποία είναι τοποθετημένα αντίθετα. Ο ατμός που διοχετεύεται βγαίνει με πίεση από τα ακροφύσια και κινεί τη σφαίρα (σχήμα 8.1 .α).

Αυτή η αξιόλογη ανακάλυψη χρησιμοποιήθηκε σε πάρα πολλές εφαρμογές, αλλά δε βελτιώθηκε στην πορεία. Αυτό, συνέβη διότι η ενέργεια του ατμού θεωρήθηκε παράδοξο φαινόμενο. Παρόλα αυτά, η "σφαίρα του Ήρωνα" είναι η ελληνική συμβολή στην ανακάλυψη της ατμομηχανής

Επρεπε να περάσουν πολλοί αιώνες από τότε, έως ότου στα μέσα του 10ου αι. ο Watt σχεδίασε και πρότεινε μια θερμική μηχανή για την παραγωγή έργου.

Τη μηχανή αυτή κατασκεύασε ο μαθητής του Wilkinson,περί τα τέλη του 16ου αι. Ετσι γεννήθηκε η πρώτη θερμική μηχανή, η ατμομηχανή.

Για να λειτουργήσει αυτή, χρησιμοποιούσε σαν ρευστό φορέα θερμότητας τον ατμό. Η δημιουργία του ατμού προέκυπτε από την ατμοποίηση του νερού, στο οποίο προσφερόταν θερμική ενέργεια μέσω καύσης καυσίμων υλών, όπως τα ξύλα και τα στερεά καύσιμα (λιθάνθρακες, ανθρακίτες κ.α.). Η παραγωγή του έργου από αυτές τις μηχανές έδωσε την ευκαιρία στον άνθρωπο να έχει στη διάθεση του, όχι μόνο μεγάλα ποσά μηχανικού έργου αλλά και μεγάλη βοήθεια στην παραγωγή αγαθών.

Γίνεται αντιληπτό το μέγεθος αυτής της ανακάλυψης, αφού ανέτρεψε, τη μέχρι τότε φιλοσοφία και πρακτική της παραγωγής αγαθών και της επικοινωνίας των ανθρώπων και την έθεσε σε μια νέα βάση και αντίληψη.

Με τις θερμικές αυτές μηχανές, κινήθηκαν μηχανές εργοστασίων, αναπτύχθηκαν οι επικοινωνίες με την ανάπτυξη και τη χρήση του σιδηροδρόμου, κινήθηκαν ατμόπλοια και διάφορα μέσα μαζικής μεταφοράς.

Βρέθηκε δηλαδή ο άνθρωπος μπροστά σε μια αλλαγή τέτοιου μεγέ1θους, που οι ιστορικοί τη χαρακτήρισαν ως βιομηχανική επανάσταση. Ηταν τόσο έντονες αυτές οι αλλαγές στη ζωή του ανθρώπου, που κάλλι στα μπορούν να συγκριθούν με αυτές, οι οποίες συμβαίνουν σήμερα γύρω μας, όπου όλα αλλάζουν τόσο γρήγορα, και αδυνατούμε πολλές φορές να τις παρακολουθήσουμε. Οι άνθρωποι εκείνης της εποχής δηλαδή έζησαν κάτι παρόμοιο με αυτό που ζούμε εμείς σήμερα στην επανάσταση της πληροφορικής.

Από τα πρώτα βήματα της νέας αυτής τεχνολογίας τέθηκε το ερώτημα του υπολογισμού της μέγιστης ποσότητας του έργου, που θα μπορούσε να δώσει μια συγκεκριμένη ποσότητα καυσίμου.

Για παράδειγμα, ένα βαγόνι γεμάτο κάρβουνο θα έφτανε, για να κινήσει μια ατμομηχανή για κάποιο συγκεκριμένο ταξίδι ή θα μπορούσαμε να κάνουμε ένα ολόκληρο ταξίδι με μια καλύτερη ατμομηχανή; Με άλλα λόγια τέθηκε το πρόβλημα της καλύτερης δυνατής εκμετάλλευσης της θερμικής ενέργειας, δηλαδή της καλύτερης δυνατής απόδοσης μιας θερμικής μηχανής.

Για την επίλυση αυτού του προβλήματος θεμελιώθηκε και αναπτύχθηκε η επιστήμη της Θερμοδυναμικής.

8.2 ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ CARNOT

Ενας Γάλλος στρατιωτικός μηχανικός ήταν από τους πρώτους που προσπάθησε να λύσει αυτό το πρόβλημα. Αυτός, χωρίς να έχει ασχοληθεί με την κατασκευή των ατμομηχανών, απέδειξε ότι είναι δυνατή η παραγωγή του έργου από τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας. Με άλλα λόγια, έθεσε τις βάσεις της θεωρίας του μετασχηματισμού της ενέργειας, δηλαδή ουσιαστικά τις αρχές του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής, που ήδη έχουμε εξετάσει.

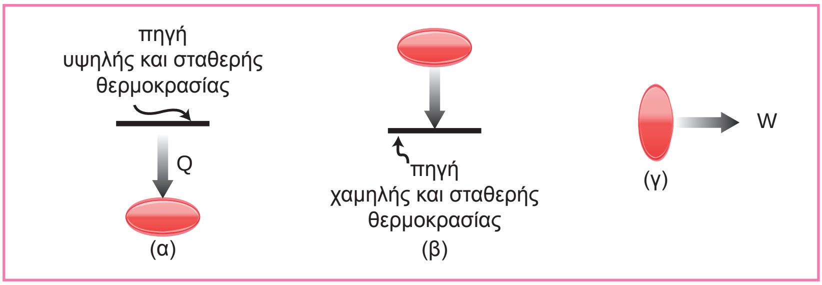
Παρατηρούμε δηλαδή ότι η θεωρία του βασίστηκε σε αποτελέσματα της εφαρμογής του 2^{ου} νόμου της θερμοδυναμικής πολύ νωρίτερα από τη διατύπωση και την αποδοχή του 1^{ου} θερμοδυναμικού νόμου.

Η ανάλυση του Carnot επιτρέπει να κατανοηθεί ακόμα καλύτερα η έννοια της εντροπίας, που ήδη έχει αναφερθεί στο 2ο θερμοδυναμικό νόμο.

Αν θεωρηθεί ότι η "θερμική μηχανή" ως ένα ανοικτό σύστημα είναι εκείνη η μηχανή, που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε έργο, τότε μπορούν να μελετηθούν οι πιο κάτω τρεις περιπτώσεις:

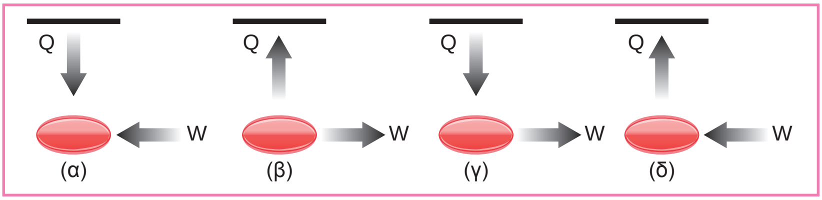
- Η απορρόφηση θερμότητας από μια πηγή υψηλής και σταθερής θερμοκρασίας, T_1 από το σύστημα.
- Η απόδοση της θερμότητας σε μια πηγή χαμηλής και σταθερής θερμοκρασίας T_2, από το σύστημα.
- Το σύστημα παράγει έργο στον εξωτερικό του χώρο.

Στην παρακάτω γραφική παράσταση φαίνονται οι προαναφερόμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 8.1.β

Με την υπόθεση ότι μια θερμική μηχανή διαθέτει μόνο μια πηγή θερμότητας και ότι το εργαζόμενο ρευστό σ' αυτή βρίσκεται σε συνθήκες μονίμου ροής και διαγράφει κλειστές θερμοδυναμικές μεταβολές (θερμοδυναμικούς κύκλους), τότε θα μπορούσαν να υπάρχουν οι πιο κάτω περιπτώσεις.



Σχήμα 8.1.γ

Για την περίπτωση παρατηρείται ότι, αν εφαρμοστεί ο 1ος νόμος της Θερμοδυναμικής, δηλ.

$$Q = A_h + W_i + \Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g \qquad \text{(I)}$$

τότε παρατηρείται ότι, επειδή το ρευστό διαγράφει θερμοδυναμικούς κύκλους, οι μεταβλητές A_h, ΔE_c, AE_{cf} και ΔE_g, ισούνται με μηδέν.

Έτσι η προηγούμενη σχέση γράφεται

$$Q = W_i$$

Με τις παραδοχές που έχουν ήδη γίνει, ότι δηλαδή η θερμότητα θεωρείται θετική, όταν μπαίνει στο σύστημα και το μηχανικό έργο θεωρείται θετικό, όταν το σύστημα παράγει έργο στον εξωτερικό του χώρο, τότε:

$$Q = W_i = 0$$

Η τελευταία σχέση δεν ισχύει, δηλαδή στην (α) περίπτωση του σχ. 8.1.γ δεν μπορεί να υπάρχει, διότι παραβιάζεται ο 1ος νόμος της θερμοδυναμικής.

Και στη (β) περίπτωση, με τον ίδιο συλλογισμό δεν μπορεί να υπάρξει, γιατί και σ' αυτή παραβιάζεται ο 1ος θερμοδυναμικός νόμος.

Για την (γ) περίπτωση ο 1ος θερμοδυναμικός νόμος γράφεται:

$$Q = \Delta_h + W_i + \Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g$$

Για τους ίδιους λόγους τα Δ_h, ΔE_c, ΔE_{cf}, ΔE_g είναι μηδενικά και η σχέ1ση γράφεται:

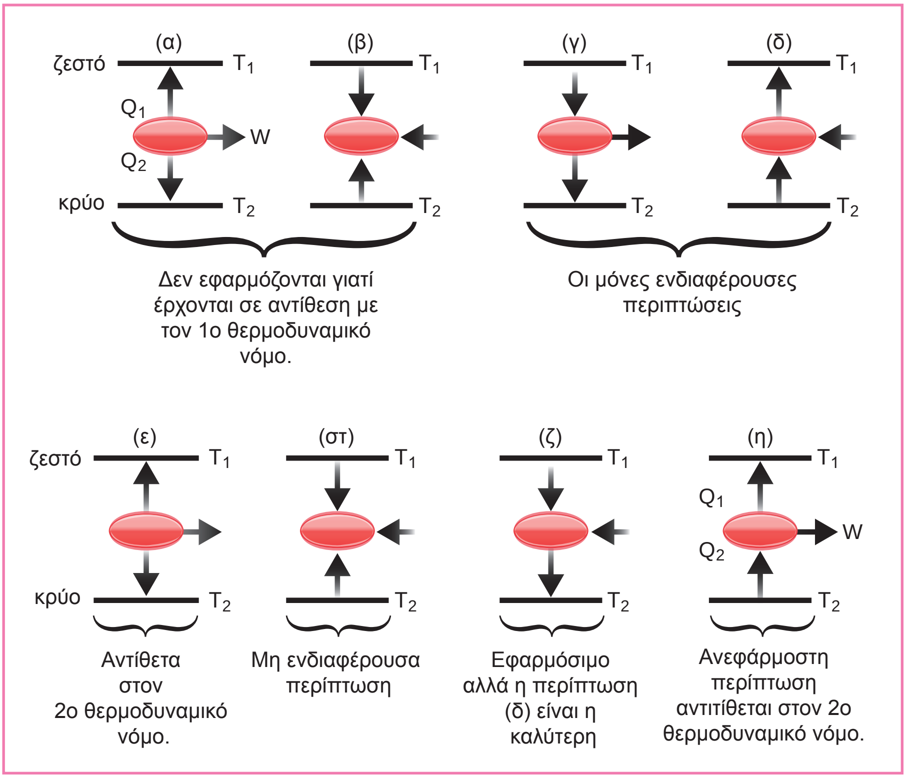
$$Q = W_i$$

Παρατηρείται ότι σ' αυτήν την περίπτωση ισχύει ο 1ος θερμοδυναμικός νόμος αλλά ούτε αυτή μπορεί να υπάρξει, διότι παραβιάζεται ο 2ος θερμοδυναμικός νόμος.

Πράγματι, η παραπάνω σχέση δείχνει ότι ένα ποσό θερμότητας που μπαίνει στο σύστημα, μετατρέπεται όλο σε έργο. Σύμφωνα με το 2ο θερμοδυναμικό νόμο, η θερμότητα, λόγω του ότι είναι κατώτερης ποιότητας ενέργεια, δεν μπορεί να μετατραπεί εξ' ολοκλήρου σε μηχανικό έργο.

Για την (δ) περίπτωση παρατηρείται ότι ισχύει και ο 1ος και ο 2ος θερμοδυναμικός νόμος. Είναι δηλαδή η μοναδική περίπτωση που μπορεί να υπάρξει θερμική μηχανή με μια πηγή θερμότητας. Ενα παράδειγμα μιας τέτοιος εφαρμογής είναι η ηλεκτρική θερμάστρα, στην οποία προσφέρουμε ηλεκτρική ενέργεια και παράγει θερμότητα.

Αν θεωρηθούν τώρα οι προηγούμενες συνθήκες με τη διαφορά ότι έχουμε δύο πηγές θερμότητας, τότε μπορούν να παρουσιαστούν οι παρακάτω περιπτώσεις: (σχήμα 8.1 .δ).



Σχήμα 8.1.δ

Από τα παραπάνω φαίνεται καθαρά ότι οι συνδυασμοί που μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη είναι οι περιπτώσεις (γ) και (δ).

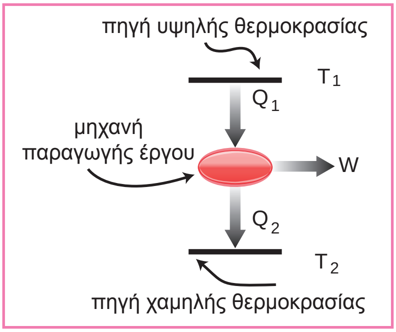
Ο συνδυασμός (γ) είναι εκείνος που εφαρμόζεται στις θερμικές μηχανές, που ακολουθούν τον κύκλο του Carnot.

Ο συνδυασμός (δ) είναι εκείνος που εφαρμόζεται στις αντλίες θερμότητας, που ακολουθούν τον αντίστροφο κύκλο του Carnot.

8.2.1. Θερμικές μηχανές που ακολουθούν τον κύκλο του Carnot

Στα προηγούμενα αποδείχθηκε ότι δεν μπορεί να παραχθεί μηχανικό έργο από μια θερμική μηχανή, που χρησιμοποιεί μια μόνο πηγή θερμότητας. Πάντα χρειαζόμαστε δυο πηγές, μια υψηλής θερμοκρασίας και μια χαμηλότερης θερμοκρασίας, η οποία θα απορροφά τη θερμότητα που αποβάλλεται.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αυτή η διαδικασία



Σχήμα 8.2.1.α: *Θερμική μηχανή που ακολουθεί τον κύκλο του Carnot*

Αν μια θερμική μηχανή ακολουθεί αυτή τη διαδικασία παραγωγής έργου, ορίζεται ως θερμικός βαθμός απόδοσης αυτής το πηλίκο:

$$\boxed{n_\theta = \frac{\text{ωφέλιμο αποτέλεσμα}}{\text{κατανάλωση ενέργειας}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}}$$

Σύμφωνα με τον 1ο θερμοδυναμικό νόμο το ωφέλιμο αποτέλεσμα είναι η διαφορά μεταξύ των ποσών της θερμότητας που μπαίνει στο σύστημα και εκείνης που βγαίνει απ' αυτό δηλ. $Q_1 - Q_2$

Η κατανάλωση ενέργειας για τις θερμικές μηχανές είναι πάντα το ποσό της θερμότητας που δίνει η πηγή υψηλής θερμοκρασίας.

Έτσι έχουμε:

$$\boxed{n_e = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}}$$

1ο Θεώρημα του Carnot

«Αν σε δύο θερμικές μηχανές το εργαζόμενο ρευστό λαμβάνει θερμότητα απ' την πηγή υψηλής σταθερής θερμοκρασίας T_1 και αποδίδει μέρος αυτής της θερμότητας στην πηγή χαμηλής σταθερής θερμοκρασίας T_2 και με την υπόθεση ότι αυτό γίνεται κατ' αντιστρεπτό τρόπο, οι δύο αυτές θερμικές μηχανές έχουν τον ίδιο θερμικό βαθμό απόδοσης.»

2ο Θεώρημα του Carnot

«Η απόδοση μιας μη αντιστρεπτής θερμικής μηχανής είναι πάντα μικρότερη απ' την απόδοση μιας αντιστρεπτής, όταν και οι δυο λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών». Η έννοια της αντιστρεπτής θερμικής μηχανής είναι ότι το εργαζόμενο ρευστό διαγράφει αντιστρεπτούς κύκλους.

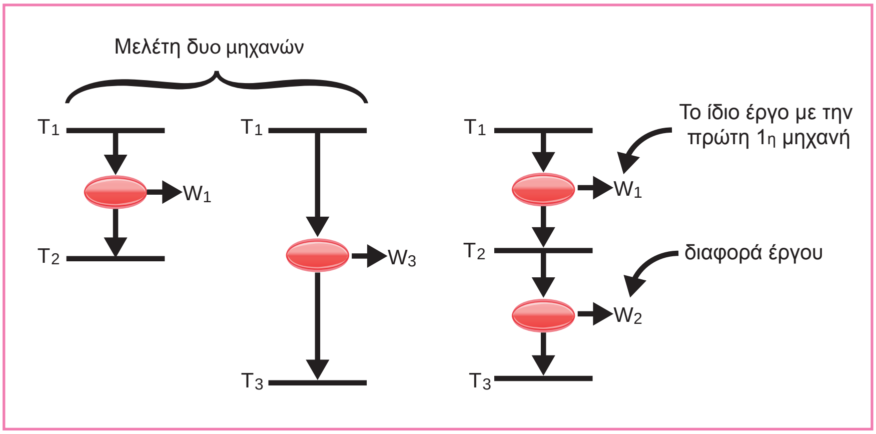
$$\eta_{\theta_{\alpha\nu\tau}} > \eta_{\theta_{\mu\alpha\nu\tau}}$$

(αντ. = αντιστρεπτή μηχανή, μαντ = μη αντιστρεπτή μηχανή)

3ο Θεώρημα του Carnot

«Για την ίδια υψηλή θερμοκρασία T_1, η θερμική μηχανή, η οποία εκμεταλλεύεται μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας ΔT, έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης, γιατί παράγει περισσότερο έργο.»

Η απόδειξη του θεωρήματος αυτού φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



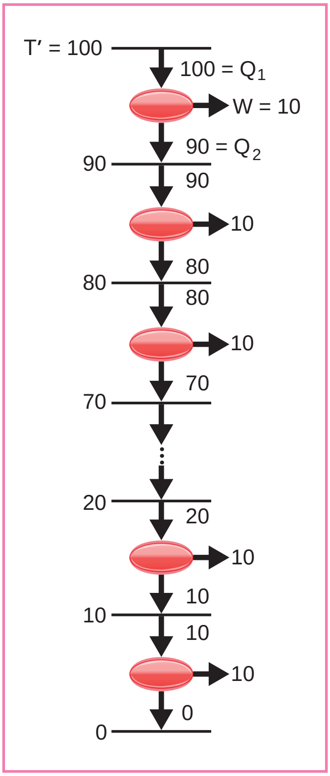
Σχήμα 8.2.1.β

Εδώ παρατηρούμε ότι, όταν η θερμοκρασία T_3 μειώνεται, το έργο W αυξάνεται και η ποσότητα θερμότητας Q_2 μειώνεται. Αυτή η παρατήρηση οδήγησε τον Kelvin στον ορισμό της γνωστής ήδη κλίμακας των θερμοκρασιών σε μονάδες Kelvin.

8.2.2. Κλίμακα θερμοκρασιών του Kelvin

Μετά την πάροδο περίπου 30 ετών από την ανακοίνωση της θεωρίας του Carnot, ο λόρδος Kelvin πρότεινε μια νέα κλίμακα μέτρησης των θερμοκρασιών, η οποία δε θα βασιζόταν στις διαστολές των υγρών ή των αερίων, αλλά θα βασιζόταν στη θεωρία των θερμικών μηχανών του Carnot.

Αυτός θεώρησε μια σειρά από θερμικές μηχανές που ακολουθούσαν τον θερμικό κύκλο του Carnot, όπου η κάθε μια θα παρήγαγε έργο ίσο με 10 μονάδες που θα λειτουργούσαν και θα εργάζονταν σε θερμοκρασίες, όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8.2.2.α΄ *Κλίμακα θερμοκρασιών Kelvin*

Στη συνέχεια αυτός είπε: «Ας επιλέξουμε μια κλίμακα θερμοκρασίας Τ΄, τέτοια ώστε να είναι ανάλογη με το ποσό της θερμότητας Q». Για παράδειγμα, όταν το Q = 90 αυτός πρότεινε η θερμοκρασία T, η οποία αντιστοιχεί σ' αυτήν την πηγή, να είναι T = 90 βαθμοί και αυτό να ισχύει για κάθε θερμική μηχανή δηλ. T_1 ανάλογο του Q_1 και

$$\frac{T'_2}{T'_1} = \frac{Q_2}{Q_1}$$

Αν ληφθεί υπόψη η σχέση

$$n_\theta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

τότε θα έχουμε

$$n_\theta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \tag{8.14}$$

Αυτή η κλίμακα θερμοκρασιών, που ορίστηκε με όρους μηχανικού έργου και θερμότητας σε μια μηχανή που ακολουθεί τον κύκλο του Carnot, ονομάστηκε κλίμακα Kelvin Τ΄.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, αυτή η κλίμακα θερμοκρασιών προ έκυψε από καθαρά θερμοδυναμικές έννοιες και δεν μπορεί να συνδέεται με τις άλλες κλίμακες προσδιορισμού της θερμοκρασίας όπως του Κελσίου (C) ή του Φαρενάιτ (F).

Στα παρακάτω θα γίνει προσπάθεια να κατασκευαστεί μια θερμική μηχανή, η οποία μπορεί να παράγει έργο σύμφωνα με τις αρχές της θεωρίας του Carnot. Το εργαζόμενο ρευστό θεωρείται ιδανικό και ότι έχει μάζα 1 kgr και αυτό, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, για την απλοποίηση του προβλήματος.

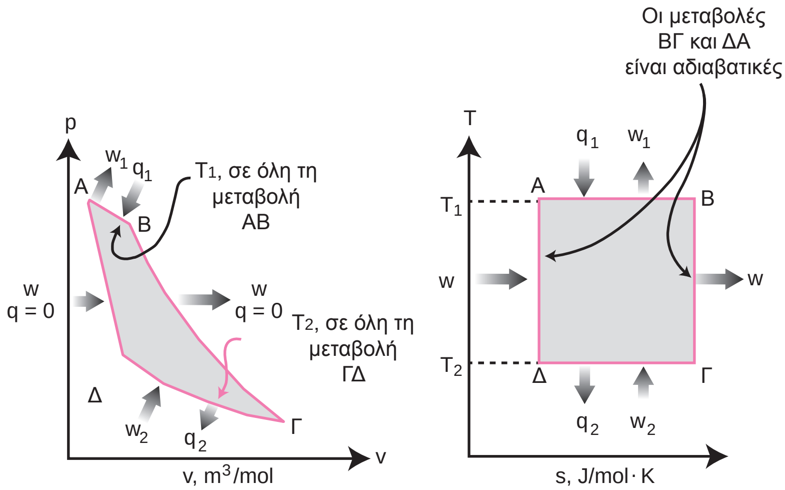
Για να υπάρχει μια τέτοια μηχανή, θα πρέπει να μπορεί να συμπιέσει α διαβατικά το ρευστό από τις συνθήκες του σημείου Β, στις συνθήκες του σημείου Γ. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί συμπιέζοντας το ρευστό μέσα σ’ ένα κύλινδρο.

Στις συνθήκες του σημείου Γ θα πρέπει το ρευστό να δέχεται ισόθερμα ποσά θερμότητας από την πηγή υψηλής σταθερής θερμοκρασίας. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ενός εναλλάκτη θερμότητας. Μετά τη λήψη του ποσού αυτού της θερμότητας το ρευστό θα βρίσκεται στις συνθήκες του σημείου Δ.

Στο αέριο ρευστό που βρίσκεται σ’ αυτές τις συνθήκες, δίνεται η ευκαιρία να εκτονωθεί αδιαβατικά μέχρι τις συνθήκες του σημείου Α. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας το μηχανισμό έμβολο – κύλινδρος. Από αυτές τις συνθήκες θα πρέπει να δοθεί η δυνατότητα στο ρευστό να αποβάλει θερμότητα στην πηγή χαμηλής θερμοκρασίας και αυτή η μεταβολή είναι εφικτή και το ρευστό μπορεί να φτάσει μετά την αποβολή της θερμότητας στις συνθήκες του σημείου Β.

Παρατηρούμε ότι το ρευστό πραγματοποίησε ένα θερμοδυναμικό κύκλο και συνεπώς, αν αυτό εργαστεί στα κινητά μέρη της μηχανής, θα παράγει έργο.

Ο θερμικός βαθμός αυτής της μηχανής θα είναι ο καλύτερος από οποιαδήποτε άλλη μηχανή, στην οποία το ρευστό θα λαμβάνει τις ίδιες συνθήκες, αλλά οι μεταβολές θα είναι μη αντιστρεπτές. Ακόμα τον ίδιο κύκλο, αν τον διαγράψει ένα πραγματικό ρευστό που θα εργάζεται, αυτό θα έχει μικρότερο βαθμό απόδοσης.



Σχήμα 8.2.2.β

Με υπόδειγμα τα προηγούμενα σχέδια, ας προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε το θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου.

$$n_\theta = \frac{\text{ωφέλιμο αποτέλεσμα}}{\text{κατανάλωση ενέργειας}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

Το ποσό θερμότητας Q_1 θα υπολογιστεί ως εκείνο το ποσό θερμότητας που αποσπάστηκε ισόθερμα στο σύστημα, όταν αυτό αντιστρεπτά πήγε από τις συνθήκες 3 στην 4. Γι' αυτή τη μεταβολή γράφουμε την αρχή της διατήρησης της ενέργειας

$$Q_1 = \Delta U + W_e + \Delta Ec + \Delta E_{cf} + \Delta E_g$$

Στην τελευταία εξίσωση ισχύει ότι $\Delta U = 0$ (γιατί $\Delta U = C_v \cdot \Delta T$ και $\Delta T = 0$). Είναι επίσης ΔE_c, ΔE_{cf}, μηδενικά από υπόθεση. Έτσι η σχέση γράφεται:

$$Q_1 = W_e$$

Είναι γνωστόν ότι το W_e είναι το έργο των δυνάμεων επιφανείας του συστήματος και ισούται:

$$W_e = \Sigma_3^4 P \cdot \Delta V = \Sigma_3^4 RT_1 \frac{\Delta V}{V} = RT_1 \Sigma_3^4 \frac{\Delta V}{V} = RT_1 \ln\frac{V_4}{V_3}$$

δηλ

$$Q_1 = RT_1 \ln\frac{V_4}{V_3}$$

Για τον υπολογισμό του Q2, εργαζόμαστε, όπως πιο πάνω, και καταλήγουμε

$$Q_2 = -RT_2 \ln\frac{V_2}{V_1} = RT_2 \ln\frac{V_1}{V_2}$$

Το σημείο (– ·) δείχνει ότι η θερμότητα βγαίνει από το σύστημα

$$n_\theta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Παρατηρείται ότι βρέθηκε η ίδια σχέση, που είχε προτείνει ο λόρδος Kelvin για την κλίμακα των απολύτων θερμοκρασιών.

Αυτό αποδεικνύει ότι η κλίμακα θερμοκρασίας των ιδανικών αερίων είναι ισοδύναμη με την κλίμακα έργου του Kelvin και T = T΄. Ως εκ τούτου, θα χρησιμοποιούμε πάντα τη θερμοκρασία T.

Επειδή ο Kelvin έκανε αυτήν την ανακάλυψη, ονομάσαμε την κλίμακα απόλυτης θερμοκρασίας προς τιμή του κλίμακα Kelvin. Ετσι μπορούμε να προχωρήσουμε σίγουροι ότι η συνηθισμένη κλίμακα ιδανικών αερίων συμπίπτει με τη θερμοδυναμική κλίμακα θερμοκρασίας.

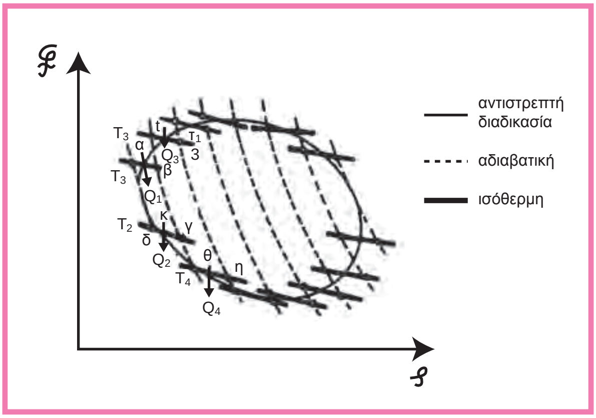
Υπενθυμίζεται ακόμη μια φορά ότι θεωρείται θετικό το ποσό εκείνο που μπαίνει και αρνητικό αυτό που βγαίνει από το σύστημα.

$$\frac{-Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

ή ακόμη

$$\frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} = 0$$

Θεωρείται ένας τυχαίος θερμοδυναμικός κύκλος, όπως στο σχήμα 8.2.2.γ



Σχήμα 8.2.2.γ

Από αυτό προκύπτει ότι ο θερμικός κύκλος μπορεί να θεωρηθεί ότι α ποτελείται από άπειρους επί μέρους κύκλους Carnot, που για τον καθένα θα ισχύει η παρακάτω σχέση

$$\frac{Q_2}{T_2}+\frac{Q_1}{T_1}=0$$

Συνεπώς, για όλο τον κύκλο ας γράψουμε

$$\frac{Q_1}{T_1}+\frac{Q_2}{T_2}+\frac{Q_3}{T_3}+=0$$

ή

$$\sum_{i=1}^{\infty}\frac{Q_i}{T_i}=0$$

Αυτή η ποσότητα ισχύει για τις αντιστρεπτές κυκλικές θερμοδυναμικές μεταβολές και εκφράζει τη μεταβολή της εντροπίας του συστήματος.

Ετσι, για κάθε αντιστρεπτή θερμοδυναμική μεταβολή του συστήματος και του περιβάλλοντος η μεταβολή της εντροπίας είναι μηδενική.

και για

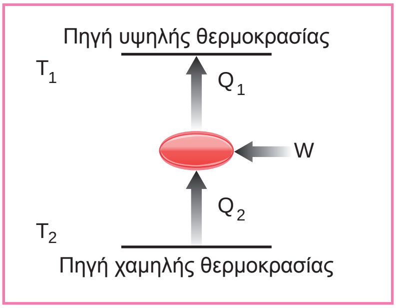
$$\Sigma_{ολ}\,\Delta S=0$$

Αν οι θερμοδυναμικές μεταβολές είναι μη αντιστρεπτές –όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα– τότε η μεταβολή του συστήματος και του περιβάλλοντος χώρου –όπως ήδη αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο– είναι πάντοτε θετική.

$$\Sigma_{ολικό}\,\Delta S>0$$

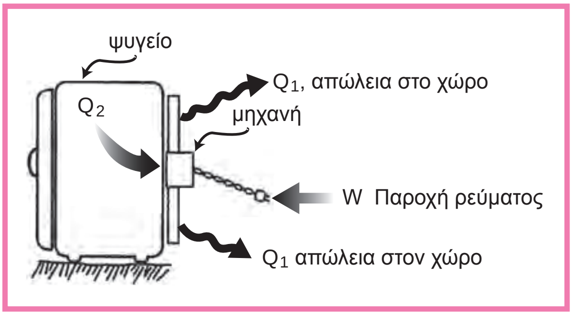
8.2.3 Αντίστροφος κύκλος του Carnot

Στην προηγούμενη παράγραφο απεδείχθη ότι είναι δυνατόν να υπάρχει θερμική μηχανή, όπως στο σχήμα 8.2.3.α



Σχήμα 8.2.3.α

δηλαδή ισχύει η περίπτωση, κατά την οποία μπορούμε να αντλήσουμε ποσά θερμότητας από την πηγή χαμηλής σταθερής θερμοκρασίας στην πηγή υψηλής σταθερής θερμοκρασίας (T_1) προσφέροντας στη θερμική μηχανή ένα εσωτερικό έργο W. Παράδειγμα τέτοιου είδους μηχανής είναι το ηλεκτρικό ψυγείο.



Σχήμα 8.2.3.β: ***Ηλεκτρικό ψυγείο***

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης στις μηχανές αυτές, που το εργαζόμενο ρευστό διαγράφει ένα αντίστροφο κύκλο του Carnot, ορίζεται με δυο διαφορετικούς τρόπους. Για τα ψυκτικά μηχανήματα και τις αντλίες θερμότητας το καλοκαίρι και για τις αντλίες θερμότητας του χειμώνα.

Στη δεύτερη περίπτωση ορίζεται

$$COP = \frac{\text{Ψυκτικό φορτίο}}{\text{Κατανάλωση ενέργειας}}$$

COP = **C**oefficient **o**f **p**erformance και σημαίνει συντελεστής απόδοσης

$$COP = \frac{Q_2}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

Για τη δεύτερη περίπτωση ορίζεται

$$\boxed{COP' = \frac{\text{θερμικό φορτίο}}{\text{κατανάλωση ενέργειας}}}$$

$$\boxed{COP' = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}}$$

Παρατηρείται ότι ισχύουν οι σχέσεις

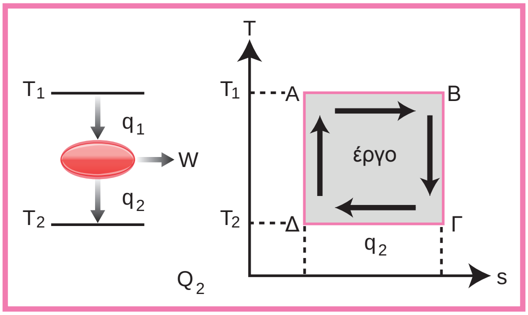
$(COP)_{\text{πραγματικό}} < (COP)_{\text{ιδανικό}}$

$(COP')_{\text{πραγματικό}} < (COP')_{\text{ιδανικό}}$

8.2.4. Διάγραμμα T – S για τον κύκλο του Carnot

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται ο θερμικός κύκλος του Carnot στο διάγραμμα συντεταγμένων T - S.

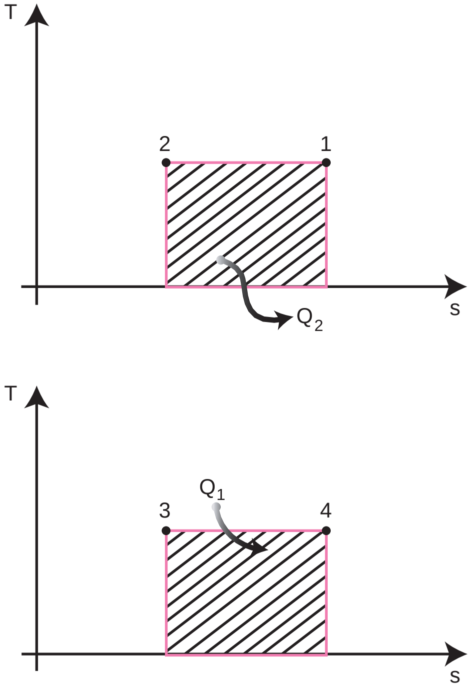
Στην περίπτωση της θερμικής μηχανής παραγωγής μηχανικού έργου ο κύκλος του Carnot είναι όπως στο σχήμα 8.2.4.α.



Σχήμα 8.2.4.α

Παρατηρήσεις

Υπενθυμίζεται ότι το εμβαδόν, που περικλείεται από τη θερμοδυναμική μεταβολή και από τον άξονα των τεταγμένων στο διάγραμμα T-S, παριστάνει το ποσό της θερμότητας.



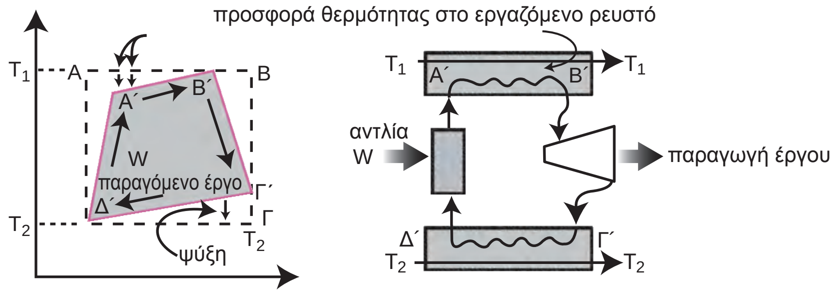
Σχήμα 8.2.4.β

8.2.5. Κύκλος του Carnot για πραγματικές θερμικές μηχανές

Ο κύκλος του Carnot αποτελείται από τέσσερις θερμοδυναμικές μεταβολές και συγκεκριμένα από δυο ισόθερμες και δυο αδιαβατικές. Αυτές απο τελούν τις ιδανικές συνθήκες, κατά τις οποίες μπορεί να εργαστεί ένα ιδανικό ρευστό για την παραγωγή έργου.

Στην πραγματικότητα όμως ούτε τα ρευστά είναι ιδανικά αλλά ούτε και οι θερμοδυναμικές μεταβολές αντιστρεπτές. Συνεπώς, ο πραγματικός κύκλος του Carnot διαφέρει από εκείνο το θεωρητικό. Η προσπάθεια που συνεχώς γίνεται, είναι ο πραγματικός κύκλος του Carnot, που διατρέχει ένα πραγματικό ρευστό να πλησιάζει, όσο το δυνατόν, εκείνο το θεωρητικό, εξελίσσοντας την τεχνολογία των θερμικών μηχανών.

Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται ένα παράδειγμα ενός κύκλου του Carnot με ένα θεωρητικό.



Σχήμα 8.2.5.α

Είναι προφανές ότι ισχύουν οι σχέσεις

◆ Για τις θερμικές μηχανές παραγωγής έργου

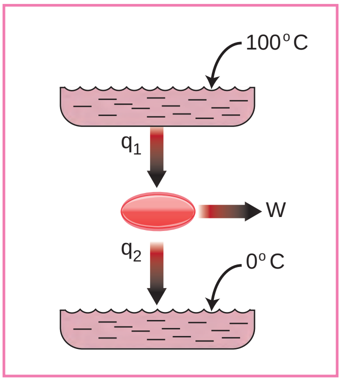
$$\boxed{W_{\text{μη αντιστρεπτό}} < W_{\text{αντιστρεπτό}}}$$

◆ Για τις αντλίες θερμότητας

$$\boxed{W_{\text{μη αντιστρεπτό}} < W_{\text{αντιστρεπτό}}}$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

1. Δίνεται θερμική μηχανή παραγωγής μηχανικού έργου, η οποία αντλεί θερμότητα από δεξαμενή υψηλής σταθερής θερμοκρασίας $T_1 = 100^\circ C$ και την αποδίδει στη δεξαμενή χαμηλής σταθερής θερμοκρασίας $T_2 = 0^\circ C$. Ζητείται να βρεθεί ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυτής της θερμικής μηχανής



Σχήμα 8.2.5.β

Λύση

Θεωρώντας ότι οι μηχανές έχουν μεγάλη χωρητικότητα, μπορούμε να γράψουμε

$$n_\theta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

είναι

$$T_1 = 273 + 100 = 373 \text{ K}$$

$$T_2 = 273 + 0 = 273 \text{ K}$$

Η προηγούμενη σχέση δίνει

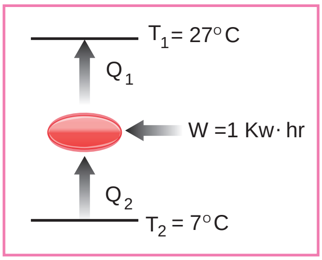
$$n_\theta = \frac{373 - 273}{373} \Rightarrow n_\theta = 0.268$$

δηλαδή ο βαθμός απόδοσης είναι 26,8%.

2. Θέλουμε να θερμάνουμε με αντλία θερμότητας το εσωτερικό οικίας στους 27° C, με τη χρήση αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιεί το νερό της λίμνης (όπως στο σχήμα 8.2.5.γ), το οποίο έχει θερμοκρασία 7° C, προσδίδοντας στη θερμική μηχανή μηχανικό έργο 1 KWh. Να βρεθεί το COP΄

Λύση

Στο πιο κάτω σχήμα φαίνεται η αρχή λειτουργίας της θερμικής μηχανής



Σχήμα 8.2.5.γ

Ο συντελεστής COP΄ θα δίνεται από τη σχέση

$$COP' = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

όπου T_1 είναι 300K, T_2 = 280 K και το προσδιδόμενο έργο 1 KWh.

Από τη προηγούμενη σχέση

$$Q_1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = W \Rightarrow Q_1 = \frac{300}{300 \cdot 280} \cdot 1$$

Q_1 = 15 KWh

Συνεπώς, το

$$COP' = \frac{15\ \text{KWh}}{1\ \text{KWh}} = 15$$

Παρατηρείται ότι αυτό είναι πολύ μεγάλο και στην πράξη το COP΄ $\simeq$ 3 λόγω των διαφόρων απωλειών.

ΕΞΕΡΓΕΙΑ

8.3 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι σε όλους γνωστό ότι οι ενεργειακοί πόροι του πλανήτη μας είναι περιορισμένοι. Αυτό σημαίνει ότι είναι υποχρέωση όλων ο περιορισμός της σπατάλης των ενεργειακών αυτών πόρων, για να μπορέσει να αντεπεξέλ θει στις ανάγκες των μελλοντικών γενεών. Στην προσπάθεια αυτή συμβάλλει η οικονομία των πόρων αυτών, η οποία οδήγησε στην ανάπτυξη μιας νέας τεχνικής της **"εξοικονόμησης ενέργειας"**.

Είναι γνωστό ότι ο **πρώτος θερμοδυναμικός νόμος** εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας και αυτό χρησιμοποιείται σαν ένα αναγκαίο εργαλείο για το ισοζύγιο της ενέργειας, κατά τη διάρκεια μιας θερμοδυναμικής μεταβολής, χωρίς όμως να προσφέρει στο Μηχανολόγο ιδιαίτερες πληροφορίες στην κατασκευή και λειτουργία των μηχανών.

Αντίθετα, **ο 2ος Θερμοδυναμικός νόμος**, όπως έχει ήδη αναφερθεί, α σχολείται με την **ποιότητα της ενέργειας** και ειδικότερα, αφορά:

- Στον υποβιβασμό της ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας θερμοδυναμικής μεταβολής
- Στη μεταβολή της εντροπίας των συστημάτων
- Στις χαμένες ευκαιρίες δυνατότητας παραγωγής έργου, αυτός δηλ. προσφέρει στην τέχνη του Μηχανολόγου ένα ευρύ πεδίο για βελτιώσεις των Μηχανολογικών εφαρμογών, τόσο για την εκμετάλλευση, όσο και για την εξοικονόμηση της ενέργειας.

Επομένως, ο δεύτερος **Θερμοδυναμικός νόμος** αποδείχθηκε ότι **είναι ένα ισχυρό εργαλείο στη διάθεση του Μηχανολόγου**, τόσο για τη βελτίω1ση της απόδοσης των θερμικών μηχανών, όσο και για τη βελτιστοποίηση σύνθετων θερμοδυναμικών προβλημάτων.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται προσπάθεια να εξεταστεί ο σχεδιασμός και η λειτουργία Μηχανολογικών συσκευών με την εφαρμογή των πορισμάτων του 2ου νόμου της Θερμοδυναμικής.

Η προσπάθεια αυτή αρχίζει με την εισαγωγή της έννοιας της **εξέργειας** στη Θερμοδυναμική επιστήμη.

Την έννοια αυτή μπορεί κανείς να τη συναντήσει με τον όρο **διαθεσιμότητα** (availability).

Αυτή ορίζεται ως το ωφελικό αποτέλεσμα (έργο), που μπορεί να πα ραχθεί από ένα σύστημα, το οποίο βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση και σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον.

Στη συνέχεια η προσπάθεια αυτή συνεχίζεται με την εισαγωγή της έννοιας του **αντιστρεπτού έργου**, που είναι το μέγιστο ωφέλιμο έργο που μπορεί να ληφθεί από ένα σύστημα, που υφίσταται μια μεταβολή μεταξύ δυο καθορισμένων θερμοδυναμικών καταστάσεων.

Τέλος, συμπληρώνεται η ανάλυση αυτή με την έννοια της **μη αντιστρεπτικότητας**, η οποία παριστάνει το χαμένο δυναμικό έργο κατά τη διάρκεια μιας θερμοδυναμικής μεταβολής, εξαιτίας της εμφανίσεως μη αντιστρεπτών μεταβολών και καταλήγει στον ορισμό της **θερμικής απόδοσης** με την εφαρμογή του δεύτερου νόμου.

Στο βιβλίο αυτό θα ασχοληθούμε λεπτομερώς μόνο με την έννοια της **εξέργειας**, ενώ για τα άλλα δυο θα δοθούν μόνο παραδείγματα.

8.3.1. Μέγιστη δυνατότητα της ενέργειας για την παραγωγή έργου

Κάθε φορά που βρισκόμαστε μπροστά σε ένα πρόβλημα παραγωγής μηχανικού έργου από την εκμετάλλευση μιας πηγής ενέργειας, πρώτο μέλημα μας είναι να εκτιμήσουμε την ποσότητα της ενέργειας, που περιέχεται σ' αυτήν την πηγή. Για παράδειγμα η ανακάλυψη ενός γεωθερμικού πηγαδιού το πρώτο μέλημά μας είναι να εκτιμηθεί η ποσότητα της ενέργειας που περιέχεται σ' αυτή τη πηγή. Είναι αυτονόητο ότι η πληροφορία αυτή από μόνη της δεν είναι αρκετή, για να αποφασιστεί ή όχι η εγκατάσταση μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό που πραγματικά θα πρέπει να μας είναι γνωστό, για να προχωρήσει η εγκατάσταση είναι η δυνατότητα παραγωγής έργου ή το δυναμικό έργο της πηγής ή, με άλλα λόγια, η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να εξαχθεί με τη μορφή ωφέλιμου έργου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το υπόλοιπο μέρος της ενέργειας θα πεταχθεί τελικά σα χαμένη ενέργεια και δεν αξίζει να λαμβάνεται υπόψη.

Επομένως, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να υπάρχει μια παράμετρος, η οποία θα μας επιτρέπει εκ των προτέρων τον καθορισμό της δυνατότητας παραγωγής ωφέλιμου έργου από μια δεδομένη ποσότητα ενέργειας, που έχει συγκεκριμένη μορφή και βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση. Η παράμετρος αυτή είναι η **"εξέργεια"**, η οποία, όπως προαναφέραμε, ονομάζεται και "διαθεσιμότητα" ή διαθέσιμη ενέργεια.

Όταν ένα σύστημα βρίσκεται σε συγκεκριμένη θερμοδυναμική κατάσταση, το δυναμικό έργο της ενέργειας που περιέχεται μέσα σε αυτό, είναι απλά το μέγιστο ωφέλιμο έργο, που μπορεί να δώσει αυτό το σύστημα.

Υπενθυμίζεται ότι το έργο που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας θερμοδυναμικής μεταβολής εξαρτάται:

α) Από την **αρχική κατάσταση**, στην οποία βρίσκεται το σύστημα

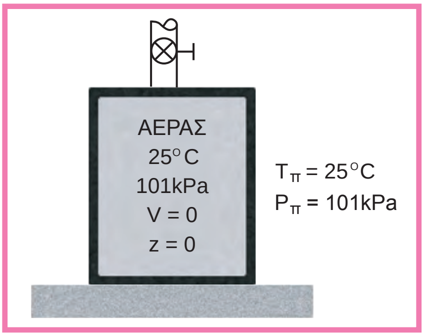
β) Από την **τελική κατάσταση**, που βρίσκεται το σύστημα

γ) Από τη **διαδρομή**, μέσα από την οποία πραγματοποιείται η θερμοδυναμική μεταβολή.

Στην ανάλυση της παραμέτρου της εξέργειας η αρχική κατάσταση είναι πάντοτε καθορισμένη, με αποτέλεσμα να μην αποτελεί μεταβλητή του προβλήματος. Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα, το έργο που πραγματοποιεί ένα σύστημα στο περιβάλλον του μεγιστοποιείται, όταν αυτό προέρχεται από μια θερμοδυναμική μεταβολή αντιστρεπτή μεταξύ δυο θερμοδυναμικών καταστάσεων.

Είναι προφανές ότι, για να μεγιστοποιηθεί το έργο αυτό, θα πρέπει το σύστημα στο τέλος της θερμοδυναμικής μεταβολής να βρεθεί στο τέλος της πλήρους εξάντλησης.

Ενα σύστημα λέγεται ότι βρίσκεται στην κατάσταση πλήρους εξάντλησης, όταν βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το περιβάλλον του. Στο πιο κάτω παράδειγμα δίνεται ένα σύστημα που βρίσκεται σε πλήρη εξάντληση σε σχέση με το περιβάλλον του.



Σχήμα 8.3.1.α

Σύστημα που βρίσκεται σε ισορροπία με το περιβάλλον, λέγεται ότι βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης.

Στο πιο πάνω σχήμα το σύστημα:

α) έχει θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος, δηλ. βρίσκεται σε μηχανική και θερμική ισορροπία με αυτό

β) δεν έχει καθόλου κινητική ή δυναμική ενέργεια σε σχέση με το πε1ριβάλλον του (η ταχύτητα του ρευστού V= 0, γιατί ηρεμεί και Z = 0, γιατί βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας)

γ) δεν αντιδρά με το περιβάλλον του. Επιπλέον, δεν υπάρχουν ασταθή φαινόμενα μαγνητικού ή ηλεκτρικού τύπου μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντος.

Η έννοια της μεγιστοποίησης του έργου εξόδου ενός συστήματος υπάρχει, όταν αυτό φτάσει σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης μετά το τέλος της θερμοδυναμικής μεταβολής και μπορεί να εξελιχθεί ως εξής:

Εάν η **θερμοκρασία** του συστήματος στην **τελική κατάσταση** είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος του, τότε είναι πάντα **δυνατή η παραγωγή έργου** με τη λειτουργία μιας θερμικής μηχανής μεταξύ αυτών των δυο θερμοκρασιών.

Εάν η **τελική πίεση** του συστήματος είναι μεγαλύτερη από την πίεση του περιβάλλοντος, τότε είναι ακόμη **δυνατή η παραγωγή έργου**, εφόσον επιτραπεί η εκτόνωση του συστήματος στην πίεση του περιβάλλοντος.

Εάν η **τελική ταχύτητα** του συστήματος δεν είναι μηδενική, τότε η κινητική αυτή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα στρόβιλο, που θα τη μετατρέψει σε μηχανικό έργο.

Ένα σύστημα που βρίσκεται αρχικά σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης, δεν μπορεί να παράγει έργο. Παρατηρείται ότι η ατμόσφαιρα που μας περιβάλλει, περιέχει μια τεράστια ποσότητα ενέργειας όμως, η ενέργεια αυτή βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης και δεν περιέχει δυναμικό έργο.

Επομένως, υποστηρίζεται ότι ένα σύστημα θα μεταφέρει το μέγιστο δυνατό έργο, όταν αυτό θα πραγματοποιεί μια αντιστρεπτή θερμοδυναμική μεταβολή από την καθορισμένη αρχική κατάσταση, έως εκείνη την κατάσταση του περιβάλλοντος του. Αυτό παριστάνει τη δυνατότητα του συστήματος για την παραγωγή ωφέλιμου έργου και είναι αυτό που ονομάζεται **“εξέργεια”**.

Είναι σημαντικό να κατανοηθεί ότι η παράμετρος “**εξέργεια**” δεν παριστάνει την πραγματική ποσότητα του έργου, που θα παράγει με την εγκατάστασή της μια συσκευή παραγωγής έργου. Αντίθετα, παριστάνει το ανώτερο όριο της ποσότητας του έργου, που μπορεί να παράγει μια συσκευή, χωρίς να παραβιάζει κάποιον από τους νόμους της θερμοδυναμικής. Πάντα θα υπάρχει μια μικρή ή μια μεγάλη διαφορά ανάμεσα στην ενέργεια και στο πραγματικό έργο, που θα παράγεται από μια συσκευή. Η διαφορά αυτή υποστηρίζεται ότι είναι τα περιθώρια, στα οποία οι τεχνικοί έχουν τη δυνατότητα να κάνουν τις βελτιώσεις για την εξοικονόμηση ενέργειας. Σημειώνεται ότι η εξέργεια ενός συστήματος σε μια δεδομένη κατάσταση εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος του ή, μπορούμε να πούμε, από την κατάσταση πλήρους εξάντλησης και από τις παραμέτρους του συστήματος.

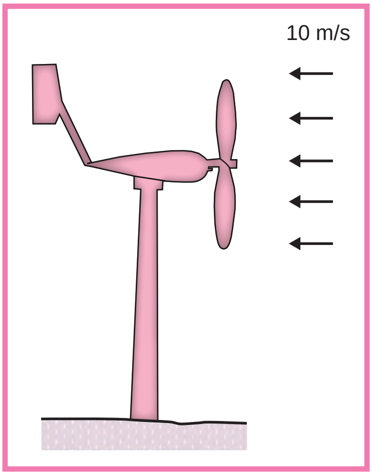
Επομένως, **η εξέργεια** είναι μια **παράμετρος του συνδυασμού «συστήματος – περιβάλλοντος»** και όχι μόνο του συστήματος. Δηλ. το να μεταβάλει κάποιος το περιβάλλον ενός συστήματος είναι ένας άλλος τρόπος, για να αυξήσει την εξέργεια του, αλλά κάτι τέτοιο, τέλος, δεν είναι τόσο εύκολο.

Αναφέρεται ότι, αντί για τον όρο “διαθεσιμότητα” που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στις Η.Π.Α. κατά τη δεκαετία του 1940, σήμερα χρησιμοποιείται ο ισοδύναμος όρος της εξέργειας που χρησιμοποιήθηκε στην Ευρώπη της δεκαετίας του 1950, και γι’ αυτό το λόγο θεωρήθηκε υποχρεωτική η εισαγωγή σ’ αυτό το βιβλίο.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8.3.2

Προσδιορισμός μέγιστης ισχύος ανεμογεννήτριας

Ο ανεμόμυλος που φαίνεται στο σχήμα, έχει ένα ρότορα διαμέτρου 14 m και πρόκειται να εγκατασταθεί σε μια περιοχή, όπου ο αέρας φυσάει με V = 10 m/s. Να υπολογισθεί η διαθέσιμη ισχύς για τον ανεμόμυλο. (Σχήμα 8.3.2.α)



Σχήμα 8.3.2.α

Λύση

Ο αέρας που κινείται, έχει τις ίδιες ιδιότητες με τον αέρα που βρίσκεται σε ηρεμία, με τη διαφορά ότι ο πρώτος έχει ταχύτητα, άρα κινητική ενέργεια.

Ο αέρας θα φθάσει σε κατάσταση πλήρους εξάντλησης, όταν αναγκαστεί να σταματήσει τελείως. Επομένως, στην προκειμένη περίπτωση η “εξέργεια" του αέρα που κινείται, δεν είναι άλλη παρά η κινητική του ενέργεια δηλαδή:

$$\text{Εξέργεια} = \frac{V_2}{2} = \frac{100\,m^2/s^2}{2} = 50\frac{m_2/s_2}{kg}$$

$$= m^2 kg/s^2 = 50 J/kg = 0{,}05\,KL/kg$$

Αυτό σημαίνει ότι κάθε μονάδα μάζας του αέρα που κινείται με 10m/s, έχει τη δυνατότητα να παράγει έργο ίσο με 0,05 KJ/kg. Δηλ. ένας τέλειος ανυψωτήρας, που αναγκάζει τον αέρα να σταματήσει τελείως, όταν αυτός πέσει επάνω του, θα εκμεταλλεύεται ένα δυναμικό έργο (εξέργεια) ίσο με 0, 05 KJ/kg.

Για να βρεθεί η διαθέσιμη ισχύς αυτής, πρέπει να είναι γνωστή η ποσό1τητα του αέρα, που διέρχεται δια μέσου των πτερυγίων της ανεμογεννή τριας στη μονάδα του χρόνου, δηλ. η παροχή της μάζας του αέρα. Παροχή μάζας

$$m = \rho \cdot A \cdot V$$

όπου : m : παροχή της μάζας

ρ: πυκνότητα του αέρα

Α: ισοδύναμος διατομή προσπτώσεως του αέρα

V: ταχύτητα του αέρα

$$\dot{m} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2 \cdot V}{4}$$

Από πίνακες βρίσκουμε ότι σε πίεση 1 kg_f / m^2 και θερμοκρασία 25° C και η πυκνότητα του αέρα είναι ρ = 1,18 kg/m^3.

Με την αντικατάσταση έχουμε

$$\dot{m} = \left(1{,}18/m^3\right) \cdot \left(\frac{3{,}14}{4}\right)(14\,m)^2\left(10\frac{m}{s}\right) = 129{,}68\,kg/s$$

Επομένως, η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς θα είναι:

Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς = $\dot{m}$: x εξέργεια

= 129,68 kg/s x 0,05 KJ/kg = 6,48 KW

Παρατηρείται ότι η εξέργεια είναι ίση με την κινητική ενέργεια του αέρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κινητική ενέργεια είναι μια ενέργεια ανώτερης ποιότητας.

8.3.3 Παραγωγή θερμικής ενέργειας από ένα καυστήρα

Δίνεται καυστήρας που μπορεί να περιέχει ενέργεια με τη μορφή θερμότητας με ρυθμό 2.016 Kcal/s στους 1.111 K, και ζητείται να βρεθεί η εξέργεια της διαθέσιμης ενέργειας, όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι 25˚ C.

Λύση

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυτής της μηχανής θα δίνεται από την παρακάτω σχέση με την υπόθεση ότι η θερμική μεταβολή που πραγματοποιείται είναι αντιστρεπτή

$$n_{\theta,\,max} = n_{\theta,\,\alpha\nu\tau} = \frac{\text{ωφέλιμο αποτέλεσμα}}{\text{κατανάλωση ενέργειας}} =$$

$$= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{298}{1 \cdot 111}$$

$$= 1 - 0{,}2682 = 0{,}732 \text{ ή } 73{,}2\%$$

Αυτό σημαίνει ότι μια θερμική μηχανή μπορεί να μετατρέψει αυτήν την παρεχόμενη θερμική ενέργεια στην καλύτερη περίπτωση το 73,2% της θερμότητας που λαμβάνει από τον καυστήρα σε έργο.

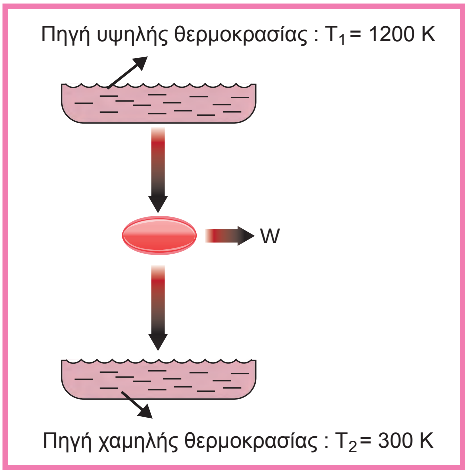
Η εξέργεια αυτού του καυστήρα είναι ισοδύναμη με την ισχύ που παρά γεται από τη θερμική μηχανή, στην οποία οι θερμοδυναμικές μεταβολές είναι αντιστρεπτές.

Παρατηρείται ότι το 26,8% της ενέργειας που μεταφέρεται από τον καυστήρα με τη μορφή θερμότητας, δεν είναι διαθέσιμο για την παραγωγή έργου.

Το τμήμα της ενέργειας που δεν είναι διαθέσιμο, ονομάζεται μη διαθέσιμη ενέργεια. Η μη διαθέσιμη ενέργεια είναι απλά, σε αυτήν την περίπτωση, η διαφορά ανάμεσα στη συνολική ενέργεια ενός συστήματος σε μια καθορισμένη κατάσταση και την εξέργεια της ενέργειας αυτής.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8.3.4

Δίνεται θερμική μηχανή, που φαίνεται στο σχήμα 8.3.4.α. Αυτή δέχεται θερμότητα από μια πηγή θερμοκρασίας 1200 K με ρυθμό 500 KJ/s και απορρίπτει τη χαμένη θερμότητα σε ένα μέσο θερμοκρασίας 300 K. Η ισχύς εξόδου της θερμικής μηχανής είναι 180 KW. Να υπολογιστεί η ισχύς, την οποία μπορεί να δώσει η θερμική μηχανή, όταν οι θερμοδυναμικές μεταβολές του ρευστού αυτής θεωρηθούν αντιστρεπτές και να βρεθεί ο ρυθμός της μη αντιστρεπτικότητας αυτής της μηχανής.



Σχήμα 8.3.4.α

Λύση

Στην πρώτη περίπτωση, η ποσότητα της ισχύος που παρήγαγε η θερμική μηχανή θα είναι: ίση με εκείνη της θερμικής μηχανής που το ρευστό θα λειτουργούσε σύμφωνα με το κύκλο του Carnot στα ίδια όρια θερμοκρασίας.

Σ' αυτήν την περίπτωση θα είναι

$$n_{\theta,\ \alpha\nu\tau} = \frac{\text{ωφέλιμο αποτέλεσμα}}{\text{κατανάλωση ενέργειας}} = \frac{\dot{W}_{e,\ \alpha\nu\tau}}{\dot{Q}_1}$$

συνεπώς

$$\dot{W}_{e,\ \alpha\nu\tau} = n_{\theta,\ \alpha\nu\tau} \cdot \dot{Q}_1 = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot \dot{Q}_1 = \left(1 - \frac{300}{1200}\right) \cdot 500 = 375\,\text{KW}$$

Αυτή είναι η μέγιστη ισχύς, που μπορεί να παράγει μια θερμική μηχανή, όταν το εργαζόμενο ρευστό διαγράφει ένα κύκλο του Carnot στα συγκεκριμένα όρια της θερμοκρασίας.

Ο ρυθμός της μη αντιστρεπτικότητας θα είναι προφανώς η διαφορά μεταξύ της ισχύος που δίνει η μηχανή, όταν το ρευστό εργάζεται αντιστρεπτά καιτης ωφέλιμης ισχύος εξόδου

$$\dot{i} = \dot{W}_e - \dot{W}_{\varepsilon\xi} = (375 - 180)\,\text{KW} = 195\,\text{KW}$$

Παρατηρείται ότι λόγω της μη αντιστρεπτότητας των θερμικών μεταβο1λών χάνονται 195 KW δυναμικής ισχύος. Παρατηρείται ότι τα 125 kW, που προκύπτουν από τη διαφορά 500 – 375 = 125 KW, τα οποία απορρίπτονται με τη μορφή θερμότητας στην πηγή χαμηλής θερμοκρασίας, δεν είναι διαθέσιμα να μετατραπούν σε έργο και, συνεπώς, δεν είναι μέρος των απωλειών, λόγω της μη αντιστρεπτικότητας των μεταβολών.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 8ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Αν μια θερμική μηχανή ακολουθεί αυτή τη διαδικασία παραγωγής έργου, ορίζεται ως θερμικός βαθμός απόδοσης αυτής το πηλίκο:

$$\boxed{n_\theta = \frac{\text{ωφέλιμο αποτέλεσμα}}{\text{κατανάλωση ενέργειας}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}}$$

- **1ο Θεώρημα του Carnot**

  «Αν σε δύο θερμικές μηχανές το εργαζόμενο ρευστό λαμβάνει θερμότητα απ' την πηγή υψηλής σταθερής θερμοκρασίας T_1 και αποδίδει μέρος αυτής της θερμότητας στην πηγή χαμηλής σταθερής θερμοκρασίας T_2 και με την υπόθεση ότι αυτό γίνεται κατ' αντιστρεπτό τρόπο, οι δύο αυτές θερμικές μηχανές έχουν τον ίδιο θερμικό βαθμό απόδοσης.»

- **2ο Θεώρημα του Carnot**

  «Η απόδοση μιας μη αντιστρεπτής θερμικής μηχανής είναι πάντα μικρότερη απ' την απόδοση μιας αντιστρεπτής, όταν και οι δυο λειτουργούν μεταξύ των ίδιων θερμικών δεξαμενών».

- **3ο Θεώρημα του Carnot**

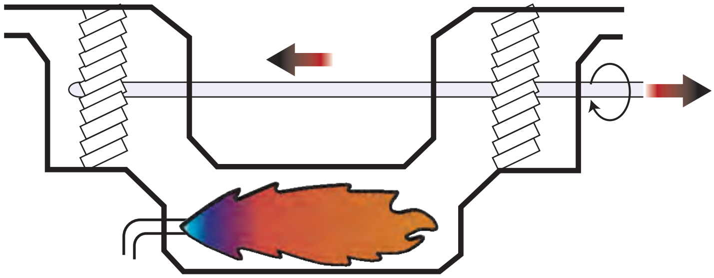
  «Για την ίδια υψηλή θερμοκρασία T_1 η θερμική μηχανή, η οποία εκμεταλλεύεται μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας ΔT, έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης, γιατί παράγει περισσότερο έργο.»

- Ισχύει η περίπτωση, κατά την οποία μπορούμε να αντλήσουμε ποσά θερμότητας από την πηγή χαμηλής σταθερής θερμοκρασίας στην πηγή υψηλής σταθερής θερμοκρασίας (T_1) προσφέροντας στη θερμική μηχανή ένα εσωτερικό έργο W. Παράδειγμα τέτοιου είδους μηχανής είναι το ηλεκτρικό ψυγείο.

- Ο θερμικός βαθμός απόδοσης στις μηχανές αυτές, που το εργαζόμενο ρευστό διαγράφει ένα αντίστροφο κύκλο του Carnot, ορίζεται με δυο διαφορετικούς τρόπους.

- Είναι σε όλους γνωστό ότι οι ενεργειακοί πόροι του πλανήτη μας είναι περιορισμένοι. Αυτό σημαίνει ότι είναι υποχρέωση όλων ο περιορισμός της σπατάλης των ενεργειακών αυτών πόρων, για να μπορέσει να αντεπεξέλθει στις ανάγκες των μελλοντικών γενεών. Στην προσπάθεια αυτή συμβάλλει η οικονομία των πόρων αυτών, η οποία οδήγησε στην ανάπτυξη μιας νέας τεχνικής της “**εξοικονόμησης ενέργειας**”.

- Ως **εξέργεια** ορίζεται το ωφέλιμο αποτέλεσμα (έργο), που μπορεί να παραχθεί από ένα σύστημα, το οποίο βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση και σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΙΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

9.1 Γενικά

9.2 Θερμικές κινητήριες μηχανές εξωτερικής καύσης

9.3 Θερμοδυναμικός κύκλος θερμικής μηχανής εξωτερικής καύσης. Κύκλος Rankine

9.4 Κινητήριες μηχανές εσωτερικής καύσης

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να δίνετε τους ορισμούς των κινητήρων εσωτερικής και εξωτερικής καύσης
- Να γνωρίζετε τον κύκλο του Rankine καθώς επίσης και τις πρακτικές εφαρμογές του
- Να αναγνωρίζετε και να περιγράφετε τις αλλαγές των φάσεων του νερού
- Να αναφέρετε τους τρόπους βελτίωσης του βαθμού απόδοσης των θερμικών εγκαταστάσεων
- Να γνωρίζετε τον αντίστροφο κύκλο του Rankine
- Να δίνετε τους ορισμούς του 4χρονου και του 2χρονου κινητήρα
- Να αναφέρετε τους κύκλους Otto, Diesel και Sabathe και να αναφέρετε τις διαφορές τους
- Να γνωρίζετε τους κύκλους Brayton & Joule καθώς επίσης και τις εφαρμογές τους

9.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ο μηχανολόγος, από πολύ παλιά μέχρι και σήμερα, εκτός των άλλων, ασχολήθηκε και με την κατασκευή θερμικών κινητήριων μηχανών για την παραγωγή μηχανικού έργου από την εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας. Στα πλαίσια αυτού του βιβλίου θα παρουσιαστούν δυο κατηγορίες θερμικών κινητήριων μηχανών:

Α) Θερμικές κινητήριες μηχανές εξωτερικής καύσης και

Β) Θερμικές κινητήριες μηχανές εσωτερικής καύσης

Η διάκριση αυτή είναι αναγκαία εξαιτίας του ότι αυτές διαφέρουν, τόσο από κατασκευαστικής πλευράς, όσο και από τις αρχές λειτουργίας τους.

Κατ' αρχάς θα πρέπει να γίνει κατανοητό ότι βασικό στοιχείο κάθε θερμικής μηχανής είναι το εργαζόμενο ρευστό, το οποίο είναι και ο φορέας μεταφοράς της θερμότητας. Αυτή η θερμότητα μπορεί να δοθεί στο εργαζόμενο ρευστό με διαδικασίες και μεταβολές εκτός αυτού ή με διαδικα1σίες και μεταβολές εντός αυτού.

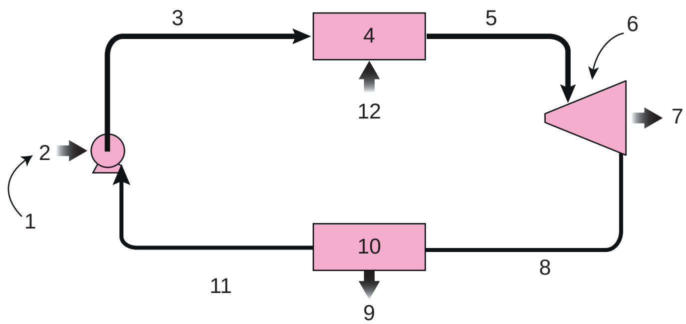
Εκείνες οι θερμικές μηχανές στις οποίες το εργαζόμενο ρευστό λαμβάνει τη θερμότητα με μεταβολές εκτός αυτού, ονομάζονται θερμικές κινητήριες μηχανές εξωτερικής καύσης. Αντίθετα, εκείνες στις οποίες το εργαζόμενο (ρευστό λαμβάνει τη θερμότητα εντός αυτού, ονομάζονται θερμικές μηχανές εσωτερικής καύσης.

9.2. ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΙΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

Στην κατηγορία αυτή των θερμικών κινητήριων μηχανών μπορούμε να διακρίνουμε δυο τύπους μηχανών, αυτές του κλειστού θερμοδυναμικού κύκλου (π.χ. ατμοστρόβιλοι) και αυτές του ανοικτού θερμοδυναμικού κύκλου (π.χ. παλινδρομικές ατμομηχανές ή ενός σταδίου ατμοστρόβιλοι).

Α) Θερμικές κινητήριες μηχανές κλειστού θερμοδυναμικού κύκλου

Ενας τύπος τέτοιας μηχανής φαίνεται στο σχήμα 9.2.α



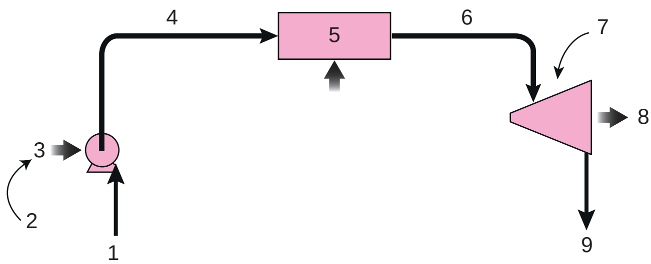
Σχήμα 9.2.α: Κινητήρια μηχανή κλειστού θερμοδυναμικού κύκλου.

1. Αντλία που απαιτεί πολύ λίγο έργο, 2. Συμπίεση υγρού, 3. Ψυχρό υγρό υψηλής πίεσης, 4.Βραστήρας, 5. Ζεστός ατμός υψηλής πίεσης, 6. Εκτόνωση, 7. Παραγωγή έργου, 8. Ψυχρός ατμός χαμηλής πίεσης, 9. Έξοδος θερμότητας, 10. Συμπυκνωτής, 11. Ψυχρό υγρό χαμηλής πίεσης, 12. Είσοδος θερμότητας.

Στο πιο πάνω σχήμα φαίνεται ότι το νερό μεταφέρεται με τη βοήθεια της αντλίας (1) στον ατμολέβητα, στον οποίο εξατμίζεται, αφού δέχεται μεγάλα ποσά θερμότητας απ' την καύση καυσίμων ουσιών. (Η καύση εκτός του ατμολέβητα) (2). Ο παραγόμενος ατμός σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία, στη συνέχεια, οδηγείται στη θερμική μηχανή (3), όπου του δίνεται η ευκαιρία εκτονούμενο να παράγει έργο, το οποίο παραλαμβάνεται από τα κινητά μέρη της μηχανής με τη μορφή μηχανικού έργου, το οποίο εμφανίζεται στον άξονα της μηχανής. Στη συνέχεια, το ρευστό που βγαίνει από τη θερμική μηχανή, είναι χαμηλότερης πίεσης και θερμοκρασίας και οδηγείται στο συμπυκνωτή (4), όπου ψύχεται και υγροποιείται και μέσω της αντλίας οδηγείται στον ατμολέβητα, για να επαναληφθεί ο κύκλος.

Β) Θερμικές κινητήριες μηχανές ανοικτού θερμοδυναμικού κύκλου

Σ' αυτόν τον τύπο θερμικής μηχανής (σχήμα 9.2.β), το νερό οδηγείται στον ατμολέβητα μέσω της αντλίας, όπου εξατμίζεται από τη θερμότητα, που προσφέρεται στο λέβητα. Ο ατμός, ο οποίος, βγαίνοντας από τον ατμολέβητα, έχει υψηλή πίεση και θερμοκρασία, οδηγείται σε μια παλινδρομική ατμομηχανή ή ατμοστρόβιλο και από εκεί εκτονούμενο παράγει έργο, το οποίο μετατρέπεται από τα κινούμενα μέρη της μηχανής σε μηχανικό έργο. Στη συνέχεια, το ρευστό στην έξοδο της μηχανής οδηγείται ελεύθερα στην ατμόσφαιρα. Είναι προφανές ότι οι θερμικές μηχανές αυτές έχουν χαμηλό βαθμό απόδοσης και γι' αυτό δε χρησιμοποιούνται πλέον, παρά μόνο σε ειδικές εφαρμογές, όπως για την κίνηση αντλιών ανάγκης στα πλοία.



Σχήμα 9.2.β: Κινητήρια μηχανή θερμοδυναμικού κύκλου.

1. Ψυχρό υγρό, 2. Αντλία που απαιτεί πολύ έργο, 3. Συμπίεση υγρού, 4. Ψυχρό υγρό υψηλής πίεσης, 5. Βραστήρας, 6. Ζεστός ατμός υψηλής πίεσης, 7. Τουρμπίνα ή έμβολο κινητήρα, 8. Παραγωγή έργου, 9. Εκτόνωση ατμού χαμηλής πίεσης, 10. Είσοδος θερμότητας.

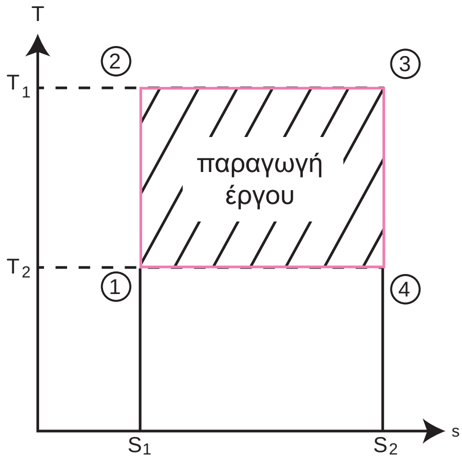
9.3. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ. ΚΥΚΛΟΣ RANKINE

Για να προσδιοριστεί ο βαθμός απόδοσης μιας θερμικής εγκατάστασης, ό1πως αυτή που δείχτηκε στο σχήμα 9.2.α, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η θεωρία Carnot και μάλιστα ο κύκλος αυτού, όταν το ρευστό που τον διαγράφει, είναι το νερό, που βρίσκεται σε δυο φάσεις (ατμόςυγρό).

Είναι ήδη γνωστό ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης μιας θερμικής μηχανής, όπου το εργαζόμενο ρευστό ακολουθεί τον κύκλο του Carnot, δίνεται απ' τη σχέση:

$$n_\theta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Παρατηρώντας τον κύκλο αυτό στο διάγραμμα TS (σχήμα 9.3.α) διαπιστώνει εύκολα κανείς ότι το ρευστό που θα τον διαγράψει, θα πρέπει να παρουσιάζεται, ανάλογα με τις ανάγκες, σε δυο φάσεις. Η εισαγωγή της θερμότητας με σταθερή θερμοκρασία απαιτεί το ρευστό να βρίσκεται σε αέρια κατάσταση (ατμός). Αντίθετα, για την αποβολή της θερμότητας στο περιβάλλον το ρευστό πρέπει να είναι σε υγρή κατάσταση.



Σχήμα 9.3.α

Η ανάγκη να χρησιμοποιηθούν οι δυο φυσικές καταστάσεις του νερού, μας υποχρεώνει να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του νερού σε διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

9.3.1. Διάγραμμα φάσεων νερού

Είναι σε όλους γνωστό από την καθημερινή μας εμπειρία ότι, αν σε μια ποσότητα νερού προσφέρουμε θερμότητα, τότε αυτό βράζει παράγοντας ατμό. Ο ατμός δηλαδή είναι η αέρια μορφή, που πήρε το νερό. Αντίθετα, αν από μια ποσότητα νερού αφαιρεθεί θερμότητα, αυτό παγώνει και μετα τρέπεται σε πάγο. Ο πάγος είναι μια άλλη φυσική κατάσταση, που μπορεί να υπάρξει το νερό.

Το νερό δηλαδή μπορεί να υπάρχει σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις, στερεά, υγρή και αέρια, ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που βρίσκεται.

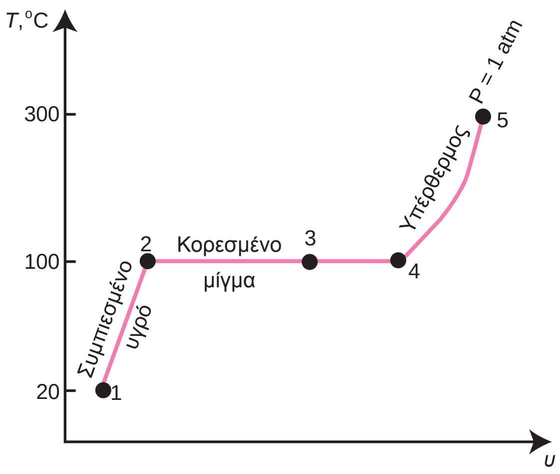
Εκτός των καταστάσεων αυτών είναι λογικό να υπάρχουν συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που το νερό βρίσκεται σε ενδιάμεσες καταστάσεις, όπως π.χ. συνύπαρξης νερού – ατμού, πάγου – νερού, πάγου – ατμού.

Η μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη ονομάζεται αλλαγή φάσης. Αυτή μπορεί να κατανοηθεί καλύτερα με τη χρήση διαγραμμάτων στα οποία μεταβάλλονται οι παράμετροι των συνθηκών που βρίσκεται το νερό.

Τέτοια διαγράμματα – είναι (T, v) θερμοκρασίας – ειδικού όγκου, (P, T) πίεσης θερμοκρασίας, (P, v) πίεσης – ειδικού όγκου, (T, S) θερμοκρασίας – εντροπίας και, τέλος, (h – S) ενθαλπίας (διάγραμμα Mollier)

I. Διάγραμμα (T, v)

Αν προσφερθεί θερμότητα σε μια καθορισμένη μάζα νερού, ενώ αυτό βρίσκεται σε πίεση 1 atm, τότε η αλλαγή των φάσεων αυτού φαίνεται στο σχήμα 9.3.1.α



Σχήμα 9.3.1.α: *Διάγραμμα φάσεων νερού*

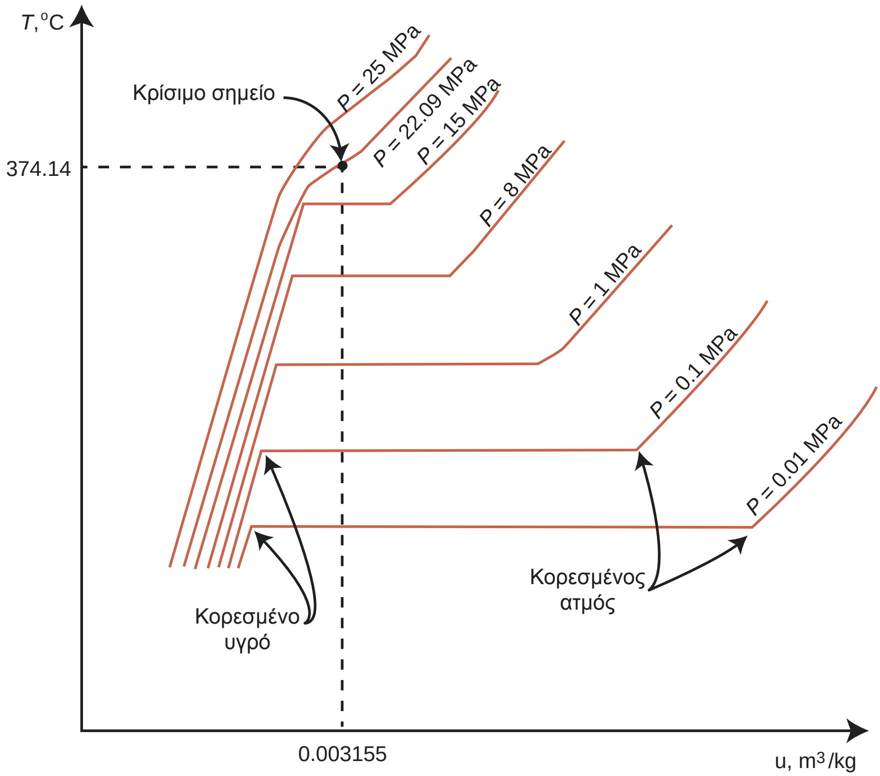
Διαδρομή 1–2 Προσφέρεται θερμότητα, η θερμοκρασία του νερού αυξάνει, αυτό διαστέλλεται (θερμοκρασία του σημείου 1 μεγαλύτερο των 4° C) και αυξάνει ο ειδικός όγκος του. Τα σημεία της γραμμής 12 αποτελούν τη γραμμή του κορεσμένου υγρού, υπάρχει δηλαδή μόνο νερό.

Διαδρομή 2–3 Παρόλο που συνεχίζουμε να προσφέρουμε θερμότητα η θερμοκρασία του νερού παραμένει σταθερή. Από ένα σημείο και μετά εμφανίζονται και ατμοί αλλά η θερμοκρασία εξακολουθεί να παραμένει σταθερή. Το ποσό της θερμότητας που προσφέρουμε στη φάση 2 – 3, ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης. Η θερμότητα παραμένει σταθε1ρή και ονομάζεται θερμότητα ατμοποίησης.

Διαδρομή 3–4 Συνεχίζοντας να προσφέρουμε θερμότητα, η θερμοκρασία του ρευστού αυξάνει και ο όγκος του μεγαλώνει. Το νερό έχει μετατραπεί όλο σε ατμό.

Η διαδικασία μπορεί να αναστραφεί και από τη φάση ατμού του νερού να καταλήξουμε στην υγρή φάση του, αλλά πάντα κάτω από την ίδια σταθερή πίεση 1 atm, με τη διαφορά ότι δε θα μιλάμε για ατμοποίηση αλλά για υγροποίηση και λανθάνουσα θερμότητα υγροποίησης.

Αν επαναλάβουμε το πείραμα ακριβώς με την ίδια θερμοκρασία αλλά με διαφορετικές πιέσεις κάθε φορά, θα καταλήξουμε στο διάγραμμα του σχήματος 9.3.1.β.



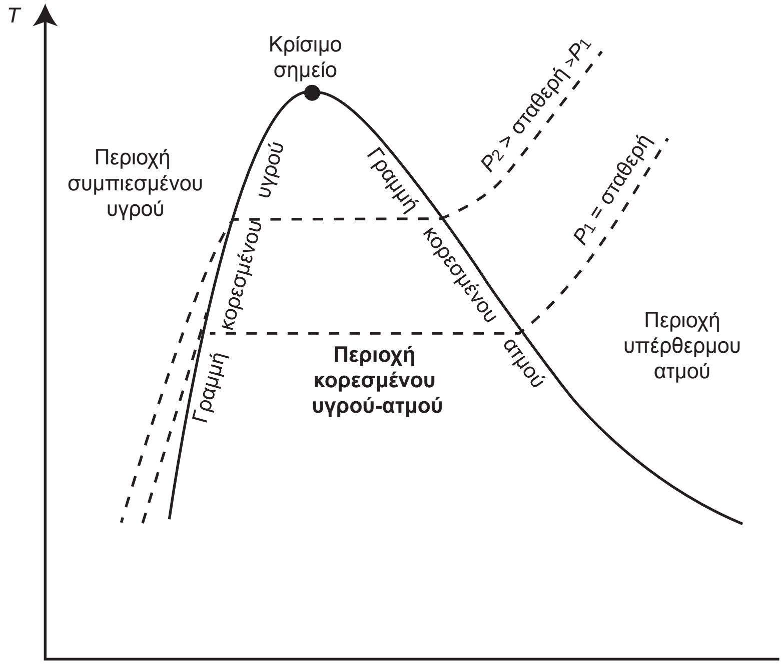
Σχήμα 9.3.1.β

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι όλα τα σημεία, στα οποία αρχίζει να παραμένει σταθερή η θερμοκρασία, αποτελούν μια καμπύλη (γεωμετρικός τόπος), σε κάθε σημείο της οποίας το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση και ονομάζεται καμπύλη **κορεσμένου υγρού**. Παρατηρεί ται ότι το μήκος του ευθύγραμμου τμήματος είναι παράλληλο προς το μήκος των τετμημένων, ενώ όσο αυξάνει η πίεση, το μέγεθος μικραίνει και γίνεται μηδενικό στο σημείο C. Δηλαδή στο σημείο αυτό το νερό περνάει από την υγρή στην αέρια φάση απ’ ευθείας ή ακόμη υποστηρίζεται ότι στο σημείο C συνυπάρχει η υγρή και η αέρια φάση του νερού (κρίσιμο σημείο).

Η καμπύλη, η οποία ενώνει τα σημεία στα οποία αρχίζει πάλι να αυξά1νει η θερμοκρασία, ονομάζεται **καμπύλη κορεσμένου ατμού** και δηλώνει ότι σε κάθε σημείο αυτής το νερό βρίσκεται υπό τη μορφή ατμού. Παρατη ρείται ότι ο ατμός που παράγεται στις ενδιάμεσες καταστάσεις, στις οποίες η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, ονομάζεται **ακόρεστος** και χαρακτηρίζεται από τον τίτλο του, δηλαδή από το βαθμό ξηρότητας, που είναι η περιεκτικότητα του νερού σε υγρή κατάσταση.

➟ **Παρατήρηση**

Παρατηρείται ακόμη ότι οι 2 καμπύλες κορεσμένου ατμού και κορεσμένου υγρού συναντιούνται στο σημείο C.



Σχήμα 9.3.1.γ

Στο σχήμα 9.3.1.γ παρατηρούμε ότι οι γραμμές κορεσμένου υγρού και ατμού χωρίζουν την επιφάνεια σε διάφορες περιοχές όπως περιοχή του κορεσμένου υγρού (1), περιοχή του υπέρθερμου ατμού (2) και περιοχή της ενδιάμεσης κατάστασης υγρού–ατμού (3)

II) Διάγραμμα (P – T)

Τις μεταβολές των φάσεων του νερού μπορούμε να τις μελετήσουμε σ' ένα διάγραμμα με συντεταγμένες την πίεση (P) και τη θερμοκρασία (T). Το διάγραμμα αυτό ονομάζεται και διάγραμμα φάσεων, γιατί σ' αυτό δια κρίνονται η μια φάση από την άλλη με τρεις γραμμές:

α) Η γραμμή της εξάχνωσης, (η μετάβαση από τη στερεή φάση στην αέρια) διαχωρίζει την περιοχή της στερεής από την αέρια φάση.

β) Η γραμμή της εξάτμισης, διαχωρίζει την περιοχή της υγρής από την αέρια φάση και

γ) Η γραμμή της τήξης (ή πήξης), διαχωρίζει την περιοχή της στερεής από την υγρή φάση.

Οι τρεις αυτές γραμμές συναντιούνται σ' ένα σημείο, στο οποίο οι τρεις φάσεις βρίσκονται σε ισορροπία και ονομάζεται τριπλό σημείο.* (* Σ' αυτό το σημείο το νερό έχει κρίσιμη πίεση:

$$P_c = 22{,}12 \times 1O^{-6}\ N/m^2$$

και κρίσιμη θερμοκρασία $T_c = 374{,}15^\circ C$)

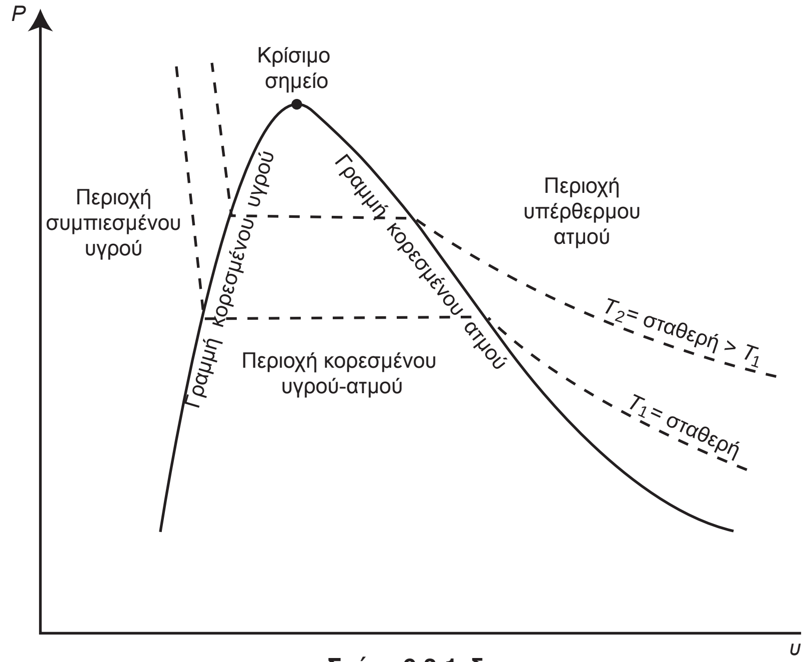
Παρατηρείται ότι η γραμμή εξάτμισης σταματά στο κρίσιμο σημείο, διότι πάνω από το σημείο αυτό δεν είναι δυνατό να γίνει διάκριση μεταξύ υγρής και αέριας φάσης.

Στο διάγραμμα αυτό οι ουσίες που διαστέλλονται ή συστέλλονται κατά την πήξη, διαφέρουν μόνο κατά τη φορά τήξης.

III) Διάγραμμα (P, V)

Τα διαγράμματα σε συντεταγμένες πίεσης (P) και ειδικού όγκου (V), έ1-χουν μορφή περίπου ίδια με εκείνη σε συντεταγμένες (T, V), με τη μόνη διαφορά ότι διακρίνεται σταθερή θερμοκρασία (σχήμα 9.3.1 .δ.)

Έστω ότι έχουμε μια ποσότητα νερού σε θερμοκρασία T_1 σε πίεση P_1 και σε ειδικό όγκο V_1. Εάν η πίεση P_1 είναι πολύ μεγάλη τότε παρόλο που τα υγρά θεωρούνται ασυμπίεστα, η μάζα του νερού έχει υποστεί αυτή την πίεση, με αποτέλεσμα να υπάρχει ο αντίστοιχος ειδικός όγκος Αν μειωθεί η πίεση, τότε αυξάνεται, έστω και λίγο, ο ειδικός όγκος. Συνεχίζοντας να μειώνεται η πίεση (η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή) ο ειδικός όγκος λαμβάνει μια τιμή, πέραν της οποίας η πίεση παραμένει σταθερή αλλά ο ειδικός όγκος V_1 παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές. Αυτή η περιοχή στην οποία διατηρούνται η πίεση και η θερμοκρασία σταθερές, αλλά αλλάζει ο ειδικός όγκος, είναι η περιοχή αλλαγής της φάσης του νερού. Από ένα σημείο και μετά αρχίζει να μειώνεται η πίεση, η θερμοκρασία να παραμένει σταθερή και ο ειδικός όγκος να μεταβάλλεται πολύ λιγότερο από προηγούμενα. Αν επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία σε διαφορετικές θερμοκρασίες, έχουμε όπως και προηγούμενα το διάγραμμα του σχήματος 9.3.1.δ



Σχήμα 9.3.1 .δ

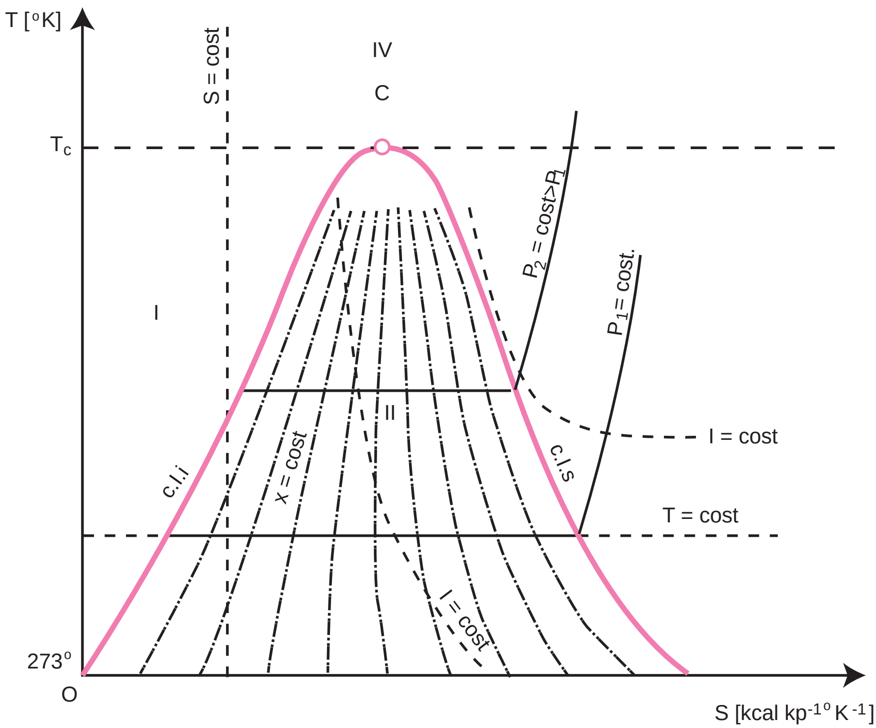
Σ' αυτό το διάγραμμα παρατηρείται η γραμμή του κορεσμένου υγρού, η γραμμή κορεσμένου ατμού, το κρίσιμο σημείο και οι περιοχές συμπιεσμένου υγρού υπέρθερμου ατμού και κορεσμένου υγρού – ατμού.

IV) Διάγραμμα (T, S)

Γ ια τις πρακτικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα εκείνες οι θερμικές μηχανές που ακολουθούν τον κύκλο του Rankine, είναι χρήσιμο το διάγραμμα εκείνο που έχει συντεταγμένες τη θερμοκρασία (T) και την εντροπία (S) με μονάδα της εντροπίας: KJ/kgr K με αναφορά μάζα νερού 1 kgr Σ' αυτό το διάγραμμα και στην αρχή του η εντροπία του κορεσμένου υγρού είναι ίση με μηδέν στους 273 K.

Η καμπύλη που παριστάνει το κορεσμένο νερό περνά από την αρχή του διαγράμματος και περιορίζεται μέχρι το κρίσιμο σημείο C. Το μέρος του άξονα των τετμημένων που περιέχεται μεταξύ των καμπύλών του κορεσμένου νερού και κορεσμένου ατμού συμπίπτει με την ισόβαρη μεταβολή στους 273 K.

Ενα διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 9.3.1.ε, στο οποίο οι συμβολισμοί είναι ίδιοι με αυτούς που αναφέρονται και στο διάγραμμα P, V. Στο πεδίο μεταξύ των δυο οριακών καμπύλών οι ισόθερμες και ισοβαρές μεταβολές συμπίπτουν και είναι ευθείες παράλληλες ως προς τον άξονα της εντροπίας.

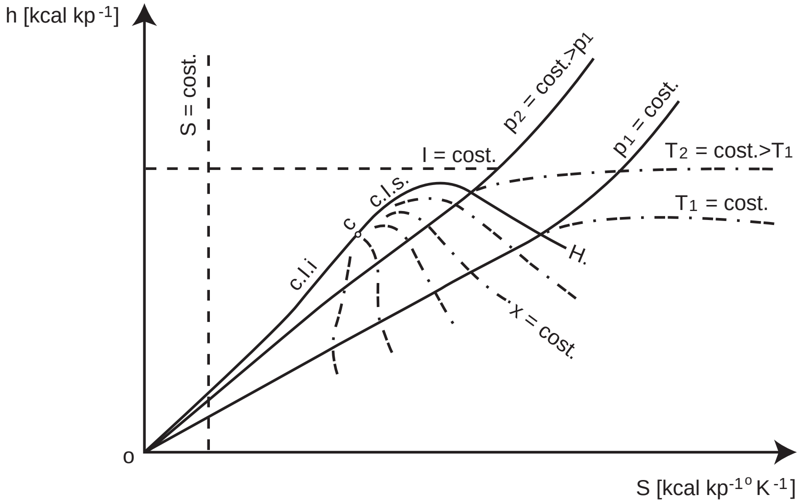


Σχήμα 9.3.1.ε

Στην περιοχή του υπέρθερμου ατμού οι ισόθερμες μεταβολές είναι ευθείες παράλληλες ως προς τον άξονα των τετμημένων, ενώ οι ισοβαρείς έχουν κλίση προς τα πάνω. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνονται και οι καμπύλες ίσου τίτλου καθώς και δυο καμπύλες σταθερής ενθαλπίας.

V) Διάγραμμα MOULIEUR (h – S)

Στις πρακτικές εφαρμογές των θερμικών μηχανών με ατμό, μεγάλη χρήση έχει το διάγραμμα, στις τεταγμένες του οποίου φέρει την ενθαλπία σε KJ/kgr και στις τετμημένες την εντροπία σε KJ/kgr K. Ο λόγος είναι ότι η ενθαλπία για τον ατμό δεν είναι μόνο συνάρτηση της θερμοκρασίας, γι’ αυτό και χρησιμοποιείται το διάγραμμα του σχήματος 9.3.1.στ



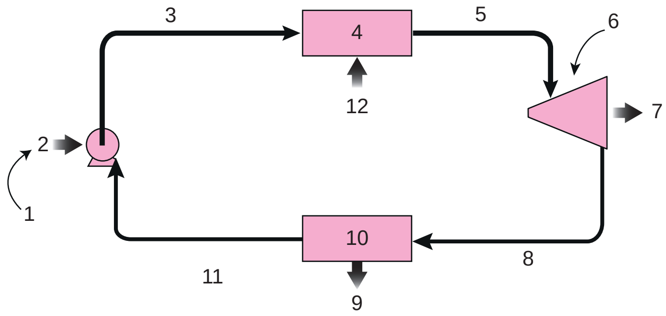
Σχήμα 9.3.1.στ

Σ' αυτό παρατηρούμε ότι στο διάστημα μεταξύ των δυο οριακών καμπύλών οι ισόθερμες και οι ισοβαρείς ταυτίζονται και είναι ευθείες κεκλιμένες, των οποίων η κλίση αυξάνεται με την θερμοκρασία. Αντίθετα, στο πεδίο του υπέρθερμου ατμού οι ισοβαρείς κλίνουν προς τα πάνω και οι ισόθερμες προς τα κάτω.

Παραδείγματα εφαρμογής αυτού του διαγράμματος και των προηγουμένων θα δοθούν σε επόμενες ενότητες.

9.3.2. Πρακτική εφαρμογή του κύκλου του Rankine

Θεωρώντας τη θερμική εγκατάσταση παραγωγής έργου του σχήματος 9.3.2.α

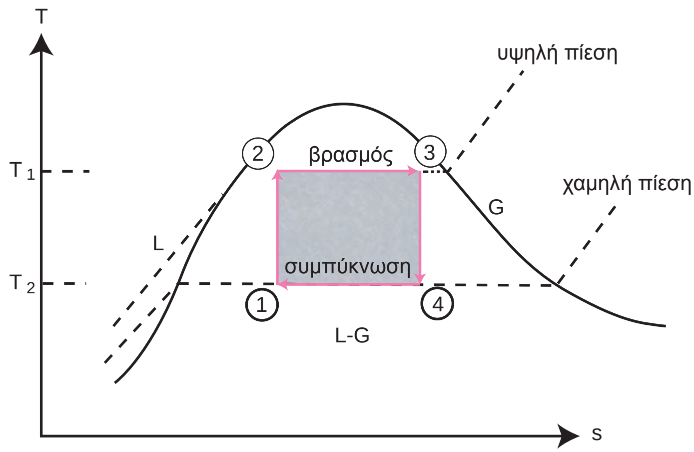


Σχήμα 9.3.2.α

1. Αντλία που απαιτεί πολύ λίγο έργο, 2. Συμπίεση υγρού, 3. Ψυχρό υγρό υψηλής πίεσης, 4.Βραστήρας, 5. Ζεστός ατμός υψηλής πίεσης, 6. Εκτόνωση, 7. Παραγωγή έργου, 8. Ψυχρός ατμός χαμηλής πίεσης, 9. Εξοδος θερμότητας, 10. Συμπυκνωτής, 11. Ψυχρό υγρό χαμηλής πίεσης, 12. Είσοδος θερμότητας.

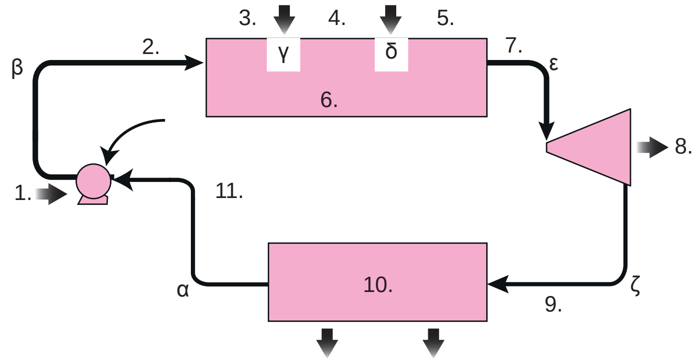
αποδείχτηκε ότι η εφαρμογή του κύκλου του Carnot, για τον υπολογισμό της θερμικής απόδοσης της εγκαταστάσεως αυτής, απαιτούσε το ρευστό να έχει δυο φάσεις.

Σχεδιάζοντας τον κύκλο του Carnot γι' αυτήν την εγκατάσταση θα έχουμε το διάγραμμα του σχήματος 9.3.2.β



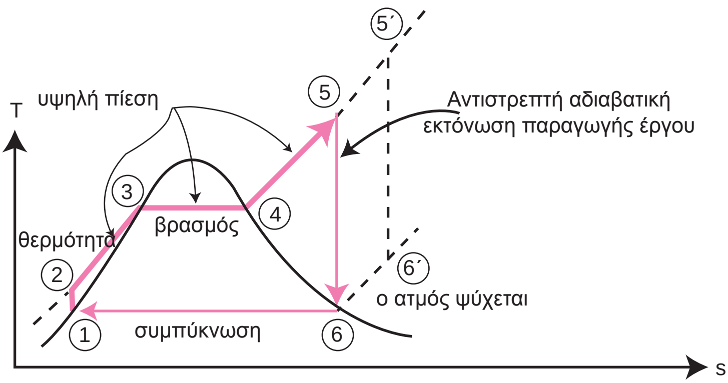
Σχήμα 9.3.2.β

Παρατηρείται ότι λειτουργικά προβλήματα της θερμικής μηχανής από τη χρήση υγρού ατμού χαμηλής ξηρότητας πάνω στα πτερύγια της μας αναγκάζει να αλλάξουμε την ποιότητα του ατμού αφενός και αφετέρου να αυξήσουμε το εμβαδόν του κύκλου στα ιδία όρια της πίεσης. Γι' αυτό το λόγο συμπληρώνεται η εγκατάσταση με άλλα βοηθητικά μηχανήματα (σχήμα 9.3.2.γ)



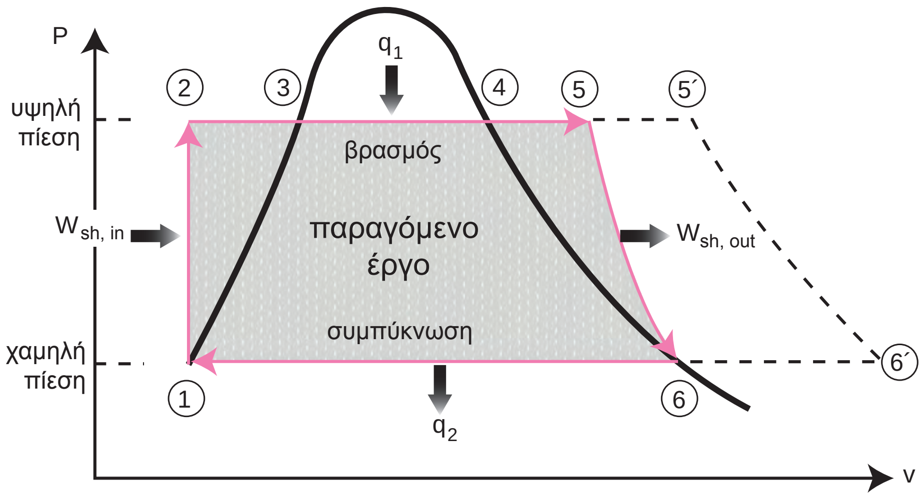
Σχήμα 9.3.2.γ *1. Συμπίεση, 2. Υγρό, 3. Θέρμανση, 4. Βρασμός, 5. Υπερθέρμανση, 6. Βραστήρας, 7. Ατμός, 8. Παραγόμενο έργο, 9. Ατμός, 10. Συμπυκνωτής, 11. Υγρό.*

Με βάση αυτήν την εγκατάσταση στο διάγραμμα T–S ο θερμοδυναμικός κύκλος που διαγράφει το ρευστό, φαίνεται στο διάγραμμα 9.3.2.δ.



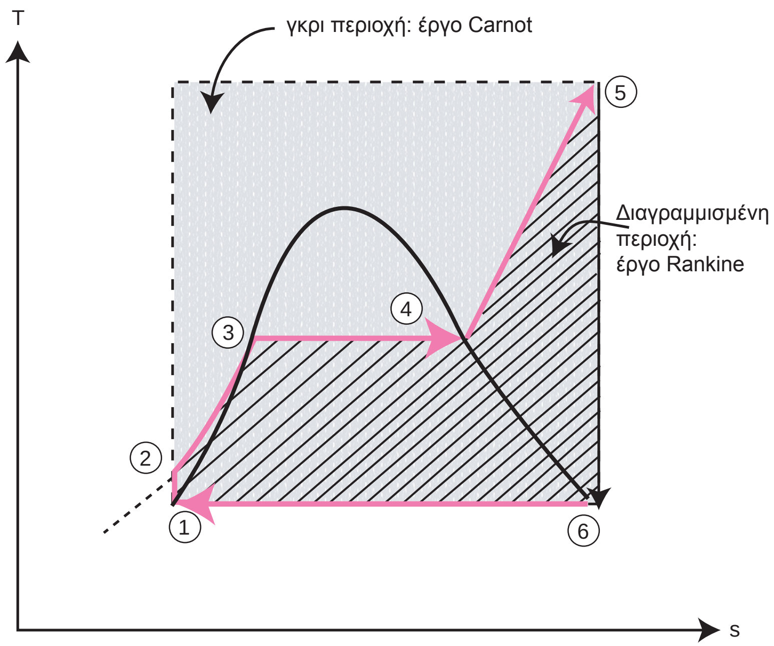
9.3.2.δ

Για την ίδια εγκατάσταση ο θερμικός κύκλος στο διάγραμμα P, V είναι όπως στο σχήμα 9.3.2.ε.



Σχήμα 9.3.2.ε

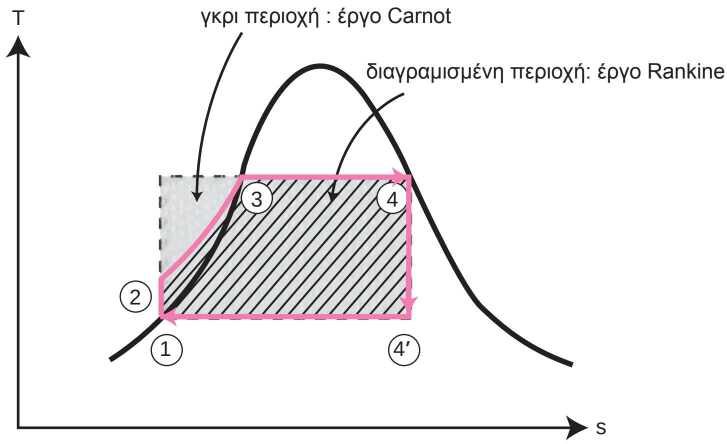
Στο διάγραμμα του σχήματος 9.3.2.στ γίνεται η σύγκριση του θερμοδυναμικού κύκλου που ακολουθεί το νερό, με τον κύκλο του Carnot, ο οποίος έχει τις ίδιες θερμοκρασίες



Σχήμα 9.3.2.στ

Στο σχήμα αυτό, το εμβαδόν του διαγραμμισμένου μέρους είναι το ποσό της θερμότητας που μετατρέπεται σε έργο, ενώ το γκρι μέρος εκφράζει τον κύκλο του Carnot στις ίδιες οριακές θερμοκρασίες λειτουργίας της εγκατάστασης.

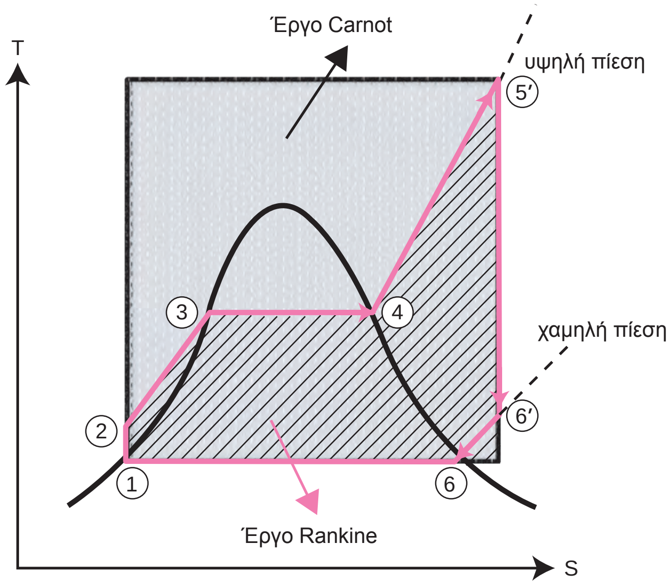
Φαίνεται καθαρά πόσο απέχει η απόδοση αυτής της θερμικής εγκατάστασης από μια θερμική μηχανή, η οποία εργάζεται σύμφωνα με τον κύκλο του Carnot. Θα μπορούσε κανείς να υποστηρίξει ότι η θερμική εγκατάσταση εργάζεται με οριακές θερμοκρασίες στο διάγραμμα του σχήματτος



Σχήμα 9.3.2.ζ

Βλέπουμε ότι σ' αυτήν την περίπτωση τα εμβαδά των κύκλων του Carnot και του Rankine διαφέρουν πολύ λίγο και θα ήταν μια πολύ καλή περίπτωση. Ομως, όπως προαναφέραμε, λειτουργικές απαιτήσεις των θερμικών μηχανών (ατμοστροβίλων) δεν επιτρέπουν τη χρήση του, λόγω του φαινομένου της σπηλαίωσης, της καταστροφής των πτερυγίων και άλλων.

Για να αποφευχθούν λοιπόν αυτές οι δυσκολίες, ο κύκλος του Rankine αλλάζει όρια συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης και γίνεται όπως στο σχήμα 9.3.2.η.



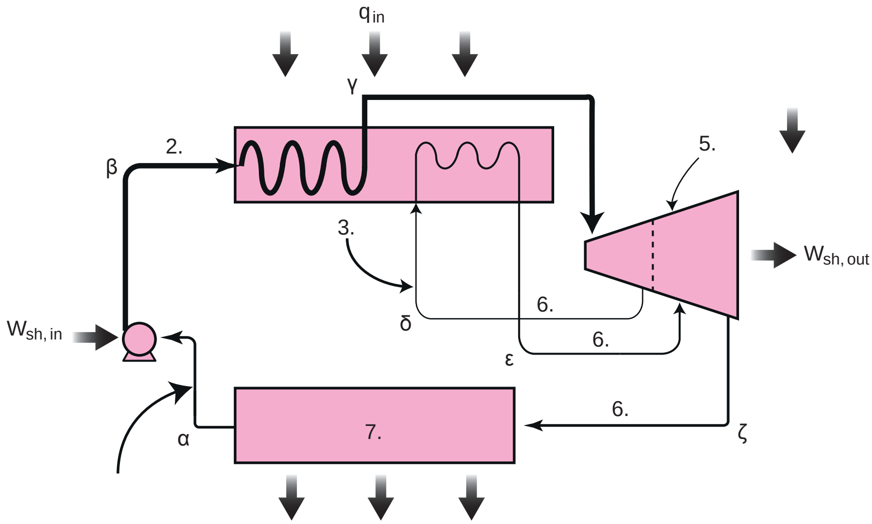
Σχήμα 9.3.2.η

Στο σχήμα αυτό, αν και χάνεται ένα μέρος του παραγόμενου έργου, η θερμική μηχανή (ατμοστρόβιλος) εργάζεται με ατμό και δεν υπάρχουν τα προηγούμενα προβλήματα.

9.3.3. Βελτίωση του βαθμού απόδοσης της θερμικής εγκατάστασης

Για να βελτιωθεί ο βαθμός απόδοσης της θερμικής εγκατάστασης που αναφερόμαστε, θα πρέπει το εμβαδόν του θερμοδυναμικού κύκλου του Rankine να πλησιάζει το εμβαδόν του κύκλου του Carnot.

Ταυτόχρονα, για να περιοριστεί και η τελική θερμοκρασία 5΄ καταφεύγουμε σε λύσεις, μια από τις οποίες φαίνεται στο σχήμα 9.3.3.α



Σχήμα 9.3.3.α

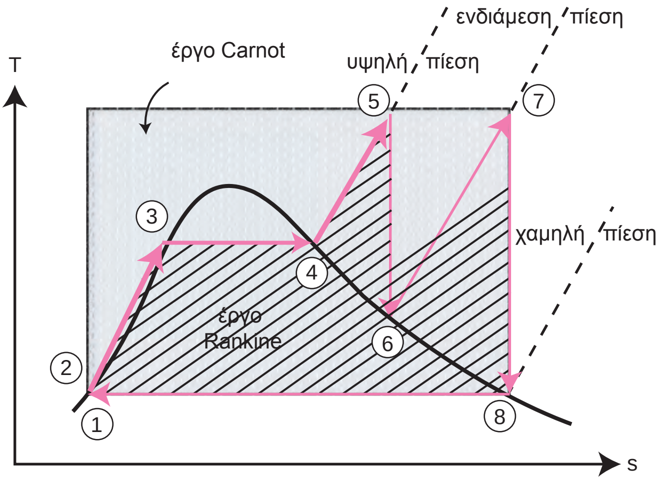
1. Υγρό, 2. Ψυχρό υγρό υψηλής πίεσης, 3. Επαναθέρμανση, 4. Θερματμός, 5. Τουρμπίνα δύο φάσεων, 6. Ατμός,, 7. Συμπυκνωτής.

Σε αυτό παρατηρείται ότι ο ατμός, αφού "εργαστεί" στη θερμική μηχανή (μεταβολή γ–δ) επαναθερμαίνεται προσφέροντας σε αυτόν θερμική ενέργεια σε μια ενδιάμεση πίεση (μεταβολή δ–ε).

Στη συνέχεια, ο ατμός κινούμενος παράγει έργο κατά την αδιαβατική μεταβολή (ε–ζ).

Παρατηρείται ότι η θερμική αυτή εγκατάσταση έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης από την προηγούμενη, αφού το εμβαδόν του κύκλου του Rankine προσεγγίζει περισσότερο το θερμοδυναμικό κύκλο του Carnot, με τα ίδια όρια θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.3.3.α.

Η διαδικασία της αναθέρμανσης του ατμού στην πράξη γίνεται, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, μια από τις οποίες φαίνεται στο σχήμα 9.3.3.β



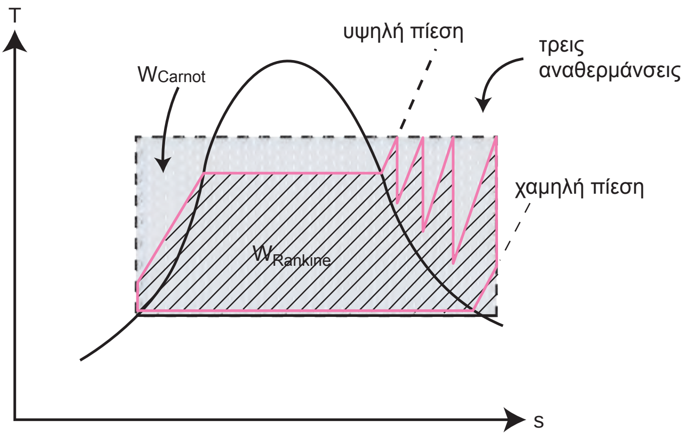
Σχήμα 9.3.3.β

Είναι κατανοητό ότι, εάν θέλουμε να βελτιώσουμε ακόμη περισσότερο τη θερμική εγκατάσταση, θα πρέπει να αυξηθεί το εμβαδόν του θερμοδυναμικού κύκλου του Rankine, ώστε να πλησιάσει ακόμη περισσότερο το εμβαδόν του κύκλου του Carnot.

Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους όπως:

- Με πολλαπλές αναθερμάνσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.3.3.γ
- Με απομαστεύσεις μιας ή περισσοτέρων, όπως στο σχήμα 9.3.3.γ
- Με την αύξηση της πίεσης λειτουργίας της θερμικής μηχανής
- Με τη μείωση της πίεσης και της θερμοκρασίας στην έξοδο της θερμικής μηχανής
- Με χρήση εγκαταστάσεων εξοικονόμησης ενέργειας
- Με χρήσεις ειδικών εγκαταστάσεων

Στην ενότητα αυτή έγινε προσπάθεια παρουσίασης της κατανόησης και της χρήσης του ιδανικού κύκλου θερμικής μηχανής που πρότεινε ο Carnot και ο ρόλος που έπαιξε αυτός στην εξέλιξη των θερμικών κινητήριων μηχανών εξωτερικής καύσης.

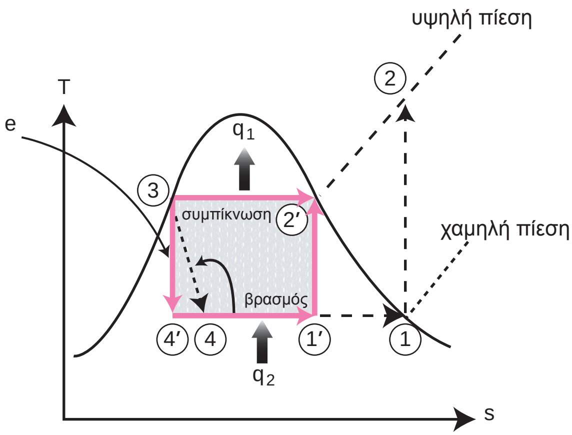


Σχήμα 9.3.3.γ

9.3.4. Αντίστροφος κύκλος του Rankine

Στην παράγραφο 8.2.3 παρουσιάστηκε ο αντίστροφος θερμικός κύκλος του Carnot και αναφέρθηκε ότι μπορεί αυτός να εφαρμοστεί, όταν το εργαζόμενο ρευστό παρουσιάζεται σε δυο καταστάσεις (φάσεις)

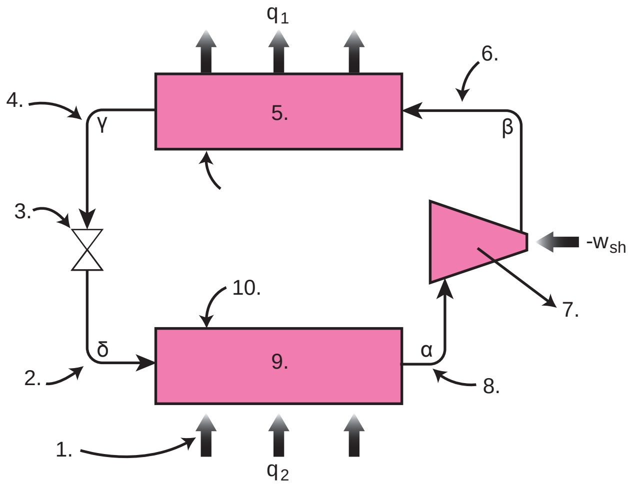
Ενα πραγματικό ρευστό μπορεί να διαγράψει ένα αντίστροφο θερμοδυναμικό κύκλο, όπως εκείνο του Rankine. Ενας τέτοιος κύκλος φαίνεται στο σχήμα 9.3.4.α



Σχήμα 9.3.4.a

Το ρευστό ακολουθεί τη σειρά μεταβολών 1΄, 2΄, 3, 4΄ ,1΄

Ενας τέτοιος αντίστροφος κύκλος μπορεί να εφαρμοστεί από ένα διφασικό ρευστό στις θερμικές εγκαταστάσεις, που φαίνεται στο σχήμα 9.3.4.β



Σχήμα 9.3.4.β: *1. Θερμότητα από ψυγείο, 2. Χαμηλής πίεσης ψυχρό μίγμα, 3. Εκτονωτική βαλβίδα, 4. Θερμό υγρό υψηλής πίεσης, 5. Συμπυκνωτής, 6. Θερμός ατμός υψηλής πίεσης, 7. Συμπιεστής, 8. Ψυχρός ατμός χαμηλής πίεσης, 9. Βραστήρας, 10. Είσοδος ψυγείου*

Περιγραφή εγκατάστασης

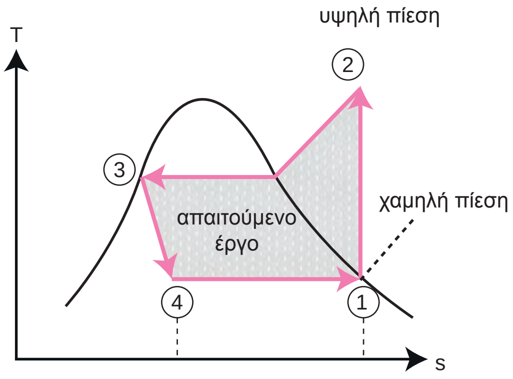
Συμπιεστής: Η μηχανή αυτή συμπιέζει το ρευστό από τις συνθήκες του σημείου (α) στις συνθήκες του σημείου (β). Ο αεροσυμπιεστής αυτός κινείται με τη βοήθεια προσφερόμενου μηχανικού έργου (ηλεκτρικός κινητήρας)

Συμπυκνωτής: Σε αυτό το ρευστό αποβάλλει θερμότητα με μεταβολή από το σημείο (β) στο (γ)

Εκτονωτική βαλβίδα: Σε αυτήν το ρευστό εκτονώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η ενθαλπία του ρευστού παραμένει σταθερή, από τις συνθήκες (γ) στην (δ)

Εξατμιστής: Σε αυτόν το ρευστό αλλάζει φάση, απορροφώντας θερμότητα από το περιβάλλον.

Είναι προφανές ότι η συμπίεση ενός ρευστού πραγματοποιείται ευκολότερα, όταν το ρευστό είναι σε αέρια φάση. Για το λόγο αυτό ο αντίστροφος κύκλος του Rankine παίρνει τη μορφή σε διάγραμμα T, S όπως φαίνεται στο σχήμα 9.3.4.γ.



Σχήμα 9.3.4.γ

9.4. ΚΙΝΗΤΗΡΙΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ

9.4.1. Γενικά

Η κατηγορία αυτή των κινητήρων αναπτύχθηκε πολύ αργότερα από εκείνους τους θερμικούς κινητήρες εξωτερικής καύσης. Η ανάγκη της εξέλιξης των μηχανών εξωτερικής καύσης προερχόταν από το μεγάλο όγκο και βάρος των θερμικών αυτών εγκαταστάσεων καθώς επίσης και του μεγάλου αριθμού των περικλειομένων βοηθητικών μηχανημάτων. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό των εφαρμογών στις μεταφορές ξηράς και αέρος. Έτσι εξελίχθηκαν οι θερμικές κινητήριες μηχανές εσωτερικής καύσης μικρότερου βάρους και με μικρό αριθμό παρελκομένων μηχανημάτων. Μια βασική διαφορά μεταξύ αυτών των δυο κατηγοριών είναι ότι οι δεύτεροι χρησιμοποιούν κατ' αποκλειστικότητα υγρά καύσιμα, κυρίως βενζίνη και πετρέλαιο.

Δεν θα ήταν δυνατή η εξέλιξη των θερμικών κινητήρων, εάν δεν υπήρχαν στη φύση υγρά καύσιμα.

Την ονομασία θερμικές κινητήριες μηχανές εσωτερικής καύσης την πήραν, όπως έχει ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα, από το γεγονός ότι το εργαζόμενο ρευστό λαμβάνει τη θερμική ενέργεια από θερμοδυναμική μεταβολή, που γίνεται εντός αυτού με την καύση του υγρού καυσίμου.

9.4.2. Θερμικοί κύκλοι έργου στις Μ.Ε.Κ.

Στις θερμικές μηχανές εσωτερικής καύσεως δεν μπορούμε να μιλάμε για θερμοδυναμικούς κύκλους του εργαζόμενου ρευστού αλλά για θερμικούς κύκλους έργου μηχανής και γι' αυτό το λόγο στις τετμημένες των θερμοδυναμικών διαγραμμάτων αντί του θερμικού όγκου [v = m3/kg] υπάρχει ο όγκος που παράγεται από τη μετατόπιση του εμβόλου [V = m3].

Ένας άλλος λόγος για τον οποίο στις μηχανές εσωτερικής καύσης αναφερόμαστε σε θερμικούς κύκλους έργου και όχι σε θερμοδυναμικούς κύκλους, προκύπτει από τον ίδιο τον ορισμό του θερμοδυναμικού κύκλου τον οποίο υπενθυμίζουμε:

«Ένα αέριο ρευστό διαγράφει ένα θερμοδυναμικό κύκλο όταν ξεκινάει από τις συνθήκες ενός σημείου 1 και διαγράφει έναν κύκλο μεταβολών επανερχόμενο στις αρχικές συνθήκες».

Πράγματι, όπως διαπιστώνεται στη μελέτη λειτουργίας ΜΕΚ το ρευστό στην αρχή αποτελείται από ένα μείγμα αερίων, καυσίμου και αέρα, αφού καεί το καύσιμο με το οξυγόνο που παράγεται στον αέρα, δημιουργούνται καυσαέρια (ουσία διαφορετική από την προηγούμενη) και αφού αυτά εκτονωθούν, παράγουν έργο, το οποίο παραλαμβάνεται από τα κινητά μέρη του κινητήρα και αποδίδεται με μορφή μηχανικού έργου (περιστρεφόμενος άξονας). Στη συνέχεια αυτό εξέρχεται από τον κινητήρα και αντικαθίσταται με νέο καύσιμο μίγμα. Από τα πιο πάνω φαίνεται καθαρά πως ο θερμοδυναμικός κύκλος του Carnot δεν μπορεί να εφαρμοστεί ως κύκλος αναφοράς για τη βελτίωση της απόδοσης των θερμικών μηχανών εσωτερικής καύσης.

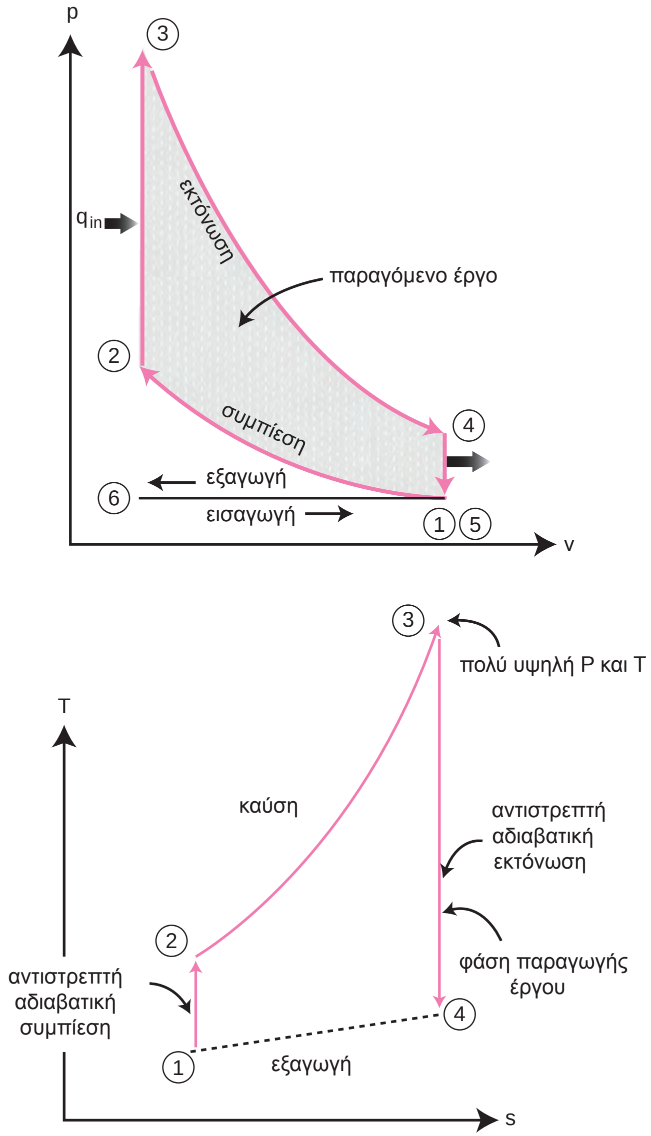
Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κύκλος αυτός, είναι ότι στον κύκλο του Carnot υπάρχουν δυο πηγές θερμότητας σταθερής θερμοκρασίας, μιας υψηλής και μιας χαμηλής πίεσης. Στις μηχανές εσωτερικής καύσης παρατηρείται ότι μπορεί να υπάρχει μια μόνο πηγή θερμότητας σταθερής θερμοκρασίας, η χαμηλή, ενώ η προσφορά θερμότητας γίνεται με μεταβαλλόμενη τη θερμοκρασία.

Για το λόγο αυτό, για τη μελέτη και τη βελτίωση της λειτουργίας των κινητήρων ΜΕΚ είμαστε υποχρεωμένοι να ορίσουμε θερμικούς κύκλους αναφοράς.

9.4.3. Θερμικός κύκλος Otto

Στο σχήμα 9.4.3.α φαίνεται θερμικός κύκλος έργου αναφοράς για τους 4χρονους κινητήρες Μ.Ε.Κ.

Ονομάζεται 4χρονος ένας παλινδρομικός κινητήρας ΜΕΚ, ο οποίος σε 2 πλήρεις στροφές του άξονα του έχει έναν κύκλο μηχανικού έργου και 2χρονος, όταν σε μια πλήρη στροφή του άξονα του υπάρχει ένας κύκλος έργου.



Σχήμα 9.4.3.α: Κύκλος Otto

Για τον 4χρονο παλινδρομικό κινητήρα ένας κύκλος αναφοράς σε συντεταγμένες P–V και T–S φαίνεται στο σχήμα 9.4.3.α.

Σε αυτόν τον κύκλο παρατηρείται ότι αυτός αποτελείται από δυο ισόχωρες και δυο αδιαβατικές.

Μεταβολή 6-1: φάση εισαγωγής κατά την οποία μπαίνει στον κινητήρα το καύσιμο μίγμα (αέρας–καύσιμο)

Μεταβολή 1-2: φάση της συμπίεσης κατά την οποία το ρευστό συμπιέζεται αδιαβατικά έως το σημείο 2

Μεταβολή 2-3: φάση της καύσης. Παραγωγή θερμότητας από την καύση του μίγματος. Εισαγωγή θερμότητας από T_2 έως T_3. Κατά τη διάρκεια της καύσης ο όγκος του ρευστού παραμένει σταθερός (καύση υπό σταθερό όγκο)

$$Q_1 = C'_v(T_3 - T_2)$$

$$W = 0$$

$$\Delta S > 0$$

Μεταβολή 3-4: φάση εκτόνωσης. Το ρευστό παράγει έργο.

$$Q = 0,\ W_e = \ \Delta U_{43},\ \Delta S = 0$$

Μεταβολή 4-5: φάση αυθόρμητης εξαγωγής κατά την οποία το ρευστό που βρίσκεται σε υψηλότερη πίεση P4, βγαίνει από μόνο του σε ένα χώρο που επικρατεί χαμηλότερη πίεση P5 και μάλιστα με σταθερό όγκο.

$$Q_2 = C'_v\ (T_4\ T_1)$$

$$\Delta S < 0$$

Μεταβολή 5-6: φάση της βεβιασμένης εξαγωγής. Το ρευστό δεν μπο ρεί από μόνο του να απομακρυνθεί και αυτό γίνεται αναγκάζοντας το να βγει εκτός του κινητήρα, καταναλώνοντας έργο.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης μιας θερμικής μηχανής της, οποίας το εργαζόμενο ρευστό, θεωρούμενο ως ενιαίο, ακολουθεί τις μεταβολές του πιο πάνω κύκλου έργου θα δίνεται από τη σχέση

$$n_\theta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

Σχέση που θα αποδειχθεί παρακάτω, όπου ε η σχέση συμπίεσης του κινητήρα και κ είναι το πηλίκο

$$\kappa = \frac{C_p}{C_v}$$

των ειδικών θερμοτήτων υπό σταθερή πίεση και σταθερό όγκο.
Αυτή ορίζεται ως το πηλίκο

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

όπου V_1 είναι ο ολικός όγκος του κυλίνδρου και V_2 είναι ο όγκος του θαλάμου καύσης (νεκρός χώρος)

ΑΝΣ είναι το Ανω Νεκρό Σημείο, δηλ είναι το ανώτερο σημείο που μπο1ρεί να φθάσει η πάνω επιφάνεια του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο.

ΚΝΣ είναι το Κάτω Νεκρό Σημείο, δηλ είναι το κατώτερο σημείο που μπορεί να φθάσει η πάνω επιφάνεια του εμβόλου μέσα στον κύλινδρο.

V: είναι ο κυβισμός του κυλίνδρου, είναι δηλ. ο όγκος που δημιουργεί ται από την κίνηση του εμβόλου από το ΚΝΣ έως το ΑΝΣ.

Από τη σχέση

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$$

προκύπτει

$$\varepsilon = \frac{V_2 + V}{V_2} = 1 + \frac{V}{V_2}$$

και από αυτή προκύπτει ότι ο όγκος του θαλάμου καύσης

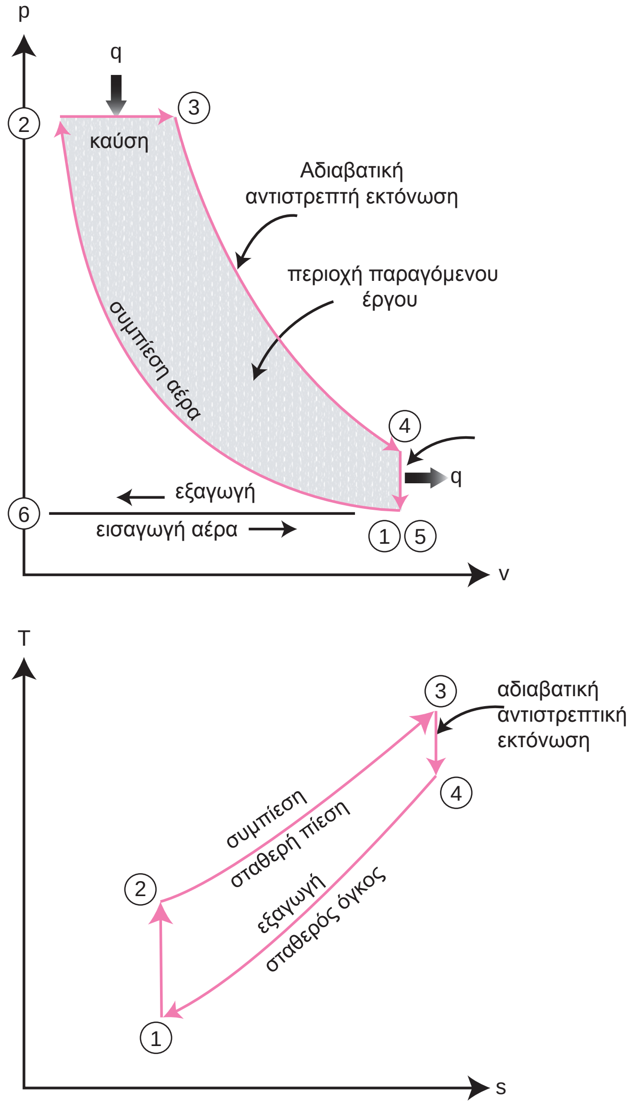
$$V_2 = \frac{V}{\varepsilon - 1}$$

Σημειώνεται ότι ο κυβισμός μιας παλινδρομικής ΜΕΚ δε συμπεριλαμβάνει τους όγκους των θαλάμων καύσης.

Ο κύκλος ονομάστηκε Otto προς τιμήν του Γερμανού μηχανικού Otto, ο οποίος υλοποίησε τον τύπο αυτού του κινητήρα από την ιδέα των Ιταλών μηχανικών Barsanti e Matteucci.

9.4.4. Θερμικός κύκλος έργου Diesel

Στο σχήμα 9.4.4.α φαίνονται οι θερμικοί κύκλοι αναφοράς για τους 4χρονους κινητήρες Diesel, ρ



Σχήμα 9.4.4.α

παρατηρούμε σε αυτά.

Μεταβολή 6-1: φάση εισαγωγής. Μέσα στον κύλινδρο εισάγεται αέρας.

Μεταβολή 1–2: φάση συμπίεσης. Το αέριο ρευστό (αέρας) συμπιέζεται αδιαβατικά και φθάνει στις συνθήκες του σημείου 2. Η θερμοκρασία του αέρα T2 στο τέλος της συμπίεσης έχει αυξηθεί (λόγω συμπίεσης). Προς το τέλος της συμπίεσης και πριν το έμβολο φθάσει στο ΑΝΣ γίνεται η έγχυση του πετρελαίου. Αυτό αναμιγνύεται με τον υπάρχοντα αέρα και σε περιβάλλον θερμοκρασίας μεγαλύτερο του σημείου ανάφλεξης, αυτό αναφλέγεται.

Μεταβολή 2–3: φάση της καύσης. Το δημιουργούμενο καύσιμο μίγμα, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη φάση, αναφλέγεται και καίγεται με σταθερή πίεση προσδιορίζονται στο ρευστό. Θερμική ενέργεια Q,.

Μεταβολή 3–4: φάση αδιαβατικής εκτόνωσης. Το ρευστό και η θερμοδυναμική αυτή μεταβολή παράγουν έργο, το οποίο παραλαμβάνει ο μηχανισμός εμβόλουδιωστήρα, μεταφέροντας το ως μηχανικό έργο εκτός του κινητήρα (στον άξονα).

Μεταβολή 4–5: φάση της αυθόρμητης εξαγωγής. Το ρευστό εξέρχεται από το κινητήρα αυθόρμητα (χωρίς βοήθεια) υπό σταθερό όγκο, λόγω της διαφοράς της πίεσης του κυλίνδρου και του περιβάλλοντος.

Μεταβολή 5–6: φάση της βεβιασμένης εξαγωγής. Σε αυτήν την περίπτωση το ρευστό εξέρχεται από τον κύλινδρο με τη βοήθεια της κίνησης του εμβόλου προς το ΑΝΣ.

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης μιας θερμικής μηχανής, της οποίας το εργαζόμενο ρευστό, θεωρούμενο ως ιδανικό, ακολουθεί τις μεταβολές του πιο κύκλου έργου θα δίνεται από τη σχέση:

$$n_\theta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\tau' - 1}{\kappa(\tau' - 1)}$$

όπου: ε η σχέση συμπίεσης

τ΄ το πηλίκο των θερμοκρασιών

$$\frac{T_3}{T_2}$$

κ είναι το πηλίκο των ειδικών θερμοτήτων

$$\frac{C_p}{C_v}$$

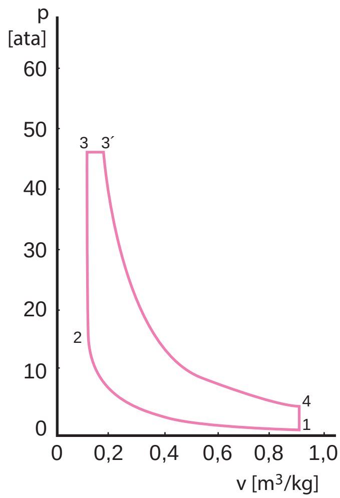
Η πιο πάνω σχέση θα αποδειχθεί στα επόμενα.

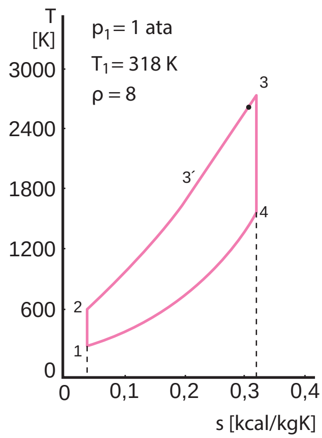
Ο κύκλος αυτός ονομάζεται Diesel προς τιμήν του Γερμανού μηχανικού

Rudolf Diesel, οποίος κατασκεύασε γύρω στα 1893 ένα θερμικό κινητήρα, του οποίου το εργαζόμενο ρευστό ακολουθούσε αυτόν το θερμικό κύκλο έργου.

9.4.5. Μικτός θερμικός κύκλος έργου

Η εξέλιξη των μηχανών Diesel οδήγησε να εργάζονται αυτές με μεγαλύτερο αριθμό στροφών λειτουργίας. Για τη βελτίωση της απόδοσης αυτών των κινητήρων προτάθηκε από το Γάλλο μηχανικό Sabathe ο πιο κάτω θερμικός κύκλος έργου παλινδρομικής ΜΕΚ, απ'όπου πήρε και το όνομά του.





Σχήμα 9.4.4.β: *Κύκλος έργου Sabathe*

Ο κύκλος αυτός συμπεριλαμβάνει και τους δυο προηγούμενους θερμικούς κύκλους.

Σε αυτόν παρατηρούμε ότι η φάση της καύσης γίνεται κατά ένα μέρος υπό σταθερό όγκο (μεταβολή 2–3) και μέρος υπό σταθερή πίεση (μεταβολή 3–3΄).

Ο βαθμός απόδοσης δίνεται από τη σχέση

$$\boxed{\eta_\theta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}}$$

όπου: Q_1 θερμότητα που μπαίνει λόγω της καύσης

Q_2 θερμότητα που αποβάλλεται στο περιβάλλον

$$Q_I = Q_{IV} - Q_{IP} = C_{V'}(T_3 - T_2) + C_{V'\,P}\,(T_3{}' - T_3)$$

$$Q_2 = C_{V'}\,(T_4 - T_1)$$

αντικαθιστώντας έχουμε:

$$\eta_\theta = \frac{C'_v - (T_3 - T_2) + C'_p - \left(T'_3 - T_3\right) - C'_v - \left(T_4 - T_1\right)}{C'_v - \left(T_3 - T_2\right) + C'_p - (T'_3 - T_3)}$$

διαιρούμε και τους δυο όρους με $C_V{}'$, οπότε θα έχουμε:

$$\eta_\theta = \frac{T_3 - T_2 + \dfrac{C_p}{C'_v}\left(T'_3 - T_3\right) - T_4 + T_1}{T_3 - T_2 + \dfrac{C_p}{C'_v}\left(T'_3 - T_3\right)} = \frac{T_3 - T_2 + \kappa'\left(T'_3 - T_3\right) - T_4 + +T_1}{T_3 - T_2 + \kappa'(T'_3 - T_3)}$$

θεωρούνται τα πηλίκα θερμοκρασιών:

$$\tau = \frac{T_3}{T_2} \qquad \tau' = \frac{T'_3}{T_2}$$

και εκφράζονται όλες οι θερμοκρασίες σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία T_1.

Προσδιορισμός της T_2: η μεταβολή 1–2 είναι αδιαβατική και ισχύει ο νόμος της αδιαβατικής μεταβολής $P \cdot V^K$ = σταθ. Εφαρμόζοντας τη σχέση αυτή για τα σημεία 1 και 2 θα έχουμε

$$P_1 \cdot V_1^{\kappa} = P_2 \,.\, V_2^{\kappa}$$

$P_1 \cdot T_1^K \cdot V^{K-1} = P_2 \cdot T_2^K \cdot V_2^{K-1}$

θεωρώντας το ρευστό ως ιδανικό ισχύει η καταστατική εξίσωση αερίων

$P \cdot V = R \cdot T$

εφαρμοζόμενη για τα σημεία 1 και 2 θα έχουμε:
$P_1 \cdot V_1 = R \cdot T_1$ και $P_2 \cdot V_2 = R \cdot T_2$

και αντικαθιστώντας προκύπτει

$R\, T_1\, V_1^{K-1} = R\, T_2 V_2^{K-1}$

δεν γίνεται μεγάλο λάθος, αν θεωρήσουμε, στην περίπτωση των βενζινοκινητήρων, ότι αντί να μπαίνει καύσιμο μίγμα εντός αυτών μπαίνει αέρας. Συνεπώς το Κ είναι το πηλίκο των ειδικών θερμοτήτων του αέρα.

$$\boxed{K = \frac{C_p}{C_v}}$$

Με την υπόθεση αυτή η σχέση γίνεται:
$T_1\, V^{K-1} = T_2 V_2^{K-1}$

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{V_1^{K-1}}{V_2^{K-1}} = T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

και επειδή

$$\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = E$$

$$T_2 = T_1 E_{K-1}$$

Προσδιορισμός T_3 από τη σχέση

$$\tau = \frac{T_3}{T_2}$$

$T_3 = \tau \cdot T_2 = \tau \cdot T_1 \cdot E^{\kappa-1}$

Προσδιορισμός T_3' από τη σχέση

$$\tau' = \frac{T'_3}{T'_2}$$

προκύπτει ότι $T_3' = \tau' \cdot T_3 = \tau \cdot \tau' \cdot T_1 \cdot E^{\kappa-1}$

Προσδιορισμός T_4 Η μεταβολή 3΄–4 είναι αδιαβατική και εργαζόμενοι όπως προηγούμενα θα έχουμε

$P_3'' \cdot V_3' = P4 \cdot v4$

$P_3'' \cdot V_3' \cdot V_3'^{K'-1} = P_4 \cdot V_4 \cdot V_4'^{K'-1}$

$R' \cdot T_3' \cdot V_3'^{K'-1} = R_4 \cdot T_4 \cdot V_4^{K'-1}$

$T_3' \cdot V_3'^{K'-1} = T_4 \cdot V_4'^{K'-1}$

$$T_4 = T'_3 \frac{V'_3}{V_4^{K'-1}} = T'_3 \left(\frac{V'_3}{V'_4} \right)^{K'-1}$$

Αντικαθιστώντας τις θερμοκρασίες T_2, T_3, T_3' και T_4 στη σχέση (A) και κάνοντας τις πράξεις προκύπτει

$$\eta_\theta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\tau \cdot \tau' \kappa - 1}{\tau - 1 + \kappa' \tau (\tau' - 1)}$$

στην τελευταία σχέση παρατηρείται ότι για

$$\tau' = 1 \text{ δηλ.}$$

$$\tau' = \frac{T'_3}{T_3} = 1$$

$$T_3'' = T_3$$

όταν η καύση γίνει υπό σταθερό όγκο (κύκλος Otto), η προηγούμενη σχέση δίνει

$$\boxed{n_\theta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}}$$

δηλ. αποδείχθηκε ο τύπος του βαθμού απόδοσης του κύκλου Otto για $\tau = 1$

$$\tau = \frac{T'_3}{T_3} = 1$$

$T_3 = T_2$ δηλ. η καύση γίνεται υπό σταθερή πίεση (κύκλος Diesel)

Σ' αυτήν την περίπτωση θα είναι

$$n_\theta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\tau'(\kappa-1)}{\kappa(\tau'-1)}$$

απόδειξη του βαθμού απόδοσης ενός κινητήρα Diesel

9.4.6. Σύγκριση των θερμικών κύκλων έργου Otto και Diesel

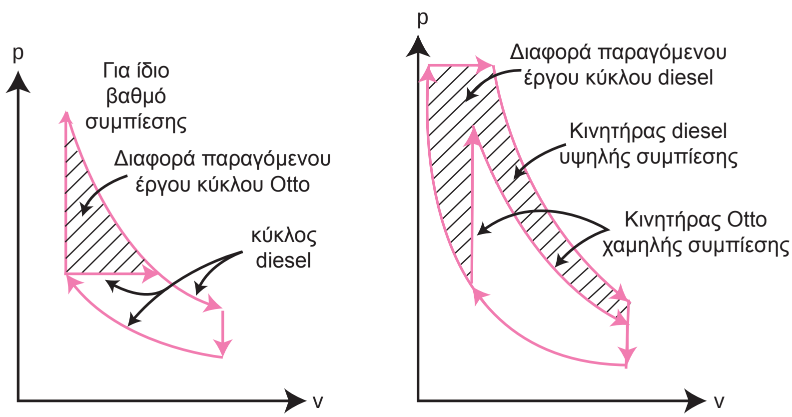
Συγκρίνοντας τους θερμικούς βαθμούς απόδοσης των θερμικών κύκλων Otto και Diesel, παρατηρούμε ότι ο θερμικός κύκλος έργου Otto έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης από τον αντίστοιχο Diesel που σημαίνει ότι μια μηχανή, στην οποία το εργαζόμενο ρευστό εργάζεται σύμφωνα με τον κύκλο Otto στις ίδιες οριακές τιμές του κύκλου, έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης.

Πράγματι το πηλίκο

$$\frac{\tau'(\kappa-1)}{\kappa'(\tau'-1)} < 1$$

και συνεπώς ο θερμικός βαθμός απόδοσης του Diesel είναι μικρότερος του Otto.

Στο ίδιο αποτέλεσμα καταλήγουμε, εάν θεωρήσουμε τους θερμικούς κύκλους Diesel και Otto ότι αποτελούνται από πολλούς στοιχειώδεις κύκλους.

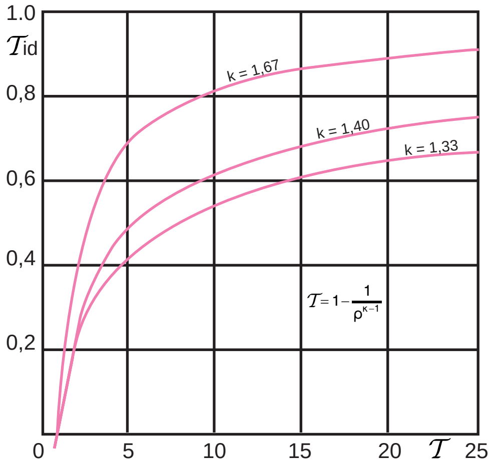


Σχήμα 9.4.6.α: *Σύγκριση κινητήρων Otto και Diesel*

Στα πιο πάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι ο κύκλος Otto αποτελείται από στοιχειώδεις κύκλους, που έχουν όλοι την ίδια σχέση συμπίεσης ε. Αντίθετα, εκείνος του Diesel αποτελείται από στοιχειώδεις κύκλους, των οποίων η σχέση της συμπίεσης συνεχώς μικραίνει, με συνέπεια αυτός να ’χει μικρότερο βαθμό απόδοσης.

Όμως, κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας του εργαζόμενου ρευστού στους παλινδρομικούς κινητήρες Diesel, αυτοί μπορούν να έχουν καλύτερο βαθμό απόδοσης.

Στο σχήμα 9.4.6.β η γραφική παράσταση του θερμικού βαθμού απόδοσης ενός κινητήρα, του οποίου το εργαζόμενο ρευστό που θεωρείται ιδανικό, διαγράφει ένα θερμικό κύκλο του έργου Otto.



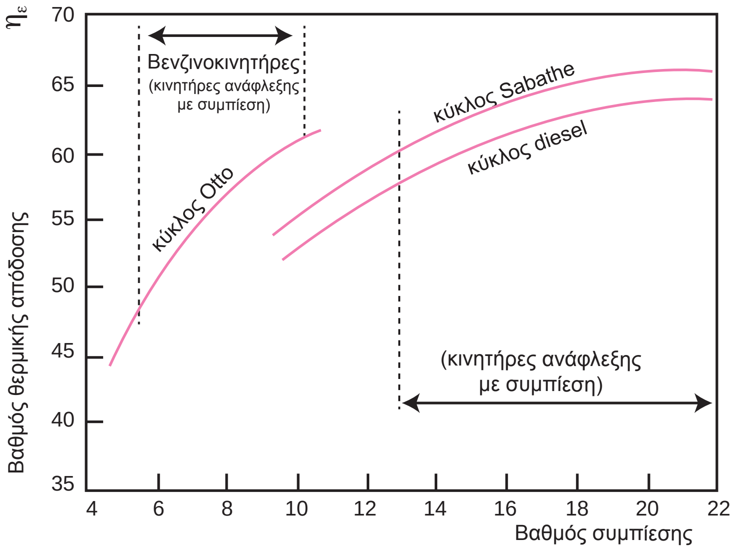
Σχήμα 9.4.6.β

Μια παρατήρηση που προκύπτει από το παραπάνω σχήμα είναι ότι, για τη βελτίωση μιας τέτοιας μηχανής Otto, δε συμφέρει από ένα σημείο και μετά να αυξήσουμε τη σχέση συμπίεσης, γιατί το κέρδος στο βαθμό απόδοσης είναι μικρό και μάλιστα για πολύ μεγάλα ε τείνει στο μηδέν.

Βέβαια στο μάθημα των ΜΕΚ θα διαπιστωθεί ότι ένας άλλος λόγος που απαγορεύει την αύξηση του ε, είναι η δημιουργία ανωμάλων καύσεων (όπως κρουστική), με αποτέλεσμα να περιορίζεται το ε σε τιμές μέχρι και 11. Ακόμα, αυτός δεν μπορεί να πάρει πολύ μικρές τιμές και μάλιστα όχι κάτω του 6. Η ανώτερη τιμή του του ε (δηλ. το 11) αποτελεί ένα όριο στην εξέλιξη του βενζινοκινητήρα. Τελικά η σχέση συμπιέσεως περιορίζεται $6<ε<11$ και ο βαθμός απόδοσης σε αντίστοιχα όρια.

Για τους κινητήρες που το εργαζόμενο ρευστό ακολουθεί τον κύκλο Diesel, ισχύει το πρώτο μέρος των πιο πάνω, δεν ισχύει όμως το δεύτερο, διότι δεν υπάρχουν κρουστικές καύσεις, συνεπώς το ε αυξάνεται απεριόριστα με μόνο εμπόδιο την πίεση. Αυτό σημαίνει ότι χρειαζόμαστε ανθεκτικότερο κινητήρα, με περισσότερο βάρος κ.λπ.

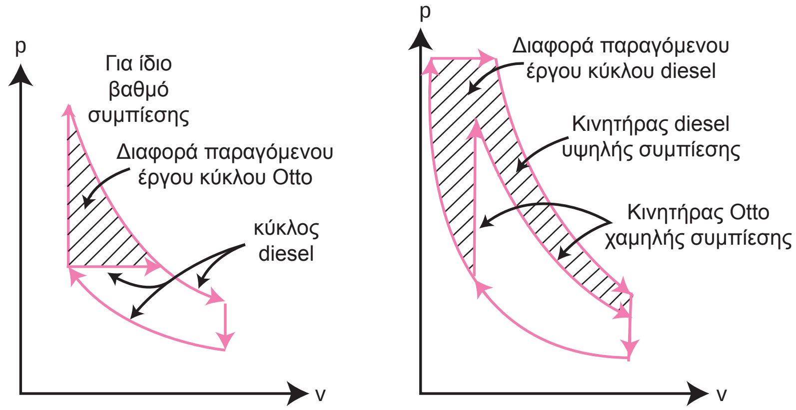
Στους κινητήρες αυτούς το ε μεταβάλλεται από 13 έως 22.
Τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 9.4.6.γ



Σχήμα 9.4.6γ

Από το διάγραμμα του σχήματος συμπεραίνουμε ότι στους κινητήρες νέας τεχνολογίας Diesel (πολύστροφους) είναι δυνατόν, αν η σχέση συμπίεσης είναι υψηλή, ο βαθμός απόδοσης να είναι μεγαλύτερος από ένα βενζινοκινητήρα.

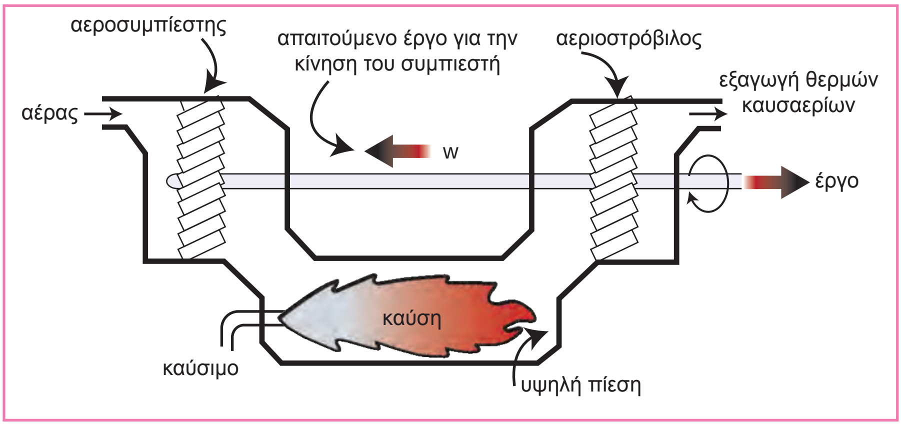
Στο σχήμα 9.4.6.δ φαίνονται καθαρά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα διαγράμματα του σχήματος 9.4.6γ.



Σχήμα 9.4.6.δ: *Σύγκριση κινητήρων Otto, Diesel.*

9.4.7. Θερμικοί κύκλοι έργου Brayton ή Joule

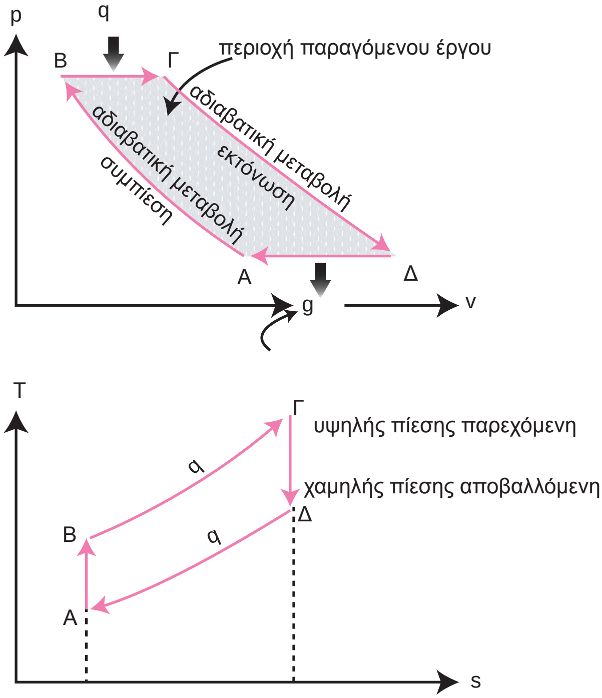
Η εξέλιξη των ΜΕΚ οδήγησε στην κατασκευή κινητήρων, όπως εκείνων που φαίνονται στο σχήμα 9.4.7.α



Σχήμα 9.4.7.α: *Κινητήρας κύκλου Brayton ή Joule*

Αυτή αποτελείται από μια εργομηχανή, (αεροσυμπιεστή), ο οποίος συμπιέζει και παρέχει μεγάλη ποσότητα αέρα στον καυστήρα, όπου το καύσιμο αναμιγνύεται με O_2 του αέρα και καίγεται, στη συνέχεια τα θερμά καυσαέρια οδηγούνται σε μια θερμική κινητήρια μηχανή (αεροστρόβιλο), όπου εργάζεται παράγοντας έργο, που παραλαμβάνει ο άξονας της τουρμπίνας.

Ο θεωρητικός θερμικός κύκλος έργου σε συντεταγμένες P,V και T,S μιας τέτοιας μηχανής φαίνεται στο σχήμα 9.4.7.β.



Σχήμα 9.4.7.β: Διάγραμμα κύκλου έργου Brayton ή Joule

Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης αυτού του κύκλου, που ονομάζεται Brayton ή Joule δίνεται από τον τύπο

$$n_\theta = 1 - \frac{T_\alpha}{T_\beta} = 1 - \left(\frac{P_A}{P_B}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

όπου $\kappa = C_p/C_v$

Οι μηχανές αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για σταθερές εφαρμογές (π.χ. εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) σε περιπτώσεις αιχμής.

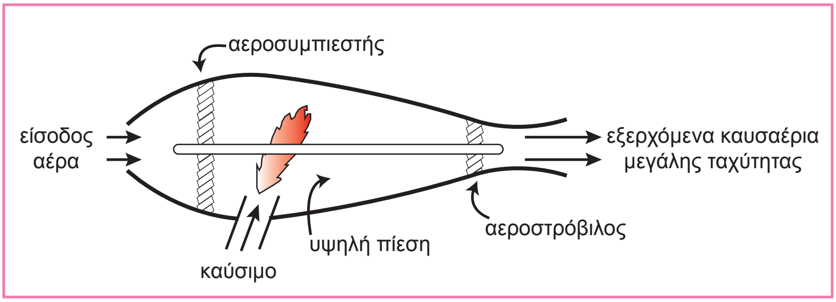
Παρατηρείται ότι μεγάλο ποσό από το παραγόμενο έργο του εργαζόμενου ρευστού, απορροφάται για τη λειτουργία του συμπιεστή ($\simeq$ 60%).

Αντίθετα, όπως προαναφέραμε, η αντίστοιχη μηχανή στον κύκλο του Rankine σε μια θερμική εγκατάσταση εξωτερικής καύσης απορροφά $\simeq$1% του παραγόμενου έργου. Γι’ αυτό το λόγο, η εξέλιξη των θερμικών μηχανών έγινε με ταυτόχρονη αύξηση του βαθμού απόδοσης των αεροσυμπιεστών.

Επίσης παρατηρούμε ότι ο θερμικός βαθμός απόδοσης αυτής της θερμικής εγκατάστασης εξαρτάται από τις οριακές θερμοκρασίες T_A και T_B, συνεπώς, θα μπορούσαμε να πούμε ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η T_B, τόσο καλύτερος θα 'ναι και ο βαθμός απόδοσης της θερμοκρασίας που σημαίνει ότι, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία των καυσαερίων, τόσο μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης θα 'χει η εγκατάσταση. Αυτό περιορίζεται από το γεγονός ότι τα μέταλλα από τα οποία κατασκευάζονται αεριοστρόβιλοι, πρέπει να αντέχουν σε μεγάλες θερμοκρασίες με μεγάλο κόστος παραγωγής αφενός, και αφετέρου, όταν η θερμοκρασία ξεπερνά ορισμένα όρια, τότε στα καυσαέρια εμφανίζεται το φαινόμενο της διάσπασης, με αποτέλεσμα τη μείωση του θερμικού βαθμού απόδοσης.

9.4.8 Αεριοστρόβιλοι για την κίνηση αεροπλάνων (Turbo-Jet)

Η εφαρμογή του θεωρητικού θερμικού κύκλου Brayton-Joule οδήγησε στην κατασκευή θερμικών κινητήρων, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.4.8.α



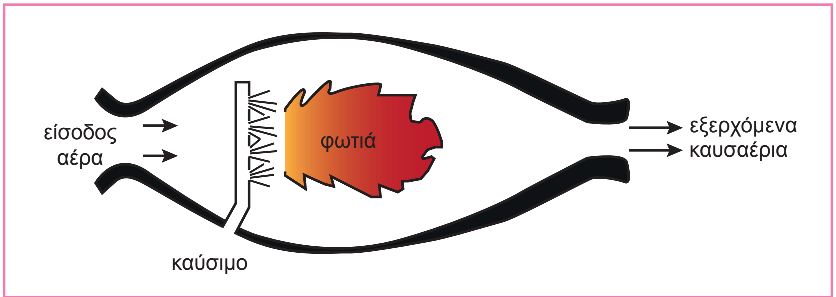
Σχήμα 9.4.8.α: *Κινητήρας Turbo-Jet*

Σ' αυτή τη μηχανή για την κίνηση του αερρπλάνου χρησιμοποιείται η κινητική ενέργεια των καυσαερίων, που εξέρχονται από τον καυστήρα.

Ο αεριοστρόβιλος που υπάρχει, δέχεται ένα μέρος του παραγόμενου έργου από το εργαζόμενο ρευστό, για να κινήσει τον αξονικό αεριοσυμπιεστή, ο οποίος απορροφά και συμπιέζει τον αέρα στο θάλαμο καύσης, όπου καίγεται το καύσιμο, που στη συνέχεια τα καυσαέρια εκτονούμενα αποκτούν μεγάλες ταχύτητες και εξερχόμενα από τη θερμική μηχανή ωθούν το αεροπλάνο.

9.4.9 Θερμικές μηχανές κύκλου Brayton-Joule χωρίς αεροσυμπιεστή και αεροστρόβιλο (Ramjet)

Μια τέτοια θερμική μηχανή φαίνεται στο σχήμα 9.4.9.α



Σχήμα 9.4.9.α: *Κινητήρας Ramjet*

Σ' αυτήν ο αέρας εισέρχεται με μεγάλη ταχύτητα στον καυστήρα, όπου καιγόμενο το καύσιμο δημιουργεί καυσαέρια, τα οποία εκτονούμενα αποκτούν ακόμη μεγαλύτερη ταχύτητα και εξερχόμενα προωθούν τα αεροπλάνα.

Είναι προφανές ότι, για να λειτουργήσουν αυτοί οι κινητήρες, θα πρέ1πει ήδη το αεροπλάνο να κινείται με μεγάλη ταχύτητα.

9.4.10. Δυνάμεις ώθησης

Για να βρεθούν οι δυνάμεις ώθησης, που δίνουν τα καυσαέρια στο κινού1μενο όχημα κατά την έξοδο τους από αυτό, θα εφαρμοστεί ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής σε ανοικτά συστήματα, όπως μπορούν να θεωρηθούν οι προηγούμενες θερμικές μηχανές.

Εχουμε:

$$Q = \Delta h + Wi + \Delta Ec + \Delta E_{cf} + \Delta E_g$$

Στη σχέση αυτή είναι:

- $Q = 0$, γιατί θεωρούμε το ανοικτό σύστημα ως αδιαβατικό
- $W_i = 0$, θεωρώντας ότι η μηχανή δεν έχει κινούμενα μέρη (Ramjet)
- $\Delta E_{cf} \simeq 0$, θεωρώντας ότι τα φυγοκεντρικά πεδία της γης έχουν μικρή αντίδραση στα αέρια ρευστά.

Τότε η σχέση γίνεται:

$$\Delta h + \Delta \frac{V^2}{2} - \Delta E_g = 0$$

Αυτή γράφεται

$$C_p \ \Delta T + \frac{\Delta V^2}{2} = 0$$

που σημαίνει ότι η διαφορά θερμοκρασίας επηρεάζει την ταχύτητα των καυσαερίων.

Από την άλλη μεριά με την εφαρμογή του νόμου του Newton ισχύει η σχέση:

$$F \cdot t = \Delta\ (m \cdot V)$$

και

$$F = \frac{\Delta(m \cdot V)}{t} = \Delta(m \cdot V)$$

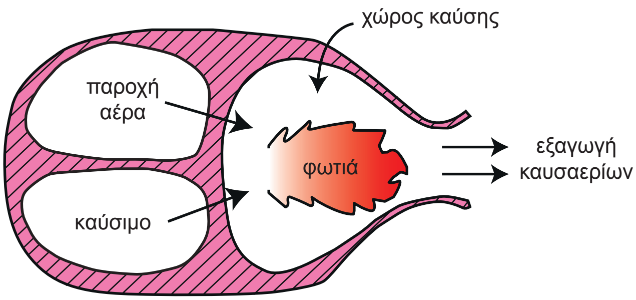
Συνεπώς η δύναμη G είναι ανάλογη

$$F\alpha = \left(\sqrt{T_{\text{εξερχομένων καυσαερίων}}} - \sqrt{T_{\text{εισερχομένου αέρα}}}\right)$$

Τελικά, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά της ενθαλπίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η ώθηση της θερμικής μηχανής.

9.4.11 Θερμικοί κινητήρες κίνησης πυραύλων

Στο σχήμα 9.4.11.α, φαίνεται σε απλή μορφή μια διάταξη κίνησης πυραύλων.



Σχήμα 9.4.11.α: Κινητήρας πυραύλου

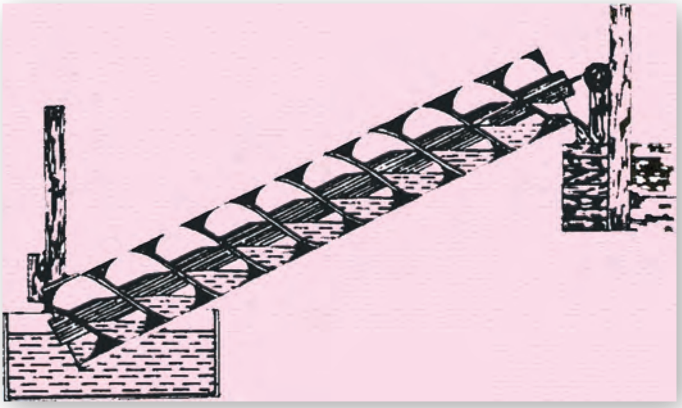
ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 9ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Οι θερμικές μηχανές στις οποίες το εργαζόμενο ρευστό λαμβάνει τη θερμότητα με μεταβολές εκτός αυτού, ονομάζονται θερμικές κινητήριες μηχανές εξωτερικής καύσης. Αντίθετα, εκείνες στις οποίες το εργαζόμενο ρευστό λαμβάνει τη θερμότητα εντός αυτού, ονομάζονται θερμικές μηχανές εσωτερικής καύσης.
- Το νερό μπορεί να υπάρχει σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις, στερεά, υγρή και αέρια, ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που βρίσκεται.
- Εκτός των καταστάσεων αυτών είναι λογικό να υπάρχουν συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που το νερό βρίσκεται σε ενδιάμεσες καταστάσεις, όπως π.χ. συνύπαρξης νερού – ατμού, πάγου – νερού, πάγου – ατμού.
- Η μετάβαση από τη μια κατάσταση στην άλλη ονομάζεται αλλαγή φάσης.
- Είναι κατανοητό ότι, εάν θέλουμε να βελτιώσουμε ακόμη περισσότερο τη θερμική εγκατάσταση, θα πρέπει να αυξήσουμε το εμβαδόν του θερμοδυναμικού κύκλου του Rankine, ώστε να πλησιάσει ακόμη περισσότερο το εμβαδόν του κύκλου του Carnot.

  Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους όπως:

  - Με πολλαπλές αναθερμάνσεις
  - Με απομαστεύσεις μιας ή περισσοτέρων
  - Με την αύξηση της πίεσης λειτουργίας της θερμικής μηχανής
  - Με τη μείωση της πίεσης και της θερμοκρασίας στην έξοδο της θερμικής μηχανής
  - Με χρήση εγκαταστάσεων εξοικονόμησης ενέργειας
  - Με χρήσεις ειδικών εγκαταστάσεων
  - Η ανάγκη της εξέλιξης των μηχανών εξωτερικής καύσης προερχόταν από το μεγάλο όγκο και βάρος των θερμικών αυτών εγκαταστάσεων καθώς επίσης και του μεγάλου αριθμού των περικλειομένων βοηθητικών μηχανημάτων. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό των εφαρμογών στις μεταφορές ξηράς και αέρος. Έτσι εξελίχθηκαν οι θερμικές κινητήριες μηχανές εσωτερικής καύσης

- Ονομάζεται 4χρονος ένας παλινδρομικός κινητήρας ΜΕΚ, ο οποίος σε 2 πλήρεις στροφές του άξονα του έχει έναν κύκλο μηχανικού έργου και 2χρονος, όταν σε μια πλήρη στροφή του άξονα του υπάρχει ένας κύκλος έργου.
- Συγκρίνοντας τους θερμικούς βαθμούς απόδοσης των θερμικών κύκλων Otto και Diesel, παρατηρούμε ότι ο θερμικός κύκλος έργου Otto έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης από τον αντίστοιχο Diesel που σημαίνει ότι μια μηχανή, στην οποία το εργαζόμενο ρευστό εργάζεται σύμφωνα με τον κύκλο Otto στις ίδιες οριακές τιμές του κύκλου, έχει καλύτερο βαθμό απόδοσης.
- Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του Diesel είναι μικρότερος του Otto.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΑΝΤΛΙΕΣ – ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ

10.1 Αντλίες
10.2 Συμπιεστές

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να δίνετε τον ορισμό των αντλιών
- Να αναφέρετε τις κατηγορίες των αντλιών
- Να αναφέρετε τα μεγέθη τα οποία χαρακτηρίζουν τις αντλίες
- Να αναφέρετε τους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την αντλητική ικανότητα των αντλιών.
- Να δίνετε τον ορισμό των συμπιεστών.
- Να αναφέρετε τις κατηγορίες των συμπιεστών.

10.1. ΑΝΤΛΙΕΣ

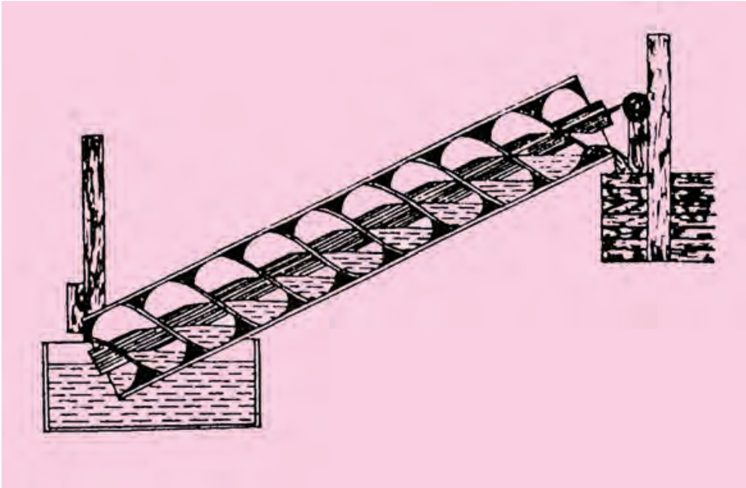
10.1.1. Εισαγωγή

Ο ατέρμων κοχλίας που είναι γνωστός και ως υδρόβιδα ή έλικα, είναι μια από τις αρχαιότερες αντλητικές μηχανές. Διαδόθηκε πολύ γρήγορα, τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο.

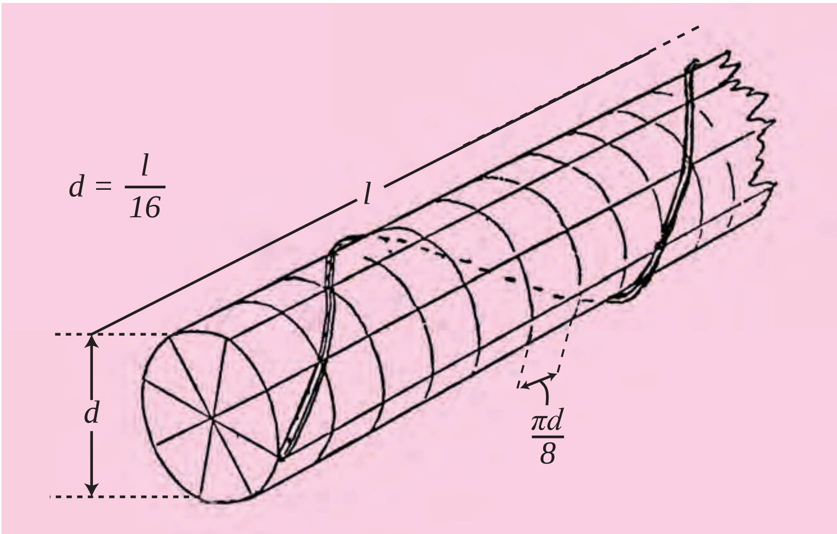
Έως σήμερα χρησιμοποιείται σε χώρες της Ασίας. (Ιράκ-Ιράν-Πακιστάν-Αραβία και άλλες). Είναι βέβαιο όλα τα ιστορικά στοιχεία το αναφέρουν ότι αυτό το μηχάνημα το ανακάλυψε ο Αρχιμήδης (287-212 π.Χ.).

"... οι δε άνθρωποι αρδεύουν όλην την περιοχή δια τίνος μηχανής, την οποίαν επενόησεν μεν ο Αρχιμήδης ο Συρακούσιος, ονομάζεται δε εκ του σχήματος κοχλίας..."
Αγαθαρχίδης ο Κήδιος (180-116 π.Χ.).

Βλέπουμε και εδώ τη μεγάλη συμβολή του ελληνικού στοιχείου στην τεχνολογία. Η πρώτη, λοιπόν, αντλία, πριν από 2.300 χρόνια, ήταν ελληνική.



Σχήμα 10.1: *Ο κοχλίας ή έλικα του Αρχιμήδη, μηχανισμός για την άντληση νερού.*



Σχήμα 10.2: *Τεχνικά χαρακτηριστικά για την κατασκευή του κοχλία.*

10.1.2. Βασικές έννοιες

Αντλίες ονομάζονται τα μηχανήματα με τα οποία είναι δυνατό να μεταφέρουμε μια ποσότητα υγρού από μια υψομετρική στάθμη σε άλλη, που βρίσκεται υψηλότερα, ή από ένα χώρο χαμηλής πίεσης σε άλλο υψηλής πίεσης.

Οι αντλίες δεν είναι κινητήριες μηχανές, αλλά εργομηχανές, είναι δηλαδή θερμικές μηχανές, οι οποίες καταναλίσκουν μηχανικό έργο και παράγουν κινητική ή δυναμική ενέργεια.

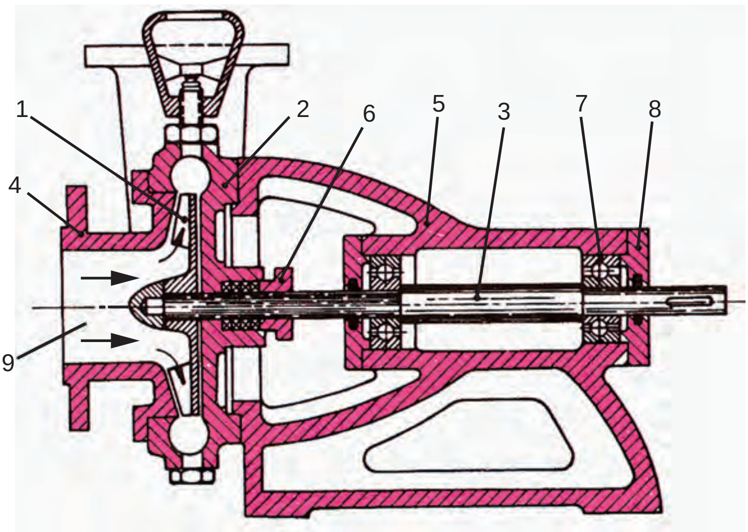
10.1.3 Κατηγορίες αντλιών

Οι αντλίες διαιρούνται κυρίως σε δύο κατηγορίες:

α) Στις φυγόκεντρες αντλίες και

β) στις αντλίες εκτόπισης

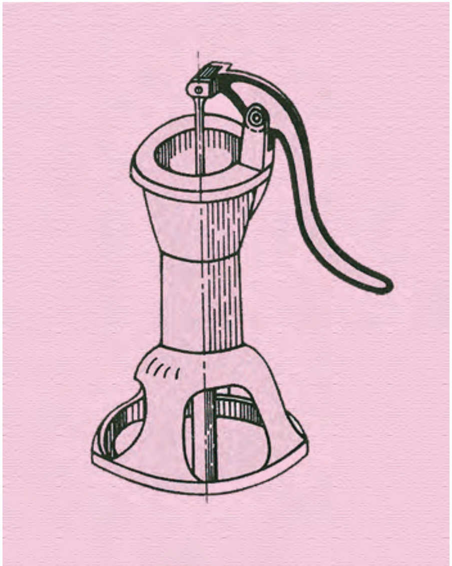
Στις φυγόκεντρες αντλίες η ενέργεια προσδίδεται στο υγρό με την περιστροφή της πτερωτής. Η πτερωτή καθώς περιστρέφεται παρασύρει με τα πτερύγιά της και το υγρό σε περιστροφή. Αυτό λόγω της φυγόκεντρης δύναμης, ωθείται στην περιφέρεια, παραλαμβάνεται από το σπυροειδές κέλυφος και οδηγείται στη σωλήνωση κατάθλιψης.



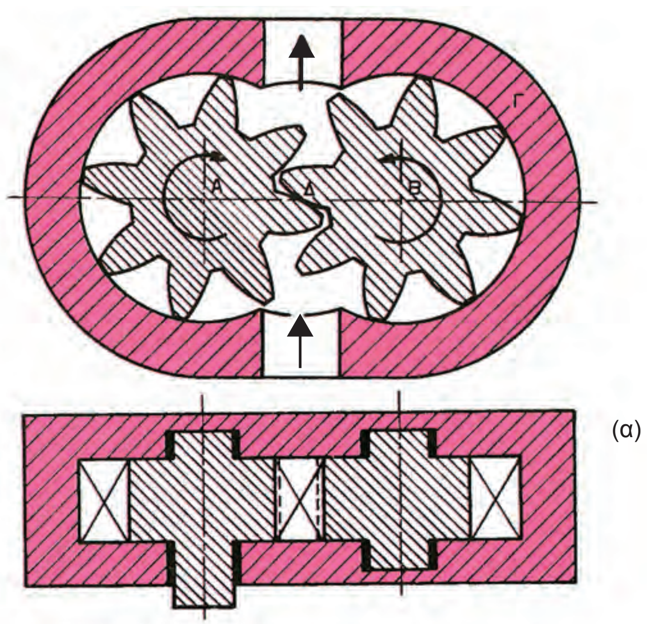
Σχήμα 10.3: *Κύρια μέρη φυγόκεντρης αντλίας*

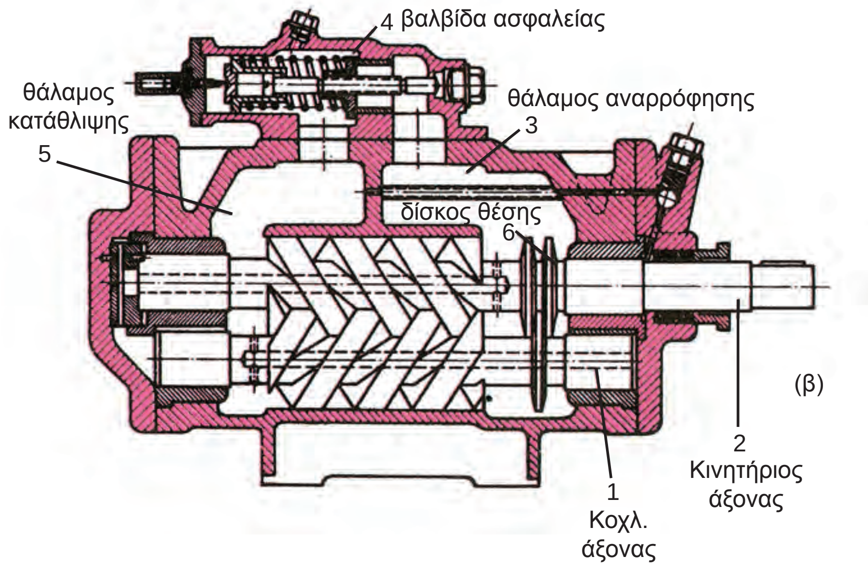
1. Φτερωτή, 2. Σπειροειδές κέλυφος, 3. Άξονας κίνησης, 4. Κάλυμμα αναρρόφησης υγρού, 5. Βάση, 6. Στυπειοθλίπτης, 7. Ρουλεμάν, 8. Κάλυμμα ρουλεμάν, 9. Είσοδος υγρού.

Στις αντλίες εκτόπισης ένας θάλαμος πληρώνεται συνέχεια από το υγρό που πρόκειται να αντληθεί, το οποίο πιέζεται συνήθως από το κάποιο έμβολο. Με αυτό το τρόπο εκτοπίζεται από το θάλαμο και οδηγείται στη σωλήνεωση κατάθλιψης.



Σχήμα 10.4: *Εμβολοφόρος χειροκίνητη αντλία*





Σχήμα 10.5: *α) Γραναζωτή αντλία β) Αντλία με κοχλίες*

Σωλήνας αναρρόφησης είναι το τμήμα του σωλήνα, από το σημείο παραλαβής του υγρού μέχρι την είσοδό του στην αντλία.

Σωλήνας κατάθλιψης είναι το τμήμα του σωλήνα, από το σημείο εξόδου του υγρού από την αντλία μέχρι το σημείο αποστολής του.

Σωληνογραμμή είναι το σύνολο των σωλήνων, μέσα από τους οποίους ρέει το υγρό.

Σύστημα άντλησης είναι η διάταξη του σωλήνα αναρρόφησης, της αντλίας, του σωλήνα κατάθλιψης και του κινητήρα.

Αντλητικό συγκρότημα είναι ένα σύνολο αντλιών (μαζί με τον κινητήρα), που συνεργάζεται για την άντληση του υγρού.

10.1.4. Χαρακτηριστικά μεγέθη αντλιών

Κάθε αντλία χαρακτηρίζεται από ορισμένα βασικά μεγέθη, τα οποία την προσδιορίζουν. Αυτά είναι τα ύψη της αντλίας, η παροχή της, οι βαθμοί α1πόδοσης και η ισχύς που απαιτείται.

Α. Ύψη αντλίας

α) *Στατικό ή γεωμετρικό ύψος αναρρόφησης* ($H_α$), ονομάζεται η κατα κόρυφη απόσταση από την επιφάνεια του υγρού της δεξαμενής αναρρόφησης μέχρι το σημείο εισόδου του υγρού στην αντλία. Το ύψος αυτό μπορεί να έχει και αρνητική τιμή, στην περίπτωση που η αντλία είναι τοποθετημένη χαμηλότερα απ’ τη στάθμη του υγρού.

β) *Στατικό ή γεωμετρικό ύψος κατάθλιψης* (H_u), ονομάζεται η κατακόρυφη απόσταση από το σημείο εξόδου του υγρού απ’ την αντλία, έως την επιφάνεια του υγρού στην δεξαμενή αποθήκευσης.

γ) *Στατικό ή γεωμετρικό ύψος* ($H_σ$) ονομάζεται το άθροισμα των δυο προηγούμενων υψών, είναι δηλαδή η απόσταση απ’ τη στάθμη του υγρού στη δεξαμενή αναρρόφησης μέχρι τη στάθμη του υγρού στη δεξαμενή αποθήκευσης.

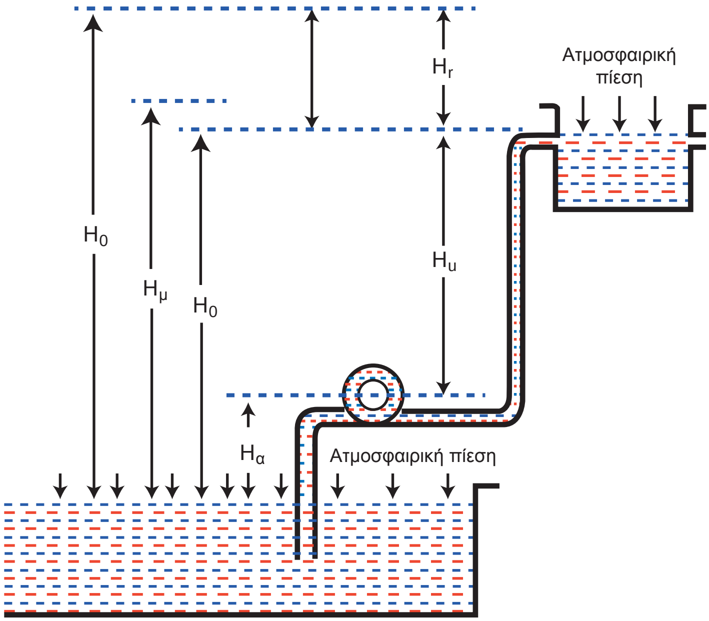
$$H_σ = H_κ + H_α$$

δ) *Ύψος αντιστάσεων* (H_r), είναι το σύνολο των αντιστάσεων, που απο τελούν εμπόδιο στην κίνηση του υγρού. Αυτές οι αντιστάσεις οφείλονται σε τριβές, στενώσεις, διάφορους στροβιλισμούς, στις καμπύλες των σωληνώσεων, στην παρεμβολή διαφόρων οργάνων ή διακοπτών κ.λ.π. Ετσι έχουμε αντιστάσεις εσωτερικές της αντλίας και εξωτερικές των σωληνώσεων. Αυτές οι αντιστάσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό μιας αντλίας.

ε) *Ολικό ύψος* (H_0) είναι το άθροισμα του στατικού ύψους και του ύψους των αντιστάσεων. Είναι δηλαδή:

$$\text{Ho } H_r + H_\sigma = H_r + H_\kappa + H_\alpha$$

στ) *Μανομετρικό ύψος αντλίας* είναι το ολικό ύψος (H_O) αν απ' αυτό αφαιρέσουμε τις εξωτερικές αντιστάσεις των σωληνώσεων κατάθλιψης και αναρρόφησης, δηλαδή αυτών που δημιουργούνται στις σωληνώσεις.



Σχήμα 10.6: *Ύψη αντλίας*

Β. Παροχή

α) *Θεωρητική παροχή* (Q_θ) είναι ο όγκος του υγρού, που θα έπρεπε να αποδίδεται στη μονάδα του χρόνου, αν δεν υπήρχαν εσωτερικές ή εξωτερικές διαρροές.

β) *Κανονική παροχή* (Optimum) (Q_n) είναι η αποδιδόμενη παροχή, όταν η αντλία εργάζεται με το μέγιστο βαθμό αποδόσής της.

γ) *Πραγματική παροχή* (Q) είναι ο όγκος του υγρού που αποδίδεται στο σωλήνα κατάθλιψης στη μονάδα του χρόνου, υπό ορισμένο μανομετρικό ύψος H_m.

δ) *Εσωτερική παροχή* (Q_ε) είναι ο όγκος υγρού, που διέρχεται μέσα από την πτερωτή στη μονάδα του χρόνου. Επομένως, είναι το άθροισμα της πραγματικής παροχής και των εσωτερικών διαρροών:

$$\boxed{Q_\varepsilon = Q + O_\delta}$$

Όπου Q_δ είναι ο όγκος των εσωτερικών διαρροών (το Q_δ είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το Q).

Γ. Απαιτούμενη ισχύς

α) Εισερχόμενη ισχύς στον άξονα της αντλίας (N_α) είναι η ισχύς, που μεταβιβάζεται στον άξονα αντλίας από τον κινητήρα.

Αν η εισερχόμενη ισχύς μετριέται στην πηγή που τροφοδοτεί τον κινητήρα, τότε:

$$\boxed{N_\alpha = n_\kappa + N_\kappa} \qquad (1)$$

η_κ = βαθμός αποδόσεως του κινητήρα.

Β) Εσωτερική ισχύς (N_ε) είναι η συνολική ισχύς που μεταβιβάζεται από την πτερωτή στο υγρό παροχής Q_ε

$$\boxed{N_\varepsilon = \gamma \cdot Q_\varepsilon \cdot H_\varepsilon + N_f} \qquad (2)$$

Όπου N_f η απαιτούμενη ισχύς για την υπερνίκηση των τριβών μεταξύ του υγρού και της πτερωτής, που εκδηλώνεται υπό μορφή θερμικής ενέργειας.

Η εσωτερική ισχύς είναι ίση με την εισερχόμενη ισχύ στον άξονα της αντλίας μείον την ισχύ Nmf, που απαιτείται για την υπερνίκηση των μηχανικών τριβών της αντλίας (τριβείς, σαλαμάστρα κ.λ.):

$$\boxed{N_\varepsilon = N_\alpha - N_{mf}} \qquad (3)$$

γ) Αποδιδόμενη ισχύς (N) της αντλίας είναι το γινόμενο:

$$\boxed{N = \gamma \cdot Q \cdot H_0 \text{ kpm/s}} \qquad (4)$$

γ = ειδικό βάρος του υγρού [kp/m^3],

Q = πραγματική παροχή [m^3/s],

H_0 = αποδιδόμενο ή ολικό ύψος της αντλίας [m].

Αν το ειδικό βάρος του υγρού εκφραστεί σε N/m^3, η ισχύς δίνεται σε Nm/s ή Watt (1 kp = 9,81 N).

Επειδή 1 HP = 75 kp m/s = 0,736 KW η εξίσωση (4) γράφεται:

$$N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_0}{75} HP \quad ή \tag{5}$$

$$\boxed{N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_0}{102} kW} \tag{6}$$

Δ. Βαθμός αποδόσεως

α) Υδραυλικός βαθμός αποδόσεως (η_h) είναι ο λόγος του αποδιδομένου ή ολικού ύψους της αντλίας προς το εσωτερικό ύψος.

$$\boxed{\eta_h = \frac{H_o}{H_\varepsilon} = \frac{H_o}{H_\theta}} \tag{7}$$

β) Ογκομετρικός βαθμός αποδόσεως (η_v) είναι ο λόγος της πραγματικής παροχής προς την εσωτερική παροχή.

$$\boxed{\eta_v = \frac{Q}{Q_e}} \tag{8}$$

γ) Μηχανικός βαθμός αποδόσεως (η_m) είναι ο λόγος της εσωτερικής ισχύος προς την εισερχόμενη ισχύ στον άξονα της αντλίας:

$$\boxed{\eta_m = \frac{N_\varepsilon}{N_\alpha} = \frac{N_\alpha - N_{mf}}{N_\alpha}} \tag{9}$$

δ) Ολικός βαθμός αποδόσεως (η) είναι ο λόγος της αποδιδόμενης ισχύος της αντλίας (N) προς την εισερχόμενη ισχύ στον άξονα της αντλίας:

$$\boxed{\eta = \frac{N}{N_\alpha}} \tag{10}$$

Ο ολικός βαθμός αποδόσεως που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 70% και 90%, είναι το γινόμενο των επί μέρους βαθμών αποδόσεως. Αν Nf ≈ 0, έχουμε:

$$\boxed{n = n_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m}$$

Από την εξίσωση (10) υπολογίζεται η ισχύς που πρέπει να μεταβιβάζει ο κινητήρας στον άξονα της αντλίας:

$$N_\alpha = \frac{N}{\eta} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_0}{\eta} \text{kpm/s} \tag{11}$$

ή σύμφωνα με τις εξισώσεις (5) και (6)

$$N_\alpha = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_0}{75\eta} \text{HP} \tag{12}$$

Και

$$N_\alpha = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_0}{102 \cdot \eta} \text{kW}$$

Αντικαθιστώντας το N_α από την εξίσωση (1) βρίσκουμε την ισχύ του κινητήρα:

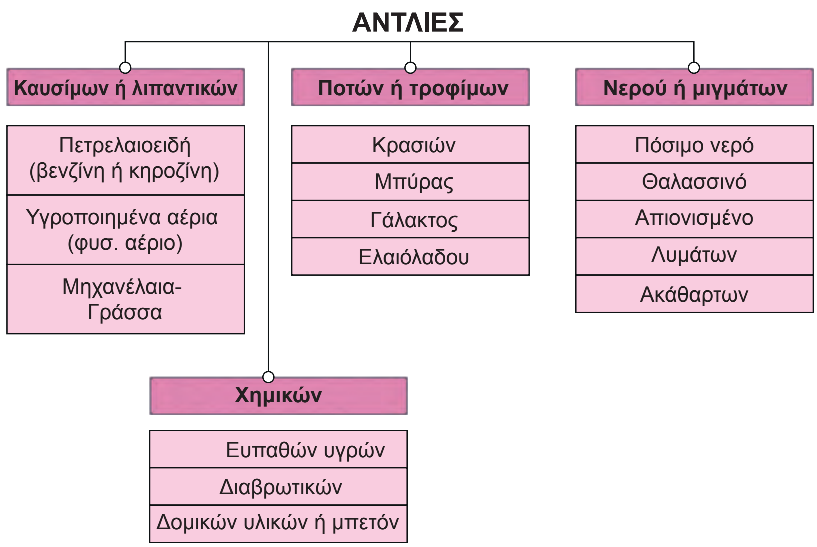
$$N_\kappa = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_0}{102 \cdot \eta \cdot \eta_\kappa} \text{kW}$$

10.1.5. Παράγοντες που επηρεάζουν την αναρρόφηση της αντλίας

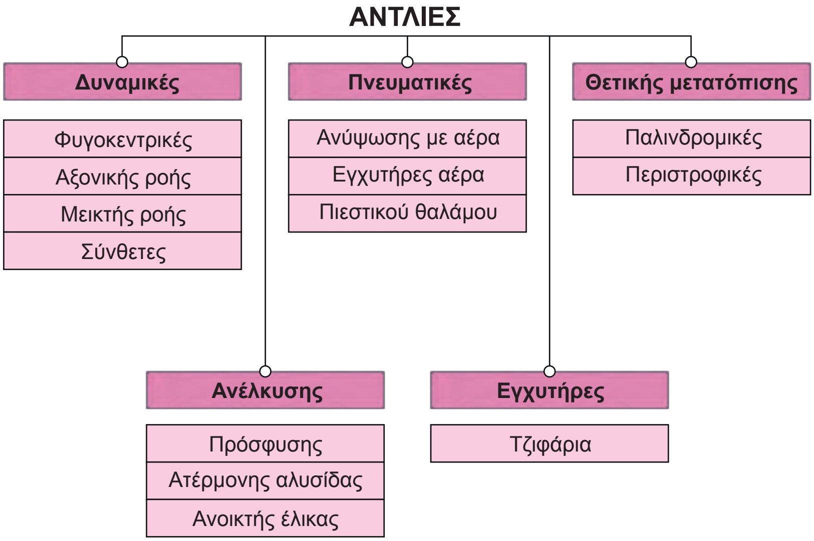
Η αντλία μέσα στο θάλαμό της δημιουργεί ένα κενό. Αυτό είναι μια πίεση μικρότερη από την ατμοσφαιρική, που επικρατεί συνήθως στην επιφάνεια του υγρού και έχει ως αποτέλεσμα την κίνησή του, μέσα στη σωλήνωση. Η ικανότητα μιας αντλίας για αναρρόφηση εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Μερικούς από αυτούς αναφέρουμε παρακάτω:

1) Από την πίεση που επικρατεί στην επιφάνεια του προς αναρρόφηση υγρού. Όσο πιο μικρή είναι αυτή, τόσο πιο δύσκολο είναι το έργο της αντλίας.
2) Από την πυκνότητα και το ιξώδες του υγρού. Όσο πιο παχύρρευστο είναι αυτό, τόσο πιο δύσκολα το αναρροφά η αντλία.
3) Από τη θερμοκρασία του υγρού. Ενα ψυχρό υγρό αναρροφάται πιο εύκολα, σε σχέση με ένα θερμό.
4) Από τις αντιστάσεις των σωληνώσεων. Μεγάλη διάμετρος σωληνώσεων, λιγότερα όργανα, ευθείς σωλήνες, λείοι στο εσωτερικό τους είναι παράγοντες που μειώνουν τις αντιστάσεις.
5) Η στεγανότητα της όλης εγκατάστασης διευκολύνει την αναρρόφηση του υγρού.

10.1.6. Κατάταξη αντλιών ανάλογα με το είδος του αντλούμενου υγρού



10.1.7. Κατάταξη των αντλιών με βάση την αρχή λειτουργίας τους.



10.2. ΣΥΜΠΙΕΣΤΕΣ

1. Εισαγωγή

Στις πρακτικές εφαρμογές τόσο στη βιομηχανία όσο και στις μονάδες μεταποίησης, επισκευής και συντήρησης, χρησιμοποιείται ευρύτατα ο πεπιεσμένος αέρας. Αυτός αποτελεί μια "καθαρή" κινητήρια δύναμη, η οποία είναι αποθηκευμένη.

Η σπουδαιότητα της μελέτης των μηχανημάτων τα οποία συμπιέζουν τον ατμοσφαιρικό αέρα, φαίνεται ξεκάθαρα από τις εφαρμογές, που αναφέρονται πιο κάτω:

Στη βιομηχανία ο ατμοσφαιρικός αέρας κινεί πλήθος φορητών ή μη εργαλείων όπως αερόκλειδα, πρέσες, δράπανα, καρφωτικά. Έχει, επίσης, εφαρμογές στην κίνηση σερβομηχανισμών. Στα λατομεία και στην οδοποιία η κίνηση των γεωδραπάνων και των σφυριών γίνεται με πεπιεσμένο αέρα. Η χρήση του έχει εφαρμογές και σε εργαστήρια οδοντοτεχνικής, ιατρεία οδοντιατρικής, χημικά ή μικροβιολογικά εργαστήρια.

Συνεργεία αυτοκινήτων χρησιμοποιούν πολύ τον πεπιεσμένο αέρα για αρκετές εργασίες. Τέλος, μεγάλα οχήματα (λεωφορεία-φορτηγά κ.α.) έχουν συτήματα πέδησης και ανάρτησης, τα οποία χρησιμοποιούν τον πεπιεσμένο αέρα, για να λειτουργήσουν.

2. Γενικά

Συμπιεστές είναι οι μηχανές, με τις οποίες επιτυγχάνουμε την αύξηση της πίεσης διαφόρων αερίων. Αυτό γίνεται, με την εισαγωγή μιας ποσότητας αερίου από μια πηγή χαμηλής πίεσης, τη συμπίεση και την αποθήκευσή του και, τέλος, την εξαγωγή του σε διάφορες περιοχές-δίκτυα, για να χρησιμοποιηθεί.

Για να επιτευχθεί η αύξηση της πίεσης του αερίου, θα πρέπει να προσ δώσουμε έργο από κάποια κινητήρια μηχανή. Αυτό σημαίνει ότι οι συμπιεστές καταναλίσκουν έργο, γι’ αυτό και καλούνται εργομηχανές.

Η αύξηση της πίεσης του αερίου μπορεί να γίνει με δυο τρόπους:

- Με ελάττωση του όγκου του και
- Με αύξηση της ταχύτητάς του

Το χρησιμοποιούμενο αέριο στους συμπιεστές μπορεί να είναι ατμοσφαιρικός αέρας, οποιοδήποτε άλλο αέριο ή μίγμα αερίων ή ακόμη και ατμός. Στις περισσότερες εφαρμογές γίνεται χρήση του ατμοσφαιρικού αέρα.

Όσον αφορά τις διαφορές των συμπιεστών, που χρησιμοποιούν διαφορετικά αέρια, είναι ελάχιστες τόσο ως προς τη λειτουργία τους, όσο και ως προς τα κατασκευαστικά τους στοιχεία.

Στις επόμενες ενότητες θα αναφερόμαστε στους συμπιεστές που χρησιμοποιούν ατμοσφαιρικό αέρα (αεροσυμπιεστές).

3. Στοιχεία ατμοσφαιρικού αέρα

Όπως είναι γνωστό, ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελείται από άζωτο (N_2) 78%, οξυγόνο (O_2) 21% και άλλα ευγενή αέρια 1%.

Ατμοσφαιρική πίεση ονομάζουμε την υδροστατική πίεση, που ασκεί η ατμόσφαιρα σε κάθε αντικείμενο, που βρίσκεται μέσα σ' αυτή. Η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται, όσο αυξάνει το υψόμετρο του σημείου στο οποίο τη μετράμε. Αυτή μετριέται με τη βοήθεια του βαρόμετρου και οι μονάδες είναι:

$$kp/cm^2 \text{ ή } mbar \text{ ή } Nt/m^2 \text{ ή } mmHg$$

Η ατμοσφαιρική πίεση είναι 760mmHg ή 1,033 kp/cm^2, όταν μετρηθεί στην επιφάνεια της θάλασσας. Αυτή η μονάδα ονομάζεται φυσική ατμό σφαιρα (1 Atm). Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούμε την τεχνική ατμόσφαιρα 1 at.

- Σχέσεις των μονάδων πίεσης

1 Atm = 760mmHg = 1,033 kp/cm^2

1 bar = 10 N/cm^2

1 Atm = 1,0132 bar

4. Κατηγορίες αεροσυμπιεστών

Όπως προαναφέραμε, οι συμπιεστές διακρίνονται σε εκείνους, οι οποίοι επιτυγχάνουν την αύξηση της πίεσης με ελλάτωση του όγκου του αερίου και σε εκείνους, οι οποίοι την επιτυγχάνουν με την αύξηση της ταχύτητάς του.

Οι πρώτοι καλούνται συμπιεστές εκτόπισης και οι δεύτεροι φυγοκε1ντρικοί.

Οι μεν συμπιεστές εκτόπισης διακρίνονται σε:

- Εμβολοφόρους, παλινδρομικούς
- Περιστροφικούς

Οι δε φυγοκεντρικοί σε:

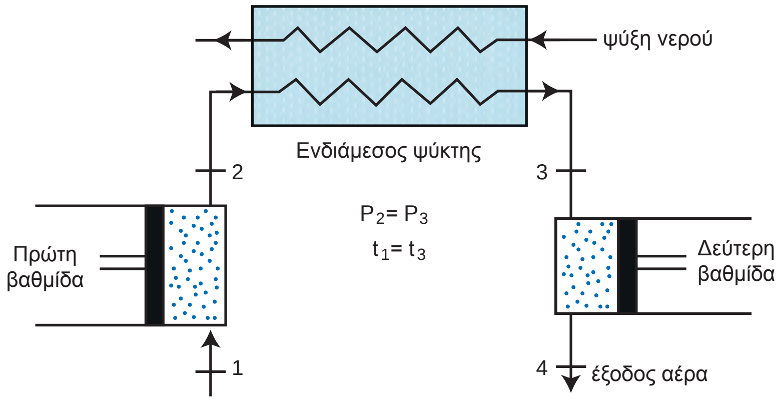
- αξονικούς και ακτινικής ροής

5. Στάδια συμπίεσης (πολλαπλή συμπίεση)

Σε περιπτώσεις που απαιτούνται υψηλές πιέσεις αερίων, χρησιμοποιούμε τη λεγάμενη πολλαπλή συμπίεση με ενδιάμεση ψύξη του αέρα. Αυτή επιτυγχάνεται με συμπίεση του αερίου σε διαδοχικούς και σε σειρά συνδεμένους συμπιεστές.

Η εισαγωγή του ενός συμπιεστή είναι η εξαγωγή του προηγούμενου με την παρεμβολή συστήματος ψύξης. Η ψύξη επιτυγχάνεται είτε με νερό είτε με αέρα.

Στο σχήμα 10.7 παριστάνεται ένας παλινδρομικός συμπιεστής δυο σταδίων με ενδιάμεση ψύξη.



Σχήμα 10.7: *Αεροσυμπιεστής δυο σταδίων*

Σκοπός των σταδίων συμπίεσης είναι η αποφυγή φθορών διαφόρων εξαρτημάτων (βαλβίδες-ελατήρια κ.α.) ή ακόμη και η πρόωρη καταστροφή των λιπαντικών τους, λόγω υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων.

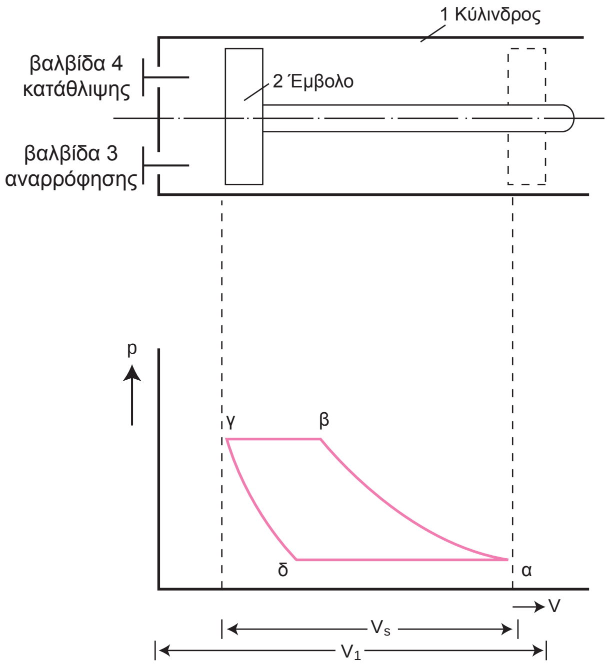
Αυτή η διεργασία, δηλ. τα στάδια συμπίεσης εφαρμόζονται περισσότερο σε συμπιεστές φυγοκεντρικούς και δεν είναι πάνω από τέσσερα (τετραβάθμιοι).

6. Εμβολοφόροι αεροσυμπιεστές

Ένας εμβολοφόρος αεροσυμπιεστής αποτελείται κυρίως από τον κύλινδρο, το έμβολο και τις βαλβίδες αναρρόφησης και κατάθλιψης.

Θα εξετάσουμε πως μεταβάλλεται η πίεση του αέρα σ' ένα πλήρη κύκλο δηλ. μια πλήρη στροφή του στροφαλοφόρου (θεωρητικός κύκλος).

Στο σχήμα 10.8 φαίνονται οι μεταβολές που θα μελετήσουμε.



Σχήμα 10.8: *Θεωρητικός κύκλος λειτουργίας αεροσυμπιεστή.*
(V_1: Συνολικός όγκος κυλίνδρου, V_s: Όγκος διαδρομής εμβόλου)

Ως σημείο έναρξης του κύκλου λειτουργίας θεωρούμε το σημείο (α).

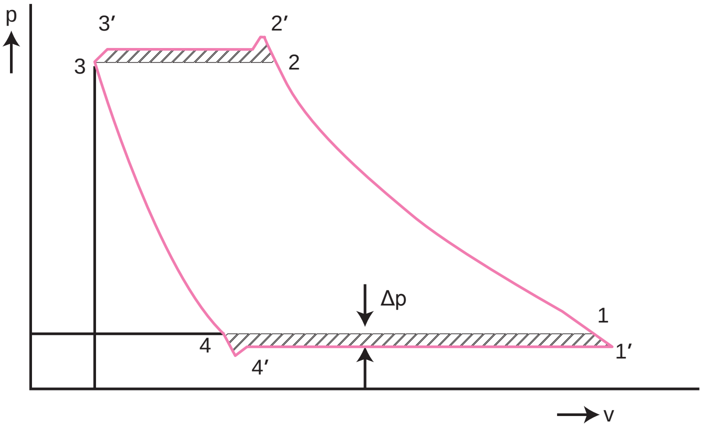
Το έμβολο κινείται προς το ΑΝΣ, προκαλεί ελάττωση του όγκου του κυλίνδρου με αποτέλεσμα τη συμπίεση του αέρα (φάση αβ).

Κατόπιν στο σημείο 2, ανοίγει η βαλβίδα κατάθλιψης (4) και ο συμπιεστής τροφοδοτεί με συμπιεσμένο αέρα το χώρο αποθήκευσής του (αεροφυλάκιο), υπό σταθερή πίεση (φάση β-γ). Εκείνη τη στιγμή η βαλβίδα (4) κλείνει.

Μέσα στο συμπιεστή παραμένει μια μικρή ποσότητα συμπιεσμένου αέρα, στο χώρο μεταξύ του εμβόλου και της κεφαλής του συμπιεστή. Αυτός ο χώρος ονομάζεται επιζήμιος.

Στη συνέχεια, το έμβολο κινείται προς το ΚΝΣ, η πίεση του αέρα στον επιζήμιο χώρο ελαττώνεται, ανοίγει η βαλβίδα αναρρόφησης και εισάγε ται αέρας με πίεση μια ατμόσφαιρα. Η αναρρόφηση τελειώνει, μόλις το έμβολο φτάσει στο ΚΝΣ, οπότε κλείνει η βαλβίδα (φάση γ-δ-α).

Όσα προαναφέραμε, αποτελούν το θεωρητικό κύκλο λειτουργίας.



Σχήμα 10.9: *Σύγκριση πραγματικού και θεωρητικού κύκλου*

Στο σχήμα 10.9, φαίνεται το διάγραμμα του πραγματικού κύκλου λειτουργίας ενός εμβολοφόρου αεροσυμπιεστή και οι διαφορές του με το θεωρητικό.

Οι διαφορές των δυο κύκλων είναι:

– Η γραμμή αναρρόφησης (4 -1΄) βρίσκεται κάτω από την ατμοσφαιρική πίεση, λόγω απωλειών από τις σωληνώσεις αναρρόφησης και των τριβών στις βαλβίδες.

– Η τελική πίεση (2΄ -3΄) είναι πιο μεγάλη από τη θεωρητική και αυτό συμβαίνει για να μπορεί να υπερνικήσει τις αντιστάσεις τριβών και τις απώλειες στις σωληνώσεις, που συνδέουν το συμπιεστή με το αεροφυλάκιο.

Το εμβαδόν του σχήματος 1΄ 2΄ 3΄ 4΄, δείχνει το έργο που απαιτεί ο συμπιεστής, για να πραγματοποιήσει τον κύκλο λειτουργίας του. Η διαφορά των εμβαδών 1 2 3 4,1΄ 2΄ 3΄ 4΄ είναι οι απώλειες.

7. Περιστροφικοί συμπιεστές

Οι περιστροφικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται για μέσες πιέσεις και εξασφαλίζουν συνεχή ροή του αέρα. Έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παλινδρομικούς και αυτά τους κάνουν να έχουν περισσότερες εφαρμογές. Μερικά από αυτά αναφέρονται πιο κάτω.

– Εξασφαλίζουν συνεχή και ομαλή ροή του αέρα.

– Για τη συμπίεση δεν απαιτούνται βαλβίδες.

– Λόγω της έλλειψης των εμβόλων και των βαλβίδων δεν έχουν κραδασμούς και είναι λιγότερο θορυβώδεις.

– Είναι πολύστροφοι.

– Έχουν πιο απλή συντήρηση, λόγω του μειωμένου αριθμού εξαρτημάτων.

Οι χρησιμοποιούμενοι τύποι περιστροφικών συμπιεστών είναι:

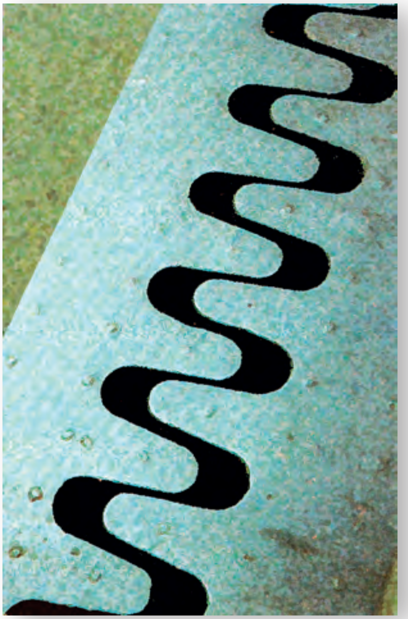
– Με πτερύγια

– Με κοχλίες

– Με λοβούς

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 10ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Αντλίες ονομάζονται τα μηχανήματα με τα οποία μεταφέρουμε μια ποσότητα υγρού από μια υψομετρική στάθμη σε μια άλλη, η οποία βρίσκεται υψηλότερα ή από ένα χώρο χαμηλής πίεσης σε ένα άλλο υψηλής.
- Κάθε αντλία χαρακτηρίζεται από ορισμένα βασικά μεγέθη, τα οποία την προσδιορίζουν. Αυτά είναι τα ύψη της αντλίας, η παροχή της, οι βαθμοί απόδοσης και η ισχύς της.
- Οι αντλίες διαιρούνται κυρίως σε δυο κατηγορίες στις φυγόκεντρες και στις αντλίες εκτόπισης.
- Η αντλητική ικανότητα των αντλιών επηρεάζεται, από τη πίεση η οποία επικρατεί στην επιφάνεια του προς αναρρόφηση υγρού, από τη πυκνότητα, το ιξώδες και τη θερμοκρασία του υγρού, από τις αντιστάσεις των σωληνώσεων και από τη στεγανότητα της εγκατάστασης.
- Συμπιεστές είναι οι μηχανές με τις οποίες επιτυγχάνουμε την αύξηση της πίεσης διαφόρων αερίων.
- Οι συμπιεστές διακρίνονται σε εκείνους οι οποίοι επιτυγχάνουν την αύξηση της πίεσης με ελάττωση του όγκου του αερίου (συμπιεστές εκτόπισης) και σε εκείνους οι οποίοι την επιτυγχάνουν με την αύξηση της ταχύτητάς του.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ

11.1 Γενικά

11.2 Γραμμική διαστολή στερεών

11.3 Κυβική διαστολή στερεών

11.4 Διαστολή υγρών

11.5 Θερμική διαστολή του νερού

11.5 Διαστολή αερίων

11.6 Μηχανικά αποτελέσματα θερμικής διαστολής των σωμάτων

11.6 Λανθάνουσα θερμότητα

11.7 Ειδική θερμότητα

11.8 Θερμιδομετρία

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να γνωρίζετε και να διατυπώνετε τους νόμους της διαστολής των σωμάτων
- Να γνωρίζετε τους τύπους, τα μεγέθη που τους ορίζουν και τις μονάδες τους
- Να εφαρμόζετε όλα τα προηγούμενα, σε τεχνικά προβλήματα και ασκήσεις
- Να εξηγείτε τις έννοιες: λανθάνουσα θερμότητα, ειδική θερμότητα, θερμοχωρητικότητα
- Να αναφέρετε τις μονάδες τους
- Να διατυπώνετε το νόμο της θερμιδομετρίας, να επιλύετε ασκήσεις και να αναφέρετε παραδείγματα

11.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως γνωρίζουμε, οι διαστάσεις των σωμάτων μεταβάλλονται όταν αυτά θερμαίνονται ή όταν ψύχονται.Στην πρώτη περίπτωση το φαινόμενο ονομάζεται *διαστολή*, ενώ στη δεύτερη *συστολή*.

Όταν έχουμε θέρμανση ή ψύξη των σωμάτων, παρατηρείται μεταβολή και στις τρεις διαστάσεις τους. Γι αυτό πάντα θα πρέπει να διευκρινίζουμε σε ποια μεταβολή αναφερόμαστε.

Πιο συγκεκριμένα, όταν η μεταβολή αναφέρεται μόνο σε μία διάσταση ενός σώματος, ονομάζεται **γραμμική**, όταν αυτή αναφέρεται στην επιφά1-νεια του σώματος ονομάζεται **επιφανειακή** και όταν γίνεται αναφορά στη μεταβολή του όγκου, ονομάζεται **κυβική**.

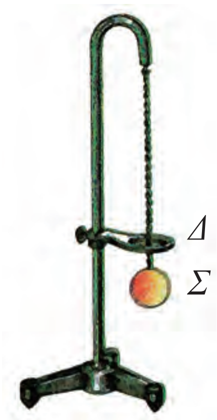
Στα υγρά και στα αέρια αναφερόμαστε, όπως είναι φυσικό σε κυβική μεταβολή.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα διαστολής των διαφόρων σωμάτων (στερεών – υγρών – αερίων), αναφέρουμε παρακάτω.

-Όσον αφορά την διαστολή των στερεών, εκτελούμε το πείραμα του σχήματος 11.1.

Μια μεταλλική σφαίρα Σ έχει διάμετρο λίγο μικρότερη από το δακτύλιο Δ. Σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, η σφαίρα περνάει ελεύθερα μέσα από αυτόν.

Όταν θερμάνουμε τη σφαίρα, παρατηρούμε ότι δεν περνά μέσα από το δακτύλιο και συμπεραίνουμε ότι η σφαίρα, όταν θερμανθεί, διαστέλλεται.



Σχήμα 11.1: *Η σφαίρα όταν θερμανθεί, δεν περνά από το δακτύλιο*

– Κλασικό παράδειγμα διαστολής των υγρών είναι το υδραργυρικό θερμόμετρο.

– Για να γίνει αντιληπτή η διαστολή των αερίων, εκτελούμε το παρακάτω πείραμα.

Σε γυάλινη σφαιρική φιάλη, η οποία είναι κλειστή με φελλό, τοποθετούμε γυάλινο σωλήνα. (Σχ. 11.2). Όταν βυθίσουμε το σωλήνα στο ποτήρι, το οποίο περιέχει νερό, και θερμάνουμε την φιάλη με τα χέρια μας, ο αέρας που περιέχεται σ αυτή διαστέλλεται και βγαίνει με τη μορφή φυσαλίδων.

Σχήμα 11.2: *Ο αέρας θερμαίνεται και βγαίνει με τη μορφή φυσαλίδων*

11.2 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΣΤΕΡΕΩΝ

Υποθέτουμε ότι μια ράβδος από κάποιο υλικό έχει μήκος ℓ_1, σε θερμοκρασία θ_1. Οταν η θερμοκρασία αλλάξει κατά Δθ, τότε παρατηρούμε ότι και το μήκος της ράβδου αλλάζει κατά ℓl. Από πειράματα έχει βρεθεί ότι για μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας (Δθ μικρότερο των 80˚C), το $\Delta\ell$ είναι ανάλογο του Δθ και ισχύει ότι η επιμήκυνση της ράβδου είναι ανάλογη του αρχικού μήκους της ράβδου (ℓ_1), ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας (Δθ) και εξαρτάται από το υλικό της ράβδου

Έχουμε δηλαδή ότι:

$$\boxed{\Delta\ell = \alpha\,\ell\,\Delta\Theta}$$

Ο συντελεστής (α) , ονομάζεται συντελεστής γραμμικής διαστολής και μας δίνει την αύξηση του μήκους ράβδου 1m, όταν αυτή θερμαίνεται κατά 1˚C

Μονάδα μέτρησης του συντελεστή γραμμικής διαστολής είναι:

$$\alpha = \frac{\Delta\ell}{\ell\cdot\Delta\theta} \qquad 1\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{cm}\cdot\mathrm{K}} \qquad \text{ή} \qquad 1\mathrm{K}^{-1}$$

Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής (α) εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία.

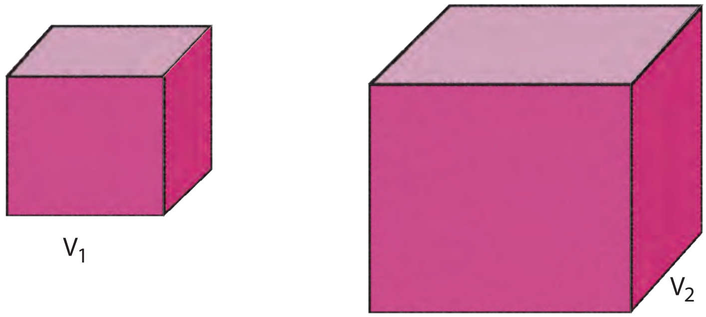
ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ (α)

ΥΛΙΚΟ	α σε K^{-1}
Αλουμίνιο	0,000024
Αντιμόνιο	0,000011
Άργυρος	0,000020
Γυαλί	0,000009
Μαγνήσιο	0,000026
Μόλυβδος	0,000029
Νικέλιο	0,000013
Ορείχαλκος	0,000018
Πλατίνα	0,000009
Υδράργυρος	0,0000606
Χάλυβας	0,000012
Χαλκός	0,000017
Χυτοσίδηρος	0,000011
Χρυσός	0,000011

11.3 ΚΥΒΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΣΤΕΡΕΩΝ

Όταν αυξήσουμε τη θερμοκρασία ενός σώματος όγκου (V_1), από θ_1 σε θ_2, θα παρατηρήσουμε ότι αυτό διαστέλλεται και αποκτά όγκο (V_2).

Η αύξηση αυτή του όγκου του σώματος, ύστερα από υπολογισμούς, έχει βρεθεί ότι είναι ανάλογη του αρχικού όγκου (V_1), ανάλογη της μεταβολής της θερμοκρασίας (Δθ) και εξαρτάται από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το σώμα.



Σχήμα 11.3: *Κυβική διαστολή στερεών*

Έχουμε δηλαδή : $\boxed{\Delta Y = \gamma \cdot V \cdot \Delta\theta}$

Ο συντελεστής (γ) λέγεται συντελεστής κυβικής διαστολής και εξαρ τά-ται από το υλικό του σώματος.

Μονάδα του συντελεστή (γ) είναι: $1\ K^{-1}$

Ισχύει επίσης ότι $\boxed{\gamma = 3 \cdot \alpha}$

11.4 ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΥΓΡΩΝ

Όπως στα στερεά, έτσι και στα υγρά έχουμε αύξηση του όγκου τους, κατά τη θέρμανσή τους. Αυτή η αύξηση του όγκου υπολογίζεται απ’ τη σχέση:

$$\boxed{\Delta V = \gamma \cdot V \cdot \Delta\theta}$$

όπου γ , ο συντελεστής κυβικής διαστολής των υγρών.

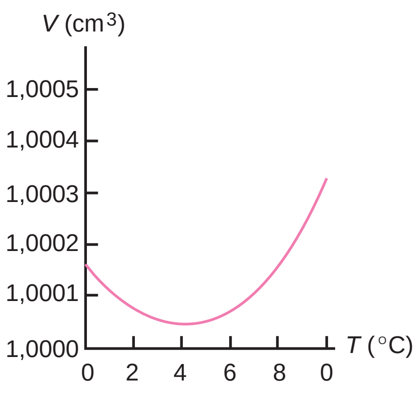
ΤΙΜΕΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΚΥΒΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ

ΣΤΕΡΕΑ	γ σε K^{-1}	ΥΓΡΑ	γ σε K^{-1}
Αργίλιο	$7{,}2 \cdot 10^{-5}$	Αιθανόλη	$75 \cdot 10^{-5}$
Γυαλί	$1{,}2 - 2{,}7 \cdot 10^{-5}$	Γλυκερίνη	$49 \cdot 10^{-5}$
Ορείχαλκος	$6 \cdot 10^{-5}$	Διθειούχος άνθρακας	$115 \cdot 10^{-5}$
Χαλκός	$5{,}1 \cdot 10^{-5}$	υδράργυρος	$18 \cdot 10^{-5}$
χάλυβας	$3{,}6 \cdot 10^{-5}$		

11.5 ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

Όλα τα υγρά όταν θερμανθούν διαστέλλονται, με εξαίρεση το νερό. Αυτό, όταν θερμανθεί από τους 0 ˚C στους 4˚C συστέλλεται και σ' αυτή τη θερμοκρασία έχει την μεγαλύτερη πυκνότητά του. Το φαινόμενο αυτό καλείται *ανώμαλη διαστολή* του νερού. Τα ρευστά με τη μεγαλύτερη πυκνότητα βρίσκονται πάντα σε μεγαλύτερο βάθος. Αυτό σημαίνει ότι σε μια παγωμένη λίμνη, μπορεί η επιφάνειά της να είναι παγωμένη (0˚C), ενώ στο βυθό της η θερμοκρασία είναι 4˚C και έτσι υπάρχει ζωή. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για την διατήρηση της ζωής στις λίμνες και στους υδροβιότοπους. Σε αντίθετη περίπτωση όλοι οι ζώντες υδρόβιοι οργανισμοί δεν θα άντεχαν.

Ακόμη μια παρατήρηση για το νερό είναι, ότι αυτό διαστέλλεται όταν γίνεται πάγος, γι' αυτό το λόγο προσθέτουμε αντιψυκτικό υγρό στα ψυγεία των αυτοκινήτων τον χειμώνα.



Σχήμα 11.4: *Από τους 0˚C, έως τους 4˚C το νερό συστέλλεται.*

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΥΓΡΩΝ

ΥΓΡΟ	γ σε K^{-1}
Βενζίνη	0,0014
Νερό	0,00018
Θειίκό οξύ	0,00056
Λάδι	0,00076
Αλκοόλη	0,001

11.5 ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΑΕΡΙΩΝ

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι υπό σταθερή πίεση η μεταβολή του όγκου ε1-νός αερίου, υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\boxed{\Delta_\theta = \Delta_o \cdot (1+\gamma \cdot \theta)}$$

όπου

V_θ = τελικός όγκος αερίου

V_o = αρχικός όγκος αερίου

γ = θερμικός συντελεστής όγκου

θ = αύξηση της θερμοκρασίας

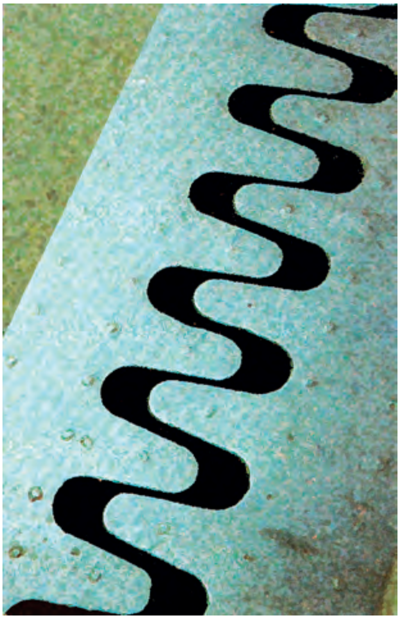
΄Εχει βρεθεί ότι σε όλα τα αέρια ο συντελεστής (γ), είναι ο ίδιος και ίσος προς 1/273 στο μετρικό σύστημα.

Αυτό σημαίνει ότι, όταν θερμάνουμε ένα αέριο κατά 1˚C, ο όγκος του θα αυξηθεί κατά το 1/273 του όγκου, που είχε το αέριο στους 0˚C.

11.6 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ

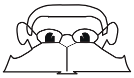
Όπως παρατηρήσαμε όταν θερμάνουμε ένα μεταλλικό στερεό σώμα οι διαστάσεις του μεταβάλλονται. Για να πραγματοποιηθεί η ίδια μεταβολή μιας διάστασής του, θα πρέπει να εξασκηθεί μια δύναμη εφελκυσμού σ' αυτό. Θα γνωρίσετε στο μάθημα της αντοχής των υλικών ότι σ' αυτή την περίπτωση δημιουργούνται μηχανικές εσωτερικές τάσεις. Συνεπώς, στη περίπτωση της θέρμανσης της ράβδου αναπτύσσονται μέσα σ' αυτή μηχανικές εσωτερικές τάσεις.

Επίσης, αν πακτώσουμε μια ράβδο έτσι ώστε να παρεμποδίζουμε κάθε διαστολή ή συστολή της και στη συνέχεια μεταβάλλουμε την θερμοκρασία της θα αναπτυχθούν τάσεις εφελκυσμού ή θλίψης , οι οποίες αν αυξηθούν πάρα πολύ μπορεί να οδηγήσουν σε μόνιμη παραμόρφωση ή και θραύση της ράβδου. Μεγάλοι αυτοκινητόδρομοι από σκυρόδεμα ή γέφυρες έχουν από κατασκευής ορισμένα κενά τα οποία είναι γεμάτα από εύκαμπτο υλικό, ώστε να διευκολύνουν την διαστολή και την συστολή του σκυροδέματος (σχήμα 11.5).



Σχήμα 11.5: *Για να αποφύγουμε τις παραμορφώσεις σε μεγάλες κατασκευές, τοποθετούμε εύκαμπτα υλικά ή αφήνουμε κενά, για να διευκολύνουμε τη διαστολή και τη συστολή του σκυροδέματος.*

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ



Άσκηση 1η

Ράβδος από ορείχαλκο σε θερμοκρασία 20 °C έχει μήκος ℓ = 40cm και θερμαίνεται σε θερμοκρασία 170 °C. Να υπολογίσετε το μήκος της ράβδου σε αυτή τη θερμοκρασία.

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

$\alpha = 0{,}000018$	$\Delta\ell = \alpha\,\ell\,\Delta\theta$

Λύση

Υπολογίζουμε κατ' αρχή τη διαφορά θερμοκρασίας Δθ :

$\theta_1 = 20\ ^\circ C = 20 + 273\ (K) = 293\ K$

$\theta^2 = 170^\circ C = 170 + 273\ (K) = 443\ K$

$$\Delta_\theta = 443 - 293 \rightarrow \boxed{\Delta_\theta = 150K}$$

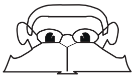
Εφαρμόζουμε τον τύπο και υπολογίζουμε την αύξηση του μήκους

$$\Delta\ell = 0{,}000018 \cdot 40 \cdot 150^\circ K \left[\frac{cm \cdot K^\circ}{K^\circ}\right]$$

$$\Delta\ell = 0{,}108\ cm \quad \boxed{\Delta\ell = 1{,}08}$$

Άρα το τελικό μήκος της ράβδου θα είναι το αρχικό συν την επιμήκυνση

$$\ell_2 = \ell_1 + \Delta\ell \rightarrow \ell_2 = 40 + 0{,}108 \rightarrow \boxed{\ell_2 = 40{,}108\,cm}$$



Άσκηση 2η

Σιδερένια σφαίρα διαμέτρου 15 cm θερμαίνεται από τη θερμοκρασία των 23˚C σε αυτή των 350˚C. Να υπολογίσετε τον όγκο της στη νέα θερμοκρασία.

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

$Y_{Fe} = 0{,}000017$	$V_{σφ} = \dfrac{π \cdot d^3}{6}$
$γ = 3 \cdot α$	$ΔV = γ \cdot V \cdot Δ_θ$

Λύση

Υπολογίζουμε τη διαφορά θερμοκρασίας

$Θ_1 = 23\ ˚C = 23 + 273\ (K) = 296˚K$

$θ_2 = 350\ ˚C = 350 + 273\ (K) = 623˚K$ $\boxed{Δθ = θ_1 - θ_2 = 327˚K}$

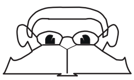
Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε τον όγκο της σφαίρας

$$V_{σφ} = \frac{π \cdot d^3}{6} = \frac{π \cdot 15}{6} \rightarrow \boxed{V_1 = 1766{,}25\,cm^3}$$

Γνωρίζοντας ότι $γ = 3α$, έχουμε ότι:

$$ΔV = 0{,}000017.3 \cdot 1766{,}25 \cdot 327° \left[\frac{cm^3 \cdot K^0}{K^0}\right] \rightarrow \boxed{ΔV = 29{,}46\ cm^3}$$

Άρα $V_2 = 1766{,}25 + 29{,}46 \rightarrow V_2 = 1795{,}71\,cm^3$



ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΛΥΣΗ

1) Δύο ράβδοι από το ίδιο υλικό, έχουν το ίδιο μήκος, η πρώτη όμως βρίσκεται σε θερμοκρασία 25˚ C και η δεύτερη σε θερμοκρασία 70 ˚C. Αν αυξήσουμε αυτές τις θερμοκρασίες το ίδιο, οι ράβδοι θα εξακολουθήσουν να έχουν το ίδιο μήκος ;

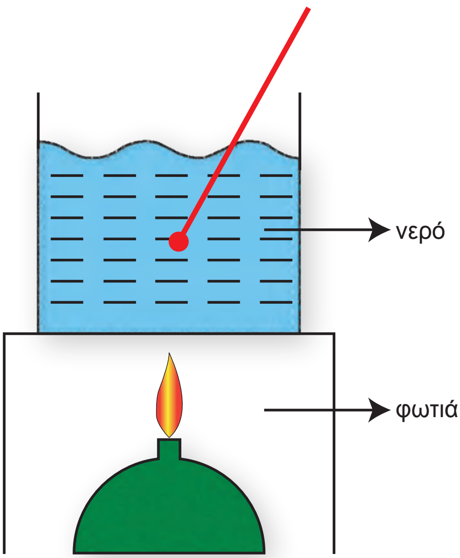
2) Μια χαλύβδινη σιδηροδρομική γραμμή σε θερμοκρασία 10° C έχει μήκος 30m. Να υπολογίσετε τι μήκος θα έχει τον χειμώνα με θερμοκρασία 10° C και το καλοκαίρι με θερμοκρασία 38° C.

3) Γυάλινη σφαίρα ακτίνας 8cm θερμαίνεται κατά 200° C. Να υπολογίσετε τον όγκο της.

11.7 ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Σε δοχείο, το οποίο περιέχει νερό τοποθετούμε ένα θερμόμετρο. Θερμαίνουμε το δοχείο και παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του νερού σιγά σιγά ανεβαίνει.

Συνεχίζοντας τη θέρμανσή του φτάνουμε σε κάποιο σημείο που η θερμοκρασία του θα σταματήσει να ανεβαίνει, παρ' όλο που εμείς συνεχίζουμε να προσφέρουμε θερμότητα. Επίσης, παρατηρούμε ότι το νερό αρχίζει να βράζει. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι η θερμότητα η οποία μεταδίδεται από ένα σύστημα σε ένα δεύτερο (δοχείο με νερό) , δεν προκαλεί συνέχεια αύξηση στη θερμοκρασία του δεύτερου συστήματος. Η θερμότητα αυτή, ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα (βλ. σχήμα 11.6).



Σχήμα 11.6: *Βρασμός νερού*

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3.1

ΥΛΙΚΟ	ΣΗΜΕΙΟ ΒΡΑΣΜΟΥ °C
ΝΕΡΟ	100
ΟΙΝΟΠΝΕΥΜΑ	78
ΒΕΝΖΙΝΗ	80
ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΣ	357
ΑΙΘΕΡΑΣ	24
ΑΜΜΩΝΙΑ	-33
ΥΔΡΟΓΟΝΟ	-252,8
ΟΞΥΓΟΝΟ	-182,9
ΑΖΩΤΟ	-195,8
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	2300
ΧΑΛΚΟΣ	2600
ΣΙΔΗΡΟΣ	2500

11.8 ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Σε προηγούμενο κεφάλαιο δόθηκε ο ορισμός της ειδικής θερμότητας και εφαρμογές της στα αέρια. Σ' αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην ειδική θερμότητα των στερεών και των υγρών.

Πειραματικά, έχει βρεθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ενός σώματος είναι ανάλογη του ποσού θερμότητας (**Q**), που μεταβιβάζεται στο σώμα, αντιστρόφως ανάλογη της μάζας (**m**) του σώματος και εξαρτάται από το υλικό, από το οποίο αποτελείται το σώμα.

Η τελευταία παράμετρος (η φύση του υλικού) αναφέρεται με ένα μέγεθος, το οποίο ονομάζεται *ειδική θερμότητα*, συμβολίζεται με το γράμμα c και είναι διαφορετική για κάθε υλικό.

Όλα τα προαναφερθέντα διατυπώνονται με τη θεμελιώδη εξίσωση της θερμιδομετρίας:

$$\boxed{\Delta\theta = \frac{Q}{m \cdot c} \qquad \text{ή} \qquad Q = c \cdot m \cdot \Delta\theta} \qquad \text{(A)}$$

Στους παραπάνω τύπους το Q και το Δθ μπορούν να είναι θετικά ή αρνητικά. Όταν είναι θετικά προσφέρεται θερμότητα στο σώμα και η θερμόκρασία του αυξάνει, ενώ όταν είναι αρνητικά αποβάλλεται θερμότητα από το σώμα και η θερμοκρασία του μειώνεται

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3.2
Ειδικές θερμότητες στερεών και υγρών ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

Υδρογόνο	14,250	Αλουμίνιο	900
Νερό	4,186	Τσιμέντο	880
Ανθρ. Σώμα	3,470	Μάρμαρο	840
Οινόπνευμα	2,420	Τούβλο	840
Πετρέλαιο	2,100	Άμμος	820
Φελλός	2,100	Γυαλί	670-800
Πάγος	2,090	Σίδηρος	460
Βενζίνη	1,700	Χαλκός	390
Καουτσούκ	1,880	Μόλυβδος	130

Για να ορίσουμε τη μονάδα της ειδικής θερμότητας λύνουμε την εξίσωση (Α) της προηγούμενης παραγράφου ως προς c, οπότε παίρνουμε τη σχέση:

$$\boxed{c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\theta}}$$

Αν σε αυτή την εξίσωση βάλουμε Q = 1J, m =1 kg και Δθ = 1K , τότε παίρνουμε τη μονάδα της ειδικής θερμότητας, που είναι η:

$$\boxed{1\frac{J}{kg \cdot K^{\circ}}}$$

(1 Joule ανά χιλιόγραμμο και βαθμό K)

Αλλη μονάδα μέτρησης της ειδικής θερμότητας είναι το 1 cal/gr $\cdot\,^{\circ}$C που είναι η ειδική θερμότητα του νερού και ορίζεται ως εξής:

“Θερμίδα (cal) ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που απαιτείται για να αυξηθεί, κατά ένα βαθμό Κελσίου (1°C), ένα γραμμάριο νερού (1 gr H_20).”

Το γινόμενο της μάζας ενός σώματος (m) επί την ειδική θερμότητα του (c) ονομάζεται *θερμοχωρητικότητα* του σώματος και συμβολίζεται με το γράμμα Κ.

$$\boxed{K = M \cdot c}$$

Άρα, η θεμελιώδης εξίσωση της θερμοκρασίας γίνεται:

$$\boxed{Q = K \cdot \Delta\theta}$$

άρα

$$\boxed{K = \frac{Q}{\Delta\theta} = \frac{\text{Joule}}{K}}$$

Μονάδα θερμοχωρητικότητας, λοιπόν, είναι το: 1 Joule / K

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι η θερμοχωρητικότητα είναι μέγεθος, που αναφέρεται σε δεδομένο σώμα (π.χ. σε μια συσκευή), ενώ η ειδική θερμότητα σε υλικό (π.χ. χαλκός)

11.9 ΘΕΡΜΙΔΟΜΕΤΡΙΑ

Η θερμιδομετρία ασχολείται με τη μέτρηση ποσοτήτων θερμότητας ή πιο απλά μπορούμε να πούμε ότι θερμιδομετρία σημαίνει “μέτρηση θερμότητας”. Σε προηγούμενα κεφάλαια αναφερθήκαμε στη μεταφορά ενέργειας–θερμότητας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Η θερμότητα επίσης υπεισέρχεται και στις αλλαγές των φάσεων, όπως η τήξη του πάγου ή ο βρασμός του νερού.

Με τον όρο φάση περιγράφουμε την συγκεκριμένη κατάσταση της ύλης ως στερεού, υγρού ή αερίου. Το νερό μπορεί να υπάρξει σε στερεή (πάγος), υγρή και αέρια (ατμός) φάση. Η μετάβαση από τη μια φάση σε κάποια άλλη ονομάζεται αλλαγή ή μετατροπή φάσης. Σε κάθε δεδομένη πίεση η αλλαγή της φάσης πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και συνήθως συνοδεύεται από απορρόφηση ή απόδοση θερμότητας.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αλλαγής φάσης είναι η τήξη του πάγου. Όταν προσφέρουμε θερμότητα σε πάγο στους 0˚C , με ατμοσφαιρική πίεση, η θερμοκρασία του πάγου δεν μεταβάλλεται, αλλά μέρος αυτού λιώνει. Αν η προσφορά της θερμότητας γίνεται πολύ αργά τότε η θερμοκρασία βρίσκεται στους 0˚C , μέχρι να λιώσει όλος ο πάγος. Η ποσότητα της θερμότητας η οποία απαιτείται για να μετατραπεί 1 κιλό πάγος 0˚C, σε 1 κιλό νερό 0˚C είναι 3,34 * 105 Joule και ονομάζεται θερμότητα τήξης.

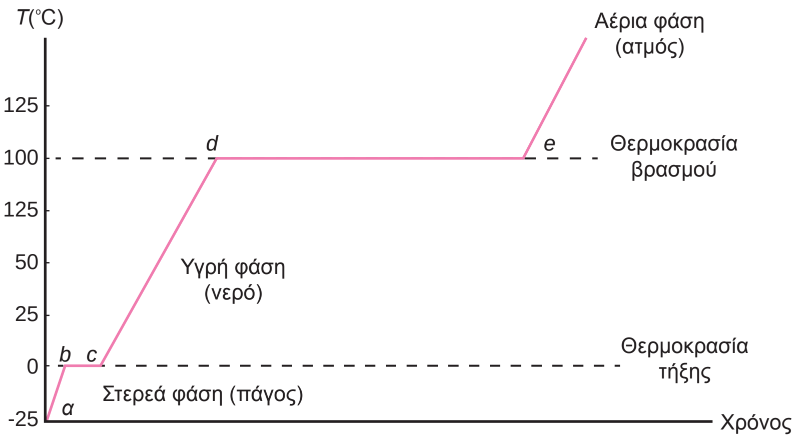
Για να μετατρέψουμε νερό 0˚C σε πάγο θα πρέπει να αφαιρέσουμε θερμότητα , της οποίας το ποσό είναι ακριβώς το ίδιο.

Γενικά μπορούμε να αναφέρουμε ότι η απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας για την τήξη ενός σώματος μάζας m και θερμότητα τήξης L δίνεται από τον τύπο:

$$Q = \pm m \cdot L$$

Για την αλλαγή της φάσης από υγρό σε αέριο πραγματοποιούμε την ίδια εργασία, με διαφορά ότι εδώ υπάρχει βρασμός και εξαέρωση. Η αντίστοιχη θερμότητα ανά μονάδα μάζας ονομάζεται θερμότητα εξαέρωσης. Βέβαια και εδώ αναφέρουμε ότι η θερμότητα εξαέρωσης και η θερμοκρασία βρασμού εξαρτώνται από την πίεση.

Στο σχήμα 11.7 φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας, όταν γίνεται προσφορά θερμότητας σε ένα κομμάτι πάγου με αρχική θερμοκρασία 0˚C



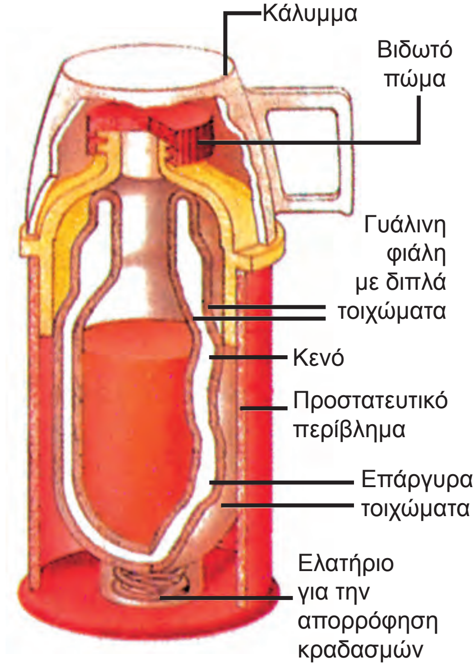
Σχήμα 11.7: *Οι φάσεις του νερού (στερή - υγρή - αέρια)*

11.9.1 Θερμιδόμετρα

Τα όργανα που χρησιμοποιούμε για την μέτρηση ποσοτήτων θερμότητας ονομάζονται θερμιδόμετρα. Ένα απλό θερμιδόμετρο νερού αποτελείται από ένα θερμικά μονωμένο δοχείο με διπλά τοιχώματα, ένα θερμόμετρο, ένα αναδευτήρα και το κάλυμμά του. Όλη η διάταξη αυτή στηρίζετε σε μια βάση. Το μονωμένο δοχείο περιέχει μια ποσότητα νερού, την οποία μπορούμε να την ανακατεύουμε ώστε να έχουμε ίδια θερμοκρασία σε όλη την ποσότητά του. Τη θερμοκρασία την μετρούμε με το θερμόμετρο.

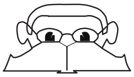
11.9.2 Έλεγχος θερμοχωρητικότητας σώματος

Στο θερμιδόμετρο τοποθετούμε ένα σώμα γνωστής θερμοκρασίας, αλλά άγνωστης θερμοχωρητικότητας. Όταν οι θερμοκρασίες είναι διαφορετικές θα υπάρξει μεταξύ του σώματος και της ποσότητας του νερού ανταλλαγή ποσών θερμότητας, μέχρις ότου οι θερμοκρασίες εξισωθούν. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία του νερού, την οποία παρατηρούμε με το θερμόμετρο μεταβάλλεται. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τις θερμικές ιδιότητες των σωμάτων που τοποθετούμε στο θερμιδόμετρο.



Σχήμα 11.8: *Το "θερμός" έχει ίδια κατασκευή και μορφή, όπως το θερμιδόμετρο*

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ



Άσκηση 1η

Πόση θερμότητα χρειάζονται 2 kg χαλκού, για να αποκτήσουν θερμοκρασία 350 $^\circ$C ;

ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Αρχική θερμοκρασία 20°C

Ειδική θερμότητα Cu = 390 J · kg^{-1} · K^{-1}

$Q = m \cdot c \cdot \Delta\Theta$

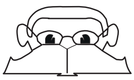
Λύση

$\theta_1 = 20\ ^\circ C$ ή $\theta_1 = 273+20 = 293$ K

$\theta_2 = 350\ ^\circ C$ ή $\theta_2 = 273+350 = 623$ K

Εφαρμόζουμε τον τύπο $Q = m \cdot c \cdot \Delta\Theta$ και έχουμε :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta \rightarrow Q = 2\,kg \cdot 390 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot (623 \cdot 293)K \rightarrow \boxed{Q = 257400\ Joule}$$



Άσκηση 2η

Ενα κομμάτι σιδήρου βάρους 5 kg, απορροφά θερμότητα 46000 Joule. Ποια είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του

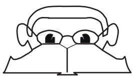
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Ειδική θερμότητα Fe = 460 J · kg^{-1} · K^{-1}

$\mathbf{Q = m \cdot c \cdot \Delta\Theta}$

Λύση

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta \rightarrow \Delta\theta = \frac{Q}{m \cdot c} \rightarrow \Delta\theta = \frac{46000\ Joule}{5\,kg \cdot 460 \frac{Joule}{kg \cdot K}} \rightarrow \boxed{\Delta\theta = 20K}$$



ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΛΥΣΗ

1. Ποια είναι η απαιτούμενη ποσότητα θερμότητας, για να θερμανθούν 20 kg νερού και η θερμοκρασία του από 15˚C να γίνει 90˚C

$$c_{H_2O} = 4{,}186\ J \cdot kg^{-1} \cdot k^{-1}$$

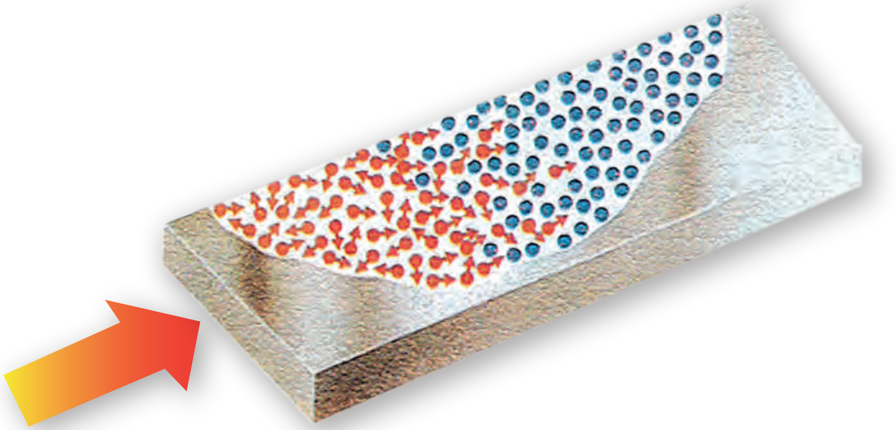
2. Για την ψύξη των υδροχιτωνίων ενός κινητήρα χρησιμοποιήσαμε 20 kg νερού. Η θερμοκρασία εισόδου του νερού ήταν 20 ˚C και αυτή της εξόδου 70 ˚C. Ποια ήταν η ποσότητα της θερμότητας που απορροφήθηκε από το νερό;

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 11ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Οι διαστάσεις των σωμάτων μεταβάλλονται όταν αυτά θερμαίνονται ή όταν ψύχονται. Στην πρώτη περίπτωση το φαινόμενο ονομάζεται *διαστολή*, ενώ στη δεύτερη *συστολή*.
- Όταν η μεταβολή αναφέρεται μόνο σε μία διάσταση ενός σώματος, ονομάζεται **γραμμική**, όταν αυτή αναφέρεται στην επιφάνεια του σώματος ονομάζεται **επιφανειακή** και όταν γίνεται αναφορά στη μεταβολή του όγκου, ονομάζεται **κυβική**.
- Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής (α), καθώς επίσης και ο συντελεστής κυβικής διαστολής (γ) εξαρτώνται από το υλικό και τη θερμοκρασία των σωμάτων.
- Όλα τα υγρά όταν θερμανθούν διαστέλλονται, με εξαίρεση το νερό. Αυτό, όταν θερμανθεί από τους 0 ˚C στους 4˚C συστέλλεται και σ' αυτή τη θερμοκρασία έχει την μεγαλύτερη πυκνότητά του.
- Εχει βρεθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ενός σώματος είναι ανάλογη του ποσού θερμότητας (**Q**), που μεταβιβάζεται στο σώμα, αντιστρόφως ανάλογη της μάζας (**m**) του σώματος και εξαρτάται από το υλικό, από το οποίο αποτελείται το σώμα.
- Η θεμελιώδης εξίσωση της θερμιδομετρίας είναι η εξής:

$$\boxed{\Delta\theta = \frac{Q}{m \cdot c} \qquad ή \qquad Q = c \cdot m \cdot \Delta\theta}$$

- Η θερμιδομετρία ασχολείται με τη μέτρηση ποσοτήτων θερμότητας ή πιο απλά μπορούμε να πούμε ότι θερμιδομετρία σημαίνει "μέτρηση θερμότητας".Τα όργανα που χρησιμοποιούμε γι΄ αυτό το σκοπό ονομάζονται θερμιδόμετρα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

12.1 **Γενικά**

12.2 **Μετάδοση με αγωγή**

12.3 **Μετάδοση με μεταφορά**

12.4 **Μετάδοση με ακτινοβολία**

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να αναφέρετε τους τρόπους μετάδοσης της θερμότητας
- Να περιγράφετε παραδείγματα του φαινομένου της μετάδοσης της θερμότητας (σε πρακτικές εφαρμογές)
- Να δίνετε τον ορισμό της ροής της θερμότητας και να αναφέρετε τις μονάδες της
- Να αναφέρετε τους νόμους Fourier, Stefan - Boltzemann και Newton και να επιλύετε ασκήσεις εφαρμόζοντάς τους.

12.1 ΓΕΝΙΚΑ

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα στην καθημερινή μας ζωή, με τα οποία αντιλαμβανόμαστε τη μετάδοση της θερμότητας.

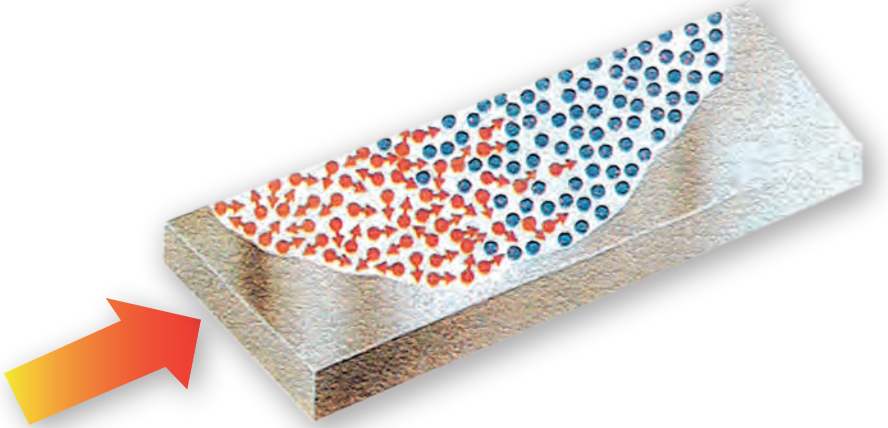
– Αν αφήσουμε ένα σώμα κοντά σε ένα καλοριφέρ ή μια θερμάστρα παρατηρούμε ότι το σώμα αυτό ζεσταίνεται.

– Αν ακουμπήσουμε ένα θερμό σώμα, παρατηρούμε ότι το χέρι μας θερμαίνεται.

– Αν αφήσουμε στον ήλιο –ιδιαίτερα το καλοκαίρι– ένα δοχείο με νερό, αυτό θα ζεσταθεί.

– Αν ζεστάνουμε το ένα άκρο μιας μεταλλικής ράβδου, θα παρατηρήσουμε ότι μετά από λίγο θα θερμανθεί και το άλλο.

Από τα προηγούμενα παραδείγματα συμπεραίνουμε ότι η θερμότητα ρέει από τα θερμότερα σώματα στα ψυχρότερα ή από τα θερμότερα σημεία ενός σώματος προς τα ψυχρότερα.



Σχήμα 12.1: *Η θερμότητα ρέει από τα θερμότερα σημεία ενός σώματος προς τα ψυχρότερα.*

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι μετάδοσης της θερμότητας.

Α) Με αγωγή

Β) Με μεταφορά

Γ) Με ακτινοβολία

– Ο πρώτος τρόπος μετάδοσης της θερμότητας συναντάται και στις τρεις καταστάσεις της ύλης (δηλ. σε στερεά –υγρά– αέρια) κυρίως όμως στα στερεά. Εχουμε δηλαδή μετάδοση της θερμότητας από το ένα μόριο ενός σώματος στο άλλο ή από ένα σώμα σε άλλο σώμα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η θέρμανση του άκρου της μεταλλικής ράβδου και η μετάδοσή της τελικά στο άλλο άκρο.

Μετάδοση θερμότητας με μεταφορά συναντάμε κυρίως στα στερεά και ρευστά σώματα. Εχουμε σ' αυτή την περίπτωση μετάδοση θερμότητας από θερμό στερεό σώμα σε κινούμενο ρευστό ή το αντίθετο Ένας από τους

Σχήμα 12.2: *Τρόποι μετάδοσης της θερμότητας*

γνωστούς τρόπους μετάδο1σης με μεταφορά είναι το σύστημα της κεντρικής θέρμανσης (καλοριφέρ). Σ’ αυτό εκτός από την μεταφορά θερμότητας έχουμε και μεταφορά ύλης.

– Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία συναντάται και στις τρεις καταστάσεις της ύλης και η θερμότητα, η οποία ακτινοβολείται από κάποια σώματα, απορροφάται από κάποια άλλα, δίχως να βρίσκονται σε επαφή. Παράδειγμα για τη μετάδοση της θερμότητας με ακτινοβολία είναι η θέρμανση διαφόρων σωμάτων από τον ήλιο.

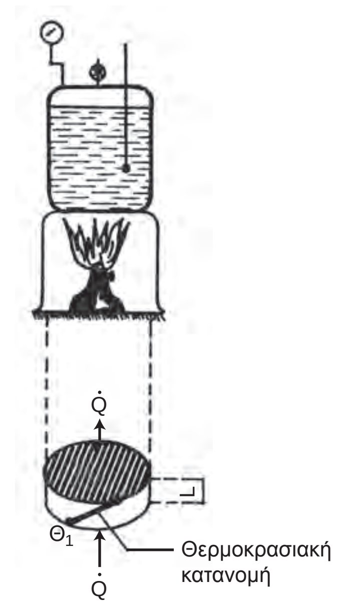
12.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΑΓΩΓΗ

Είναι η μεταφορά θερμότητας από τα μόρια ενός σώματος με την περισσότερη ενέργεια στα γειτονικά τους με μικρότερη. Τη μετάδοση της θερμότητας με αγωγή τη συναντούμε στα στερεά, στα υγρά και στα αέρια.

Αυτός ο τρόπος μετάδοσης συντελείται με την κίνηση των μορίων. Τα μόρια του σώματος, τα οποία έχουν υψηλές θερμοκρασίες, έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια και μεταδίδουν την ενέργειά τους στα γειτονικά τους με τις χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Έχουμε δηλαδή μετάδοση θερμότητας από μόριο σε μόριο. Για να κατανοήσουμε τις σχέσεις με τις οποίες θα μπορούμε να υπολογίζουμε τα ποσά της θερμότητας, που με ταφέρονται με αγωγή θα παρατηρήσουμε το σχήμα 12.3.

Αυτό αποτελείται από λέβητα στην απλούστερη μορφή του, του οποίου ο πυθμένας (επιφάνεια A) είναι επίπεδος και κατασκευασμένος από έλασμα πάχους (L)



Σχήμα 12.3: Απλή μορφή λέβητα

ΠΙΝΑΚΑΣ 1
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μερικών στερεών σωμάτων

Στερεά	Θερμοκρασία t ˚C	Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας λ W/mK
Αλουμίνιο 99,75	20	229
Χάλυβας απλός	0	58
Χάλυβας απλός	200	52
Χάλυβας απλός	400	44
Χαλκός κοινός εμπορίου	20	372
Μπρούντζος	20	81-116
Ψευδάργυρος	20	113
Σκυρόδεμα	20	1,28
Τζάμι παραθύρων	20	1,16
Τοιχοποιία τούβλων	20	0,76
Υαλοβάμβακας	25	0,046
Αμίαντος	20	0,161

Η θερμότητα μεταδίδεται με αγωγή από την εξωτερική πλευρά του πυθμένα του δοχείου, προς την εσωτερική του, η οποία διαβρέχεται από το υγρό. Πρέπει να διευκρινίσουμε ότι μας ενδιαφέρει η μετάδοση της θερμότητας στο έλασμα του πυθμένα και όχι η μετάδοση στο υγρό.

12.2.1 Νόμος του Fourier

Ο Γάλλος φυσικομαθηματικός G.B. Fourier (1768 - 1830), διατύπωσε τον νόμο της μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή διατυπώνοντάς τον με διαφορική εξίσωση. Η θεωρία του η οποία αποδείχθηκε και πειραματικά, περι γράφεται παρακάτω:

Αν στο προηγούμενο παράδειγμα συμβολίσουμε με:

Q – την ποσότητα της θερμότητας σε χρόνο (t) που περνά από το μέταλλο,

L – το πάχος του μετάλλου,

A – την επιφάνεια του πυθμένα που είναι κάθετη στη ροή της θερμότητας,

θ_1, θ_2 – τις θερμοκρασίες της εξωτερικής και της εσωτερικής πλευράς αντίστοιχα και λ – το συντελεστή αναλογίας.

Τότε η ποσότητα της θερμότητας *(Q)* υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\boxed{Q = \lambda \cdot t \cdot \frac{A}{L}(\theta_1 - \theta_2)} \qquad ή \qquad \boxed{\frac{Q}{t} = \lambda \cdot \frac{A}{L}(\theta_1 - \theta_2)}$$

Το πηλίκο Q/t εκφράζει την ποσότητα της θερμότητας, που μεταδίδεται από τον πυθμένα στη μονάδα του χρόνου και καλείται ροή της θερμότητας.

$$\boxed{\text{ροή θερμότητας} \qquad \dot{Q} = \frac{Q}{t}}$$

Μονάδα ροής της θερμότητας είναι το Watt (Βατ)

Άρα η (1) γίνεται:

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot A}{L}(\theta_1 - \theta_2)}$$

και εκφράζει το νόμο του Fourier.

Ο συντελεστής (λ) ονομάζεται *συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας* εξαρτάται από την θερμοκρασία που βρίσκεται το υλικό και εκφράζει την ποσότητα της θερμότητας στην μονάδα του χρόνου, η οποία διαπερνά μια μεταλλική επιφάνεια $1m^2$ και πάχους 1m, όταν η διαφορά θερμοκρασίας είναι 1K .Ο λόγος $\frac{\lambda \cdot A}{L}$ στη σχέση (3) καλείται *θερμική αγωγιμότητα*, ενώ το αντίστροφο καλείται *θερμική αντίσταση* $\frac{\lambda \cdot A}{L}$.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η ροή της θερμότητας ($\dot{Q}$) είναι ανάλογη του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) του υλικού, ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας (θ_1-θ_2) ανάλογη της επιφάνειας (Α) του υλικού και αντιστρόφως ανάλογη του πάχους του ελάσματος L, μεταξύ των οποίων μετράμε τη διαφορά θερμοκρασίας. (Νόμος Fourier)

Παρατηρήσεις:

Οι μονάδες του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στο S.J. είναι

$$\frac{W}{m \cdot K}$$

Στον πίνακα 6.2. φαίνονται οι τιμές του λ για αρκετά στερεά σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από τα παραπάνω εύκολα προκύπτουν και οι μονάδες της θερμικής αγωγιμότητας και αντίστασης , οι οποίες είναι:

Θερμική αγωγιμότητα $\frac{W}{K}$ Θερμική αντίσταση $\frac{K}{W}$

Στο εμπόριο μονωτικών υλικών μπορεί να συναντήσουμε και μονάδες BTU/h, ft (πόδια) για το εμβαδόν της διατομής (A) και F (Fahrenheit) για την θερμοκρασία (1 BTU = 0,293watt).

12.3 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΜΕΤΑΦΟΡΑ

Είναι ο τρόπος μετάδοσης της θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας στερεού και μιας γειτονικής υγρής ή αέριας, η οποία βρίσκεται σε κίνηση. Όσο πιο γρήγορα κινείται το ρευστό, τόσο πιο μεγάλα ποσά θερμότητας μετα φέρονται. Όταν δεν υπάρχει κίνηση του ρευστού, τότε έχουμε μετάδοση με αγωγή.

Όταν η θερμοκρασία του ρευστού είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία του στερεού, έχουμε μετάδοση από το ρευστό προς το στερεό, ενώ το αντίθετο συμβαίνει, όταν η θερμοκρασία του στερεού είναι υψηλότερη του ρευστού.

12.3.1 Νόμος του Νεύτωνα (Newton)

Ο νόμος του Νεύτωνα για τη μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά αναφέρει ότι η ροή της θερμότητας ($\dot{Q}$) είναι ανάλογη της επιφάνειας (A) του τοιχώματος, της διαφοράς θερμοκρασίας (θ_1-θ_2) μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του ρευστού και ενός συντελεστή (α).

Ισχύει λοιπόν ότι: $\boxed{\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (\theta_1 - \theta_2)}$

Ο συντελεστής α ονομάζεται *συντελεστής θερμικής μεταφοράς* και εκφράζει την ποσότητα της θερμότητας στην μονάδα του χρόνου, που μεταδίδεται από ένα στερεό σώμα επιφάνειας 1 m^2, σε ένα ρευστό, με το οποίο βρίσκεται σε επαφή, όταν η διαφορά θερμοκρασίας τους είναι 1˚K.

Μονάδα του (α) είναι :1 W/m^2K

Η τιμή του συντελεστή θερμικής μεταφοράς (α) εξαρτάται από τη μορφή της ροής ,τη μορφή του στερεού ,τη θερμοκρασία του ρευστού κ.ά.

Ο λόγος

$$\frac{1}{\alpha \cdot A}$$

εκφράζει την θερμική αντίσταση για διάδοση με μεταφορά.

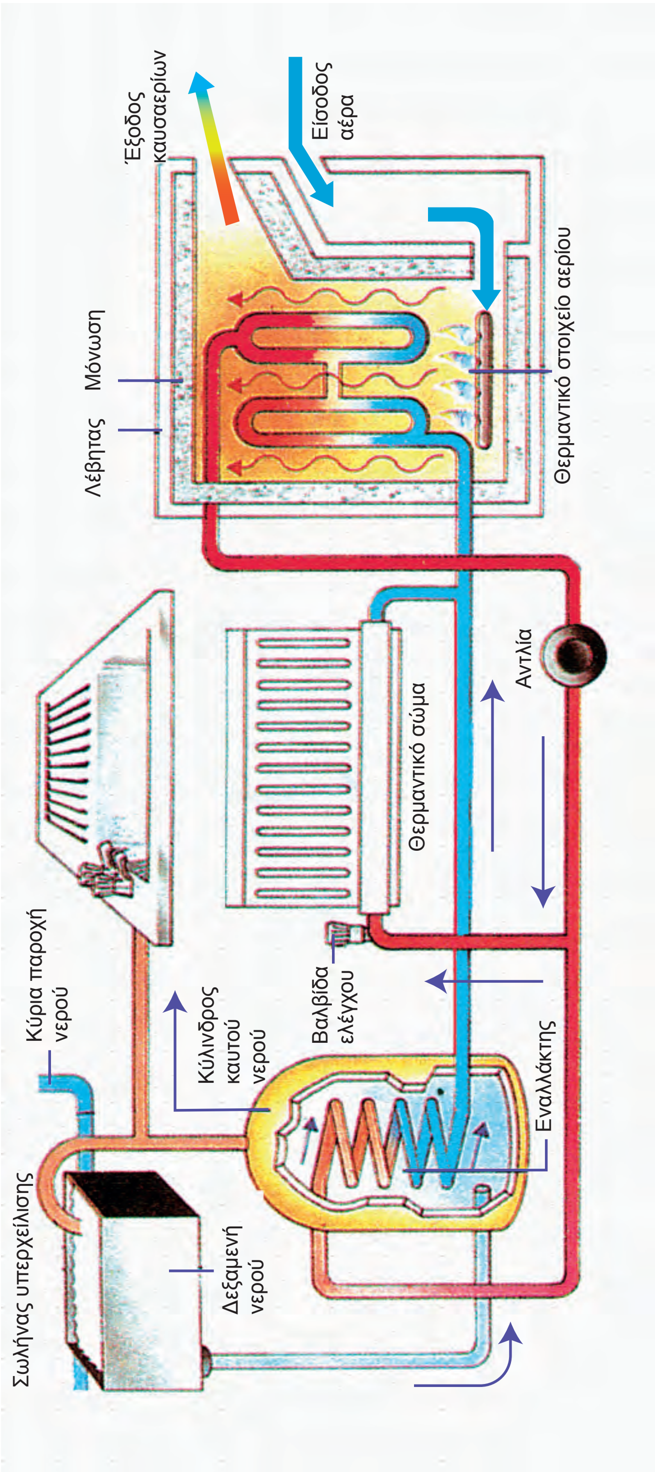
Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς είναι από 2-20000.

Συμπερασματικά, μπορούμε να αναφέρουμε ότι

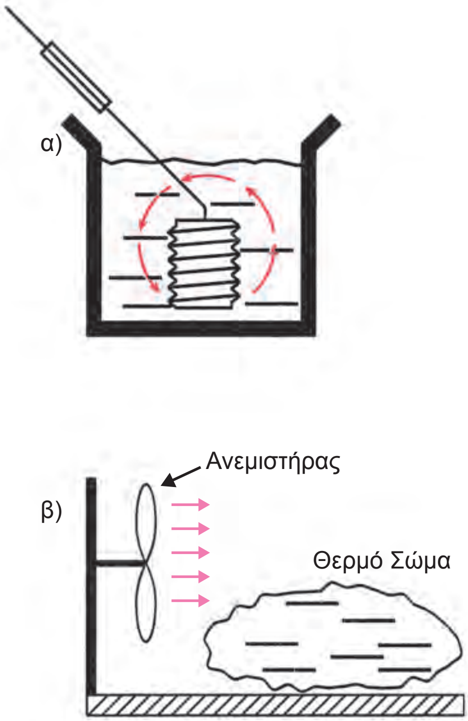
Η ροή της θερμότητας ($\dot{Q}$) με μεταφορά είναι ανάλογη της επιφάνειας συναλλαγής (Α), ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας στερεού και ρευστού (Δθ) και ανάλογη του συντελεστή θερμικής μεταφοράς (α).

Η μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά όταν το ρευστό εξαναγκάζεται να ρέει πάνω σε μια επιφάνεια από διάφορα μηχανικά μέσα, όπως ένας ανεμιστήρας ή μια αντλία, ονομάζεται βεβιασμένη μετάδοση ή κυκλοφορία. Σε αντίθετη περίπτωση όταν η μετάδοση προκαλείται λόγω των ανυψωτικών δυνάμεων που οφείλονται στη διαφορετική πυκνότητα του ρευστού το οποίο έχει άλλη θερμοκρασία, ονομάζεται φυσική μετάδοση ή κυκλοφορία.

Όταν έχουμε εξαναγκασμένη μεταφορά ο συντελεστής θερμικής μεταφοράς είναι μεγαλύτερος.



Σχήμα 12.4: *Σύστημα κεντρικής θέρμανσης, παράδειγμα μετάδοσης θερμότητας με μεταφορά.*

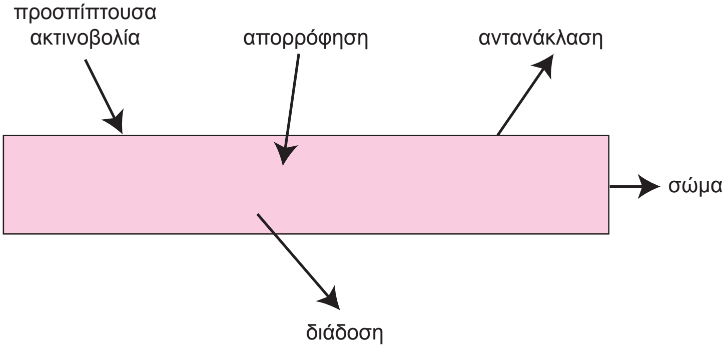


Σχήμα 12.5: *Μετάδοση θερμότητας με: α) Φυσική κυκλοφορία β) Βεβιασμένη κυκλοφορία*

12.4 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Στις προηγούμενες ενότητες είδαμε ότι, για να πραγματοποιηθεί η μετάδοση της θερμότητας, είναι απαραίτητη η ύπαρξη της ύλης. Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν προϋποθέτει ύπαρξη ύλης. (Ο ήλιος θερμαίνει τα σώματα, τα οποία είναι εκτεθειμένα σ' αυτόν, παρ' όλο που μεσολαβεί κενό.)

Ο όρος "με ακτινοβολία" χαρακτηρίζει την περίπτωση της μετάδοσης με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Έτσι, η μεταφερόμενη από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ενέργεια έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής ενέργειας κάποιου σώματος, το οποίο τελικά θερμαίνεται. Στη διάρκεια της μετάδοσης θερμότητας λαμβάνουν χώρα δύο διαδικασίες.



Σχήμα 12.6: *Μετάδοση της θερμότητας με ακτινοβολία*

Α) Η εκπομπή της θερμότητας και

Β) Η απορρόφησή της

Το υποθετικό σώμα το οποίο απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό, χωρίς να αντανακλά μέρος της, ονομάζεται ιδανικό ή υε λανό σώιια.

Η ροή της θερμότητας (Q/t) που εκπέμπεται από μία επιφάνεια είναι ανάλογη:

- της επιφάνειάς του (Α)
- της τέταρτης δύναμης της απόλυτης θερμοκρασίας του (Τ) και
- της σταθερός (σ) των Stefan – Boltzmann και
- του συντελεστή ε, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό της θερμικής ακτινοβολίας σε σχέση με το μέλαν ή ιδανικό σώμα.

Ισχύει λοιπόν η σχέση:

$$\boxed{\frac{Q}{t} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4}$$

Αυτή η σχέση εκφράζει το νόμο του Stefan – Boltzmann

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

1. Δίνεται η ροή θερμότητας $\dot{Q}$ = 1500 W μέσα από τοίχωμα πάχους L = 12 mm. Το εμβαδόν της επιφάνειας είναι A = 4m^2.
   Να υπολογίσετε την θερμική αντίσταση για διάδοση με αγωγή και τη διαφορά θερμοκρασίας.

   Δίνεται $\lambda = 0{,}03\dfrac{w}{m\cdot k}$

Λύση

$$R = \frac{L}{\lambda \cdot A} = \frac{0{,}012\,m}{0{,}03\dfrac{W}{m\cdot K}\cdot 4\,m^2} \rightarrow \boxed{R = 0{,}01\frac{K}{W}}$$

2. Μέσα από ένα χαλύβδινο έλασμα πάχους L = 10 mm και εμβαδού A = 4m^2 διέρχεται θερμότητα Q = 60 kJ. Στη μία πλευρά του ελάσματος η θερμοκρασία είναι Θ_1 = 100°C και στην άλλη είναι θ_2 = 40°C.
   Να υπολογισθούν:

   α) η ροή της θερμότητας και

   β) ο χρόνος που διήρκεσε το φαινόμενο.

   Δίνεται $\lambda = 58\dfrac{W}{m\cdot K}$

Λύση

$$Q = \lambda \cdot t\frac{A}{L}(\theta_1 - \theta_2) \Rightarrow t = \frac{Q\cdot L}{\lambda \cdot A\cdot(\theta_1 - \theta_2)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t = \frac{60.000\,Ws \cdot 0{,}010m}{58\cdot\dfrac{W}{m\cdot K}\cdot 4m^2 \cdot 60\,K} \Rightarrow \boxed{t = 0{,}043\,s}$$

Για να υπολογίσουμε τη ροή της θερμότητας εφαρμόζουμε τον τύπο:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \frac{60000\,Ws}{0{,}043\,s} \Rightarrow \dot{Q} = 1395349\,W \quad ή \quad \boxed{\dot{Q} = 1395{,}349\,kW}$$

3. Μία ατσάλινη τετραγωνική λεπτή πλάκα με πλευρά 8cm, θερμαίνεται στους 600˚C. Να υπολογισθεί ο ολικός ρυθμός της ακτινοβολούμενης ενέργειας, αν ο συντελεστής εκπομπής της είναι 0,60.

Λύση

Η συνολική επιφάνεια της πλάκας είναι:

$A=2.(0,0064)\ m^2 = 0,0128\ m^2$

Μετατρέπουμε τους 600˚C σε K και έχουμε:

$$600^{\circ}C + 273 = 873\ K$$

$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \Rightarrow Q = (0,60) \cdot \left(5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}\right) \cdot \left(0,0128 m^2\right) \cdot$$

$$\cdot (873\ K)^4 \Rightarrow \boxed{Q = 253W}$$

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 12ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι μετάδοσης της θερμότητας.

A) Με αγωγή

B) Με μεταφορά

Γ) Με ακτινοβολία

- Ο πρώτος τρόπος μετάδοσης της θερμότητας συναντάται και στις τρεις καταστάσεις της ύλης (δηλ. σε στερεά – υγρά – αέρια)
- Μετάδοση θερμότητας με μεταφορά συναντάμε κυρίως στα στερεά και ρευστά σώματα.
- Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία συναντάται και στις τρεις καταστάσεις της ύλης.

- Ο νόμος της μετάδοσης της θερμότητας με αγωγή εκφράζεται από το νόμο του Fourier.

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot A}{L}(\theta_1 - \theta_2)}$$

- Ο λόγος $\frac{\lambda \cdot A}{L}$ καλείται *θερμική αγωγιμότητα*,

  ενώ το αντίστροφο καλείται *θερμική αντίσταση* $\frac{L}{\lambda \cdot A}$

- Ο νόμος του Νεύτωνα για τη μετάδοση της θερμότητας με μεταφορά, δίνεται από τον τύπο:

$$\boxed{\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (\theta_1 - \theta_2)}$$

- Στη διάρκεια της μετάδοσης θερμότητα με ακτινοβολία λαμβάνουν χώρα δύο διαδικασίες.

- Α) Η εκπομπή της θερμότητας και

  Β) Η απορρόφησή της

Το υποθετικό σώμα το οποίο απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό, χωρίς να αντανακλά μέρος της, ονομάζεται ιδανικό ή μελανό σώμα.

Για την μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία ισχύει ο νόμος των Stefan–Boltzmann

$$\boxed{\frac{Q}{t} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13

ΚΑΥΣΙΜΑ - ΚΑΥΣΗ

13.1 Καύσιμα

13.2 Καύση

13.3 Ατμοσφαιρικός αέρας

13.4 Θερμογόνος δύναμη

13.5 Περίσσεια αέρα

13.6 Προϊόντα καύσης

13.7 Εξισώσεις καύσης

13.8 Ταξινόμηση καυσίμων

13.9 Είδη καυσίμων

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να εξηγείτε τις έννοιες: καύσιμα, καύση, τέλεια και ατελής καύση
- Να αναφέρετε τους ορισμούς: καυσιγόνος αέρας, θερμογόνος δύναμη, περίσσεια αέρα
- Να γνωρίζετε τη σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα
- Να γνωρίζετε και να αναφέρετε τα συστατικά των καυσίμων
- Να γνωρίζετε τα είδη των γαιανθράκων, τα προϊόντα της κλασματικής απόσταξης του πετρελαίου τη θερμογόνο δύναμή τους και το πεδίο εφαρμογών τους.

13.1 ΚΑΥΣΙΜΑ

Καύσιμα είναι τα υλικά (στερεά, υγρά ή αέρια), τα οποία, όταν καίγονται, παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας (θερμική ενέργεια). Συχνά η καύση τους συνοδεύεται και από έντονη φλόγα. Την θερμική αυτή ενέργεια τη χρησιμοποιούμε για θέρμανση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και κίνηση μεταφορικών μέσων.

Υπάρχουν πολλές καύσιμες ουσίες, αλλά ως καύσιμα νοούνται μόνο εκείνα που υπάρχουν σε μεγάλες ποσότητες στη φύση, η εξόρυξή ή η άντλησή τους δεν έχει πολύ μεγάλο κόστος, ενώ τα προϊόντα της καύσης τους θα πρέπει να είναι, όσο το δυνατόν, λιγότερο βλαβερά.

Τα κύρια συστατικά τους είναι ο ***άνθρακας (C)***, το ***υδρογόνο (H)*** και το ***θείο (S)***. Όσο πιο πολύ άνθρακα περιέχει κάποιο καύσιμο, τόσο πιο μεγάλη ποσότητα θερμότητας αποδίδει.

13.2 ΚΑΥΣΗ - ΚΑΥΣΙΓΟΝΟΣ ΑΕΡΑΣ

Καύση είναι η χημική αντίδραση μιας ουσίας (ανόργανης ή οργανικής)με το οξυγόνο του αέρα, σε μικρό χρονικό διάστημα και συνοδεύεται από την παραγωγή θερμότητας και την εκπομπή φωτός. Όταν η καύση γίνει με πολύ μεγάλη ταχύτητα, τότε λέμε ότι έχουμε έκρηξη. Οι βασικές χημικές αντιδράσεις που συντελούνται, είναι του άνθρακα και του υδρογόνου και περιγράφονται από τις χημικές εξισώσεις του πίνακα 1.

Όπως προαναφέραμε, για να υπάρξει καύση, είναι απαραίτητη η παρουσία αέρα. Γι΄ αυτό, λοιπόν, τον αέρα τον ονομάζουμε ***καυσιγόνο***. Οταν γίνεται η καύση και στα προϊόντα της υπάρχουν καύσιμα, τότε είναι προφανές ότι η ποσότητα του αέρα δεν ήταν επαρκής και έχουμε *ατελή καύση*, ενώ, σε αντίθετη περίπτωση έχουμε *τέλεια καύση*, (πίνακας 1)

ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΕΛΕΙΑΣ ΚΑΥΣΗΣ ΜΕΡΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ
Πίνακας 1

ΚΑΥΣΗ ΣΤΕΡΕΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ *Άνθρακας:* $C + O_2 = CO_2$
ΚΑΥΣΗ ΥΓΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ *Βενζίνη:* $2C_8H_{18} + 25O_2 = 16CO_2 + 18\,H_2O$ *Αιθανόλη:* $C_2\,H_3OH + 3O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$
ΚΑΥΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ Μεθάνιο: $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$ Υδρογόνο: $2H_2 + O_2 = 2H_2O$

13.3. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΣ ΑΕΡΑΣ - ΣΥΣΤΑΣΗ

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι ένα μείγμα αερίων κυρίως O_2 και N_2, από το οποίο αποτελείται η γήινη ατμόσφαιρα. Με την επίδραση του αέρα και του νερού συντελούνται οι κυριότερες γεωλογικές διεργασίες στην επιφάνεια της γης και διαμορφώνεται ο καιρός και το κλίμα. Η εκατοστιαία σύσταση του ξηρού ατμοσφαιρικού αέρα είναι:

	ΚΑΤ' ΟΓΚΟ	ΚΑΤΑ ΒΑΡΟΣ
ΟΞΥΓΟΝΟ	21%	23%
ΑΖΩΤΟ	79%	77%

Περιέχει ακόμη πολύ μικρές ποσότητες άλλων ευγενών αερίων καθώς και υδρογόνο (H_2), όζον (O_3), οξείδια του αζώτου(NO_x), διοξείδιο του άνθρακα ($C0_2$), αμμωνία (NH_3), μεθάνιο (CH_4), διοξείδιο του θείου ($S0_2$) κ.α

Η περιεκτικότητα του αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα, οξείδιο του αζώτου και ενώσεις του θείου παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις και είναι ιδιαίτερα μεγάλη στις πόλεις και τα βιομηχανικά κέντρα.

13.4 ΘΕΡΜΑΝΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ - ΘΕΡΜΟΓΟΝΟΣ ΔΥΝΑΜΗ (Η)

Στις διάφορες τεχνικές εφαρμογές , ένα από τα πιο σημαντικά μεγέθη ,τα οποία μας ενδιαφέρουν στην επιλογή ενός καυσίμου, είναι το ποσό της θερμικής ενέργειας που μπορεί να μας δώσει μια μονάδα ενός συγκεκριμένου καυσίμου, όταν καίγεται με τέλεια καύση.

Θερμαντική ικανότητα ή θερμογόνος δύναμη *(Η)* ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που εκλύεται κατά την πλήρη καύση 1 Kg (ή 1 m^3 για αέρια) στερεού υγρού ή αερίου καυσίμου υπό κανονικές συνθήκες (0˚C και 1013,25 mbar). Μονάδα μέτρησης αυτού του μεγέθους είναι:

KJ/Kg για τα στερεά και υγρά *(κιλοτζάουλ ανά κιλό)*

KJ/m^3 για τα αέρια *(κιλοτζάουλ ανά κυβικό μέτρο)*

Στον πίνακα 2 βλέπουμε ενδεικτικά τη σύσταση ορισμένων καυσίμων καθώς επίσης και τη θερμογόνο δύναμή τους.

Η θερμογόνος δύναμη συμβολίζεται με το γράμμα **H** και στη περίπτωση των υγρών, αερίων και εκείνων των στερεών καυσίμων που περιέχουν ως συστατικό τους το υδρογόνο (H_2) διακρίνεται σε ανώτερη και κατώτερη.

- **Ανώτερη θερμογόνος** δύναμη (H_s) είναι η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, όταν δε λαμβάνεται υπόψη η απώλεια θερμότητας από την ατμοποίηση του παραγόμενου νερού κατά την καύση του H_2. (λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης.)

- **Κατώτερη θερμογόνος** δύναμη (H_i) είναι η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, αφού έχει αφαιρεθεί η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για την ατμοποίηση του παραγόμενου νερού κατά την καύση του υδρογόνου H_2.

Στην περίπτωση των υγρών και αερίων αυτή ακόμη διακρίνεται σε θερμογόνο δύναμη υπό σταθερή πίεση (Hp) και θερμογόνο δύναμη υπό σταθερό όγκο (H_v) ανάλογα αν η καύση γίνει υπό σταθερή πίεση ή όγκο αντίστοιχα. Η θερμογόνος δύναμη προσδιορίζεται πειραματικά σε ειδικές συσκευές και είναι σε πίνακες με σταθερές συνθήκες θερμοκρασιών 15 ˚C και 25 ˚C.

Πίνακας 2: Σύσταση και θερμογόνος δύναμη διαφόρων καυσίμων

Καύσιμο	Μοριακός τύπος ή σύσταση κατά προσέγγιση	Θερμογόνος δύναμη (H)
ΑΝΘΡΑΚΙΤΗΣ	94% C	31.4 MJ/Kg
ΞΥΛΑΝΘΡΑΚΑΣ	60% C	11.6 MJ/Kg
		35% υγρασία
ΛΙΓΝΙΤΗΣ	67% C	21 MJ/Kg
ΞΥΛΟ	53% C	13 MJ/Kg
		35% υγρασία
ΒΕΝΖΙΝΗ	κυρίως $C_{18}H_{18}$	35 MJ/Kg
ΑΙΘΑΝΟΛΗ	C_2H_5OH	35 MJ/Kg
ΜΕΘΑΝΟΛΗ	CH_3OH	23.8 MJ/Kg
ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	CH4	55 MJ/m^3
ΥΓΡΑΕΡΙΟ	$C_3H_8+C_4H_{10}$	49.5 MJ/m^3
ΥΔΡΟΓΟΝΟ	H_2	143 MJ/m^3

13.5 ΠΕΡΙΣΣΕΙΑ ΑΕΡΑ

Σε όλες τις περιπτώσεις καύσης μιας ποσότητας καυσίμου, όταν το οξυγόνο που υπάρχει είναι ακριβώς το απαιτούμενο, τότε έχουμε το θεωρητικά σωστό μείγμα αέρα – καυσίμου. Αυτό το μίγμα ονομάζεται στοιχειομετρικό.

Την αναγκαία ποσότητα οξυγόνου θα την υπολογίζουμε με τις εξισώσεις καύσης, που θα εξετάσουμε σε επόμενη ενότητα. Αυτή η ποσότητα οξυγόνου θα ήταν επαρκής για μια τέλεια καύση. Βέβαια αυτό είναι δύσκολο γιατί είναι αδύνατη η τέλεια ανάμιξη των μορίων του καυσίμου με τα μόρια του αέρα στην ιδανική αναλογία.

Χρειάζεται, λοιπόν, να χορηγήσουμε μια συμπληρωματική ποσότητα αέρα (a,), άρα και περισσότερο οξυγόνο(O_2). Αυτή την ποσότητα την ονομάζουμε ***περίσσεια αέρα***. Ο λόγος της ποσότητας του αέρα (V_θ) που είναι πραγματικά αναγκαίος προς την ποσότητα του αέρα (V) του στοιχειομε τρικού μίγματος ονομάζεται *συντελεστής περίσσειας αέρα (λ)* και δίνεται από τον τύπο:

$$\boxed{\lambda = V_\pi / V\theta_\pi}$$

Η τιμή του εξαρτάται από το είδος του καυσίμου και τις συνθήκες καύσης.

13.6 ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΥΣΗΣ – ΚΑΥΣΑΕΡΙΑ

Τα προϊόντα της καύσης των καυσίμων διακρίνονται σε αέρια και στερεά.

Τα αέρια, ή αλλιώς, **καυσαέρια**, μπορεί να είναι μονοξείδιο του άνθρακα *(CO)*, διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), διοξείδιο του θείου (SO_2), άζωτο (N_2). Τα στερεά είναι κυρίως η αιθάλη (C), όπως επίσης η τέφρα και η σκουριά, τα οποία προέρχονται από άκαυστα άλατα του καυσίμου. Όπως είδαμε και στον πίνακα 1, όταν έχουμε τέλεια καύση, τότε στα προϊόντα της δεν ανιχνεύουμε άνθρακα (C) ή μονοξείδιο του άνθρακα (CO), σε αντίθεση με την ατελή καύση, στην οποία ανιχνεύουμε.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι αν η καύση των υδρογονανθράκων (HC) που περιέχονται στα καύσιμα ήταν τέλεια, τότε τα μοναδικά προϊόντα θα ήταν διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και νερό (H_2O). Στην πράξη σχεδόν ποτέ δεν έχουμε τέλεια καύση.

Ιδιαίτερα ατελής είναι η καύση στους κινητήρες των αυτοκινήτων, με αποτέλεσμα στα καυσαέριά τους να βρίσκουμε μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και άκαυστους υδρογονάνθρακες. Αυτό συμβαίνει, κυρίως, γιατί ο χρόνος της αντίδρασης της καύσης, είναι μικρός και οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές.

Γνωρίζουμε ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας εκτός από οξυγόνο (O_2), περιέχει και άζωτο (N_2),το οποίο στην ατμόσφαιρα είναι αδρανές. Σε συνθήκες όμως υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, όπως στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, το άζωτο αντιδρά με το 02 και σχηματίζονται τα οξείδια του αζώτου (NO, NO_2), ή γενικά (NO_x).

Σχήμα 13.1: *Καύση 1kg βενζίνης - 14.7 kg αέρα και παραγόμενα καυσαέρια*

13.7 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΑΥΣΗΣ

Η εξίσωση καύσης εκφράζει τη χημική ένωση των στοιχείων που συνιστούν τα καύσιμα, με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Η καύση των στοιχείων αυτών παριστάνεται με τις ακόλουθες χημικές εξισώσεις, στις οποίες αναγράφουμε και το ποσό της θερμότητας που αποδίδεται ανά μονάδα βάρους.

ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΕΛΕΙΑΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ
$$C + O_2 = CO_2 + 33800 \text{ kJ/kg}$$

Με αυτήν την εξίσωση παριστάνουμε την τέλεια καύση του άνθρακα **(C)** με προϊόν το **CO_2.** Είναι σχέση βαρών και αν σε αυτό τοποθετήσουμε τα ατομικά βάρη των στοιχείων θα έχουμε :

$C + O_2 = CO_2$

12 + 32 = 44 και διαιρώντας δια 12, έχουμε:

1 + 2,67 = 3.67

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι 1 kg άνθρακα το οποίο καίγεται πλήρως στον αέρα, χρειάζεται 2.67 kg οξυγόνου παράγει 3.67 kg διοξείδιο του άνθρακα και αποδίδει θερμότητα 33800 kJ/ kg.

ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΕΛΕΙΑΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ
$$2H_2 + O_2 = 2H_2O + 144000 \text{ kJ/kg}$$

Εχουμε λοιπόν:

4+ 32 = 36 και διαιρώντας δια 4 έχουμε:

1+8 = 9

Δηλαδή ένα 1 kg υδρογόνου απαιτεί 8 kg οξυγόνου και μας δίνει 9 kg νερό με την μορφή υδρατμών

ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΕΛΕΙΑΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΟΥ ΘΕΙΟ
$$S+O_2 = SO_2 + 10400 \text{ kJ/kg}$$

Έχουμε λοιπόν:

32 + 32 = 64 και διαιρώντας δια 32, έχουμε :

1 + 1=2

δηλαδή 1 kg θείου καίγεται με ένα 1 kg οξυγόνο και αποδίδει 2 kg διοξείδιο του θείου. Ανάλογες σχέσεις υπάρχουν και για την ατελή καύση του άνθρακα σε μονοξείδιο και, στη συνέχεια το μονοξείδιο σε διοξείδιο του άνθρακα.

ΑΤΟΜΙΚΑ ΒΑΡΗ
O = 16, C = 12, H = 1, S = 32

13.8 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούμε στις εφαρμογές, που προαναφέραμε διακρίνονται σε κατηγορίες, ανάλογα με τη φυσική τους κατάσταση, την προέλευσή τους και τις εφαρμογές τους.

I. ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΟΥΣ

Διακρίνονται σε:

✎ **Φυσικά:** αυτά που χρησιμοποιούνται όπως προέρχονται από τη φύση *(μεθάνιο, λιγνίτης, φυσικό αέριο, γαιάνθρακες κ.ά.)*

✎ **Τεχνητά:** αυτά που χρησιμοποιούνται αφού έχουν υποστεί ορισμένη επεξεργασία. *(Βενζίνη - φωταέριο - diesel - οινόπνευμα)*

II. ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Διακρίνονται σε:

✎ **Στερεά**: λιγνίτης - ανθρακίτης - κώκ κ.ά.

✎ **Υγρά:** κηροζίνη - πετρέλαιο - οινόπνευμα κ.ά.

✎ **Αέρια:** μεθάνιο - φυσικό αέριο - φωταέριο κ.ά.

III. ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

Ένα άλλο κριτήριο διάκρισης των καυσίμων είναι το πεδίο εφαρμογών τους. Έτσι, άλλα από αυτά χρησιμοποιούνται σε κινητήριες μηχανές (βενζίνη πετρέλαιο), ενώ άλλων η χρήση περιορίζεται σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (λιγνίτης). Επίσης υπάρχουν και τα αέρια καύσιμα, τα οποία, σιγά-σιγά κάνουν την εμφάνισή τους σε οχήματα (L.P.G.-υγραέριο, φυσικό αέριο),ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στην παραγωγή ενέργειας.

13.9 ΕΙΔΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα 13.1 ότι το βασικό συστατικό των καυσίμων είναι ο άνθρακας (C).Στα καύσιμα περιλαμβάνονται ορυκτά οργανικής προέλευσης, λιγνίτες, φυσικό αέριο, καύσιμος σχιστόλιθος, λιθάνθρακας, πετρέλαιο, τύρφη καθώς, επίσης, ξυλεία και απορρίμματα φυτικής προέλευσης (άχυρο-φλούδες κ.ά.)

Οι σπουδαιότερες καύσιμες ύλες είναι οι παρακάτω.

Α. Τύρφη

Είναι ορυκτός καύσιμος άνθρακας που προήλθε από την απανθράκωση υδρόβιων φυτών. Η τύρφη είναι σχετικά φτωχό καύσιμο, έχει δηλαδή μικρή θερμογόνο δύναμη, επίσης περιέχει πολλές ξένες προσμίξεις και μεγάλα ποσά υγρασίας, γι’ αυτό, συνήθως πριν τη χρήση της, πρέπει πρώτα να ξηραθεί.

Β. Γαιάνθρακες

Προέρχονται από φυτά τα οποία έχουν απανθρακωθεί σε παλαιές γεωλογικές εποχές, χωρίς την παρουσία αέρα αλλά κάτω από υψηλή πίεση και θερμοκρασία.

Τα σπουδαιότερα είδη γαιανθράκων είναι τα παρακάτω:

➢ *Λιγνίτης:* εύφλεκτο ορυκτό, είναι κάτι μεταξύ της τύρφης και του ανθρακίτη. Διαφέρει από την τύρφη, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας του, της λιγότερης υγρασίας και της μεγαλύτερης θερμογόνου δύναμης.

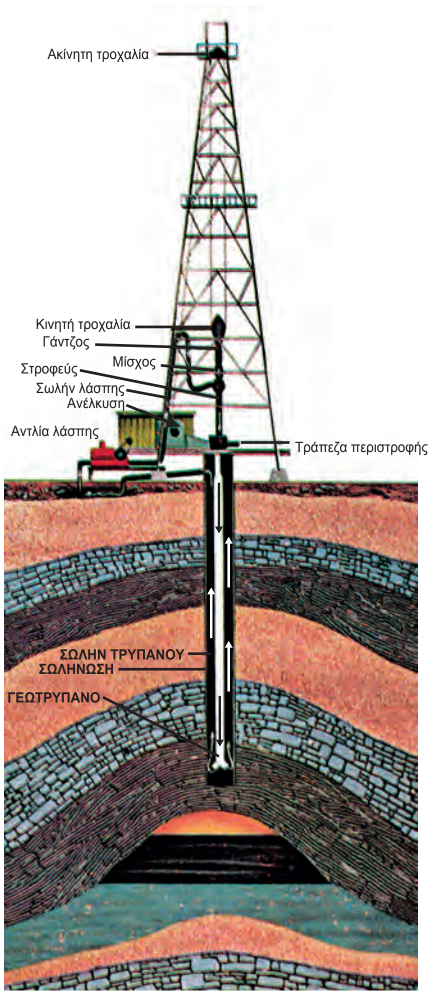
➢ *Λιθάνθρακας:* είναι από τα πιο παλιά στερεά καύσιμα. έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα, μικρά ποσοστά υγρασίας και μεγάλη θερμογόνο δύναμη.

➢ *Αθρακίτης:* είναι ένα είδος λιθάνθρακα με μεγάλη θερμογόνο δύναμη. Είναι σκληρό υλικό με χαμηλά ποσά υγρασίας και μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα.

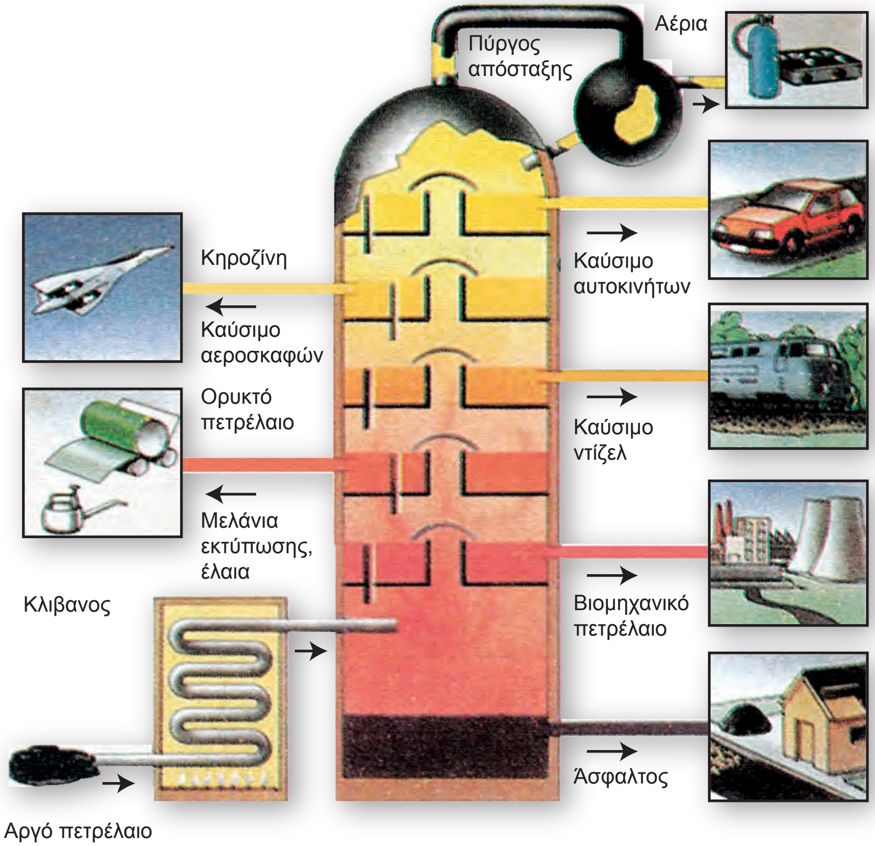
Γ. Ακατέργαστο πετρέλαιο

Το ακατέργαστο πετρέλαιο είναι φυσικό υγρό, καύσιμο, ελαιώδες, εύφλεκτο, με ειδική οσμή. Σχηματίζεται μαζί με τους αέριους HC, σε βάθη συνήθως 1,2 - 2,0 km. Δε χρησιμοποιείται στην μορφή στην οποία αντλείται. Σε ειδικές εγκαταστάσεις, τα διυλιστήρια, υποβάλλεται σε κλασματική απόσταξη από την οποία παίρνουμε ανάλογα με το σημείο ζέσης τα ακόλουθα προϊόντα(σχήμα 13.3):

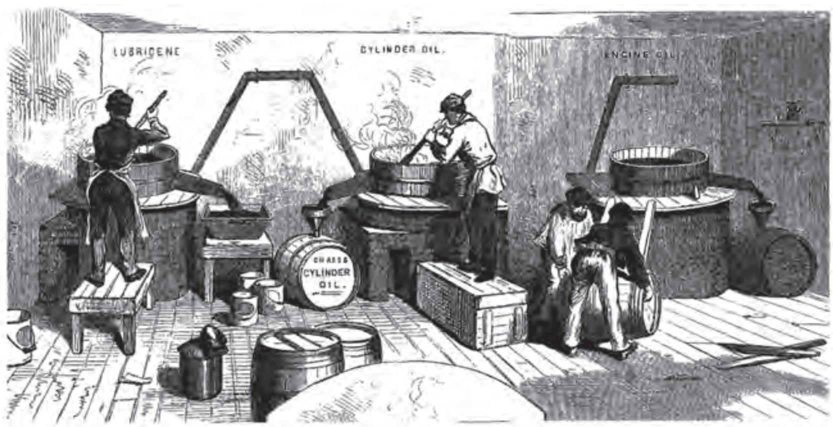
- ✓ Υγραέρια
- ✓ Διάφορους τύπους βενζί1νης
- ✓ Κηροζίνη
- ✓ Πετρέλαιο Diesel
- ✓ Ορυκτέλαια - Παραφίνες - Βαζελίνες
- ✓ Άσφαλτος



Σχήμα 13.2: *Άντληση πετρελαίου*



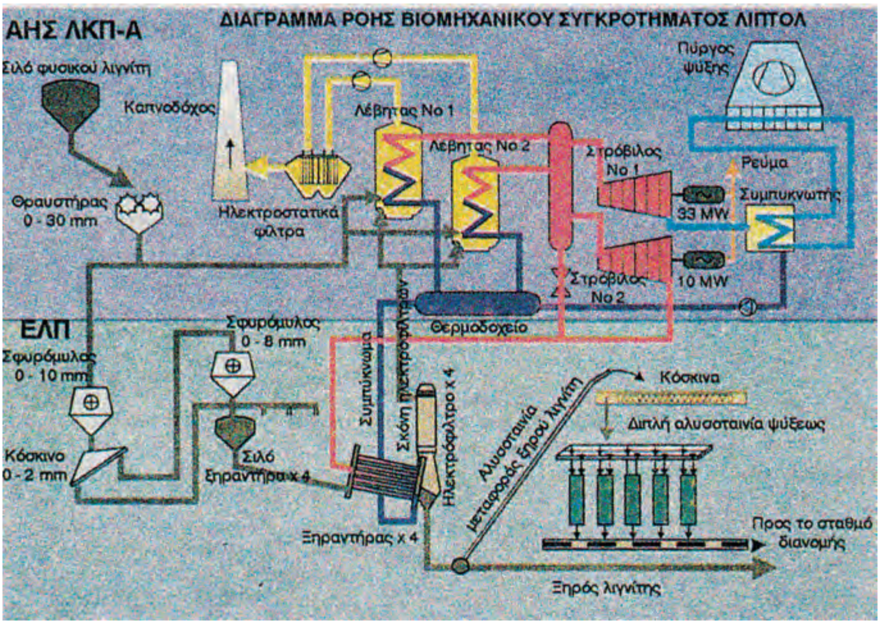
Σχήμα 13.3: *Προϊόντα διύλισης πετρελαίου*



Σχήμα 13.4: *Πρωτόγονο διυλιστήριο*

Δ. Αέρια καύσιμα

Σ΄ αυτήν την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται τα φυσικά αέρια με κύριο συστατικό το μεθάνιο (CH4) και τα τεχνητά αέρια, όπως το υγραέριο, το οποίο είναι παράγωγο του πετρελαίου. Επίσης, υπάρχει το φωταέριο το οποίο είναι προϊόν ξηρής απόσταξης λιθανθράκων.

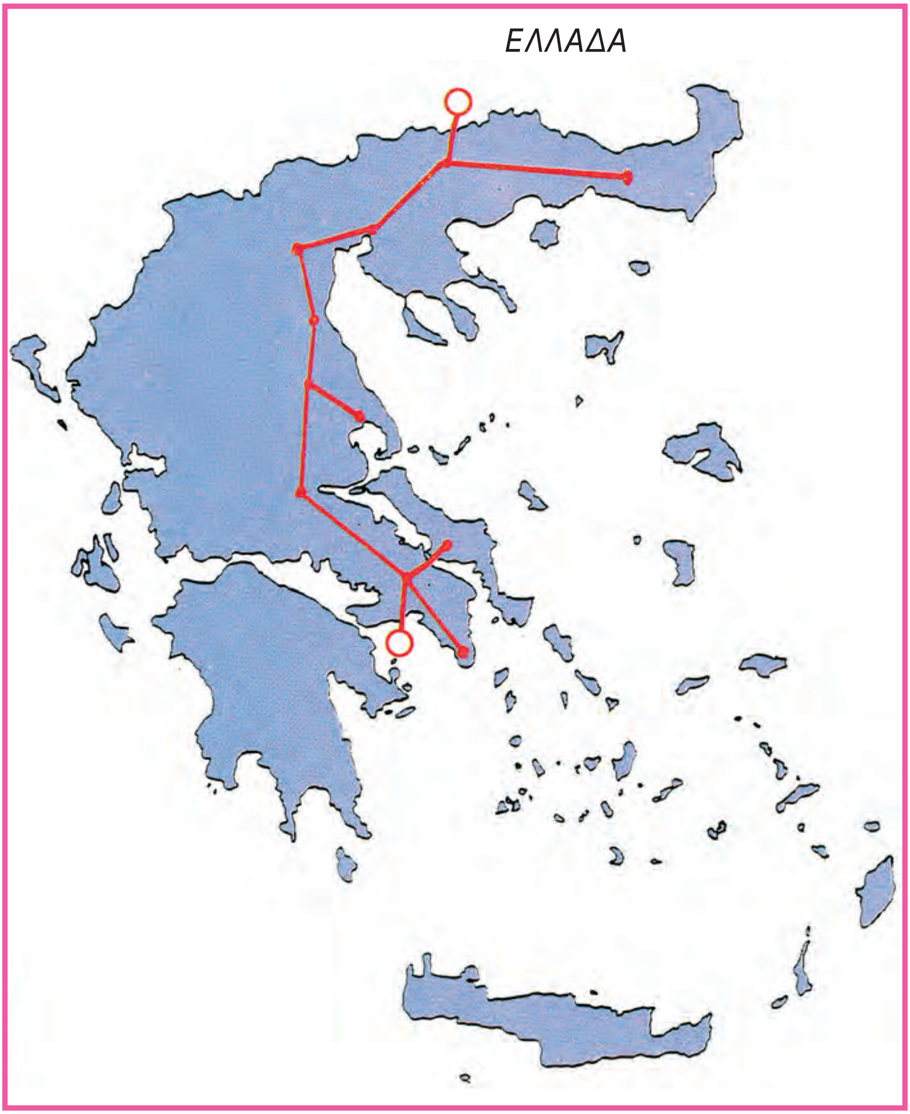


Σχήμα 13.5: *Εργοστάσιο της ΛΙΠΤΟΛ, για την παρασκευή τεχνητού στερεού καυσίμου (μπριγκέτες)*

Σ΄ αυτή τη διαδικασία το υπόλειμμα είναι το κωκ, ένα στερεό καύσιμο με μεγάλη θερμογόνο δύναμη. Επίσης ένα ακόμη τεχνητό στερεό καύσιμο είναι οι μπριγκέτες, οι οποίες κατασκευάζονται από μικρά κομμάτια κωκ, σκόνη λιγνίτη ή και λιθάνθρακα.

Άλλο αέριο καύσιμο είναι το φυσικό αέριο. Αυτό είναι μίγμα υδρογονανθράκων (HC) σε αέρια κατάσταση, αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH4) και ανήκει στη δεύτερη οικογένεια των αερίων καυσίμων. Εξάγεται από φυσικές κοιλότητες, υπόγειες ή υποθαλάσσιες. Μετά από πρωτογενή επεξεργασία, μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις μέχρι τις περιοχές κατανάλωσής του, σε υψηλή πίεση με ειδικούς αγωγούς μεγάλης διαμέτρου. Υπάρχει δυνατότητα θαλάσσιας μεταφοράς του σε υγροποιημένη μορφή, με ειδικά δεξαμενόπλοια σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία -162 C˚. Δεν περιέχει μονοξείδιο του άνθρακα (CO), δεν είναι τοξικό και δεν ρυπαίνει το περιβάλλον.

Στην Ελλάδα, εισάγουμε φυσικό αέριο από τη Ρωσία μέσω αγωγού και από την Αλγερία, σε υγροποιημένη μορφή με τα ειδικά δεξαμενόπλοια. Έχει ευρύ πεδίο εφαρμογών και χρησιμοποιείται ως καύσιμο, στους σταθμούς παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, στη βιομηχανία, στους κινητήρες εσωτερικής καύσης και στον οικιακό τομέα.



Σχήμα 13.6: *Αγωγός φυσικού αερίου*

Ε. Πυρηνικά καύσιμα

Είναι τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες για να πετύχουμε τη διάσπαση του πυρήνα και να εκμεταλλευτούμε τα μεγάλα ποσά θερμικής ενέργειας που εκλύονται. Υπάρχει ένα είδος πυρηνικού καυσίμου και αυτό είναι το ουράνιο 235U και 238U. Στις αντιδράσεις σχάσης του πυρήνα του ουρανίου η εκλυόμενη ενέργεια είναι 2.10^6 φορές μεγαλύτερη από την ενέργεια που εκλύεται από την καύση ενός κιλού πετρελαίου. Οι κίνδυνοι όμως της πυρηνικής τεχνολογίας, δείχνουν ότι θα είναι δύσκολη η ολική αντικατάσταση των "συμβατικών" καυσίμων από αυτή.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 13ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Καύσιμα είναι τα υλικά (στερεά, υγρά ή αέρια), τα οποία, όταν καίγονται, παράγουν μεγάλα ποσά θερμότητας (θερμική ενέργεια).
- Τα κύρια συστατικά τους είναι ο ***άνθρακας (C)***, το ***υδρογόνο (H)*** και το ***θείο (S)***.
- Καύση είναι η χημική αντίδραση μιας ουσίας (ανόργανης ή οργανικής) με το οξυγόνο του αέρα, σε μικρό χρονικό διάστημα και συνοδεύεται από την παραγωγή θερμότητας και την εκπομπή φωτός.
- Για να υπάρξει καύση, είναι απαραίτητη η παρουσία αέρα. Ο αέρας αυτός ονομάζεται ***καυσιγόνος***. Όταν γίνεται η καύση και στα προϊόντα της υπάρχουν καύσιμα, έχουμε ατελή καύση, ενώ, σε αντίθετη περίπτωση έχουμε τέλεια καύση.
- Ατμοσφαιρικός αέρας είναι ένα μείγμα αερίων κυρίως O_2 και N_2,
- **Θερμαντική ικανότητα ή θερμογόνος δύναμη** (*H*) ονομάζεται το ποσό της θερμότητας που εκλύεται κατά την πλήρη καύση 1 Kg (ή 1 m^3 για αέρια) στερεού υγρού ή αερίου καυσίμου.
- **Ανώτερη θερμογόνος** δύναμη είναι η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, όταν δε λαμβάνεται υπόψη η απώλεια θερμότητας από την ατμοποίηση του παραγόμενου νερού κατά την καύση του H_2. (λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης.)

- **Κατώτερη θερμογόνος** δύναμη είναι η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου, αφού έχει αφαιρεθεί η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για την ατμοποίηση του παραγόμενου νερού κατά την καύση του υδρογόνου H_2.

- Οι εξισώσεις καύσης εκφράζουν τη χημική ένωση των στοιχείων που συνιστούν τα καύσιμα , με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Η καύση των στοιχείων αυτών παριστάνεται με χημικές εξισώσεις, στις οποίες αναγράφουμε και το ποσό της θερμότητας που αποδίδεταιανά μονάδα βάρους

- Τα καύσιμα που χρησιμοποιούμε στις εφαρμογές, διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τη φυσική τους κατάσταση, (φυσικά ή τεχνητά), ανάλογα την προέλευσή τους (στερεά, υγρά ή αέρια) και τις εφαρμογές τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1) University Physics Hugh D. Young
2) Introduction to Thermodynamics and heat transfer - Gengel - Boles
3) Εφαρμοσμένη θερμοδυναμική Νικ. Γ. Κουμούτσου
4) Φυσική - Κ. Δ. Αλεξόπουλου - Δ. Ι. Μαρίνου
5) Κινητήριες Μηχανές - Γ. Φ. Δανιήλ - Ιδρ. Ευγενίδου
6) Τεχνικό Μνημόνιο - Β. Η. Σελλούντος
7) Στοιχεία Υδραυλικών Μηχανών - Συμπιεστών - Ιδρ. Ευγενίδου
8) Motori Endotermici - Dante Giacosa
9) Η τεχνολογία στην Αρχαία Ελλάδα - Λάζος
10) Θερμοδυναμική Α. Γ. Παπαπαύλου
11) Στοιχεία θερμοδυναμικής Δημητρίου Κουρεμένου
12) Τεχνική Μηχανική Dipl - Ing Dr Techn Hans Hiedl
13) Μηχανική Γεωργίου Γκρος - Λάζαρου Λαζαρίδη
14) Applied Thermodynamics Eastor & Me Conkey
15) Thermodynamics and heat power Granet
16) Engineering Thermo Levelnspiel
17) Elementi di machine a Fluido Giuseppe Dabini
18) Basic Engineering Thermodynamics Rayner Joel
19) Les Machines transformatrices d’ énergie G. Lemasson
20) Εγκυκλοπαίδεια LIFE Ενέργεια

Κωδικός βιβλίου: 0-24-0468
ISBN 978-960-06-4439-5

ΙΤΥΕ
"ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ"
ινστιτουτο
τεχνολογιας
υπολογιστων & εκδοσεων

(01) 000000 0 24 0468 4