

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΑΠΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ  
 ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΛΛΕΚΤΗ ΣΕ ΥΔΑΤΙΝΗ ΦΛΕΒΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ  
 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.

Αμβρόσιος Μπαγτζόγλου  
 Computational Hydrology Laboratory  
 Civil Engineering Department  
 University of California  
 Irvine, Ca 92717, U.S.A.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η μετάδοση θερμότητας από επίπεδο εξωτερικό ηλιακό συλλέκτη σε υδάτινη φλέβα με τη χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου, που βασίστηκε στον αλγόριθμο Simple. Βρέθηκε ότι για να μεγιστοποιηθεί η ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται πρέπει η ροή να είναι στρωτή και να χαρακτηρίζεται από αριθμό Reynolds της τάξης του 100. Επίσης βρέθηκε ότι η μέγιστη αποτελεσματικότητα επιτυγχάνεται όταν οι αδιάστατες αποστάσεις μεταξύ των σημείων εισροής είναι μέχρις 10.

ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ: Αριθμητικό Μοντέλο, Εξωτερικός Συλλέκτης, Αλγόριθμος Simple, Στρωτή Ροή, Αριθμός Sherwood, Ανηγμένη Θερμοκρασία, Σημείο Εισροής.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Σκοπός της εργασίας είναι να μελετήσει το φαινόμενο της μεταφοράς μάζας και θερμότητας γύρω από την επιφάνεια επίπεδου εξωτερικού ηλιακού συλλέκτη. Αναπτύχθηκε ένα αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης το οποίο βασίζεται στον αλγόριθμο Simple όπως αυτός, με μεγάλη λεπτομέρεια, περιγράφεται από τον Patankar (1) και τροποποιείται από τον Elghobashi (2).

Οι εξισώσεις της συνέχειας, διατήρησης της ορμής, και μετάδοσης της θερμότητας χρησιμοποιούνται και επιλύονται, με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων [Elghobashi (2)], από αυτό το αριθμητικό μοντέλο σε αλληλεξάρτηση με τις οριακές συνθήκες οι οποίες χαρακτηρίζουν το διακριτοποιημένο χώρο.

Απώτατος σκοπός αυτής της ερευνητικής προσπάθειας ήταν να δείξει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης των αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης σαν εργαλεία πρόβλεψης για τον σχεδιαστή ενεργητικών ηλιακών συστημάτων.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σαν εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου, το οποίο θα περιγραφεί παρακάτω, μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός συλλέκτη ηλιακής ενέργειας τόσο από ρευστοδυναμικής όσο και από θερμικής άποψης. Ο, υπό μελέτη, επίπεδος εξωτερικός συλλέκτης ηλιακής ακτινοβολίας αποτελείται από ξύλινο σκελετό και είναι καλυμμένος με φύλλα πλαστικού πολυαιθυλενίου.

Το ένα από αυτά τα φύλλα είναι μαύρου χρώματος και αποτελεί τον συλλέκτη (Σχ. 1). Πάνω σ' αυτό είναι τοποθετημένο, έτσι ώστε να εφάπτονται, ένα άλλο φύλλο από διαφανές πολυαιθυλένιο με σκοπό να δημιουργείται μια μεμβράνη νερού [Γραφιαδέλλης (3)]. Αυτή η μεμβράνη, μεταξύ των δύο πλαστικών επιφανειών, (Σχ. 1, σημείο Α) αποτελεί μία υδάτινη φλέβα η οποία ρέει και απορροφά θερμότητα από τον συλλέκτη. Η τροφοδοσία του νερού γίνεται με τη χρήση σωλήνα ο οποίος διατρέχει την κατασκευή κατά μήκος (Σχ. 1, σημείο Β). Σε τακτές αποστάσεις ο σωλήνας έχει σημεία εισροής, τα οποία μπορούν να είναι απλές σπές διανομής νερού (μπέκ).

Πρέπει να τονιστεί ότι ο σχεδιασμός και η κατασκευή του συλλέκτη έγινε στο τμήμα Λαχανοκομίας του Κέντρου Γεωργικής Έρευνας Βόρειας Ελλάδας στη Θεσσαλονίκη. Οι διαστάσεις που αναφέρονται στο σχήμα 1 είναι ρεαλιστικές μεν όσο αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και αναλογίες του συλλέκτη, υποθετικές δε όσο αφορά την ύπαρξη πανομοιότυπης κατασκευής στο Κ.Γ.Ε.Β.Ε. Η συνολική συλλεκτική επιφάνεια είναι  $60 \text{ m}^2$ .

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το σύστημα συντεταγμένων και τα όρια του συστήματος ροής, γύρω από το σημείο εισροής, φαίνονται στο σχήμα 2 σε μεγεθυνημένη στρεβλή κλίμακα. Η υδάτινη φλέβα εισέρχεται στο σύστημα από το σημείο εισροής διαμέτρου  $b$  με μία μέση ταχύτητα  $v_j$  και με μία θερμοκρασία νερού  $t_j$ . Οι επιφάνειες που περιβάλλουν τη φλέβα απέχουν απόσταση  $h$ . Τέλος, η κάτω επιφάνεια, που αποτελεί τον συλλέκτη, έχει μία θερμοκρασία  $t_s$ .

Το πεδίο ροής θεωρείται διδιάστατο καθώς η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων εισροής είναι τέτοια ώστε να μην υπάρχει αλληλεπίδραση λόγω εγκάρσιων στροβιλισμών.

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΔΙΕΠΟΥΝ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Κάνοντας τις υποθέσεις : μόνιμης ροής και ασυμπίεστου ιξώδους Νευτόνιου ρευστού, έχουμε τις παρακάτω εξισώσεις σε αδιάστατη μορφή.

Εξίσωση Συνέχειας

$$\partial U/\partial X + \partial V/\partial Y = 0$$

Εξισώσεις Διατήρησης της Ορμής

$$\text{Διεύθυνση-X : } U \cdot \partial U/\partial X + V \cdot \partial U/\partial Y = -\partial P/\partial X + (\partial^2 U/\partial X^2 + \partial^2 U/\partial Y^2)/Re$$

$$\text{Διεύθυνση-Y : } U \cdot \partial V/\partial X + V \cdot \partial V/\partial Y = -\partial P/\partial Y + (\partial^2 V/\partial X^2 + \partial^2 V/\partial Y^2)/Re$$

Εξίσωση Μεταφοράς της Θερμότητας

$$\partial^2 T/\partial X^2 + \partial^2 T/\partial Y^2 = Pe \cdot (\partial T/\partial X + \partial T/\partial Y)$$

Οι ανηγμένες (αδιάστατες) μεταβλητές στις παραπάνω εξισώσεις ορίζονται ως εξής :

$$L = h/b$$

$$X = x/b$$

$$Y = y/b$$

$$U = u/v_j$$

$$V = v/v_j$$

$$Re = b \cdot v_j / \nu$$

$$Pe = v_j \cdot b / \alpha$$

$$P = p / (\rho \cdot v_j^2)$$

$$T = (t - t_j) / (t_s - t_j)$$

Όπου, εκτός από τις ήδη ορισμένες παραμέτρους,  $\nu$  είναι ο συντελεστής κινηματικού ιξώδους [ $L^2/T$ ],  $\rho$  είναι η πυκνότητα [ $M/L^3$ ], και  $\alpha$  είναι ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας [ $L^2/T$ ].

### ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

#### Σημείο Εισροής

Θεωρώντας πλήρως αναπτυγμένο προφίλ ταχυτήτων εισόδου καταλήγουμε στην εξής εξίσωση :

$$V = 1.5 - 6 X^2$$

όπου  $V$  είναι οι κατακόρυφες ταχύτητες στο σημείο εισροής. Τέλος, η ανηγμένη θερμοκρασία είναι  $T = 0$ .

#### Ανω Επιφάνεια

Η επιφάνεια αυτή θεωρείται αδιαπέρατη και μονωμένη, και συνεπώς :

$$U = 0 \quad V = 0 \quad \text{και} \quad \partial T / \partial Y = 0$$

#### Κάτω Επιφάνεια (Συλλέκτης)

$$U = 0 \quad V = 0 \quad \text{και} \quad T = 1$$

#### Αξονας Συμμετρίας

$$\partial U / \partial X = 0 \quad \partial V / \partial Y = 0 \quad \text{και} \quad \partial T / \partial X = 0$$

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ

- Ο κানাβος με βάση τον οποίο το πεδίο ροής διακριτοποιήθηκε σε 697 κόμβους, σχεδιάστηκε έτσι ώστε το σημείο εισροής να είναι διακριτοποιημένο σε 5 σημεία. Ο κানাβος είναι ανομοιόμορφος και κατά τις δύο διευθύνσεις με ένα λόγο επέκτασης ίσο με 1.5.
- Για τα ισοζύγια μάζας, ορμής και ενέργειας το 0.001 θεωρήθηκε ικανοποιητικό κριτήριο σύγκλισης.
- Ο αριθμός Sherwood υπολογίστηκε με βάση τις αδιάστατες παραμέτρους ως εξής :

$$Sh = \partial T / \partial Y$$

πάνω στη θερμαινόμενη επιφάνεια.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η εκτέλεση του προγράμματος πραγματοποιήθηκε σε υπολογιστή VAX, και τα αποτελέσματα αναλύθηκαν και σχεδιάστηκαν με χρήση του πακέτου γραφικών του N.C.A.R. (National Center for Atmospheric Research).

Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται οι γραμμές ροής κοντά στο σημείο εισροής και μέχρις μιας ανηγμένης απόστασης  $X=40$ , από την ολική διάσταση  $X=490$  του χωρίου. Είναι εμφανές ότι για μεγαλύτερες ταχύτητες ροής, και κατά συνέπεια για μεγαλύτερες τιμές του αριθμού Reynolds, η ανακύκλωση και η διαταραχή της στρωματοποιημένης ροής επεκτείνεται προς την περιοχή εκροής. Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται για τις ίδιες τιμές του αριθμού Reynolds οι ισοθερμικές καμπύλες. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι:

- Οι ισόθερμες έχουν γενικά τη μορφή των γραμμών ροής.
- Για μικρές ταχύτητες ροής η διάχυση κυριαρχεί στη συναγωγή, αναγκάζοντας τις ισοθερμικές καμπύλες να εκτείνονται σε μεγαλύτερο μέρος του πεδίου ροής.

Στο σχήμα 5 έχει σχεδιαστεί ο αριθμός Sherwood σαν συνάρτηση της ανηγμένης απόστασης από το σημείο εισροής, για τιμές του αριθμού Reynolds ίσες με 400 και 100. Αξίζει να σημειωθεί η απότομη πτώση που παρουσιάζεται στην καμπύλη για αδιάστατες αποστάσεις γύρω στην τιμή  $X=10$ .

Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται ένα προφίλ ταχυτήτων ροής, στην περιοχή εκροής, και συγκρίνεται με την αναλυτική λύση για ροή μεταξύ παραλλήλων πλακών. Εμφανής είναι η πολύ καλή συμπεριφορά των αριθμητικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα αναλυτικά, καθώς  $u=0$  στην άνω επιφάνεια,  $u=u_{\max}$  και  $\partial u/\partial y=0$  στον άξονα συμμετρίας.

Η κατανομή των ανηγμένων θερμοκρασιών στην περιοχή εκροής, όπου θεωρούμε πλήρως αναπτυγμένη ροή, παρουσιάζεται στο σχήμα 7. Όπως αναμενόταν η αδιάστατη θερμοκρασία  $T=1$  στην κάτω επιφάνεια,  $T \neq 0$  και  $\partial T/\partial y=0$  στην άνω επιφάνεια. Ας σημειωθεί ότι για την περίπτωση όπου  $Re=100$  το προφίλ ανηγμένων θερμοκρασιών τείνει να φανεί πιο ομοιόμορφο και πιο κοντά προς μια γραμμική μεταβολή, ως προς  $y$ , σε αντίθεση με την περίπτωση όπου  $Re=400$ .

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το φαινόμενο της μετάδοσης θερμότητας από την επιφάνεια του επίπεδου εξωτερικού ηλιακού συλλέκτη σε υδάτινη φλέβα επηρεάζεται τόσο από την ταχύτητα ροής όσο και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής.

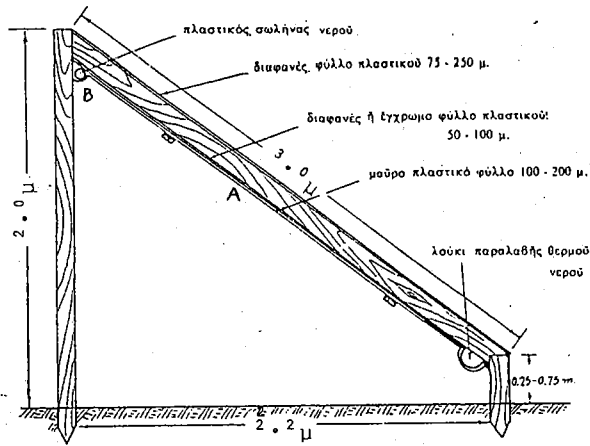
Οι μεγαλύτερες τιμές της θερμικής βαθμίδας (πτώση της θερμοκρασίας ανά κατακόρυφη απόσταση) επιτυγχάνονται για αδιάστατες αποστάσεις γύρω από το σημείο εισροής μέχρις της τιμής 10 (Σχ. 5). Αυτό σημαίνει ότι ο σωλήνας διανομής του νερού θα πρέπει να έχει σημαία εισροής ανά αποστάσεις δεκαπλάσιες από την απόσταση μεταξύ των δύο επιφανειών. Με βάση το μήκος στο οποίο κυριαρχούν οι στροβιλισμοί (Σχ. 4) και την χωρική κατανομή της ανηγμένης θερμοκρασίας (Σχ. 3 και Σχ. 5) καθορίζεται σαν ανώτατη τιμή του αριθμού Reynolds το 400. Αυτό έχει σαν συνέπεια, με βάση τυπικές διαστάσεις, να προσδιορίζεται μια παροχή τροφοδοσίας του ηλιακού συστήματος ίση με  $0.05 \text{ l/s}$  ανά  $\text{m}^2$  του συλλέκτη. Αυτή η τιμή αν και είναι σαφώς μικρότερη του ορίου  $0.1-0.2 \text{ l/s/m}^2$  [Χριστοφορίδης, (4)], είναι μέσα στα πλαίσια της λογικής και αξίζει να τύχει περαιτέρω συζήτησης. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι τα συστήματα για

τα οποία καθορίζεται αυτό το όριο, αντίθετα με το υπό μελέτη σ'αυτή την εργασία σύστημα, είναι ιδιωτικές μονάδες των 3-4m<sup>2</sup> συλλεκτικής επιφάνειας.

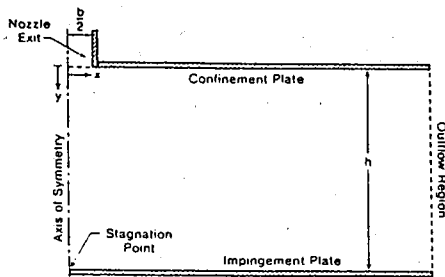
Τέλος, ο απώτατος σκοπός της εργασίας εκπληρώθηκε με το να δείξει την πληθώρα χρήσιμων πληροφοριών που μπορεί να αντλήσει ο σχεδιαστής ηλιακών συστημάτων όταν χρησιμοποιεί αριθμητικά μοντέλα σαν εργαλεία πρόβλεψης.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

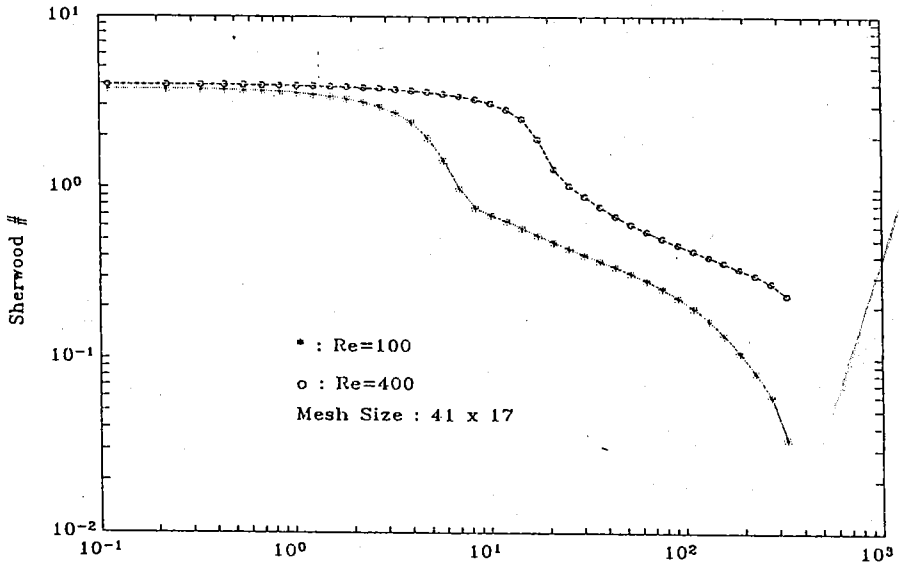
- (1) Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
- (2) Elghobashi, S., Numerical Methods in Heat, Mass and Momentum Transport, Lecture Notes, Mechanical Engineering Department, University of California/Irvine, 1980.
- (3) Γραφιαδέλλης, Μ., Σύγχρονα Θερμοκήπια, Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη, 1980.
- (4) Χριστοφορίδης, Α. Χ., Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα για τη Θέρμανση Κατοικίας, Σεμινάριο ΕΛ.ΚΕ.ΠΑ., Θεσσαλονίκη 1988.



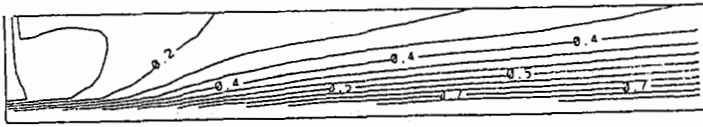
Σχ.1. Τομή ηλιακού συλλέκτη, που σχεδιάστηκε στο τμήμα Λαχανοκομίας του Κ.Γ.Ε.Β.Ε., στη Θεσσαλονίκη. (Από Γραφιαδέλλη, 1980)



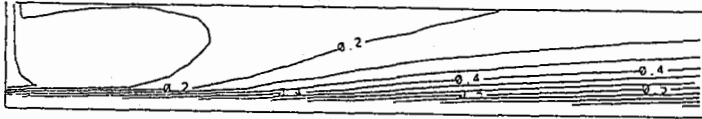
Σχ. 2. Σύστημα των συντεταγμένων και όρια του πεδίου ροής, στο σημείο εισροής.



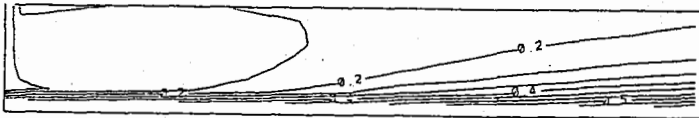
Σχ. 5. Αριθμός Sherwood σαν συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης από το σημείο εισροής.



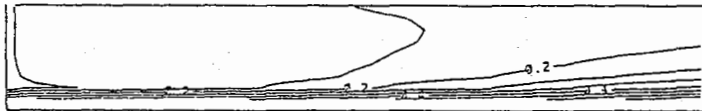
α)  $R=100$



β)  $R=200$



γ)  $R=300$

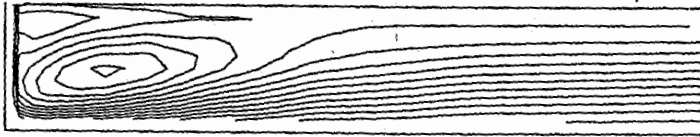


δ)  $R=400$

Σχ. 3. Ανηγμένες θερμοκρασίες γύρω από το σημείο εισροής, για διάφορους αριθμούς Reynolds.



α)  $R=100$



β)  $R=200$



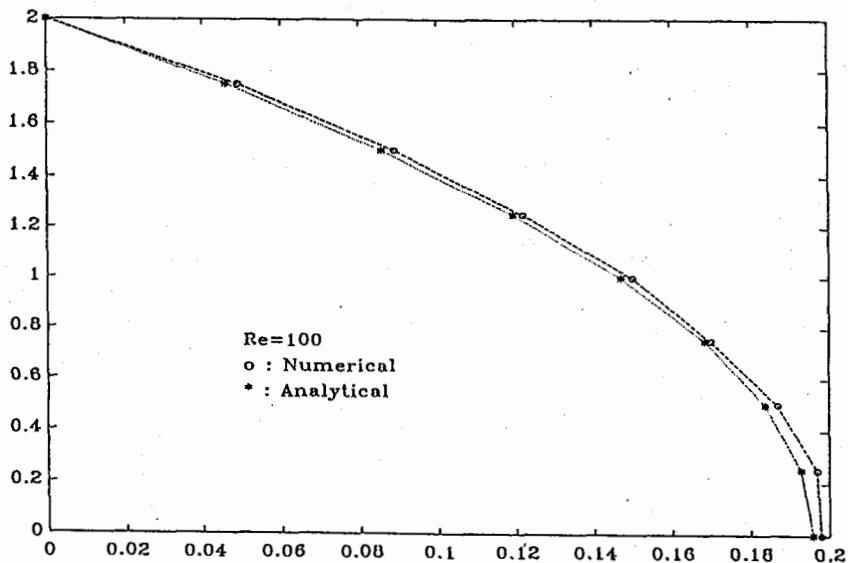
γ)  $R=300$



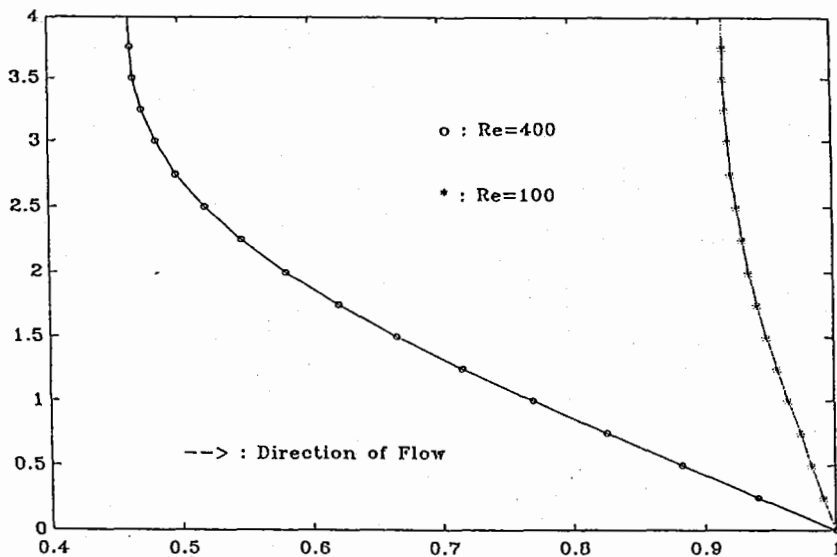
δ)  $R=400$

Σχ. 4. Γραμμές ροής γύρω από το σημείο εισροής, για διάφορους αριθμούς Reynolds.





Σχ. 6. Σύγκριση αριθμητικού και αναλυτικού προφίλ ταχυτήτων ροής, στην περιοχή εκροής. Ο κατακόρυφος άξονας παριστά απόσταση από το επίπεδο συμμετρίας του πεδίου ροής.



Σχ. 7. Κατανομή ανηγμένων θερμοκρασιών, ως προς τον άξονα των  $\psi$ , στο σημείο εκροής για δύο αριθμούς Reynolds.