

Τρόποι Μετάδοσης της θερμότητας:

ΔΙΑΛΕΞΗ - 4
27/10/2020

Αγωγή (*conduction*): Επαφή

Νόμος Fourier:
$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k_t \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{W})$$

όπου η σταθερά αναλογίας k_t παριστάνει τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού και αποτελεί μέτρο της ικανότητας του υλικού να άγει τη θερμότητα.

Συναγωγή (*convection*) : Σχετική κίνηση και επαφή

Νόμο ψύξης του Newton:
$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h \cdot A \cdot (T_s - T_f) \quad (\text{W})$$

όπου

h , ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή,

A , το εμβαδόν της επιφάνειας διαμέσου της οποίας γίνεται η μεταφορά θερμότητας,

T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας,

T_f η θερμοκρασία της κύριας μάζας του ρευστού.

Με ακτινοβολία (*radiation*)

Νόμος των Stefan-Boltzmann: $\dot{Q}_{\text{emit,max}} = \sigma \cdot A \cdot T_s^4$ (W)

T_s η απόλυτη θερμοκρασία επιφάνειας,

A το εμβαδόν της επιφανείας σ

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ η σταθερά *Stefan-Boltzmann*.

Η ιδανική επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία με το μέγιστο αυτό ρυθμό ονομάζεται μαύρο (**μέλαν**) σώμα και η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα τέτοιο σώμα ονομάζεται ακτινοβολία του μέλανος σώματος.

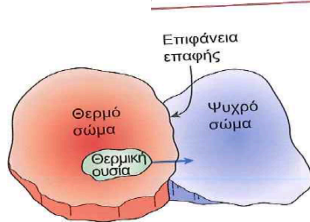
Πραγματική επιφάνεια (σώμα):

$$\dot{Q}_{\text{emit}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_s^4 \quad (\text{W})$$

όπου ο συντελεστής ε (0-1) ονομάζεται ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας.

Για το μέλαν σώμα $\varepsilon = 1$.

ΕΝΕΡΓΕΙΑ - ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΓΕΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ



Σχήμα 2-19:

Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, η θερμότητα θεωρείτο ως ένα αόρατο ρευστό ονομαζόμενο θερμιδική ουσία που έρχετο από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα σώματα.

κής θεωρίας αμφισβητήθηκε επίσης και από αρκετούς άλλους. Ωστόσο τα προσεκτικά πειράματα του James P. Joule (1818-1889), που δημοσιεύθηκαν το 1843, ήταν αυτά που τελικά έπεισαν τους σκεπτικιστές ότι η θερμότητα δεν ήταν κάποια ουσία, και έτσι η θερμιδική θεωρία τέθηκε στο περιθώριο. Αν και η θερμιδική θεωρία εγκαταλείφθηκε πλήρως στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, συνεισέφερε τα μέγιστα στην ανάπτυξη της θερμοδυναμικής και της μεταφοράς θερμότητας.

Η θερμότητα μεταφέρεται μέσω τριών μηχανισμών: **αγωγή**, **συναγωγή** και **ακτινοβολία**. **Αγωγή** είναι η μεταφορά ενέργειας από τα πιο ενεργητικά σωματίδια μιας ουσίας προς τα γειτονικά, λιγότερο ενεργητικά σωματίδια, ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ σωματιδίων. **Συναγωγή** είναι η μεταφορά ενέργειας μεταξύ μίας στερεάς επιφάνειας και του γειτνιαζόντος ρευστού που βρίσκεται σε κίνηση και εμπεριέχει τις συνδυασμένες επιδράσεις της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. **Ακτινοβολία** είναι η μεταφορά ενέργειας συνδυασμένες επιδράσεις της αγωγής και της κίνησης του ρευστού. **Ακτινοβολία** είναι η μεταφορά ενέργειας που οφείλεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ή φωτονίων). Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται μια επισκόπηση των τριών μηχανισμών μεταφοράς της θερμότητας, ως ένα Θέμα Ειδικού Ενδιαφέροντος.

2.4 Μεταφορά Ενέργειας Μέσω Έργου

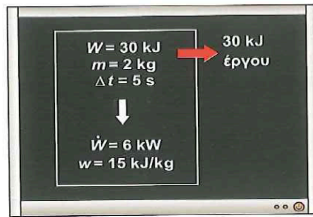
Το έργο, όπως η θερμότητα, αποτελεί μια ενεργειακή αλληλεπίδραση μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντός του. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ενέργεια μπορεί να διαπεράσει το όριο ενός κλειστού συστήματος με τη μορφή θερμότητας είτε έργου. Επομένως, εάν η ενέργεια που διαπερνά το όριο ενός κλειστού συστήματος δεν είναι θερμότητα, πρέπει να είναι έργο. Η θερμότητα είναι εύκολο να αναγνωριστεί: η μηχανική δύναμή της είναι μια διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο σύστημα και στο περιβάλλον του. Μπορούμε επομένως να ισχυριστούμε απλά ότι μια ενεργειακή αλληλεπίδραση η οποία δεν προκαλείται από μια θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντός του είναι έργο. Πιο συγκεκριμένα, ένα έργο αποτελεί μία μεταφορά ενέργειας που σχετίζεται με κάποια δύναμη η οποία ενεργεί από απόσταση. Ένα ανυψούμενο έμβολο, μια περιστρεφόμενη ράβδος, ή ένα ηλεκτροφόρο καλώδιο που διαπερνά το όριο ενός συστήματος, όλα αυτά σχετίζονται με αλληλεπιδράσεις έργου.

Το έργο είναι επίσης μια μορφή ενέργειας που μεταφέρεται όπως και η θερμότητα και συνεπώς, έχει μονάδες ενέργειας όπως το kJ. Το έργο που επιτελείται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας μεταξύ των καταστάσεων 1 και 2 συμβολίζεται ως W_{12} , ή απλά W . Το έργο που επιτελείται ανά μονάδα μάζας ενός συστήματος συμβολίζεται με w και εκφράζεται ως

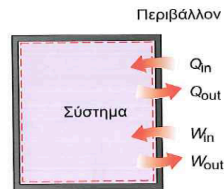
$$w = \frac{W}{m} \quad (\text{kJ/kg}) \quad (2.17)$$

Το επιτελούμενο έργο ανά μονάδα χρόνου ονομάζεται **ισχύς** και συμβολίζεται με W (Σχήμα 2-20). Η μονάδα μέτρησης της ισχύος είναι το kJ/s, ή kW.

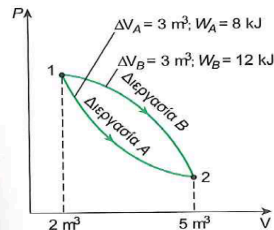
Η θερμότητα και το έργο είναι κατευθυντικές ποσότητες και επομένως, η πλήρης περιγραφή μιας αλληλεπίδρασης με τη μορφή θερμότητας είτε έργου απαιτεί τον καθορισμό τόσο του μέτρου όσο και της διεύθυνσής του. Ένας τρόπος για να το κάνουμε αυτό είναι να υιοθετήσουμε μια σύμβαση προσήμου. Η γενικά αποδεκτή **τυπική σύμβαση προσήμου**, για αλληλεπιδράσεις θερμότητας και έργου έχει ως εξής: η μεταφορά θερμότητας προς ένα σύστημα και το έργο που παράγεται από ένα σύστημα είναι θετικά: η μεταφορά θερμότητας από ένα σύστημα προς το περιβάλλον του και το έργο που επιτελείται σε ένα σύστημα είναι αρνητικά. Ένας άλλος τρόπος είναι η χρήση δεικτών *in*, ή *es* και *out* ή *ez* για την κατάδειξη της κατεύθυνσης (Σχήμα 2-21). Για παράδειγμα,



Σχήμα 2-20: Οι σχέσεις μεταξύ των w, W και \dot{W} .



Σχήμα 2-21



Σχήμα 2-22: Οι ιδιότητες είναι συναρτήσεις σημείου. Ωστόσο, η θερμότητα και το έργο είναι συναρτήσεις μετάβασης (οι τιμές τους εξαρτώνται από την ακολουθούμενη διαδρομή).

Οι **συναρτήσεις μετάβασης** έχουν **ατελή διαφορικά**, που προσδιορίζονται με το σύμβολο δ . Επομένως, μια διαφορική ποσότητα θερμότητας ή έργου αναπαρίσταται ως δQ ή δW , αντίστοιχα, αντί των dQ ή dW . Ωστόσο, οι ιδιότητες είναι **συναρτήσεις σημείου** (δηλαδή εξαρτώνται μόνον από την κατάσταση και όχι από τον τρόπο με τον οποίο ένα σύστημα προσεγγίζει αυτήν την κατάσταση) και έχουν τέλεια διαφορικά, που προσδιορίζονται με το σύμβολο d . Για παράδειγμα, μια μικρή μεταβολή του όγκου, αναπαρίσταται με dV ενώ η συνολική μεταβολή του όγκου κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας μεταξύ των καταστάσεων 1 και 2 είναι

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1 = \Delta V$$

Επομένως, η μεταβολή του όγκου κατά τη διάρκεια της διεργασίας 1-2 ισούται πάντοτε με τον όγκο στην κατάσταση 2 μείον τον όγκο στην κατάσταση 1, ανεξάρτητα από τη διαδρομή που ακολουθεί η διεργασία (Σχήμα 2-22). Το συνολικό έργο που επιτελείται κατά τη διεργασία 1-2, ωστόσο, είναι

$$\int_1^2 \delta W = W_{12} \quad (\text{όχι } \Delta W)$$

ένα έργο εισόδου των 5 kJ μπορεί να εκφραστεί ως $W_{in} = 5$ kJ, ενώ μια απώλεια θερμότητας των 3kJ μπορεί να γραφεί ως $Q_{out} = 3$ kJ. Όταν η κατεύθυνση της αλληλεπίδρασης με τη μορφή θερμότητας ή έργου δεν είναι γνωστή, μπορούμε απλά να υποθέσουμε μια κατεύθυνση για την αλληλεπίδραση (χρησιμοποιώντας το δείκτη *in*, ή *out*) και να την επιλύσουμε. Ένα θετικό αποτέλεσμα δείχνει ότι η υποθεθείσα κατεύθυνση είναι σωστή. Αντίθετα, ένα αρνητικό αποτέλεσμα δείχνει ότι η κατεύθυνση της αλληλεπίδρασης είναι η αντίθετη από αυτήν που υποθέσαμε αρχικά. Αυτό είναι εντελώς ανάλογο με το να υποθέσουμε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση για μια άγνωστη δύναμη επιλύοντας ένα πρόβλημα στατικής μηχανικής, και να αντιστρέψουμε την κατεύθυνση όταν ληφθεί ένα αρνητικό αποτέλεσμα για τη δύναμη. Θα χρησιμοποιούμε αυτήν τη *δαισθητική προσέγγιση* σε αυτό το βιβλίο, καθώς εξαλείφει την ανάγκη υιοθέτησης μιας τυπικής σύμβασης καθώς και την ανάγκη προσεκτικής ανάθεσης αρνητικών τιμών σε κάποιες αλληλεπιδράσεις.

Σημειώστε ότι μια ποσότητα που μεταφέρεται από ή προς το σύστημα κατά τη διάρκεια μιας αλληλεπίδρασης δεν αποτελεί ιδιότητα του συστήματος αφού το ποσό μιας τέτοιας ποσότητας εξαρτάται περισσότερο από αυτήν ακριβώς την κατάσταση του συστήματος. Η θερμότητα και το έργο αποτελούν *μηχανισμούς μεταφοράς ενέργειας* μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντός του, και υπάρχουν μεταξύ τους πολλές ομοιότητες:

1. Αμφότερα αναγνωρίζονται στα όρια του συστήματος, καθώς τα διασχίζουν. Δηλαδή, τόσο η θερμότητα όσο και το έργο είναι (συν) οριακά φαινόμενα.
2. Τα συστήματα κατέχουν ενέργεια, αλλά όχι θερμότητα ή έργο.
3. Τόσο το έργο όσο και η θερμότητα σχετίζονται με μια *διεργασία* και όχι με μια κατάσταση. Αντίθετα λοιπόν από τις ιδιότητες ενός συστήματος, η θερμότητα ή το έργο δεν έχουν νόημα σε μια κατάσταση.
4. Αμφότερα το έργο και η θερμότητα είναι *συναρτήσεις μετάβασης* (δηλαδή οι τιμές τους εξαρτώνται από τη διαδρομή που ακολουθείται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, καθώς και από την αρχική και την τελική κατάσταση αυτής της διαδρομής).

Δηλαδή το συνολικό έργο περιγράφεται από τη διαδρομή. Το ολοκληρωμένο έργο είναι διαφορετικά ποσά έργα (δW) καθώς ακολουθούμε αυτή τη διαδρομή. Το ολοκληρωμένο έργο είναι 0 (δηλαδή με το έργο στην κατάσταση 2 μείον το έργο στην κατάσταση 1), που δεν έχει νόημα, εφόσον το έργο δεν αποτελεί ιδιότητα του συστήματος και τα συστήματα δεν κατέχουν έργο όταν βρίσκονται σε μια κατάσταση.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-3: Καύση ενός Κεριού σε ένα Μονωμένο Δωμάτιο

Ένα κεριό καίγεται σε ένα επαρκώς μονωμένο δωμάτιο. Θεωρώντας ως σύστημα ολόκληρο το δωμάτιο (τον αέρα και το κεριό), να προσδιορίσετε: (α) εάν υπάρχει οποιαδήποτε μεταφορά θερμότητας κατά τη διάρκεια της διεργασίας καύσης και (β) εάν υπάρχει μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια του συστήματος.

Λύση: Θεωρούμε ένα κεριό που καίγεται σε ένα επαρκώς μονωμένο δωμάτιο. Ζητείται να προσδιοριστεί εάν υπάρχει οποιαδήποτε μεταφορά θερμότητας και οποιαδήποτε μεταβολή στην εσωτερική ενέργεια.

Ανάλυση (α) Οι εσωτερικές επιφάνειες του δωματίου αποτελούν το όριο του συστήματος όπως φαίνεται από τις διακεκομμένες γραμμές στο Σχήμα 2-23. Όπως τονίστηκε παραπάνω, η θερμότητα αναγνωρίζεται καθώς διασχίζει τα όρια. Εφόσον το δωμάτιο είναι επαρκώς μονωμένο, έχουμε ένα αδιαβατικό σύστημα και δεν θα διαπεράσει τα όριά του καμία ποσότητα θερμότητας. Επομένως, για τη διεργασία αυτή $Q = 0$.

(β) Η εσωτερική ενέργεια του συστήματος περιλαμβάνει ενέργειες που υπάρχουν σε διάφορες μορφές (αισθητή, λανθάνουσα, χημική, πυρηνική). Κατά τη διάρκεια της διεργασίας που μόλις περιγράψαμε, μέρος της χημικής ενέργειας μετατρέπεται σε αισθητή ενέργεια. Εφόσον δεν υπάρχει αύξηση ή ελάττωση στη συνολική εσωτερική ενέργεια του συστήματος για τη συγκεκριμένη διεργασία θα είναι $\Delta U = 0$ για τη διεργασία αυτή.



Σχήμα 2-23: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-3.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-4: Ψήσιμο μιας Πατάτας σε ένα Φούρνο

Μια πατάτα, ευρισκόμενη αρχικά σε θερμοκρασία δωματίου (25°C) ψήνεται σε έναν φούρνο που διατηρείται σε θερμοκρασία 200°C , όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-24. Υπάρχει μεταφορά θερμότητας κατά τη διεργασία ψήσιματος;

Λύση: Μια πατάτα ψήνεται σε έναν φούρνο. Ζητείται να καθοριστεί εάν υπάρχει κάποια μεταφορά θερμότητας κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας.

Ανάλυση Το πρόβλημα αυτό δεν είναι καλώς ορισμένο, εφόσον το σύστημα δεν προσδιορίζεται. Ας υποθέσουμε ότι θεωρούμε μόνο την πατάτα, που θα είναι το σύστημα μας. Τότε η εξώτερη επιφάνεια της φλούδας της πατάτας μπορεί να θεωρηθεί ως το όριο του συστήματος. Μέρος της ενέργειας του φούρνου θα διασχίσει τη φλούδα της πατάτας. Εφόσον η κινητήρια δύναμη για τη συγκεκριμένη μεταφορά ενέργειας είναι μια θερμοκρασιακή διαφορά, αυτή είναι μια διεργασία μεταφοράς θερμότητας.



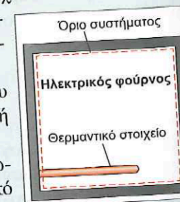
Σχήμα 2-24: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-4.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-5: Θέρμανση ενός Φούρνου μέσω Μεταφοράς Έργου

Ένας καλά μονωμένος ηλεκτρικός φούρνος θερμαίνεται από το θερμαντικό του στοιχείο. Εάν ολόκληρη η συσκευή, συμπεριλαμβανομένου και του θερμαντικού στοιχείου, θεωρηθεί ως το σύστημα υπό μελέτη, να καθορίσετε εάν η συγκεκριμένη διεργασία είναι αλληλεπίδραση θερμότητας ή έργου.

Λύση: Ένας καλά μονωμένος ηλεκτρικός φούρνος θερμαίνεται από το θερμαντικό του στοιχείο. Ζητείται να καθοριστεί εάν αυτή είναι μια αλληλεπίδραση θερμότητας ή έργου.

Ανάλυση Για το πρόβλημα αυτό, οι εσωτερικές επιφάνειες του φούρνου διαμορφώνουν το όριο του συστήματος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-25. Το ενεργειακό περιεχόμενο του φούρνου προφανώς αυξάνει κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας, όπως φανεράει η άνοδος της θερμοκρασίας. Αυτή η μεταφορά ενέργειας προς το φούρνο δεν προκαλείται από μια διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του φούρνου και του



Σχήμα 2-25: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-5.

περιβάλλοντα αέρα. Αντίθετα, οφείλεται στα ηλεκτρόνια που διαπερνούν το όριο του συστήματος και κατά συνέπεια παράγουν έργο σε αυτό. Επομένως αυτή είναι μια αλληλεπίδραση έργου.

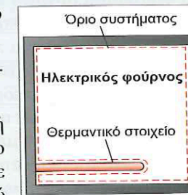
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-6: Θέρμανση ενός Φούρνου μέσω Μεταφοράς Θερμότητας

Να απαντήσετε στο ερώτημα του Παραδείγματος 2-5, εάν ως σύστημα θεωρηθεί μόνο ο αέρας εντός του φούρνου, χωρίς το θερμαντικό στοιχείο.

Λύση: Επανεξετάζεται το ερώτημα του Παραδείγματος 2-5 λαμβάνοντας ως σύστημα μόνον τον αέρα στο εσωτερικό του φούρνου.

Ανάλυση Αυτήν τη φορά, το όριο του συστήματος θα περιλαμβάνει την εξωτερική επιφάνεια του θερμαντικού στοιχείου και δεν θα το διαπερνά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-26. Επομένως τα ηλεκτρόνια δεν θα διαπερνούν το όριο του συστήματος σε κάθε σημείο. Αντίθετα, η ενέργεια που παράγεται στο εσωτερικό του θερμαντικού στοιχείου θα μεταφερθεί στον αέρα γύρω από αυτό, ως αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θερμαντικού στοιχείου και του αέρα στο εσωτερικό του φούρνου. Επομένως αυτή είναι μια διεργασία μεταφοράς θερμότητας.

Συζήτηση Σε αμφοτέρους τις περιπτώσεις, η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται στον αέρα είναι η ίδια. Τα δύο αυτά παραδείγματα δείχνουν ότι μια μεταφορά ενέργειας μπορεί να χαρακτηριστεί ως θερμότητα ή ως έργο, ανάλογα με το τι επιλέγεται ως σύστημα.



Σχήμα 2-26: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-6.

Ηλεκτρικό Έργο

Στο Παράδειγμα 2-5 αναφέρθηκε ότι τα ηλεκτρόνια διαπερνώντας το όριο του συστήματος, παράγουν έργο στο σύστημα. Σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, τα ηλεκτρόνια σε έναν αγωγό κινούνται υπό την επίδραση ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων, παράγοντας έργο. Όταν ηλεκτρικό φορτίο N coulombs μετακινείται διαμέσου μιας διαφοράς δυναμικού V , το ηλεκτρικό έργο που παράγεται είναι

$$W_{\eta\lambda} = VN$$

που μπορεί επίσης να εκφράζεται σε μορφή ρυθμού μεταβολής ως

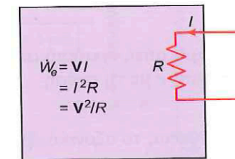
$$\dot{W}_{\eta\lambda} = V \cdot I \quad (\text{W}) \quad (2.18)$$

όπου $\dot{W}_{\eta\lambda}$ είναι η **ηλεκτρική ισχύς** και I το πλήθος των ηλεκτρικών φορτίων που ρέουν στη μονάδα του χρόνου, δηλαδή, το **ηλεκτρικό ρεύμα** (Σχήμα 2-27). Γενικά, τόσο η τάση V όσο και το ρεύμα I μεταβάλλονται με το χρόνο, και το ηλεκτρικό έργο που παράγεται κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος Δt εκφράζεται ως

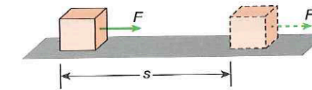
$$W_{\eta\lambda} = \int_1^2 VI \Delta t \quad (\text{kJ}) \quad (2.19)$$

Όταν αμφοτέρα η τάση V και το ρεύμα I παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος Δt , η παραπάνω σχέση απλοποιείται στην

$$W_{\eta\lambda} = VI \Delta t \quad (\text{kJ}) \quad (2.20)$$



Σχήμα 2-27: Ηλεκτρικό έργο συνάρτησης της αντίστασης R , της έντασης ηλεκτρικού ρεύματος I και της διαφοράς δυναμικού V .



Σχήμα 2-28: Το παραγόμενο έργο είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης δύναμης F και της διανυόμενης απόστασης s .

2.5 Μηχανικές Μορφές Έργου

Υπάρχουν αρκετοί και διαφορετικοί τρόποι παραγωγής έργου, ο καθένας σχετίζεται με κάποιο τρόπο με μία δύναμη που δρα από απόσταση (Σχήμα 2-28). Στη βασική μηχανική, το έργο που παράγεται από μια σταθερή δύναμη F σε ένα σώμα που μετατοπίζεται κατά απόσταση s και κατά τη διεύθυνση της δύναμης, δίνεται από τη σχέση:

$$W = Fs \quad (\text{kJ}) \quad (2.21)$$

Εάν η δύναμη F δεν παραμένει σταθερή, τότε το έργο που παράγεται υπολογίζεται προσθέτοντας (δηλ. ολοκληρώνοντας) τα διαφορικά ποσά του έργου,

$$W = \int_1^2 F ds \quad (\text{kJ}) \quad (2.22)$$

Προφανώς, χρειάζεται κάποιος να γνωρίζει πως μεταφορικά αυτό το ολοκλήρωμα. Οι εξισώσεις 2.21 και 2.22 δίνουν μόνο το μέτρο του έργου. Το πρόσημο καθορίζεται εύκολα από τη φυσική εξέταση: Το έργο που προσδίδεται σε ένα σύστημα από μια εξωτερική δύναμη που ενεργεί στην κατεύθυνση της κίνησης είναι αρνητικό, και το έργο που παράγεται από ένα σύστημα ενάντια σε μια εξωτερική δύναμη που δρα στην αντίθετη κατεύθυνση της κίνησης είναι θετικό.

Υπάρχουν δύο προϋποθέσεις για να υπάρχει μια αλληλεπίδραση έργου ανάμεσα σε ένα σύστημα και το περιβάλλον του: (1) θα πρέπει να υπάρχει μια δύναμη που να επιδρά στο όριο του συστήματος, και (2) το όριο αυτό πρέπει να μετακινείται. Επομένως, η παρουσία δυνάμεων στο όριο, χωρίς οποιαδήποτε μετατόπιση του δεν αποτελεί αλληλεπίδραση έργου. Παρόμοια, η μετατόπιση του ορίου, χωρίς κάποια δύναμη που να αντιτίθεται είτε να προκαλεί αυτήν την κίνηση (όπως η εκτόνωση ενός αερίου σε κενό), δεν αποτελεί αλληλεπίδραση έργου εφόσον δεν μεταφέρεται ενέργεια.

Σε πολλά προβλήματα θερμοδυναμικής, το μηχανικό έργο αποτελεί τη μοναδική εμπλεκόμενη μορφή έργου. Αυτό σχετίζεται με την κίνηση του ορίου ενός συστήματος ή με τη μετατόπιση ολόκληρου του συστήματος ως συνόλου. Ορισμένες συνήθεις μορφές μηχανικού έργου σχολιάζονται στη συνέχεια.

Έργο Περιστροφής Άξονα

Η μετάδοση ενέργειας μέσω ενός περιστρεφόμενου άξονα είναι πολύ συνηθισμένη σε εφαρμογές μηχανικής (Σχήμα 2-29). Συχνά, η εφαρμοζόμενη ροπή στρέψης T που εφαρμόζεται στον άξονα είναι σταθερή, που σημαίνει ότι η εφαρμοζόμενη δύναμη F είναι επίσης σταθερή. Για μια συγκεκριμένη σταθερή ροπή στρέψης, το παραγόμενο έργο κατά τη διάρκεια n περιστροφών προσδιορίζεται ως εξής: Μια δύναμη F η οποία δρα μέσω ενός βραχίονα ροπής r αναπτύσσει μια ροπή T (Σχήμα 2-30)

$$T = Fr \rightarrow F = \frac{T}{r} \quad (2.23)$$

Η δύναμη αυτή δρα από απόσταση s , η οποία σχετίζεται με την ακτίνα περιστροφής r με τη σχέση

$$s = (2\pi r)n \quad (2.24)$$

Κατά συνέπεια, το αξονικό έργο προσδιορίζεται ως

$$W_{αξ} = Fs = \frac{(T)}{(r)}(2\pi rn) = 2\pi nT \quad (\text{kJ}) \quad (2.25)$$

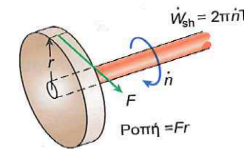
Η ισχύς που μεταδίδεται μέσω του άξονα είναι το παραγόμενο αξονικό έργο ανά μονάδα χρόνου, που μπορεί να εκφράζεται ως

$$\dot{W}_{αξ} = 2\pi nT \quad (\text{kW}) \quad (2.26)$$

όπου n είναι το πλήθος των περιστροφών ανά μονάδα χρόνου.



Σχήμα 2-29: Η μεταφορά ενέργειας διαμέσου αξόνων περιστροφής συναντάται ευρέως στην πράξη.



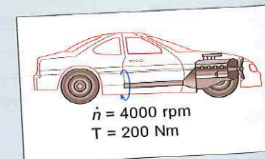
Σχήμα 2-30: Το αξονικό έργο είναι ανάλογο της εφαρμοζόμενης ροπής στρέψης και του πλήθους των περιστροφών του άξονα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-7: Μετάδοση ισχύος μέσω Άξονα Αυτοκινήτου

Να προσδιορίσετε την ισχύ που μεταδίδεται με τη βοήθεια του άξονα ενός αυτοκινήτου, όταν η εφαρμοζόμενη ροπή στρέψης είναι 200 N·m και ο άξονας περιστρέφεται με ρυθμό 4.000 στροφών ανά λεπτό.

Λύση: Δίνονται η ροπή στρέψης και οι στροφές ανά λεπτό μιας μηχανής αυτοκινήτου. Ζητείται να προσδιοριστεί η μεταδιδόμενη ισχύς.

Ανάλυση Ένα διάγραμμα του αυτοκινήτου δίνεται στο Σχήμα 2-31. Η ισχύς του άξονα προσδιορίζεται κατευθείαν από τη σχέση



Σχήμα 2-31: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-7.

$$\dot{W}_{αξ} = 2\pi nT = (2\pi) \left(4.000 \frac{1}{\text{min}} \right) (200 \text{ N} \cdot \text{m}) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1.000 \text{ N} \cdot \text{m}} \right) = 83,8 \text{ kW} \text{ (ή 112 hp)}$$

Συζήτηση Παρατηρείστε ότι η ισχύς που μεταδίδεται μέσω του άξονα είναι ανάλογη της ροπής στρέψης και της ταχύτητας περιστροφής.

Έργο Ελατηρίου

Είναι σε όλους γνωστό ότι όταν μια δύναμη εφαρμόζεται σε ένα ελατήριο, το μήκος του ελατηρίου μεταβάλλεται (Σχήμα 2-32). Όταν το μήκος του ελατηρίου μεταβάλλεται κατά μια διαφορική ποσότητα dx υπό την επίδραση μιας δύναμης F , τότε το παραγόμενο έργο είναι

$$\delta W_{ελ} = F dx \quad (2.27)$$

Για να προσδιορίσουμε το συνολικό έργο του ελατηρίου, χρειάζεται να γνωρίζουμε τη συναρτησιακή εξάρτηση των F και x . Για γραμμικά ελαστικά ελατήρια, η μετατόπιση x είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης δύναμης (Σχήμα 2-33). Δηλαδή,

$$F = kx \quad (\text{kN}) \quad (2.28)$$

όπου k η σταθερά του ελατηρίου σε μονάδες kN/m. Η μετατόπιση x μετράται από τη θέση ηρεμίας του άκρου του ελατηρίου (δηλαδή $x = 0$ όταν $F = 0$). Αντικαθιστώντας την Εξ. 2.28 στην 2.27 και ολοκληρώνοντας προκύπτει

$$W_{ελ} = \frac{1}{2} k (x_2^2 - x_1^2) \quad (\text{kJ}) \quad (2.29)$$

όπου x_1 και x_2 η αρχική και η τελική μετατόπιση του ελατηρίου, αντίστοιχα, μετρούμενες από την αρχική θέση ηρεμίας του άκρου του ελατηρίου.

Υπάρχουν πολλές άλλες μορφές μηχανικού έργου. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζουμε σύντομα μερικές από αυτές.

Παραγόμενο Έργο σε Ελαστικές Στερεές Ράβδους

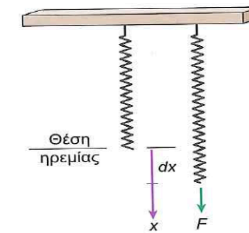
Τα στερεά σώματα μοντελοποιούνται συχνά ως γραμμικά ελατήρια, επειδή συστέλλονται ή επιμηκύνονται υπό την επίδραση κάποιας δύναμης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-34 και όταν η δύναμη καταργείται αυτά επιστρέφουν στα αρχικά τους μήκη, όπως ένα ελατήριο. Αυτό βέβαια ισχύει όσο η δύναμη βρίσκεται εντός της ελαστικής περιοχής, δηλαδή, δεν είναι τόσο ισχυρή ώστε να προκαλέσει μόνιμες (πλαστικές) παραμορφώσεις. Επομένως, οι εξισώσεις που δίνονται για ένα γραμμικό ελατήριο μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για ελαστικές στερεές ράβδους. Εναλλακτικά, μπορούμε να προσδιορίσουμε το έργο που σχετίζεται με την επιμήκυνση ή με τη συστολή μιας ελαστικής στερεάς ράβδου, αντικαθιστώντας στην έκφραση του έργου την πίεση P με το αντίστοιχο μέγεθος στα στερεά, που είναι η *ορθή μηχανική καταπόνηση* $\sigma_n = F/A$,

$$W_{ελαστ} = \int_1^2 F dx = \int_1^2 \sigma_n A dx \quad (\text{kJ}) \quad (2.30)$$

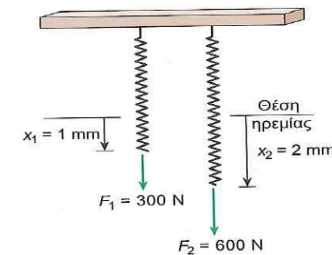
όπου A το εμβαδό διατομής της ράβδου. Παρατηρείστε ότι η καταπόνηση εκφράζεται σε μονάδες πίεσης.

Έργο Διάτασης Υγρού Υμενίου

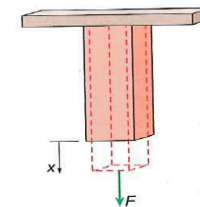
Θεωρούμε ένα υγρό υμένιο, όπως αυτό της σαπουνόφουσκας, η οποία αναρτάται σε ένα συμμάτινο πλαίσιο (Σχήμα 2-35). Από την εμπειρία μας γνωρίζουμε ότι απαιτείται κάποια δύναμη, για να υποστεί διάταση αυτό το υμένιο, μέσω του κινούμενου τμήματος του συμμάτινου πλαισίου. Αυτή η δύναμη χρησιμοποιείται για να υπερνικήσει τις μικροσκοπικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων στις διεπαφές μεταξύ υγρού - αέρα. Αυτές οι



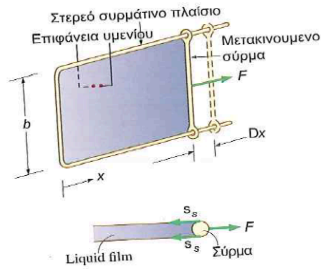
Σχήμα 2-32: Επιμήκυνση ενός ελατηρίου υπό την επίδραση μιας δύναμης.



Σχήμα 2-33: Η μετατόπιση ενός γραμμικού ελατηρίου διπλασιάζεται, όταν διπλασιάζεται η εφαρμοζόμενη δύναμη.



Σχήμα 2-34: Οι στερεές ράβδοι συμπεριφέρονται ως ελατήρια, υπό την επίδραση κάποιας δύναμης.



Σχήμα 2-35: Διάταση ενός υγρού υμενίου χρησιμοποιώντας ένα κινούμενο σύρμα.

Μικροσκοπικές δυνάμεις είναι κάθετες σε κάθε γραμμή που ανήκει στην επιφάνεια του υμενίου και η συνολική δύναμη ανά μονάδα μήκους που δημιουργείται από όλες αυτές τις δυνάμεις, ονομάζεται **επιφανειακή τάση** σ_s , και μετράται σε N/m. Επομένως, το έργο που σχετίζεται με τη διάταση ενός υμενίου ονομάζεται επίσης **έργο επιφανειακής τάσης** και προσδιορίζεται από τη σχέση

$$W_s = \int_1^2 \sigma_s dA \quad (\text{kJ}) \quad (2.31)$$

όπου $dA=2b dx$ είναι η μεταβολή του εμβαδού της επιφάνειας του υμενίου. Ο παράγοντας 2 οφείλεται στο γεγονός ότι το υμένιο εμφανίζει δύο επιφάνειες διεπαφής με τον αέρα. Η δύναμη που εφαρμόζεται στο κινούμενο σύρμα ως αποτέλεσμα της επιφανειακής τάσης, ισούται με $F = 2b\sigma_s$, όπου σ_s είναι η δύναμη επιφανειακής τάσης ανά μονάδα μήκους.

Δαπανώμενο Έργο για Ανύψωση ή Επιτάχυνση ενός Σώματος

Όταν ένα σώμα ανυψώνεται εντός βαρυντικού πεδίου, η δυναμική του ενέργεια αυξάνεται. Παρόμοια, όταν ένα σώμα επιταχύνεται, αυξάνει η κινητική του ενέργεια. Η αρχή διατήρησης της ενέργειας απαιτεί ότι πρέπει να μεταφέρεται μια ισοδύναμη ποσότητα ενέργειας στο σώμα που ανυψώνεται ή επιταχύνεται. Ενθυμούμενοι ότι η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί προς μια ορισμένη μάζα μόνο μέσω θερμότητας ή έργου και ότι η ενέργεια που μεταφέρεται στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι θερμότητα, αφού δεν οδηγείται από κάποια διαφορά θερμοκρασίας. Επομένως αυτή θα πρέπει να είναι έργο. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι (1) η μεταφορά έργου που απαιτείται για την ανύψωση ενός σώματος ισούται με τη μεταβολή στη δυναμική ενέργεια του σώματος, και (2) η μεταφορά έργου που χρειάζεται για να επιταχύνει ένα σώμα ισούται με τη μεταβολή στην κινητική ενέργεια του σώματος (Σχήμα 2-36). Με παρόμοιο τρόπο, η δυναμική ή η κινητική ενέργεια ενός σώματος αναπαριστά το έργο που μπορεί να ληφθεί από το σώμα αυτό, καθώς κατέρχεται στο επίπεδο αναφοράς ή επιβραδύνεται μέχρις ότου μηδενιστεί η ταχύτητά του.

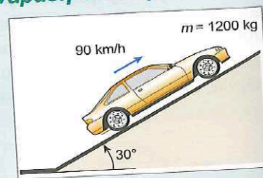


Σχήμα 2-36: Η ενέργεια που μεταφέρεται σε ένα σώμα καθώς ανυψώνεται ισούται με τη μεταβολή της δυναμικής του ενέργειας.

Αυτή η συζήτηση σε συνδυασμό με τη θεώρηση των τριβών και άλλων απωλειών, αποτελούν τη βάση για τον καθορισμό του αναγκαίου ρυθμού παραγωγής ισχύος των κινητήρων που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση συσκευών και διατάξεων όπως είναι για παράδειγμα οι ανελκυστήρες, τα ανυψωτικά μηχανήματα, οι ταινιόδρομοι μεταφοράς υλικών, και οι αναβατήρες χιονοδρόμων. Διαδραματίζει επίσης έναν πρωτεύοντα ρόλο στη σχεδίαση των μηχανών αυτοκινήτων και αεροσκαφών, καθώς επίσης και στον προσδιορισμό της ποσότητας υδροηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί από μια συγκεκριμένη υδάτινη δεξαμενή και η οποία είναι απλά η δυναμική ενέργεια του νερού ως προς τη θέση του υδραυλικού στροβίλου.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-8: Απαιτήσεις Ισχύος ενός Αυτοκινήτου κατά την Ανάβαση σε Λόφο

Θεωρήστε ένα αυτοκίνητο μάζας 1.200 kg το οποίο κινείται ευθύγραμμα και ομαλά σε επίπεδο δρόμο με ταχύτητα 90 km/h. Τώρα το αυτοκίνητο αρχίζει να ανεβαίνει σε ένα λόφο κλίσης 30° σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο (Σχήμα 2-37). Εάν η ταχύτητα του αυτοκινήτου πρόκειται να παραμείνει σταθερή κατά τη διάρκεια της ανάβασης, να προσδιορίσετε την πρόσθετη ισχύ που πρέπει να παρέχει ο κινητήρας του αυτοκινήτου.



Σχήμα 2-37: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-8.

Λύση: Ένα αυτοκίνητο πρόκειται να ανεβεί σε έναν λόφο διατηρώντας σταθερή ταχύτητα. Πρόκειται να προσδιοριστεί η απαιτούμενη επιπρόσθετη ισχύς.

Ανάλυση Η επιπλέον απαιτούμενη ισχύς είναι απλά το έργο ανά μονάδα χρόνου το οποίο πρέπει να παραχθεί, για να επιτευχθεί η ανάβαση του αυτοκινήτου, κάτι που ισούται με τη μεταβολή στη δυναμική ενέργεια του αυτοκινήτου ανά μονάδα χρόνου:

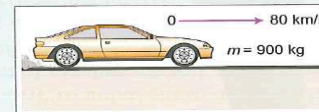
$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{prop}} &= mg \Delta z / \Delta t = mg v_{\text{κάθετη}} = (1200 \text{ kg})(9,81 \text{ m/s}^2)(90 \text{ km/h})(\sin 30^\circ) \left(\frac{1 \text{ m/s}}{3,6 \text{ km}} \right) \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{100 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = \\ &= 147 \text{ kJ/s} = \mathbf{147 \text{ kW}} \quad (\text{ή } 197 \text{ hp}) \end{aligned}$$

Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Συζήτηση Σημειώστε ότι ο κινητήρας του αυτοκινήτου θα πρέπει να αναπτύξει μια πρόσθετη ισχύ σχεδόν 200 hp, κατά την ανάβαση του λόφου, εάν το αυτοκίνητο πρόκειται να διατηρεί την ταχύτητά του.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-9: Απαιτούμενη Ισχύς για την Επιτάχυνση ενός Αυτοκινήτου

Να προσδιορίσετε την ισχύ που απαιτείται για να επιταχύνει ένα αυτοκίνητο μάζας 900 kg, όπως αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-38, από ακινησία σε μια ταχύτητα 80 km/h, σε χρόνο 20s, κινούμενο σε επίπεδο δρόμο.



Σχήμα 2-38: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-9.

Λύση: Ζητείται να προσδιοριστεί η ισχύς που απαιτείται για να επιταχύνει ένα αυτοκίνητο σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα.

Ανάλυση Το έργο που απαιτείται για την επιτάχυνση ενός σώματος είναι απλά η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του σώματος,

$$W_a = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) = \frac{1}{2} (900 \text{ kg}) \left[\left(\frac{80.000 \text{ m}}{3.600 \text{ s}} \right)^2 - 0^2 \right] \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1.000 \text{ m}^2 / \text{s}^2} \right) = 222 \text{ kJ}$$

Η μέση ισχύς υπολογίζεται ως

$$\dot{W}_a = \frac{W_a}{\Delta t} = \frac{222 \text{ kJ}}{20 \text{ s}} = \mathbf{11,1 \text{ kW}} \quad (\text{ή } 14,9 \text{ hp})$$

Συζήτηση Η πρόσθετη αυτή ισχύς απαιτείται προκειμένου για να υπερνικήσει την τριβή, την αντίσταση κύλισης, καθώς και άλλες ανεπάρκειες.

Μη Μηχανικές Μορφές Έργου

Η θεώρηση στην Ενότητα 2-5, αντιπροσωπεύει μια αρκετά περιεκτική κάλυψη των μηχανικών μορφών έργου, εκτός από την περίπτωση του έργου κινούμενου ορίου, η οποία μελετάται στο Κεφ. 4. Μερικοί τύποι έργου που συναντώνται στην πράξη, δεν είναι μηχανικής φύσης. Ωστόσο, αυτοί οι μη μηχανικοί τύποι έργου μπορούν να αντιμετωπιστούν με έναν ανάλογο τρόπο, ταυτοποιώντας μια γενικευμένη δύναμη F , η οποία δρα κατά τη διεύθυνση μιας γενικευμένης μετατόπισης x . Τότε, το έργο που σχετίζεται με τη διαφορική μετατόπιση, υπό την επίδραση της δύναμης αυτής, προσδιορίζεται από τη σχέση $\delta W = F dx$.

Μερικά παραδείγματα μη μηχανικών τύπων έργου είναι το **ηλεκτρικό έργο**, όπου η γενικευμένη δύναμη είναι η τάση (ηλεκτρικό δυναμικό) και η γενικευμένη μετατόπιση είναι το ηλεκτρικό φορτίο, όπως συζητήθηκε προηγουμένως· το **μαγνητικό έργο**, όπου η γενικευμένη δύναμη είναι η έγταση του μαγνητικού πεδίου και η γενικευμένη μετατόπιση είναι η συνολική μαγνητική διπολική ροπή· και το **έργο ηλεκτρικής πόλωσης**, όπου η γενικευμένη δύναμη είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η γενικευμένη μετατόπιση είναι η πόλωση του μέσου (το άθροισμα των ηλεκτρικών διπολικών στροφομορών των μορίων). Λεπτομερείς θεωρήσεις αυτών καθώς και άλλων ακόμη τύπων μη μηχανικού έργου μπορούν να βρεθούν σε εξειδικευμένα βιβλία σε αυτά τα ζητήματα.

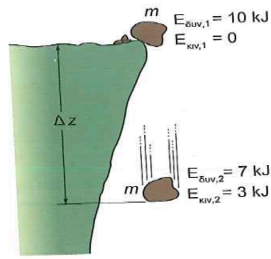
2.6 Ο Πρώτος Νόμος της Θερμοδυναμικής*

Μέχρι τώρα, έχουμε θεωρήσει μεμονωμένα διάφορες μορφές ενέργειας, όπως τη θερμότητα Q , το έργο W και την ολική ενέργεια E , και δεν έγινε κάποια προσπάθεια συσχέτισης μεταξύ τους κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας. Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής, επίσης γνωστός και ως αρχή διατήρησης της ενέργειας, παρέχει ένα στέρεο υπόβαθρο για τη μελέτη των σχέσεων μεταξύ των διαφόρων μορφών ενέργειας, καθώς και των ενεργειακών αλληλεπιδράσεων. Βασισμένος σε πειραματικές παρατηρήσεις, ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής δηλώνει ότι η ενέργεια δεν μπορεί ούτε να δημιουργηθεί, ούτε να καταστραφεί, κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας· μπορεί μόνο να αλλάζει μορφές. Επομένως θα πρέπει να θεωρείται κάθε ποσότητα ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας.

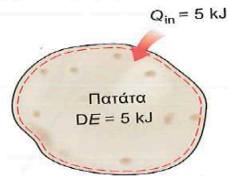
Όλοι γνωρίζουμε ότι ένας βράχος σε κάποιο ύψος κατέχει κάποια δυναμική ενέργεια, και ότι μέρος αυτής της δυναμικής ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική, καθώς ο βράχος πέφτει (Σχήμα 2-39). Τα πειραματικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι η ελάττωση της δυναμικής ενέργειας ($mg\Delta z$) είναι ακριβώς ίση με την αύξηση της κινητικής ενέργειας ($m(v_2^2 - v_1^2)/2$) όταν η αντίσταση του αέρα θεωρηθεί αμελητέα, επιβεβαιώνοντας επομένως την αρχή διατήρησης της ενέργειας, όσον αφορά τη μηχανική ενέργεια.

Θεωρούμε ένα σύστημα που υφίσταται μια σειρά αδιαβατικών διεργασιών, από μια συγκεκριμένη κατάσταση 1 σε μια άλλη συγκεκριμένη κατάσταση 2. Οι διεργασίες αυτές, όντας αδιαβατικές, προφανώς δεν εμπριέ-

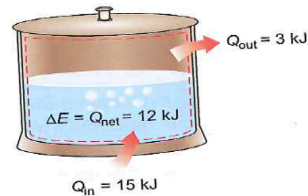
Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ



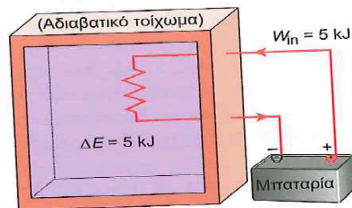
Σχήμα 2-39:
Η ενέργεια δεν μπορεί να δημιουργηθεί αλλά ούτε και να καταστραφεί, μπορεί μόνο να αλλάξει μορφές.



Σχήμα 2-40:
Η αύξηση της ενέργειας μιας πατάτας που ψήνεται στο φούρνο είναι ίση με το ποσό θερμότητας που μεταφέρεται σε αυτήν.



Σχήμα 2-41:
Εάν δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις έργου, η ενεργειακή μεταβολή σε ένα σύστημα ισούται με το τελικό μεταφερόμενο ποσό θερμότητας σε αυτό.



Σχήμα 2-42:
Το (ηλεκτρικό) έργο που παράγεται σε ένα αδιαβατικό σύστημα ισούται με την αύξηση της ενέργειας του συστήματος.

χουν κάποια μεταφορά θερμότητας, μπορούν όμως να περιλαμβάνουν διάφορα είδη αλληλεπιδράσεων έργου. Προσεκτικές μετρήσεις κατά τη διάρκεια αυτών των πειραμάτων δείχνουν τα εξής: Για όλες τις αδιαβατικές διεργασίες ανάμεσα σε δύο καθορισμένες καταστάσεις ενός κλειστού συστήματος, το τελικό παραγόμενο έργο είναι το ίδιο, ανεξάρτητα από τη φύση του κλειστού συστήματος και τις λεπτομέρειες της διεργασίας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχει ένα άπειρο πλήθος δυνατών τρόπων πραγματοποίησης αλληλεπιδράσεων έργου υπό αδιαβατικές συνθήκες, αυτή η δήλωση φαίνεται να είναι πολύ ισχυρή, με πολλές ενδυνάμει προεκτάσεις. Η δήλωση αυτή, η οποία ουσιαστικά στηρίζεται στα πειράματα του Joule που πραγματοποιήθηκαν κατά το πρώτο μισό του 19^{ου} αιώνα, δεν μπορεί να εξαχθεί από κάποια άλλη γνωστή φυσική αρχή και για το λόγο αυτό αναγνωρίζεται ως μια θεμελιώδης αρχή. Αυτή η αρχή είναι γνωστή ως **πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής**, ή απλώς ο **πρώτος νόμος** (Στ.: στην ελληνική βιβλιογραφία απαντάται και ο όρος “Πρώτο Θερμοδυναμικό Αξίωμα”).

Μια σημαντική συνέπεια του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής, είναι η διαπίστωση της ύπαρξης και ο ορισμός της ιδιότητας *ολική ενέργεια E*. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το τελικό έργο είναι το ίδιο για όλες τις αδιαβατικές διεργασίες ενός κλειστού συστήματος μεταξύ δύο ορισμένων καταστάσεων, η τιμή του τελικού έργου πρέπει να εξαρτάται από τις δύο αυτές ακραίες καταστάσεις του συστήματος και μόνο, επομένως αυτό πρέπει να αντιστοιχεί σε μια μεταβολή κάποιας ιδιότητας του συστήματος. Αυτή η ιδιότητα είναι η *ολική ενέργεια*. Σημειώστε ότι ο πρώτος νόμος δεν κάνει καμία αναφορά στην τιμή της ολικής ενέργειας ενός κλειστού συστήματος που βρίσκεται σε κάποια κατάσταση. Δηλώνει απλά ότι η *μεταβολή* της ολικής ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας αδιαβατικής διεργασίας πρέπει να ισούται με το τελικό παραγόμενο έργο. Επομένως, μπορεί να εκχωρηθεί μια βολική αυθαίρετη τιμή στην ολική ενέργεια σε μια συγκεκριμένη κατάσταση για να εξυπηρετεί ως ένα σημείο αναφοράς.

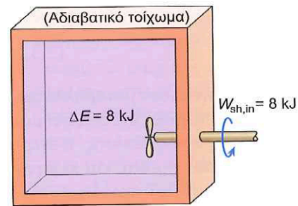
Στη δήλωση του πρώτου νόμου εμπεριέχεται ρητώς η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Αν και η ουσία του πρώτου νόμου είναι η ύπαρξη της ιδιότητας της *ολικής ενέργειας*, ο πρώτος νόμος συχνά θεωρείται ως μια διατύπωση της *αρχής διατήρησης της ενέργειας*. Στη συνέχεια, αναπτύσσουμε τον πρώτο νόμο, ή την αρχή διατήρησης της ενέργειας, με τη βοήθεια μερικών γνωστών παραδειγμάτων, χρησιμοποιώντας διαισθητικούς συλλογισμούς.

Αρχικά, θεωρούμε κάποιες διεργασίες που εμπεριέχουν μεταφορά θερμότητας αλλά όχι αλληλεπιδράσεις έργου. Η περίπτωση της ψητής πατάτας στο φούρνο είναι ένα καλό παράδειγμα για αυτήν την περίπτωση (Σχήμα 2-40). Ως αποτέλεσμα της μεταφοράς θερμότητας προς την πατάτα, η ενέργειά της θα αυξηθεί. Εάν παραλείψουμε οποιαδήποτε μεταφορά μάζας (απώλεια υγρασίας από την πατάτα), η αύξηση στην ολική ενέργεια της πατάτας ισούται με το μεταφερθέν σε αυτή ποσό θερμότητας. Δηλαδή, εάν μεταφέρονται 5 kJ θερμότητας στην πατάτα, η αύξηση ενέργειας της πατάτας θα είναι επίσης 5 kJ.

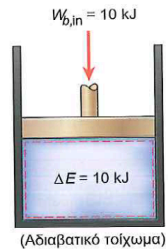
Ως ένα άλλο παράδειγμα, θεωρείστε τη θέρμανση νερού μέσα σε μια κατσαρόλα που βρίσκεται πάνω σε μια εστία μαγειρέματος (Σχήμα 2-41). Εάν μεταφέρονται 15 kJ θερμότητας από το θερμαντικό στοιχείο στο νερό και από αυτά 3 kJ είναι η απώλεια θερμότητας από το νερό προς το περιβάλλον, τότε η αύξηση της ενέργειας του νερού θα ισούται με τη συνολική τελική θερμότητα που μεταφέρθηκε σε αυτό, που είναι 12 kJ.

Θεωρούμε τώρα ως σύστημα ένα επαρκώς μονωμένο (δηλαδή αδιαβατικό) δωμάτιο που θερμαίνεται από ένα ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο (Σχήμα 2-42). Η ενέργεια του συστήματος θα αυξάνεται ως αποτέ-

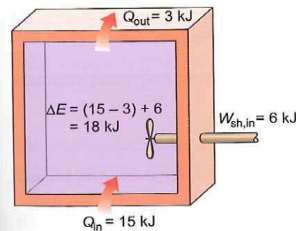
Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ



Σχήμα 2-43:
Το παραγόμενο (αξονικό) έργο σε ένα αδιαβατικό σύστημα ισούται με την αύξηση της ενέργειας του συστήματος.



Σχήμα 2-44:
Το παραγόμενο έργο (ογκομεταβολής) σε ένα αδιαβατικό σύστημα ισούται με την αύξηση της ενέργειας του συστήματος.



Σχήμα 2-45:
Η ενεργειακή μεταβολή ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας ισούται με το τελικό έργο και τη μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στο σύστημα και στο περιβάλλον του.

λεσμα του παραγόμενου ηλεκτρικού έργου. Εφόσον το σύστημα είναι αδιαβατικό και δεν μπορεί να υπάρξει μεταφορά θερμότητας από και προς το περιβάλλον του ($Q = 0$), η αρχή διατήρησης της ενέργειας υπογορεύει ότι το παραγόμενο ηλεκτρικό έργο στο σύστημα πρέπει να ισούται με την αύξηση της ενέργειας του συστήματος.

Ας αντικαταστήσουμε τώρα το ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο με τη φτερωτή ενός αναδευτήρα (Σχήμα 2-43). Ως αποτέλεσμα της διεργασίας ανάδευσης, η ενέργεια του συστήματος θα αυξάνεται. Για μία ακόμη φορά, εφόσον δεν υφίσταται θερμική αλληλεπίδραση ανάμεσα στο σύστημα και στο περιβάλλον του ($Q = 0$), το παραγόμενο αξονικό έργο στο σύστημα πρέπει να εμφανίζεται ως μια αύξηση της ενέργειας του συστήματος.

Πολλοί από εσάς θα έχετε προφανώς παρατηρήσει ότι η θερμοκρασία του αέρα αυξάνεται, όταν αυτός συμπιέζεται (Σχήμα 2-44). Αυτό οφείλεται στην ενέργεια που μεταφέρεται στον αέρα, με τη μορφή έργου ογκομεταβολής. Απουσία οποιασδήποτε μεταφοράς θερμότητας ($Q = 0$), ολόκληρο το έργο ογκομεταβολής θα αποθηκευτεί στον αέρα ως μέρος της ολικής του ενέργειας. Η αρχή διατήρησης της ενέργειας απαιτεί και πάλι ότι η αύξηση της ενέργειας του συστήματος να είναι ίση με το έργο ογκομεταβολής που προσδίδεται στο σύστημα.

Μπορούμε να επεκτείνουμε τις παραπάνω μελέτες σε συστήματα που εμπλέκουν ταυτόχρονα διάφορες μορφές αλληλεπιδράσεων θερμότητας και έργου. Για παράδειγμα, εάν ένα σύστημα λαμβάνει 12 kJ θερμότητας κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, ενώ παράγονται και 6 kJ έργου πάνω σε αυτό, τότε η αύξηση της ενέργειας του συστήματος κατά τη συγκεκριμένη διεργασία είναι 18 kJ (Σχήμα 2-45). Δηλαδή, η μεταβολή της ενέργειας ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, είναι απλά ίση με την τελική μεταφερόμενη ενέργεια από (ή προς) το σύστημα.

Ενεργειακό Ισοζύγιο

Υπό το φώς των προηγούμενων μελετών η αρχή διατήρησης της ενέργειας μπορεί να εκφράζεται ως ακολούθως: Η τελική μεταβολή (αύξηση ή μείωση) της ολικής ενέργειας ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας ισούται με τη διαφορά μεταξύ της συνολικής εισερχόμενης ενέργειας στο σύστημα και της συνολικής εξερχόμενης ενέργειας από το σύστημα κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας. Δηλαδή,

$$\left(\begin{array}{c} \text{Ολική ενέργεια} \\ \text{εισερχόμενη} \\ \text{στο σύστημα} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Ολική ενέργεια} \\ \text{εξερχόμενη} \\ \text{από το σύστημα} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Συνολική μεταβολή} \\ \text{της ενέργειας} \\ \text{του συστήματος} \end{array} \right)$$

ή

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system}$$

Αυτή η σχέση συχνά αναφέρεται ως **ενεργειακό ισοζύγιο** και μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιοδήποτε τύπου συστήματα, που υπόκεινται σε οποιοδήποτε είδος διεργασίας. Η επιτυχής χρήση αυτής της σχέσης στην επίλυση προβλημάτων μηχανικής, εξαρτάται από την κατανόηση των διαφόρων μορφών ενέργειας και την αναγνώριση των διαφόρων μορφών μεταφοράς ενέργειας.

Ενεργειακή Μεταβολή Συστήματος, ΔE_{system}

Ο καθορισμός της ενεργειακής μεταβολής ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, περιλαμβάνει την αποτίμηση της ενέργειας του συστήματος στην αρχή και στο τέλος της διεργασίας και τη λήψη της διαφοράς τους. Δηλαδή,

$$\left(\begin{array}{c} \text{Ενεργειακή} \\ \text{μεταβολή} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Ενέργεια} \\ \text{στην τελική} \\ \text{κατάσταση} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Ενέργεια} \\ \text{στην αρχική} \\ \text{κατάσταση} \end{array} \right)$$

Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

ή

$$\Delta E_{\text{συστ}} = E_{\text{τελ}} - E_{\text{αρχ}} = E_2 - E_1.$$

(2.32)

Σημειώστε ότι η ενέργεια είναι μια (θερμοδυναμική) ιδιότητα και ότι η τιμή μιας ιδιότητας δεν μεταβάλλεται, παρά μόνον εάν μεταβληθεί η κατάσταση του συστήματος. Επομένως, η ενεργειακή μεταβολή ενός συστήματος είναι μηδενική, εάν η κατάστασή του δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Επίσης, η ενέργεια μπορεί να υπάρχει σε πολυάριθμες μορφές, όπως εσωτερική (αισθητή, λαθάνουσα, χημική, και πυρηνική), κινητική, δυναμική, ηλεκτρική, και μαγνητική, με το άθροισμα όλων αυτών να αποτελεί την *ολική ενέργεια* E ενός συστήματος. Εάν δεν υπάρχουν ηλεκτρικές, μαγνητικές και επιφανειακής τάσης επιδράσεις (δηλαδή σε απλά συμπίεστα συστήματα), τότε η μεταβολή στην ολική ενέργεια ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, είναι το άθροισμα των μεταβολών στην εσωτερική, την κινητική, και τη δυναμική ενέργεια του συστήματος, και μπορεί να εκφράζεται ως

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_{\text{κιν}} + \Delta E_{\text{δυν}}$$

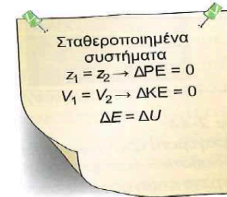
(2.33)

όπου

$$\Delta U = m(u_2 - u_1), \quad \Delta E_{\text{κιν}} = \frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2), \quad \Delta E_{\text{δυν}} = mg(z_2 - z_1)$$

Όταν η αρχική και η τελική κατάσταση του συστήματος είναι καθορισμένες, οι τιμές των καθορισμένων εσωτερικών ενεργειών u_1 και u_2 μπορούν να προσδιοριστούν άμεσα από πίνακες ιδιοτήτων, ή από σχέσεις θερμοδυναμικών ιδιοτήτων.

Τα περισσότερα συστήματα που συναντώνται στην πράξη είναι σταθεροποιημένα, δηλαδή, δεν εμπιέχουν οποιεσδήποτε μεταβολές στην ταχύτητά τους ή στην υψομετρική τους θέση κατά τη διάρκεια εξέλιξης μιας διεργασίας (Σχήμα 2-46). Επομένως, για **σταθεροποιημένα συστήματα**, οι μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας είναι μηδενικές (δηλαδή $\Delta E_{\text{κιν}} = \Delta E_{\text{δυν}} = 0$) και η εξίσωση μεταβολής της ολικής ενέργειας, για αυτά τα συστήματα (Εξ. 2.33), απλοποιείται στην έκφραση $\Delta E = \Delta U$. Επίσης, η ενέργεια ενός συστήματος θα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας, ακόμη και αν μόνο μία μορφή της ενέργειάς του μεταβάλλεται, ενώ οι άλλες μορφές ενέργειας παραμένουν αμετάβλητες.



Σχήμα 2-46:

Για σταθεροποιημένα συστήματα $\Delta E_{\text{κιν}} = \Delta E_{\text{δυν}} = 0$, οπότε $\Delta E = \Delta U$.

Μηχανισμοί Μεταφοράς Ενέργειας, E_{in} και E_{out}

Η ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται από και προς ένα σύστημα με τρεις μορφές: θερμότητα, έργο και ροή μάζας. Οι ενεργειακές αλληλεπιδράσεις αναγνωρίζονται στα όρια του συστήματος καθώς τα διαπερνούν και αναπαριστούν την ενέργεια που προσλαμβάνεται ή αποβάλλεται από ένα σύστημα κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας. Οι μόνες δύο μορφές ενεργειακών αλληλεπιδράσεων που σχετίζονται με σταθερή μάζα ή ένα κλειστό σύστημα, είναι η μεταφορά θερμότητας και το έργο.

- 1. Μεταφορά Θερμότητας, Q** Η μεταφορά θερμότητας προς ένα σύστημα (θερμική απολαβή) αυξάνει την ενέργεια των μορίων και επομένως την εσωτερική ενέργεια του συστήματος, ενώ η μεταφορά θερμότητας από ένα σύστημα (θερμική απώλεια) ελαττώνει την παραπάνω ενέργεια, αφού η ενέργεια που μεταφέρεται εκτός συστήματος ως θερμότητα προέρχεται από την ενέργεια των μορίων του συστήματος.
- 2. Μεταφορά Έργου, W** Κάθε ενεργειακή αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ένα σύστημα και στο περιβάλλον το οποίο δεν οφείλεται σε κάποια θερμοκρασιακή διαφορά, είναι έργο. Ένα ανοδικά κινούμενο έμβολο, ένας περιστρεφόμενος άξονας και ένα ηλεκτροφόρο καλώδιο διαπερνώντας τα όρια του συστήματος σχετίζονται όλα με αλληλεπιδράσεις έργου. Η μεταφορά έργου σε ένα σύστημα (δηλαδή έργο που προσδίδεται στο σύστημα) αυξάνει την ενέργεια του συστήματος, ενώ η μεταφορά έργου από ένα σύστημα (δηλαδή το έργο που παράγεται από το σύστημα) ελαττώνει την παραπάνω ενέργεια, αφού η ενέργεια που εξέρχεται με τη μορφή έργου προέρχεται από την ενέργεια που περιέχεται στο σύστημα. Οι μηχανές των οχημάτων και οι υδραυλικοί στρόβιλοι, οι στρόβιλοι ατμού ή αερίου παράγουν έργο, ενώ οι συμπίεστες, οι αντλίες και οι αναμίκτης καταναλώνουν έργο.
- 3. Ροή Μάζας, m** Η ροή μάζας από και προς ένα σύστημα χρησιμεύει ως ένας επιπρόσθετος μηχανισμός μεταφοράς ενέργειας. Όταν εισέρχεται μάζα σε ένα σύστημα, η ενέργεια του αυξάνει επειδή η μάζα μεταφέρει ενέργεια σε αυτό (στην πραγματικότητα, η μάζα είναι ενέργεια). Παρόμοια, όταν κάποια ποσότητα

Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

μάζας εγκαταλείπει το σύστημα, η εναπομένουσα στο σύστημα ενέργεια ελαττώνεται, επειδή η εξερχόμενη μάζα αφαιρεί μαζί της κάποια ενέργεια. Για παράδειγμα, όταν μια ποσότητα ζεστού νερού βγαίνει από έναν θερμοσίφωνα και αντικαθίσταται από ίση ποσότητα ψυχρότερου νερού, τότε το ενεργειακό περιεχόμενο της δεξαμενής θερμού νερού (ο όγκος ελέγχου) ελαττώνεται, ως αποτέλεσμα αυτής της αλληλεπίδρασης μάζας (Σχήμα 2-47).



Σχήμα 2-47: Το ενεργειακό περιεχόμενο ενός όγκου ελέγχου μπορεί να μεταβάλλεται μέσω μεταφοράς μάζας, καθώς και μέσω αλληλεπιδράσεων θερμότητας και έργου.

Παρατηρώντας ότι η ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας και ότι η καθαρή μεταφορά μιας ποσότητας ισούται με τη διαφορά μεταξύ των ποσοτήτων που μεταφέρονται από και προς το σύστημα, το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γραφεί αναλυτικότερα ως

$$E_{in} - E_{out} = (Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) + (E_{mass,in} - E_{mass,out}) = \Delta E_{system} \quad (2.34)$$

όπου οι δείκτες “in” και “out” υποδηλώνουν ποσότητες που εισέρχονται και εξέρχονται από το σύστημα, αντίστοιχα. Και οι έξι οι ποσότητες στο δεξιό μέλος της εξίσωσης αναπαριστούν «ποσά» και επομένως είναι θετικές ποσότητες. Η κατεύθυνση μιας οποιασδήποτε ενεργειακής μεταφοράς περιγράφεται από τους δείκτες “in” και “out”.

Η μεταφορά θερμότητας Q είναι μηδενική για αδιαβατικά συστήματα, η μεταφορά έργου W είναι μηδενική για συστήματα που δεν εμπεριέχουν αλληλεπιδράσεις έργου και η μεταφορά ενέργειας μέσω μάζας E_{mass} είναι μηδενική για συστήματα που δεν εμπεριέχουν ροή μάζας διαμέσου των ορίων τους (δηλαδή κλειστά συστήματα).

Το ενεργειακό ισοζύγιο για οποιοδήποτε σύστημα στο οποίο εξελίσσεται μια οποιαδήποτε διεργασία μπορεί να εκφραστεί περισσότερο συνεπτυγμένα ως

$$\begin{array}{l} E_{in} - E_{out} \\ \text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω} \\ \text{θερμότητας, έργου, ροής μάζας} \end{array} = \begin{array}{l} \Delta E_{system} \text{ (kJ)} \\ \text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής,} \\ \text{δυναμικής κλπ. ενέργειας} \end{array} \quad (2.35)$$

ή στη μορφή **ρυθμού μεταβολής**, ως

$$\begin{array}{l} \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \\ \text{Συνολικός ρυθμός μεταφοράς ενέργειας} \\ \text{μέσω θερμότητας, έργου, ροής μάζας} \end{array} = \begin{array}{l} dE_{system}/dt \text{ (kW)} \\ \text{Ρυθμός μεταβολής εσωτερικής,} \\ \text{κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας} \end{array} \quad (2.36)$$

Για σταθερούς ρυθμούς μεταβολής, οι συνολικές ποσότητες κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος Δt σχετίζονται με τις αντίστοιχες ποσότητες ανά μονάδα χρόνου ως εξής:

$$Q = \dot{Q}\Delta t, \quad W = \dot{W}\Delta t \quad \text{και} \quad \Delta E = \frac{dE}{dt}\Delta t \text{ (kJ)} \quad (2.37)$$

Το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να εκφραστεί **ανά μοναδιαία μάζα** ως

$$e_{in} - e_{out} = \Delta e_{system} \text{ (kJ/kg)}, \quad (2.38)$$

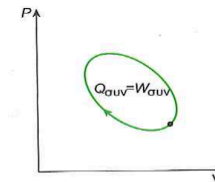
που λαμβάνεται διαιρώντας όλες τις ποσότητες της Εξίσωσης (2.35) με τη μάζα m του συστήματος. Το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί επίσης να εκφραστεί σε διαφορική μορφή ως

$$\delta E_{in} - \delta E_{out} = dE_{system} \quad \text{ή} \quad \delta e_{in} - \delta e_{out} = de_{system} \quad (2.39)$$

Για ένα κλειστό σύστημα το οποίο διαγράφει έναν **(θερμοδυναμικό) κύκλο**, η αρχική και η τελική του κατάσταση ταυτίζονται και επομένως θα είναι $\Delta E_{system} = E_2 - E_1 = 0$. Στην περίπτωση αυτή, το ενεργειακό ισοζύγιο ενός κύκλου απλοποιείται στην έκφραση $E_{in} - E_{out} = 0$, οπότε θα έχουμε $E_{in} = E_{out}$. Παρατηρώντας ότι ένα κλειστό σύστημα δεν εμπεριέχει ροή μάζας κατά μήκος των ορίων του, το ενεργειακό ισοζύγιο ενός κύκλου μπορεί να εκφραστεί σε όρους αλληλεπίδρασης θερμότητας και έργου ως

$$W_{ολ,out} = Q_{ολ,in} \quad \text{ή} \quad \dot{W}_{ολ,out} = \dot{Q}_{ολ,in} \text{ (ανά κύκλο)}. \quad (2.40)$$

Επομένως, το συνολικό έργο εξόδου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ισούται με τη συνολική θερμότητα εισόδου στον κύκλο (Σχήμα 2-48).



Σχήμα 2-48: Για έναν κύκλο, είναι $\Delta E = 0$, οπότε $Q = W$.

1^{ος} νόμος της θερμοδυναμικής, ή 1^ο θερμοδυναμικό αξίωμα (**Ι.Θ.Α.**) ή **αρχή διατήρησης της ενέργειας**: η ενέργεια δεν μπορεί ούτε να παραχθεί ούτε να καταστραφεί, αλλά μόνο να αλλάξει μορφή.

Μεταβολή της ολικής ενέργειας ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας (όταν δεν υπάρχουν ηλεκτρικά, μαγνητικά φαινόμενα και φαινόμενα επιφανειακής τάσης δηλαδή για απλά, συμπιεστά συστήματα:

$$\Delta E = E_{in} - E_{out} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

όπου: $\Delta U = m \cdot (u_2 - u_1),$

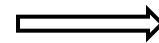
$$\Delta KE = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2)$$

$$\Delta PE = m \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$$

$$\Delta E = E_{in} - E_{out} = (Q_{in} - Q_{out}) + (W_{in} - W_{out}) + (E_{mass,in} - E_{mass,out})$$

Για **στατικά** συστήματα (δεν περιλαμβάνουν αλλαγές ταχύτητας ή υψομετρικής διαφοράς, δηλαδή $\Delta KE = \Delta PE = 0$) προκύπτει:

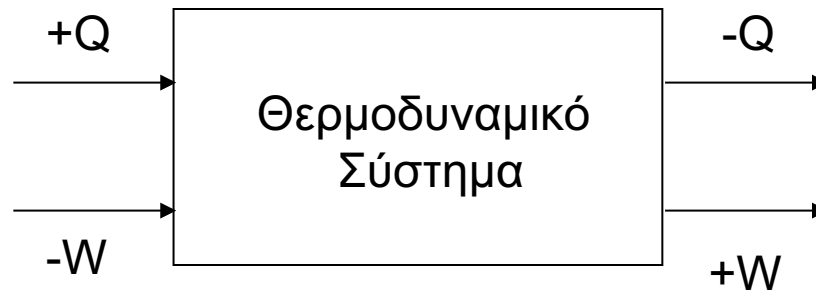
$$\Delta E = E_{in} - E_{out} = \Delta U + \cancel{\Delta KE} + \cancel{\Delta PE}$$



$$\Delta E = \Delta U$$

για κλειστά συστήματα :

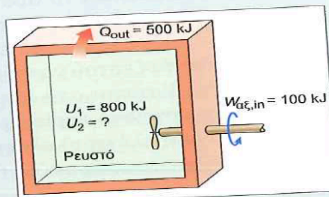
$$\Delta U = Q_{12} - W_{12} \Rightarrow Q_{12} = \Delta U + W_{12}$$



Τα μεγέθη Q_{12} και W_{12} , **θα πρέπει να αναγράφονται με τα πρόσημά τους**

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-10: Ψύξη Θερμού Ρευστού σε Δεξαμενή

Μια δεξαμενή με άκαμπτα τοιχώματα περιέχει ένα θερμό ρευστό, το οποίο ψύχεται, ενώ αναδεύεται με τη βοήθεια ενός αναδευτήρα. Αρχικά, η εσωτερική ενέργεια του ρευστού είναι 800 kJ. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας ψύξης, το ρευστό χάνει 500 kJ θερμότητας και η φτερωτή του αναδευτήρα παράγει έργο 100 kJ στο ρευστό. Να προσδιορίσετε την τελική εσωτερική ενέργεια του ρευστού. Να αγνοήσετε την ενέργεια που αποθηκεύεται στον αναδευτήρα.



Σχήμα 2-49: Διάγραμμα Προβλήματος 2-10.

Λύση: Ένα ρευστό εντός άκαμπτης δεξαμενής χάνει θερμότητα καθώς αναδεύεται. Να προσδιοριστεί η τελική τιμή της εσωτερικής ενέργειας του ρευστού.

Παραδοχές 1) Η δεξαμενή θεωρείται ως σταθεροποιημένο σύστημα, οπότε οι μεταβολές στην κινητική και τη δυναμική της ενέργεια είναι μηδενικές ($\Delta E_{κιν} = \Delta E_{δυν} = 0$). Επομένως, $\Delta E = \Delta U$ και η εσωτερική ενέργεια είναι η μόνη μορφή ενέργειας του συστήματος η οποία μπορεί να μεταβληθεί κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας. **2)** Η ενέργεια που αποθηκεύεται στον αναδευτήρα είναι αμελητέα.

Ανάλυση Λαμβάνουμε ως σύστημα το περιεχόμενο της δεξαμενής (Σχήμα 2-49). Αυτό είναι ένα κλειστό σύστημα, εφόσον κατά τη διάρκεια της διεργασίας δεν υπάρχει ροή μάζας διαμέσου του ορίου. Παρατηρούμε ότι ο όγκος της άκαμπτης δεξαμενής παραμένει σταθερός και επομένως δεν υπάρχει έργο ογκομεταβολής. Επίσης, χάνεται θερμότητα από το σύστημα και παραγόμενο έργο περιστροφής στο σύστημα. Εφαρμόζοντας το ενεργειακό ισοζύγιο στο σύστημα προκύπτει

$$\begin{array}{ccc} E_{in} - E_{out} & = & \Delta E_{system} \\ \text{Συνολική μεταφορά ενέργειας μέσω} & & \text{Μεταβολή εσωτερικής, κινητικής,} \\ \text{θερμότητας, έργου, ροής μάζας} & & \text{δυναμικής κλπ. ενέργειας} \end{array}$$

$$W_{\alpha\zeta, in} - Q_{out} = \Delta U = U_2 - U_1$$

$$100 \text{ kJ} - 500 \text{ kJ} = U_2 - 800 \text{ kJ}, \quad U_2 = 400 \text{ kJ}$$

Επομένως, η τελική εσωτερική ενέργεια του συστήματος είναι 400 kJ.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-11: Επιτάχυνση Αέρα μέσω Ανεμιστήρα

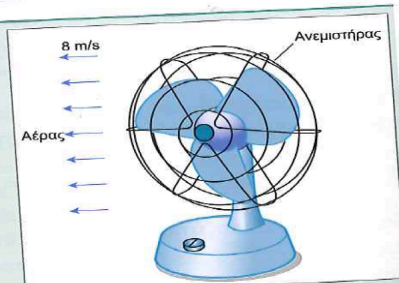
Ένας ανεμιστήρας, που όταν λειτουργεί καταναλώνει 20 W ηλεκτρικής ισχύος, φέρεται να μπορεί να επιτύχει απορροή αέρα ενός δωματίου με ρυθμό 1,0 kg/s και με ταχύτητα 8 m/s (Σχήμα 2-50). Να αποφανθείτε εάν αυτός ο ισχυρισμός είναι εύλογος.

Λύση: Ένας ανεμιστήρας φέρεται ότι αυξάνει την ταχύτητα του αέρα σε μια καθορισμένη τιμή, καταναλώνοντας ηλεκτρική ισχύ με ένα καθορισμένο ρυθμό. Πρόκειται να διερευνηθεί η ορθότητα αυτού του ισχυρισμού.

Παραδοχές Ο αέρας του δωματίου είναι σχετικά ήρεμος και η ταχύτητά του εντός του χώρου του δωματίου είναι αμελητέα.

Ανάλυση Αρχικά, ας εξετάσουμε τις εμπλεκόμενες ενεργειακές μετατροπές. Ο κινητήρας του ανεμιστήρα μετατρέπει τμήμα της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει σε μηχανικό έργο άξονα, το οποίο χρησιμοποιείται για την περιστροφή των περυγίων του ανεμιστήρα μέσα στον αέρα του δωματίου. Τα περυγία αυτά είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να υποβοηθούν τη μετάδοση ενός μεγάλου σχετικά κλάσματος της μηχανικής ισχύος του άξονα στον αέρα, θέτοντας τον σε κίνηση. Στην οριακή ιδανική περίπτωση μηδενικών απωλειών (δεν υπάρχει μετατροπή ηλεκτρικής και μηχανικής ενέργειας σε θερμική ενέργεια) και σταθεροποιημένης λειτουργίας, η ηλεκτρική ισχύς εισόδου θα ισούται με το ρυθμό αύξησης της κινητικής ενέργειας του αέρα. Επομένως, για έναν όγκο ελέγχου ο οποίος περικλείει το σύνολο ανεμιστήρα - κινητήρα, το ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γραφεί ως

$$\begin{array}{ccc} \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} & = & \frac{dE_{system}}{dt} \\ \text{Συνολικός ρυθμός μεταφοράς ενέργειας} & & \text{Ρυθμός μεταβολής εσωτερικής,} \\ \text{μέσω θερμότητας, έργου, ροής μάζας} & & \text{κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας} \end{array} = 0 \Rightarrow \Delta E_{system} / dt = 0 \Rightarrow \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$



Σχήμα 2-50: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-11.

Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

$$W_{\eta\lambda, \text{in}} = \dot{m}_{\text{αερ}} k e_{\text{out}} = \dot{m}_{\text{αερ}} \frac{v_{\text{out}}^2}{2}$$

Επιλύοντας ως προς v_{out} και αντικαθιστώντας λαμβάνουμε τη μέγιστη ταχύτητα εξόδου του αέρα

$$v_{\text{out}} = \sqrt{\frac{2\dot{W}_{\eta\lambda, \text{in}}}{\dot{m}_{\text{αερ}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (20 \text{ J/s})}{1,0 \text{ kg/s}} \left(\frac{1 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1 \text{ J/kg}} \right)} = 6,3 \text{ m/s}$$

τιμή που είναι κάτω των 8 m/s. Ο ισχυρισμός επομένως είναι **ψευδής**.

Συζήτηση Η αρχή διατήρησης της ενέργειας απαιτεί η ενέργεια να διατηρείται, καθώς αυτή μετατρέπεται από τη μια μορφή στην άλλη και δεν επιτρέπει οποιαδήποτε ενέργεια να δημιουργείται ή να καταστρέφεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας. Όσον αφορά τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, δεν υπάρχει τίποτε λανθασμένο με τη μετατροπή ολόκληρης της ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια. Επομένως, ο πρώτος νόμος δεν εναντιώνεται στο να φθάσει η ταχύτητα του αέρα να είναι 6,3 m/s - αλλά αυτό είναι το *άνω όριο*. Οποιοσδήποτε ισχυρισμός περί υψηλότερης ταχύτητας έρχεται σε σύγκρουση με τον πρώτο νόμο, και επομένως είναι ανέφικτος. Στην πραγματικότητα, η ταχύτητα του αέρα θα είναι αρκετά χαμηλότερη από 6,3 m/s, λόγω των απωλειών που σχετίζονται με τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε αξονική μηχανική ενέργεια και της επακόλουθης μετατροπής της αξονικής μηχανικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια του αέρα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-12: Θερμικά Αποτελέσματα Ανεμιστήρα

Ένα δωμάτιο αρχικά βρίσκεται σε θερμοκρασία εξωτερικού χώρου 25°C. Τώρα, ένας ισχυρός ανεμιστήρας που καταναλώνει 200 W ηλεκτρικής ισχύος όταν λειτουργεί, τίθεται σε λειτουργία (Σχήμα 2-51). Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του δωματίου και του εξωτερικού αέρα δίδεται ως $\dot{Q} = UA(T_i - T_o)$, όπου $U = 6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ είναι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, $A = 30 \text{ m}^2$ είναι η εκτεθειμένη περιοχή της επιφάνειας του δωματίου, και T_i, T_o είναι η εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία, αντίστοιχα. Να προσδιορίσετε την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα, όταν δημιουργηθούν σταθεροποιημένες συνθήκες λειτουργίας.

Αδση: Ένας ανεμιστήρας τίθεται και διατηρείται σε λειτουργία εντός δωματίου που παρουσιάζει απώλειες θερμότητας προς τον εξωτερικό χώρο. Ζητείται να προσδιοριστεί η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, όταν επικρατήσουν σταθεροποιημένες συνθήκες λειτουργίας του ανεμιστήρα.

Παραδοχές 1 Η μεταφορά θερμότητας διαμέσου του δαπέδου είναι αμελητέα. 2 Δεν εμπλέκονται άλλου είδους ενεργειακές αλληλεπιδράσεις.

Ανάλυση Ο ηλεκτρισμός που καταναλώνεται από τον ανεμιστήρα αποτελεί την ενέργεια εισόδου για το δωμάτιο και επομένως το δωμάτιο λαμβάνει ενέργεια με ρυθμό 200 W. Ως αποτέλεσμα, η θερμοκρασία του αέρα του δωματίου τείνει να αυξηθεί. Όμως, καθώς η θερμοκρασία του δωματίου αυξάνεται, αυξάνει και ο ρυθμός απώλειας θερμότητας από το δωμάτιο, μέχρις ότου ο ρυθμός απωλειών θερμότητας να γίνει ίσος με την κατανάλωση της ηλεκτρικής ισχύος. Σε αυτό το σημείο, η θερμοκρασία του αέρα του δωματίου, και επομένως το ενεργειακό περιεχόμενο του δωματίου, παραμένουν σταθερά και η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας για το δωμάτιο γίνεται

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}}}_{\text{Συνολικός ρυθμός μεταφοράς ενέργειας μέσω θερμότητας, έργου, και μάζας}} = \underbrace{\frac{dE_{\text{system}}/dt}{dt}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής εσωτερικής, κινητικής, δυναμικής κλπ. ενέργειας}} = 0 \rightarrow \dot{E}_{\text{in}} = \dot{E}_{\text{out}}$$

$$\dot{W}_{\eta\lambda, \text{in}} = \dot{Q}_{\text{out}} = UA(T_i - T_o)$$

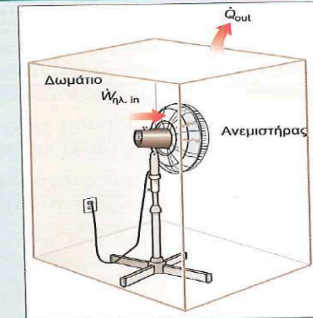
Αντικαθιστώντας

$$200 \text{ W} = \left(\frac{6 \text{ W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right) (30 \text{ m}^2) (T_i - 25^\circ\text{C})$$

Αυτό δίνει

$$T_i = 26,1^\circ\text{C}$$

Επομένως, η θερμοκρασία του αέρα του δωματίου θα παραμείνει σταθερή, μόλις φθάσει τους 26,1 °C.



Σχήμα 2-51: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-12.

Συζήτηση Σημειώστε ότι ένας ανεμιστήρας ισχύος 200 W θερμαίνει ένα δωμάτιο όπως ακριβώς μια θερμοδυναμική αντίσταση ισχύος 200 W. Στην περίπτωση του ανεμιστήρα, ο κινητήρας μετατρέπει μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που αντλεί σε μηχανική ενέργεια, με τη μορφή αξονικής περιστροφής, ενώ το υπόλοιπο μέρος της μετατρέπεται ως θερμότητα στον αέρα του δωματίου λόγω της ανεπάρκειας του κινητήρα (κανένας κινητήρας δεν μετατρέπει το 100% της ηλεκτρικής ενέργειας με την οποία τροφοδοτείται σε μηχανική ενέργεια, αν και μερικοί κινητήρες μεγάλου μεγέθους υπερβαίνουν σε απόδοση μετατροπής το 97%). Μέρος της μηχανικής ενέργειας του άξονα μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του αέρα, με τη βοήθεια των πτερυγίων του ανεμιστήρα, η οποία με τη σειρά της μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, καθώς τα μόρια του αέρα επιβραδύνονται, λόγω τριβών. Τελικά, ολόκληρη η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας με την οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας του ανεμιστήρα μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια του αέρα, η οποία εκδηλώνεται ως μια αύξηση στη θερμοκρασία.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-13: Ετήσιο Κόστος Φωτισμού Αίθουσας Διδασκαλίας

Οι ανάγκες φωτισμού μιας αίθουσας διδασκαλίας εξυπηρετούνται από 30 λαμπτήρες φθορισμού, με τον καθένα να καταναλώνει 80 W ηλεκτρικής ισχύος (Σχήμα 2-52). Τα φώτα στην αίθουσα παραμένουν αναμμένα για 12 ώρες ημερησίως και για 250 ημέρες το έτος. Για μοναδιαίο κόστος ηλεκτρικού ρεύματος €0,11/kWh να προσδιορίσετε το ετήσιο κόστος φωτισμού για την αίθουσα αυτή. Επίσης, να μελετήσετε την επίδραση του φωτισμού στις ανάγκες θέρμανσης και κλιματισμού αυτής της αίθουσας.

Αύση: Θεωρούμε το φωτισμό μιας αίθουσας διδασκαλίας μέσω λαμπτήρων φθορισμού. Ζητείται να προσδιοριστεί το ετήσιο κόστος ηλεκτρικού ρεύματος για φωτισμό, και να μελετηθεί η επίδραση του φωτισμού στις απαιτήσεις θέρμανσης και κλιματισμού της αίθουσας αυτής.

Παραδοχές Η επίδραση των διακυμάνσεων ηλεκτρικής τάσης είναι αμελητέα, και έτσι κάθε λαμπτήρας φθορισμού καταναλώνει την ονομαστική του ισχύ.

Ανάλυση Η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται από τους λαμπτήρες όταν όλοι είναι αναμμένοι καθώς και το πλήθος των ωρών λειτουργίας τους σε ετήσια βάση είναι

$$\text{Ισχύς φωτισμού} = \left(\begin{array}{c} \text{καταναλισκόμενη} \\ \text{ισχύς} \\ \text{ανά λαμπτήρα} \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{πλήθος} \\ \text{λαμπτήρων} \end{array} \right) = 80 \frac{\text{W}}{\text{λαμπτήρες}} \times 30 \text{λαμπτήρες} = 2.400 \text{ W} = 2,4 \text{ kW}$$

$$\text{Ώρες λειτουργίας} = 12 \frac{\text{ώρες}}{\text{ημέρα}} \cdot 250 \frac{\text{ημέρες}}{\text{έτος}} = 3.000 \text{ ώρες/έτος}$$

Συνεπώς η ποσότητα και το κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιείται ανά έτος γίνεται

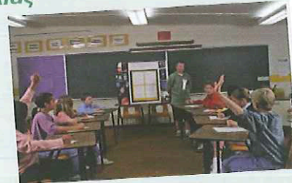
$$\begin{aligned} \text{Ενέργεια φωτισμού} &= (\text{ισχύς φωτισμού})(\text{ώρες λειτουργίας}) = (2,4 \text{ kW})(3000 \text{ ώρες/έτος}) = 7200 \text{ kWh/έτος} \\ \text{Κόστος φωτισμού} &= (\text{Ενέργεια φωτισμού})(\text{μοναδιαίο κόστος}) = (7200 \text{ kWh/έτος})(€0,11/\text{kWh}) = €792/\text{kWh} \end{aligned}$$

Το φως που απορροφάται από τις επιφάνειες μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Αγνοώντας την ποσότητα φωτός που δραπετεύει από τα παράθυρα, το σύνολο των 2,4 kW ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται από τους λαμπτήρες, τελικά γίνεται τμήμα της θερμικής ενέργειας της αίθουσας. Επομένως, το σύστημα φωτισμού σε αυτήν την αίθουσα ελαττώνει τις απαιτήσεις θέρμανσης κατά 2,4 kW αλλά αυξάνει το φορτίο κλιματισμού κατά την ίδια ποσότητα.

Συζήτηση Παρατηρήστε ότι το ετήσιο κόστος φωτισμού μόνον αυτής της αίθουσας διδασκαλίας υπερβαίνει τα €800. Αυτό δείχνει τη σπουδαιότητα των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας. Εάν χρησιμοποιούνταν λαμπτήρες πυρακτώσεως αντί λαμπτήρων φθορισμού, το κόστος φωτισμού θα ήταν τετραπλάσιο, καθώς οι λαμπτήρες πυρακτώσεως καταναλώνουν 4 φορές περισσότερη ισχύ για την ίδια παραγόμενη ποσότητα φωτεινής ακτινοβολίας.

2.7 Συντελεστές Απόδοσης Ενεργειακών Μετατροπών

Η **αποδοτικότητα** ή **απόδοση** είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους όρους στη θερμοδυναμική και δείχνει πόσο καλά επιτυγχάνεται μια μετατροπή ενέργειας ή μια διεργασία μεταφοράς. Η αποδοτικότητα είναι επίσης ένας από τους πλέον συχνά, κατά αδόκιμο τρόπο, χρησιμοποιούμενους όρους στη θερμοδυναμική και



Σχήμα 2-52:

Λαμπτήρες φθορισμού φωτίζοντας μια αίθουσα διδασκαλίας όπως μελετάται στο Παράδειγμα 2-13. ©Vol. 24/PhotoDisc/Getty RF.

Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

αποτελεί πηγή παρερμηνειών. Αυτό συμβαίνει επειδή η αποδοτικότητα χρησιμοποιείται συχνά χωρίς αρχικά να έχει οριστεί κατάλληλα. Στη συνέχεια, θα αποσαφηνίσουμε περαιτέρω αυτήν την έννοια και θα ορίσουμε μερικούς συντελεστές απόδοσης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη.

Γενικά, η απόδοση ή η αποδοτικότητα, μπορεί να εκφραστεί σε όρους επιθυμητής εξόδου και απαιτούμενης εισόδου ως

$$\text{Απόδοση} = \frac{\text{Επιθυμητή Έξοδος}}{\text{Απαιτούμενη Είσοδος}} \quad (2.41)$$

Εάν πάτε να αγοράσετε έναν θερμοσίφωνα, ένας έμπειρος πωλητής θα σας πει ότι η αποδοτικότητα ενός συμβατικού ηλεκτρικού θερμοσίφωνα είναι περίπου 90% (Σχήμα 2-53). Αυτό είναι κάτι που ενδεχομένως θα σας προκαλέσει απορία, εφόσον τα θερμαντικά στοιχεία στους ηλεκτρικούς θερμοσίφωνες είναι θερμαντικές αντιστάσεις και η απόδοση κάθε τέτοιας θερμαντικής αντίστασης είναι 100%, αφού αυτές μετατρέπουν ολόκληρο το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν σε θερμική ενέργεια. Ένας καλά πληροφορημένος πωλητής θα διευκρινίσει το θέμα, εξηγώντας ότι οι θερμικές απώλειες από το δοχείο θερμού νερού προς τον περιβάλλοντα αέρα είναι αυτές που ευθύνονται για το 10% της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και ότι η **απόδοση ενός θερμοσίφωνα** ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που αποδίδεται στο οικιακό περιβάλλον με τη μορφή ζεστού νερού προς την ενέργεια με την οποία τροφοδοτείται ο θερμοσίφωνα. Ένας έξυπνος πωλητής μπορεί να καταφέρει να σας πείσει να αγοράσετε κάποιον ακριβότερο θερμοσίφωνα, με παχύτερο μονωτικό στρώμα, που έχει απόδοση 94%. Εάν είστε ενημερωμένος καταναλωτής και μπορείτε να έχετε πρόσβαση σε φυσικό αέριο, κατά πάσα πιθανότητα θα προτιμήσετε την αγορά ενός θερμοσίφωνα φυσικού αερίου, παρ' όλο που η απόδοσή του είναι μόνο 55%, αφού μια μονάδα φυσικού αερίου κοστίζει περίπου την ίδια τιμή με αυτή μιας μονάδας ηλεκτρικού ρεύματος για αγορά και εγκατάσταση, αλλά το ετήσιο ενεργειακό κόστος μιας μονάδας φυσικού αερίου θα είναι κατά πολύ μικρότερο του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας.

Τσως να αναρωτιέστε πώς ορίζεται η απόδοση ενός θερμοσίφωνα φυσικού αερίου και για ποιο λόγο αυτή είναι τόσο μικρότερη από την απόδοση ενός ηλεκτρικού θερμοσίφωνα. Ως γενικός κανόνας, η απόδοση μιας διάταξης η οποία περιλαμβάνει την καύση κάποιου καυσίμου στηρίζεται στη **θερμογόνο δύναμη (θερμαντική αξία) του καυσίμου**, που είναι το ποσό της θερμότητας που απελευθερώνεται κατά την πλήρη καύση μιας μοναδιαίας ποσότητας καυσίμου σε θερμοκρασία δωματίου, με τα προϊόντα της καύσης να ψύχονται σε θερμοκρασία δωματίου (Σχήμα 2-54). Στην περίπτωση αυτή, η απόδοση της διάταξης καύσης μπορεί να χαρακτηριστεί από το **συντελεστή (βαθμό) απόδοσης καύσης**, ο οποίος ορίζεται ως

$$\eta_{\text{καύσης}} = \frac{Q}{\Theta \cdot \Delta\xi} = \frac{\text{Ποσό θερμότητας που απελευθερώνεται κατά την καύση}}{\text{Θερμαντική αξία καυσίμου}} \quad (2.42)$$

Ένας συντελεστής απόδοσης καύσης 100% δηλώνει πλήρη καύση, και τα αέρια κατάλοιπα της καύσης εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης σε θερμοκρασία δωματίου και επομένως η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη διεργασία της καύσης ισούται με τη θερμαντική αξία του καυσίμου.

Τα περισσότερα καύσιμα περιέχουν υδρογόνο, που δημιουργεί νερό καθώς καίγεται, και η θερμαντική αξία ενός καυσίμου θα είναι διαφορετική, ανάλογα με το εάν το νερό ως προϊόν καύσης θα είναι σε υγρή μορφή ή σε μορφή υδρατμών. Η θερμαντική αξία χαρακτηρίζεται ως **κατώτερη θερμαντική αξία (LHV)**, όταν το νερό ως προϊόν καύσης έχει τη μορφή υδρατμών και ως **ανώτερη θερμαντική αξία (HHV)**, όταν το νερό στα προϊόντα της καύσης συμπυκνώνεται πλήρως και επομένως ανακτάται και η θερμότητα εξαέρωσης. Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο θερμαντικών αξιών είναι ίση με το γινόμενο της ποσότητας νερού και της ενθαλπίας εξαέρωσης του νερού σε θερμοκρασία δωματίου. Για παράδειγμα, η κατώτερη και η ανώτερη θερμαντική αξία της βενζίνης είναι 44.000 kJ/kg και 47.300 kJ/kg, αντίστοιχα. Κάθε ορισμός απόδοσης θα πρέπει να

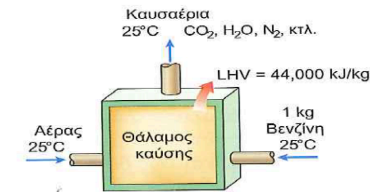


Water heater

ΤΥΠΟΣ	ΑΠΟΔΟΣΗ
Αερίου, συμβατικός	55%
Αερίου, υψ. απόδοσης	62%
Ηλεκτρικός, συμβατικός	90%
Ηλεκτρικός, υψ. απόδοσης	94%

Σχήμα 2-53:

Τυπικές αποδόσεις συμβατικών και υψηλής απόδοσης ηλεκτρικών και φυσικού αερίου θερμοσίφωνων. © McGraw-Hill Companies, Inc. Φωτογράφος: Jill Braaten



Σχήμα 2-54:

Ορισμός της θερμογόνου δύναμης της βενζίνης.

αναφέρει ρητά εάν βασίζεται στην ανώτερη ή στην κατώτερη θερμαντική αξία ενός καυσίμου. Οι βαθμοί απόδοσης των μηχανών των οχημάτων και των αεροσκαφών συνήθως στηρίζονται στις *κατώτερες θερμαντικές αξίες* επειδή ότι το νερό εξέρχεται ως υδρατμός στα καυσαέρια και δεν είναι πρακτικά συμφέρουσα η απόπειρα ανάκτησης της θερμότητας εξαέρωσης. Αντίθετα, οι αποδόσεις κλιβάνων, στηρίζονται στις *ανώτερες θερμαντικές αξίες*.

Η απόδοση των συστημάτων θέρμανσης χώρων κατοικιών και κτηρίων επαγγελματικής χρήσης συνήθως εκφράζεται σε όρους **απόδοσης ετήσιας χρήσης καυσίμου** (ή συντομογραφικά **AFUE**), όπου λαμβάνεται υπόψη τόσο ο βαθμός απόδοσης καύσης, όσο και άλλες απώλειες, όπως είναι για παράδειγμα οι θερμικές απώλειες προς μη θερμαινόμενους χώρους και οι απώλειες έναρξης και λήξης διαδικασιών θέρμανσης. Ο συντελεστής AFUE για την πλειοψηφία των σύγχρονων συστημάτων θέρμανσης είναι περίπου 85%, αν και ο AFUE για μερικά παλαιά συστήματα θέρμανσης είναι κάτω από το 60%. Η τιμή AFUE μερικών σύγχρονων κλιβάνων υψηλής απόδοσης υπερβαίνει το 96%, αν και το υψηλό κόστος τέτοιων διατάξεων είναι αποτρεπτικό για γεωγραφικές θέσεις με ήπιο ή όχι πολύ κρύο χειμώνα. Η επίτευξη τέτοιων υψηλών αποδόσεων επιτυγχάνεται μέσω ανάκτησης του μεγαλύτερου μέρους της θερμότητας των καυσαερίων, συμπίκνωσης των υδρατμών, και απόρριψης των καυσαερίων σε θερμοκρασία έως 38°C, αντί των περίπου 200°C για τις συμβατικές διατάξεις.

Για *μηχανές αυτοκινήτων*, ως μέτρο του έργου εξόδου θεωρείται η ισχύς που αποδίδεται από τον στροφαλοφόρο άξονα. Ωστόσο, για τις διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ως μέτρο του έργου εξόδου μπορεί να ληφθεί η μηχανική ισχύς στην έξοδο του στροβίλου, ή η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της γεννήτριας της διάταξης.

Μια γεννήτρια είναι μια συσκευή η οποία μετατρέπει μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, και η αποδοτικότητα μιας γεννήτριας χαρακτηρίζεται από το **συντελεστή απόδοσης γεννήτριας**, που ορίζεται ως ο λόγος της *ηλεκτρικής ισχύος εξόδου προς τη μηχανική ισχύ εισόδου*. Η *θερμική απόδοση* μιας διάταξης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι πρωτεύουσας σημασίας στη θερμοδυναμική, ορίζεται συνήθως ως ο λόγος του τελικού έργου εξόδου του στροφαλοφόρου άξονα του στροβίλου προς τη θερμότητα εισόδου του εργαζόμενου ρευστού. Οι επιδράσεις των άλλων παραγόντων λαμβάνονται υπόψη, ορίζοντας ένα **συνολικό συντελεστή απόδοσης** για τη διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ως το *λόγο της τελικής ηλεκτρικής ισχύος εξόδου προς το ρυθμό ροής εισόδου ενέργειας καυσίμου*. Δηλαδή,

$$\eta_{ολ} = \eta_{καύσης} \cdot \eta_{θερμικός} \cdot \eta_{γεννήτριας} = \frac{\dot{W}_{\text{τελ.ηλεκτρ}}}{\text{HHV} \cdot \dot{m}_{ολ}} \quad (2.43)$$

Οι συντελεστές ολικής απόδοσης είναι περίπου 26%-30% για βενζινοκινητήρες αυτοκινούμενων οχημάτων, 30% - 40% για πετρελαιοκινητήρες, και έως 60% για μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Όλοι μας είμαστε εξοικειωμένοι με τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε *φως* με τη χρήση λαμπτήρων πυρακτώσεως, λαμπτήρων φθορισμού, και λαμπτήρων εκκένωσης υψηλής τάσης. Η απόδοση της μετατροπής του ηλεκτρισμού σε φως μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της ενέργειας που μετατρέπεται σε φως προς την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται. Για παράδειγμα, οι κοινοί λαμπτήρες πυρακτώσεως μετατρέπουν περίπου το 5% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν, σε φως, ενώ το υπόλοιπο της ενέργειας που καταναλώνεται διαχέεται ως θερμότητα, η οποία το καλοκαίρι επιβαρύνει το φορτίο ψύξης ενός κλιματιστικού. Ωστόσο, είναι πιο συνηθισμένη η έκφραση της αποδοτικότητας αυτής της διεργασίας μετατροπής μέσω της **φωτεινής απόδοσης**, η οποία ορίζεται ως η *παραγόμενη ποσότητα φωτός σε lumens ανά W καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας*.

Η αποδοτικότητα διαφορετικών συστημάτων φωτισμού δίνεται στον Πίνακα 2-1. Παρατηρείστε ότι ένας λαμπτήρας φωτισμού μικρών διαστάσεων παράγει περίπου τετραπλάσια ποσότητα φωτός, ανά W, σε σχέση με έναν λαμπτήρα πυρακτώσεως, και επομένως ένας λαμπτήρας φθορισμού των 15 W μπορεί να αντικαταστήσει ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως των 60 W (Σχήμα 2-55). Επίσης, ένας λαμπτήρας φθορισμού μικρών διαστάσεων, έχει διάρκεια ζωής περίπου 10.000 ώρες, που είναι δέκα φορές μεγαλύτερη

Πίνακας 2-1:
Αποδοτικότητα διαφόρων συστημάτων φωτισμού

Τύπος φωτισμού	lumens/W
Κάυση	
Κερί	0,3
Κηροζίνη	1-2
Πυράκτωση	
Συμβατικός λαμπτήρας	6-20
Λαμπτήρας αλογόνου	15-35
Φθορισμός	
Συμπαγής	40-87
Λαμπτήρας	60-120
Εκκένωση υψηλής τάσης	
Ατμός υδραργύρου	40-60
Αλογόνου	65-118
Νάτριο υψηλής πίεσης	85-140
Νάτριο χαμηλής πίεσης	70-200
Στερεά κατάσταση	
LED	20-160
OLED	15-60
Θεωρητικό όριο	300*

* Η τιμή αυτή εξαρτάται από τη φασματική κατανομή της αντίστοιχης ιδανικής φωτεινής πηγής. Για πηγές λευκού φωτός, το άνω όριο είναι περίπου 300 lm/W για λευκού φωτός, το άνω όριο είναι περίπου 300 lm/W για λευκού φωτός, 350 lm/W για πηγές φθοριπηγές τύπου metal halide, 350 lm/W για πηγές φθοριπηγές, και 400 lm/W για πηγές LED. Το φασματικό μέγεθος εντοπίζεται σε μήκος κύματος 555 nm (πράσινο), με μια ικανότητα φωτισμού 683 lm/W.

Α΄ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

ρη από αυτήν ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως και τοποθετείται κατευθείαν στην υποδοχή στην οποία βιδώνεται ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως. Επομένως, παρά το μεγαλύτερο αρχικό κόστος αγοράς τους, οι λαμπτήρες φθορισμού μειώνουν σημαντικά τα κόστη φωτισμού μέσω της μειωμένης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι λαμπτήρες εκκένωσης νατρίου υψηλής πίεσης προσφέρουν τον πλέον αποδοτικό φωτισμό, η χρήση τους όμως περιορίζεται σε εξωτερικούς χώρους, λόγω της κτηρινωπής χροιάς του φωτός που παράγουν.

Μπορούμε επίσης να ορίσουμε αποδοτικότητες για μαγειρική σκευή επειδή αυτές οι συσκευές μετατρέπουν ηλεκτρική ή χημική ενέργεια σε θερμότητα για μαγείρεμα. Η **αποδοτικότητα μιας μαγειρικής συσκευής** μπορεί να οριστεί ως ο λόγος της *ωφέλιμης ενέργειας που μεταφέρεται στην τροφή, προς την ενέργεια που καταναλώνεται από τη συσκευή* (Σχήμα 2-56). Οι ηλεκτρικές εστίες είναι πιο αποδοτικές από τις εστίες αερίου, αλλά το μαγείρεμα με καύσιμο το φυσικό αέριο είναι πολύ φθηνότερο από ότι με ηλεκτρικό ρεύμα λόγω της φθηνότερης τιμής μονάδας του φυσικού αερίου (Πίνακας 2-2).

Η αποδοτικότητα στο μαγείρεμα εξαρτάται από τις συνθήκες του χρήστη καθώς και από τις μεμονωμένες συσκευές. Οι αερόθερμοι φούρνοι, όπως και οι φούρνοι μικροκυμάτων, είναι εκ κατασκευής πιο αποδοτικοί από ότι οι συμβατικοί φούρνοι. Σε γενικές γραμμές, οι αερόθερμοι φούρνοι εξοικονομούν περίπου το *ένα τρίτο*, και οι φούρνοι μικροκυμάτων περίπου τα *δύο τρίτα* της ενέργειας που χρησιμοποιείται από τους συμβατικούς φούρνους. Η αποδοτικότητα στο μαγείρεμα μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας το μικρότερο δυνατό φούρνο για ψήσιμο, χρησιμοποιώντας μια χύτρα ταχύτητας, χρησιμοποιώντας μια αργή ηλεκτρική κουζίνα για στιφάδο και σούπες, χρησιμοποιώντας το μικρότερο για κάθε περίπτωση τηγάνι, χρησιμοποιώντας το μικρότερο θερμαντικό στοιχείο της ηλεκτρικής κουζίνας για τηγάνισμα μικρού μεγέθους, χρησιμοποιώντας τηγάνια με επίπεδο πυθμένα σε ηλεκτρικές εστίες ώστε αυτά να εφαρμόζουν καλά, διατηρώντας τα τηγάνια καθαρά και αστραφτερά, ξεπαγώνοντας κατεψυγμένες τροφές στο ψυγείο πριν το μαγείρεμα, αποφεύγοντας την προθέρμανση των τροφίμων εκτός και αν είναι απαραίτητο, διατηρώντας τις μαγειρικές συσκευές κλειστές κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος, χρησιμοποιώντας χρονόμετρα και θερμομέτρα για να αποφύγουμε το υπερβολικό μαγείρεμα, χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα αυτοκαθαρισμού των φούρνων αμέσως μετά το μαγείρεμα, και διατηρώντας καθαρές τις εσωτερικές επιφάνειες των φούρνων μικροκυμάτων.

Η χρήση ενεργειακά αποδοτικών συσκευών και πρακτικές μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας οδηγούν σε εξοικονόμηση χρημάτων μειώνοντας τους λογαριασμούς των αγαθών κοινής ωφελείας. Επίσης βοηθά το **περιβάλλον** ελαττώνοντας την ποσότητα αέριων ρύπων που εκλύονται στην ατμόσφαιρα παράγονται κατά την καύση καυσίμων στο σπλίτ ή σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η καύση ενός *therm* φυσικού αερίου παράγει 6,4 kg διοξειδίου του άνθρακα, που είναι αιτία

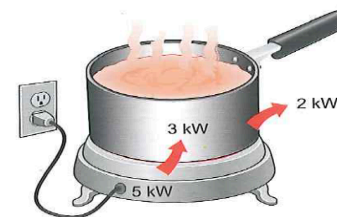
Πίνακας 2-2 Ενεργειακά κόστη μαγειρέματος σε μια κατασάβλα, με τη χρήση διαφορετικών συσκευών¹

Συσκευή μαγειρέματος	Θερμοκρασία μαγειρέματος	Χρόνος μαγειρέματος	Χρησιμοποιούμενη ενέργεια	Κόστος ενέργειας
Ηλεκτρική εστία	177°C	1 h	20 kWh	\$ 0.19
Αερόθερμος φούρνος	163°C	45min	1.39 kWh	\$ 0.13
Φούρνος με φυσικό αέριο	177°C	1 h	0.112 therm	\$ 0.13
Τηγάνι	216°C	1 h	0.9 kWh	\$ 0.09
Φρυγανιέρα	218°C	50 min	0.95 kWh	\$ 0.09
Κεραμική εστία	93°C	7 h	0.7 kWh	\$ 0.07
Φούρνος μικροκυμάτων	“υψηλή”	15 min	0.36 kWh	\$ 0.03

¹ Υποτίθεται ένα μοναδιαίο κόστος 0,095\$/kWh για ηλεκτρισμό και 1,20\$/ therm (1 therm = 105,500kJ) για φυσικό αέριο.



Σχήμα 2-55: Ένας λαμπτήρας φθορισμού μικρών διαστάσεων 15 W παράγει τόσο φως, όσο ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως των 60 W.



$$\begin{aligned} \text{Απόδοση} &= \frac{\text{Χρησιμοποιημένη ενέργεια}}{\text{Παρεχόμενη ενέργεια}} \\ &= \frac{3 \text{ kWh}}{5 \text{ kWh}} = 0.60 \end{aligned}$$

Σχήμα 2-56: Η απόδοση μιας συσκευής μαγειρέματος αναπαριστά το κλάσμα της ενέργειας που μεταφέρεται στη τροφή, ως προς την ενέργεια με την οποία τροφοδοτείται η συσκευή.

παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής, 4,7g οξειδίων του αζώτου και 0,54g υδρογονανθράκων, που δημιουργούν αιθαλομίχλη, 2,0 g μονοξειδίου του άνθρακα που είναι τοξική ουσία και 0,030 g διοξειδίου του θείου που αποτελεί παράγοντα πρόκλησης όξινης βροχής. Κάθε therm φυσικού αερίου που εξοικονομείται εξαιρείται την εκπομπή αυτών των ρύπων εξοικονομώντας \$0,60 για το μέσο καταναλωτή στις Η.Π.Α. Κάθε kWh ηλεκτρισμού που εξοικονομείται αποφεύγει την καύση 0,4 kg γαιάνθρακα και την έκλυση 1,0 kg CO₂ και 15 g SO₂ από μια εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργεί με άνθρακα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-14: Κόστος μαγειρέματος με Ηλεκτρικό Ρεύμα και Φυσικό Αέριο

Η αποδοτικότητα των μαγειρικών συσκευών επηρεάζει την εσωτερική απολαβή θερμότητας από αυτές, αφού μια μη αποδοτική συσκευή καταναλώνει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας για την ίδια εργασία, και η επιπλέον καταναλισκόμενη ενέργεια διαχέεται ως θερμότητα στον ζωτικό χώρο. Η απόδοση των ανοικτών καυστήρων προσδιορίζεται να είναι 73% για τις ηλεκτρικές μονάδες και 38% για τις μονάδες αερίου (Σχήμα 2-57). Θεωρούμε έναν ηλεκτρικό καυστήρα ισχύος 2 kW, σε μία τοποθεσία όπου τα μοναδιαία κόστη ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου είναι 0,09\$/kWh και 1,20\$/therm (1 therm = 105,500 kJ), αντίστοιχα. Να προσδιορίσετε το ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας από τον καυστήρα και το μοναδιαίο κόστος ωφέλιμης ενέργειας, για αυτούς τους δύο τύπους καυστήρων.

Λύση: Θεωρούμε εστίες που λειτουργούν με ηλεκτρικό ρεύμα και φυσικό αέριο. Πρόκειται να προσδιοριστούν ο ρυθμός ενεργειακής κατανάλωσης και το μοναδιαίο κόστος ωφέλιμης ενέργειας.

Ανάλυση Η απόδοση του ηλεκτρικού θερμαντικού στοιχείου δίνεται ίση με 73%. Επομένως, ένας καυστήρας που καταναλώνει 2kW ηλεκτρικής ισχύος θα παρέχει

$$\dot{Q}_{\text{ωφ.}} = (\text{ενέργεια εισόδου}) \times (\text{απόδοση}) = (2\text{ kW}) \cdot (0,73) = 1,46 \text{ kW}$$

ωφέλιμης ενέργειας. Το μοναδιαίο κόστος ωφέλιμης ενέργειας είναι αντιστρόφως ανάλογο της απόδοσης, και προσδιορίζεται από τη σχέση

$$\text{Κόστος ωφέλιμης ενέργειας} = \frac{\text{Κόστος ενέργειας εισόδου}}{\text{Απόδοση}} = \frac{\$0,09 / \text{kWh}}{0,73} = 0,123\$/\text{kWh}$$

Επισημαίνοντας ότι η απόδοση ενός καυστήρα φυσικού αερίου είναι 38%, η ισχύς εισόδου σε έναν καυστήρα φυσικού αερίου που προμηθεύει τη χρησιμοποιούμενη ενέργεια στον ίδιο ρυθμό (1,46 kW) είναι

$$\dot{Q}_{\text{in,αερ.}} = \frac{\dot{Q}_{\text{ωφ.}}}{\text{Απόδοση}} = \frac{1,46 \text{ kW}}{0,38} = 3,84 \text{ kW}$$

Επομένως, ένας καυστήρας φυσικού αερίου θα πρέπει να παρέχει έναν ρυθμό τουλάχιστον ίσο με 13.100 Btu/h, ώστε να λειτουργεί ακριβώς όπως μία μονάδα ηλεκτρισμού. Δεδομένου ότι 1 therm = 29,3 kWh, το μοναδιαίο κόστος ωφέλιμης ενέργειας στην περίπτωση του καυστήρα φυσικού αερίου προσδιορίζεται να είναι

$$\text{Κόστος ωφέλιμης ενέργειας} = \frac{\text{Κόστος ενέργειας εισόδου}}{\text{Απόδοση}} = \frac{1,20\$/29,3\text{ kWh}}{0,38} = 0,108\$/\text{kWh}$$

Συζήτηση Το κόστος του χρησιμοποιούμενου φυσικού αερίου είναι μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος. Επομένως, παρά την μεγαλύτερη αποδοτικότητα, το μαγείρεμα με έναν ηλεκτρικό καυστήρα θα κοστίζει στην περίπτωση αυτή περίπου 14% περισσότερο, σε σύγκριση με έναν καυστήρα φυσικού αερίου. Αυτό εξηγεί γιατί οι συνειδητοποιημένοι καταναλωτές επιζητούν πάντοτε συσκευές φυσικού αερίου, και δεν είναι συνετή η χρήση ηλεκτρικού ρεύματος για θερμαντικούς λόγους.

Αποδόσεις Μηχανικών και Ηλεκτρικών Συσκευών

Η μεταφορά μηχανικής ενέργειας συνήθως επιτυγχάνεται μέσω ενός περιστρεφόμενου άξονα και για το λόγο αυτό το μηχανικό έργο αναφέρεται συνήθως και ως *αξονικό έργο*. Μία αντλία ή ένας ανεμιστήρας δέχεται ως είσοδο αξονικό έργο (συνήθως από έναν ηλεκτρικό κινητήρα), το οποίο και μεταφέρει στο ρευστό λειτουρ-



Σχήμα 2-57: Διάγραμμα ηλεκτρικής μονάδας θέρμανσης απόδοσης 73% και μονάδας αερίου απόδοσης 38%, για το Παράδειγμα 2-14.

Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

γίας ως μηχανική ενέργεια (μείον τις απώλειες λόγω τριβών). Από την άλλη πλευρά, ένας στρόβιλος, μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια ενός ρευστού σε αξονικό έργο. Απουσία μη αντιστρεπτών φαινομένων όπως τριβών, η μηχανική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί εξ ολοκλήρου από μια μηχανική μορφή σε κάποια άλλη και ο **συντελεστής μηχανικής απόδοσης** μιας συσκευής ή μιας διεργασίας μπορεί να οριστεί ως (Σχήμα 2-58)

$$\eta_{\text{μηχ}} = \frac{\text{μηχανική ενέργεια εξόδου}}{\text{μηχανική ενέργεια εισόδου}} = \frac{E_{\text{μηχ, out}}}{E_{\text{μηχ, in}}} = 1 - \frac{E_{\text{μηχ, απωλ}}}{E_{\text{μηχ, in}}} \quad (2.44)$$

Μια απόδοση μετατροπής μικρότερη του 100% δηλώνει ότι η μετατροπή υπολείπεται της ιδανικής και ότι κατά τη διάρκεια της έχουν συμβεί απώλειες. Μια μηχανική απόδοση 97% δηλώνει ότι το 3% της μηχανικής ενέργειας εισόδου μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, ως αποτέλεσμα της θέρμανσης λόγω τριβών, και θα γίνει από μόνο του εμφανές ως μια ελαφρά αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού.

Στα συστήματα ρευστών, συνήθως ενδιαφερόμαστε για την αύξηση της πίεσης, της ταχύτητας ή/και της υψομετρικής στάθμης ενός ρευστού. Αυτό επιτυγχάνεται με την *παροχή μηχανικής ενέργειας* στο ρευστό, μέσω μιας αντλίας, ενός ανεμιστήρα, ή ενός συμπιεστή (θα αναφερόμαστε σε όλες αυτές τις συσκευές, ως αντλίες). Ίσως ενδιαφερόμαστε για την αντίστροφη διεργασία της *εξαγωγής μηχανικής ενέργειας* από ένα ρευστό μέσω ενός στρόβιλου και η παραγωγή μηχανικής ισχύος, με τη μορφή ενός περιστρεφόμενου άξονα, που μπορεί να θέτει σε κίνηση μια ηλεκτρογεννήτρια ή κάποια άλλη περιστροφική διάταξη. Ο βαθμός τελειότητας της διεργασίας μετατροπής μεταξύ του μηχανικού έργου που παρέχεται ή που εξάγεται και της μηχανικής ενέργειας του ρευστού, εκφράζεται από την **απόδοση αντλίας** και την **απόδοση στρόβιλου**, που ορίζονται ως

$$\eta_{\text{αντλίας}} = \frac{\text{αύξηση μηχανικής ενέργειας ρευστού}}{\text{μηχανική ενέργεια εισόδου}} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{μηχ, ρευστού}}}{\dot{W}_{\text{άξονα, εισ}}} = \frac{\dot{W}_{\text{αντλίας, ωφ.}}}{\dot{W}_{\text{αντλίας}}} \quad (2.45)$$

όπου $\Delta \dot{E}_{\text{μηχ, ρευστού}} = \dot{E}_{\text{μηχ, out}} - \dot{E}_{\text{μηχ, in}}$ είναι ο ρυθμός αύξησης της μηχανικής ενέργειας του ρευστού, που είναι ισοδύναμη με την **ωφέλιμη ισχύ άντλησης** $\dot{W}_{\text{αντλίας, ωφ.}}$ με την οποία εφοδιάζεται το ρευστό, και

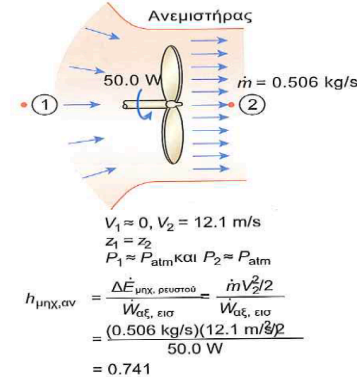
$$\eta_{\text{στροβ.}} = \frac{\text{μηχανική ενέργεια εξόδου}}{\text{ελάττωση μηχανικής ενέργειας ρευστού}} = \frac{\dot{W}_{\text{άξονα, out}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{μηχ, ρευστού}}|} = \frac{\dot{W}_{\text{στροβ}}}{\dot{W}_{\text{στροβ, εξ}}} \quad (2.46)$$

όπου $|\Delta \dot{E}_{\text{μηχ, ρευστού}}| = \dot{E}_{\text{μηχ, in}} - \dot{E}_{\text{μηχ, out}}$ είναι ο ρυθμός ελάττωσης της μηχανικής ενέργειας του ρευστού, που είναι ισοδύναμος με τη μηχανική ισχύ που εξάγεται από το ρευστό μέσω του στρόβιλου $\dot{W}_{\text{στροβ, εξ}}$, και χρησιμοποιούμε την απόλυτη τιμή για να αποφύγουμε αρνητικές τιμές για τους συντελεστές απόδοσης. Ένας συντελεστής απόδοσης αντλίας ή στρόβιλου ίσος με 100% υποδηλώνει πλήρη μετατροπή μεταξύ του αξονικού έργου και της μηχανικής ενέργειας του ρευστού και η τιμή αυτή μπορεί να προσεγγιστεί (αλλά να μην επιτευχθεί ποτέ) καθώς ελαχιστοποιούνται οι επιδράσεις των τριβών.

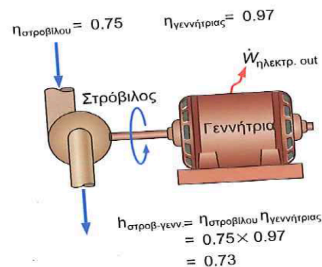
Η ηλεκτρική ενέργεια συνήθως μετατρέπεται σε *περιστροφική μηχανική ενέργεια* μέσω ηλεκτροκινητήρων, για να τεθούν σε κίνηση ανεμιστήρες, συμπιεστές, ρομποτικοί βραχίονες, διατάξεις εκκίνησης αυτοκινήτων κλπ. Η αποδοτικότητα αυτής της διαδικασίας μετατροπής χαρακτηρίζεται από τον **συντελεστή απόδοσης κινητήρα** $\eta_{\text{κινητήρα}}$, που είναι ο λόγος της *μηχανικής ενέργειας εξόδου* του κινητήρα προς την *ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοσίας του*. Οι αποδόσεις κινητήρων υπό πλήρες φορτίο ποικίλλουν από περίπου 35% για μικρούς κινητήρες, έως άνω του 97% για μεγάλους κινητήρες υγλής απόδοσης. Η διαφορά ανάμεσα στην καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια και στην αποδιδόμενη μηχανική ενέργεια εκλύεται ως θερμική απώλεια.

Ο συντελεστής μηχανικής απόδοσης δεν θα πρέπει να συγχέεται με τον **συντελεστή απόδοσης κινητήρα**, αλλά ούτε και με τον **συντελεστή απόδοσης γεννήτριας**, οι οποίοι ορίζονται ως

$$\text{Κινητήρας: } \eta_{\text{κινητήρα}} = \frac{\text{μηχανική ισχύς εξόδου}}{\text{ηλεκτρική ισχύς εισόδου}} = \frac{\dot{W}_{\text{άξονα, out}}}{\dot{W}_{\text{ηλεκτρ., in}}} \quad (2.47)$$



Σχήμα 2-58: Η μηχανική απόδοση ενός ανεμιστήρα είναι ο λόγος του ρυθμού αύξησης της μηχανικής ενέργειας του αέρα ως προς τη μηχανική ισχύ εισόδου.



Σχήμα 2-59:

Ο συντελεστής ολικής απόδοσης μιας διάταξης στροβίλου - γεννήτριας είναι το γινόμενο των συντελεστών απόδοσης του στροβίλου και της γεννήτριας, και αναπαριστά το κλάσμα της μηχανικής ισχύος του ρευστού που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ.

του συνόλου της μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας εισόδου σε θερμική ενέργεια και η διάταξη στην περίπτωση αυτή λειτουργεί απλά ως θερμική αντίσταση. Το άνω όριο του 100% αντιστοιχεί στην περίπτωση της πλήρους μετατροπής, χωρίς να υφίστανται τριβές ή άλλες μη αντιστρεπτότητες, και επομένως δεν υπάρχει μετατροπή μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική ενέργεια.

Γεννήτρια: $\eta_{\text{γεννήτρια}} = \frac{\text{ηλεκτρική ισχύς εξόδου}}{\text{μηχανική ισχύς εισόδου}} = \frac{\dot{W}_{\text{ηλεκτρ.,out}}}{\dot{W}_{\text{αξονα,in}}} \quad (2.48)$

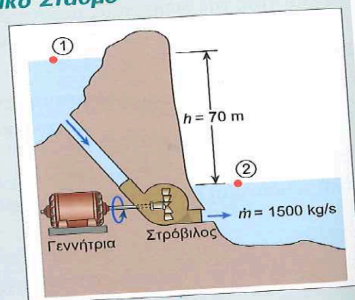
Μια αντλία περιλαμβάνεται συνήθως μαζί με τον κινητήρα της, και ένας στρόβιλος μαζί με τη γεννήτριά του. Επομένως, ενδιαφερόμαστε συνήθως για τη **συνδυασμένη ή ολική απόδοση** των σύνθετων διατάξεων αντλίας-κινητήρα και στροβίλου-γεννήτριας (Σχήμα 2-59), οι οποίοι ορίζονται ως

$$\eta_{\text{αντλίας-κινητήρα}} = \eta_{\text{αντλίας}} \cdot \eta_{\text{κινητήρα}} = \frac{\dot{W}_{\text{αντλίας,ωφ.}}}{\dot{W}_{\text{ηλεκτρ.,in}}} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{μηχ.ρ.ευστού}}}{\dot{W}_{\text{ηλεκτρ.,in}}} \quad (2.49)$$

$$\eta_{\text{στροβ-γενν}} = \eta_{\text{στροβ}} \cdot \eta_{\text{γεννήτριας}} = \frac{\dot{W}_{\text{ηλεκτρ.,out}}}{\dot{W}_{\text{στροβ,εξ.}}} = \frac{\dot{W}_{\text{ηλεκτρ.,out}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{μηχ.ρ.ευστού}}|} \quad (2.50)$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-15: Παραγωγή Ισχύος από έναν Υδροηλεκτρικό Σταθμό

Πρόκειται να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς εγκαθιστώντας μια διάταξη υδραυλικού στροβίλου - γεννήτριας σε μια τοποθεσία 70 m κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια μιας μεγάλης υδάτινης δεξαμενής, η οποία μπορεί να παρέχει νερό με έναν σταθερό ρυθμό 1.500 kg/s (Σχήμα 2-60). Εάν η μηχανική ισχύς εξόδου του στροβίλου είναι 800 kW και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι 750 kW, να προσδιορίσετε το συντελεστή απόδοσης του στροβίλου και τη συνδυασμένη απόδοση στροβίλου - γεννήτριας για αυτόν το σταθμό. Θεωρείστε αμελητέες τις απώλειες στους αγωγούς.



Σχήμα 2-60: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-15

Λύση: Μια διάταξη υδραυλικού στροβίλου - γεννήτριας εγκαθίσταται σε μια μεγάλη υδάτινη δεξαμενή, για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Να προσδιοριστούν η συνδυασμένη απόδοση στροβίλου - γεννήτριας και η απόδοση του στροβίλου.

Παραδοχές 1 Η υψομετρική στάθμη του νερού στη δεξαμενή παραμένει σταθερή. 2 Η μηχανική ενέργεια του νερού στο σημείο εξόδου του στροβίλου είναι αμελητέα.

Ανάλυση Λαμβάνουμε ως σημείο 1 την ελεύθερη επιφάνεια του νερού στη δεξαμενή και ως σημείο 2 το σημείο εξόδου του στροβίλου. Επίσης λαμβάνουμε την έξοδο του στροβίλου ως μηδενικό υψόμετρο (επίπεδο αναφοράς για τη δυναμική ενέργεια) ως το επίπεδο αναφοράς ($z_2 = 0$), έτσι ώστε οι δυναμικές ενέργειες στα σημεία 1 και 2 είναι $e_{\text{δυν}}^{(1)} = gz_1$ και $e_{\text{δυν}}^{(2)} = 0$. Η ενέργεια ροής P/ρ και στα δύο σημεία είναι μηδενική, επειδή και τα δύο σημεία 1 και 2 είναι ανοικτά στην ατμόσφαιρα ($P_1 = P_2 = P_{\text{atm}}$). Επιπλέον, η κινητική ενέργεια και στα δύο σημεία είναι μηδενική ($e_{\text{κιν}}^{(1)} = e_{\text{κιν}}^{(2)} = 0$), επειδή το νερό στη θέση 1 είναι ουσιαστικά ακίνητο, και η κινητική ενέργεια του νερού στην έξοδο του στροβίλου υποτίθεται ότι είναι μηδενική. Η δυναμική ενέργεια του νερού στη θέση 1 είναι

$$e_{\text{δυν}}^{(1)} = gz_1 = (9,81 \text{ m/s}^2) \cdot (70 \text{ m}) \cdot \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1.000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 0,687 \text{ kJ/kg}$$

Επομένως ο ρυθμός με τον οποίο η μηχανική ενέργεια του νερού τροφοδοτείται στο στρόβιλο γίνεται

$$|\Delta \dot{E}_{\text{μηχ.ρ.ευστού}}| = \dot{m} (e_{\text{μηχ.,in}} - e_{\text{μηχ.,out}}) = \dot{m} (e_{\text{δυν}}^{(1)} - 0) = \dot{m} e_{\text{δυν}}^{(1)} = (1.500 \text{ kg/s}) \cdot (0,687 \text{ kJ/kg}) = 1.031 \text{ kW}$$

Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Η συνδυασμένη απόδοση στροβίλου - γεννήτριας και η απόδοση του στροβίλου προσδιορίζονται από τους αντίστοιχους ορισμούς τους και είναι

$$\eta_{\text{στροβ-γενν}} = \frac{\dot{W}_{\text{ηλεκτρ, out}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{μηχ, ρευστού}}|} = \frac{750 \text{ kW}}{1031 \text{ kW}} = 0,727 \text{ ή } 72,7\%$$

$$\eta_{\text{στροβ}} = \frac{\dot{W}_{\text{μηχ, out}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{μηχ, ρευστού}}|} = \frac{800 \text{ kW}}{1.031 \text{ kW}} = 0,776 \text{ ή } 77,6\%$$

Επομένως, η δεξαμενή εφοδιάζει το στρόβιλο με 1.031 kW μηχανικής ισχύος, ο οποίος μετατρέπει τα 800 kW από αυτά σε αξονικό έργο που δίνει κίνηση στη γεννήτρια, η οποία με τη σειρά της παράγει 750 kW ηλεκτρικής ισχύος.

Συζήτηση Το πρόβλημα αυτό μπορεί επίσης να επιλυθεί λαμβάνοντας ως σημείο 1 το σημείο εισόδου στο στρόβιλο και χρησιμοποιώντας την ενέργεια ροής, αντί της δυναμικής ενέργειας. Θα προέκυπτε το ίδιο αποτέλεσμα εφόσον η ενέργεια ροής στην είσοδο του στροβίλου ισούται με τη δυναμική ενέργεια στην ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2-16: Εξοικονόμηση Κόστους με Χρήση Κινητήρων Υψηλής Απόδοσης

Ένας ηλεκτροκινητήρας ισχύος 60 hp (ένας κινητήρας που αποδίδει 60 hp αξονικής ισχύος υπό πλήρες φορτίο) που έχει βαθμό απόδοσης 89,0%, είναι καταπονημένος και πρόκειται να αντικατασταθεί από έναν υψηλής απόδοσης κινητήρα, με απόδοση 93,2% (Σχήμα 2-61). Ο κινητήρας λειτουργεί 3.500 ώρες ετησίως υπό πλήρες φορτίο. Λαμβάνοντας ότι το μοναδιαίο κόστος του ηλεκτρικού ρεύματος είναι 0,08\$/kWh, να προσδιορίσετε την ποσότητα ενέργειας και τα χρήματα που θα εξοικονομηθούν, ως αποτέλεσμα της εγκατάστασης του κινητήρα υψηλής απόδοσης, αντί της διατήρησης του συμβατικού κινητήρα. Επίσης, να προσδιορίσετε την απλή περίοδο αποπληρωμής, εάν οι τιμές αγοράς του συμβατικού και του κινητήρα υψηλής απόδοσης είναι 4520\$ και 5160\$, αντίστοιχα.

Λύση: Ένας καταπονημένος συμβατικός κινητήρας πρόκειται να αντικατασταθεί από έναν νέο κινητήρα υψηλής απόδοσης. Πρόκειται να προσδιοριστούν τα ποσά εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας και χρημάτων, καθώς και η περίοδος αποπληρωμής.

Παραδοχές Ο συντελεστής φορτίου του κινητήρα παραμένει ίσος με 1 (πλήρες φορτίο) καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας.

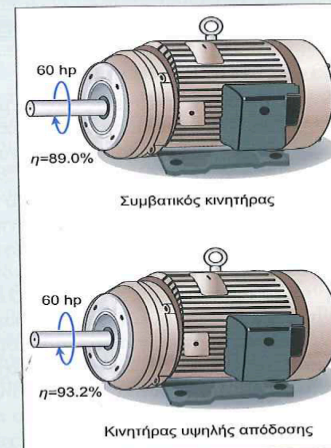
Ανάλυση Η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνει κάθε κινητήρας, καθώς και η διαφορά αυτών των δύο τιμών ισχύος μπορούν να εκφραστούν ως

$$\dot{W}_{\text{ηλ. in, συμβ}} = \frac{\dot{W}_{\text{άξονα}}}{\eta_{\text{συμβ}}} = \frac{(\text{ονομαστική ισχύς})(\text{συντελεστής φορτίου})}{\eta_{\text{συμβ}}}$$

$$\dot{W}_{\text{ηλ. in, υψ. απ.}} = \frac{\dot{W}_{\text{άξονα}}}{\eta_{\text{υψ. απ.}}} = \frac{(\text{ονομαστική ισχύς})(\text{συντελεστής φόρτου})}{\eta_{\text{υψ. απ.}}}$$

$$\begin{aligned} \text{Εξοικονόμηση ενέργειας} &= \dot{W}_{\text{ηλ. in, συμβ}} - \dot{W}_{\text{ηλ. in, υψ. απ.}} = \\ &= (\text{ονομαστική ισχύς})(\text{συντελεστής φόρτου}) \times \left(\frac{1}{\eta_{\text{συμβ}}} - \frac{1}{\eta_{\text{υψ. απ.}}} \right) \end{aligned}$$

όπου $\eta_{\text{συμβ}}$ είναι ο συντελεστής απόδοσης του συμβατικού κινητήρα και $\eta_{\text{υψ. απ.}}$ είναι ο αντίστοιχος συντελεστής του κινητήρα υψηλής απόδοσης. Κατά συνέπεια, η ετήσια εξοικονόμηση σε ενέργεια και χρήμα που σχετίζεται με την εγκατάσταση του κινητήρα υψηλής απόδοσης γίνεται



Σχήμα 2-61: Διάγραμμα Παραδείγματος 2-17.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στόχοι του Κεφαλαίου:

- Διερεύνηση του έργου μετακίνησης οριακών επιφανειών, ή έργου PdV , που συναντάται συχνά σε παλινδρομικές διατάξεις όπως μηχανές αυτοκίνησης και συμπιεστές.
- Διαπίστωση ότι ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής αποτελεί απλά μια έκφραση της αρχής διατήρησης της ενέργειας για κλειστά (σταθερής μάζας) συστήματα.
- Ανάπτυξη του γενικού ενεργειακού ισοζυγίου, όπως αυτό εφαρμόζεται στα κλειστά συστήματα.
- Ορισμός της ειδικής θερμότητας υπό σταθερό όγκο και της ειδικής θερμότητας υπό σταθερή πίεση.
- Συσχέτιση των ειδικών θερμότητων με τους υπολογισμούς των μεταβολών της εσωτερικής ενέργειας και της ενθαλπίας των ιδανικών αερίων.
- Περιγραφή των ασυμπίεστων ουσιών και προσδιορισμός των μεταβολών της εσωτερικής ενέργειας και της ενθαλπίας τους.
- Επίλυση προβλημάτων ενεργειακού ισοζυγίου για κλειστά (σταθερής μάζας) συστήματα, τα οποία εμπεριέχουν αλληλεπιδράσεις έργου και θερμότητας μεταξύ καθαρών ουσιών, ιδανικών αερίων, και ασυμπίεστων ουσιών.

Στο Κεφάλαιο 2, θεωρήσαμε διάφορες μορφές ενέργειας και μεταφοράς ενέργειας και αναπτύξαμε μια γενική σχέση για την αρχή διατήρησης της ενέργειας ή του ενεργειακού ισοζυγίου. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3, διδαχθήκαμε πώς να προσδιορίζουμε τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των καθαρών ουσιών. Σε αυτό το κεφάλαιο θα εφαρμόσουμε τη σχέση του ενεργειακού ισοζυγίου σε συστήματα τα οποία δεν εμπεριέχουν οποιαδήποτε ροή μάζας δια μέσου των ορίων τους, δηλαδή σε κλειστά συστήματα.

Ξεκινάμε αυτό το κεφάλαιο με μια συζήτηση περί του έργου μετακίνησης οριακών επιφανειών, ή έργου PdV , που συναντάται συχνά σε παλινδρομικές διατάξεις, όπως είναι οι μηχανές αυτοκίνησης και οι συμπιεστές. Συνεχίζουμε εφαρμόζοντας τη σχέση του γενικού ενεργειακού ισοζυγίου, η οποία εκφράζεται απλά ως $E_{in} - E_{out} = \Delta E_{system}$ σε συστήματα τα οποία περιλαμβάνουν καθαρές ουσίες. Στη συνέχεια ορίζουμε τις ειδικές θερμότητες, λαμβάνουμε σχέσεις για την εσωτερική ενέργεια και την ενθαλπία των ιδανικών αερίων συναρτήσει των ειδικών θερμότητων και των θερμοκρασιακών μεταβολών, και πραγματοποιούμε ενεργειακά ισοζύγια σε διάφορα συστήματα που περιλαμβάνουν ιδανικά αέρια. Αυτό επαναλαμβάνεται για συστήματα που περιλαμβάνουν στερεά και υγρά, τα οποία προσεγγίζονται ως ασυμπίεστες ουσίες.

4.1 Έργο Μετακίνησης Οριακών Επιφανειών

Μια μορφή μηχανικού έργου που συναντάται συχνά στην πράξη σχετίζεται με την εκτόνωση ή τη συμπίεση ενός αερίου εντός μιας διάταξης εμβόλου - κυλίνδρου. Κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας, τμήμα της οριακής επιφάνειας (η εσωτερική επιφάνεια του εμβόλου) εκτελεί μια παλινδρομική κίνηση. Επομένως το έργο εκτόνωσης και συμπίεσης ονομάζεται συχνά **έργο μετακίνησης οριακών επιφανειών**, ή απλά **έργο οριακών επιφανειών (έργο ογκομεταβολής)** (Σχήμα 4-1). Συχνά, για λόγους που εξηγούνται αργότερα, αυτό ονομάζεται *έργο PdV* . Το έργο ογκομεταβολής είναι η κύρια μορφή έργου που εμπλέκεται στις *μηχανές αυτοκινήτων*. Κατά τη διάρκεια της εκτόνωσής τους, τα καυσαέρια εξαναγκάζουν το έμβολο να κινηθεί, και αυτό με τη σειρά του εξαναγκάζει το στροφαλοφόρο άξονα να περιστραφεί.

Το έργο μετακίνησης οριακών επιφανειών που σχετίζεται με πραγματικές μηχανές ή συμπιεστές, δεν μπο-

ρεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια μόνον από τη θερμοδυναμική ανάλυση, επειδή το έμβολο κινείται συνήθως με πολύ μεγάλες ταχύτητες, κάτι καθιστά δύσκολο για το αέριο που βρίσκεται στο εσωτερικό του κυλίνδρου να διατηρείται σε ισορροπία. Συνεπώς οι καταστάσεις από τις οποίες διέρχεται το σύστημα κατά τη διάρκεια της διεργασίας δεν μπορούν να οριστούν επακριβώς, και δεν μπορεί να σχεδιαστεί η διαδρομή της διεργασίας. Το έργο, όντας μια συνάρτηση μετάβασης (μεταφοράς) δεν μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά, χωρίς γνώση της διαδρομής. Επομένως, το έργο ογκομεταβολής σε πραγματικές μηχανές ή σε συμπίεστες προσδιορίζεται μέσω άμεσων μετρήσεων.

Στην ενότητα αυτή, αναλύουμε το έργο ογκομεταβολής για μια διεργασία οιονεί ισορροπίας, μια διεργασία κατά τη διάρκεια της οποίας, σε κάθε χρονική στιγμή, το σύστημα παραμείνει σχεδόν σε ισορροπία. Μια διεργασία οιονεί ισορροπίας, ονομαζόμενη επίσης *ψευδοστατική διεργασία*, προσεγγίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις πραγματικές μηχανές, ιδιαίτερα όταν το έμβολο κινείται με μικρές ταχύτητες. Υπό ταυτόσημες συνθήκες, το έργο εξόδου των μηχανών βρίσκεται να είναι μέγιστο, και το έργο εισόδου των συμπίεστών να είναι ελάχιστο, όταν χρησιμοποιούνται ψευδοστατικές διεργασίες στη θέση των μη ψευδοστατικών διεργασιών. Παρακάτω το έργο που σχετίζεται με ένα κινούμενο όριο αποτιμάται για μια ψευδοστατική διεργασία.

Θεωρούμε το αέριο που περιέχεται σε μια διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-2. Η αρχική πίεση του αερίου είναι P , ο συνολικός όγκος V , και το εμβαδόν της κάθετης διατομής του εμβόλου A . Εάν το έμβολο αφηθεί να μετατοπιστεί κατά μια απόσταση ds με κάποιον ψευδοστατικό τρόπο, τότε το διαφορικό έργο που παράγεται κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας είναι

$$\delta W_b = Fds = PAds = PdV \quad (4.1)$$

Δηλαδή, το έργο ογκομεταβολής στη διαφορική του μορφή ισούται με το γινόμενο της απόλυτης πίεσης P επί τη διαφορική μεταβολή του όγκου dV του συστήματος. Η έκφραση αυτή εξηγεί επίσης γιατί το έργο ογκομεταβολής αποκαλείται μερικές φορές έργο $P dV$.

Σημειώστε στην Εξίσωση 4.1 ότι P είναι η απόλυτη πίεση, η οποία είναι πάντοτε θετική. Ωστόσο, η μεταβολή του όγκου dV είναι θετική κατά τη διάρκεια κάποιας διεργασίας εκτόνωσης (ο όγκος αυξάνεται) και αρνητική κατά τη διάρκεια κάποιας διεργασίας συμπίεσης (ο όγκος ελαττώνεται). Επομένως, το έργο ογκομεταβολής είναι θετικό κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας εκτόνωσης και αρνητικό κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας συμπίεσης. Έτσι η Εξίσωση 4.1 μπορεί να θεωρηθεί ως μια έκφραση για το παραγόμενο οριακό έργο ογκομεταβολής, $W_{b,out}$. Μια αρνητική τιμή υποδηλώνει έργο ογκομεταβολής εισόδου, έργο που παράγεται πάνω στο σύστημα (συμπίεση).

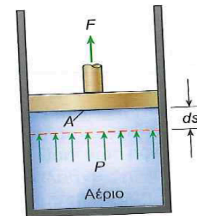
Το συνολικό παραγόμενο έργο ογκομεταβολής κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διεργασίας καθώς το έμβολο μετακινείται, λαμβάνεται προσθέτοντας όλα τα διαφορικά έργα από την αρχική έως την τελική κατάσταση:

$$W_b = \int_1^2 PdV \quad (\text{kJ}) \quad (4.2)$$

Το ολοκλήρωμα αυτό μπορεί να αποτιμηθεί, μόνον εάν γνωρίζουμε τη συναρτησιακή εξάρτηση μεταξύ των P και V κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Δηλαδή θα πρέπει να είναι διαθέσιμη η συνάρτηση $P = f(V)$. Σημειώστε ότι η $P = f(V)$ είναι απλά η εξίσωση της διαδρομής της διεργασίας σε ένα διάγραμμα $P-V$. Η διεργασία ψευδοστατικής εκτόνωσης που περιγράφηκε φαίνεται σε ένα διάγραμμα $P-V$ στο Σχήμα 4-3. Στο διάγραμμα αυτό, το διαφορικό εμβαδόν dA ισούται με PdV , που είναι το διαφορικό έργο. Το συνολικό εμβαδόν A κάτω από την καμπύλη 1-2 της διεργασίας λαμβάνεται προσθέτοντας αυτά τα διαφορικά εμβαδά:



Σχήμα 4-1: Το έργο που σχετίζεται με τη μετακίνηση οριακών επιφανειών ονομάζεται έργο μετακίνησης οριακών επιφανειών ή έργο ογκομεταβολής.



Σχήμα 4-2 Ένα αέριο παράγει ένα διαφορικό ποσό έργου δW_b καθώς αναγκάζει το έμβολο να μετακινηθεί κατά μία διαφορική μετατόπιση ds .

$$Εμβαδόν = A = \int_1^2 dA = \int_1^2 PdV \quad (4.3)$$

Μια σύγκριση αυτής της εξίσωσης με την Εξίσωση 4.2, καταδεικνύει ότι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της διεργασίας σε ένα διάγραμμα $P - V$ ισούται, κατά μέτρο, με το παραγόμενο έργο κατά τη διάρκεια μιας ψευδοστατικής διεργασίας εκτόνωσης ή συμπίεσης ενός κλειστού συστήματος (σε ένα διάγραμμα $P-V$, αυτό αναπαριστά το παραγόμενο έργο ογκομεταβολής ανά μονάδα μάζας).

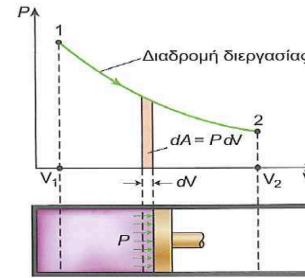
Ένα αέριο μπορεί να ακολουθεί αρκετές διαφορετικές διαδρομές καθώς εκτονώνεται από την κατάσταση 1 στην κατάσταση 2. Γενικά, κάθε διαδρομή θα ορίζει και ένα διαφορετικό εμβαδόν κάτω από αυτήν και εφόσον αυτό το εμβαδόν αναπαριστά το μέτρο του έργου, το παραγόμενο έργο θα είναι διαφορετικό για κάθε διεργασία (Σχήμα 4-4). Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού το έργο είναι μια συνάρτηση μεταφοράς (δηλαδή εξαρτάται από τη διαδρομή που ακολουθείται καθώς και από τις τελικές καταστάσεις). Εάν το έργο δεν ήταν μια συνάρτηση μεταφοράς, όλες οι διατάξεις που λειτουργούν σε κύκλους (μηχανές αυτοκινήτων, σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) δεν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως διάταξη παραγωγής έργου. Το παραγόμενο έργο από αυτές τις συσκευές κατά τη διάρκεια ενός τμήματος του κύκλου λειτουργίας τους, θα έπρεπε να καταναλώνεται κατά τη διάρκεια κάποιου άλλου τμήματος, και δεν θα υπήρχε συνολικό παραγόμενο έργο. Ο κύκλος που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-5 παράγει ένα συνολικό έργο εξόδου, επειδή το παραγόμενο έργο από το σύστημα κατά τη διάρκεια της διεργασίας εκτόνωσης (εμβαδόν επιφάνειας κάτω από τη διαδρομή A) είναι μεγαλύτερο από το έργο που παράγεται στο σύστημα κατά τη διάρκεια της διεργασίας του τμήματος συμπίεσης του κύκλου (εμβαδόν επιφάνειας κάτω από τη διαδρομή B), και η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο είναι το συνολικά (καθαρό) παραγόμενο έργο κατά τη διάρκεια του κύκλου λειτουργίας (έγχρωμη περιοχή).

Εάν η σχέση μεταξύ P και V κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας εκτόνωσης ή συμπίεσης προσδιορίζεται με τη βοήθεια πειραματικών δεδομένων αντί με κάποια συναρτησιακή μορφή, προφανώς δεν μπορούμε να πραγματοποιήσουμε την ολοκλήρωση με αναλυτικό τρόπο. Μπορούμε ωστόσο να σχεδιάσουμε το διάγραμμα $P-V$ της διεργασίας, χρησιμοποιώντας τα δοθέντα ζεύγη τιμών και να υπολογίσουμε με γραφικό τρόπο το εμβαδόν της περιοχής κάτω από αυτά για να προσδιορίσουμε το παραγόμενο έργο.

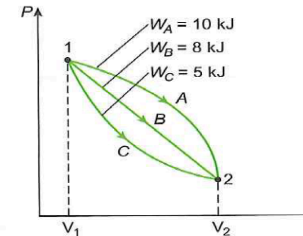
Κυριολεκτώντας, η πίεση P στην Εξίσωση 4.2 είναι η πίεση στην εσωτερική επιφάνεια του εμβόλου. Αυτή γίνεται ίση με την πίεση του αερίου εντός του κυλίνδρου, μόνον εάν η διεργασία είναι ψευδοστατική και επομένως ολόκληρη η ποσότητα του αερίου εντός του κυλίνδρου βρίσκεται στην ίδια πίεση, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Η Εξίσωση 4.2 μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για μη ψευδοστατικές διεργασίες, υπό την προϋπόθεση ότι για την ποσότητα P σε αυτή, χρησιμοποιείται η πίεση στην εσωτερική επιφάνεια του εμβόλου (Εκτός από αυτό, δεν μπορούμε να μιλάμε για την πίεση ενός συστήματος κατά τη διάρκεια μιας μη ψευδοστατικής διεργασίας, αφού οι ιδιότητες των συστημάτων ορίζονται μόνο για καταστάσεις ισορροπίας). Επομένως, μπορούμε να γενικεύσουμε τη σχέση του έργου ογκομεταβολής, διατυπώνοντας την ως

$$W_b = \int_1^2 P_i dV \quad (4.4)$$

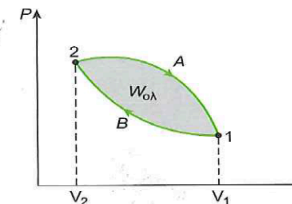
όπου P_i είναι η πίεση στην εσωτερική επιφάνεια του εμβόλου.



Σχήμα 4-3: Το εμβαδό κάτω από την καμπύλη μιας διεργασίας σε ένα διάγραμμα $P-V$ αναπαριστά το έργο ογκομεταβολής.



Σχήμα 4-4: Το έργο ογκομεταβολής κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας εξαρτάται από τη διαδρομή που ακολουθείται καθώς και από τις τελικές καταστάσεις.



Σχήμα 4-5: Το συνολικό παραγόμενο έργο κατά τη διάρκεια ενός κύκλου είναι η διαφορά μεταξύ του έργου που παράγεται από το σύστημα και του έργου που παράγεται πάνω στο σύστημα.

Σημειώστε ότι το έργο είναι ένας μηχανισμός ενεργειακής αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός συστήματος και του περιβάλλοντός του, και η ποσότητα W_b , αναπαριστά την ενέργεια που μεταφέρεται εκτός συστήματος, κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας εκτόνωσης (ή προς το σύστημα, κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας συμπίεσης). Επομένως, η ποσότητα αυτή πρέπει να εμφανίζεται κάπου αλλού και πρέπει να είμαστε σε θέση να το αιτιολογούμε αφού η ενέργεια διατηρείται. Για παράδειγμα, στη μηχανή ενός αυτοκινήτου, το παραγόμενο έργο ογκομεταβολής από τα εκτονούμενα θερμά καυσαέρια χρησιμοποιείται για να υπερνικά την τριβή μεταξύ του εμβόλου και του κυλίνδρου, να εξωθεί μακριά τον ατμοσφαιρικό αέρα, και να περιστρέφει το στροφαλοφόρο άξονα. Επομένως,

$$W_b = W_{\text{τριβ.}} + W_{\text{atm}} + W_{\text{στροφ.}} = \int_1^2 (F_{\text{τριβ.}} + P_{\text{atm}}A + F_{\text{στροφ.}}) dx \quad (4.5)$$

Φυσικά το έργο που χρησιμοποιείται για να υπερνικά την τριβή εμφανίζεται ως θερμότητα λόγω τριβής και η ενέργεια που μεταδίδεται μέσω του στροφαλοφόρου άξονα μεταφέρεται σε άλλα εξαρτήματα (όπως οι τροχοί), για να πραγματοποιηθούν συγκεκριμένες λειτουργίες. Σημειώστε όμως ότι, η ενέργεια που μεταφέρεται από το σύστημα ως έργο, πρέπει να ισούται με την ενέργεια που λαμβάνει ο στροφαλοφόρος άξονας, η ατμόσφαιρα, και την ενέργεια που χρησιμοποιείται για να υπερνικάται η τριβή. Η χρήση της σχέσης του έργου ογκομεταβολής δεν περιορίζεται μόνο στις ψευδοστατικές διεργασίες των αερίων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για στερεά και υγρά.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-1: Έργο Ογκομεταβολής για μια Διεργασία Σταθερού Όγκου

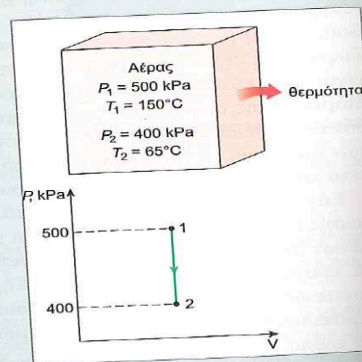
Ένα άκαμπτο δοχείο περιέχει αέρα σε 500 kPa και 150°C. Ως αποτέλεσμα της μεταφοράς θερμότητας στο περιβάλλον, η θερμοκρασία και η πίεση εντός του δοχείου μειώνονται στα 400 kPa και στους 65°C, αντίστοιχα. Να προσδιορίσετε το παραγόμενο έργο ογκομεταβολής κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας.

Λύση: Αέρας εντός άκαμπτου δοχείου ψύχεται, και τόσο η πίεση όσο και η θερμοκρασία μειώνονται. Να προσδιοριστεί το παραγόμενο έργο ογκομεταβολής.

Ανάλυση Ένα σκαρίφημα του συστήματος και το διάγραμμα $P-V$ της διεργασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 4-6. Το έργο ογκομεταβολής μπορεί να προσδιοριστεί από την Εξίσωση (4.2) και είναι

$$W_b = \int_1^2 P dV = 0$$

Συζήτηση Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, αφού το άκαμπτο δοχείο έχει ένα σταθερό όγκο και στην εξίσωση αυτή $dV=0$. Επομένως, κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας δεν υπάρχει παραγόμενο έργο ογκομεταβολής. Δηλαδή, το παραγόμενο έργο ογκομεταβολής κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σταθερού όγκου είναι πάντοτε μηδενικό. Αυτό είναι επίσης προφανές από το διάγραμμα $P-V$ της διεργασίας (το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της διεργασίας είναι μηδενικό).



Σχήμα 4-6: Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα $P-V$ του Παραδείγματος 4-1.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-2: Έργο Ογκομεταβολής για μια Διεργασία Σταθερής Πίεσης

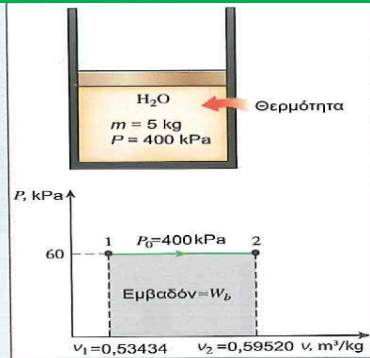
Μια διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου χωρίς τριβές περιέχει 5 kg ατμού σε 400 kPa και 200°C. Τώρα μεταφέρεται θερμότητα στον ατμό μέχρι η θερμοκρασία φτάσει στους 250°C. Εάν το έμβολο δεν είναι προσαρτημένο σε κάποιον άξονα και η μάζα του είναι σταθερή, να προσδιορίσετε το έργο που παράγει ο ατμός κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας.

Λύση: Ατμός εντός διάταξης εμβόλου - κυλίνδρου θερμαίνεται και η θερμοκρασία αυξάνεται υπό σταθερή πίεση. Να προσδιοριστεί το παραγόμενο έργο ογκομεταβολής.

Ανάλυση Ένα σκαρίφημα του συστήματος και το διάγραμμα $P-v$ της διεργασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 4-7.

Παραδοχές Η διεργασία εκτόνωσης είναι ψευδοστατική.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΛΕΙΣΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



Σχήμα 4-7:
Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα P-V του Παραδείγματος 4-2.

$$W_b = (5\text{kg})(400\text{kPa})[(0,59520 - 0,53434)\text{m}^3/\text{kg}]\left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa}\cdot\text{m}^3}\right) = 122\text{kJ}$$

Συζήτηση Το θετικό πρόσημο υποδηλώνει ότι το έργο παράγεται από το σύστημα. Δηλαδή, ο ατμός χρησιμοποιήσε 122 kJ της ενέργειάς του για να παράξει αυτό το έργο. Το μέτρο αυτού του έργου θα μπορούσε επίσης να προσδιοριστεί υπολογίζοντας το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της διεργασίας στο διάγραμμα P-v, που απλά είναι $P_0\Delta V$ για την περίπτωση αυτή.

Ανάλυση Αν και δεν αναφέρεται ρητά, η πίεση του ατμού εντός του κυλίνδρου παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της διεργασίας, αφού τόσο η ατμοσφαιρική πίεση όσο και το βάρος του εμβόλου παραμένουν σταθερά. Επομένως, αυτή είναι μια διεργασία σταθερής πίεσης, και, από την Εξίσωση 4.2

$$W_b = \int_1^2 P dV = P_0 \int_1^2 dV = P_0 (V_2 - V_1) \quad (4.6)$$

ή

$$W_b = mP_0 (v_2 - v_1),$$

αφού $V = m\nu$. Από τον πίνακα υπέρθερμου ατμού (Πίνακας Α-6), οι ειδικοί όγκοι προσδιορίζονται ως $\nu_1 = 0,53434\text{ m}^3/\text{kg}$ στην κατάσταση 1 (400 kPa, 200°C) και $\nu_2 = 0,59520\text{ m}^3/\text{kg}$ στην κατάσταση 2 (400 kPa, 250°C). Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές, βρίσκουμε ότι

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-3: Ισόθερμη Συμπίεση ενός Ιδανικού Αερίου

Μια διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου περιέχει αρχικά $0,4\text{ m}^3$ αέρα σε 100 kPa και 80°C . Ο αέρας τώρα συμπιέζεται σε $0,1\text{ m}^3$ με τέτοιο τρόπο, ώστε η θερμοκρασία στο εσωτερικό του κυλίνδρου να παραμένει σταθερή. Να προσδιορίσετε το παραγόμενο έργο κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας.

Λύση: Ο αέρας εντός μιας διάταξης εμβόλου-κυλίνδρου συμπιέζεται ισόθερμα. Να προσδιοριστεί το παραγόμενο έργο ογκομεταβολής.

Ανάλυση Ένα σκαρίφημα του συστήματος και το διάγραμμα P-V της διεργασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 4-8.

Παραδοχές 1 Η διεργασία συμπίεσης είναι ψευδοστατική. 2 Στις συγκεκριμένες συνθήκες, ο αέρας μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό αέριο, αφού βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία και χαμηλή πίεση, ως προς τις τιμές στο κρίσιμο σημείο του.

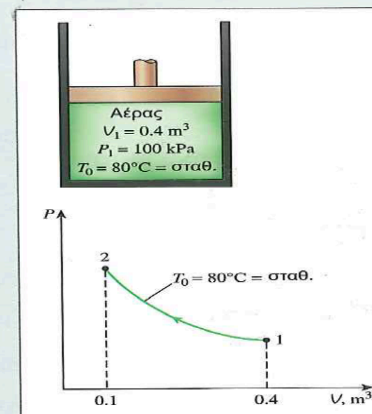
Ανάλυση Για ένα ιδανικό αέριο σε σταθερή θερμοκρασία T_0 ,

$$PV = mRT_0 = C \quad \text{ή} \quad P = \frac{C}{V}$$

όπου C μια σταθερά. Αντικαθιστώντας τη σχέση αυτή στην Εξίσωση (4.2), έχουμε

$$W_b = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{C}{V} dV = C \int_1^2 \frac{dV}{V} = C \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (4.7)$$

Στην Εξίσωση (4.7), ο όρος $P_1 V_1$ μπορεί να αντικατασταθεί από τον $P_2 V_2$ ή mRT_0 . Επίσης, ο όρος V_2/V_1 μπορεί να αντικατασταθεί από τον P_1/P_2 , αφού για την περίπτωση αυτή $P_1 V_1 = P_2 V_2$.



Σχήμα 4-8:
Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα P-V του Παραδείγματος 4-3.

Αντικαθιστώντας τις αριθμητικές τιμές στην Εξίσωση (4.7), βρίσκουμε

$$W_b = (100\text{kPa})(0,4\text{m}^3) \left(\ln \frac{0,1}{0,4} \right) \left(\frac{1\text{kJ}}{1\text{kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = -55,5 \text{ kJ}$$

Συζήτηση Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι το έργο αυτό παράγεται πάνω στο σύστημα, (έργο εισόδου), κάτι που ισχύει πάντοτε για διεργασίες συμπίεσης.

Πολυτροπικές Διεργασίες

Κατά τη διάρκεια πραγματικών διεργασιών εκτόνωσης και συμπίεσης αερίων, η πίεση και ο όγκος συχνά σχετίζονται με μια σχέση της μορφής $PV^n = C$, όπου n και C είναι σταθερές. Μια διεργασία αυτού του είδους ονομάζεται **πολυτροπική διεργασία** (Σχήμα 4-9). Στη συνέχεια θα αναπτύξουμε μια γενική έκφραση για το έργο που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας πολυτροπικής διεργασίας. Η πίεση μιας πολυτροπικής διεργασίας μπορεί να εκφρασθεί ως

$$P = CV^{-n} \quad (4.8)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στην Εξίσωση 4.2, λαμβάνουμε

$$W_b = \int_1^2 P dV = \int_1^2 CV^{-n} dV = C \frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{-n+1} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n} \quad (4.9)$$

εφόσον $C = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$. Για ένα ιδανικό αέριο, ($PV = mRT$), η εξίσωση αυτή μπορεί να γραφεί ως

$$W_b = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n} \quad n \neq 1 \quad (\text{kJ}) \quad (4.10)$$

Για την ειδική περίπτωση όπου $n = 1$, το έργο ογκομεταβολής γίνεται

$$W_b = \int_1^2 P dV = \int_1^2 CV^{-1} dV = PV \ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

Για ένα ιδανικό αέριο, το αποτέλεσμα αυτό είναι ισοδύναμο με την ισόθερμη διεργασία του Παραδείγματος 4-3.

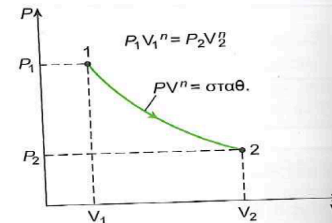
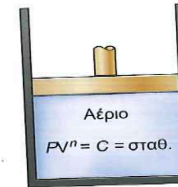
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-4: Εκτόνωση ενός Αερίου Αντίθετη σε ένα Ελατήριο

Μια διάταξη εμβόλου - κυλίνδρου περιέχει $0,05 \text{ m}^3$ ενός αερίου, αρχικά σε πίεση 200 kPa . Στην κατάσταση αυτή, ένα γραμμικό ελατήριο που έχει μια σταθερά ελατηρίου 150 kN/m εφάπτεται στο έμβολο αλλά δεν εξασκεί καμία δύναμη σε αυτό. Τώρα μεταφέρεται θερμότητα στο αέριο, αναγκάζοντας το έμβολο να ανέλθει και να συμπίεσει το ελατήριο, μέχρι ο όγκος στο εσωτερικό του κυλίνδρου να διπλασιαστεί. Εάν το εμβαδό της εγκάρσιας διατομής του εμβόλου είναι $0,25 \text{ m}^2$, να προσδιορίσετε (α) την τελική πίεση στο εσωτερικό του κυλίνδρου, (β) το συνολικά παραγόμενο έργο από το αέριο, και (γ) το κλάσμα αυτού του παραγόμενου έργου αντίθετα προς το ελατήριο, ώστε αυτό να συμπίεστεί.

Λύση: Ένα αέριο στο εσωτερικό μιας διάταξης εμβόλου-κυλίνδρου εξοπλισμένης με ένα γραμμικό εκτονώνεται ως αποτέλεσμα θέρμανσης. Να προσδιοριστούν η τελική πίεση του αερίου, το συνολικά παραγόμενο έργο, και το κλάσμα του έργου αυτού για τη συμπίεση του ελατηρίου.

Παραδοχές 1 Η διεργασία εκτόνωσης είναι ψευδοστατική. **2** Το ελατήριο είναι γραμμικό στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Ανάλυση Ένα σκαρίφημα του συστήματος και το διάγραμμα $P-V$ της διεργασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 4-10.



Σχήμα 4-9: Σχηματική αναπαράσταση και διάγραμμα $P-V$ για μια πολυτροπική διεργασία.