

Άσκηση 5: “Αριθμός Reynolds – Στρωτή / μεταβατική / τυρβώδης ροή”

Αντικείμενο: Μέτρηση του αριθμού Reynolds και φαινομενολογική παρατήρηση των χαρακτηριστικών της στρωτής, της μεταβατικής και της τυρβώδους ροής

Αντικείμενο

Αντικείμενο της Άσκησης είναι η κατανόηση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων ροής (στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης) που μπορεί να αναπτυχθούν σε ένα κυλινδρικό σωλήνα.

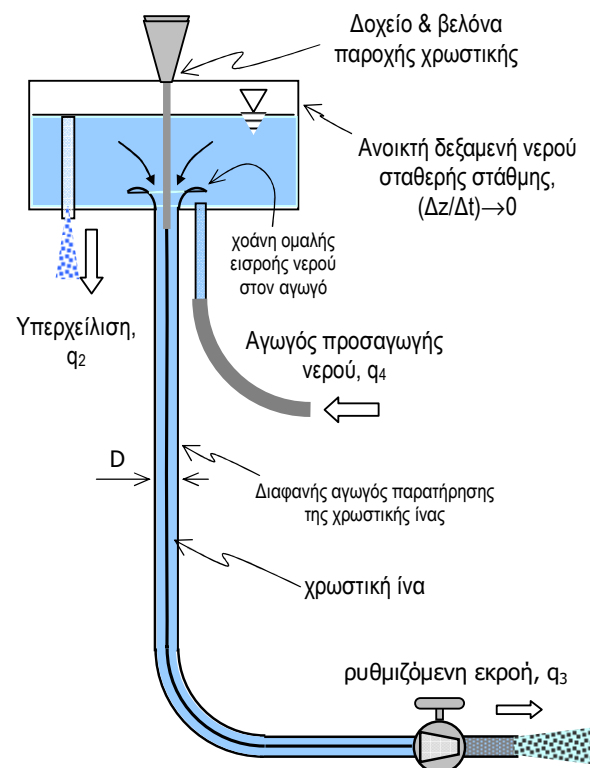
Βασική θεωρία

Ο αριθμός **Reynolds**, Re , είναι ένας αδιάστατος αριθμός ο οποίος δίνει τη σχέση μεταξύ δυνάμεων αδρανείας και δυνάμεων τριβής σε μια ροή (υγρού ή αερίου) και ορίζεται ως

$$\frac{\{\text{αδρανειακές δυνάμεις}\}}{\{\text{ιξώδεις δυνάμεις}\}} \equiv Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του υγρού (ή του αερίου) και μ το δυναμικό ιξώδες του ενώ U είναι η μέση ταχύτητα της ροής και L ένα χαρακτηριστικό μήκος της ροής.

Η ροή μπορεί να πραγματοποιείται μέσα σε ένα αγωγό ή γύρω από ένα ακίνητο σώμα. Στην πρώτη περίπτωση το χαρακτηριστικό μήκος είναι η διάμετρος D του (κυλινδρικού) αγωγού (ή η ισοδύναμη υδραυλική διάμετρος για αγωγό οποιουδήποτε σχήματος). Στη δεύτερη περίπτωση ως χαρακτηριστικό μήκος μπορεί να τεθεί μια κύρια διάσταση του σώματος, π.χ. το μήκος ή το πλάτος του. Στην παρούσα εργαστηριακή άσκηση θα μελετήσουμε τη ροή υγρού (νερού) σε ένα κυλινδρικό σωλήνα. Περισσότερα για τον αριθμό Reynolds δίνονται στο Εκπαιδευτικό Υλικό του e-class της Υδραυλικής Ι (Θεωρία)

Πειραματική διάταξη & διαδικασία

Σε ένα διαφανή (υάλινο) αγωγό εσωτερικής διαμέτρου, D , ρέει νερό με σταθερή παροχή, το οποίο διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία. Λίγο μετά την είσοδο του νερού στον αγωγό παρέχεται χρωστική ουσία (μελάνι) με τη βοήθεια σύριγγας παράλληλης στον άξονα του αγωγού (βλέπε διπλανό σκαρίφημα). Η παροχή του νερού, q , προσδιορίζεται από το χρόνο, Δt , που διαρκεί η παροχέτευση δια μέσου του αγωγού γνωστού όγκου νερού ΔV , χρησιμοποιώντας τον ορισμό της μέσης παροχής όγκου, $q = \Delta V / \Delta t$. Το είδος της ροής (στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης) χαρακτηρίζεται από τη διασπορά της ίνας του μελανιού κατά μήκος του αγωγού. Η ροή φωτογραφίζεται και σημειώνονται οι τιμές T_i , της θερμοκρασίας του νερού, και Δt_i , του χρόνου που διήρκεσε η παροχέτευση γνωστού όγκου νερού, ΔV , δια μέσου του αγωγού.

Η μελέτη της μετάβασης του είδους μιας ροής από στρωτή σε μεταβατική σε τυρβώδη, επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ροών για

διάφορους συνδυασμούς θερμοκρασίας και παροχής. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι ροές που προκύπτουν από συνδυασμούς 5 διαφορετικών τιμών θερμοκρασίας νερού, T_i ($i=1,5$), με 5 διαφορετικές τιμές της παροχής, q_j ($j=1,5$). Δηλαδή, για κάθε τιμή της θερμοκρασίας νερού δημιουργούνται 5 ροές κάθε μια με διαφορετική παροχή. Έτσι, συνολικά εξετάζονται $5 \times 5 = 25$ διαφορετικές ροές.

Οι ροές διαμορφώνονται και εξετάζονται από μια ομάδα φοιτητών. Για κάθε ροή, ένας φοιτητής καταγράφει τις θερμοκρασίες, T_i , ένας φοιτητής καταγράφει τους χρόνους παροχέτευσης, t_j , και ένας φοιτητής φωτογραφίζει τη ροή που επικρατεί σε κάθε ροή (δηλαδή σε κάθε συνδυασμό $\{\Delta t_j, T_i\}$).

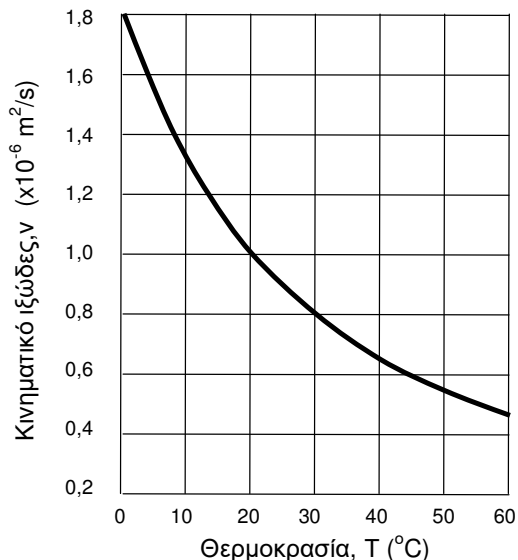
Ενδεικτικά βίντεο μεταβατικής ροής σε σωλήνα – παρατήρηση της γραμμής χρώσης

http://users.teiath.gr/marval/CIE_HydroLab/TransientFlow_Reynolds_1.wmv

http://users.teiath.gr/marval/CIE_HydroLab/TransientFlow_Reynolds_2.wmv

Δεδομένα

Δίνονται η διάμετρος του αγωγού, $D=12\text{mm}$, καθώς και το διάγραμμα της Εικόνας 1 από όπου προσδιορίζεται το κινηματικό ιξώδες του νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας του, $\nu(T)$.



Εικόνα 1 Διάγραμμα μεταβολής του κινηματικού ιξώδους, ν , του νερού συναρτήσει της θερμοκρασίας του, T .

Παρακάτω δίνονται 2 ομάδες μετρήσεων. Κάθε ομάδα αποτελείται από 5 μετρημένες τιμές. Μία ομάδα τιμών αναφέρεται στις μετρήσεις T_i της θερμοκρασίας του νερού, και μία ομάδα τιμών στις μετρήσεις Δt_j , του χρονικού διαστήματος που διήρκεσε η παροχέτευση γνωστού όγκου νερού $\Delta V=600\text{ml}$, δια μέσου του αγωγού.

$$\Delta t_j(\text{s}) = \{8, 15, 20, 30, 50\} \text{ και}$$

$$T_i(^{\circ}\text{C}) = \{6, 10, 20, 30, 55\}, \quad i, j=1 \text{ έως } 5$$

Δημιουργήθηκαν ροές για όλους τους (25) συνδυασμούς θερμοκρασίας και παροχής και πάρθηκαν φωτογραφικά στιγμιότυπα Φ_{ij} της ροής για κάθε συνδυασμό $\Delta t_j, T_i$ (οι δείκτες i, j παίρνουν ακέραιες τιμές από 1 έως 5).

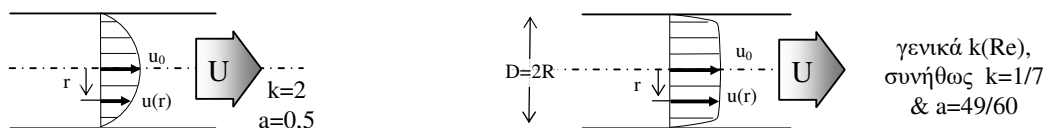
Οι φωτογραφίες των ροών κατάχθηκαν σε 3 κατηγορίες, οι οποίες απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 2. Επίσης, το είδος και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της ροής που παρατηρείται για διάφορες περιοχές τιμών του αριθμού Re δίνονται κατ'αντιστοιχία στον Πίνακα 1.



Εικόνα 2 Οι τρεις κλάσεις στις οποίες κατατάχθηκαν οι φωτογραφίες της ροής για διάφορες τιμές παροχής και θερμοκρασίας.

Πίνακας 1 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των τριών διαφορετικών τύπων ροής

A	B	Γ
Re < ~2000	~2000 < Re < ~4000	~4000 < Re
Στρωτή ροή	Μεταβατική ροή	Τυρβώδης ροή
<p>Εξ αιτίας των χαμηλών ταχυτήτων οι αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο υγρό είναι μικρότερες σε ένταση από τις εσωτερικές τριβές του υγρού. Έτσι το ιξώδες αποσβένει άμεσα (εν τη γενέσει τους) τυχόν αστάθειες (μικρο δίνες) και η ροή πραγματοποιείται σε επάλληλες στρώσεις. Ιδιαίτερα σε κυλινδρικούς αγωγούς οι στρώσεις είναι ομοαξονικοί κύλινδροι. Δεν υπάρχει μεταφορά μάζας μεταξύ των στρώσεων (κάθετα στη διεύθυνση ροής) και η ταχύτητα κάθε σωματιδίου υγρού προσδιορίζεται από ένα δάνυσμα σταθερής διεύθυνσης - παράλληλο στη ροή.</p> <p>Η χρωστική ίνα παραμένει αναλλοίωτη (περίπου ευθύγραμμη με ελάχιστες αναταράξεις εξ αιτίας γεωμετρικών διαταραχών ή ταλαντώσεων του αγωγού) και τα όρια της είναι ευδιάκριτα. Μόνο αρκετά μακριά από το σημείο εισόδου στη ροή θολώνει και βαθμιαία διαχέεται στο ρευστό εξ αιτίας μοριακής διάχυσης και μόνο.</p>	<p>Ενδιάμεση κατάσταση όπου οι αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο υγρό είναι παρόμοιες σε ένταση με τις εσωτερικές τριβές του υγρού (ιξώδες). Αποτέλεσμα είναι όσες ροϊκές αστάθειες (δίνες) δημιουργούνται στο υγρό να αποσβένονται από το ιξώδες του σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Η μεταφορά μάζας ρευστού κάθετα στη ροή παραμένει σε χαμηλά σχετικά επίπεδα.</p> <p>Η χρωστική ίνα συστρέφεται ελαφρώς αλλά παραμένει ενιαία με αυξομειούμενο πάχος και ευδιάκριτο σχήμα. Το βαθμιαίο θόλωμα της μακριά από το σημείο εισόδου οφείλεται σε μοριακή διάχυση (όπως και στη στρωτή ροή)</p>	<p>Εξ αιτίας των υψηλών ταχυτήτων του υγρού οι αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτό είναι μεγάλες σε ένταση συγκρινόμενες με τις εσωτερικές τριβές του υγρού (ιξώδες). Αποτέλεσμα είναι η αδυναμία του ιξώδους του υγρού να αποσβέσει όσες αστάθειες (δίνες) δημιουργούνται και η ροή οδηγείται σε πλήρη αστάθεια (τύρβη). Το κύριο χαρακτηριστικό είναι η έντονη μεταφορά μάζας υγρού ακόμα και σε διευθύνσεις κάθετες στη ροή. Έτσι, μόνο η χρονομέση ταχύτητα κάθε σωματιδίου υγρού προσδιορίζεται από δάνυσμα σταθερής διεύθυνσης παράλληλη στη ροή.</p> <p>Η χρωστική ίνα αμέσως μετά την εισόδο της στη ροή διαχέεται εξ αιτίας των έντονων αναταράξεων και της τυρβώδους μεταφοράς μάζας υγρού.</p> <p>Στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές -κυρίως ροή σε σωληνώσεις- αναπτύσσονται τυρβώδεις ροές.</p>



Κατανομή ταχύτητας σε κυλινδρικό αγωγό: $u(r) = u_0 \left(1 - (r/R)^k\right)$ και μέση ταχύτητα: $U = au_0$ ανάλογα με το είδος της ροής

Ζητούμενο και οδηγίες εκπόνησης άσκησης

Οι Πίνακες 2^A & 2^B που ακολουθούν διαμορφώνονται με βάση όλους τους συνδυασμούς χρόνων παροχέτευσης, Δt , και θερμοκρασιών, T , των ροών που εξετάστηκαν. Κάθε κελί αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή του αριθμού Reynolds ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες Δt & T . Ο Πίνακας 2^A πρέπει να συμπληρωθεί με τις τιμές του αριθμού Reynolds, ο Πίνακας 2^B πρέπει να συμπληρωθεί, επιλέγοντας έναν από τους χαρακτηρισμούς Α, Β, Γ σε κάθε κενό κελί, ανάλογα με το είδος της ροής που επικρατεί κάθε φορά (τον οποίο θα εκτιμήσετε εσείς υπολογίζοντας τον αντίστοιχο αριθμό Re_{ji}) και την κατάταξη των διαφορετικών τύπων ροής σύμφωνα με την Εικόνα 2 και τον Πίνακα 1.

Πίνακας 2A – Αριθμός Reynolds για διαφορετικές συνθήκες ροής

		Θερμοκρασία, T (°C)				
		6	15	30	45	55
Χρόνος παροχέτευσης, Δt (s)	8,0					
	15,0					
	20,0					
	30,0					
	50,0					

Πίνακας 2B – Χαρακτηρισμός τύπου ροής (Α: στρωτή, Β: μεταβατική, Γ: τυρβώδης)

		Θερμοκρασία, T (°C)				
		6	15	30	45	55
Χρόνος παροχέτευσης, Δt (s)	8,0					
	15,0					
	20,0					
	30,0					
	50,0					

Πρέπει πρώτα να εκτιμηθεί η τιμή του αριθμού Reynolds, Re_{ji} , που επικρατεί σε κάθε ροή, $\{\Delta t_j, T_j\}$. Σύμφωνα με τον ορισμό του Re που δόθηκε παραπάνω πρέπει να υπολογισθούν:

- η μέση ταχύτητα $U_j = \{\text{παροχή}\} / \{\text{διατομή αγωγού}\} = q_j / A = 4q_j / (\pi D^2)$
- η παροχή $q_j = \{\text{όγκος που παροχετεύεται}\} / \{\text{χρονικό διάστημα παροχέτευσης}\} = \Delta V / \Delta t_j$
- το κινηματικό ιξώδες ν_i , το οποίο προσδιορίζεται από το διάγραμμα της Εικόνας 1 συναρτήσει της θερμοκρασίας T_i .

Δώστε σε ένα φύλλο έργου μια συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήσατε. Μπορείτε να σχεδιάσετε και χρησιμοποιήσετε και δικούς σας βοηθητικούς /ενδιάμεσους πίνακες. Επειδή η διαδικασία υπολογισμού του Re είναι επαναλαμβανόμενη (25 φορές) συνιστάται να χρησιμοποιήσετε κάποιο υπολογιστικό πακέτο (π.χ. Excel).

ΠΡΟΣΟΧΗ - Κάθε εργασία θα παραδοθεί στο εργαστήριο και αφού σφραγισθεί θα επιστραφεί. Κάθε σφραγισμένη εργασία θα φυλαχθεί σε φάκελο μέχρι το τέλος του εξαμήνου οπότε και θα την υποβληθεί μαζί με το τεστ του Εργαστηρίου. Το Εξώφυλλο της εργασίας υπάρχει στα Έγγραφα (https://eclass.teiath.gr/modules/document/file.php/PEY134/Hydraulics_I_Lab_CoverPage.doc)