ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων

ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ

ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΗΡΙΑ

1ος Κύκλος • Α΄ Τάξη

Α΄ Τεύχος

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟΣ

ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ:

- Αντωνελάκης Ισίδωρος-Μάριος
- Παπαγεωργίου Προκόπης

ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ:

- Ροζάκος Νικόλαος

ΚΡΙΤΕΣ:

- Βλάχος Γεώργιος
- Μπαλουκτσής Αναστάσιος
- Σπυρίδωνος Πέτρος

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ:

- Ηλιοπούλου Αναστασία

ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:

- Σηφάκη Μαρία

ATELIER (παρακολούθηση - συνεργασία):

- Αντωνελάκης Ισίδωρος-Μάριος
- COSMOSWARE

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το βιβλίο αυτό απευθύνεται στους μαθητές και στις μαθήτριες της Α΄ τάξης των Τ.Ε.Ε. του μηχανολογικού τομέα. 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 της 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.

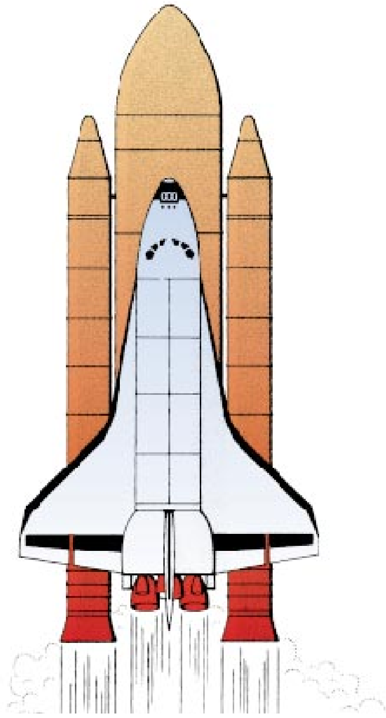
Προσπαθήσαμε να δώσουμε τις βασικές θεωρητικές γνώσεις που είναι απαραίτητες στην κατανόηση άλλων επαγγελματικών μαθημάτων, τα οποία θα ακολουθήσουν στα επόμενα έτη σπουδών (*μηχανολογία αυτοκινήτου, θερμικές και ψυκτικές εγκαταστάσεις και άλλα*), καθώς επίσης και εκείνες τις απαραίτητες γνώσεις για 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

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 πραγματοποιούν αυτές τις μετατροπές.

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 μεγέθη **P, V, T** και ακολουθεί η καύση, όπου αλλάζει η χημική σύσταση 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 υγρό ή ένα αέριο.

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

Επομένως, η θερμοδυναμική είναι η επιστήμη που μελετά τα φυσικά φαινόμενα που υφίσταται η ύλη, τους νόμους που υπακούουν, τις αρχές που τα στηρίζουν και λαμβάνει υπ΄όψη της, τη μεταβολή των μηχανικών, θερμικών και χημικών μεγεθών της ύλης.

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

α. με τη μικροσκοπική μέθοδο και

β. με τη μακροσκοπική

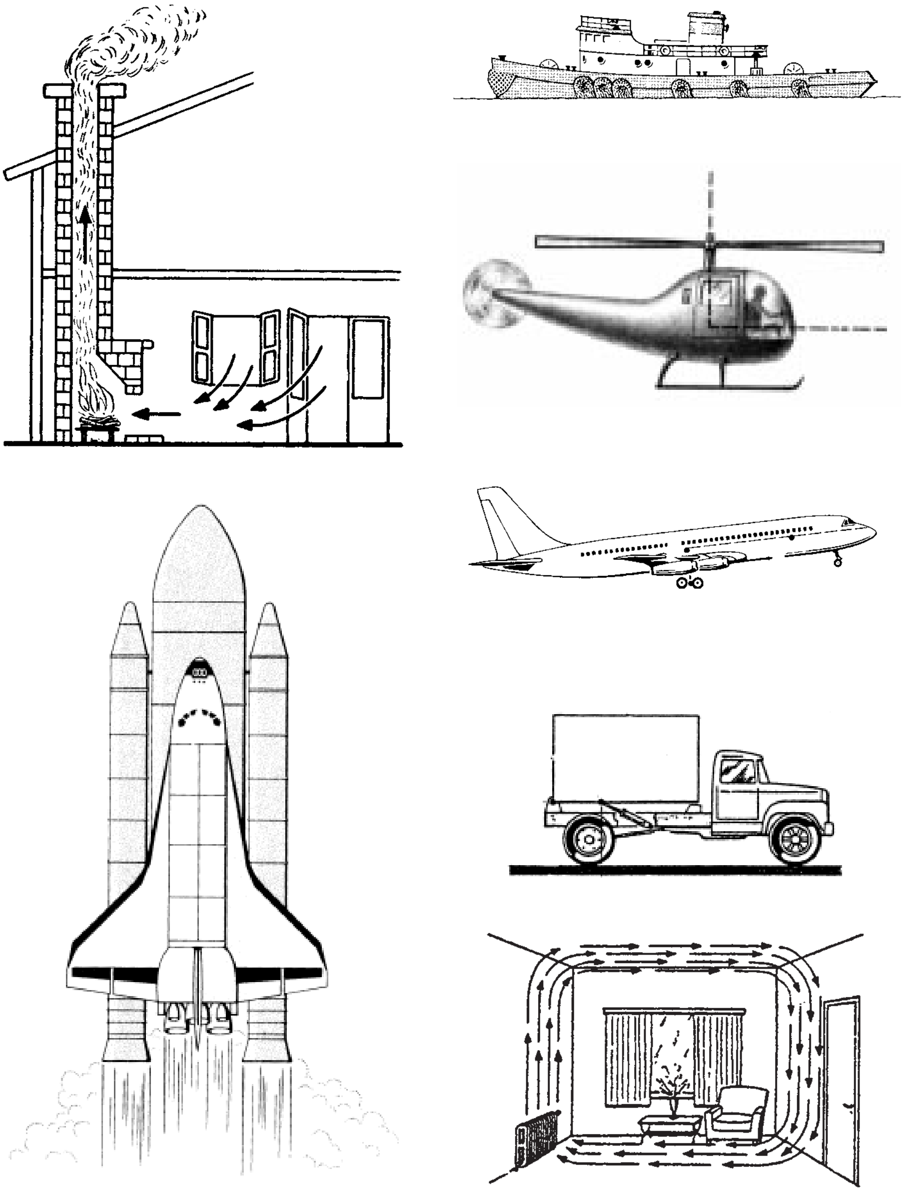
Η **μικροσκοπική μέθοδος** αφορά στη λεπτομερειακή δομή της ύλης, πραγματοποιείται με στατιστικούς τρόπους και ασχολείται με τις εφαρμογές των αρχών της μηχανικής στα άτομα και τα μόρια. Ο τρόπος αυτός της εξέτασης της ύλης ενδιαφέρει κυρίως τους φυσικούς και τους χημικούς και λιγότερο τους τεχνικούς.

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 1.2α *Εφαρμογές 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	T, Θ	n	I_v	φ	Ω
μονάδα	μέτρο	χιλιό-γραμμο	δευτερό-λεπτο	Αμπέρ	Κέλβιν	όλ	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 Pa, είναι πάρα πολύ μικρή, χρησιμοποιείται το **μπαρ** που ορίζεται ως εξής:

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

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 Pa = 1013250 KPa = 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 m^3/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 $\alpha = 1$ m/s^2 έχομε

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

Αυτή τη σύνθετη μονάδα **1 kg · 1 m/s^2** 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	min	1min=60 s
	ώρα	h	1h=60 min
	ημέρα	d	1d=24 h
	έτος	a	1a=365 d
Επίπεδη γωνία	μοίρα	°	1°
	πρώτο λεπτό	'	1'=(1/60)°
	δεύτερο λεπτό	"	1"=(1/60)'
όγκος	λίτρο	ℓ	$1\ell = 1\text{dm}^3 = 1/1000\ \text{m}^3$
μάζα	τόνος	t	$1\text{t} = 10^3$ kg
ενέργεια	ηλεκτρονιοβόλτ	ev	$1\text{e} = 1{,}602\text{x}10^{-9}$ I
πίεση ρευστού	μπαρ	bar	$1\text{bar} = 10^5$ Pα

● Μορφές ενέργειας στα Θερμοδυναμικά συστήματα

Ενέργεια ονομάζουμε την ικανότητα ενός συστήματος να παράγει έργο. Η παρουσία της ενέργειας γίνεται αντιληπτή από τα αποτελέσματά 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:**

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

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:

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

3. **Εσωτερική ενέργεια**

   Όλα τα ρευστά έχουν αποθηκευμένη ενέργεια που οφείλεται στην κίνηση των ατόμων και μορίων τους, δηλ. στη δομή τους.
   Αυτή την ονομάζουμε **εσωτερική ενέργεια**.

4. **Θερμότητα**

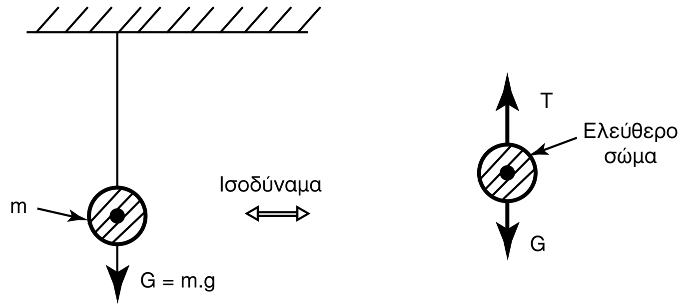
   Θερμότητα είναι ενέργεια σε μεταφορά εξ' αιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας.

5. **Έργο**

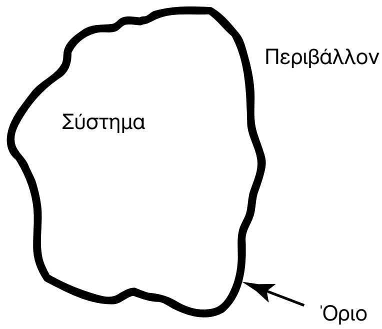
   Έργο είναι ενέργεια σε μεταφορά, όπου η διαφορά θερμοκρασίας δεν εμπλέκεται άμεσα.

1.4. ΣΥΣΤΗΜΑ – ΟΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ –ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Στη Μηχανική, για να γίνει ευκολότερη η μελέτη των προβλημάτων της χρησιμοποιήθηκε 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 Τ 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: *Σύστημα*

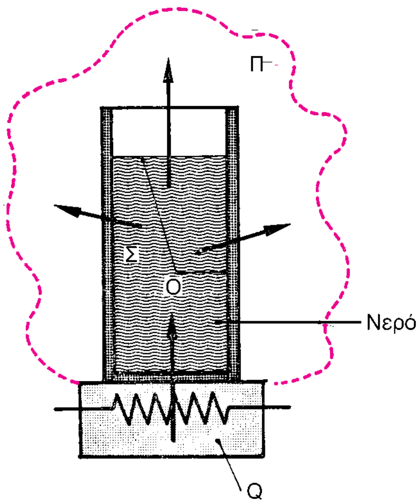
Κατ' αναλογία, **στη Θερμοδυναμική** θα χρησιμοποιήσουμε τον όρο "**σύστημα**". σχ. (1.4.-γ) ***Σύστημα ονομάζεται το σύνολο των φυσικών σωμάτων (στερεά, υγρά, αέρια) πάνω στα οποία εργαζόμαστε για να πετύχουμε ένα συγκεκριμένο σκοπό.***

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.

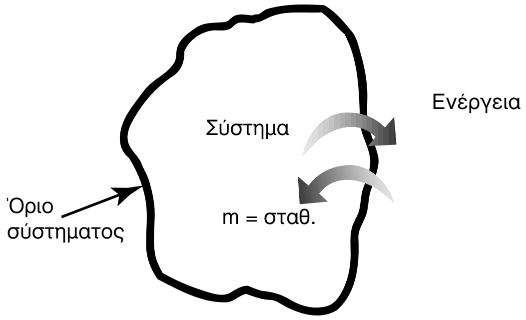
Υπάρχουν δυο κατηγορίες συστημάτων, **τα κλειστά** και τα **ανοικτά συστήματα**, που θα εξετάσουμε στη συνέχεια.



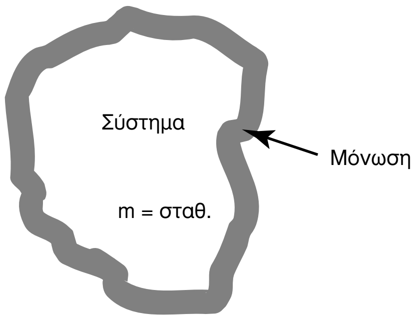
Σχήμα 1.4.δ: *Σύστημα - όριο συστήματος - περιβάλλον*

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*

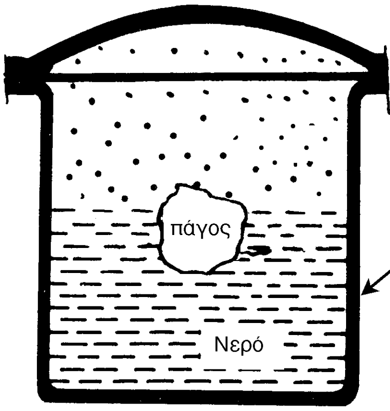


Σχήμα 1.4.1β: *Μονωμένο σύστημα*

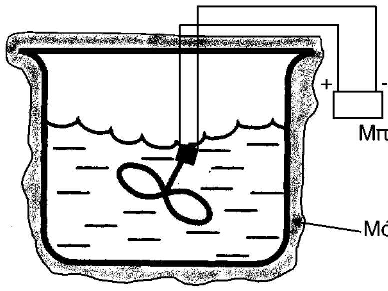
Το **κλειστό σύστημα** στο οποίο δεν υπάρχει **εναλλαγή ενέργειας** με το περιβάλλον, σε οποιαδήποτε μορφή, ονομάζεται **μονωμένο σύστημα**. Για το μονωμένο σύστημα ισχύει η σχέση **Ε = σταθ**., όπου Ε η ολική ενέργεια του συστήματος (σχήμα 1.4.1β και σχήμα 1.4.1γ.)

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.

Αυτά τα συστήματα ονομάζονται **αδιαβατικά** (σχ. 1.4.1δ.)

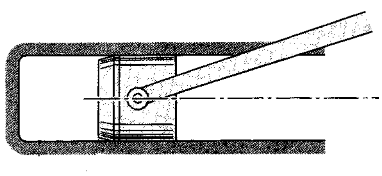


Σχήμα 1.4.1γ: *Θερμός: μονωμένο σύστημα*

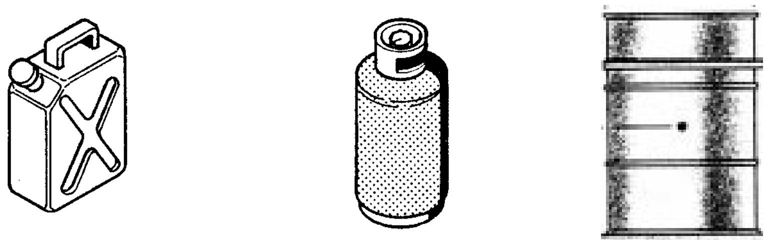


Σχήμα 1.4.1δ: *Αδιαβατικό σύστημα*

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 κλειστά συστήματα.



Σχήμα 1.4.1ε:*διάταξη κυλίνδρου – εμβόλου*

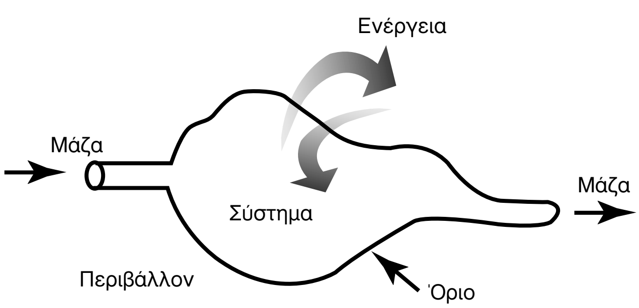


Σχήμα 1.4.1στ.: *Κλειστά συστήματα*

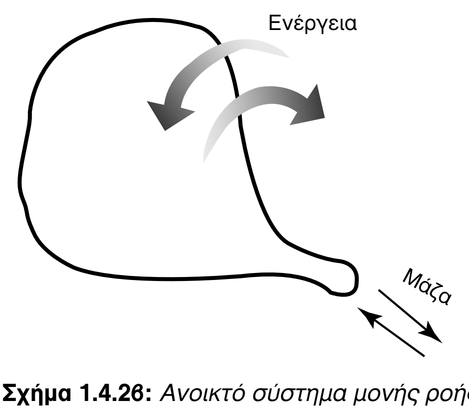
1.4.2. Ανοικτά συστήματα

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*

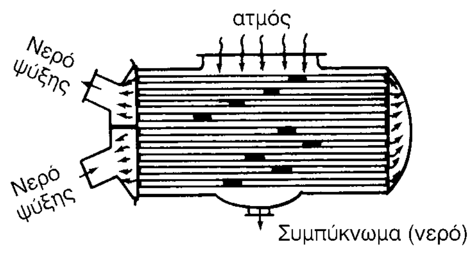


Σχήμα 1.4.2β: *Ανοικτό σύστημα μονής ροής*

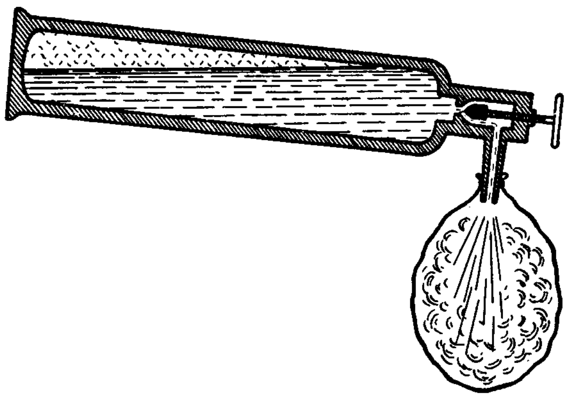
Παράδειγμα ανοικτού συστήματος διπλής ροής αποτελεί ο εναλλάκτης θερμότητας, πρόκειται για ένα ψυγείο (σχ. 1.4.2γ), του οποίου τα σταθερά όρια, δηλ. το περίβλημά του, επιτρέπουν μια σταθερή ροή μάζας μεταξύ του συστήματος και του περιβάλλοντός του. Επειδή τα όρια του συστήματος είναι σταθερά, θα είναι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



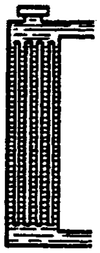
Σχήμα 1.4.2γ: *Ψυγείο ατμού ανοικτό σύστημα διπλής ροής*



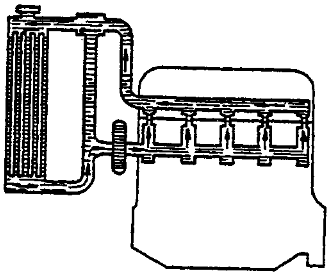
Σχήμα 1.4.2δ: *Εκτόνωση αερίου ανοικτό σύστημα μονής ροής*

Ένα 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).



Σχήμα 1.4.2ε: *Ψυγείο νερού ενός κινητήρα αυτοκινήτου*



Σχήμα 1.4.2στ: *Κινητήρας αυτοκινήτου*

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 και ίση με αυτή του περιβάλλοντος.

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

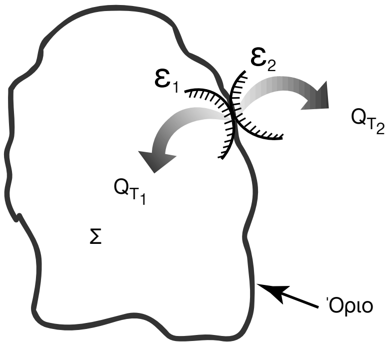
γ) **Χημική ισορροπία:** Η εσωτερική δομή και η χημική σύσταση παραμένουν σταθερά.

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

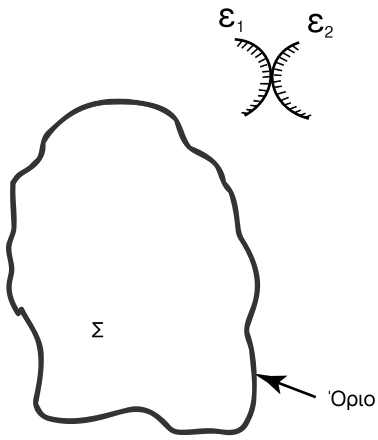
1.6. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

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**.

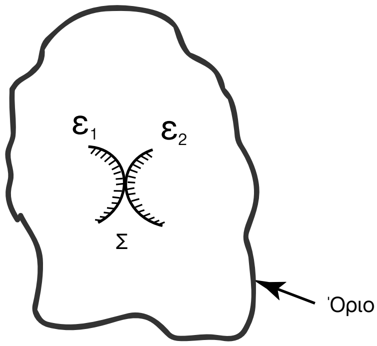
Έστω ότι έχουμε δύο επιφάνειες στερεών σωμάτων ε_1 και ε_2 σε επαφή, που βρίσκονται σε σχετική κίνηση μεταξύ τους (σχήμα 1.6.α,β,γ.) όπως



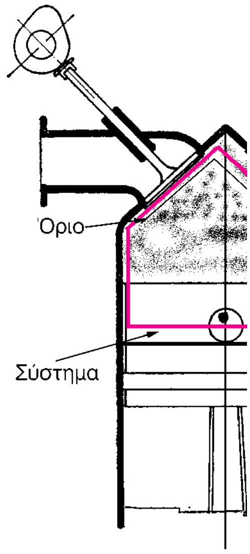
Σχήμα 1.6α: *Λανθασμένη επιλογή συστήματος.*



Σχήμα 1.6β: *Σωστή επιλογή συστήματος.*

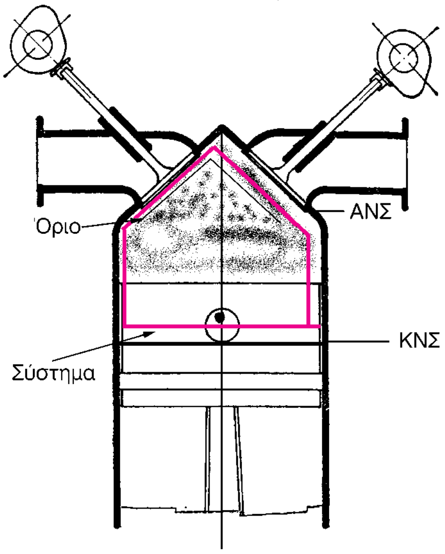


Σχήμα 1.6γ: *Σωστή επιλογή συστήματος.*

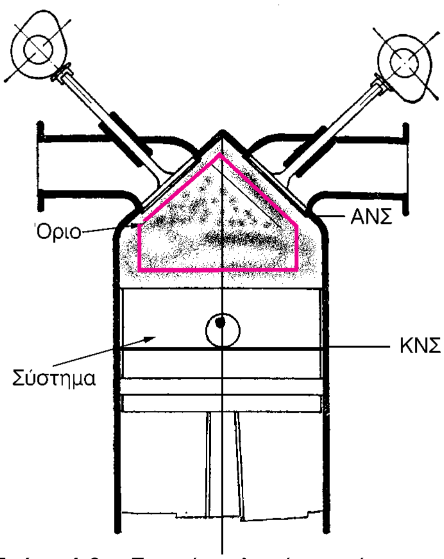


Όπως γνωρίζουμε από τη Μηχανική, θα αναπτυχθεί τριβή και επομένως θερμότητα. Το ποσό της θερμότητας που παράγεται από την τριβή είναι γνωστό ότι μπορεί να υπολογιστεί. Παρατηρώντας το σχήμα 1.6α, διαπιστώνουμε ότι ένα μέρος της παραγόμενης θερμότητας από την τριβή, μπαίνει στο σύστημα και ένα άλλο μέρος μπαίνει στο εξωτερικό μέρος του συστήματος. Όμως δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν τα μεγέθη Q_{T_1} και Q_{T_2} 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 στον κύλινδρο μεταξύ του Άνω Νεκρού Σημείου (Α.Ν.Σ.) και του Κάτω Νεκρού Σημείου (Κ.Ν.Σ.) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6δ. **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 θερμοδυναμικού 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.*

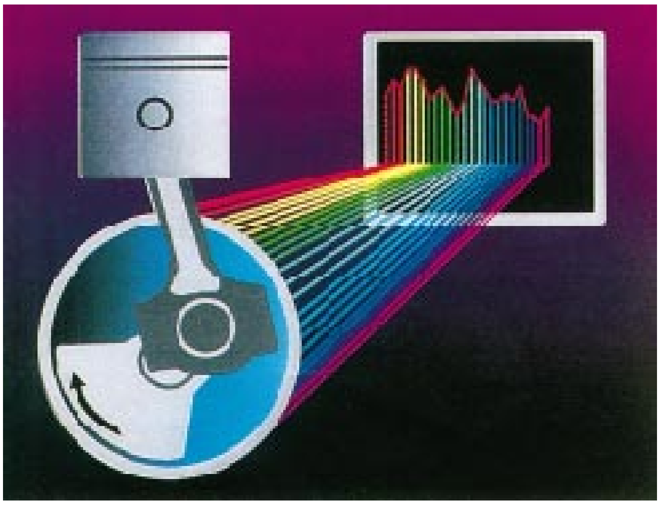


Σχήμα 1.6ε: *Σωστή επιλογή συστήματος.*

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

2.6 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 θερμοδυναμικό 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 **γνωρίζετε** την καταστατική εξίσωση των αερίων.
- Να **ορίζετε** τις έννοιες: τέλειο αέριο, ιδεώδες, σχεδόν ιδεώδες, πραγματικό.

2.1. ΕΠΙΛΥΣΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Για την **επίλυση των θερμοδυναμικών προβλημάτων**, 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** διακρίνονται 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 :

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

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 Τ**.

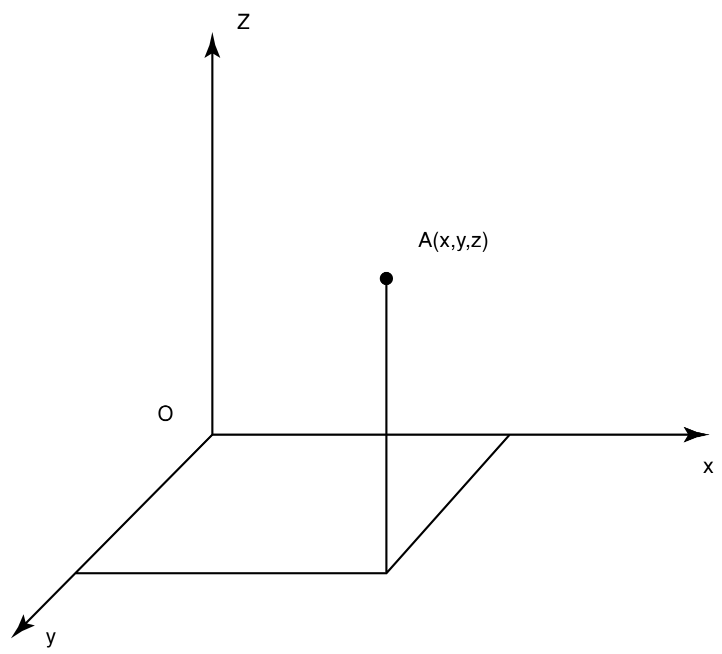
Σημειώνουμε ότι ο αριθμός των κεντρικών παραμέτρων, που αναφέραμε και πιο πάνω, είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος δίχως να αποκλείεται να είναι περισσότερες.

2.3. ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΕΠΙΛΕΓΕΝΤΟΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

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

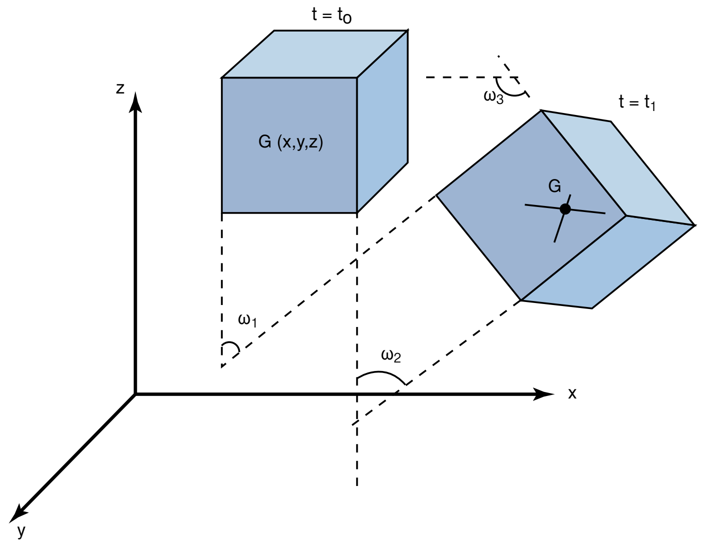
Είναι γνωστό ότι, καθορίζοντας ένα σύστημα αναφοράς **O(x, y, z)**, πρέπει να γνωρίζουμε τη θέση του επιλεγέντος συστήματος ως προς αυτό το σύστημα αναφοράς.

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



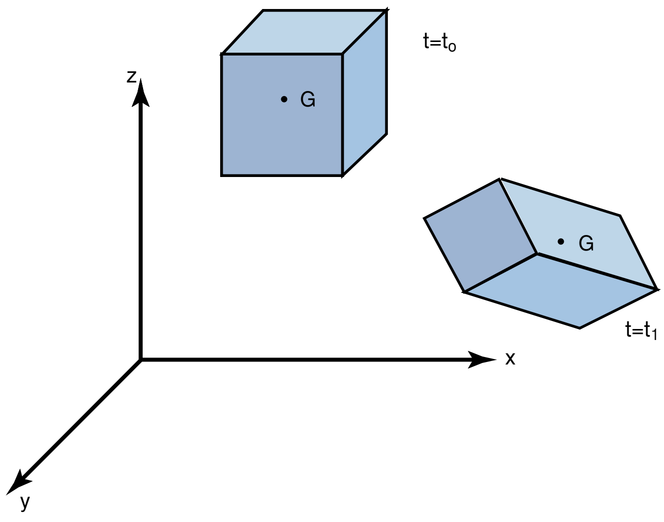
Σχήμα 2.3α. *Η θέση του συστήματος A (υλικό σημείο) προσδιορίζεται από τις παραμέτρους x,y,z.*

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 ω1, ω2, ω3, όπως φαίνονται στο (σχ. 2.3.β.).



Σχήμα 2.36. *Η θέση του συστήματος (κύβος) προσδιορίζεται από τις παραμέτρους x, 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).

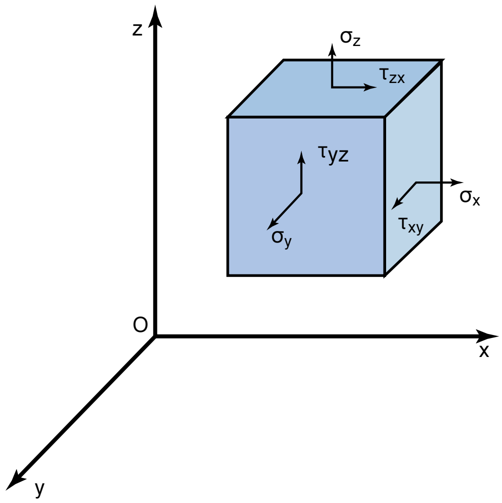
Αντίθετα, για την περίπτωση των αερίων ρευστών η ανάγκη προσδιορισμού της θέσης προκύπτει όχι από τη θέση, αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα, την ορμή, την κινητική ενέργεια του ρευστού.

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 μέθοδοι** επίλυσης θερμοδυναμικών προβλημάτων που όμως οδηγούν στα **ίδια αποτελέσματα**, με τη διαφορά ότι, πολλές φορές, οι χρόνοι που απαιτούνται για την επίλυση είναι διαφορετικοί.

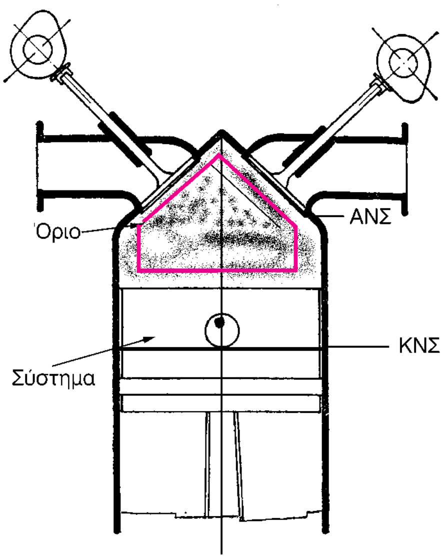
Υπάρχουν περιπτώσεις που προτιμάται ο ένας ή ο άλλος τρόπος επίλυσης η καμιά φορά και οι δύο μαζί.

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 $m_α$. 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.

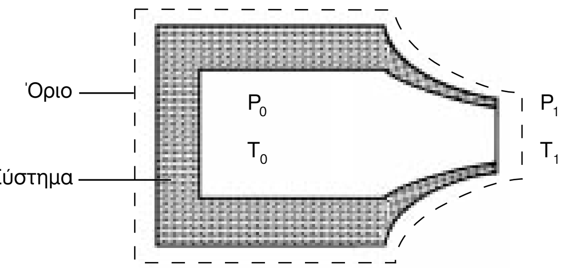


Σχήμα 2.5α. *Εκτόνωση σε παλινδρομικό κινητήρα εσωτερικής καύσης.*

❑ 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.

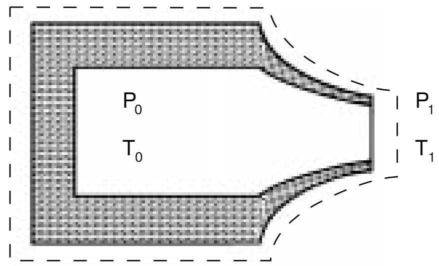


Σχήμα 2.5.6. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 2.2.*

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.3

Δίνεται το ακροφύσιο του σχήματος 2.5γ. Δίνονται οι συνθήκες της δεξαμενής Ρο, Το, 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**.

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

όπου: P η πίεση,
v ο ειδικός όγκος,
T η 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 :

$$\mathbf{R = \frac{Ra}{m}}$$

όπου: Ra η παγκόσμια σταθερά των αερίων,
m μοριακή μάζα του αερίου για το οποίο γράφεται η καταστατική εξίσωση του αερίου.

$$\mathbf{Ra = 8{,}3143\ KJ/kgmolK}$$

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 :

$$\mathbf{m \cdot P \cdot V = z \cdot RT}$$

όπου: m η μοριακή μάζα

R η παγκόσμια σταθερά των αερίων

z συντελεστής συμπιεστικότητας του αερίου ρευστού.

V ο ειδικός όγκος

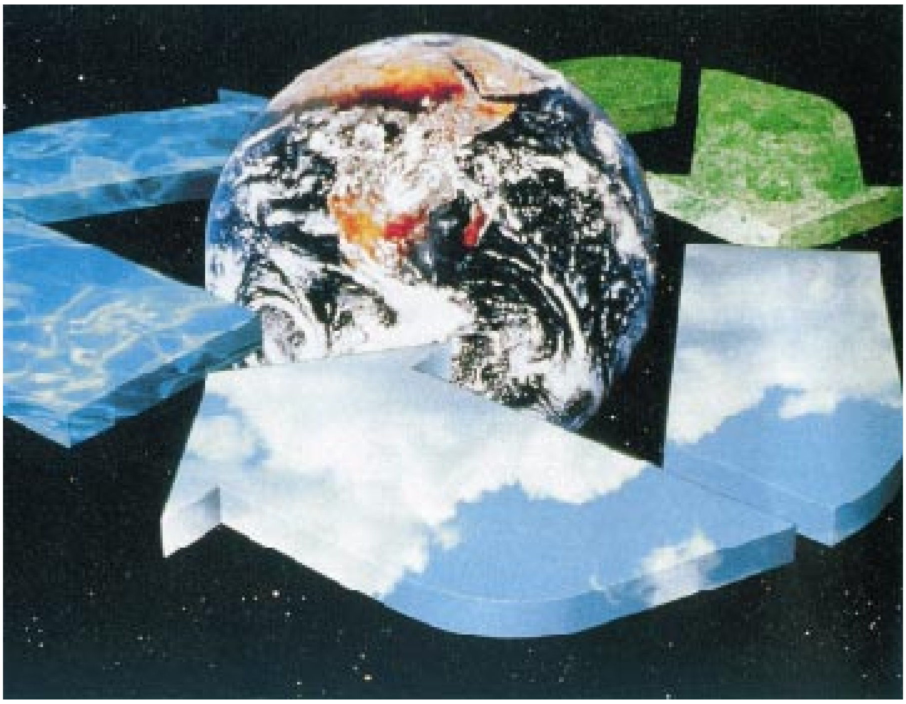
ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 2ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- 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

3.7 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:

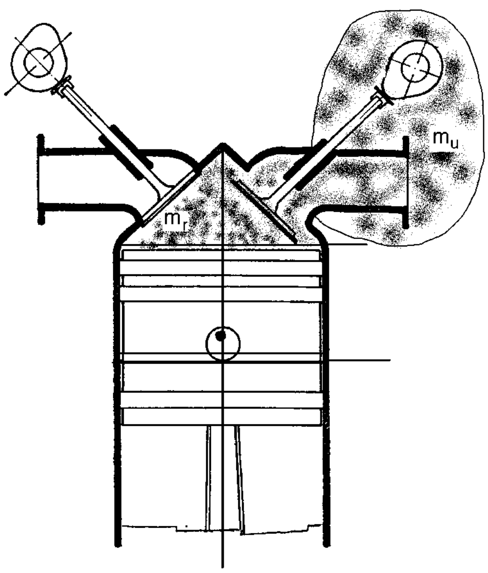
Παρατηρώντας το σχήμα 3.1α μπορούμε να γράψουμε την αρχή διατήρησης της ύλης:

$$\boxed{m_g = m_r + m_u} \qquad (3.1α)$$

όπου: $\mathbf{m_g}$ η μάζα στην αρχή της φάσης της βεβιασμένης εξαγωγής (έμβολο στο Κ.Ν.Σ.).

$\mathbf{m_r}$ το ποσό της μάζας εντός του κυλίνδρου στην τυχαία θέση αυτού.

$\mathbf{m_u}$ η μάζα που έχει βγει μέχρι εκείνη τη στιγμή έξω από τον κύλινδρο.



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. Γι' 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:

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

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

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

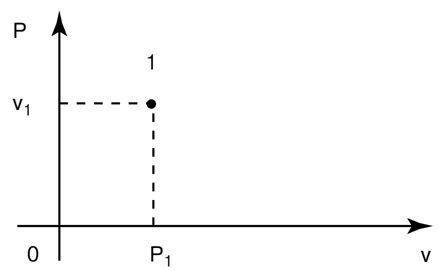
Σύμφωνα με όσα αναφέραμε σε προηγούμενη παράγραφο, για να ορίσουμε τη **θερμοδυναμική κατάσταση της ύλης**, χρειαζόμαστε **δύο παραμέτρους**, που από εδώ και στο εξής θα ονομάζουμε καταστατικά μεγέθη.

Επομένως, μπορούμε να απεικονίσουμε γραφικά τη Θερμοδυναμική κατάσταση του συστήματος σε ένα καρτεσιανό διάγραμμα, που έχει άξονες τα δύο καταστατικά μεγέθη, με ένα σημείο.

Έστω ότι γνωρίζουμε τις τιμές P_1, v_1 πιέσεως και ειδικού όγκου του συστήματος στην 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. 3.4α)

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

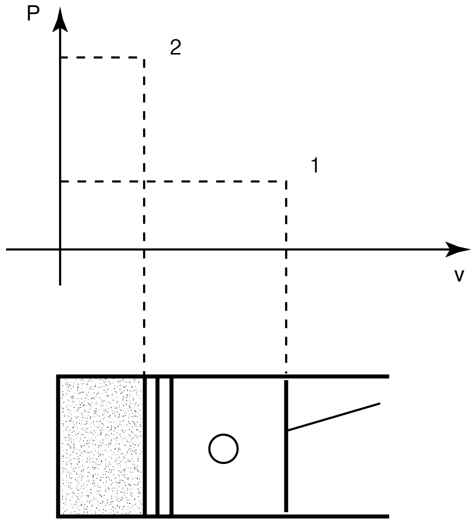


Σχήμα 3.4.α. *Καταστατικό διάγραμμα (P-v).*

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).*

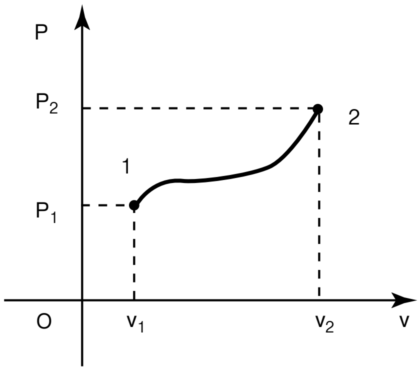
Τα σημεία 1 και 2 απεικονίζουν στο διάγραμμα (P-v) τις παραπάνω καταστάσεις του αέρα.

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 ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ Η ΜΕΤΑΒΟΛΗ

Παρατηρούμε στο παρακάτω σχήμα 3.5α ένα Θερμοδυναμικό σύστημα στην κατάσταση ισορροπίας 1 που χαρακτηρίζεται από τις τιμές P_1, v_1, T_1.

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. *Διεργασία ή 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 P_2, v_2, T_2.

Μεταβολή ή **διεργασία** 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 διεργασία ή 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 διεργασία, 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.

$$m = 1, \quad (Pv = RT).$$

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

$$m = 0, \quad P = \text{σταθερό}.$$

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

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

3. Ισοεντροπική μεταβολή: Δεν υπάρχει εναλλαγή θερμικής ενέργειας του συστήματος με το περιβάλλον του, κατά τη διάρκεια της μεταβολής.

4. Πολυτροπική μεταβολή:

$$m = m.$$

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

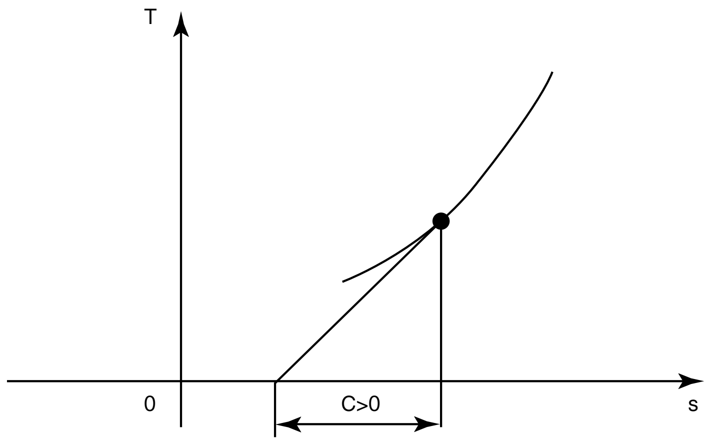
$$\boxed{\mathbf{T \cdot \Delta S = C \cdot \Delta T}} \qquad (3.6\alpha)$$

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 α-ντίστοιχα.

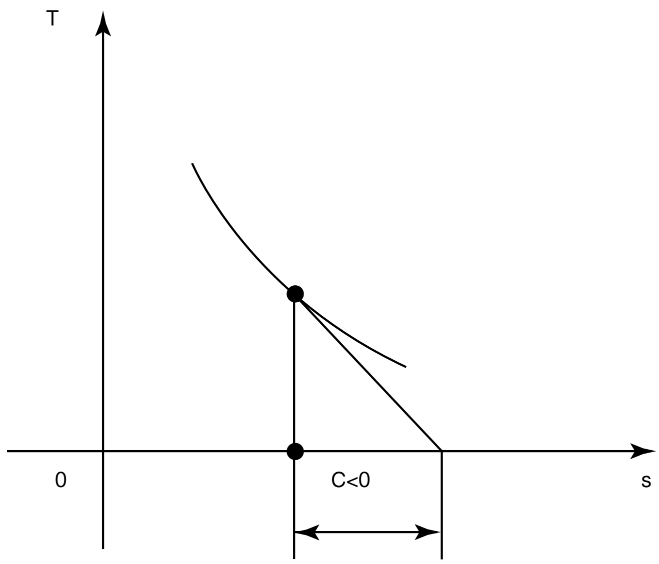
T: είναι η θερμοκρασία.

ΔT: είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας.

ΔS: 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 $C_P > C_V$ *

Για την ισόθερμη μεταβολή έχουμε: $C = \pm\infty$

Για την ισόχωρη μεταβολή έχουμε: $C = C_V$

Για την ισοβαρή μεταβολή έχουμε: $C = C_P$

Για την ισοεντροπική μεταβολή έχουμε: C = 0

Για την πολυτροπική μεταβολή έχουμε: C = C

Η ανάλυση των θερμοδυναμικών μεταβολών θα πραγματοποιηθεί στο τέταρτο κεφάλαιο.

Παρατήρηση*

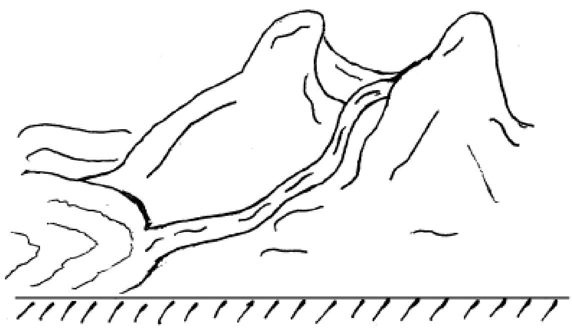
Εάν πραγματοποιήσουμε μια μεταβολή με σταθερό όγκο και μια με σταθερή πίεση σε μια διάταξη κυλίνδρου – εμβόλου που τα όρια μεταβολής της θερμοκρασίας είναι τα ίδια, τότε $C_P > C_V$. Η θερμότητα που προστίθεται ή αφαιρείται, κατά τη διάρκεια της μεταβολής με σταθερή πίεση, είναι μεγαλύτερη από τη θερμότητα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

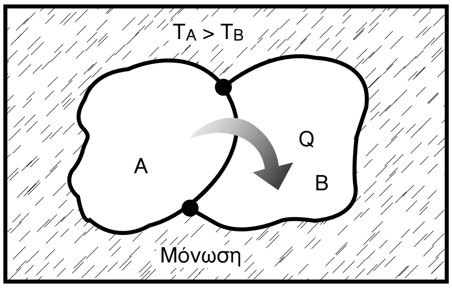
3.7 Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

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).



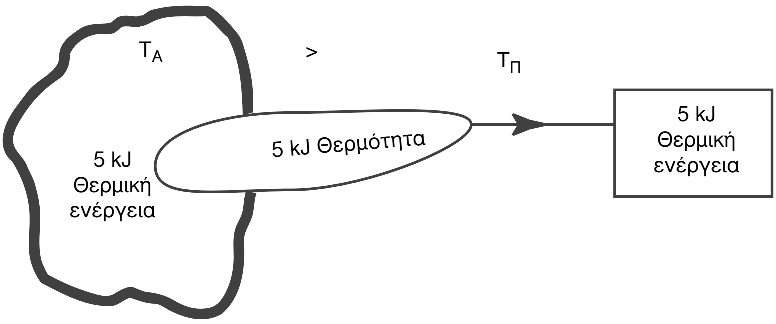
Σχήμα 3.7.α. *Αιτία της ροής των ρευστών είναι η υψομετρική διαφορά. Αιτία της ροής θερμότητας είναι η διαφορά θερμοκρασίας.*



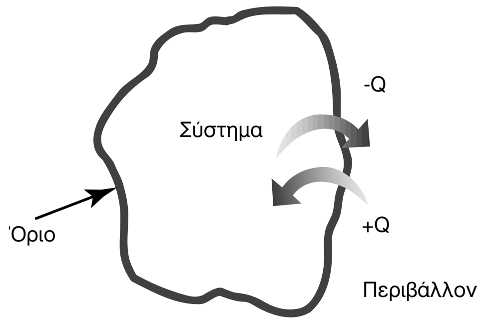
Σχήμα 3.7.6. *Θερμότητα ρέει από την υψηλή θερμοκρασία στη χαμηλή και ποτέ αντίστροφα.*

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** .

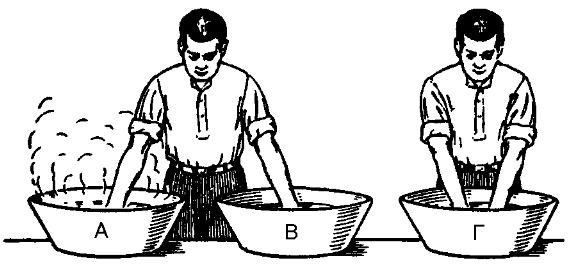
Μια μονάδα θερμότητας, που δεν ανήκει στο SI και που τη συναντάμε συχνά σε βιβλία που εκδόθηκαν πριν από την καθιέρωση του SI, είναι η Κιλοκαλορί (Kcal), που αντιπροσωπεύει την ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται, για να ανυψωθεί η θερμοκρασία 1kg καθαρού νερού 14,5°C σε 15,5 °C. Μεταξύ Kcal και Kj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

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

Επίσης, συναντάμε συχνά σε βιβλία τη μονάδα θερμότητας 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.

Έτσι, 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 :

$$\boxed{\frac{°C}{5} = \frac{°F - 32}{9}} \qquad (3.7α)$$

- **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 :

$$\boxed{\mathbf{T = t° + 237°}} \qquad (3.7β)$$

❑ 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 :

$$\frac{°C}{5} = \frac{°F - 32}{9}$$

και βάζοντας °C = °F θα έχουμε :

$$\frac{°C}{5} = \frac{°C - 32}{9}$$

$9°\ C = 5\ (°\ C - 32)$

$9°\ C = 5°\ C - 160$

$4°\ C + 5°\ C = 5°\ C - 160$

$4°\ C = -\ 160$

$°C = -\ 40$

$$\boxed{°C = °F = -40}$$

Επομένως, και η κλίμακα Κέλσιους και η κλίμακα Φαρενάιτ δείχνουν την ίδια θερμοκρασία στους - °40.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.2

Προσδιορίστε τους βαθμούς στην κλίμακα Φαρενάιτ που αντιστοιχούν στη θερμοκρασία 50 °C.

Λύση

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

$$\frac{°C}{5} = \frac{°F - 32}{9}$$

$9° C = 5 (°F - 32)$

$9° C = 5° F - 160$

$9° C + 160 = 5° F$

$$°F = \frac{9°C + 160}{5}$$

αντικαθιστούμε και έχουμε :

$$°F = \frac{9 \cdot 50 + 160}{5}$$

$$°F = \frac{160}{5}$$

$$\boxed{°F = 122}$$

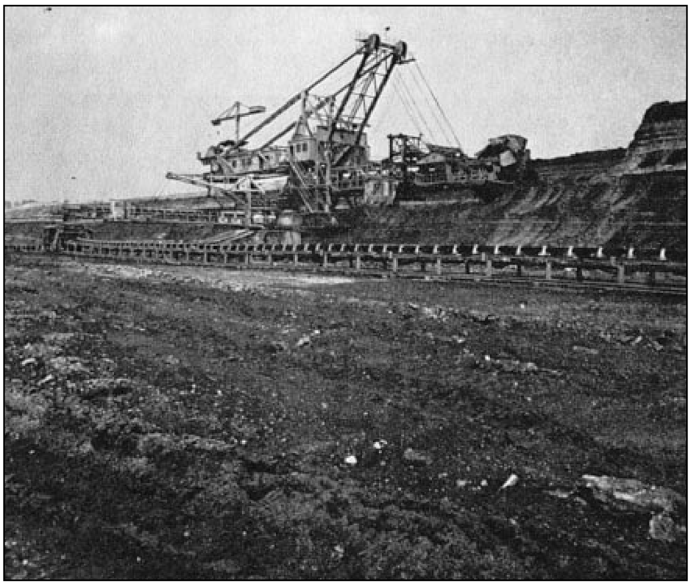
Επομένως, στους 50° C αντιστοιχούν 122° F.

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.



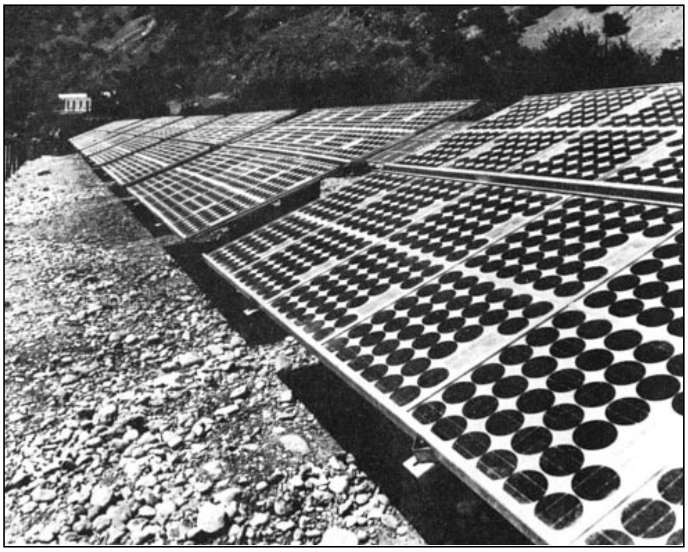
Σχήμα 3.8α. *Μηχανικός εκσκαφέας με καδοφόρο τροχό, ενώ εξορύσσει λιγνίτη στο λιγνιτωρυχείο Πτολεμαΐδας.* ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

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**.

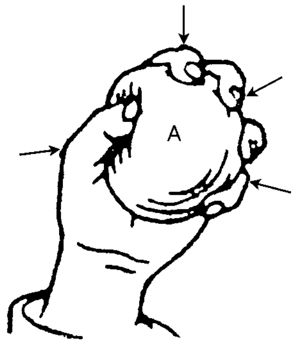
- Τα στοιχειώδη αυτά σωματίδια της ύλης **κινούνται, περιστρέφονται, ταλαντεύονται, έλκονται, απωθούνται**.

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

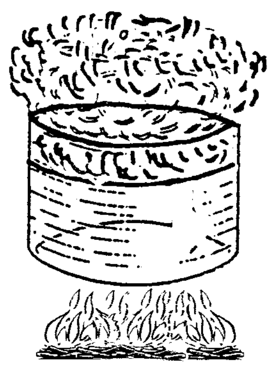
- Περιέχει **κινητική ενέργεια** που οφείλεται στην **κίνησή τους**.

- 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**.

Η ενθαλπία ορίζεται από τη σχέση :

$$\boxed{H = U + pV} \qquad (3.10α)$$

Η ειδική ενθαλπία h θα εκφράζεται με 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.

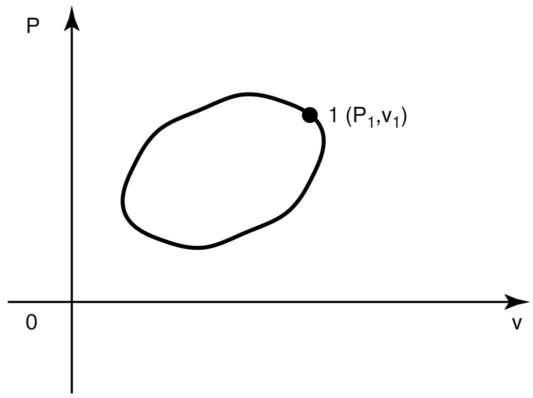
Είναι ένα μέγεθος πολύ χρήσιμο στη θερμοδυναμική και βρίσκει εφαρμογή στην αντιμετώπιση των προβλημάτων του ατμού, του νερού, του αέρα, των ψυκτικών μέσων και των εφαρμογών τους στα ανοικτά συστήματα.

3.11 ΚΥΚΛΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ - ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

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

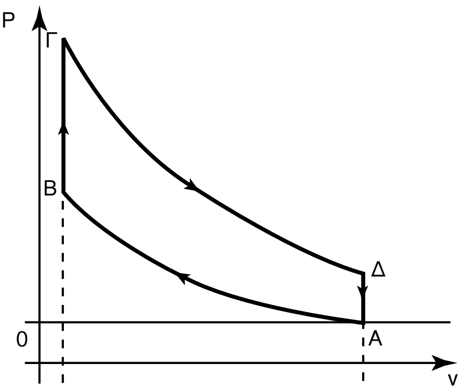
Μια τέτοια διεργασία είναι αυτή που απεικονίζεται στο σχήμα 3.11α, η οποία ξεκινάει από την αρχική κατάσταση 1 (P_1, v_1, T_1), εξελίσσεται και πραγματοποιείται με μια σειρά διαδοχικών καταστάσεων και επαναφέρει τελικά το σύστημα στην αρχική του κατάσταση 1 (P_1, v_1, T_1), στις ίδιες, δηλαδή τιμές πίεσης,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

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

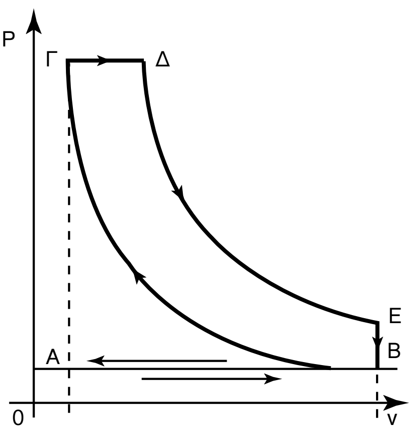


Σχήμα 3.11.α. *Κυκλική διεργασία ή μεταβολή.*

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

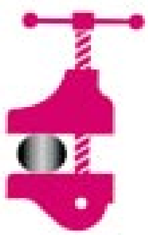


Σχήμα 3.11.6. *Θεωρητικός θερμοδυναμικος κύκλος βενζινομηχανής.*



Σχήμα 3.11.γ. *Θεωρητικός θερμοδυναμικός κύκλος πετρελαιομηχανής.*

Στην πραγματικότητα δεν είναι ένας θερμοδυναμικός 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 διεργασία ή 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 ζεστού-κρύου** 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

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΕΛΕΙΩΝ ΑΕΡΙΩΝ

4.7 Οι μεταβολές στο διάγραμμα (P - v)

4.8 Οι μεταβολές στο διάγραμμα (T - s)

4.9 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 τις παραμέτρους 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.

4.1. 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, πολυτροπική. 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 ΔT που υφίσταται το σύστημα ως συνέπεια της εναλλαγής θερμότητας ΔQ.**

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

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

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

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 C_p και C_v 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:

$$C_p - C_v = R$$

$$\frac{C_p}{C_v} = K$$

Από την πρώτη (σχέση του Mayer) παρατηρούμε ότι, επειδή R είναι ποσότητα θετική, Cp είναι πάντα μεγαλύτερη της 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 $Q_{1,2} = U_2 - U_1$ και

$$C_{pm} = \frac{Q_{1,2}}{T_2 - T_1} = \frac{U_2 - U_1}{T_2 - T_1}$$

όπου: C_{pm} 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:

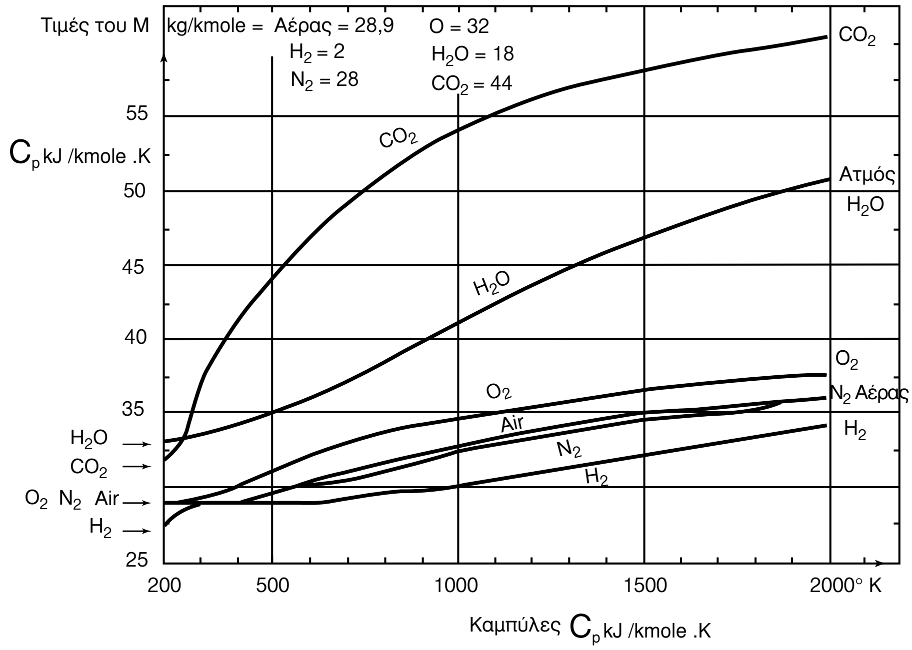
$$U_2 - U_1 = C_v\,(T_2 - T_1)$$

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

Από τον πίνακα 4.1* για το O_2 έχουμε:

* Ο πίνακας 4.1 μας δίνει τις μεταβολές της ειδικής θερμότητας με σταθερή πίεση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για τα πιο ενδιαφέροντα αέρια.

Πίνακας 4.1 Ειδική θερμότητα



C_p στους 773 K = 33,4 kJ/kmole K

C_p στους 1073 K = 35 kJ/kmole K

M_{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

$$C_p - C_v = R \text{ το R για το } O_2 \text{ είναι 260 J/kg K}$$

και

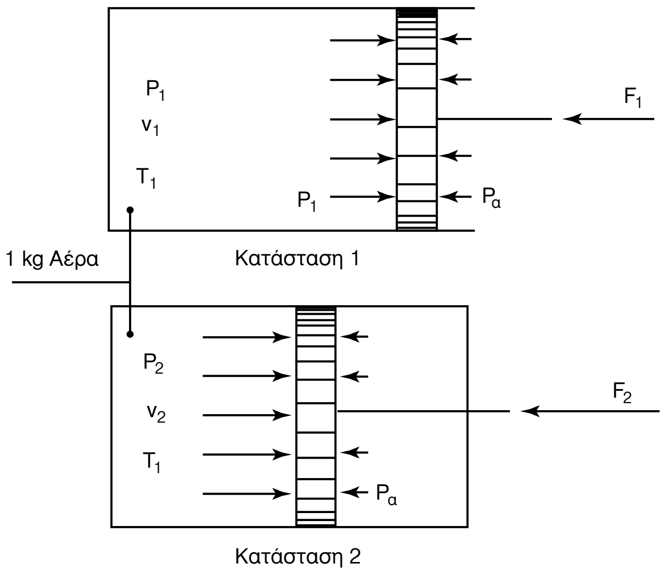
$$C_v = 1{,}07 - 0{,}26 = 0{,}81 \text{ x } 300 = 243 \text{ kJ / kg}$$

Τελικά: $$U_2 - U_1 = 0{,}81 \text{ x } 300 = 243 \text{ kJ / kg}$$

4.2 ΙΣΟΘΕΡΜΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

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

Έστω μια διάταξη κυλίνδρου εμβόλου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2α, όπου πραγματοποιούμε μια ισόθερμη μεταβολή από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2.



Σχήμα 4.2α *Διάταξη κυλίνδρου εμβόλου*

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

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

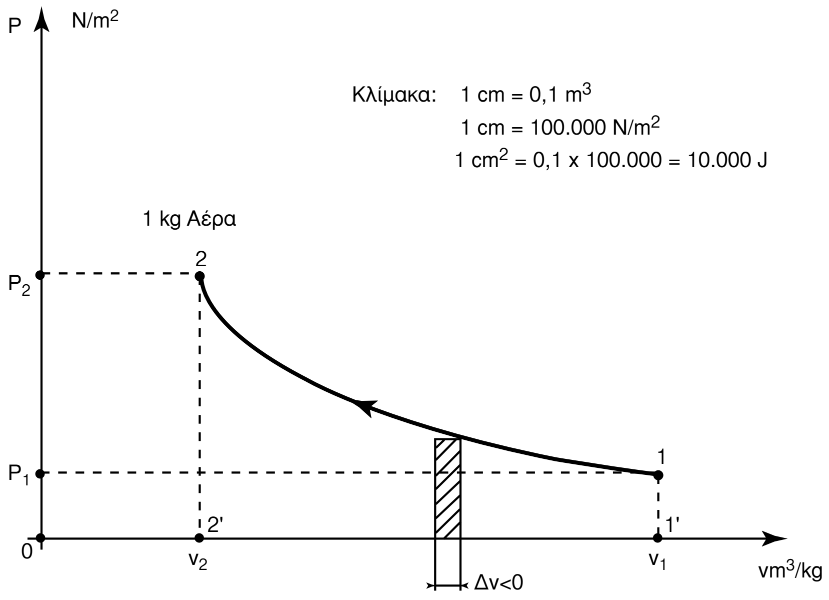
Από τις δύο εξισώσεις λαμβάνοντας υπόψη ότι $T_1 = T_2$ έχουμε:

$$p_1v_1 = p_2v_2 = \text{σταθ.}$$

και

$$\boxed{p \cdot v = \text{σταθ}}$$

Η σχέση αυτή εκφράζει την εξίσωση της ισόθερμης μεταβολής. Στο διάγραμμα (P – v) απεικονίζεται με το ένα σκέλος μιας ισοσκελούς υπερβολής (σχ. 4.2β).



Σχήμα 4.26 *Ισόθερμη μεταβολή*

Η εναλλαγή έργου

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

$$\Delta W = -\, p\, \Delta v \qquad\qquad \Delta v < 0$$

επειδή μειώνεται ο όγκος του συστήματος και επομένως $\Delta W > 0$. Επίσης, παρατηρούμε στο σχήμα 4.2β ότι, για πολύ μικρά Δv μπορούμε να θεωρήσουμε την πίεση σταθερή και επομένως το γινόμενο $p \cdot \Delta v$ 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 παραλληλόγραμμα που αντιπροσωπεύουν τα στοιχειώδη έργα, και να πούμε ότι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη είναι το άθροισμα όλων των στοιχειωδών 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:

$$\boxed{\left(W_{1,2}\right)_T = R\,T_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = R\,T_1 \ln \frac{P_1}{P_2}}$$

Υπενθυμίζεται ότι lnx = 2,3 log10x

Μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας $U_2 - U_1$

Γνωρίζουμε ότι:

$$U_2 - U_1 = C_v\,(T_2 - T_1)$$

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

$$\boxed{U_2 - U_1 = 0}$$

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 κατά Lagrange (κλειστά συστήματα) έχουμε:

$$(Q + W)_{12} = U_2 - U_1$$

όπου: $U_2 - U_1 = 0$

οπότε

$$\boxed{Q_{12} = -\,W_{12}}$$

Από τη σχέση $Q_{12} = -\,W_{12}$ 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 4.2α και 4.2β) Ισόθερμη συμπίεση 1 kg αέρα

Κατάσταση 1: $p_1 = 10\ N/m^2$

$v_1 =\ ;$

$T_1 = 323°\ K$

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

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

Κατάσταση 2: $P_2 = 40\ N/m^2$

$v_2 =\ ;$

$T_2 = T_1 = 323°\ K$

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

Η **εξίσωση** της καμπύλης είναι:

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

Η καμπύλη είναι μια ισοσκελής υπερβολή σχήμα 4.2β.

Το **έργο** υπολογίζεται με τη σχέση:

$$W_{12} = R\ T_1 \log \frac{v_2}{v_1}$$

ή μετρώντας το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη

$W_{12} =$ εμβαδόν $(1'122') = 12{,}8\ cm^2$

$W_{12} = 12{,}8 \times 10.000 = 128.000\ J/kg$

Η **θερμότητα** υπολογίζεται από τη σχέση:

$Q_{12} = -W_{12}$ αλλά $W_{12} = 128.000\ J/kg$

$Q_{12} = 128.000\ J/kg.$

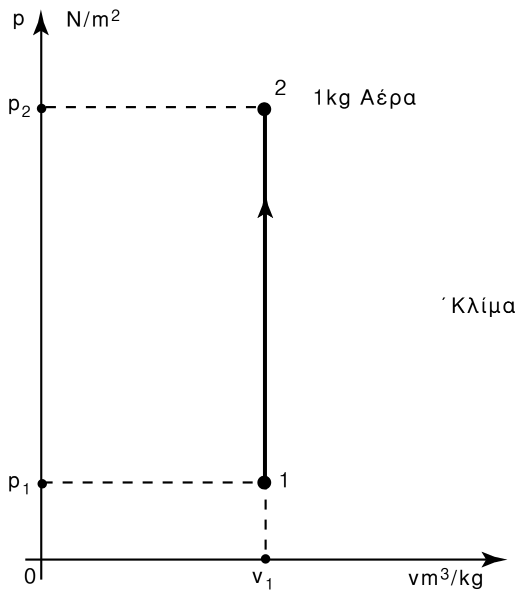
4.3 ΙΣΟΧΩΡΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

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:

$$\boxed{v = \text{σταθ}}$$

Στο διάγραμμα (P – v) η μεταβολή απεικονίζεται με ένα ευθύγραμμο τμήμα 12 παράλληλο στον άξονα P (σχήμα 4.3α)



Σχήμα 4.3α *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: $p_1, v_1, T_1, \quad p_1 v_1 = RT_1$

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

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 4.3α)

Κατάσταση 1: $p_1 = 100\ N/cm^2$ ή $100 \times 10^4\ N/m^2$

$v_1 = ;$

$T_1 = 500\ K$ ή $227°\ C$

Από την εξίσωση: $p \cdot v = RT$

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

Κατάσταση 2: $T_2 = 2.500\ K$

$V_2 = V_1 = 0{,}143\ m^3/kg$

$p_2 = ;$

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

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

Έργο

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

$$W = -\,p\Delta v$$

και επειδή $\Delta v = 0$ θα έχουμε:

$$W_{12} = 0$$

Μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας

Γνωρίζουμε ότι:

$$U_2 - U_1 = Cv\,(T_2 - T_1)$$

$$T_2 - T_1 = 2.500 - 500 = 2.000°\ K$$

Υπολογίζουμε Cp: Από το σχετικό πίνακα 4.1 για τον αέρα. Θα έχουμε:

$$C_{pm} = 1{,}21 \ \text{kJ/kg °K}$$

όπου: C_{pm} μέση τιμή.

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

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

Επομένως:

$$U_2 - U_1 = 0{,}923 \times 2.000 = 1846 \ \text{kJ/kg}$$

Θερμότητα

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

$$(Q + W)_{12} = U_2 - U_1$$

και επειδή $W_{12} = 0$ προκύπτει:

$$Q_{12} = U_2 - U_1 = 1846 \ \text{kJ/kg}$$

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.

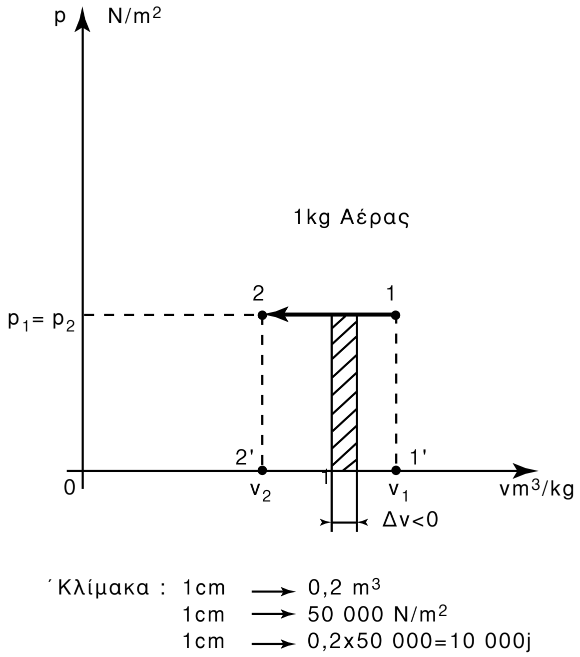
4.4 ΙΣΟΒΑΡΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

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

Η εξίσωση της μεταβολής εκφράζεται με τη σχέση:

$$\boxed{p = \text{σταθ}}$$

Στο διάγραμμα (P – v) η μεταβολή απεικονίζεται με ένα ευθύγραμμο τμήμα παράλληλο στον άξονα v. (σχ. 4.4α)



Σχήμα 4.4α *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: $v_1 = \dfrac{R\,T_1}{p_1} = \dfrac{287 \times 300}{101\,300} = 0{,}855$ 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: $T_2 = T_1 \dfrac{v_2}{v_1} = 300 \times \dfrac{0{,}5}{0{,}855} = 175$ K

Έργο

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

$$\Delta W = -\,p \cdot \Delta v$$

και επειδή $\Delta v < 0$ $\Delta W > 0$ το σύστημα δέχεται έργο από το περιβάλλον του.

Το έργο $W_{12} =$ εμβαδόν (1΄122΄) = 3,60 cm^2.

$$W_{12} = 3{,}60 \text{ x } 10.000 = 36.000 \text{ J/kg}$$

Το έργο μπορούμε να το υπολογίσουμε και ως εξής:

$W_{12} = \Sigma\,(-\,p\Delta v)$ και επειδή p = σταθερό

$W_{12} = -\,p\Sigma\Delta v$ αλλά $\Sigma\Delta v = V_2 - V_1$

Τελικά

$$W_{12} = -\,p\,(V_2 - V_1)$$

$$W_{12} = -\,101300\,(0{,}5 - 0{,}855) = 36.000 \text{ J/kg}$$

Μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας

Γνωρίζουμε ότι:

$$U_2 - U_1 = Cv\,(T_2 - T_1)$$

όπου $C_p = 0{,}71$ kJ/kgk

τιμή του C_v για τον αέρα για συνήθεις θερμοκρασίες

$$U_2 - U_1 = 0{,}71\ (175 - 300) = -\ 88{,}7\ \text{kJ/kg}$$

Θερμότητα

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

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12}$$

$$Q_{12} = U_2 - U_1 - P_1\ (V_2 - V_1)\ , \quad P_1 = P_2$$

$$Q_{12} = U_2 + P_1V_1 - P_2V_2 - U_1$$

$$Q_{12} = (U_2 + P_1V_1) - (U_2 + P_2V_2)$$

$$Q_{12} = H_2 - H_1$$

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

$$Q_{12} = h_2 - h_1 = Cp\ (T_2 - T_1)$$

Για το παράδειγμα θα έχουμε:

$(Q + W)_{12} = U_2 - U_1 = -\ 88{,}7$ kJ/kg

$W_{12} = 36.000$ J/kg

οπότε:

$$Q_{12} = -\ 88{,}7 - 36 = -\ 124{,}7\ \text{kJ/kg}$$

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

$$Q_{12} = C_p\ (T_2 - T_1) = 1\ (175 - 300) = -\ 125\ \text{kJ/kg}$$

4.5 ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

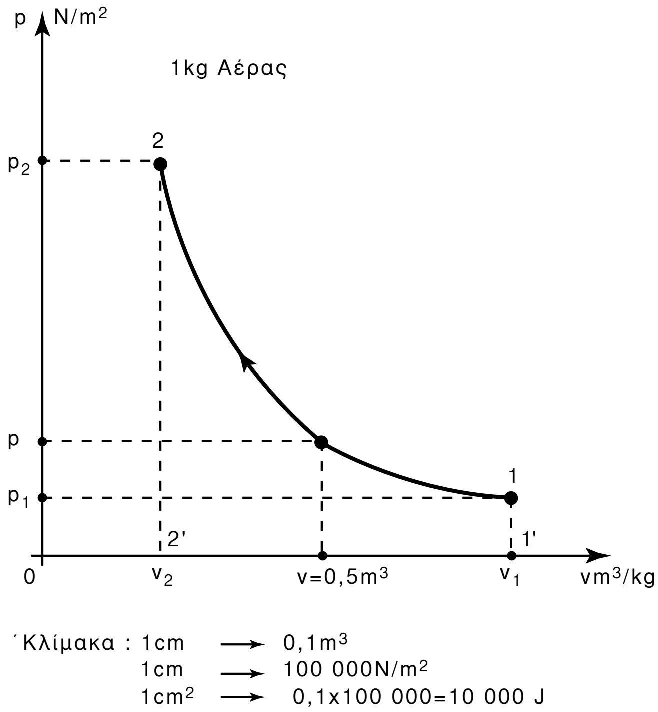
Αδιαβατική ονομάζεται η μεταβολή κατά τη διάρκεια της οποίας δεν υπάρχει εναλλαγή θερμότητας του συστήματος με το περιβάλλον του. Επομένως θα έχουμε: $(Q_{12})_{αδ} = 0$.

Η εξίσωση της μεταβολής εκφράζεται με τη σχέση:

$$\boxed{p \cdot v^{k} = \text{σταθ}}$$

όπου $k = \dfrac{C_p}{C_v}$

Στο διάγραμμα (P – v) η μεταβολή απεικονίζεται από μία καμπύλη (σχήμα 4.5α).



Σχήμα 4.5α *Αδιαβατική μεταβολή*

Από την εξίσωση $p_1 v_1^k$ = σταθ. για την κατάσταση 1 και 2 της μεταβολής θα έχουμε:

Κατάσταση 1: p_1, v_1, T_1, $p_1 v_1^k$ = σταθ.

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

Επομένως θα έχουμε

$$p_1 \cdot v_1^k = P_2 \cdot {v_2}^k$$

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

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

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

$$(Q + W)_{12} = U_2 - U_1$$

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

$$W_{12} = U_2 - U_1$$

Γνωρίζουμε ότι:

$$U_2 - U_1 = C_v\,(T_2 - T_1)$$

Επομένως μπορούμε να γράψουμε:

$$W_{12} = U_2 - U_1 = Cv\,(T_2 - T_1)$$

Υπολογίζουμε $(T_2 - T_1)$

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

$$W_{1,2} = U_2 - U_1 = \frac{C_v}{R} = \left(p_2\, v_2 - p_1\, v_1\right)$$

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

$$W_{1,2} = \frac{C_v}{R} = (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$W_{1,2} = \frac{C_v}{C_p - C_v} = (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$W_{1,2} = \frac{1}{\frac{C_p}{C_v} - 1} = (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

όπου $\frac{C_p}{C_v} = k$

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

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

Τελικά:

$$W_{1,2} = \frac{1}{k-1} = (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Αδιαβατική συμπίεση 1 kg αέρα (σχήμα 4.5α)

Κατάσταση 1: $p_1 = 100.000$ N/m^2

$V_1 = ;$

$T_1 = 280°$ K

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

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

Κατάσταση 2: $\frac{v_1}{v_2} = 4$

$P_2 = ;$

$T_2 = ;$

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

Υπολογίζουμε p_2: Από τη σχέση $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$

προκύπτει: $\frac{p_2}{p_1} = 4^{1 \cdot 40}$

$$\log \frac{p_2}{p_1} = 1{,}40 \times \log 4 = 1{,}40 \times 0{,}60 = 0{,}840$$

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

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

προκύπτει: $\frac{T_2}{T_1} = 4^{(1.40-1)} = 4^{0.40}$

$$\frac{T_2}{T_1} = 1.76 \quad , \ T_2 = 1{,}76 \text{ x } 288 = 510^\circ\ K$$

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας θα είναι:

$$U_2 - U_1 = Cv\ (T_2 - T_1)$$

όπου: $C_v = 0{,}71\ kJ/kg\ K$

$$U_2 - U_1 = 0{,}71\ (510 - 288) = 158\ kJ/kg$$

Το έργο θα είναι:

$$W_{12} = U_2 - U_1 = 158\ kJ/kg$$

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. Έτσι εξηγείται και γιατί επιδιώκουμε να λειτουργούν οι σύγχρονες θερμικές μηχανές σε υψηλές ταχύτητες, να είναι δηλαδή ταχύστροφες.

4.6 ΠΟΛΥΤΡΟΠΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ

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

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

όπου: m ονομάζεται εκθέτης της πολυτροπικής.

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

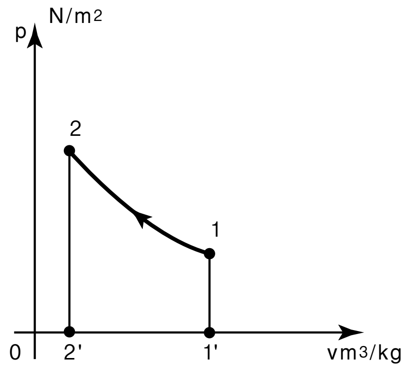
Η **μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας** εκφράζεται με τη σχέση:

$$\boxed{U_2 - U_1 = \frac{c_v}{R}\left(p_2 v_2 - p_1 v_1\right)}$$

Το **έργο** εκφράζεται με τη σχέση:

$$\boxed{W_{1,2} = \frac{1}{m-1}\left(p_2 v_2 - p_1 v_1\right)}$$

και είναι ίσο με το εμβαδόν 1΄122΄, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6α



Σχήμα 4.6α *Πολυτροπική μεταβολή*

Θερμότητα

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

$$(Q + W)_{12} = U_2 - U_1$$

$$Q_{12} = (U_2 - U_1) - W_{12}$$

$$Q_{1\,2} = \frac{c_v}{R}(p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{m-1}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$Q_{1\,2} = \left(\frac{c_v}{R} - \frac{1}{m-1}\right)(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

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:

$$Q_{1\,2} = \left(\frac{1}{K-1} - \frac{1}{m-1}\right)(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$Q_{1\,2} = \frac{m-k}{(k-1)(m-1)}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$\boxed{Q_{1\,2} = W_{1,2} = \frac{m-k}{k-1}}$$

Από αυτή τη σχέση παρατηρούμε ότι:

Εάν $W_{12} > 0$ και

$m > k$ τότε $Q_{12} > 0$. Το σύστημα δέχεται θερμότητα

$m < k$ τότε $Q_{12} < 0$. Το σύστημα χορηγεί θερμότητα.

Εάν $W_{12} < 0$ τότε συμβαίνει το αντίθετο.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Πολυτροπική μεταβολή με εκθέτη m = 1,3.

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

Κατάσταση 2: $P_2 = 400.000\ N/m^2$

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

προκύπτει:

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

Το έργο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$W_{1\,2} = \frac{1}{m-1}\left(p_2 v_2 - p_1 v_1\right)$$

Επειδή όμως $P_2V_2 = RT_2$ και $P_1V_1 = RT_1$ θα έχουμε:

$$W_{1\,2} = \frac{R}{m-1}\left(T_2 - T_1\right)$$

$$W_{1\,2} = \frac{287}{0,3}\left(413 - 300\right) = 108.000\ J/kg$$

Η θερμότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{1\,2} = W_{1\,2} \cdot \frac{m-k}{k-1}$$

$$Q_{1\,2} = 108 \times \frac{1,3 - 1,4}{0,4} = -27\ kJ/kg$$

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.

4.7 ΟΙ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ (P – v)

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

$$\boxed{p \cdot v^m = \text{σταθ}}$$

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

- $m = \infty$, $v = \text{σταθ}$

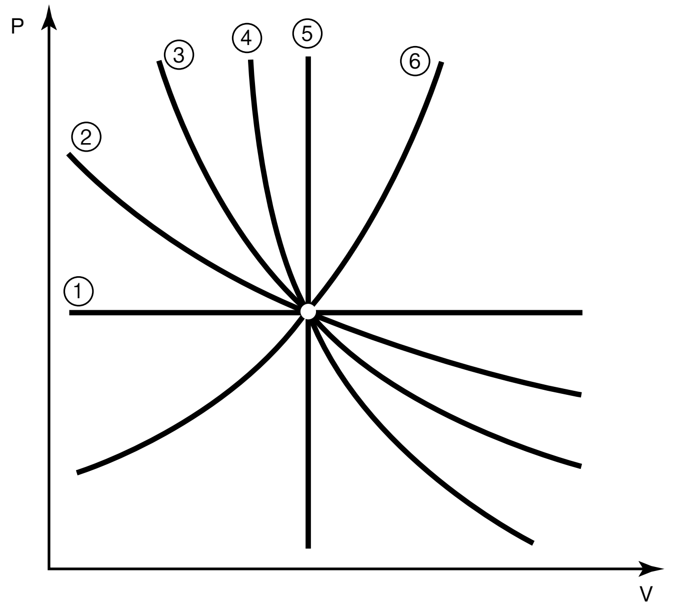
Ισόχωρη μεταβολή

- $m \neq K$, $pV^m = \text{σταθ}$

Πολυτροπική μεταβολή

Απεικονίζουμε τις παραπάνω μεταβολές στο διάγραμμα (P – v). Θεωρούμε επίσης τις πολυτροπικές με $m < 1$ και $m < 0$. (σχ. 4.7α)

- 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 ($m = \infty$).



Σχήμα 4.7α *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:

$$mpdv + vdp = 0$$

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

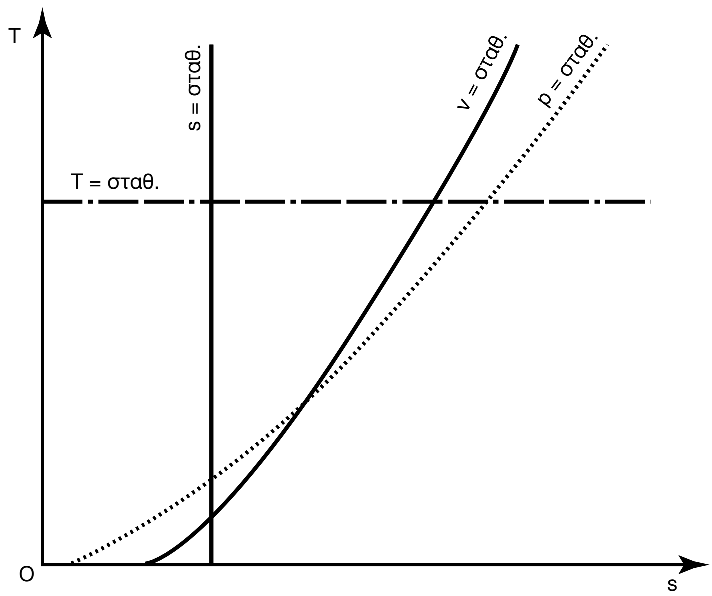
Το κλάσμα $\frac{dp}{dv}$ στο πρώτο μέλος είναι η κλίση της καμπύλης στο διάγραμμα (P – v) και, επειδή p, v είναι ποσότητες θετικές, εάν m είναι θετικό, τότε το δεύτερο μέλος είναι αρνητικό και αντίστροφα.

4.8 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 τεταγμένες.

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



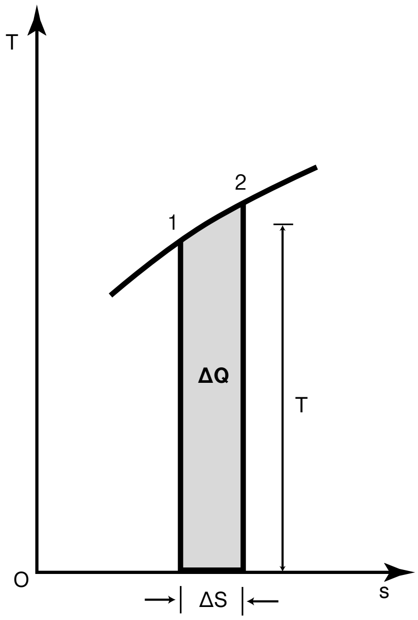
Σχήμα 4.8α *Θερμοδυναμικές μεταβολές στο διάγραμμα (T – s)*

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 $\Delta W = p \cdot \Delta v$, 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 4.8β *Διάγραμμα (T – s)*

4.9 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 περιβάλλοντός του.

Πράγματι, εάν η πίεση p 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 περιβάλλοντός του. Εάν υπήρχε διαφορά θερμοκρασίας T – T΄, το σύστημα θα έτεινε να υποστεί 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 ην αρχική. Στο διάγραμμα (T – s) απεικονίζεται με ένα ευθύγραμμο τμήμα παράλληλο στον άξονα της θερμοκρασίας. Η αδιαβατική αντιστρεπτή είναι ισοεντροπική.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ 4ου 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:

$$\mathbf{p \cdot v = σταθ.}$$

- **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:

$$\mathbf{v = σταθ.}$$

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

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

$$\mathbf{p = σταθ.}$$

- **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:

$$\mathbf{p \,.\, v^k = σταθ.}$$

- **Πολυτροπική** ονομάζεται η μεταβολή του συστήματος που καθορίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{p \,.\, v^m = σταθ.}$$

- **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 πα-

ράλληλο 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^3 και ο τελικός 0,05 m^3. 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 συγκοληθεί περιφερειακά περιέχεται αέρας υπό πίεση 340 kPa και θερμοκρασία 10°C. Αν δοθεί θερμότητα στον αέρα μέχρι να φθάσει η θερμοκρασία του στους 270 °C, να προσδιορίσετε την ποσότητα αυτή της θερμότητας. 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 5

ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΚΦΡΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να **διατυπώνετε** τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής κατά Lagrange (κλειστά συστήματα), 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 κατά Euler (ανοικτά συστήματα), 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 θερμοδυναμικός** νόμος είναι μια σχέση που εκφράζει την **αρχή διατήρησης της ενέργειας**.

Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος 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 θερμοδυναμικός νόμος κατά Lagrange (κλειστά συστήματα)

Θα μελετήσουμε κατ' αρχήν αυτό το νόμο **κατά Lagrange**. Δείχνουμε με:

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

$\mathbf{W_{rs}}$: είναι το έργο που έλαβε το σύστημα στο χρονικό διάστημα Δt.

$\mathbf{U_0}$: είναι η εσωτερική ενέργεια του συστήματος με οποιαδήποτε μορφή μηχανική, θερμική, χημική κ.λ.π.

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής κατά Lagrange είναι:

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

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 **προσπαθήσουμε να αναλύσουμε τα μεγέθη** που εμφανίζονται στον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο.

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

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

όπου: $\mathbf{\Delta U_{th}}$ θερμική: είναι η εσωτερική ενέργεια, που οφείλεται στην κίνηση των μορίων

$\mathbf{\Delta U_{ch}}$: είναι η εσωτερική χημική ενέργεια.

$\mathbf{\Delta U_{ΔΙΑΦ}}$: 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:

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

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

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

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

$\mathbf{Q_{cws}}$**:** είναι η θερμότητα που προέρχεται από τυχόν τριβές επαφής επιφανειών στερεών σωμάτων, μεταξύ συστήματος και εξωτερικού χώρου.

Όπως προαναφέραμε, στα προβλήματα που μελετάμε, πάντοτε αποφεύγουμε την ύπαρξη αυτής της τριβής επιλέγοντας κατάλληλα το σύστημα.

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

$$\boxed{W_{rs} = (W_{rs})_{fs} + (W_{rs})_{fm}} \quad (5.1.1.δ.)$$

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 $\mathbf{W_e}$.

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 δίδεται από τη σχέση :

$$\boxed{(W_{rs})_{fs} = -\Delta E_c - \Delta E_{cf} - \Delta E_g} \quad (5.1.1.ε.)$$

όπου: **ΔE_c:** 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: η **μεταβολή της ενέργειας** που οφείλεται στο **πεδίο βαρύτητας**.

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

Έτσι μπορούμε να γράψουμε το **πρώτο θερμοδυναμικό νόμο κατά Lagrange** :

$$\boxed{Q = \Delta U_0 + W_e + \Delta E_c + \Delta E_{cf} + \Delta E_g} \quad (5.1.1.στ.)$$

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.

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

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

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

όπου $\mathbf{W_{wm}}$**:** 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˙ΔV ως έργο αντιστρεπτό** και $\mathbf{W_{wm}}$ **των δυνάμεων τριβής από το ιξώδες ως έργο μη αντιστρεπτό**.

Όταν δεν λαμβάνουμε υπόψη το ιξώδες τότε είμαστε στην ειδική περίπτωση που μπορούμε να θεωρήσουμε τη **θερμοδυναμική μεταβολή σαν αντιστρεπτή**.

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5.1

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, επιλέγουμε το σύστημα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.1α. Όπως αναφέραμε το έργο We που παράγει το σύστημα από τις δυνάμεις επιφάνειας θα δίνεται από τη σχέση :

$$\boxed{W_e = p \cdot \Delta V}$$

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.

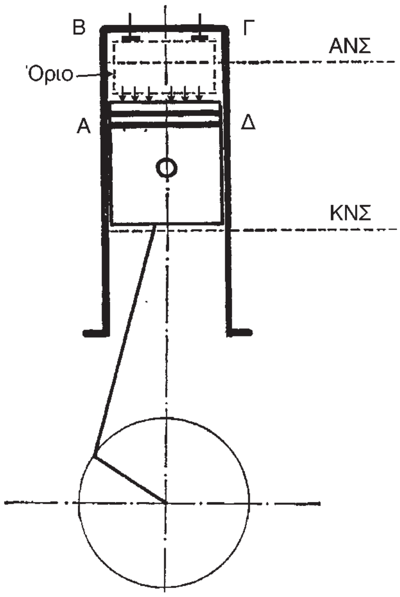
Οι κάθετες δυνάμεις στην επιφάνεια ΑΔ παράγουν έργο,. Μετακινούν το σημείο εφαρμογής τους, αφού το έμβολο μετακινείται.

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 $\Delta\ell$, τότε το έργο που παράγει η δύναμη F θα είναι :

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

$$\boxed{W_e = p \cdot \Delta V} \qquad (5.1.1.θ.)$$

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 κατά Euler (ανοικτά συστήματα)

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

$$\boxed{Q = \Delta H} \qquad (5.1.2.α.)$$

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

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

ΔΗ: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 :

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

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**.

Αν συμβολίσουμε 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 :

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

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

Με βάση τη σχέση που αναφέραμε 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) :

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

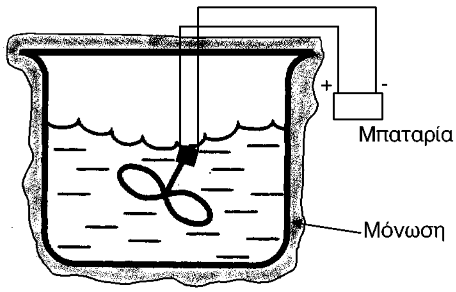
$$J = 4.186 \text{ J/kcal}$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5.1

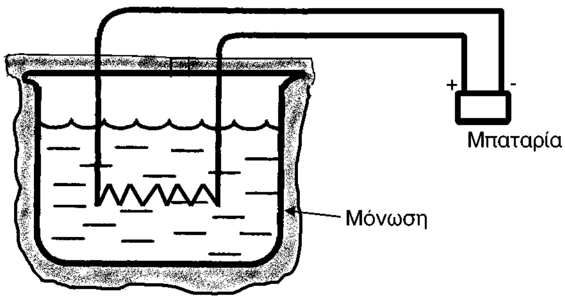
Ένα μονωμένο δοχείο με σταθερά τοιχώματα περιέχει 10kg νερού.

α. Μέσω μιας έλικας που περιστρέφεται από ένα ηλεκτροκινητήρα χορηγούμε μηχανικό έργο 10KJ. σχ. 5.2.α.

β. Μέσω μιας αντιστάσεως χορηγούμε την ίδια θερμική ενέργεια σχ. 5.2.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.*

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

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

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

$\Delta U_0 = Q - W_e$

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

$\Delta U_0 = We$, $\quad -W_e$ έργο **προς** το σύστημα

η ειδική εσωτερική ενέργεια

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

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

β. Επίσης έχουμε :

$$\Delta U_0 = Q - W_e$$

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

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

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

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 5.2

Σε ένα κλειστό σύστημα που αποτελείται από 5,4 kg ενός ρευστού πραγματοποιούμε 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_c, ΔE_g, Δ_c είναι αμελητέες προκύπτει :

$$\Delta U_0 = Q - W_e$$

$$\Delta u_0 = q - we, \qquad \Delta u = -60\ KJ/kg$$

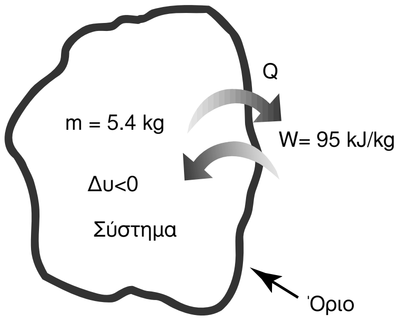
$-60 = q - w_e$, $\quad$ w = 95 KJ/kg

$-60 = q - 95$

q = 35 KJ/kg

Q = 5,4 kg x 35 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 :

$\Sigma Q + \Sigma W = 0$

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

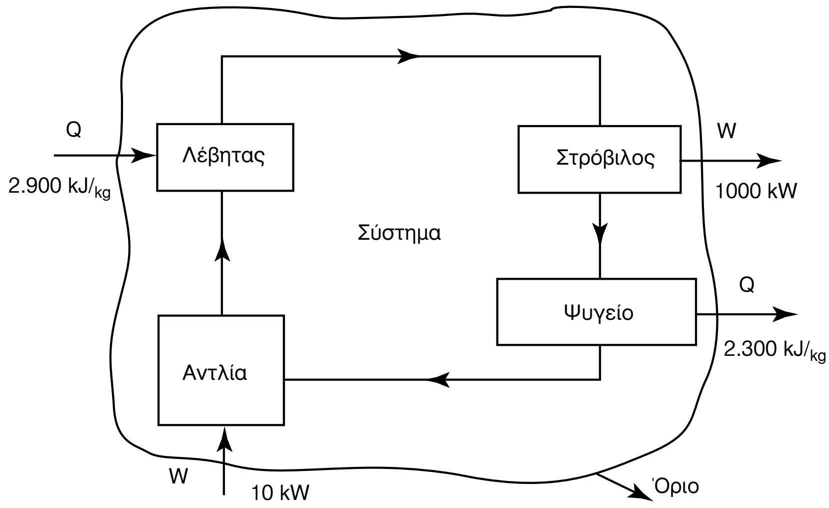
Έστω $\dot{m}$ kg/s η μάζα του ατμού

$\Sigma Q = 600\,\dot{m}$ KW

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

οπότε $600\,\dot{m} - 990 = 0$

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



Σχήμα 5.2.δ. *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 θερμοδυναμικός νόμος** είναι μια σχέση που εκφράζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας.
- **Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής κατά Lagrance** (κλειστά συστήματα) 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 εσωτερικής του ενέργειας.**

- Μια άλλη έκφραση του **πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής κατά Lagrange** (κλειστά συστήματα) 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 κατά Euler** δίνεται από τις σχέσεις:

$$Q = \Delta H,$$

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

- **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 διεργασία** 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 πραγμοτοποείται 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 διεργασίας 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

ΜΟΡΦΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

Επιδιωκόμενοι στόχοι:

- Να **εξηγείτε** την έννοια του έργου.
- Να **αναφέρετε** τις διάφορες μορφές έργου.
- Να **εξηγείτε** και να **αναφέρετε** τις διάφορες μορφές μηχανικού έργου.
- 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 παραγόμενου έργου από ένα σύστημα στη θερμοδυναμική.

6.1. ΕΡΓΟ

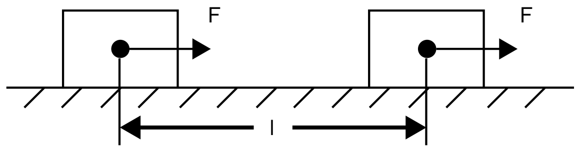
Το **έργο** παρουσιάζεται με **διάφορες μορφές** - **μηχανικό ηλεκτρικό** - **χημικό έργο** κ.λ.π.

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.

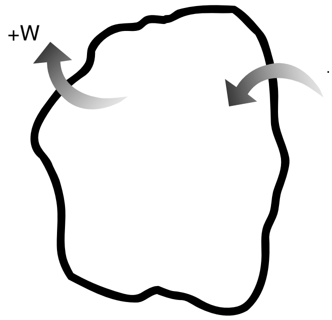
Το έργο ορίζεται σαν το γινόμενο μίας δύναμης επί τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής στη διεύθυνση της ίδιας της δύναμης. (σχ. 6.1.α)

Έργο = δύναμη x μετατόπιση

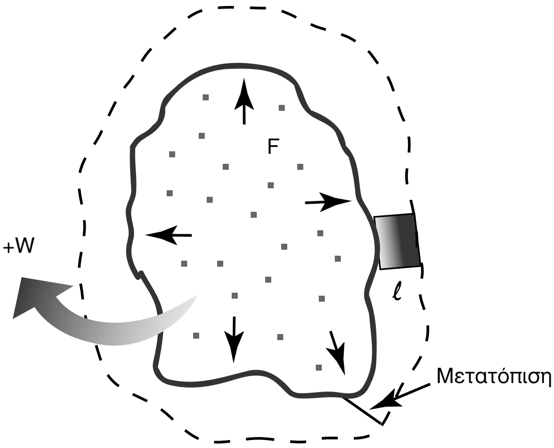


Σχήμα 6.1.α *Το έργο που παράγεται είναι ανάλογο της δύναμης και της μετατόπισης*

Στη **θερμοδυναμική** θα λέμε ότι 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 το συμβολίζουμε συμβατικά με (+W). (σχ. 6.1-β,γ).



Σχήμα 6.1.β *Το έργο που προσθέτουμε στο σύστημα είναι αρνητικό. και αυτό που αφαιρούμε θετικό*



Σχήμα 6.1.γ Τ*ο σύστημα παράγει έργο γιατί η δύναμη και η μετατόπιση έχουν ίδια διεύθυνση και φορά*

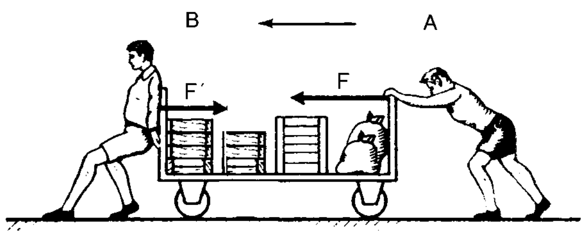
6.2. ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΕΡΓΟ

Από τη Μηχανική γνωρίζουμε 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 6.2α 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).

Τη δύναμη P του εργάτη Β, που αντιστέκεται στην κίνηση, θα τη λέμε **δύναμη αντιστάσεως** και το έργο που παράγει, **έργο καταναλισκόμενο ή αντιστάσεως** και θα το συμβολίζουμε συμβατικά με το (-W).



Σχήμα 6.2.α *Ο εργάτης Α παράγει κινητήριο έργο και ο Β καταναλισκόμενο.*

Παρατήρηση

Όσον 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.

6.3. ΕΡΓΟ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

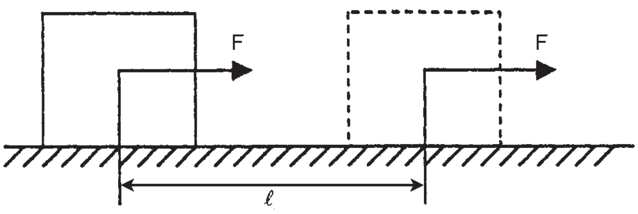
Στις παρακάτω περιπτώσεις η **δύναμη** είναι **σταθερή κατά μέτρο, διεύθυνση και φορά.**

6.3.1. Δύναμη και μετατόπιση σχηματίζουν γωνία 0°.

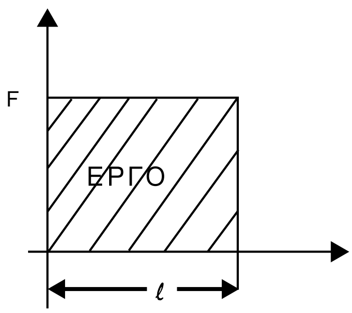
Το σημείο εφαρμογής μετατοπίζεται κατά ένα μήκος στην ευθεία ενέργειας της δύναμης και προς την κατεύθυνση της δύναμης (σχ. 6.3.1.α).

Το παραγόμενο έργο εκφράζεται με τη σχέση :

$$\boxed{W = F \cdot \ell} \qquad (6.3.1.α.)$$



Σχήμα 6.3.1.α. *Δύναμη και μετατόπιση σχηματίζουν γωνία 0°*



Σχήμα 6.3.1.6. *Το έργο ισούται με το εμβαδόν του παραλληλόγραμμου*

Το εμβαδόν του διαγραμμισμένου παραλληλόγραμμου ισούται με το έργο (σχ. 6.3.1.β).

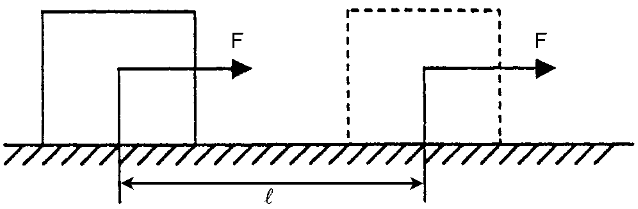
$$W = F \cdot \ell = (\text{εμβαδόν παραλληλόγραμμου})$$

6.3.2. Δύναμη και μετατόπιση σχηματίζουν γωνία α°

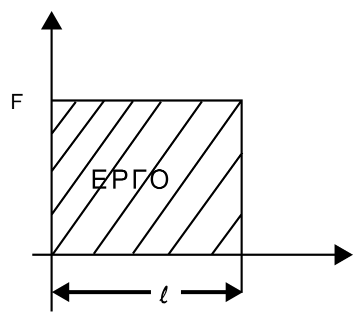
Το σημείο εφαρμογής μετατοπίζεται κατά ένα μήκος ℓ σε ευθεία, που σχηματίζει γωνία α με την κατεύθυνση της δύναμης (σχ. 6.3.2.α).

Το παραγόμενο έργο ισούται με :

$$\boxed{W = F \cdot \ell \text{ συν α}} \qquad (6.3.2.α.)$$



Σχήμα 6.3.2.α. *Δύναμη και μετατόπιση σχηματίζουν γωνία α°*



Σχήμα 6.3.2.6. *Το έργο ισούται με το εμβαδόν του παραλληλόγραμμου*

Το εμβαδόν του διαγραμμισμένου παραλληλόγραμμου ισούται με το έργο: (σχ. 6.3.2β).

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

6.3.3. Το σημείο εφαρμογής της δύναμης ακολουθεί τυχούσα διαδρομή

Το σημείο εφαρμογής μετατοπίζεται κατά ένα μήκος ℓ σε τυχούσα ευθεία (σχ.6.3.3.α).

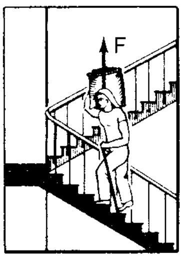
Το έργο εκφράζεται με τη σχέση :

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

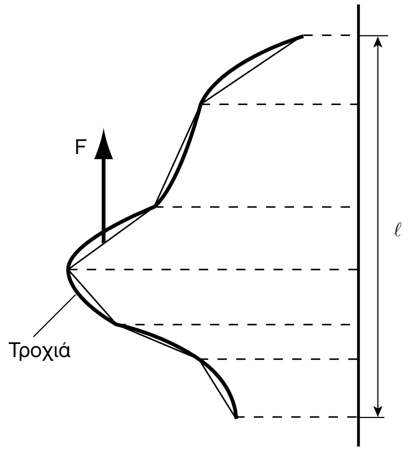
$$\boxed{W = F \times \text{προβ. τρ. σημ. εφαρ.}} \qquad (6.3.3.α.)$$

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

όπως φαίνεται στο (σχ. 6.3.3.β).



Σχήμα 6.3.3.α *Το σημείο εφαρμογής ακολουθεί τυχούσα διαδρομή*



Σχήμα 6.3.3.β. *Το έργο είναι ίσο με τη δύναμη επί την προβολή της τροχιάς στη διεύθυνση της δύναμης*

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. 6.3.3.γ.) θα ισούται με :

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

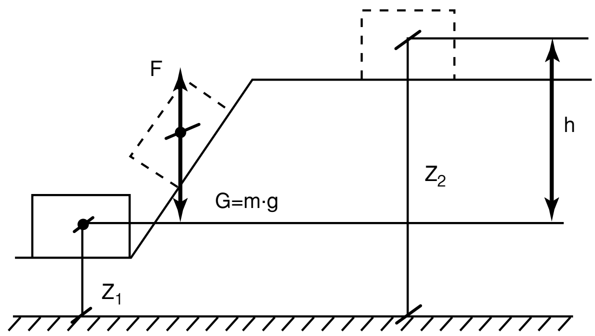
Από τη σχέση 6.3.1α θα έχουμε:

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

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

$W = mg \cdot h,$

$$\boxed{W = mgh = mg\left(z_2 - z_1\right)} \qquad (6.3.3β)$$



Σχήμα 6.3.3.γ. *Έργο βάρους*

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.1

Να υπολογίσετε το έργο που καταναλώνει εργάτης για να ανυψώσει μάζα m = 30 kg σε ύψος h = 3 m σχήμα 6.3.3.δ.

Λύση

Από τη σχέση (6.3.1.α.) αντικαθιστώντας και λαμβάνοντας $g \approx 10\ m/s^2$ θα έχουμε:

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

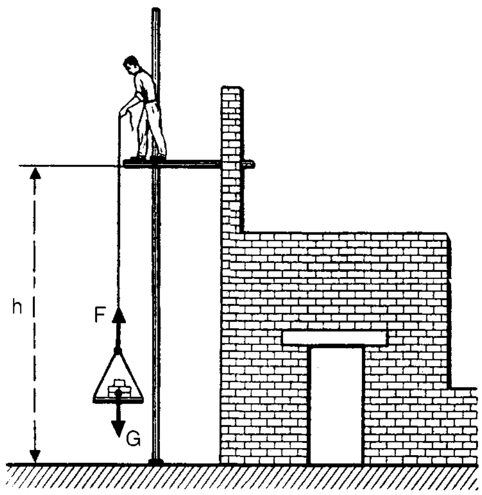
$W = G \cdot h,$ $\qquad G = m \cdot g$

$W = m \cdot g \cdot h$

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

$W = 900\ J$

$$\boxed{W = 900\ J}$$



Σχήμα 6.3.3.δ. *Εργάτης ανυψώνει βάρος G*

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.2

Να υπολογίσετε το έργο που καταναλώνεται, για να μεταφερθεί μάζα m = 200 kg σε ένα κεκλιμένο επίπεδο γωνίας 30°, γνωρίζοντας το μήκος του ℓ = 5 m και g ≈ 10 m/s^2 (σχ. 6.3.3.ε).

Λύση

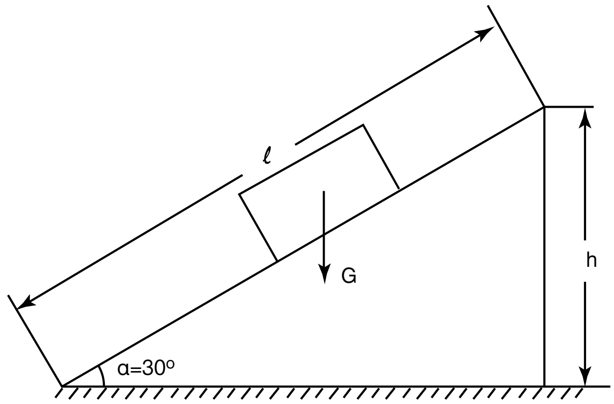
Από τη σχέση (6.3.1.α) αντικαθιστώντας και λαμβάνοντας g ≈ 10 m/s^2, θα έχουμε:

$$W = F \cdot \ell = G \cdot h, \qquad ημ\,30° = \frac{h}{\ell}, \qquad G = mg$$

$$W = G \cdot ημ30°\,\ell = 200\text{ kg}10\text{m/s}^2 \times 0{,}5 \times 5\text{m}$$

$$W = 5.000 \text{ J}$$

$$\boxed{W = 5 \text{ KJ}}$$



Σχήμα 6.3. 3.ε. *Σώμα μεταφέρεται σε κεκλιμένο επίπεδο*

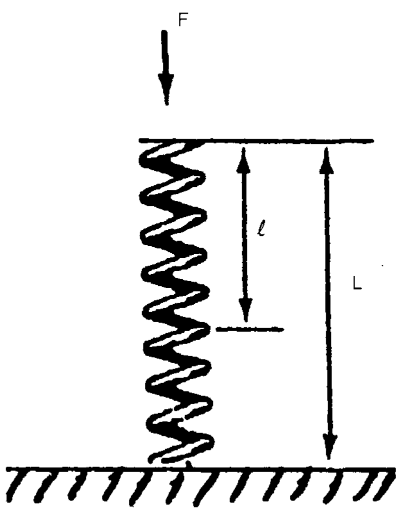
6.4. ΕΡΓΟ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

6.4.1. Έργο ελατηρίου

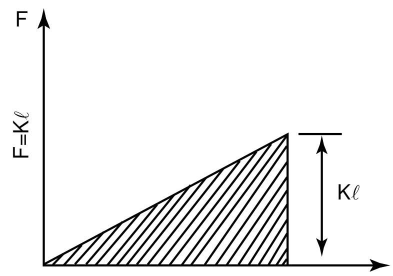
Κατά την έλξη ή συμπίεση ελατηρίου η δύναμη αυξάνεται ανάλογα με τη διαδρομή $F = K \cdot \ell$, όπου K είναι η σταθερά του ελατηρίου. (σχ. 6.4.1α,β).

Το έργο εκφράζεται με τη σχέση :

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



Σχήμα 6.4.1.α. *Συμπίεση ελατηρίου*



Σχήμα 6.4.1.6. *Το έργο ελατηρίου είναι ίσο με το εμβαδόν του τριγώνου*

Από το σχήμα 6.4.1.β. έχουμε:

W = εμβαδόν διαγραμμισμένου τριγώνου

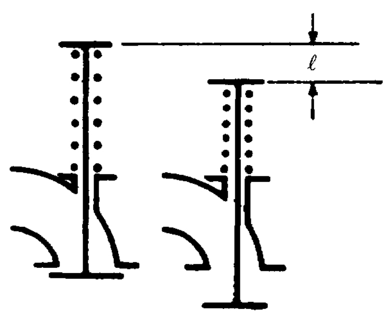
W = εμβ. Τριγώνου

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

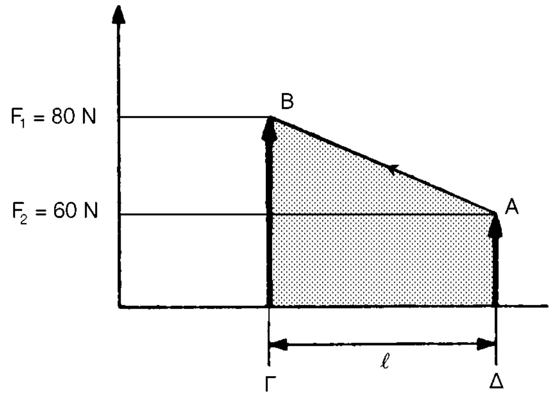
$$\boxed{W = 1/2\ K\,\ell^2} \qquad (6.4.1.α)$$

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.3

Ελατήριο βαλβίδας μηχανής αυτοκινήτου λειτουργεί σαν ελατήριο συμπιέσεως, (σχ. 6.4.1.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 6.4.1.γ. *Ελατήριο βαλβίδας*



Σχήμα 6.4.1.δ. *Διάγραμμα ελατηρίου*

Το διάγραμμα έργου του ελατηρίου στην προκειμένη περίπτωση είναι τραπέζιο, το εμβαδόν του οποίου αντιστοιχεί στο έργο συμπίεσης του ελατηρίου (σχ. 6.4.1.δ).

Επομένως, θα έχουμε :

W = εμβαδόν τραπεζίου (ΑΒΓΔ)

$$W = \frac{F_1 + F_2}{2} \times \ell$$

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

W = 70 x 1,2 N cm

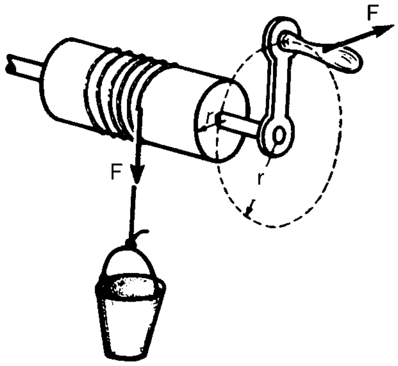
W = 7 x 0,12 N m

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

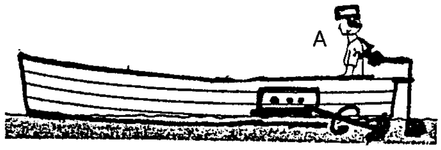
6.4.2. Έργο ατράκτου

Στη μηχανολογία είναι πάρα πολύ συχνή η μεταφορά ενέργειας με ατράκτους, που περιστρέφονται, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. (σχ.6.4.2.α,β,γ).

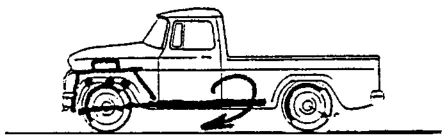
Το έργο ατράκτου εκφράζεται με τη σχέση: $\mathbf{W_{\alpha\tau\rho} = 2\,\pi\,\nu \cdot M}$



Σχήμα 6.4.2.α. *Βαρούλκο*



Σχήμα 6.4.2.6. *Βάρκα*



Σχήμα 6.4.2.γ. *Αυτοκίνητο*

Από το σχήμα 6.4.2.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: $\boxed{W_{ατρ} = 2\pi v M}$ (6.4.2α)

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

Ισχύς ατράκτου: $P_{ατρ} = W_{ατρ}$ / ανά μονάδα χρόνου

Ισχύς ατράκτου: $\boxed{P_{ατρ} = 2πnM}$ (6.2.4β)

όπου: n = σ.α.λ.

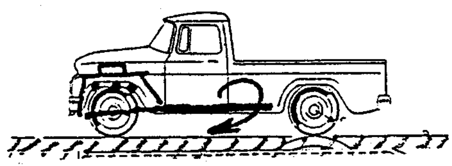
❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.4

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. 6.4.2.δ).

Λύση

Από τη σχέση (6.4.2.β.) έχουμε :
$P_{ατρ}$ = 2πnM = 2π x 3.000 σ.αλ x 300 Nm

$\boxed{P_{ατρ} = 3{,}14 \text{ Kw}}$

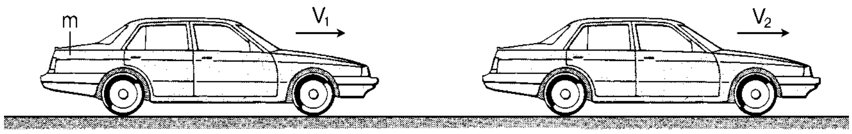


Σχήμα 6.4.2.δ *Αυτοκίνητο*

6.4.3. 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. 6.4.3.α).

Το **έργο επιτάχυνσης** εκφράζεται με τη σχέση : $\mathbf{W_{επ} = 1/2\ m\ (V_2^2 - V_1^2)}$



Σχήμα 6.4.3.α. *Αυτοκίνητο που επιταχύνει από V1 σε V2*

$$W = F \cdot \ell$$

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

$$F = m\,\alpha$$

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

$\alpha = \dfrac{V_2 - V_1}{t}$ επιτάχυνση στην ομαλά 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: $\boxed{W = \frac{1}{2}\,m\left(V_2^2 - V_1^2\right)}$ (6.4.3α)

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

$$\mathbf{P_{ΕΠ} = \frac{W_{ΕΠ}}{\text{μονάδα χρόνου}}}$$

Ισχύς επιτάχυνσης: $\boxed{P_{ΕΠ} = \frac{W_{ΕΠ}}{\text{μονάδα χρόνου}}}$ (6.4.3.β)

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.4

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. 6.4.3.β).

Λύση

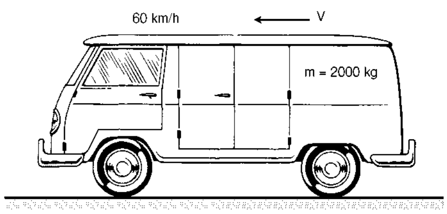
Από τη σχέση (6.4.3β) έχουμε :

$$\mathbf{P_{ΕΠ} = \frac{W_{ΕΠ}}{μονάδα\ χρόνου}}$$

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

$$= \frac{1}{2}\, 2.000\ kg \left(\frac{60.000\ m}{3.6000\ S}\right)^2 \frac{1\ KJ}{1.000\ kg\ m^2/s^2}$$

$$W_{επ} = 275{,}5\ KJ$$



Σχήμα 6.4.3.6. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 6.4.*

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

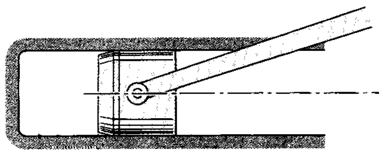
6.5 ΕΡΓΟ P · V (ΟΓΚΟΜΕΤΑΒΟΛΗΣ)

Για το έργο ογκομεταβολής έγινε αναφορά στο προηγούμενο κεφάλαιο παράδειγμα 5.1. Το έργο εκφράζεται με τη σχέση: $\mathbf{W_e = P\Delta V}$ (έργο αντιστρεπτό).

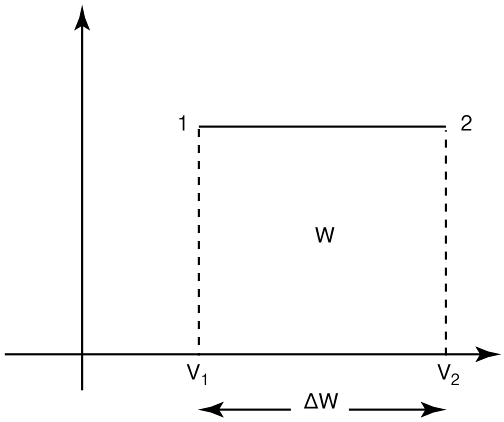
❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.6

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. 6.5.γ. και σχ. 6.5.δ.

Λύση



Σχήμα 6.5.α. *Διάταξη εμβόλου κυλίνδρου*



Σχήμα 6.5.6. *Το έργο είναι ίσο με το εμβαδόν του παραλληλογράμμου (P · V)*

Από τη σχέση (6.5.γ.) θα έχουμε :

$W = P\ \Delta V$

$W = P\ (V_2 - V_1)$

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

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

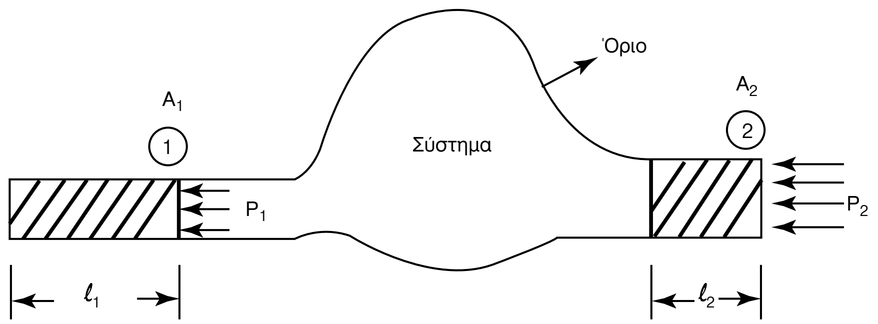
$= 6 \times 10^5$ N m

$= 6 \times 10^5$ J

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

6.6. ΕΡΓΟ ΡΟΗΣ

Θεωρούμε το ανοικτό σύστημα του σχήματος, όπου έχουμε 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. 6.6.α).



Σχήμα 6.6.α *Ανοικτό σύστημα σταθερής ροής - έργο ροής*

Θα υπολογίσουμε 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 P_1, 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.

$$W_1 = P_1 A_1 \ell_1 = m (P_1 V_1)$$

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

Ανάλογα για τη διατομή 2 : $W_2 = P_2 A_2 \ell_2 = m (P_2 V_2)$

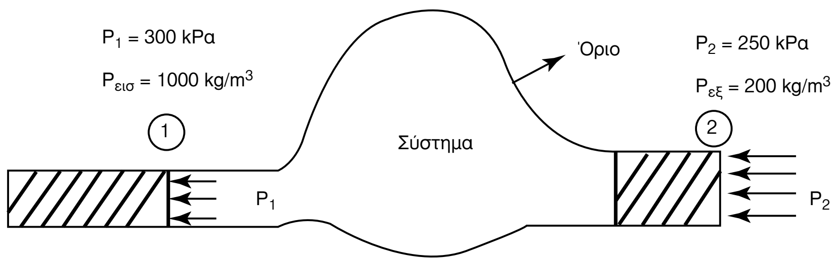
το καθαρό έργο ροής $w_2 = P_2 v_2$

εκφράζεται με τη σχέση : $\boxed{w = p_2 v_2 - p_1 v_1}$ (6.6.α) J/kg

❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 6.8

Να υπολογίσετε το έργο ροής σε ένα ανοικτό σύστημα σταθερής ροής ενός ρευστού στην είσοδο και στην έξοδο. Δίδονται πίεση εισόδου $P_{εισ}$ = 300 KPα και πυκνότητα ρευστού ρ = 1.000 kg/m^3. Στην έξοδο $P_{εξ}$ = 200 KPα και πυκνότητα ρευστού ρ = 250 kg/m^3 (σχ. 6.6.β).

Λύση



Σχήμα 6.6.6. *Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 6.8.*

Το έργο εισόδου θα είναι :

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

$$= 300 \text{ KPα} \times \frac{1}{1.000 \text{ kg/m}^3}$$

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

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

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

Το έργο εξόδου θα είναι :

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

$$= 200 \text{ KPa} \times \frac{1}{250 \text{ kg/m}^3}$$

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

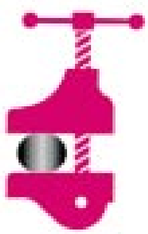
$$= 300 \frac{\text{Nm}}{\text{kg}}$$

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

6.7. 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 ΤΕΤΑΡΤΟΥ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Το **έργο** ορίζεται σαν το γινόμενο μίας δύναμης επί τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής στη διεύθυνση της ίδιας της δύναμης.
- Στη **θερμοδυναμική** θα λέμε ότι 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 το συμβολίζουμε 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 (σχ. 6.3.1.α), 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 (σχ. 6.3.2.α). Το παραγόμενο έργο ισούται με:

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

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

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

- 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 :

$$\mathbf{W_{ατρ} = 2\,\pi\,v \cdot M}.$$

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

$$\mathbf{W_{επ} = 1/2\; m\,(V_2^2 - V_1^2)}.$$

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

$$\mathbf{W_e = p\Delta V} \qquad \text{(έργο αντιστρεπτό)}$$

- Το **καθαρό έργο ροής** εκφράζεται με τη σχέση:

$$\mathbf{W = p_2\,v_2 - p_1 v_1}$$

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

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

1. Ένας 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. Ένα 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)