



# Θερμοδυναμική Ι

Βασικές έννοιες Θερμοδυναμικής - Ορισμοί

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης

# Εισαγωγικά για το μάθημα

## Το e-class του μαθήματος

- Το μάθημα διαθέτει e-class στην ακόλουθη διεύθυνση:  
<https://eclass.hmu.gr/courses/MECH215/>
- Θα πρέπει να εγγραφούν όλοι οι φοιτητές και να δηλώσουν ένα έγκυρο e-mail, προκειμένου να λαμβάνουν ειδοποιήσεις για τις ανακοινώσεις.
- Στο e-class του μαθήματος είναι αναρτημένο όλο το υλικό που αφορά στο μάθημα.

# Ύλη μαθήματος

Σύμφωνα με το Πρόγραμμα Σπουδών, η ύλη του μαθήματος είναι η ακόλουθη:

1. Θεμελίωση των βασικών ενεργειακών μεγεθών, ορισμοί. Η έννοια του πεπερασμένου συστήματος και οι νόμοι της Θερμοδυναμικής. Εισαγωγική περιγραφή.
2. Καταστατικά μεγέθη και καταστατικές εξισώσεις. Οι καθαρές ουσίες και οι φάσεις της ύλης. Το ιδανικό αέριο, η έννοια της θερμοδυναμικής ισορροπίας, η σταθερά του ιδανικού αερίου και η καταστατική εξίσωσή του.
3. Οι μεταβολές ιδανικού αερίου.
4. Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος, μετατροπή θερμότητας σε έργο.
5. Θερμοδυναμικοί κύκλοι. Υπολογισμοί έργου και βαθμού απόδοσης.
6. Η έννοια της εντροπίας. Περιγραφή και ανάλυση θερμοδυναμικών κύκλων σε διαγράμματα πίεσης – όγκου και ενθαλπίας – εντροπίας.
7. Ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος. Ανάλυση θερμοδυναμικών κύκλων κινητήριων μηχανών και αντλιών θερμότητας.

# Ύλη μαθήματος

8. Αλλαγή φάσεων και εισαγωγή στη θερμοδυναμική των μιγμάτων.
9. Γενίκευση της έννοιας της εντροπίας. Αναφορές στη στατιστική μηχανική και στη θεωρία της πληροφορίας.
10. Ενέργεια και πληροφορία, σχεδιασμός θερμοδυναμικών συστημάτων.
11. Από τη Στατιστική Μηχανική στην Κοσμολογία, το εύρος ισχύος των νόμων της Θερμοδυναμικής και οι εφαρμογές του Μηχανικού σήμερα και αύριο.

# Ενότητες του μαθήματος

Η ύλη του μαθήματος χωρίζεται στις ακόλουθες ενότητες:

1. Ενότητα 1<sup>η</sup>: Βασικές έννοιες – ορισμοί
2. Ενότητα 2<sup>η</sup>: Πρώτος νόμος Θερμοδυναμικής
3. Ενότητα 3<sup>η</sup>: Ιδιότητες καθαρής ουσίας
4. Ενότητα 4<sup>η</sup>: Ιδανικά αέρια, διεργασίες, κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα
5. Ενότητα 5<sup>η</sup>: Ανοιχτό θερμοδυναμικό σύστημα, διεργασίες
6. Ενότητα 6<sup>η</sup>: Δεύτερος νόμος Θερμοδυναμικής, αναστρέψιμες μεταβολές
7. Ενότητα 7<sup>η</sup>: Εντροπία
8. Ενότητα 8<sup>η</sup>: Θερμοδυναμικοί κύκλοι

# Ενότητα 1<sup>η</sup>: Βασικές έννοιες

# Ύλη της ενότητας

Στην πρώτη ενότητα του μαθήματος καλύπτονται τα ακόλουθα θέματα:

1. Θερμοδυναμική
2. Ύλη και θερμοδυναμικό σύστημα
3. Κατηγορίες θερμοδυναμικών συστημάτων
4. Καταστάσεις και ιδιότητες της ύλης
5. Διεργασίες
6. Θερμοδυναμικός κύκλος
7. Πίεση και θερμοκρασία
8. Μετάδοση θερμότητας
9. Αδιαβατική διεργασία



# Βασικές έννοιες – ορισμοί: Θερμοδυναμική

- Η Θερμοδυναμική αποτελεί ένα βασικό κλάδο της Φυσικής, με πολλές εφαρμογές σε άλλες επιστήμες και διδάσκεται ως βασικό προπτυχιακό μάθημα σε πλήθος σχολών σε όλο τον κόσμο.
- Η Θερμοδυναμική ασχολείται με τη μελέτη των μορφών και των μετατροπών ενέργειας.
- Στα περισσότερα προβλήματα, η θερμοδυναμική καλείται να εξετάσει μακροσκοπικά τη μεταβολή ενέργειας από τη μία μορφή στην άλλη και να υπολογίσει το αριθμητικό αποτέλεσμα της συναλλαγής ενέργειας μεταξύ θερμοδυναμικού συστήματος και περιβάλλοντος. Κλασσικό παράδειγμα αποτελεί η εναλλαγή θερμότητας και έργου στις θερμικές κινητήριες μηχανές.
- Η Θερμοδυναμική επίσης καλείται να περιγράψει το ενεργειακό περιεχόμενο της ύλης, αναλύοντάς το σε τρεις μορφές ενέργειας: την κινητική, την εσωτερική και τη δυναμική. Η περίπτωση αυτή εφαρμόζεται στη μελέτη των φαινομένων μεταφοράς θερμότητας σε κτήρια.
- Η Θερμοδυναμική ασχολείται μόνο με τη μακροσκοπική ανάλυση των θερμοδυναμικών συστημάτων, την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε πειραματικά.

# Βασικές έννοιες – ορισμοί: Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική

- Ο κλάδος της Θερμοδυναμικής που ενδιαφέρει περισσότερο τους Μηχανικούς ονομάζεται συνήθως Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική.
- Η Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική ασχολείται με βασικά λειτουργικά και θερμοδυναμικά μηχανών και συστημάτων όπως:
  - μηχανές εσωτερικής καύσης
  - στρόβιλοι και αεροσυμπιεστές
  - λέβητες
  - ψυκτικές και κλιματιστικές εγκαταστάσειςόπου η αρχική διαθέσιμη μορφή ενέργειας μετατρέπεται σε μία άλλη επιθυμητή για να επιτευχθεί κάποιος συγκεκριμένος σκοπός.

# Βασικές έννοιες – ορισμοί: Ύλη

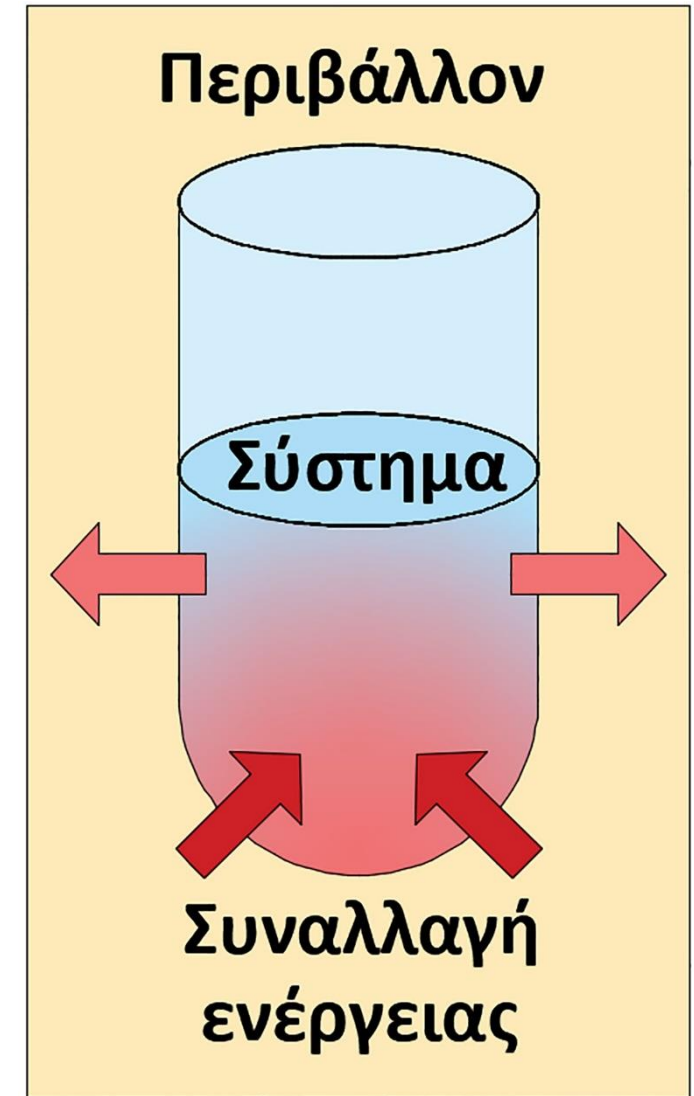
- Στη Θερμοδυναμική διακρίνουμε την ύλη σε δύο κατηγορίες:
  - την καθαρή ουσία
  - το μίγμα.
- Η ύλη είναι καθαρή ουσία όταν:
  - είναι ομογενής σε φυσική κατάσταση, δηλαδή αποτελείται από τα ίδια χημικά στοιχεία και με την ίδια αναλογία
  - είναι ομογενής σε χημική κατάσταση, δηλαδή τα χημικά στοιχεία συνδέονται χημικώς μεταξύ τους με τον ίδιο τρόπο σε όλη την ύλη.
- Αν δεν ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι ανωτέρω συνθήκες, τότε η ύλη αποτελεί μίγμα και όχι φυσική ουσία.

# Βασικές έννοιες – ορισμοί: Παραδείγματα ύλης

Ύλη	Ομογενής σε φυσική κατάσταση	Ομογενής σε χημική κατάσταση	Απουσία χημικής αντίδρασης	Καθαρή ουσία
Ατμός	✓	✓	✓	✓
Ατμός Νερό	✓	✓	✓	✓
Αέρας (O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> )	✓	✓	✓	✓
Αέρας & ατμός καυσίμου (χωρίς αντίδραση)	✓	✓	✓	✓
Αέρας & ατμός καυσίμου (χωρίς αντίδραση) Υγρό καύσιμο	x	✓	✓	x
Αέρας & ατμός καυσίμου	✓	x	x	x
Καυσαέρια	✓	✓	✓	✓

# Βασικές έννοιες – ορισμοί: Θερμοδυναμικό σύστημα

- Θερμοδυναμικό σύστημα είναι μία διάταξη ή συνδυασμός διατάξεων, ένα σύνολο μακροσκοπικών αντικειμένων, που περιλαμβάνει σώματα ή πεδία και περιέχει την υπό μελέτη ποσότητα μάζας.
- Ουσιαστικά είναι ένα υλικό τμήμα του φυσικού κόσμου, που μπορεί να εξεταστεί ξεχωριστά από το περιβάλλον του. Διαχωρίζεται από τον υπόλοιπο φυσικό κόσμο με φυσικά ή νοητά όρια.
- Ο υπόλοιπος φυσικός κόσμος αποτελεί το περιβάλλον του θερμοδυναμικού συστήματος.
- Το θερμοδυναμικό σύστημα ανταλλάσσει ενέργεια ή ύλη αμοιβαία με το περιβάλλον ή με όποιο εξωτερικό μέσο περιβάλλει αυτό, σύμφωνα με τις αρχές και τους νόμους της Θερμοδυναμικής.



# Βασικές έννοιες – ορισμοί: Θερμοδυναμικό σύστημα

- Όγκος ελέγχου:  
Περιλαμβάνει το υπό εξέταση θερμοδυναμικό σύστημα και τις διατάξεις που το περιβάλλουν. Διαχωρίζει το θερμοδυναμικό σύστημα από το περιβάλλον, μέσω της διαχωριστικής επιφάνειας. Οτιδήποτε εκτός όγκου ελέγχου ανήκει στο περιβάλλον.

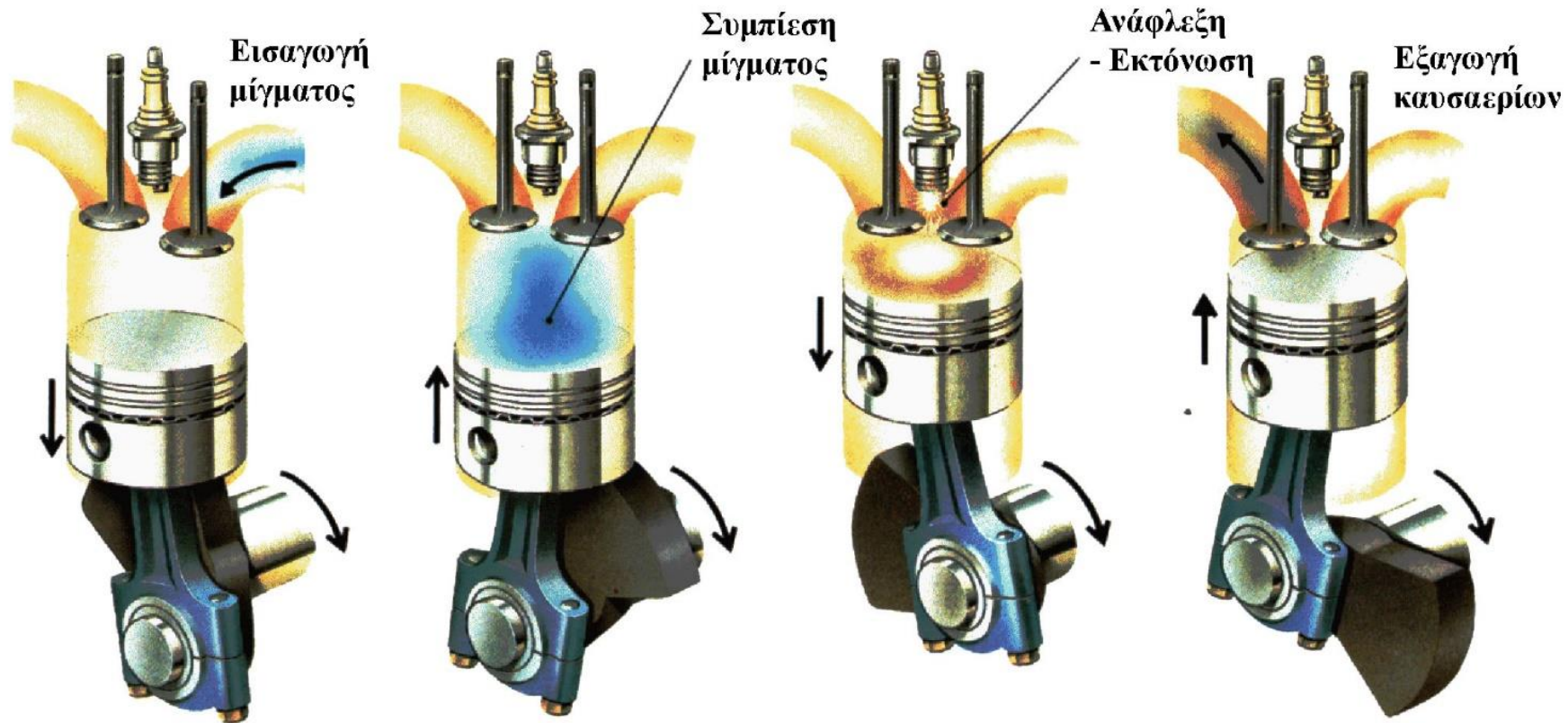
## Βασικές έννοιες – ορισμοί: είδη συστημάτων

- Κλειστό σύστημα (υλικώς):  
Τα όρια του συστήματος είναι αδιαπέραστα από την ύλη ( $dm/dt=0$ ). Δεν ανταλλάσσεται μάζα με το περιβάλλον. Μπορεί όμως να ανταλλάσσεται ενέργεια (θερμότητα ή έργο).
- Ανοιχτό σύστημα:  
Τα όρια του συστήματος είναι διαπερατά ως προς την ύλη. Ανταλλάσσεται μάζα και ενέργεια.
- Μηχανικώς κλειστό σύστημα:  
Δεν υπάρχει ανταλλαγή μηχανικού έργου μέσω των ορίων του συστήματος.
- Αδιαβατικό σύστημα:  
Δεν υπάρχει συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον (θερμομονωτικά τοιχώματα – αδιαβατικά).
- Αποκλεισμένο ή απομονωμένο σύστημα:  
Τα όρια του συστήματος είναι αδιαπέραστα από ύλη και ενέργεια (θερμότητα ή μηχανικό έργο).



## Βασικές έννοιες – ορισμοί: Παράδειγμα

- Μια ποσότητα αερίου μέσα σε ένα θάλαμο που κλείνει με ένα έμβολο. Με μετακίνηση του εμβόλου το σύστημα ανταλλάσει μηχανικό έργο με το περιβάλλον του.

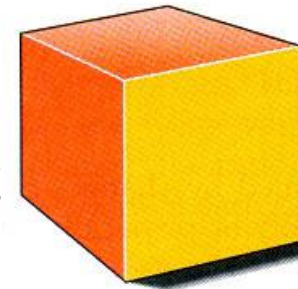


<https://www.youtube.com/watch?v=ZQvfHyfgBtA>

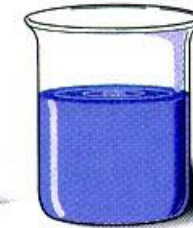


# Βασικές έννοιες – ορισμοί: καταστάσεις και ιδιότητες ύλης

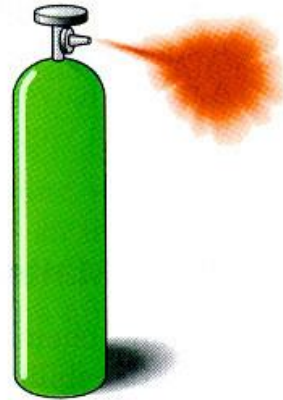
- Η ύλη μπορεί να βρίσκεται σε τρεις φάσεις, την αέρια, την υγρή και τη στερεή.
- Τα αέρια σώματα καταλαμβάνουν όλο τον όγκο του δοχείου που τα περιέχει.
- Τα υγρά σώματα παίρνουν το σχήμα του δοχείου που τα περιέχει.
- Τα στερεά σώματα έχουν σταθερό σχήμα.
- Όλα τα σώματα χαρακτηρίζονται από τις ιδιότητές τους: διαφανή – αδιαφανή, οσμή, χρώμα, γεύση, απορροφητικά.
- Ειδικά τα στερεά μπορεί επιπλέον να είναι εύκαμπτα ή άκαμπτα, μαλακά ή σκληρά, αδιάβροχα ή διαπερατά στο νερό κλπ.



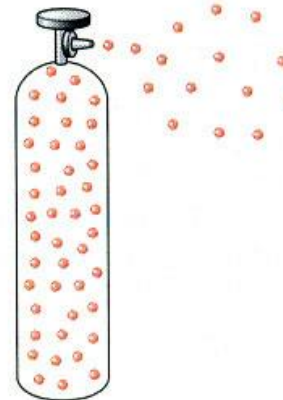
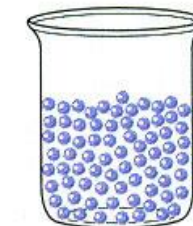
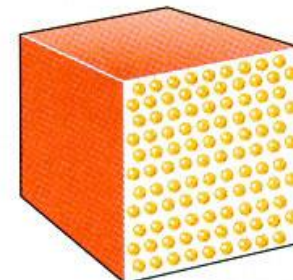
στερεό



υγρό



αέριο

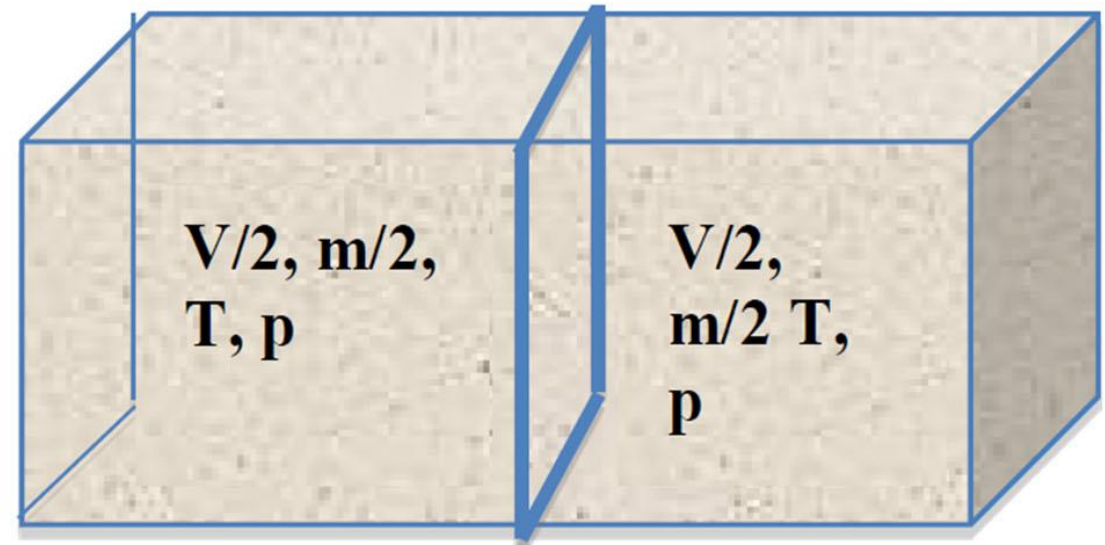
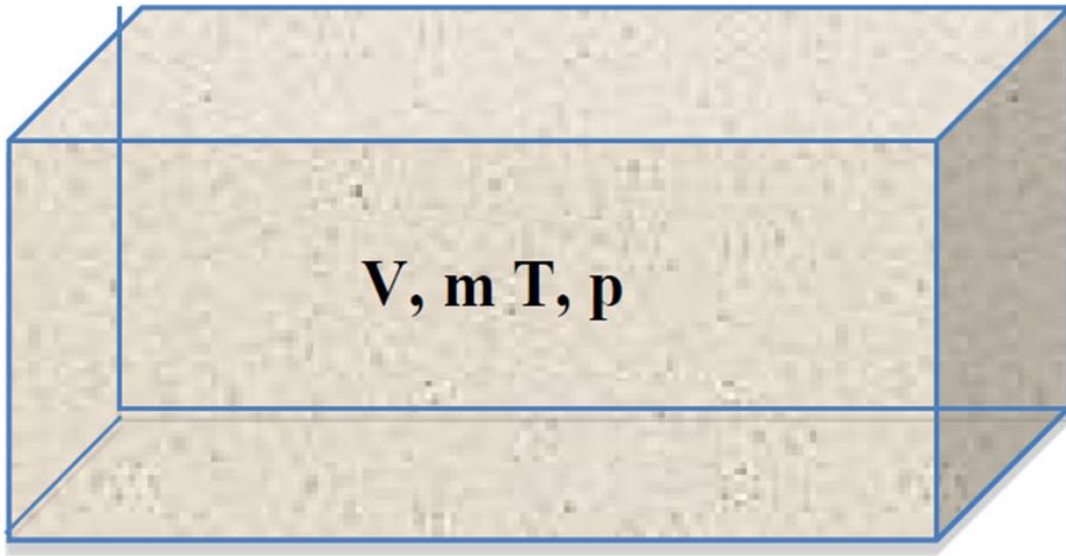


## Βασικές έννοιες – ορισμοί: καταστατικά μεγέθη

- Κάθε μεταβλητή που περιγράφει τη φάση ενός σώματος σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα, η οποία εξαρτάται μόνο από τη θερμοδυναμική κατάσταση του σώματος και όχι από τον τρόπο με τον οποίο έχει επιτευχθεί η συγκεκριμένη θερμοδυναμική κατάσταση, αποτελεί ένα καταστατικό μέγεθος.
- Τα καταστατικά μεγέθη διακρίνονται σε εντατικά (intensive) και εκτατικά (extensive):
  - Στα εντατικά μεγέθη η τιμή τους δεν εξαρτάται από την περιεχόμενη ποσότητα ύλης ή τη γεωμετρία, δηλαδή τη μάζα ή τον όγκο του σώματος. Τα εντατικά μεγέθη είναι η πίεση, η θερμοκρασία, η πυκνότητα του σώματος κλπ.
  - Στα εκτατικά μεγέθη η τιμή τους εξαρτάται από την περιεχόμενη ποσότητα ύλης ή τη γεωμετρία του σώματος. Τα εκτατικά μεγέθη είναι η μάζα, ο όγκος, η εσωτερική ενέργεια κλπ.

## Βασικές έννοιες – ορισμοί: εκτατικά και εντατικά μεγέθη

- Έτσι, αν μία ποσότητα αερίου που περιέχεται σε ένα δοχείο χωριστεί στη μέση με ένα διάφραγμα, τα εντατικά μεγέθη στα δύο διακριτά μέρη που θα προκύψουν δεν θα αλλάξουν. Αντίθετα, τα εκτατικά μεγέθη και στα δύο μέρη θα μεταβληθούν (η μάζα και ο όγκος θα υποδιαιρεθούν).



## Βασικές έννοιες – ορισμοί: ειδικά μεγέθη

- Τα ειδικά μεγέθη είναι τα εκτατικά μεγέθη διαιρεμένα με τη μάζα του σώματος, π.χ.: ο ειδικός όγκος  $v$  και η ειδική ενθαλπία  $h$  σώματος μάζας  $m$ , όγκου  $V$  και ενθαλπίας  $H$ :

$$v = \frac{V}{m}$$

$$h = \frac{H}{m}$$

- Τα ειδικά μεγέθη είναι εντατικά μεγέθη.

## Βασικές έννοιες – ορισμοί: θερμοδυναμική κατάσταση

- Ένα σύστημα μπορεί να περιέχει μάζα ενός ή περισσοτέρων στοιχείων σε μία ή περισσότερες φάσεις.
- Κάθε φάση χαρακτηρίζεται από διαφορετικές τιμές των λεγόμενων καταστατικών μεγεθών (πίεση, θερμοκρασία, όγκος) και λέμε ότι βρίσκεται σε διαφορετική θερμοδυναμική κατάσταση.
- Για ίδιες θερμοδυναμικές καταστάσεις, τα καταστατικά μεγέθη έχουν τις ίδιες τιμές, ανεξάρτητα από τον τρόπο που επιτεύχθηκε η κατάσταση αυτή.

# Βασικές έννοιες – ορισμοί: ισορροπία συστήματος

- Θερμοδυναμική ισορροπία:

Ένα σύστημα βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία όταν βρίσκεται ταυτόχρονα σε θερμική, μηχανική και χημική ισορροπία.

Οι ιδιότητες (καταστατικά μεγέθη) συστήματος ευρισκόμενου σε θερμοδυναμική ισορροπία δεν μεταβάλλονται με το χρόνο, εντός του οποίου εξετάζεται το σύστημα. Τούτο σημαίνει ότι οι όποιες μεταβολές που μπορεί να επέλθουν θα είναι αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης με άλλο σύστημα και μόνο.

- Θερμική ισορροπία:

Ένα σύστημα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία όταν σε κάθε σημείο του η θερμοκρασία είναι η ίδια, συνεπώς δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας εσωτερικά στο σύστημα. Η κοινή θερμοκρασία είναι τότε η θερμοκρασία συστήματος.

# Βασικές έννοιες – ορισμοί: ισορροπία συστήματος

- Μηχανική ισορροπία:  
Είναι η κατάσταση ενός θερμοδυναμικού συστήματος κατά την οποία δεν εμφανίζεται καμία τάση μεταβολής της πίεσεως του συστήματος με το χρόνο, σε κανένα σημείο του συστήματος και για όσο αυτό είναι μονωμένο από το περιβάλλον.
- Χημική ισορροπία:  
Είναι η κατάσταση ενός θερμοδυναμικού συστήματος κατά την οποία έχουν περατωθεί όλες οι χημικές αντιδράσεις των συνιστωσών του συστήματος.



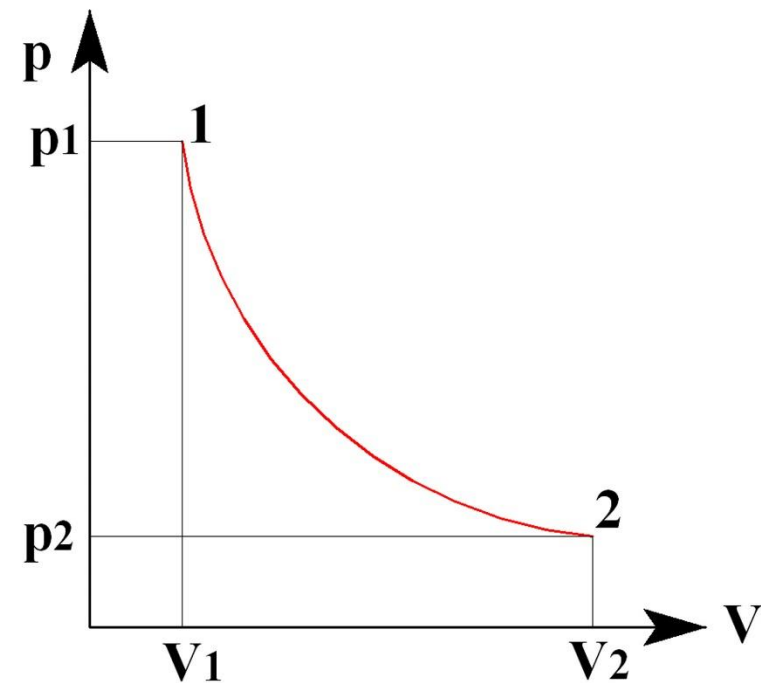
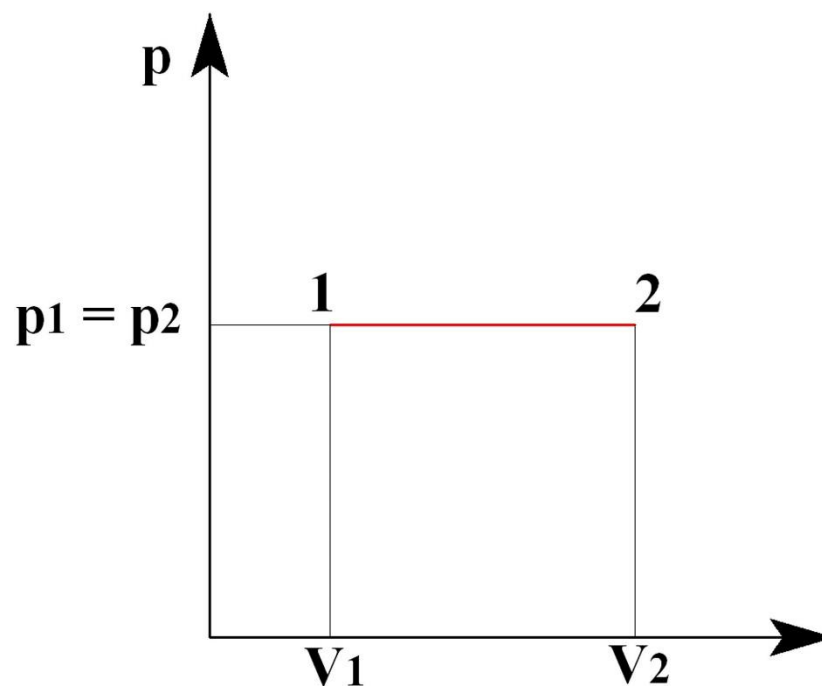
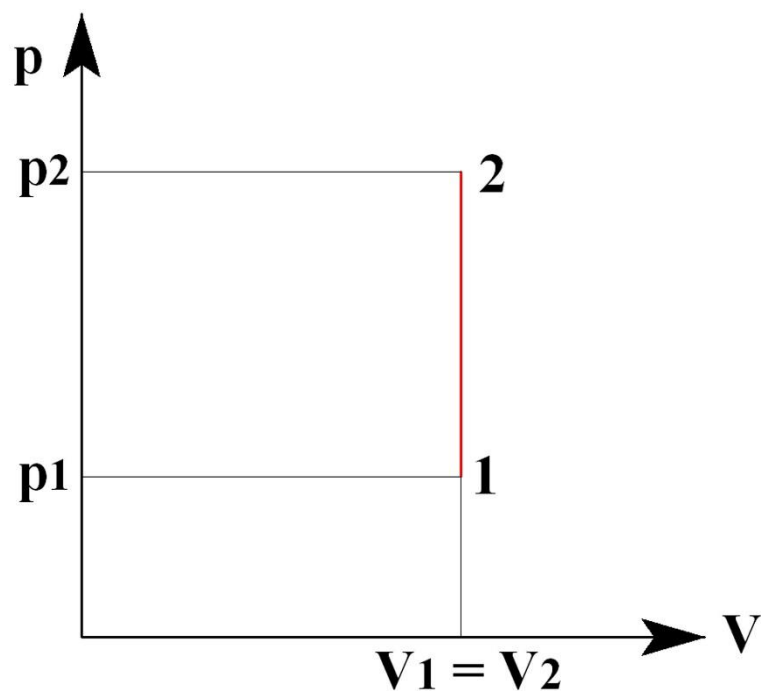
# Βασικές έννοιες – ορισμοί: θερμοδυναμική μεταβολή

- Όταν μεταβληθούν ένα ή περισσότερα καταστατικά μεγέθη του συστήματος, τότε έχουμε μεταβολή της θερμοδυναμικής κατάστασής του.
- Η αλληλουχία των καταστάσεων (πορεία) από τις οποίες διέρχεται το σύστημα ονομάζεται θερμοδυναμική μεταβολή.
- Όταν η θερμοδυναμική μεταβολή γίνεται κάτω από καθορισμένες συνθήκες, τότε έχουμε θερμοδυναμική διεργασία.



# Βασικές έννοιες – ορισμοί: θερμοδυναμική μεταβολή

- Σε περίπτωση που κάποιο από τα καταστατικά μεγέθη διατηρείται σταθερό έχουμε:
  - ισόχωρη ή ισόογκη μεταβολή (διεργασία): μεταβολή υπό σταθερό όγκο
  - ισοβαρής ή ισόθλιπτη μεταβολή (διεργασία): μεταβολή υπό σταθερή πίεση
  - ισοθερμοκρασιακή μεταβολή (διεργασία): μεταβολή υπό σταθερή θερμοκρασία.

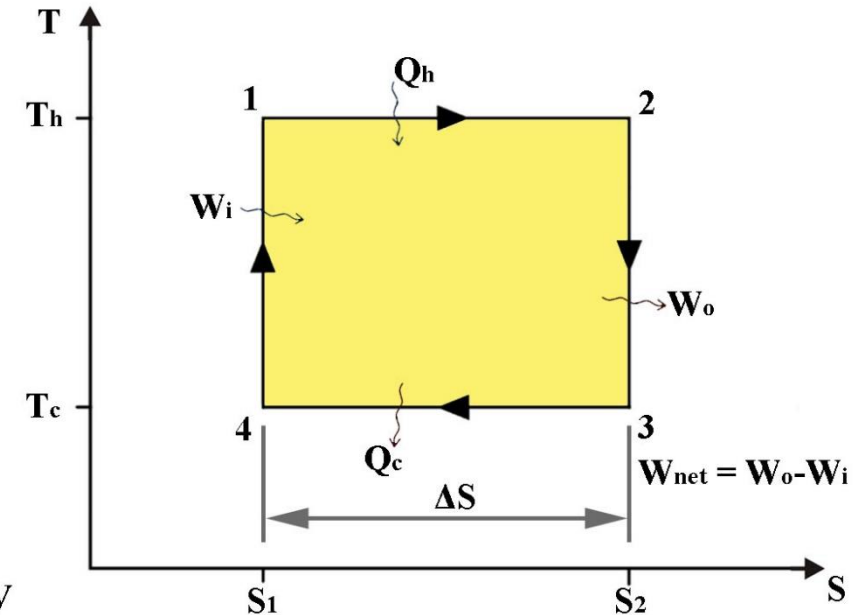
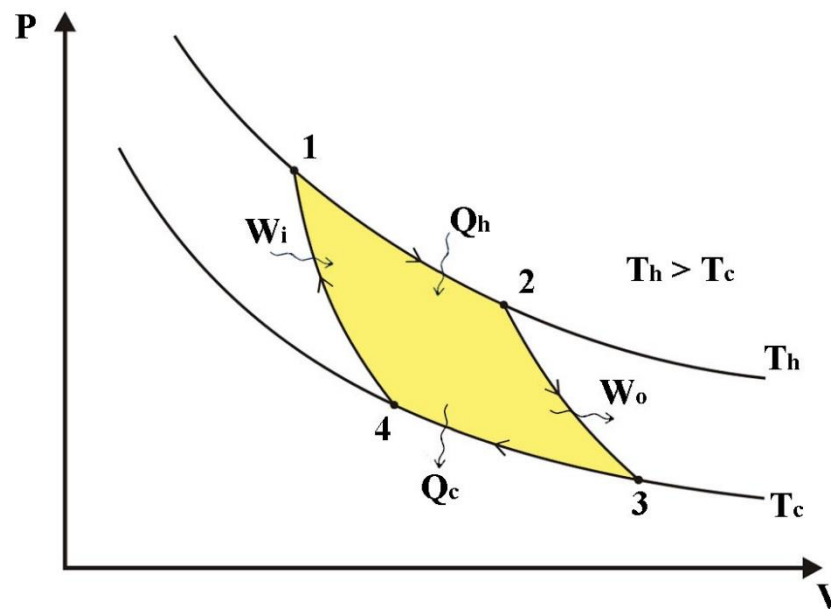
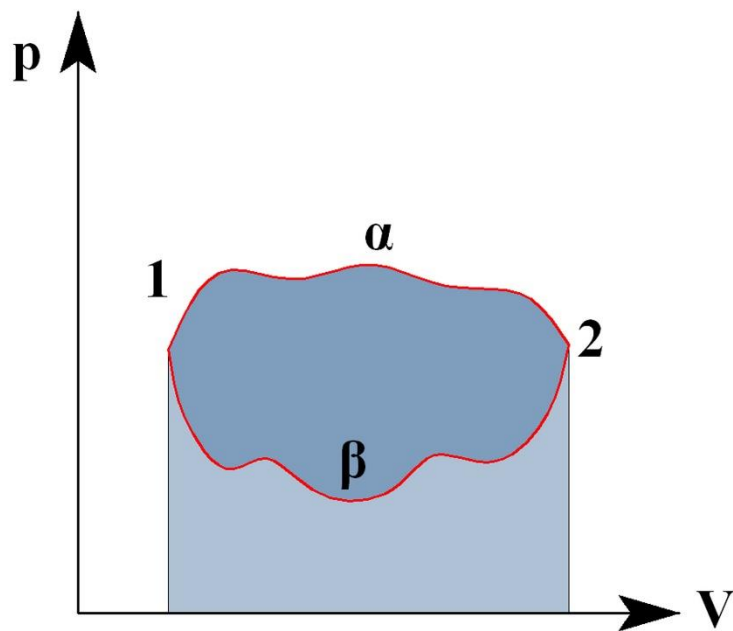


## Βασικές έννοιες – ορισμοί: αντιστρεπτές και μη μεταβολές

- Αντιστρεπτές είναι οι θερμοδυναμικές διεργασίες, στις οποίες η πορεία μπορεί να αντιστραφεί, ώστε τόσο το σύστημα, όσο και το περιβάλλον να επιστρέψουν στην αρχική κατάστασή τους, χωρίς να απομένει κανένα ενεργειακό υπόλοιπο μεταξύ τους.
- Οποιαδήποτε άλλη διεργασία ονομάζεται μη αντιστρεπτή.
- Η αντιστρεψιμότητα μιας θερμοδυναμικής διεργασίας συνδέεται με απουσία τριβών, διαδοχικές θέσεις ισορροπίας (απείρως αργές μεταβολές), απειροστές διαφορές θερμοκρασίας και πίεσης. Όσο περισσότερο πλησιάζει μια διεργασία αυτά τα χαρακτηριστικά, τόσο προσεγγίζει την αντιστρεπτή διεργασία.

# Βασικές έννοιες – ορισμοί: θερμοδυναμικός κύκλος

- Είναι μία αλληλουχία θερμοδυναμικών μεταβολών, κατά τις οποίες η επόμενη μεταβολή διαδέχεται την προηγούμενη και που οδηγούν τελικά το θερμοδυναμικό σύστημα στην ίδια θερμοδυναμική κατάσταση με την αρχική.



# Βασικές έννοιες – ορισμοί: ψυχροδοχείο & θερμοδοχείο

- Θερμοδοχείο ονομάζεται ένα σώμα, το οποίο έχει την ικανότητα να αποβάλλει επ' άπειρον ποσά θερμότητας, χωρίς να μεταβάλλεται η θερμοκρασία του.
- Αντίστοιχα, ψυχροδοχείο ονομάζεται ένα σώμα που έχει την ικανότητα να απορροφά επ' άπειρον θερμότητα, χωρίς να αυξάνεται η θερμοκρασία του.

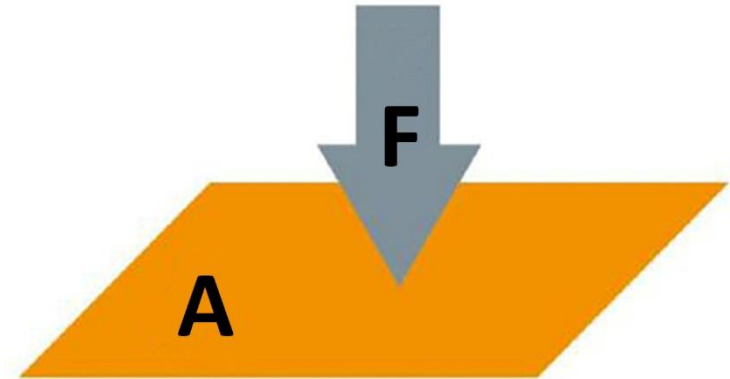
## Βασικά καταστατικά μεγέθη: πίεση

- **Πίεση:** είναι ο λόγος της κάθετης σε μια επιφάνεια δυνάμεως  $dF_n$  διά του εμβαδού της επιφάνειας  $dA$ :

$$p = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dF_n}{dA}$$

$$\text{Πίεση (p)} = \frac{\text{Δύναμη (F}_n\text{)}}{\text{Επιφάνεια (A)}}$$

- Στο SI η πίεση μετράται σε  $\text{Pa} = \text{Nt/m}^2$ .
- Η κανονική ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας ισούται με  $101.325 \text{ Pa}$ , ποσότητα που ισούται με  $1 \text{ atm}$ :  
 $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ .
- Επίσης, βασική μονάδα μέτρησης είναι το  $\text{bar}$ :  
 $1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Pa} = 10^5 \text{ Pa}$ .
- Από τα ανωτέρω συνάγεται ότι:  $1,01325 \text{ bar} = 1 \text{ atm}$ .
- Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της πίεσης ονομάζεται μανόμετρο.

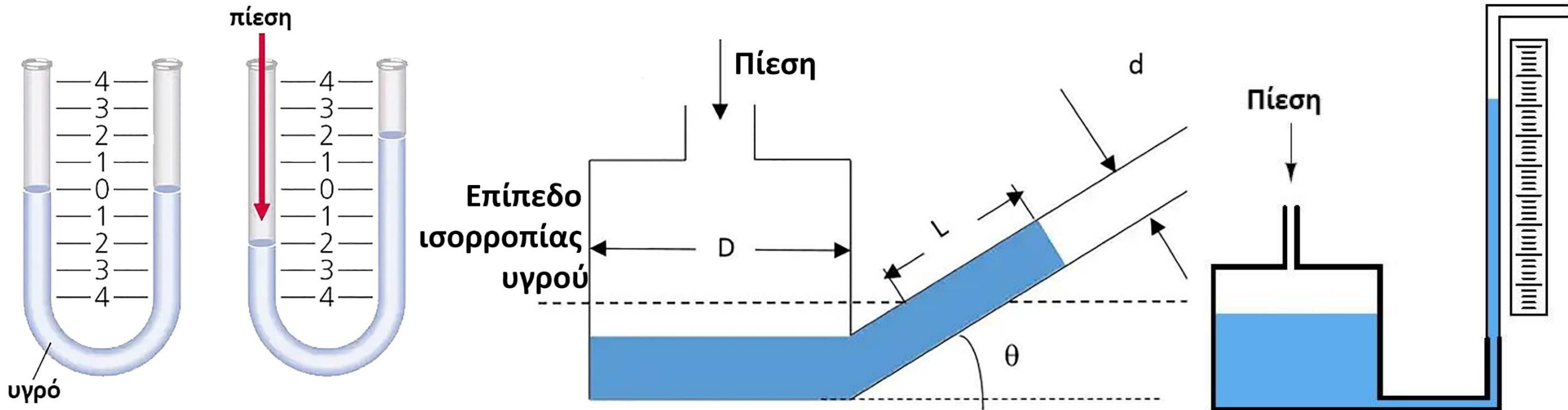


# Βασικά καταστατικά μεγέθη: πίεση

- Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της πίεσης ονομάζεται μανόμετρο.
- Αν  $z$  η κατακόρυφη μετατόπιση της στήλης υγρού στα μανόμετρα,  $\rho$  η πυκνότητα του υγρού και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας, η διαφορά πίεσης στα μανόμετρα ισούται με:

$$\Delta p = z \cdot \rho \cdot g$$

<https://www.youtube.com/watch?v=gxrkLkJybnA>  
<https://www.youtube.com/watch?v=9SQ2FPHCZJk>



# Βασικά καταστατικά μεγέθη: θερμοκρασία

- **Θερμοκρασία:** είναι ένα φυσικό μέγεθος που συνδέεται με τη θερμική κατάσταση των διαφόρων σωμάτων και, συνεπώς, με τη μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων ενός συστατικού.  
Η θερμοκρασία γίνεται αντιληπτή με το αποτέλεσμα ύπαρξης θερμοκρασιακών διαφορών, που είναι η μεταφορά θερμότητας εντός της μάζας του σώματος ή μεταξύ των διαφορετικών σωμάτων.  
Δύο σώματα έχουν την ίδια θερμοκρασία όταν, ερχόμενα σε επαφή, δεν παρατηρείται καμιά μεταβολή σε μετρήσιμες μεταβλητές τους. Τα σώματα τότε βρίσκονται σε θερμική ισορροπία.  
Δύο σώματα που βρίσκονται σε θερμική ισορροπία με τρίτο σώμα, βρίσκονται σε θερμική ισορροπία και μεταξύ τους (μηδενικός νόμος θερμοδυναμικής).

# Βασικά καταστατικά μεγέθη: θερμοκρασία

- Μονάδα της θερμοκρασίας στο SI είναι ο βαθμός K.
- Άλλες μονάδες θερμοκρασίας είναι ο βαθμός Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), ο βαθμός Fahrenheit ( $^{\circ}\text{F}$ ) και ο βαθμός Rankine (R).
- Οι σχέσεις μετατροπής μεταξύ των ανωτέρω μονάδων θερμοκρασίας είναι οι εξής:

$$T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} \cdot T(^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273$$

$$T(\text{R}) = \frac{9}{5} \cdot (T(^{\circ}\text{C}) + 273)$$



# Βασικά καταστατικά μεγέθη: ενέργεια & εσωτερική ενέργεια

- **Ενέργεια:** περιγράφει την ικανότητα της ύλης να παράγει έργο. Στο SI μετράται σε Joule.
- **Ειδική εσωτερική ενέργεια**  $u$ , που είναι το πηλίκο της εσωτερικής ενέργειας  $U$  του συστήματος προς τη μάζα του:

$$u = \frac{U}{m}$$

Μονάδα της ειδικής εσωτερικής ενέργειας στο SI είναι το J/kg.

Η εσωτερική ενέργεια  $U$  ενός σώματος είναι το άθροισμα της συνολικής δυναμικής ενέργειας των πεδίων που δημιουργούν τα εσωτερικά στοιχεία του σώματος και της συνολικής κινητικής ενέργειάς τους. Η συνολική κινητική ενέργεια είναι κατά κανόνα θετική. Η συνολική δυναμική ενέργεια είναι αρνητική, γιατί συγκρατεί τα δομικά στοιχεία, άρα οφείλεται σε ελκτικές δυνάμεις. Η εσωτερική ενέργεια χαρακτηρίζει την εσωτερική συνοχή του σώματος. Όταν είναι αρνητική σημαίνει ότι χρειάζεται προσφορά ενέργειας για τη διάσπαση του σώματος στα δομικά συστατικά του, ενώ όταν είναι θετική σημαίνει ότι θα διασπαστεί αυθόρμητα. Όταν είναι μηδέν η κατάσταση είναι οριακή και ασταθής, αφού με την παραμικρή προσφορά ενέργειας το σώμα μπορεί να διαλυθεί.

## Βασικά καταστατικά μεγέθη: ειδικός όγκος & πυκνότητα

- **Ειδικός όγκος** συστήματος: ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου του συστήματος διά τη μάζα του:

$$v = \frac{V}{m}$$

- **Πυκνότητα** συστήματος: ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας του συστήματος διά τον όγκο του, δηλαδή η πυκνότητα είναι το αντίστροφο του ειδικού όγκου:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

- Μονάδα του ειδικού όγκου στο SI είναι το  $\text{m}^3/\text{kg}$ , ενώ για την πυκνότητα το  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

## Βασικά καταστατικά μεγέθη: ειδική ενθαλπία

- **Ειδική ενθαλπία**  $h$  ενός συστήματος: ισούται με το άθροισμα της ειδικής εσωτερικής ενέργειας  $u$  του συστήματος με το γινόμενο της πίεσης  $p$  επί τον ειδικό όγκο του συστήματος  $v$ . Μονάδα της ειδικής ενθαλπίας στο SI είναι το J/kg:

$$h = u + p \cdot v$$

- Με τον όρο «ενθαλπία», που προέρχεται από το ρήμα ενθάλπω = ζεσταίνω, περιθάλπω, χαρακτηρίζεται η ενέργεια που προσφέρεται κατά τη θέρμανση ουσιών και που εγκλωβίζεται στα μόριά τους. Συνέπεια αυτού είναι ότι τα μόρια αυτά έχουν μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο από τα αρχικά μόρια. Έτσι με την ενθαλπία εκφράζεται το θερμικό περιεχόμενο κάθε χημικού συστήματος και συμβολίζεται με το γράμμα  $H$ .
- Η ενέργεια αυτή οφείλεται στις δυνάμεις των χημικών δεσμών που συγκρατούν τα άτομα μέσα στο μόριο, αλλά και στη κίνηση των ατόμων, των ηλεκτρονίων καθώς και του ίδιου του μορίου.

## Βασικά καταστατικά μεγέθη: ειδική εντροπία

- **Ειδική εντροπία**  $s$  ενός συστήματος: ισούται με το πηλίκο της εντροπίας  $S$  του συστήματος προς τη μάζα του  $m$ :

$$s = \frac{S}{m}$$

Η εντροπία εκφράζει τη δυνατότητα ενός συστήματος να παράγει μηχανικό έργο. Όσο μικρότερη η εντροπία, τόσο μεγαλύτερη η δυνατότητα του συστήματος να παράγει μηχανικό έργο, να εκτονωθεί δηλαδή προς θερμοδυναμικές καταστάσεις υψηλότερης εντροπίας.

- Αποδεικνύεται ότι για οποιαδήποτε αντιστρεπτή μεταβολή  $1 \rightarrow 2$ , μεταξύ των ιδίων καταστάσεων 1 και 2, το μέγεθος  $\int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$  είναι σταθερό, άρα δεν εξαρτάται από τη διαδρομή, άρα είναι καταστατικό μέγεθος. Αυτό το μέγεθος ορίζει τη διαφορά εντροπίας για μία θερμοδυναμική μεταβολή:

$$\delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$$

## Βασικά καταστατικά μεγέθη: ειδική εντροπία

- Η διαφορά εντροπίας μεταξύ δύο καταστάσεων είναι ανεξάρτητη της διεργασίας. Ωστόσο υπολογίζεται από την ανωτέρω σχέση μόνο για αντιστρεπτές διεργασίες.
- Μονάδα της ειδικής εντροπίας στο SI είναι το  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ .

## Βασικά καταστατικά μεγέθη: ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα

- **Ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα:**

Σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα που αποτελείται από μία ομογενή φάση, ορίζεται ως ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται ανά μονάδα μάζας για την αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος κατά  $1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{ K}$ .

- Μονάδα της ειδικής θερμότητας στο SI είναι το  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ .
- Πιο ακριβής ορισμός προκύπτει θεωρώντας απειροστή μεταβολή της θερμοκρασίας:

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{1}{m} \cdot \left( \frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)$$

- Υλικά με υψηλή ειδική θερμότητα απαιτούν περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα μάζας για την αύξηση της θερμοκρασίας τους και αποδίδουν περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα μάζας όταν μειώνεται η θερμοκρασία τους.
- Η ειδική θερμότητα του νερού είναι μία από τις υψηλότερες όλων των υλικών, ιδιότητα που το καθιστά ως βασική αποθήκη θερμότητας, π.χ. σε θερμοσίφωνες ή στο σώμα μας.

# Βασικά καταστατικά μεγέθη: ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα

- **Ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα:**

Υλικό	Ειδική θερμότητα (kcal/kgK)	Ειδική θερμότητα (J/kgK)
Αλουμίνιο	0,22	900
Χαλκός	0,093	390
Γυαλί	0,20	840
Ανθρώπινο σώμα (με μέση θερμοκρασία 37 °C)	0,83	3.500
Πάγος (στους -5 °C)	0,50	2.100
Σίδηρος ή χάλυβας	0,11	450
Υδράργυρος	0,033	140
Άργυρος	0,056	240
Ατμός (στους 110 °C)	0,48	2.010
Νερό	1,00	4.187
Ξύλο	0,40	1.700

## Βασικά καταστατικά μεγέθη: ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα

- Η ειδική θερμότητα ορίζεται για δύο ειδικές περιπτώσεις θερμοδυναμικών μεταβολών, θεωρώντας ότι η δυναμική και κινητική ενέργεια του συστήματος δεν μεταβάλλονται και λαμβάνοντας υπόψη ότι η θερμότητα εξαρτάται από τη θερμοδυναμική διεργασία.
- Οι περιπτώσεις αυτές προκύπτουν στην περίπτωση που η θέρμανση του συστήματος γίνεται υπό σταθερό όγκο ή σταθερή πίεση. Οι αντίστοιχες ειδικές θερμότητες ονομάζονται ως «ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο» και «ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση» αντίστοιχα και ορίζονται ως εξής:

$$c_v = \frac{1}{m} \cdot \left( \frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_v \Leftrightarrow c_v = \frac{1}{m} \cdot \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \Leftrightarrow c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$c_p = \frac{1}{m} \cdot \left( \frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)_p \Leftrightarrow c_p = \frac{1}{m} \cdot \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \Leftrightarrow c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$



Βασικά καταστατικά μεγέθη:  
ειδική θερμότητα ή θερμοχωρητικότητα

- Τέλος, αποδεικνύεται ότι για τέλεια αέρια (βλέπε επόμενη ενότητα) ισχύουν οι σχέσεις:

$$c_v = \frac{R'}{\gamma - 1}$$

$$c_p = R' \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1}$$

$$c_p - c_v = R'$$

όπου  $R'$  η σταθερά του εκάστοτε αερίου και  $\gamma$  ο λόγος των δύο ειδικών θερμοτήτων:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

## Παράδειγμα 1: ειδικές θερμότητες

Για ένα αέριο η σταθερά  $R'$  είναι  $0,4615 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  και ο συντελεστής  $\gamma$  ισούται με  $1,329$ . Ζητείται να υπολογιστούν οι ειδικές θερμότητες του αερίου υπό σταθερή πίεση και σταθερό όγκο.

Λύση:

Με βάση τα ανωτέρω θα έχουμε:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \Rightarrow 1,329 = \frac{c_p}{c_v} \Leftrightarrow c_p = 1,329 \cdot c_v$$

και

$$c_p - c_v = R' \Rightarrow 1,329 \cdot c_v - c_v = 0,4615 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \Leftrightarrow 0,329 \cdot c_v = 0,4615 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \Leftrightarrow c_v = 1,4024 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$c_p = 1,329 \cdot c_v \Rightarrow c_p = 1,329 \cdot 1,4024 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \Leftrightarrow c_p = 1,8638 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

# Βασικά καταστατικά μεγέθη

- Από τα ανωτέρω καταστατικά μεγέθη, στις συνήθεις θερμοδυναμικές διεργασίες που αφορούν στο Μηχανικό εμπλέκονται κυρίως τα ακόλουθα:
  - πίεση
  - θερμοκρασία
  - ειδικός όγκος ή πυκνότητα
  - ειδική εσωτερική ενέργεια
  - ειδική ενθαλπία
  - ειδική εντροπία.
- Για τον προσδιορισμό της κατάστασης ενός σώματος, π.χ. του αέρα εντός ενός κλιματιζόμενου χώρου, του ψυκτικού μέσου σε μία ψυκτική συσκευή ή του ατμού εντός ενός θερμοδοχείου, αρκεί η γνώση δύο ανεξάρτητων εντατικών μεγεθών (π.χ. πίεσης και θερμοκρασίας, ή ειδικής ενθαλπίας και ειδικού όγκου).

## Παράδειγμα 2: πίεση και δύναμη

Σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης τύπου ντίζελ η διάμετρος του εμβόλου είναι 850 mm και η πίεση από τα παραγόμενα αέρια με την καύση είναι 15 bar. Να υπολογιστεί η δύναμη που ασκείται πάνω στην εγκάρσια επιφάνεια του εμβόλου.

Λύση:

Η δύναμη που ασκείται πάνω στην εγκάρσια επιφάνεια του εμβόλου υπολογίζεται από τη σχέση ορισμού της πίεσης:

$$p = \frac{F}{A} \Leftrightarrow F = p \cdot A \Leftrightarrow F = p \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Rightarrow F = 15 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \frac{\pi \cdot 0,850^2 \text{ m}^2}{4}$$

$$\Leftrightarrow F = 851,174 \text{ kNt}$$

όπου  $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  η εγκάρσια επιφάνεια του εμβόλου κυκλικής διατομής και  $d$  η διάμετρος της διατομής.

Υπενθυμίζεται ότι  $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \frac{\text{Nt}}{\text{m}^2}$

## Παράδειγμα 3: πίεση

Στο μανόμετρο του σχήματος η απόσταση  $z$  ισούται με 1 cm και η πίεση  $p_2$  ισούται με 10 Pa. Να βρεθεί η πίεση  $p_1$ , αν το υγρό στο μανόμετρο είναι νερό ή υδράργυρος. Η πυκνότητα του νερού είναι  $1.000 \text{ kg/m}^3$  και του υδράργυρου  $13.568 \text{ kg/m}^3$ .

Λύση:

Η διαφορά πίεσης στο μανόμετρο δίνεται από τη σχέση:  $\Delta p = p_1 - p_2 = z \cdot \rho \cdot g \Leftrightarrow p_1 = z \cdot \rho \cdot g + p_2$

Για την περίπτωση του νερού:

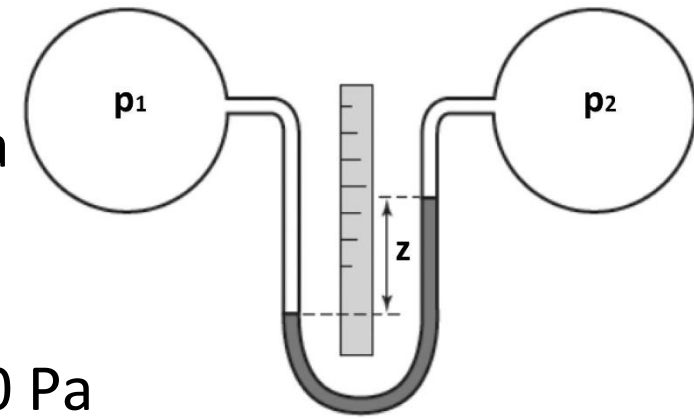
$$p_1 = z \cdot \rho \cdot g + p_2 \Rightarrow p_1 = 0,01 \text{ m} \cdot 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 10 \text{ Pa} \Leftrightarrow p_1 = 108,1 \text{ Pa}$$

Για την περίπτωση του υδραργύρου:

$$p_1 = z \cdot \rho \cdot g + p_2 \Rightarrow p_1 = 0,01 \text{ m} \cdot 13.568 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 10 \text{ Pa} \Leftrightarrow p_1 = 1.341,0 \text{ Pa}$$

Προσοχή με τις μονάδες:

$$\text{m} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{1}{\text{m}^2} \cdot \left( \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = \frac{1}{\text{m}^2} \cdot \text{Nt} = \frac{\text{Nt}}{\text{m}^2} = \text{Pa}$$



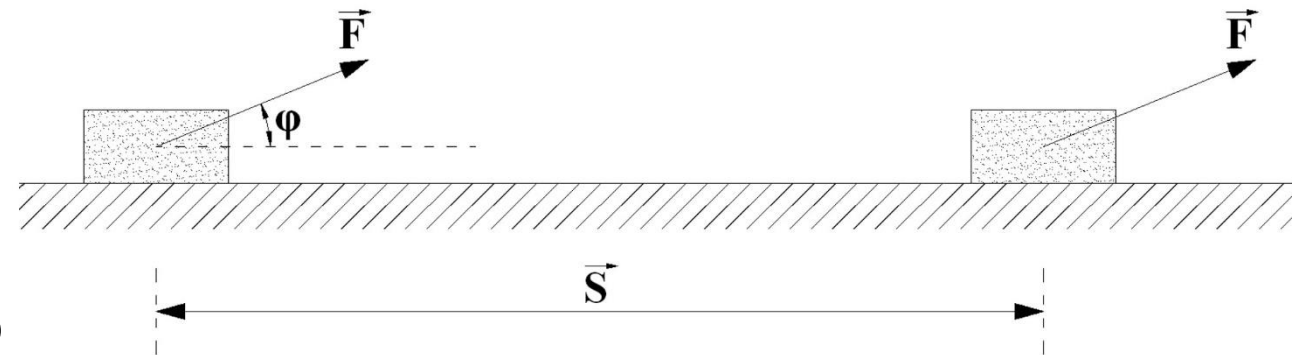
# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

- Γνωρίζουμε από τη Μηχανική ότι το έργο είναι το αποτέλεσμα της μετακίνησης ενός σώματος κατά μήκος μιας διαδρομής, όταν πάνω του ασκηθεί δύναμη  $\vec{F}$ .
- Στη γενική περίπτωση μεταβαλλόμενης δύναμης, που μετατοπίζει το σώμα κατά διάστημα  $dx$ , το παραγόμενο μηχανικό έργο δίνεται από τη σχέση:

$$W = \int F \cdot dx$$

- Αν η δύναμη  $\vec{F}$  είναι σταθερή, όταν σε ένα σώμα ασκηθεί δύναμη και μετατοπίσει το σώμα κατά διάστημα  $\vec{S}$ , του οποίου η διεύθυνση σχηματίζει γωνία  $\phi$  με τη διεύθυνση του διανύσματος  $\vec{F}$ , τότε παράγεται έργο που ισούται με το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων  $\vec{F}$  και  $\vec{S}$ :

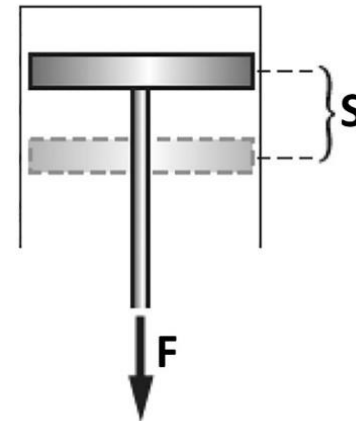
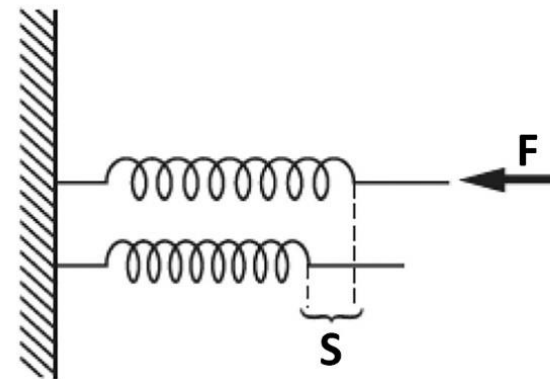
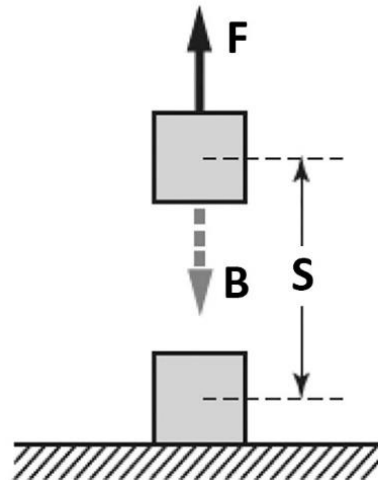
$$W = |\vec{F}| \cdot |\vec{S}| \cdot \cos\phi$$



- Μονάδα μέτρησης του έργου στο SI είναι το Joule:  $1 \text{ Joule} = 1 \text{ Nt} \cdot 1 \text{ m}$

# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

- Εάν η μετατόπιση  $\vec{S}$  του σώματος έχει την ίδια φορά με την κατεύθυνση της δύναμης  $\vec{F}$ , τότε το έργο θεωρείται θετικό. Στην αντίθετη περίπτωση το έργο θεωρείται αρνητικό. Εάν η μετατόπιση είναι κάθετη στη διεύθυνση της δύναμης, το έργο ισούται με μηδέν, καθώς η γωνία  $\phi$  είναι  $90^\circ$  και  $\cos 90^\circ = 0$ .
- Σύμφωνα με τα ανωτέρω, μπορούμε να πούμε ότι έχουμε θετικό έργο όταν:
  - μία δύναμη ανυψώνει ένα σώμα
  - μία δύναμη συμπιέζει ένα ελατήριο
  - ένα αέριο εκτονώνεται μέσα σε έναν κύλινδρο.



# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

- Η παραγωγή έργου αντιστοιχεί σε τουλάχιστον ισόποση (αν αγνοηθούν οι απώλειες) διάθεση ενέργειας.
- Έργο και ενέργεια είναι αντίστοιχα φυσικά μεγέθη, για τούτο έχουν τις ίδιες μονάδες.
- Ο ρυθμός μεταβολής του έργου ως προς το χρόνο δίνει την ισχύ. Εναλλακτικά, ισχύς είναι ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο ένα σώμα ή ένα σύστημα παράγει ή καταναλώνει ενέργεια:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt}$$

- Μονάδα μέτρησης της ισχύος είναι το Watt:

$$1 \text{ Watt} = \frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ s}}$$



# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

- Ένα θερμοδυναμικό σύστημα παράγει έργο, όταν, αλληλεπιδρώντας με το περιβάλλον, προκαλεί τη μετατόπιση κάποιας μάζας.
- Για παράδειγμα, ένα συμπιεσμένο αέριο σε υψηλή πίεση που αφήνεται να εκτονωθεί μέσω ενός εμβόλου, παράγει έργο.
- Το έργο σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα θεωρείται θετικό όταν αποδίδεται από το σύστημα στο περιβάλλον και αρνητικό όταν αποδίδεται από το περιβάλλον στο σύστημα.
- Το παραγόμενο έργο κατά μία θερμοδυναμική μεταβολή σαφώς εξαρτάται και από τις θερμοδυναμικές διεργασίες, κι όχι μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση. Άρα δεν είναι καταστατικό μέγεθος.
- Δεν μπορούμε να ορίσουμε το έργο μιας κατάστασης  $W_1$ , ούτε τη διαφορά έργων δύο καταστάσεων  $W_1 - W_2$ . Ορίζουμε το έργο μόνο για συγκεκριμένες μεταβολές.

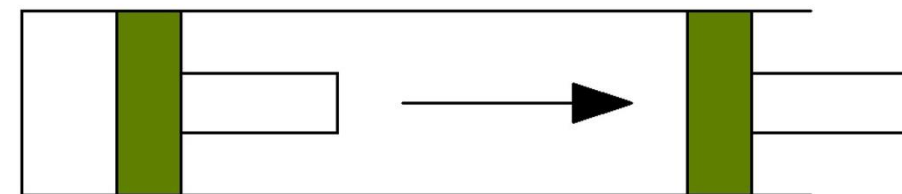
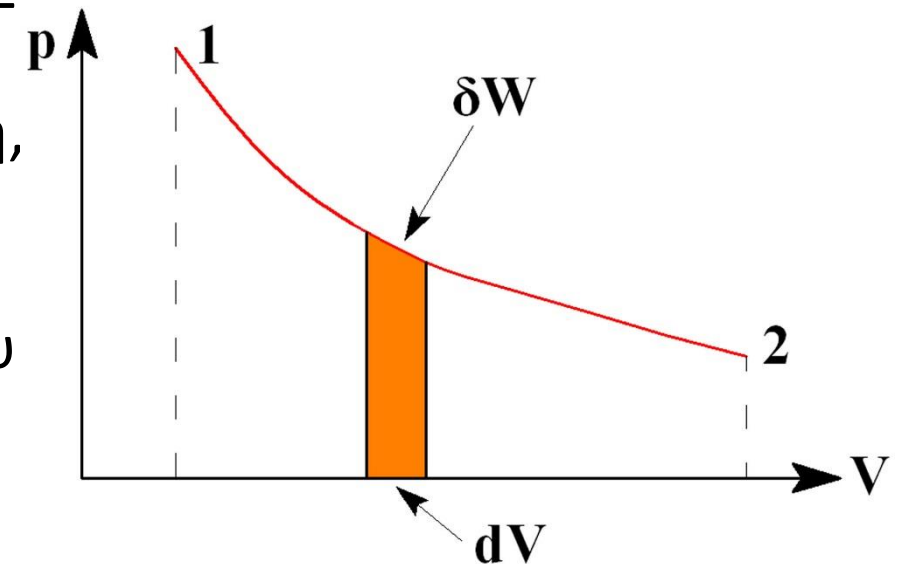
# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

- Η εκτόνωση ενός αερίου συνεπάγεται μεταβολή της πίεσής του και αντίστοιχη μεταβολή του όγκου του.
- Γενικότερα, η παραγωγή έργου στη Θερμοδυναμική προϋποθέτει και συνεπάγεται τη μεταβολή του όγκου του θερμοδυναμικού συστήματος.
- Κατά την εκτόνωση, έστω μία πολύ μικρή μετακίνηση  $dL$  του εμβόλου, που αντιστοιχεί σε μεταβολή του όγκου κατά  $dV$ . Επειδή η μεταβολή του όγκου είναι πολύ μικρή, μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ότι η πίεση  $p$  του αερίου εντός του θαλάμου παραμένει αμετάβλητη. Αν  $A$  είναι η επιφάνεια του εμβόλου, τότε η δύναμη που ασκείται από το αέριο στο έμβολο ισούται με:

$$F = p \cdot A$$

- Κατά τη στοιχειώδη μετατόπιση  $dL$  θα έχει παραχθεί μία στοιχειώδης ποσότητα έργου ίση με:

$$\delta W = F \cdot dL = p \cdot A \cdot dL = p \cdot dV$$

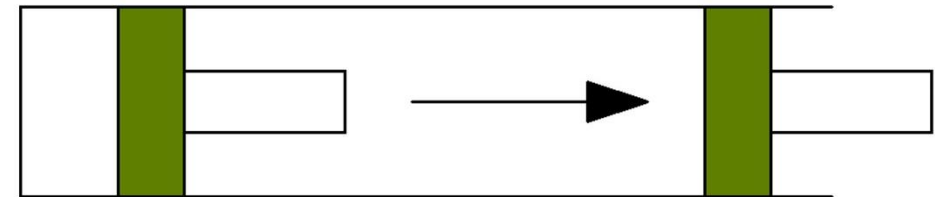
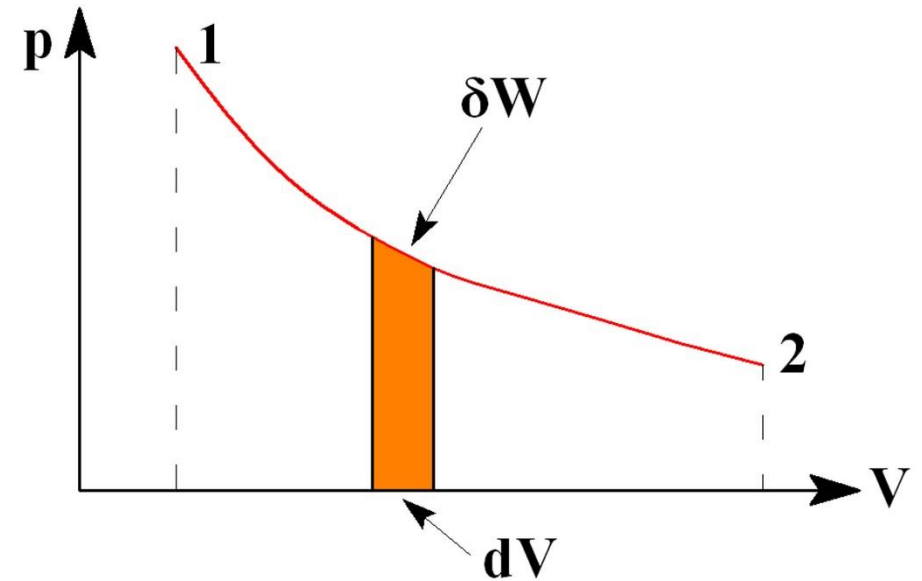


# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

- Κατά την πλήρη μετακίνηση του εμβόλου από τη θέση 1 στη θέση 2, το συνολικό έργο που θα παραχθεί ισούται με το άθροισμα όλων των επιμέρους στοιχειωδών ποσοτήτων έργου, δηλαδή:

$$W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV$$

- Το μηχανικό έργο κατά μία θερμοδυναμική μεταβολή, όπως υπολογίστηκε ανωτέρω, ονομάζεται έργο μετατοπίσεως ή έργο ογκομεταβολής.



# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

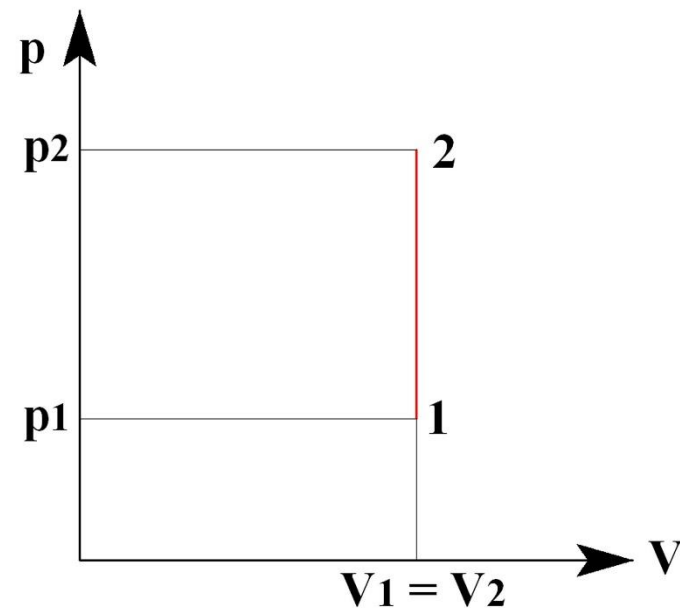
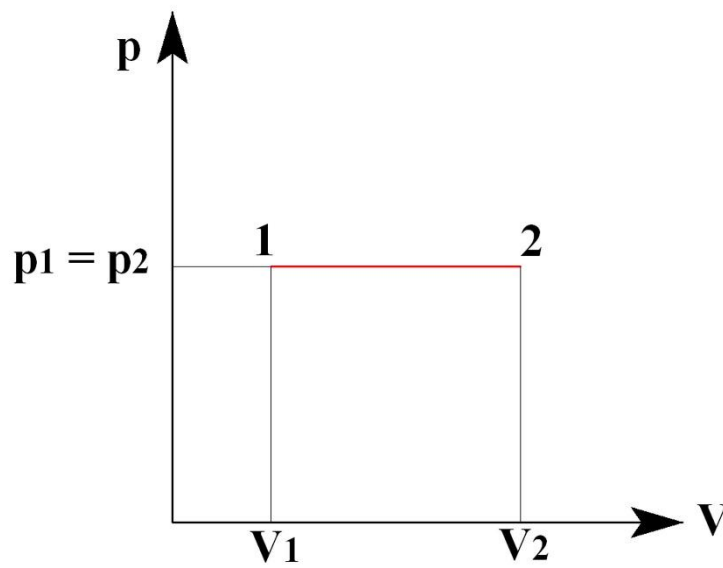
Για τις βασικές θερμοδυναμικές μεταβολές που αναφέρθηκαν προηγουμένως, το έργο που παράγεται κατά την πραγματοποίησή τους υπολογίζεται αναπτύσσοντας την παραπάνω σχέση. Συγκεκριμένα:

- Διεργασία υπό σταθερό όγκο:

$$dV=0 \Rightarrow W_{12}=0.$$

- Διεργασία υπό σταθερή πίεση:

$$p=\text{const.} \Rightarrow W_{12}=p \cdot (V_2 - V_1).$$



# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

- Διεργασία υπό σταθερή θερμοκρασία:

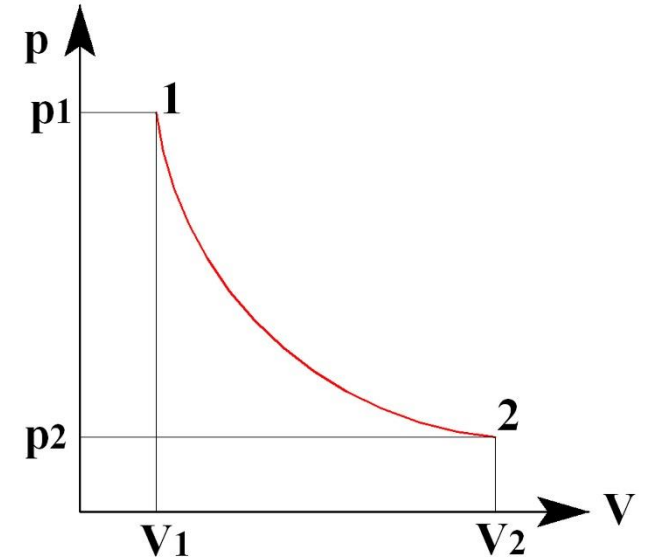
$$p \cdot V = C \Leftrightarrow p = C/V$$

$$W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV \Leftrightarrow W_{12} = \int_1^2 \frac{C}{V} \cdot dV \Leftrightarrow$$

$$W_{12} = C \cdot \int_1^2 \frac{dV}{V} \Leftrightarrow W_{12} = C \cdot [\ln V]_{V_1}^{V_2} \Leftrightarrow$$

$$W_{12} = C \cdot (\ln V_2 - \ln V_1) \Leftrightarrow W_{12} = C \cdot \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \Rightarrow$$

$$W_{12} = p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = p_2 \cdot V_2 \cdot \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = m \cdot R' \cdot T \cdot \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$



# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

- Πολυτροπική μεταβολή:

$$p \cdot V^n = C \Rightarrow p_1 \cdot V_1^n = p_2 \cdot V_2^n \quad \text{και} \quad p = \frac{C}{V^n} \Leftrightarrow p = \frac{p_1 \cdot V_1^n}{V^n} = \frac{p_2 \cdot V_2^n}{V^n}$$

$$\begin{aligned} W_{12} &= \int_1^2 p \cdot dV \Leftrightarrow W_{12} = C \cdot \int_1^2 \frac{dV}{V^n} \Leftrightarrow W_{12} = C \cdot \int_1^2 V^{-n} \cdot dV \Leftrightarrow W_{12} = C \cdot \left[ \frac{V^{-n+1}}{-n+1} \right]_{V_1}^{V_2} \Leftrightarrow \\ W_{12} &= C \cdot \frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{1-n} \Leftrightarrow W_{12} = \frac{C \cdot V_2^{-n+1} - C \cdot V_1^{-n+1}}{1-n} \Leftrightarrow W_{12} = \frac{p_2 \cdot V_2^n \cdot V_2^{-n+1} - p_1 \cdot V_1^n \cdot V_1^{-n+1}}{1-n} \\ \Leftrightarrow W_{12} &= \frac{p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1}{1-n} \end{aligned}$$

# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

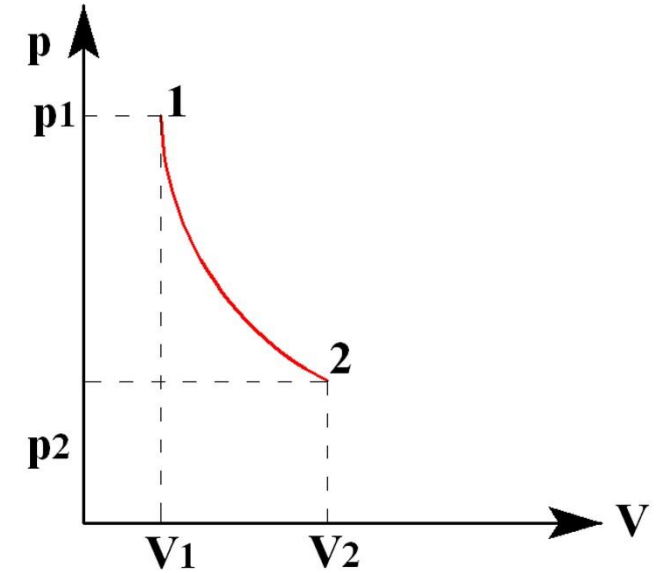
- Ισεντροπική μεταβολή:

$$p \cdot V^\gamma = C \Rightarrow p_1 \cdot V_1^\gamma = p_2 \cdot V_2^\gamma$$

και

$$p = \frac{C}{V^\gamma} \Leftrightarrow p = \frac{p_1 \cdot V_1^\gamma}{V^\gamma} = \frac{p_2 \cdot V_2^\gamma}{V^\gamma}$$

$$W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV \Leftrightarrow W_{12} = C \int_1^2 \frac{dV}{V^\gamma} \Rightarrow W_{12} = \frac{p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1}{1 - \gamma}$$

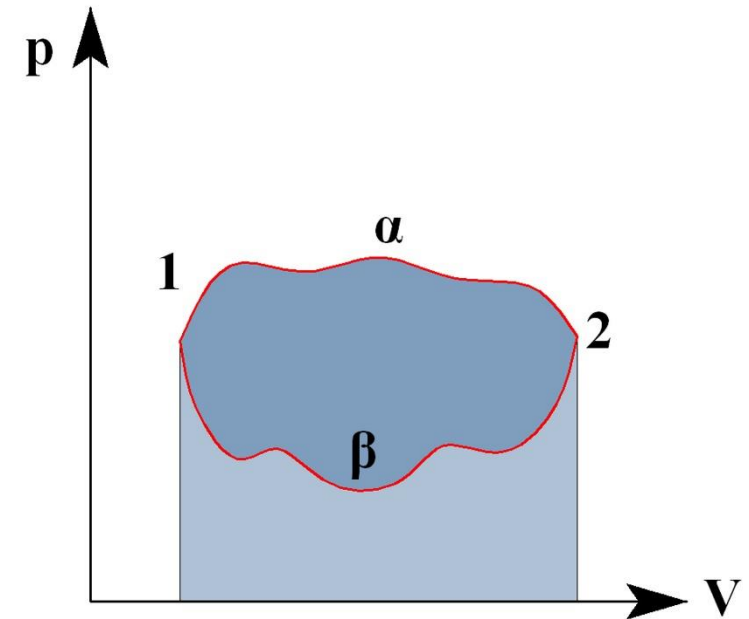


# Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

- Κυκλική μεταβολή:

Το έργο ογκομεταβολής κλειστού συστήματος που εκτελεί κυκλική διεργασία ισούται με το εμβαδόν εντός της καμπύλης που περιγράφει τη μεταβολή σε διάγραμμα  $p$ - $V$ .

Το έργο σε μία κυκλική μεταβολή είναι θετικό (αποδίδεται από το σύστημα στο περιβάλλον), όταν η καμπύλη είναι δεξιόστροφη και αρνητικό (αποδίδεται από το περιβάλλον στο σύστημα), όταν η καμπύλη είναι αριστερόστροφη.





## Παράδειγμα 4: Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

Έστω ότι στο σχήμα η σχέση που συνδέει την πίεση  $p$  και τον όγκο  $V$  είναι  $p = C/V$ , όπου  $C$  σταθερός αριθμός. Εάν η αρχική πίεση είναι 3 bar, ο αρχικός όγκος είναι  $10 \text{ cm}^3$  και ο τελικός όγκος είναι  $30 \text{ cm}^3$ , να υπολογιστεί το παραγόμενο έργο σε Joule. Το έργο που παράγεται είναι θετικό ή αρνητικό;

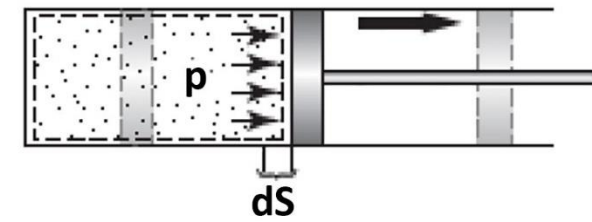
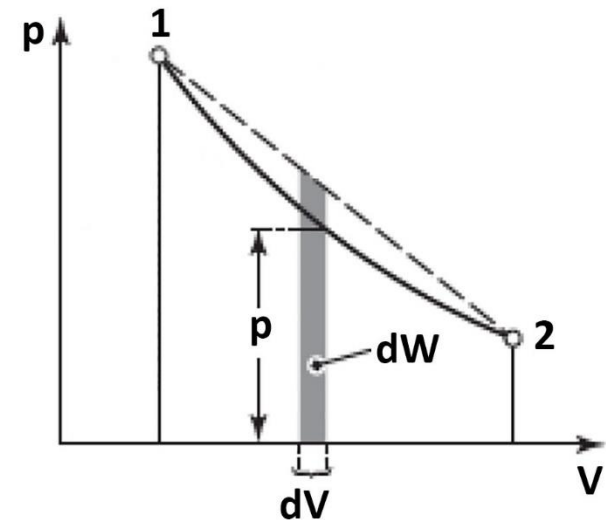
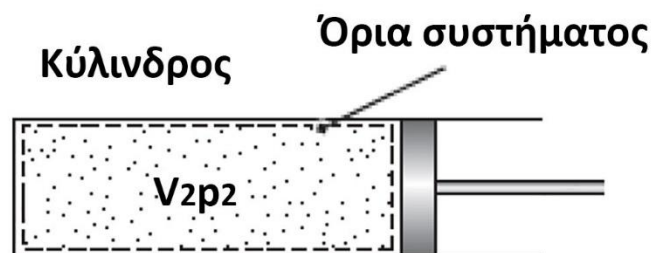
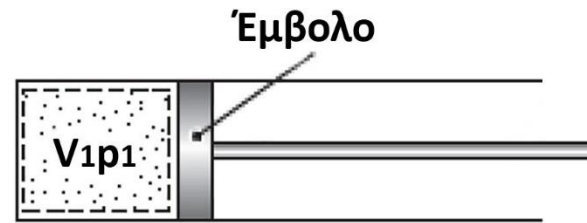
Λύση:

Το παραγόμενο έργο δίνεται από τη γενική σχέση:  $W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV$ .

Όμως δίνεται  $p = C/V$ , οπότε:

$$W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV \Leftrightarrow W_{12} = \int_1^2 \frac{C}{V} \cdot dV \Leftrightarrow$$

$$W_{12} = C \int_1^2 \frac{dV}{V} \Rightarrow W_{12} = C \cdot \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)$$



## Παράδειγμα 4: Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

Με βάση τα δεδομένα για την αρχική και τελική κατάσταση της μεταβολής μπορεί να υπολογιστεί η σταθερά  $C$ .

Για  $p_1 = 3 \text{ bar}$ ,  $V_1 = 10 \text{ cm}^3$ , οπότε:

$$p_1 = \frac{C}{V_1} \Leftrightarrow C = p_1 \cdot V_1 = 3 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \Leftrightarrow C = 3 \text{ Joule}$$

Το παραγόμενο έργο υπολογίζεται τελικά από τη σχέση:

$$W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV \Leftrightarrow W_{12} = \int_1^2 \frac{C}{V} \cdot dV \Leftrightarrow$$

$$W_{12} = C \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \Rightarrow W_{12} = 3 \text{ Joule} \cdot \ln\left(\frac{30}{10}\right) \Leftrightarrow W_{12} = 3,296 \text{ Joule}$$

Το έργο είναι θετικό, κάτι που σημαίνει ότι αποδίδεται από το σύστημα προς το περιβάλλον.

Υπενθυμίζεται επίσης ότι:

$$\int_1^2 \frac{dx}{x} = \ln(x_2) - \ln(x_1) = \ln\left(\frac{x_2}{x_1}\right)$$

## Παράδειγμα 5: Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

Η πίεση στον κύλινδρο του σχήματος μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση  $p = C/V^2$ . Εάν η αρχική πίεση είναι 500 kPa, ο αρχικός όγκος 0,05 m<sup>3</sup> και η τελική πίεση 200 kPa, να βρεθεί το έργο του συστήματος σε kJ. Εάν το έργο αυτό παρήχθη σε 30 s, να βρεθεί η ισχύς του συστήματος.

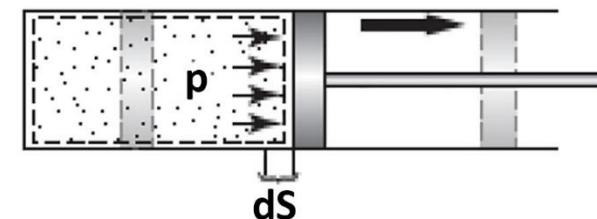
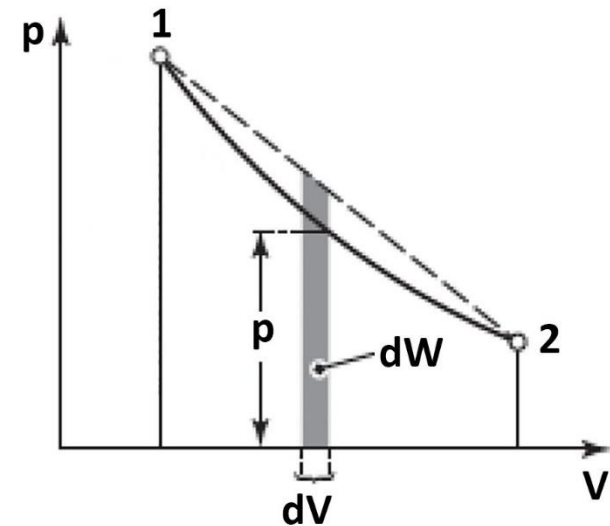
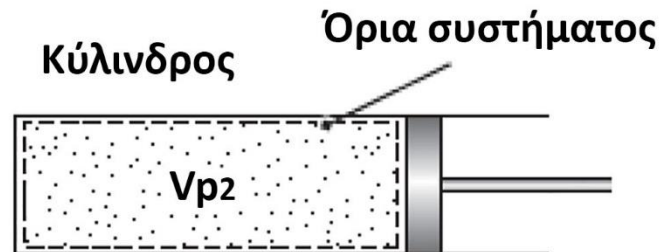
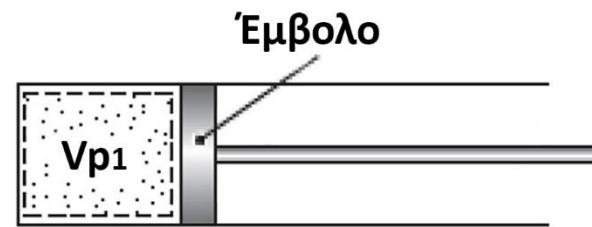
Λύση:

Το παραγόμενο έργο δίνεται από τη γενική σχέση:  $W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV$ .

Όμως δίνεται  $p = C/V^2$ , οπότε:

$$W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV \Leftrightarrow W_{12} = \int_1^2 \frac{C}{V^2} \cdot dV \Leftrightarrow$$

$$W_{12} = C \int_1^2 \frac{dV}{V^2} \Rightarrow W_{12} = C \cdot \left( \frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right)$$



## Παράδειγμα 5: Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

Με βάση τα δεδομένα για την αρχική και τελική κατάσταση της μεταβολής μπορεί να υπολογιστεί η σταθερά  $C$ .

Για  $p_1 = 500 \text{ kPa}$ ,  $V_1 = 0,05 \text{ m}^3$ , οπότε:

$$p_1 = \frac{C}{V_1^2} \Leftrightarrow C = p_1 \cdot V_1^2 = 500 \cdot 10^3 \text{ Pa} \cdot 0,05^2 \text{ m}^6 \Leftrightarrow C = 1.250 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6$$

Για  $p_2 = 200 \text{ kPa}$  ο τελικός όγκος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_2 = \frac{C}{V_2^2} \Leftrightarrow V_2 = \sqrt{\frac{C}{p_2}} \Rightarrow V_2 = \sqrt{\frac{1.250 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6}{200.000 \text{ Pa}}} \Leftrightarrow V_2 = 0,079 \text{ m}^3$$

Το παραγόμενο έργο υπολογίζεται τελικά από τη σχέση:

$$W_{12} = C \cdot \left( \frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right) \Rightarrow W_{12} = 1.250 \text{ Pa} \cdot \text{m}^6 \cdot \left( \frac{1}{0,05 \text{ m}^3} - \frac{1}{0,079 \text{ m}^3} \right) \Leftrightarrow W_{12} = 9.177,2 \text{ J} \\ = 9.18 \text{ kJ}$$

## Παράδειγμα 5: Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

Η ισχύς του συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση ορισμού της:

$$P = \frac{W_{12}}{t} \Rightarrow P = \frac{9,177 \text{ J}}{30 \text{ s}} \Leftrightarrow P = 305,9 \text{ W}$$

# Κυρίαρχες μορφές ενέργειας

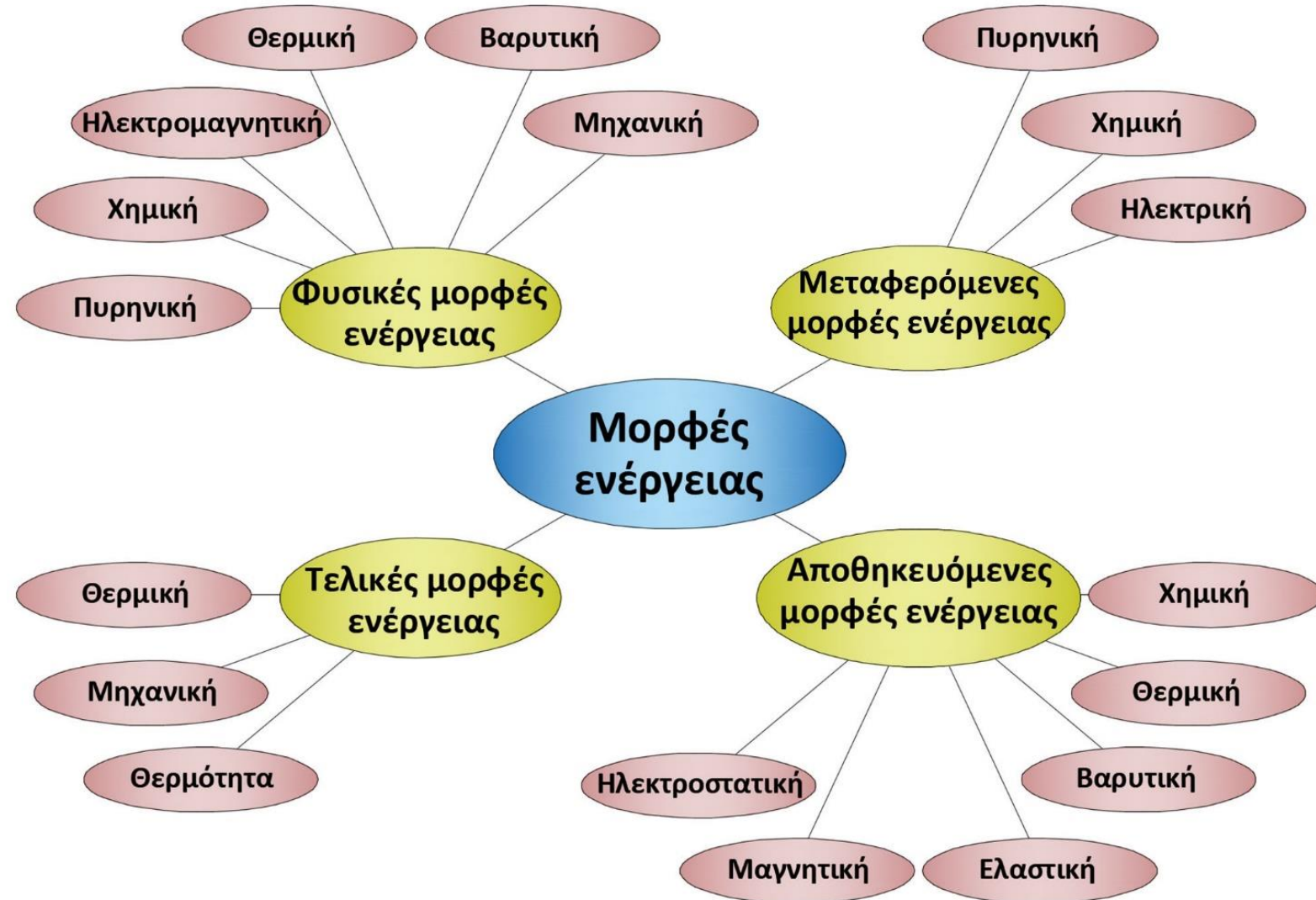
- Μηχανική (mechanical): η ενέργεια της ελεύθερης κίνησης ενός σωματιδίου ή ενός σώματος σε ένα σύστημα ή της δυναμικής κατάστασής του λόγω βαρυτικών πεδίων.
- Θερμότητα (heat): η ενέργεια της χαοτικής κίνησης και της αλληλεπίδρασης σωματιδίων σε μακροσυστήματα.
- Θερμική (thermal): το ποσοστό της θερμότητας που μπορεί να απελευθερωθεί και να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας, δίνοντας θερμοκρασιακές μεταβολές.
- Ηλεκτρική ή ηλεκτροδυναμική (electric or electrodynamic): η ενέργεια κάθε μορφής τακτικής κίνησης των ηλεκτρονίων στην ύλη.
- Βαρυτική (gravitational): η δυναμική ενέργεια εντατικών καταστάσεων, που προκύπτει από δυνάμεις αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα υλικά σώματα, οι οποίες οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο της γης.

# Κυρίαρχες μορφές ενέργειας

- Πυρηνική (nuclear): η δεσμευμένη ενέργεια των πυρήνων που απελευθερώνεται κατά τη σχάση βαρέων πυρήνων και τη σύνθεση ελαφρότερων.
- Χημική (chemical): η ενέργεια που εκλύεται κατά τις χημικές αντιδράσεις, σαν αποτέλεσμα της ανακατανομής των στοιβάδων ηλεκτρονίων στα μόρια.
- Ελαστική (elastic): η ενέργεια ενός εντεταμένου ελατηρίου ή ενός συμπιεσμένου ρευστού σε σταθερή θερμοκρασία που οδηγεί σε αποθήκευση ενέργειας. Η ενέργεια αυτή απορρέει από ηλεκτρομαγνητικές, θερμικές και βαρυτικές αλληλεπιδράσεις.
- Ηλεκτρομαγνητική (electromagnetic): η ενέργεια που μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών.



# Κατηγοριοποίηση μορφών ενέργειας





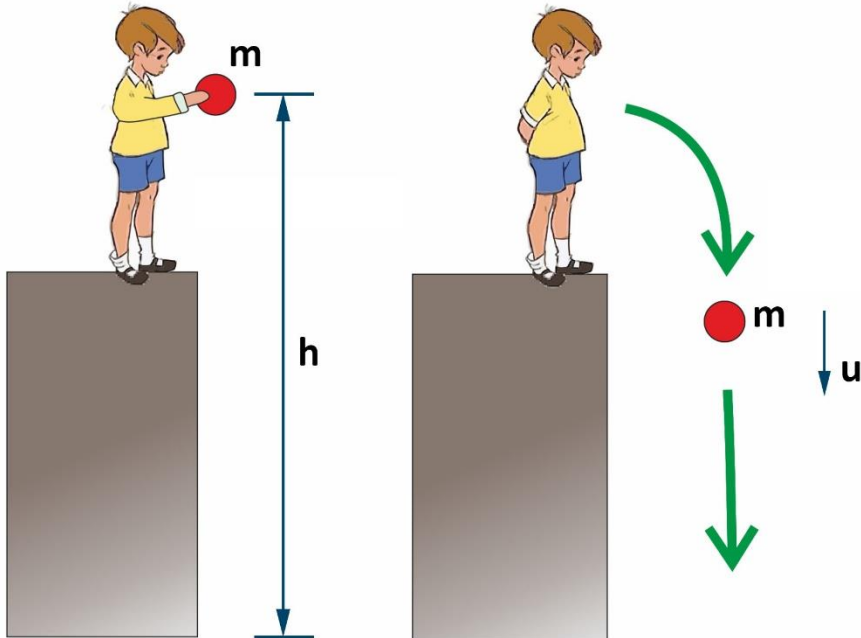
# Δυναμική και κινητική ενέργεια

- Δυναμική ενέργεια (potential energy): είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα λόγω της θέσης ή της κατάστασής του. Η δυναμική ενέργεια λόγω του βαρυτικού πεδίου της γης ονομάζεται βαρυτική ενέργεια και ισούται με:

$$E_{\text{δυν.}} = m \cdot g \cdot h$$

- Κινητική ενέργεια (kinetic energy): η ενέργεια ενός σώματος λόγω της κίνησής του:

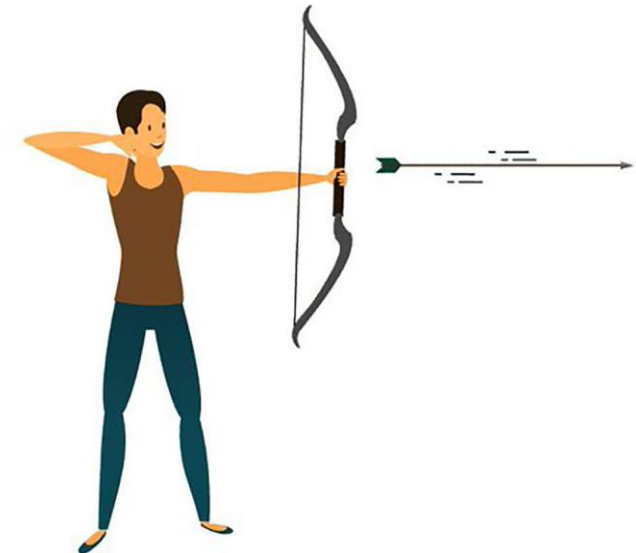
$$E_{\text{κιν.}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$



Δυναμική (ελαστική) ενέργεια



Κινητική ενέργεια



## Παράδειγμα 6: Δυναμική και κινητική ενέργεια

Ατμός υψηλής πίεσης και μάζας 8.000 kg εισέρχεται στο σωλήνα του δικτύου ατμού μιας ατμοκίνητης εγκατάστασης με ταχύτητα 90 m/s. Στην έξοδό του από το σωλήνα η ταχύτητά του έχει μειωθεί στα 80 m/s. Να βρεθεί η κινητική ενέργεια ατμού στην είσοδο και στην έξοδό του από το σωλήνα. Ποια είναι η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του ατμού;

Λύση:

Η κινητική ενέργεια του ατμού στην είσοδό του στο σωλήνα ισούται με:

$$E_{κιν1.} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 \Rightarrow E_{κιν1.} = \frac{1}{2} \cdot 8.000 \text{ kg} \cdot 90^2 (\text{m/s})^2 \Leftrightarrow E_{κιν1.} = 32.400.000 \text{ J} = 32.400 \text{ kJ} = 9,0 \text{ kWh.}$$

Η κινητική ενέργεια του ατμού στην έξοδό του στο σωλήνα ισούται με:

$$E_{κιν2.} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2 \Rightarrow E_{κιν2.} = \frac{1}{2} \cdot 8.000 \text{ kg} \cdot 80^2 (\text{m/s})^2 \Leftrightarrow E_{κιν2.} = 25.600.000 \text{ J} = 25.600 \text{ kJ} = 7,1 \text{ kWh.}$$

Η μείωση της κινητικής ενέργειας του ατμού κατά τη διέλευσή του από το σωλήνα ισούται με:

$$\Delta E_{κιν.} = E_{κιν1.} - E_{κιν2.} = (32.400 - 25.600) \text{ kJ} = 6.800 \text{ kJ} = 1,9 \text{ kWh.}$$

# Θερμότητα

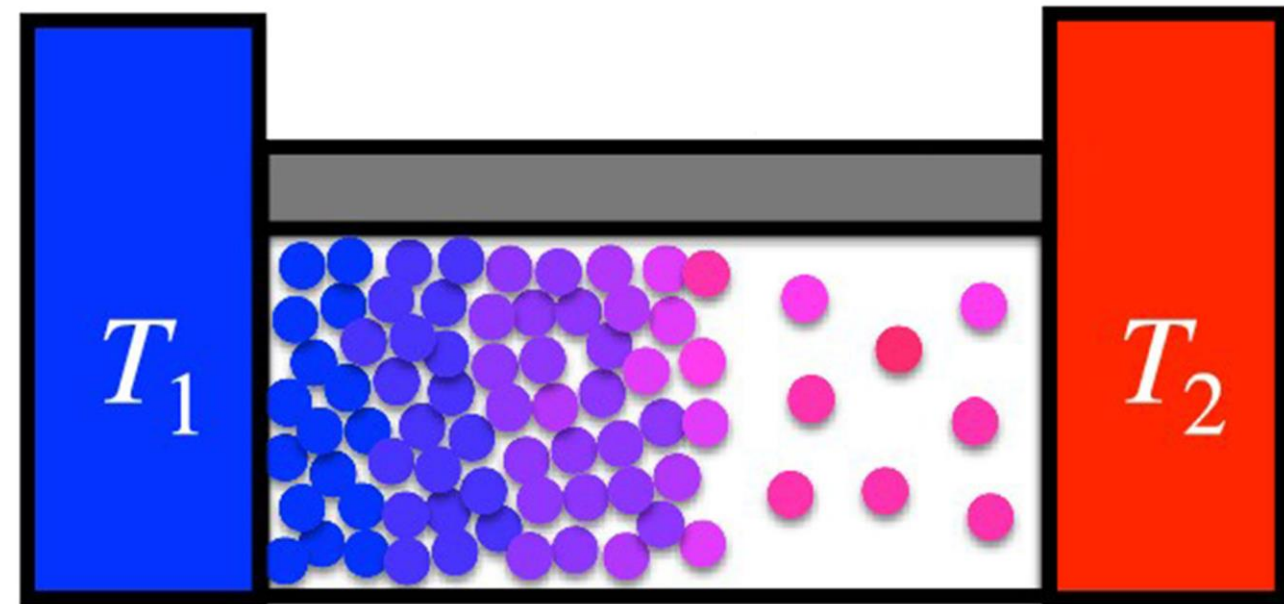
- Η θερμότητα ορίζεται ως η μορφή ενέργειας που μεταδίδεται διαμέσου του ορίου ενός θερμοδυναμικού συστήματος συγκεκριμένης θερμοκρασίας προς ένα άλλο σύστημα, που μπορεί να είναι και το περιβάλλον, που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, λόγω ακριβώς αυτής της διαφοράς θερμοκρασίας των δύο συστημάτων.
- Η θερμότητα μεταφέρεται πάντα από το σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας στο σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας.
- Αιτία της μεταφοράς θερμότητας είναι η θερμοκρασιακή διαφορά των δύο σωμάτων.
- Ένα σύστημα δεν περιέχει θερμότητα. Η έννοια της θερμότητας δεν ορίζεται, δεν έχει νόημα για ένα σύστημα. Η θερμότητα ορίζεται μόνο στα όρια του συστήματος και μόνο κατά τη διάρκεια της μεταφοράς της.
- Όταν η θερμότητα προσδίδεται σε ένα σύστημα θεωρείται θετική, ενώ όταν αποβάλλεται από ένα σύστημα θεωρείται αρνητική.
- Η θερμότητα εξαρτάται από τη διεργασία κι όχι μόνο από την αρχική και τελική κατάσταση του συστήματος. Άρα δεν είναι καταστατικό μέγεθος.
- Η θερμότητα μετράται σε μονάδες ενέργειας, δηλαδή σε Joule στο SI.

# Τρόποι μεταφοράς θερμότητας

- Η θερμότητα μεταφέρεται με τρεις τρόπους:
- **Αγωγή:** αφορά στη μεταφορά θερμότητας μέσω ενός ακίνητου μέσου (στερεό, υγρό ή αέριο).
- **Συναγωγή:** αφορά στη μεταφορά θερμότητας ανάμεσα σε ένα στερεό σώμα ή την επιφάνεια ενός υγρού προς ένα κινούμενο ρευστό πέριξ του στερεού ή άνω της επιφάνειας του υγρού.
- **Θερμική ακτινοβολία:** βασίζεται στο δεδομένο ότι κάθε σώμα με πεπερασμένη θερμοκρασία εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Συνεπώς, ανάμεσα σε δύο σώματα διαφορετικής θερμοκρασίας θα υπάρξει μεταφορά θερμότητας, χωρίς απαραίτητα να υπάρχει κάποιο μέσο μεταξύ τους.

# Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

- Η αγωγή αφορά μακροσκοπικά σε ακίνητα σώματα (στερεά ή υγρά σε ηρεμία) και σχετίζεται με τη μεταφορά ενέργειας σε μοριακό επίπεδο. Ουσιαστικά είναι η μεταφορά ενέργειας από θεμελιώδη σωματίδια της ύλης υψηλότερης ενέργειας προς σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας, μέσω της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης.
- Ας υποθέσουμε ρευστό μεταξύ δύο επιφανειών, μίας ζεστής και μίας κρύας. Η υψηλότερη θερμοκρασία στη μία επιφάνεια συνεπάγεται αραιότερο μέσο και με πιο έντονες μοριακές κινήσεις. Η θερμότητα μεταφέρεται προς τα ψυχρότερα μόρια μέσω των αλληλο-συγκρούσεων μεταξύ τους.
- Η μεταφορά ενέργειας από τα θερμότερα στα ψυχρότερα μόρια μέσω των συγκρούσεών τους ονομάζεται «μοριακή διάχυση».
- Στα υγρά το φαινόμενο είναι πολύ πιο έντονο.



# Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

- Στα στερεά, η αγωγή εκτελείται μέσω δύο μηχανισμών:
  - στους μονωτές, μέσω κυμάτων διαμέσου της μάζας του στερεού, τα οποία προκαλούνται από την παλινδρομική κίνηση των ατόμων
  - στους αγωγούς, μέσω της ελεύθερης κίνησης των ηλεκτρονίων, σε συνδυασμών και με τα κύματα λόγω παλινδρόμησης των ατόμων.

# Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

- Στην καθημερινότητά μας, πολλά φαινόμενα σχετίζονται με τη μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής, όπως:
  - Θερμικές απώλειες ενός θερμαινόμενου σπιτιού διαμέσου του κτηριακού κελύφους.
  - Μεταφορά θερμότητας από μία ηλεκτρική εστία στο σκεύος μαγειρικής.





# Μεταφορά θερμότητας με αγωγή

Υλικό	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Υλικό	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)	Υλικό	Θερμική Αγωγιμότητα (W/mK)
Χώμα	2,00	Υαλότουβλα	1,40	Υαλοβάμβακας	0,033 – 0,041
Άργιλος	1,50	Συμπαγής ξυλεία	0,12 – 0,21	Πετροβάμβακας	0,033 – 0,041
Ασβεστοκονίαμα	0,87	Υαλοπίνακας	1,00	Φελός	0,042 – 0,046
Τσιμεντοκονίαμα	1,40	Πολυουρεθάνη	0,25	Φύκια θαλάσσης	0,045 – 0,050
Θερμομονωτικό επίχρισμα	0,08	Πολυκαρβονικά φύλλα	0,50	Διογκωμένη πολυστερίνη	0,033 – 0,038
Άοπλο σκυρόδεμα	1,15	Τσιμεντόλιθοι	1,30	Ξηρός αέρας (20 °C)	0,025
Οπλισμένο σκυρόδεμα	1,51	Ανοξείδωτος χάλυβας	17,00	Διοξείδιο του άνθρακα	0,014
Γυψοσανίδες	0,21	Σίδηρος	50,00	Νερό στους 10 °C	0,60
Τσιμεντοσανίδες	0,28 – 0,32	Χαλκός	380,00	Νερό στους 40 °C	0,63
Ασβεστόλιθος	1,40 – 2,30	Αλουμίνιο	160,00		

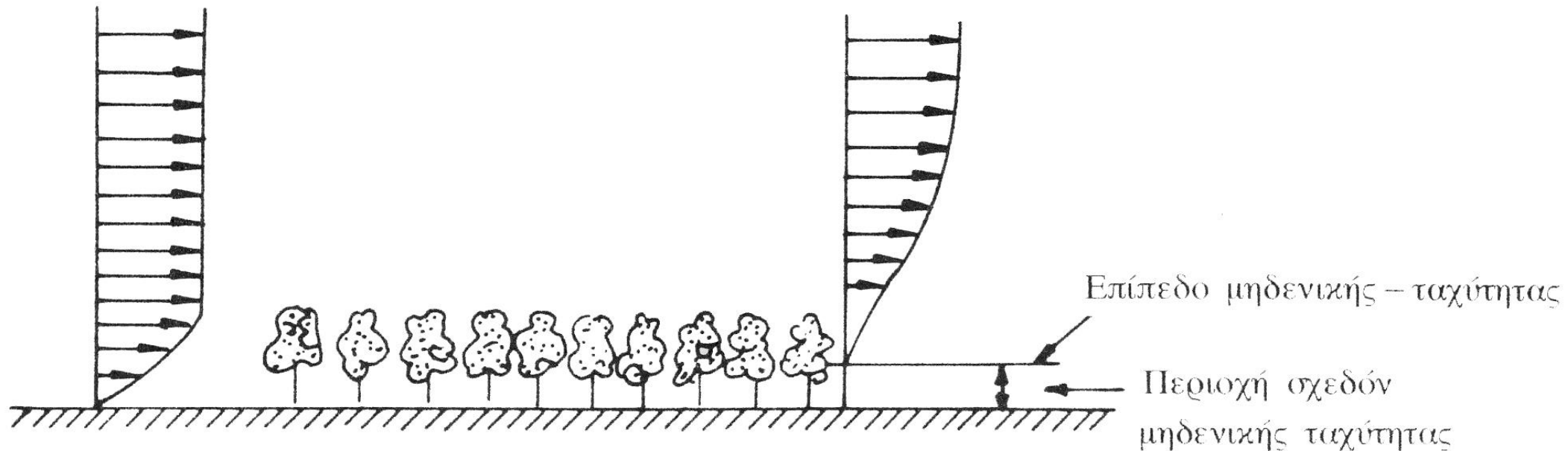


# Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

- Η θερμική συναγωγή αφορά στη μεταφορά θερμότητας μέσω κινούμενων ρευστών.
- Στη θερμική συναγωγή συνυπάρχουν δύο μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας:
  - μοριακή διάχυση, όπως και στη θερμική αγωγή
  - μακροσκοπική κίνηση ρευστών, κατά την οποία τα θεμελιώδη σωματίδια του ρευστού μεταφέρουν την ενέργεια και τη μάζα τους που σχετίζονται με την τυχαία κίνησή τους, καθώς και την εσωτερική περιστροφή και ταλάντωσή τους.

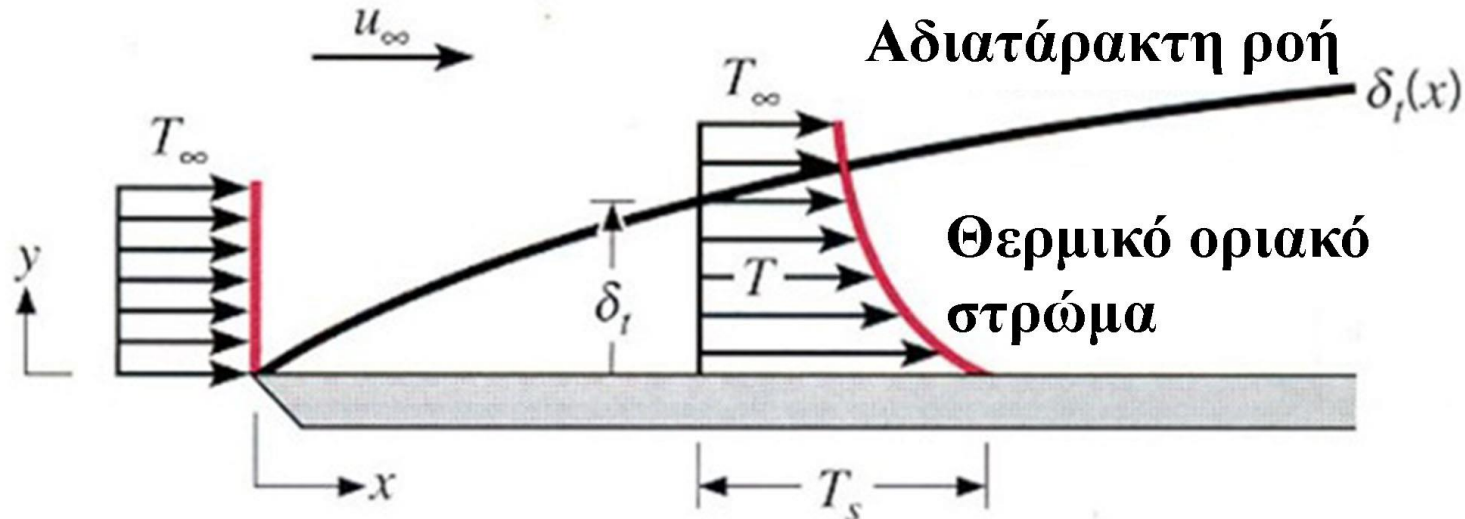
# Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

- Το κύριο πεδίο εφαρμογής της θερμικής συναγωγής είναι η ροή ρευστού πάνω από επιφάνεια στερεού ή η ροή αέριου πάνω από επιφάνεια στερεού ή υγρού.
- Από τη Μηχανική Ρευστών γνωρίζουμε ότι κατά τη ροή ρευστού πάνω από στερεό ή αέριου πάνω από στερεό ή υγρό αναπτύσσεται το λεγόμενο οριακό στρώμα, ως αποτέλεσμα των δυνάμεων συνεκτικότητας στη ροή.



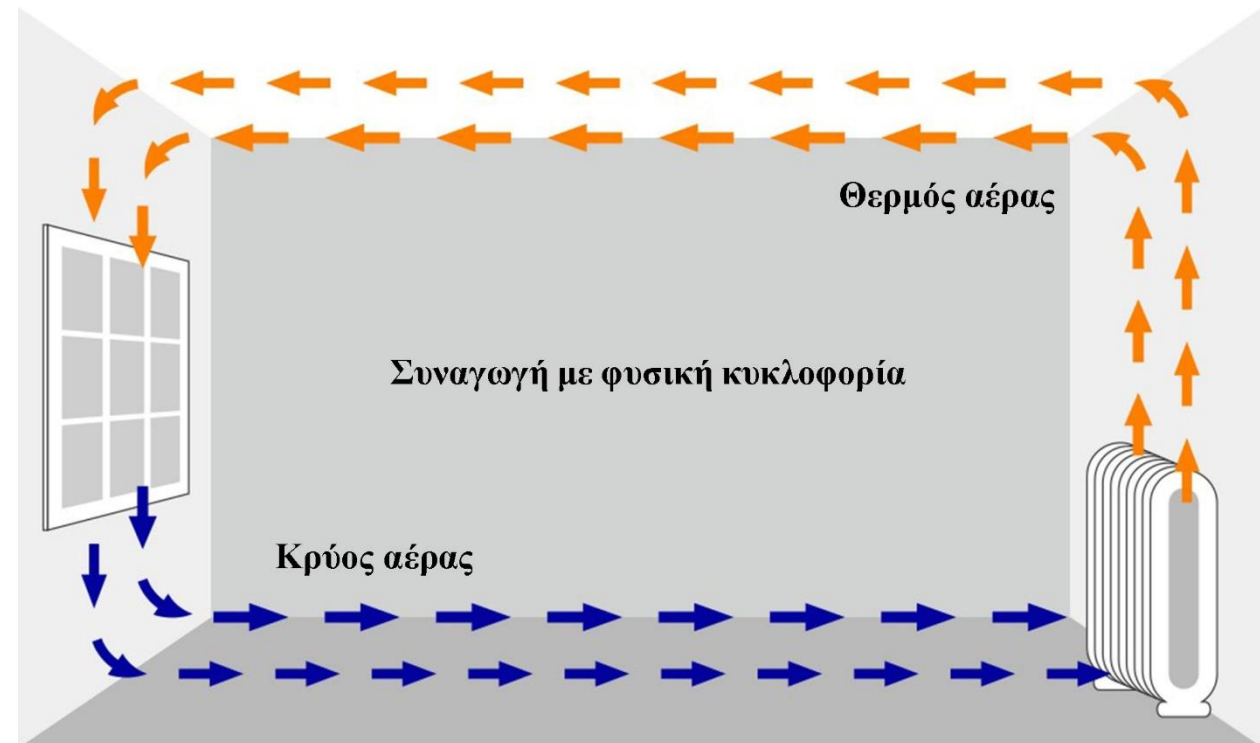
# Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή

- Σε περίπτωση θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στο στερεό και στο ρευστό, αναπτύσσεται παράλληλα και το **θερμικό οριακό στρώμα**, του οποίου το πάχος μπορεί να είναι μεγαλύτερο, μικρότερο ή ίσο με αυτό του οριακού στρώματος της ροής.
- Μέσα στο οριακό στρώμα η θερμοκρασία μεταβάλλεται σταδιακά από τη θερμοκρασία  $T_s$  του στερεού στη θερμοκρασία της ροής  $T_0$ .



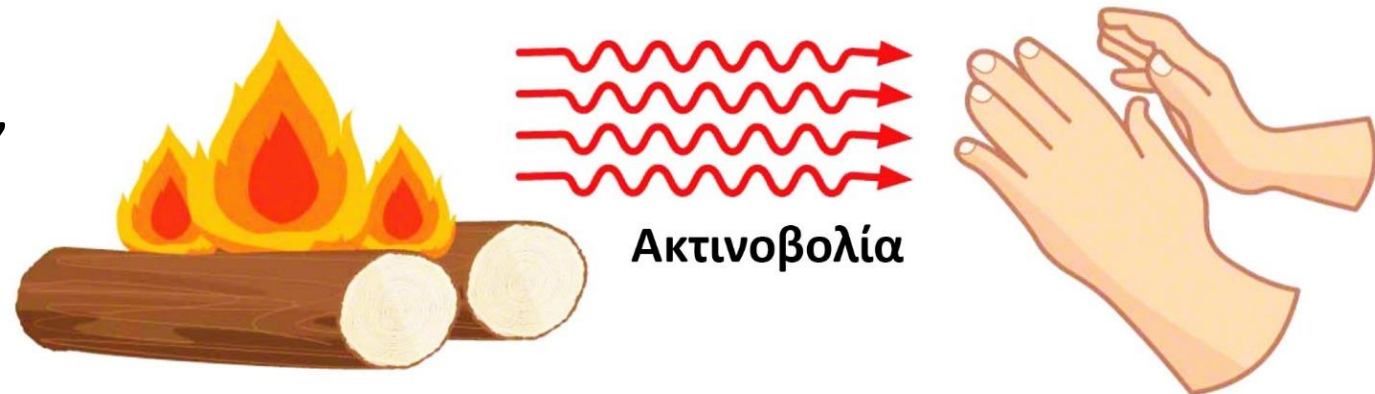
# Συναγωγή με φυσική ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία

- Συναγωγή με φυσική κυκλοφορία: χρήση καλοριφέρ για τη θέρμανση εσωτερικών χώρων.
- Συναγωγή με εξαναγκασμένη κυκλοφορία: σεσουάρ, κλιματιστικό.



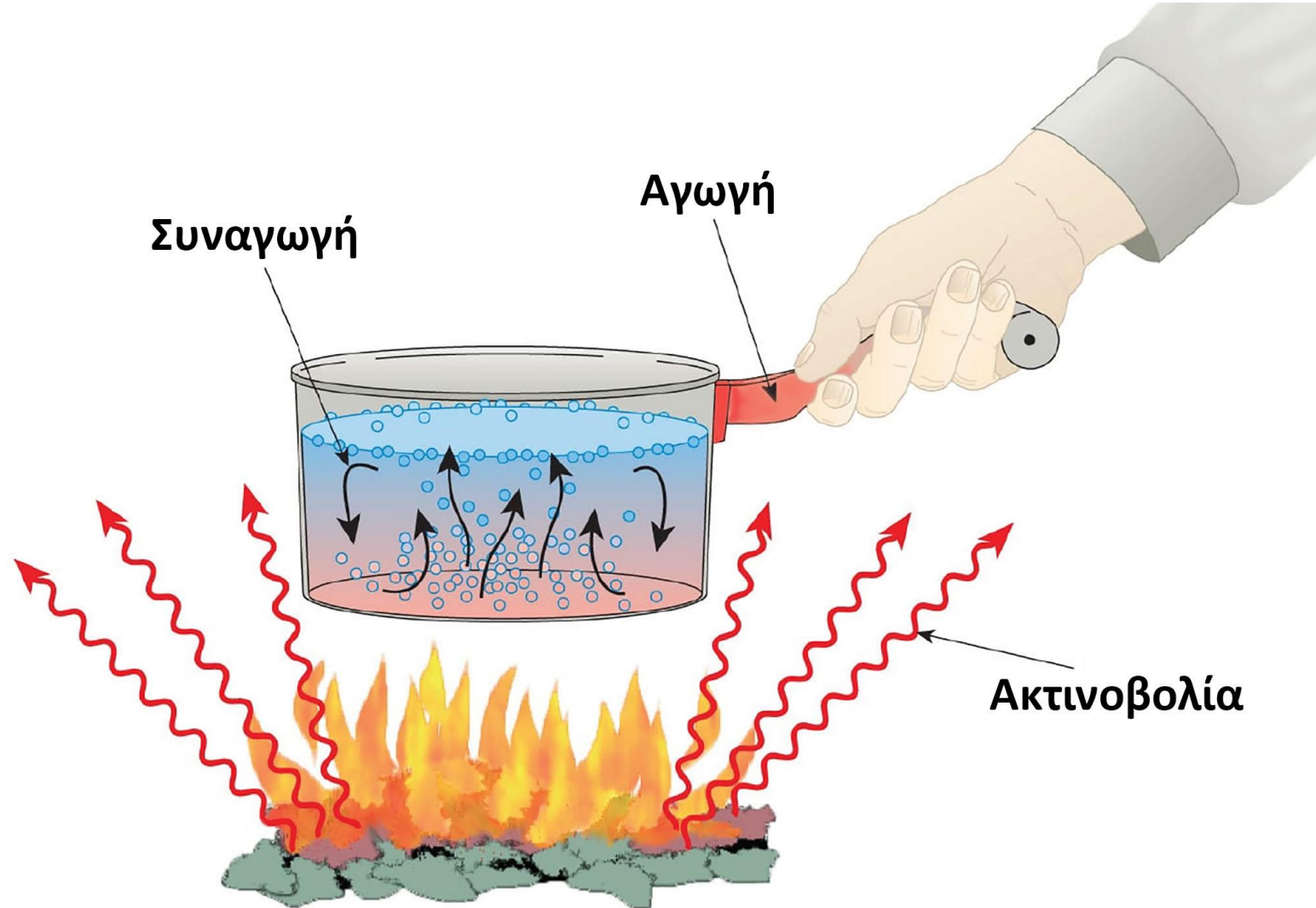
# Μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία

- Κάθε σώμα (στερεό, υγρό ή αέριο), με θερμοκρασία μεγαλύτερη των 0 K, εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.
- Η ακτινοβολία (με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και φωτονίων) παράγεται από αλλαγές στο ενεργειακό επίπεδο των ηλεκτρονίων στα άτομα του σώματος.
- Σε αντίθεση με τους δύο άλλους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη κάποιας μάζας αλλά μπορεί να λάβει χώρα και παρουσία κενού (πρακτικά τότε η απόδοση μεταφοράς μέσω ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη).
- Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός στερεού σώματος παράγεται στο εσωτερικό του σώματος.
- Πέραν από την εκπομπή ακτινοβολίας, ένα σώμα μπορεί να δέχεται επίσης πρόσπτωση ακτινοβολίας, η οποία εκπέμπεται από άλλα σώματα.





# Μεταφορά θερμότητας: αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία



## Βασικές έννοιες – ορισμοί: αδιαβατική διεργασία

- Μεταξύ όλων των σωμάτων ή συστημάτων στη φύση υπάρχει ροή θερμότητας.
- Με τη χρήση μονωτικών υλικών η μεταφορά θερμότητας από ένα ζεστό σε ένα ψυχρό σύστημα μπορεί να εξακολουθεί να υπάρχει, όμως με σημαντικά μειωμένους ρυθμούς. Για πρακτικούς λόγους, κάποιες φορές μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.
- Στη Θερμοδυναμική, μία τέτοια κατάσταση, κατά την οποία δεν υφίσταται καμία μεταφορά θερμότητας προς ή από ένα θερμοδυναμικό σύστημα, ονομάζεται αδιαβατική διεργασία.
- Ένα θερμοδυναμικό σύστημα μονωμένο από το περιβάλλον του ονομάζεται αδιαβατικό σύστημα.

## Παράδειγμα 7: Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

Νερό μάζας 2 kg και θερμοκρασίας 18 °C χύνεται μέσα σε ένα καλά μονωμένο δοχείο με θερμοκρασία τοιχωμάτων στους 15 °C. Οι θερμοκρασίες του νερού και του δοχείου ισορρόπησαν στους 17,4 °C. Να προσδιοριστεί το ποσό θερμότητας που μεταφέρθηκε και η συμβατική φορά της, όταν ως σύστημα θεωρούμε:

α. το δοχείο με τη μόνωση

β. το νερό

γ. το δοχείο με τη μόνωση και το νερό.

Δίνεται η ειδική θερμότητα του νερού ίση με 4,18 kJ/kgK.

Λύση:

Μεταφορά θερμότητας υπάρχει προφανώς από το νερό (υψηλότερη θερμοκρασία) προς τα τοιχώματα του δοχείου (χαμηλότερη), καθώς τούτα έρχονται σε επαφή. Η μεταφερόμενη θερμότητα σε κάθε περίπτωση ισούται με:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_v - T_\delta) \Rightarrow Q = 2 \text{ kg} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (18 - 17,4) \text{ K} \Leftrightarrow Q = 5,016 \text{ kJ}$$



## Παράδειγμα 7: Έργο και θερμότητα στη Θερμοδυναμική

- α. Στην πρώτη περίπτωση το θερμοδυναμικό σύστημα θεωρείται ότι είναι το δοχείο, χωρίς το νερό. Η θερμότητα μεταφέρεται από το νερό, δηλαδή το περιβάλλον, προς το σύστημα. Συνεπώς θεωρείται θετική.
- β. Στη δεύτερη περίπτωση συμβαίνει το αντίθετο. Το θερμοδυναμικό σύστημα είναι το νερό, το οποίο αποβάλλει θερμότητα προς το δοχείο, που είναι το περιβάλλον. Συνεπώς η μεταφερόμενη θερμότητα θεωρείται αρνητική.
- γ. Στην περίπτωση που το δοχείο και το νερό θεωρείται ότι συναποτελούν το θερμοδυναμικό σύστημα, η θερμότητα συναλλάσσεται εντός του συστήματος, χωρίς να διέρχεται από τα όρια τούτου. Συνεπώς, δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας προς ή από το θερμοδυναμικό σύστημα.



Σας ευχαριστώ πολύ  
για την προσοχή σας

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης