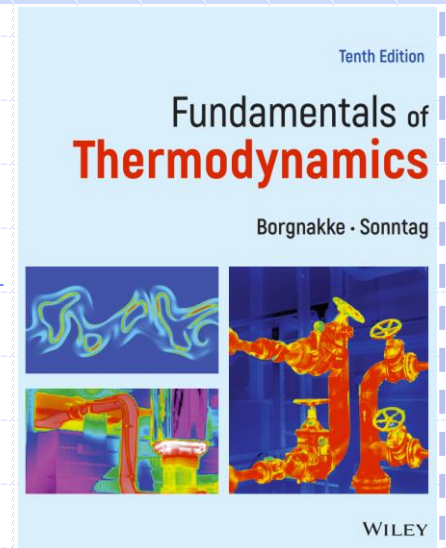


Fundamentals of Thermodynamics
Borgnakke – Sonntag
10^η έκδοση
Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, 2023



Κεφάλαιο 3ο
Εξίσωση ενέργειας και 1^{ος}
Θερμοδυναμικός νόμος

Επιμέλεια παρουσίασης
καθηγήτης Γ. Σκόδρας

Περιεχόμενα...

- ✓ **Εισαγωγή**
- ✓ **Η εξίσωση της ενέργειας**
- ✓ **Ο πρώτος νόμος (αξίωμα) της θερμοδυναμικής**
- ✓ **Ο ορισμός του έργου**
- ✓ **Έργο που παράγεται ή καταναλώνεται στα κινούμενα όρια ενός απλού συμπιεστού συστήματος**
- ✓ **Ορισμός της θερμότητας**
- ✓ **Τρόποι μεταφοράς θερμότητας**
- ✓ **Εσωτερική ενέργεια – Μια θερμοδυναμική ιδιότητα**
- ✓ **Ανάλυση προβλημάτων και τεχνική επίλυσης**

Περιεχόμενα...

- ✓ Η θερμοδυναμική ιδιότητα της ενθαλπίας
- ✓ Ειδική θερμότητα σταθερού όγκου και σταθερής πίεσης
- ✓ Η εσωτερική ενέργεια, η ενθαλπία και η ειδική θερμότητα των ιδανικών αερίων
- ✓ Ανομοιογενής κατανομή καταστάσεων και μαζών
- ✓ Η μεταβατική διεργασία
- ✓ Γενικά συστήματα που περιλαμβάνουν έργο
- ✓ Εφαρμογές μηχανικής
- ✓ Βασικές έννοιες και σχέσεις

Εισαγωγή...

- ❑ Τα **Αξιώματα** ή **Θερμοδυναμικοί Νόμοι** είναι γενικοί περιορισμοί που θέτει η φύση στους μετασχηματισμούς της ενέργειας
- ❑ Τα Αξιώματα είναι **πρωταρχικά** και δεν μπορούν να προκύψουν από κάτι πιο θεμελιώδες, και η διατύπωση τους απαιτεί την χρήση εννοιών που είναι επίσης πρωταρχικές, και δεν έχουν ακριβείς ορισμούς
- ❑ **Θερμοδυναμικά αξιώματα**
Περιγράφουν τις συσχετίσεις ενέργειας και ύλης και πως συνδέονται με τις ιδιότητες όπως η θερμοκρασία και η εντροπία
 - ✓ **Μηδενικό** (θερμική ισορροπία)
 - ✓ **Πρώτο** (διατήρηση ενέργειας, εσωτερική ενέργεια)
 - ✓ **Δεύτερο** (υποβάθμιση της ενέργειας, εντροπία)
 - ✓ **Τρίτο** (απόλυτο μηδέν)
 - ✓ **Τέταρτο ;** (αντίστροφες συσχετίσεις Onsager)
 - ✓ **Πέμπτο ;** (αρνητικές απόλυτες θερμοκρασίες ή αρνητική εντροπία)
 - ✓ **Έκτο ;** (όλες οι φυσικές διεργασίες είναι μη αντιστρεπτές)
 - ✓ **..... ;**

Εισαγωγή...

- ❑ Ο πρώτος νόμος (αξίωμα) της Θερμοδυναμικής και η, εξ αυτού απορρέουσα, εξίσωση της ενέργειας είναι εναλλακτικές εκφράσεις του ίδιου θεμελιώδους νόμου της φυσικής που λέει ότι, η μάζα, η ορμή και η ενέργεια διατηρούνται
- ❑ Η εξίσωση της ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να συσχετιστεί η μεταβολή κατάστασης μέσα σε έναν όγκο ελέγχου με την ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρεται σε μια διεργασία ως έργο ή θερμότητα
- ❑ Σε όλες τις περιπτώσεις, η εξίσωση της ενέργειας συσχετίζει τις διάφορες μορφές ενέργειας της μάζας ελέγχου με τις μεταφορές ενέργειας μέσω θερμότητας ή έργου

Η εξίσωση της ενέργειας...

η μάζα, η ορμή και η ενέργεια διατηρούνται

- Η μάζα, η ορμή και η ενέργεια δεν καταστρέφονται, ούτε δημιουργούνται, αλλάζουν μορφή αλλά η συνολική ποσότητα διατηρείται

Συνολική ενέργεια: $E = me = U + KE + PE = m(u + ke + pe)$
 $= m(u + \frac{1}{2}V^2 + gZ)$

- Σε δεδομένο όγκο ελέγχου, όταν δεν υπάρχει μεταφορά μάζας, οποιαδήποτε μεταβολή ενέργειας οφείλεται σε εισροή ή εκροή θερμότητας ή/και έργου (μεταφορά θερμότητας ή/και έργου)

Εξίσωση ενέργειας

$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{E}_{cv} = \dot{Q} - \dot{W} = +in - out$

όγκος ελέγχου

Συσσώρευση ενέργειας στον όγκο ελέγχου

Η θερμότητα που μεταφέρεται προς όγκο ελέγχου έχει θετικό πρόσημο, ενώ το έργο έχει θετικό πρόσημο όταν αποδίδεται από τον όγκο ελέγχου



Η εξίσωση της ενέργειας...

- Ολοκληρώνοντας από την αρχή (t_1) μέχρι το τέλος (t_2) μιας διεργασίας προκύπτει:

$$dE_{CV} = dU + d(KE) + d(PE) = \delta Q - \delta W \Rightarrow \int E_{CV} = E(t_2) + E(t_1) = E_2 - E_1$$

$$\Rightarrow \int [\dot{Q} - \dot{W}] dt = \int_{path} dQ - \int_{path} \delta W = {}_1 Q_2 - {}_1 W_2$$

$$\Rightarrow \mathbf{E_2 - E_1 = {}_1 Q_2 - {}_1 W_2}$$

που συνοδεύεται από:

$$E_2 - E_1 = U_2 - U_1 + \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2) + mg(Z_2 - Z_1)$$

- Οι ανωτέρω μορφές της εξίσωσης ενέργειας περιγράφονται ως:

$$\text{συσσώρευση} = +\text{εισροές} - \text{εκροές}$$

Η εξίσωση της ενέργειας...

□ Εξίσωση της ενέργειας

$$\dot{E}_{CV} = \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = \dot{Q}_A + \dot{Q}_C - \dot{W}_B$$

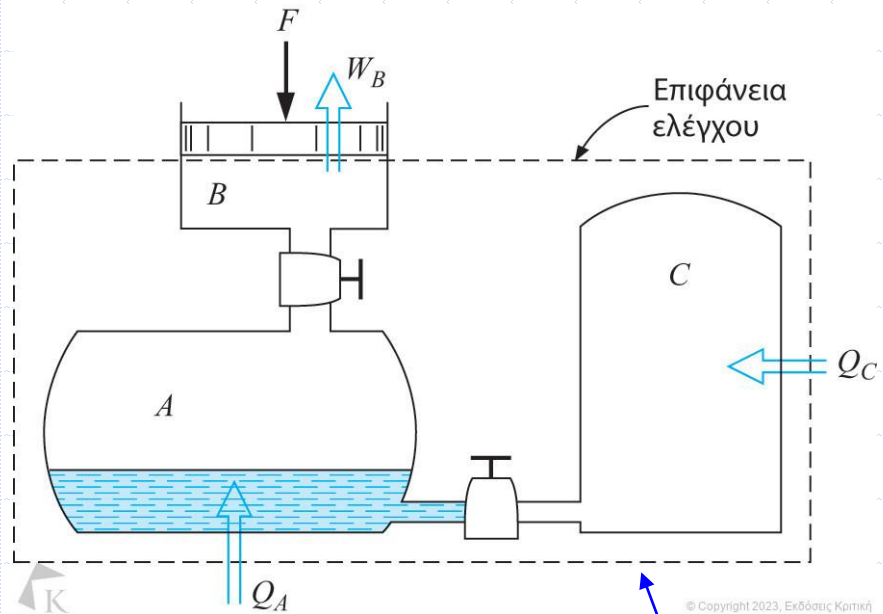
□ Αρχή διατήρησης της μάζας (ρυθμός μεταβολής)

$$\dot{m}_{CV} = \dot{m}_A + \dot{m}_B + \dot{m}_C = 0$$

από τις οποίες προκύπτουν:

$$m_2 - m_1 = (m_{2A} + m_{2B} + m_{2C}) - (m_{1A} + m_{1B} + m_{1C}) = 0$$

$$(E_{2A} + E_{2B} + E_{2C}) - (E_{1A} + E_{1B} + E_{1C}) = {}_1 Q_{2A} + {}_1 Q_{2C} - {}_1 W_{2B}$$



Αν και η συνολική μάζα δεν μεταβάλλεται, η κατανομή μεταξύ των οικοσυστημάτων είναι πιθανόν να μεταβάλλεται

Η εξίσωση της ενέργειας...



Παράδειγμα 3.1

Ο πρώτος νόμος της Θερμοδυναμικής...

- Εφαρμόζοντας την εξίσωση ενέργειας σε μια κυκλική διεργασία, προκύπτει:

Καθώς η ουσία επιστρέφει στην αρχική κατάσταση, δεν υπάρχει καμιά καθαρή μεταβολή ενέργειας

$$\oint dE = 0 = \oint \delta Q - \oint \delta W$$

Επικαμπύλιο ολοκλήρωμα μεταφοράς θερμότητας

Επικαμπύλιο ολοκλήρωμα μεταφοράς έργου

Η ενέργεια δεν καταστρέφεται, ούτε δημιουργείται, αλλάζει μορφή αλλά η συνολική ποσότητα διατηρείται

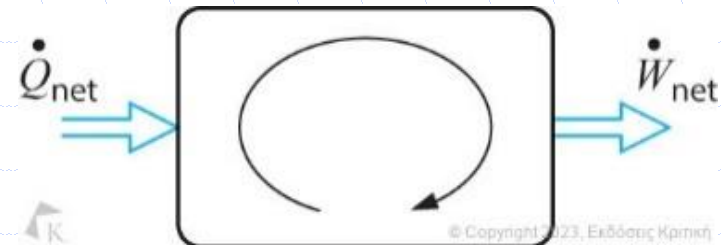
- Οπότε προκύπτει: $\oint \delta Q = \oint \delta W$
- Αρχική μαθηματική διατύπωση του πρώτου νόμου της Θερμοδυναμικής

- Πλέον χρησιμοποιείται η εξίσωση της ενέργειας σε όγκο ελέγχου

- Εάν θεωρηθούν οι ρυθμοί, προκύπτει η σχέση:

$$\text{Κύκλος: } \dot{Q}_{net,in} = \dot{W}_{net,in}$$

- που αρχικά διατυπώθηκε για τις θερμικές μηχανές, όπου στόχος είναι η απόληψη κάποιου έργου από ένα ποσό θερμότητας



Ο ορισμός του έργου...

- Σύμφωνα με τον κλασσικό ορισμό, έργο παράγεται όταν μια δύναμη F μετατοπίζει το σημείο εφαρμογής της κατά ένα διάστημα x
- Για διαφορική μετατόπιση dx , είναι:

$$\delta W = F dx$$

- και ολοκληρώνοντας (από την κατάσταση 1 μέχρι την κατάσταση 2) προκύπτει το πεπερασμένο έργο:

$${}_1W_2 = \int_1^2 F dx$$

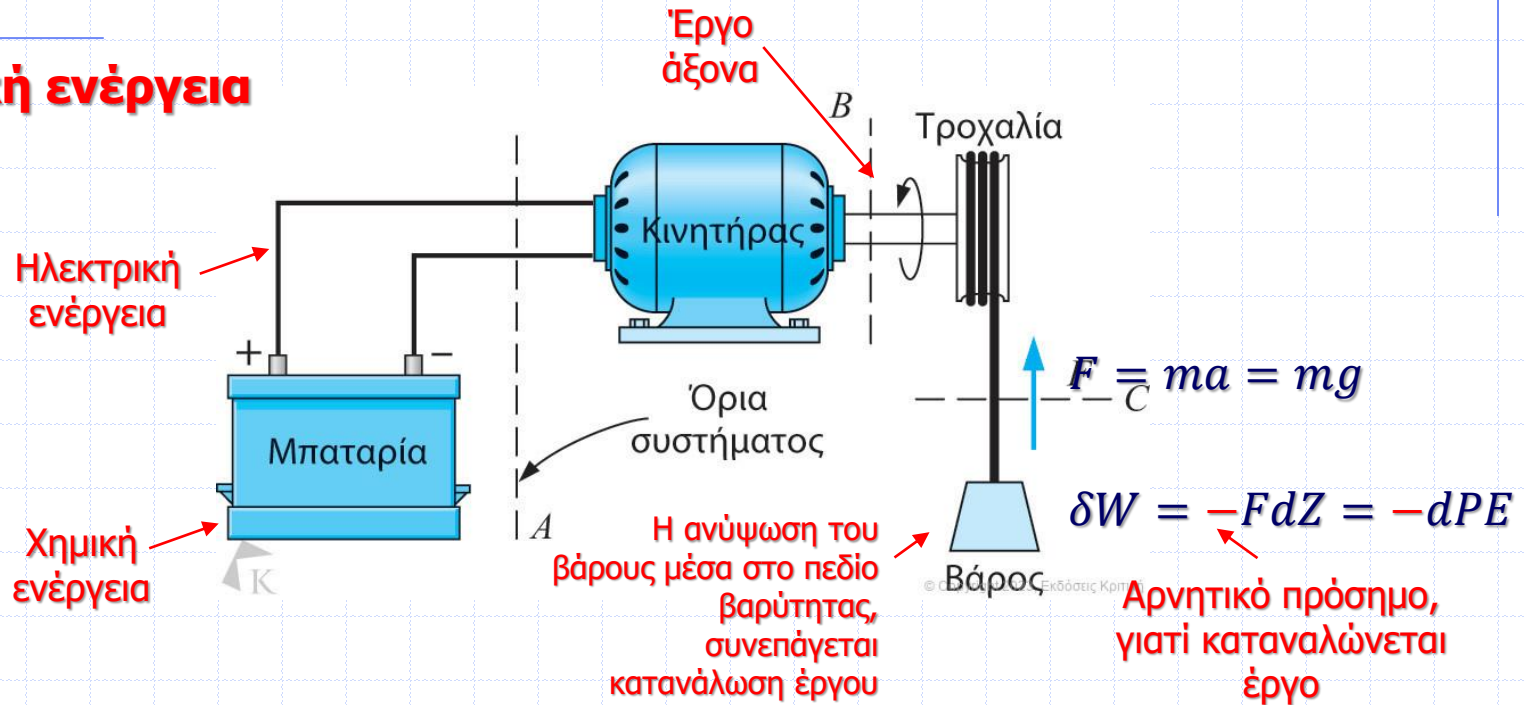
- Το έργο είναι ενέργεια που μεταφέρεται και συνεπώς, διαπερνά τα όρια του όγκου ελέγχου
- Η **ισχύς** είναι ο ρυθμός παραγωγής έργου και συμβολίζεται με \dot{W} :

$$\dot{W} = \frac{\delta W}{dt}$$

- Το έργο ανά μονάδα μάζας, ονομάζεται ειδικό έργο, και είναι: $w = \frac{W}{m}$

Ο ορισμός του έργου...

Δυναμική ενέργεια



οπότε προκύπτει:

$$dPE = FdZ = mgdZ \Rightarrow \int_{PE_1}^{PE_2} dPE = m \int_{Z_1}^{Z_2} gdZ \Rightarrow PE_2 - PE_1 = mg(Z_2 - Z_1)$$

Όταν το g δεν εξαρτάται από το Z

Ο ορισμός του έργου...

Κινητική ενέργεια

- Όταν μια μάζα, στην οποία ασκείται μια δύναμη, ξεκινώντας από την ηρεμία, κινείται (χωρίς να συμβαίνει μεταφορά θερμότητας ή μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας) τότε ισχύουν:

Με V συμβολίζεται η ταχύτητα

$$\left. \begin{aligned} \delta W &= -F dx = -dKE \\ F &= ma = m \frac{dV}{dt} = m \frac{dx}{dt} \frac{dV}{dx} = mV \frac{dV}{dx} \end{aligned} \right\} \Rightarrow dKE = F dx = mV dV \Rightarrow$$

- και ολοκληρώνοντας, προκύπτει:

$$\int_{KE=0}^{KE} dKE = \int_{V=0}^V mV dV \Rightarrow KE = \frac{1}{2} mV^2$$

Ο ορισμός του έργου...

Έργο άξονα

- Έργο που σχετίζεται με περιστρεφόμενο άξονα, επίσης, διαπερνά τα όρια του συστήματος (όγκου ελέγχου), οπότε είναι:

$$\delta W = F dx = Fr d\theta = T d\theta$$

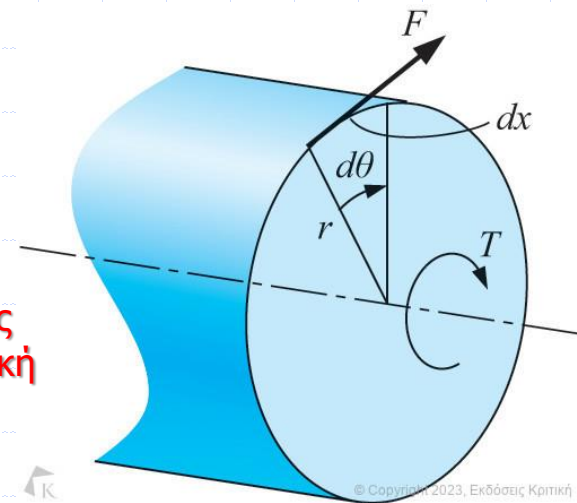
Ροπή
στρέψης
($T = Fr$)

οπότε προκύπτει:

$$\dot{W} = \frac{\delta W}{dt} = F \frac{dx}{dt} = Fr \frac{d\theta}{dt} = T\omega$$

Δύναμη επί
τον ρυθμό
μετατόπισης

Ροπή στρέψης
επί την γωνιακή
ταχύτητα



$$\omega = \text{ακτινία ανα δευτερολεπτο} = 2\pi \text{ rev} = 2\pi \left(\frac{\text{rpm}}{60}\right)$$

Ο ορισμός του έργου...

Μονάδες μέτρησης έργου

Η μονάδα μέτρησης του έργου στο SI καλείται joule (J), και είναι το γινόμενο μιας δύναμης, μοναδιαίου μέτρου (1 N), το σημείο εφαρμογής της οποίας μετατοπίζεται κατά μια μοναδιαία απόσταση (1 m):

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$$

Στο αγγλικό σύστημα μονάδων: $1 \text{ lbf} = 32,174 \text{ lbm ft}^2 \text{ s}^{-2}$

Ιπποδύναμη: $1 \text{ hp} = 550 \text{ ft-lbf/s} = 0,7457 \text{ kW}$

$1 \text{ hp} = 0,7355 \text{ kW}$ (μετρικός hp)

Η μονάδα μέτρησης της ισχύος στο SI καλείται watt (W), και είναι το γινόμενο μιας δύναμης, μοναδιαίου μέτρου (1 N), και είναι:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

Το έργο ανά μονάδα μάζας ονομάζεται ειδικό έργο, συμβολίζεται με w και ορίζεται ως:

$$w = \frac{W}{m}$$

Ο ορισμός του έργου...

Παραδείγματα 3.2 – 3.3

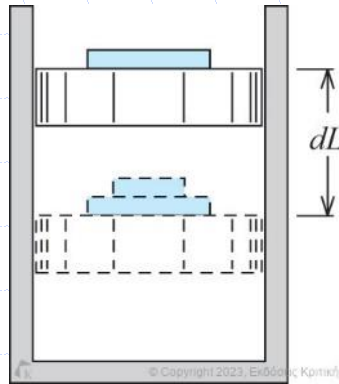
Έργο που παράγεται ή καταναλώνεται στα κινούμενα όρια ενός απλού συμπιεστού συστήματος...

Πίεση αερίου Επιφάνεια εμβόλου

$$\delta W = PA dL = PdV \Rightarrow {}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 P dV$$

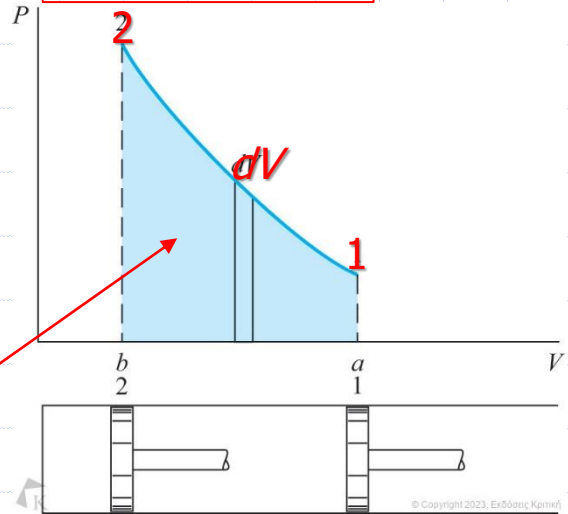
Το δ συμβολίζει το μη τέλειο διαφορικό

Παραδοχή: Η κίνηση του εμβόλου γίνεται με μικρά βήματα, οπότε είναι διεργασία **οιονεί ισορροπίας**

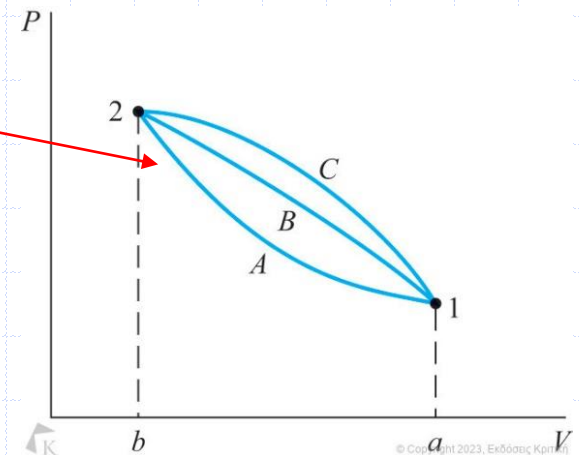


Το έργο που καταναλώνεται για την κίνηση του εμβόλου από την θέση 1 στην θέση 2

Είναι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της διεργασίας



- Έργο παράγεται με μετακίνηση των οριακών επιφανειών, σε συνθήκες οιονεί ισορροπίας
- Για τον υπολογισμό του έργου ${}_1W_2$ απαιτείται γνώση της διαδρομής, καθώς η μετάβαση από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2 μπορεί να γίνει από πολλές διαδρομές
- Το παραγόμενο έργο εξαρτάται όχι μόνο από τις αρχικές και τελικές συνθήκες, αλλά και την διαδρομή που ακολουθείται
- Το έργο καλείται **συνάρτηση μετάβασης** και το δW είναι **μη τέλειο διαφορικό (ατελές)**



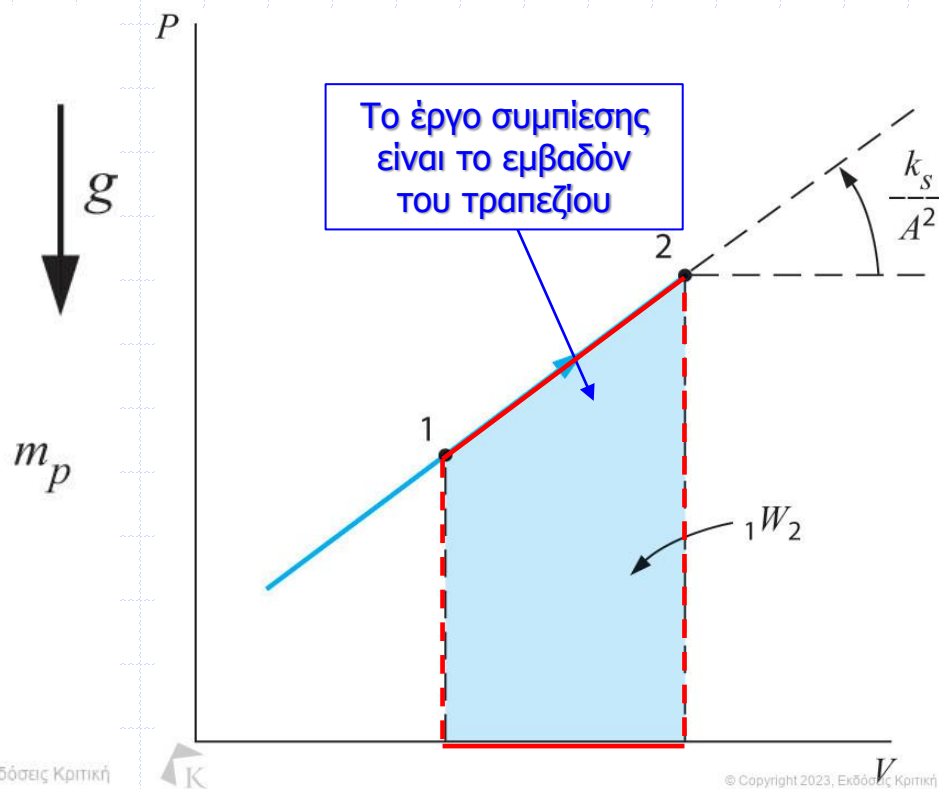
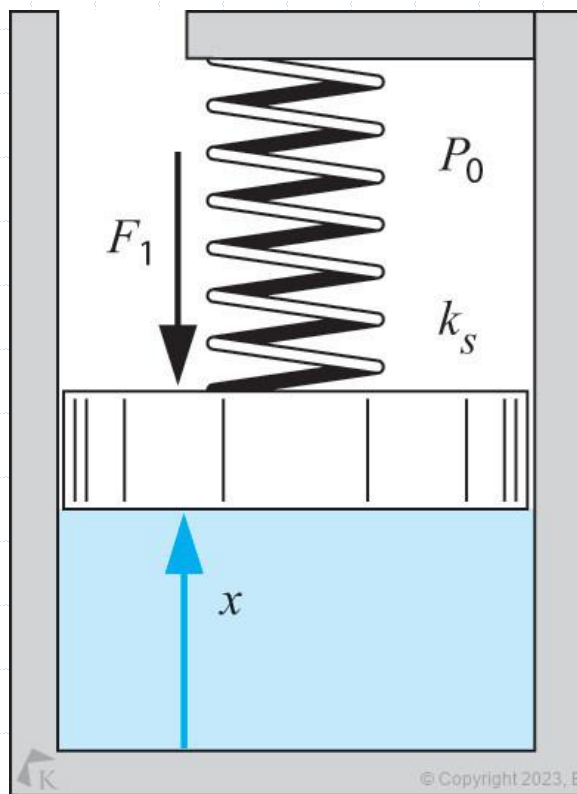
Έργο που παράγεται ή καταναλώνεται στα κινούμενα όρια ενός απλού συμπιεστού συστήματος...

- Έργο μετακίνησης οριακών επιφανειών μπορεί να παραχθεί και σε μια διεργασία μη ισορροπίας, οπότε, η συνολική δύναμη PA που ασκείται στο έμβολο από το αέριο στο εσωτερικό του κυλίνδρου, δεν ισούται με την εξωτερική δύναμη F_{ext}
- Στην περίπτωση αυτή, το έργο μπορεί να υπολογιστεί ως προς την F_{ext} ή, διαιρώντας μια ισοδύναμη εξωτερική πίεση P_{ext} με το εμβαδό, οπότε, το έργο που παράγεται στα κινούμενα όρια είναι:

$$\delta W = F_{ext} dL = P_{ext} dV$$

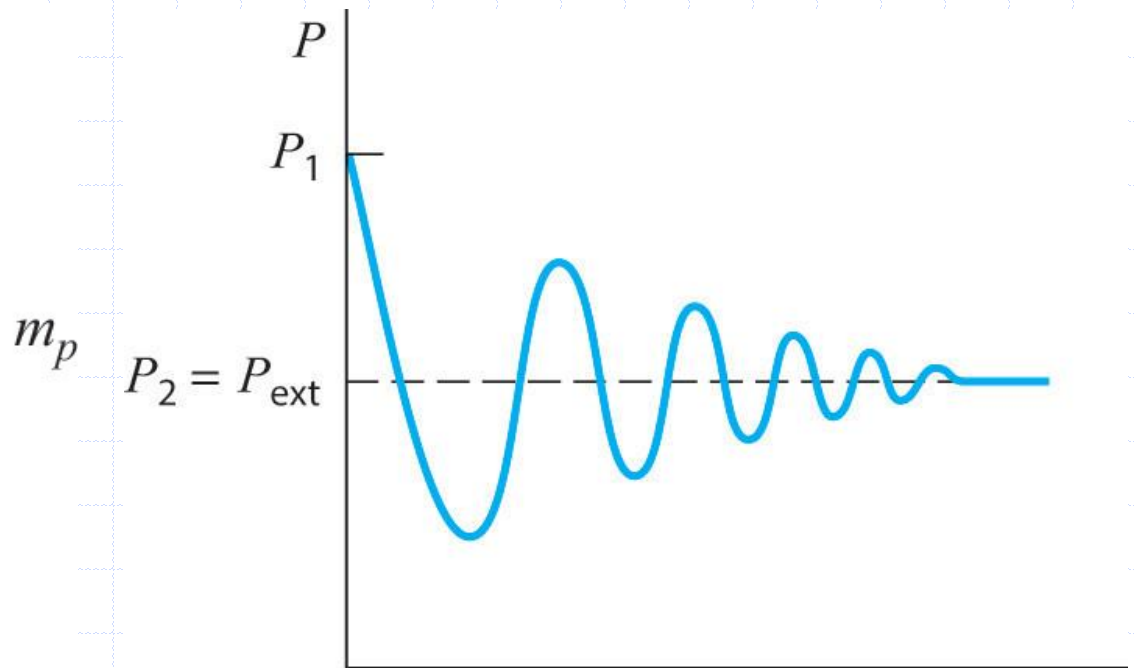
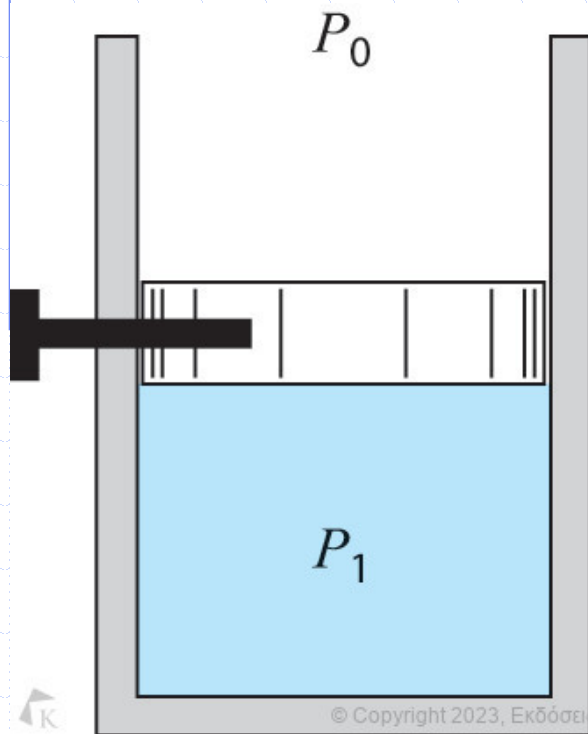
Έργο που παράγεται ή καταναλώνεται στα κινούμενα όρια ενός απλού συμπίεστου συστήματος...

Παράδειγμα 3.4



Έργο που παράγεται ή καταναλώνεται στα κινούμενα όρια ενός απλού συμπιεστού συστήματος...

Παράδειγμα 3.5



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική Χρόνος

Έργο που παράγεται ή καταναλώνεται στα κινούμενα όρια ενός απλού συμπιεστού συστήματος...

Πολυτροπική διεργασία

$$P V^n = \text{σταθερά}$$

$$P V^n = \text{σταθερά} = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$$

$$P = \frac{\text{σταθερά}}{V^n} = \frac{P_1 V_1^n}{V^n} = \frac{P_2 V_2^n}{V^n}$$

$$\int_1^2 P dV = \text{σταθερά} \int_1^2 \frac{dV}{V^n} = \text{σταθερά} \left(\frac{V^{-n+1}}{-n+1} \right) \Big|_1^2$$

$$\int_1^2 P dV = \frac{\text{σταθερά}}{1-n} (V_2^{1-n} - V_1^{1-n}) = \frac{P_2 V_2^n V_2^{1-n} - P_1 V_1^n V_1^{1-n}}{1-n} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n}$$

ισχύει $\forall n \neq 1$

όταν $n=1$ $P V = \text{σταθερά} = P_1 V_1 = P_2 V_2$

και $\int_1^2 P dV = P_1 V_1 \int_1^2 \frac{dV}{V} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$

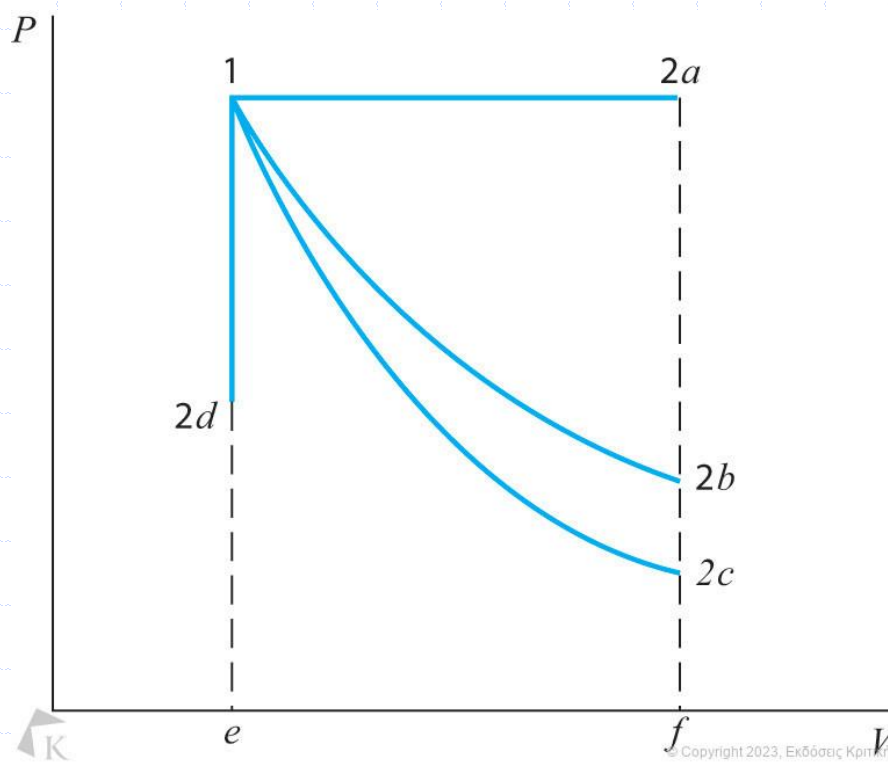
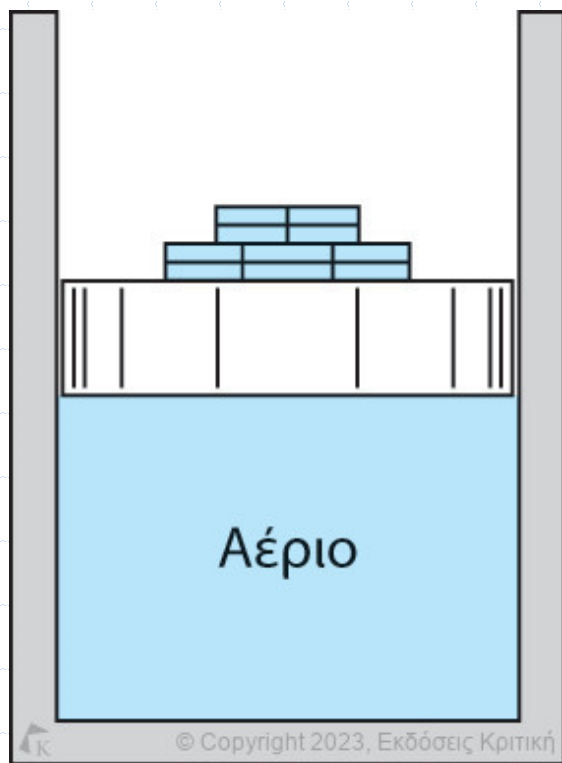
Το n είναι ο πολυτροπικός εκθέτης, χαρακτηριστικός της διεργασίας, και κυμαίνεται από $-\infty$ ως $+\infty$

Όταν $n = 0$ ισοβαρής διεργασία

Όταν $n \rightarrow \pm\infty$ ισόογκη (ισόχωρη) διεργασία

Έργο που παράγεται ή καταναλώνεται στα κινούμενα όρια ενός απλού συμπιεστού συστήματος...

Παράδειγμα 3.6



Ορισμός της θερμότητας...

- ❑ Η **θερμότητα** είναι η μορφή ενέργειας που μεταφέρεται, μέσω των ορίων, από ένα σύστημα που βρίσκεται σε μια δεδομένη θερμοκρασία σε κάποιο άλλο σύστημα (ή στο περιβάλλον) που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία
- ❑ Μεταφέρεται (ρέει) από το σύστημα που βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία στο σύστημα που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία, αποκλειστικά λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας (κινούσα δύναμη) μεταξύ των δύο συστημάτων
- ❑ Είναι ένα μεταβατικό φαινόμενο που μεταφέρει ενέργεια προς ή από ένα σύστημα, και γίνεται αντιληπτή όταν διασχίζει τα όρια του συστήματος, και είναι θετική όταν εισέρχεται στο σύστημα και αρνητική όταν εξέρχεται
- ❑ Όπως και το έργο, είναι μια συνάρτηση που εξαρτάται από την διαδρομή (μη τέλειο διαφορικό), οπότε συμβολίζεται ως **δQ** και δίνεται από το ολοκλήρωμα:

$$\int_1^2 \delta Q = {}_1Q_2$$

Η θερμότητα που μεταφέρεται σε μια δεδομένη διεργασία μεταξύ των καταστάσεων 1 και 2

- ❑ Η θερμότητα ανά μονάδα μάζας ονομάζεται ειδική θερμότητα και συμβολίζεται με **q** , και είναι:

$$q \equiv \frac{Q}{m}$$

Τρόποι μεταφοράς θερμότητας...

- Η **μεταφορά θερμότητας** είναι η μεταφορά ενέργειας λόγω μιας διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ διαφορετικών ποσοτήτων ύλης (συστημάτων)
 - ✓ Αγωγή
 - ✓ Συναγωγή (Φυσική ή Εξαναγκασμένη)
 - ✓ Ακτινοβολία
- Όταν δεν συμβαίνει μεταφορά θερμότητας ($\dot{Q} = 0$) η διεργασία καλείται **αδιαβατική**
- Η μεταφορά ενέργειας από τα μόρια της ύλης (μεταφορική (κινητική), περιστροφής και δόνησης) στα γειτονικά μόρια με αλληλεπιδράσεις (κρούσεις) ή με ανταλλαγή μορίων, καλείται **μεταφορά θερμότητας με αγωγή**, και περιγράφεται από τον νόμο της αγωγιμότητας του Fourier:

$$\dot{Q} = -k A \frac{dT}{dx}$$

αγωγιμότητα

επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας

διαφορά θερμοκρασίας

δείχνει την κατεύθυνση μεταφοράς θερμότητας

Τρόποι μεταφοράς θερμότητας...

- Όταν υπάρχει πεδίο ροής, η μεταφορά θερμότητας με αγωγή μεταξύ διαφορετικών ποσοτήτων ύλης (συστημάτων) καθορίζεται από τον τρόπο με τον οποίο η συνολική κίνηση φέρνει τις δύο ουσίες σε επαφή ή σε κοντινή απόσταση
- Η ανταλλαγή αυτή θερμότητας μεταξύ των μορίων καλείται **μεταφορά θερμότητας με συναγωγή**, και περιγράφεται από τον νόμο του Newton:

$$\dot{Q} = A h \Delta T$$

επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας

συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (συνάρτηση των ιδιοτήτων του μέσου, της ροής και της γεωμετρίας)

διαφορά θερμοκρασίας

Τρόποι μεταφοράς θερμότητας...

Ενδεικτικές τιμές συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (σε $W/(m^2.K)$)

Φυσική συναγωγή	$h = 5 - 25$, αέριο	$h = 50 - 1.000$, υγρό
Εξαναγκασμένη συναγωγή	$h = 20 - 250$, αέριο	$h = 50 - 20.000$ υγρό
Αλλαγή φάσης (βρασμός)	$h = 2.500 - 100.000$	

Τρόποι μεταφοράς θερμότητας...

- Η μεταφορά θερμότητας με ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδει ενέργεια στον κενό χώρο, χωρίς να απαιτείται ύλη (όμως, η εκπομπή και η απορρόφηση της ακτινοβολίας απαιτούν την παρουσία μιας ουσίας)
- Η ανταλλαγή αυτή θερμότητας μεταξύ των μορίων καλείται **μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία**, και περιγράφεται ως κλάσμα ϵ (ικανότητα εκπομπής) της ακτινοβολίας ιδανικού μέλανος σώματος (Νόμος Stefan-Boltzmann):

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A T_S^4$$

σταθερά Stefan-Boltzmann
($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)

επιφάνεια εκπομπής
θερμότητας

θερμοκρασία
επιφάνειας εκπομπής

ικανότητα εκπομπής

Το **μέλαν σώμα** είναι ένα εξιδανικευμένο μοντέλο της ύλης που απορροφά όλο το φως που προσπίπτει πάνω του (και κατ' επέκταση, όλη την ηλεκτρονική ακτινοβολία), όμως, το ίδιο εκπέμπει κάποια ακτινοβολία, το φάσμα της οποίας εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία (Gustav Robert Kirchhoff, 1860)

Τρόποι μεταφοράς θερμότητας...

- Στην πράξη, χρησιμοποιείται ένας κοινός τύπος για όλους τους τρόπους μεταφοράς θερμότητας:

$$\dot{Q} = C_q A \Delta T = \frac{\Delta T}{R_t}$$

επιφάνεια εναλλαγής
θερμότητας

ολικός συντελεστής
μεταφοράς θερμότητας

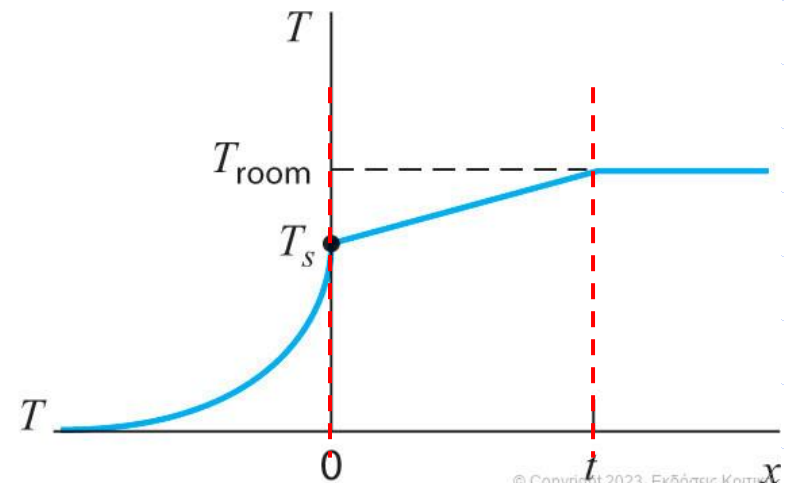
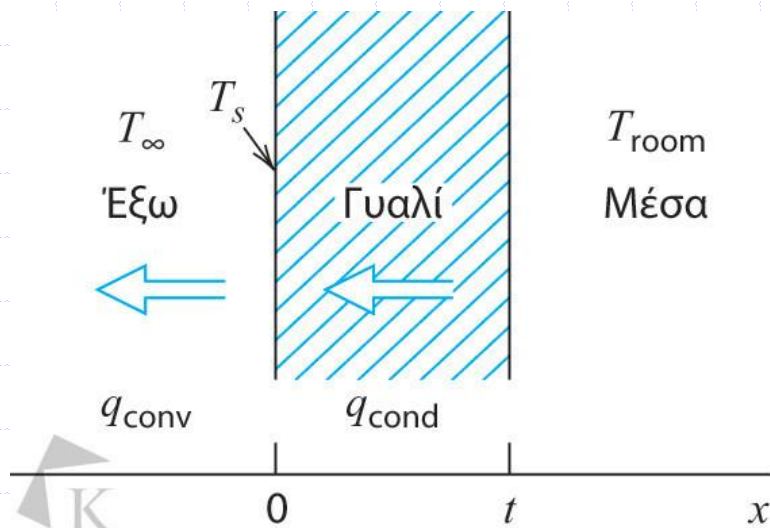
διαφορά
θερμοκρασίας

- Από την ανωτέρω σχέση προκύπτει ο ορισμός της θερμικής αντίστασης:

$$R_t = \frac{1}{C_q A}$$

Τρόποι μεταφοράς θερμότητας...

Παράδειγμα 3.7



Εσωτερική ενέργεια – Μια θερμοδυναμική ιδιότητα...

□ **Πρώτο Θερμοδυναμικό αξίωμα**

- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 1**: Η ολική ενέργεια κάθε συστήματος και του περιβάλλοντος του, θεωρουμένων ως σύνολο, παραμένει σταθερή
- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 2**: Η ενέργεια ούτε παράγεται και ούτε καταστρέφεται, αλλά μετατρέπεται από την μια μορφή στην άλλη
- ✓ **Αξιοματική διατύπωση 3**: Υπάρχει μια μορφή ενέργειας, η εσωτερική ενέργεια U , που είναι ενυπάρχουσα ιδιότητα κάθε συστήματος και συνδέεται συναρτησιακά με τις μετρήσιμες ιδιότητες που καθορίζουν το σύστημα. Για κλειστό σύστημα, που δεν κινείται, οι μεταβολές της ιδιότητας δίνονται από τη σχέση:

$$dU = \delta Q - \delta W$$

Εσωτερική ενέργεια – Μια θερμοδυναμική ιδιότητα...

- ❑ Η εσωτερική ενέργεια U είναι μια εκτατική ιδιότητα, καθώς εξαρτάται από την μάζα του συστήματος (όπως η κινητική και η δυναμική ενέργεια), ενώ χρησιμοποιείται η ειδική εσωτερική ενέργεια u (εσωτερική ενέργεια ανά μονάδα μάζας)
- ❑ Η εσωτερική ενέργεια είναι μια από τις ανεξάρτητες ιδιότητες μιας καθαρής ουσίας, όπως η πίεση και η θερμοκρασία
- ❑ Σε πίνακες θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, όπως είναι οι πίνακες του ατμού, καταχωρίζεται και η τιμή της εσωτερικής ενέργειας μαζί με άλλες θερμοδυναμικές ιδιότητες
- ❑ Περιλαμβάνονται η εσωτερική ενέργεια του κορεσμένου υγρού u_f , η εσωτερική ενέργεια του κορεσμένου ατμού u_g και η διαφορά μεταξύ της εσωτερικής ενέργειας του κορεσμένου υγρού και του κορεσμένου ατμού u_{fg} (αλλαγής φάσης)

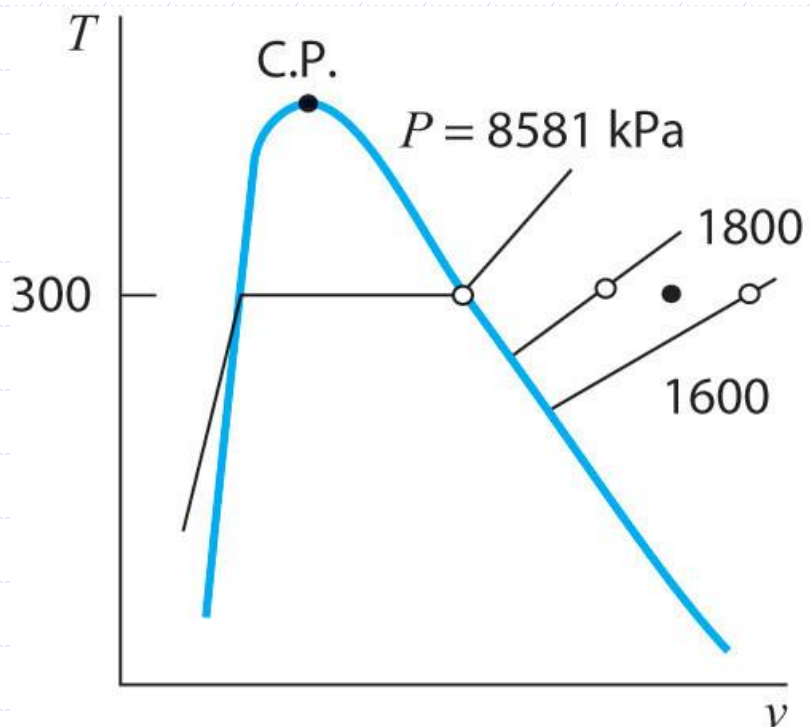
$$U = U_{liq} + U_{vap} \quad m u = m_{liq} u_f + m_{vap} u_g$$

$$u = (1 - x) u_f + x u_g \quad u = u_f + x u_{fg}$$

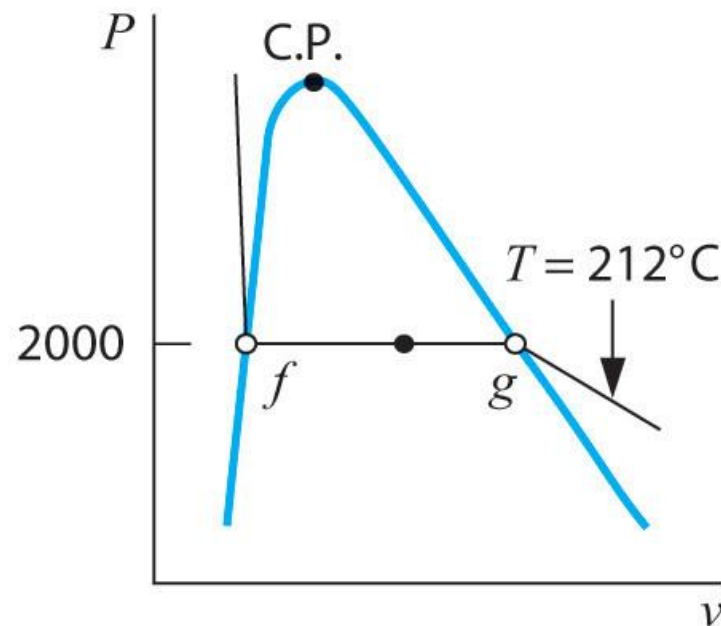
Ποιότητα ατμού 

Εσωτερική ενέργεια – Μια θερμοδυναμική ιδιότητα...

Παράδειγμα 3.8



(α)



(β)

Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

Ανάλυση προβλημάτων και τεχνική επίλυσης...

1. Κάντε ένα σχέδιο του πραγματικού συστήματος με τα στοιχεία του και απεικονίστε όλες τις ροές μάζας, τις ροές θερμότητας και τους ρυθμούς έργου. Συμπεριλάβετε μια ένδειξη για τις δυνάμεις όπως τις εξωτερικές πιέσεις και τις σημειακές δυνάμεις
2. Προσδιορίστε (δηλαδή επιλέξτε) μια μάζα ελέγχου ή έναν όγκο ελέγχου ορίζοντας μια επιφάνεια ελέγχου που περιέχει την ουσία/διάταξη που θέλετε να αναλύσετε. Υποδείξτε την παρουσία όλων των όρων μεταφοράς μέσα και έξω από τον όγκο ελέγχου και επισημάνετε τα διαφορετικά μέρη του συστήματος αν δεν βρίσκονται στην ίδια θερμοδυναμική κατάσταση
3. Γράψτε τους γενικούς νόμους για καθέναν από τους επιλεγμένους όγκους ελέγχου (προς το παρόν χρησιμοποιούμε απλώς την εξίσωση της ενέργειας, αλλά αργότερα θα χρησιμοποιήσουμε αρκετούς νόμους). Αν ένας όρος μεταφοράς εγκαταλείπει έναν όγκο ελέγχου και εισέρχεται σε κάποιον άλλο, θα πρέπει να έχετε έναν όρο σε κάθε εξίσωση με αντίθετο πρόσημο

Ανάλυση προβλημάτων και τεχνική επίλυσης...

4. Καταγράψτε τους βοηθητικούς ή ειδικούς νόμους για οτιδήποτε περιλαμβάνεται σε καθέναν από τους όγκους ελέγχου. Η σύσταση μιας ουσίας είτε καταγράφεται είτε αναφέρεται σε πίνακα. Η διατύπωση μιας εξίσωσης για μια δεδομένη διεργασία είναι συνήθως εύκολη, δίνεται από τον τρόπο κατασκευής του συστήματος ή της διάταξης και συχνά αποτελεί μια προσέγγιση της πραγματικότητας. Δηλαδή, φτιάχνουμε ένα απλοποιημένο μαθηματικό μοντέλο της συμπεριφοράς του πραγματικού κόσμου
5. Ολοκληρώστε τη διατύπωση συνδυάζοντας όλες τις εξισώσεις (δεν χρησιμοποιούμε ακόμη αριθμούς)· στη συνέχεια ελέγξτε ποιες ποσότητες είναι γνωστές και ποιες άγνωστες. Είναι σημαντικό να καθορίσετε όλες τις καταστάσεις προσδιορίζοντας ποιες δύο ανεξάρτητες ιδιότητες καθορίζουν μια δεδομένη κατάσταση. Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται ευκολότερα με την απεικόνιση όλων των διεργασιών και καταστάσεων σε ένα διάγραμμα (P-v), (T-v) ή σε παρόμοιο διάγραμμα. Αυτά τα διαγράμματα είναι επίσης χρήσιμα στη μελέτη ενός πίνακα και στον εντοπισμό μιας κατάστασης.

Ανάλυση προβλημάτων και τεχνική επίλυσης...

Εξίσωση ενέργειας

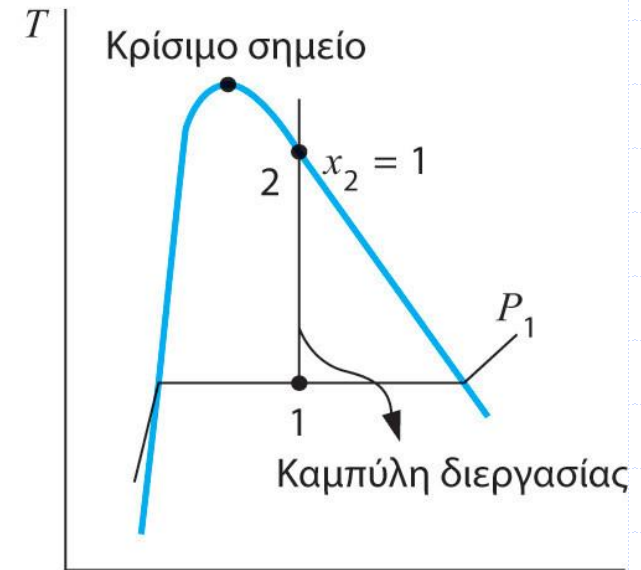
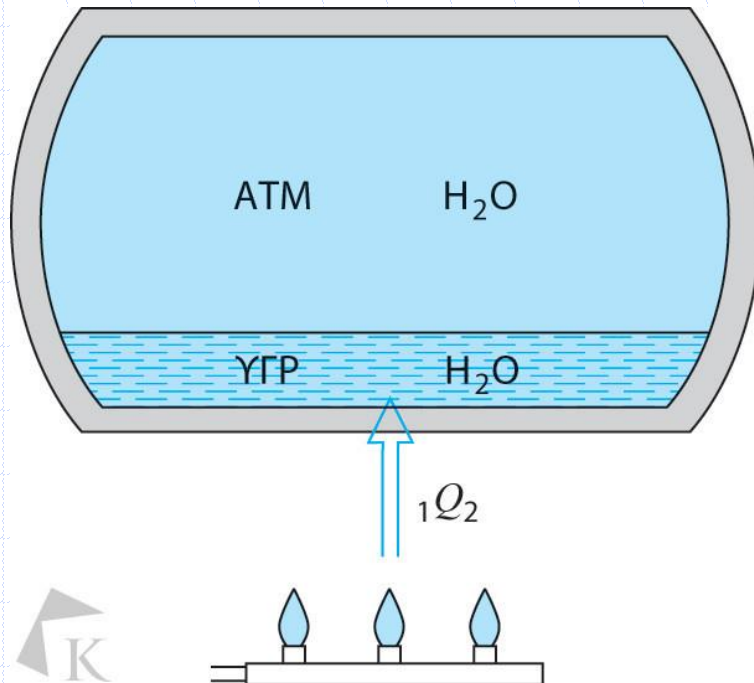
Όταν οι ταχύτητες είναι μικρές, η κινητική ενέργεια είναι αμελητέα

$$U_2 - U_1 + \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2) + mg(Z_2 - Z_1) = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

Όταν η μεταβολή του ύψους είναι μικρή, η δυναμική ενέργεια είναι αμελητέα

Ανάλυση προβλημάτων και τεχνική επίλυσης...

Παράδειγμα 3.9



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

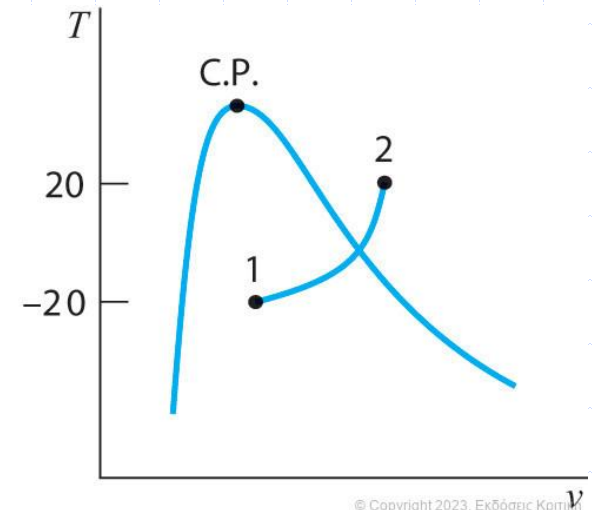
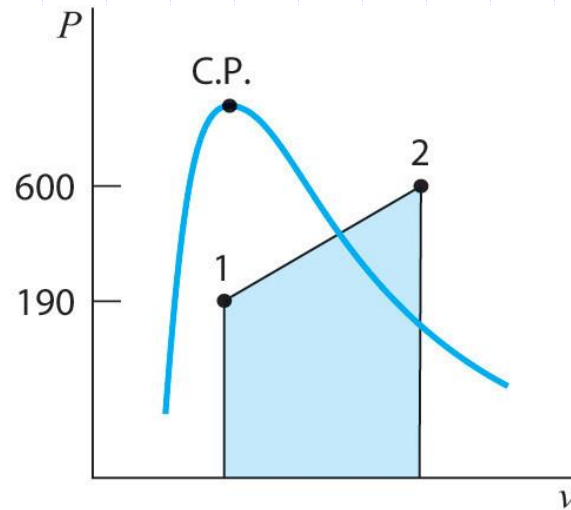
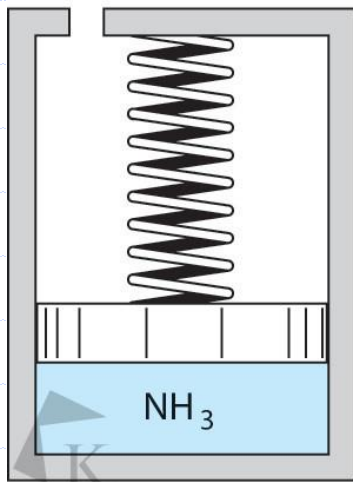
Ανάλυση προβλημάτων και τεχνική επίλυσης...



Παράδειγμα 3.9M

Ανάλυση προβλημάτων και τεχνική επίλυσης...

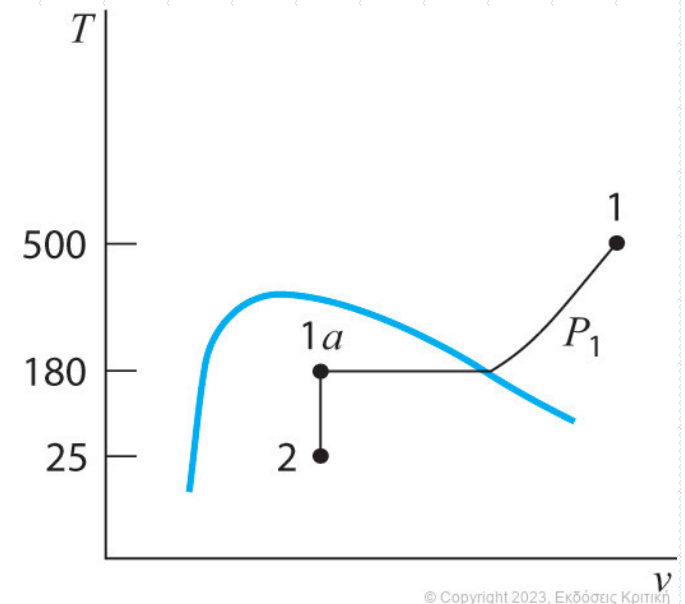
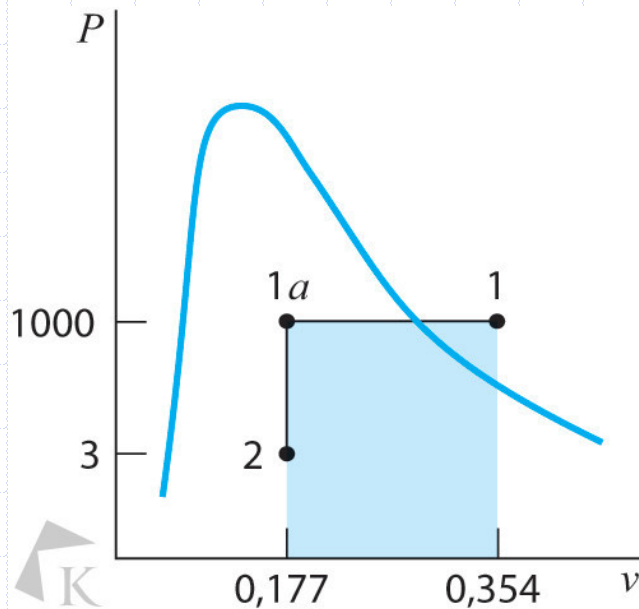
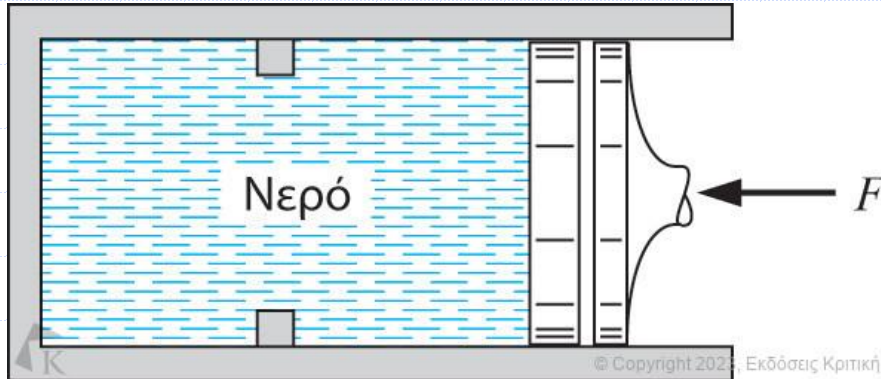
Παράδειγμα 3.10



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κρητι

Ανάλυση προβλημάτων και τεχνική επίλυσης...

Παράδειγμα 3.11



Η θερμοδυναμική ιδιότητα της ενθαλπίας...

□ Εξίσωση ενέργειας

$$U_2 - U_1 = {}_1Q_1 - {}_1W_2$$

□ Έργο

$${}_1W_2 = \int_1^2 P dV \quad \begin{matrix} P \text{ σταθερή} \\ \Rightarrow \end{matrix} \quad {}_1W_2 = P \int_1^2 dV = P(V_2 - V_1)$$

Οπότε:

$${}_1Q_1 = U_2 - U_1 + P_2V_2 - P_1V_1 = (U_2 + P_2V_2) - (U_1 + P_1V_1)$$

□ Ορίζεται μια θερμοδυναμική ιδιότητα που καλείται **Ενθαλπία**, έχει μονάδες ενέργειας και ορίζεται από την σχέση:

Περιλαμβάνει την μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας και το μηχανικό έργο

Ενθαλπία

$$H \equiv U + PV$$

ή

$$h \equiv u + Pv$$

Ειδική ενθαλπία (ανά μονάδα μάζας)

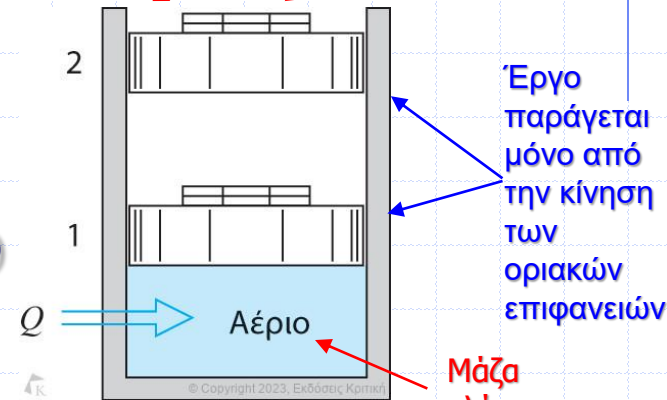
Εσωτερική ενέργεια

Μηχανικό έργο

Ποιότητα ατμού

Αμελητέα μεταβολή της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας

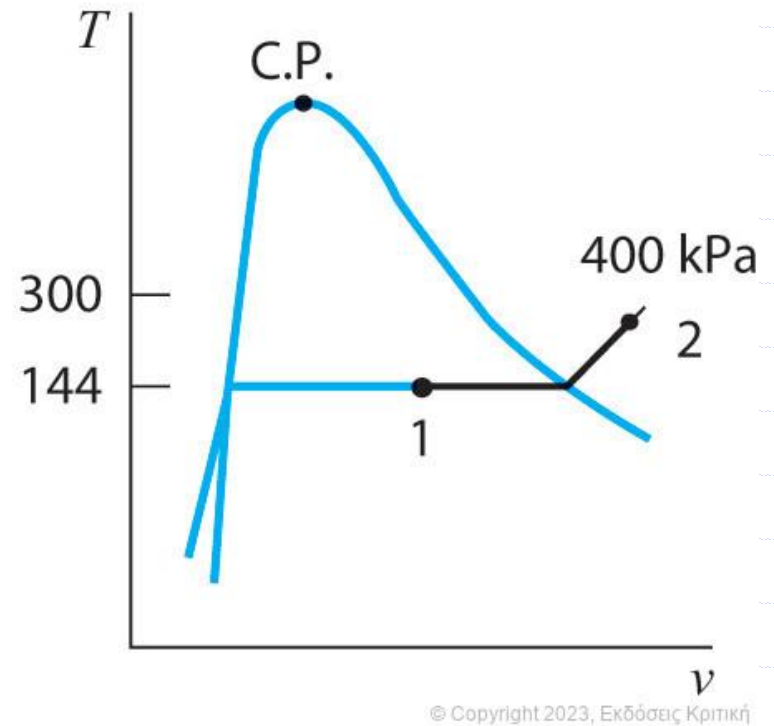
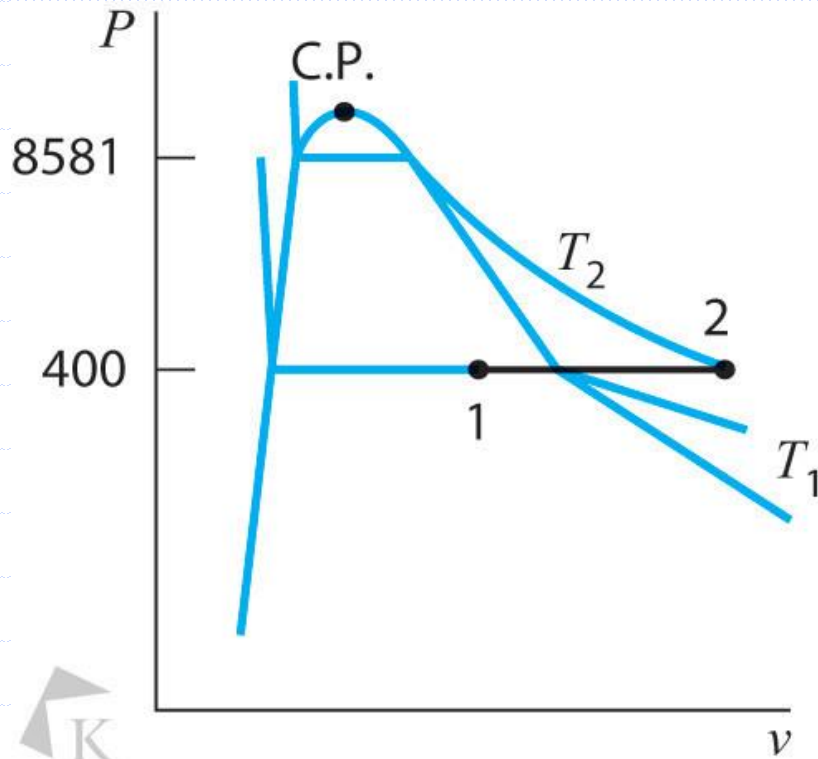
Διεργασία οιονει σταθερής πίεσης



□ Για διφασικό μίγμα είναι: $h = (1 - x)h_f + xh_g$ ή $h = h_f + xh_{fg}$

Η θερμοδυναμική ιδιότητα της ενθαλπίας...

Παράδειγμα 3.12



Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο και σταθερή πίεση...

- Εισάγονται δύο ιδιότητες, που είναι παράγωγοι της εσωτερικής ενέργειας u και της ενθαλπίας h , και ονομάζονται ειδικές θερμότητες:

Η θερμότητα που απαιτείται για να ανέβει η θερμοκρασία κατά dT **υπό σταθερό όγκο** $C_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$ Η θερμότητα που απαιτείται για να ανέβει η θερμοκρασία κατά dT **υπό σταθερή πίεση** $C_p \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$

- Για τις οποίες ισχύουν:

$v = \text{σταθερός}$ $\partial q = du + \cancel{\partial w}^0 = du = C_v dT$

$p = \text{σταθερή}$ $\partial q = du + \partial w = du + Pdv + \cancel{v dP}^0 = dh = C_p dT$

- Χωρίς αλλαγή φάσης, ισχύει:

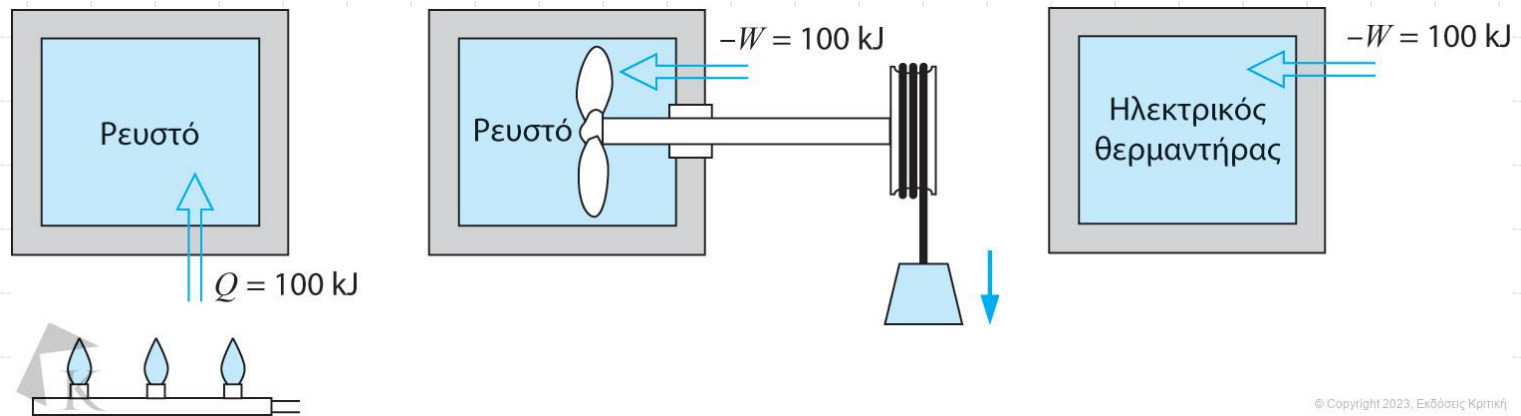
Σταθερές, ανεξάρτητες από την θερμοκρασία

$$\left. \begin{array}{l} C_v \approx \frac{du}{dT} \\ C_p \approx \frac{dh}{dT} \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{l} du = C_v dT \Rightarrow u_2 - u_1 = \int C_v dT \approx C_v (T_2 - T_1) \\ dh = C_p dT \Rightarrow h_2 - h_1 = \int C_p dT \approx C_p (T_2 - T_1) \end{array}$$

Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο και σταθερή πίεση...

- Οι ειδικές θερμότητες δεν συνδέονται μόνο με τη μεταφορά θερμότητας αλλά εκφράζουν και τις μεταβολές της εσωτερικής ενέργειας και της ενθαλπίας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

Εναλλακτικοί τρόποι επίτευξης μιας δεδομένης ΔU



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο και σταθερή πίεση...

Στερεά και υγρά

- Είναι, πρακτικά, ασυμπίεστα, $v =$ σταθερός και μικρός, οπότε:

$$dh = du + d(Pv) = du + Pdv + vdP \approx du + Pdv$$

οπότε
$$h_2 - h_1 = u_2 - u_1 + \int v dP = u_2 - u_1 + v(P_2 - P_1)$$

$$\approx C_v(T_2 - T_1) + v(P_2 - P_1)$$

- Επειδή ο ειδικός όγκος είναι πολύ μικρός, σε πολλές περιπτώσεις είναι $C = C_p = C_v$, οπότε:

$$dh = du = CdT \Rightarrow h_2 - h_1 = u_2 - u_1 \approx C(T_2 - T_1)$$

Η εσωτερική ενέργεια, η ενθαλπία και η ειδική θερμότητα των ιδανικών αερίων...

- Η εσωτερική ενέργεια μιας ουσίας (αερίου συστήματος) σε χαμηλή πίεση και υψηλή θερμοκρασία (δηλ. χαμηλής πυκνότητας), εξαρτάται κυρίως από την θερμοκρασία, ενώ η επίδραση της πίεσης είναι σχεδόν αμελητέα

Εσωτερική ενέργεια υπέρθερμου ατμού

<i>T</i> , °C	<i>P</i> , kPa			
	10	100	500	1000
200	2661,3	2658,1	2642,9	2621,9
700	3479,6	3479,2	3477,5	3475,4
1200	4467,9	4467,7	4466,8	4465,6

Η εσωτερική ενέργεια, η ενθαλπία και η ειδική θερμότητα των ιδανικών αερίων...

- Καθώς η πυκνότητα μειώνεται, η συμπεριφορά του αερίου τείνει προς το μοντέλο του ιδανικού αερίου, οπότε:

$$Pv = RT \quad \text{και} \quad u = f(T) \quad \text{και} \quad C_{v0} \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \Rightarrow C_{v0} = \frac{du}{dT} \Rightarrow du = C_{v0} dT$$

Ο δείκτης 0 υποδεικνύει
ιδανικό αέριο

- Για μια δεδομένη μάζα m , προκύπτει: $dU = m C_{v0} dT$

- Ομοίως, για την ενθαλπία ισχύουν:

$$h = f(T) \quad C_{p0} \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \Rightarrow C_{p0} = \frac{dh}{dT} \Rightarrow dh = C_{p0} dT$$

- Για μια δεδομένη μάζα m , προκύπτει: $dH = m C_{p0} dT$

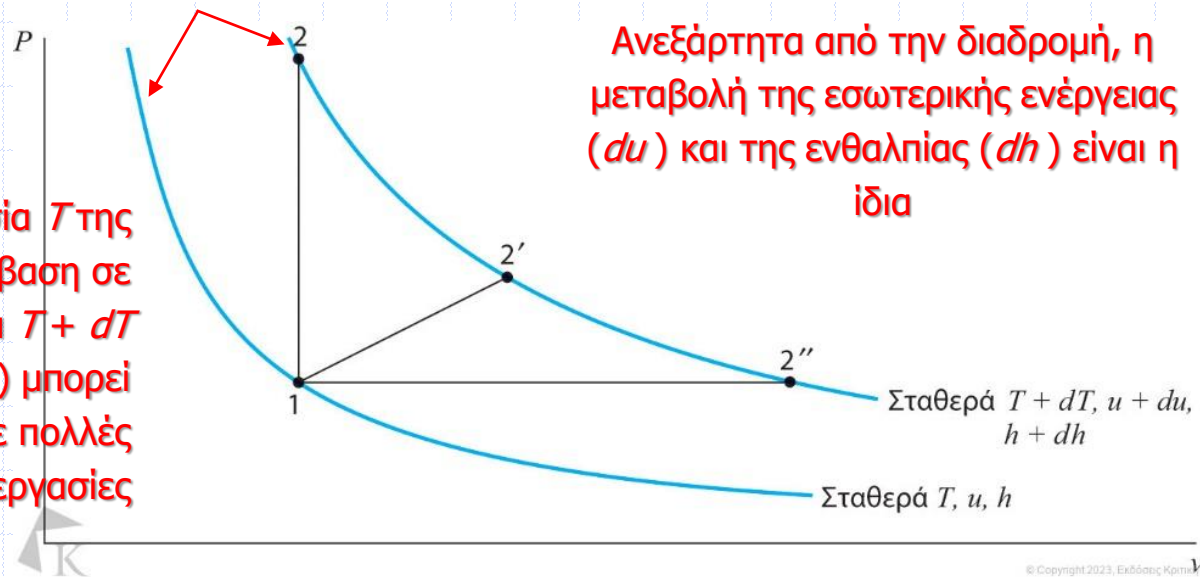
Η εσωτερική ενέργεια, η ενθαλπία και η ειδική θερμότητα των ιδανικών αερίων...

Καμπύλες σταθερής θερμοκρασίας
και άρα, σταθερής εσωτερικής
ενέργειας και ενθαλπίας

$$du = C_{v0}dT \quad dh = C_{p0}dT$$

Ανεξάρτητα από την διαδρομή, η
μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας
(du) και της ενθαλπίας (dh) είναι η
ίδια

Από την θερμοκρασία T της
κατάστασης 1, η μετάβαση σε
θερμοκρασία $T + dT$
(καταστάσεις 2, 2', 2'') μπορεί
να γίνει με πολλές
εναλλακτικές διεργασίες



Διάγραμμα $P-v$ ιδανικού αερίου

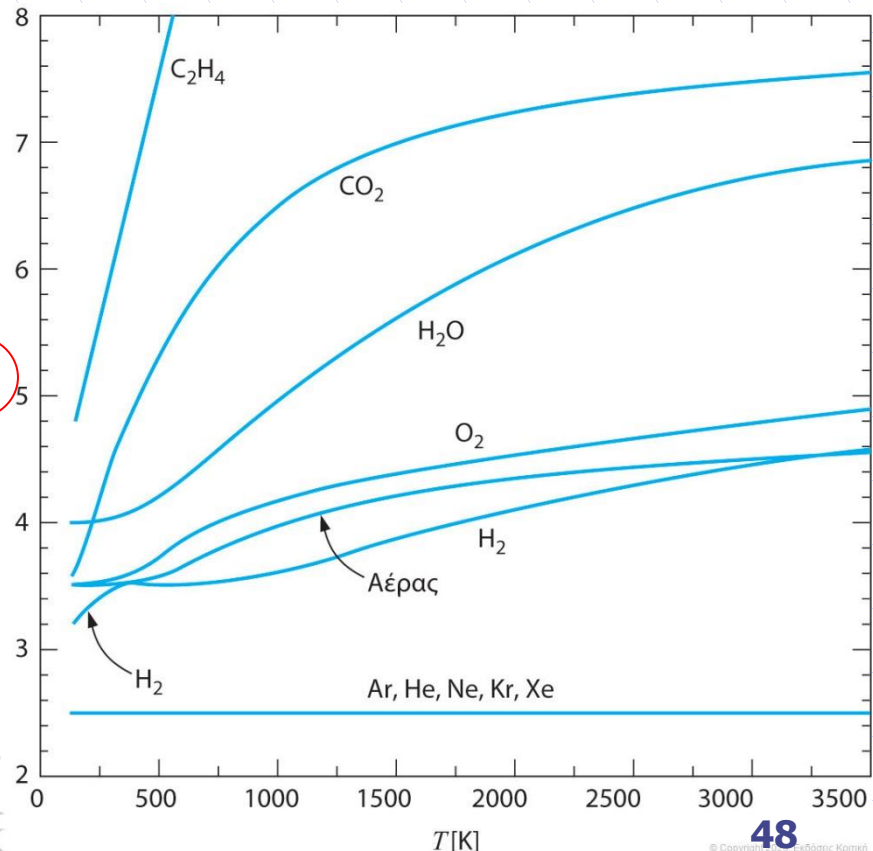
- Εφόσον η εσωτερική ενέργεια και η ενθαλπία είναι συναρτήσεις μόνο της θερμοκρασίας, το αυτό ισχύει και για τις ειδικές θερμότητες, $C_{v0} = f(T)$ και $C_{p0} = f(T)$

Η εσωτερική ενέργεια, η ενθαλπία και η ειδική θερμότητα των ιδανικών αερίων...

- Καθώς η πίεση τείνει στο μηδέν, η ειδική θερμότητα ονομάζεται ειδική θερμότητα μηδενικής πίεσης και η ειδική θερμότητα μηδενικής πίεσης, C_{p0} και η ειδική θερμότητα μηδενικής πίεσης, σταθερού όγκου C_{v0}
- Επειδή υπάρχει μόνο μεταφορική κίνηση, οι ειδικές θερμότητες των μονοατομικών αερίων (πχ. Ar, He, Ne, Kr, Xe κλπ.) είναι χαμηλές
- Σε περισσότερο σύνθετα μόρια, υπάρχουν περισσότερες διαθέσιμες κινήσεις (δόνηση, ταλάντωση κλπ.), οπότε οι ειδικές θερμότητες είναι υψηλότερες

$\frac{C_{p0}}{R}$
Αδιάστατο μέγεθος

Ειδική θερμότητα (C_{p0}/R) αερίων



Η εσωτερική ενέργεια, η ενθαλπία και η ειδική θερμότητα των ιδανικών αερίων...

- Για την ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση και την ειδική θερμότητα σταθερού όγκου, ιδανικού αερίου ισχύουν:

$$\left. \begin{array}{l} h = u + Pv \\ Pv = RT \\ du = C_{v0}dT \\ dh = C_{p0}dT \end{array} \right\} \Rightarrow dh = u + RdT \Rightarrow C_{p0}dT = C_{v0}dT + RdT \Rightarrow \boxed{C_{p0} - C_{v0} = R}$$

ή

$$\boxed{\bar{C}_{p0} - \bar{C}_{v0} = R}$$

- Συνεπώς, επαρκεί η μελέτη μιας από τις δύο ειδικές θερμότητες, καθώς η δεύτερη προκύπτει από τις ανωτέρω σχέσεις

Η εσωτερική ενέργεια, η ενθαλπία και η ειδική θερμότητα των ιδανικών αερίων...

Παραδείγματα 3.13 – 3.15

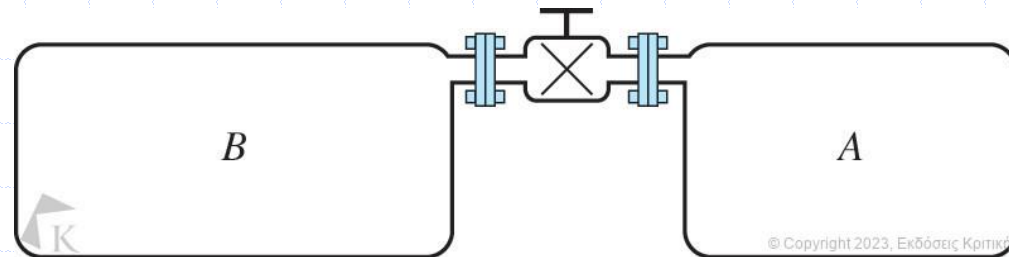
Ανομοιογενής κατανομή καταστάσεων και μαζών...

- Όταν η θερμοκρασία μιας μάζας m_A μεταβάλλεται λόγω θέρμανσης, ψύξης, συμπίεσης ή εκτόνωσης, μεταβάλλεται και η θερμοκρασία της μάζας m_B του δοχείου μέσα στο οποίο βρίσκεται, και η ενέργεια κινείται από και την μάζα του δοχείου

$$U_2 - U_1 = m_A(u_2 - u_1)_A + m_B(u_2 - u_1)_B = {}_1Q_2 - {}_1W_1$$

Διατήρησης μάζας: $m_2 = m_1 = m_{1A} + m_{2B}$ (εξίσωση συνεχείας)

Εξίσωση ενέργειας: $m_2 e_2 - (m_{1A} e_{1A} + m_{1B} e_{1B}) = {}_1Q_2 - {}_1W_2$



Συνδεδεμένες δεξαμενές σε διαφορετικές αρχικές καταστάσεις

Ανομοιογενής κατανομή καταστάσεων και μαζών...

- Όταν δεν υπάρχει υψομετρική διαφορά και η κινητική ενέργεια θεωρείται αμελητέα:

$$\begin{aligned} & m_2 e_2 - (m_{1A} e_{1A} + m_{1B} e_{1B}) \\ &= m_2(u_2 + 0 + gZ_1) - m_{1A}(u_{1A} + 0 + gZ_1) - m_{1B}(u_{1B} + 0 + gZ_1) \\ &= m_2 u_2 - (m_{1A} u_{1A} + m_{1B} u_{1B}) + [m_2 - (m_{1A} + m_{1B})]gZ_1 \\ &= m_2 u_2 - (m_{1A} u_{1A} + m_{1B} u_{1B}) \end{aligned}$$

Μηδέν
(εξίσωση συνέχειας)

οπότε:
$$u_2 - \frac{(m_{1A} u_{1A} + m_{1B} u_{1B})}{m_2} = \frac{({}_1Q_2 - {}_1W_2)}{m_2}$$

ή:
$$u_2 = \frac{m_{1A}}{m_2} u_{1A} + \frac{m_{1B}}{m_2} u_{1B} + \frac{({}_1Q_2 - {}_1W_2)}{m_2}$$

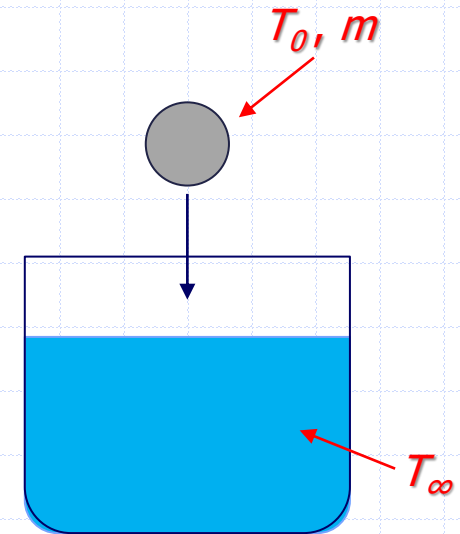
- Για μονωμένο (${}_1Q_2$) και άκαμπτο δοχείο ($V = C$ οπότε ${}_1W_2 = 0$), η τελική ειδική εσωτερική ενέργεια είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος ως προς την μάζα, των αρχικών τιμών

Ο ειδικός όγκος είναι:
$$v_2 = \frac{V_2}{m_2} = \frac{m_{1A}}{m_2} v_{1A} + \frac{m_{1B}}{m_2} v_{1B}$$

Μη σταθεροποιημένη διεργασία...

- ❑ Ο όρος **μη σταθεροποιημένη διεργασία** σημαίνει ότι κάποιο μέγεθος /ιδιότητα (πχ. θερμοκρασία) μεταβάλλεται με τον χρόνο
- ❑ Ευρίσκεται ένα μαθηματικό υπόδειγμα (μοντέλο) που περιγράφει την ιδιότητα ως συνάρτηση του χρόνου
- ❑ Μελετάται η ταχεία βύθιση ενός σώματος μάζας m και θερμοκρασίας T_0 σε λουτρό θερμού νερού θερμοκρασίας T_∞
- ❑ Η επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας είναι A και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας είναι C_q

$$\frac{dE_{CV}}{dt} = \frac{dU_{CV}}{dt} = mC_v \frac{dT}{dt} = \dot{Q} = -C_q A (T - T_\infty)$$



όπου:

- ✓ Η κινητική και δυναμική ενέργεια θεωρούνται αμελητέες, και δεν παράγεται έργο
- ✓ Δεν συμβαίνει αλλαγή φάσης, οπότε η εσωτερική ενέργεια εκφράζεται ως μια ειδική θερμότητα (C_v)

Μη σταθεροποιημένη διεργασία...

- Εισάγοντας τον μετασχηματισμό $\theta = T - T_\infty$, και ολοκληρώνοντας από $t = 0$, όπου $T = T_0$ ($\theta = \theta_0$) προκύπτει:

$$mC_v \frac{d\theta}{dt} = -C_q A \theta \text{ or } \theta^{-1} d\theta = -\frac{C_q A}{mC_v} dt \Rightarrow$$

$$\ln\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right) = -\frac{C_q A}{mC_v} t \text{ or } \theta = \theta_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

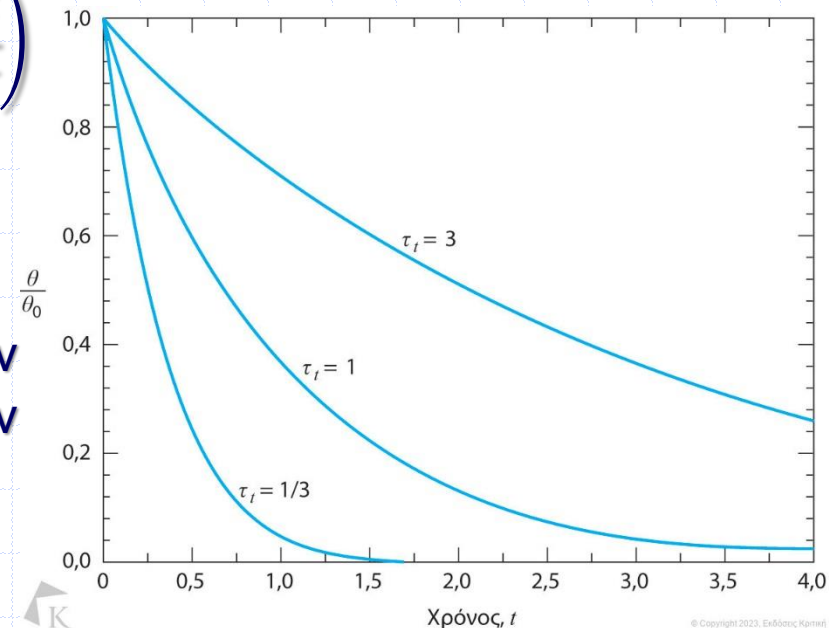
όπου:

$$\tau = \frac{mC_v}{C_q A} = mC_v R_t$$

Θερμική
σταθερά
χρόνου

- Η εξίσωση που περιγράφει την μεταβολή της θερμοκρασίας με τον χρόνο είναι:

$$T - T_\infty = (T_0 - T_\infty) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$



© Copyright 2023, Εκδόσεις Κριτική

Μη σταθεροποιημένη διεργασία...

Παράδειγμα 3.16

Γενικά συστήματα που περιλαμβάνουν έργο...

- Θεωρώντας μια γενικευμένη δύναμη και για γενικευμένη μετατόπιση, το έργο δίνεται από την γενικευμένη σχέση:

$${}_1W_2 = \int_1^2 F_{gen} dx_{gen}$$

Γενικευμένος όρος έργου

Σύστημα	Δύναμη	Μονάδα μέτρησης	Μετατόπιση	Μονάδα μέτρησης
Απλή δύναμη	F	N	dx	m
Πίεση	P	Pa	dV	m^3
Ελατήριο	$F = k_s(x - x_0)$	N	dx	m
Σύρμα υπό τάση	F	N	$dx = x_0 de$	m
Επιφανειακή τάση	$\sigma = A E e$	N/m	dA	m^2
Ηλεκτρικό	EMF**	volt	dZ^*	Coulon

*Παρατηρήστε τη χρονική παράγωγο $dZ/dt = i$ (ρεύμα σε αμπέρ).

**Ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) (Σ.τ.Μ.)

- Για τον υπολογισμό του έργου απαιτείται η γνώση της σχέσης $F_{gen}(x_{gen})$

Γενικά συστήματα που περιλαμβάνουν έργο...

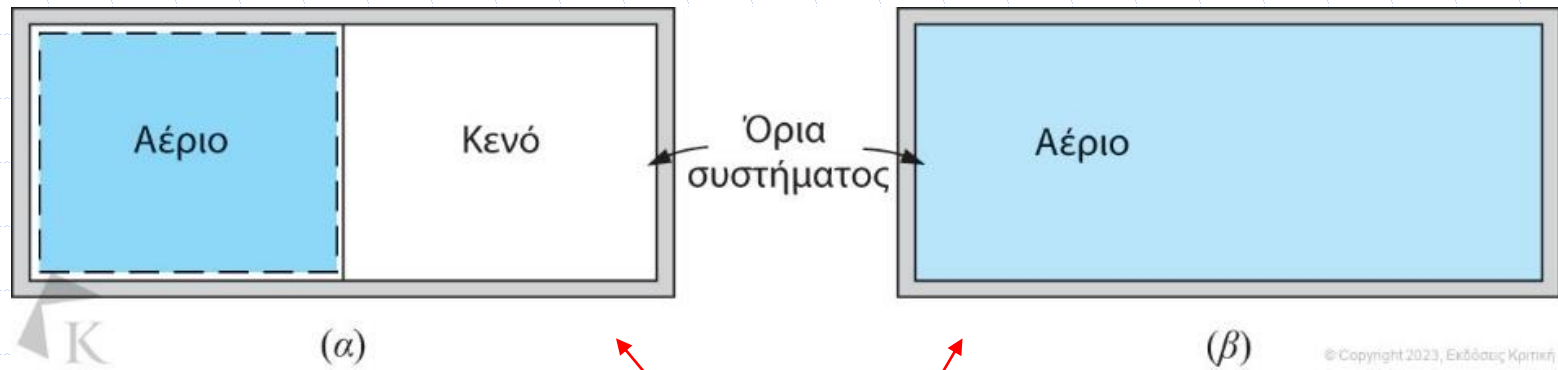
- Λαμβάνοντας υπόψη την σύμβαση των προσήμων, η δύναμη είναι θετική όταν το έργο εισέρχεται στο σύστημα, οπότε για το έργο ισχύει:

$$\delta W = PdV - FdL - \sigma dA - EMFdZ + \dots$$

- Και για την ισχύ είναι:

$$\dot{W} = \frac{dW}{dt} = P\dot{V} - F\dot{V} - \sigma\dot{A} + EMF\dot{Z} + \dots$$

Γενικά συστήματα που περιλαμβάνουν έργο...



- ❑ Τα όρια του συστήματος δεν μεταβάλλονται, παρά το γεγονός ότι ο σχετικός όγκος των υποσυστημάτων (αέριο, κενό) μεταβάλλονται
- ❑ Το έργο μπορεί να εντοπιστεί μόνο στα όρια του συστήματος
- ❑ Αν ως σύστημα θεωρηθεί το αέριο (μόνο), τότε είναι:

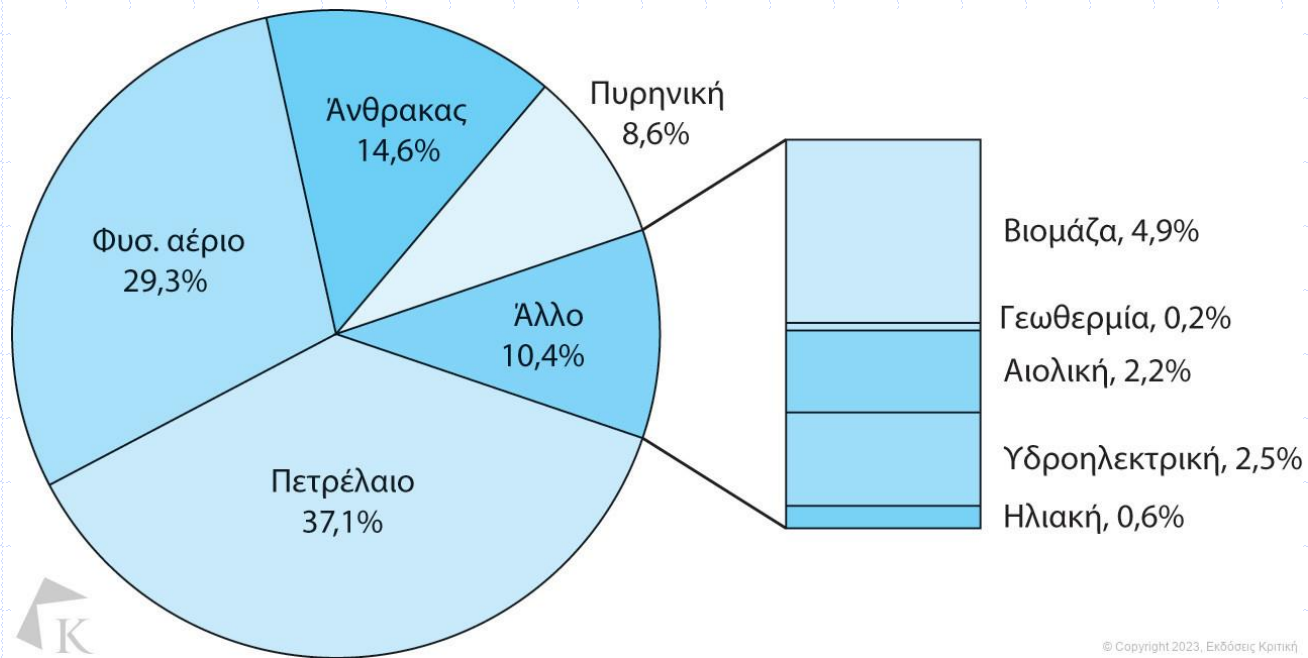
$$\int_1^2 PdV$$

Γενικά συστήματα που περιλαμβάνουν έργο...

Παράδειγμα 3.17

Εφαρμογές μηχανικής...

Ενεργειακοί πόροι



Κατανάλωση ενέργειας στις ΗΠΑ 2016, 103 EJ

Εφαρμογές μηχανικής...

Κατανάλωση ενέργειας στις ΗΠΑ 2016 (103 EJ)

Κτίρια	Δημόσια	18,7%	39,6%
	Κατοικίες	20,9%	
Βιομηχανία			31,8%
Μεταφορές			28,6%

Κατά κεφαλή χρήση ενέργειας και εκπομπές CO₂ (2015)

Περιοχή	GJ/p*	t CO ₂ /p	Περιοχή	GJ/p*	t CO ₂ /p
Κόσμος	78	4,4	Γαλλία	155	4,4**
Βραζιλία	60	2,2	Γερμανία	158	8,9
Καναδάς	315	15,3	Κορέα	226	11,6
Κίνα	90	6,6	Ρωσία	206	10,2
Ιαπωνία	142	9,0	ΗΠΑ	285	15,5

* το /p σημαίνει κατά κεφαλήν.

**Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κατά 40% από πυρηνική ενέργεια.

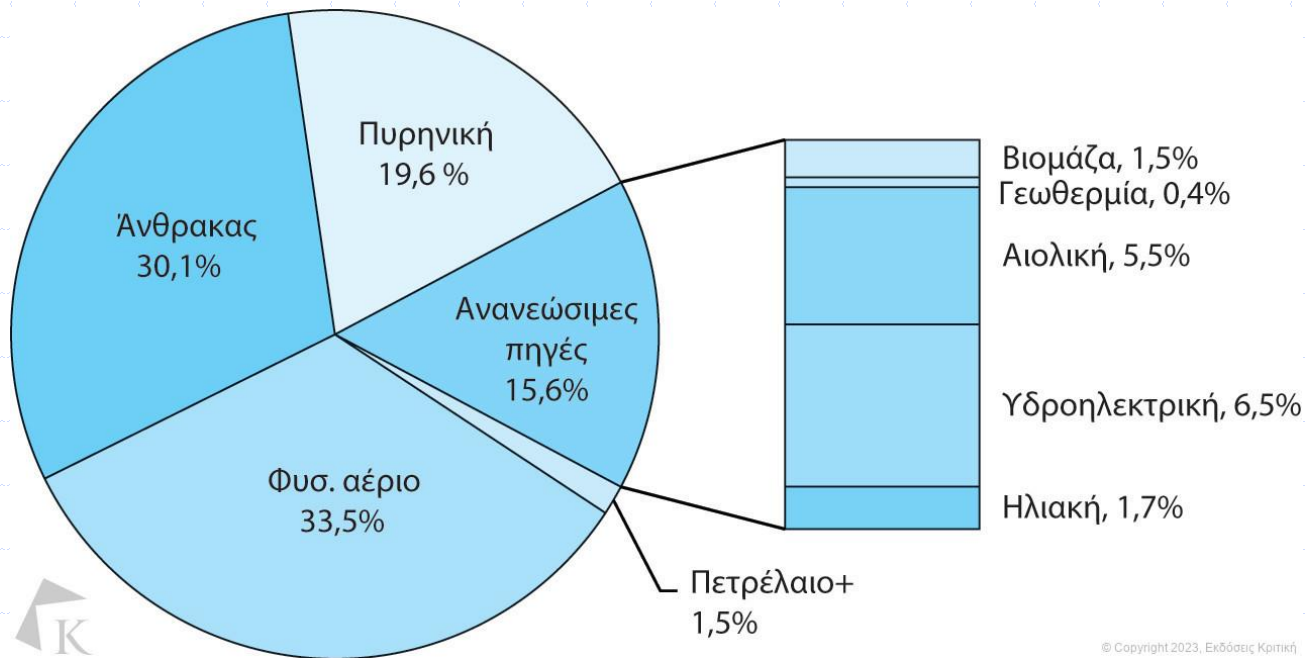
Εφαρμογές μηχανικής...

Μετατροπή και μετασχηματισμός ενέργειας

Πόρος	Μετατροπή, μετασχηματισμός	Σύστημα μετατροπής
Αρχικό καύσιμο	Τροποποιημένο καύσιμο ή χημικές ουσίες	Διυλιστήριο
Καύσιμο	Θερμό αέριο \Rightarrow Θερμότητα ή ηλεκτρισμός + Θερμότητα	Καυστήρας, μονάδα ηλεκτροπαραγωγής
Νερό, άνεμος	Μηχανική ενέργεια \Rightarrow Ηλεκτρισμός	Στρόβιλος φράγματος, ανεμογεννήτρια
Ηλιακή ενέργεια	Θερμό υγρό ή θερμό αέριο Ηλεκτρισμός	Φωτοβολταϊκό πάνελ

Εφαρμογές μηχανικής...

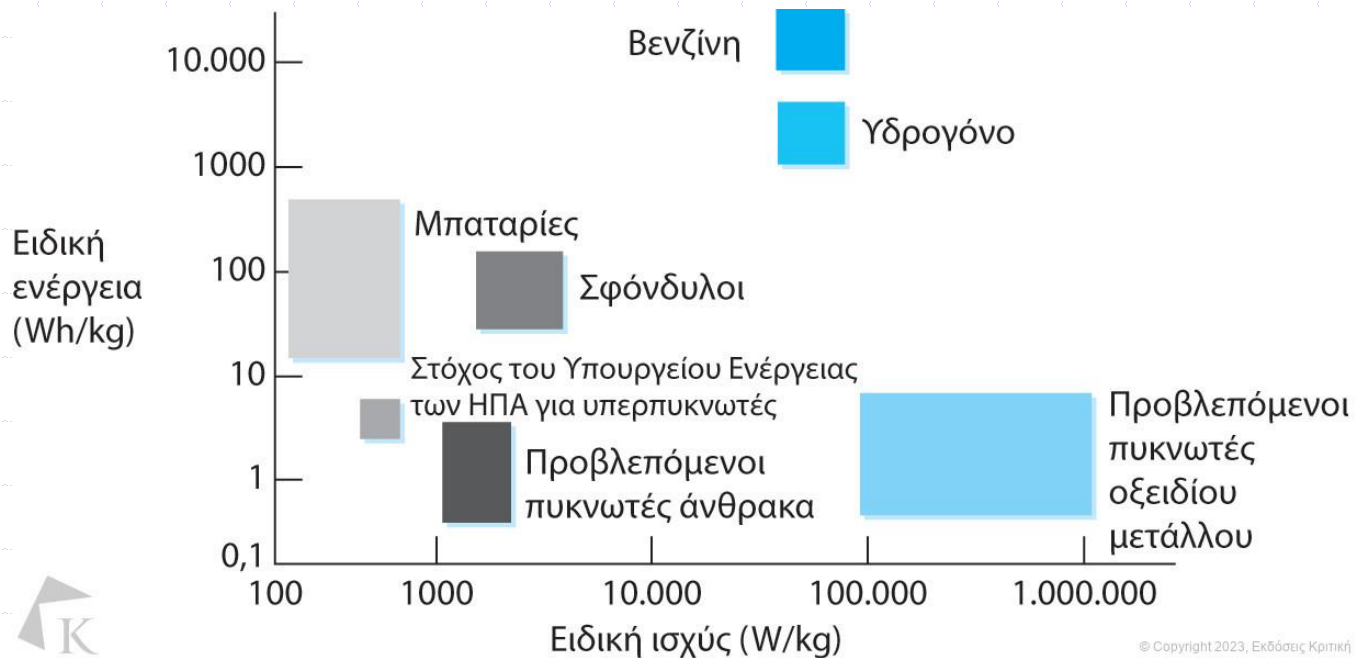
Παραγωγή ενέργειας στις ΗΠΑ 2016 (14,8 EJ)



Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ 2016, 14,8 EJ

Εφαρμογές μηχανικής...

Αποθήκευση ενέργειας



Ειδική ενέργεια συναρτήσει της ειδικής ισχύος

Εφαρμογές μηχανικής...

Αποθήκευση ενέργειας



Εφαρμογές μηχανικής...

- ❑ Μηχανολογικά συστήματα
- ❑ Συστήματα θέρμανσης
- ❑ Ηλεκτρικά συστήματα
- ❑ Χημικά συστήματα

Εφαρμογές μηχανικής...

Μεταφορά ενέργειας

Τυπικοί ρυθμοί ενέργειας σε ηλεκτρικές συσκευές

Συσκευή	Ισχύς
Αεριοστρόβιλος, μικρός	3-5 MW
Ανεμογεννήτρια	2,5 MW
Εγκατάσταση θέρμανσης τοποθετημένη στη βάση των τοίχων (σοβατεπί)	1-3 kW
Εστίες ηλεκτρικής κουζίνας	1-3,3 kW
Ηλεκτρικό αυτοκίνητο	75 kW
Ηλεκτρικό τρυπάνι	500 W
Ηλεκτροκινητήρας υβριδικού αυτοκινήτου	50 kW
Ηλιακό φωτοβολταϊκό, ημέρα με ηλιοφάνεια	100 W/m ²
Κινητήρας αντλίας νερού	0,5-3 kW
Λαμπτήρας Led	13 W
Λαμπτήρας πυρακτώσεως	60 W
Μονάδα σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	500 MW
Στεγνωτήρας μαλλιών	750-1000 W
Υδροηλεκτρικό φράγμα, Hoover	1300 MW
Υδροφράγμα, μικρό*	0,1-30 MW
Φούρνος μικροκυμάτων	1000 W

* Κάτω από τα 100 kW ονομάζονται *μικρο-υδροηλεκτρικοί* σταθμοί, ενώ *μεγαλο-υδροηλεκτρικοί* >30 MW

Εφαρμογές μηχανικής...

Μεταφορά ενέργειας

Τυπικοί ρυθμοί ενέργειας σε συσκευές με θερμότητα

Συσκευή	Θερμότητα \dot{Q}	Συσκευή	Θερμότητα \dot{Q}
Αυτοκίνητο (100 km/h, 62 mi/h)	50 και πάνω kW	Ηλιακή θερμική, ημέρα με ηλιοφάνεια	500 W/m ²
Βιομηχανικός καυστήρας αερίου, μικρός	15 kW	Λέβητας βιομηχανικού τύπου	4 MW
Βιομηχανικός φούρνος, μικρός	750 kW	Οικιακός θερμοσίφωνας	5 kW
Είσοδος μονάδας σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	900 MW	Οικιακός καυστήρας	25 kW
		Φούρνος τήξης αλουμινίου	2 MW
		Φως κεριού	30 W

Η θερμότητα περιλαμβάνει τη μετατροπή ενέργειας με καύση.

Εφαρμογές μηχανικής...

© Baloncici/Stockphoto



(α) Κύλινδρος κινητήρα μοτοσυκλέτας

© Borgnakke

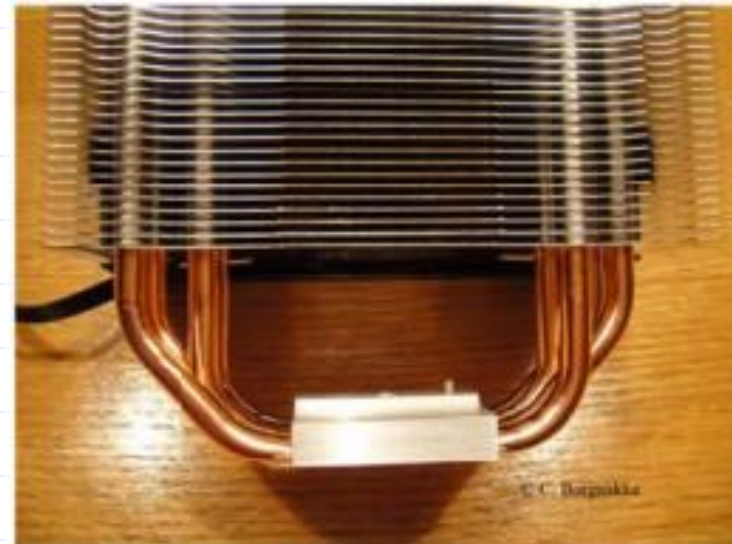


(β) Το εσωτερικό θερμαντικού επιδαπέδιου στοιχείου

© Martin Leigh/Getty Images, Inc.



(γ) Αεροψηκτήρες ελαίου, βαρέως τύπου



Αερο-ψηκτήρας με ανεμιστήρα πτερύγια (fins)

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Συνολική ενέργεια: $E = U + KE + PE = mu + \frac{1}{2} mV^2 + mgZ$

Κινητική ενέργεια: $KE = \frac{1}{2} mV^2$

Δυναμική ενέργεια: $PE = mgZ$

Ειδική συνολική ενέργεια: $e = u + \frac{1}{2} V^2 + gZ$

Ενθαλπία: $h \equiv u + Pv$

Μέση τιμή μάζας δύο φάσεων:

$$u = u_f + xu_{fg} = (1 - x)u_f + xu_g$$
$$h = h_f + xh_{fg} = (1 - x)h_f + xh_g$$

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Μέση τιμή μάζας δύο φάσεων:

$$u = u_f + xu_{fg} = (1-x)u_f + xu_g$$
$$h = h_f + xh_{fg} = (1-x)h_f + xh_g$$

Ειδική θερμότητα:

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \cdot C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$$

Θερμοχωρητικότητα:

Ενέργεια που απαιτείται για τη θέρμανση μιας μάζας κατά έναν βαθμό $Q/\Delta T$

mC_v για τη διεργασία $V = C$

mC_p για τη διεργασία $P = C$

Στερεά και υγρά:

Ασυμπίεστα, άρα $v = \text{σταθερός} \cong v_f$ και v πολύ μικρός

$C = C_v = C_p$ Πίνακες A.3 και A.4 (ΣΤ.2 και ΣΤ.3)

$$u_2 - u_1 = C(T_2 - T_1)$$

$h_2 - h_1 = u_2 - u_1 + v(P_2 - P_1)$. Συχνά ο δεύτερος όρος πολύ μικρός

$$h = h_f + vf(P - P_{\text{sat}}) \cdot u \cong u_f \text{ κορεσμένα στην ίδια } T$$

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Ιδανικό αέριο:

Εξισώσεις με βάση τη μάζα:

$h = u + Pv = u + RT$. Μόνο συναρτήσεις της T

$$C_v = \frac{du}{dT} \quad C_p = \frac{dh}{dT} = C_v + R$$

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT \cong C_v (T_2 - T_1)$$

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \cong C_p (T_2 - T_1)$$

Από τον Πίνακα A.7, A.8, και A.6 σε T_{avg} ή A.5 στους 25°C

Από τον Πίνακα ΣΤ.5, ΣΤ.6 και ΣΤ.4 στους 77 F

Ενέργεια σε μορφή ρυθμού:

Ολοκληρωμένη εξίσωση ενέργειας:

$$\dot{E} = \dot{Q} = \dot{W}, \text{ ρυθμός} = +\text{είσοδος} - \text{έξοδος}$$

$E_2 - E_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2$. Μεταβολή = +είσοδος - έξοδος

$$m(e_2 - e_1) = m(u_2 - u_1) + \frac{1}{2} m(\mathbf{V}_2^2 - \mathbf{V}_1^2) + mg(Z_2 - Z_1)$$

Πολλαπλές μάζες, καταστάσεις:

$$E = m_A e_A + m_B e_B + m_C e_C + \dots$$

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Έργο: Ενέργεια σε μεταφορά, μηχανική, ηλεκτρική και χημική

Έργο μετατόπισης:
$$W = \int_1^2 F dx = \int_1^2 P dV = \int_1^2 S dA = \int_1^2 T d\theta$$

Ειδικό έργο: $w = W/m$ [έργο ανά μονάδα μάζας]

Ισχύς, ρυθμός έργου: $\dot{W} = FV = P \dot{V} = T\omega$ [\dot{V} ρυθμός μετατόπισης]
[ταχύτητα $V = r\omega$, ροπή στρέψης $T = Fr$, γωνιακή ταχύτητα $= \omega$]

$$\omega = \text{ακτίνια ανά δευτ.} = 2\pi (\text{rev/s}) = 2\pi (\text{rpm}/60)$$

rpm = περιστροφές ανά λεπτό

Πολυτροπική διεργασία: $PV^n = \text{σταθερά}$ ή $Pv^n = \text{σταθερά}$

Έργο πολυτροπικής διεργασίας:
$${}_1W_2 = \frac{1}{1-n} (P_2V_2 - P_1V_1) \quad \text{αν } n \neq 1$$

$${}_1W_2 = P_1V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \text{αν } n = 1$$

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Θερμότητα: Ενέργεια σε μεταφορά, που προκαλείται από ΔT

Μεταφορά θερμότητας με αγωγή: $\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \approx kA \frac{\Delta T}{L}$

Αγωγιμότητα: k [W/m K]

Μεταφορά θερμότητας με συναγωγή: $\dot{Q} = h_{\text{conv}} A \Delta T$

Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή: h_{conv} [W/m²K]

Βασικές έννοιες και σχέσεις...

Μεταφορά θερμότητας
με ακτινοβολία:

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{amb}}^4) \cdot (\text{καθαρή στο περιβάλλον})$$
$$= h_{\text{rad}} A (T_s - T_{\text{amb}}) = h_{\text{rad}} A \Delta T$$

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T_s^2 - T_{\text{amb}}^2)(T_s + T_{\text{amb}})(T_s - T_{\text{amb}})$$

Σταθερά Stefan-Boltzman:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

Θερμική αντίσταση:

$$\dot{Q} = C_q A \Delta T = \Delta T / R_t$$

$$R_t = 1 / C_q A$$

$$C_q = k/L \text{ ή } h_{\text{conv}} \text{ ή } h_{\text{rad}} \text{ (3 διαφορετικοί τρόποι)}$$

Θερμική σταθερά χρόνου:

$$\tau = \frac{m C_v}{C_q A} = m C_v R_t$$

Ολοκλήρωση ρυθμού:

$${}_1 Q_2 = \int \dot{Q} dt \approx \dot{Q}_{\text{avg}} \Delta t$$

Θερμοδυναμική

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!