

ΑΝΟΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
Α' ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΝΟΜΟΣ

Η εξίσωση 4-7 είναι ανάλογη με τη εξίσωση $m = V\rho$ που δίνει τη σχέση μεταξύ της μάζας και του όγκου ενός ρευστού σ' ένα δοχείο.

Για λόγους απλότητας, παραγράφεται ο δείκτης για τη μέση ταχύτητα. Στη συνέχεια, με V θα συμβολίζεται η μέση ταχύτητα κατά τη διεύθυνση της ροής, εκτός βέβαια εάν δηλώνεται κάτι άλλο. Επίσης, με A θα συμβολίζεται το εμβαδόν της διατομής που είναι κάθετη στη διεύθυνση της ροής.

Ισοζύγιο Ενέργειας σε έναν Όγκο Ελέγχου

Στο κεφάλαιο 3 εκφράστηκε η αρχή διατήρησης της ενέργειας (ή το ισοζύγιο ενέργειας) για *οποιοδήποτε σύστημα* και για *οποιαδήποτε διεργασία* ως εξής: η *συνολική (καθαρή) μεταβολή (αύξηση ή μείωση) της ολικής ενέργειας του συστήματος κατά τη διάρκεια μίας διεργασίας είναι ίση με τη διαφορά ανάμεσα στην ολική ενέργεια που εισέρχεται στο σύστημα και στην ολική ενέργεια που εξέρχεται από το σύστημα κατά τη διεργασία αυτή*. Επίσης τονίστηκε ότι η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί από ή προς ένα σύστημα με τρεις μορφές -θερμότητα, έργο και ροή μάζας- και ότι η ολική ενέργεια ενός απλού, συμπίεστου συστήματος περιλαμβάνει την εσωτερική, την κινητική και τη δυναμική ενέργεια. Στην περίπτωση αυτή το ισοζύγιο ενέργειας γράφεται ως εξής:

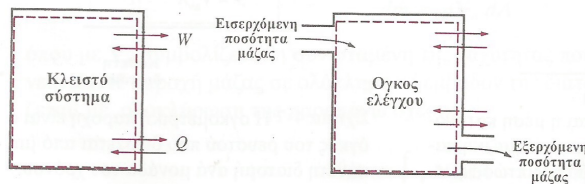
$$\underbrace{E_{in} - E_{out}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά} \\ \text{ενέργειας με τη μορφή} \\ \text{θερμότητας, έργου και μάζας}}} = \underbrace{\Delta E_{system}}_{\substack{\text{Μεταβολή της εσωτερικής,} \\ \text{κινητικής δυναμικής κ.λ.π} \\ \text{ενέργειας.}}} \quad (\text{kJ}) \quad (4-8)$$

ή με τη μορφή ρυθμών μεταβολής ως εξής:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς} \\ \text{ενέργειας με τη μορφή} \\ \text{θερμότητας, έργου και μάζας}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας.}}} \quad (\text{kW}) \quad (4-9)$$

Στο κεφάλαιο 3 εξετάστηκαν συστήματα που περιελάμβαναν μόνο μεταφορά θερμότητας και αλληλεπιδράσεις ενέργειας και έργου (π.χ. τα κλειστά συστήματα). Στο κεφάλαιο αυτό η ανάλυση επεκτείνεται σε συστήματα που περιλαμβάνουν ροή μάζας μέσω των οριακών επιφανειών του συστήματος (π.χ. στους όγκους ελέγχου).

Η ροή μάζας από και προς ένα σύστημα λειτουργεί ως ένας επιπλέον μηχανισμός μεταβολής του ενεργειακού περιεχομένου του συστήματος (Σχήμα 4-8). Όταν μια πο-



Σχήμα 4-8 Το ενεργειακό περιεχόμενο ενός όγκου ελέγχου μπορεί να μεταβάλλεται είτε με τη ροή μάζας είτε με τις αλληλεπιδράσεις θερμότητας ή έργου.

σότητα μάζας εισέρχεται σ' έναν όγκο ελέγχου, η ενέργεια του όγκου ελέγχου αυξάνεται, επειδή η μάζα περιέχει κάποια ενέργεια. Αντίστοιχα, όταν μια ποσότητα μάζας εξέρχεται από έναν όγκο ελέγχου, η ενέργεια του όγκου ελέγχου μειώνεται, επειδή η μάζα μεταφέρει κάποια ενέργεια. Για παράδειγμα, όταν μια ποσότητα ζεστού νερού εξέρχεται από έναν θερμαντήρα νερού και αντικαθίσταται από την ίδια ποσότητα ψυχρού νερού, το ενεργειακό περιεχόμενο της δεξαμενής θερμού νερού (όγκος ελέγχου) μειώνεται λόγω αυτής της αλληλεπίδρασης της μάζας.

Η μεταφορά θερμότητας από ή προς τον όγκο ελέγχου δεν πρέπει να συγχέεται με την ενέργεια που μεταφέρεται με τη μάζα μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου.

Υπενθυμίζεται ότι η θερμότητα είναι η μορφή ενέργειας που μεταφέρεται εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ ενός όγκου ελέγχου και του περιβάλλοντός του.

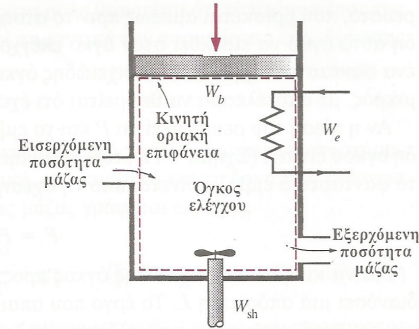
Στον όγκο ελέγχου, όπως και στο κλειστό σύστημα, μπορεί να εμπλέκονται μία ή και περισσότερες μορφές έργου (Σχήμα 4-9). Εάν οι οριακές επιφάνειες του όγκου ελέγχου είναι σταθερές, όπως συμβαίνει συχνά, τότε το έργο ογκομεταβολής είναι ίσο με μηδέν. Οπότε, σε απλά συμπιεστά συστήματα, ο όρος του έργου περιλαμβάνει το έργο ατράκτου ή/και το ηλεκτρικό έργο. Όπως και στα κλειστά συστήματα, όταν ο όγκος ελέγχου είναι θερμομονωμένος, ο όρος μεταφοράς θερμότητας είναι μηδέν.

Η ενέργεια που απαιτείται για να σπρώξει ένα ρευστό μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου ονομάζεται *έργο ροής* ή *ενέργεια ροής* και θεωρείται ότι είναι ένα μέρος της ενέργειας που μεταφέρεται από το ρευστό.

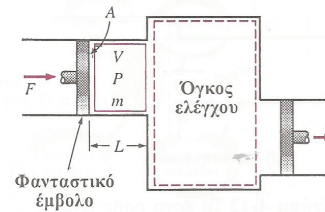
Έργο Ροής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, σε αντίθεση με τα κλειστά συστήματα, οι όγκοι ελέγχου περιλαμβάνουν και ροή μάζας διαμέσου των οριακών τους επιφανειών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτείται κάποιο έργο για να σπρώξει τη μάζα αυτή προς ή από τον όγκο ελέγχου. Το έργο αυτό είναι γνωστό σαν *έργο ροής* ή *ενέργεια ροής* και είναι απαραίτητο για να διατηρείται η ροή διαμέσου του όγκου ελέγχου.

Για να εξαχθεί μια σχέση για το έργο ροής, θεωρείται ένας στοιχειώδης όγκος V του ρευστού, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4-10. Το



Σχήμα 4-9 Ένας όγκος ελέγχου μπορεί να περιλαμβάνει εκτός από έργο ογκομεταβολής και ηλεκτρικό έργο ή έργο ατράκτου.



Σχήμα 4-10 Σχηματική παράσταση του έργου ροής.

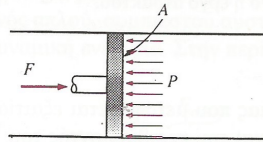
ρευστό, που βρίσκεται αμέσως πριν το στοιχειώδη όγκο, θα εξαναγκάσει το στοιχειώδη αυτό όγκο να εισέλθει στον όγκο ελέγχου, λειτουργώντας κατά κάποιο τρόπο σαν ένα φανταστικό έμβολο. Ο στοιχειώδης όγκος του ρευστού θεωρείται ότι είναι αρκετά μικρός, με αποτέλεσμα να θεωρείται ότι έχει ομοιόμορφες ιδιότητες.

Αν η πίεση του ρευστού είναι P και το εμβαδόν της κάθετης διατομής του στοιχειώδη όγκου είναι A (Σχήμα 4-11), τότε η δύναμη που εξασκείται στο στοιχειώδη όγκο από το φανταστικό έμβολο δίνεται από τη σχέση:

$$F = PA \quad (4-9)$$

Για να κινηθεί ο στοιχειώδης όγκος προς τον όγκο ελέγχου, η δύναμη αυτή πρέπει διανύσει μια απόσταση L . Το έργο που απαιτείται για να σπρώξει το στοιχειώδη όγκο του ρευστού μέσα στον όγκο ελέγχου. Δηλαδή το έργο ροής ισούται με:

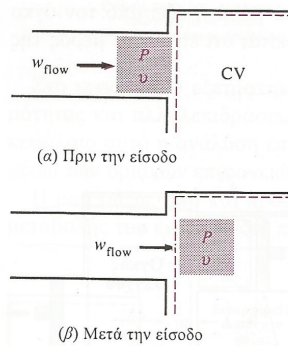
$$W_{\text{flow}} = FL = PAL = PV \quad (\text{kJ}) \quad (4-10)$$



Το έργο ροής ανά μονάδα μάζας υπολογίζεται διαιρώντας και τα δύο σκέλη της εξίσωσης με τη μάζα του στοιχειώδους όγκου του ρευστού:

$$w_{\text{flow}} = Pv \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-11)$$

Σχήμα 4-11 Όταν δεν υπάρχει επιτάχυνση, η δύναμη που ασκείται στο ρευστό από το έμβολο ισούται με τη δύναμη που ασκείται από το ρευστό στο έμβολο.



Σχήμα 4-12 Το έργο ροής είναι η ενέργεια που απαιτείται για να σπρώξει το ρευστό μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου και ισούται με Pv .

Η σχέση του έργου ροής είναι η ίδια είτε το ρευστό κινείται προς ή από τον όγκο ελέγχου (Σχήμα 4-12).

Ενδιαφέρον είναι επίσης το γεγονός ότι, σε αντίθεση με τις άλλες μορφές έργου, το έργο ροής εκφράζεται από ιδιότητες του συστήματος. Πράγματι, αυτό ισούται με το γινόμενο δύο ιδιοτήτων του ρευστού. Για το λόγο αυτό, μερικοί θεωρούν ότι είναι μια *συνδυαστική ιδιότητα* (όπως η ενθαλπία) και αναφέρονται σ' αυτό με τον όρο *ενέργεια συναγωγής* ή *ενέργεια μεταφοράς* αντί για ενέργεια ροής. Μια άλλη εξίσου σωστή άποψη είναι ότι το γινόμενο Pv παριστάνει μόνο την ενέργεια ροής των ρευστών και δεν παριστάνει καμιά μορφή ενέργειας για συστήματα που δεν περιλαμβάνουν ροή. Κατά συνέπεια, θα πρέπει να θεωρείται ως έργο. Βέβαια, η παραπάνω διαφωνία δε φαίνεται να έχει τέλος. Είναι όμως παρήγορο το γεγονός ότι και οι δύο θεωρίες οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα, που είναι η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας. Στις

παραγράφους που θα ακολουθήσουν η ενέργεια ροής θεωρείται ότι είναι ένα μέρος της ενέργειας του ρευστού, γιατί αυτό απλοποιεί σημαντικά την παραγωγή της εξίσωσης ενέργειας για όγκους ελέγχου.

Ολική Ενέργεια ενός Ρέοντος Ρευστού

Όπως εξετάστηκε στο κεφάλαιο 1, η ολική ενέργεια ενός απλού συμπιεστού συστήματος αποτελείται από τρία μέρη: την εσωτερική, την κινητική και τη δυναμική ενέργεια (Σχήμα 4-13). Η ενέργεια αυτή ανά μονάδα μάζας γράφεται ως εξής:

$$e = \bar{u} + ke + pe = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-12)$$

όπου με V συμβολίζεται η ταχύτητα και με z η υψομετρική διαφορά του συστήματος από κάποιο εξωτερικό σημείο αναφοράς.

Η ροή που εισέρχεται ή εξέρχεται από τον όγκο ελέγχου περιέχει και μια επιπρόσθετη μορφή ενέργειας - την *ενέργεια ροής* Pv , που εξετάστηκε προηγουμένως. Οπότε, η ολική ενέργεια του **ρέοντος ρευστού** ανά μονάδα μάζας (συμβολίζεται με θ) γίνεται:

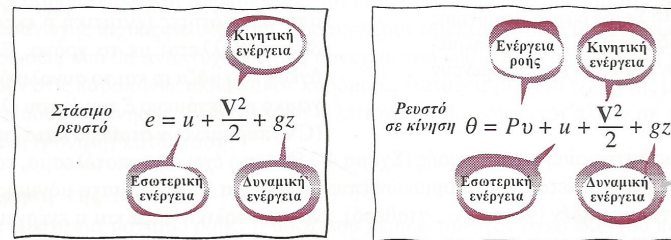
$$\theta = Pv + e = Pv + (u + ke + pe)$$

Όμως, ο **συνδυασμός** $Pv + u$ έχει οριστεί ως η **ενθαλία** h . Έτσι, η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως εξής:

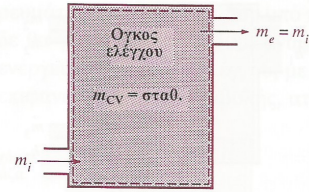
$$\theta = h + ke + pe = h + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-13)$$

Το 1966, ο καθηγητής J. Kestin πρότεινε για το θ τον όρο **μετενθαλία** (που σημαίνει *πέρα από την ενθαλία*).

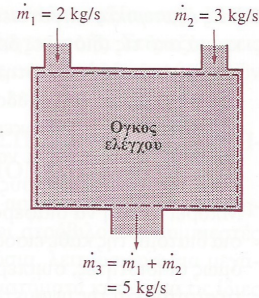
Χρησιμοποιώντας την ενθαλία αντί της εσωτερικής ενέργειας για την έκφραση της ενέργειας του ρέοντος ρευστού, παραλείπεται ο όρος του έργου ροής. Το έργο που συνοδεύει την ώθηση του ρευστού μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου περιέχεται αυτόματα στην ενθαλία. Στη συνέχεια και μέχρι το τέλος του βιβλίου, η ενέργεια των



Σχήμα 4-13 Η ολική ενέργεια ενός στάσιμου (στατικού) ρευστού αποτελείται από τρία μέρη, ενώ για ένα ρευστό σε κίνηση αποτελείται από τέσσερα.



Σχήμα 4-17 Κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας μόνιμης ροής, η μάζα που εισέρχεται στον όγκο ελέγχου είναι ίση με τη μάζα που εξέρχεται από αυτόν.



Σχήμα 4-18 Η αρχή διατήρησης της μάζας για ένα σύστημα δύο εισόδων και μιας εξόδου.

Για παράδειγμα, στο ακροφύσιο ενός λάστιχου, που χρησιμοποιείται για το πότισμα του κήπου, σε σταθεροποιημένη λειτουργία το νερό που εισέρχεται ισούται με το νερό που εξέρχεται.

Στις διεργασίες σταθεροποιημένης ροής δεν έχει σημασία η ποσότητα της μάζας που ρέει μέσα ή έξω από τον όγκο ελέγχου, αλλά ο ρυθμός ροής της μάζας ανά μονάδα

$$\left(\begin{array}{l} \text{Ολική μάζα} \\ \text{που εισέρχεται} \\ \text{στον όγκο} \\ \text{ελέγχου ανά} \\ \text{μονάδα χρόνου} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Ολική μάζα που} \\ \text{εγκαταλείπει} \\ \text{τον όγκο} \\ \text{ελέγχου ανά} \\ \text{μονάδα χρόνου} \end{array} \right)$$

χρόνου, δηλαδή η παροχή μάζας. Η αρχή διατήρησης της μάζας σε μια διάταξη, η οποία λειτουργεί σε συνθήκες σταθεροποιημένης ροής, με πολλαπλές εισόδους και εξόδους (Σχήμα 4-18) μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή ρυθμού ως εξής:

ή

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (\text{kg/s}) \quad (4-14)$$

όπου οι δείκτες i και e υποδηλώνουν την *είσοδο* και την *έξοδο*. Οι περισσότερες μηχανικές διατάξεις, όπως τα ακροφύσια, οι διαχυτήρες, οι στρόβιλοι, οι συμπιεστές και οι αντλίες, περιέχουν ένα ρεύμα ροής (μία είσοδο και μία έξοδο).

Στις περιπτώσεις αυτές, η είσοδος δηλώνεται με το δείκτη 1 και η έξοδος με το δείκτη 2. Οπότε, στα συστήματα μιας εισόδου, μιας εξόδου και σταθεροποιημένης ροής, η εξίσωση 4-14 ανάγεται στην ακόλουθη μορφή:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{kg/s}) \quad (4-15)$$

ή

$$\rho_1 \mathbf{V}_1 A_1 = \rho_2 \mathbf{V}_2 A_2 \quad (4-16)$$

ή

$$\frac{1}{v_1} V_1 A_1 = \frac{1}{v_2} V_2 A_2 \quad (4-17)$$

όπου ρ = η πυκνότητα, kg/m³

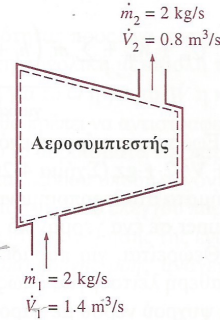
v = ο ειδικός όγκος, m³/kg (= 1/ρ)

V = η μέση ταχύτητα ροής στη διεύθυνση της ροής, m/s

A = το εμβαδόν της κάθετης διατομής κατά τη διεύθυνση ροής, m²

Υπενθυμίζεται ότι δεν υφίσταται αντίστοιχη αρχή διατήρησης του όγκου και επομένως οι ογκομετρικές παροχές εισόδου και εξόδου ($\dot{V} = VA$, m³/s) μπορεί να είναι μεταξύ τους διαφορετικές. Η ογκομετρική παροχή στην έξοδο ενός αεροσυμπιεστή θα είναι πολύ μικρότερη από ό,τι στην είσοδο, παρά το γεγονός ότι η παροχή μάζας του αέρα στο συμπιεστή είναι σταθερή (Σχήμα 4-19). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην έξοδο του συμπιεστή ο αέρας έχει μεγαλύτερη πυκνότητα.

Όσον αφορά στα υγρά, τόσο η ογκομετρική όσο και η μαζική παροχή παραμένουν σταθερές, γιατί τα υγρά είναι ουσιαστικά ασυμπίεστες ουσίες (έχουν σταθερή πυκνότητα). Καλό παράδειγμα για την τελευταία περίπτωση αποτελεί η ροή του νερού μέσα από το ακροφύσιο στο λάστιχο ποτίσματος.



Σχήμα 4-19 Κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σταθεροποιημένης ροής, οι ογκομετρικές παροχές δε διατηρούνται κατ'άνγκη σταθερές.

Ισοζύγιο Ενέργειας σε Συστήματα Σταθεροποιημένης Ροής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας σταθεροποιημένης ροής το ολικό ενεργειακό περιεχόμενο ενός όγκου ελέγχου παραμένει σταθερό ($E_{CV} = \text{σταθερό}$). Δηλαδή κατά τη διάρκεια μιας τέτοιας διεργασίας, η μεταβολή της ολικής ενέργειας του όγκου ελέγχου είναι ίση με μηδέν ($\Delta E_{CV} = 0$). Άρα σε μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής η ενέργεια που εισέρχεται σ' έναν όγκο ελέγχου με όλες τις μορφές (θερμότητα, έργο, μεταφορά μάζας) θα πρέπει να είναι ίση με την ενέργεια που εξέρχεται. Στην περίπτωση αυτή το γενικό ισοζύγιο ενέργειας με τη μορφή των ρυθμών γράφεται:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \Delta \dot{E}_{system} \rightarrow 0 \text{ (Σταθεροποιημένο)} = 0 \quad (4-18)$$

ή

Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας

Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας.

$$\dot{E}_{in}$$

Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας

$$\dot{E}_{out}$$

Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας.

$$(4-19)$$

Επειδή η ενέργεια μπορεί να μεταφερθεί μέσω της θερμότητας, του έργου και της μά-

ζας, το παραπάνω ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γραφεί (για ένα γενικό σύστημα σταθεροποιημένης ροής) στην ακόλουθη μορφή:

$$\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_i \theta_i = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_e \theta_e \quad (4-20)$$

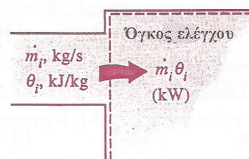
ή

$$\underbrace{\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right)}_{\text{για κάθε είσοδο}} = \underbrace{\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)}_{\text{για κάθε έξοδο}} \quad (4-21)$$

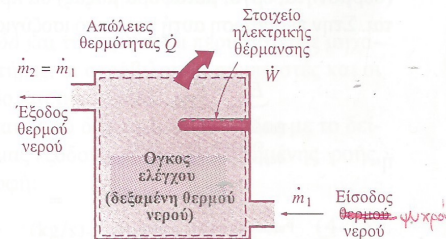
Εφόσον, η ενέργεια ενός ρέοντος ρευστού ανά μονάδα μάζας είναι $\theta = h + ke + pe = h + V^2/2 + gz$ (Σχήμα 4-20). Η σχέση του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής για συστήματα σταθεροποιημένης ροής διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1859 από τον Gustav Zeuner σε ένα γερμανικό βιβλίο θερμοδυναμικής.

Θεωρείται, για παράδειγμα, ένας συνηθισμένος ηλεκτρικός βραστήρας νερού υπό σταθερή λειτουργία, όπως φαίνεται στο σχήμα 4-21. Στο βραστήρα εισάγεται ένα ρεύμα ψυχρού νερού με παροχή μάζας \dot{m}_1 , ενώ το ρεύμα του θερμού νερού που εξέρχεται έχει την ίδια παροχή μάζας. Η απώλεια θερμότητας του βραστήρα (όγκου ελέγχου) προς το περιβάλλον είναι \dot{Q}_{out} . Το ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο παρέχει στο νερό ηλεκτρικό έργο (θέρμανση) με ρυθμό \dot{W}_{in} . Με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας, η ολική ενέργεια του ρεύματος του νερού θα αυξηθεί, καθώς το νερό ρέει μέσα από το βραστήρα. Η αύξηση αυτή θα είναι ίση με την ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στο νερό μείον τις θερμικές απώλειες.

Το ισοζύγιο ενέργειας (ή ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής) που δίνεται παραπάνω χρησιμοποιείται πολύ εύκολα, όταν είναι γνωστά τα μεγέθη και οι κατευθύνσεις προς τις οποίες μεταφέρεται θερμότητα και έργο. Όταν όμως γίνεται μια γενική αναλυτική μελέτη ή κατά την επίλυση ενός προβλήματος που περιλαμβάνει μια άγνωστη θερμική ή ενεργειακή αλληλεπίδραση, θα πρέπει να επιλεγεί μια κατεύθυνση για αυτές τις αλληλεπιδράσεις. Στις περιπτώσεις αυτές συνήθίζεται η παραδοχή ότι η θερμότητα μεταφέρεται προς το σύστημα (είσοδος θερμότητας) με ρυθμό \dot{Q} και ότι το σύστημα παράγει ισχύ με ρυθμό \dot{W} (έξοδος έργου). Ο πρώτος νόμος ή η σχέση του ισοζυγίου ενέργειας για ένα γενικό σύστημα σταθεροποιημένης ροής γράφεται ως εξής:



Σχήμα 4-20 Το γινόμενο $\dot{m}_i \theta_i$ δίνει την ενέργεια που μεταφέρει η μάζα προς τον όγκο ελέγχου ανά μονάδα χρόνου.



Σχήμα 4-21 Ένας θερμαντήρας νερού που λειτουργεί σε συνθήκες σταθεροποιημένης ροής.

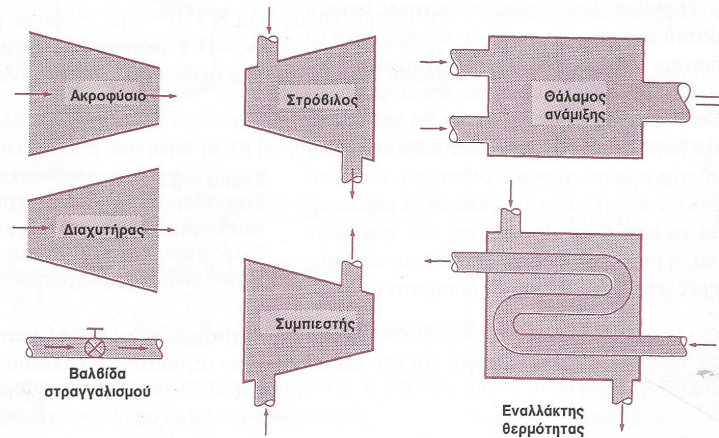
περίπου ταχύτητα ($V_1 \cong V_2$), η μεταβολή της κινητικής ενέργειας είναι σχεδόν μηδέν ανεξάρτητα από την ταχύτητα. Όταν όμως η ταχύτητα είναι μεγάλη, θα πρέπει να εξεταστεί ο όρος της κινητικής ενέργειας, γιατί ακόμα και μικρές μεταβολές της ταχύτητας μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές μεταβολές στην κινητική ενέργεια (Σχήμα 4-24).

$\Delta pe = g(z_2 - z_1)$. Ανάλογα με τα παραπάνω είναι και αυτά που ισχύουν για τον όρο της δυναμικής ενέργειας. Η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας κατά 1 kJ/kg αντιστοιχεί σε διαφορά ύψους 102 m. Η διαφορά ύψους, μεταξύ της εισόδου και της εξόδου, των περισσότερων βιομηχανικών διατάξεων, όπως οι στρόβιλοι και οι συμπιεστές, είναι πολύ μικρότερη και ο όρος της δυναμικής ενέργειας θεωρείται αμελητέος. Η μόνη περίπτωση που ο όρος της δυναμικής ενέργειας γίνεται σημαντικός είναι, όταν η διεργασία περιλαμβάνει την άντληση ρευστού σε μεγάλο ύψος. Αυτό ισχύει κυρίως για συστήματα με αμελητέα μεταφορά θερμότητας.

4-3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ (ΜΟΝΙΜΗΣ) ΡΟΗΣ

Πολλές από τις διατάξεις που ενδιαφέρουν τους μηχανικούς λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα ουσιαστικά κάτω από σταθερές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι διατάξεις μιας εγκατάστασης παραγωγής ισχύος (στρόβιλοι, συμπιεστές, εναλλάκτες και αντλίες) λειτουργούν ασταμάτητα για μήνες πριν η όλη εγκατάσταση σταματήσει για συντήρηση (Σχήμα 4-25). Οπότε, οι παραπάνω διατάξεις μπορούν να θεωρηθούν διατάξεις σταθεροποιημένης ροής.

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται μερικές από τις πιο κοινές διατάξεις μόνιμης ροής και αναλύονται οι θερμοδυναμικές πτυχές της ροής μέσα από αυτές. Για τις διατάξεις αυτές, οι αρχές διατήρησης της μάζας και της ενέργειας δίνονται στη συνέχεια με παραδείγματα.



Σχήμα 4-25 Διατάξεις σταθεροποιημένης ροής που λειτουργούν ασταμάτητα για μεγάλες χρονικές περιόδους.

1 Ακροφύσια και Διαχυτήρες

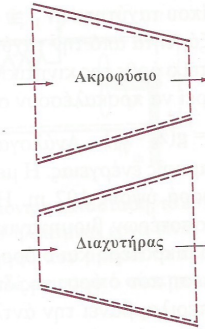
Τα ακροφύσια και οι διαχυτήρες είναι πολύ διαδεδομένες διατάξεις στους κινητήρες των μηχανών jet, των πυραύλων και των διαστημοπλοίων. Το **ακροφύσιο** είναι μια διάταξη που *αυξάνει την ταχύτητα του ρευστού* σε βάρος της πίεσής του, ενώ ο **διαχυτήρας** είναι μια διάταξη που *αυξάνει την πίεση του ρευστού* επιβραδύνοντας το (σε βάρος της ταχύτητάς του). Δηλαδή, το ακροφύσιο και ο διαχυτήρας έχουν αντίθετο ακριβώς αποτέλεσμα (λειτουργία). Το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής του ακροφυσίου ελαττώνεται προς τη διεύθυνση της ροής για υποηχητικές ταχύτητες ροής και αυξάνεται για ταχύτητες ροής μεγαλύτερες από αυτή του ήχου. Στους διαχυτήρες συμβαίνει το αντίθετο. Η διαφορετική συμπεριφορά των ρευστών για ταχύτητες μικρότερες ή μεγαλύτερες από αυτή του ήχου περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 16. Στο σχήμα 4-26 παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας του ακροφυσίου και του διαχυτήρα.

Οι όροι που εμφανίζονται στις εξισώσεις διατήρησης της ενέργειας των ακροφυσίων και των διαχυτήρων είναι οι ακόλουθοι:

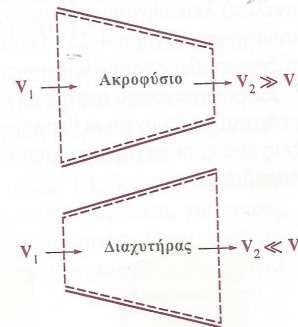
$\dot{Q} \cong 0$. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ρευστού που ρέει μέσα από το ακροφύσιο ή το διαχυτήρα και του περιβάλλοντος είναι πολύ μικρός, ακόμα και όταν οι διατάξεις αυτές δεν είναι μονωμένες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ρευστό έχει πολύ μεγάλη ταχύτητα και δεν παραμένει στη συσκευή για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να προλάβει να ανταλλάξει θερμότητα. Επομένως, όταν για τη μεταφορά θερμότητας δεν υπάρχουν δεδομένα, η ροή μέσα από τα ακροφύσια και τους διαχυτήρες μπορεί να θεωρηθεί αδιαβατική.

$\dot{W} = 0$. Ο όρος του έργου στα ακροφύσια και στους διαχυτήρες είναι μηδέν, γιατί οι συσκευές αυτές είναι απλοί αγωγοί και δεν περιλαμβάνουν ατράκτους ή καλώδια και ηλεκτρικές αντιστάσεις.

$\Delta ke \neq 0$. Στα ακροφύσια και στους διαχυτήρες αναπτύσσονται συχνά πολύ μεγάλες ταχύτητες. Έτσι, καθώς το ρευστό ρέει μέσα από τις διατάξεις αυτές υφίσταται μεγάλη



Σχήμα 4-26 Σχηματική παράσταση του ακροφυσίου και του διαχυτήρα για υποηχητικές ταχύτητες ροής (ταχύτητες ροής μικρότερες από αυτή του ήχου).



Σχήμα 4-27 Τα ακροφύσια και οι διαχυτήρες έχουν τέτοιο σχήμα, ώστε να προκαλούν μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα και στην κινητική ενέργεια του ρευστού.

μεταβολή στην ταχύτητά του (Σχήμα 4-27). Επομένως, κατά την ανάλυση της ροής μέσα από τις διατάξεις αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές της κινητικής ενέργειας.

$\Delta p_e \approx 0$. Η μεταβολή του ύψους σ' ένα ακροφύσιο ή σ' ένα διαχυτήρα είναι συνήθως πολύ μικρή και ο όρος της δυναμικής ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος.

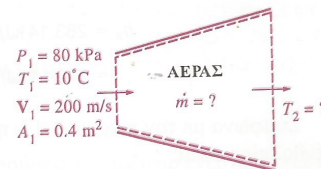
ΚΑΛΗ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-1 Επιβράδυνση του Αέρα μέσα σ' έναν Διαχυτήρα

Αέρας σε πίεση 80 kPa και σε θερμοκρασία 10°C εισέρχεται με ταχύτητα 200 m/s στο διαχυτήρα μιας μηχανής jet. Το εμβαδόν της εισόδου του διαχυτήρα είναι 0.4 m². Ο αέρας εγκαταλείπει το διαχυτήρα με ταχύτητα που θεωρείται πολύ μικρή σε σύγκριση με την ταχύτητα εισόδου. Να υπολογιστούν: (α) η παροχή μάζας του αέρα και (β) η θερμοκρασία του αέρα, όταν εγκαταλείπει το διαχυτήρα.

Λύση Ως σύστημα επιλέγεται ο διαχυτήρας (Σχήμα 4-28). Πρόκειται για έναν όγκο ελέγχου, αφού η μάζα διέρχεται από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το σύστημα έχει μόνο μία είσοδο και μία έξοδο, άρα $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$.

Παραδοχές 1 Πρόκειται για μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, αφού κανένα μέγεθος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, σε οποιοδήποτε σημείο. Επομένως, $\Delta m_{CV} = 0$ και $\Delta E_{CV} = 0$. 2 Ο αέρας θεωρείται ιδανικό αέριο, επειδή βρίσκεται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία και χαμηλή πίεση σε σύγκριση με τα αντίστοιχα κρίσιμα μεγέθη των -141°C και 3.77 MPa. 3 Η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας είναι ίση με μηδέν, $\Delta p_e = 0$. 4 Η μεταφορά θερμότητας θεωρείται αμελητέα. 5 Η κινητική ενέργεια στην έξοδο του διαχυτήρα είναι αμελητέα. 6 Δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις έργου.



Σχήμα 4-28 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 4-1.

Ανάλυση (α) Για τον υπολογισμό της παροχής μάζας, πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί ο ειδικός όγκος του αέρα με τη βοήθεια της εξίσωσης των ιδανικών αερίων στις συνθήκες εισόδου:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{[0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](283 \text{ K})}{80 \text{ kPa}} = 1.015 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Τότε, από την εξίσωση 4-5 προκύπτει:

$$\dot{m} = \frac{1}{v_1} \mathbf{V}_1 A_1 = \frac{1}{1.015 \text{ m}^3/\text{kg}} (200 \text{ m/s})(0.4 \text{ m}^2) = 78.8 \text{ kg/s}$$

Εφόσον η ροή είναι σταθεροποιημένη, η παροχή μάζας μέσα από το διαχυτήρα θα παραμένει σταθερή στην παραπάνω τιμή.

(β) Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και παρατηρήσεις το ισοζύγιο ενέργειας για το σύστημα γράφεται (με τη μορφή ρυθμών) στην ακόλουθη μορφή:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας}} = 0 \quad \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής κ.λπ. ενέργειας}} \overset{\rightarrow 0 \text{ (σταθεροποιημένη)}}{=} 0$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \Rightarrow \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + g z_i \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e \right)$$

(επειδή $\dot{Q} \cong 0$, $\dot{W} = 0$, και $\Delta p e \cong 0$)

$$m \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} \right) = m \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} \right)$$

$$h_2 = h_1 - \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

Η ταχύτητα του ρευστού στην έξοδο του διαχυτήρα είναι συνήθως μικρή σε σχέση με την ταχύτητα εισόδου ($V_2 \ll V_1$), με αποτέλεσμα η κινητική ενέργεια στην έξοδο να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Στην είσοδο του διαχυτήρα, η ενθαλπία του αέρα υπολογίζεται από τον πίνακα δεδομένων για τον αέρα (Πίνακας A-17) και είναι ίση με:

$$h_1 = h_{@283\text{K}} = 283.14 \text{ kJ/kg}$$

Αντικαθιστώντας, προκύπτει:

$$h_2 = 283.14 \text{ kJ/kg} - \frac{0 - (200 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right)$$

$$= 303.14 \text{ kJ/kg}$$

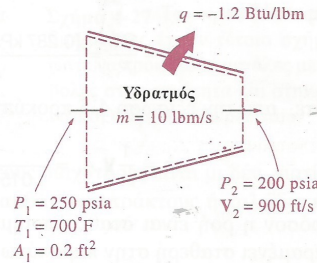
Σύμφωνα με τον πίνακα A-17, η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην παραπάνω τιμή ενθαλπίας είναι:

$$T_2 = 303.1\text{K}$$

γεγονός που δείχνει ότι κατά την επιβράδυνση του αέρα στο διαχυτήρα η θερμοκρασία του αυξάνεται περίπου κατά 20°C. Η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα οφείλεται κυρίως στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε εσωτερική.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-2 Επιτάχυνση του Ατμού μέσα σ' ένα Ακροφύσιο

Σ' ένα ακροφύσιο με εμβαδόν εισόδου 0.2 ft² εισέρχεται με σταθεροποιημένη ροή υδρατμός σε πίεση 250 psia και σε θερμοκρασία 700°F. Η παροχή μάζας του υδρατμού μέσα από το ακροφύσιο είναι 10 lbm/s. Ο υδρατμός εγκαταλείπει το ακροφύσιο με πίεση 200 psia και με ταχύτητα 900 ft/s. Η θερμικές απώλειες ανά μονάδα μάζας είναι σε 1.2 Btu/lbm. Να υπολογιστούν: (α) η ταχύτητα στην είσοδο και (β) η θερμοκρασία του υδρατμού στην έξοδο.



Σχήμα 4-29 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 4-2.

Λύση Ως σύστημα επιλέγεται το ακροφύσιο

(Σχήμα 4-29). Πρόκειται για έναν όγκο ελέγχου, αφού η μάζα διέρχεται από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το σύστημα έχει μόνο μία είσοδο και μία έξοδο, άρα $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$

Παραδοχές 1 Πρόκειται για μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, εφόσον κανένα μέγεθος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, σε οποιοδήποτε σημείο. Επομένως, $\Delta m_{CV} = 0$ και $\Delta E_{CV} = 0$. **2** Δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις έργου. **3** Η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας είναι ίση με μηδέν, $\Delta pe = 0$.

Ανάλυση (α) Η ταχύτητα στην είσοδο του ακροφυσίου υπολογίζεται από την εξίσωση 4-5. Προηγουμένως όμως πρέπει να υπολογιστεί ο ειδικός όγκος του υδρατμού στις συνθήκες της εισόδου:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= 250 \text{ psia} \\ T_1 &= 700^\circ\text{F} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} v_1 &= 2.688 \text{ ft}^3/\text{lbm} \\ h_1 &= 1371.1 \text{ Btu/lbm} \end{aligned} \quad (\text{Πίνακας A-6E})$$

Ετσι, από την εξίσωση 4-5, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{1}{v_1} \mathbf{V}_1 A_1 \\ 10 \text{ lbm/s} &= \frac{1}{2.688 \text{ ft}^3/\text{lbm}} (\mathbf{V}_1)(0.2 \text{ ft}^2) \\ \mathbf{V}_1 &= 134.4 \text{ ft/s} \end{aligned}$$

(β) Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και παρατηρήσεις το ισοζύγιο ενέργειας για το σύστημα αυτό γράφεται (με τη μορφή ρυθμών) ως εξής:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας}}} \stackrel{0 \text{ (σταθεροποιημένη)}}{=} 0 \quad (\text{kW})$$

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{\mathbf{V}_1^2}{2} \right) = \dot{Q}_{out} + \dot{m} \left(h_2 + \frac{\mathbf{V}_2^2}{2} \right) \quad (\text{επειδή } \dot{W} \cong 0, \text{ και } \Delta pe \cong 0)$$

Το h_2 υπολογίζεται διαιρώντας την παραπάνω σχέση με τη παροχή μάζας \dot{m} και με αντικατάσταση προκύπτει:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 - q_{out} - \frac{\mathbf{V}_2^2 - \mathbf{V}_1^2}{2} \\ &= (1371.1 - 1.2) \text{ Btu/lbm} - \frac{(900 \text{ ft/s})^2 - (134.4 \text{ ft/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ Btu/lbm}}{25,037 \text{ ft}^2/\text{s}^2} \right) \\ &= 1354.1 \text{ Btu/lbm} \end{aligned}$$

$$\text{Οπότε: } \left. \begin{array}{l} P_2 = 200 \text{ psia} \\ h_p = 1354.1 \text{ Btu/lbm} \end{array} \right\} T_2 = 661.9^\circ\text{F}$$

Δηλαδή, η θερμοκρασία του υδρατμού θα μειωθεί κατά 38.1°F κατά τη διέλευση του μέσα από το ακροφύσιο. Η πτώση αυτή της θερμοκρασίας οφείλεται στη μετατροπή της εσωτερικής ενέργειας του υδρατμού σε κινητική. (Στην περίπτωση αυτή, οι απώλειες θερμότητας είναι πολύ μικρές και δεν έχουν καμία επίδραση).

2 Στρόβιλοι και Συμπιεστές

Στις θερμοηλεκτρικές μονάδες και γενικά στις εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος με υδρατμό ή άλλο αέριο, η διάταξη που κινεί την ηλεκτρική γεννήτρια είναι ο στρόβιλος. Καθώς το ρευστό περνά μέσα από το στρόβιλο, προσδίδει έργο στα πτερύγια του, τα οποία είναι προσαρμοσμένα πάνω σε μια άτρακτο (άζονα). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την περιστροφή της άτρακτου και την παραγωγή έργου από το στρόβιλο. Το έργο του στροβίλου είναι θετικό, γιατί παράγεται από το ρευστό.

Οι συμπιεστές, όπως οι αντλίες και οι ανεμιστήρες, είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της πίεσης του ρευστού. Το έργο παρέχεται σε αυτές τις διατάξεις από εξωτερικές πηγές διαμέσου μιας περιστρεφόμενης άτρακτου. Συνεπώς, ο όρος του έργου στους συμπιεστές έχει αρνητικές τιμές, γιατί προσδίδεται στο ρευστό. Παρόλο που οι τρεις αυτές διατάξεις λειτουργούν κατά τον ίδιο τρόπο, διαφέρουν ως προς το σκοπό για τον οποίο χρησιμοποιούνται. Ο *ανεμιστήρας* αυξάνει ελάχιστα την πίεση ενός αερίου και χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός αερίου σ' ένα χώρο. Ο *συμπιεστής* έχει τη δυνατότητα να συμπιέσει το αέριο σε πολύ υψηλές πιέσεις. Οι *αντλίες* λειτουργούν παρόμοια με τους συμπιεστές με τη μόνη διαφορά ότι χρησιμοποιούνται για υγρά, σ' αντίθεση με τους συμπιεστές που χρησιμοποιούνται για αέρια.

Για τους στροβίλους και τους συμπιεστές, τα σύμβολα που εμφανίζονται στους διάφορους όρους της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας έχουν την ακόλουθη σημασία:

$\dot{Q} \cong 0$. Η μεταφορά θερμότητας στις διατάξεις αυτές είναι γενικά μικρή σε σχέση με το έργο άτρακτου, εκτός και εάν υπάρχει σύστημα ψύξης της διάταξης (όπως στην περίπτωση των συμπιεστών). Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, εάν δεν υπάρχει ψύξη του συστήματος ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια κατ'επίκληση τιμή της θερμότητας, η οποία θα στηρίζεται σε πειραματικές μετρήσεις.

$\dot{W} \neq 0$. Οι παραπάνω διατάξεις περιλαμβάνουν περιστρεφόμενη άτρακτο η οποία διαπερνά τις οριακές επιφάνειες και ο όρος του έργου είναι σημαντικός. Στους στροβίλους το \dot{W} παριστάνει την ισχύ εξόδου, ενώ στις αντλίες και στους συμπιεστές παριστάνει την ισχύ εισόδου.

$\Delta pe \cong 0$. Η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας στην οποία υπόκειται ένα ρευστό καθώς ρέει μέσα από στροβίλους, συμπιεστές, ανεμιστήρες και αντλίες είναι συνήθως πολύ μικρή και φυσικά αγνοείται.

$\Delta ke \cong 0$. Η ταχύτητα του ρευστού στις διατάξεις αυτές, με εξαίρεση τους στροβίλους, είναι συνήθως πολύ μικρή για να προκαλέσει σημαντική μεταβολή στην κινητική ενέρ-

για. Η ταχύτητα του ρευστού στους στροβίλους είναι πολύ υψηλή και το ρευστό υφίσταται σημαντική μεταβολή στην κινητική του ενέργεια. Η μεταβολή όμως αυτή είναι συχνά πολύ μικρή σε σχέση με τη μεταβολή στην ενθαλπία και συχνά παραλείπεται.

ΚΑΛΗ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-3 Συμπίεση του Αέρα με Συμπιεστή

Αέρας σε πίεση 100 kPa και στα 280 K συμπιέζεται, σε συνθήκες σταθεροποιημένης ροής, σε πίεση 600 kPa και η θερμοκρασία του γίνεται 400 K. Η παροχή μάζας του αέρα είναι 0.02 kg/s και η απόλεια θερμότητας κατά τη διάρκεια της διεργασίας είναι 16 kJ/kg. Θεωρείται ότι οι μεταβολές στη δυναμική και στην κινητική ενέργεια είναι αμελητέες. Να υπολογιστεί η απαραίτητη ισχύς εισόδου στο συμπιεστή.

Λύση Ως σύστημα επιλέγεται ο συμπιεστής (Σχήμα 4-30). Πρόκειται για έναν όγκο ελέγχου, αφού κατά τη διάρκεια της διεργασίας διέρχεται διαμέσου των οριακών επιφανειών ποσότητα μάζας. Το σύστημα έχει μόνο μία εισοδο και μία έξοδο, άρα $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Το σύστημα χάνει θερμότητα και καταναλώνει έργο.

Παραδοχές 1 Πρόκειται για μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, εφόσον κανένα μέγεθος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, σε οποιοδήποτε σημείο. Επομένως, $\Delta m_{CV} = 0$ και $\Delta E_{CV} = 0$. 2 Ο αέρας θεωρείται ιδανικό αέριο, επειδή βρίσκεται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία και χαμηλή πίεση σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη στο κρίσιμο σημείο, των -141°C και 3.77 MPa. 3 Η μεταβολή της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας είναι ίση με μηδέν, $\Delta ke = \Delta pe = 0$.

Ανάλυση Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και παρατηρήσεις το ισοζύγιο ενέργειας για το σύστημα αυτό γράφεται (με τη μορφή ρυθμών) ως εξής:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας}} \stackrel{0 \text{ (σταθεροποιημένη)}}{=} 0 \quad (\text{kW})$$

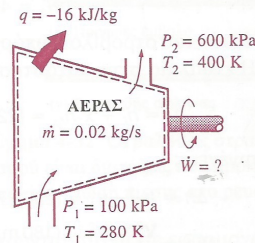
$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{in} &= \dot{E}_{out} && \text{(επειδή } \Delta ke = \Delta pe \cong 0) \\ \dot{W} + \dot{m}h_1 &= \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2 \\ \dot{W}_{in} &= \dot{m}q_{out} + \dot{m}(h_2 - h_1) \end{aligned}$$

Η ενθαλπία ενός ιδανικού αερίου εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και οι ενθαλπίες του αέρα στις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου υπολογίζονται από τον πίνακα ιδιοτήτων του αέρα (Πίνακας A-17):

$$\begin{aligned} h_1 &= h_{@280\text{K}} = 280.13 \text{ kJ/kg} \\ h_2 &= h_{@400\text{K}} = 400.98 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας, προκύπτει:



Σχήμα 4-30 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 4-3.

$$\dot{W}_n = (0.02 \text{ kg/s})(16 \text{ kJ/kg}) + (0.02 \text{ kg/s})(400.98 - 280.13 \text{ kJ/kg})$$

$$= 2.74 \text{ kW}$$

ΚΑΛΗ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-4 Παραγωγή Ισχύος με έναν Στρόβιλο Υδρατμού

Η ισχύς εξόδου ενός αδιαβατικού στροβίλου υδρατμού ισούται με 5 MW και οι συνθήκες εισόδου και εξόδου του υδρατμού είναι, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4-31.

(α) Να συγκριθούν τα μεγέθη των μεταβολών Δh , Δke και Δpe .

(β) Να υπολογιστεί το έργο ανά μονάδα μάζας του υδρατμού. $w = \int (h_1 - h_2)$

(γ) Να υπολογιστεί η παροχή μάζας του υδρατμού.

Λύση Ως σύστημα επιλέγεται ο στρόβιλος (Σχήμα 4-31). Πρόκειται για έναν όγκο ελέγχου, αφού η μάζα διέρχεται από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος κατά τη διάρκεια

της διεργασίας. Το σύστημα έχει μόνο μία είσοδο και μία έξοδο, άρα $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Το σύστημα παράγει έργο. Οι ταχύτητες στην είσοδο και την έξοδο καθώς και οι υψομετρικές διαφορές είναι γνωστές. Επομένως, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η κινητική και η δυναμική ενέργεια.

Παραδοχές 1 Πρόκειται για μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, αφού κανένα μέγεθος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, σε οποιοδήποτε σημείο. Επομένως, $\Delta m_{CV} = 0$ και $\Delta E_{CV} = 0$. 2 Το σύστημα είναι αδιαβατικό, άρα δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας.

Ανάλυση (α) Στην είσοδο, ο υδρατμός βρίσκεται σε υπέρθερμη κατάσταση και η ενθαλπία του είναι:

$$\left. \begin{array}{l} P_1 = 2 \text{ MPa} \\ T_1 = 400^\circ\text{C} \end{array} \right\} h_1 = 3247.6 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Πίνακας A-6})$$

Στην έξοδο του στροβίλου, υπάρχει μίγμα κορεσμένου υγρού και υδρατμού σε πίεση 15 kPa. Η ενθαλπία στην κατάσταση αυτή είναι:

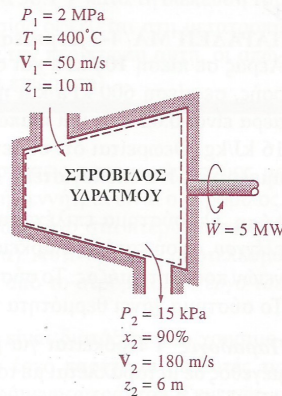
$$h_2 = h_f + x_2 h_{fg} = [225.94 + (0.9)(2373.1)] \text{ kJ/kg} = 2361.73 \text{ kJ/kg}$$

Στη συνέχεια:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = (2361.73 - 3247.6) \text{ kJ/kg} = -885.87 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta ke = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \frac{(180 \text{ m/s})^2 - (50 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 14.95 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta pe = g(z_2 - z_1) = (9.807 \text{ m/s}^2)[(6 - 10) \text{ m}] \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = -0.04 \text{ kJ/kg}$$



Σχήμα 4-31 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 4-4.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν δύο συμπεράσματα. Πρώτον, η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας είναι ασήμαντη σε σύγκριση με τις μεταβολές της ενθαλπίας και της κινητικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει στις περισσότερες μηχανικές διατάξεις. Το δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι η ταχύτητα του υδρατμού στην έξοδο του στροβίλου μπορεί να είναι πολύ μεγάλη εξαιτίας της χαμηλής πίεσης και κατά συνέπεια του υψηλού ειδικού όγκου. Επίσης, η μεταβολή της κινητικής ενέργειας αποτελεί ένα μικρό κλάσμα της μεταβολής της ενθαλπίας (στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι μικρότερη από 2%) και θεωρείται αμελητέα.

(β) Το ισοζύγιο ενέργειας γι' αυτό το σύστημα γράφεται (με τη μορφή ρυθμών) ως εξής:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας}} \stackrel{>0 \text{ (σταθεροποιημένη)}}{=} 0 \quad (\text{kW})$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \dot{m}(h_1 + \mathbf{V}_1^2/2 + gz) = \dot{W}_{out} + \dot{m}(h_2 + \mathbf{V}_2^2/2 + gz_2) \quad (\text{εφόσον } \dot{Q} = 0)$$

Διαιρώντας την παραπάνω σχέση με τη παροχή μάζας \dot{m} και με αντικατάσταση προκύπτει

$$\begin{aligned} w_{out} &= - \left[(h_2 - h_1) + \frac{\mathbf{V}_2^2 - \mathbf{V}_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] = -(\Delta h + \Delta ke + \Delta pe) \\ &= -[-885.87 + 14.95 - 0.04] \text{ kJ/kg} = 870.96 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

(γ) Η παροχή μάζας που απαιτείται για ισχύ εξόδου 5 MW υπολογίζεται από τη ακόλουθη σχέση:

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}}{w} = \frac{5000 \text{ kJ/s}}{870.96 \text{ kJ/kg}} = 5.74 \text{ kg/s}$$

3 Βαλβίδες Στραγγαλισμού

Βαλβίδα στραγγαλισμού ονομάζεται κάθε είδους διάταξη που περιορίζει τη ροή, προκαλώντας σημαντική πτώση της πίεσης στο ρευστό. Μερικά συνηθισμένα παραδείγματα είναι οι κοινές βαλβίδες ρύθμισης της ροής, οι τριχοειδείς σωλήνες και τα πορώδη έμβολο (Σχήμα 4-32). Σε αντίθεση με τους στροβίλους, οι βαλβίδες στραγγαλισμού προκαλούν πτώση πίεσης χωρίς να παράγουν ή να καταναλώνουν έργο. Η πτώση πίεσης συνοδεύεται συχνά από μεγάλη πτώση της θερμοκρασίας του ρευστού και για το λόγο αυτό οι διατάξεις στραγγαλισμού χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές ψύξης και κλιματισμού. Η πτώση της θερμοκρασίας (ή μερικές φορές η αύξηση της θερμοκρασίας) σε μια διεργασία στραγγαλισμού περιγράφεται από μια ιδιότητα που ονο-



(α) Ρυθμιζόμενη βαλβίδα

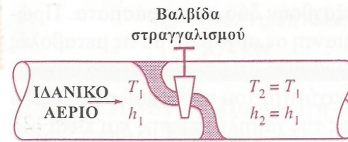


(β) Πορώδες έμβολο



(γ) Τριχοειδής σωλήνας

Σχήμα 4-32 Οι βαλβίδες στραγγαλισμού είναι διατάξεις που προκαλούν μεγάλη πτώση πίεσης στο ρευστό.



Σχήμα 4-33 Η θερμοκρασία ενός ιδανικού αερίου δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια μιας διεργασίας ($h = \text{σταθερό}$) στραγγαλισμού, γιατί $h = h(T)$.

ρ'όλο που η ταχύτητα στην έξοδο είναι συχνά πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα στην είσοδο, η αύξηση της κινητικής ενέργειας είναι συνήθως αμελητέα ($\Delta ke \cong 0$). Επομένως, σε μια βαλβίδα στραγγαλισμού μιας εισόδου, μιας εξόδου και σταθεροποιημένης ροής η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας ανάγεται στη μορφή:

$$h_2 \cong h_1 \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4-27)$$

Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές της ενθαλπίας στην είσοδο και στην έξοδο μιας βαλβίδας στραγγαλισμού είναι ίσες. Για το λόγο αυτό, η βαλβίδα στραγγαλισμού ονομάζεται και *ισενθαλπική διάταξη*.

Για να γίνει κατανοητή η επίδραση της βαλβίδας στραγγαλισμού στις ιδιότητες του ρευστού, η εξίσωση 4-27 γράφεται ως εξής:

$$u_1 + P_1 v_1 = u_2 + P_2 v_2$$

ή $\text{Εσωτερική ενέργεια} + \text{Ενέργεια ροής} = \text{σταθερή}$

Το τελικό αποτέλεσμα μιας διεργασίας στραγγαλισμού εξαρτάται από το ποια από τις δύο ποσότητες κατά τη διεργασία αυξάνεται. Εάν κατά τη διάρκεια της διεργασίας αυξάνεται η ενέργεια ροής ($P_2 v_2 > P_1 v_1$), τότε αυτό θα συμβαίνει σε βάρος της εσωτερικής ενέργειας. Το αποτέλεσμα θα είναι η μείωση της εσωτερικής ενέργειας, η οποία συνήθως συνοδεύεται και από πτώση της θερμοκρασίας. Εάν πάλι κατά τη διάρκεια της διεργασίας στραγγαλισμού μειώνεται η ενέργεια ροής (Pv), η εσωτερική ενέργεια και κατά συνέπεια και η θερμοκρασία θα αυξάνονται. Για τα ιδανικά αέρια $h = h(T)$ και η θερμοκρασία θα πρέπει να παραμένει σταθερή (Σχήμα 4-33).

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-5 Εκτόνωση του ψυκτικού 134α σε έναν Καταψύκτη

Ψυκτικό-134α εισέρχεται στον τριχοειδή σωλήνα ενός καταψύκτη, σε κατάσταση κορεσμένου υγρού, σε πίεση 0.8 MPa η οποία μειώνεται με στραγγαλισμό στα 0.12 MPa. Να υπολογιστούν η ποιότητα του ψυκτικού υγρού στην τελική κατάσταση και η πτώση της θερμοκρασίας κατά τη διεργασία.

Λύση Ο τριχοειδής σωλήνας είναι μια απλή διάταξη περιορισμού της ροής, που χρησιμοποιείται συχνά στις ψυκτικές εφαρμογές για να προκαλεί μεγάλη πτώση της πίεσης

μάζεται *συντελεστής Joule-Thomson* και εξετάζεται στο κεφάλαιο 11.

Οι βαλβίδες στραγγαλισμού είναι συνήθως μικρές διατάξεις και η ροή μέσα από αυτές μπορεί να θεωρηθεί αδιαβατική ($q \cong 0$), γιατί δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος ή αρκετά μεγάλη επιφάνεια, ώστε να πραγματοποιηθεί μεταφορά θερμότητας με αξιοσημείωτους ρυθμούς. Επίσης, δεν παράγεται καθόλου έργο ($w = 0$) και η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας, εάν υπάρχει, είναι πολύ μικρή ($\Delta pe \cong 0$). Πα-

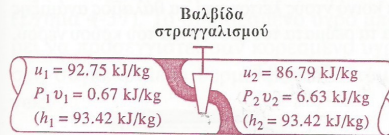
του ψυκτικού. Η ροή μέσα από τριχοειδή σωλήνα είναι μια διεργασία στραγγαλισμού και η ενθαλπία του ψυκτικού παραμένει σταθερή (Σχήμα 4-34).

Στην είσοδο: $P_1 = 0.8 \text{ MPa}$ } $T_1 = T_{\text{sat}@0.8 \text{ MPa}} = 31.33^\circ\text{C}$
 κορ. υγρό } $h_1 = h_{f@0.8 \text{ MPa}} = 93.42 \text{ kJ/kg}$ (Πίνακας Α-12)

Στην έξοδο: $P_2 = 0.12 \text{ MPa} \longrightarrow h_f = 21.32 \text{ kJ/kg}$ $T_{\text{sat}} = -22.36^\circ\text{C}$
 $(h_2 = h_1)$ $h_g = 233.86 \text{ kJ/kg}$

Προφανώς, $h_f < h_2 < h_g$ και το ψυκτικό στην έξοδο βρίσκεται στην κατάσταση του κορεσμένου μίγματος. Η ποιότητα σε αυτή την κατάσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$x_2 = \frac{h_2 - h_f}{h_{fg}} = \frac{93.42 - 21.32}{233.86 - 21.32} = 0.339$$



Σχήμα 4-34 Σε μια διεργασία στραγγαλισμού η ενθαλπία (ενέργεια ροής + εσωτερική ενέργεια) του ρευστού παραμένει σταθερή. Ενδέχεται όμως η εσωτερική ενέργεια ή η ενέργεια ροής να μετατρέπονται από τη μια μορφή στην άλλη.

Εφόσον η κατάσταση εξόδου είναι ένα κορεσμένο μίγμα πίεσης 0.12 MPa, τότε η τιμή της θερμοκρασίας εξόδου θα πρέπει να ισούται με την θερμοκρασία κορεσμού που αντιστοιχεί στην πίεση αυτή, δηλαδή -22.36°C . Η μεταβολή θερμοκρασίας για τη διεργασία γίνεται:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (-22.36 - 31.33)^\circ\text{C} = -53.69^\circ\text{C}$$

Δηλαδή, κατά τη διάρκεια του στραγγαλισμού η θερμοκρασία του ψυκτικού μειώνεται κατά 53.69°C . Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια του στραγγαλισμού το 33.9% του ψυκτικού εξατμίζεται και η ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση λαμβάνεται από το ίδιο το ψυκτικό.

4α Θάλαμοι Ανάμιξης

Στις εφαρμογές της μηχανικής χρειάζεται συχνά να γίνει ανάμιξη δύο ρευμάτων ρευστού. Η συσκευή στην οποία γίνεται η ανάμιξη ονομάζεται **θάλαμος ανάμιξης**. Ο θάλαμος ανάμιξης δε χρειάζεται να είναι μια διακριτή συσκευή. Για παράδειγμα, μια συνηθισμένη διασταύρωση στις σωληνώσεις (ταφ), όπως αυτό του ντους της τουαλέτας, λειτουργεί σα θάλαμος ανάμιξης για τα ρεύματα του κρύου και του ζεστού νερού (Σχήμα 4-35).

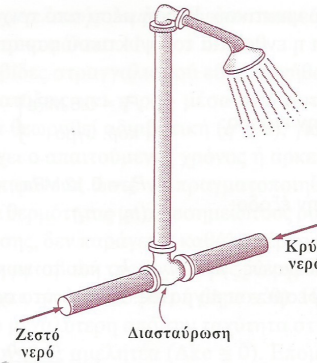
Στους θαλάμους ανάμιξης, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας, το άθροισμα των παροχών μάζας των ρευμάτων εισόδου πρέπει να είναι ίσο με τη παροχή μάζας των ρευμάτων εξόδου. Οι θάλαμοι ανάμιξης είναι πάντοτε καλά θερμομονωμένοι ($q \cong 0$) και σε αυτά δεν εμπλέκεται καμιά μορφή έργου ($w = 0$). Επίσης, η κινητική και η δυνα-

μική ενέργεια των ρευμάτων των ρευστών είναι συνήθως αμελητέες ($ke \cong 0$, $pe \cong 0$). Οπότε, στην εξίσωση διατήρησης της ενέργειας (Εξίσωση 4-19) παραμένουν μόνο οι ολικές ενέργειες των ρευμάτων εισόδου και εξόδου. Επομένως, στην περίπτωση αυτή, η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας είναι ανάλογη με την εξίσωση διατήρησης της μάζας.

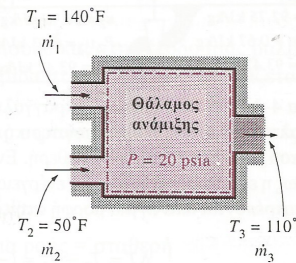
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-6 Ανάμιξη Θερμού και Κρύου Νερού σε ένα Ντους

Εξετάζεται ένα κοινό ντους στο οποίο αναμιγνύεται ζεστό με κρύο νερό στους 140 και 50°F αντίστοιχα. Η επιθυμητή θερμοκρασία του νερού είναι 110°F. Να υπολογιστεί ο λόγος των μαζών του ζεστού και του κρύου νερού. Οι θερμικές απώλειες θεωρούνται αμελητέες και η πίεση στο θάλαμο ανάμιξης είναι 20 psia.

Λύση Ως σύστημα επιλέγεται ο *θάλαμος ανάμιξης* (Σχήμα 4-36). Πρόκειται για έναν *όγκο ελέγχου*, αφού η μάζα διέρχεται από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το σύστημα έχει δύο εισόδους και μία έξοδο.



Σχήμα 4-35 Η διασταύρωση του σωλήνα σ' ένα κοινό ντους λειτουργεί σα θάλαμος ανάμιξης για τα ρεύματα του ζεστού και του κρύου νερού.



Σχήμα 4-36 Σχήμα του παραδείγματος 4-6.

Παραδοχές 1 Πρόκειται για μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, αφού κανένα μέγεθος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, σε οποιοδήποτε σημείο, άρα $\Delta m_{CV} = 0$ και $\Delta E_{CV} = 0$. 2 Η κινητική και η δυναμική ενέργεια είναι αμελητέες, $ke \cong pe \cong 0$. 3 Οι απώλειες θερμότητας του συστήματος είναι αμελητέες, άρα $Q \cong 0$. 4 Δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις έργου.

Ανάλυση Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και παρατηρήσεις τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας για το σύστημα αυτό γράφονται (με τη μορφή ρυθμών) ως εξής:

Ισοζύγιο μάζας $\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \Delta \dot{m}_{system} \xrightarrow{0 \text{ (σταθεροποιημένη)}} = 0$
 $\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \rightarrow \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$

Ισοζύγιο ενέργειας $\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \Delta \dot{E}_{system} \xrightarrow{0 \text{ (σταθεροποιημένο)}} = 0$
Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής κ.λπ. ενέργειας.

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \quad (\text{επειδή } \dot{Q} \cong 0 \text{ και } ke \cong pe \cong 0)$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3$$

Συνδυάζοντας τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας, προκύπτει:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_3$$

Από τη διαίρεση της παραπάνω εξίσωσης με \dot{m}_2 , προκύπτει:

$$y h_1 + h_2 = (y + 1) h_3$$

όπου με $y = \dot{m}_1 / \dot{m}_2$ παριστάνεται ο ζητούμενος λόγος των παροχών μάζας.

Η θερμοκρασία κορεσμού του νερού στην πίεση των 20 psia είναι 227.96°F. Εφόσον, οι θερμοκρασίες και των τριών ρευμάτων είναι μικρότερες από την παραπάνω τιμή ($T < T_{sat}$), το νερό στα τρία ρεύματα βρίσκεται στην κατάσταση συμπιεσμένου υγρού (Σχήμα 4-37). Το συμπιεσμένο υγρό μπορεί να προσεγγιστεί σαν κορεσμένο υγρό στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Επομένως:

$$h_1 \cong h_f @ 140^\circ\text{F} = 107.96 \text{ Btu/lbm}$$

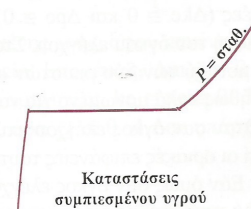
$$h_2 \cong h_f @ 50^\circ\text{F} = 18.06 \text{ Btu/lbm}$$

$$h_3 \cong h_f @ 110^\circ\text{F} = 78.02 \text{ Btu/lbm}$$

Λύνονται ως προς y και αντικαθιστώντας, προκύπτει:

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_1 - h_3} = \frac{78.02 - 18.06}{107.96 - 78.02} = 2.0$$

Αρα, η παροχή του ζεστού νερού πρέπει να είναι διπλάσια από την παροχή του κρύου προκειμένου η τελική θερμοκρασία να είναι 110°F.

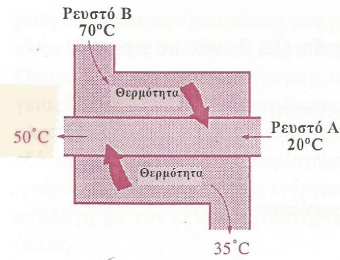


Σχήμα 4-37 Μια ουσία βρίσκεται στην κατάσταση του συμπιεσμένου υγρού, όταν για τη δεδομένη πίεση η θερμοκρασία της είναι μικρότερη της θερμοκρασίας κορεσμού.

4β Εναλλάκτες Θερμότητας

Όπως φαίνεται και από το όνομα, οι **εναλλάκτες θερμότητας** είναι διατάξεις στις οποίες δύο ρεύματα ρευστού εναλλάσσουν μεταξύ τους θερμότητα χωρίς όμως να αναμιγνύονται. Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα στη βιομηχανία.

Ο πιο απλός τύπος εναλλάκτη θερμότητας είναι ο εναλλάκτης δύο σωλήνων (ή εναλλάκτης αυλών-κελύφους), ο οποίος παριστάνεται στο σχήμα 4-38. Ο εναλλάκτης αυτός αποτελείται από δύο ομόκεντρους σωλήνες διαφορετικής διαμέτρου. Το ένα ρευστό ρέει στον εσωτερικό σωλήνα και το άλλο στο διάκενο μεταξύ των δύο σωλήνων. Η θερμότητα μεταφέρεται από το ζεστό στο κρύο ρευστό μέσα από τα τοιχώματα του



Σχήμα 4-38 Ο εναλλάκτης θερμότητας μπορεί να είναι τόσο απλός, όπως δύο ομόκεντροι σωλήνες με διαφορετικές διαμέτρους.

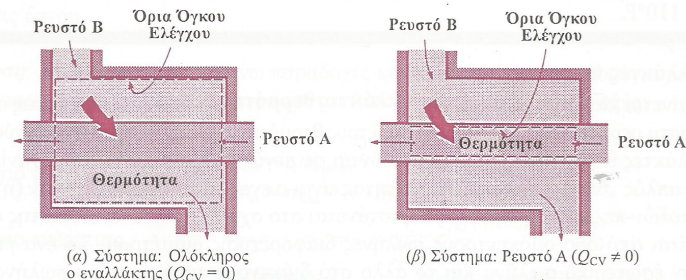
μόνιμης ροής, η παροχή μάζας του κάθε ρεύματος παραμένει σταθερή.

Οι εναλλάκτες θερμότητας δεν περιλαμβάνουν αλληλεπιδράσεις έργου ($w = 0$) και οι μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας του κάθε ρεύματος είναι αμελητέες ($\Delta ke \approx 0$ και $\Delta pe \approx 0$). Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από την επιλογή του όγκου ελέγχου. Στους εναλλάκτες θερμότητας, η μεταφορά θερμότητας γίνεται μεταξύ των δύο ρευστών στο εσωτερικό της διάταξης. Το εξωτερικό κέλυφος είναι συνήθως καλά μονωμένο για να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον.

Όταν σαν όγκος ελέγχου επιλέγεται ολόκληρος ο εναλλάκτης, τότε το \dot{Q} είναι μηδέν, γιατί οι οριακές επιφάνειες ταυτίζονται με το κέλυφος που είναι καλά μονωμένο (Σχήμα 4-39). Εάν όμως σαν όγκος ελέγχου επιλεγεί το ένα μόνο ρευστό, τότε η θερμότητα θα διαπερνά τις οριακές επιφάνειες και ο ρυθμός μεταφοράς \dot{Q} δε θα είναι μηδέν. Στην περίπτωση αυτή, το \dot{Q} θα παριστάνει το ρυθμό μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-7 Ψύξη του Ψυκτικού -134a με Νερό

Σ'ένα συμπτυκνωτή ψυκτικό-134a πρόκειται να ψυχθεί με νερό. Το ψυκτικό εισέρχεται στο συμπτυκνωτή με παροχή 6 kg/min σε πίεση 1 MPa και σε θερμοκρασία 70°C και τον

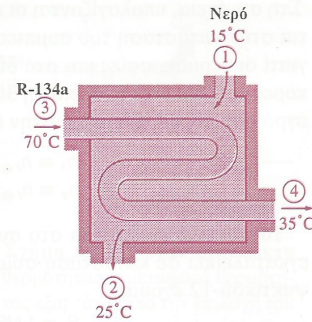


Σχήμα 4-39 Στους εναλλάκτες, η μεταφορά θερμότητας εξαρτάται από την επιλογή του συστήματος.

εσωτερικού σωλήνα. Συχνά, ο εσωτερικός σωλήνας έχει τη μορφή σπειρών, με στόχο την αύξηση της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας και κατά συνέπεια του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Οι θάλαμοι ανάμιξης που εξετάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο ανήκουν σε μια δεύτερη κατηγορία εναλλακτών που ονομάζονται *εναλλάκτες άμεσης επαφής*.

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας, σ'έναν εναλλάκτη θερμότητας που λειτουργεί με μόνιμη ροή το άθροισμα των παροχών μάζας εισόδου πρέπει να είναι ίσο με το άθροισμα των παροχών μάζας εξόδου. Η παραπάνω αρχή μπορεί επίσης να διατυπωθεί ως εξής: *για λειτουργία*

εγκαταλείπει σε θερμοκρασία 35°C. Το κρύο νερό εισέρχεται με πίεση 300 kPa και με θερμοκρασία 15°C, εγκαταλείποντάς τον με θερμοκρασία 25°C. Αγνοώντας οποιαδήποτε πτώση πίεσης, να υπολογιστούν: (α) η παροχή μάζας του κρύου νερού και (β) ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από το ψυκτικό στο νερό.



Σχήμα 4-40 Σχηματική αναπαράσταση του παραδείγματος 4-7.

Λύση Ως σύστημα επιλέγεται ολόκληρος ο εναλλάκτης θερμότητας (Σχήμα 4-40). Πρόκειται για έναν όγκο ελέγχου, αφού η μάζα διέρχεται από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Γενικά υπάρχουν πολλές δυνατότητες όσον αφορά στην επιλογή του όγκου ελέγχου για συσκευές πολλών ρευμάτων σταθεροποιημένης ροής. Παρόλα αυτά, η τελική επιλογή εξαρτάται από τη συγκεκριμένη περίπτωση. Στο παράδειγμα αυτό υπάρχουν δύο ρεύματα ρευστών (άρα δύο εισοδοί και δύο έξοδοι), όμως δε λαμβάνει χώρα ανάμιξη.

Παραδοχές 1 Πρόκειται για μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, αφού κανένα μέγεθος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, σε οποιοδήποτε σημείο. Επομένως, $\Delta m_{CV} = 0$ και $\Delta E_{CV} = 0$. 2 Η κινητική και η δυναμική ενέργεια είναι αμελητέες, $ke \cong pe \cong 0$. 3 Οι απώλειες θερμότητας του συστήματος είναι αμελητέες, άρα $\dot{Q} \cong 0$. 4 Δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις έργου.

Ανάλυση (α) Με βάση τις παραπάνω παραδοχές και παρατηρήσεις τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας για το σύστημα αυτό γράφονται (με τη μορφή ρυθμών) ως εξής:

Ισοζύγιο μάζας: $\dot{m}_in = \dot{m}_out$

για κάθε ρεύμα, αφού δεν υπάρχει ανάμιξη. Άρα

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= \dot{m}_2 = \dot{m}_w \\ \dot{m}_3 &= \dot{m}_4 = \dot{m}_R \end{aligned}$$

Ισοζύγιο ενέργειας $\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής κ.λπ. ενέργειας}} = 0 \text{ (σταθεροποιημένη)}$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_4 h_4 \quad (\text{επειδή } \dot{Q} \cong 0, \dot{W} = 0 \text{ και } ke \cong pe \cong 0)$$

Συνδυάζοντας τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας προκύπτει:

$$\dot{m}_w (h_1 - h_2) = \dot{m}_R (h_4 - h_3)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ενθαλπίες στις τέσσερις καταστάσεις. Το νερό βρίσκεται στην κατάσταση του συμπιεσμένου υγρού τόσο στην είσοδο όσο και στην εξόδο, γιατί οι θερμοκρασίες και στα δύο αυτά σημεία είναι μικρότερες από τη θερμοκρασία κορεσμού του νερού, σε πίεση 300 kPa (133.55°C). Προσομοιάζοντας το συμπιεσμένο υγρό σαν κορεσμένο υγρό στην ίδια θερμοκρασία, προκύπτει:

$$\begin{aligned} h_1 &\cong h_{f @ 15^\circ\text{C}} = 62.99 \text{ kJ/kg} \\ h_2 &\cong h_{f @ 25^\circ\text{C}} = 104.89 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (\text{Πίνακας A-4})$$

Το ψυκτικό εισέρχεται στο συμπυκνωτή σε κατάσταση υπέρθερμου ατμού και τον εγκαταλείπει σε κατάσταση συμπιεσμένου υγρού στους 35°C. Από τους πίνακες του ψυκτικού-12 έχουμε:

$$\left. \begin{aligned} P_3 &= 1 \text{ MPa} \\ T_3 &= 70^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} h_3 = 302.34 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Πίνακας A-13})$$

$$\left. \begin{aligned} P_4 &= 1 \text{ MPa} \\ T_4 &= 35^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} h_4 \cong h_{f @ 35^\circ\text{C}} = 98.78 \text{ kJ/kg} \quad (\text{Πίνακας A-11})$$

Αντικαθιστώντας, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \dot{m}_w(62.99 - 104.89) \text{ kJ/kg} &= (6 \text{ kg/min}) [(-302.34) \text{ kJ/kg}] \\ \dot{m}_w &= 29.15 \text{ kg/min} \end{aligned}$$

(β) Για τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας από το ψυκτικό προς το νερό, πρέπει να επιλεγεί ένας όγκος ελέγχου του οποίου οι οριακές επιφάνειες θα τέμνουν τη διαδρομή της θερμικής ροής, γιατί η θερμότητα αναγνωρίζεται μόνο καθώς διαπερνά τις οριακές επιφάνειες. Αρα, ως όγκος ελέγχου μπορεί να επιλεγεί ο όγκος που καταλαμβάνει το ένα από τα δύο ρευστά. Χωρίς κανένα ιδιαίτερο λόγο, ως όγκος ελέγχου επιλέγεται ο όγκος που καταλαμβάνει το νερό. Οι παραδοχές που έγιναν στο προηγούμενο ερώτημα συνεχίζουν να ισχύουν, με τη διαφορά ότι η ροή της θερμότητας δεν είναι πλέον μηδέν. Για το συγκεκριμένο σύστημα ενός ρεύματος και μόνιμης ροής, ανάγεται στην ακόλουθη μορφή:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας}}} \overset{0 \text{ (σταθεροποιημένη)}}{=} 0$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{Q}_{w,in} + \dot{m}_w h_1 = \dot{m}_w h_2$$

Ανακατανέμοντας τους όρους και αντικαθιστώντας προκύπτει

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{w,in} &= \dot{m}_w(h_2 - h_1) = (29.15 \text{ kg/min})[(104.89 - 62.99) \text{ kJ/kg}] \\ &= 1221 \text{ kJ/min} \end{aligned}$$

Σχόλια Αν ως όγκος ελέγχου είχε επιλεγεί ο όγκος που καταλαμβάνει το ψυκτικό (Σχήμα 4-41), θα προέκυπτε το ίδιο αποτέλεσμα για το $\dot{Q}_{R,out}$, επειδή η θερμότητα που κερδίζει το νερό είναι ίση με τη θερμότητα που χάνει το ψυκτικό.

5 Ροή σε Σωλήνες ή σε Αγωγούς

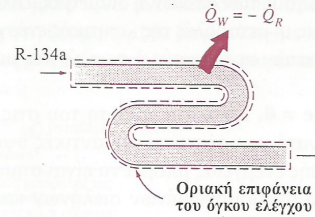
Σε πολλές εφαρμογές της μηχανικής, η μεταφορά υγρών και αερίων μέσα από σωλήνες ή από αγωγούς είναι πολύ σημαντική. Η ροή μέσα από σωλήνες ή από αγωγούς ικανοποιεί συνήθως τις συνθήκες σταθεροποιημένης ροής, με εξαίρεση τις μεταβατικές καταστάσεις της εκκίνησης και της διακοπής της διεργασίας. Ο όγκος ελέγχου επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να περιλαμβάνει τις εσωτερικές επιφάνειες του τμήματος εκείνου του σωλήνα ή του αγωγού που εξετάζεται.

Κατά την ανάλυση της ροής σ' αγωγούς πρέπει να εξετάζονται τα ακόλουθα σημεία:

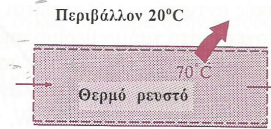
$\dot{Q} \neq 0$. Κάτω από συνηθισμένες συνθήκες λειτουργίας, το ποσό θερμότητας που κερδίζεται ή χάνεται από το ρευστό ενδέχεται να είναι σημαντικό, ιδιαίτερα εάν ο σωλήνας ή ο αγωγός έχει μεγάλο μήκος (Σχήμα 4-42). Σ' ορισμένες περιπτώσεις, η μεταφορά θερμότητας είναι επιθυμητή και ίσως να είναι και ο μόνος λόγος για τον οποίο επιδιώκεται η ροή μέσα από το σωλήνα. Μερικά παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι η ροή νερού στο εσωτερικό των καυστήρων στα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, η ροή του ψυκτικού στα ψυγεία και η ροή στους εναλλάκτες θερμότητας. Σ' άλλες όμως περιπτώσεις, η μεταφορά θερμότητας είναι ανεπιθύμητη και οι σωλήνες ή οι αγωγοί πρέπει να είναι μονωμένοι, ώστε να αποτρέπουν τις απώλειες ή την προσθήκη θερμότητας, ιδιαίτερα όταν η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του ρευστού και του περιβάλλοντος είναι μεγάλη. Στην περίπτωση αυτή, η μεταφορά θερμότητας είναι αμελητέα.

$\dot{W} \neq 0$. Εάν ο όγκος ελέγχου περιλαμβάνει τμήματα θέρμανσης (θερμαντικές σπείρες), ανεμιστήρα ή αντλία, τότε οι αλληλεπιδράσεις έργου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (Σχήμα 4-43). Από τις παραπάνω περιπτώσεις, το έργο ανεμιστήρα είναι συνήθως μικρό και θεωρείται αμελητέο. Εάν ο όγκος ελέγχου δεν περιλαμβάνει καμιά από τις παραπάνω διατάξεις παραγωγής έργου, οι όροι που αναφέρονται στο έργο μηδενίζονται.

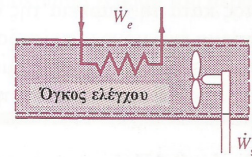
$\Delta ke \cong 0$. Οι ταχύτητες που αναπτύσσονται κατά τη ροή των ρευστών μέσα σε αγωγούς ή σε σωλήνες είναι σχετικά χαμηλές, με αποτέλεσμα οι αντίστοιχες μεταβολές της κινητικής ενέργειας να θεωρούνται αμελητέες. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε μονωμένους σωλήνες ή



Σχήμα 4-41 Σ' έναν εναλλάκτη θερμότητας, η μεταφορά θερμότητας εξαρτάται από την επιλογή του όγκου ελέγχου.



Σχήμα 4-42 Οι απώλειες θερμότητας, όταν ένα θερμό ρευστό ρέει μέσα σ' ένα μη-θερμομονωμένο σωλήνα, ενδέχεται να είναι πολύ σημαντικές.



Σχήμα 4-43 Η ροή σε σωλήνα ή σε αγωγό μπορεί να περιέχει μία ή και περισσότερες διατάξεις παραγωγής έργου ταυτόχρονα.

αγωγούς των οποίων η διάμετρος είναι σταθερή και τα θερμικά φαινόμενα αμελητέα. Βέβαια, οι μεταβολές της κινητικής ενέργειας μπορεί να είναι σημαντικές σε περιπτώσεις ροής ρευστών σε αγωγούς ή σε σωλήνες με μεταβλητή την κάθετη διατομή τους.

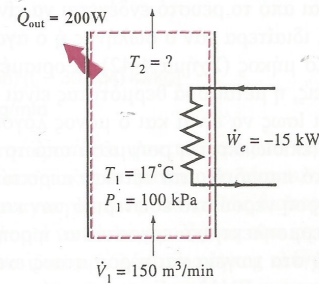
$\Delta p \neq 0$. Κατά την κίνηση του στις σωληνώσεις και στους αγωγούς, το ρευστό είναι δυνατό να υφίσταται σημαντικές υψομετρικές μεταβολές. Επομένως, ο όρος της δυναμικής ενέργειας μπορεί να είναι σημαντικός. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα στις ροές διαμέσου θερμομονωμένων σωλήνων και αγωγών όπου η μεταφορά θερμότητας δεν επισκιάζει άλλα φαινόμενα.

ΚΑΛΗ
Σ

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-8 Ηλεκτρική Θέρμανση του Αέρα ενός Σπιτιού

Σε πολλά σπίτια, τα συστήματα ηλεκτρικής θέρμανσης αποτελούνται από έναν απλό αγωγό με θερμαντικές αντιστάσεις. Ο αέρας θερμαίνεται καθώς περνάει μέσα από ηλεκτρικές αντιστάσεις. Θεωρείται ένα σύστημα ηλεκτρικής θέρμανσης 15 kW. Ο αέρας εισέρχεται στο τμήμα θέρμανσης με πίεση 100 kPa και με θερμοκρασία 17°C. Η ογκομετρική παροχή είναι 150 m³/min. Αν κατά τη ροή του αέρα μέσα από τον αγωγό οι απώλειες θερμότητας είναι 200 W, να υπολογιστεί η θερμοκρασία εξόδου του αέρα.

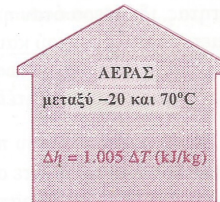
Λύση Ως σύστημα επιλέγεται το τμήμα της θέρμανσης του αγωγού (Σχήμα 4-44). Πρόκειται για έναν όγκο ελέγχου, αφού η μάζα διέρχεται από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το σύστημα έχει μόνο μία είσοδο και μία έξοδο, άρα $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Το σύστημα χάνει θερμότητα, ενώ παρέχεται σε αυτό ηλεκτρικό έργο.



Σχήμα 4-44 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 4-8.

Παραδοχές 1 Πρόκειται για μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, αφού κανένα μέγεθος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, σε οποιοδήποτε σημείο. Επομένως, $\Delta m_{CV} = 0$ και $\Delta E_{CV} = 0$. 2 Ο αέρας θεωρείται ιδανικό αέριο, επειδή βρίσκεται σε αρκετά υψηλή θερμοκρασία και χαμηλή πίεση σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη στο κρίσιμο σημείο, -141°C και 3.77 MPa. 3 Η μεταβολή της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας είναι ίση με μηδέν, $\Delta ke = \Delta pe = 0$. 4 Ο αέρας θεωρείται ότι έχει σταθερές ειδικές θερμότητες σε θερμοκρασία δωματίου.

Ανάλυση Στις θερμοκρασίες των συνηθισμέ-



Σχήμα 4-45 Το σφάλμα που εισάγεται από την προσέγγιση $\Delta h = C_p \Delta T$ και $C_p = 1.0050 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ για τον αέρα, στο θερμοκρασιακό διάστημα -20 έως 70°C, είναι μικρότερο από 0.5%.

των εφαρμογών θέρμανσης και κλιματισμού το Δh μπορεί να αντικατασταθεί από το $C_p \Delta T$, όπου $C_p = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ -που είναι η τιμή στη θερμοκρασία δωματίου- με αμελητέο σφάλμα (Σχήμα 4-45). Το ισοζύγιο ενέργειας για το σύστημα αυτό γράφεται (με τη μορφή ρυθμών) ως εξής:

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας}}} \stackrel{>0 \text{ (σταθεροποιημένη)}}{=} 0$$

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out}$$

$$\dot{W}_{e,in} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{out} + \dot{m}h_2 \quad c_p = \frac{\partial h}{\partial T}$$

$$\dot{W}_{e,in} - \dot{Q}_{out} = \dot{m}C_p(T_2 - T_1) \quad (\text{επειδή } \Delta ke \equiv \Delta pe \equiv 0)$$

Σύμφωνα με τη σχέση των ιδανικών αερίων, ο ειδικός όγκος του αέρα στην είσοδο του αγωγού είναι

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{[0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})](290 \text{ K})}{100 \text{ kPa}} = 0.832 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Η παροχή μάζας του αέρα μέσω του αγωγού δίνεται από τη σχέση:

$$v = \frac{V}{\dot{m}} = \frac{\dot{V}}{\dot{m}} \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{V}_1}{v_1} = \frac{150 \text{ m}^3/\text{min}}{0.832 \text{ m}^3/\text{kg}} \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) = 3.0 \text{ kg/s}$$

Αντικαθιστώντας τις γνωστές τιμές, υπολογίζεται η θερμοκρασία εξόδου του αέρα

$$(15 \text{ kJ/s}) - (0.2 \text{ kJ/s}) = (3 \text{ kg/s})[1.005 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})](T_2 - 17)^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 21.9^\circ\text{C}$$

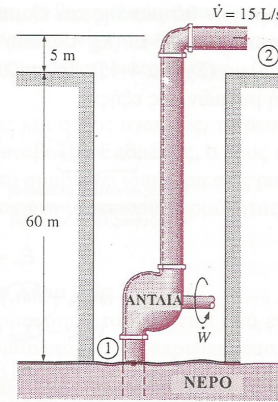
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4-9 Αντληση Νερού από ένα Πηγάδι

Στις αγροτικές περιοχές χρησιμοποιούνται συχνά αντλίες για την άντληση του νερού από γεωτρήσεις. Θεωρείται ένας υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας του οποίου η επιφάνεια βρίσκεται 60 m κάτω από το έδαφος. Το νερό πρέπει να αντληθεί σε ύψος 5 m πάνω από το έδαφος. Η διάμετρος του σωλήνα είναι 15 cm στην είσοδο και 20 cm στην έξοδο. Να υπολογιστεί η ισχύς της αντλίας που απαιτείται για μόνιμη ροή νερού ίση με 15 L/s (= 0.015 m³/s), θεωρώντας αμελητέα οποιαδήποτε θερμική αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και τη θερμότητα λόγω τριβής.

Λύση Ως σύστημα επιλέγονται οι σωλήνες και η αντλία (Σχήμα 4-46). Πρόκειται για έναν όγκο ελέγχου, αφού η μάζα διέρχεται από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Το σύστημα έχει μόνο μία είσοδο και μία έξοδο, άρα $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. Στην αντλία παρέχεται έργο ατράκτου. Η κινητική και η δυναμική ενέργεια μπορεί να έχουν σημαντική τιμή, γι' αυτό και λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς.

Παραδοχές 1 Πρόκειται για μια διεργασία σταθεροποιημένης ροής, αφού κανένα μέγεθος δε μεταβάλλεται με το χρόνο, σε οποιοδήποτε σημείο. Επομένως $\Delta m_{CV} = 0$ και $\Delta E_{CV} = 0$. **2** Η μεταφορά θερμότητας είναι αμελητέα. **3** Δε λαμβάνονται υπόψη οι θερμαντικές επιδράσεις της τριβής.

Ανάλυση Η πυκνότητα του νερού στην υγρή φάση στη θερμοκρασία δωματίου (ή σε θερμοκρασία, περίπου ίση με τη θερμοκρασία δωματίου), μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ίση με 1000 kg/m^3 , με αμελητέο σφάλμα. Η παροχή του νερού και οι ταχύτητες ροής γίνονται:



Σχήμα 4-46 Σχηματική παράσταση του παραδείγματος 4-9.

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = (1000 \text{ kg/m}^3)(0.015 \text{ m}^3/\text{s}) = 15 \text{ kg/s}$$

$$V_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1 A_1} = \frac{15 \text{ kg/s}}{(1000 \text{ kg/m}^3)[\pi(0.15 \text{ m})^2/4]} = 0.85 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 A_2} = \frac{15 \text{ kg/s}}{(1000 \text{ kg/m}^3)[\pi(0.2 \text{ m})^2/4]} = 0.48 \text{ m/s}$$

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, τα υγρά μπορούν να θεωρηθούν ασυμπιεστά ($v = \text{σταθερός}$). Άρα η μεταβολή της ενθαλπίας είναι:

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= (u_2 + P_2 v_2) - (u_1 + P_1 v_1) \\ &= (u_2 - u_1) + v(P_2 - P_1) \\ &= C(T_2 - T_1) + v(P_2 - P_1) = 0 \end{aligned}$$

αφού $\Delta u = C\Delta T$. Στην περίπτωση αυτή $\Delta h = 0$, αφού δε μεταβάλλεται ούτε η θερμοκρασία ($T_2 = T_1$) ούτε η πίεση ($P_2 = P_1 = P_{\text{atm}}$). (Να σημειωθεί ότι τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο επικρατεί ατμοσφαιρική πίεση).

Τότε, το ισοζύγιο ενέργειας για το σύστημα γράφεται (με τη μορφή ρυθμών) ως εξής:

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{in}} - \dot{E}_{\text{out}}}_{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς ενέργειας με τη μορφή θερμότητας, έργου και μάζας}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{system}}}_{\text{Ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής, κινητικής δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας}} \overset{0 \text{ (σταθεροποιημένη)}}{=} 0$$

$$\dot{W}_{\text{sh, in}} + \dot{m} \left(\frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) = \dot{m} \left(\frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) \quad (\text{επειδή } \dot{Q} \equiv 0, \Delta h \equiv 0)$$

$$\dot{W}_{e, \text{in}} = \dot{m} \left[\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$\begin{aligned} \dot{W}_{e, \text{in}} &= (15 \text{ kg/s}) \left[\frac{(0.48 \text{ m/s})^2 - (0.85 \text{ m/s})^2}{2} + (9.8 \text{ m/s}^2)(65 \text{ m}) \right] \\ &= (15 \text{ kg/s}) (-0.246 \text{ m}^2/\text{s}^2 + 637.5 \text{ m}^2/\text{s}^2) \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) \\ &= 9.55 \text{ kW} \end{aligned}$$

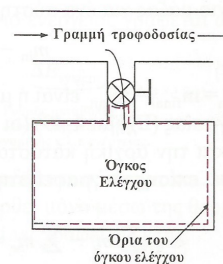
Σχόλια Αυτό είναι και το απαιτούμενο έργο αντλίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όταν η διεργασία περιλαμβάνει σημαντική υψομετρική διαφορά, ο όρος της κινητικής ενέργειας έχει πολύ μικρή τιμή σε σχέση με τον όρο της δυναμικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει σε πολλές πραγματικές διεργασίες. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι στα προβλήματα της ροής μέσα από σωλήνα ή από αγωγό ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα σημαντικές οι απώλειες λόγω τριβής. Αρα, στην πράξη θα χρειαστεί μια ισχυρότερη αντλία προκειμένου να υπερνικηθεί αυτή η επιπλέον αντίσταση στη ροή. Οι απώλειες λόγω τριβής εξετάζονται από τη ρευστομηχανική.

4.4 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗΣ ΜΗ-ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ

Στις διεργασίες σταθεροποιημένης ροής στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου δεν πραγματοποιούνται μεταβολές των ιδιοτήτων με το χρόνο. Για το λόγο αυτό δεν εξετάζεται το τι συμβαίνει μέσα από τις οριακές επιφάνειες του συστήματος. Το γεγονός ότι στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου δεν πραγματοποιείται κάποια μεταβολή των ιδιοτήτων με το χρόνο απλοποιεί σημαντικά την ανάλυση της εργασίας.

Στην πράξη όμως υπάρχουν πολλές διεργασίες οι οποίες περιλαμβάνουν μεταβολές με το χρόνο στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου. Οι διεργασίες αυτές ονομάζονται **διεργασίες μη-σταθεροποιημένης ή μεταβατικής ροής**. Οι σχέσεις που ισχύουν για τη σταθεροποιημένη ροή και αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 4-2 δεν είναι δυνατό να εφαρμοστούν στην περίπτωση αυτή. Κατά την ανάλυση των μεταβατικών διεργασιών, εκτός από τις ενεργειακές αλληλεπιδράσεις κατά μήκος των ορίων του συστήματος, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μάζα και η ενέργεια που περιέχονται στον όγκο ελέγχου.

Παραδείγματα μεταβατικών διεργασιών είναι το γέμισμα δοχείων με σταθερό όγκο από γραμμές τροφοδοσίας (Σχήμα 4-47), η εκκένωση (άδειασμα) δοχείων που βρίσκονται κάτω από πίεση, οι στρόβιλοι πίε-



Σχήμα 4-47 Η τροφοδοσία ενός δοχείου με υγρό είναι μια διεργασία μη-σταθεροποιημένης ροής, γιατί κατά την εξέλιξη της μέσα στον όγκο ελέγχου εμπλέκονται μεταβολές των ιδιοτήτων με το χρόνο.

$$Q_{in} = \left(m_1 - \frac{V}{v_2}\right)h_e + \left(\frac{V}{v_2}u_2 - m_1u_1\right)$$

Στην παραπάνω εξίσωση υπάρχουν δύο άγνωστοι, οι u_2 και v_2 . Οι δύο αυτοί άγνωστοι πρέπει να εκφραστούν ως προς ένα κοινό άγνωστο και στη συνέχεια να υπολογιστούν. Θεωρώντας ότι στην τελική κατάσταση υπάρχει ακόμα υγρό στη χύτρα (δηλαδή επικρατούν συνθήκες κορεσμού), τα v_2 και u_2 μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$v_2 = v_f + x_2v_{fg} = 0.001 + x_2(1.004 - 0.001) \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_2 = u_f + x_2u_{fg} = 486.8 + x_2(2038.1) \text{ kJ/kg}$$

Υπενθυμίζεται ότι, κατά τη διάρκεια του βρασμού υπό σταθερή πίεση, οι ιδιότητες της κάθε φάσης παραμένουν σταθερές και μεταβάλλεται μόνον η ποιότητα. Όταν οι δύο παραπάνω εξισώσεις αντικατασταθούν στην εξίσωση της ενέργειας, τότε ο μόνος άγνωστος είναι η ποιότητα x_2 η οποία υπολογίζεται ίση με:

$$x_2 = 0.009$$

Άρα

$$v_2 = 0.001 + (0.009)(1.004 - 0.0001) \text{ m}^3/\text{kg} = 0.010 \text{ m}^3/\text{kg}$$

και

$$m_2 = \frac{V}{v_2} = \frac{0.006 \text{ m}^3}{0.01 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0.6 \text{ kg}$$

Επομένως, μετά από 30 min, η χύτρα ταχύτητας θα περιέχει 0.6 kg νερού (υγρό + ατμός).

4-5 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Ο όγκος ελέγχου διαφέρει από ένα κλειστό σύστημα στο ότι περιλαμβάνει μεταφορά μάζας. Η μάζα μεταφέρει μαζί της ενέργεια, άρα η μάζα και το ενεργειακό περιεχόμενο ενός συστήματος μεταβάλλονται όταν η μάζα εισέρχεται σε ένα σύστημα ή εξέρχεται από αυτό. Τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας για οποιοδήποτε σύστημα που υφίσταται κάποια διεργασία μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\underbrace{m_{in} - m_{out}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας} \\ \text{με τη μορφή θερμότητας,} \\ \text{έργου και μάζας}}} = \Delta m_{\text{system}} \quad (\text{kg})$$

$$\underbrace{E_{in} - E_{out}}_{\substack{\text{Συνολική μεταφορά ενέργειας} \\ \text{με τη μορφή θερμότητας,} \\ \text{έργου και μάζας}}} = \underbrace{\Delta E_{\text{system}}}_{\substack{\text{Μεταβολή της εσωτερικής,} \\ \text{κινητικής δυναμικής κ.λ.π} \\ \text{ενέργειας}}} \quad (\text{kJ})$$

Τα ισοζύγια αυτά μπορούν επίσης να εκφραστούν συναρτήσει των ρυθμών ως εξής:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \Delta \dot{m}_{\text{system}} \quad (\text{kg/s})$$

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Ρυθμός συνολικής μεταφοράς} \\ \text{ενέργειας με τη μορφή} \\ \text{θερμότητας, έργου και μάζας}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{\text{system}}}_{\substack{\text{Ρυθμός μεταβολής της} \\ \text{εσωτερικής, κινητικής} \\ \text{δυναμικής κ.λ.π. ενέργειας}}} \quad (\text{kW})$$

Η μάζα που ρέει διαμέσου μιας εγκάρσιας διατομής στη μονάδα του χρόνου ονομάζεται *παροχή μάζας*, συμβολίζεται με \dot{m} και δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m} = \rho \mathbf{V}_{av} A \quad (\text{kg/s})$$

όπου ρ = η πυκνότητα, kg/m^3 ($= 1 / v$)

\mathbf{V}_{av} = η μέση ταχύτητα ροής κάθετα στη διατομή A, m/s

A = το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής, m^2

Ο όγκος του ρευστού που ρέει διαμέσου μιας εγκάρσιας διατομής στη μονάδα του χρόνου ονομάζεται *ογκομετρική παροχή* \dot{V} και δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{V} = \int_A \mathbf{V}_n dA = \mathbf{V}_{av} A \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Η παροχή μάζας και η ογκομετρική παροχή συνδέονται με τη σχέση:

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

Οι θερμοδυναμικές διεργασίες, που περιλαμβάνουν όγκους ελέγχου, διακρίνονται σε διεργασίες σταθεροποιημένης (μόνιμης) ροής και σε διεργασίες μεταβατικής ροής. Στη διάρκεια μιας *διεργασίας μόνιμης ροής*, το ρευστό ρέει μέσα από τον όγκο ελέγχου συνεχώς χωρίς να υφίσταται καμιά μεταβολή με το χρόνο σε οποιοδήποτε σημείο. Η μάζα και η ενέργεια που περιέχονται στον όγκο ελέγχου παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Θεωρώντας ότι η μεταφορά θερμότητας που πραγματοποιείται προς το σύστημα και το έργο που παράγεται από το σύστημα έχουν θετικές τιμές, οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της ενέργειας στις διεργασίες μόνιμης ροής έχουν τη μορφή:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (\text{kg/s})$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \underbrace{\sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{\mathbf{V}_e^2}{2} + gz_e \right)}_{\text{για κάθε έξοδο}} - \underbrace{\sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{\mathbf{V}_i^2}{2} + gz_i \right)}_{\text{για κάθε είσοδο}} \quad (\text{kW})$$

όπου οι δείκτες i και e δηλώνουν *είσοδο* και *έξοδο* αντίστοιχα. Οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν τις γενικές μορφές των εξισώσεων των διεργασιών σταθεροποιημένης ροής. Για συστήματα μιας εισόδου και μιας εξόδου, όπως τα ακροφύσια, οι διαχυτήρες, οι στρόβιλοι, οι συμπιεστές και οι αντλίες, οι εξισώσεις αυτές απλοποιούνται ως εξής:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{kg/s})$$

$$\text{ή} \quad \frac{1}{v_1} \mathbf{V}_1 A_1 = \frac{1}{v_2} \mathbf{V}_2 A_2$$

$$\text{και} \quad \dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{\mathbf{V}_2^2 - \mathbf{V}_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] \quad (\text{kW})$$

Στις παραπάνω σχέσεις, οι δείκτες 1 και 2 υποδηλώνουν αντίστοιχα τις καταστάσεις

στην είσοδο και στην έξοδο.

Σε μια διεργασία ομοιόμορφης ροής, η κατάσταση του όγκου ελέγχου μπορεί να μεταβάλλεται με το χρόνο, αλλά αυτό συμβαίνει ομοιόμορφα. Επίσης, οι ιδιότητες του ρευστού, στις εισόδους και στις εξόδους του όγκου ελέγχου, θεωρείται ότι παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας στις διεργασίες ομοιόμορφης ροής έχει τη μορφή:

$$Q - W = \sum m_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum m_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) + (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{CV}$$

Όταν οι μεταβολές της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας στον όγκο ελέγχου, αλλά και στα ρεύματα εισόδου και εξόδου είναι αμελητέες, η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται στη μορφή:

$$Q - W = \sum m_e h_e - \sum m_i h_i + (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{CV} \quad (\text{kJ})$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1 A. Bejan, *Advanced Engineering Thermodynamics*, Wiley, New York, 1988.
- 2 W. Z. Black and J. G. Hartley, *Thermodynamics*, Harper & Row, New York, 1985.
- 3 J. R. Howell and R. O. Buckius, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill, New York, 1987.
- 4 J. B. Jones and G. A. Hawkins, *Engineering Thermodynamics*, 2d ed., Wiley, New York, 1986.
- 5 W. C. Reynolds and H. C. Perkins, *Engineering Thermodynamics*, 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1977.
- 6 G. J. Van Wylen and R. E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, 3d ed., Wiley, New York, 1985.
- 7 K. Wark, *Thermodynamics*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, 1988.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Γενική Ανάλυση του Όγκου Ελέγχου

- 4-1Γ Να ορισθεί η παροχή μάζας και η ογκομετρική παροχή. Σε τι διαφέρουν μεταξύ τους;
- 4-2Γ Ποιοι είναι οι μηχανισμοί μεταφοράς ενέργειας προς ή από τον όγκο ελέγχου;
- 4-3Γ Τι είναι η ενέργεια ροής; Τα ρευστά σε ηρεμία διαθέτουν ενέργεια ροής;
- 4-4Γ Ποια είναι η διαφορά ανάμεσα στην ολική ενέργεια των ρευστών που ρέουν και των ρευστών σε κατάσταση ηρεμίας; Ποιες είναι οι μορφές ενέργειας που υπάρχουν στην κάθε περίπτωση.