

## ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΟ ΑΓΩΓΟ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ ΜΕ ΑΝΕΜΟΜΕΤΡΙΑ ΘΕΡΜΟΥ ΦΙΛΜ

Κεραμάρης Ευάγγελος<sup>1</sup>, Πρίνος Παναγιώτης<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Επιστημονικός Συνεργάτης, Τμ. Πολιτικών Έργων Υποδομής Α.Τ.Ε.Ι.Θ  
Σίνδος, 57400 Θεσ/νίκη, e-mail : [keram@civil.auth.gr](mailto:keram@civil.auth.gr)

<sup>2</sup>Καθηγητής, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στην εργασία αυτή διερευνάται εργαστηριακά η τυρβώδης ροή σε ανοικτό αγωγό με διαπερατό πυθμένα με τη χρήση ανεμομετρίας θερμού φιλμ (hot-film). Ο διαπερατός πυθμένας προσομοιώνεται με πορώδη φίλτρα πορώδους  $\varepsilon$  ίσου με 0.70 και 0.91. Το σχετικό πάχος πορώδους  $s'/h$  ( $s'$ =πάχος πορώδους,  $h$ =συνολικό βάθος ροής πάνω και μέσα από το πορώδες στρώμα) μεταβάλλεται από 0.375 έως 0.5. Μετρήσεις της παροχής, μέσης ταχύτητας και τυρβωδών μεγεθών (ένταση τύρβης, τάσεις Reynolds) φανερώνουν την επίδραση των παραπάνω μεγεθών ( $\varepsilon$  και  $s'/h$ ) στα χαρακτηριστικά της ροής και στην παροχαρακτηριστική ικανότητα του αγωγού.

## HOT-FILM MEASUREMENTS OF TURBULENT FLOW IN AN OPEN CHANNEL WITH A PERMEABLE BED

Keramaris Evangelos<sup>1</sup>, Prinos Panayotis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Associate, Department of Civil Infrastructure Eng., A.T.E.I.Th.  
Sindos, 57400 Thessaloniki, e-mail : [keram@civil.auth.gr](mailto:keram@civil.auth.gr)

<sup>2</sup>Professor, Department of Civil Eng., AUTh.

**SUMMARY :** Turbulent flow in an open channel with a permeable bed is investigated experimentally with the use of hot-film anemometry. The permeable bed is simulated with porous filters of porosity  $\varepsilon$  equal to 0.70 and 0.91. The relative thickness of the porous layer  $s'/h$  ( $s'$ =porous thickness,  $h$ =total flow depth over and through porous layer) varies between 0.375 and 0.5. Measurements of discharge, mean velocity and turbulence characteristics (turbulence intensity, Reynolds stresses) indicate the effect of  $\varepsilon$  and  $s'/h$  on the flow characteristics and the discharge capacity of the channel.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επίδραση του πορώδους μέσου στη ροή πάνω από αυτό και τα χαρακτηριστικά της ροής στη διεπιφάνεια νερού ή αέρα και πορώδους μέσου έχουν μελετηθεί πειραματικά, αναλυτικά και υπολογιστικά από αρκετούς ερευνητές για στρωτή ροή με αρκετά μικρούς αριθμούς Reynolds. Αρχικά οι Beavers and Joseph (1967), χρησιμοποίησαν πορώδες με μεγάλη διαπερατότητα και στρωτή ροή και κατέληξαν σε μία εμπειρική οριακή συνθήκη για την ταχύτητα ολίσθησης στη διεπιφάνεια. Διαπίστωσαν αύξηση της μάζας της ροής πάνω από τον διαπερατό πυθμένα σε σχέση με τη ροή ρευστού πάνω από αδιαπέρατο πυθμένα. Οι Poulidakos and Kazmierczak (1987), χρησιμοποίησαν στρωτή ροή και τις εξισώσεις Navier-Stokes για τη ροή και τις εξισώσεις Darcy-Brinkman για τη ροή μέσα στο πορώδες. Το τελικό συμπέρασμα που προέκυψε από την έρευνα αυτή είναι ότι η παρουσία του πορώδους μέσου κοντά σε αδιαπέρατο τοίχωμα σημαίνει και αύξηση της ταχύτητας ροής πάνω από το πορώδες μέσο. Στην έρευνα των Vafai and Thiagaraja (1987), χρησιμοποιήθηκαν στρωτή ροή και μικροί αριθμοί Reynolds και εξάχθηκαν αναλυτικές λύσεις για την κατανομή της ταχύτητας και της θερμοκρασίας που δείχνουν ότι υπάρχει εξαιρετική συμφωνία με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Οι Sahraoui and Kaviany (1992) έδειξαν ότι για τον ακριβή υπολογισμό της ταχύτητας κοντά στη διεπιφάνεια και μέσα στο πορώδες μέσο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μεταβλητό και όχι σταθερό ενεργό ιξώδες με τις εξισώσεις Darcy-Brinkman. Ο Larrea (1995), ασχολήθηκε με τη μελέτη στρωτής ροής σε κλειστούς αγωγούς με δύο πορώδη τοιχώματα. Επισημάνει το ιδιαίτερο πρόβλημα που υπάρχει στην επιλογή των κατάλληλων συνθηκών στη διεπιφάνεια που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τη ρεαλιστική περιγραφή της εφαιπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας στο διαπερατό όριο. Οι Gupte and Advani (1996), μελέτησαν τη στρωτή ροή μέσα σε πορώδες μέσο κοντά στο διαπερατό όριο με τη βοήθεια της ανεμομετρίας Laser-Doppler (LDA). Η λεπτομερής αυτή έρευνα έγινε με σκοπό τον υπολογισμό του προφίλ ταχύτητας μέσα στο πορώδες μέσο. Με τον υπολογισμό της ταχύτητας στη διεπιφάνεια πορώδους μέσου και ρευστού ασχολήθηκαν οι Choi and Waller (1997). Αυτή η μελέτη εξηγεί ότι το βάθος διείσδυσης εξαρτάται μόνο από τον αριθμό Darcy του πορώδους μέσου παρά από τον αριθμό Reynolds και τη μορφή του προφίλ της ταχύτητας. Κοντά στη διεπιφάνεια ο νόμος του Darcy είναι ακατάλληλος να περιγράψει τη ροή σε ένα διαπερατό τοίχωμα και τη ροή πάνω από πορώδες μέσο.

Η μελέτη της τυρβώδους ροής κοντά σε διαπερατό τοίχωμα (πορώδη πυθμένα) είναι μάλλον περιορισμένη αφού υπάρχουν επιπλέον δυσκολίες στη περίπτωση αυτή λόγω των τυρβωδών διακυμάνσεων. Μελέτες στο MIT (Munoz, Goma and Gelahr (1968), Ruff and Gehlar (1970) και Chu and Gelhar (1972)) έχουν δείξει ότι ο λογαριθμικός νόμος του τοιχώματος μπορεί να εφαρμοστεί με τιμή της σταθεράς von Karman  $\kappa$  μεταξύ 0.26 και 0.29 αντί για τη τιμή 0.41 που ισχύει σε κλασσικές ροές με λείο τοίχωμα. Η πρώτη ουσιαστικά πλήρης μελέτη γύρω από την τυρβώδη ροή και τα χαρακτηριστικά της έγιναν από τους Mendoza and Zhou (1992). Βέβαια προηγήθηκαν κάποιες μελέτες, όπως του Nezu (1977) που από πειράματα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η σταθερά von-Karman ( $\kappa$ ) μειώνεται με την αύξηση της διαπερατότητας  $K$ . Επίσης οι Zippe and Graf (1983) με πειράματα διαπίστωσαν ότι η αντίσταση στη ροή της διαπερατής επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση αδιαπέρατου τοιχώματος με την ίδια τραχύτητα. Ωστόσο οι Mendoza and Zhou (1992) και Zhou and Mendoza (1993) ήταν οι πρώτοι που παρουσίασαν αναλυτικά αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής πάνω από πορώδη πυθμένα και την κατανομή της ταχύτητας μέσα στο πορώδη πυθμένα αντίστοιχα.

Στην εργασία των Prinos, Sofialidis and Keramaris (2003) παρουσιάστηκαν αποτελέσματα (πειραματικά και υπολογιστικά) για την τυρβώδη ροή πάνω και μέσα σε πορώδες μέσο. Η προσομοίωση του τελευταίου έγινε με συστοιχία ράβδων. Πρόσφατα οι de Lemos and Silva (2006) χρησιμοποίησαν τις μακροσκοπικές εξισώσεις Reynolds και ένα μακροσκοπικό μοντέλο τύρβης k-ε για τον υπολογισμό της τυρβώδους ροής πάνω από πορώδες μέσο υψηλής διαπερατότητας.

Στην εργασία αυτή διερευνάται εργαστηριακά η τυρβώδης ροή σε ανοικτό αγωγό με διαπερατό πυθμένα με τη χρήση ανεμομετρίας θερμού φιλμ (hot-film). Ο διαπερατός πυθμένας προσομοιώνεται με πορώδη φίλτρα πορώδους  $\epsilon=0.70$  και  $0.91$ . Το σχετικό πάχος πορώδους  $s'/h$  ( $s'$ =πάχος πορώδους,  $h$ =συνολικό βάθος ροής πάνω και μέσα από το πορώδες στρώμα) μεταβάλλεται από  $0.375$  έως  $0.5$  και ο αριθμός Reynolds από  $7000$  έως  $22000$ . Μετρήσεις της παροχής, μέσης ταχύτητας και τυρβωδών μεγεθών (τάσεις Reynolds) φανερώουν την επίδραση των παραπάνω μεγεθών ( $\epsilon$  και  $s'/h$ ) στα χαρακτηριστικά της ροής και στην παροχτευτική ικανότητα του αγωγού.

## **2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΗΣ**

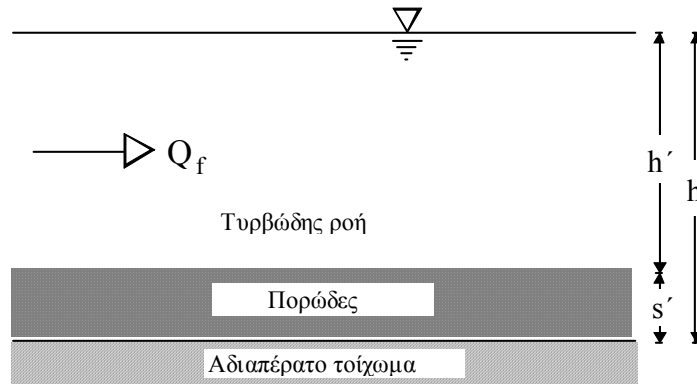
### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η θεωρητική προσέγγιση και η εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων για ροή μέσα και πάνω από πορώδες μέσο έχει γίνει από αρκετούς ερευνητές για στρωτή ροή. Η αντίστοιχη έρευνα για τυρβώδη ροή βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο. Για τη θεωρητική προσέγγιση αυτής της ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί μικροσκοπική ή μακροσκοπική ανάλυση.

Οι δύο αυτές αναλύσεις διαφέρουν στον τρόπο προσομοίωσης του πορώδους μέσου. Παλαιότερα χρησιμοποιούσαν μακροσκοπικά χαρακτηριστικά για την περιγραφή των χαρακτηριστικών της ροής μέσα στον πορώδη πυθμένα ενώ τελευταία η ροή αναλύεται μικροσκοπικά. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η μακροσκοπική ανάλυση και παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις ροής.

### **2.2 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ**

Χρησιμοποιώντας αυτή την ανάλυση η τυρβώδης ροή πάνω από πορώδη πυθμένα (σχήμα 1) περιγράφεται με τις εξισώσεις Reynolds ενώ η ροή μέσα στον πορώδη πυθμένα περιγράφεται με την γενικευμένη εξίσωση Darcy συμπεριλαμβάνοντας τον όρο Forchheimer και τον όρο Brinkman (Antohe and Lage 1997, Nakayama and Kuwahara 1999, Getachew, Minkowycz and Lage 2000, Nield 2001, Pedras and deLemos 2001 και Lage, de Lemos and Nield 2002). Η τελευταία εξίσωση μπορεί να λάβει διάφορες μορφές και έχει προκαλέσει αρκετή συζήτηση στη διεθνή επιστημονική κοινότητα (Nield 2001, Lage, de Lemos and Nield 2002).



Σχήμα 1. Μακροσκοπική Ανάλυση

Οι παραπάνω αναφερόμενες εξισώσεις για διδιάστατη σταθερή και ασυμπίεστη ροή είναι :

**Περιοχή Ρευστού :**

$$\text{Εξίσωση συνέχειας: } \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{Εξίσωση ορμής: } U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] \quad (2.2)$$

όπου :  $U_i$ =μέση χρονικά ταχύτητα,  $P$ =στατική πίεση,  $-\overline{u_i u_j}$ =τάσεις Reynolds,  $\rho$ = πυκνότητα ρευστού,  $\nu$ =κινηματικό ιξώδες.

**Περιοχή Πορώδους :**

$$\text{Εξίσωση συνέχειας : } \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad \text{ή} \quad \frac{\partial \langle U_i \rangle^f}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3)$$

Εξίσωση Darcy-Brinkman-Forchheimer :

$$\begin{aligned} \langle U_j \rangle^f \frac{\partial \langle U_i \rangle^f}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle^f}{\partial x_j} + g_j + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial \langle U_i \rangle^f}{\partial x_j} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \langle -\overline{u_i u_j} \rangle^f - \varepsilon \frac{\nu}{K} \langle U_i \rangle^f - \frac{\varepsilon^2 C}{\sqrt{K}} \left( \langle U_j \rangle^f \langle U_j \rangle^f \right)^{1/2} \langle U_i \rangle^f \end{aligned} \quad (2.4)$$

όπου  $K$ =διαπερατότητα,  $\varepsilon$ =πορώδες,  $C$ =συντελεστής αδράνειας Forchheimer. Στις εξισώσεις (2.3) και (2.4) το σύμβολο  $\langle \rangle$  φανερώνει ότι τα χαρακτηριστικά της ροής ( $U_i$ ,  $p$ , κλπ) είναι μέσα ογκομετρικά χαρακτηριστικά.

Γενικά, για μία γενική παράμετρο του ρευστού  $\psi$ , το μέσο ογκομετρικό μέγεθος  $\langle \psi \rangle$ , σε ένα στοιχειώδη όγκο ελέγχου  $V$  που περιλαμβάνει ρευστό και στερεό, και το αντίστοιχο  $\langle \psi \rangle^f$ , σε έναν όγκο  $V_f$  ( $V_f$  είναι ο όγκος του ρευστού που περιέχεται στον όγκο  $V$ ) ορίζονται αντίστοιχα όπως:

$$\langle \psi \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_f} \psi dV \quad , \quad \langle \psi \rangle^f = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \psi dV \quad (2.5)$$

Το πορώδες  $\varepsilon$  ορίζεται όπως  $\varepsilon = V_f/V$ . Πρέπει να τονιστεί, ότι για ανοικτούς αγωγούς, η κλίση πίεσης  $-dp/dx$  είναι ίση με  $\rho g S_0$  ( $g$ = επιτάχυνση της βαρύτητας,  $S_0$ = κλίση καναλιού).

Οι τάσεις Reynolds που εμφανίζονται στις εξισώσεις (2.2) και (2.4) θα πρέπει να υπολογιστούν με τη βοήθεια τυρβωδών μοντέλων. Ενώ τα τυρβώδη μοντέλα ( $k$ - $\varepsilon$ , μοντέλα τάσεων Reynolds) για την περιοχή του ρευστού έχουν αποδειχθεί και εφαρμόζονται σε πολλές περιπτώσεις (Rodí, 1980), μακροσκοπικά μοντέλα τύρβης για πορώδη μέσα είναι μάλλον σπάνια. Πρόσφατα, θεωρητικές αναλύσεις για διάφορα μοντέλα πορώδων μέσων επιχειρήθηκαν από διάφορους ερευνητές (Masuoka and Takatsu, 1996, Antohe and Lage, 1997, Nakayama and Kuwahara, 1999, Getachew, Minkowycz and Lage, 2000, Pedras and deLemos 2001, deLemos and Silva 2006) αλλά η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ-ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

#### 3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Το σύνολο των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακό ανοικτό κανάλι μήκους 12m, πλάτους 25cm και ύψους 50cm. Η κλίση του καναλιού μπορούσε να μεταβληθεί με τη βοήθεια κατάλληλου μηχανισμού από αντίθετη μέχρι αρκετά απότομη. Σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων η τιμή της κλίσης παρέμεινε σταθερή και ίση με  $2 \cdot 10^{-3}$ . Στην έξοδο του καναλιού υπήρχαν καθοδηγητικά πτερύγια για τη ρύθμιση της ομοιομορφίας της ροής στο κανάλι. Τα καθοδηγητικά πτερύγια, τα οποία ανοιγόκλειναν στην κατακόρυφη διεύθυνση, λειτουργούσαν σαν θυρίδα και έτσι ήταν δυνατή η ρύθμιση της ροής στα ανάντη και η επίτευξη ομοιόμορφου βάθους ροής στο τμήμα του αγωγού όπου αρχικά (χωρίς την λειτουργία των πτερυγίων) το προφίλ της ροής ήταν τύπου  $M_2$  λόγω ελεύθερης υδατόπτωσης.

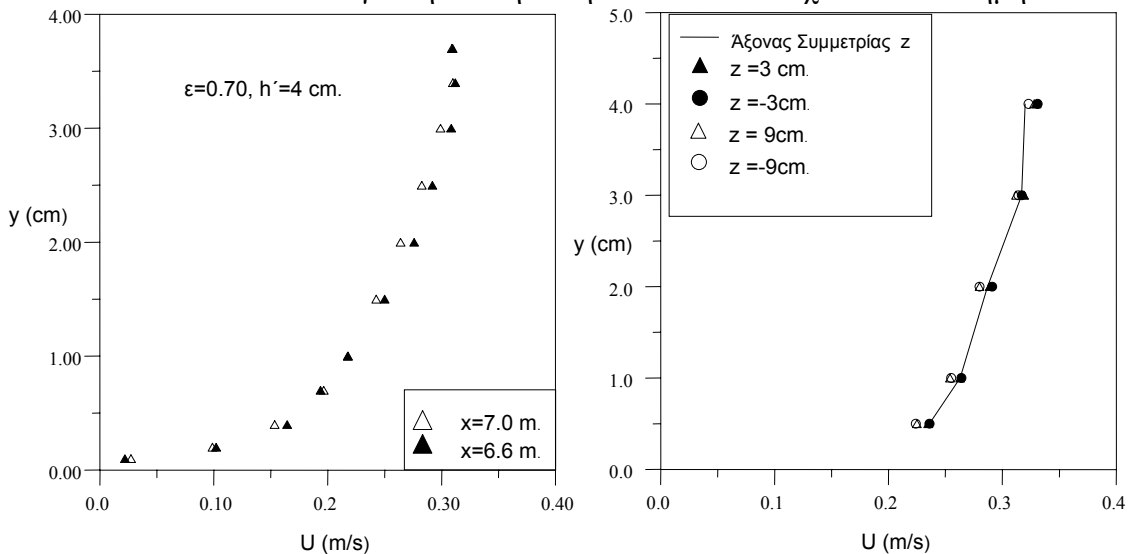
Για την προσομοίωση του πορώδους πυθμένα χρησιμοποιήθηκαν πορώδη φίλτρα με πάχος 3cm τα οποία είχαν πλάτος ίσο με το πλάτος του καναλιού (25cm) και μήκος ίσο με το μήκος του καναλιού. Τα πορώδη αυτά επικολλήθηκαν σε γαλβανιζέ λαμαρίνες πάχους 0.5mm και μήκους 2.5m, οι οποίες λόγω βάρους παρέμεναν σταθερές στο πυθμένα του καναλιού καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Το σχετικό πάχος πορώδους  $s$  ( $s = s'/h$ ,  $s'$ =πάχος πορώδους,  $h$ =συνολικό βάθος ροής,  $h'$ =βάθος ροής πάνω από το πορώδες), που φανερώνει πόσο βυθισμένο είναι το πορώδες στη ροή, κυμάνθηκε από 0.375 έως 0.5 και επομένως έγινε δυνατή η μελέτη της επίδρασης του σχετικού πάχους του πορώδους στα χαρακτηριστικά της τυρβώδους ροής. Το πορώδες  $\varepsilon$  των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκε ήταν 0.70 και 0.91 από μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο.

### 3.2 ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Μετρήσεις της ταχύτητας έγιναν αρχικά με τη βοήθεια σωλήνα Pitot, εσωτερικής διαμέτρου 4mm που ήταν συνδεδεμένος με κεκλιμένο μανόμετρο γωνίας  $45^\circ$  για τη μέτρηση μικρών διαφορών πίεσης. Ο κύριος όγκος των μετρήσεων ταχύτητας (οριζόντιας και κατακόρυφης) καθώς επίσης και μετρήσεις τύρβης έγιναν με τη βοήθεια της ανεμομετρίας θερμού φιλμ (hot-film). Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρια δύο συνιστωσών (TSI model 1243) τα οποία είχαν τη δυνατότητα να τοποθετηθούν στο οριζόντιο ή κατακόρυφο επίπεδο. Τα αισθητήρια αυτά τοποθετήθηκαν με τη βοήθεια γωνίας, σε κατακόρυφο στήριγμα (TSI probe support) και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό του καναλιού για την πραγματοποίηση των μετρήσεων. Για τις μετρήσεις της τάσης (voltage) χρησιμοποιήθηκαν δύο ανεμόμετρα, ένα παλαιότερης τεχνολογίας (MODEL 1050) και ένα νεότερης τεχνολογίας (IFA 100). Για την μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό χρησιμοποιήθηκε μία κάρτα A/D και η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τη βοήθεια προγράμματος σε περιβάλλον Labview.

Η συνολική παροχή  $Q_i$  μετρήθηκε στην έξοδο του καναλιού με τη βοήθεια τριγωνικού εκχειλιστή και με τη βοήθεια δεξαμενής όπου μπορούσε να μετρηθεί ο χρόνος συλλογής ενός δεδομένου όγκου νερού. Οι δύο μέθοδοι είχαν ασήμαντη διαφορά ( $\pm 1\%$ ) στη μέτρηση της παροχής. Από την κατανομή της ταχύτητας της ροής πάνω από τον πορώδη πυθμένα ήταν δυνατός ο υπολογισμός της παροχής πάνω από τον πορώδη πυθμένα ( $Q_f$ ). Στη συνέχεια ο υπολογισμός της παροχής και της ταχύτητας μέσα στον πορώδη πυθμένα ( $Q_p$ ) γίνεται με βάση τις δύο προηγούμενες παροχές ( $Q_i=Q_p+Q_f$ ).

Οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση 8 m από την είσοδο του καναλιού και πάνω από τη διεπιφάνεια πορώδους/ρευστού όπου η ροή θεωρείται πλήρως αναπτυγμένη. Έλεγχος της πλήρους ανάπτυξης της ροής έγινε με τη σύγκριση των κατανομών της ταχύτητας στην περιοχή πάνω από τον πορώδη πυθμένα σε δύο θέσεις κατά μήκος της ροής που απείχαν μεταξύ τους 40 cm. Στο σχήμα 2α παρουσιάζεται η κατανομή της ταχύτητας ως προς το βάθος πάνω από το πορώδες για πορώδες με  $\varepsilon=0.70$  και βάθος ροής  $h'=4$  cm. Οι ταχύτητες μετρήθηκαν με σωλήνα Pitot σε 11 θέσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 2α. Η κατανομή της ταχύτητας τόσο για απόσταση από την αρχή του καναλιού  $x=7.0$  m όσο και για την άλλη θέση  $x=6.6$  m είναι σχεδόν ταυτόσημη.



Σχήμα 2. Έλεγχοι (α) πλήρους ανάπτυξης της ροής και (β) διδιάστατης ροής

Επίσης η ομοιομορφία της ροής ελέγχθηκε με τη μέτρηση του συνολικού βάθους ροής  $h$  ( $h=s'+h'$ ) με σταθμήμετρα σε δύο θέσεις που απέχουν περίπου 7m μεταξύ τους. Το σφάλμα μέτρησης του βάθους ροής με το σταθμήμετρο ήταν  $\pm 0.1\text{mm}$ .

Μετρήσεις της ταχύτητας έγιναν στον κεντρικό άξονα της διατομής του καναλιού όπου η ροή μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν επηρεάζεται από τα πλευρικά τοιχώματα του καναλιού. Ο λόγος πλάτους/βάθους ροής σε όλα τα πειράματα ήταν μεγαλύτερος του 5.

Για τον έλεγχο της διδιάστατης ροής η κατανομή της ταχύτητας μετρήθηκε με τη βοήθεια του σωλήνα Pitot σε 5 θέσεις εγκάρσια της διατομής σε αποστάσεις από τον άξονα  $z=0, \pm 3, \pm 9\text{cm}$ . όπως φαίνεται και στο σχήμα 2β. Μετρήθηκε η ταχύτητα σε 5 σημεία (σε απόσταση 5mm, 1cm, 2cm, 3cm, 4cm από τον πορώδη πυθμένα), για βάθος ροής 5cm στο μέσο του καναλιού και στη συνέχεια σε δύο συμμετρικές θέσεις αριστερά και δεξιά και βρέθηκε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των τιμών αυτών (σχήμα 2β), πράγμα που φανερώνει το γεγονός της διδιάστατης ροής σε μεγάλο μέρος του πλάτους της διατομής.

Μετρήθηκε και η τραχύτητα της επιφάνειας του πορώδους φίλτρου έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των χαρακτηριστικών της ροής σε αγωγό με πορώδες φίλτρο και των αντίστοιχων σε αγωγό με αδιαπέρατο πυθμένα και τραχύτητα ίση με αυτή της επιφάνειας του φίλτρου. Για τον προσδιορισμό της τραχύτητας έγιναν ανεξάρτητα πειράματα στο ίδιο κανάλι με αρκετά μικρό πάχος πορώδους (5mm) και από μετρήσεις της τοπικής ταχύτητας σε διάφορες αποστάσεις από τον πυθμένα (σχήμα 3α) υπολογίστηκε ο αδιάστατος συντελεστής Nikuradse  $k_s^+$ . Για  $\varepsilon=0.91$  και  $\varepsilon=0.70$  ο  $k_s^+$  υπολογίστηκε ίσος με 176 και 91 αντίστοιχα, που δείχνει ότι το φίλτρο με το μεγαλύτερο πορώδες έχει και μεγαλύτερη επιφανειακή τραχύτητα.

Συγκεκριμένα, καταρτίστηκε διάγραμμα μεταβολής της αδιαστατοποιημένης ταχύτητας  $U/U_*$  ως προς την αδιαστατοποιημένη απόσταση από την διεπιφάνεια  $y^+ = yU_*/\nu$ , όπου  $U_*$  η ταχύτητα τριβής ( $U_* = \sqrt{gRS_0}$ , όπου  $R$  η υδραυλική ακτίνα και  $S_0$  η κλίση του πυθμένα), όπως φαίνεται στο σχήμα 3α. Για πλήρως τυρβώδη ροή και τραχύ τοίχωμα ισχύει :

$$\frac{U}{U_*} = 5.75 \log y^+ + D_1 \quad (3.1)$$

όπου :

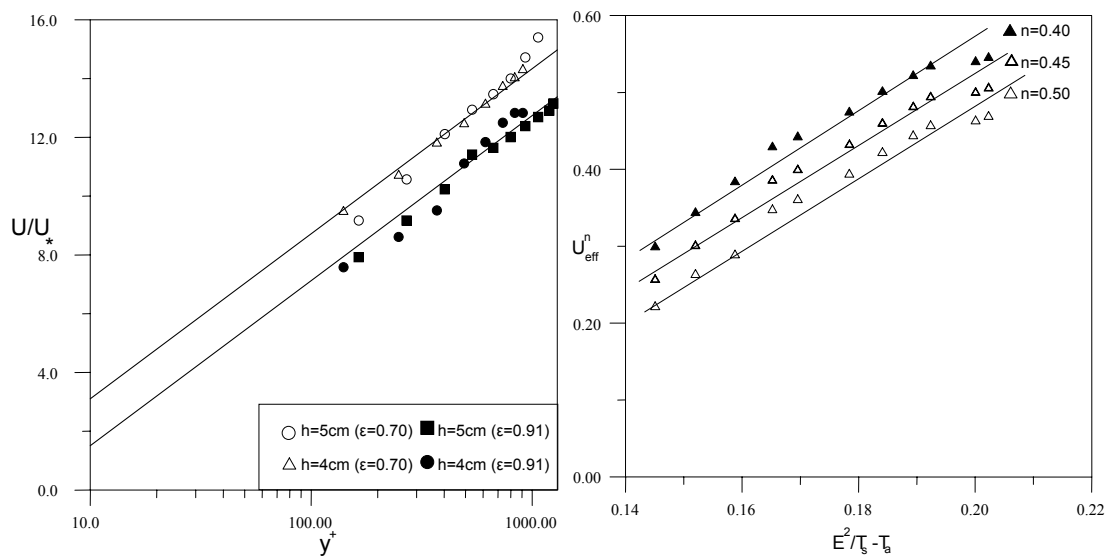
$$D_1 = 8.5 - 5.75 \log k_s^+ \quad (3.2)$$

$$\text{με } k_s^+ = k_s U_* / \nu$$

Από το σχήμα 3α προσδιορίστηκε η σταθερά της εξ. (3.1) ως  $D_1=-4.41$  για  $\varepsilon=0.91$  και  $D_1=-2.76$  για  $\varepsilon=0.70$  και στη συνέχεια από την εξ. (3.2) υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές του  $k_s^+$ , όπως προαναφέρθηκαν.

Αρχικά έγιναν μετρήσεις στον διαπερατό και αδιαπέρατο πυθμένα με σωλήνα Pitot για να έχουμε κάποιες πρώτες εκτιμήσεις για τα αποτελέσματα. Ο κύριος όγκος των μετρήσεων στον αδιαπέρατο πυθμένα και στους πορώδεις πυθμένες έγιναν με τη βοήθεια ανεμομετρίας θερμού φίλμ. Το βάθος ροής ήταν από 3 cm έως 5 cm όπως φαίνεται και από τον πίνακα 1. Έτσι έγινε δυνατή η σύγκριση των χαρακτηριστικών της ροής με διαπερατό και αδιαπέρατο πυθμένα. Τα περισσότερα σημεία μέτρησης βρίσκονταν κοντά στη διεπιφάνεια πορώδους/νερού όπου οι μεταβολές της ταχύτητας είναι σημαντικές. Μετρήσεις ταχύτητας μέσα στην κάθετο έγιναν με τη βοήθεια της ανεμομετρίας θερμού φίλμ σε τουλάχιστον 10 σημεία που είχαν απόσταση μεταξύ τους 5-10 mm. Η πλησιέστερη μέτρηση απέχει 2 mm από τη διεπιφάνεια πορώδους/νερού.

Ο αριθμός Reynolds (υπολογισμένος με βάση τη μέση ταχύτητα ροής  $U_f$  και το βάθος ροής  $h'$  πάνω από τον διαπερατό πυθμένα) κυμάνθηκε από 7000 έως 22000 και επομένως η ροή μπορεί να θεωρηθεί πλήρως τυρβώδης.



Σχήμα 3. (α) Υπολογισμός τραχύτητας με τη βοήθεια φίλτρων με μικρό πάχος και (β) Καμπύλη βαθμονόμησης ανεμομέτρου

Η βαθμονόμηση των θερμών φιλμ έγινε με τη βοήθεια του τροποποιημένου νόμου του King όπως φαίνεται παρακάτω : Γνωρίζοντας τη θερμοκρασία του αισθητήρα και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος υπολογίζονται με γραμμική παλινδρόμηση οι εμπειρικοί συντελεστές  $A$ ,  $B$  και  $n$  της βαθμονόμησης από τη σχέση (3.3)

$$\frac{E^2}{T_s - T_a} = A + B \cdot U_{eff}^n \quad (3.3)$$

όπου  $E$ =τάση (Voltage),  $T_s$ =θερμοκρασία αισθητήρα,  $T_a$ =θερμοκρασία περιβάλλοντος,  $U_{eff}$ =ενεργή ταχύτητα,  $A, B, n$  =εμπειρικοί συντελεστές από βαθμονόμηση

Μια τυπική καμπύλη βαθμονόμησης φαίνεται στο σχήμα 3β. Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα με τη βέλτιστη ευθεία υπολογίζεται ο εμπειρικός συντελεστής  $n$  (στο παραπάνω σχήμα 3β παρατηρούμε ότι ο βέλτιστος συντελεστής είναι  $n=0.40$ ).

Με τη βοήθεια του αισθητήρα θερμού φιλμ και των οργάνων μετριέται η στιγμιαία ταχύτητα σε κατακόρυφο επίπεδο (οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα) και στη συνέχεια σε οριζόντιο επίπεδο (οριζόντια και εγκάρσια συνιστώσα). Από τις στιγμιαίες τιμές της ταχύτητας (3 συνιστώσες) υπολογίζονται οι μέσες ως προς το

χρόνο ταχύτητες (3 συνιστώσες), οι τάσεις Reynolds  $\overline{u^2}$  ( $\overline{u^2} = \frac{1}{T} \int_0^T (U - \overline{U})^2 dt$ ), όπου

$U$  : στιγμιαία ταχύτητα,  $\overline{U}$  : μέση ως προς το χρόνο ταχύτητα και  $T$  : χρονική περίοδος μέτρησης),  $\overline{v^2}$ ,  $\overline{w^2}$ ,  $\overline{uv}$ ,  $\overline{uw}$  και οι συνιστώσες έντασης της τύρβης  $u'$ ,  $v'$  και  $w'$  ( $u' = \sqrt{\overline{u^2}}$ ).

Τα χαρακτηριστικά των πειραμάτων παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 1 για το σύνολο τη ροής (με δείκτη  $t$ ), πάνω από τον πορώδη πυθμένα (με δείκτη  $f$ ) και μέσα στον πορώδη πυθμένα (με δείκτη  $p$ ). Η συνολική παροχή  $Q_i$  μετρήθηκε μέσω του



τριγωνικού εκχειλιστή και της ογκομέτρησης, η  $Q_f$  υπολογίστηκε από  $Q_f=U_f A_f$  (όπου η ταχύτητα  $U_f$  υπολογίστηκε από την κατανομή των τοπικών ταχυτήτων που μετρήθηκαν πάνω από τον πορώδη πυθμένα και  $A_f=0.25h'$ , εμβαδόν διατομής πάνω από το διαπερατό στρώμα) και τέλος η  $Q_p$  υπολογίστηκε από  $Q_p=Q_t-Q_f$ . Επίσης παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα για αδιαπέρατο, τραχύ πυθμένα (με δείκτη  $np$ ) με τραχύτητα ίση με αυτή της επιφάνειας του πορώδους. Η παροχή  $Q_{np}$  (παροχή για αδιαπέρατο πυθμένα) υπολογίστηκε με ανεξάρτητα πειράματα για τραχύ αδιαπέρατο πυθμένα και για να δημιουργηθεί ο τραχύς πυθμένας χρησιμοποιήθηκε πορώδες φίλτρο πολύ μικρού πάχους 5mm με  $\varepsilon=0.70$  και  $\varepsilon=0.91$  αντίστοιχα),  $U_{np}$  = μέση ταχύτητα για αδιαπέρατο πυθμένα ( $U_{np}=Q_{np}/(0.25h')$ ). Στην περίπτωση του αδιαπέρατου πυθμένα πρώτα υπολογίστηκε η παροχή  $Q_{np}$  με τη βοήθεια του υπερχειλιστή και στη συνέχεια η ταχύτητα  $U_{np}$  από τη μέτρηση κατανομής ταχυτήτων. Οι αποκλίσεις των τιμών της ταχύτητας  $U_{np}$  από τη μέτρηση κατανομής ταχυτήτων και της ταχύτητας  $U_{np}$  = μέση ταχύτητα για αδιαπέρατο πυθμένα ( $U_{np}=Q_{np}/(0.25h')$ ) δεν ξεπερνούσαν το 7%. Στον παρακάτω πίνακα 2 καθώς και στα επόμενα σχήματα χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της ταχύτητας  $U_{np}$  που προκύπτουν από τον τύπο  $U_{np}=Q_{np}/(0.25h')$ . Έτσι είναι δυνατή η σύγκριση των χαρακτηριστικών της ροής με διαπερατό και αδιαπέρατο πυθμένα. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των πειραμάτων με πορώδη πυθμένα και αντίστοιχα στον πίνακα 2 αυτά με τραχύ αδιαπέρατο πυθμένα.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά πειραμάτων με διαπερατό πορώδη πυθμένα

Τύπος πορώδους		$s'$	$h$	$s'/h$	$Q_t$	$U_f$	$Re_f$	$Q_f$	$Q_p$
$\varepsilon$	$k_s^+$	(cm)	(cm)		(* $10^{-3}m^3/s$ )	(m/s)	(= $U_f h'/v$ )	(* $10^{-3}m^3/s$ )	(* $10^{-3}m^3/s$ )
0.91	176	3	6	0.5	1.79	0.238	7140	1.785	0.005
0.91	176	3	7	0.428	2.78	0.268	10720	2.680	0.100
0.91	176	3	8	0.375	3.95	0.306	15300	3.825	0.125
0.70	91	3	6	0.5	2.35	0.309	9270	2.317	0.033
0.70	91	3	7	0.428	3.74	0.370	14800	3.700	0.040
0.70	91	3	8	0.375	5.42	0.424	21200	5.300	0.120

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά πειραμάτων με αδιαπέρατο τραχύ πυθμένα

$\varepsilon$	$k_s^+$	$h'$	$Q_{np}$	$U_{np}$	$Re_{np}$
		(cm)	(* $10^{-3}m^3/s$ )	(m/s)	
0.91	176	3	1.53	0.204	6120
0.91	176	4	2.51	0.251	10040
0.91	176	5	3.66	0.293	14650
0.70	91	3	1.79	0.239	7170
0.70	91	4	2.91	0.291	11640
0.70	91	5	4.19	0.335	16750

Στους παραπάνω πίνακες  $\varepsilon$ =πορώδες,  $k_s^+$ =αδιάστατος συντελεστής τραχύτητας Nikuradse,  $s'$ =πάχος πορώδους,  $h$ =συνολικό βάθος ροής,  $s'/h$ =σχετικό πάχος πορώδους,  $Q_t$ =συνολική παροχή για βάθος ροής  $h$  (μετρούμενη με τη βοήθεια του υπερχειλιστή),  $U_f$ =μέση ταχύτητα ροής πάνω από το πορώδες (υπολογισθείσα από τον μέσο όρο των σημειακών μετρήσεων της τοπικής ταχύτητας),  $Q_f$ =παροχή πάνω από το πορώδες για βάθος ροής  $h'$  ( $Q_f=U_f(0.25h')$ ),  $Q_p$ =παροχή μέσα στο πορώδες ( $Q_p=Q_t-Q_f$ ),  $Re$ =αριθμός Reynolds,  $h'$ =βάθος ροής πάνω από το πορώδες,  $Q_{np}$ =παροχή για αδιαπέρατο πυθμένα,  $U_{np}$ =μέση ταχύτητα για αδιαπέρατο πυθμένα ( $U_{np}=Q_{np}/(0.25h')$ ).

#### 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η κατανομή της ταχύτητας πάνω από το πορώδες και η επίδραση του σχετικού πάχους πορώδους  $s'/h$  στην ταχύτητα ροής πάνω από το πορώδες φαίνονται στο σχήμα 4α και 4β για διαπερατό πυθμένα με πορώδες  $\varepsilon=0.70$  και  $\varepsilon=0.91$  αντίστοιχα. Επίσης στα ίδια σχήματα φαίνονται οι λογαριθμικοί νόμοι του τοιχώματος για λείο πυθμένα και για αδιαπερατό τραχύ πυθμένα με αντίστοιχη τραχύτητα  $k_s^+$  ίση με 91 και 176. Οι νόμοι για αδιαπερατό τραχύ πυθμένα βρέθηκαν ύστερα από ανεξάρτητα πειράματα που έγιναν στο ίδιο κανάλι και με αρκετά μικρό σχετικό πάχος πορώδους όπως περιγράφεται προηγούμενα.

Συγκεκριμένα κατά Schlichting (1968), ο ημι-εμπειρικός λογαριθμικός νόμος για λείο πυθμένα είναι :

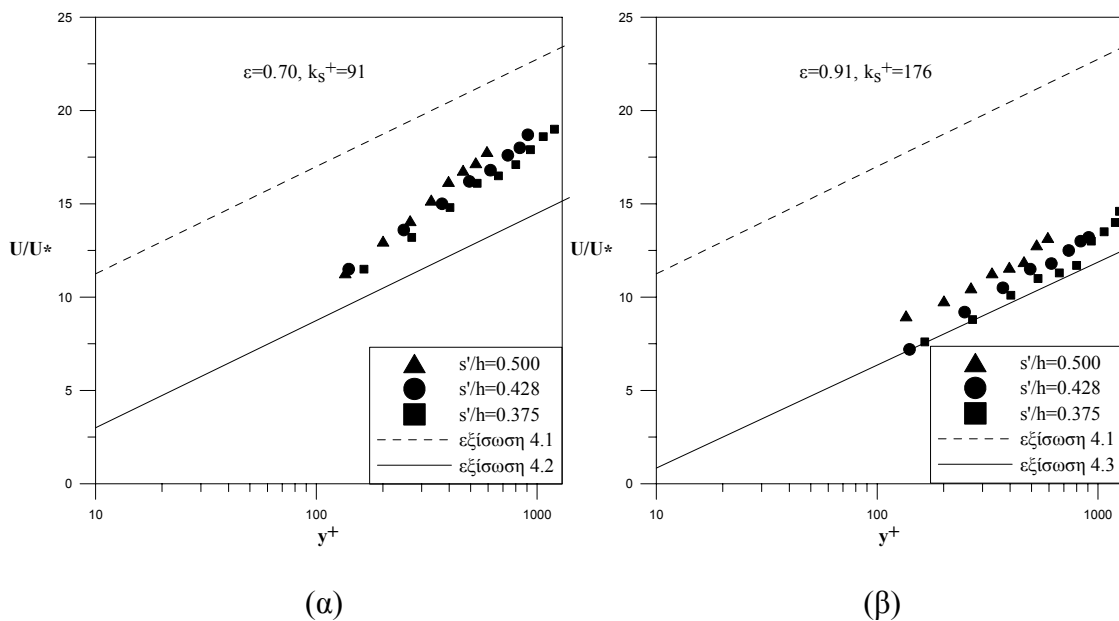
$$\frac{U}{U_*} = 5.75 \log y^+ + 5.50 \quad (4.1)$$

ενώ όπως βρέθηκε προηγουμένως, για αδιαπερατό τραχύ πυθμένα με  $k_s^+=91$  ισχύει :

$$\frac{U}{U_*} = 5.75 \log y^+ - 2.76 \quad (4.2)$$

και για τραχύ πυθμένα με  $k_s^+=176$  ισχύει :

$$\frac{U}{U_*} = 5.75 \log y^+ - 4.41 \quad (4.3)$$



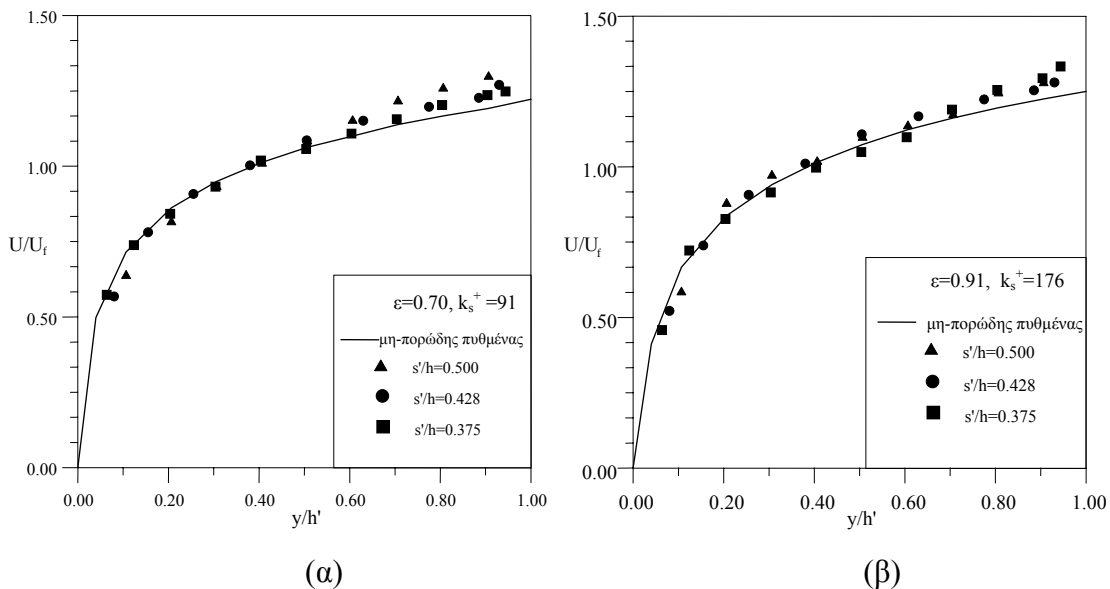
Σχήμα 4. Κατανομή της ταχύτητας πάνω από το πορώδες για διαφορετικά σχετικά πάχη πορώδους  $s'/h$ , (α)  $\varepsilon=0.70$  και (β)  $\varepsilon=0.91$ .

Όπως παρατηρείται στο σχήμα 4, π.χ για την περίπτωση  $s'/h=0.375$  οι αδιάστατες ταχύτητες  $U/U_*$  στην περίπτωση του πορώδους φίλτρου με  $\varepsilon=0.91$  βρίσκονται πολύ κοντά στον λογαριθμικό νόμο για το τραχύ τοίχωμα ενώ για το ίδιο σχετικό πάχος πορώδους για το άλλο πορώδες με  $\varepsilon=0.70$  οι ταχύτητες είναι αρκετά μεγαλύτερες. Αυτό οφείλεται στο ότι η μεγαλύτερη τραχύτητα, που οφείλεται στο πορώδες  $\varepsilon=0.91$ , μειώνει

τις τοπικές ταχύτητες ώστε σχεδόν να περιγράφονται από τον λογαριθμικό νόμο του αδιαπέρατου τοιχώματος με την ίδια τραχύτητα.

Από το σχήμα 4 φαίνεται ότι για ορισμένο πορώδες  $\varepsilon$  η συνεχής μείωση του σχετικού πάχους πορώδους έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της επίδρασης του πορώδους στη ροή πάνω από το πορώδες, οπότε και η κατανομή της ταχύτητας προσεγγίζει το λογαριθμικό νόμο για τραχύ αδιαπέρατο τοίχωμα. Επίσης από την κατανομή της ταχύτητας και για τα δύο πορώδη φαίνεται ότι το σχετικό πάχος πορώδους επιδρά στη κλίση του λογαριθμικού νόμου του τοιχώματος και συγκεκριμένα για μεγάλο σχετικό πάχος η κλίση παρουσιάζεται αυξημένη ( $\kappa < 0.41$ ) ενώ όσο μειώνεται το σχετικό πάχος πορώδους η κλίση προσεγγίζει την αντίστοιχη κλίση του λογαριθμικού νόμου για αδιαπέρατο τοίχωμα ( $\kappa = 0.41$ ). Το παραπάνω συμπέρασμα συμφωνεί και με τις αντίστοιχες διαπιστώσεις των Munoz-Goma and Gelhar (1968), Chu and Gelhar (1972) για τυρβώδη ροή σε αγωγό με πορώδη τοιχώματα. Επίσης από τη σύγκριση των σχημάτων και για το ίδιο σχετικό πάχος πορώδους η κλίση του λογαριθμικού νόμου φαίνεται ότι μειώνεται με την αύξηση του πορώδους  $\varepsilon$  (αύξηση της διαπερατότητας).

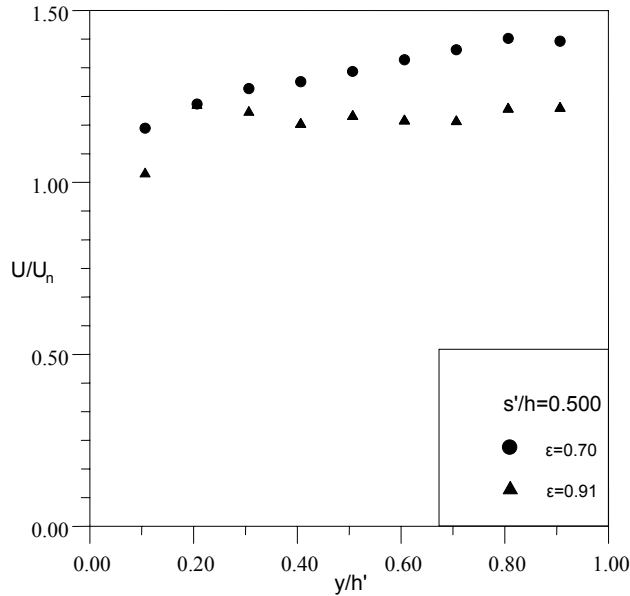
Στο σχήμα 5 φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας  $U/U_f$  ως προς το βάθος ροής  $y/h'$  πάνω από τον διαπερατό πυθμένα για τα δύο πορώδη 0.70 και 0.91 αντίστοιχα. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και η θεωρητική κατανομή της αντίστοιχης ταχύτητας για αδιαπέρατο πυθμένα με τραχύτητα  $k_s^+ = 91$  και 176 (από τις μετρήσεις ταχύτητας που πραγματοποιήθηκαν για αδιαπέρατο πυθμένα). Όπως φαίνεται η κατανομή της ταχύτητας διαφέρει από την αντίστοιχη με αδιαπέρατο πυθμένα της ίδιας τραχύτητα κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Η σύγκριση των κατανομών  $U/U_f$  για τις δύο διαπερατότητες δείχνει ότι λόγω της μεγαλύτερης τραχύτητας στην δεύτερη περίπτωση ( $\varepsilon = 0.91$ ) οι ταχύτητες κοντά στον πυθμένα είναι αρκετά μικρότερες (μέχρι 20% σε σχέση με αυτές του πορώδους με  $\varepsilon = 0.70$ ) ενώ αντίστοιχα αυτές κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια μεγαλύτερες.



Σχήμα 5. Κατανομή του  $U/U_f$  ως προς βάθος ροής  $y/h'$  (α)  $\varepsilon = 0.70$  και (β)  $\varepsilon = 0.91$ .

Η επίδραση του πορώδους  $\varepsilon$  στην κατανομή της ταχύτητας πάνω από το πορώδες φαίνεται στο σχήμα 6 όπου η τοπική ταχύτητα έχει αδιαστατοποιηθεί με τη μέση ταχύτητα  $U_{np}$  για αδιαπέρατο πυθμένα με την ίδια τραχύτητα έτσι ώστε να απαλειφούν

οι επιδράσεις της τραχύτητας. Φαίνεται ότι για οποιαδήποτε απόσταση από τη διεπιφάνεια οι τοπικές ταχύτητες πάνω από το πορώδες είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για μη-πορώδη πυθμένα (πάνω από 25%). Η αύξηση είναι μικρότερη για την περίπτωση υψηλότερης τραχύτητας ( $k_s^+ = 176$ ) που οφείλεται στην αύξηση της αντίστασης που ασκείται από την τραχύτερη διεπιφάνεια. Αυτό δείχνει την μεγαλύτερη παροχετευτική ικανότητα του αγωγού με τον πορώδη πυθμένα όταν συγκρίνεται με αυτή με μη-πορώδη (αδιαπέρατο) πυθμένα ίδιου βάθους ροής.



Σχήμα 6. Επίδραση του πορώδους  $\varepsilon$  στην ταχύτητα ροής  $U/U_{np}$

Εκτός όμως από τις επιδράσεις του πορώδους στην κατανομή της μέσης ταχύτητας ενδιαφέρον παρουσιάζει και η επίδραση του πορώδους στην κατανομή των τυρβωδών τάσεων (κάθετων και διατμητικών) και της τυρβώδους κινητικής ενέργειας. Για ροή σε ανοικτό αγωγό με αδιαπέρατο πυθμένα οι σχέσεις που ισχύουν για τα τυρβώδη μεγέθη (Nezu and Nakagawa 1993) είναι:

$$\frac{u'}{U_*} = 2.30 \cdot \exp\left(\frac{-y}{h'}\right) \quad (4.4)$$

$$\frac{v'}{U_*} = 1.27 \cdot \exp\left(\frac{-y}{h'}\right) \quad (4.5)$$

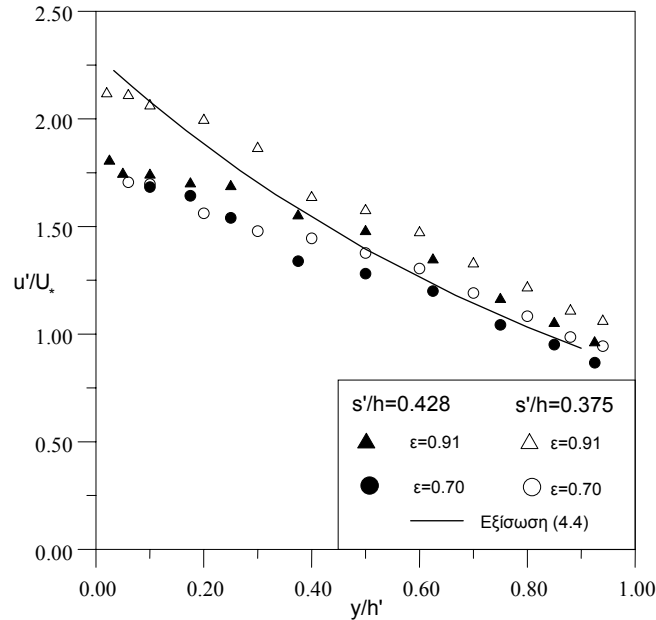
$$\frac{w'}{U_*} = 1.63 \cdot \exp\left(\frac{-y}{h'}\right) \quad (4.6)$$

$$\frac{-\overline{uv}}{U_*} = 1 - \left(\frac{y}{h'}\right) \quad (4.7)$$

$$\frac{k}{U_*^2} = 4.78 \cdot \exp\left(\frac{-2y}{h'}\right) \quad (4.8)$$

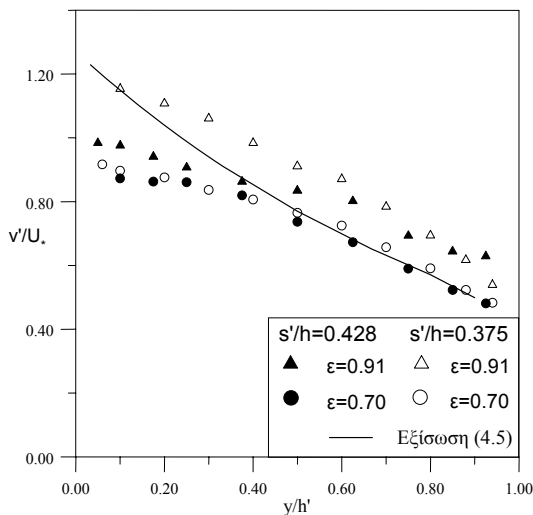
Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης  $u'/U_*$  ως προς το βάθος ροής ( $u'/U_*$  vs  $y/h'$ , με  $u' = \sqrt{\overline{u^2}}$  και  $\overline{u^2}$  = ορθή τυρβώδης τάση στη διεύθυνση της ροής) για τα πορώδη με  $\varepsilon = 0.91$  και  $\varepsilon = 0.70$  και για σχετικά πάχη πορώδους  $s'/h = 0.428$  και  $s'/h = 0.375$ . Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται η ημι-εμπειρική καμπύλη της κατανομής της εξίσωσης (4.4).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7 η κλίση της καμπύλης της παραπάνω εξίσωσης (4.4) για το  $u'/U_*$  είναι παρόμοια με την κλίση από τα πειραματικά δεδομένα και για τα δύο πορώδη μακριά από τη διεπιφάνεια πορώδους/νερού (για  $y/h' > 0.4$ ) ενώ κοντά στη διεπιφάνεια οι τιμές του  $u'/U_*$  είναι μικρότερες λόγω της αλληλεπίδρασης της ροής μέσα στο πορώδες και πάνω από αυτό.

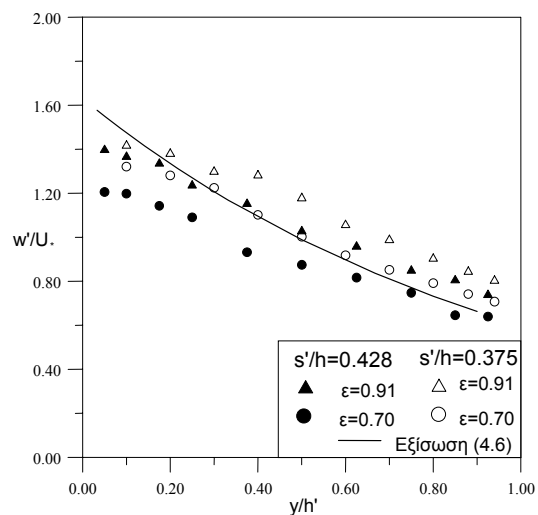


Σχήμα 7. Κατανομή της έντασης της τύρβης  $u'/U_*$  σε σχέση με το βάθος ροής  $y/h'$

Στο σχήμα 8α φαίνεται η κατανομή της κατακόρυφης έντασης της τύρβης  $v'/U_*$  ως προς το βάθος ροής  $y/h'$  για  $\epsilon = 0.91$  και  $\epsilon = 0.70$  και για σχετικά πάχη πορώδους  $s'/h' = 0.428$  και  $s'/h' = 0.375$ . Και εδώ η κλίση της εξίσωσης (4.5) για  $v'/U_*$  είναι παρόμοια της κλίσης από τα πειραματικά δεδομένα για  $y/h' > 0.4$ .



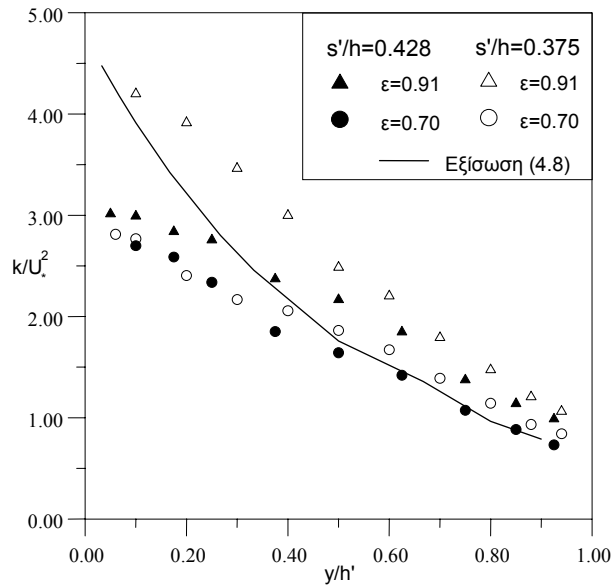
(α)



(β)

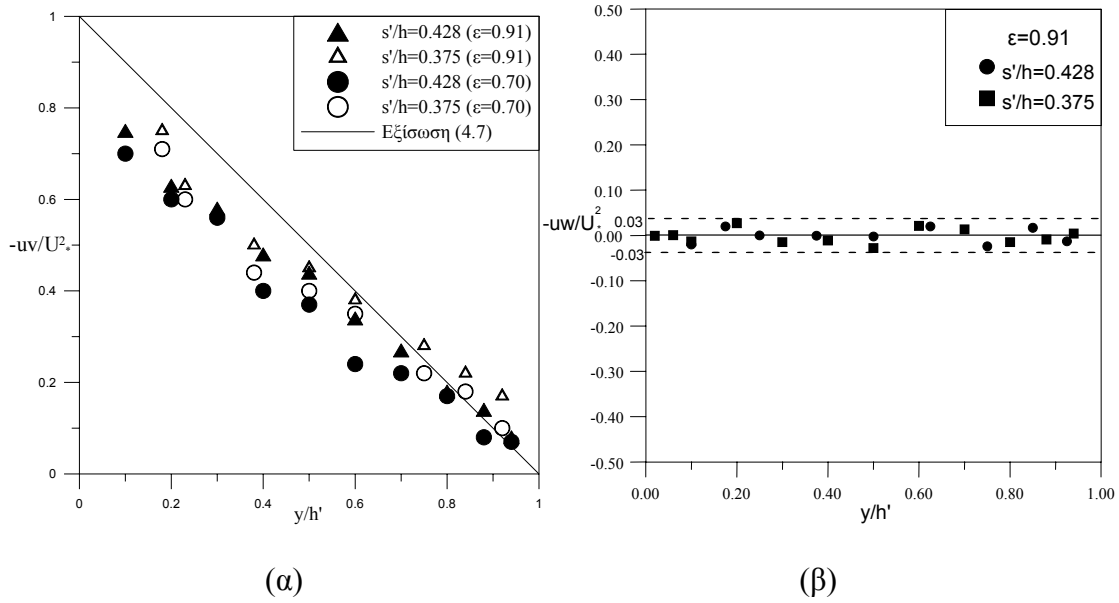
Σχήμα 8. (α) Κατανομή της έντασης της τύρβης  $v'/U_*$  ως προς το βάθος ροής  $y/h'$   
(β) Κατανομή της έντασης της τύρβης  $w'/U_*$  ως προς το βάθος ροής  $y/h'$

Η κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας  $k$  στο βάθος ροής  $y/h'$  για τα πορώδη φίλτρα παρουσιάζεται στο σχήμα 9. Το  $k$  υπολογίστηκε από τη σχέση  $k = \frac{1}{2} \cdot (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})$ . Η κλίση της εξίσωσης (4.8) είναι και εδώ παρόμοια με τις κλίσεις των πειραματικών δεδομένων για  $y/h' > 0.4$  ενώ κοντά στο πυθμένα οι τιμές είναι μικρότερες αφού το  $k$  υπολογίστηκε από τις τιμές των κάθετων τάσεων  $\overline{u^2}$ ,  $\overline{v^2}$  και  $\overline{w^2}$ .



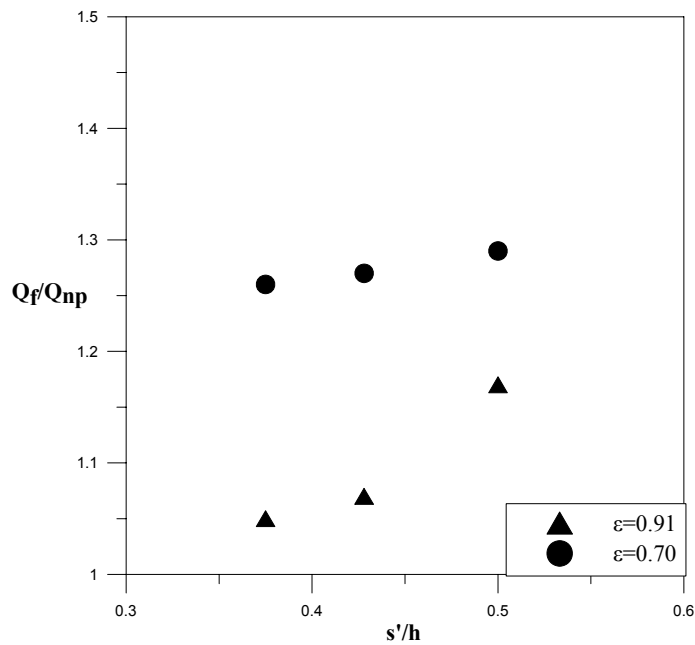
Σχήμα 9. Κατανομή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας  $k$  ως προς το βάθος  $y/h'$

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 10α) φαίνεται η κατανομή της διατμητικής τάσης  $\overline{uv}$  ως προς το βάθος ( $-\overline{uv}/U_*^2$  vs  $y/h'$ ). Παρατηρούμε ότι για το ίδιο πορώδες ( $\varepsilon=0.91$  ή  $\varepsilon=0.70$ ) με μείωση του σχετικού πάχους πορώδους έχουμε μία μικρή αύξηση της τυρβώδους διατμητικής τάσης  $\overline{uv}$ . Μακριά από τον πυθμένα υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και της θεωρητικής εξίσωσης (4.7), αλλά η διατμητική τάση είναι μειωμένη κοντά στον πορώδη πυθμένα σε σύγκριση με τον αδιαπέρατο. Στο σχήμα 10β απεικονίζεται η κατανομή της διατμητικής τάσης  $\overline{uw}$  ως προς το βάθος ροής ( $-\overline{uw}/U_*^2$  vs  $y/h'$ ). Παρατηρείται ότι για το ίδιο πορώδες ( $\varepsilon=0.91$ ) οι τιμές για όλα τα σχετικά πάχη πορώδους είναι σχεδόν μηδέν με πολύ μικρές αποκλίσεις (από  $-0.03$  έως  $0.03$ ), γεγονός το οποίο αναμένεται διότι οι μετρήσεις έγιναν στο μέσον του καναλιού (που αποτελεί άξονα συμμετρίας). Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για το άλλο πορώδες με  $\varepsilon=0.70$ .



Σχήμα 10 (α) Κατανομή της τυρβώδους διατμητικής τάσης  $\overline{uv}$  ως προς το βάθος  $y/h'$   
 (β) Κατανομή της τυρβώδους διατμητικής τάσης  $\overline{uw}$  ως προς το βάθος  $y/h'$

Τέλος οι παραπάνω επιδράσεις του πορώδους πυθμένα στην κατανομή ταχυτήτων έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή της παροχетеυτικής ικανότητας των αγωγών. Στο σχήμα 11 συγκρίνεται η παροχетеυτική ικανότητα ανοικτών αγωγών πάνω από πορώδη πυθμένα με αντίστοιχους με αδιαπέρατο πυθμένα ίδιου βάθους ροής (3cm, 4cm, και 5cm) και ίδιας τραχύτητας ( $k_s^+ = 91$  και 176). Η παροχή  $Q_f$  έχει αδιαστατοποιηθεί με την αντίστοιχη παροχή  $Q_{np}$  για αγωγό με αδιαπέρατο πυθμένα της ίδιας τραχύτητας και του ίδιου βάθους ροής  $h'$ , έτσι ώστε να διερευνηθεί αποκλειστικά η επίδραση του πορώδους  $\epsilon$ .



Σχήμα 11. Επίδραση του πορώδους  $\epsilon$  στην παροχетеυτική ικανότητα του αγωγού  $Q_f/Q_{np}$

Από το σχήμα 11 παρατηρείται ότι οι λόγοι  $Q_f/Q_{np}$  είναι μεγαλύτεροι της μονάδας γεγονός που οφείλεται στην μεγάλη επίδραση της τραχύτητας. Αν ο αδιαπέρατος πυθμένας ήταν λείος σαφώς και οι λόγοι αυτοί θα ήταν μικρότεροι της μονάδας (Prinos et. al 2003), αλλά στην προκειμένη περίπτωση η επίδραση της τραχύτητας είναι σημαντική με αποτέλεσμα να αντιστρέφονται τα αποτελέσματα. Για το μικρότερο πορώδες ( $\varepsilon=0.70$ ) η παροχή εμφανίζεται αυξημένη κατά 25-30% σε σχέση με την αντίστοιχη για αδιαπέρατο πυθμένα για όλα τα σχετικά πάχη πορώδους ενώ για το μεγαλύτερο πορώδες ( $\varepsilon=0.91$ ) η παροχή είναι αυξημένη κατά 17% περίπου για  $s'/h$  ίσο με 0.5 αλλά η αύξηση αυτή γίνεται μικρότερη (5%) για  $s'/h=0.375$ . Αυτό φανερώνει την μικρή επίδραση του πορώδους πυθμένα με μεγάλο πορώδες  $\varepsilon$  και μικρό σχετικό πάχος πορώδους.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την εργασία αυτή, είναι τα ακόλουθα :

- Αύξηση του πορώδους από  $\varepsilon=0.70$  σε  $\varepsilon=0.91$  έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέσης ταχύτητας πάνω από το πορώδες, εξαιτίας της μεγαλύτερης διεύθυνσης της ροής μέσα σε αυτό, στην περίπτωση του πορώδους με  $\varepsilon=0.91$ . Η συνεχής μείωση του σχετικού πάχους πορώδους έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της επίδρασης του πορώδους στη ροή πάνω από το πορώδες, οπότε και η κατανομή της ταχύτητας προσεγγίζει το λογαριθμικό νόμο για τραχύ αδιαπέρατο τοίχωμα. Για σχετικό πάχος πορώδους ίσο με 0.5 η κλίση της κατανομής της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη και επομένως η σταθερά von Karman είναι μικρότερη του 0.41. Με μείωση του σχετικού πάχους πορώδους η σταθερά πλησιάζει την τιμή του 0.41 που παρατηρείται σε ροές πάνω από αδιαπέρατο πυθμένα.
- Η κατανομή των τυρβωδών χαρακτηριστικών (ένταση τύρβης, τάσεις Reynolds) πάνω από τον διαπέρατο πυθμένα είναι παρόμοια με αυτή των ημι-εμπειρικών κατανομών για αδιαπέρατο πυθμένα για  $y/h' > 0.4$  ενώ κοντά στη διεπιφάνεια οι τιμές των αντίστοιχων χαρακτηριστικών είναι μικρότερες λόγω της αλληλεπίδρασης της ροής στο πορώδες και της ροής πάνω από αυτό.
- Η παροχτευτική ικανότητα των αγωγών με πορώδη πυθμένα παρουσιάζεται αυξημένη σε σχέση με αυτή αγωγών με αδιαπέρατο πυθμένα μέχρι 30% για τις συνθήκες που εξετάστηκαν (ίδιο βάθος ροής και ίδια τραχύτητα) γεγονός που οφείλεται στην σημαντική επίδραση της τραχύτητας. Η αύξηση αυτή γίνεται μικρότερη με αύξηση του πορώδους  $\varepsilon$  και μείωση του σχετικού πάχους πορώδους  $s'/h$ .
- Τέλος να σημειωθεί ότι για τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν θα πρέπει να διατηρηθούν κάποιες επιφυλάξεις ως προς την ακρίβειά τους και υπάρχει ανάγκη περαιτέρω έρευνας για την επιβεβαίωση αυτών.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Antohe, B.V. and J.L. Lage, 1997. *A general two-equation macroscopic turbulence model for incompressible flow in porous media*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.40, 3013-3024.
- Beavers, G.S., and Joseph, D.D. 1967. *Boundary conditions at a naturally permeable wall*, Journal of Fluid Mechanics, vol.30, 197-207.
- Choi, C., and Waller, P., (1997). *Momentum transport mechanism for water flow over porous media*, Journal of Environmental Engineering, vol.123, 792-799.
- Chu, Y.H., and Gelhar, L.W., 1972. *Turbulent pipe flow with granular permeable boundaries*, Report No. 148, Ralph M. Parsons Lab. for Water Resour and Hydrodynamics, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge, Mass.
- Getachew, D., Minkowycz, W.J., Lage, J.L., 2000. *A modified form of the k-ε model for turbulence flows of an incompressible fluid porous media*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 43, 2909-2915.
- Gilver, R.C and Altobelli, S.A, 1994. *A determination of the effective viscosity for the Brinkman-Forchheimer flow model*, Journal of Fluid Mechanics, vol.28, 355-370.
- Gupte S., Advani S., 1996. *Flow near the permeable boundary of a porous medium: An experimental investigation using LDA*, Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, USA., vol.22, 408-422.
- Lage J.L. de Lemos M.J.S. and Nield D.A. 2002. *Modelling turbulence in porous media. Transport Phenomena in Porous Media*, D.B. Ingham and I. Pop, eds., Pergamon, Amsterdam, 198-230.
- Larrea J., 1995. *Laminar flow in a channel formed by two porous walls*, Hydra 2000, vol.2, 170-175.
- de Lemos M.J.S. and Silva R.A., 2006. *Turbulent flow over a layer of a highly permeable medium simulated with a diffusion-jump model for the interface*, Int. J. of Heat and Mass Transfer, 49, 546-556.
- Li B., Garga V., 1998. *Theoretical solution for seepage flow in overtopped rockfill*, Journal of Hydraulic Engineering, vol.124, 213-217.
- Masuoka, T., and Takatsu, Y., 1996. *Turbulence model for flow through porous media*, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.39, 2803-2809.
- Mendoza, C., Zhou, D., 1992. *Effects of porous bed on turbulent stream flow above bed*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol.118, 1222-1239.
- Munoz-Goma, R.J., and Gelhar, L.W., (1968). *Turbulent pipe flow with rough and porous walls*, Report No. 109, Hydrodynamics Lab., Dept. of Civ. Engrg., Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge, Mass.
- Nakagawa, A. and Kuwahara, F., 1999. *A Macroscopic Turbulence Model for Flow in a Porous Media*, Journal of Fluids Engineering, vol.121, 427-433.
- Nezu, I., 1977. *Turbulent structure in open-channel flows*, Ph.D thesis, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- Nezu, I. and Nakagawa, A., 1993. *Turbulence in open-channel flows*, IAHR Monograph, chap.4, 53-54.
- Nield D.A., 2001. *Alternative models of turbulence in porous medium and related matters*, Journal of Fluids Engineering, ASME, vol. 123, 928-931.
- Pedras M.H.J. and deLemos M.J.S., 2001. *Macroscopic turbulence modelling for incompressible flow through undeformable porous media*, Int. J. of Heat and Mass Transfer, vol. 44, 1082-1093.

- Poulikakos, D., Kazmierczak, M., 1987. *Forced convection in a duct partially filled with a porous material*, Journal of Heat Transfer, vol. 109, 653-662.
- Prinos, P., Sofialidis D., Keramaris E., 2003. *Turbulent flow over and within a porous bed*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 129, 720-733.
- Rodi, W., (1980). *Turbulence Models and Their Applications in Hydraulics*, 104pp., International Association Hydraulic Research, Delft.
- Ruff, J.F., and Gelhar, L.W., 1970. *Porous boundary effects in turbulent shear flow*, Report No. 126, Water Resour. and Hydrodynamics Lab., Dept. of Civ. Engrg., Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge Mass.
- Sahraoui, M. and Kaviany, M., 1992. *Slip and no-slip velocity boundary conditions at interface of porous, plain media*, Int. Jour. Heat Mass Transfer, vol.35, 927-943.
- Schlichting H., 1968. *Boundary Layer Theory*, McGraw Hill Eds.
- Vafai, K., and Thiyagaraja, R., 1987. *Analysis of flow and heat transfer at the interface region of a porous medium*, International Journal of Heat Mass Transfer, vol.30, 1391-1405.
- Zhou, D., and Mendoza, C., 1993. *Flow through porous bed of Turbulent Stream*, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, vol.119, 365-383.
- Zippe, J. and Graf, W.H., 1983. *Turbulent boundary-layer flow over permeable and non-permeable rough surfaces*, J. Hydraylic. Res. IAHR, vol.21, 51-65.