Μετρήσεις βασικών μεγεθών
Μέτρηση θερμοκρασίας, πίεσης, ροής

Dr.-Ing. Νικόλαος Θ. Αλεξανδράκης

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστηριακή Άσκηση ΕΙ.1

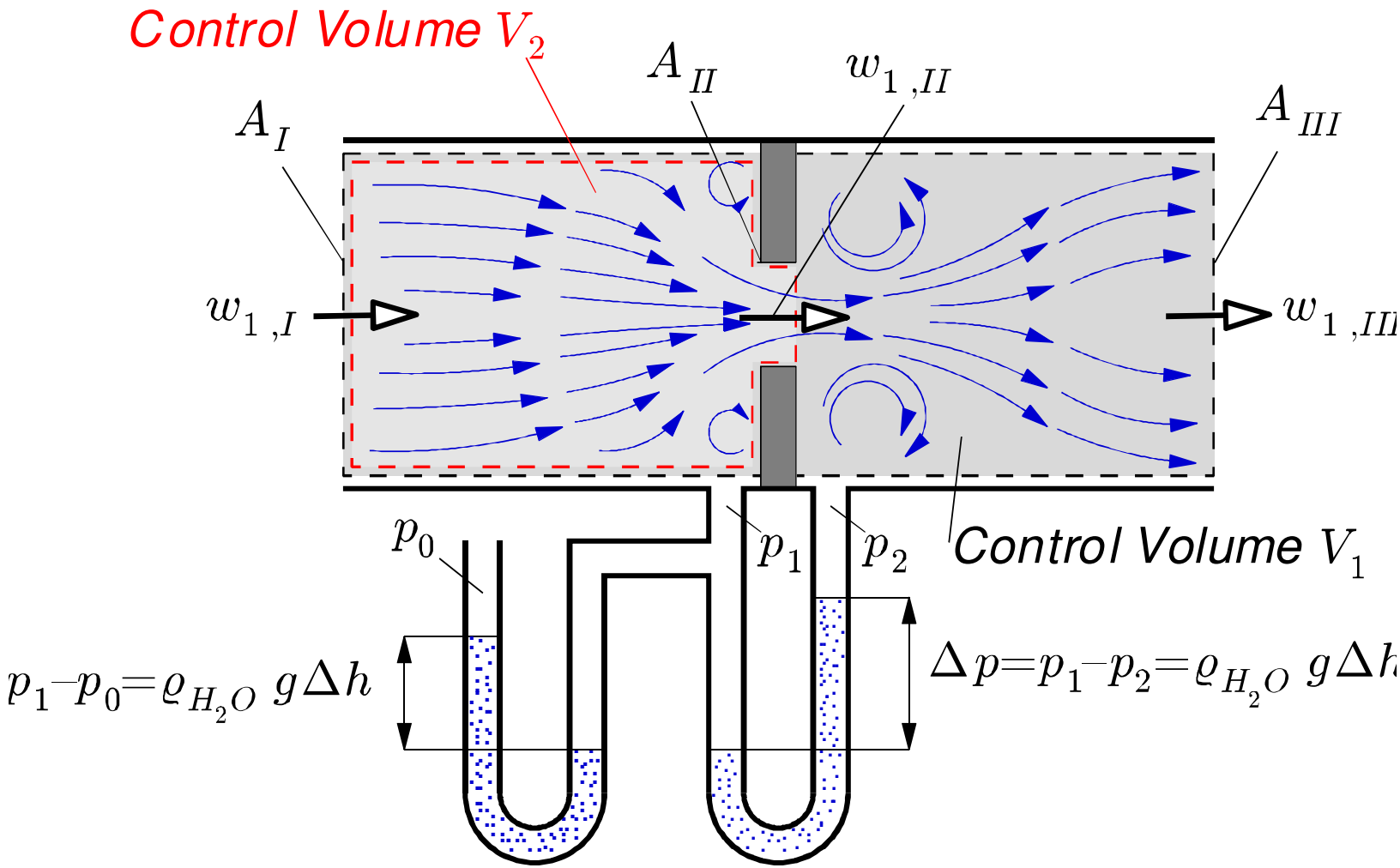
31 Μαΐου 2013

Μέρος Ι: Φυσικά Μεγέθη - Πίεση, Θερμοκρασία

Μέρος II: Μετρήσεις Θερμοκρασίας, Πίεσης

Ενότητα

Φυσικό Σύστημα



Ισοζύγιο Ενεργειών

- Εσωτερική U και Κινητική K Ενέργεια:

$$U + K = \frac{1}{V}\int_V \left(U + \frac{1}{2}mw^2\right)dV = \int_V \varrho\left(u + \frac{1}{2}w^2\right)dV$$

  - Εσωτερική Ενέργεια U ανηγμένη στην Μάζα:$u = \frac{U}{m}$ (μονάδα $\frac{m^2}{s^2}$)

- Μηχανική W και Θερμική Q Ισχύς:

$$\frac{d}{dt}(U + K) = \frac{d}{dt}\int_V \varrho\left(u + \frac{1}{2}w^2\right)dV = \frac{d}{dt}(W + Q)$$

Ισοζύγιο Ενεργειών

- Εσωτερική U και Κινητική K Ενέργεια:

$$U + K = \frac{1}{V}\int_V \left(U + \frac{1}{2}mw^2\right)dV = \int_V \varrho\left(u + \frac{1}{2}w^2\right)dV$$

  - Εσωτερική Ενέργεια U ανηγμένη στην Μάζα:$u = \frac{U}{m}$ (μονάδα $\frac{m^2}{s^2}$)

- Μηχανική W και Θερμική Q Ισχύς:

$$\frac{d}{dt}(U + K) = \frac{d}{dt}\int_V \varrho\left(u + \frac{1}{2}w^2\right)dV = \frac{d}{dt}(W + Q)$$

Ενότητα

Μηχανική Ισχύς $\frac{dW}{dt}$

- Μεταβολή Ορμής dP_i στοιχειώδους Όγκου dV:

$$\begin{aligned} \frac{dP_i}{dV} &= \frac{d(m\,w_i)}{dV} = \frac{dm}{dV}w_i + m\frac{dw_i}{dV} = \frac{dm}{dV}w_i = \varrho w_i \\ \Rightarrow dP_i &= \varrho\, w_i\, dV \end{aligned}$$

- Αντίδραση Αδρανείας (Δύναμη) $\frac{dP_i}{dt}$ στοιχειώδους Όγκου dV:

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{d}{dt}\int_V \varrho w_i\, dV$$

Μηχανική Ισχύς $\frac{dW}{dt}$

- Μεταβολή Ορμής dP_i στοιχειώδους Όγκου dV:

$$\begin{aligned} \frac{dP_i}{dV} &= \frac{d(m\,w_i)}{dV} = \frac{dm}{dV}w_i + m\frac{dw_i}{dV} = \frac{dm}{dV}w_i = \varrho w_i \\ \Rightarrow dP_i &= \varrho\, w_i\, dV \end{aligned}$$

- Αντίδραση Αδρανείας (Δύναμη) $\frac{dP_i}{dt}$ στοιχειώδους Όγκου dV:

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{d}{dt}\int_V \varrho w_i\, dV$$

Μηχανική Ισχύς $\frac{dW}{dt}$

- Δυνάμεις Επιφανείας Όγκου ∂V

$$\sum F_{Area\ dA} = \int_{\partial V} t_j\, dA = \int_{\partial V} t_{ji}\, n_i\, dA$$

- Ισχύς = Δύναμη X Ταχύτητα: $\frac{dP_i}{dt} \cdot w_j$

$$\underbrace{\left\{ \frac{d}{dt} \int_V \varrho w_i\, dV \right\}}_{\text{Δύναμη}} w_j = \int_{\partial V} t_{ji}\, n_i\, w_j\, dA = \frac{dW}{dt}$$

Θερμική Ισχύς $\frac{dQ}{dt}$

- Θερμική Ισχύς Επιφάνειας Όγκου ∂V

$$\frac{dQ}{dt} = -\int_{\partial V} q_i \, n_i \, dA$$

Το Σύστημα

- εκλύει θερμότητα: $\frac{dQ}{dt} < 0$
- είναι αδιαβατικό: $\frac{dQ}{dt} = 0$
- απορροφά θερμότητα: $\frac{dQ}{dt} > 0$

Θερμική Ισχύς $\frac{dQ}{dt}$

- Θερμική Ισχύς Επιφάνειας Όγκου ∂V

$$\frac{dQ}{dt} = -\int_{\partial V} q_i \, n_i \, dA$$

Το Σύστημα

- εκλύει θερμότητα: $\frac{dQ}{dt} < 0$
- είναι αδιαβατικό: $\frac{dQ}{dt} = 0$
- απορροφά θερμότητα: $\frac{dQ}{dt} > 0$

Ισοζύγιο Ενεργειών

$$\rightarrow \quad \frac{d}{dt}\int_V \varrho \underbrace{\left(u + \frac{1}{2}w_i^2\right)}_{\mathcal{U}} dV + \int_{\partial V} \left(-t_{ji}\, w_j + q_i\right) n_i\, dA \;= 0$$

Υλική παράγωγος πεδίου $\varrho\,\mathcal{U}(x_i,t) = \varrho\,\mathcal{U}_i$:

$$\frac{d(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{dt} = \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial x_i}\, w_i$$

$$\int_V \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial t} dV + \int_{\partial V} \{\; \underbrace{\varrho\,\mathcal{U}_i\, w_i}_{\text{μεταφερόμενη}} \; - \; \underbrace{t_{ji}\, w_j + q_i}_{\text{μη μεταφερόμενη}} \;\} n_i\, dA = 0$$

1. Αδιαβατικός Χώρος V_2: $\mathbf{q}_i = 0$.
2. Επιδρά ομογενές Πεδίο Πίεσης $\mathbf{p}$: $t_{ji} = -\mathbf{p}\,\delta_{ji}$.
3. Σύστημα χρονικά αμετάβλητο: $\int_V \frac{\partial}{\partial t}\,(\varrho\,\mathcal{U}_i)\; dV = 0$.

Ισοζύγιο Ενεργειών

$$\rightarrow \quad \frac{d}{dt}\int_V \varrho \underbrace{\left(u + \frac{1}{2}w_i^2\right)}_{\mathcal{U}} dV + \int_{\partial V} \left(-t_{ji}\, w_j + q_i\right) n_i\, dA \;= 0$$

Υλική παράγωγος πεδίου $\varrho\,\mathcal{U}(x_i,t) = \varrho\,\mathcal{U}_i$:

$$\frac{d(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{dt} = \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial x_i}\, w_i$$

$$\int_V \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial t} dV + \int_{\partial V} \{\; \underbrace{\varrho\,\mathcal{U}_i\, w_i}_{\text{μεταφερόμενη}} \; - \; \underbrace{t_{ji}\, w_j + q_i}_{\text{μη μεταφερόμενη}} \;\} n_i\, dA = 0$$

1. Αδιαβατικός Χώρος V_2: $\mathbf{q}_i = 0$.
2. Επιδρά ομογενές Πεδίο Πίεσης $\mathbf{p}$: $t_{ji} = -\mathbf{p}\,\delta_{ji}$.
3. Σύστημα χρονικά αμετάβλητο: $\int_V \frac{\partial}{\partial t}\,(\varrho\,\mathcal{U}_i)\; dV = 0$.

Ισοζύγιο Ενεργειών

$$\rightarrow \quad \frac{d}{dt}\int_V \varrho \underbrace{\left(u+\frac{1}{2}w_i^2\right)}_{\mathcal{U}} dV + \int_{\partial V} \left(-t_{ji}\, w_j + q_i\right) n_i\, dA \;= 0$$

Υλική παράγωγος πεδίου $\varrho\,\mathcal{U}(x_i,t) = \varrho\,\mathcal{U}_i$:

$$\frac{d(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{dt} = \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial x_i}\, w_i$$

$$\int_V \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial t} dV + \int_{\partial V} \{\; \underbrace{\varrho\,\mathcal{U}_i\, w_i}_{\text{μεταφερόμενη}} \; - \; \underbrace{t_{ji}\, w_j + q_i}_{\text{μη μεταφερόμενη}} \;\} n_i\, dA = 0$$

1. Αδιαβατικός Χώρος V_2: $\mathbf{q}_i = 0$.
2. Επιδρά ομογενές Πεδίο Πίεσης $\mathbf{p}$: $t_{ji} = -\mathbf{p}\,\delta_{ji}$.
3. Σύστημα χρονικά αμετάβλητο: $\int_V \frac{\partial}{\partial t}\,(\varrho\,\mathcal{U}_i)\; dV = 0$.

Ισοζύγιο Ενεργειών

$$\rightarrow \quad \frac{d}{dt}\int_V \varrho \underbrace{\left(u + \frac{1}{2}w_i^2\right)}_{\mathcal{U}} dV + \int_{\partial V} \left(-t_{ji}\, w_j + q_i\right) n_i\, dA \;= 0$$

Υλική παράγωγος πεδίου $\varrho\,\mathcal{U}(x_i,t) = \varrho\,\mathcal{U}_i$:

$$\frac{d(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{dt} = \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial x_i}\, w_i$$

$$\int_V \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial t} dV + \int_{\partial V} \{\; \underbrace{\varrho\,\mathcal{U}_i\, w_i}_{\text{μεταφερόμενη}} \; - \; \underbrace{t_{ji}\, w_j + q_i}_{\text{μη μεταφερόμενη}} \;\} n_i\, dA = 0$$

1. Αδιαβατικός Χώρος V_2: $\mathbf{q}_i = 0$.
2. Επιδρά ομογενές Πεδίο Πίεσης $\mathbf{p}$: $t_{ji} = -\mathbf{p}\,\delta_{ji}$.
3. Σύστημα χρονικά αμετάβλητο: $\int_V \frac{\partial}{\partial t}\left(\varrho\,\mathcal{U}_i\right) dV = 0$.

Ισοζύγιο Ενεργειών

$$\rightarrow \quad \frac{d}{dt}\int_V \varrho \underbrace{\left(u + \frac{1}{2}w_i^2\right)}_{\mathcal{U}} dV + \int_{\partial V} \left(-t_{ji}\, w_j + q_i\right) n_i\, dA \;= 0$$

Υλική παράγωγος πεδίου $\varrho\,\mathcal{U}(x_i,t) = \varrho\,\mathcal{U}_i$:

$$\frac{d(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{dt} = \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial x_i}\, w_i$$

$$\int_V \frac{\partial(\varrho\,\mathcal{U}_i)}{\partial t} dV + \int_{\partial V} \{\; \underbrace{\varrho\,\mathcal{U}_i\, w_i}_{\text{μεταφερόμενη}} \; - \; \underbrace{t_{ji}\, w_j + q_i}_{\text{μη μεταφερόμενη}} \;\} n_i\, dA = 0$$

1. Αδιαβατικός Χώρος V_2: $\mathbf{q}_i = 0$.
2. Επιδρά ομογενές Πεδίο Πίεσης $\mathbf{p}$: $t_{ji} = -\mathbf{p}\,\delta_{ji}$.
3. Σύστημα χρονικά αμετάβλητο: $\int_V \frac{\partial}{\partial t}\,(\varrho\,\mathcal{U}_i)\; dV = 0$.

Ενότητα

Ισοζύγιο Ενεργειών

$$\int_{\partial v} \left\{ \varrho \left(u + \frac{1}{2} w_i^2 \right) w_i + p\, \delta_{ji}\, w_j \right\} n_i \, dA \;=\; 0,$$

Μονοδιάστατη Ροή : $\quad i = j = 1 \quad , \quad w_i = w_j = w_1$

$$\Rightarrow \int_{\partial v} \left\{ \underbrace{u + \frac{1}{2} w_1^2 + \frac{p}{\varrho}}_{\mathbf{h_t}\text{: Απόλυτη Ενθαλπία}} \right\} w_1 \, n_1 \, dA \;=\; 0$$

$$u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2} w_1^2 \;=\; const.$$

$$\Rightarrow \left. u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2} w_1^2 \right|_{\text{Διατομή } I} = \left. u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2} w_1^2 \right|_{\text{Διατομή } II}$$

Ισοζύγιο Ενεργειών

$$\int_{\partial V} \left\{ \varrho \left(u + \frac{1}{2} w_i^2 \right) w_i + p\, \delta_{ji}\, w_j \right\} n_i \, dA \quad = \quad 0,$$

Μονοδιάστατη Ροή : $\quad i = j = 1 \quad , \quad w_i = w_j = w_1$

$$\Rightarrow \int_{\partial V} \left\{ \underbrace{u + \frac{1}{2} w_1^2 + \frac{p}{\varrho}}_{\mathbf{h_t}\text{: Απόλυτη Ενθαλπία}} \right\} w_1 \, n_1 \, dA \quad = \quad 0$$

$$u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2} w_1^2 \quad = \quad const.$$

$$\Rightarrow \left. u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2} w_1^2 \right|_{\text{Διατομή } I} \quad = \quad \left. u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2} w_1^2 \right|_{\text{Διατομή } II}$$

Ισοζύγιο Ενεργειών

$$\int_{\partial V} \left\{ \varrho \left(u + \frac{1}{2} w_i^2 \right) w_i + p\, \delta_{ji}\, w_j \right\} n_i \, dA \quad = \quad 0,$$

Μονοδιάστατη Ροή : $\quad i = j = 1 \quad , \quad w_i = w_j = w_1$

$$\Rightarrow \int_{\partial V} \left\{ \underbrace{u + \frac{1}{2} w_1^2 + \frac{p}{\varrho}}_{\mathbf{h_t}\text{: Απόλυτη Ενθαλπία}} \right\} w_1 \, n_1 \, dA \quad = \quad 0$$

$$u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2} w_1^2 \quad = \quad const.$$

$$\Rightarrow u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2} w_1^2 \Big|_{\text{Διατομή } I} \quad = \quad u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2} w_1^2 \Big|_{\text{Διατομή } II}$$

Ισοζύγιο Ενεργειών

Ενθαλπία Διατομής

$$\mathbf{h_t}_{\text{ Διατομή I}} = \mathbf{h_t}_{\text{ Διατομή II}}$$

$$\left(u+\frac{p}{\varrho}\right)\Big|_I \Uparrow + \frac{w_1^2}{2}\Big|_I \Downarrow \rightarrow \left(u+\frac{p}{\varrho}\right)\Big|_{II} \Downarrow + \frac{w_1^2}{2}\Big|_{II} \Uparrow$$

- Αμετάβλητη «ενθαλπία ανακοπής» $h_t = h + \frac{w^2}{2}$
- Ειδική Ενθαλπία: $h = u + \frac{p}{\varrho}$ $\rightarrow$ Ειδική Κινητική Ενέργεια: $k = \frac{1}{2}w_1^2$

Ο αδιαβατικός στραγγαλισμός είναι ισενθαλπική διαδικασία για $\frac{\mathbf{w^2}}{\mathbf{2}} \ll \mathbf{h}$.

Ισοζύγιο Ενεργειών

Ενθαλπία Διατομής

$$\mathbf{h_t}_{\text{ Διατομή I}} = \mathbf{h_t}_{\text{ Διατομή II}}$$

$$\left(u+\frac{p}{\varrho}\right)\Big|_I \Uparrow + \frac{w_1^2}{2}\Big|_I \Downarrow \rightarrow \left(u+\frac{p}{\varrho}\right)\Big|_{II} \Downarrow + \frac{w_1^2}{2}\Big|_{II} \Uparrow$$

- Αμετάβλητη «ενθαλπία ανακοπής» $h_t = h + \frac{w^2}{2}$
- Ειδική Ενθαλπία: $h = u + \frac{p}{\varrho}$ $\rightarrow$ Ειδική Κινητική Ενέργεια: $k = \frac{1}{2}w_1^2$

Ο αδιαβατικός στραγγαλισμός είναι ισενθαλπική διαδικασία για $\frac{\mathbf{w^2}}{\mathbf{2}} \ll \mathbf{h}$.

Ισοζύγιο Ενεργειών

Ενθαλπία Διατομής

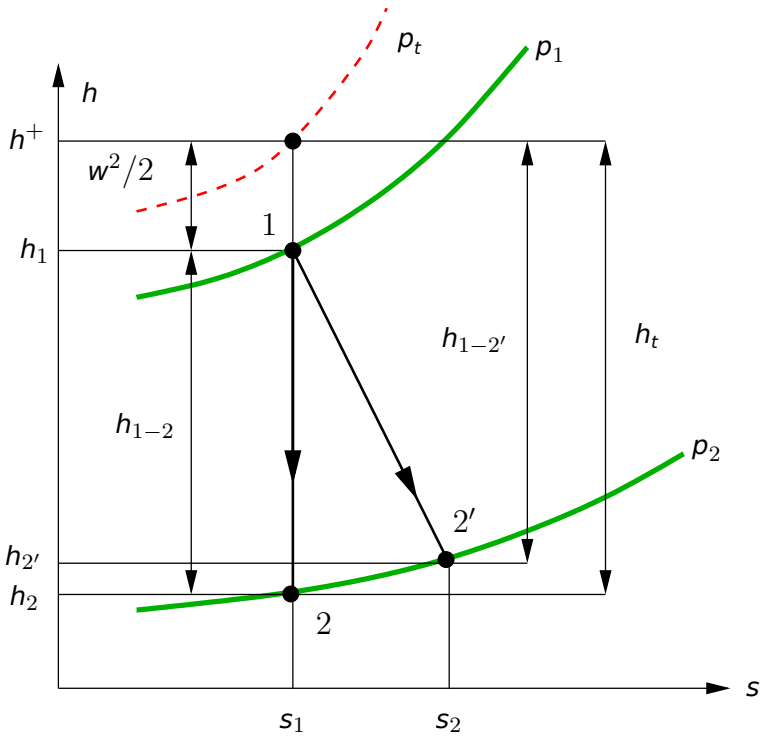
$$\mathbf{h_t}_{\text{ Διατομή I}} = \mathbf{h_t}_{\text{ Διατομή II}}$$

$$\left(u+\frac{p}{\varrho}\right)\Big|_I \Uparrow + \frac{w_1^2}{2}\Big|_I \Downarrow \rightarrow \left(u+\frac{p}{\varrho}\right)\Big|_{II} \Downarrow + \frac{w_1^2}{2}\Big|_{II} \Uparrow$$

- Αμετάβλητη «ενθαλπία ανακοπής» $h_t = h + \frac{w^2}{2}$
- Ειδική Ενθαλπία: $h = u + \frac{p}{\varrho}$ $\rightarrow$ Ειδική Κινητική Ενέργεια: $k = \frac{1}{2}w_1^2$

Ο αδιαβατικός στραγγαλισμός είναι ισενθαλπική διαδικασία για $\frac{\mathbf{w^2}}{\mathbf{2}} \ll \mathbf{h}$.

Καταστατική Μεταβολή Ανακοπής



Σχήμα: Καταστατική μεταβολή αδιαβατικής $1-2$ και μή αδιαβατικής $1-2'$ ροής σε στατικές συνθήκες μεταξύ δύο πιέσεων $p_2 < p_1$

Ενότητα

Καταστατική Μεταβολή Ανακοπής

- Θερμοδυναμικά μεγέθη ανακοπής
  Ενθαλπία, Πίεση, Θερμοκρασία:

$$h_t = u + p_t v = u + \left(pv + \frac{w^2}{2} \right) = h + \frac{w^2}{2}$$

$$u = \frac{1}{\kappa - 1} RT, \qquad pv = RT, \quad c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\kappa - 1} RT_t + RT_t = \frac{1}{\kappa - 1} RT + RT + \frac{w^2}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT_t = \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT + \frac{w^2}{2}, \; T_t = T + \frac{w^2}{2\, c_p}$$

Καταστατική Μεταβολή Ανακοπής

- Θερμοδυναμικά μεγέθη ανακοπής
  Ενθαλπία, Πίεση, Θερμοκρασία:

$$h_t = u + p_t v = u + \left(pv + \frac{w^2}{2} \right) = h + \frac{w^2}{2}$$

$$u = \frac{1}{\kappa - 1} RT, \qquad pv = RT, \quad c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\kappa - 1} RT_t + RT_t = \frac{1}{\kappa - 1} RT + RT + \frac{w^2}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT_t = \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT + \frac{w^2}{2}, \; T_t = T + \frac{w^2}{2\, c_p}$$

Καταστατική Μεταβολή Ανακοπής

- Θερμοδυναμικά μεγέθη ανακοπής
  Ενθαλπία, Πίεση, Θερμοκρασία:

$$h_t = u + p_t v = u + \left(pv + \frac{w^2}{2} \right) = h + \frac{w^2}{2}$$

$$u = \frac{1}{\kappa - 1} RT, \qquad pv = RT, \quad c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\kappa - 1} RT_t + RT_t = \frac{1}{\kappa - 1} RT + RT + \frac{w^2}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT_t = \frac{\kappa}{\kappa - 1} RT + \frac{w^2}{2}, \; T_t = T + \frac{w^2}{2\, c_p}$$

Καταστατική Μεταβολή Ανακοπής

- Αδιαβατική θερμοκρασία ανακοπής: $T_t = T + \frac{w^2}{2\,c_p}$
- Αδιαβατική πίεση ανακοπής: $\frac{p_t}{p} = \left(\frac{T_t}{T}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$
- Διορθωμένη ροή μάζας ανά μονάδα επιφανείας:

Ταχύτητα του ήχου : $c = \sqrt{\kappa\, R\, T}$

Σταθερά του αερίου : $R = c_p - c_v$

Συνάρτηση $\mathcal{D}(M)$: $M = \frac{w}{c}$ (M: αριθμός Mach)

$$\dot{m} \cdot \sqrt{\frac{R\,\mathbf{T_t}}{\kappa}} \cdot \frac{1}{\mathbf{A\,p_t}} = M \cdot \left[1 + (\kappa - 1)\,\frac{M^2}{2}\right]^{-\frac{1}{2}\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} = \mathcal{D}(M)$$

Καταστατική Μεταβολή Ανακοπής

- Αδιαβατική θερμοκρασία ανακοπής: $T_t = T + \frac{w^2}{2\,c_p}$
- Αδιαβατική πίεση ανακοπής: $\frac{p_t}{p} = \left(\frac{T_t}{T}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$
- Διορθωμένη ροή μάζας ανά μονάδα επιφανείας:

Ταχύτητα του ήχου : $c = \sqrt{\kappa\, R\, T}$

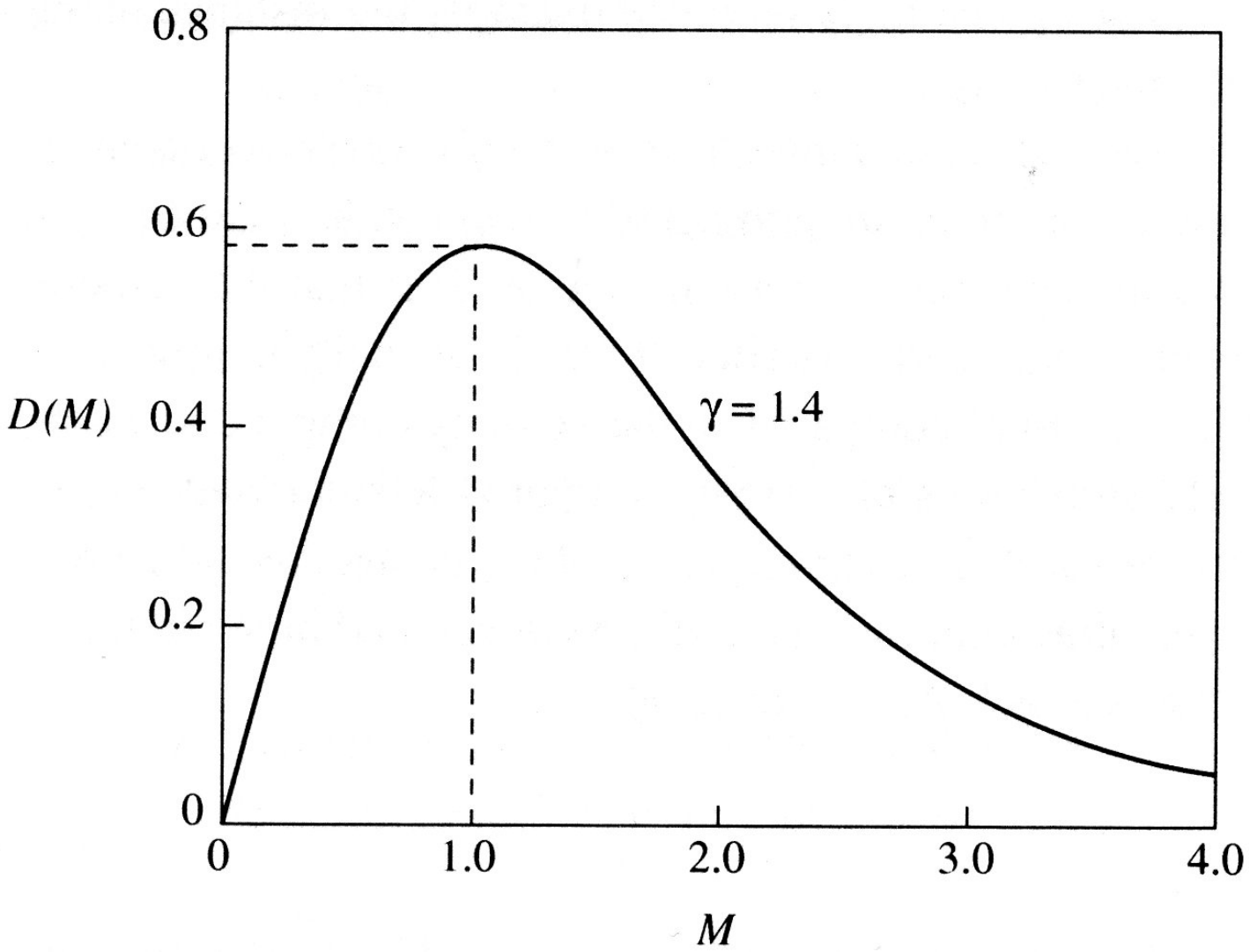
Σταθερά του αερίου : $R = c_p - c_v$

Συνάρτηση $\mathcal{D}(M)$: $M = \frac{w}{c}$ (M: αριθμός Mach)

$$\dot{m} \cdot \sqrt{\frac{R\,\mathbf{T_t}}{\kappa}} \cdot \frac{1}{\mathbf{A\,p_t}} = M \cdot \left[1 + (\kappa - 1)\,\frac{M^2}{2}\right]^{-\frac{1}{2}\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} = \mathcal{D}(M)$$

Ενότητα

Καταστατική Μεταβολή Ανακοπής



Ενότητα

Μέτρηση Ροής

Για ταχύτητες: $\mathbf{0} < \mathbf{w_1} \lessapprox \frac{\mathbf{c}}{\mathbf{3}}$ ισχύει: $w_1^2 \ll h$

$$
\begin{aligned}
h_{t,I} = u_{up} + \frac{p_{up}}{\varrho} + \frac{1}{2} w_{1,I}^2 &= u_{down} + \frac{p_{down}}{\varrho} + \frac{1}{2} w_{1,II}^2 = h_{t,II} \\
u_{up} \approx u_{down} \quad , \quad & w_{1,I}^2 \ll w_{1,II}^2 \\
\dot{m}_{II} &= \varrho_{II}\, \dot{V}_{II} = \varrho_{II}\, w_{1\,,II}\, A_{II} \\
\Delta p &= p_{up} - p_{down} \\
\Rightarrow \mathbb{C} \cdot w_{1\,,II} &= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_{II}}{A_I}\right)^2}} \sqrt{\frac{2}{\varrho}\, \Delta p}
\end{aligned}
$$

Ενότητα

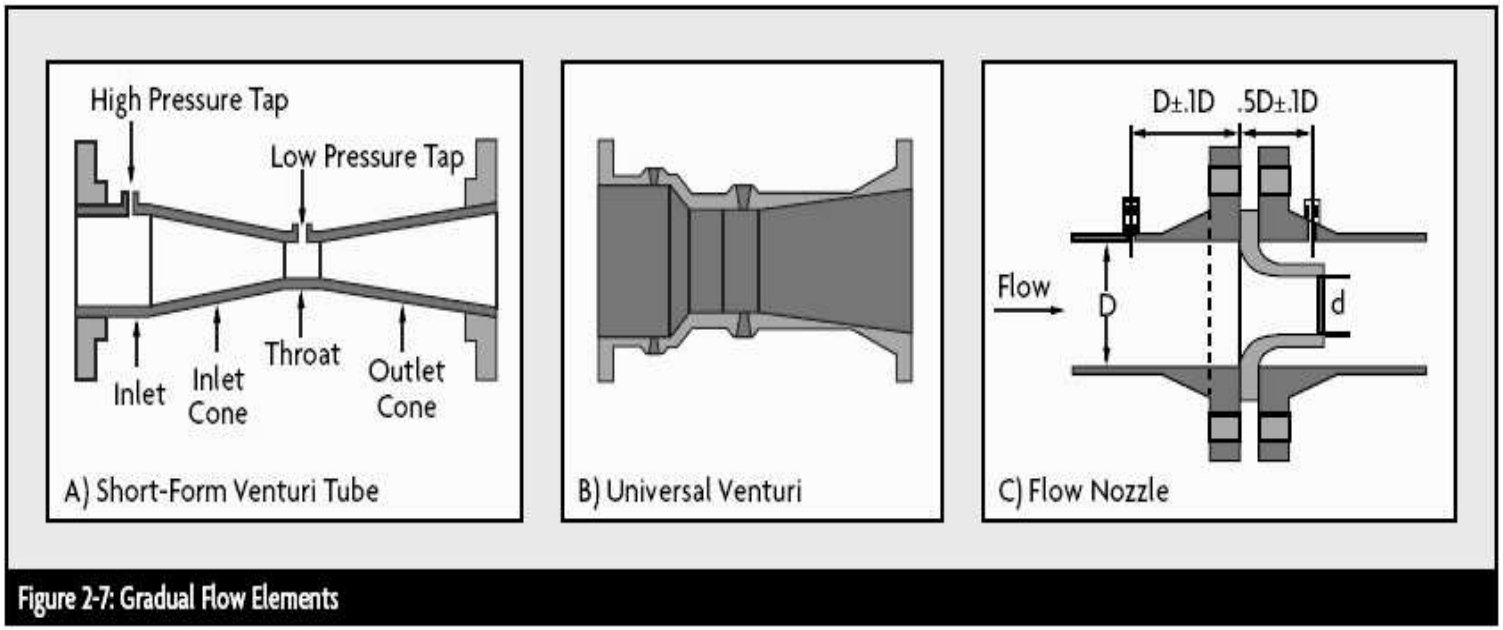


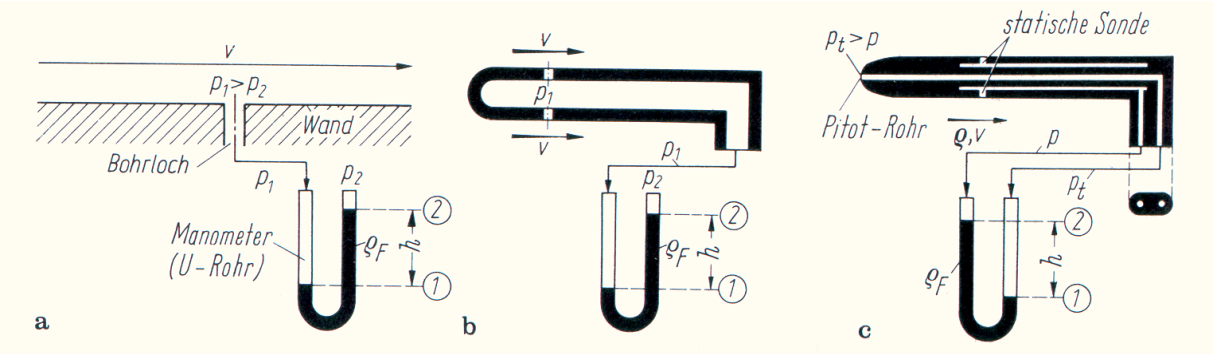
Figure 2-7: Gradual Flow Elements

Σχήμα: A,B. Ροόμετρα Στένωσης Τύπου Venturi, C. Ακροφύσιο ISO 5167

Σχήμα: Κρίσιμο ακροφύσιο Venturi 8in

Σχήμα: Βαθμονομημένο ακροφύσιο Venturi

Μέτρηση Ταχύτητας: Σωλήνες Pitot και Prandtl

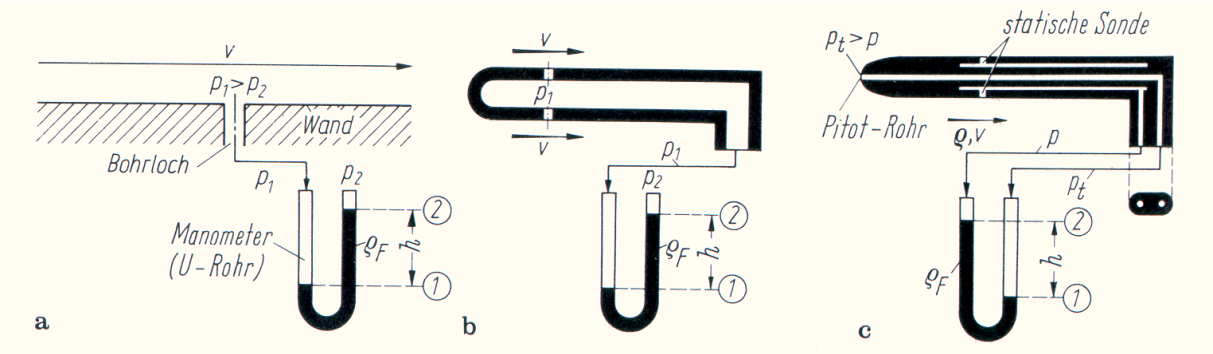


$$h_t = u + \frac{p_t}{\varrho} = h + \frac{1}{2}w_1^2 = u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2}w_1^2 = const.$$

$$\dot{q}\, dt = du - p\, dV = 0, \quad u = const. = dV$$

$$\frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2}w_1^2 = \frac{p_t}{\varrho} \Rightarrow w_1 = \sqrt{\frac{2}{\varrho}(p_t - p)}$$

Μέτρηση Ταχύτητας: Σωλήνες Pitot και Prandtl



$$h_t = u + \frac{p_t}{\varrho} = h + \frac{1}{2}w_1^2 = u + \frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2}w_1^2 = const.$$

$$\dot{q}\, dt = du - p\, dV = 0, \quad u = const. = dV$$

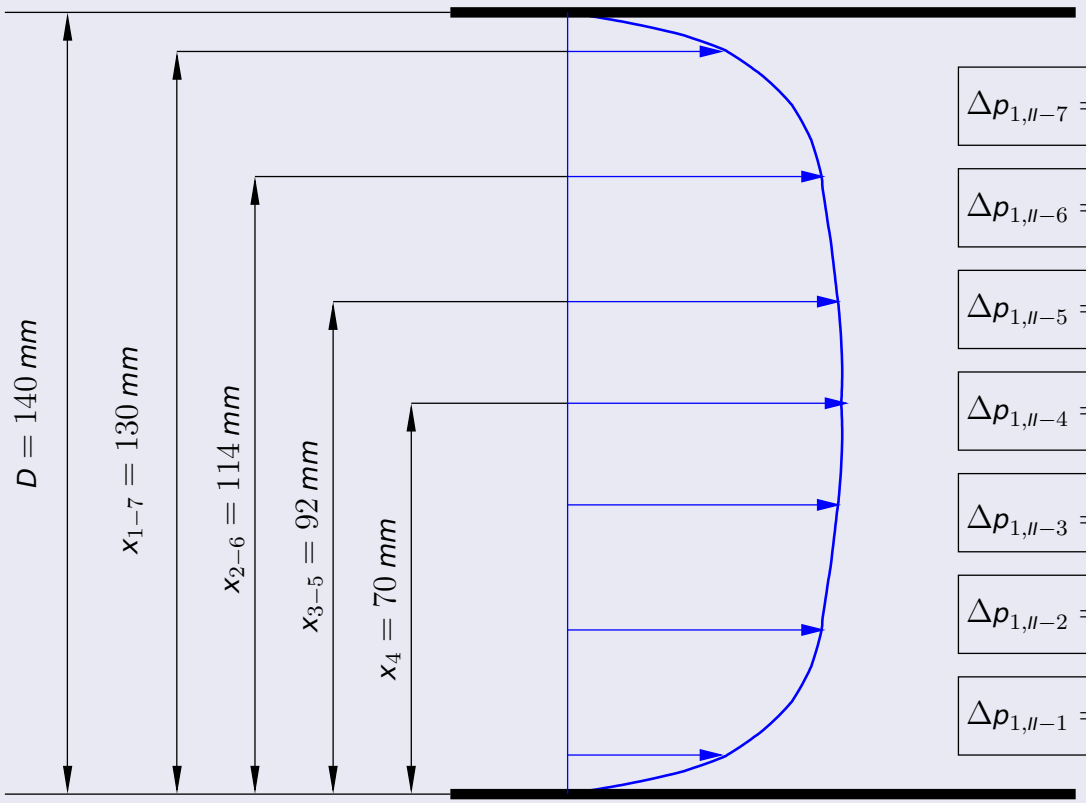
$$\frac{p}{\varrho} + \frac{1}{2}w_1^2 = \frac{p_t}{\varrho} \Rightarrow w_1 = \sqrt{\frac{2}{\varrho}\,(p_t - p)}$$

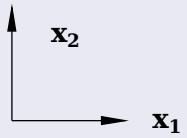
Μέρος ΙΙ: Μέτρηση Κατατομής Ταχυτήτων

Ενότητα

Μέτρηση κατανομής ταχυτήτων στο διάφραγμα

$T_0 =$ K	$p_0 =$ hPa
$p_{up} =$ kPa	$\Delta p =$ kPa





$\Delta p_{1,II-7} =$ kPa	$w_{1,II-7} =$ m/s
$\Delta p_{1,II-6} =$ kPa	$w_{1,II-6} =$ m/s
$\Delta p_{1,II-5} =$ kPa	$w_{1,II-5} =$ m/s
$\Delta p_{1,II-4} =$ kPa	$w_{1,II-4} =$ m/s
$\Delta p_{1,II-3} =$ kPa	$w_{1,II-3} =$ m/s
$\Delta p_{1,II-2} =$ kPa	$w_{1,II-2} =$ m/s
$\Delta p_{1,II-1} =$ kPa	$w_{1,II-1} =$ m/s

Σχήμα: Πίνακας δεδομένων

Ενότητα

Κώδικας Matlab - Εισαγωγή Δεδομένων

```
% Measurement data across the
% two rectangular planes x1-x2 and x1-x3
%
Pm4=[ -70 0 ]       ; Qm4=[ -70 0 ];
Pm3=[ -67 1.0 ]     ; Qm3=[ -67 1.0 ];
Pm2=[ -45 1.0 ]     ; Qm2=[ -45 1.0 ];
Pm1=[ -23 1.0 ]     ; Qm1=[ -23 1.0 ];
P0 =[   0 1.0 ]     ; Q0 =[   0 1.0 ];
P1 =[  23 1.0 ]     ; Q1 =[  23 1.0 ];
P2 =[  45 1.0 ]     ; Q2 =[  45 1.0 ];
P3 =[  67 1.0 ]     ; Q3 =[  67 1.0 ];
P4 =[  70 0 ]       ; Q4 =[  70 0 ];
%
% declaration of arrays
section1x1=zeros(9,1);      section1y1=zeros(11,1);
section2x1=zeros(9,1);      section2y1=zeros(11,1);
section3x1=zeros(9,1);      section3y1=zeros(11,1);
section4x1=zeros(9,1);      section4y1=zeros(11,1);
prodS11=zeros(5,1);         prodS12=zeros(5,1);
sectionYS1=zeros(81,1);     var1=zeros(81,1);
sectionYS2=zeros(41,1);     var2=zeros(41,1);
```

Καμπύλη Ελαχίστων Τετραγώνων

```
% Cylinder 1 least squares fit
lsqx1=[0;pi/2;pi;3*pi/2;2*pi];
lsqy1=[P1(1,2);Q1(1,2);Pm1(1,2);Pm1(1,2);Qm1(1,2)];
foptmethod1=fitoptions(...
        'Method','LinearLeastSquares',...
        'Robust','on',...
        'Normalize','on');
[cfun1,gof1]=fit(lsqx1,lsqy1,'poly3');
```

Ορισμός Κατατομής

```
% 4 Sections
% 1st section at  plane x1-x2
%
x1=Pm4(1,1);x2=Pm3(1,1);x3=Pm2(1,1);
x4=Pm1(1,1);x5=P0(1,1);x6=P1(1,1) ;
x7=P2(1,1) ;x8=P3(1,1) ;x9=P4(1,1) ;
y1=0              ;y2=feval(cfun3,pi);y3=feval(cfun2,pi);
y4=feval(cfun1,pi);y5=P0(1,2)        ;y6=feval(cfun1,0) ;
y7=feval(cfun2,0) ;y8=feval(cfun3,0) ;y9=0;
section1x1=[x1;x2;x3;x4;x5;x6;x7;x8;x9];
%
% declaration of boundary slopes
y0=1/1.50;     y10=-1/1.50;
section1y1=[y0;y1;y2;y3;y4;y5;y6;y7;y8;y9;y10];
sectionS1=spline(section1x1,section1y1);
%
% declaration of 2nd spline
incr=70/80;
section1Sx1T=-35:incr:35;
section1Sx1  =section1Sx1T';
section1Sy1  =ppval(sectionS1,    section1Sx1);
```

Περιστροφή Κατατομής - Κανόνας Guldin

```
% Volume of section 1 rotated by pi/4
% according to the 2nd Guldin's rule
% left quadrant
prodS11=section1Sx1.*section1Sy1;       % Product x1.y1(x)
funGuldin1=spline(section1Sx1,prodS11); % Integrand x1.y1(x)
hGuldinS1=@(x)ppval(funGuldin1,x);      % Function-Handle
YS11=-quad(hGuldinS1,-35, 0);           % Simpson Quadrature, V1=3869
% Right quadrant
YS12= quad(hGuldinS1,  0,35);
% Volume of rotated section 1 by pi/4
V1=(YS11+YS12)*pi;
% End of volume calculation of section 1
```

Κατανομή ταχυτήτων