

# **ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ**

Διδακτικές σημειώσεις  
Θεωρία και ασκήσεις

Αθήνα 2019

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ιστορία της θερμοδυναμικής, με τη μοντέρνα έννοια, μπορεί να θεωρηθεί ότι αρχίζει το πρώτο ήμισυ του XIX αιώνα.

Στην πραγματικότητα είναι μια ιστορία που διαρκεί από πολύ παλαιά, συνδεδεμένη με εκείνη της θερμότητας με την οποία ασχολήθηκαν φιλόσοφοι και φυσικοί.

Οι ιδέες των αρχαίων για τη θερμότητα ήταν πολύ συγκεχυμένες : οι Έλληνες φιλόσοφοι θεωρούσαν τη φωτιά σαν τέταρτο στοιχείο και λανθασμένα “ μπερδεύαν ” τη φωτιά με τη θερμότητα, θεωρώντας την σαν μια ουσία. Άλλες σχολές, θεωρούσαν τη θερμότητα ως κατάσταση των σωμάτων.

Άλλη πηγή “ σύγχυσης ” ήταν ο διαχωρισμός μεταξύ ΖΕΣΤΟΥ και ΚΡΥΟΥ :

Οι περιπατητικοί φιλόσοφοι (Η περιπατητική Σχολή ιδρύθηκε στην Αθήνα το 335 π.Χ. από τον φιλόσοφο Αριστοτέλη και ο φιλόσοφοι αυτοί συνήθιζαν να περπατούν στο κτήμα της Σχολής δίπλα στο δάσκαλο Αριστοτέλη, εξ ου και η σχετική ονομασία) θεωρούσαν ότι ζεστό και κρύο ήταν ιδιότητες εσωτερικές και ξεχωριστές της ύλης και μόνο το 1623 ο Γαλιλαίος είπε ότι “ το κρύο δεν είναι μια θετική ποιότητα των σωμάτων αλλά αντιθέτως μια έλλειψη ζεστού και δεν είναι έμφυτο στην ύλη ”.

Μέσα από τη γενική σύγχυση των ιδεών, πολλές φορές τροφοδοτούμενη από μη επιστημονικές δεσμεύσεις, με τις παραδοσιακές φιλοσοφικές θεωρίες, τον XVII αιώνα γεννάται το ερώτημα :

“ τί είναι η θερμότητα ; ”

Οι Bacon και Kepler υποστηρίζουν ότι η θερμότητα είναι μια κατάσταση του σώματος που οφείλεται στην κίνηση των εσωτερικών τμημάτων του σώματος. Επίσης και ο Boyle αποδίδει τη θερμότητα στην κίνηση των μορίων.

Η θεωρία αυτή αποδείχτηκε σωστή, περίπου 200 χρόνια αργότερα, όμως στα τέλη του 1600 “ πνίγηκε ” από τη θεωρία του “θερμογόνου”.

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, “ υπάρχει ” ένα ειδικό ρευστό, μια ειδική ουσία (με την ονομασία “caloric”, “θερμογόνο” ή “φλογιστό” ή “θερμικό”) στο οποίο οφείλονταν όλα τα θερμικά φαινόμενα.

Αυτό το ρευστό είχε την ιδιότητα να είναι αβαρές, χωρίς χρώμα, χωρίς οσμή, χωρίς γεύση διάχυτο σε όλη την ύλη, με ικανότητα να διεισδύει σε όλα τα σώματα και να συνδυάζεται με αυτά.

Για παράδειγμα, χρησιμοποιήθηκε στην εξήγηση του φαινομένου αλλαγής φάσης :

- πάγος + θερμογόνο = υγρό
- υγρό + θερμογόνο = ατμός

Επίσης όταν ένα σώμα δεν μπορούσε να δεχτεί άλλο θερμογόνο, το σώμα ονομαζόταν “κορεσμένο από θερμογόνο”. Αυτή η ορολογία χρησιμοποιήθηκε αργότερα για τον ορισμό του “κορεσμένο υγρό” και “κορεσμένο ατμό”.

Παρ’ ότι η ιδέα του “θερμογόνου” έτυχε γρήγορα μεγάλης απήχησης, υπήρχε πάντοτε (σε μικρότερη έκταση πάντως) η μηχανική θεωρία της θερμότητας, εκείνη δηλαδή που θεωρούσε τη θερμότητα μια κατάσταση του σώματος οφειλόμενη στην κίνηση των μορίων.

Η αναποφασιστικότητα στην επιλογή της μιας ή της άλλης θεωρίας ήταν μεγάλη, τόσο που στο τέλος του XVIII αιώνα οι δύο επιστήμονες Lavoisier και Laplace δεν μπορούσαν να αποφασίσουν ποιά θεωρία να επιλέξουν.

Παράλληλα με τις μελέτες στη φύση της θερμότητας, γεννώνται και εξελίσσονται οι μελέτες για *ειδική θερμότητα* και *θερμοκρασία*.

Ήδη οι Ακαδημαϊκοί του Cimento (η Ακαδημία Cimento, όπου *cimento* σημαίνει εδώ τη δοκιμασία, το πείραμα σύμφωνα με την αντίληψη του Γαλιλαίου, δημιουργήθηκε στη Φλωρεντία το 1657 από μαθητές του Γαλιλαίου τον Evangelista Torricelli και τον Vincenzo Viviani με τη συγκατάθεση του πρίγκιπα Φερδινάνδου II, δούκα της Τοσκάνης, και του Λεοπόλδου των Μεδίκων, συμμετείχαν δε ως μέλη και οι Giovanni Borelli, Niccolò Stenone. Η Ακαδημία λειτούργησε με βασικούς κανόνες την εκτέλεση πειραμάτων για κάθε τι, την αποφυγή κερδοσκοπίας, τα σπάνια των μετρήσεων, έδωσε δε μεγάλη ώθηση και συνεισφορά στις επιστημονικές μελέτες. Τα μέλη της έκαναν πολυάριθμα πειράματα κυρίως στα πεδία μετρήσεων θερμοκρασιών και ατμοσφαιρικής πίεσης, χρησιμοποιώντας όργανα που κατασκεύασαν ακριβώς γι' αυτό το σκοπό. Η Ακαδημία διαλύθηκε το 1667) είχαν εκφράσει την έννοια της *''ικανότητας ενός σώματος για τη θερμότητα''* αλλά οι μελέτες αυτές έγιναν γνωστές το 1841 και οι επιστημονικοί συγγραφείς συγγέουν συχνά τις έννοιες *''θερμοκρασία''* και *''θερμότητα''*, μέχρι που έφθασαν στο σημείο να αποδεχθούν ότι το θερμόμετρο μετρά την απόλυτη ποσότητα της θερμότητας.

Μόνο το 1729 ο Klingenstierna υποστηρίζει ότι θερμότητα και θερμοκρασία είναι δύο διαφορετικές έννοιες και προς το μέσον του αιώνα αυτό επιβεβαιώθηκε από τα πειράματα των Richmann και Black στην ατμοποίηση και τήξη.

Σε ό,τι αφορά στη μέτρηση της θερμοκρασίας, μπορεί να αναφερθεί ότι ήδη το 1702 ο Guglielmo Amonts κατασκεύασε το πρωτότυπο θερμόμετρο με αέριο προσεγγίζοντας στο απόλυτο μηδέν που το όρισε στο  $-239,5^{\circ}\text{C}$ .

Από τις μελέτες του Giuseppe Black επιβεβαιώθηκε η θεωρία του *''θερμογόνου''*, κυρίως επειδή η θεωρία αυτή εκείνη την εποχή ήταν ευρέως ενισχυμένη από την εμπειρία.

Σημαντικός σταθμός στην ιστορία της θερμότητας ήταν το 1798, το πείραμα που έγινε από τον Beniamino Thompson (κόμης Rumford της Βαυαρίας) στο Μόναχο, στο οποίο ο Thompson προσπάθησε να τρυπήσει τον πυθμένα ενός κανονιού χρησιμοποιώντας ένα τρυπάνι: μετά από 360 στροφές το τρυπάνι είχε αποξύσει 837 κομμάτια υλικού (περίπου 54,3 γραμμάρια) και στον πυθμένα του κανονιού η θερμοκρασία από  $16,7^{\circ}\text{C}$  έγινε  $54,4^{\circ}\text{C}$ .

Το πείραμα επαναλήφθηκε βυθίζοντας τον πυθμένα του κανονιού σε νερό θερμοκρασίας  $15,6^{\circ}\text{C}$ , οπότε το νερό έβρασε σε  $2\frac{1}{2}$  ώρες. Θεωρήθηκε ότι ο βρασμός του νερού προκλήθηκε από την πρόσδοση του *''θερμογόνου''* το οποίο προερχόταν από το διαμελισμό σε κομμάτια του υλικού του κανονιού.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος η άκρη του τρυπανιού αμβλύθηκε με αποτέλεσμα να μην προκαλείται απόξυση κομματιών της ύλης του κανονιού, όμως διαπιστώθηκε αύξηση της θερμοκρασίας. Επομένως η άνοδος της θερμοκρασίας δεν οφειλόταν σε αυτή την ουσία που ονομαζόταν *''θερμογόνο''* αλλά ο Thompson την απέδωσε στην κίνηση, δηλαδή στο μηχανικό έργο κατά τη διάρκεια της προσπάθειας διάτρησης.

Την 25 Ιανουαρίου 1798 στην Royal Society, λοιπόν ο Thompson στη δημοσίευσή του απέδειξε από τα πειράματα που έκανε, ότι δεν υπάρχει το *''θερμογόνο''* (σημειώνεται εδώ ότι ο Baliani έκανε μια ανάλογη διαπίστωση την οποία κοινοποίησε το 1614 στον Γαλιλαίο).

Η θεωρία του *''θερμογόνου''* άντεχε όμως ακόμα.

Το 1829 ο Biot υποστήριξε ότι η προέλευση της θερμότητας είναι άγνωστη και οι ίδιες μελέτες του Sadi Carnot (που άνοιξαν το δρόμο για τη μοντέρνα θερμοδυναμική) έγιναν όταν ο ίδιος πίστευε στην ακρίβεια αυτής της θεωρίας.

Οι μελέτες του Carnot δεν αναφέρθηκαν τυχαία, δεδομένου ότι στο πρώτο μισό του XIX αιώνα οι μελέτες για τη θερμότητα από το θεωρητικό επίπεδο πέρασαν στο πρακτικό επίπεδο, με στόχο τη βελτιστοποίηση της ατμομηχανής.

**Ο Watt έθεσε το πρόβλημα :** για να παραχθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα έργου από τη θερμική μηχανή, πόσο κάρβουνο πρέπει να καεί ;

**Και ακόμα :** για ίση ποσότητα έργου, πώς θα γίνει ελάχιστη η κατανάλωση κάρβουνου ;

Είναι προφανές ότι το ερώτημα του Watt αναφερόταν στο βαθμό απόδοσης, ειδικά δε το δεύτερο ερώτημα στο μέγιστο βαθμό απόδοσης.

Το ερώτημα απαντήθηκε σε μια μελέτη του Sadi Carnot, ο οποίος δημοσίευσε τα αποτελέσματα το 1824 (*Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres a' developper cette puissance*”).

Ο Carnot βασίστηκε στην αδυναμία πραγματοποίησης του αεικίνητου και συμπέρανε ότι ο βαθμός απόδοσης μιας θερμικής μηχανής περιορίζεται από τη θερμοκρασία στη φάση πρόσδοσης της θερμότητας (θέρμανση) και τη θερμοκρασία στη φάση αποβολής της θερμότητας (ψύξη).

Η διατύπωση αυτή του Carnot πέρασε απαρατήρητη, αλλά δέκα χρόνια αργότερα έτυχε της προσοχής του Benedetto Clapeyron ο οποίος στο μεταξύ ανακοίνωσε την καταστατική εξίσωση του αερίου, συνθέτοντας σε ένα μόνο νόμο τις εξισώσεις που έδωσαν οι Volta, Boyle, Gay-Lussac.

*Έχει σημασία να αναφερθεί ότι ο Carnot πρόσεξε και μελέτησε το γεγονός ότι η διαφορά θερμοκρασίας (συνεπώς η μεταφορά θερμότητας) ήταν η ουσιαστική και αληθινή πηγή " κινητικής ισχύος " , ταυτόχρονα δε παρατήρησε ότι δεν είχε καμμία θεωρητική σημασία η εργαζόμενη ουσία. Ανέπτυξε την έννοια της αντιστρέψιμης μηχανής και τον αντιστρέψιμο κύκλο που έχει το όνομά του.*

*Το 1872 εκδόθηκαν οι μελέτες του (είχε πεθάνει το 1832 σε επιδημία χολέρας), από τις οποίες προέκυπτε ότι είχε προβλέψει την αρχή διατήρησης της ενέργειας και είχε υπολογίσει το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας.*

Οι νέες ιδέες άργησαν να δημοσιοποιηθούν, ώσπου στα μέσα του αιώνα σχεδόν ταυτόχρονα αλλά σίγουρα ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον, μια ομάδα νέων επιστημόνων (Carnot, R.Mayer, G. Joule, C.F. Mohr, L.A. Colding, M. Seguine) ανακοίνωσε την αντιστοιχία μεταξύ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ και ΕΡΓΟΥ :

**Ήταν το έμβρυο του 1<sup>ου</sup> Θερμοδυναμικού Νόμου.**

Η περισσότερο πλήρης μελέτη ήταν εκείνη του Mayer (1842) : ο προσδιορισμός του μηχανικού ισοδύναμου της θερμότητας έγινε από τον Mayer μέσα από μελέτη επάνω στη διαφορά μεταξύ των ειδικών θερμοτήτων υπό σταθερή πίεση και όγκο για τα αέρια και ορίστηκε :

$$1 \text{ Kcal} = 365 \text{ kpm} .$$

Αργότερα ο Regnault βασιζόμενος στις βασικές ειδικές θερμότητες διόρθωσε την τιμή αυτή σε 424 kpm .

Ο Joule πάλι, είχε άλλη ιδέα εκκίνησης : μελετούσε τη θερμική επίδραση στο ηλεκτρικό ρεύμα όταν ανακοίνωσε το νόμο (σήμερα με το όνομά του) όπου ορίζει το μηχανικό ισοδύναμο  $1 \text{ Kcal} = 460 \text{ kpm}$ .

Τέλος, το 1880, ο Rowland υπολόγισε μια νέα έννοια : *ΕΝΕΡΓΕΙΑ*.

Η διαφοροποίηση μεταξύ ενέργειας και δύναμης, αρχικά συγκεχυμένες όπως έγινε με θερμότητα και θερμοκρασία, τέθηκε το 1847 από τον Helmholtz ο οποίος εκείνη τη χρονιά ανακοίνωσε την *ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*.

Ο Rudolf Clausius απέδειξε το 1850 ότι η σταθερή τιμή του πηλίκου μεταξύ θερμότητας και έργου, ικανοποιείται μόνο εάν η διαδικασία είναι κυκλική, δηλαδή τέτοια ώστε το εξεταζόμενο σύστημα να επιστρέφει στην αρχική κατάσταση. Αυτό δεν συνέβαινε στο αρχικό πείραμα του Joule, όπου στο τέλος της διεργασίας το νερό μέσα στο οποίο περιστρέφετο η έλικα ήταν σε διαφορετική θερμοκρασία και μεγαλύτερη από την αρχική.

Εάν η διεργασία δεν είναι κυκλική, η διαφορά μεταξύ θερμότητας και θερμικού ισοδύναμου του έργου, δεν είναι μηδενική : για να εξαφανιστεί αυτή τη διαφορά, ο Clausius εισήγαγε την έννοια της *ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*, προσδιορίζοντας έτσι οριστικά σε ακριβή μαθηματική σχέση το 1<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Νόμο.

Λίγο αργότερα ο Clausius ανακοίνωσε την εισαγωγή της έννοιας της *ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ* που θέτει τη διαφοροποίηση μεταξύ πραγματικών και ιδανικών διεργασιών.

### Είναι πλέον το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Αξίωμα.

Οι καιροί είχαν πλέον ωριμάσει : και η μηχανική θεωρία της θερμότητας που για πρώτη φορά διατυπώθηκε το 1738 από τον Daniele Bernoulli επικράτησε οριστικά την περίοδο μεταξύ 1887 και 1892 μέσα από έρευνες και μελέτες του Max Plank.

Παράλληλα, στο πεδίο της χημείας, είχαν διατυπωθεί η *ΑΤΟΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ* η οποία μαζί με τη μηχανική θεωρία της θερμότητας γεννούν την *ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΕΡΙΩΝ*.

### Είναι η μοντέρνα θερμοδυναμική.

Να ακολουθήσει κάποιος τις εξελίξεις της μοντέρνας θερμοδυναμικής και να αναφερθούν μόνο τα ονόματα των μελετητών στους οποίους οφείλονται οι ανακαλύψεις στα διάφορα πεδία όπου η θερμοδυναμική διαδόθηκε δεν είναι εδώ δυνατόν.

Σημαίνει ότι πρέπει να αναφερθεί η ιστορία της επιστήμης και της τεχνικής στο πρώτο μισό του XX αιώνα.

Σημειώνεται όμως ένας από τους τελευταίους και πιο σημαντικούς σταθμούς, ειδικά για την τεχνική θερμοδυναμική :

Η έννοια του καταστατικού ενεργειακού μεγέθους *ΕΝΘΑΛΠΙΑ*, που έγινε στο τέλος του XIX αιώνα από τους Kamerling – Ones.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

## 1.1 ΕΝΝΟΙΕΣ – ΟΡΙΣΜΟΙ

Η θερμοδυναμική εξετάζει και μελετά τις μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων της ύλης σαν αποτέλεσμα μιας διεργασίας – μεταβολής, με σκοπό πάντα τη μετατροπή της ενέργειας από μια μορφή σε μια άλλη, σε συνδυασμό με τις ιδιότητες της ύλης.

Είναι ένας ιδιαίτερος κλάδος της φυσικής επιστήμης, ασχολείται με τις μορφές που μπορεί να λάβει η θερμική ενέργεια καθώς και με την αποδοτική της αξιοποίηση, διευκρινίζει τις συνθήκες υπό τις οποίες είναι δυνατή η μετατροπή της ενέργειας σε άλλες μορφές κατά τη διάρκεια των φυσικών φαινομένων και των τεχνικών διεργασιών.

Η θερμοδυναμική διδάσκει τη διαφοροποίηση των μορφών ενέργειας του 1<sup>ου</sup> θερμοδυναμικού αξιώματος και διευκρινίζει με τη διατύπωση του 2<sup>ου</sup> θερμοδυναμικού αξιώματος τις συνθήκες και τα όρια για τη μετατροπή των διαφόρων μορφών ενέργειας κατά τα φυσικά φαινόμενα και τις τεχνικές διεργασίες.

Η θερμοδυναμική ξεκίνησε με την κατασκευή των πρώτων μηχανών ατμού, με σκοπό την περιγραφή της λειτουργίας τους και τον καθορισμό των δυνατοτήτων τους.

Μπορεί να ορισθεί ως η “*επιστήμη της ενέργειας*”.

Ταυτόχρονα οι διατυπώσεις της θερμοδυναμικής έχουν μεγάλη σημασία για τη συμπεριφορά της ύλης στις θερμοδυναμικές καταστάσεις και τις μετατροπές των ουσιών κατά τη διάρκεια χημικών διεργασιών.

Η θερμοδυναμική παρέχει τις σχέσεις μεταξύ των μακροσκοπικών ιδιοτήτων της ύλης στις καταστάσεις ισορροπίας, και σε αυτές μπορούν να περιγραφούν οι θερμοδυναμικές ιδιότητες με θερμοδυναμικά μεγέθη.

Εκτός λοιπόν από “*επιστήμη της ενέργειας*”, η θερμοδυναμική μπορεί να ορισθεί και ως γενική θεωρία των καταστάσεων ισορροπίας (“*θεωρία της ισορροπίας*”) των φυσικών συστημάτων.

Σήμερα, η θερμοδυναμική έχει μπει στην καθημερινή μας ζωή, μερικά δε παραδείγματα εφαρμογής είναι :

- η κίνηση των αυτοκινήτων,
- η λειτουργία της εγκατάστασης θέρμανσης και κλιματισμού,
- η διαδικασία διαχωρισμού και εμφιάλωσης αερίου,
- η παραγωγή αφαλατωμένου νερού,
- η κατασκευή βελτιωμένων συστημάτων εκμετάλλευσης των φυσικών πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, γεωθερμική).

Η *τεχνική θερμοδυναμική*, ασχολείται με βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά μηχανών και μηχανημάτων, όπως ΜΕΚ, στρόβιλοι, λέβητες, αεροσυμπιεστές, ψυκτικές και κλιματιστικές εγκαταστάσεις κλπ, στα οποία μετατρέπεται η ενέργεια για να επιτευχθεί κάποιος συγκεκριμένος σκοπός.



## 1.2. ΤΡΟΠΟΣ ΕΞΕΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Είναι γνωστό ότι η ύλη αποτελείται από μεγάλο αριθμό σωματιδίων (μόρια) από τη συμπεριφορά των οποίων εξαρτώνται οι ιδιότητές τους : για παράδειγμα, η πίεση στο εσωτερικό ενός δοχείου είναι αποτέλεσμα της μεταφοράς της ορμής των μορίων στα τοιχώματα του δοχείου.

Όμως δεν είναι απαραίτητη η γνώση της συμπεριφοράς των μορίων του αερίου για να προσδιοριστεί η πίεση στο εσωτερικό του δοχείου, επειδή είναι αρκετή η τοποθέτηση ενός μανόμετρου στο δοχείο.

Αυτή η **μακροσκοπική προσέγγιση** στη μελέτη της θερμοδυναμικής που δεν απαιτεί γνώση της συμπεριφοράς των μορίων της ύλης συνιστά την **ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ**, η οποία παρέχει απλές μεθόδους για την επίλυση των ενεργειακών προβλημάτων.

Μια προσέγγιση περισσότερο σύνθετη κατά την οποία εξετάζεται η μέση συμπεριφορά μεγάλου αριθμού μορίων, είναι στη βάση της **ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**, στην οποία εφαρμόζονται σε μόρια και άτομα οι νόμοι της κλασσικής μηχανικής και της κβαντομηχανικής με τη βοήθεια των οποίων διατυπώνονται σχέσεις με στατιστικές μεθόδους που συνδέουν τις ιδιότητες των μορίων και των ατόμων με τις μακροσκοπικές ιδιότητες της ύλης.

Είναι η **μικροσκοπική προσέγγιση** δηλαδή η μελέτη των ποσοτήτων που περιγράφουν την κατάσταση ατόμων και μορίων τα οποία αποτελούν την ύλη.

## 1.3. ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Τα συστήματα που εξετάζονται και μελετώνται στη θερμοδυναμική, αποτελούνται από ποσότητα ύλης που περικλείεται σε ένα πεπερασμένο όγκο, ο οποίος περιορίζεται από μια επιφάνεια (**όρια ή τοίχωμα**) γεωμετρικά ορισμένη, που διαχωρίζει την ποσότητα αυτή της ύλης από το εξωτερικό περιβάλλον.

Ονομάζεται **ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ**, ή απλώς **ΣΥΣΤΗΜΑ**, μια ορισμένη ποσότητα της ύλης ή οποιαδήποτε υλική περιοχή του χώρου ή το σύνολο των σωμάτων που κάθε φορά ενδιαφέρει την έρευνα και τη διεργασία στην οποία αυτό υποβάλλεται.

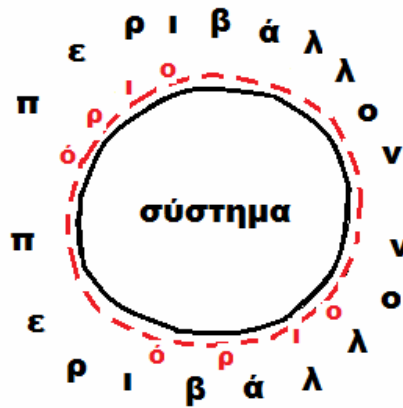
Το μέρος αυτό της ύλης μπορεί να είναι η **μονάδα μάζας το 1 kg** (στο Διεθνές σύστημα μονάδων), ή η **μονάδα βάρους το 1 kp** (στο Τεχνικό σύστημα μονάδων).

Το σύστημα είναι γενικότερη έννοια από το σώμα. Το σύστημα περιλαμβάνει το σώμα, τα όριά του ή ακόμα ένα σύνολο σωμάτων που εξετάζονται ενιαία και υπόκεινται σε κοινούς κανόνες.

Εάν για παράδειγμα θερμανθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού, η μάζα αυτή αποτελεί το **σύστημα**, δεδομένου ότι αυτή υπόκειται στη διεργασία θέρμανσης με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας.

Το σύστημα επομένως είναι μια φυσική οντότητα με μάζα, συνεπώς καταλαμβάνει μια συγκεκριμένη περιοχή και ο,τιδήποτε άλλο έξω από το σύστημα αποτελεί το **ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**.

Το σύστημα διαχωρίζεται από το περιβάλλον του από πραγματικές ή νοητές επιφάνειες που ονομάζονται **ΟΡΙΟ** (φυσικό ή νοητό) του συστήματος.



Σχήμα 1

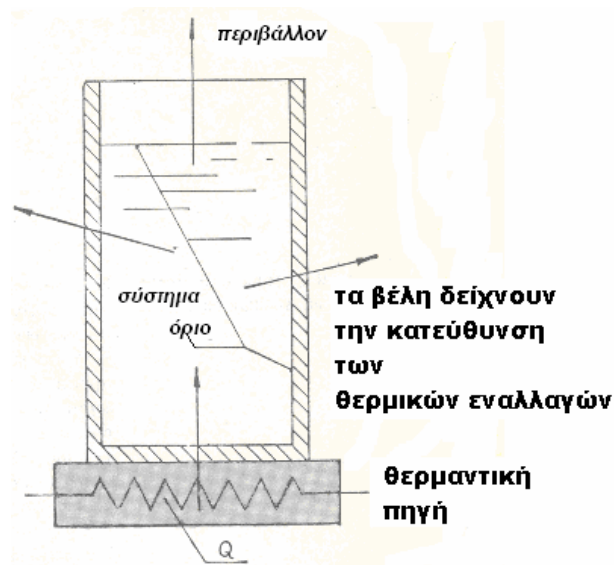
Από μαθηματικής άποψης το όριο του συστήματος έχει μηδενικό πάχος οπότε δεν έχει μάζα ούτε καταλαμβάνει όγκο. Διαμέσου του ορίου του συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθούν ενεργειακές εναλλαγές μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος.

Πρέπει εδώ να γίνει μια **απαραίτητη διευκρίνιση** : το περιβάλλον δεν θεωρείται απεριόριστο. Σαν περιβάλλον θεωρούνται τα σώματα που είναι σε άμεση επαφή με το σύστημα και που έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν τις ενεργειακές εναλλαγές με το σύστημα.

Εάν μια ποσότητα νερού που ευρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο (**σχήμα -2-**) θερμανθεί, τότε η ποσότητα (μάζα) αυτή αποτελεί το ΣΥΣΤΗΜΑ, δεδομένου ότι αυτή υπόκειται στη διαδικασία θέρμανσης με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας. Εδώ το σύστημα (μάζα νερού) έχει σαν όριο το εσωτερικό του δοχείου και την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.

Διαμέσου του ορίου αυτού, το σύστημα δέχεται θερμότητα από το θερμαντικό στοιχείο και αποδίδει θερμότητα στον περιβάλλοντα αέρα με απώλεια από τα τοιχώματα που δεν είναι σε επαφή με το θερμαντικό στοιχείο και δια της ελεύθερης επιφάνειας.

Στην προκείμενη περίπτωση επομένως, περιβάλλον είναι η θερμαντική πηγή και ο αέρας που ευρίσκεται έξω από το δοχείο.



Σχήμα 2



## 1.4. ΑΝΟΙΚΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ και ΚΛΕΙΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Τα θερμοδυναμικά συστήματα κατατάσσονται σε σχέση με τις εναλλαγές της ενέργειας και της ύλης μέσα από τα όριά τους.

Από μια γενική σκοπιά, τα συστήματα διαχωρίζονται σε :

- **κλειστά συστήματα** όταν εναλλάσσεται ενέργεια αλλά όχι ύλη,
- **ανοικτά συστήματα** εάν εναλλάσσεται και ενέργεια και μάζα με το περιβάλλον.
- **απομονωμένα συστήματα** όταν δεν εναλλάσσεται ούτε ενέργεια ούτε μάζα,
- 

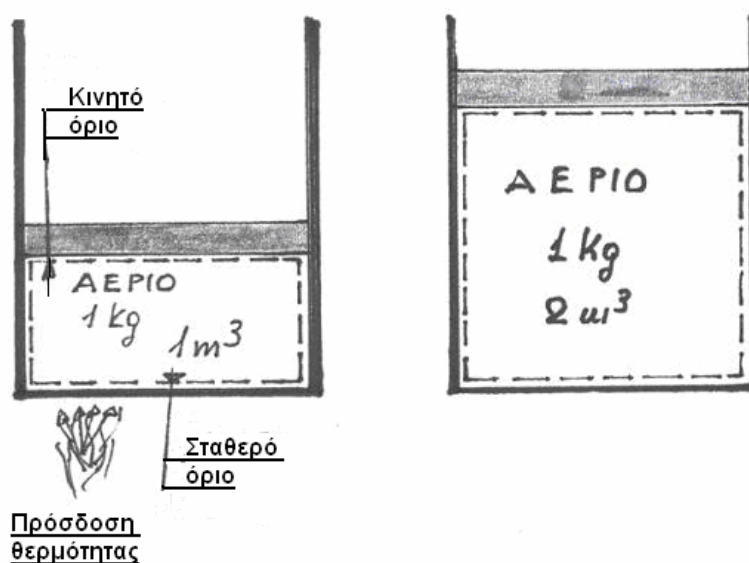
Ένα **κλειστό σύστημα** (ονομάζεται και *μάζα ελέγχου*) αποτελείται από μια συγκεκριμένη ποσότητα ύλης και **χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι τα όρια του συστήματος δεν επιτρέπουν τη διέλευση της ύλης**.

Η ποσότητα επομένως της ύλης (μάζα ή βάρος) που περιέχεται στο σύστημα παραμένει σταθερή, ενώ ο όγκος μπορεί να μεταβάλλεται δηλαδή τα όρια του συστήματος μπορεί να κινούνται.

Ενώ μάζα δεν ανταλλάσσεται μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος, η ενέργεια μπορεί να διαπερνά τα όρια του συστήματος.

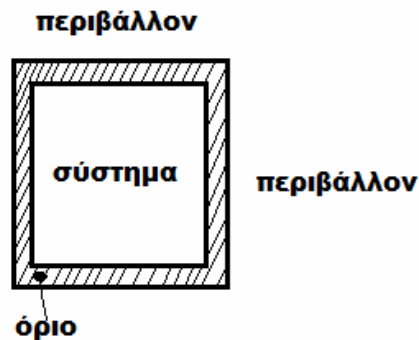
Στο επόμενο **σχήμα 3 α** παρουσιάζεται ένα δοχείο στη μια πλευρά του οποίου προσαρμόζεται ένα κινούμενο έμβολο.

Στο εσωτερικό του δοχείου περιέχεται ποσότητα αερίου και τα όρια του συστήματος συμπίπτουν με την εσωτερική επιφάνεια του κινούμενου εμβόλου. Εδώ τα **όρια** είναι **πραγματικά και κατά ένα μέρος είναι κινητά**.



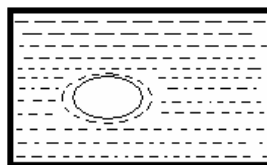
Σχήμα 3 α

Στο επόμενο σχήμα 3β παρουσιάζεται ένα δοχείο με σταθερές όλες τις πλευρές του, στο εσωτερικό του οποίου περιέχεται ποσότητα αερίου που επιλέγεται ως σύστημα.. Η εσωτερική επιφάνεια του δοχείου αποτελεί τα όρια του συστήματος και στην περίπτωση αυτή τα όρια είναι πραγματικά και σταθερά.



Σχήμα 3β

Στο επόμενο σχήμα 3γ επιλέγεται ως σύστημα ένα μόριο του ρευστού που περιέχεται σε ένα δοχείο. Η επιφάνεια του ορίου του συστήματος συμπίπτει με την εξωτερική επιφάνεια του υγρού μορίου. Η επιφάνεια αυτή μπορεί να παραμορφώνεται δεδομένου ότι τα υγρά μόρια κατά την κίνησή τους αλλάζουν σχήμα μέσα στην υγρή μάζα. Στην προκειμένη περίπτωση τα όρια του συστήματος είναι υφή (υποθετικά) και κινούμενα.

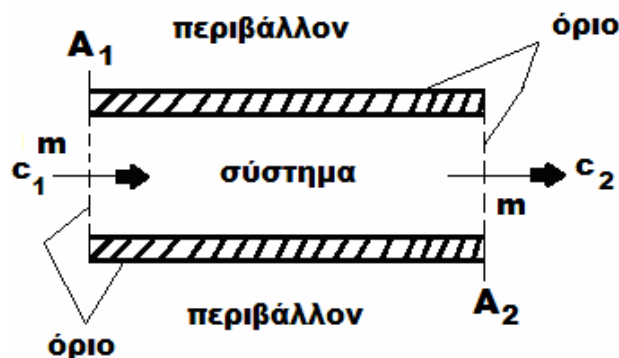


Σχήμα 3γ

Ένα ανοικτό σύστημα (ονομάζεται και όγκος ελέγχου) είναι μια περιοχή του χώρου που οριοθετείται από ένα περίγραμμα που ονομάζεται επιφάνεια ελέγχου, και χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι τα όρια του συστήματος επιτρέπουν τη διέλευση της ύλης.

Στα ανοικτά συστήματα περιλαμβάνονται οι συσκευές που διαπερνώνται από ροή μάζας, όπως οι συμπιεστές, οι στρόβιλοι, τα ακροφύσια. Η ροή μάζας διαμέσου των συσκευών αυτών αναλύεται καλλίτερα θεωρώντας ως όγκο ελέγχου την εσωτερική επιφάνεια της συσκευής.

Σαν παράδειγμα αναφέρεται ένα τμήμα σωλήνα εντός του οποίου ρέει ρευστό : το όριο του συστήματος προσδιορίζεται από το εσωτερικό τοίχωμα της σωλήνας και από τις δύο διατομές  $S_1$  και  $S_2$  (εισόδου και εξόδου αντίστοιχα).

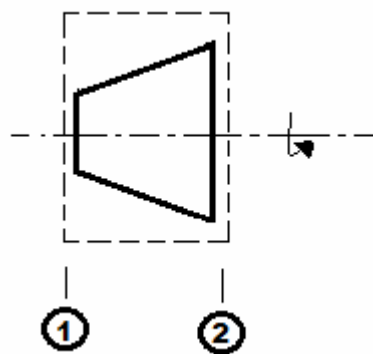


Σχήμα 4

Στο εσωτερικό της σωλήνας το ρευστό ρέει με σταθερή παροχή : δηλαδή όταν μια ορισμένη ποσότητα ( $m$ ) του ρευστού εισέρχεται σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή από τη διατομή εισόδου  $A_1$  μια ίση ποσότητα ( $m$ ) του ρευστού εξέρχεται την ίδια χρονική στιγμή από τη διατομή εξόδου  $A_2$ .

Η ποσότητα ( $m$ ) του συστήματος του ρευστού που περιέχεται εντός του ορίου είναι σταθερή αλλά η ύλη που την αποτελεί ανανεώνεται συνεχώς μέσα από τις διατομές  $A_1$  και  $A_2$  που το επιτρέπουν (παράδειγμα συσκευής με ανάλογη λειτουργία είναι ο θερμοσίφωνας).

Παράδειγμα ανοικτού συστήματος μπορεί να είναι μια μηχανή εκτόνωσης (στροβίλος) , **σχήμα 4α** , όπου μέσα από τις διατομές εισόδου "1" και εξόδου "2" εισέρχεται και εξέρχεται αντίστοιχα ροή μάζας  $\dot{m}$  ( $\text{kg}/\text{sec}$ ) η οποία ενεργεί επί των πτερυγίων του στροβίλου και περιστρέφει τον άξονά του.



Σχήμα 4<sup>α</sup>

Η διακεκομμένη γραμμή αποτελεί το όριο του συστήματος δια μέσου του οποίου εναλλάσσονται το περιβάλλον θερμότητα , έργο και μάζα.

Επομένως ισχύει ο νόμος διατήρησης της μάζας, σύμφωνα με τον οποίο "η μάζα ενός συστήματος παραμένει σταθερή", δηλαδή όση ποσότητα μάζας (= παροχή) εισέρχεται στο σύστημα, τόση και εξέρχεται από αυτό.

$$\dot{m} = \frac{A_1 \cdot c_1}{u_1} = \frac{A_2 \cdot c_2}{u_2}, \text{ όπου :}$$

$$\dot{m} = \text{παροχή μάζας ( μεταβολή της μάζας στο χρόνο = } \frac{dm}{dt} \text{ ) } \left( \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \right)$$

$$A_1 , A_2 = \text{διατομές εισόδου και εξόδου } (m^2)$$

$$c_1 , c_2 = \text{ταχύτητες στην είσοδο και έξοδο } \left( \frac{m}{\text{sec}} \right)$$

$$u_1 , u_2 = \text{ειδικός όγκος } \left( \frac{m^3}{\text{kg}} \right)$$

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ 1** : στα ανοικτά συστήματα τα όρια του συστήματος είναι σταθερά και η εσωτερική επιφάνεια της συσκευής αποτελεί τα πραγματικά όρια, ενώ οι διατομές εισόδου και εξόδου είναι υποθετικά όρια.

Ένα **απομονωμένο** ( ή αποκλεισμένο) σύστημα , ονομάζεται ένα κλειστό σύστημα στο οποίο δεν ανταλλάσσεται ούτε ύλη ούτε ενέργεια διαμέσου των ορίων του με το περιβάλλον του. Ένα απομονωμένο σύστημα είναι απαραίτητα κλειστό ενώ δεν αληθεύει το αντίστροφο.

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ 2** : Οι θερμοδυναμικές σχέσεις που εφαρμόζονται στα ανοικτά και στα κλειστά συστήματα διαφέρουν μεταξύ τους. Είναι επομένως πολύ σημαντικό να προσδιοριστεί σωστά ο τύπος του συστήματος και να καθοριστούν με ακρίβεια τα όρια του με το περιβάλλον του πριν αρχίσει η οποιαδήποτε ανάλυσή του.

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ 3** : είναι σαφές ότι ένα κλειστό σύστημα χαρακτηρίζεται από σταθερή ποσότητα μάζας , αλλά δεν συμβαίνει το αντίθετο, υπό την έννοια ότι ένα σύστημα με σταθερή μάζα δεν είναι κατ'ανάγκη κλειστό. Ως παράδειγμα αναφέρεται ένα ανοικτό σύστημα στο οποίο κάθε χρονική στιγμή η εισερχόμενη μάζα είναι ίση με την εξερχόμενη.

## **1.5. ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

*Ενέργεια*, είναι η ικανότητα ενός σώματος να παράγει έργο και εξαρτάται από τη στιγμιαία φυσική κατάσταση που το σύστημα βρίσκεται.

Όταν ένα σύστημα μεταβεί από μια κατάσταση σε κάποια άλλη, η ενέργεια είναι το άθροισμα των μηχανικών ισοδυνάμων όλων των δράσεων (των ενεργειών) που μπορούν να προκληθούν έξω από το σύστημα κατά την, με οποιοδήποτε τρόπο, μετάβαση.

*Αρα η ενέργεια είναι η ικανότητα που έχει το σύστημα να προκαλέσει εξωτερική δράση.*

Η ενέργεια παρουσιάζεται σε διάφορες μορφές, όπως θερμική, χημική, ηλεκτρική, μαγνητική, πυρηνική, κινητική, δυναμική, **το άθροισμα** δε όλων αυτών **των μορφών αποτελεί την ΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ** του σώματος.

Στη θερμοδυναμική, εξετάζονται οι μεταβολές της ολικής ενέργειας που έχουν σημασία στα ενεργειακά προβλήματα και δεν ενδιαφέρει η απόλυτη τιμή της ολικής ενέργειας.

Η ενέργεια μπορεί να μετατρέπεται από μια μορφή σε κάποια άλλη, είτε εξ ολοκλήρου, είτε μερικώς, όμως κατά τη μετατροπή αυτή, η συνολική ποσότητα ενέργειας δεν μεταβάλλεται αλλά παραμένει σταθερή και αυτή είναι η **ΑΡΧΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ** (νόμος αφθαρσίας) της ενέργειας.

Στη θερμοδυναμική ανάλυση είναι χρήσιμη η κατάταξη των διαφόρων μορφών ενέργειας που συνθέτουν την ολική ενέργεια ενός συστήματος σε δύο κατηγορίες :

- **μακροσκοπικές** = δηλαδή οι μορφές ενέργειας που ένα σύστημα έχει στο σύνολό του ως προς ένα σύστημα αναφοράς, όπως η δυναμική και η κινητική ενέργεια
- **μικροσκοπικές** = ενέργειες που σχετίζονται με τη μοριακή σύνθεση του σώματος και είναι ανεξάρτητες από το εξωτερικό σύστημα αναφοράς του συστήματος.

**Το άθροισμα των μικροσκοπικών μορφών ενέργειας, αποτελεί την ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.**

**Η ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ** αποτελείται :

- **μερικώς από την κινητική ενέργεια των μορίων** που κινούνται ακατάστατα στα αέρια και υγρά συστήματα ή εκτελούν κυμάνσεις στα στερεά. Η μέση ταχύτητα και η δραστηριότητα (κινήσεις) των μορίων είναι ανάλογη με τη θερμοκρασία οπότε όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία μεταβάλλεται η κινητική ενέργεια των μορίων οπότε μεταβάλλεται και η εσωτερική ενέργεια.
- **μερικώς από τη δυναμική ενέργεια των μορίων** λόγω των ελκτικών δυνάμεων που επιδρούν μεταξύ τους. Το μέγεθος των δυνάμεων αυτών αποτελεί συνάρτηση των μαζών των μορίων και της μεταξύ τους απόστασης. Άρα, εάν σε ένα σύστημα χορηγηθεί ποσότητα ενέργειας θα

μεταβληθεί η απόσταση μεταξύ των μορίων, με συνέπεια να μεταβληθεί η εσωτερική ενέργεια του συστήματος. Αυτή η μεταβολή είναι εμφανής όταν το σύστημα αλλάζει φάση, όπως κατά τη διαδικασία ατμοποίησης του νερού, όπου απαιτείται σημαντικό ποσό ενέργειας, το οποίο αποθηκεύεται ως εσωτερική ενέργεια στον υδρατμό.

Η μακροσκοπική ενέργεια ενός συστήματος σχετίζεται με την κίνηση και την επίδραση εξωτερικών παραγόντων όπως είναι η βαρύτητα, ο μαγνητισμός, ο ηλεκτρισμός και η επιφανειακή τάση.

**Ένα σύστημα ως προς ένα σύστημα αναφοράς :**

- **όταν κινείται**, έχει ενέργεια η οποία ονομάζεται κινητική ενέργεια και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση :

$$\text{ολική ενέργεια } E_{κιν.} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot w^2 \text{ (J) και για μονάδα μάζας : } e_{κιν.} = \frac{1}{2} \cdot (1\text{kg}) \cdot w^2 = \frac{1}{2} w^2 \left( \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right)$$

- **εξ αιτίας υψομετρικής διαφοράς**, έχει δυναμική ενέργεια η οποία δίδεται από τη σχέση :

$$\text{ολική ενέργεια } E_{δυν.} = m \cdot g \cdot z \text{ (J) και για μονάδα μάζας : } e_{δυν.} = (1\text{ kg}) \cdot g \cdot z \text{ (J) = } g \cdot z \left( \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right)$$

όπου  $z = h_2 - h_1$  υψομετρική διαφορά

Σε ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων εξετάζονται και η μαγνητική ενέργεια, η ηλεκτρική ενέργεια καθώς και η επιφανειακή τάση.

Θεωρώντας αμελητέες αυτές τις μορφές ενέργειας (στην παρούσα ανάλυση δεν ενδιαφέρουν), η **ολική ενέργεια** δίδεται από την :

$$E_{ολ.} = E_{κιν.} + E_{δυν.} + U = \left[ \frac{1}{2} \cdot m \cdot w^2 + m \cdot g \cdot z + U \right] (J)$$

και **για μονάδα μάζας** είναι :  $e_{ολ.} = e_{κιν.} + e_{δυν.} + u = \left[ \frac{1}{2} \cdot w^2 + g \cdot z + u \right] \left( \frac{J}{kg} \right)$

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ** : για συνολική ποσότητα χρησιμοποιούνται τα κεφαλαία γράμματα , για ποσότητες ανά μονάδα συστήματος (μάζα ή βάρος) χρησιμοποιούνται μικρά γράμματα.

### **Η προαναφερόμενη κατηγοριοποίηση της ενέργειας, πρέπει να εξηγηθεί περισσότερο.**

Χρειάζεται να γίνει σαφής διαχωρισμός μεταξύ της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο εσωτερικό του συστήματος, και των μορφών της ενέργειας που παρουσιάζονται μόνο κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας.

### **Έτσι οι μορφές της ενέργειας κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες :**

- **Ενέργεια συστήματος**, όπου περιλαμβάνονται η **εξωτερική ενέργεια** (δυναμική και κινητική του συστήματος ως προς ένα σύστημα αναφοράς) και η **εσωτερική ενέργεια** ( το άθροισμα των μικροσκοπικών μορφών ενέργειας που σχετίζονται με τη μοριακή σύνθεση του σώματος , όπως παραπάνω έχει εξηγηθεί)
- **Ενέργεια διεργασιών** , όπου περιλαμβάνονται οι μορφές ενέργειας που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση του συστήματος με το περιβάλλον του και υπάρχουν όσο επιτελείται η διεργασία , μετά δε το πέρας αυτής παύουν να υπάρχουν. Αποτέλεσμα της μεταφοράς αυτών των ενεργειών είναι η δημιουργία μεταβολών στο περιεχόμενο ενέργειας του συστήματος.

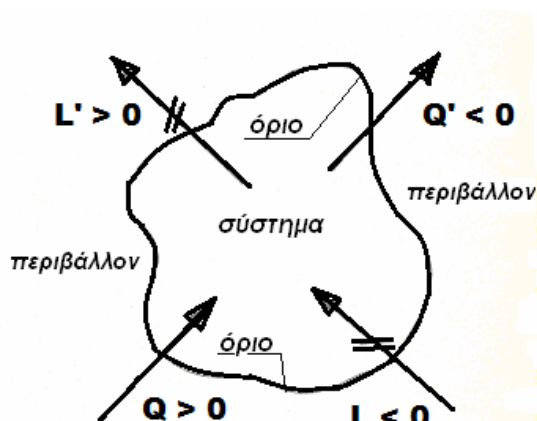


## 1.6. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΕΝΑΛΛΑΓΕΣ

Μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος πραγματοποιούνται ενεργειακές εναλλαγές, οι οποίες μπορούν να γίνουν προς δύο κατευθύνσεις :

- από το σύστημα προς το περιβάλλον
- από το περιβάλλον στο σύστημα

Αυτές οι εναλλαγές είναι είτε εναλλαγές θερμότητας  $Q$  είτε εναλλαγές έργου  $L$  (θερμότητα και έργο αναλύονται σε επόμενες παραγράφους) και επειδή μπορεί να γίνονται κατά δυο κατευθύνσεις, ορίζεται ένα αλγεβρικό πρόσημο, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα :



Σχήμα 5

Διαμέσου του ορίου του συστήματος πραγματοποιούνται οι ενεργειακές εναλλαγές με το περιβάλλον με την παρακάτω σύμβαση προσήμου :

- θερμική εναλλαγή : εάν η **θερμότητα** ρέει ΑΠΟ το περιβάλλον ΣΤΟ σύστημα θεωρείται **ΘΕΤΙΚΗ**  
εάν η **θερμότητα** ρέει ΑΠΟ το σύστημα ΣΤΟ περιβάλλον θεωρείται **ΑΡΝΗΤΙΚΗ**
- εναλλαγή έργου : εάν το **έργο** εκτελείται ΑΠΟ το περιβάλλον ΣΤΟ σύστημα θεωρείται **ΑΡΝΗΤΙΚΟ**  
εάν το **έργο** εκτελείται ΑΠΟ το σύστημα ΣΤΟ περιβάλλον θεωρείται **ΘΕΤΙΚΟ**

Σημειώνεται ότι :

- A.** όταν η θερμότητα και το έργο αναφέρονται στο σύνολο του θερμοδυναμικού συστήματος, παριστάνονται με κεφαλαία γράμματα :  $Q, L$ .
- B.** όταν η θερμότητα και το έργο αναφέρονται στη μονάδα του θερμοδυναμικού συστήματος, παριστάνονται με μικρά γράμματα :  $q, l$

Ανάλογα με το σύστημα μονάδων είναι :

**ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΑΔΩΝ**

ΕΡΓΟ : σύνολο συστήματος : .....	$L$ (KJoule) ή (Joule)
ανά μονάδα μάζας συστήματος : .....	$\ell$ (KJoule/kg) ή (Joule/kg)
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ : σύνολο συστήματος : .....	$Q$ (KJoule) ή (Joule)
ανά μονάδα βάρους συστήματος : ....	$q$ (KJoule/kg) ή (Joule/kg)

**ΤΕΧΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΝΑΔΩΝ**

ΕΡΓΟ : σύνολο συστήματος : .....	$L$ (Kp·m)
ανά μονάδα βάρους συστήματος : .....	$\ell$ (Kp·m/kgp)
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ : σύνολο συστήματος : .....	$Q$ (Kcal)
ανά μονάδα βάρους συστήματος : .....	$q$ (Kcal/kgp)

**1.7. Σκοπός της Θερμοδυναμικής – Ιδιότητες Θερμοδυναμικού Συστήματος**

Κάθε φυσική ιδιότητα, εκφράζεται με ένα συγκεκριμένο μέγεθος (και μετριέται με συγκεκριμένες μονάδες) όπως :

ΠΙΕΣΗ 'P', ΟΓΚΟΣ 'V', ΜΑΖΑ 'M', ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 'T', ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ 'U', ΕΝΤΡΟΠΙΑ 'S', ΕΝΘΑΛΠΙΑ 'H'.

Αναφέρονται επίσης, η πυκνότητα, η θερμική αγωγιμότητα, το μέτρο ελαστικότητας, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, η ταχύτητα.

Η διερεύνηση ενός συστήματος έχει σαν στόχο τον προσδιορισμό των φυσικών του ιδιοτήτων, μερικές από τις οποίες διαπιστώνονται πειραματικά και ονομάζονται θερμοδυναμικές ιδιότητες ή θερμοδυναμικές μεταβλητές ή θερμοδυναμικές συντεταγμένες, του θερμοδυναμικού συστήματος.

Αυτές οι ιδιότητες στις περισσότερες τεχνικές εφαρμογές μπορεί να θεωρηθούν εξαρτώμενες από την κατάσταση του συστήματος σε μια δεδομένη στιγμή, και όχι από τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα έφθασε στη συγκεκριμένη κατάσταση.

Κατά τη διάρκεια ενός συμβάντος σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα, ορισμένες φυσικές ιδιότητες μεταβάλλονται και άλλες παραμένουν σταθερές :

**ο προσδιορισμός των μεταβλητών αποτελεί το βασικό σκοπό μιας θερμοδυναμικής διερεύνησης.**

**Όταν οι μεταβλητές αυτές πάρουν σταθερές τιμές, τότε το θερμοδυναμικό σύστημα βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση, η οποία φυσικά χαρακτηρίζεται από τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος σε αυτή την κατάσταση και τότε αυτές ονομάζονται ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ (= συγκεκριμένη αριθμητική τιμή), επειδή ακριβώς προσδιορίζουν θερμοδυναμικά τη συγκεκριμένη κατάσταση ισορροπίας του συστήματος.**

Κάθε μια ιδιότητα  $Y$  ενός συστήματος μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση των συντεταγμένων  $X_1, X_2, \dots, X_n$  που η κάθε μια εκφράζει και μι αφυσική ιδιότητα :

$$Y = \varphi(X_1, X_2, \dots, X_n) \text{ ή } \Phi(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$$

δηλαδή μια ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ, μια σχέση η οποία προσδιορίζει μαθηματικά τη σχέση των ιδιοτήτων ενός συστήματος όταν ευρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας και μάλιστα θερμοδυναμικής ισορροπίας όταν εξετάζονται από την άποψη των στόχων της θερμοδυναμικής, δηλαδή τον προσδιορισμό των μεταβλητών  $P, V, T, U, I, S$ .

Οι ιδιότητες ενός συστήματος δεν είναι όλες ανεξάρτητες από άλλες, επειδή αρκετές από αυτές ορίζονται σε συνάρτηση με άλλες ιδιότητες.

Αναφέρεται ως παράδειγμα η πυκνότητα η οποία ορίζεται ως η μάζα ανά μονάδα όγκου :

$$\rho = \frac{m}{V} \left( \frac{kg}{m^3} \right)$$

Πολλές φορές η πυκνότητα εκφράζεται σε σχέση με την πυκνότητα μιας γνωστής ουσίας η οποία ευρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση, συνήθως δε γίνεται αναφορά στο νερό θερμοκρασίας  $4^\circ C$  και πίεσης  $101.325 \text{ Pa}$  (=  $101,326 \text{ kPa} = 1 \text{ atm} = 1,01325 \text{ bar}$ ) του οποίου η πυκνότητα είναι

$$\rho_0 = 1000 \left( \frac{kg}{m^3} \right).$$

Έτσι ορίζεται η **ΣΧΕΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ**, ως  $\rho_{σχ.} = \frac{\rho}{\rho_0}$ , ένα μέγεθος αδιάστατο η αριθμητική τιμή του οποίου είναι ανεξάρτητη του συστήματος μονάδων που χρησιμοποιείται κάθε φορά στις εφαρμογές.

Οι ιδιότητες ενός θερμοδυναμικού συστήματος διακρίνονται σε :

- **εντατικές**, εκείνες που δεν εξαρτώνται από τις διαστάσεις του συστήματος, όπως είναι η θερμοκρασία  $T$ , η πίεση  $p$ , η πυκνότητα  $\rho$ .
- **εκτατικές**, εκείνες που εξαρτώνται από τις διαστάσεις του συστήματος, όπως η μάζα  $m$ , ο όγκος  $V$ , η ενέργεια  $E$ , ενθαλπία  $H$ .

Ένα σύστημα μπορεί να διαιρεθεί σε μικρότερα συστήματα τα οποία χαρακτηρίζονται από καταστατικά μεγέθη.

Όσα από τα καταστατικά μεγέθη διατηρούν την ίδια τιμή σε όλα τα μικρότερα συστήματα, είναι τα **εντατικά μεγέθη** (θερμοκρασία, πίεση) και είναι **ανεξάρτητα από την ποσότητα (μάζα, βάρος) του συστήματος**.

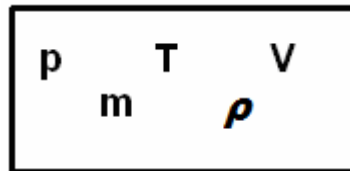
Τα καταστατικά μεγέθη τα οποία επιμερίζονται στα μικρότερα συστήματα, **εξαρτώνται** δηλαδή **από την ποσότητα (μάζα, βάρος) του συστήματος** ονομάζονται **εκτατικά μεγέθη** (όγκος  $V$ , εσωτερική ενέργεια  $U$ , εντροπία  $S$ ).

Εάν για παράδειγμα ένα σύστημα χωριστεί σε τρία μέρη, τότε :

Η μάζα και ο όγκος χωρίζονται σε 1/3 : εκτατικά μεγέθη.

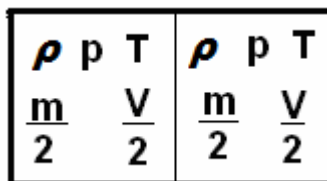
Η πίεση, η θερμοκρασία, η πυκνότητα παραμένουν στην ίδια τιμή που είχαν στο ενιαίο σύστημα : εντατικά μεγέθη.

Στο επόμενο σχήμα ένα σύστημα περιέχεται σε δοχείο και χαρακτηρίζεται από τις τιμές της πίεσης, θερμοκρασίας, όγκου, μάζας, πυκνότητας



1  
Σχήμα 6

Εάν το δοχείο χωριστεί σε δύο ίσα μέρη με ένα τοίχωμα τόσο λεπτό ώστε να θεωρείται αμελητέου πάχους, η πίεση η θερμοκρασία και η πυκνότητα εξακολουθούν να έχουν την ίδια τιμή, ενώ οι ιδιότητες που περιγράφουν την ποσότητα του συστήματος έχουν σε κάθε ένα από τα δύο μέρη τη μισή της αρχικής τιμής :



Σχήμα 7

**Είναι :** ΠΙΕΣΗ '**p**', ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ '**T**' ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ '**ρ**' = .....  
εντατικά μεγέθη (δηλαδή διατηρούν την ίδια τιμή σε όλα τα μικρότερα συστήματα

ΟΓΚΟΣ '**V**', ΜΑΖΑ '**m**', ΕΝΕΡΓΕΙΑ **E**, ΕΝΘΑΛΠΙΑ **H** = .....  
εκτατικά μεγέθη (δηλαδή επιμερίζονται στα μικρότερα συστήματα

Σε πολλές εφαρμογές της θερμοδυναμικής δεν έχει σημασία τόσο το μέγεθος των ποσοτήτων του συστήματος, ενώ ενδιαφέρει η εντατική κατάσταση και τα εντατικά μεγέθη είναι χρήσιμα στην πινακοποίηση πειραματικών και υπολογιστικών δεδομένων.

### Ειδικά μεγέθη

Στην περίπτωση αυτή, αντί των εκτατικών μεγεθών χρησιμοποιούνται τα **ΕΙΔΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ** ,  
δηλαδή μεγέθη που αναφέρονται στη μονάδα του συστήματος .

Γενικά το ειδικό μέγεθος **φ** προκύπτει από το εκτατικό μέγεθος **Φ** διαιρώντας με τη μάζα ή το βάρος :

$$\varphi = \frac{\Phi}{m} \quad \text{ή} \quad \left( \frac{\Phi}{B} \right)$$

Η εισαγωγή των ειδικών μεγεθών χρειάζεται ώστε η εξέταση των θερμοδυναμικών φαινομένων να αναφέρεται στη μονάδα του συστήματος , είτε πρόκειται για μονάδα μάζας είτε για μονάδα βάρους του θερμοδυναμικού συστήματος , ανάλογα με το σύστημα μονάδων που κάθε φορά επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί.

Ως παράδειγμα αναφέρεται ο **ΕΙΔΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ** που ορίζεται ως ο όγκος ανά μονάδα μάζας (ή βάρους) :

$$v = \frac{V}{m} \left( \frac{m^3}{kg} \right) \quad \text{ή} \quad v = \frac{V}{B} \left( \frac{m^3}{kp} \right)$$

Ο ειδικός όγκος υπολογίζεται και όταν είναι γνωστός ο **μοριακός όγκος**  $\left( \frac{m^3}{mole} \right)$  (= όγκος που ένα μόριο αερίου καταλαμβάνει στις συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Σύμφωνα με το νόμο του Avogadro ο όγκος αυτός είναι σταθερός και σε θερμοκρασία 0<sup>ο</sup> C και πίεση 760 mmHg ισούται με 22,414  $\frac{m^3}{mole}$  ) και **το μοριακό βάρος**  $\left( \frac{kp}{mole} \right)$ .

Εάν είναι γνωστός ο μοριακός όγκος και τομοριακό βάρος , είναι :

$$\frac{\nu \left( \frac{m^3}{mole} \right)}{\mu \left( \frac{kp}{mole} \right)} = v \left( \frac{m^3}{kp} \right)$$

**Τα ειδικά καταστατικά μεγέθη είναι ανεξάρτητα από τη μάζα του συστήματος και επομένως είναι και εντατικά μεγέθη.**

## 1.8. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Η έννοια της θερμοκρασίας προέρχεται από την ποιοτική εντύπωση του ζεστού και του κρύου, όπως αυτή προσδιορίζεται από την αίσθηση της αφής.

Η πρόταση αυτή είναι αρκετά ασαφής και οι αισθήσεις μπορεί να είναι παραπλανητικές. Υπάρχουν όμως πολλές ιδιότητες της ύλης που μπορεί να μετρηθούν και που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Είναι, για παράδειγμα, το μήκος μιας μεταλλικής ράβδου, η πίεση ατμού σε έναν ατμολέβητα, η ικανότητα ενός σύρματος να άγει ηλεκτρικό ρεύμα, το χρώμα ενός πυρακτωμένου αντικειμένου.

Η θερμοκρασία, είναι το μέτρο του ζεστού και του κρύου ως προς κάποια κλίμακα μέτρησης.

Η θερμοκρασία είναι η ιδιότητα ενός θερμοδυναμικού συστήματος με βάση την οποία διαπιστώνεται εάν το θερμοδυναμικό σύστημα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με άλλα θερμοδυναμικά συστήματα ή όχι, ή ακόμα, η θερμοκρασία ορίζεται σαν η ιδιότητα του θερμοδυναμικού συστήματος να μπορεί να μεταφέρει ενέργεια με τη μορφή θερμότητας και ακτινοβολίας.

Όταν δηλαδή ένα σύστημα (σώμα) έρχεται σε επαφή με ένα άλλο διαφορετικής θερμοκρασίας, διαπιστώνεται μεταφορά ποσού θερμότητας από το σύστημα υψηλότερης θερμοκρασίας σε εκείνο με χαμηλότερη θερμοκρασία και η μεταφορά αυτή διαρκεί έως ότου τα δύο συστήματα αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία. Τότε τα δύο συστήματα ευρίσκονται σε **θερμική ισορροπία**.

Διατυπώνεται λοιπόν το **μηδενικό αξίωμα της θερμοδυναμικής** σύμφωνα με το οποίο δύο συστήματα (σώματα) που το κάθε ένα ευρίσκεται σε θερμική ισορροπία με ένα τρίτο, τότε ευρίσκονται σε θερμική ισορροπία και μεταξύ τους.

Παρά το γεγονός ότι αυτή η προφανής διαπίστωση αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη θερμοδυναμικά αξιώματα, σημειώνεται ότι δεν προκύπτει από τα άλλα θερμοδυναμικά αξιώματα και είναι η βάση για τη μέτρηση της θερμοκρασίας.

Εάν το τρίτο σύστημα αντικατασταθεί από ένα θερμόμετρο το μηδενικό αξίωμα της θερμοδυναμικής μπορεί να επαναδιατυπωθεί ως εξής :

**δύο συστήματα ακόμα και εάν δεν είναι σε επαφή μεταξύ τους, ευρίσκονται σε θερμική ισορροπία εάν έχουν την ίδια θερμοκρασία στη μέτρηση ενός θερμομέτρου.**

Το μηδενικό αξίωμα της θερμοδυναμικής διατυπώθηκε από τον R.H.Fowler το 1931 μετά από το πρώτο και δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα και ονομάστηκε έτσι επειδή έπρεπε να προηγείται των άλλων δύο.

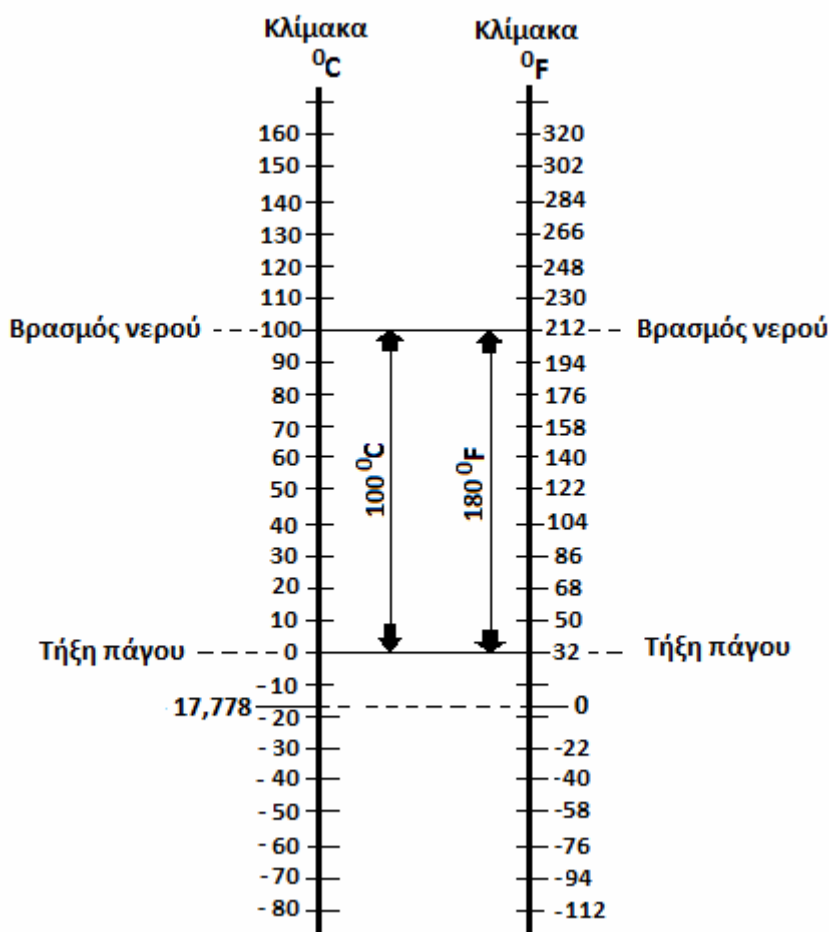
Η θερμοκρασία μετριέται με θερμόμετρα τα οποία έχουν βαθμονομημένη κλίμακα.

Η κλίμακα θερμοκρασιών **ΚΕΛΣΙΟΥ**, ή εκατονταβάθμια κλίμακα, δηλαδή η βαθμονόμηση ενός θερμομέτρου, όπου αντιστοιχεί η ένδειξη "μηδέν" στη θέση της επιφάνειας του υγρού μέσα στον τριχοειδή σωλήνα όταν το θερμόμετρο βρίσκεται σε παγωμένο καθαρό νερό, και την ένδειξη "εκατό" όταν βρίσκεται σε καθαρό νερό που βράζει. Διαιρώντας την απόσταση μεταξύ των δύο ενδείξεων σε 100 ίσα διαστήματα που ονομάζονται "βαθμοί", δημιουργείται η προαναφερόμενη κλίμακα μέτρησης της θερμοκρασίας. Θερμοκρασίες καταστάσεων που είναι πιο κρύες από το παγωμένο νερό περιγράφονται από αρνητικές ενδείξεις.



Η κλίμακα θερμοκρασιών **ΦΑΡΕΝΑΪΤ (FAHRENHEIT)** στην οποία η θερμοκρασία του παγωμένου νερού τοποθετείται στους  $32^{\circ}\text{F}$  και εκείνη του νερού που βράζει στους  $212^{\circ}\text{F}$  και οι δύο σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Μεταξύ πήξης και βρασμού του νερού μεσολαβούν 180 βαθμοί, σε αντίθεση με τους 100 βαθμούς της κλίμακας Κελσίου. Άρα, ένας βαθμός Φαρενάιτ αντιστοιχεί σε μεταβολή θερμοκρασίας ίση με τα  $100 / 180$ , ή  $5 / 9$  εκείνης του ενός βαθμού Κελσίου, ή ένας βαθμός Κελσίου ισούται με 1,8 βαθμούς Φαρενάιτ.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η αντιστοιχία των δύο κλιμάκων θερμοκρασίας :



### Μετατροπή θερμοκρασίας :

- από θερμοκρασίες Κελσίου σε θερμοκρασίες Φαρενάιτ :

$$T_F = \frac{180}{100} \cdot C + 32 = \frac{9}{5} \cdot C + 32 = 1,8 \cdot C + 32$$

- από θερμοκρασίες Φαρενάιτ σε θερμοκρασίες Κελσίου :

$$T_C = (T_F - 32) \cdot \frac{100}{180} = (T_F - 32) \cdot \frac{5}{9}$$

**Κλίμακα KELVIN**

Η πίεση ενός αερίου αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Ένα θερμόμετρο για αυτή τη χρήση κατασκευάζεται έτσι ώστε η λειτουργία του να βασίζεται σε αυτή τη συμπεριφορά.

Για τη βαθμονόμηση ενός τέτοιου θερμομέτρου σταθερού όγκου, μετριέται η πίεση σε δύο θερμοκρασίες, π.χ.  $0^{\circ}\text{C}$  και  $100^{\circ}\text{C}$ , τοποθετούνται τα σημεία σε ένα διάγραμμα, χαράσσεται μια ευθεία γραμμή δια των σημείων αυτών και στη συνέχεια είναι δυνατή η ανάγνωση της θερμοκρασίας που αντιστοιχεί σε οποιαδήποτε άλλη πίεση.

Επεκτείνοντας την ευθεία αυτή γραμμή (δες σελ.67) υπάρχει μια υποθετική θερμοκρασία στην οποία η πίεση του αερίου θα έπρεπε να είναι μηδέν, και ενώ θα περίμενε κανείς αυτή η θερμοκρασία να είναι διαφορετική για διαφορετικά αέρια, προκύπτει ότι είναι η ίδια και ίση προς  $-273,15^{\circ}\text{C}$ , για ένα πλήθος διαφορετικών αερίων, τουλάχιστον στο όριο πολύ χαμηλής πυκνότητας.

Στην πραγματικότητα, δεν είναι δυνατό να παρατηρηθεί αυτή η κατάσταση μηδενικής πίεσης, τα αέρια υγροποιούνται και στερεοποιούνται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, και η σχέση αναλογίας μεταξύ πίεσης και θερμοκρασίας παύει να ισχύει.

Αυτή η θερμοκρασία που αντιστοιχεί σε μηδενική πίεση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το "μηδέν" μιας νέας κλίμακας θερμοκρασιών.

Αυτή είναι η κλίμακα θερμοκρασιών KELVIN. Η κλίμακα αυτή έχει ένα απόλυτο "μηδέν" που δεν υπάρχουν θερμοκρασίες κάτω από αυτό, έτσι αποφεύγεται η σχετικότητα στη μέτρηση των θερμοκρασιών.

Οι μονάδες της κλίμακας KELVIN, έχουν το ίδιο μέγεθος με αυτές της κλίμακας Κελσίου, αλλά το μηδέν της, είναι μετατοπισμένο έτσι ώστε :

$$0\text{ K} = -273,15^{\circ}\text{C} \text{ και } 273,15\text{ K} = 0^{\circ}\text{C} \quad T_{\text{K}} = T_{\text{C}} + 273,15$$

**Στις Σκανδιναβικές χώρες και Ολλανδία**, χρησιμοποιείται η κλίμακα ΡΕΩΜΥΡΟΥ στην οποία είναι :

0 = όταν ο πάγος λειώνει      80 = όταν το νερό βράζει.

**Στο Αγγλικό σύστημα** η κλίμακα θερμοκρασίας είναι η **κλίμακα Rankine**, η μονάδα μέτρησης συμβολίζεται με **R** και είναι :

$$T(R) = T(^{\circ}\text{F}) + 459,67$$

$$T(R) = 1,8 \cdot T(K) \quad , \quad T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 \cdot T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

**ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ**

Ο ατμοσφαιρικός αέρας θερμαίνεται αφ' ενός μεν από τις ηλιακές ακτίνες που τον διαπερνούν και αφ' ετέρου από τη επιφάνεια του εδάφους που θερμαίνεται επίσης από την ηλιακή ακτινοβολία πολύ όμως ισχυρότερα του αέρα. Για το λόγο αυτό τα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας είναι θερμότερα των υπερκείμενων στρωμάτων.

Η ένταση αυτή της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους, είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος (κάθετα) του ήλιου.

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας **ελαττώνεται κατά 0,64 (°C) κάθε 100 μέτρα** και αυτή η ελάττωση λέγεται **κατακόρυφη θερμοβαθμίδα**.

Εάν στην επιφάνεια της ξηράς η θερμοκρασία είναι 20 (°C), τότε σε ύψος 1000 μέτρων η θερμοκρασία

$$\text{είναι : } 20 \text{ (}^\circ\text{C)} - \frac{0,64 \text{ (}^\circ\text{C)}}{100 \text{ (m)}} \times 1000 \text{ (m)} = 13,6 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

## 1.9. ΠΙΕΣΗ

Η πίεση είναι η δύναμη που ασκείται από ένα ρευστό ανά μονάδα επιφάνειας . **Πίεση** αναφέρεται στην **περίπτωση αερίων και υγρών**, ενώ στα **στερεά** το **αντίστοιχο μέγεθος** είναι η **τάση**.

Όταν ένα υγρό ευρίσκεται σε ηρεμία η πίεση σε ένα σημείο του υγρού είναι η ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις.

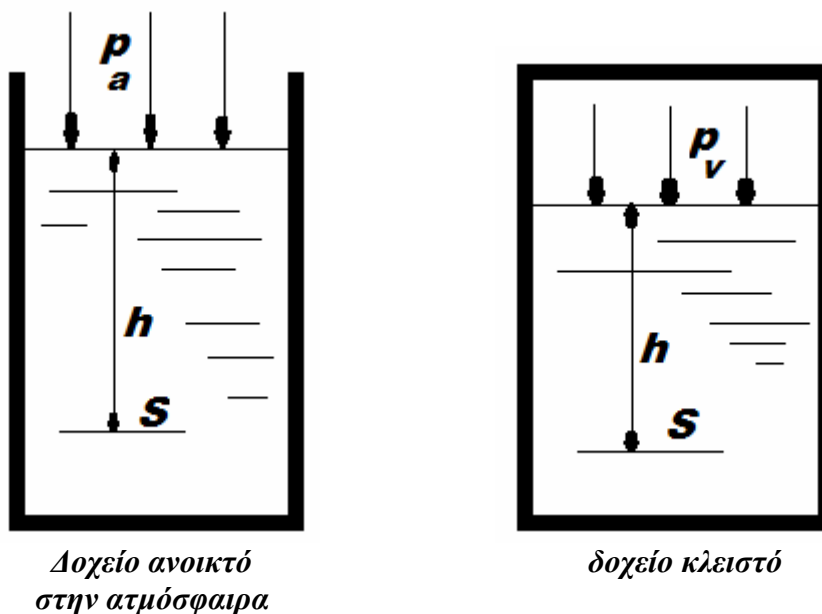
Σε ένα **δοχείο με υγρό** ή σε μια δεξαμενή, η πίεση αυξάνεται με το βάθος και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα κατώτερα υγρά στρώματα υπόκεινται το βάρος των υπερκείμενων υγρών στρωμάτων. Η πίεση μεταβάλλεται κατακόρυφα υπό την επίδραση της βαρύτητας και παραμένει σταθερή κατά την οριζόντια διεύθυνση.

### Υδροστατική πίεση

Πριν γίνει αναφορά στη μέτρηση της πίεσης, υπενθυμίζεται η έννοια της **υδροστατικής πίεσης** , εξετάζοντας ένα παράδειγμα με υγρό σε δοχείο, δεδομένου ότι στα υγρά η υδροστατική πίεση έχει πρωταρχική σημασία.

Έστω ένα δοχείο που περιέχει υγρό με ειδικό βάρος  $\gamma$ .

Εάν το δοχείο είναι ανοικτό στην ατμόσφαιρα, στο υγρό ασκείται η ατμοσφαιρική πίεση, ενώ εάν είναι κλειστό ασκείται η πίεση του αέρα που ευρίσκεται πάνω από το υγρό.



Σχήμα 8

Σε βάθος κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια επί μιας στοιχειώδους επιφάνειας  $S$  ασκούνται οι παρακάτω δυνάμεις :

- $p_a \cdot S$  , εάν  $p_a$  είναι η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια
- $h \cdot \gamma \cdot S$  ίση με το βάρος της υγρής στήλης πάνω από την στοιχειώδη επιφάνεια  $S$ .

Η πίεση είναι επομένως : 
$$p = \frac{p_a \cdot S + h \cdot \gamma \cdot S}{S} = p_a + h \cdot \gamma$$

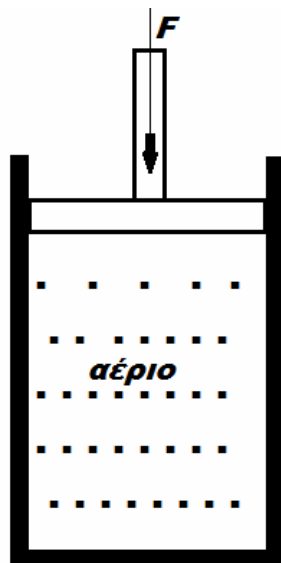
Ο δεύτερος όρος ( $h \cdot \gamma$ ) ονομάζεται **υδροστατική πίεση**, και εξαρτάται από το είδος του υγρού και από το βάθος στο οποίο υπολογίζεται.

Εάν δηλαδή σε υγρό εξασκηθεί πίεση  $p_1$  αυτή μεταφέρεται σε όλο το υγρό και γίνεται αισθητή σε όλα τα τοιχώματα του δοχείου που το περιέχει , ανάλογα δε με το βάθος στο οποίο μετρείται η πίεση , αναπτύσσεται η πίεση  $p - p_1 = \gamma \cdot h = \rho \cdot g \cdot h$  .

Η πίεση που ασκείται στο υγρό οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας , μια μεταβολή όμως πολύ μικρή.

Στην πράξη επομένως παραλείπεται αυτή η πολύ μικρή μεταβολή της πυκνότητας και **τα υγρά θεωρούνται ασυμπίεστα**.

Έστω κύλινδρος με έμβολο με πλήρη εφαρμογή στα τοιχώματα, γεμάτος με αέριο. Η πίεση στο εσωτερικό του δοχείου (όταν δε εξασκείται καμμία δύναμη στο έμβολο) μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ομοιόμορφα κατανεμημένη δεδομένου ότι το πολύ ελαφρύ αέριο δεν δημιουργεί αισθητή διαφορά πίεσης .



Σχήμα 9

Εφαρμόζοντας μία δύναμη  $F$  επί του εμβόλου, το αέριο συμπιέζεται.

Εάν  $A$  είναι το εμβαδόν της διατομής του εμβόλου, καλείται **πίεση** το πηλίκο μεταξύ της δύναμης  $F$  που ασκείται κάθετα και ομοιόμορφα κατανεμημένη επί της επιφάνειας  $A$  του εμβόλου και της επιφάνειας  $A$ .

**Ατμοσφαιρική πίεση** = η δύναμη με την οποίαν η ατμόσφαιρα πιέζει τη μονάδα μιας επιφάνειας. Η πίεση αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με το υψόμετρο και τη θερμοκρασία.

**Φυσική ατμόσφαιρα** = η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας υπό θερμοκρασία 0<sup>0</sup> C.

## ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΙΕΣΗΣ

A. Δεδομένου ότι η πίεση ισούται με δύναμη / επιφάνεια = **1 kp / cm<sup>2</sup>**, στο Τεχνικό Σύστημα μονάδων, η μονάδα αυτή ονομάζεται "**ata**", δηλαδή **απόλυτη τεχνική ατμόσφαιρα** όταν το "μηδέν" της κλίμακας πιέσεων είναι το απόλυτο κενό.

Ονομάζεται "**ate**", **σχετική τεχνική ατμόσφαιρα**, όταν το "μηδέν" της κλίμακας πιέσεων τοποθετείται σε 1 ata.

Είναι : 1 ata = 0 ate, 2 ata = 1 ate κ.λ.π.

Η μονάδα μέτρησης είναι :  $1 \text{ ata} = 1 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} = 10.000 \frac{\text{kp}}{\text{m}^2}$

**Κενό** νοείται όταν από ένα χώρο αφαιρεθεί εξ ολοκλήρου ο αέρας.

**B. Στο Διεθνές Σύστημα μονάδων (S.I.)**, η μονάδα πίεσης είναι

$$Pa (= Pascal) = \frac{N}{m^2} \left( = \frac{\text{δύναμη}}{\text{μονάδα επιφάνειας}} \right)$$

Επειδή το (Pa) είναι πολύ μικρή μονάδα για πιέσεις που συναντώνται στις, εφαρμογές, χρησιμοποιούνται πολλαπλάσια αυτής της μονάδας, έτσι είναι :

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}, \quad 1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

$$\text{Επίσης : } 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \left( \frac{N}{m^2} \right)$$

**Μονάδες πίεσης και σχέση μεταξύ των :**

$$1 \text{ atm} = 1,03288 \text{ ata} = 1,03288 \left( \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right) = 1,01325 \times 10^5 \left( \frac{N}{m^2} \right) = 1,01325 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg} = 760 \text{ Torr}, \quad 1 \text{ ata} = 735,5 \text{ Torr}$$

$$1 \text{ ata} = 0,968 \text{ atm}, \quad 1 \text{ ata} = 0,98 \text{ bar}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ (Pa)} = 10^5 \left( \frac{N}{m^2} \right) = 1,01972 \text{ ata.}$$



### 1.9.1. Μέτρηση πίεσης

Σε ένα σημείο η πραγματική πίεση που μετριέται ονομάζεται **απόλυτη πίεση**. Η πίεση αυτή μετριέται σε σχέση με το απόλυτο κενό όπου η πίεση είναι μηδέν.

Τα **περισσότερα όργανα** για τη μέτρηση της πίεσης είναι βαθμονομημένα έτσι ώστε να **δείχνουν “μηδέν” στην ατμοσφαιρική πίεση**, **δείχνουν** δηλαδή τη διαφορά μεταξύ απόλυτης πίεσης με την τοπική ατμοσφαιρική πίεση και η διαφορά αυτή ονομάζεται **σχετική πίεση (πίεση στο μανόμετρο)**.

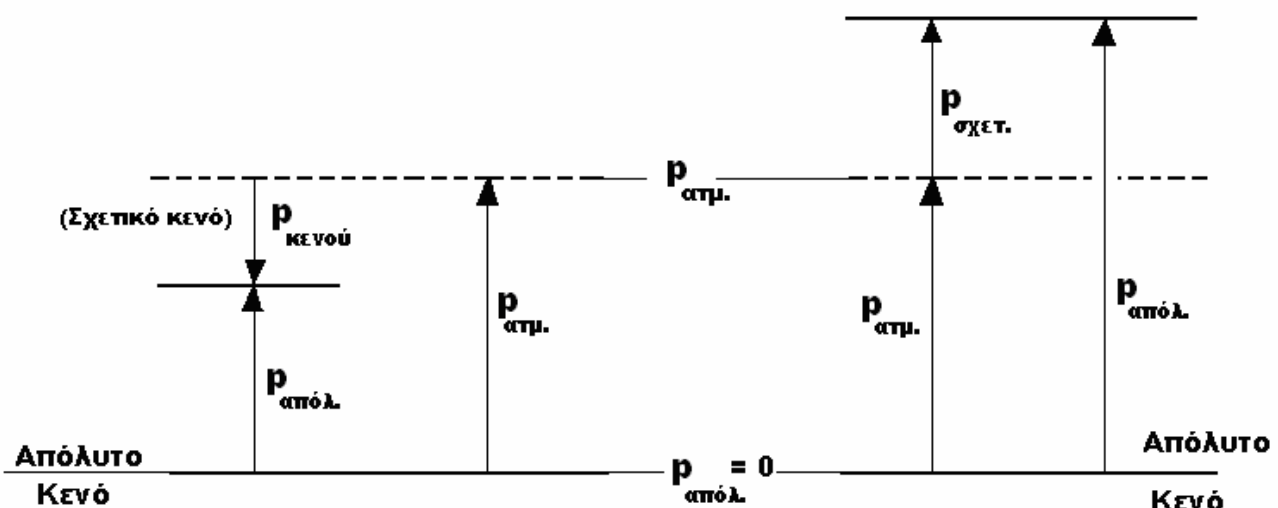
$$P_{\text{σχετ.}} = P_{\text{απολυτη}} - P_{\text{ατμοσφ.}} \Rightarrow P_{\text{απολυτη}} = P_{\text{ατμοσφ.}} + P_{\text{σχετ.}}$$

**Σημείωση** : Εάν η πίεση ασκείται **από το περιβάλλον προς το σύστημα**, τότε το **σύστημα** ευρίσκεται σε **υποπίεση** ως προς το περιβάλλον, αντιθέτως εάν η φορά της πίεσης είναι **από το σύστημα προς το περιβάλλον** τότε το **σύστημα** ευρίσκεται σε **υπερπίεση** ως προς το περιβάλλον.

Όταν η πίεση είναι **χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική**, ονομάζεται **πίεση κενού** (vacuum pressure) και μετριέται από όργανα (= **μετρητές κενού**) η ένδειξη των οποίων είναι η διαφορά μεταξύ ατμοσφαιρικής πίεσης και απόλυτης πίεσης :

$$P_{\text{κενού}} = P_{\text{ατμοσφαιρική}} - P_{\text{απόλυτη}}$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ των πιέσεων :



Σχήμα 10

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ**

Ένας μετρητής κενού συνδέεται σε ένα δοχείο και έχει ένδειξη 50 kPa, ενώ η ατμοσφαιρική πίεση είναι 120 kPa. Να υπολογιστεί η απόλυτη πίεση στο δοχείο.

**Λύση**

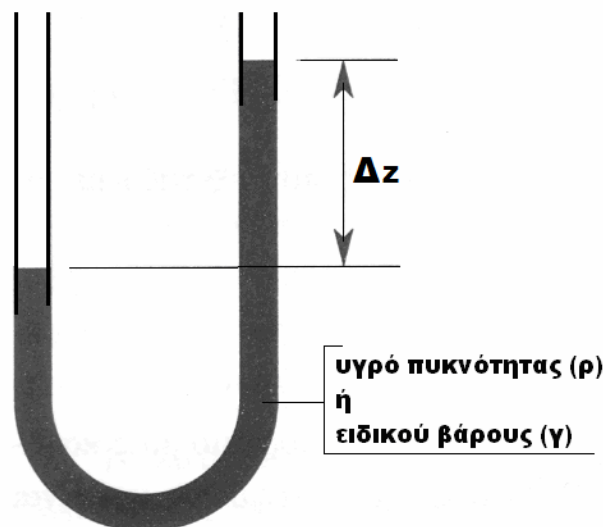
Η απόλυτη πίεση υπολογίζεται από τη σχέση :

$$P_{\text{κενού}} = P_{\text{ατμοσφαιρική}} - P_{\text{απόλυτη}} \Rightarrow P_{\text{απόλυτη}} = P_{\text{ατμοσφαιρική}} - P_{\text{κενού}}$$

$$P_{\text{απόλυτη}} = P_{\text{ατμοσφαιρική}} - P_{\text{κενού}} = (120 - 50)(\text{kPa}) = 70(\text{kPa})$$

**1.9.2. Όργανα μέτρησης πίεσης – εφαρμογές**

Μικρές και μεσαίες πιέσεις μετριούνται με όργανα τα οποία ονομάζονται **διαφορικά μανόμετρα** (δείχνουν τη σχετική πίεση, δηλαδή τη διαφορά της απόλυτης πίεσης από την πίεση του περιβάλλοντος την ατμοσφαιρική ή βαρομετρική πίεση). Το πιο διαδεδομένο είναι το μανόμετρο σχήματος **U**, από ισχυρό υάλινο ή πλαστικό σωλήνα



**Σχήμα 11**

που περιέχει υγρό (υδράργυρος νερό, οινόπνευμα ή λάδι) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- ειδικό βάρος πολύ μεγαλύτερο από το ειδικό βάρος του υγρού του οποίου πρόκειται να μετρηθεί η πίεση
- τα δύο υγρά δεν πρέπει να αντιδρούν ή να αναμιγνύονται

Για μέτρηση μεγάλων διαφορών πίεσης, χρησιμοποιούνται βαριά ρευστά , όπως ο υδράργυρος.

Η σχέση μεταξύ ειδικού βάρους  $\gamma \left( \frac{N}{m^3} \right)$  και πυκνότητας  $\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$  είναι :  $\gamma = \rho \cdot g$  , όπου

$$g = 9,81 \left( \frac{m}{sec^2} \right)$$

Ένα από τα δύο σκέλη του μανόμετρου συνδέεται με το δοχείο που περιέχει το υγρό του οποίου πρόκειται να μετρηθεί η πίεση, το άλλο άκρο αφήνεται ελεύθερο στην ατμόσφαιρα (ανοικτό) ή συνδέεται με δοχείο οπότε το μανόμετρο είναι κλειστό.

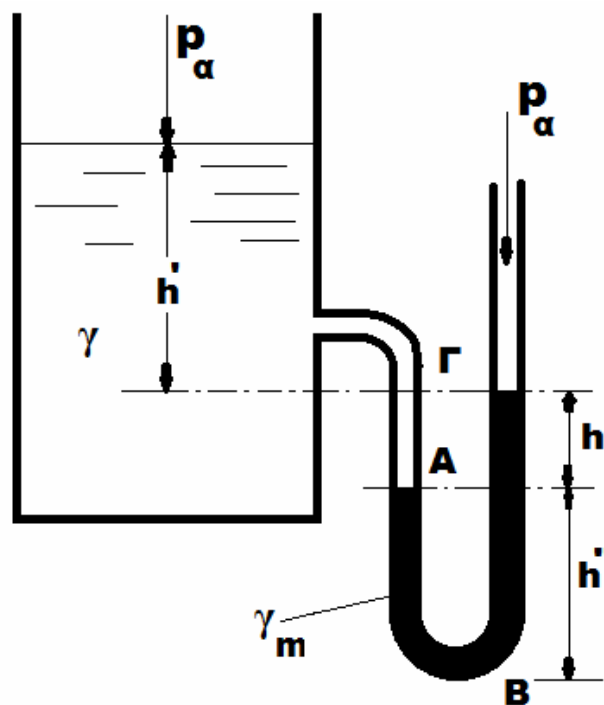
### 1.9.2.1. Μανόμετρο ανοικτό ( ή μανόμετρο ελεύθερης επιφάνειας )

Σε ένα δοχείο ανοικτό στην ατμόσφαιρα, που περιέχει υγρό, είναι :

$p_a$  = η πίεση επί της ελεύθερης επιφάνειας

$\gamma$  = το ειδικό βάρος του υγρού του δοχείου

$\gamma_m$  = το ειδικό βάρος του μανομετρικού υγρού



Σχήμα 12

Από την ισορροπία των πιέσεων που ασκούνται στην επιφάνεια Β του σωλήνα, είναι :

$$p_a + h' \cdot \gamma + h \cdot \gamma + h'' \cdot \gamma_m = h'' \cdot \gamma_m + h \cdot \gamma_m + p_a$$

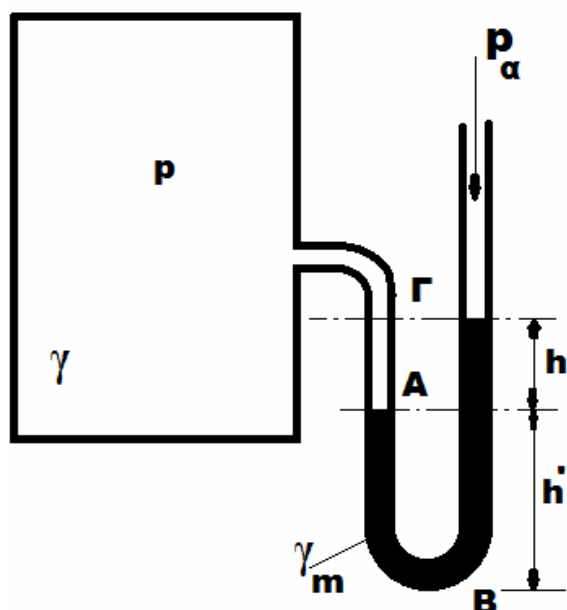
$$\text{απ' όπου : } h' \cdot \gamma = p = h \cdot (\gamma_m - \gamma)$$

Στην περίπτωση αυτή το ανοικτό μανόμετρο μετρά την υδροστατική πίεση στο επίπεδο Γ και μετριέται σχετική πίεση (ate).

Εάν το δοχείο περιέχει αέριο σε πίεση  $p$ , δεδομένου ότι η πίεση είναι ομοιόμορφα κατανομημένη στο χώρο που καταλαμβάνει το αέριο, είναι :

$$p + h \cdot \gamma + h'' \cdot \gamma_m = p_a + h \cdot \gamma_m + h'' \cdot \gamma_m$$

$$p = p_a + h \cdot (\gamma_m - \gamma)$$



Σχήμα 13

Στην περίπτωση αυτή μετριέται η απόλυτη πίεση (ata).

Επειδή πολλές φορές το ειδικό βάρος του μανομετρικού υγρού  $\gamma_m$  είναι πολύ μεγαλύτερο από το ειδικό βάρος  $\gamma$  του προς μέτρηση υγρού, μπορεί να γραφεί :

$$p = p_a + h \cdot \gamma_m$$

### 1.9.2.2. Μανόμετρο κλειστό

Στο κλειστό σκέλος του μανομέτρου, πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του υδραργύρου (επειδή ο υδράργυρος είναι το περισσότερο σε χρήση υγρό στα μανόμετρα) δημιουργείται το λεγόμενο **κενό του Torricelli**. Σε αυτή την ελεύθερη επιφάνεια ασκείται μια πίεση  $p_v$  πολύ μικρή που οφείλεται στην παρουσία των ατμών του υδραργύρου, πίεση που μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία και μπορεί να υπολογιστεί με τις εξισώσεις των ιδανικών αερίων.

Οπότε είναι :

$$p_a + h' \cdot \gamma + h \cdot \gamma + h'' \cdot \gamma_m = h'' \cdot \gamma_m + h \cdot \gamma_m + p_v$$

$$p = (p_a + h' \cdot \gamma) = h'' \cdot (\gamma_m - \gamma) + p_v$$

Υπολογίζεται έτσι η απόλυτη πίεση στο επίπεδο Γ.

Για την απόλυτη πίεση είναι :

$$p + h \cdot \gamma + h'' \cdot \gamma_m = p_v + h \cdot \gamma + h'' \cdot \gamma_m$$

$$p = p_v + h \cdot (\gamma_m - \gamma)$$

Σημειώνεται ότι όλα τα μανόμετρα που δείχνουν την απόλυτη πίεση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μέτρηση πιέσεων μικρότερων της ατμοσφαιρικής.

### 1.9.2.3. Διαφορικό μανόμετρο

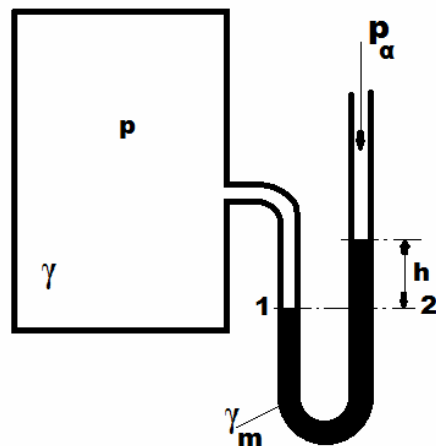
Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι εάν το ανοικτό στην ατμόσφαιρα σκέλος ενός μανομέτρου συνδεθεί με χώρο όπου επικρατεί πίεση  $p_2$ , ενώ το άλλο σκέλος συνδεθεί με χώρο όπου επικρατεί πίεση  $p_1$ , τότε το μανόμετρο δίδει τη διαφορά της πίεσης μεταξύ των δύο χώρων.

Έτσι είναι :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h \cdot (\gamma_m - \gamma)$$

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα δοχείο που περιέχει αέριο και με το μανόμετρο ζητείται ο υπολογισμός της πίεσης. Η πίεση σε κάθε σημείο του δοχείου είναι ίδια οπότε είναι ίση και η πίεση στο σημείο 1.

Επίσης η πίεση στο σημείο 2 είναι ίση με αυτήν του σημείου 1 δεδομένου ότι η πίεση σε ένα υγρό δεν μεταβάλλεται σε οριζόντια κατεύθυνση, δηλαδή  $p_1 = p_2$ .



Σχήμα 14

Οπότε στο επίπεδο **12** η ισορροπία των δυνάμεων δίδει :

$$A \cdot p_1 = A \cdot p_{\alpha\tau\mu.} + (\text{βάρος υδροστατικής στήλης πάνω από το σημείο 2}), \text{ όπου}$$

$$\text{βάρος υδροστατικής στήλης πάνω από το σημείο 2} = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot A \cdot h \cdot g$$

Οπότε είναι :

$$A \cdot p_1 = A \cdot p_{\alpha\tau\mu.} + \rho \cdot A \cdot h \cdot g \Rightarrow p_1 = p_{\alpha\tau\mu.} + \rho \cdot h \cdot g \Rightarrow \Delta p = p_1 - p_{\alpha\tau\mu.} = \rho \cdot h \cdot g$$

Στην παραπάνω σχέση  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας εκεί όπου γίνεται η μέτρηση,  $A$  είναι το εμβαδόν της τομής του σωλήνα το οποίο δεν επιδρά στη μέτρηση της πίεσης,  $p_{\alpha\tau\mu.}$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση.

**ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ****ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1<sup>ο</sup>**

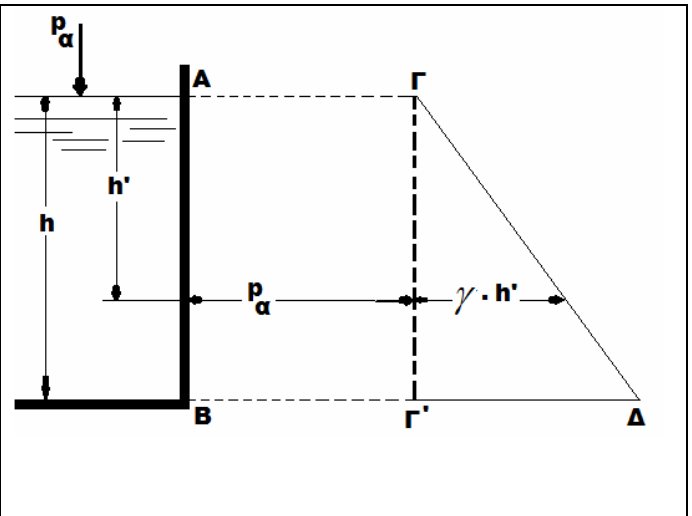
Μια δεξαμενή βάθους 6 μέτρων και ανοικτή στην ατμόσφαιρα περιέχει νερό. Να υπολογιστεί η πίεση που επικρατεί στο βάθος της δεξαμενής και να χαραχθεί το διάγραμμα πίεσης κατά το ύψος της δεξαμενής.

**ΛΥΣΗ**

Στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού από τον ατμοσφαιρικό αέρα εφαρμόζεται πίεση  $p_\alpha = 10,3288 \left( \frac{kp}{m^2} \right)$ ,

Εάν  $h$  είναι το ύψος στην ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής και  $\gamma = 1 \left( \frac{kp}{dm^3} \right)$  το ειδικό βάρος του νερού, η πίεση στο βάθος είναι :

$$\begin{aligned} p &= p_\alpha + h \cdot \gamma = \\ &= 10,3288 \left( \frac{kp}{m^2} \right) + 1,000 \left( \frac{kp}{m^3} \right) \cdot 6(m) \\ &= 16,3288 \left( \frac{kp}{m^2} \right) \end{aligned}$$



Για τη χάραξη του διαγράμματος των πιέσεων, λαμβάνεται κλίμακα :

- για τα μήκη : 1 (cm) = 100 (cm)
- για τις πιέσεις : 1 (cm) = 2.000  $\left( \frac{kp}{m^2} \right)$

Χαράσσεται κάθετα τμήμα  $AB = 6$  (cm) που παριστάνει το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας.

Επί της οριζόντιας από το σημείο A χαράσσεται ευθύγραμμο τμήμα  $A\Gamma = 5,16$  (cm)

$\left[ = \frac{103288 \left( \frac{kp}{m^2} \right)}{2000 \left( \frac{kp}{m^2} \right)} \cdot 1 \text{ (cm)} \right]$  που παριστάνει την πίεση  $p_\alpha$  στην ελεύθερη επιφάνεια στην επιλεγμένη κλίμακα.

Επί της οριζόντιας από το σημείο B χαράσσεται ευθύγραμμο τμήμα  $B\Delta = 8,16$  (cm)  $\left[ = \frac{163288 \left( \frac{kp}{m^2} \right)}{2000 \left( \frac{kp}{m^2} \right)} \cdot 1 \text{ (cm)} \right]$  που παριστάνει την πίεση  $p = p_\alpha + h \cdot \gamma$  στο βάθος της δεξαμενής στην επιλεγμένη κλίμακα.

Ενώνοντας τα σημεία  $\Gamma$  και  $\Delta$ , η ευθεία  $\Gamma\Delta$  παριστάνει τη γραμμική μεταβολή (τριγωνικής απεικόνισης) της υδροστατικής πίεσης, μιας μεταβολής σε ευθεία συνάρτηση με το ύψος  $h$ .

**ΠΙΕΣΗ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ**

Η ατμόσφαιρα της Γης αποτελείται κυρίως από άζωτο και σε μικρότερο βαθμό από οξυγόνο, το οποίο χρησιμοποιείται από τους οργανισμούς για την αναπνοή, και διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο χρησιμοποιείται από τα φυτά, τα φύκη και τα κυανοβακτήρια για τη φωτοσύνθεση. Η ατμόσφαιρα βοηθάει στην προστασία των ζωντανών οργανισμών της Γης από γενετικές βλάβες από την ηλιακή υπεριώδη ακτινοβολία, τον ηλιακό άνεμο και τις κοσμικές ακτίνες.

Η ατμόσφαιρα περιβάλλει τη γή και αποτελείται από ατμοσφαιρικό αέρα ο οποίος είναι κυρίως μίγμα οξυγόνου 23,01 % κατά βάρος και 20,93 % κατ'όγκο, και αζώτου 75,51% κατά βάρος και 78,1% κατ'όγκο (αργόν 0,96%, διοξείδιο του άνθρακα 0,04%, και ίχνη από ήλιον, νέον, κρυπτόν, ξένον, υδρογόνο).

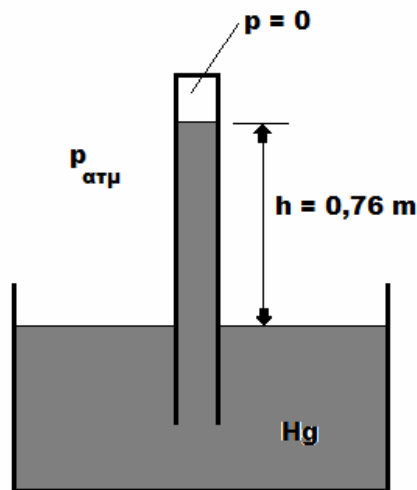
Η σύνθεση αυτή της ατμόσφαιρας δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται με το ύψος και αποδεικνύεται ότι όσο το ύψος μεγαλώνει αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άζωτο, ενώ από ύψος (70 – 80) χλμ. και πάνω από ατμόσφαιρα αζώτου είναι ατμόσφαιρα υδρογόνου.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας ασκεί με το βάρος του μια πίεση, η οποία είναι ονομάζεται ατμοσφαιρική πίεση. Η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται σύμφωνα με τις μετεωρολογικές συνθήκες. Στην επιφάνεια της θάλασσας και σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας 0 (°C) η συνήθης τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης είναι :

$$P_{\text{κανονική}} = 1,013 \text{ (bar)} = 1,103 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

Πειραματικά η ύπαρξη της ατμοσφαιρικής πίεσης αποδείχθηκε από τον Torricelli (1608 – 1647, Ιταλός Φυσικός και Μαθηματικός που εφηύρε το βαρόμετρο).

Ο Torricelli βύθισε αντεστραμμένο σωλήνα με υδράργυρο σε δοχείο με υδράργυρο :



Στο σωλήνα παρέμεινε στήλη υδραργύρου ύψους  $0,76 \text{ m} = 760 \text{ mm}$  και αυτό οφείλεται στην ατμοσφαιρική πίεση που ασκείται στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού του δοχείου. Μέσα στο σωλήνα και πάνω από τον υδράργυρο πρακτικά υπάρχει κενό (πίεση μηδενική), στην κατάσταση ισορροπίας ισχύει :

**Ατμοσφαιρική πίεση = πίεση στήλης υδραργύρου,**

$$P_{\text{ατμοσφαιρική}} = \rho_{\text{Hg}} \cdot g \cdot h_{\text{Hg}}$$



Οπου :

$$\rho_{Hg} = 13,6 \cdot 10^3 \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \text{πυκνότητα υδραργύρου}$$

$$g = 9,81 \left( \frac{m}{sec^2} \right) = \text{επιτάχυνση της βαρύτητας}$$

$$h_{Hg} = 760 (mm) = 0,76 (m),$$

Οπότε :

$$P_{ατμοσφαιρική} = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h_{Hg} = 13,6 \cdot 10^3 \left( \frac{kg}{m^3} \right) \cdot 9,81 \left( \frac{m}{sec^2} \right) \cdot 0,76 (m) = 101396,16 \left( \frac{N}{m^2} \right) = 1,013 \cdot 10^5 (bar)$$

Επειδή ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι συμπιεστό ρευστό και οι υπερκείμενες μάζες ασκούν πίεση στις υποκείμενες αέριες μάζες οι οποίες συμπιέζονται περισσότερο, η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα μειώνεται σε συνάρτηση με το ύψος.

Η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται εκθετικά σε συνάρτηση με το υψόμετρο και δίδεται από την παρακάτω εξίσωση η οποία ονομάζεται **βαρομετρικός τύπος**

$$p(h) = 1,013 \cdot e^{-\frac{h}{8083}}$$

Επιλύοντας την παραπάνω σχέση ως προς το υψόμετρο  $h$ , υπολογίζεται ότι η ατμοσφαιρική πίεση υποδιπλασιάζεται σε ύψος 5,6 (km) από την επιφάνεια της θάλασσας.

## 1.10. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ - ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

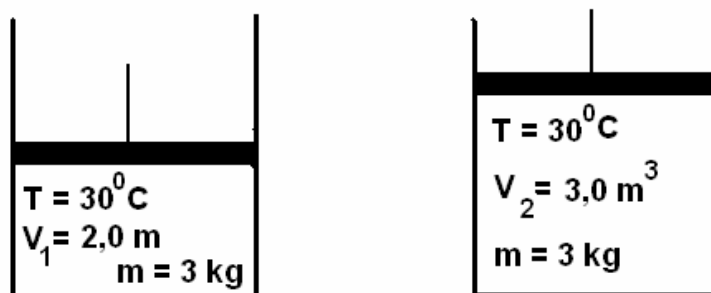
Εάν ένα σύστημα δεν υπόκειται σε καμία μεταβολή, όλες οι φυσικές ιδιότητες, **δηλαδή οι θερμοδυναμικές μεταβλητές του**, που το προσδιορίζουν μπορούν να μετρηθούν ή να υπολογιστούν οπουδήποτε στο εσωτερικό του.

Όταν οι **μεταβλητές** πάρουν **σταθερές τιμές**, τότε το σύστημα βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση, η οποία φυσικά χαρακτηρίζεται από τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος σ' αυτή την κατάσταση και τότε αυτές **ονομάζονται "ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ"**, επειδή ακριβώς χαρακτηρίζουν θερμοδυναμικά τη συγκεκριμένη κατάσταση ισορροπίας του συστήματος.

**Σταθερές τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών καθορίζουν την ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ** ενός συστήματος.

Αυτές οι μεταβλητές είναι η πίεση  $p$ , η θερμοκρασία  $T$  και ο όγκος  $V$

Εάν μεταβληθεί έστω και μια από τις θερμοδυναμικές μεταβλητές του συστήματος, τότε μεταβάλλεται η θερμοδυναμική του κατάσταση, όπως παριστάνεται στο επόμενο σχήμα :



ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Α

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ Β

Σχήμα 15

Γενικά, μπορεί να ειπωθεί ότι **κατάσταση** ενός συστήματος σημαίνει το σύνολο των μακροσκοπικών ιδιοτήτων που αναφέρονται στο σύστημα. Αναφέρεται στις συνθήκες που το σύστημα ευρίσκεται μια συγκεκριμένη στιγμή, δηλαδή η θέση του, η ταχύτητα, η ενέργεια που περιέχεται στο σύστημα.

Η κατάσταση ισορροπίας είναι μια απλή κατάσταση για ένα σύστημα και περιγράφεται μαθηματικά με απλό τρόπο επειδή οι θερμοδυναμικές μεταβλητές (= ιδιότητες) μπορούν να μετρηθούν.

Ένα σύστημα ευρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας εάν ικανοποιούνται όλοι οι τύποι της ισορροπίας, και συγκεκριμένα :

- 1.** ένα σύστημα είναι σε κατάσταση **ΘΕΡΜΙΚΗΣ** ισορροπίας όταν η θερμοκρασία διατηρείται ίδια σε κάθε σημείο του συστήματος, δηλαδή όταν δεν παρατηρούνται διαφορές θερμοκρασίας στο εσωτερικό του συστήματος οι οποίες προκαλούν ροή θερμικής ενέργειας.
- 2.** ένα σύστημα ευρίσκεται σε **ΜΗΧΑΝΙΚΗ** ισορροπία εάν δεν μεταβάλλεται με το χρόνο η πίεση σε κάθε σημείο του συστήματος. Εν τούτοις η πίεση μπορεί να μεταβάλλεται στο εσωτερικό του συστήματος εξ αιτίας της βαρύτητας, επειδή η μεγαλύτερη πίεση σε χαμηλότερα στρώματα εξισορροπείται από το μεγαλύτερο βάρος που πρέπει να αντέχουν, οπότε δεν υπάρχει ισορροπία δυνάμεων.

- 3.** ένα σύστημα ευρίσκεται σε ΧΗΜΙΚΗ ισορροπία εάν η χημική σύσταση του συστήματος δεν μεταβάλλεται με το χρόνο, δηλαδή εάν δεν πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις.

Συμπερασματικά, ένα σύστημα είναι σε ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ισορροπία, εάν τα μεγέθη που προσδιορίζουν την κατάσταση του δεν μεταβάλλονται όταν στο σύστημα δεν υπάρχουν επιδράσεις από το περιβάλλον του.

Στις καταστάσεις ισορροπίας αρκούν μερικά μεγέθη για την περιγραφή της κατάστασης του συστήματος και τα μεγέθη αυτά έχουν συγκεκριμένες τιμές.

Ένα **σύστημα** ονομάζεται ΟΜΟΓΕΝΕΣ και **χαρακτηρίζεται ως ΦΑΣΗ** (J. W. Gibbs), όταν σε κάθε σημείο του συστήματος έχει ίδια χημική σύσταση και οι φυσικές του ιδιότητες είναι σταθερές.

Διευκρινίζεται ότι η προϋπόθεση ότι ένα σύστημα είναι ομογενές (ή αποτελείται από πολλές ομογενείς περιοχές) δεν εξασφαλίζει την θερμοδυναμική ισορροπία.

Έτσι :

- 4.** ένα σύστημα με περισσότερες φάσεις είναι σε ισορροπία ΦΑΣΕΩΝ όταν η κάθε φάση είναι σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

## 1.11. ΜΕΤΑΒΟΛΗ (ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ)

Ένα σύστημα είναι πηγή θερμοδυναμικής διαδικασίας (ή θερμοδυναμικής μεταβολής) όταν στο σύστημα συμβαίνει μια διαδοχή διαφορετικών καταστάσεων (επομένως και μια μεταβολή των χαρακτηριστικών που το προσδιορίζουν) με ή χωρίς εμπλοκή με το περιβάλλον του.

Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η θερμοδυναμική κατάσταση ενός συστήματος, ονομάζεται μεταβολή η οποία προκαλείται από εξωτερική του συστήματος πρόσδοση ενέργειας. Η μεταφορά του συστήματος από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 επιτυγχάνεται μέσα από διατάξεις, όπως άλλωστε και η πρόσδοση ενέργειας γίνεται μέσα από διατάξεις.

Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **διεργασία** με την οποία περιγράφονται και οι διατάξεις (μηχανές και εγκαταστάσεις) που χρησιμοποιούνται για τη μεταβολή της κατάστασης ενός συστήματος.

Συνεπώς, η έννοια δηλαδή της μεταβολής περιέχει την έννοια της διεργασίας η οποία είναι ευρύτερη.

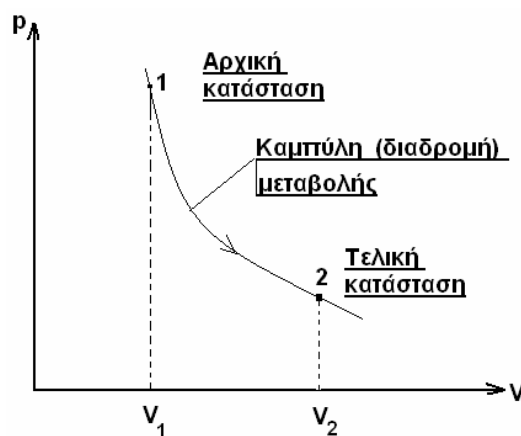
Έστω ένα θερμοδυναμικό σύστημα το οποίο στην κατάσταση που ευρίσκεται έχει χαρακτηριστικά μεγέθη την πίεση  $p$ , και τη θερμοκρασία  $T$ .

Το σύστημα υποβάλλεται σε μια διεργασία, χωρίς να μεταβάλλεται η ποσότητά του και η χημική του σύνθεση, έτσι ώστε να μεταβεί σε μια άλλη κατάσταση που χαρακτηρίζεται από διαφορετικές τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας του. Το σύστημα έχει υποστεί μια μεταβολή.

Έτσι, σύστημα 0,6 kp N<sub>2</sub> ευρίσκεται σε πίεση  $p_1 = 5 \text{ ata}$  και θερμοκρασία  $T_1 = 273^\circ \text{K}$ . Υποβάλλεται σε διεργασία ώστε τα μεγέθη αυτά να λάβουν τιμές  $p_2 = 1 \text{ ata}$  και  $T_2 = 432^\circ \text{K}$ . Το σύστημα έχει υποστεί αμεταβολή και έχει λάβει τις νέες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας χωρίς όμως να έχουν μεταβληθεί η ποσότητά του (βάρος ή μάζα) ούτε και η χημική του σύνθεση.

Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια μιας μεταβολής, πάντοτε λαμβάνουν μέρος θερμικές και δυναμικές εναλλαγές μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος και είναι πιθανό να διαπιστωθεί μεταβολή φάσης του συστήματος.

Οι διαδοχικές καταστάσεις από τις οποίες το σύστημα διέρχεται κατά τη διάρκεια της μεταβολής ονομάζεται γραμμή ή καμπύλη ή διαδρομή της μεταβολής.

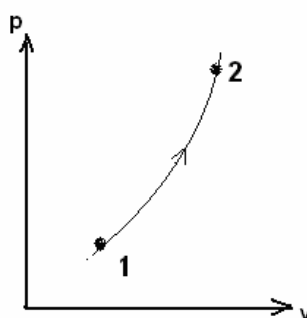


Σχήμα 16

Για να περιγραφεί πλήρως μια μεταβολή, πρέπει να ορισθούν με ακρίβεια η **ΑΡΧΙΚΗ** και η **ΤΕΛΙΚΗ** κατάσταση, η **ΔΙΑΔΡΟΜΗ** της μεταβολής και οι **ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ** του συστήματος με το περιβάλλον και σε αυτό αποσκοπεί η θερμοδυναμική.

Εάν κατά τη διάρκεια μιας μεταβολής όλες οι ενδιάμεσες καταστάσεις μπορούν να θεωρηθούν σαν καταστάσεις θερμοδυναμικής ισορροπίας και η κάθε κατάσταση απέχει απειροστά από την προηγούμενη, η μεταβολή αυτή ονομάζεται **ΟΙΟΝΕΙ – ΣΤΑΤΙΚΗ** (ή *ψευδοστατική* ή *στατικότροπη*).

Μια τέτοια μεταβολή είναι ασφαλώς θεωρητική, ιδανική και δεν υπάρχουν τριβές κατά την εξέλιξή της, παριστάνεται δε σε κάθε διάγραμμα με συνεχή γραμμή η οποία έχει την έννοια ότι σε κάθε σημείο είναι γνωστές οι τιμές των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του συστήματος.

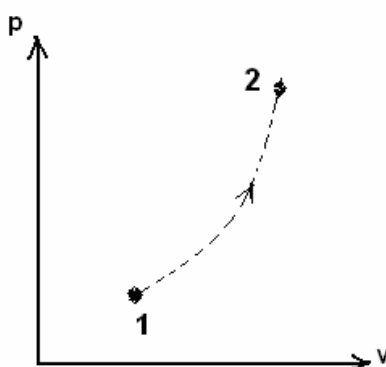


**Οιονεί - στατική μεταβολή**  
**(ιδανική)**

Σχήμα 17

Μια τέτοια μεταβολή πρέπει να εκτελείται πολύ αργά ώστε να αποκαθίσταται η τιμή των θερμοδυναμικών καταστατικών μεγεθών κάθε χρονική στιγμή σε όλη την έκταση της ποσότητας του συστήματος.

Αντιθέτως μια πραγματική μεταβολή παριστάνεται με διακεκομμένη γραμμή και υποδηλώνει το γεγονός ότι δεν είναι γνωστές οι τιμές των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των ενδιάμεσων καταστάσεων που το σύστημα ευρίσκεται κατά τη διάρκεια της μεταβολής.



**Μη οιονεί - στατική μεταβολή**  
**(πραγματική)**

Σχήμα 18

Οι προαναφερόμενες μεταβολές έχουν το χαρακτηριστικό ότι το σύστημα δεν επανέρχεται στην αρχική κατάσταση. Μια τέτοια μεταβολή ονομάζεται *Ανοικτή μεταβολή*

Όταν η διαδοχή των καταστάσεων κατά τη διάρκεια μιας μεταβολής είναι τέτοια ώστε το σύστημα ξεκινώντας από μια αρχική κατάσταση (με οποιοδήποτε τρόπο ή δρόμο μεταβολής ακολουθήσει) επανέλθει στην αρχική κατάσταση, η μεταβολή είναι *κλειστή* και ονομάζεται *κυκλική* ή πιο απλά, *θερμοδυναμικός κύκλος*.



Σχήμα 19

## 1.12. ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΥΛΗΣ - ΚΑΘΑΡΗ ΟΥΣΙΑ

Όλα τα στοιχεία ή οι χημικές ενώσεις που αποτελούν την ύλη μπορούν να παρουσιατούν σε τρεις φυσικές καταστάσεις και συγκεκριμένα :

### **ΥΓΡΗ - ΣΤΕΡΕΗ - ΑΕΡΙΑ**

οπότε υπάρχουν σώματα (συστήματα) στερεά , υγρά και αέρια.

Η διάκριση αυτή αναφέρεται στις μακροσκοπικές ιδιότητες αλλά και στη μοριακή δομή των σωμάτων συνεπώς είναι διαφορετική και η συμπεριφορά του κάθε ένα από αυτά.

- Ένα **στερεό σώμα** έχει σταθερό σχήμα και όγκο , είναι περισσότερο ή λιγότερο ελαστικό και όταν εξασκείται επί αυτού μια δύναμη , κάμπτεται , εφελκύεται ή στρέφεται ελαστικά (ανάλογα και με τη στήριξή του) δηλαδή επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση όταν δεν ενεργεί πλέον η δύναμη. Η παραμόρφωση του σώματος είναι ανάλογη με τη δύναμη (την τάση) που το καταπονεί. Τα στερεά σώματα ανάλογα με τη δομή τους διακρίνονται σε "άμορφα" και "κρυσταλλικά". Τα άμορφα σώματα (γυαλί, άσφαλτος) όσο θερμαίνονται γίνονται πλαστικά και σιγά – σιγά υγροποιούνται. Τα κρυσταλλικά σώματα έχουν συγκεκριμένη θερμοκρασία τήξεως (σίδηρος, πάγος κ.λ.π.) και στην τιμή αυτή μετατρέπονται σε υγρά σώματα.
- Ένα **υγρό σώμα** δεν έχει σταθερό σχήμα, έχει όμως σταθερό όγκο ο οποίος παραμορφώνεται ελαστικά δηλαδή επανέρχεται στο αρχικό σχήμα όταν δεν ενεργεί πλέον η δύναμη επί αυτού.
- Ένα **αέριο σώμα** δεν έχει συγκεκριμένο σχήμα μπορεί όμως να καταλάβει (γεμίσει) οποιονδήποτε χώρο, για τη μεταβολή δε του όγκου του απαιτούνται πολύ μικρές δυνάμεις.

Ένα θερμοδυναμικό σύστημα αναφέρεται και ως **εργαζόμενο μέσο** ή **φορέας της ενέργειας**. Είναι ένα ρευστό συχνά σε αέρια φάση χωρίς να αποκλείεται η συνύπαρξη περισσότερων της μιας φάσεων.

**Ομοιογενές** ( ή *ομοιόμορφο*) ονομάζεται ένα σύστημα στο οποίο η χημική σύσταση και οι φυσικές του ιδιότητες έχουν την ίδια τιμή σε όλο το σύστημα και σε κάθε χρονική στιγμή.

**Φάση** ονομάζεται κάθε ομοιογενής περιοχή του συστήματος (ή όλο το σύστημα) .

Ένα σύστημα από περισσότερες ομοιογενείς φάσεις ονομάζεται ετερογενές σύστημα.

Ένα σύστημα που αποτελείται από πάγο και νερό είναι ένα ετερογενές σύστημα, καθ'όσον υπάρχουν δύο ομοιογενείς διακριτές φάσεις (στερεή και υγρή).

Ένα θερμοδυναμικό σύστημα είναι δυνατό να αποτελείται από ένα ή περισσότερα μέρη, ανεξάρτητα μεταξύ τους που μπορεί να συνυπάρχουν σε ένα σύστημα και μπορεί να εμφανίζονται υπό μορφή χημικών στοιχείων, ενώσεων και στη θερμοδυναμική παρουσιάζει ενδιαφέρον η περίπτωση ενός συστήματος που αποτελείται από ένα συστατικό.

Το σύστημα αυτό που αποτελείται από ένα συστατικό ονομάζεται **καθαρή ουσία**, όταν είναι :

- ομοιογενές σε σύσταση
- χημικά ομοιογενές
- χημικά αμετάβλητο

**Ομοιογενές σε σύσταση** σημαίνει ότι το σύστημα έχει σε κάθε τμήμα του την ίδια σύσταση, δηλαδή στις σχετικές αναλογίες των χημικών στοιχείων που αποτελούν το σύστημα χωρίς να έχει σημασία με ποιο τρόπο τα στοιχεία που αποτελούν το σύστημα είναι ενωμένα χημικά μεταξύ τους.

**Χημικά ομοιογενές** σημαίνει ότι τα χημικά στοιχεία είναι σε όλα τα μέρη του συστήματος χημικά ενωμένα κατά τον ίδιο τρόπο. Στο σύστημα που το ένα μέρος αποτελείται από πάγο και το άλλο από νερό, αυτό ισχύει δεδομένου ότι και ο πάγος και το νερό αποτελούνται από όμοια μόρια δηλαδή  $H_2O$ .

Στο σύστημα με δύο μέρη όπου στο ένα υπάρχει αέριο μίγμα υδρογόνου και οξυγόνου και στο άλλο μέρος υπάρχει νερό, δεν ισχύει η προϋπόθεση διότι στο ένα μέρος οξυγόνο και υδρογόνο δεν είναι ενωμένα χημικά ενώ στο άλλο μέρος στο νερό είναι χημικά ενωμένα.

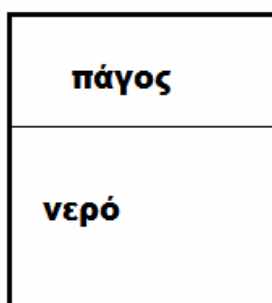
**Χημικά αμετάβλητο** σημαίνει ότι η χημική σύσταση του συστήματος δεν μεταβάλλεται με το χρόνο (αυτό προϋποθέτει ότι κατά τη διάρκεια της μελέτης δεν εξελίσσονται χημικές αντιδράσεις). Στα δύο συστήματα που περιγράψαμε παραπάνω, το πρώτο με πάγο και νερό ικανοποιεί και αυτή τη συνθήκη. Το σύστημα με αέριο μίγμα οξυγόνου και υδρογόνου, ικανοποιεί τη συνθήκη εάν δεν ενωθούν το οξυγόνο και υδρογόνο και σχηματίσουν ατμό.

**ΔΗΛΑΔΗ : καθαρή ουσία** = ομοιογενής ποσότητα ύλης με ομοιόμορφη χημική σύσταση σε όλη της την έκταση. Μπορεί να είναι μίγμα δύο φάσεων. Η θάλασσα μπορεί να θεωρηθεί καθαρή ουσία με την παραδοχή ότι περιέχονται σε σταθερή και ομοιόμορφη περιεκτικότητα διαλυμένα ανόργανα άλατα και χημικές ενώσεις σε όλη την έκταση των θαλασσών.

**Ένα μίγμα δυο ή περισσότερων φάσεων είναι μια καθαρή ουσία, εάν η χημική της σύνθεση όλων των φάσεων είναι η ίδια.**

**Οι παραπάνω έννοιες εξηγούνται στα παρακάτω παραδείγματα :**

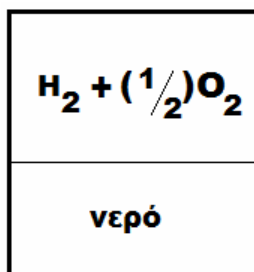
**Α.** Ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από πάγο και νερό, είναι ομοιογενές (έχει ομογενή σύσταση) επειδή τα άτομα του υδρογόνου και του οξυγόνου ευρίσκονται στην ίδια αναλογία 2 : 1 και στον πάγο και στο νερό. Επειδή ο πάγος και το νερό αποτελούνται από όμοια μόρια (πάγος και νερό  $H_2O$ ) το σύστημα είναι και χημικά ομοιογενές. Είναι και χημικά αμετάβλητο επειδή κατά τη διάρκεια της διαδικασίας δεν συμβαίνουν χημικές αντιδράσεις.



**Σχήμα 20 α**

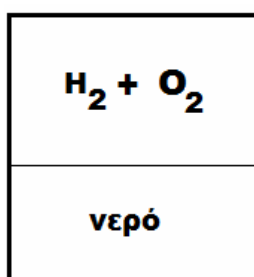


**Β.** Εάν το σύστημα αποτελείται από δύο μέρη όπου στο ένα μέρος υπάρχει αέριο μίγμα υδρογόνου και οξυγόνου σε αναλογία 2 : 1 και στο άλλο μέρος υπάρχει νερό, τότε και αυτό το σύστημα είναι ομοιογενές σε σύσταση. Δεν είναι όμως χημικά ομοιογενές επειδή το οξυγόνο και το υδρογόνο δεν είναι ενωμένα χημικά στο επάνω μέρος του συστήματος, ενώ στο κάτω μέρος το οξυγόνο και το υδρογόνο είναι ενωμένα με τη μορφή νερού. Μπορεί να είναι και χημικά αμετάβλητο εάν κατά τη διάρκεια της μελέτης το υδρογόνο και το οξυγόνο δεν αντιδρούν για σχηματισμό ατμού.



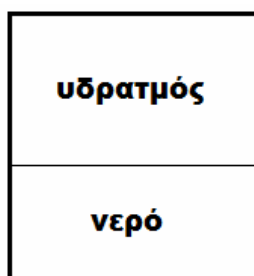
Σχήμα 20 β

**Γ.** Εάν όμως το αέριο μίγμα έχει υδρογόνο και οξυγόνο σε αναλογία 1 : 1 και το άλλο τμήμα του συστήματος έχει νερό όπου υδρογόνο και οξυγόνο είναι σε αναλογία 2 : 1, τότε το συνολικό σύστημα δεν είναι ομοιογενές. Επίσης δεν είναι χημικά ομοιογενές επειδή στο πάνω μέρος υδρογόνο και οξυγόνο δεν είναι ενωμένα χημικά, ενώ στο κάτω μέρος είναι ενωμένα με τη μορφή νερού. Μπορεί να είναι και χημικά αμετάβλητο εάν κατά τη διάρκεια της μελέτης το υδρογόνο και το οξυγόνο δεν αντιδρούν για σχηματισμό ατμού.



Σχήμα 20 γ

**Δ.** Ομοιογενές επίσης σε σύσταση είναι και μίγμα νερού σε υγρή μορφή και υδρατμοί, σύστημα που έχει και χημική ομοιογένεια αλλά είναι και χημικά αμετάβλητο.



Σχήμα 20 δ

**Σημειώνεται** ακόμη, ότι η σταθερή χημική σύσταση μέσα στα όρια του συστήματος είναι προϋπόθεση για θερμοδυναμική ισορροπία, ή ακόμη μίγματα διαφόρων ουσιών μπορούν να είναι σε θερμοδυναμική ισορροπία εάν η σχέση ανάμιξης είναι σταθερή σε όλο το σύστημα.

### 1.13. ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ

Κάθε μια ιδιότητα  $Y$  ενός συστήματος, μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση των συντεταγμένων  $X_1, X_2, \dots, X_n$  που η κάθε μια εκφράζει μια φυσική ιδιότητα :

$$Y = \varphi (X_1, X_2, \dots, X_n) \quad \text{ή} \quad \Phi (X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$$

δηλαδή μια ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ, μια σχέση η οποία προσδιορίζει μαθηματικά τη σχέση των ιδιοτήτων ενός συστήματος όταν βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας, και μάλιστα θερμοδυναμικής ισορροπίας όταν εξετάζονται από την άποψη των στόχων της θερμοδυναμικής, δηλαδή τον προσδιορισμό των μεταβλητών  $P, V, T, U, H, S$ .

Για τον ορισμό μιας κατάστασης θερμοδυναμικής ισορροπίας, απαιτούνται καταστατικά μεγέθη ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της δομής του συστήματος. Στις περισσότερες εφαρμογές εξετάζονται απλά συστήματα με αέρια και ρευστά, συστήματα δηλαδή για τα οποία απαιτούνται μόνο δυο ανεξάρτητα μεταξύ τους καταστατικά μεγέθη για τον ορισμό μίας κατάστασης θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Η **πίεση και ο ειδικός όγκος** (δηλαδή ο όγκος ανά μονάδα βάρους ή μάζας) **ορίζουν** μια κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας διότι είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Η **πυκνότητα  $\rho$  και ο ειδικός όγκος  $\nu$**  όμως **δεν μπορούν να ορίσουν** κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, διότι συνδέονται με τη σχέση  $\nu = 1 / \rho$ .

Για τα περισσότερα θερμοδυναμικά συστήματα ( δηλαδή απλά συστήματα με ομογενή ύλη για τα οποία έχει εμπειρικά εξακριβωθεί ότι προσιορίζονται επαρκώς από τις μεταβλητές ΠΙΕΣΗ – ΟΓΚΟ-ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ), η καταστατική εξίσωση έχει την πιο απλή μορφή :

$$f (p, \nu, T) = 0$$

και προσδιορίζει τη σχέση μεταξύ των καταστατικών μεγεθών :

- **πίεση  $p$**

- **ειδικός όγκος**  $\nu = \frac{V}{m} \left( \frac{m^3}{kg} \right)$  ή  $\nu = \frac{V}{B} \left( \frac{m^3}{kp} \right)$  ή μοριακός όγκος  $\mathcal{V} \left( m^3 / mole \right)$

- **θερμοκρασία  $T$**

ενός συστήματος που ευρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας , όταν δηλαδή τα καταστατικά μεγέθη παραμένουν σταθερά και δεν μεταβάλλονται χρονικά.

### ΣΗΜΕΙΩΣΗ

Η ανάλυση των καταστατικών εξισώσεων , γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.

## 1.14. Πού βασίζεται η Θερμοδυναμική

Η θερμοδυναμική βασίζεται, κυρίως, σε δύο αρχές, που είναι γνωστές σαν οι

### δύο νόμοι της θερμοδυναμικής ή θερμοδυναμικά αξιώματα.

**1<sup>ο</sup> ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΞΙΩΜΑ**, ή αξίωμα της αφθαρσίας της ενέργειας : είναι μια γενίκευση του γενικού φυσικού νόμου της διατήρησης της ενέργειας και εκφράζει την ποσοτική σχέση του μηχανικού έργου και της θερμότητας που εμφανίζονται σε κάθε μεταβολή κατάστασης ενός συστήματος.

$$\delta Q = dE + \delta L$$

ποσό θερμότητας που προσφέρεται στο σύστημα κατά τη μεταβολή	αύξηση ενέργειας του συστήματος κατά τη μεταβολή	έργο που παράγει το σύστημα κατά τη μεταβολή
---	--	--

Το 1<sup>ο</sup> Θ.Α. περιγράφει ότι σε μια μεταβολή, σε ένα φαινόμενο, ισχύει ο νόμος διατήρησης της ενέργειας. Αυτό δεν σημαίνει ότι κάθε φαινόμενο μπορεί να πραγματοποιηθεί, διότι υπάρχουν φαινόμενα που είναι σύμφωνα με το 1<sup>ο</sup> θ.α. αλλά δεν πραγματοποιούνται. Για παράδειγμα, όταν δυο σώματα, διαφορετικής θερμοκρασίας το ένα από το άλλο, έρθουν σε επαφή δεν παρατηρήθηκε το θερμό να γίνει θερμότερο ή το ψυχρό ψυχρότερο.

Το 1<sup>ο</sup> Θ.Α. λοιπόν, είναι μια αναγκαία, αλλά όχι ικανή, συνθήκη για την πραγματοποίηση ενός φαινομένου.

**2<sup>ο</sup> ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΞΙΩΜΑ**, ή αξίωμα αύξησης της εντροπίας (ορίζεται στη σελίδα 83) : δίδει τη μακροσκοπική εικόνα μιας θερμοδυναμικής μεταβολής ενός συστήματος, καθορίζοντας τις συνθήκες και την κατεύθυνση της μεταβολής.

Από το 1<sup>ο</sup> Θ.Α. προκύπτει ότι δεν τίθεται περιορισμός για τη διεύθυνση μεταφοράς του έργου ή/και της θερμότητας, αποτελεί δε αναγκαία συνθήκη για την πραγματοποίηση μιας μεταβολής.

Το 2<sup>ο</sup> Θ.Α. αναφέρεται σε ορισμένους περιορισμούς όσον αφορά στη συμπεριφορά των φυσικών συστημάτων.

Το 2<sup>ο</sup> Θ.Α. εξασφαλίζει την ικανή συνθήκη για την πραγματοποίηση ενός φαινομένου, μιας μεταβολής.

**Υπάρχουν οι εξής διατυπώσεις για το 2<sup>ο</sup> Θερμοδυναμικό Αξίωμα :**

**1<sup>η</sup> διατύπωση :** με τη βοήθεια της έννοιας της εντροπίας (σελ. ....) , ο νόμος αυτός καθορίζει ότι σε οποιαδήποτε μεταβολή κατάστασης ενός συστήματος το άθροισμα της μεταβολής της εντροπίας του συστήματος και του περιβάλλοντος δεν είναι δυνατό να μειωθεί :

$$\Delta S_{\text{συστήματος}} + \Delta S_{\text{περιβάλλοντος}} \geq 0$$

**2<sup>η</sup> διατύπωση :** το 2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα, υπαγορεύει ότι μόνο ένα μέρος της θερμότητας που δέχεται ένα σύστημα, από κάποια πηγή, μπορεί να μετατραπεί σε έργο από το ίδιο το σύστημα. Το υπόλοιπο πρέπει να μεταφερθεί σε μια δεξαμενή θερμότητας.

Κατά συνέπεια, για να λειτουργήσει μια θερμική μηχανή και να παράγει έργο, πρέπει να συνεργαστεί με μια πηγή θερμότητας (υψηλής θερμοκρασίας) και μια δεξαμενή θερμότητας (χαμηλής θερμοκρασίας).

**3<sup>η</sup> διατύπωση :** το 2<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα, υπαγορεύει ότι είναι αδύνατο να μεταδοθεί θερμότητα από ένα σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας προς ένα σύστημα υψηλής θερμοκρασίας χωρίς εξωτερική βοήθεια. Κατά συνέπεια, για να λειτουργήσει μια ψυκτική εγκατάσταση είναι αναγκαία η κατανάλωση εξωτερικής ενέργειας είτε με τη μορφή μηχανικού έργου, είτε με τη μορφή θερμότητας.

Με βάση τους δύο αυτούς νόμους και την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, εξετάζονται απλές μεταβολές καταστάσεως τελείου αερίου σε θερμικές μηχανές εσωτερικής καύσεως όπου το εργαζόμενο μέσο (αέρας ή μίγμα ανάλογα τη μηχανή) βρίσκεται στην ίδια φάση και δεν αλλάζει.

Αναφέρεται εδώ το τρίτο -3<sup>ο</sup>- θερμοδυναμικό αξίωμα ή αξίωμα του Nerst, σύμφωνα με το οποίο κατά την προσέγγιση στο απόλυτο μηδέν, η εντροπία κάθε χημικά ομογενούς κρυσταλλικού σώματος πλησιάζει ασύμπτωτα στην τιμή μηδέν.

Αναφέρεται ακόμα, το μηδενικό αξίωμα ή αξίωμα του Fowler, σύμφωνα με το οποίο εάν σώματα διαφόρων ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών τα τοποθετήσουμε σε χώρο αρκετά μεγάλο, γεμάτο με νερό ή άλλο υγρό ή αέριο και απομονωμένο από το περιβάλλον (θερμοκρασιακό λουτρό), μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα, τα σώματα αποκτούν την ίδια θερμοκρασία, είτε αλλάζουν τα χαρακτηριστικά τους είτε όχι.

Παρατήρηση : Από το 1<sup>ο</sup> Θ.Α. προκύπτει ότι δεν είναι δυνατό να παράγεται από το "μηδέν" θερμότητα και ακόμα ότι η θερμότητα δεν καταστρέφεται.

Με άλλα λόγια, δεν είναι δυνατό να κατασκευασθεί μηχανή, η οποία κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της να αποδίδει έργο μεγαλύτερο από την ενέργεια που προσδίδεται υπό μορφή θερμότητας.

Αυτό είναι το αεικίνητο του 1<sup>ου</sup> είδους.

## **ΣΗΜΕΙΩΣΗ**

**Τα αξιώματα της θερμοδυναμικής ισχύουν γενικά και όχι μόνο σε καταστάσεις ισορροπίας.**

**Η σημασία των καταστάσεων ισορροπίας για τη θερμοδυναμική είναι ότι όταν το σύστημα ευρίσκεται σε μια κατάσταση ισορροπίας , οι ιδιότητές του είναι σταθερές ανεξάρτητες του χρόνου και επομένως μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια και να αναπαραχθούν σε οποιοδήποτε τόπο και χρόνο.**

## **1.15. ΑΝΤΙΣΤΡΕΨΙΜΕΣ – ΜΗ ΑΝΤΙΣΤΡΕΨΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ**

Η παρατήρηση των φυσικών φαινομένων δείχνει ότι όλες οι μεταβολές που παρουσιάζονται στη φύση, έχουν μόνο μια κατεύθυνση προς την οποία μπορούν αυθόρμητα να πραγματοποιηθούν.

Είναι δυνατό να θεωρηθεί μια κατηγορία εξιδανικευμένων μεταβολών κατά τη διάρκεια των οποίων το σύστημα βρίσκεται πάντοτε πολύ κοντά σε θερμοδυναμική ισορροπία στο εσωτερικό του αλλά και με το περιβάλλον του.

Σε μια τέτοια περίπτωση, οποιαδήποτε αλλαγή στην κατάσταση του συστήματος μπορεί να εκτελεστεί και αντίστροφα, πραγματοποιώντας μόνο μια απειροστή αλλαγή στις συνθήκες του συστήματος, το οποίο πρέπει να διέρχεται από (ενδιάμεσες) διαδοχικές καταστάσεις ισορροπίας.

Ανάμεσα σε δύο συστήματα των οποίων οι θερμοκρασίες διαφέρουν απειροστά, είναι δυνατό να αντιστραφεί η παρατηρούμενη ροή θερμότητας, πραγματοποιώντας μια πολύ μικρή αλλαγή της μιας θερμοκρασίας ή της άλλης, δηλαδή μια ακόμη κατάσταση ισορροπίας.

Κάνοντας πολύ μικρές μεταβολές θερμοκρασίας και πίεσης, διατηρείται το σύστημα σε καταστάσεις ισορροπίας.

Μια αντιστρέψιμη ( *reversible* ) μεταβολή έχει τα εξής χαρακτηριστικά :

- 1.** αντίστροφη εκτέλεση της μεταβολής, έτσι ώστε το σύστημα να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση και ενεργειακά να μην παρατηρείται καμία αλλαγή στο περιβάλλον.
- 2.** ποιοτική και ποσοτική επαναφορά από την τελική στην αρχική κατάσταση της ενέργειας, η οποία κατά τη διάρκεια της μεταβολής μετατράπηκε.

Μια μεταβολή για να θεωρηθεί αντιστρέψιμη, πρέπει να ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις :

- 1.** σε όλη τη διάρκεια της μεταβολής πρέπει το σύστημα να ευρίσκεται σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Αυτή η προϋπόθεση δεν επιτυγχάνεται ποτέ ιδανικά. Είναι δυνατό, να προσεγγισθεί τόσο πιο πολύ, όσο πιο αργά εκτελείται η διαδικασία της μεταβολής.  
Η ροή θερμότητας πρέπει να οφείλεται αποκλειστικά σε απειροστές διαφορές θερμοκρασίας ανάμεσα στο θερμοδυναμικό σύστημα και το περιβάλλον του, δηλαδή η μεταβολή πρέπει να εκτελείται πολύ αργά, γιατί μόνο τότε υπάρχουν απειροστές διαφορές θερμοκρασίας, ώστε κάθε ενδιάμεση κατάσταση να είναι κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, το σύστημα να μπορεί να προσαρμόζει τα καταστατικά του μεγέθη (πίεση, ειδικό όγκο, θερμοκρασία) κατά τρόπο ομοιόμορφο κατά τη διάρκεια της μεταβολής.
- 2.** Κατά τη διάρκεια της μεταβολής, δεν πρέπει να εμφανίζονται δυνάμεις τριβής. Στην περίπτωση που υπάρχει τριβή, είναι αδύνατο να αντιστραφεί η φορά της μεταβολής με μια απειροελάχιστη αντιστροφή των συνθηκών του περιβάλλοντος (προϋπόθεση που δεν επιτυγχάνεται ποτέ, προφανώς διότι πάντα η σχετική κίνηση των σωμάτων σε επαφή συνοδεύεται από δυνάμεις τριβής).  
Σε μια αντιστρεπτή μεταβολή, όλες οι ενδιάμεσες καταστάσεις είναι καταστάσεις θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Οι αντιστρεπτές μεταβολές μπορούν να διερευνηθούν με τους νόμους της θερμοδυναμικής, διότι οι νόμοι της θερμοδυναμικής μπορούν να εφαρμοσθούν μόνο σε καταστάσεις ισορροπίας, για τις οποίες άλλωστε και μόνο ισχύουν οι καταστατικές εξισώσεις.

Σε μια μη αντιστρεπτή ( *irreversible* ) μεταβολή , μπορούν να γίνουν ποσοτικές διατυπώσεις όταν η αρχική (πρίν τη μεταβολή ) και η τελική (μετά τη μεταβολή ) κατάσταση του συστήματος είναι καταστάσεις θερμοδυναμικής ισορροπίας και οι διατυπώσεις αυτές αναφέρονται στο συνολικό αποτέλεσμα και όχι στην πορεία της μεταβολής.

Οι αντιστρεπτές μεταβολές είναι ιδανικές μεταβολές , δεν έχουν εφαρμογή στην πράξη , χρησιμοποιούνται όμως αφ'ενός μόνο ως μέτρο σύγκρισης ώστε να κριθεί η ποιότητα των μη αντιστρεπτών μεταβολών και αφ'ετέρου ως στόχος διότι κατά την εφαρμογή τους επιτυγχάνονται τα μεγαλύτερα δυνατά έργα με την πρόσδοση μικρότερων ποσών θερμότητας.

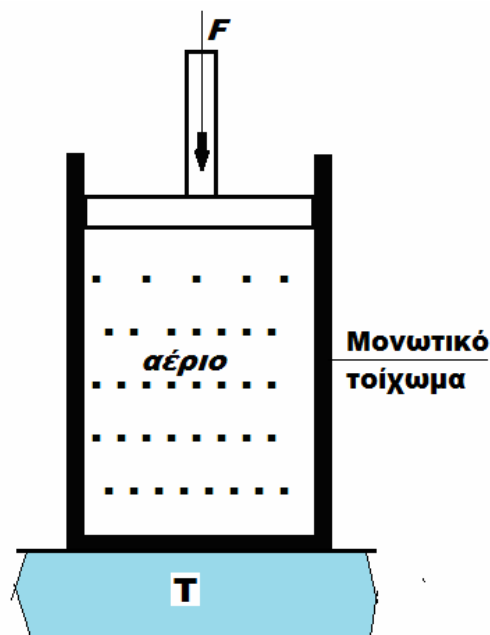
Όταν κατά τη εξέλιξη μιας μεταβολής παρουσιάζονται απώλειες κάθε είδους (τριβές , στροβιλισμοί , παραμορφώσεις κ.λ.π.) , τότε αυτή η μεταβολή είναι μη αντιστρεπτή , το δε αποτέλεσμα αυτής είναι ότι δεν μετατρέπεται όλη η προσδιδόμενη ενέργεια σε ωφέλιμη ενέργεια.

Οι μη αντιστρεπτές μεταβολές αντιστρέφονται μόνο στην περίπτωση που η ενέργεια που χάνεται αναπληρώνεται πλήρως από το περιβάλλον

Δίδεται ένα παράδειγμα για την κατανόηση της αντιστρέψιμης και μη αντιστρέψιμης μεταβολής.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται μια διάταξη κυλίνδρου (που περιέχει αέριο) με έμβολο, όγκου  $V$ . Το αέριο έχει πίεση  $p$  και θερμοκρασία  $T$  , θερμοδυναμικές μεταβλητές οι οποίες σε μια κατάσταση ισορροπίας παραμένουν σταθερές με το χρόνο. Έστω ότι τα τοιχώματα του κυλίνδρου είναι ιδανικά θερμικά μονωμένα , ενώ η βάση του κυλίνδρου είναι θερμικός αγωγός. Επίσης θεωρείται ότι σε μετακίνηση του εμβόλου δεν υπάρχουν τριβές μεταξύ εμβόλου και τοιχωμάτων κυλίνδρου. Ο κύλινδρος τοποθετείται επάνω σε μια μεγάλη δεξαμενή θερμότητας η οποία διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία.

Σε αυτή την συγκεκριμένη κατάσταση ισορροπίας τα καταστατικά μεγέθη  $p$ ,  $V$ ,  $T$  έχουν τιμές που προσδιορίζουν αυτή την κατάσταση



ΣΧΗΜΑ 21

Μια επόμενη κατάσταση ισορροπίας μπορεί να είναι το σύστημα όταν με κάποια διαδικασία φτάσει να έχει, για παράδειγμα, το  $1/3$  του όγκου του.

Αυτό επιτυγχάνεται με πολλούς τρόπους δύο εκ των οποίων μπορεί να είναι :

**1.** Προστίθεται ένα μικρό βάρος στο έμβολο ώστε αυτό να μετακινηθεί πολύ αργά έτσι ώστε πίεση, όγκος και θερμοκρασία του αερίου να έχουν καλά καθορισμένες τιμές. Η τοποθέτηση του πολύ μικρού βάρους θα επιφέρει μείωση του όγκου του συστήματος και η θερμοκρασία θα τείνει να αυξηθεί λίγο με αποτέλεσμα το σύστημα να χάσει για λίγο την ισορροπία του. Ένα μικρό ποσό θερμότητας θα μεταφερθεί στη δεξαμενή αλλά σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα το σύστημα θα φτάσει σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας και η θερμοκρασία θα λάβει πάλι την τιμή της δεξαμενής.

Η μεταβολή αυτή γίνεται αργά, έτσι ώστε η νέα κατάσταση να είναι κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας που προσδιορίζεται από τις νέες τιμές των καταστατικών μεγεθών. Έτσι προσδιορίζεται στο διάγραμμα του σχήματος -21- το σημείο "1".

Τοποθετώντας ένα δεύτερο βάρος κατά τον ίδιο τρόπο, προσδιορίζεται το σημείο "2" και συνεχίζοντας με επόμενα βάρη αργά ώστε να μετρώνται κάθε φορά τα καταστατικά μεγέθη, προσδιορίζονται τα σημεία μέχρι την τελική κατάσταση.

Τοποθετώντας ακόμα βάρη περιμένοντας κάθε φορά να αποκατασταθεί η θερμοδυναμική ισορροπία, ο όγκος μειώνεται μέχρι να φτάσει να είναι το  $1/3$  του αρχικού.

Στη διάρκεια αυτής της διαδικασίας το σύστημα βρέθηκε σε συνεχείς διαδοχικές καταστάσεις οι οποίες δεν διαφέρουν από μια κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Εκτελώντας το πείραμα με πρισσότερες διαδοχικές αυξήσεις της πίεσης χρησιμοποιώντας περισσότερα βάρη, θα προκύψουν περισσότερες καταστάσεις μικρότερης διάρκειας, με αποτέλεσμα μια συνολική διεργασία κατά την οποία το σύστημα περνά διαδοχικά από καταστάσεις ισορροπίας συνεπώς κάθε σημείο της μεταβολής "AB", είναι σημείο που προσδιορίζει κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας και αυτή μπορεί να παρασταθεί με μια συνεχή γραμμή σε διάγραμμα  $p - V$ .

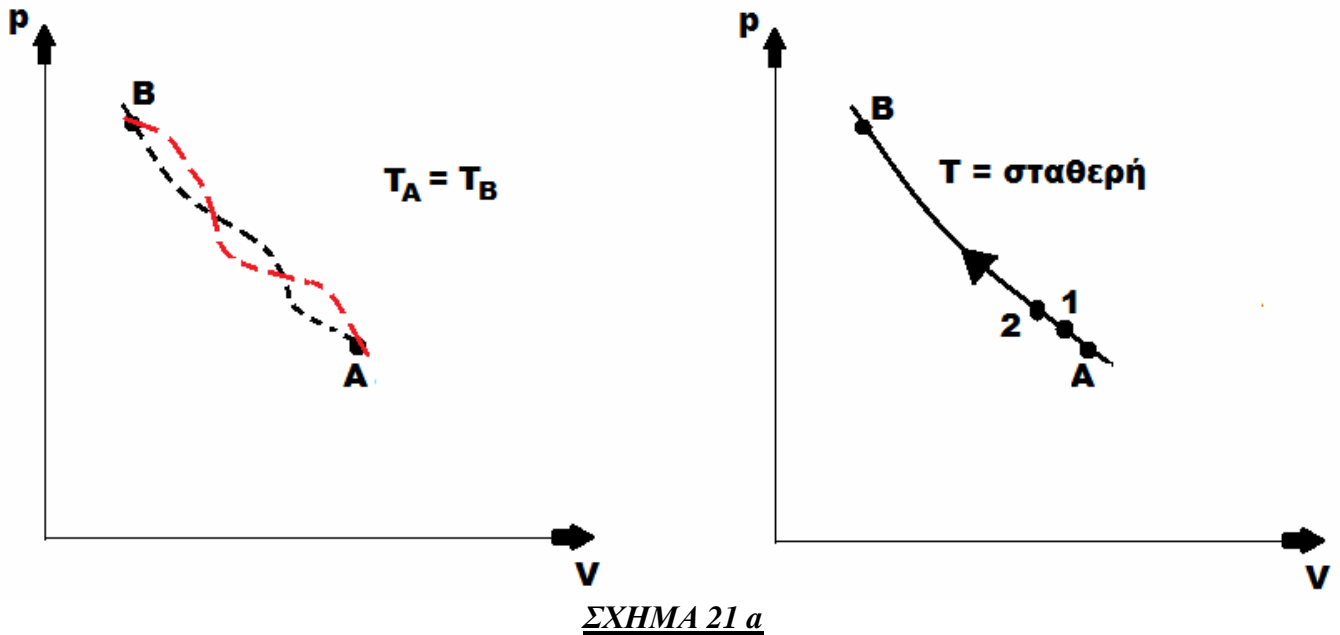
Αφαιρώντας τώρα κατά τον ίδιο τρόπο, αργά κάθε βάρος με τη σειρά, διατρέχεται η μεταβολή AB κατά την αντίστροφη πορεία, συναντώντας την κάθε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

**2.** Η ίδια μεταβολή, δηλαδή η "AB", είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί τοποθετώντας όλα τα βάρη μαζί. Σε αυτή τη δεύτερη διαδικασία το αέριο βρίσκεται σε αναταραχή και τα μεγέθη της πίεσης και της θερμοκρασίας δεν ορίζονται καλά με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η απεικόνιση της μεταβολής με μια συνεχή γραμμή στο διάγραμμα  $p - V$ , δεδομένου ότι δεν είναι εφικτός ο υπολογισμός της τιμής πίεσης ή θερμοκρασίας για κάποια τιμή του όγκου. Το σύστημα από την αρχική κατάσταση A θα μεταβεί στην τελική κατάσταση B αλλά μέσα από μια σειρά ενδιάμεσων καταστάσεων που όμως δεν μπορεί να είναι καταστάσεις ισορροπίας.

Από την αρχική κατάσταση "A" μέχρι την τελική κατάσταση "B", η πορεία θα είναι διαφορετική από την προηγούμενη και επιπλέον εάν αφαιρεθούν όλα τα βάρη μαζί, το σύστημα από την τελική κατάσταση "B" θα φθάσει στην αρχική κατάσταση "A" αλλά χωρίς η αντίστροφη πορεία να περνά από τα σημεία της προηγούμενης διαδρομής.

Στη δεύτερη αυτή περίπτωση οι διαδοχικές ενδιάμεσες καταστάσεις δεν είναι καταστάσεις θερμοδυναμικής ισορροπίας. Με άλλα λόγια η δεύτερη διαδικασία δεν αποτελεί αντιστρέψιμη μεταβολή.





Από το παραπάνω παράδειγμα γίνεται κατανοητό, ότι σε μια μεταβολή αντιστρεπτή οι ενδιάμεσες καταστάσεις είναι καταστάσεις ισορροπίας. Κατά τη διάρκεια της μεταβολής οι εξωτερικές συνθήκες μεταβάλλονται πολύ αργά ώστε το σύστημα να είναι σε κατάσταση ισορροπίας για κάθε τιμή των εξωτερικών συνθηκών.

Η αναφορά στις ιδανικές αυτές μεταβολές, προσφέρει ευκολία στη θεωρητική μελέτη αφ' ενός διότι το σύστημα κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας διέρχεται από ενδιάμεσες καταστάσεις ισορροπίας, αφ' ετέρου αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μοντελοποίηση των πραγματικών μεταβολών .

Οι αντιστρέψιμες μεταβολές χρησιμεύουν επίσης στην απλοποίηση των υπολογισμών και στον έλεγχο της απόδοσης των μηχανών και των εγκαταστάσεων που αξιοποιούν την ενέργεια.

Από τον ορισμό της αντιστρέψιμης μεταβολής προκύπτει ότι όταν μια μεταβολή χαρακτηριστεί μη αντιστρέψιμη, αυτό σημαίνει ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί ώστε να το σύστημα να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση, όμως αυτό στην πραγματικότητα δεν μπορεί να συμβεί με τις ίδιες ακριβώς προϋποθέσεις της αντιστρέψιμης : δηλαδή οι πραγματικές = μη αντιστρεπτές μεταβολές πραγματοποιούνται με δαπάνη ενέργειας η οποία δεν είναι τώρα αμελητέα.

**Το χαρακτηριστικό δηλαδή της αντιστρεψιμότητας ή μη αντιστρεψιμότητας μιας μεταβολής δεν είναι η επαναφορά του συστήματος στην αρχική κατάσταση, αλλά εάν με την αντιστροφή της μεταβολής παραμένουν μεταβολές στο περιβάλλον.**

Ως παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η διαδικασία της ελεύθερης εκτόνωσης ενός αερίου, το οποίο δεν επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση με *αυθόρμητη συμπίεση* αλλά απαιτείται κατανάλωση έργου για τον συμπίεσή.



**ΣΗΜΕΙΩΣΗ**

Η διαδικασία του πειράματος που περιγράφηκε στην περίπτωση 1 (σελ. 43) εκτός από αντιστρέψιμη είναι και ισόθερμη δεδομένης της υπόθεσης ότι η θερμοκρασία του αερίου διαφέρει σε όλες τις διαδοχικές καταστάσεις μόνο κατά ένα διαφορικό (ελάχιστο) ποσό  $dT$  από τη σταθερή θερμοκρασία της δεξαμενής επί της οποίας τοποθετήθηκε ο κύλινδρος του πειράματος.

Η διαδικασία μπορεί να γίνει (όχι απαραίτητα ισόθερμα) και με αδιαβατικό τρόπο εάν ο κύλινδρος τοποθετηθεί σε μονωμένη (αδιαβατική, δηλαδή δεν εναλλάσσεται θερμότητα από και προς το σύστημα) βάση.

Στην προκειμένη περίπτωση κατά τη διάρκεια της αδιαβατικής συμπίεσης η θερμοκρασία του αερίου θα αυξηθεί, δεδομένου ότι από το 1<sup>ο</sup> θερμοδυναμικό αξίωμα όταν η θερμότητα  $Q = 0$  (αδιαβατική μεταβολή) το έργο που προσφέρεται στο σύστημα από τη μετακίνηση του εμβόλου συνεπάγεται μια αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος.

Το έργο θα έχει διαφορετικές τιμές για διαφορετικές θέσεις του εμβόλου λόγω του κάθε φορά εφαρμοζόμενου φορτίου επί του εμβόλου, και υπολογίζεται από το εμβαδόν κάτωθεν της καμπύλης της μεταβολής στο διάγραμμα ( $p - V$ ) μόνο για τις αντιστρέψιμες μεταβολές. Αυτό σημαίνει ότι η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας και η αντίστοιχη μεταβολή της θερμοκρασίας θα είναι διαφορετική για αντιστρέψιμες και μη αντιστρέψιμες μεταβολές.

## 1.16. ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ - ΕΡΓΟ

### 1.16.1 ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

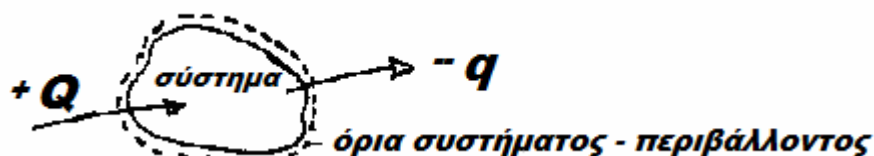
Η θερμότητα είναι μια μορφή ενέργειας, η οποία εκδηλώνεται όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας.

Ανταλλάσσεται μεταξύ δυο συστημάτων, ή ενός συστήματος και του περιβάλλοντός του μεταφέρεται δε μέσα από τα όρια του συστήματος και παύει να υπάρχει όταν εκλείψει η διαφορά της θερμοκρασίας.

Η θερμική κατάσταση ενός συστήματος καθορίζεται από τη δυναμική και κινητική ενέργεια των ατόμων ή των μορίων του τα οποία κινούνται συνεχώς με άτακτη κίνηση.

Η κινητική και δυναμική ενέργεια των ατόμων ή μορίων του συστήματος επιταχύνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του.

Η θερμότητα θεωρείται θετική (+) ποσότητα όταν προσδίδεται στο σύστημα και αρνητική (-) ποσότητα όταν αποβάλλεται από αυτό.



ΣΧΗΜΑ 22

Η θερμοκρασία είναι ένα φυσικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τη θερμική κατάσταση ενός συστήματος.

Η θερμότητα μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια με καλλίτερους όρους όταν ευρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, (υψηλή διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T$ ) και αντιθέτως η θερμότητα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά για παραγωγή έργου υπό χαμηλή θερμοκρασία.

Συνεπώς, η θερμοκρασία δίδει την ποιότητα της θερμότητας.

Ο όρος **θερμότητα**, αναφέρεται πάντοτε σε μεταφορά ενέργειας (*ενέργεια διεργασιών*) από σύστημα σε σύστημα και ποτέ σε ποσό ενέργειας που περιέχεται σε συγκεκριμένο σύστημα, άρα ένα σύστημα δεν έχει θερμότητα.

Επομένως, η θερμότητα ορίζεται μόνο στα όρια ενός συστήματος κατά τη διάρκεια της μεταφοράς της από ένα σύστημα σε ένα άλλο και για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η μεταφορά της.

Όταν σε ένα σύστημα προστεθεί ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, αυτή αποθηκεύεται σαν δυναμική και κινητική ενέργεια στα μόρια του συστήματος.

Η ροή θερμότητας δεν είναι απαραίτητο να προκαλέσει την αύξηση της θερμοκρασίας ενός συστήματος.

Θεωρώντας ένα σύστημα που αποτελείται από πάγο και νερό, δίδοντας θερμότητα στο σύστημα αυτό από κάποιο άλλο υψηλότερης θερμοκρασίας, η θερμοκρασία του συστήματος δεν αυξάνεται μέχρι να μετατραπεί ο πάγος σε νερό. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει μόνον όταν ένα σύστημα αλλάζει φάση και η θερμότητα που λαμβάνει μέρος σε αυτή τη διαδικασία είναι η λανθάνουσα θερμότητα, η οποία διακρίνεται σε :

**Λανθάνουσα θερμότητα τήξεως**, όταν δηλαδή στερεό σώμα μετατρέπεται σε υγρό

**Λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης**, όταν υγρό μετατρέπεται σε αέριο (ατμό).

Το φαινόμενο (μικροσκοπικό φαινόμενο) εξηγείται με την αλλαγή της δυναμικής και κινητικής κατάστασης των μορίων της ύλης και εξετάζεται στην ατμοποίηση του νερού.

Δεν είναι απαραίτητο πάντα να δίδεται θερμότητα για την ανύψωση της θερμοκρασίας ενός συστήματος. Σε ένα μονωμένο δοχείο που περιέχει υδρογόνο και οξυγόνο, παράγεται νερό λόγω της χημικής αντίδρασης, η αντίδραση αυτή συνοδεύεται από αύξηση της θερμοκρασίας αλλά χωρίς ροή θερμότητας λόγω της μόνωσης του δοχείου.

Η ανάφλεξη μίγματος αέρα – καυσίμου στον κύλινδρο μιας βενζινομηχανής, είναι η αρχή μιας χημικής αντίδρασης από την οποία παράγονται καυσαέρια με πολύ μεγαλύτερη θερμοκρασία από τα αρχικά συστατικά του μίγματος.

Η θερμότητα που μεταφέρεται στο γύρω ψυχόμενο χώρο του θαλάμου καύσεως, προέρχεται από το σύστημα και δεν προκάλεσε αυτή την αύξηση της θερμοκρασίας.

### Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για τη θερμότητα είναι :

Διεθνές σύστημα : **K Joule / kg** = ειδική θερμότητα, δηλαδή θερμότητα ως προς τη μονάδα μάζας του συστήματος

Τεχνικό σύστημα : **Kcal / kp** = ειδική θερμότητα, δηλαδή θερμότητα ως προς τη μονάδα βάρους του συστήματος

$$1 \text{ Kcal} = 4,1868 \text{ K Joule}$$

$$1 \text{ Btu} = 778 \text{ ft} * \text{lb} = 252 \text{ cal} = 1055 \text{ Joule}$$

$$\text{Kcal} / \text{kp} * 4,1868 = \text{K Joule} / \text{kg}$$

**Σημείωση** : η χλιοθερμίδα (kcal) ορίζεται σαν το ποσό της θερμότητας που απαιτείται ώστε η θερμοκρασία του 1 (kg)  $H_2O$  να αυξηθεί κατά  $1^\circ C$  (από  $14,5^\circ C$  σε  $15,5^\circ C$ ).

### **1.16.1.α ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

Όταν υπάρχουν διαφορές θερμοκρασίας η θερμότητα μεταφέρεται από τις υψηλές θερμοκρασίες στις χαμηλές θερμοκρασίες.

Αυτό συμβαίνει είτε μέσα σε ένα σύστημα ή μεταξύ συστημάτων, ή μεταξύ δύο χώρων που διαχωρίζονται με ένα τοίχωμα.

Περιληπτική περιγραφή των τρόπων μεταφοράς της θερμότητας :

#### **A. Μετάδοση με αγωγιμότητα ή με αγωγή**

Είναι η μεταφορά της θερμότητας από μια περιοχή ενός σώματος σε μια άλλη, ή μεταξύ δυο σωμάτων σε επαφή, μεταφορά η οποία οφείλεται σε κινήσεις των μορίων του σώματος. Το φαινόμενο της

αγωγιμότητας παρουσιάζεται σε όλα τα φυσικά σώματα, στερεά, υγρά, αέρια ενδιαφέρει όμως περισσότερο τα στερεά σώματα.

#### **B. Μετάδοση δια μεταφοράς (κυκλοφορία)**

Η θερμότητα μεταφέρεται μέσα στα μάζα των ρευστών, ή μεταβιβάζεται από ένα ζεστό σώμα σε υγρό ή αέριο που κινείται (ή σε επαφή με το στερεό σώμα).

Όταν η μεταφορά θερμότητας δια συναγωγής γίνεται εξ αιτίας διαφοράς πυκνότητας του ρευστού που είναι σε διαφορετική θερμοκρασία, τότε ονομάζεται **ελεύθερη ή φυσική συναγωγή** (φυσική μεταφορά ή φυσική κυκλοφορία).

Στην περίπτωση που η ροή του ρευστού προκαλείται από τεχνητά μέσα (χρήση ανεμιστήρα ή χρήση αντλίας), τότε ονομάζεται **εξαναγκασμένη ή βεβιασμένη κυκλοφορία**.

Φυσική (ελεύθερη) κυκλοφορία είναι η ροή του αέρα στα οικιακά σώματα θέρμανσης.

**Σημείωση** : σε πολλές περιπτώσεις οι δύο προαναφερόμενοι τρόποι μετάδοσης θερμότητας συνυπάρχουν. Παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης είναι τα ψυγεία, όπως και οι πλευρικές εξωτερικές φρακτές των χώρων ενδιάτησης των πλοίων, οι μεταλλικές εσωτερικές επιφάνειες των οποίων καλύπτονται με μόνωση. Επειδή η εσωτερική θερμοκρασία είναι υψηλότερη της εξωτερικής (περιβάλλον), η θερμότητα μεταφέρεται δια μεταφοράς από τον αέρα του χώρου στην εσωτερική πλευρά της μόνωσης, δια αγωγιμότητας μεταξύ μόνωσης και μεταλλικής επιφάνειας της φρακτής, δια μεταφοράς μεταξύ της εξωτερικής επιφάνειας της φρακτής και του περιβάλλοντος αέρα.

#### **Γ. Μετάδοση δια ακτινοβολίας**

Η θερμότητα μεταφέρεται από στερεό σώμα σε άλλο χωρίς αυτά να έρχονται σε επαφή. Κάθε σώμα που ευρίσκεται σε ορισμένη θερμοκρασία εκπέμπει θερμική ενέργεια υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, σε σώμα με χαμηλότερη θερμοκρασία.

Για τη μεταφορά δια ακτινοβολίας δεν απαιτείται ύλη ανάμεσα στα σώματα και αυτή μπορεί να μεταδοθεί και μέσα από το κενό.

Ένα μέρος αυτής της ακτινοβολίας διαπερνά το σώμα, ένα άλλο μέρος αντανακλάται και ένα μέρος απορροφάται. Η θερμική ενέργεια του ήλιου μεταφέρεται στη γη δια ακτινοβολίας.

### 1.17. ΕΡΓΟ

Το έργο, όπως και η θερμότητα είναι μια αλληλεπίδραση μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, ανταλλάσσεται μέσα από τα όρια του συστήματος με το περιβάλλον (*μεταβατικό φαινόμενο*) και διαρκεί όσο χρονικό διάστημα πραγματοποιείται (εξελίσσεται) η διεργασία.

Το έργο είναι μια μορφή ενέργειας που προκύπτει από την επενέργεια εξωτερικής δύναμης στα όρια του συστήματος και το μέγεθός του είναι ίσο με το γινόμενο της δύναμης επί τη μετατόπιση του σημείου εφαρμογής της στην κατεύθυνση της δύναμης.

Στη θερμοδυναμική, το έργο έχει ευρύτερη έννοια. Όταν ένα σύστημα ασκεί μια δύναμη επί του περιβάλλοντος ταυτόχρονα γίνεται και μετατόπιση ή παραμόρφωση του συστήματος, το έργο που παράγεται είναι εξωτερικό έργο (π.χ., ώθηση εμβόλου από τα καυσαέρια που παράγονται μέσα στο θάλαμο καύσεως).

Το έργο που εκτελείται από μέρος ενός συστήματος στο υπόλοιπο σύστημα, είναι εσωτερικό έργο (συγκρούσεις μεταξύ των μορίων).

Αυτό που ενδιαφέρει στην εφαρμοσμένη θερμοδυναμική, είναι το έργο που συνεπάγεται αλληλεπίδραση μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος, δηλαδή *το εξωτερικό έργο*.

Η δύναμη που προκαλεί το έργο μπορεί να οφείλεται σε φαινόμενα μαγνητικά, ηλεκτρικά, στη βαρύτητα ή άλλες αιτίες.

Το έργο αναφέρεται σε αυτές τις διεργασίες μεταφοράς ενέργειας και δεν αναφέρεται σε μεταφορά ενέργειας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.

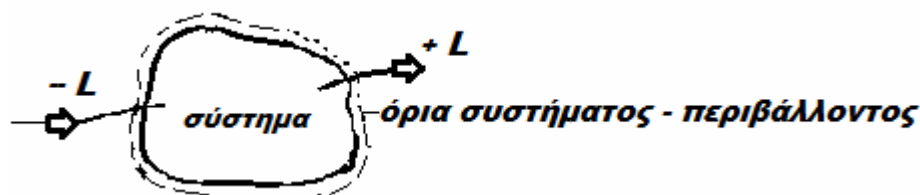
Έργο μπορεί να δοθεί στο σύστημα ή να αφαιρεθεί από το σύστημα χωρίς περιορισμούς στην ποσότητα (όπως φαίνεται στο πείραμα Joule) αρκεί να επιτευχθεί το ζητούμενο αποτέλεσμα.

Το έργο δηλαδή δεν αποτελεί χαρακτηριστικό της κατάστασης του συστήματος, αλλά η πρόσδοση ή / και η αφαίρεσή του διαρκεί όσο η μεταβολή στην οποία υποβάλλεται το σύστημα από μια θερμοδυναμική κατάσταση σε μια άλλη.

Έργο προκαλείται από την κίνηση ενός εμβόλου, από μια έλικα συνδεδεμένη με μια άτρακτο, από ηλεκτρικό ρεύμα που διαπερνά ένα μεταλλικό καλώδιο (σύρμα).

Η παραγωγή του έργου από το σύστημα είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα μιας μεταβολής ενώ η κατανάλωση (δαπάνη) έργου είναι ανεπιθύμητο αποτέλεσμα, επομένως χρειάζεται μια σύμβαση προσήμου :

***Το έργο θεωρείται θετική (+) ποσότητα όταν εξέρχεται από το σύστημα και προσφέρεται στο χρήστη, και αρνητική (-) ποσότητα όταν προσδίδεται στο σύστημα.***



ΣΧΗΜΑ 23

**Το έργο και η θερμότητα ως μορφές ενέργειας μεταξύ συστήματος και περιβάλλοντος, έχουν κοινά χαρακτηριστικά**, όπως :

- γίνονται αντιληπτά όταν διαπερνούν τα όρια του συστήματος
- είναι μορφές ενέργειας ανταλλαγής, δεδομένου ότι στα συστήματα περιέχεται ενέργεια όχι όμως έργο ή θερμότητα
- είναι συνδεδεμένα με μια μεταβολή (διεργασία) και όχι με μια κατάσταση ισορροπίας. **Το έργο και η θερμότητα** παύουν να υπάρχουν όταν σταματήσει η διεργασία, δηλαδή **δεν είναι καταστατικά μεγέθη**.
- Το **έργο και η θερμότητα** είναι **συναρτήσεις διαδρομής**, εξαρτώνται δηλαδή από την διαδρομή που το σύστημα ακολουθεί από την αρχική έως την τελική κατάσταση της μεταβολής στην οποία υποβάλλεται το σύστημα.

### **1.18. Τέλεια διαφορικά (σημειακές συναρτήσεις) και Μη τέλεια διαφορικά (συναρτήσεις διαδρομής ή μεταφοράς)**

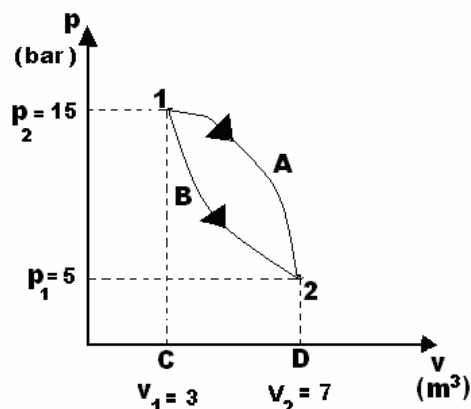
**1.18.1.** Υπάρχουν θερμοδυναμικά μεγέθη, όπως είναι τα καταστατικά μεγέθη, τα οποία είναι μονοσήμαντες συναρτήσεις της κατάστασης του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή αυτών των μεγεθών για μια συγκεκριμένη κατάσταση είναι η ίδια ανεξάρτητα με τον τρόπο που το σύστημα έφτασε στη συγκεκριμένη κατάσταση. Η ιδιότητα αυτή εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση :

$\int_1^2 dF = F_2 - F_1$  μεταξύ δυο σημείων ή  $\oint dF = 0$  σε μια κλειστή μεταβολή , όπου  $F$  είναι ένα οποιοδήποτε καταστατικό μέγεθος.

Μια συνάρτηση της οποίας η τιμή ορίζεται μονοσήμαντα σε κάθε σημείο ( $\chi, \psi$ ) του επιπέδου  $\chi\psi$  ονομάζεται **σημειακή συνάρτηση** , και το διαφορικό της που ικανοποιεί την παραπάνω σχέση είναι ένα **τέλειο διαφορικό**.

Για τα μεγέθη που ισχύουν τα προαναφερόμενα , χρησιμοποιείται ο συμβολισμός ***d*** .

Εάν θεωρηθεί η μεταβολή A ή B παρακάτω του σχήματος



**ΣΧΗΜΑ 24**

τότε η μεταβολή της πίεσης κατά τη μεταβολή  $\overline{12}$  αντιστοιχεί πάντοτε στη διαφορά της τελικής από την αρχική τιμή, ανεξάρτητα από τη διαδρομή που έχει ακολουθήσει το σύστημα :

Επομένως η απειροστή διαφορά πίεσης παριστάνεται από το **dp** και η συνολική μεταβολή της πίεσης μεταξύ των ακραίων καταστάσεων (αρχική και τελική) της μεταβολής  $\overline{12}$  είναι :

$$\Delta p = \int_1^2 dp = p_2 - p_1, \quad \text{δηλαδή :} \quad (\Delta p)_A = 10 \text{ bar} \quad (\Delta p)_B = 10 \text{ bar}$$

Το ίδιο ισχύει και για τη μεταβολή του όγκου :

$$\Delta V = \int_1^2 dV = v_2 - v_1, \quad \text{δηλαδή :} \quad (\Delta V)_A = 4 \text{ m}^3 \quad (\Delta V)_B = 4 \text{ m}^3$$

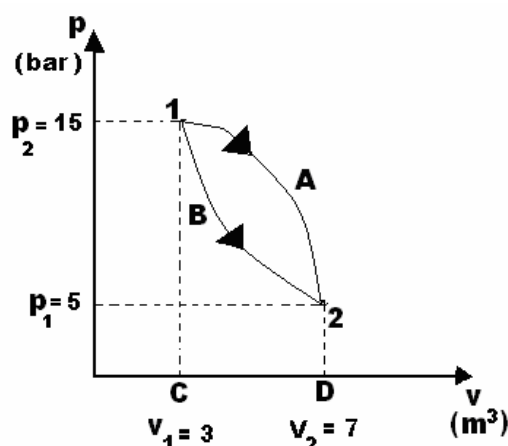
**1.18.2.** Θερμοδυναμικά μεγέθη τα οποία περιγράφουν μεταβολές ένα επίπεδο ( $\chi\psi$ ) και η τιμή τους δεν μπορεί να ορισθεί μονοσήμαντα από τις μεταβλητές  $\chi$  και  $\psi$ , εκφράζονται από συναρτήσεις που ονομάζονται συναρτήσεις διαδρομής, δηλαδή η τιμή τους εξαρτάται από τον τρόπο (= διαδρομή) με τον οποίο το σύστημα από μια κατάσταση 1 φτάνει στην κατάσταση 2. Τέτοια μεγέθη είναι η θερμότητα και το έργο.

Στο διάγραμμα ( $p - v$ ) του επομένου σχήματος, ως γνωστόν το έργο μπορεί να υπολογιστεί από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της κάθε μεταβολής. (Για την ιδιότητα αυτή το εν λόγω διάγραμμα είναι πολύ χρήσιμο για τη μελέτη των θερμικών μηχανών).

Είναι προφανές ότι :  $[C 1 A 2 D] > [C 1 B 2 D]$

δηλαδή το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της μεταβολής A είναι μεγαλύτερο από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της μεταβολής B, παρά το γεγονός ότι το σύστημα έχει την ίδια αρχική και την ίδια τελική κατάσταση ακολουθώντας τη μια ή την άλλη μεταβολή.

Το εμβαδόν παριστάνει το έργο, το οποίο όμως έχει άλλη τιμή για την μεταβολή A και άλλη τιμή για τη μεταβολή B.

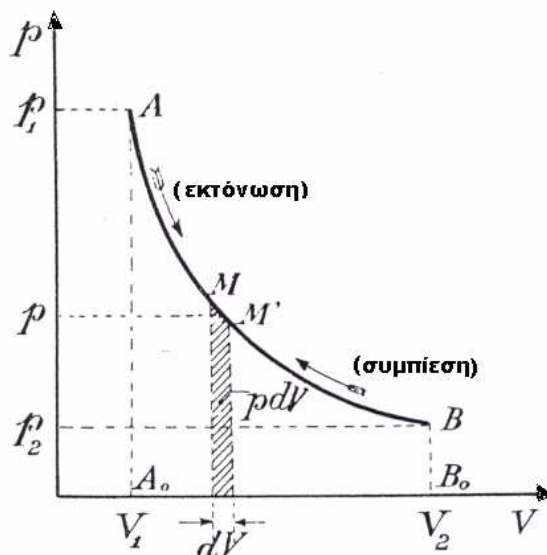


ΣΧΗΜΑ 25

Το έργο ( $L$ ) είναι μια συνάρτηση διαδρομής (δεν είναι τέλειο διαφορικό), και οι απειροελάχιστες μεταβολές του παριστάνονται με το γράμμα  $\delta$ , δηλαδή ένα πολύ μικρό ποσό του έργου παριστάνεται με  $\delta L$ .

Έστω ένας κύλινδρος με σταθερά τοιχώματα που περιέχει αέριο και μέσα στον οποίο υπάρχει ένα κινούμενο έμβολο και η κίνηση του εμβόλου δημιουργεί μεταβολή του όγκου του αερίου, οπότε δημιουργείται εναλλαγή του έργου που ονομάζεται : **έργο ογκομεταβολής**.

Στο διάγραμμα ( $p - v$ ) (ή διάγραμμα Clapeyron) η γραμμή AB είναι η γραφική παράσταση της συνάρτησης  $p = f(V)$  μεταξύ αρχικής και τελικής κατάστασης A και B.



ΣΧΗΜΑ 26

Για μια πολύ μικρή μεταβολή του όγκου  $dV$ , το αντίστοιχο ποσό του έργου είναι :

$$\delta L = p \cdot dV$$

και παριστάνεται γραφικά από το σκιασμένο εμβαδόν του σχήματος.

Το συνολικό έργο δίδεται από την :  $L_{1,2} = \int_1^2 \delta L = \int_1^2 p \cdot dV$

δηλαδή από το άθροισμα όλων των στοιχειωδών ποσοτήτων έργου και παριστάνεται γραφικά από το εμβαδόν  $[A_0 A B B_0 A_0]$ .

Με μια πρώτη ματιά μπορούν να συγκριθούν τα ποσά έργου για κάθε μεταβολή στο διάγραμμα.

Εάν η μεταβολή εξελίσσεται κατά την αύξηση του όγκου (εκτόνωση) , το έργο που εκτελεί το ρευστό είναι θετικό και αντιστοιχεί στο εμβαδόν  $[A_0 A B B_0 A_0]$  και έχει θετικό πρόσημο.

Εάν το φαινόμενο εξελίσσεται στην αντίθετη κατεύθυνση προς την μείωση του όγκου (συμπίεση) τότε το εμβαδόν είναι  $[B_0 B A A_0 B_0]$  και εκτελείται επί του ρευστού και έχει αρνητικό πρόσημο.



Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται για το έργο είναι :

Διεθνές σύστημα :  $\text{K Joule / kg} = \text{ειδικό έργο, δηλαδή έργο ως προς τη μονάδα μάζας του συστήματος}$

Τεχνικό σύστημα :  $\text{Kpm / kp} = \text{ειδικό έργο, δηλαδή έργο ως προς τη μονάδα βάρους του συστήματος}$

$$\frac{\text{Kpm}}{\text{kp}} \cdot A = \frac{\text{Kpm}}{\text{kp}} \cdot \frac{1}{427} \cdot \frac{\text{Kcal}}{\text{kpm}} = \frac{\text{Kcal}}{\text{kp}} \quad , \quad \text{Όπου } A = \frac{1}{427} \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{kpm}} \right) \text{ είναι το θερμικό ισοδύναμο του έργου.}$$

Διακρίνεται :

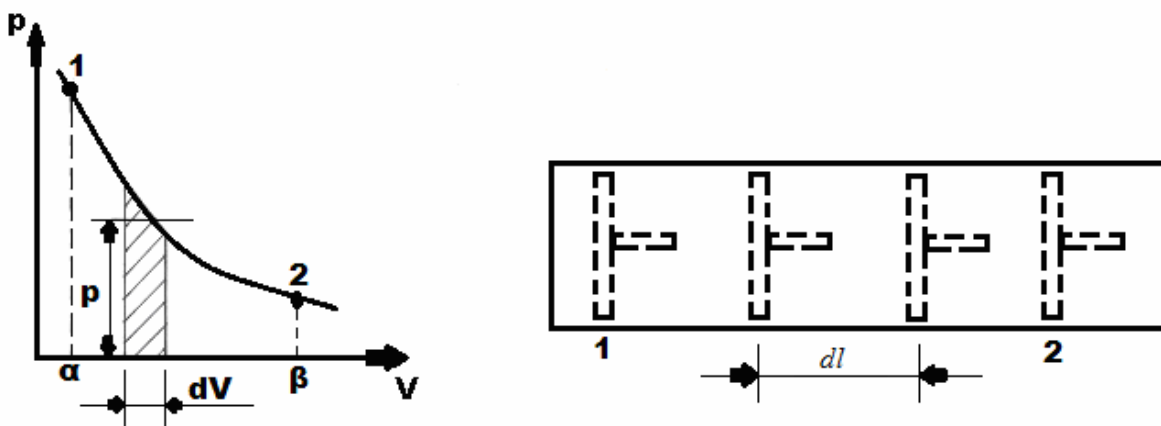
A. Μηχανικό έργο = το έργο των δυνάμεων που επιταχύνουν ή ανυψώνουν το σύστημα, επενεργώντας στο εξωτερικό του συστήματος. Μεταξύ δύο καταστάσεων 1 και 2, είναι

$$(\Delta E)_{\text{κιν.}} = (E_{\text{κιν.}})_2 - (E_{\text{κιν.}})_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (c_2^2 - c_1^2)$$

$$(\Delta E)_{\text{δυν.}} = (E_{\text{δυν.}})_2 - (E_{\text{δυν.}})_1 = m \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$$

$$L_m = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (c_2^2 - c_1^2) + m \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$$

B. Έργο ογκομεταβολής = είναι το έργο που μεταφέρεται δια των ορίων του συστήματος κατά τη μεταβολή του όγκου του.



ΣΧΗΜΑ 27

Όταν ένα έμβολο επιφάνειας "Α" μετακινείται σε ένα κύλινδρο κατά  $dl$ , αποδίδεται έργο :

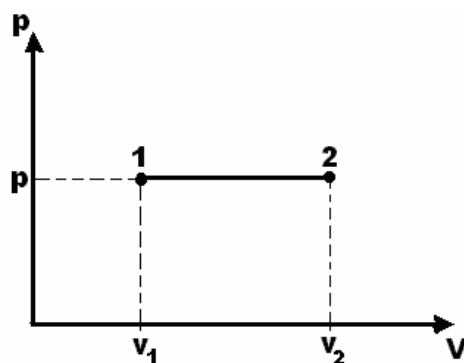
Για τη μεταβολή 1 – 2, **το συνολικό έργο** είναι :

$$L_V = \int_1^2 dL_V = \int_1^2 p \cdot dV \quad (\text{όπου η στοιχειώδης επιφάνεια } dA = p \cdot dV)$$

**και** αυτό **παριστάνεται** από την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη στα όρια της μεταβολής, δηλαδή από το εμβαδόν (α12β).

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι το έργο που παράγεται από το σύστημα, δεν εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση του συστήματος, αλλά εξαρτάται επίσης και από τη διαδρομή.

**Όταν η ασκούμενη πίεση είναι σταθερή, τότε είναι :**



**ΣΧΗΜΑ 28**

$$L_V = \int_1^2 dL_V = \int_1^2 p \cdot dV = p \int_1^2 dV = p \cdot (V_2 - V_1)$$

όπου  $p$  είναι η πίεση στην επιφάνεια του εμβόλου.

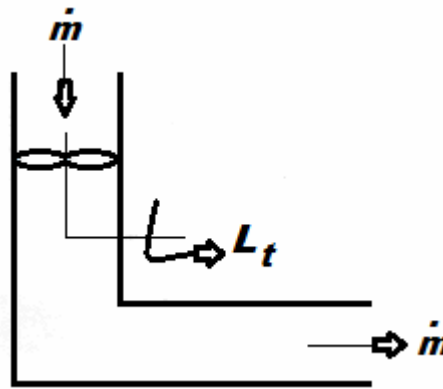
Όταν το σύστημα συμπιέζεται  $dV < 0$  οπότε  $dL_V < 0$  (πρόσδοση έργου από το περιβάλλον στο σύστημα = κατανάλωση έργου).

Όταν το σύστημα εκτονώνεται  $dV > 0$  οπότε  $dL_V > 0$  (παραγωγή έργου από το σύστημα στο περιβάλλον)

### **Γ. Τεχνικό Έργο**

Είναι το έργο που αποδίδεται στην άτρακτο ενός συστήματος στο οποίο εκτελείται διεργασία σταθερής ροής.

Σε ένα ανοικτό δηλαδή σύστημα όπου υπάρχει συνεχής ροή μάζας που ενεργεί σε μηχανισμούς (= πτερύγια) και παράγει έργο στην άτρακτο.



ΣΧΗΜΑ 29

$$(\text{ενέργεια}) \times (\text{ροή μάζας}) = \text{ισχύς} = \frac{L_t}{\text{χρόνος}}$$

Σημειώνεται ότι προϋπόθεση του τεχνικού έργου είναι η σταθερότητα της ροής της ύλης διαμέσου του συστήματος :  $\frac{dm}{dt} = \text{σταθ.}$

### Α. Ηλεκτρικό έργο

Το ηλεκτρικό έργο είναι το μηχανικό έργο που απαιτείται για να κινηθεί μια ποσότητα ηλεκτρονίων ενός ηλεκτρικού φορτίου  $q$  (Cb) μεταξύ δύο σημείων μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο (π.χ. ένα ηλεκτρικό κύκλωμα) εξ αιτίας μιας διαφοράς δυναμικού (τάση)  $V$  ( $\text{Volt} = \text{Joule}/\text{Cb}$ )

Ο υπολογισμός του έργου  $L_{\text{ηλεκτρ.}}$  της ηλεκτρικής δύναμης που ασκείται, δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$$L_{\text{ηλεκτρ.}} = V \cdot q \text{ (Joule) και η}$$

**ηλεκτρική ισχύς  $N$**  για χρονικό διάστημα  $dt$  στο οποίο το φορτίο  $q$  (Cb) διέρχεται από τα όρια του συστήματος είναι :

$$N = \frac{L_{\text{ηλεκτρ.}}}{dt} = \frac{V \cdot q}{dt} = V \cdot \frac{q}{dt} = V \left( \frac{\text{Joule}}{\text{Cb}} \right) \cdot I \left( \frac{\text{Cb}}{\text{sec}} \right) = V \cdot I \text{ (Watt)}$$

όπου  $I$  = η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, δηλαδή ο ρυθμός διέλευσης του ηλεκτρικού φορτίου από μια διατομή του αγωγού, εκφράζεται δε με τη μονάδα μέτρησης  $1 \text{ Ampere} = 1 \text{ A} = 1 \frac{\text{Cb}}{\text{sec}}$

Το ηλεκτρικό έργο, εάν είναι γνωστή η μεταβολή της τάσης  $V$  και της έντασης  $I$  του ρεύματος, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση :

$$L_{\eta\lambdaεκτρ.} = \int_{t_1}^{t_2} N dt = \int_{t_1}^{t_2} V \cdot I dt, \text{ και εάν τα μεγέθη } \mathbf{V} \text{ και } \mathbf{I} \text{ είναι σταθερά, τότε προκύπτει :}$$

$$L_{\eta\lambdaεκτρ.} = V \cdot I \cdot (t_2 - t_1)$$

### Ε. Έργο ελατηρίου

Εφαρμόζοντας μια δύναμη  $F$  σε ένα ελατήριο, το μήκος του ελατηρίου μεταβάλλεται κατά  $dx$ , οπότε το έργο είναι :

$$\delta L_{\epsilon\lambdaατ.} = F \cdot dx$$

Για τον υπολογισμό του ολικού έργου του ελατηρίου χρειάζεται η σχέση που συνδέει τη δύναμη με τη μετατόπιση του ελατηρίου :

$F = k_{\epsilon\lambdaατ.} \cdot x$ , όπου  $k_{\epsilon\lambdaατ.}$  είναι η σταθερά του ελατηρίου, η δε μετατόπιση  $x$  μετριέται από την αρχική θέση.

Οπότε είναι :

$$\delta L_{\epsilon\lambdaατ.} = k_{\epsilon\lambdaατ.} \cdot x \cdot dx \Rightarrow L_{\epsilon\lambdaατ.} = \frac{1}{2} \cdot k_{\epsilon\lambdaατ.} \cdot (x_2^2 - x_1^2)$$

όπου  $x_1, x_2$  είναι η αρχική και η τελική μετατόπιση του ελατηρίου μετρούμενη από τη θέση ανάπαυσης του ελατηρίου.

Το έργο που γίνεται επί του ελατηρίου ισούται προς τη μεταβολή της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο ελατήριο.

### Ε. Έργο σκεδάσεως

Είναι η ενέργεια που δεν μεταβάλλεται σε ωφέλιμη ενέργεια αλλά διασπείρεται σε άλλες μορφές που δεν εξυπηρετούν τους σκοπούς της εκτελούμενης μεταβολής.

Σαν παράδειγμα αναφέρεται το έργο όγκου που εκτελεί ένα αέριο σε ένα κύλινδρο, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το έργο που μεταφέρεται στο διωστήρα. Αυτό συμβαίνει διότι ένα μέρος του έργου μετατρέπεται σε θερμότητα λόγω τριβών μεταξύ των τοιχωμάτων του κυλίνδρου και του εμβόλου.

Το ίδιο συμβαίνει εάν το έργο προσάγεται από το περιβάλλον στο σύστημα.

Το έργο σκεδάσεως προσδιορίζεται μόνο εμπειρικά και μετά από σχετικές μετρήσεις.

**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ**

**1<sup>η</sup> Παρατήρηση :** το έργο και η θερμότητα **δεν είναι** καταστατικές θερμοδυναμικές μεταβλητές. Οι τιμές τους δεν είναι χαρακτηριστικές της θερμοδυναμικής κατάστασης ισορροπίας του συστήματος.

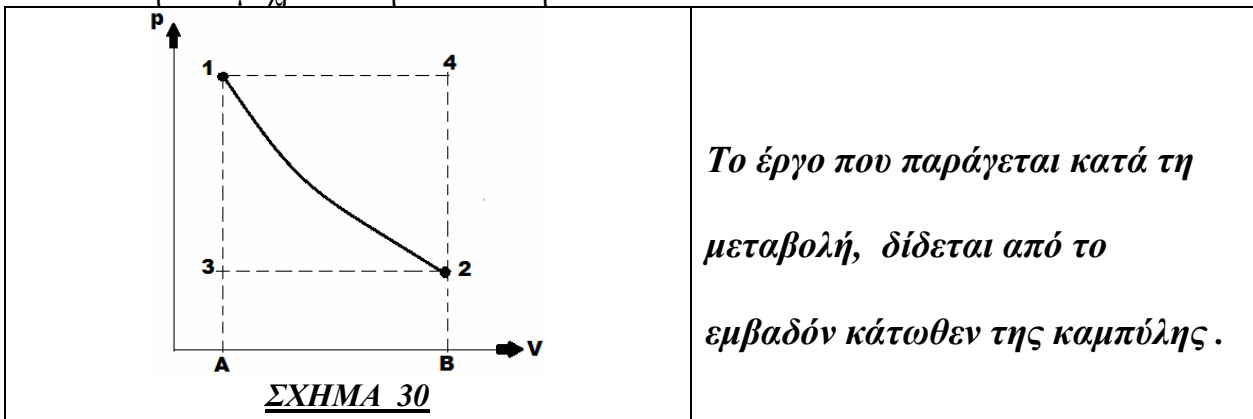
Οι ποσότητες έργου και θερμότητας έχουν τιμές που είναι χαρακτηριστικές του τρόπου κατά τον οποίο γίνεται η μεταβολή του θερμοδυναμικού συστήματος από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

Οι ποσότητες έργου και θερμότητας παύουν να υπάρχουν όταν το σύστημα μεταβεί από μια κατάσταση ισορροπίας σε μια άλλη.

**Είναι επομένως σημαντικό να μην διαφεύγει το γεγονός ότι η θερμότητα και το έργο αναφέρονται στις θερμοδυναμικές μεταβολές και όχι σε καταστάσεις ισορροπίας.**

**2<sup>η</sup> Παρατήρηση :**

Το έργο που εκτελείται κατά μια μεταβολή μεταξύ αρχικής και τελικής κατάστασης, εξαρτάται από τη διαδρομή που ακολουθεί το σύστημα κατά τη διάρκεια της μεταβολής που αυτό υποβάλλεται, από αρχική κατάσταση "1" μέχρι τελική κατάσταση "2".



*Το έργο που παράγεται κατά τη μεταβολή, δίδεται από το εμβαδόν κάτωθεν της καμπύλης .*

Εάν επιλεγεί η διαδρομή "1 2", το έργο δίδεται από το εμβαδόν [A12B].

Εάν επιλεγεί η διαδρομή "142", το έργο δίδεται από το εμβαδόν [A142B].

Εάν επιλεγεί η διαδρομή "132", το έργο δίδεται από το εμβαδόν [AB23].

Οι τρεις διαδρομές, δίδουν διαφορετικό έργο (δεδομένου ότι το εμβαδόν κάτωθεν της καμπύλης είναι διαφορετικό), παρ'ότι η αρχική και η τελική κατάσταση της μεταβολής είναι ίδιες.

Άρα το έργο που παράγεται από το σύστημα, **εξαρτάται και από τη διαδρομή**, δηλαδή από τις ενδιάμεσες καταστάσεις μεταξύ των ίδιων ακραίων (αρχική και τελική) καταστάσεων.

**3<sup>η</sup> Παρατήρηση :**

Σε μια κυκλική μεταβολή, δηλαδή μια μεταβολή η οποία αποτελείται από διαδοχικές καταστάσεις ισορροπίας μετά το πέρας των οποίων το σύστημα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση, το συνολικό έργο ισούται με το εμβαδόν που περικλείεται στον κύκλο.

Είναι θετικό εάν ο κύκλος διατρέχεται δεξιόστροφα ( κύκλος θερμικής μηχανής, κύκλος παραγωγής έργου) και είναι αρνητικό εάν διατρέχεται αριστερόστροφα (κύκλος ψυκτικής μηχανής ή αντλίας θερμότητας , κύκλος κατανάλωσης έργου) .

