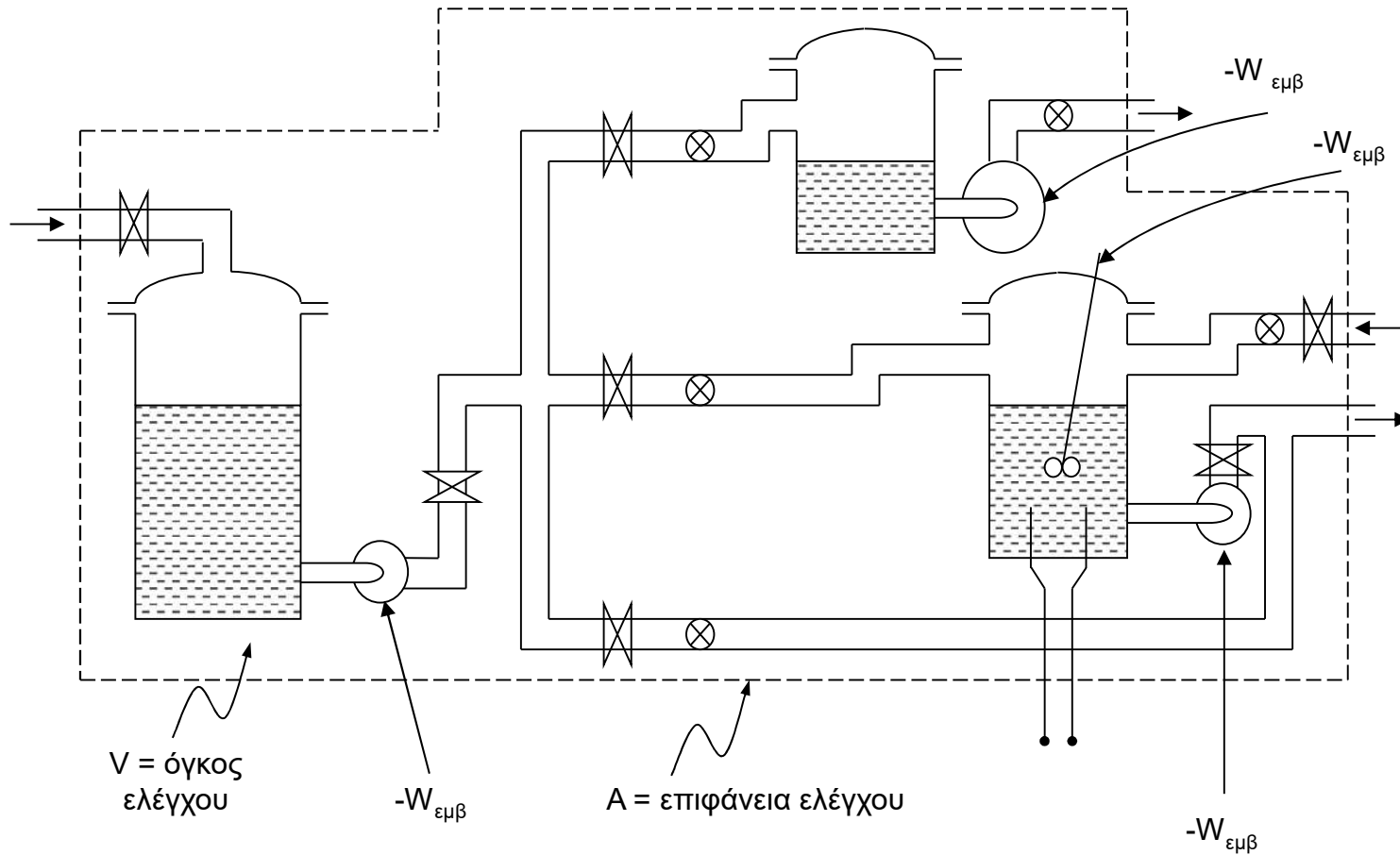


Φυσικές Διεργασίες II

Σωληνώσεις

Διαδικτυακό μάθημα
ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ

ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ



Σχήμα 11.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ

Μακροσκοπικό ισοζύγιο μάζας

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \, dV + \iint_A \rho \mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dA = 0$$

Μακροσκοπικό ισοζύγιο ενέργειας

$$\left(\frac{dE}{dt} \right)_{\text{συστ}} = \frac{d}{dt} \iiint_V e \rho \, dV + \iint_A e \rho \mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{n}} \, dA$$

E = U + KE + ΔE = ΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

e = ειδική ολική ενέργεια (= E α.μ.μ.) = u + (1/2) V² + gz

u = εσωτερική ενέργεια α.μ.μ.

½ V² = κινητική ενέργεια α.μ.μ.

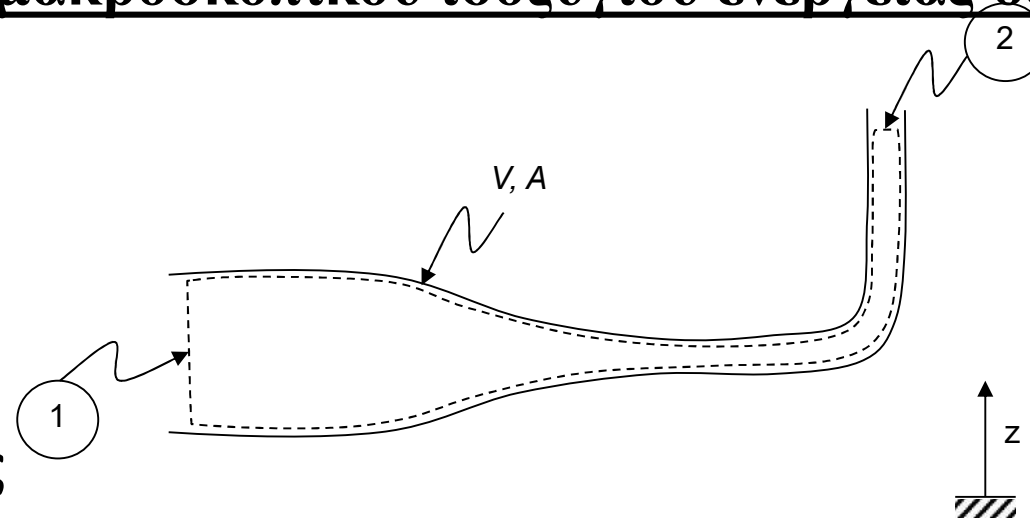
gz = δυναμική ενέργεια α.μ.μ.

1^{ος} Θερμοδυναμικός Νόμος $\left(\frac{dE}{dt} \right)_{\text{συστ}} = (\dot{Q} - \dot{W})_{\text{συστ}}$

Όπου \dot{Q}^* ο ρυθμός παροχής θερμότητας προς το σύστημα από το περιβάλλον και \dot{W}^* ο ρυθμός παραγωγής μηχανικού έργου από το σύστημα προς το περιβάλλον

ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ

Εφαρμογή του μακροσκοπικού ισοζυγίου ενέργειας σε σωληνώσεις



- Υποθέσεις

Μόνιμη ροή, Ομοιόμορφες u και p στις διατομές 1 και 2

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_1 \langle v_1 \rangle^2 + gz_1 \right) = \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_2 \langle v_2 \rangle^2 + gz_2 \right) + h_{ολ}$$

$$h_{ολ} \equiv (u_2 - u_1) - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = \text{ολική απώλεια υδροστατικής κεφαλής (total head loss)}$$

[=](L/t)², m²/s²

$u_2 - u_1$ = αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του ρευστού (δηλ. θέρμανση του ρευστού, εν γένει ανεπιθύμητη)

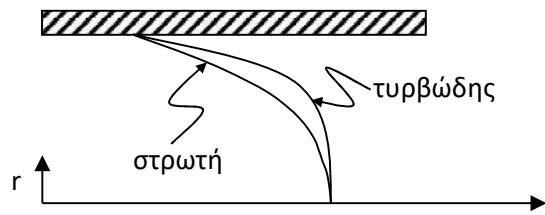
$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$ = απώλεια θερμικής ενέργειας στο περιβάλλον

Σωληνώσεις

Συντελεστής Παροχής Κινητικής Ενέργειας, α

- Στρωτή ροή

- $\Rightarrow \alpha = 2$, καθ' όσον $v_z / \langle v_z \rangle = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$ και $v_z / v_{z,max} = 2$, (για $r=0$)



Τυρβώδης ροή $\frac{v_z}{v_{z,max}} = \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{1/n}$

Έχουμε το πειραματικό αποτέλεσμα

Παρατηρούμε λοιπόν ότι για

τυρβώδη ροή έχουμε: $\alpha \approx 1$

Προσοχή: Έλεγχος Re

Re	4×10^3	1.1×10^5	3.2×10^6
n	6	7	10

n	6	7	10
$\langle \bar{v} \rangle / \bar{v}_{max}$	0.79	0.82	0.87

Re	4×10^3	1.1×10^5	3.2×10^6
		5	6
n	6	7	10
α	1.08	1.05	1.03

Σωληνώσεις

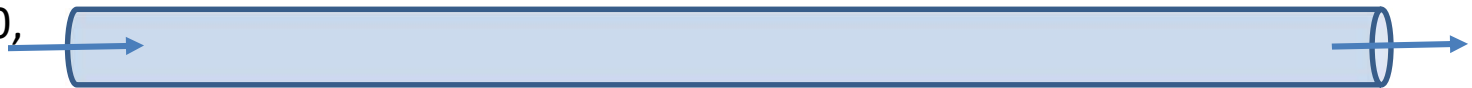
- Υπολογισμός της ολικής απώλειας υδροστατικής κεφαλής $h_{ολ}$

$$h_{ολ} = h_{\mu} + h_{\varepsilon}$$

Η h_{μ} οφείλεται σε ιώδεις τριβές μέσα σε πλήρως ανεπτυγμένη ροή. Η h_{ε} οφείλεται σε αλλαγή διατομής, γωνίες, βαλβίδες κλπ.

Για πλήρως ανεπτυγμένη ροή μέσα σε σωλήνα σταθερής διατομής, έχουμε:

$$h_{\varepsilon} = 0, \quad \alpha_1 = \alpha_2 = 0,$$



$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_1 \langle v_1 \rangle^2 + gz_1 \right) = \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_2 \langle v_2 \rangle^2 + gz_2 \right) + h_{ολ}$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} + g(z_1 - z_2) = h_{\mu}$$

$$P = p + \rho g z$$

$$\frac{(P_1 - P_2)}{\rho} = h_{\mu}$$

$$Re = \frac{\rho \langle v \rangle D}{\mu}$$

$$\frac{-\Delta P}{l} = \frac{128\mu Q}{\pi D^4} = \frac{128\mu \langle v \rangle \left(\frac{\pi}{4} D^2 \right)}{\pi D^4} = 32 \frac{1}{D} \frac{\mu \langle v \rangle}{D}$$

Hagen Poiseuille

$$h_{\mu} = 32 \frac{l}{D} \frac{\mu \langle v \rangle}{\rho D} = \frac{64 l \langle v \rangle^2}{Re D^2}$$

Σωληνώσεις

- **Τυρβώδης Ροή**

$$\Delta P = \Delta P(D, l, e, \langle v \rangle, \rho, \mu)$$

$$\frac{(P_1 - P_2)}{\rho} = h_\mu$$

$$h_\mu = f \left(\text{Re}, \frac{e}{D} \right) \frac{l}{D} \frac{\langle v \rangle^2}{2}$$

Το f είναι γνωστό ως ο συντελεστής τριβής του Fanning (κυρίως ΗΠΑ). Στην Αγγλία χρησιμοποιείται συχνά ο συντελεστής τριβής του Moody,

$$\phi = f / 4$$

Σωληνώσεις

$$h_{\mu} = 32 \frac{\ell}{D} \frac{\mu \langle v \rangle}{\rho D} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{\ell}{D} \frac{\langle v \rangle^2}{2} \quad h_{\mu} = f \left(\text{Re}, \frac{e}{D} \right) \frac{\ell}{D} \frac{\langle v \rangle^2}{2}$$

Στρωτή ροή: $f = \frac{64}{\text{Re}}$

Τυρβώδης ροή

Τιμές του f δίνονται συνήθως υπό τη μορφή του διαγράμματος του Moody (από την εργασία του L.F. Moody). Βλέπουμε ότι για τυρβώδη ροή το f εξαρτάται ισχυρώς όχι μόνο από το Re αλλά και από τη σχετική τραχύτητα e/D ,

Περιοχή 1 ($\text{Re} < 2000$) Στρωτή ροή, $f = 64/\text{Re}$. $(-\Delta P / \ell) \sim \langle v \rangle$

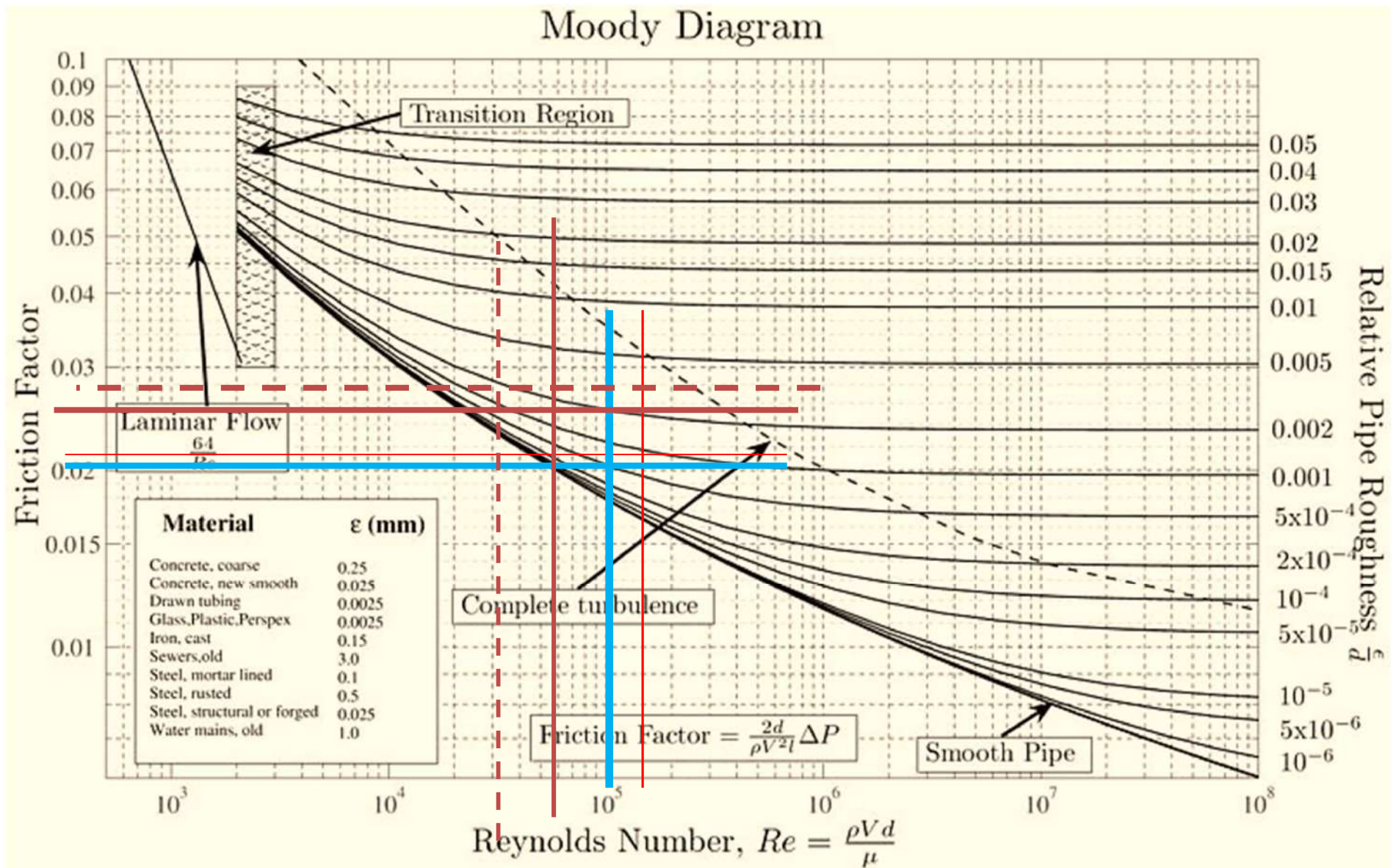
Περιοχή 2 ($2000 < \text{Re} < 3000$) Μεταβατική περιοχή μεταξύ στρωτής τυρβώδους ροής. Η μετάπτωση από στρωτή σε τυρβώδη ροή εξαρτάται από την κατάσταση του σωλήνα, την παρουσία βαλβίδων, αγκώνων, κλπ. στο σωλήνα και την καθαρότητα του ρευστού.

Περιοχή 3 ($\text{Re} > 3000$) Τυρβώδης ροή, $f = f(\text{Re}, e/D)$ $(-\Delta P / \ell) \sim \langle v \rangle^m$, $1 < m < 2$

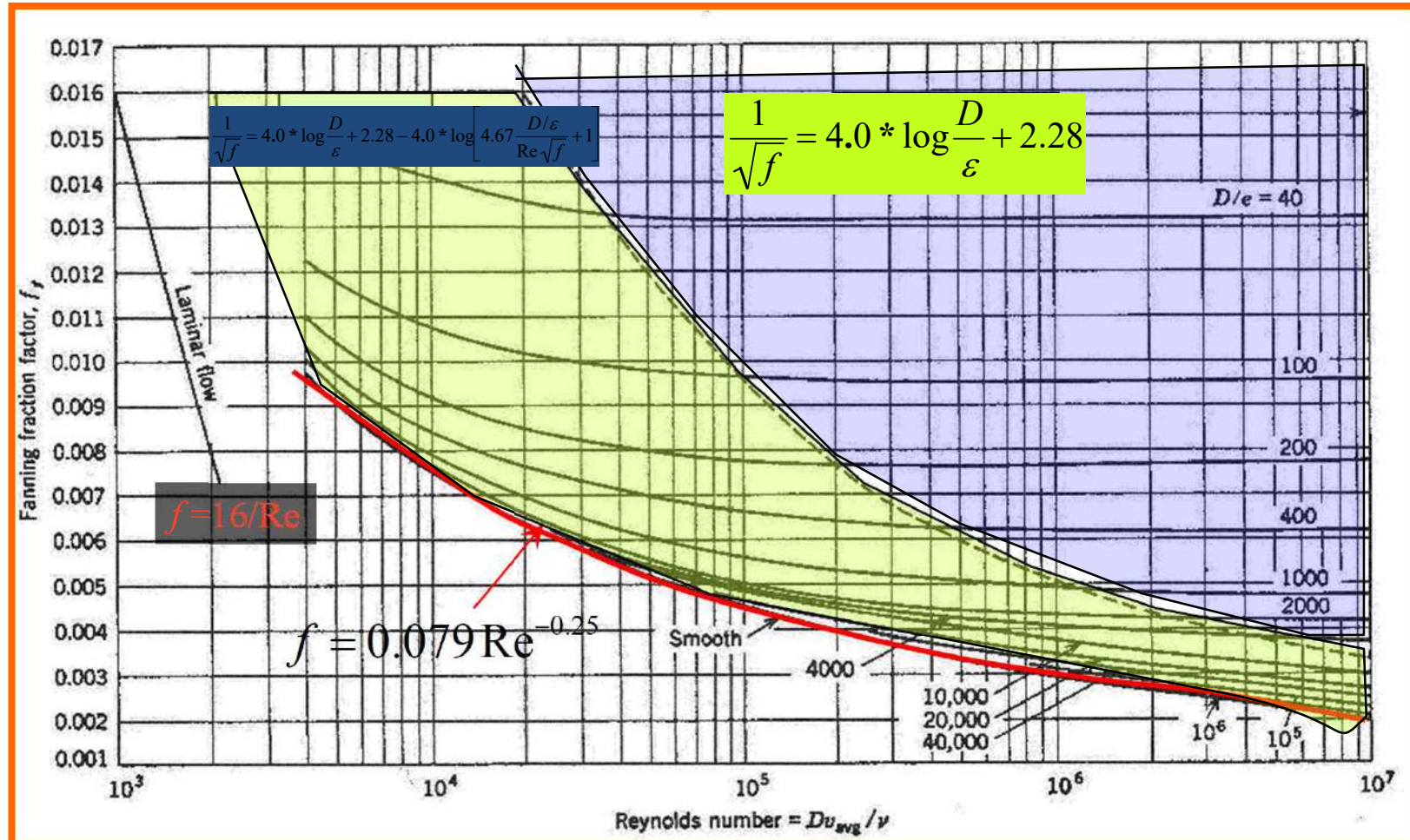
Περιοχή 4 (Τραχειές σωληνώσεις και υψηλές τιμές του Re), $f = f(e/D)$, $(-\Delta P / \ell) \sim \langle v \rangle^2$

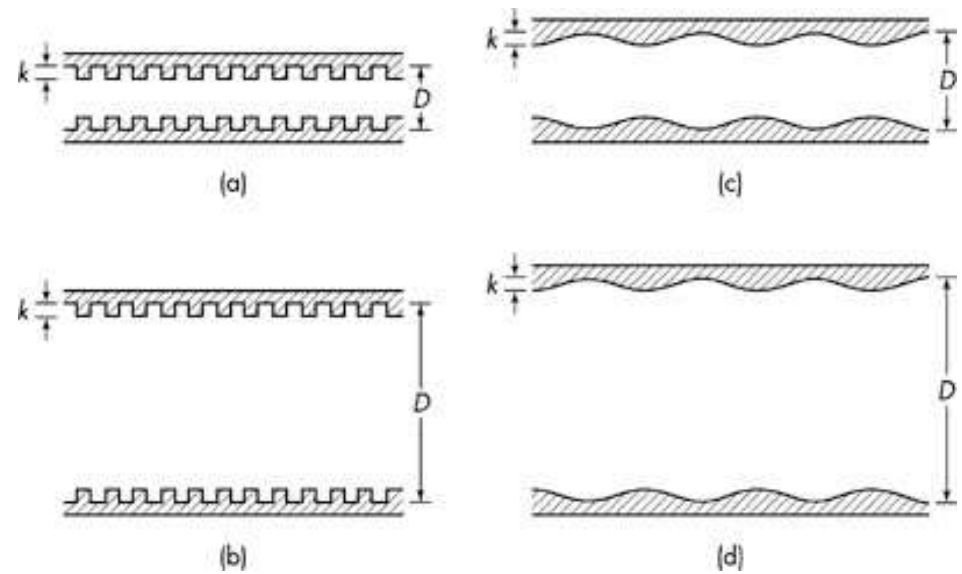
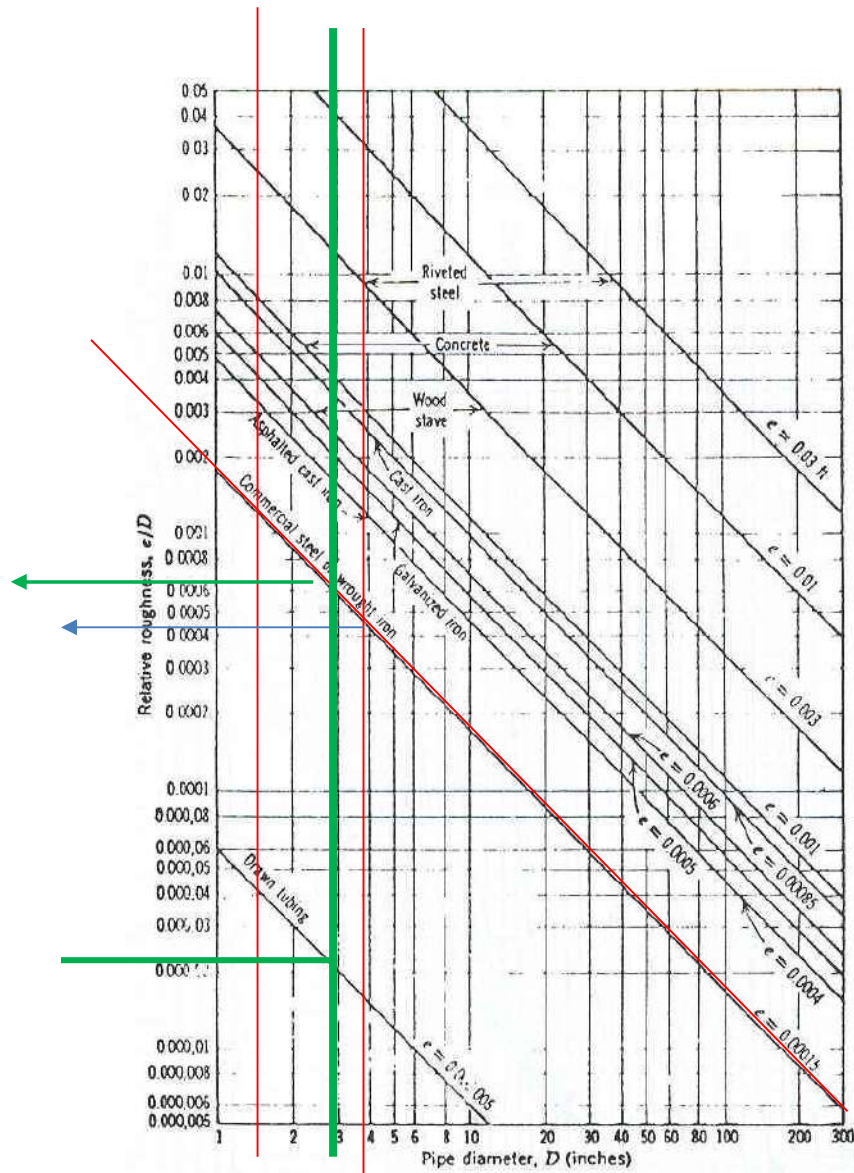
Διάγραμμα Moody

$$f_D(Re, k/D)$$



Fanning Diagram





Σχετική τραχύτητα για διάφορα είδη σωλήνων

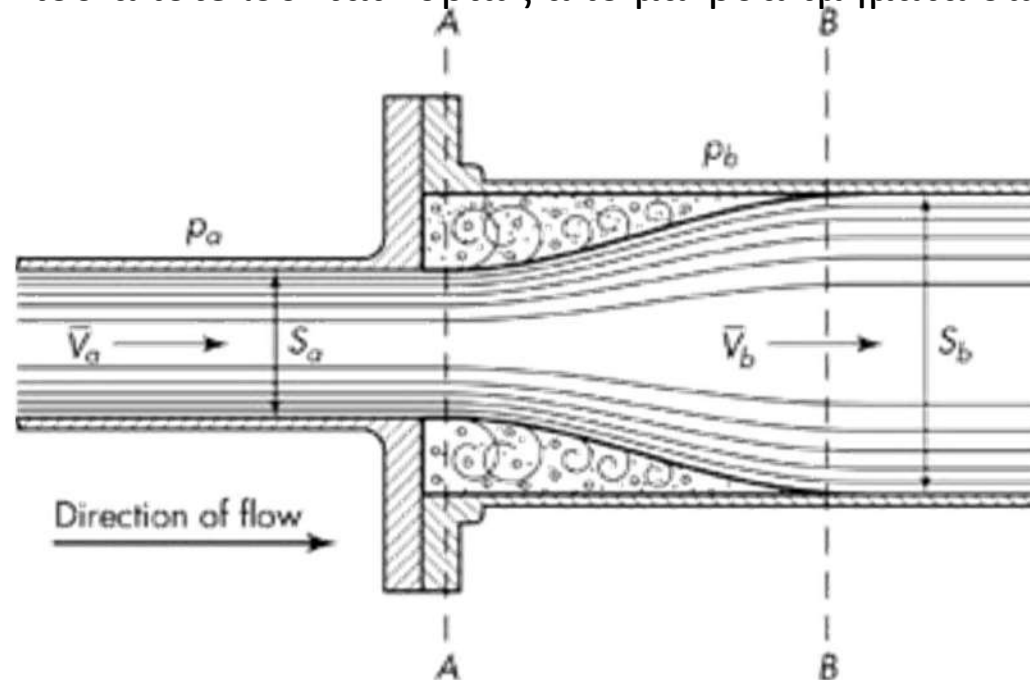
Μέση τραχύτητα σωλήνων

Υλικό	Τραχύτητα k	
	ft	mm
Γυαλί	«λείος»	
Εξηλασμένος χάλυβας Χαλκός, Μόλυβδος, Αλουμίνιο, PVC	0.000005	0.0015
Χάλυβας εμπορίου (Σφυρήλατος σίδηρος)	0.00015	0.046
Χυτοσίδηρος με επίστρωση ασφάλτου	0.0004	0.12
Γαλβανισμένος σίδηρος	0.0005	0.15
Χυτοσίδηρος	0.00085	0.26
Ξυλοσανίδα	0.0006 - 0.003	0.18 - 0.9
Σκυρόδεμα	0.001 - 0.01	0.3 - 3.0
Χάλυβας με ηλώσεις (πιρτσίνια)	0.003 - 0.03	0.0 - 9.0

Σωληνώσεις

Ελάσσονες απώλειες υδροστατικής κεφαλής

Η ροή μέσα από μία **ποικιλία εξαρτημάτων και γωνιών καθώς και αλλαγών διατομής** προκαλούν πρόσθετες απώλειες υδροστατικής κεφαλής, συχνά ως αποτέλεσμα αποχωρισμού της ροής. Μηχανική ενέργεια δαπανάται λόγω των εντόνων ιξωδών τριβών που λαμβάνουν χώρα στις ζώνες αποκολλήσεως της ροής. Οι απώλειες αυτές είναι σχετικά μικρές, εξού και ο όρος **“ελάσσονες απώλειες”**, σε συστήματα σωληνώσεων που αποτελούνται κυρίως από μακρυνά τμήματα σωλήνων σταθερής διατομής.



Σωληνώσεις

Ελάσσονες απώλειες υδροστατικής κεφαλής

$$h_{\varepsilon} = K \frac{\langle v \rangle^2}{2} \quad K = \text{συντελεστής απώλειας [=] αδιάστατος}$$

Ένας άλλος τρόπος έκφρασης της h_{ε} είναι να δοθεί η αντίσταση στην ροή από το εξάρτημα ως ισοδύναμο μήκος λ ευθύγραμμου σωλήνα της ίδιας ονομαστικής διαμέτρου, δηλ.

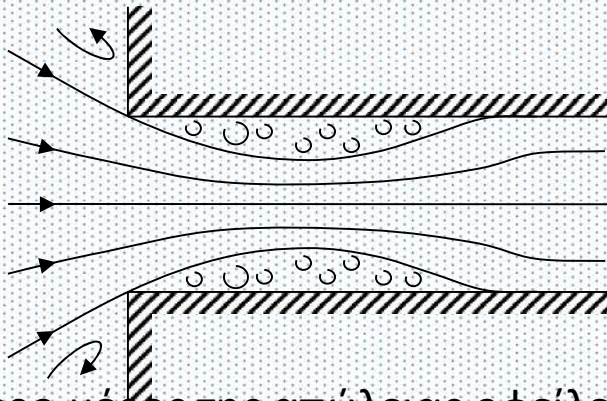
$$h_{\varepsilon} = f \frac{\lambda}{D} \frac{\langle v \rangle^2}{2} \quad K = f \frac{\lambda}{D} \quad \lambda = K \frac{D}{f}$$

Προσοχή στους Πίνακες, συνήθως δίνεται το λ/D

Σωληνώσεις

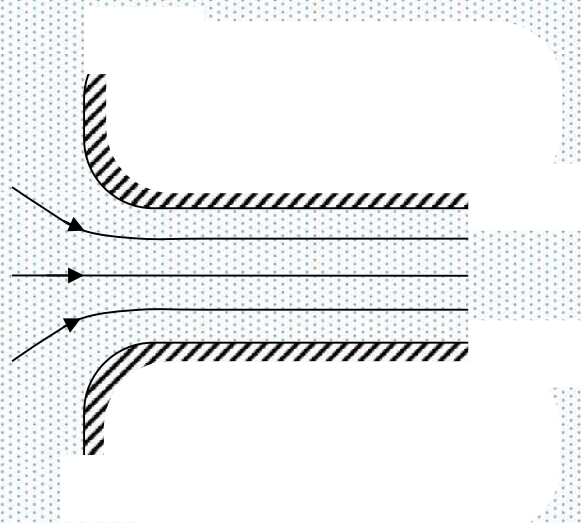
Ελάσσονες απώλειες υδροστατικής κεφαλής

1. Είσοδος και Μήκος Εισόδου



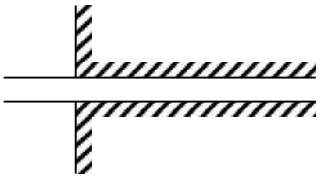
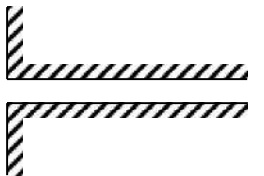
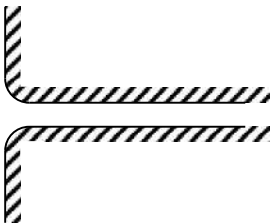
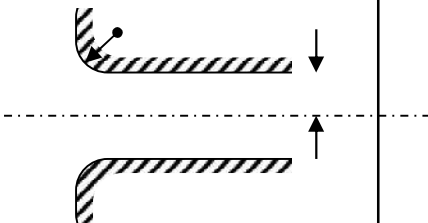
Στενωμένη φλέβα
(vena contracta)

Το μεγαλύτερο μέρος της απώλειας οφείλεται στην ανάμιξη που λαμβάνει χώρα καθώς η ροή επιβραδύνεται και απλώνει για να γεμίσει ξανά το σωλήνα. Το ανεπιθύμητο αυτό φαινόμενο περιορίζεται αποτελεσματικά, αν το χείλος της εισόδου στρογγυλευθεί

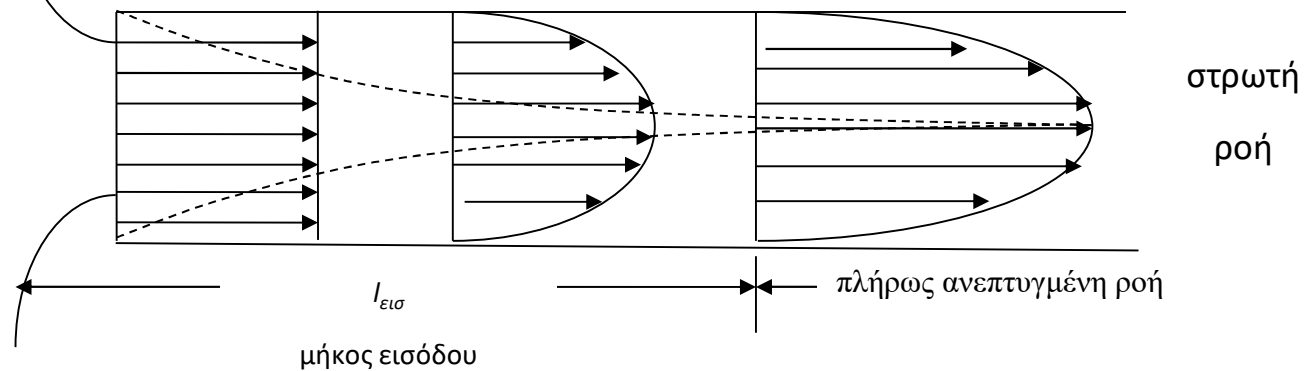


1. Είσοδος και Μήκος Εισόδου

Πίνακας 11.1 Συντελεστές απώλειας για εισόδους σωλήνων

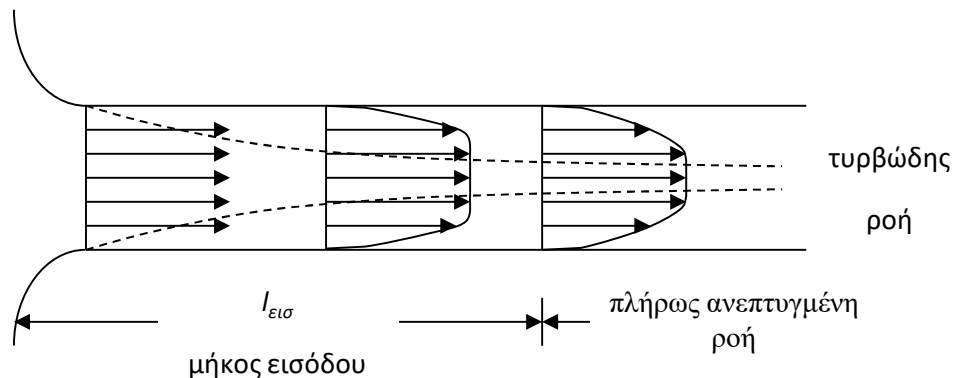
Τύπος εισόδου	Διάγραμμα	Συντ. απώλειας K
Οπισθοχωρημένη είσοδος (Στόμιο του Borda)		0.78
Απότομη είσοδος		0.34
Ελαφρώς στρογγυλεμένη είσοδος		0.20-0.25
Καλώς στρογγυλεμένη είσοδος (R≈0.35)		0.04

1. Είσοδος και Μήκος Εισόδου



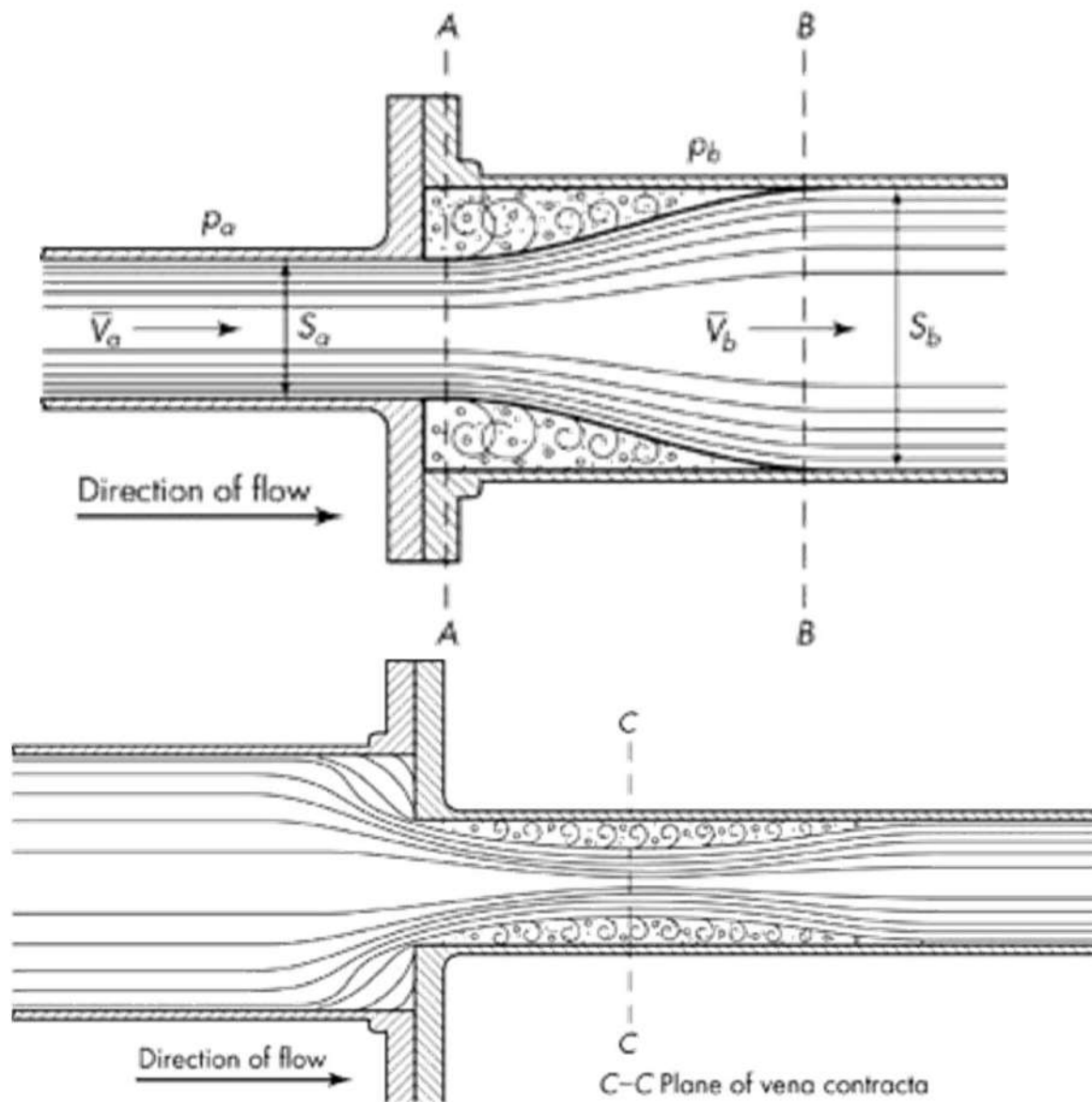
$$\ell_{\text{εισ}} / D = 0.057 \text{Re}$$

Για $\text{Re} = 2000$ έχουμε $\ell_{\text{εισ}} = 114D$. Βλέπουμε, δηλαδή, ότι το $\ell_{\text{εισ}}$ για στρωτή ροή μπορεί να είναι αξιόλογο.!!



Το $\ell_{\text{εισ}}$ για τυρβώδη ροή είναι αρκετά μικρότερο εκείνου για στρωτή ροή εξαιτίας του γεγονότος ότι ο μηχανισμός διασποράς της ορμής στην περίπτωση της τυρβώδους ροής είναι πολύ πιο ισχυρός από ότι στη στρωτή.

2. Απότομες Διευρύνσεις και Στενώσεις



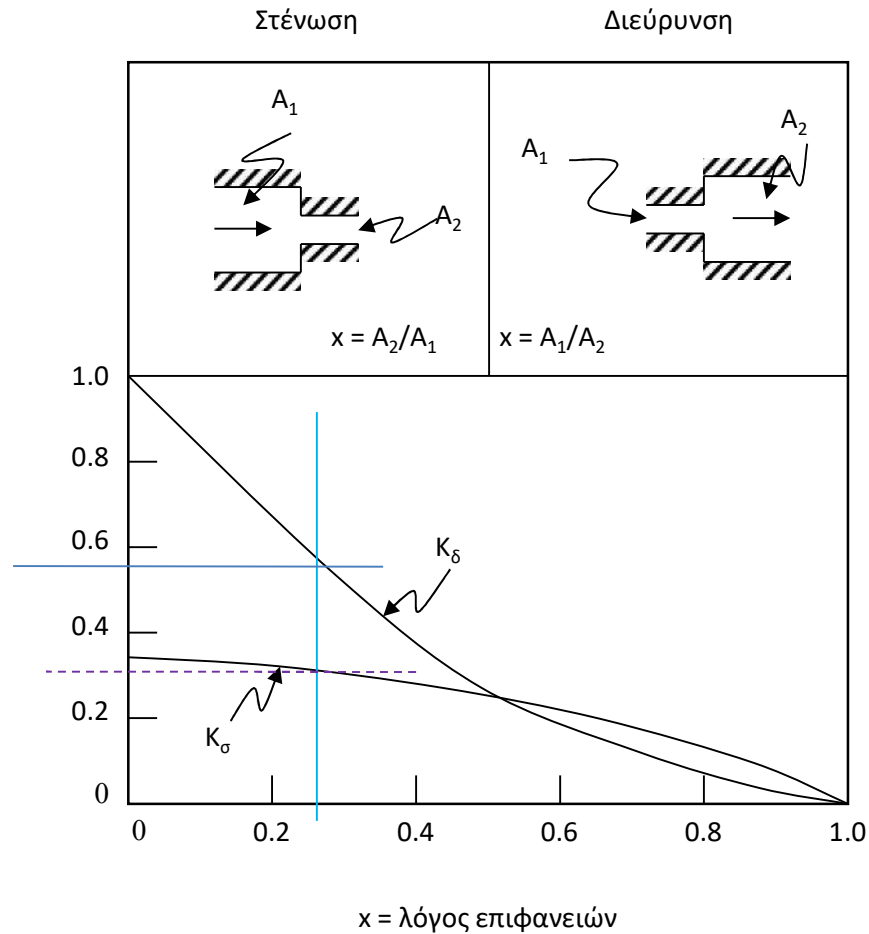
2. Απότομες Διευρύνσεις και Στενώσεις

Ο συντελεστής απώλειας για διεύρυνσης K_δ , όσο και ο συντελεστής απώλειας για στένωση, K_σ , είναι βασισμένος στη μεγαλύτερη τιμή του $\frac{1}{2}\langle v \rangle^2$.

$$h_\varepsilon = K_\sigma \frac{\langle v_2 \rangle^2}{2}$$

$$h_\varepsilon = K_\delta \frac{\langle v_1 \rangle^2}{2}$$

Προσοχή στον ορισμό του x
Επίσης στην επιλογή της ταχύτητας
(πάντα η μεγαλύτερη)

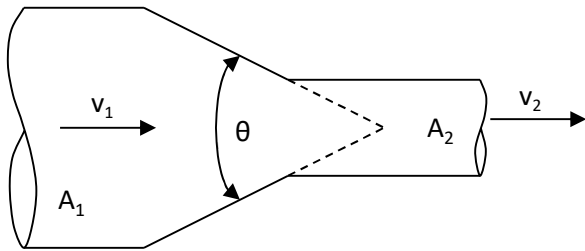


2. Απότομες Διευρύνσεις και Στενώσεις

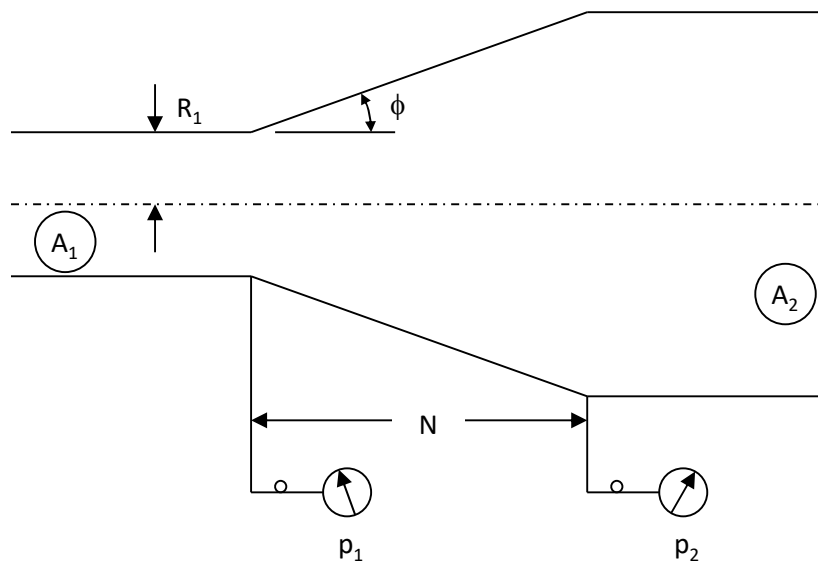
Συντελεστές απώλειας για βαθμιαίες στενώσεις.

$$h_\varepsilon = K \frac{\langle v_2 \rangle^2}{2}$$

Γωνία της στενώσεως	Συντ. απώλειας K
30°	0.02
45°	0.04
60°	0.07



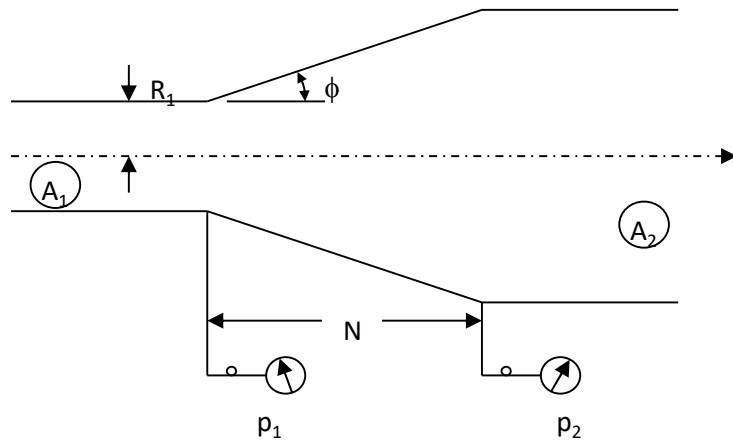
Διαχυτήρες (ή αποκαταστάτες πίεσης)



Ο διαχυτήρας ή αποκαταστάτης πίεσης είναι μία βαθμιαία διεύρυνση του σωλήνα η οποία έχει για σκοπό την ανύψωση της πίεσης του ρευστού εις βάρος της κινητικής του ενέργειας.

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{\langle v_1 \rangle^2}{2} \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{\langle v_2 \rangle^2}{2} \right) = h_\varepsilon$$

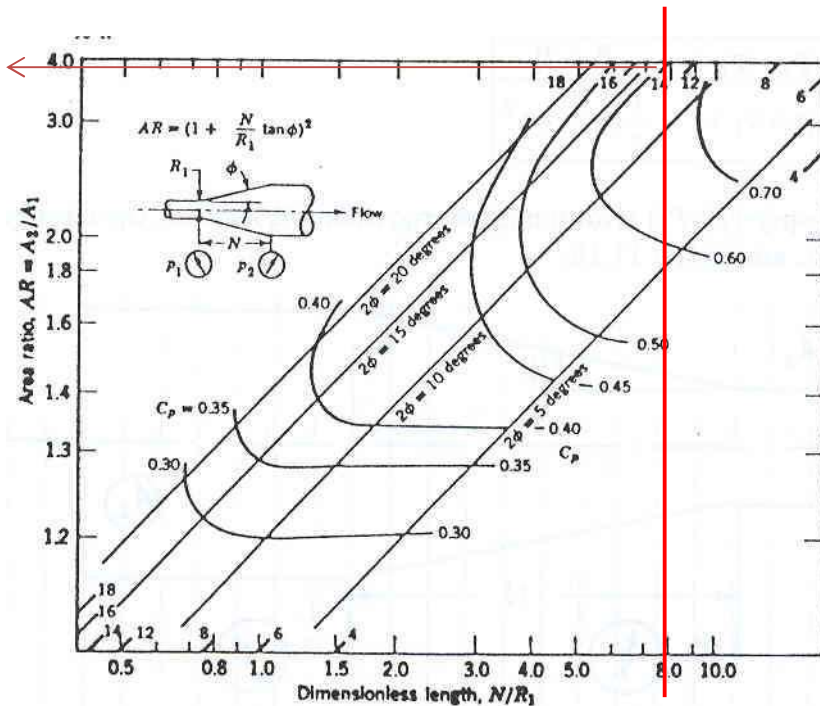
2. Απότομες Διευρύνσεις και Στενώσεις



Συντελεστή αποκατάστασης της πίεσης, C_p

$$C_p = \frac{p_2 - p_1}{\frac{1}{2} \rho \langle v_1 \rangle^2} = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{2} \rho \langle v_1 \rangle^2}$$

$$AR = \frac{A_2}{A_1} = \left(1 + \frac{N}{R_1} \tan \phi\right)^2$$



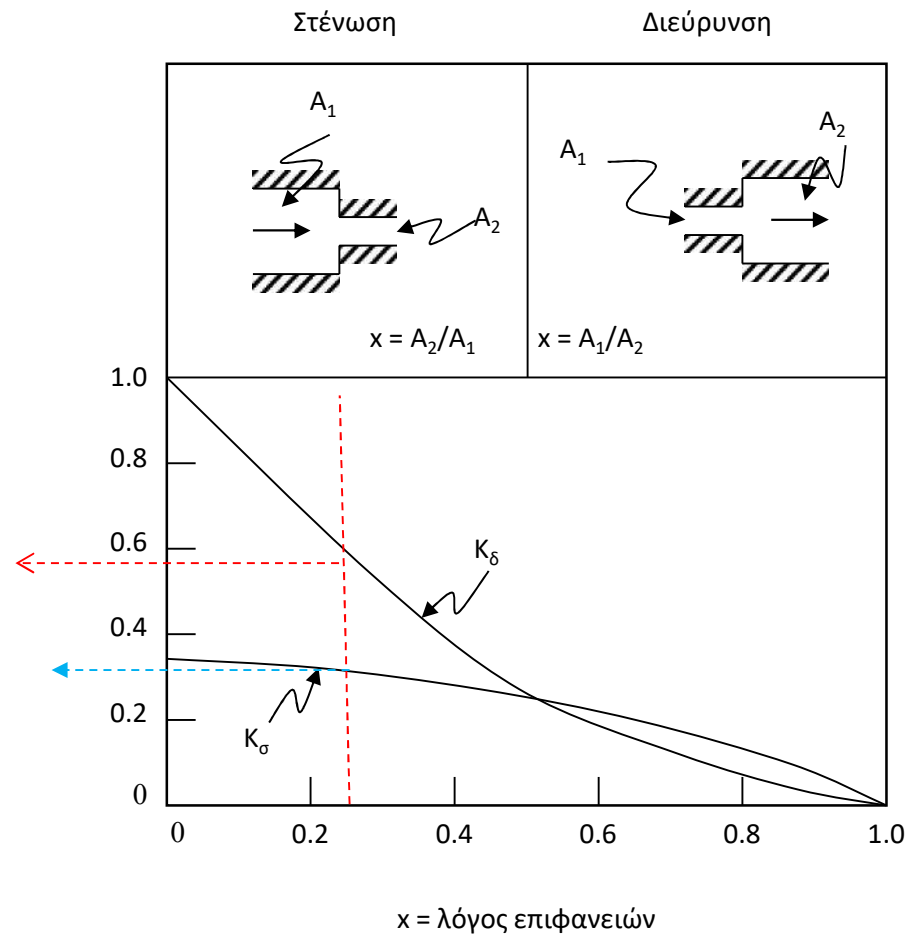
$$h_\varepsilon = \frac{1}{2} \langle v_1 \rangle^2 \left[\left(1 - \frac{1}{(AR)^2}\right) - C_p \right]$$

3. Έξοδοι

$$h_\varepsilon = \frac{1}{2} K_\delta \langle v_1 \rangle^2$$

$$K_\delta \cong 1$$

$$h_\varepsilon = \frac{1}{2} \langle v_1 \rangle^2$$

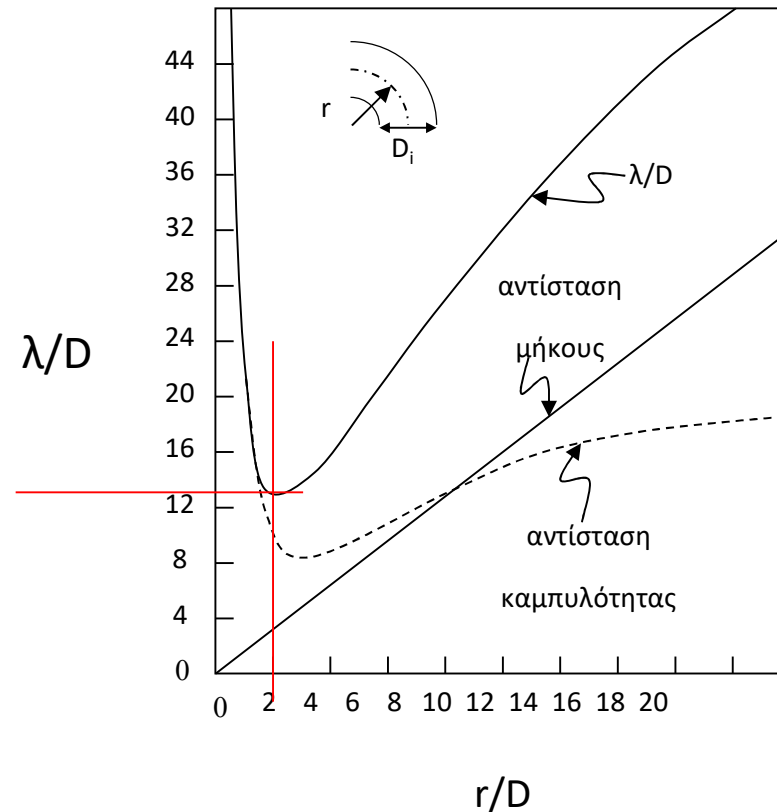


4. Καμπές

Ροή μέσα σε μία καμπή συνεπάγεται σημαντικές απώλειες μηχανικής ενέργειας εξαιτίας δευτερευουσών ροών. Η επιπλέον απώλεια υδροστατικής κεφαλής εκφράζεται συνήθως ως ισοδύναμο μήκος ευθύγραμμου σωλήνα, λ/D . Το ισοδύναμο μήκος λ εξαρτάται από την ανηγμένη ακτίνα καμπυλότητας r/R της καμπής,

$$h_\varepsilon = K \frac{\langle v \rangle^2}{2}$$

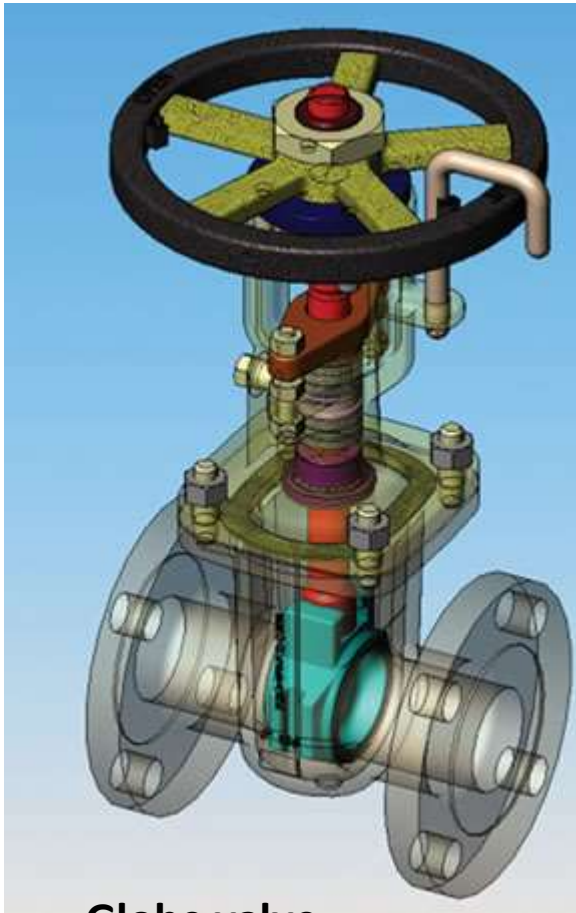
$$h_\varepsilon = f \frac{\lambda}{D} \frac{\langle v \rangle^2}{2}$$



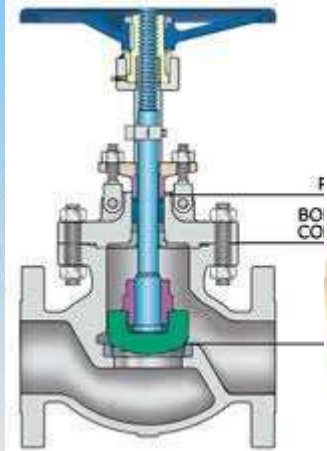
5. Βαλβίδες και Εξαρτήματα

Τυπικά ισοδύναμα μήκη (λ/D) για βαλβίδες και εξαρτήματα
Πίνακας 11.3

Εξάρτημα	Περιγραφή	Ισοδύναμο μήκος λ/D
Σφαιρική βαλβίδα (Globe valve)	Πλήρως ανοικτή	350
Βαλβίδα τύπου πύλης (Gate valve)	Πλήρως ανοικτή	13
	$3/4$ ανοικτή	35
	$1/2$ ανοικτή	160
	$1/4$ ανοικτή	900
Βαλβίδα ελέγχου (Check valve)		50-100
Αγκώνας κανονικός, 90 deg (Standard elbow)		30
Αγκώνας κανονικός, 45 deg		16
Αγκώνας 90 deg (Elbow)	Μακριάς ακτίνας (Long radius)	20
Δρομικός αγκώνας, 90 deg (Street elbow)		50
Δρομικός αγκώνας, 45 deg		26
Ταυ (tau)	Ευθύγραμμη ροή	20
	Κλαδική ροή	60
Επιστροφική καμπή (return bend)	Στροφή 180 deg (πιο “ανοικτή” από δύο κανονικούς αγκώνες)	50



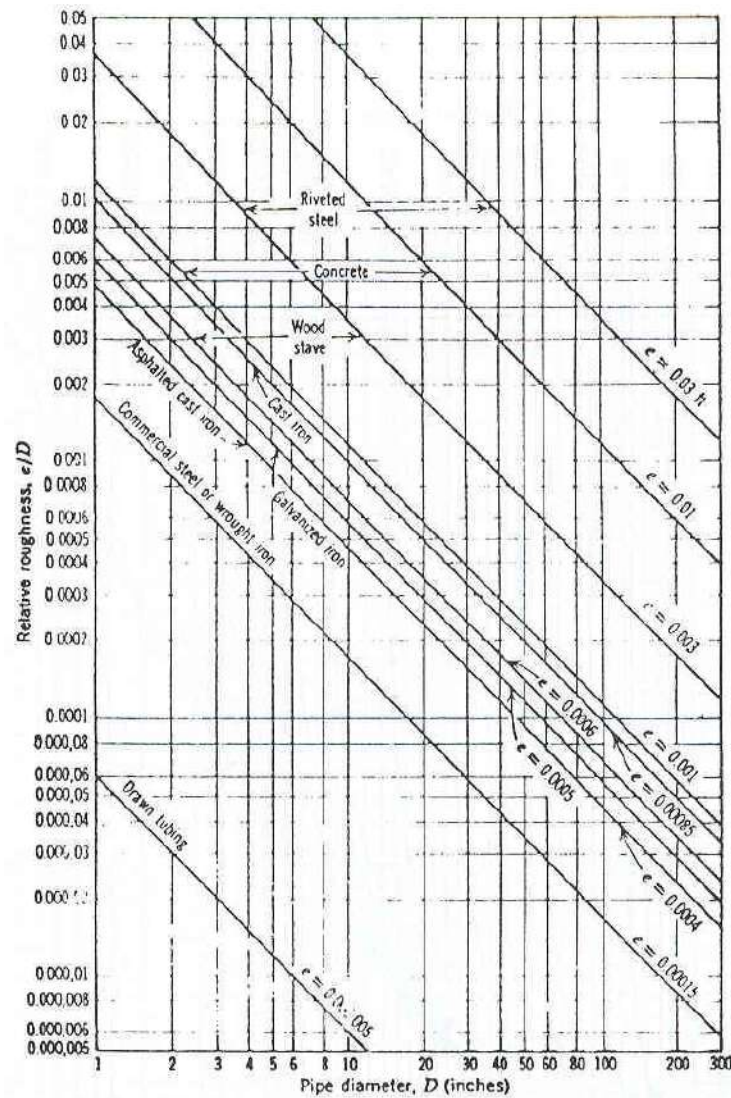
Globe valve



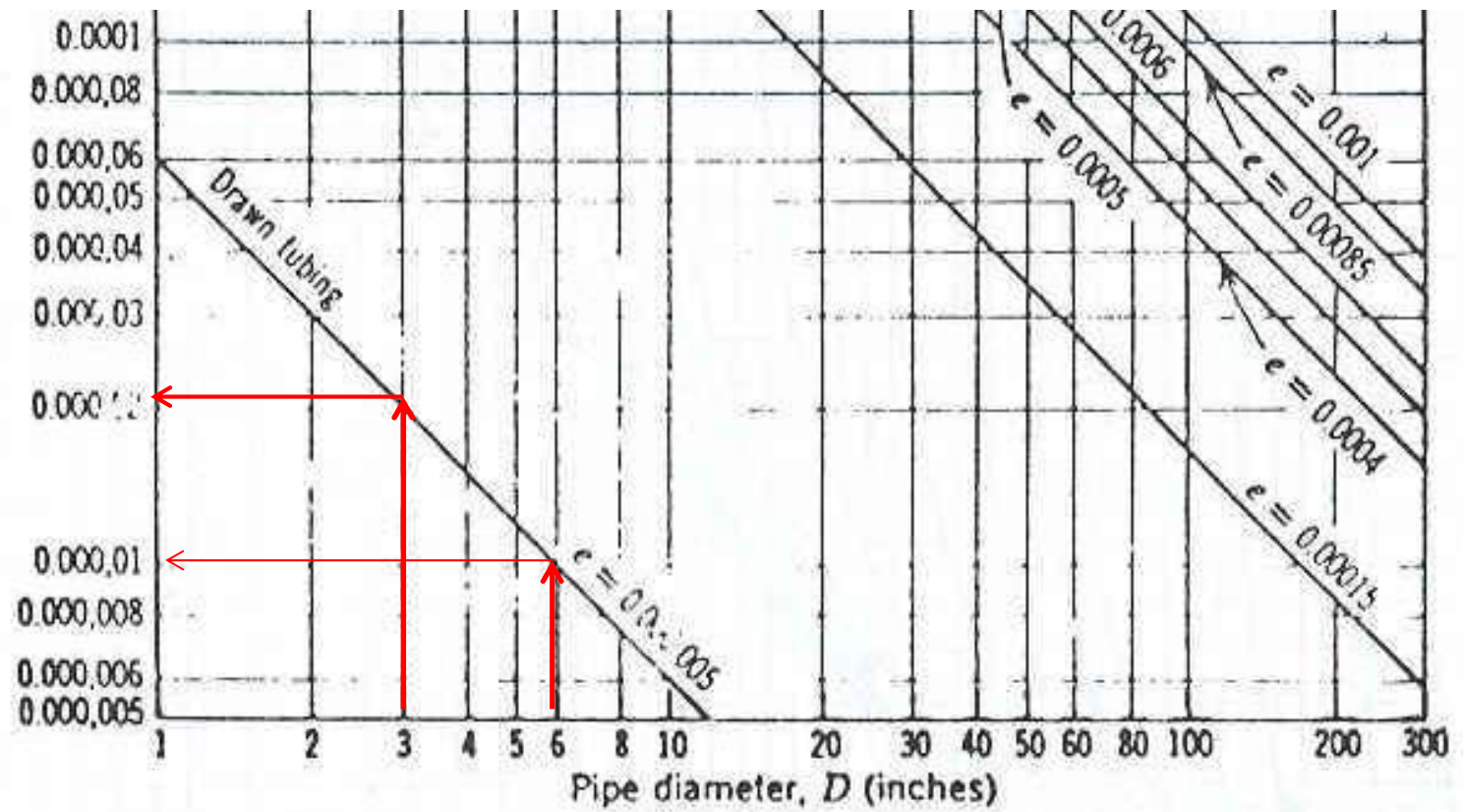
Drawn from DWH Catalog OEM

HUIBO VALVE

Gate valve



Σχήμα 11.5 Σχετική τραχύτητα για διάφορα είδη σωλήνων. Όλες οι τιμές του e/D από το ανωτέρω διάγραμμα ισχύουν για καινούργιους σωλήνες.



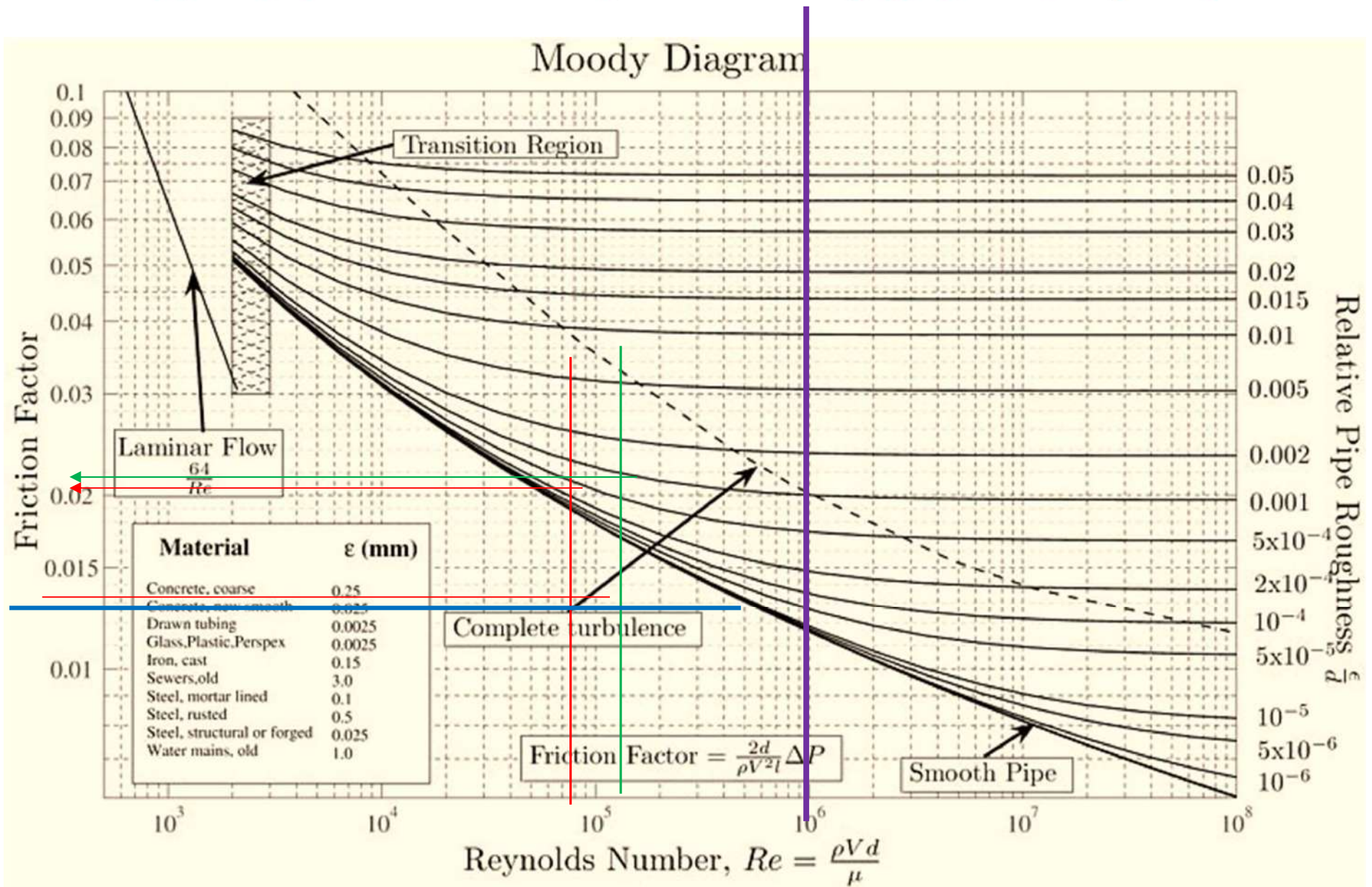
Παράδειγμα 11 στ: $D=3.068$ in, $(e/D)=0.00002$, $D=6$ in, $(e/D)= 0.00001$

Nominal Pipe Size (in)	Inside Diameter (in)
1/8	0.269
1/4	0.364
3/8	0.493
1/2	0.622
3/4	0.824
1	1.049
1 1/2	1.610
2	2.067
2 1/2	2.469
3	3.068
3 1/2	3.548
4	4.026
5	5.047
6	6.065
8	8.071
10	10.020
12	12.090

Πίνακας 11.4 (Πηγή: Fox & McDonald “Introduction to Fluid Mechanics”, 2nd ed.)

Διάγραμμα Moody

$$f_D(Re, k/D)$$



5. Βαλβίδες και Εξαρτήματα

Τυπικά ισοδύναμα μήκη (λ/D) για βαλβίδες και εξαρτήματα

Πίνακας 11.3

Εξάρτημα	Περιγραφή	Ισοδύναμο μήκος λ/D
Σφαιρική βαλβίδα (Globe valve)	Πλήρως ανοικτή	350
Βαλβίδα τύπου πύλης (Gate valve)	Πλήρως ανοικτή	13
	¾ ανοικτή	35
	½ ανοικτή	160
	¼ ανοικτή	900
Βαλβίδα ελέγχου (Check valve)		50-100
Αγκώνας κανονικός, 90 deg (Standard elbow)		30
Αγκώνας κανονικός, 45 deg		16
Αγκώνας 90 deg (Elbow)	Μακριάς ακτίνας (Long radius)	20
Δρομικός αγκώνας, 90 deg (Street elbow)		50
Δρομικός αγκώνας, 45 deg		26
Ταυ (tau)	Ευθύγραμμη ροή	20
	Κλαδική ροή	60
Επιστροφική καμπή (return bend)	Στροφή 180 deg (πιο “ανοικτή” από δύο κανονικούς αγκώνες)	50