ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ

ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΝΟΜΟΙ
ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

Θεώρημα της Μεταφοράς
(Reynolds Transport Theorem)
Μετατρέπει τη διατύπωση ενός θεμελιώδη νόμου ενός κλειστού συστήματος σ' αυτήν για έναν όγκο ελέγχου

Ο ρυθμός της εκτατικής ιδιότητας ενός συστήματος είναι ίσος με το ρυθμό αλλαγής της εκτατικής ιδιότητας στον όγκο ελέγχου (όγκο αναφοράς) συν τον καθαρό ρυθμό εκροής της εκτατικής ιδιότητας από τον όγκο ελέγχου (ρυθμός εκροής μείον ρυθμός εισροής)

Η μαθηματική του έκφραση είναι:

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{\text{Συστήματος}} = \frac{d}{dt}\left(\int_{OE} \beta\rho \, d\forall\right) + \int_{EOE} \beta\rho\left(\vec{V}_r \cdot \vec{n}\right) dA \quad \text{ή}$$

$$\left(\frac{dB}{dt}\right)_{\text{Συστήματος}} = \frac{d}{dt}\left(\int_{OE} \beta\rho \, d\forall\right) + \left(\beta\rho A V\right)_{out} - \left(\beta\rho A V\right)_{in}$$

όπου, Β η εκτατική ιδιότητα της μάζας, της ορμής και της ενέργειας ενός συστήματος m, $\vec{P} = m\vec{V}$ και E, αντίστοιχα.

$\beta = \dfrac{B}{m}$ η αντίστοιχη εντατική ιδιότητα του συστήματος, ήτοι $\beta = \dfrac{m}{m} = 1$, $\beta = \dfrac{\vec{P}}{m} = \vec{V}$

και $\beta = \dfrac{E}{m} = e = u + \dfrac{V^2}{2} + gz$

ΟΕ όγκος ελέγχου

ΕΟΕ επιφάνεια όγκου ελέγχου

$\vec{V}_r$ η σχετική ταχύτητα του ρευστού ως προς την επιφάνεια του όγκου ελέγχου

$\vec{n}$ το μοναδιαίο διάνυσμα το οποίο είναι κάθετο στην επιφάνεια του όγκου ελέγχου και με φορά προς τον εξωτερικό του ΟΕ χώρο

$d\forall$ στοιχειώδης όγκος

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΜΑΖΑΣ

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{\text{Συστήματος}} = 0 = \frac{d}{dt}\left(\int_{OE} \beta\rho \, d\forall\right) + \int_{EOE} \rho\left(\vec{V}_r \cdot \vec{n}\right) dA$$

ΑΠΛΟΥΣΤΕΡΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ

Όγκος ελέγχου

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{OE} = \sum_i \dot{m}_i - \sum_e \dot{m}_e$$

Όγκος ελέγχου – Σταθεροποιημένη κατάσταση

$$0 = \sum_i \dot{m}_i - \sum_e \dot{m}_e$$

Όγκος ελέγχου – USUF (Ομοιόμορφη κατάσταση & ομοιόμορφη ροή)

$$m_2 - m_1 = \sum_i m_i - \sum_e m_e$$

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΟΡΜΗΣ

$$\left(\frac{d\vec{P}}{dt}\right)_{\Sigma\upsilon\sigma\tau\acute{\eta}\mu\alpha\tau o\varsigma} = \Sigma\vec{F} = \frac{d}{dt}\left(\int_{OE} \rho \vec{V} d\forall\right) + \int_{EOE} \rho \vec{V}\left(\vec{V}_r \cdot \vec{n}\right) dA$$

Η εξίσωση αυτή είναι διανυσματική και ως εκ τούτου απαιτεί τον ορισμό προηγουμένως ενός συστήματος συντεταγμένων (σύστημα αναφοράς). Το σύστημα αναφοράς πρέπει να είναι αδρανειακό σύστημα (δηλαδή να παραμένει ακίνητο ή να κινείται με σταθερά ταχύτητα), προϋπόθεση για να ισχύει ο νόμος του Νεύτωνα.

Για σύστημα αναφοράς που επιταχύνεται ως προς κάποιο άλλο σύστημα αναφοράς η παραπάνω διατύπωση τροποποιείται ως εξής:

$$\Sigma\vec{F} - \int_{OE} \vec{a}_{rel} dm = \frac{d}{dt}\left(\int_{OE} \rho \vec{V} d\forall\right) + \int_{EOE} \rho \vec{V}\left(\vec{V}_r \cdot \vec{n}\right) dA$$

όπου

$$\vec{a}_{rel} = \frac{d\vec{R}}{dt} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{r} + 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \vec{\Omega} \times \left(\vec{\Omega} \times \vec{r}\right)$$

είναι η σχετική επιτάχυνση του συστήματος συντεταγμένων ως π ρος το αδρανειακό σύστημα.

ΑΠΛΟΥΣΤΕΡΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΟΡΜΗΣ

$$\Sigma\vec{F} = \left(\frac{d\vec{P}}{dt}\right)_{OE} = \Sigma(\dot{m}\vec{V})_e - \Sigma(\dot{m}\vec{V})_i$$

όπου ο δείκτες e και i υποδηλώνουν επιφάνειες από τις οποίες εξέρχεται και εισέρχεται ορμή, αντίστοιχα.

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΣΤΡΟΦΟΡΜΗΣ

$$\left(\frac{d}{dt}\int\left(\vec{r} \times \vec{V}\right) dm\right)_{\Sigma\upsilon\sigma\tau\acute{\eta}\mu\alpha\tau o\varsigma} = \Sigma\vec{M}_o = \frac{d}{dt}\left(\int_{OE}\left(\vec{r} \times \vec{V}\right)\rho d\forall\right) + \int_{EOE}\left(\vec{r} \times \vec{V}\right)\rho\left(\vec{V}_r \cdot \vec{n}\right) dA$$

Η εξίσωση αυτή είναι διανυσματική και ως εκ τούτου απαιτεί τον ορισμό προηγουμένως ενός συστήματος συντεταγμένων (σύστημα αναφοράς). Το σύστημα αναφοράς πρέπει να είναι αδρανειακό σύστημα (δηλαδή να παραμένει ακίνητο ή να κινείται με σταθερά ταχύτητα), προϋπόθεση για να ισχύε ι ο νόμος του Νεύτωνα.

Για σύστημα αναφοράς που επιταχύνεται ως προς κάποιο άλλο σύστημα αναφοράς η παραπάνω διατύπωση τροποποιείται ως εξής:

$$\Sigma\left(\vec{r} \times \vec{F}\right)_o - \int_{OE}\left(\vec{r} \times \vec{a}_{rel}\right) dm = \frac{d}{dt}\left(\int_{OE}\left(\vec{r} \times \vec{V}\right)\rho d\forall\right) + \int_{EOE}\left(\vec{r} \times \vec{V}\right)\rho\left(\vec{V}_r \cdot \vec{n}\right) dA$$

όπου

$$\vec{a}_{rel} = \frac{d\vec{R}}{dt} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{r} + 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \vec{\Omega} \times \left(\vec{\Omega} \times \vec{r}\right)$$

είναι η σχετική επιτάχυνση του συστήματος συντεταγμένων ως προς το αδρανειακό σύστημα.

ΑΠΛΟΥΣΤΕΡΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΣΤΡΟΦΟΡΜΗΣ

$$\Sigma\left(\vec{r}\times\vec{F}\right)_o=\left(\frac{dH}{dt}\right)_{OE}+\Sigma\left[\dot{m}(\vec{r}\times\vec{V})\right]_{oe}-\Sigma\left[\dot{m}(\vec{r}\times\vec{V})\right]_{oi}$$

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\Sigma\upsilon\sigma\tau\acute{\eta}\mu\alpha\tau o\varsigma}=\dot{Q}-\dot{W}=\frac{d}{dt}\left(\int_{OE}e\rho d\forall\right)+\int_{EOE}e\rho\left(\vec{V}_r\cdot\vec{n}\right)dA$$

$$\dot{Q}-\dot{W}_s-\dot{W}_{ss}=\frac{d}{dt}\left(\int_{OE}e\rho d\forall\right)+\int_{EOE}\left(e+\frac{p}{\rho}\right)\rho\left(\vec{V}_r\cdot\vec{n}\right)dA$$

$$=\frac{d}{dt}\left(\int_{OE}e\rho d\forall\right)+\int_{EOE}\left(h+\frac{V^2}{2}+gz\right)\rho\left(\vec{V}_r\cdot\vec{n}\right)dA$$

$\dot{W}_s$ αξονική ισχύς

$\dot{W}_{ss}$ ισχύς λόγω των διατμητικών τάσεων στην ΕΟΕ

ΑΠΛΟΥΣΤΕΡΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Κλειστό σύστημα

$$\frac{dE}{dt}=\dot{Q}-\dot{W}$$

Όγκος ελέγχου

$$\left(\frac{d\left(U+KE+PE\right)}{dt}\right)_{OE}=\dot{Q}_{OE}-\dot{W}_{OE}+\sum_i\dot{m}_i\left(h_i+\frac{V_i^2}{2}+gz_i\right)-\sum_e\dot{m}_e\left(h_e+\frac{V_e^2}{2}+gz_e\right)$$

Όγκος ελέγχου – Σταθεροποιημένη κατάσταση

$$0=\dot{Q}_{OE}-\dot{W}_{OE}+\sum_i\dot{m}_i\left(h_i+\frac{V_i^2}{2}+gz_i\right)-\sum_e\dot{m}_e\left(h_e+\frac{V_e^2}{2}+gz_e\right)$$

Όγκος ελέγχου – USUF

$$m_2\left(h_2+\frac{V_2^2}{2}+gz_2\right)-m_1\left(h_1+\frac{V_1^2}{2}+gz_1\right)=Q_{OE}-W_{OE}+\sum_i m_i\left(h_i+\frac{V_i^2}{2}+gz_i\right)-\sum_e m_e\left(h_e+\frac{V_e^2}{2}+gz_e\right)$$

ΟΡΙΑΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ

Κρίσιμος Αριθμός Reynolds : $\mathrm{Re} = \dfrac{\rho U x_{cr}}{\mu}$ ή $\mathrm{Re} = \dfrac{U x_{cr}}{\nu}$

(α) Ροή σε κλειστούς αγωγούς: $\mathrm{Re}_{cr} \approx 2500$

(β) Ελεύθερη ροή πάνω από επίπεδη επιφάνεια: $\mathrm{Re}_{cr} \approx 5 \cdot 10^5$

Ολοκληρωτική Εξίσωση ορμής von Karman για επίπεδη πλάκα

$\tau_0(x) = \rho U^2 \dfrac{d\theta}{dx}$ όπου $\theta = \int_0^\delta \dfrac{u}{U}\left(1 - \dfrac{u}{U}\right) dy$

Στρωτό Οριακό Στρώμα (Ο.Σ.)

Πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού : $\dfrac{u}{U} = \alpha\left(\dfrac{y}{\delta}\right)^3 + \beta\left(\dfrac{y}{\delta}\right)^3 + \gamma\left(\dfrac{y}{\delta}\right)^3 + \varepsilon$

Οριακές Συνθήκες : $u(x,0) = 0, \quad \partial^2 u / \partial y^2 (x,0) = 0$

$$u(x,\delta) = U, \quad \partial u / \partial y (x,\delta) = 0$$

$$\frac{u}{U} = -\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\delta}\right)^3 + 1.5\left(\frac{y}{\delta}\right)$$

Πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού : $\dfrac{u}{U} = \alpha_2\left(\dfrac{y}{\delta}\right)^2 + \alpha_1\left(\dfrac{y}{\delta}\right) + \alpha_0$

Οριακές Συνθήκες : $u(x,0) = 0$

$$u(x,\delta) = U, \quad \partial u / \partial y (x,\delta) = 0$$

$$\frac{u}{U} = -\left(\frac{y}{\delta}\right)^2 + 2\left(\frac{y}{\delta}\right)$$

Τυρβώδες Ο.Σ.

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7}$$

Διατμητική τάση στο τοίχωμα: $\tau_{0t}(x) = 0.0288 \rho U^2 (\mathrm{Re}_x)^{-0.2}$

Σχέσεις Υπολογισμού των Παραμέτρων Οριακού Στρώματος

	Στρωτό Οριακό Στρώμα			Τυρβώδες Ο.Σ.
	Blasius			
Κατανομή της ταχύτητας	$\frac{u}{U} = f\left(y\sqrt{\frac{U}{\nu x}}\right)$	$\frac{u}{U} = \frac{3}{2}\left(\frac{y}{\delta}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{\delta}\right)^3$	$\frac{u}{U} = 2\left(\frac{y}{\delta}\right) - \left(\frac{y}{\delta}\right)^2$	$\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7}$
Πάχος οριακού στρώματος	$\delta = \frac{5x}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$	$\delta = \frac{4{,}64x}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$	$\delta = \frac{5{,}48x}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$	$\delta = \frac{0{,}37x}{\mathrm{Re}_x^{1/5}}$
Πάχος μετατόπισης	$\delta^* = \frac{1.73x}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$	$\delta^* = \frac{3}{8}\delta$	$\delta^* = \frac{1{,}827x}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$	$\delta^* = \frac{1}{8}\delta$
Πάχος ορμής	$\theta = \frac{0{,}664x}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$	$\theta = \frac{39}{280}\delta$	$\theta = \frac{2}{15}\delta$	$\theta = \frac{7}{72}\delta$
Συντελεστής τριβής	$C_f = \frac{0{,}664}{\sqrt{\mathrm{Re}_X}}$	$C_f = \frac{0{,}646}{\sqrt{\mathrm{Re}_X}}$	$C_f = \frac{0{,}728}{\sqrt{\mathrm{Re}_X}}$	$C_f = \frac{0{,}058}{\mathrm{Re}_X^{1/5}}$
Συντελεστής οπισθέλκουσας	$C_D = \frac{1{,}328}{\sqrt{\mathrm{Re}_L}}$	$C_D = \frac{1{,}292}{\sqrt{\mathrm{Re}_L}}$	$C_D = \frac{1{,}456}{\sqrt{\mathrm{Re}_L}}$	$C_D = \frac{0{,}074}{\mathrm{Re}_L^{1/5}}$
Διατμητική Τάση	$\tau_0(x) = C_f \frac{\rho U^2}{2}$	$\tau_0(x) = C_f \frac{\rho U^2}{2}$	$\tau_0(x) = C_f \frac{\rho U^2}{2}$	$\tau_0(x) = C_f \frac{\rho U^2}{2}$
Οπισθέλκουσα Δύναμη	$F_D = C_D \frac{\rho U^2}{2} A$	$F_D = C_D \frac{\rho U^2}{2} A$	$F_D = C_D \frac{\rho U^2}{2} A$	$F_D = C_D \frac{\rho U^2}{2} A$

Μικτό Οριακό Στρώμα

$$C_D = \frac{0{,}074}{\mathrm{Re}_L^{1/5}} - \left(\frac{\mathrm{Re}_{cr}}{\mathrm{Re}_L}\right)\left(\frac{0{,}074}{\mathrm{Re}_{cr}^{0.2}} - \frac{1{,}328}{\mathrm{Re}_{cr}^{0.5}}\right) \quad \text{για } 5\times10^5 \le \mathrm{Re}_L \le 10^7$$

$$C_D = \frac{0{,}455}{(\log \mathrm{Re}_L)^{2.58}} - \left(\frac{\mathrm{Re}_{cr}}{\mathrm{Re}_L}\right)\left(\frac{0{,}455}{(\log \mathrm{Re}_L)^{2.58}} - \frac{1{,}328}{\mathrm{Re}_{cr}^{0.5}}\right) \quad \text{για } \mathrm{Re}_L \le 10^9$$

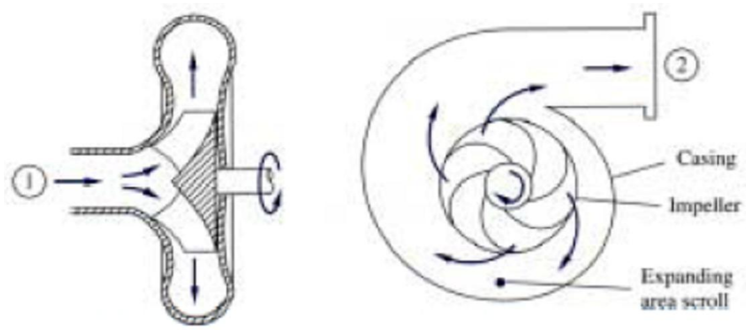
Για $\mathrm{Re}_{cr} = 5\times10^5$

$$C_D = \frac{0{,}074}{\mathrm{Re}_L^{1/5}} - \frac{1740}{\mathrm{Re}_L} \quad \text{για } 5\times10^5 \le \mathrm{Re}_L \le 10^7$$

$$C_D = \frac{0{,}455}{(\log \mathrm{Re}_L)^{2.58}} - \frac{1700}{\mathrm{Re}_L} \quad \text{για } \mathrm{Re}_L \le 10^9$$

ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ



Το μανομετρικό ύψος της αντλίας είναι:

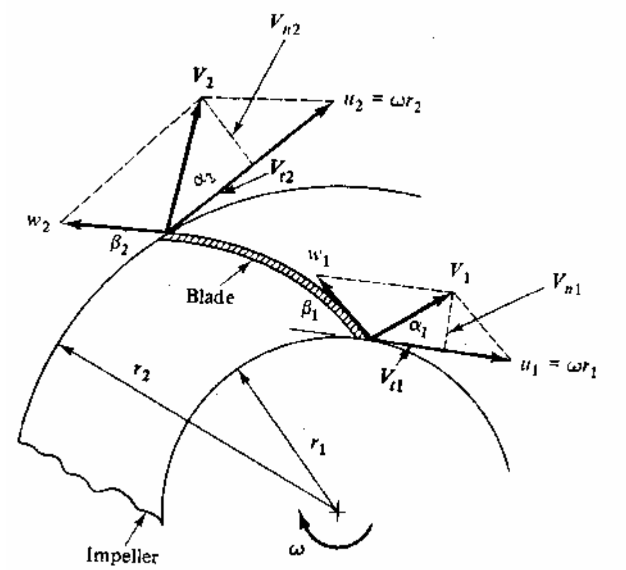
$$H = \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + Z\right)_2 - \left(\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + Z\right)_1 = \frac{1}{2g}\left[\left(V_2^2 - V_1^2\right) + \left(u_2^2 - u_1^2\right) + \left(w_2^2 - w_1^2\right)\right]$$

Η προσδιδόμενη ισχύ στο ρευστό είναι:

$$P = \rho g Q H$$

Η απόδοση της αντλίας είναι:

$$\eta = \frac{P}{\omega T} = \frac{\rho g Q H}{\omega T}$$



Η ροπή στον άξονα της αντλίας είναι:

$$T = \rho Q\left(r_2 V_{t2} - r_1 V_{t1}\right)$$

Έτσι η ισχύς γίνεται:

$$P = \omega T = \rho Q\left(u_2 V_{t2} - u_1 V_{t1}\right)$$

όπου

$$V_{t2} = V_2 \cos\alpha_2 = u_2 - w_2 \cos\beta_2 = u_2 - \frac{V_{n2}}{\tan\beta_2}$$

και το μανομετρικό ύψος:

$$H = \frac{u_2 V_{t2} - u_1 V_{t1}}{g} = \frac{1}{2g}\left[\left(V_2^2 - V_1^2\right) + \left(u_2^2 - u_1^2\right) + \left(w_2^2 - w_1^2\right)\right]$$

Για ιδανική σχεδίαση $\alpha_1 = 90^o \;\; V_{t1} = 0$

Η ισχύς δίδεται επίσης από τη σχέση:

$$P = \omega T = \rho Q\left(u_2 V_{n2} \cot\alpha_2 - u_1 V_{n1} \cot\alpha_1\right)$$

όπου

$$V_{n1} = V_1 \sin\alpha_1 = w_1 \sin\beta_1 = \frac{Q}{2\pi r_1 b_1} \text{ και } V_{n2} = V_2 \sin\alpha_2 = w_2 \sin\beta_2 = \frac{Q}{2\pi r_2 b_2}$$

Επίδραση της γωνίας β_2 στο μανομετρικό ύψος της αντλίας

$$H \approx \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2 \cot\beta_2}{2\pi r_2 b_2 g} Q$$

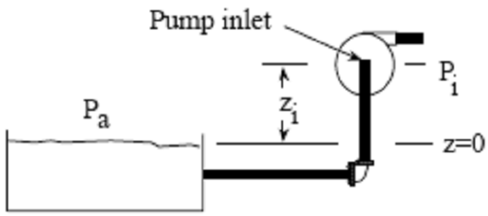
Φαινόμενο Σπηλαίωσης

Θετικό ύψος αναρρόφησης (NPSH) $NPSH = \frac{P_i}{\rho g} + \frac{V_i^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g}$

$$NPSH = \frac{P_i}{\rho g} + \frac{V_i^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} = \frac{P_a}{\rho g} - Z_i - h_f - \frac{P_v}{\rho g}$$

Για την αποφυγή σπηλαίωσης το δεύτερο μέλος της παραπάνω σχέσης πρέπει να είναι μικρότερο του πρώτου

Ο συντελεστής σπηλαίωσης $\sigma = \frac{NPSH}{H}$ είναι συνάρτηση της ειδικής ταχύτητας και του υδραυλικού βαθμού απόδοσης



Συμπεριφορά της Αντλίας με Αδιάστατες Παραμέτρους

$$C_Q = \frac{Q}{nD^3},\ C_H = \frac{gH}{n^2 D^2},\ C_P = \frac{bhp}{\rho n^3 D^5} = \frac{\omega T}{\rho n^3 D^5},\ \text{Re} = \frac{\rho n D^2}{\mu} \text{ και } \frac{\varepsilon}{D}$$

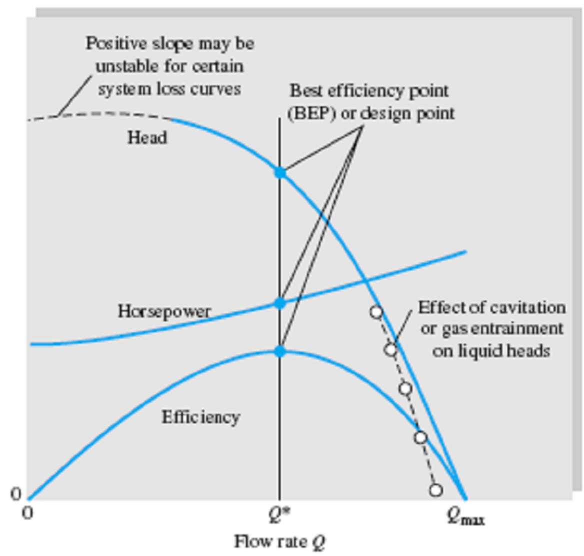
$$C_H = f\left(C_Q, \text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right) \text{ και } C_P = f\left(C_Q, \text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

Η ροή είναι τυρβώδης και η επίδραση της σχετικής τραχύτητας είνα ι με το ίδιο περίπου ποσοστό για όλες τις αντλίες, οπότε

$$C_H \approx f(C_Q) \text{ και } C_P \approx f(C_Q)$$

$$\eta \equiv \frac{C_H C_Q}{C_P} = \eta(C_Q)$$

$$C_{HS} = \frac{g(NPSH)}{n^2 D^2} = C_{HS}(C_Q)$$



Σχήμα: Τυπικές Χαρακτηριστικές Καμπύλες Αντλίας

Κανόνες Ομοιότητας

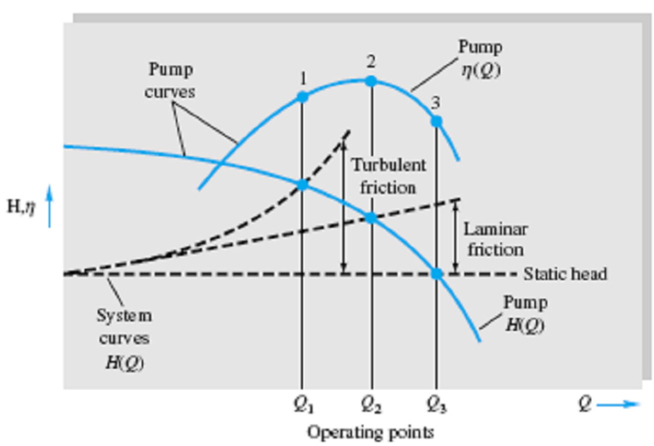
$$(C_Q)_1 = (C_Q)_2 \Rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1}\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$$

$$(C_H)_1 = (C_H)_2 \Rightarrow \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$$

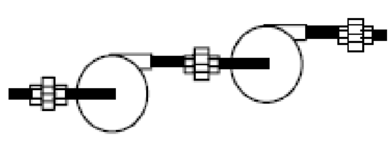
$$(C_P)_1 = (C_P)_2 \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5$$

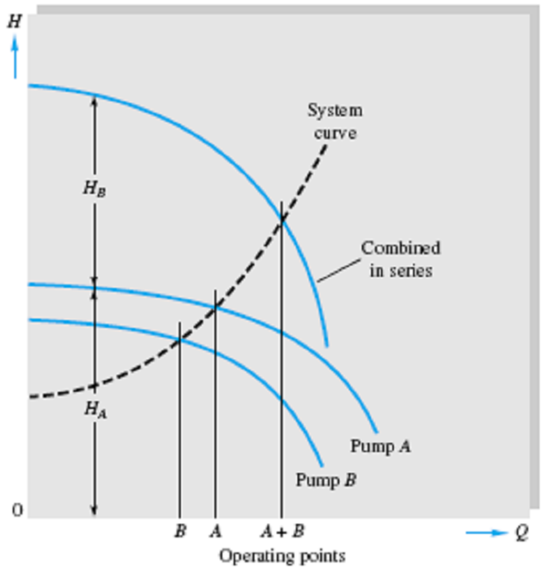
Σημείο Λειτουργίας Αντλίας

Το σημείο τομής της χαρακτηριστικής καμπύλης της αντλίας και της σωληνογραμμής

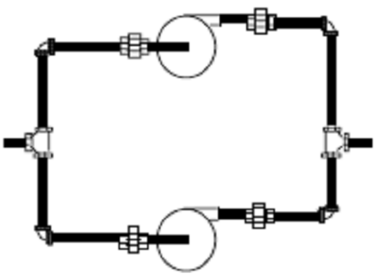


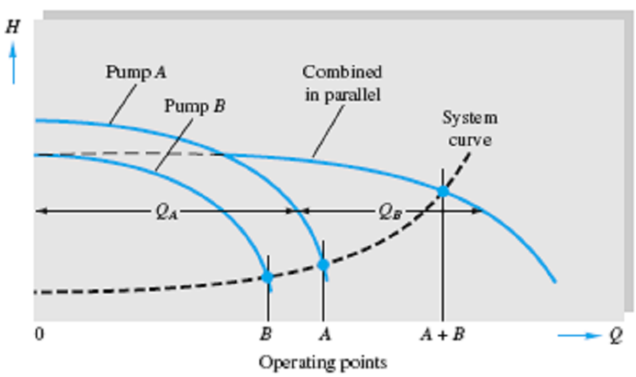
Σύνδεση αντλιών σε σειρά





Σύνδεση αντλιών εν παραλλήλω





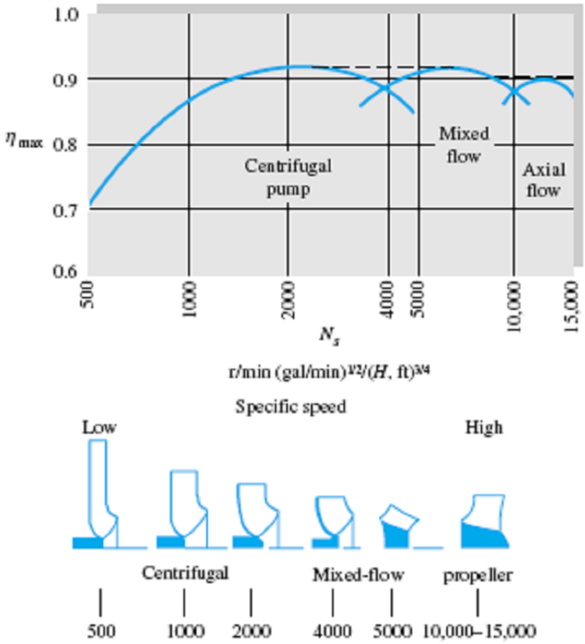
Ειδικός Αριθμός Στροφών

$$N_S' = \frac{\sqrt{C_{Q^*}}}{\left(C_{H^*}\right)^{3/4}} = \frac{n\sqrt{Q^*}}{\left(gH^*\right)^{3/4}}$$ αδιάστατος

Συνήθως όμως χρησιμοποιείται ο ακόλουθος διαστατικός:

$$N_S = \frac{n\sqrt{Q^*}}{\left(H^*\right)^{3/4}}$$ για τον οποίον πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη σημασία στις μονάδες

Χρησιμοποιείται για την επιλογή του τύπου της αντλίας που ταιριάζει σε δεδομένη εφαρμογή.



1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
η_{max}
Centrifugal pump
Mixed flow
Axial flow
500
1000
2000
4000
5000
10,000
15,000
N_s
r/min (gal/min)$^{1/2}$/(H, ft)$^{3/4}$
Specific speed
Low
High
Centrifugal
Mixed-flow
propeller
500
1000
2000
4000
5000
10,000–15,000

(b)