

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΑΥΤΗΣ**

Διευθυντής: Διονύσιος-Ελευθ. Π. Μάργαρης, Αναπλ. Καθηγητής

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Περιεχόμενα

Αντικείμενο και σκοπός του πειράματος

Θεωρία

Ορισμοί μεγεθών του οριακού στρώματος

Στρωτό οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας – λύση Blasius

Τυρβώδες οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας

Πειραματική εγκατάσταση – όργανα και υλικά

Πειραματική Διαδικασία

Αποτελέσματα

Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Ερωτήσεις

ΠΑΤΡΑ 2014

ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ II

ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΡΟΗ: ΑΣΚΗΣΗ 5^η: Οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας

Αντικείμενο και σκοπός του πειράματος

Το αντικείμενο της εργαστηριακής άσκησης είναι η διερεύνηση του οριακού στρώματος λείας επίπεδης πλάκας. Γίνεται μέτρηση της ταχύτητας του αέρα μακριά από την πλάκα (αδιατάρακτη ροή) και των κατανομών της ταχύτητας κατά μήκος της πλάκας.

Σκοπός του πειράματος είναι η πειραματική επαλήθευση θεωρητικών δεδομένων που αναφέρονται στο οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας. Τέτοια είναι:

1. Ο τοπικός συντελεστής αντίστασης στο στρωτό και τυρβώδες οριακό στρώμα.
2. Ο ολικός συντελεστής αντίστασης.
3. Η κατανομή της ταχύτητας στο στρωτό και τυρβώδες οριακό στρώμα.
4. Η κατανομή του πάχους του οριακού στρώματος.

Θεωρία

Ορισμοί μεγεθών του οριακού στρώματος

Όταν το ρευστό ρέει κατά μήκος μίας επίπεδης πλάκας η ταχύτητά του λόγω ύπαρξης του ιξώδους μεταβάλλεται κατά τη διεύθυνση y κάθετα στη διεύθυνση ροής από την τιμή 0 στην επιφάνεια της πλάκας μέχρι U στην κύρια μάζα του ρευστού. Η μεταβολή du/dy συντελείται μέσα σε μια απόσταση από τη στερεή επιφάνεια στην οποία είναι $u = U$. Η απόσταση αυτή είναι το **πάχος του οριακού στρώματος δ** . Με αυστηρή θεώρηση το οριακό στρώμα δεν έχει συγκεκριμένο πάχος επειδή η εξίσωση ταχυτήτων $u = U$ συντελείται στο άπειρο. Για πρακτικούς λόγους ορίζεται ως πάχος του οριακού στρώματος δ η απόσταση όπου η ταχύτητα u διαφέρει κατά 1% από την ταχύτητα του απέραντου ροϊκού πεδίου, δηλαδή όταν $u = 0.99U$. Συμβολικά γράφουμε:

$$\delta = y_{u=0.99U} \quad (5.1)$$

Ο ανωτέρω ορισμός του οριακού στρώματος είναι γενικά ασαφής χωρίς απόλυτη φυσική σημασία. Πιο συγκεκριμένα όμως ορίζονται τα εξής πάχη: α) το πάχος μετάθεσης δ_1 , β) το πάχος ορμής δ_2 και γ) το πάχος απώλειας ενέργειας δ_3 (βλέπε Σχήμα 5.1). Η φυσική σημασία των παραπάνω παχών είναι:

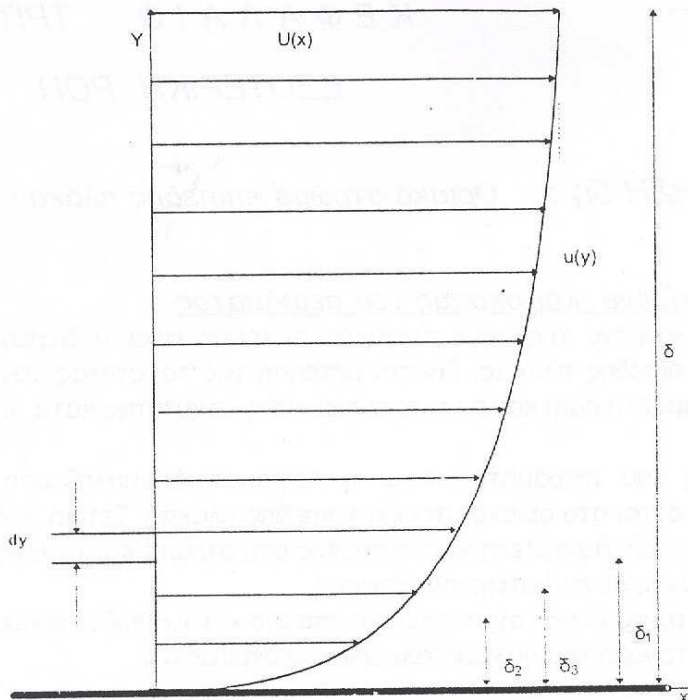
- δ_1 : είναι το πάχος του στρώματος κατά το οποίο μετατίθεται η εξωτερική ροή για να διατηρηθεί η συνέχεια της μάζας μέσα στο οριακό στρώμα πάχους δ .

Η εφαρμογή της εξίσωσης της συνέχειας με τον ορισμό αυτό δίνει για μοναδιαίο πλάτος:

$$\int_0^{\delta} (U - u(y)) dy = \int_0^{\delta_1} U dy = U \delta_1 \quad (5.2)$$

ή τελικά

$$\delta_1 = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (5.3)$$



Σχήμα 5.1: Πάχος μετάθεσης, απώλειας ορμής και απώλειας ενέργειας σε σύγκριση με το πάχος του οριακού στρώματος.

- δ_2 : είναι το ιδεατό πάχος στρώματος στο οποίο η ροή ταχύτητας U έχει ορμή ίση με το ποσόν κατά το οποίο ελαττώνεται η ορμή της ροής στο πραγματικό οριακό στρώμα πάχους δ , δηλαδή:

$$U \int_0^{\delta_2} \rho U dy = (U - u) \int_0^{\delta} \rho U dy \quad (5.4)$$

Άρα:

$$\delta_2 = \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (5.5)$$

- δ_3 : ορίζεται σαν το πάχος του ιδεατού στρώματος ενέργειας ίσης με την απώλεια στο πραγματικό οριακό στρώμα πάχους δ δηλαδή:

$$U^3 \delta_3 = \int_0^{\infty} u(U^2 - u^2) dy \quad (5.6)$$

Ή

$$\delta_3 = \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u^2}{U^2}\right) dy \quad (5.7)$$

Η εικόνα που παρουσιάζει το οριακό στρώμα πλάκας, φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Από την ακμή προσβολής της πλάκας το οριακό στρώμα είναι στρωτό. Ορίζεται ο αριθμός Reynolds με μήκος αναφοράς το τρέχον μήκος x :

$$Re_{\infty x} = \frac{\rho_{\infty} u_{\infty} x}{\mu_{\infty}} \quad (5.8)$$

Ο αριθμός Re_x αυξάνει με την απόσταση x από την ακμή. Μετά από μια ορισμένη κρίσιμη τιμή του Re το οριακό στρώμα γίνεται τυρβώδες αφού μεσολαβήσει μια μεταβατική περιοχή. Ο κρίσιμος αριθμός Re για την πλάκα είναι:

$$Re_{cr} = 5 \times 10^5 \quad (5.9)$$

Η κίνηση του ρευστού στην τυρβώδη ροή είναι ακανόνιστη και η συνισταμένη ταχύτητα αποτελείται από τη μέση ταχύτητα u και την διακυμενόμενη u' . Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας μηδενίζονται στην περιοχή που γειτονεύει με το τοίχωμα, επειδή το ρευστό προσκολλάται σ' αυτό. Γι' αυτό και στην τυρβώδη περιοχή σχηματίζεται το λεγόμενο στρωτό υπόστρωμα ή ιξώδες υπόστρωμα μεταξύ του τυρβώδους οριακού στρώματος και του τοιχώματος.

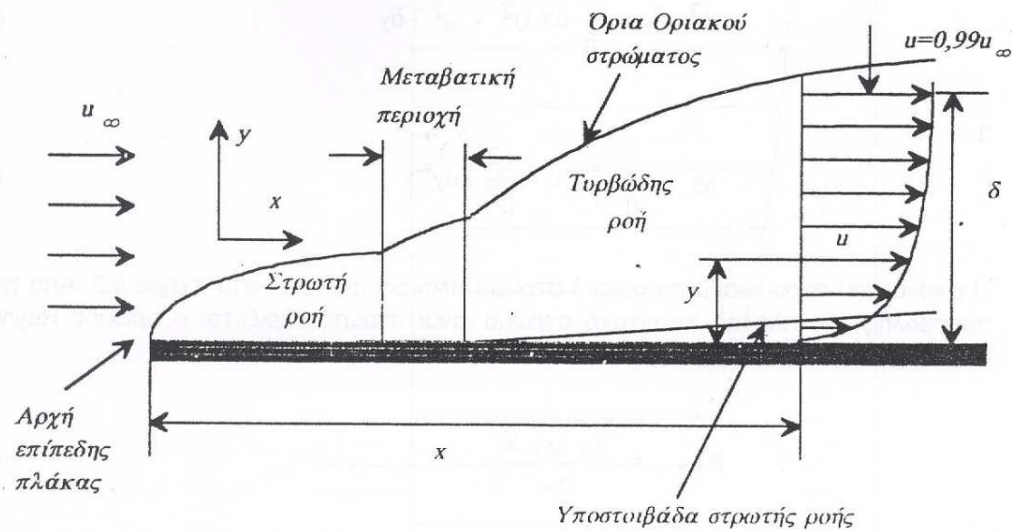
Το πάχος του οριακού στρώματος είναι μικρό και μπορεί να ορισθεί συμβατικά με τη σχ.(5.10). Δηλαδή σαν πάχος του οριακού στρώματος δ ορίζεται η απόσταση από το τοίχωμα όπου η ταχύτητα u διαφέρει κατά 1% από την ταχύτητα του απέραντου ροϊκού πεδίου.

$$\delta = y_{u=0.99U} \quad (5.10)$$

Από τη θεωρία προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα ρευστά με μεγάλο ιξώδες σχηματίζουν οριακό στρώμα μεγαλύτερου πάχους από ρευστά με μικρό ιξώδες. Γενικά ισχύει η αναλογία:

$$\delta \propto \left(\frac{\mu_{\infty} L}{\rho_{\infty} u_{\infty}}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{L}{\sqrt{Re_{\infty} L}} \quad (5.11)$$

Η αναλογία αυτή εκφράζει ότι για πλάκα σταθερού μήκους L το πάχος του οριακού στρώματος μειώνεται με αυξανόμενο αριθμό Reynolds. Όταν ο αριθμός Reynolds (Re) μένει σταθερός το πάχος δ αυξάνει με το μήκος L της πλάκας.



Σχήμα 5.2: Σχηματική απόδοση ανάπτυξης του οριακού στρώματος.

Στρωτό οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας – λύση Blasius

Για να υπολογιστεί η θεωρητική κατανομή της ταχύτητας στο στρωτό οριακό στρώμα ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Η εγκάρσια διάσταση y γίνεται αδιάστατη με το πάχος του οριακού στρώματος $\delta(x)$ και εισάγεται ο μετασχηματισμός:

$$\eta = y \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} \quad (5.12)$$

όπου: ν το κινηματικό ιξώδες, x η απόσταση από την άκρη της πλάκας, u_∞ η ταχύτητα της απέραντης ροής

Εισάγεται η ροϊκή συνάρτηση $\psi(x,y)$ και σε συνδυασμό με την αδιάστατη συντεταγμένη η προκύπτει η αδιάστατη ροϊκή συνάρτηση $f(\eta)$. Τελικά η εξίσωση της ορμής μετασχηματίζεται στη μη γραμμική συνήθη διαφορική εξίσωση τρίτου βαθμού: $f f'' + 2 f''' = 0$. Τη λύση της παραπάνω εξίσωσης πέτυχε ο Blasius με τη βοήθεια σειρών. Οι ακριβείς τιμές των f , f' και f'' δίνονται στον Πίνακα 5.1. Γνωρίζοντας τη συνάρτηση $f'(\eta)$ υπολογίζεται εύκολα η κατανομή της ταχύτητας αφού είναι $f' = \frac{u}{u_\infty}$.

Για το πάχος του οριακού στρώματος χρησιμοποιείται ο ορισμός, ότι δηλαδή είναι αυτή η απόσταση y από την επιφάνεια, όπου η ταχύτητα γίνεται ίση με $u = 0.99 u_\infty$

$$\delta = y 0.99 \sqrt{\frac{\nu x}{u_\infty}} = 4.92 \sqrt{\frac{\nu x}{u_\infty}} = \frac{5 x}{\sqrt{Re_x}} \quad (5.13)$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1

Η συνάρτηση $f(\eta)$ του οριακού στρώματος επίπεδης πλάκας κατά τον Howarth (λύση Blasius)

$\eta = y \sqrt{u_{\infty}/\nu x}$	f	$f' = u/u_{\infty} = u$	f''
0.0	0.00000	0.0000	0.33206
0.2	0.00664	0.06641	0.33199
0.4	0.02656	0.13277	0.33147
0.6	0.05974	0.19894	0.33008
0.8	0.10611	0.26471	0.32739
1.0	0.16557	0.32979	0.32301
1.2	0.23795	0.39378	0.31659
1.4	0.32298	0.45627	0.30787
1.6	0.42032	0.51676	0.29667
1.8	0.52952	0.57477	0.28293
2.0	0.65003	0.62977	0.26675
2.2	0.78120	0.68132	0.24835
2.4	0.92230	0.72899	0.22809
2.6	1.07252	0.77246	0.20646
2.8	1.23099	0.81152	0.18401
3.0	1.39682	0.84605	0.16136
3.2	1.56911	0.87609	0.13913
3.4	1.74696	0.90177	0.11788
3.6	1.92954	0.92333	0.09809
3.8	2.11605	0.94112	0.08013
4.0	2.30576	0.95552	0.06424
4.2	2.49806	0.96696	0.05052
4.4	2.69238	0.97587	0.03897
4.6	2.88826	0.98269	0.02948
4.8	3.08534	0.98779	0.02187
5.0	3.28329	0.99155	0.01591
5.2	3.48189	0.99425	0.01134
5.4	3.68094	0.99616	0.00793
5.6	3.88031	0.99748	0.00543
5.8	4.07990	0.99838	0.00365
6.0	4.27964	0.99898	0.00240
6.2	4.47948	0.99937	0.00155
6.4	4.67939	0.99961	0.00098
6.6	4.87931	0.99977	0.00061
6.8	5.07928	0.99987	0.00037
7.0	5.27926	0.99992	0.00022
7.2	5.47925	0.99996	0.00013
7.4	5.67924	0.99998	0.00007
7.6	5.87923	0.99999	0.00004
7.8	6.07923	1.00000	0.00002
8.0	6.27923	1.00000	0.00001
8.2	6.47923	1.00000	0.00001
8.4	6.67923	1.00000	0.00000
8.6	6.87923	1.00000	0.00000

Δίνεται ότι η ρευστοδυναμική αντίσταση της μιας πλευράς της πλάκας είναι:

$$D = 0.664 b \sqrt{u_{\infty}^3 \mu \rho L} \quad (5.14)$$

Εισάγεται η αδιάστατη διατμητική τάση C_F , δηλαδή ο τοπικός συντελεστής αντίστασης:

$$C_F = \frac{\tau_0}{\frac{\rho u_{\infty}^2}{2}} \quad \rightarrow \quad C_F = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}} \quad (5.15)$$

Ο ολικός συντελεστής αντίστασης C_f είναι:

$$C_f = \frac{2D}{\frac{A \rho u_{\infty}^2}{2}} \quad (5.16)$$

με $A = 2bL$, για περιρροή της πλάκας και από τις δύο πλευρές. Άρα,

$$C_f = \frac{1.328}{\sqrt{Re_L}} \quad (5.17)$$

όπου $Re_L = \frac{\rho u_{\infty} L}{\mu}$.

Οι τιμές του Re_L πρέπει να είναι μικρότερες του Re_{cr} , δηλαδή: $Re_L < Re_{cr} = 5 \times 10^5$ για να μένει η ροή στρωτή. Το πάχος μετάθεσης δ_1 δίνεται από την παρακάτω σχέση, η οποία προκύπτει από τη λύση Blasius:

$$\delta_1 = 1.7208 \sqrt{\frac{vx}{u_{\infty}}} \quad (5.18)$$

Το πάχος απώλειας ορμής είναι:

$$\delta_2 = 0.664 \sqrt{\frac{vx}{u_{\infty}}} \quad (5.19)$$

Τυρβώδες οριακό στρώμα επίπεδης πλάκας

Η μετάβαση από το στρωτό στο τυρβώδες οριακό στρώμα γίνεται όταν ο αριθμός Reynolds ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή $Re_{cr} = 5 \times 10^5$. Η θεωρητική κατανομή της ταχύτητας δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{u}{U} = \frac{u}{u_{\infty}} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (5.20)$$

Όπου $\delta = \delta(x)$ το πάχος του οριακού στρώματος και $n=7$.

Το πάχος απώλειας ορμής $\delta_2(x)$ είναι:

$$\delta_2(x) = \int_{y=0}^{y=\delta(x)} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (5.21)$$

Και αντικαθιστώντας την κατανομή της ταχύτητας γίνεται:

$$\delta_2 = \frac{\delta_n}{n-1} - \frac{\delta_n}{n+2} = \frac{\delta_n}{(n+1)(n-2)} \quad (5.22)$$

Με $n = 7$ ο λόγος του πάχους απώλειας ορμής προς το πάχος του οριακού στρώματος παίρνει την τιμή:

$$\frac{\delta_2}{\delta} = \frac{7}{72} \quad (5.23)$$

Ανάλογα προκύπτει και το πάχος μετάθεσης:

$$\frac{\delta_1}{\delta} = \frac{1}{n+1} = \frac{1}{8} \quad (5.24)$$

Από την εξίσωση ορμής έχουμε:

$$U^2 \frac{d\delta_2(x)}{dx} = \frac{\tau_0(x)}{\rho} \quad (5.25)$$

Η διατμητική τάση τ_0 δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_0(x) = 0.0225 \rho U^2 \left(\frac{v}{U\delta(x)}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (5.26)$$

Η διαφορική εξίσωση γίνεται:

$$\frac{7}{72} \frac{d\delta(x)}{dx} = 0.0225 \left(\frac{v}{U\delta(x)}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (5.27)$$

Με αρχική συνθήκη $\delta = 0$ για $x = 0$ η ολοκλήρωση έχει σαν αποτέλεσμα:

$$\delta_1(x) = 0.370 x \left(\frac{Ux}{v}\right)^{-0.2} \quad (\alpha) \quad (5.28)$$

$$\delta_2(x) = 0.036 x \left(\frac{Ux}{v}\right)^{-0.2} \quad (\beta)$$

Σύγκριση με τη στρωτή ροή δείχνει την έντονη αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος στην τυρβώδη ροή.

$$\delta_{\sigma\tau\rho} \propto x^{0.5} \quad \delta_{\tau\rho} \propto x^{0.8} \quad (5.29)$$

Η αντίσταση για μονόπλευρη ροή πλάκας μήκους L και πλάτους b είναι:

$$D = b\rho U^2 \delta_2(L) = 0.036U^2 \rho bL \left(\frac{UL}{\nu}\right)^{-0.2} \quad (5.30)$$

Όπως για στρωτό οριακό στρώμα έτσι κι εδώ εισάγονται ο τοπικός και ο ολικός συντελεστής αντίστασης C_F και C_f αντίστοιχα:

$$C_F = 0.0576 \left(\frac{U_x}{\nu}\right)^{-0.2} \quad (5.31)$$

$$C_f = 0.0720 \left(\frac{UL}{\nu}\right)^{-0.2} \quad (5.32)$$

Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι για πλάκα με τυρβώδες οριακό στρώμα από την αρχή, δηλαδή για αριθμούς Reynolds $Re > Re_{cr}$ οι τιμές των C_F και C_f γίνονται:

$$C_F = \frac{0.0296}{Re_x^{0.2}} \quad (5.33)$$

$$C_f = \frac{0.0740}{Re_x^{0.2}} \quad (5.34)$$

Για αριθμούς Reynolds: $Re \ 5 \times 10^5 < Re < 10^7$. Για την ίδια περιοχή ο Prandtl εισήγαγε τη σχέση του C_f :

$$C_f = \frac{0.074}{Re_x^{0.2}} - \frac{A}{Re_L} \quad (5.35)$$

Το μέγεθος A είναι συνάρτηση του κρίσιμου αριθμού Re και δίνεται από τον παρακάτω πίνακα. Η σχέση αυτή περιέχει τον διορθωτικό παράγοντα $-A/Re$ ο οποίος λαμβάνει υπόψη ότι το αρχικό τμήμα του οριακού στρώματος είναι στρωτό αν η πλάκα έχει μια καλά στρογγυλεμένη ακμή.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2

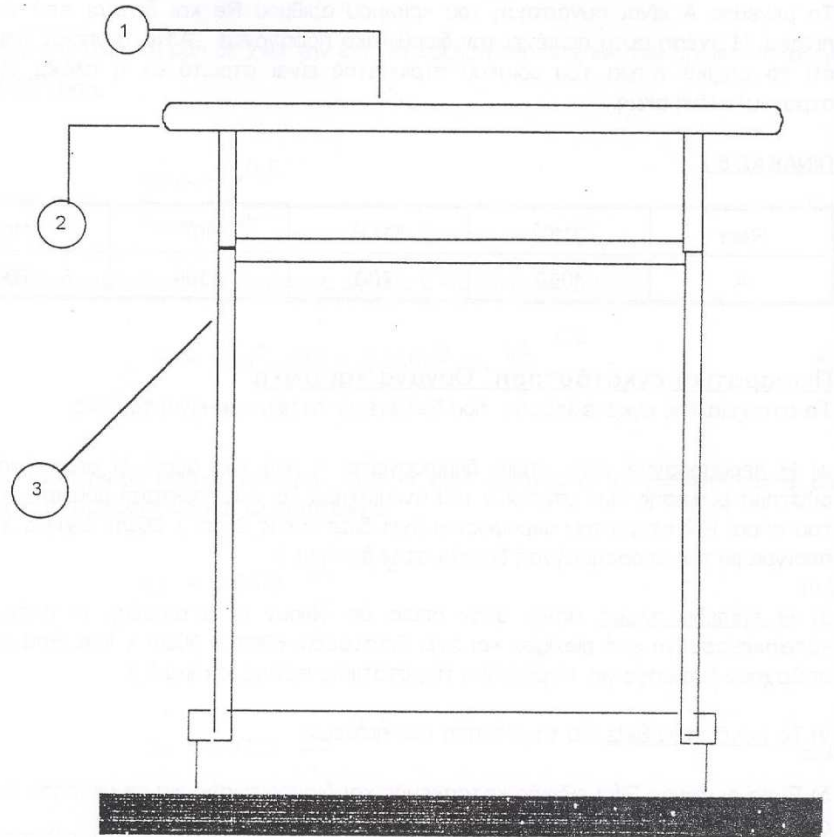
Re_{cr}	3×10^5	5×10^5	10^6	3×10^6
A	1050	1700	3300	8700

Πειραματική εγκατάσταση – όργανα και υλικά

Τα στοιχεία της εγκατάστασης που διεξάγεται το πείραμα είναι τα εξής:

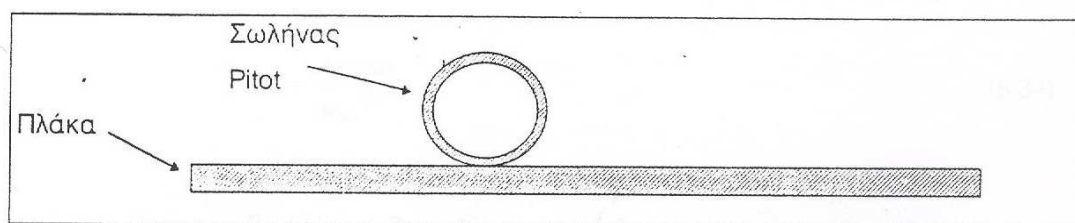
- 1) Η αεροσήραγγα στην οποία δημιουργείται η ροή του αέρα. Η αεροσήραγγα διαθέτει σύστημα ρύθμισης των στροφών του ανεμιστήρα και κατ' επέκταση ρύθμιση της ταχύτητας του αέρα. Η διατομή του ακροφυσίου έχει διαστάσεις 40 cm x 40 cm.
- 2) Η επίπεδη πλάκα πάνω στην οποία θα γίνουν οι μετρήσεις. Η πλάκα αυτή είναι κατασκευασμένη από Plexiglas και έχει διαστάσεις 60cm x 30cm x 1cm. Επάνω στην πλάκα υπάρχουν δύο οπές για τη μέτρηση της στατικής πίεσης (Σχήμα 5.3).
- 3) Το ψηφιακό (ηλεκτρονικό) μανόμετρο για τη μέτρηση των πιέσεων.

- 4) Ένας σωλήνας Pitot ειδικής κατασκευής και διαμόρφωσης για τη μέτρηση της πίεσης στο οριακό στρώμα (Σχήμα 5.4).
- 5) Τραπέζι με μεταφορικούς κοχλίες για τη μετατόπιση του σωλήνα Pitot κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση.
- 6) Ένα ωρολογιακό μικρόμετρο τοποθετημένο στη μεταφορική τράπεζα, για τη μέτρηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων του σωλήνα Pitot (ακρίβεια 0.01mm).



Σχήμα 5.3: Επίπεδη πλάκα μέτρησης οριακού στρώματος.

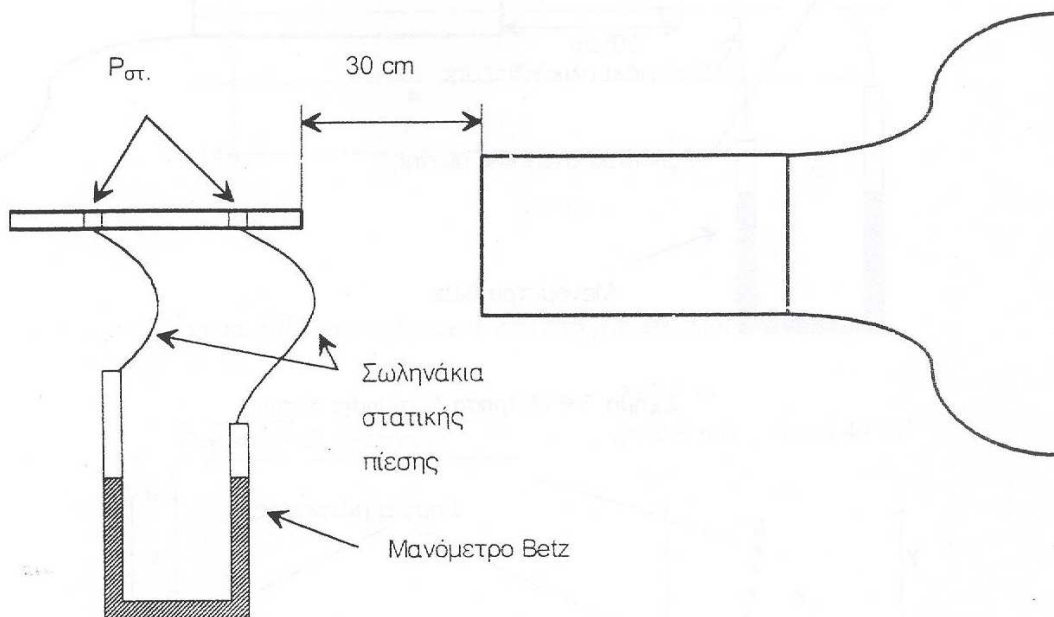
(1. Οπή μέτρησης πίεσης 2. Επίπεδη πλάκα, 3. Βάση στήριξης)



Σχήμα 5.4: Σωλήνας Pitot.

Πειραματική Διαδικασία

Τοποθετείται η πλάκα σε απόσταση 30 cm μπροστά από την αεροσήραγγα. Μηδενίζεται το μανόμετρο, έτσι ώστε η ένδειξη να δείχνει μηδέν όταν πρόκειται για την ατμοσφαιρική πίεση. Τίθεται σε λειτουργία ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας μεταβάλλοντας κλιμακωτά τον αριθμό στροφών του στροφείου. Για την αποφυγή υπερφόρτωσης του ηλεκτροκινητήρα η εκκίνηση γίνεται με μικρό αριθμό στροφών. Βεβαιωνόμαστε ότι η πλάκα είναι οριζόντια συνδέοντας τα σωληνάκια του ψηφιακού μανομέτρου στις δύο οπές στατικής πίεσης που υπάρχουν επάνω στην πλάκα. Όταν η πλάκα είναι οριζόντια η ένδειξη του μανομέτρου πρέπει να είναι μηδέν (Σχήμα 5.5).



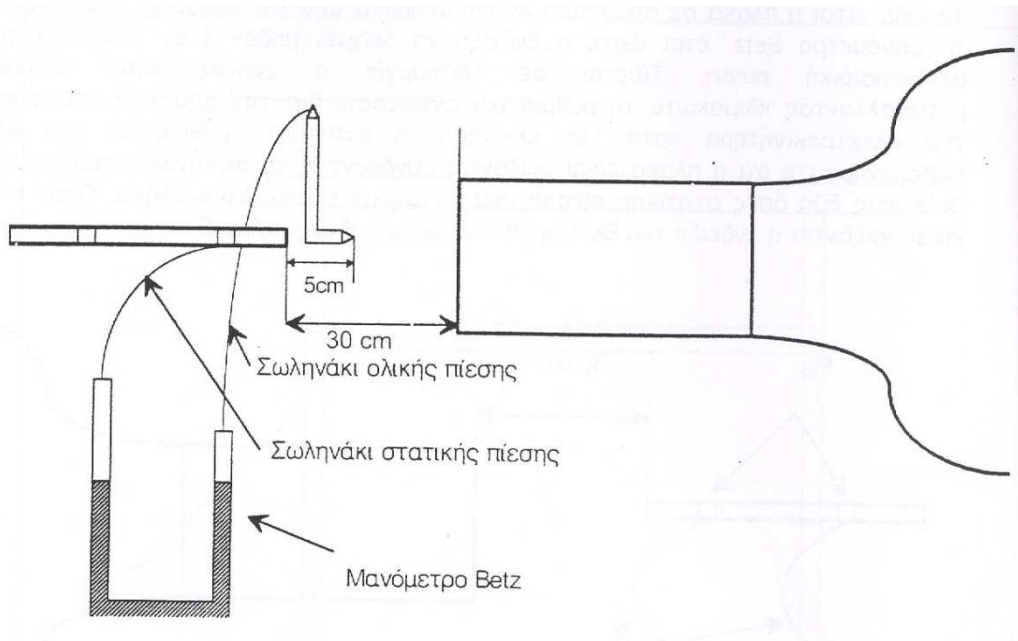
Σχήμα 5.5: Οριζοντίωση επίπεδης πλάκας.

Για να ληφθούν όλες οι επόμενες μετρήσεις συνδέεται ο σωλήνας Pitot με ένα σωληνάκι στην υποδοχή (+) του ψηφιακού μανομέτρου και η οπή στατικής πίεσης της πλάκας στην υποδοχή (-). Μετράται η δυναμική πίεση της απέραντης ροής (άρα έμμεσα και η ταχύτητα U , ($q = (1/2)\rho U^2$) σε απόσταση 5 cm μπροστά από την πλάκα (Σχήμα 5.6).

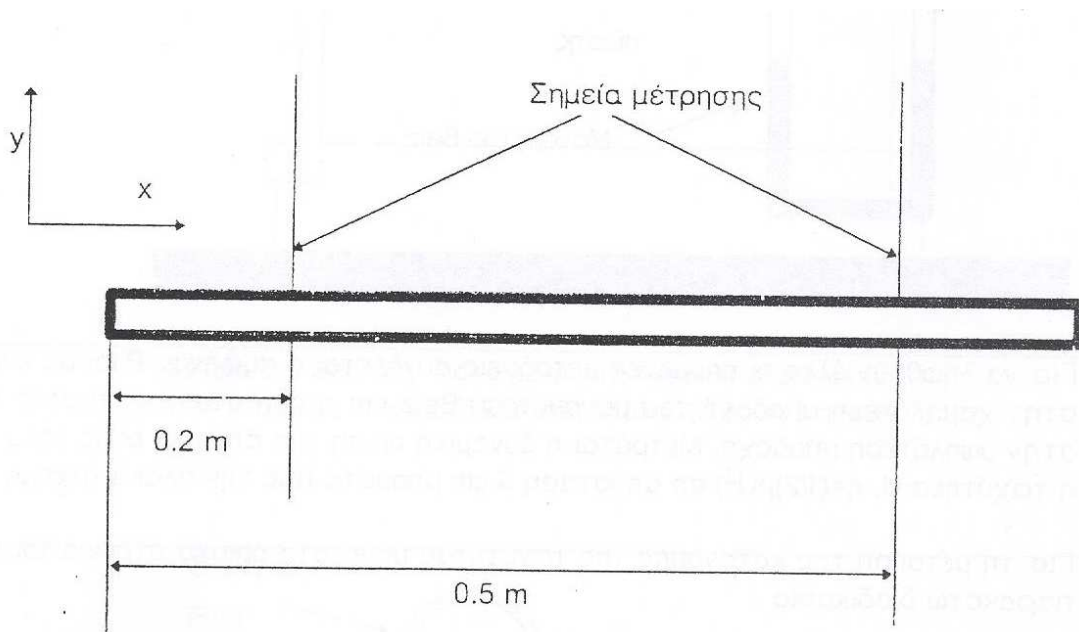
Για τη μέτρηση της κατανομής της ταχύτητας μέσα στο οριακό στρώμα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

Τοποθετείται ο σωλήνας Pitot σε επαφή με την πλάκα. Στη θέση αυτή μηδενίζεται το ωρολογιακό μικρόμετρο. Στη συνέχεια περιστρέφοντας τον μεταφορικό κοχλία και ανεβάζοντας σταδιακά τον σωλήνα Pitot λαμβάνεται σε κάθε θέση η αντίστοιχη δυναμική πίεση (ταχύτητα), ώσπου να φτάσουμε την ταχύτητα της απέραντης ροής (Σχήμα 5.7). Λαμβάνονται μετρήσεις κατανομής ταχύτητας στο οριακό στρώμα για δύο περιπτώσεις. Για την περίπτωση στρωτής ροής σε απόσταση $x = 0.2$ m από την

άκρη της πλάκας (Πίνακας 5.3) και για την περίπτωση τυρβώδους ροής σε απόσταση $x = 0.5 \text{ m}$ από την άκρη της πλάκας (Πίνακας 5.4).

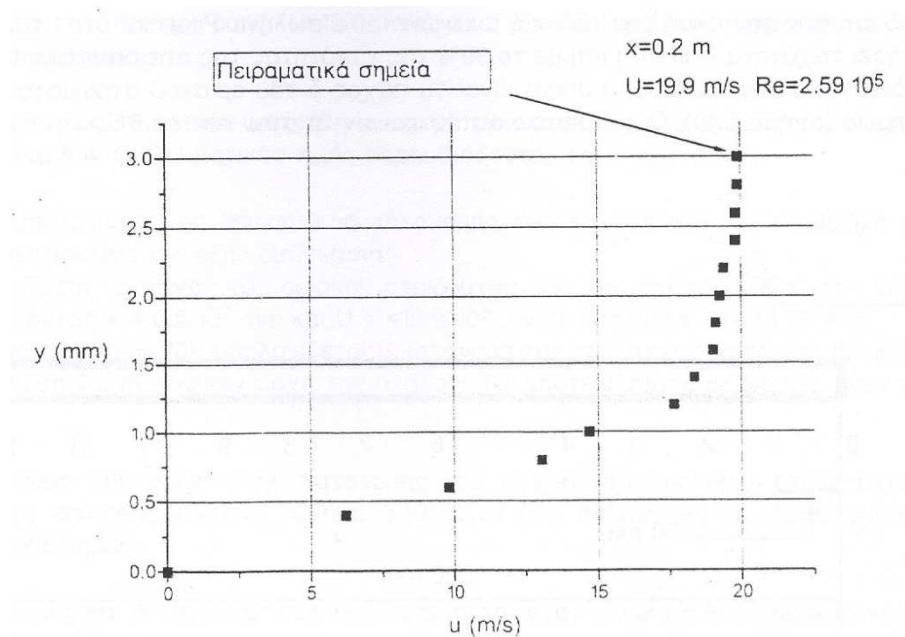


Σχήμα 5.6: Μέτρηση δυναμικής πίεσης.

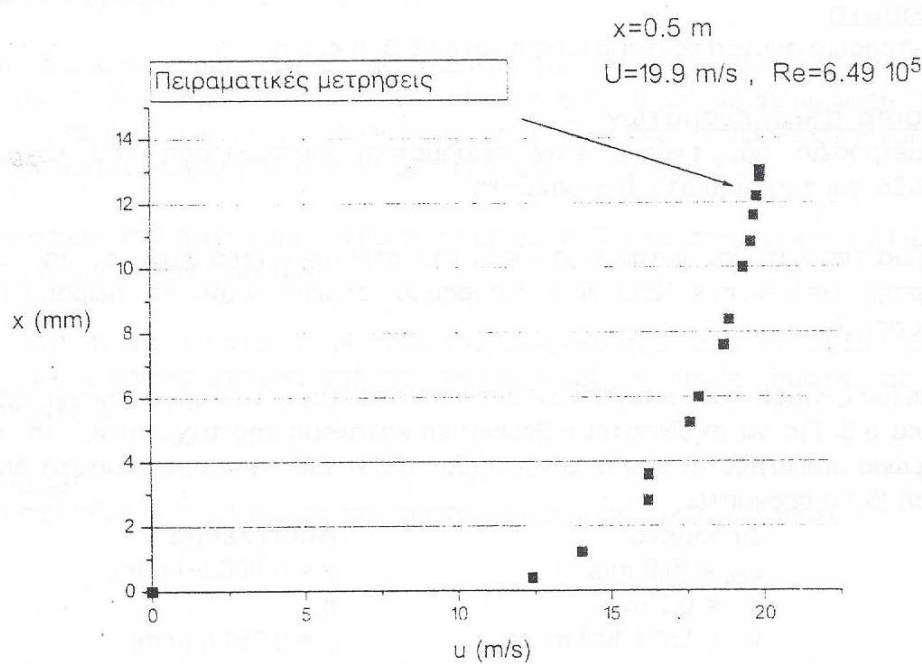


Σχήμα 5.7: Εύρεση κατανομής ταχυτήτων στην y διεύθυνση.

Έχοντας για κάθε y την αντίστοιχη ταχύτητα σχεδιάζεται η κατανομή της ταχύτητας μέσα στο οριακό στρώμα (Σχήματα 5.8 και 5.9).



Σχήμα 5.8: Κατανομή ταχύτητας στο στρωτό οριακό στρώμα.

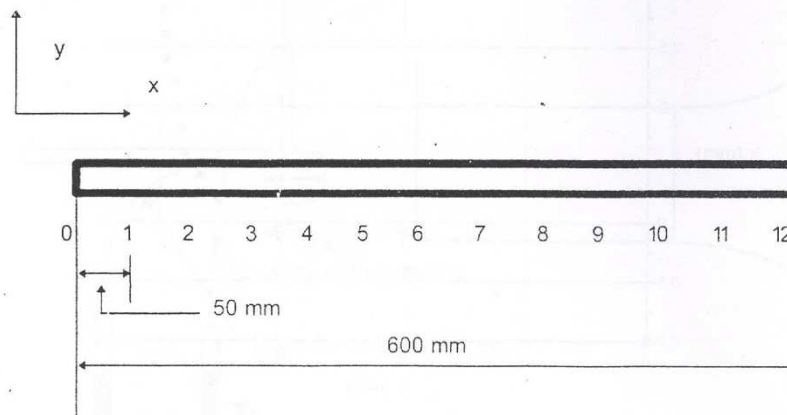


Σχήμα 5.9: Κατανομή ταχύτητας στο τυρβώδες οριακό στρώμα.

Για την κατανομή του πάχους του οριακού στρώματος ακολουθείται η ίδια σχεδόν διαδικασία:

Ανά 5 cm από την ακμή της πλάκας ανυψώνεται ο σωλήνας Pitot και όταν το μανόμετρο μετρήσει ταχύτητα (πίεση) ίση με το 99% της ταχύτητας της απέραντης ροής U παίρνεται η ένδειξη του μικρομέτρου, η οποία είναι το πάχος δ του οριακού

στρώματος σε εκείνο το σημείο (Σχήμα 5.10). Οι μετρήσεις αυτές φαίνονται στον Πίνακα 5.5.



Σχήμα 5.10: Μέτρηση πάχους του οριακού στρώματος κατά μήκος της πλάκας.

Αποτελέσματα

Όλες οι μετρήσεις αναγράφονται στους Πίνακες 5.3, 5.4, 5.5.

Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Με τις μετρήσεις που γίνονται στην πειραματική εγκατάσταση του εργαστηρίου κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα:

- 1) Διάγραμμα της κατανομής της ταχύτητας στο στρωτό οριακό στρώμα. Στο ίδιο διάγραμμα σημειώνονται τα πειραματικά και θεωρητικά σημεία. (**Προσοχή:** Στα παραδείγματα υπολογισμών και διαγραμμάτων αναφέρεται ταχύτητα απέραντης ροής $U = 19.9 \text{ m/s}$, ενώ κανονικά μπορεί να είναι διαφορετική για κάθε ομάδα).

Οι πειραματικές τιμές που μετρήθηκαν στην εγκατάσταση του εργαστηρίου γράφονται στον πίνακα 5.3. Για να σχεδιαστεί η θεωρητική κατανομή της ταχύτητας στο στρωτό οριακό στρώμα υπολογίζεται το η από τη σχ.(5.13). Εισάγοντας αριθμητικά δεδομένα στη σχ.(5.13) προκύπτει:

Δεδομένα

$$u_{\infty} = 19.9 \text{ m/s}$$

$$x = 0.2 \text{ m}$$

$$\nu = 1.534 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Αποτελέσματα

$$\eta = 0.000391 \text{ m}$$

ή

$$\eta = 0.391 \text{ mm}$$

Οι τιμές του η παίρνονται από τον Πίνακα 5.2 ανά 0.4. Η ταχύτητα u υπολογίζεται από την σχέση $u = f' u_{\infty}$, όπου $f' = \frac{u}{u_{\infty}}$ είναι η παράγωγος της συνάρτησης $f(\eta)$

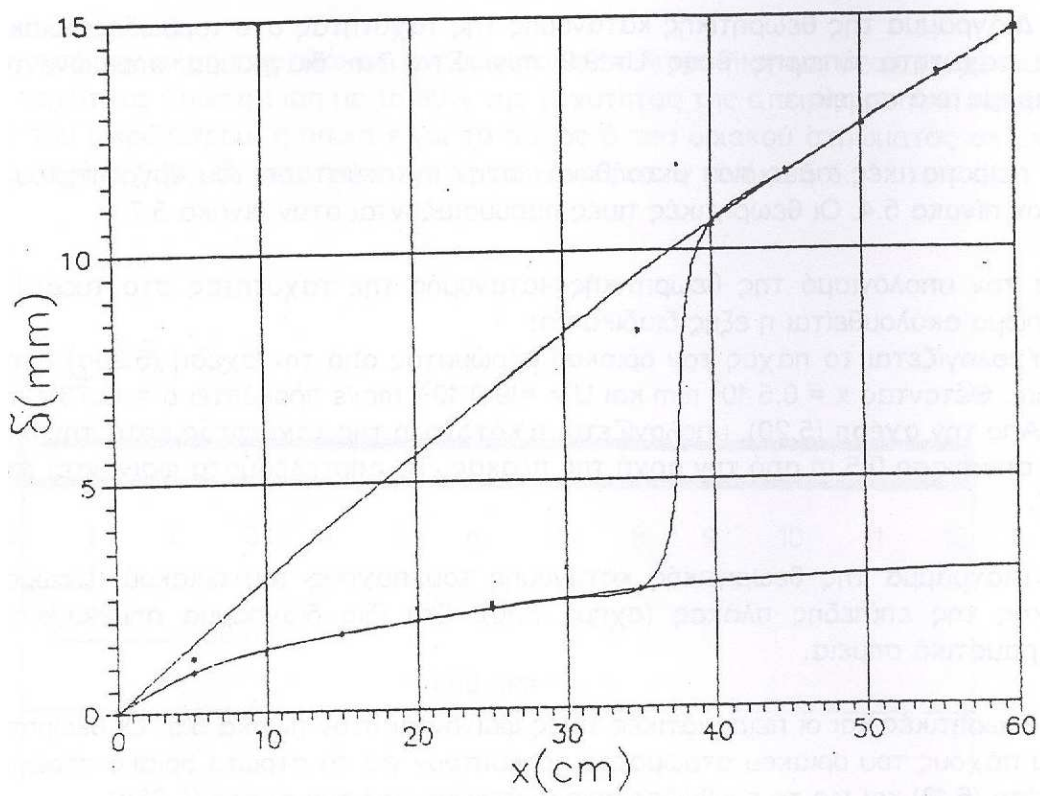
του οριακού στρώματος. Οι τιμές της f' έχουν υπολογιστεί από τον Blasius και δίνονται στον Πίνακα 5.2.

- 2) Διάγραμμα της θεωρητικής κατανομής της ταχύτητας στο τυρβώδες οριακό στρώμα, για την αντίστοιχη ταχύτητα απέραντης ροής. Στο ίδιο διάγραμμα σημειώνονται και τα πειραματικά σημεία. Για τον υπολογισμό της θεωρητικής κατανομής της ταχύτητας στο τυρβώδες οριακό στρώμα ακολουθείται η εξής διαδικασία:
 - a. Υπολογίζεται το πάχος του οριακού στρώματος από τη σχ.(5.8α) στη θέση $x = 0.5 \text{ m}$. Θέτοντας $x = 0.5 \times 10^3 \text{ mm}$ και $U = 19.9 \times 10^3 \text{ mm/s}$ προκύπτει π.χ. $\delta = 12.73 \text{ mm}$.
 - b. Από τη σχ.(5.20) υπολογίζεται η κατανομή της ταχύτητας κατά τη διεύθυνση y , σε απόσταση 0.5 m από την αρχή της πλάκας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.7.
- 3) Διάγραμμα της θεωρητικής κατανομής του πάχους του οριακού στρώματος κατά μήκος της επίπεδης πλάκας (σχήμα 5.10). Στο ίδιο διάγραμμα σημειώνονται και τα πειραματικά σημεία. Οι θεωρητικές και οι πειραματικές τιμές φαίνονται στον Πίνακα 5.5. Οι θεωρητικές τιμές του πάχους του οριακού στρώματος προκύπτουν για το στρωτό οριακό στρώμα από την σχ.(5.19) και για το τυρβώδες οριακό στρώμα από τη σχ.(5.28α).
- 4) Διάγραμμα του τοπικού συντελεστή αντίστασης C_f στο στρωτό και τυρβώδες οριακό στρώμα ως προς τον αριθμό Re . Με τις διάφορες τιμές του C_f που προκύπτουν από τη σχ.(5.15) για αριθμούς Reynolds, $Re < 5 \times 10^5$ συμπληρώνεται ο Πίνακας 6.8α, ο οποίος αναφέρεται στο στρωτό οριακό στρώμα. Για τον υπολογισμό του C_f στο τυρβώδες οριακό στρώμα χρησιμοποιείται η σχ.(5.31) και συμπληρώνεται ο Πίνακας 5.8β.
- 5) Διάγραμμα του ολικού συντελεστή αντίστασης C_f στο στρωτό και τυρβώδες οριακό στρώμα ως προς τον αριθμό Re . Για το στρωτό οριακό στρώμα οι τιμές προκύπτουν από τη σχ.(5.17) και για το τυρβώδες οριακό στρώμα από τη σχ.(5.32). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.9.

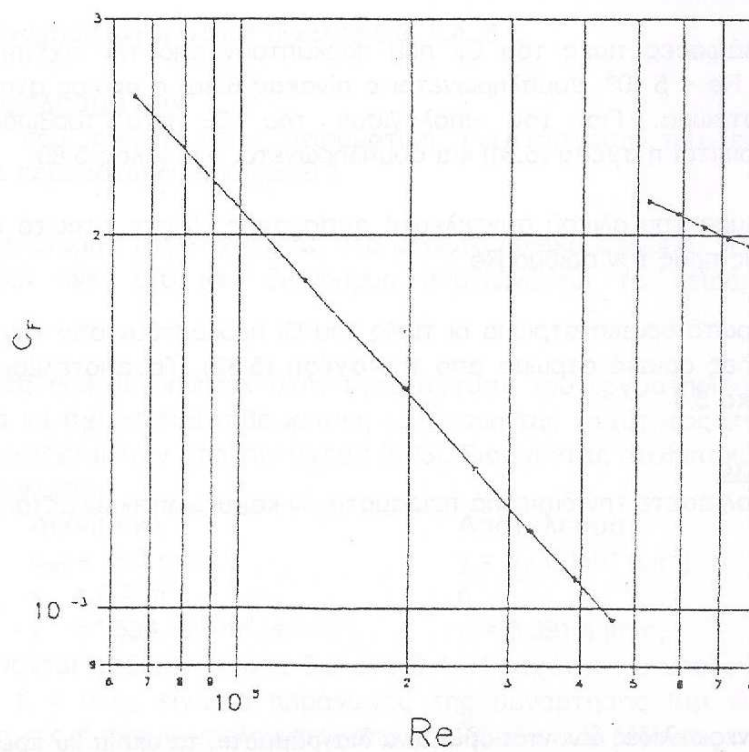
Ερωτήσεις

1. Να σχολιάσετε τη διαφορά πειραματικών και θεωρητικών μετρήσεων.

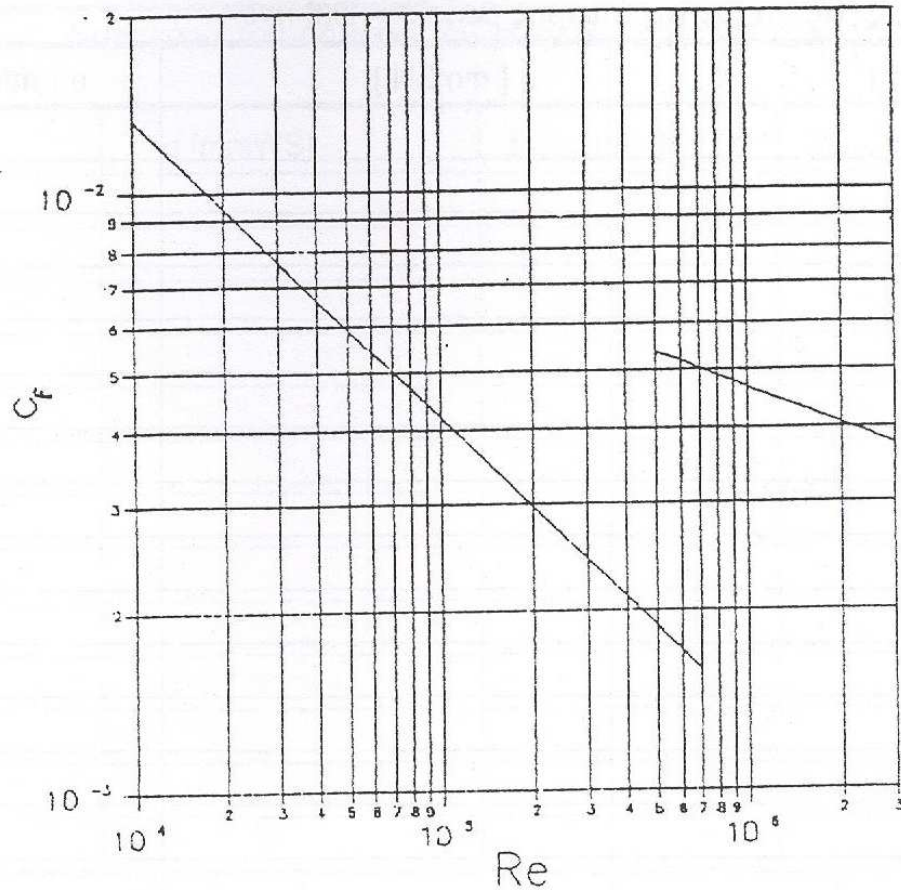
Στις επόμενες σελίδες δίνονται ορισμένα διαγράμματα, τα οποία θα πρέπει να αναπαραχθούν κατά το γράψιμο της έκθεσης, με την βοήθεια των θεωρητικών σχέσεων και των αντίστοιχων πειραματικών αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 1: Κατανομή του πάχους του οριακού στρώματος.



Διάγραμμα 2: Μεταβολή του τοπικού συντελεστή αντίστασης C_F συναρτήσει του αριθμού Reynolds.



Διάγραμμα 3: Μεταβολή του ολικού συντελεστή αντίστασης C_f συναρτήσει του αριθμού Reynolds.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 Μετρήσεις δυναμικής πίεσης σε απόσταση $x = 0.2$ m από την άκρη της πλάκας, για ταχύτητα απέραντης ροής $U = \dots\dots$ m/s

y [mm]	q [mmΣN]	u [m/s]

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4 Μετρήσεις δυναμικής πίεσης σε απόσταση $x = 0.5$ m από την άκρη της πλάκας, για ταχύτητα απέραντης ροής $U = \dots\dots\dots$ m/s

y [mm]	q [mmΣN]	u [m/s]

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5 Κατανομή του πάχους του οριακού στρώματος κατά μήκος της επίπεδης πλάκας

x [mm]	q [mmΣN]	$\delta_{\theta\epsilon\omega\rho}$ [mm]	$\delta_{\pi\epsilon\iota\rho}$ [mm]

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6 Θεωρητική κατανομή της ταχύτητας στο στρωτό οριακό στρώμα

η	$y = \dots\dots \eta$	$f' = \frac{u}{u_{\infty}}$	$u = \dots\dots f'$

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7 Θεωρητική κατανομή της ταχύτητας στο τυρβώδες οριακό στρώμα

y [mm]	u/u_∞	u [m/s]

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8 Τοπικός συντελεστής αντίστασης C_F στο στρωτό οριακό στρώμα

x [mm]	Re_x	C_F

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.9 Τοπικός συντελεστής αντίστασης C_F στο τυρβώδες οριακό στρώμα

x [mm]	Re_x	C_F

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.10 Ολικός συντελεστής αντίστασης

Στρωτό οριακό στρώμα		Τυρβώδες οριακό στρώμα	
Re_x	C_f	Re_x	C_f