

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΟΗΣ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΓΥΑΛΙΟΥ*

**ΑΝΔΡΕΑΣ ΑΤΖΕΜΙΑΝ**



Επιβλέπων Καθηγητής :  
Δρ. Νικόλαος Σπ. Βλάχος



αρ. εισ. 14/1995

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000014092



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 750/1

Ημερ. Εισ.: 29-05-1996

Δωρεά:

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ

1995

ATZ

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Σ' αυτήν τη διπλωματική εργασία παρουσιάζεται ένα αριθμητικό μοντέλο για την επίλυση δυδιάστατων ροών με ανακυκλοφορία και η εφαρμογή του σ' ένα πεδίο ροής τηγμένου γυαλιού μέσα σε υαλουργικό κλίβανο.

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας είναι η ακόλουθη :

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια γενική εισαγωγή στο θέμα. Στο κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται μια παρουσίαση της βιομηχανίας γυαλιού, παρέχοντας στοιχεία για το γυαλί σαν υλικό και για την παραγωγική του διαδικασία. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ροής και μια περιγραφή της προσέγγισής του με αριθμητικές μεθόδους. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι εξισώσεις ροής υπό τη μορφή εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών και η μέθοδος επίλυσής τους. Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η δομή του προγράμματος, που χρησιμοποιήθηκε για τη λύση του παρόντος προβλήματος ροής. Το κεφάλαιο αυτό υπηρετεί το σκοπό ενός εγχειριδίου λειτουργίας (manual) του προγράμματος αυτού στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, που υπολογίστηκαν με βάση το πρόγραμμα υπό μορφή παραμετρικών μελετών ορισμένων μεγεθών, που παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξεταζόμενη ροή. Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που αποκομίσαμε από την παρούσα μελέτη και προτάσεις για εφαρμογή της διαδικασίας επίλυσης σε νέα προβλήματα ροής.

Στα παραρτήματα, τέλος, δίνονται ορισμένες συμπληρωματικές πληροφορίες για την καλύτερη κατανόηση της όλης διαδικασίας : ο Αλγόριθμος Τριδιαγώνιου Πίνακα (TDMA), ο τρόπος παραγωγής των εξισώσεων ροής, η λίστα του προγράμματος προσομοίωσης ροών GLASS σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77, μια περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης μιας ροής, καθώς και τα αποτελέσματα μιας τυπικής εκτέλεσης του προγράμματος.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, καθηγητή Νικόλαο Σπ. Βλάχο, για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράστασή του κατά την εκπόνηση.

Επίσης, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γεώργιο Κόρδα του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος” για τη βιβλιογραφία, που μου προσέφερε και το Διευθυντή της εταιρείας Αφοι Βαλαβάνη Α.Ε., κύριο Νικήτα Ι. Βαλαβάνη, για την παροχή πληροφοριών σχετικά με το γυαλί και τις διεργασίες τήξης του.

Τέλος, ευχαριστώ και τον αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., κύριο Δ. Ασημακόπουλο, που διέθεσε τα προγράμματα ARROW και CONTOUR για τη δημιουργία γραφικών παραστάσεων.

Ανδρέας Ατζεμιάν

Βόλος, 1995



**ΑΦΙΕΡΩΝΕΤΑΙ ΣΤΟΥΣ ΓΟΝΕΙΣ ΜΟΥ**  
**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1995**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελίδα
Πρόλογος .....	1
Ευχαριστίες .....	2
Περιεχόμενα .....	4
Οδηγός σχημάτων .....	6
Ονοματολογία .....	7
1. Γενική Εισαγωγή.....	10
2. Εισαγωγή στην Τεχνολογία του Γυαλιού .....	12
2.1 Η κατάσταση της βιομηχανίας γυαλιού στην Ελλάδα .....	12
2.2 Το γυαλί και η δομή του.....	14
2.3 Εισαγωγή στην παραγωγή του γυαλιού.....	16
2.4 Η τεχνολογία της τήξης.....	17
2.5 Επιλογή των αρχικών υλικών .....	17
2.6 Τήξη και διαλυτότητα .....	19
2.7 Διαδικασία καθαρίσμού της υαλόμαζας.....	19
2.8 Ομοιογενειοποίηση .....	21
2.9 Υαλόθραυσμα.....	21
2.10 Υαλουργικοί κλίβανοι .....	22
2.11 Η παραγωγική διαδικασία της Αφοι Βαλαβάνη Α.Ε. ....	26
3. Το Γενικό Μαθηματικό Πρόβλημα .....	28
3.1 Οι γενικές εξισώσεις ροής .....	28
3.2 Οριακές και αρχικές συνθήκες .....	31
3.3 Βοηθητικές πληροφορίες.....	32
3.4 Μέθοδος αριθμητικής προσέγγισης.....	32
3.5 Γενική διαδικασία επίλυσης .....	34
3.6 Ακρίβεια των λύσεων, σύγκλιση και υποχαλάρωση.....	35
4. Ανάλυση του Προβλήματος.....	37
4.1 Το πλέγμα .....	37
4.2 Οι εξισώσεις πετρερασμένων διαφορών .....	38

4.3	Η διαδικασία επίλυσης .....	39
5.	Το Πρόγραμμα Ηλεκτρονικού Υπολογιστή GLASS .....	41
5.1	Η κύρια ρουτίνα του προγράμματος.....	41
5.2	Οι υπορουτίνες του προγράμματος.....	44
5.3	Οι χρησιμοποιούμενες μεταβλητές του προγράμματος .....	48
6.	Εφαρμογή της Διαδικασίας Επίλυσης στη Μελέτη Διαφόρων Ροών .....	54
6.1	Ιδιότητες του γυαλιού .....	54
6.2	Γενική περιγραφή και χαρακτηριστικά του πεδίου ροής .....	56
6.3	Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του προγράμματος .....	58
6.4	Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων .....	59
6.5	Δοκιμή ανεξαρτησίας πλέγματος .....	63
6.6	Παραμετρικές μελέτες .....	64
7.	Συμπεράσματα - Προτάσεις .....	68
7.1	Συμπεράσματα .....	68
7.2	Προτάσεις .....	69
	Βιβλιογραφία .....	71
	Σχήματα	
	Παράρτημα Α : Αλγόριθμος Τριδιαγώνιου Πίνακα (TDMA) .....	161
	Παράρτημα Β : Παραγωγή εξισώσεων ροής .....	163
	Παράρτημα Γ : Λίστα του προγράμματος GLASS .....	168
	Παράρτημα Δ : Περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης μιας ροής.....	196
	Παράρτημα Ε : Αποτελέσματα μιας τυπικής εκτέλεσης του προγράμματος .....	200

## ΟΔΗΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

	Σελίδα
Σχήμα 1.....	12
Σχήμα 2.....	13
Σχήμα 3.....	15
Σχήμα 4.....	22
Σχήμα 5.....	23
Σχήμα 6.....	25
Σχήμα 7.....	37
Σχήμα 8.....	38
Σχήμα 9.....	38
Σχήμα 10.....	42
Σχήμα 11.....	73
Σχήμα 12.....	74
Σχήμα 13.....	75
Σχήμα 14.....	57
Σχήματα 15-23 .....	77-85
Σχήμα 24.....	87
Σχήματα 25-33 .....	88-96
Σχήματα 34-38 .....	98-102
Σχήματα 39-43 .....	104-108
Σχήματα 44-52 .....	110-118
Σχήματα 53-57 .....	120-124
Σχήματα 58-62 .....	126-130
Σχήματα 63-67 .....	132-136
Σχήματα 68-72 .....	138-142
Σχήματα 73-77 .....	144-148
Σχήματα 78-82 .....	150-154
Σχήματα 83-87 .....	156-160
Σχήμα 88.....	161

## ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

### Σύμβολο

### Σημασία

#### Αγγλικά σύμβολα

$A$	Εμβαδόν
$A_i^j$	Συντελεστής της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών για την θέση $i$ και την εξαρτημένη μεταβλητή $j$ , όπου $i=P, N, S, E, W$ και $j=u, v, p, \varphi$ κ.λ.π.
$c$	Συγκέντρωση
$c_p$	Ειδική θερμότητα
$C_i$	Συντελεστής συναγωγής της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών για την πλευρά $i$ της κυψέλης
$D_i$	Συντελεστής διάχυσης της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών για την πλευρά $i$ της κυψέλης
$D_i^j$	Συντελεστής πίεσης της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών για την πλευρά $i$ της κυψέλης και την εξαρτημένη μεταβλητή $j$ , όπου $i=P, N, S, E, W$ και $j=u, v, p, \varphi$ κ.λ.π.
$\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}$	Μερικές παράγωγοι ως προς χρόνο, ως προς τη συντεταγμένη $x$ και ως προς τη συντεταγμένη $y$ , αντίστοιχα
$\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}$	Κλίση (μερική παράγωγος) της πίεσης ως προς τη συντεταγμένη $x$ και ως προς τη συντεταγμένη $y$ , αντίστοιχα
$f_i$	Δύναμη σώματος (βαρύτητα κ.λ.π.)
$g_\varphi$	Όρος παραγωγής της ιδιότητας $\varphi$ του ρευστού
$J_{\varphi, i}$	Ροή διάχυσης του $\varphi$
$k$	Θερμική αγωγιμότητα
$k_c$	Συντελεστής διάχυσης της μάζας
$\dot{m}$	Ροή μάζας
$Pe$	Αριθμός Peclet
$p$	Πίεση

Σύμβολο	Σημασία
$p'$	Διόρθωση της πίεσης
$q_i$	Διάνυσμα θερμορροής
$Re$	Αριθμός Reynolds
$R_{N,\varphi}$	Ποσότητα αδιαστατοποίησης της υπολειμματικής πηγής της μεταβλητής $\varphi$
$R_\varphi$	Υπολειμματική πηγή του $\varphi$
$S^j$	Πηγαίος όρος της $j$ εξαρτημένης μεταβλητής, όπου $j=u, v, p, \varphi$ κ.λ.π.
$T$	Θερμοκρασία
$u$	Συνιστώσα της ταχύτητας στη διεύθυνση $x$
$u'$	Διόρθωση του $u$
$V_i$	Διάνυσμα της ταχύτητας
$v$	Συνιστώσα της ταχύτητας στη διεύθυνση $y$
$v'$	Διόρθωση του $v$
$x_i, y_i$	Μοναδιαία διανύσματα
$x, y$	Ορθογωνικές συντεταγμένες

### Ελληνικά σύμβολα

$\alpha$	Συντελεστής χαλάρωσης
$\gamma_\varphi$	Συντελεστής μεταφοράς της ιδιότητας $\varphi$
$\Delta_{ij}$	Τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης
$\Delta x, \Delta y$	Διαστάσεις της υπολογιστικής κυψέλης στη διεύθυνση $x$ και $y$ , αντίστοιχα
$\delta x, \delta y$	Αποστάσεις μεταξύ των θέσεων των μεταβλητών στη διεύθυνση $x$ και $y$ , αντίστοιχα
$\mu$	Συντελεστής ιξώδους
$\rho$	Πυκνότητα
$\tau_{ij}$	Τανυστής της διατμητικής τάσης

Σύμβολο	Σημασία
$\varphi$	Ιδιότητα $\varphi$ του ρευστού
<u>Δείκτες</u>	
$W, E, N, S, P$	Δυτικός, ανατολικός, βόρειος, νότιος και κεντρικός κόμβος της κυψέλης, αντίστοιχα
$w, e, n, s$	Δυτική, ανατολική, βόρεια και νότια πλευρά της κυψέλης, αντίστοιχα
$p$	Πίεση
$x, y$	Ορθογωνικές συντεταγμένες
<u>Εκθέτες</u>	
$p$	Διόρθωση της πίεσης
$u$	Συνιστώσα $u$ της ταχύτητας
$v$	Συνιστώσα $v$ της ταχύτητας
$\varphi$	Ιδιότητα $\varphi$ του ρευστού

## 1. Γενική Εισαγωγή

Τα φαινόμενα μεταφοράς, που σχετίζονται με ροές πραγματικών ρευστών, περιγράφονται από μια σειρά μη γραμμικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους. Ακόμα και απλές, στρωτές ροές, όπως αναπτυσσόμενη ροή μέσα σε ένα σωλήνα ή πάνω από μια πλάκα, απαιτούν πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς για την αναλυτική επεξεργασία τους. Ροές με σύνθετη γεωμετρία δεν μπορούν να επιλυθούν εύκολα, ακόμη και σήμερα, παρά τις ισχυρές αναλυτικές μεθόδους που υπάρχουν.

Η πρόοδος των ηλεκτρονικών υπολογιστών και η ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση των εξισώσεων με μερικές παραγώγους έχουν βοηθήσει πολύ στην μελέτη πολυάριθμων περιπτώσεων ροής. Η ακρίβεια των λύσεων, η ταχύτητα επίλυσης (ο υπολογιστικός χρόνος) και η αποθηκευτική ικανότητα των Η/Υ έχουν βελτιωθεί κατά πολύ τα τελευταία χρόνια και κατά συνέπεια, έχουν αυξηθεί και οι δικές μας απαιτήσεις.

Ενώ ο μαθηματικός επιδιώκει να δημιουργήσει αναλυτικές μεθόδους για τη λύση των προβλημάτων, ο αριθμητικός αναλυτής αναπτύσσει νέες, αποδοτικές και ακριβείς μεθόδους επίλυσης. Ο φυσικός προσπαθεί να ανακαλύψει νέα φαινόμενα, ενώ εμείς οι μηχανικοί πρέπει να παρέχουμε αριθμητικές λύσεις στα προβλήματα σχεδιασμού. Ενδιαφερόμαστε περισσότερο για το μέτρο των ποσοτήτων που επηρεάζουν ένα συγκεκριμένο πρόβλημα σχεδιασμού, παρά για τις μικροσκοπικές λεπτομέρειές του.

Η Υπολογιστική Δυναμική των Ρευστών (Computational Fluid Dynamics, CFD) πλησιάζει περισσότερο στην πειραματική απ' ότι η θεωρητική δυναμική των ρευστών. Δεν υπάρχει ακόμη αυστηρή μαθηματική θεωρία για αριθμητικές λύσεις των εξισώσεων με μερικές παραγώγους, που περιγράφουν φαινόμενα μεταφοράς. Ο πειραματιστής με τον Η/Υ ξεκινάει την αριθμητική του διαδικασία και εκτυπώνει τα αποτελέσματα με τον ίδιο τρόπο που ο φυσικός πειραματιστής ξεκινάει ένα πείραμα ροής και καταγράφει τις ιδιότητες του ρευστού με τη βοήθεια του εργαστηριακού του εξοπλισμού. Ο πρώτος, όμως, έχει κάποια πλεονεκτήματα, διότι έχει πλήρη έλεγχο των παραμέτρων που εμφανίζονται στους υπολογισμούς της ροής. Μπορεί π.χ. να εξετάσει δυδιάστατες περιπτώσεις, ισοτροπία, κ.λ.π., ενώ αυτά δεν πραγματοποιούνται τόσο εύκολα στο εργαστήριο. Αφού έχει αναπτύξει και επαληθεύσει τις υποθέσεις του μοντέλου του, μπορεί να κάνει παραμετρικές μελέτες και να παρατηρήσει τις αντίστοιχες επιδράσεις. Αυτό το σημείο παρουσιάζει σημαντικό πλεονέκτημα στο μηχανολογικό σχεδιασμό.



Όσον αφορά τα φυσικά φαινόμενα, οι ροές μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- Παραβολικές ροές (Ροές σε οριακά στρώματα)
  - Ροές με μια επικρατούσα διεύθυνση

Η διάχυση στη διεύθυνση αυτή είναι αμελητέα σε σύγκριση με τη διεύθυνση διαμέσου της ροής. Μπορούν να υιοθετηθούν βηματικές αριθμητικές διαδικασίες.

- Ελλειπτικές ροές (Ροές με επανακυκλοφορία)
  - Ροές που δεν έχουν καμία επικρατούσα διεύθυνση

Όλο το πεδίο πρέπει να προβλεφθεί με επαναληπτικό τρόπο.

- Υπερβολικές ροές (Υπερηχητικές ροές)
  - Ροές με χαρακτηριστικές γραμμές

- Ημιπαραβολικές ροές (Ημιελλειπτικές ροές)

– Ροές με επικρατούσα διεύθυνση και με ισχυρές και δυσμενείς κλίσεις πίεσης

Μόνο το πεδίο πιέσεων λύνεται όπως και στις ελλειπτικές ροές και ύστερα προσαρμόζονται οι ταχύτητες.

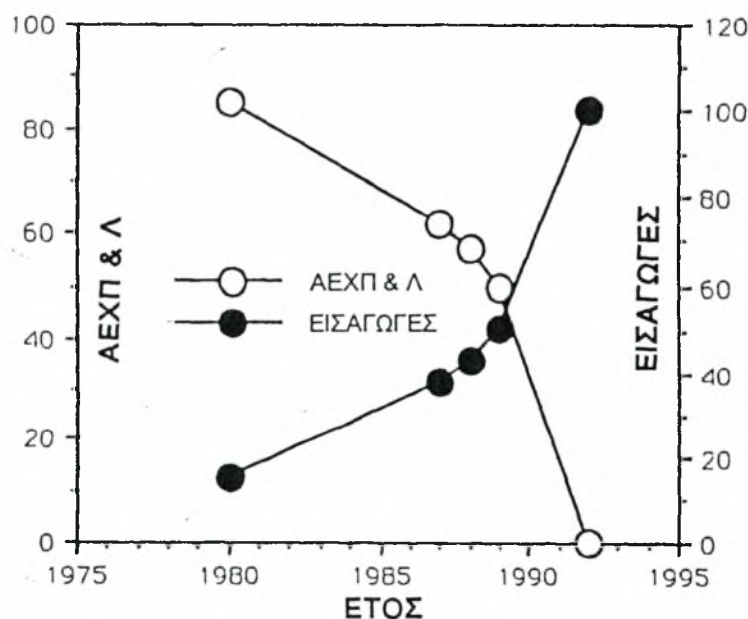
Στην εργασία αυτή, που εντάσσεται στα πλαίσια ενός κοινού ερευνητικού προγράμματος (ΕΠΕΤ II) του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και της Υαλουργίας Αφοι Βαλαβάνη Α.Ε. για τη βελτίωση της ποιότητας του εγχώρια παραγόμενου γυαλιού, θα ασχοληθούμε με μια δυδιάστατη ελλειπτική ροή (με εμπόδιο) τηγμένου γυαλιού μέσα σε μια λεκάνη τήξης. Πιο ειδικά, πρόκειται για μια μονοφασική ροή, θεωρώντας ότι το γυαλί έχει λιώσει πλήρως και σχηματίζει μια φάση, για χρονικά σταθερή ροή, επειδή το πεδίο ροής εξετάζεται σε χρόνο, που η ροή έχει μονιμοποιηθεί, αφού η παραγωγή του γυαλιού είναι μια μόνιμη διαδικασία και για νευτώνια ροή, υποθέτοντας πως οι διατμητικές τάσεις ακολουθούν το νόμο του Νεύτωνα.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επίλυση του παρόντος προβλήματος ροής βασίζεται σε έναν αλγόριθμο, που δημιούργησε ο CHORIN (1968), εξελίχθηκε από τους PANTANKAR και SPALDING (1972) και εφαρμόστηκε με μεγάλη επιτυχία για την ανάλυση της ροής του αίματος σε αρτηρίες από τον VLACHOS (1977).

## 2. Εισαγωγή στην Τεχνολογία του Γυαλιού

### 2.1 Η κατάσταση της βιομηχανίας γυαλιού στην Ελλάδα

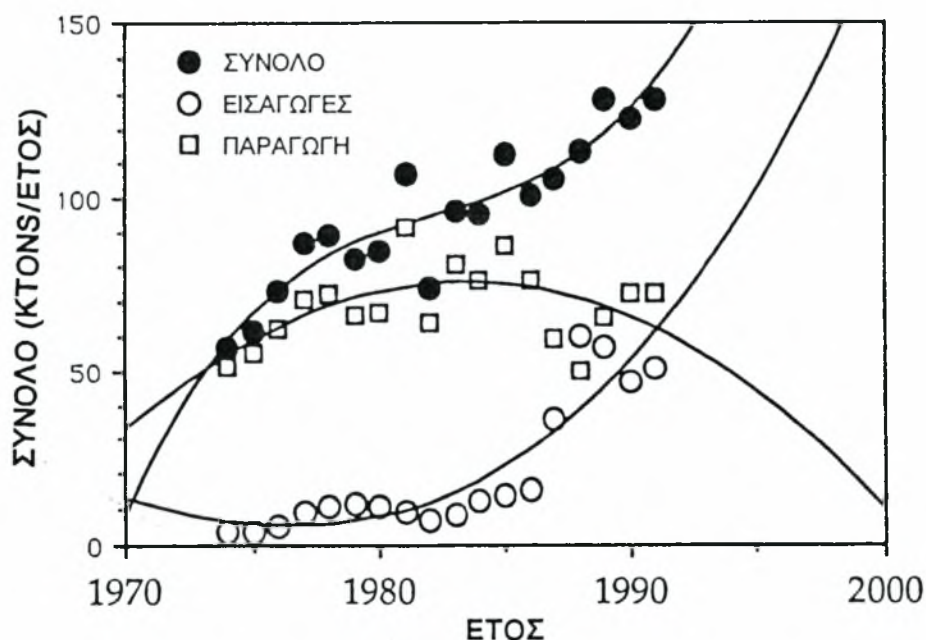
Η υαλουργία στην Ελλάδα έχει περάσει από δύσκολες καταστάσεις (Κόρδας, 1995). Η εταιρεία HELLENIC OWENS GLASS Co. ήταν μια από τις μεγαλύτερες εταιρείες παραγωγής φιαλών στην Ελλάδα πριν λίγα χρόνια. Το κλείσιμο αυτής της εταιρείας οφειλετο σε προβλήματα παραγωγής και κακής διαχείρισης. Η Ανώνυμος Εταιρεία Χημικών Προϊόντων και Λιπασμάτων (ΑΕΧΠ&Λ) ήταν η μόνη εταιρεία παραγωγής υαλοπινάκων στην Ελλάδα και εισήγαγε την διαδικασία παραγωγής της Libey Owens στην Ελλάδα το 1981. Η εταιρεία αυτή έκλεισε επειδή η διαδικασία παραγωγής του γυαλιού οδηγούσε σε χαμηλή ποιότητα και υψηλό κόστος συγκριτικά με τη διαδικασία παραγωγής Float, που είναι το επίπεδο γυαλί. Αν και η ΑΕΧΠ&Λ ήταν μια από τις μεγαλύτερες εταιρείες παραγωγής, άρχισε μια πορεία κάμψης που οφείλεται στις εισαγωγές επίπεδου γυαλιού από το εξωτερικό, έτσι ώστε το μερίδιό της στην εσωτερική αγορά να μειωθεί από το 85% που ήταν το 1980 στο 0% το 1992. Το σχήμα 1 δείχνει καθαρά την πτωτική πορεία που είχε η εταιρεία στην παραγωγή επίπεδου γυαλιού τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 1: Πτωτική πορεία της βιομηχανίας παραγωγής επίπεδου γυαλιού

Το σχήμα 2 δείχνει την κατάσταση της βιομηχανίας γυάλινων φιαλών στην Ελλάδα. Στο σχήμα αυτό η συνολική κατανάλωση σε φιάλες παρουσιάζεται μαζί με την ποσότητα των εισαγωγών από την κοινότητα και της άλλες Βαλκανικές χώρες. Φαίνεται καθαρά ότι οι συνολικές ανάγκες για φιάλες στη Ελλάδα έχουν αυξητική

τάση και φθάνουν τους 150 χιλιάδες τόνους / έτος. Μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό από το σχήμα αυτό ότι οι εισαγωγές ήταν περίπου 15 χιλιάδες τόνοι το 1985, ενώ η εγχώρια παραγωγή ήταν περίπου 75 χιλιάδες τόνοι. Το 1985, η συνολική ανάγκη για φιάλες στην Ελλάδα ήταν 90 χιλιάδες τόνοι. Αυτός ο κυρίαρχος ρόλος της υαλουργίας στην Ελλάδα αλλάζει δραστικά κατά τα τελευταία χρόνια. Αν οι εισαγωγές φιαλοειδών από βαλκανικές χώρες αυξηθούν με το σημερινό ρυθμό, όπως συμβαίνει τα τελευταία χρόνια σύμφωνα με τις προβλέψεις του Ελληνικού Υαλουργικού Συνδέσμου, η εγχώρια παραγωγή γυαλιού θα μειωθεί περίπου στους 10 χιλιάδες τόνους το έτος 2000. Το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης θα καλύπτεται από εισαγωγές. Αυτή είναι μια κατάσταση που επικρατούσε πριν μερικά χρόνια και στην παραγωγή επίπεδων υαλοπινάκων. Οι πτωτικές τάσεις, που εμφανίζονται στο σχήμα 1, δείχνουν να έχουν την ίδια εξάρτηση όπως και στο σχήμα 2, που αφορά την κατανάλωση φιαλών στην Ελλάδα.



Σχήμα 2 : Κατανάλωση φιαλών στην Ελλάδα

Ενώ σε όλο τον κόσμο η παραγωγή των υαλοπινάκων είχε εκσυγχρονιστεί, η Ελληνική Υαλουργία χρησιμοποιούσε την διαδικασία Libbey-Owens, η οποία παράγει επίπεδα γυαλιά κατώτερης ποιότητας σε σύγκριση με το γυαλί τύπου Float. Στην Τουρκία η δυνατότητα παραγωγής γυαλιού τύπου Float δημιουργήθηκε πριν λίγα έτη, ενώ αυτή η δυνατότητα απορρίφθηκε από τους επικεφαλές της εταιρείας ΑΕΧΠ&Λ και αντί αυτού η διοίκηση της επιχείρησης αποφάσισε να επενδύσει σε γραμμή παραγωγής, που ήταν μακριά από τις απαιτήσεις της εποχής.

Η κατάσταση στην υαλουργία των φιαλών είναι χειρότερη από αυτή των προηγούμενων ετών. Σήμερα οι εμπορικές σχέσεις μεταξύ των βαλκανικών χωρών βρίσκονται σε κρίση, λόγω των τελευταίων πολιτικών αλλαγών. Η Ελληνική βιομηχανία εισάγει πρώτες ύλες από την Βουλγαρία. Η τιμή της χαλαζιακής άμμου ήταν 4 δραχμές / κιλό πριν μερικά χρόνια και τώρα είναι 10 δραχμές / κιλό. Ταυτόχρονα η βιομηχανία στην Βουλγαρία αγοράζει άμμο σχεδόν με μηδέν κόστος, επειδή το ορυκτό υπάρχει στο έδαφός της. Είναι γνωστό ότι η βιομηχανία στην Βουλγαρία έχει εκσυγχρονιστεί και αναμένεται να κερδίσει σε ποιότητα σε λίγα χρόνια. Επίσης αναμένεται ότι το κόστος παραγωγής θα είναι σημαντικά μικρότερο από ότι στην Ελλάδα, λόγω του χαμηλότερου κόστους ζωής στην Βουλγαρία. Έτσι η μόνη δυνατότητα για να αντιστρέψουμε αυτή την κατάσταση είναι να εκσυγχρονίσουμε την Ελληνική Βιομηχανία.

Ως απάντηση σε αυτή την κρίση, η εταιρεία Αφοι Βαλαβάνη Α.Ε. αναλαμβάνει να αναπτύξει νέες τεχνολογίες που περιλαμβάνουν:

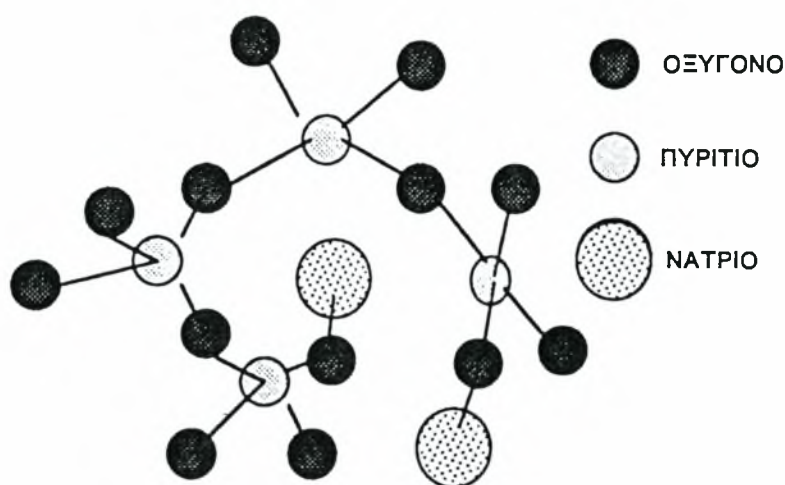
- Χρήση εγχωρίων πρώτων υλών
- Βελτιστοποίηση των διαδικασιών και
- Βελτιστοποίηση της ποιότητας των τελικών προϊόντων.

## **2.2 Το γυαλί και η δομή του**

Το γυαλί και τα πολλά προϊόντα, που κατασκευάζονται απ' αυτό, παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην καθημερινή ζωή, στην οικονομία, στην τεχνολογία και στην επιστήμη. Η διαφάνεια του, η ανθεκτικότητά του σε οξέα και η σχετικά μεγάλη σκληρότητά του, του δίνουν μια ξεχωριστή θέση ανάμεσα στα άλλα υλικά. Παρουσιάζει όμως και μειονεκτήματα όπως η ψαθυρότητά του και το σχετικά μεγάλο του βάρος, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη στην πρακτική του εφαρμογή.

Οι δύο κυρίαρχες κατηγορίες γυαλιού είναι τα φιαλοειδή και το επίπεδο γυαλί. Και στις δύο κατηγορίες πρόκειται για γυαλί σόδας-ασβέστου διαφορετικής σύστασης. Στη συνέχεια έχουμε το γυαλί του εμπορίου, κατασκευασμένο με προσμίξεις καλίου ή μολύβδου, τη μεγάλη οικογένεια των γυαλιών ειδικών χρήσεων με τη μορφή του γυαλιού χημικών-τεχνικών χρήσεων, το γυαλί για ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές, το οπτικό γυαλί και τις υάλινες ίνες. Τέλος, πρέπει να αναφερθούν τα γυαλιά βορίου (PYREX) για το χημικό-τεχνικό γυαλί, τα μη αλκαλιούχα γυαλιά για τις υφάνσιμες ίνες γυαλιού και τα αλκαλιοβοριούχα γυαλιά για τις μονωτικές ίνες γυαλιού.

Το γυαλί είναι το άμορφο στερεό προϊόν που προκύπτει από την ψύξη ενός τήγματος. Το πλέον γνωστό γυαλί είναι αυτό που αποτελείται κατά βάση από χαλαζιακή άμμο ( $\text{SiO}_2$ ), ανθρακική σόδα ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) και μαρμαρόσκονη ( $\text{CaO}$ ). Τα τετράεδρα του  $\text{SiO}_2$  είναι οι δομικοί λίθοι της δομής του γυαλιού. Τα τετράεδρα αυτά συνδέονται γωνιακά το ένα με το άλλο μέσω οξυγόνων και σχηματίζουν ένα συνεχές αλλά και τυχαίο πλέγμα. Το καθαρό  $\text{SiO}_2$  σχηματίζει γυαλί που ονομάζεται *silica*. Στο πυριτικό πλέγμα μπορούν να προστεθούν και διάφορα άλλα οξείδια. Για παράδειγμα μπορούν να προστεθούν ιόντα αλκαλίων μετάλλων (π.χ.  $\text{Na}^+$ ) τα οποία τροποποιούν τη δομή του πλέγματος του  $\text{SiO}_2$ . Αυτά τα ιόντα συνδέονται με ένα οξυγόνο, πράγμα το οποίο αποσυνθέτει τις δομικές αλυσίδες του  $\text{SiO}_2$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.



Σχήμα 3 : Δομή του γυαλιού

Σε σχέση με το είδος του ιόντος αυτά μπορούν να ταξινομηθούν ως:

- Υαλοσχηματιστές
- Τροποποιητές πλέγματος και
- Ενδιάμεσοι.

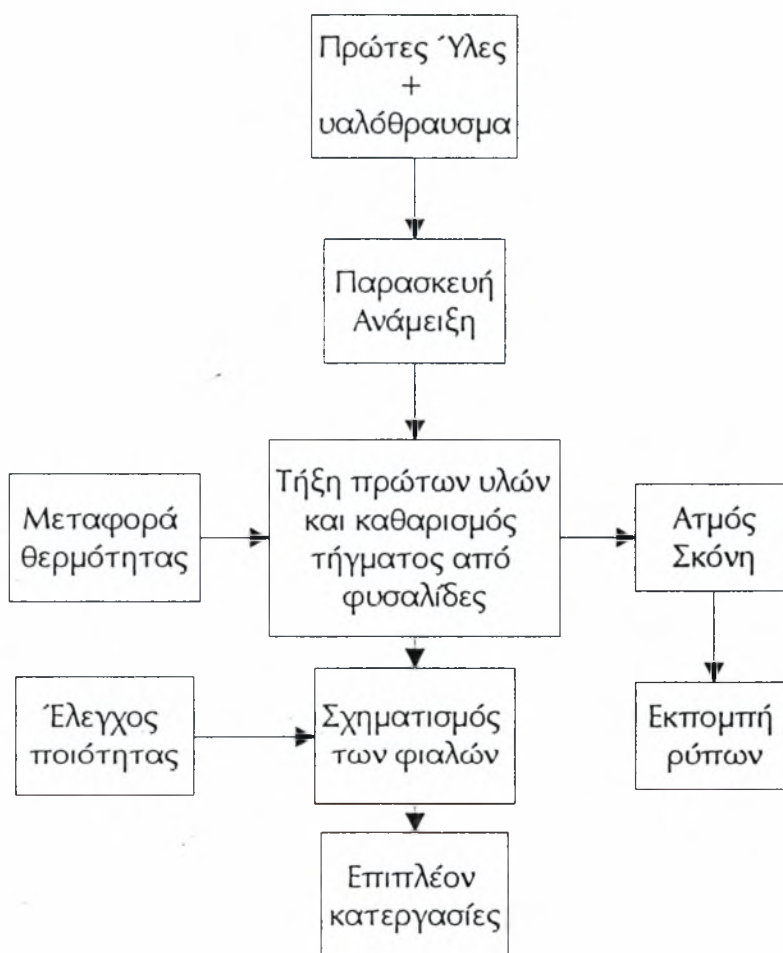
Στους υαλοσχηματιστές (Si, B, P κ.λ.π.) οφείλεται ο σχηματισμός υαλώδους πλέγματος. Οι τροποποιητές είναι αυτοί που αποσυνθέτουν το πλέγμα. Έτσι ένας αριθμός από ιδιότητες του τήγματος μπορεί να τροποποιηθεί όπως είναι το ιξώδες, η ταχύτητα απομάκρυνσης των φυσαλίδων από το τήγμα κ.λ.π. Οι ενδιάμεσοι παίζουν ένα διπλό ρόλο. Αυτοί μπορεί να δρουν είτε ως υαλοσχηματιστές είτε ως τροποποιητές πλέγματος, πράγμα που εξαρτάται από την γενική σύσταση του γυαλιού και τις συνθήκες που γίνεται η τήξη. Για παράδειγμα το Al μπορεί να είναι



υαλοσχηματιστής σε ένα γυαλί  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O}$ , εάν ισχύει ότι ο λόγος των mols του  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και του  $\text{Na}_2\text{O}$  είναι μεγαλύτερος από 1. Το Al μπορεί να είναι τροποποιητής πλέγματος, εάν ο λόγος των mols του  $\text{Al}_2\text{O}_3$  και του  $\text{Na}_2\text{O}$  είναι μικρότερος από 1. Ο αριθμός οξειδωσης ενός ιόντος μπορεί να αλλάζει με την επίδραση των μερικών πιέσεων του οξυγόνου, αλλάζοντας το βαθμό οξείδωσης του ιόντος.

### 2.3 Εισαγωγή στην παραγωγή του γυαλιού

Η παραγωγή γυαλιού περιλαμβάνει τις ακόλουθες διαδικασίες, όπως δείχνονται στο παρακάτω διάγραμμα :



Οι βασικές διαδικασίες παραγωγής υάλου είναι η τήξη, ο καθαρισμός του τήγματος από τις φυσαλίδες και η μορφοποίηση. Η τήξη, ο καθαρισμός του γυαλιού και τα στάδια σχηματισμού εξαρτώνται από την σωστή λειτουργία του κλιβάνου. Επίσης εξαρτώνται έμμεσα από το ιξώδες του τήγματος και την επιφανειακή του τάση. Η τήξη εξαρτάται και από το πόσο είναι δυνατό να διαβρωθούν οι στερεές

πρώτες ύλες από το ήδη τηγμένο γυαλί. Ο καθαρισμός εξαρτάται από την διαλυτότητα και δυνατότητα απομάκρυνσης των σχηματιζόμενων φυσαλίδων αερίου από το τήγμα. Ο σχηματισμός ή όχι του γυαλιού εξαρτάται επίσης από την ρευστότητα του τήγματος. Η δυνατότητα για διαλυτότητα, η κίνηση των φυσαλίδων και η ρευστότητα του γυαλιού σχετίζονται άμεσα με το ιξώδες του τήγματος και την επιφανειακή τάση. Το ιξώδες του τήγματος και η επιφανειακή τάση επηρεάζονται από την ατμόσφαιρα και από την επαφή και πιθανή αντίδρασή τους με τις αρχικές μη τηγμένες πρώτες ύλες αλλά και το ήδη υπάρχον τήγμα. Από τα αέρια αυτά της ατμόσφαιρας τα οξειδία του θείου αλλά και οι υδρατμοί παίζουν το σπουδαιότερο ρόλο. Η θερμοκρασία, η σύσταση του αρχικού μίγματος και η μέθοδος τροφοδοσίας καθορίζουν το κατά πόσο η ατμόσφαιρα του φούρνου θα επηρεάσει το ιξώδες του τήγματος, την επιφανειακή τάση και συνεπώς την τήξη και τον καθαρισμό από τις φυσαλίδες. Γενικά η πλέον αποδοτική διαδικασία παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη την οικονομία στα καύσιμα, την ποιότητα του γυαλιού και τη μορφοποίηση, απαιτεί χαμηλές τιμές ιξώδους και επιφανειακής τάσης. Η ατμόσφαιρα επιδρά επίσης και σε άλλα στάδια της παραγωγής γυαλιού, όπως είναι οι εκπομπές ρύπων που ελευθερώνονται και η διάρκεια ζωής των πυρίμαχων υλικών του κλιβάνου.

## 2.4 Η τεχνολογία της τήξης

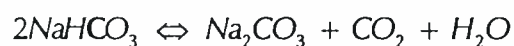
Η τήξη του μίγματος πρώτων υλών για την παραγωγή ομοιογενούς γυαλιού είναι αρκετά δύσκολη διαδικασία και απαιτεί κατάλληλες πρώτες ύλες, κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό και βιομηχανική εμπειρία. Στην πράξη η διαδικασία της τήξεως περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Επιλογή των κατάλληλων πρώτων υλών
- Τήξη και διαλυτότητα των συστατικών του μίγματος
- Καθαρισμός και απομάκρυνση των φυσαλίδων μέσα από το τήγμα και
- Ομοιογενειοποίηση και θερμική σταθεροποίηση της μάζας του γυαλιού για την περαιτέρω κατεργασία.

## 2.5 Επιλογή των αρχικών υλικών

Οι ιδιότητες του γυαλιού μεταβάλλονται με τη χημική του σύσταση. Σε σύγχρονες και αυτοματοποιημένες διαδικασίες είναι πολύ σημαντικό να κρατήσουμε σταθερή την σύνθεση του γυαλιού και επιπλέον σταθερές τις συνθήκες παραγωγής. Μια μικρή αλλαγή στη σύσταση του αρχικού μίγματος μπορεί να προκαλέσει δραματική μεταβολή στις συνθήκες παραγωγής. Επομένως, για να κρατήσουμε

σταθερή τη χημική σύσταση, πρέπει να έχουμε και σταθερή την σύσταση των αρχικών υλικών. Το μέγεθος των κρυσταλλικών κόκκων και η κατανομή τους είναι ο σημαντικός παράγοντας που επιδρά στην ομοιογενειοποίηση των αρχικών υλικών κατά τη διάρκεια της τήξης, στο σχηματισμό φυσαλίδων στο τήγμα κ.λ.π. Η άμμος είναι ένα από τα βασικά αρχικά συστατικά για την παραγωγή του γυαλιού. Το μέγεθος των κόκκων πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.1 - 0.5 mm. Η χονδρή άμμος είναι δύσκολο να λιώσει. Ο ασβεστόλιθος  $\text{CaCO}_3$  προστίθεται στα αρχικά υλικά με σκοπό την εισαγωγή του  $\text{CaO}$  στο γυαλί. Το μέγεθος των κόκκων του ασβεστόλιθου μπορεί να είναι μεταξύ 0.1 - 1.0 mm. Το  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  υπάρχει σε λίγα μόνο μέρη σαν προϊόν της φύσης. Αυτό μπορεί να παρασκευαστεί με τον ακόλουθο τρόπο:



Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα οξειδία, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αρχικά υλικά :

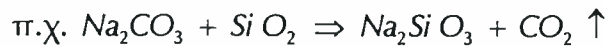
Κατηγορία	Οξείδιο	Αρχικό υλικό
Υαλοσχηματιστές	$\text{SiO}_2$	$\text{SiO}_2$
	$\text{B}_2\text{O}_3$	$\text{H}_3\text{BO}_3$
		$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$
	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{H}_3\text{PO}_4$
Τροποποιητές πλέγματος	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$
		$\text{Na}_2\text{SO}_4$
	$\text{CaO}$	$\text{CaCO}_3$
		$\text{CaCO}_3\text{MgCO}_3$
	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{CO}_3$
		$\text{KNO}_3$
Ενδιάμεσοι	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
		$\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$



## 2.6 Τήξη και διαλυτότητα

Η θέρμανση των πρώτων υλών οδηγεί σε διαφορετικές αντιδράσεις, οι οποίες μπορεί να διαιρεθούν σε τέσσερις κατηγορίες:

1. Αντιδράσεις στερεάς κατάστασης μεταξύ των κόκκων των πρώτων υλών



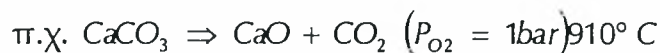
2. Σχηματισμός των ανθρακικών τηγμάτων γύρω από το  $\text{SiO}_2$ , π.χ.

$$T_{\text{EUTECTIC}}(\text{NaCa}(\text{CO}_3)_2 - \text{Na}_2\text{CO}_3) = 740^\circ \text{C}$$

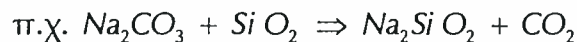
$$T(\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2) = 820^\circ \text{C}$$

$$T(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 850^\circ \text{C}$$

3. Αντιδράσεις διάσπασης



4. Αντιδράσεις μεταξύ των ανθρακικών τηγμάτων και του  $\text{SiO}_2$  και σχηματισμός των πυριτικών τηγμάτων



Η διάσπαση των ανθρακικών τηγμάτων δίνει αέριο  $\text{CO}_2$  στην μορφή φυσαλίδων, που ανυψώνονται μέσα από την μάζα στην επιφάνεια του τήγματος όσο χρόνο η πίεσή τους είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση. Οι φυσαλίδες στο τήγμα μπορεί να περιέχουν  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , και  $\text{H}_2$ . Αυτές οι φυσαλίδες πρέπει να εξαφανιστούν από το τήγμα για να επιτύχουμε οπτικά καθαρό γυαλί. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι το γυαλί, από το οποίο αποτελείται το παρμπρίζ των αυτοκινήτων με επιφάνεια  $1 \text{ m}^2$  και  $4 \text{ mm}$  πάχος δεν μπορεί να περιέχει συνολικό όγκο φυσαλίδων μεγαλύτερο από  $0.2 \text{ mm}^3$ , αν θέλουμε να εξασφαλίσουμε αναλλοίωτη εικόνα παρατήρησης προς το εξωτερικό περιβάλλον.

## 2.7 Διαδικασία καθαρισμού της υαλομάζας

Μετά την τήξη και διάλυση των αρχικών συστατικών το τήγμα που προκύπτει περιέχει σημαντικό αριθμό φυσαλίδων και άλλων μικρότερων φυσαλίδων

γνωστών ως “ψείρες”. Οι φυσαλίδες παράγονται γρηγορότερα από τις ψείρες και μπορούν να ενώνονται μεταξύ τους.

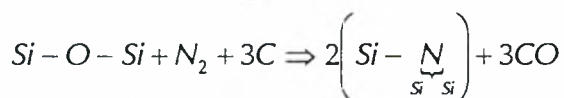
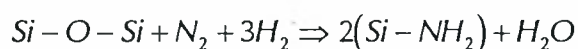
Τρεις βασικοί μηχανισμοί περιέχονται στην διαδικασία καθαρισμού, που όλοι εξαρτώνται από την επιφανειακή τάση και τουλάχιστον δύο από το ιξώδες.

Αυτοί είναι:

1. Συνένωση των φυσαλίδων για να σχηματίσουν μεγαλύτερες, οι οποίες αναδύονται απ’ ευθείας από την επιφάνεια του τήγματος.
2. Η ανάδυση των σχετικά μεγάλων φυσαλίδων προς την επιφάνεια του τήγματος συμπαρασύρει μικρότερες φυσαλίδες στο δρόμο προς την επιφάνεια.
3. Η ανάπτυξη και απορρόφηση των ανεξάρτητων φυσαλίδων.

Η ταχύτητα συνένωσης των φυσαλίδων εξαρτάται από την επιφανειακή τάση και το ιξώδες. Μπορεί, δηλαδή, η επιφανειακή ενέργεια του συστήματος να είναι χαμηλότερη, αν μειώνεται ο λόγος του συνολικού εμβαδού της επιφάνειας προς τον όγκο. Αυτό ευνοεί την συνένωση. Όσο υψηλότερη είναι η επιφανειακή τάση, διατηρώντας σταθερούς όλους τους άλλους παράγοντες, τόσο ταχύτερη είναι η διαδικασία. Υψηλότερο ιξώδες, αντιθέτως, επιβραδύνει τη συνένωση και όσο λεπτότερες γίνονται οι υγρές επιφάνειες μεταξύ των φυσαλίδων, τόσο περισσότερο επιβραδύνεται η διαδικασία.

Για παράδειγμα, το άζωτο μπορεί να ενωθεί με το πλέγμα σε αναγωγική ατμόσφαιρα, όπως φαίνεται παρακάτω:



Η οξειδωση προκαλεί την απελευθέρωση  $\text{N}_2$  από τη δομή και την συσσωμάτωση αυτού του αερίου στη φυσαλίδα. Αυτή η μεταβολή επάγει μια αλλαγή στην διαλυτότητα του  $\text{N}_2$ , που οφείλεται στη δομική τροποποίηση. Διάφορα ειδικά υλικά καθαρισμού προστίθενται στο τήγμα για να επιταχύνουν την απομάκρυνση των φυσαλίδων. Αυτά τα υλικά αποσυντίθενται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, εμπλουτίζοντας τις φυσαλίδες με αέρια, έτσι ώστε να αυξηθεί η διάμετρός τους.

## 2.8 Ομοιογενειοποίηση

Μετά την τήξη των αρχικών συστατικών και, εφόσον δεν υπάρχουν πλέον μικρές και μεγάλες φυσαλίδες στο τήγμα, αυτό παραμένει στο φούρνο για ομοιογενειοποίηση, ώστε να είναι έτοιμο για την παραγωγή των φιαλών. Το γυαλί πρέπει να είναι χημικά, φυσικά και θερμικά ομοιογενές.

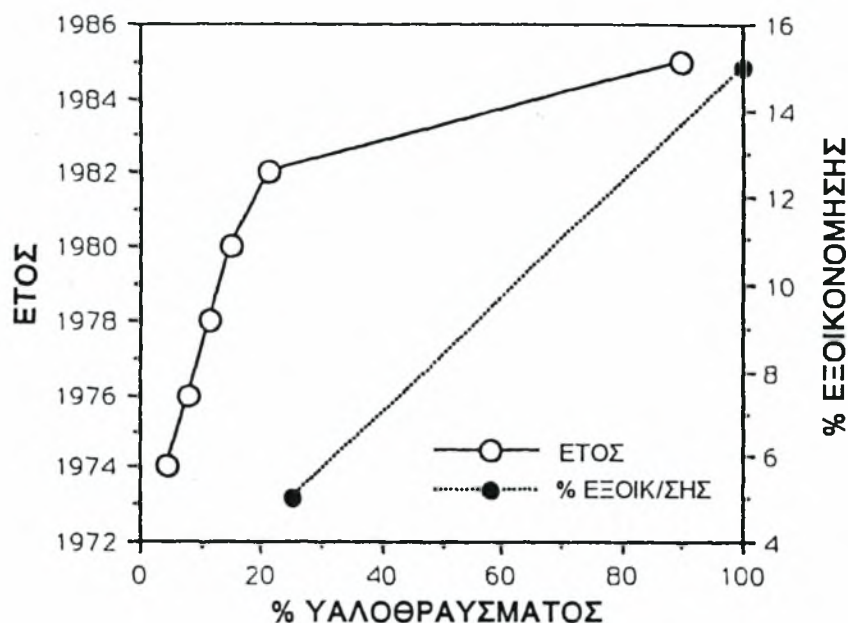
Ο καλύτερος φυσικός τρόπος ομοιογενειοποίησης του γυαλιού οφείλεται στα θερμικά (επαγωγικά) ρεύματα που δημιουργούνται μέσα στον κλίβανο. Τα θερμικά ρεύματα, που δημιουργούνται στην διώρυγα του κλιβάνου, έχουν σαν αποτέλεσμα να ωθούν το μέρος της μάζας του γυαλιού πίσω στον κυρίως κλίβανο. Η διαδικασία αυτή δημιουργεί μια κυκλική ανάδευση του υαλοτήγματος στην διώρυγα του κλιβάνου και επιμέρους μερική ομοιογενειοποίηση του τήγματος. Κατόπιν το γυαλί περνά σε δεύτερο τμήμα του κλιβάνου, όπου γίνεται περαιτέρω θερμική σταθεροποίηση της υαλομάζας.

## 2.9 Υαλόθραυσμα

Το υαλόθραυσμα είναι ανακυκλωμένο γυαλί σπασμένο σε μικρά κομμάτια. Μαζί με τις πρώτες ύλες, ο φούρνος παραγωγής τροφοδοτείται και με αυτό. Αφού το υαλόθραυσμα είναι ήδη τηγμένο γυαλί, αυτό δρα ως διαλύτης (ρευστοποιητής) και επιταχύνει τις διαδικασίες της τήξης. Εκτός λοιπόν της εξοικονόμησης πρώτων υλών, έχουμε και οικονομία στην απαιτούμενη ενέργεια για την τήξη. Η ποσότητα του υαλοθραύσματος, που προστίθεται για τήξη, έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, όπως δείχνει το σχήμα 4.

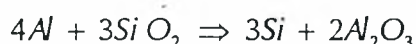
Σήμερα είναι δυνατόν να παράγουμε φιάλες με χρήση υαλοθραύσματος έως και 90%. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του υαλοθραύσματος αντί των πρώτων υλών είναι:

1. Μείωση αστικών απορριμμάτων
2. Εξοικονόμηση πρώτων υλών, ιδιαίτερα του ανθρακικού νατρίου (σόδα)
3. Μείωση της κατανάλωσης καυσίμων



Σχήμα 4 : Χρήση του υαλοθραύσματος στη βιομηχανία παραγωγής φιαλών

Με την χρήση υαλοθραύσματος εισάγονται στα αρχικά υλικά ακαθαρσίες που οδηγούν σε ατέλειες των φιαλών. Αυτές οι ακαθαρσίες (Pb, Al, κεραμικά, κ.τ.λ.) μαζεύονται στον πυθμένα του φούρνου παραγωγής. Έτσι ο πυθμένας του κλιβάνου μπορεί να διαβρωθεί. Επιπλέον το Al αντιδρά με το  $\text{SiO}_2$  ως ακολούθως:



Με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται στο γυαλί πυρίτιο, που δημιουργεί ρωγμές στην επιφάνεια του γυαλίνου αντικειμένου, λόγω των διαφορετικών τιμών μεταξύ των συντελεστών θερμικής διαστολής του Si και  $\text{SiO}_2$ .

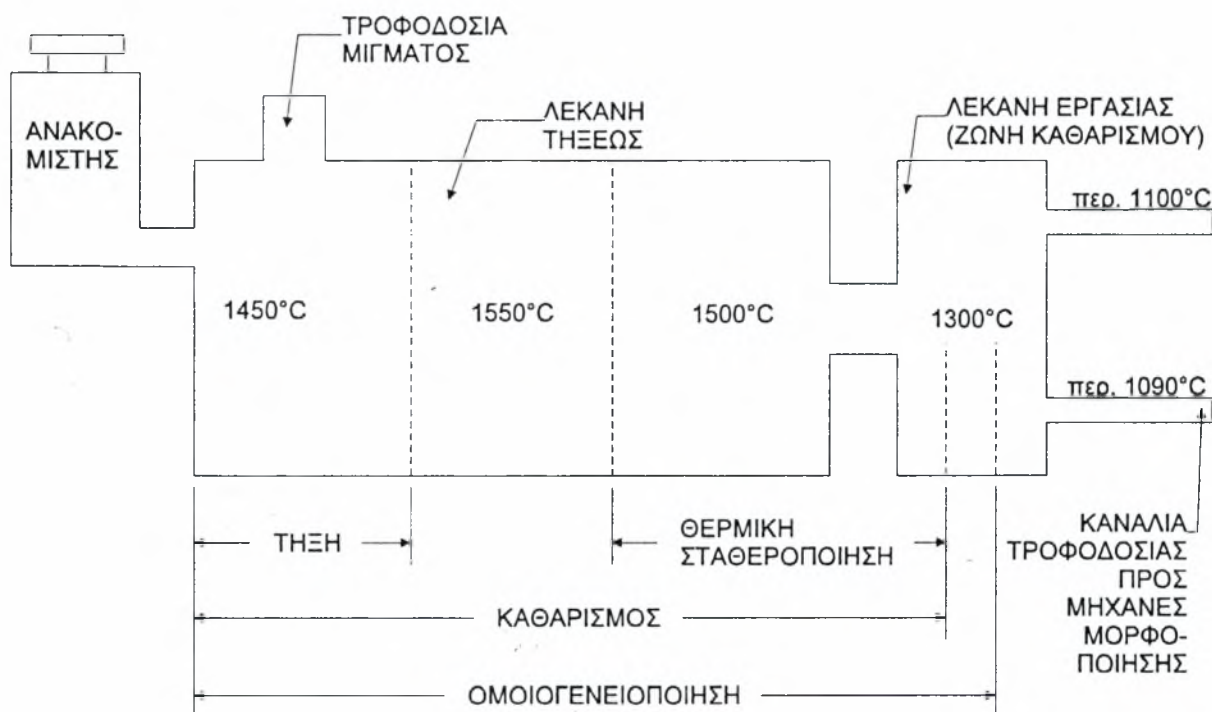
## 2.10 Υαλουργικοί κλίβανοι

Οι υαλουργικοί κλίβανοι με βάση το προς τήξη είδος γυαλιού χωρίζονται στους κλιβάνους φιαλοειδών, επίπεδου γυαλιού και γυαλιού ειδικής μορφής και η δυναμικότητά τους κυμαίνεται από 100 kg / ημέρα για το γυαλί ειδικής μορφής ως και 800 t / ημέρα για το επίπεδο γυαλί. Οι σημαντικότερες διαφορές στα χαρακτηριστικά των διαφόρων κλιβάνων είναι ο τρόπος λειτουργίας τους (συνεχής ή περιодικός), ο τρόπος τροφοδοσίας των πρώτων υλών (από εμπρός ή από πλάγια), ο διαχωρισμός των διαφόρων τμημάτων των λεκανών (με ευθεία ή βυθισμένη διώρυγα ή κανένα διαχωρισμό), η κατεύθυνση της φλόγας (εγκάρσια ή διαμήκης - τύπου U) και η ανάκτηση της θερμότητας των καυσαερίων (με αναγεννητή-Regenerator ή με ανακομιστή-Recuperator).

Για την παραγωγή φιαλοειδών αποδείχθηκε ως οικονομικότερη λύση, ο κλίβανος με δώρυγα, με θέρμανση από αναγεννητή και με εγκάρσια ή διαμήκη θέρμανση.

Η μαζική παραγωγή των φιαλών είναι μια συνεχής διαδικασία. Το σχήμα 5, που ακολουθεί, δείχνει τη διαδικασία παραγωγής της υαλόμαζας μέσα σε έναν υαλουργικό κλίβανο ο οποίος αποτελείται από:

- Τμήμα τροφοδοσίας μίγματος πρώτων υλών
- Περιοχή (τμήμα) τήξης
- Περιοχή καθαρισμού της υαλομάζας
- Λεκάνη ή τμήμα κατεργασίας και
- Τμήμα αφαίρεσης έτοιμου τήγματος προς μορφοποίηση.



**Σχήμα 5 : Διαδικασία παραγωγής υαλόμαζας**

Το μίγμα των πρώτων υλών τροφοδοτείται στο κλίβανο σε συνεχή βάση σχηματίζοντας ένα λεπτό στρώμα στη επιφάνεια του ήδη λυομένου γυαλιού που περιέχεται στον κλίβανο.

Οι πρώτες ύλες πρέπει να είναι ομοιογενείς ως προς την σύσταση τους ώστε να συντομεύεται ο χρόνος τήξεως και ομοιογενειοποίησης του τήγματος.

Οι κάτωθι παράμετροι επιδρούν ευεργετικά:

- Σωστή κοκκομετρία των πρώτων υλών
- Ποσοστό υγρασίας στις πρώτες ύλες.

Οι πρώτες ύλες πρέπει να έχουν ομοιόμορφη κοκκομετρία για ολοκληρωμένη και σωστή ανάμειξη των πρώτων υλών. Το υαλόθραυσμα συνήθως προστίθεται στο κλίβανο ξεχωριστά από τις πρώτες ύλες. Το ποσοστό υγρασίας κυρίως στην χαλαζιακή άμμο πρέπει να είναι περίπου 4%. Η υγρασία βοηθά στην διαδικασία τήξεως. Τα μόρια του ύδατος λειτουργούν σαν λιπαντικό μέσο και επιτρέπουν την καλύτερη ανάμειξη.

Για να παραχθεί η απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την τήξη και ομοιογενειοποίηση των πρώτων υλών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο πετρέλαιο ή φυσικό αέριο.

Το πετρέλαιο (85% C & 13% H) ή το φυσικό αέριο (95% CH<sub>4</sub> & 3% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) εισάγεται πλευρικά ή από το πίσω τμήμα του κλιβάνου. Η φλόγα της καύσης κατ' αυτόν τον τρόπο επεκτείνεται στο μέσο του φούρνου. Τα παραγόμενα αέρια κατά την καύση εξάγονται πλευρικά ή από το πίσω μέρος του κλιβάνου. Η καύση σταματά από την μια πλευρά και αρχίζει από την άλλη, ώστε να επιτύχουμε ψύξη των προϊόντων της καύσης. Η ροή του καυσαερίου αναπτύσσει ταχύτητα 120 m/s. Η υψηλή αυτή ταχύτητα μεταφέρει μακριά τους ατμούς από το τήγμα.

Η καύση του πετρελαίου ή του φυσικού αερίου συντελείται με αντιδράσεις που ελευθερώνουν θερμική ενέργεια (KJ / mole):

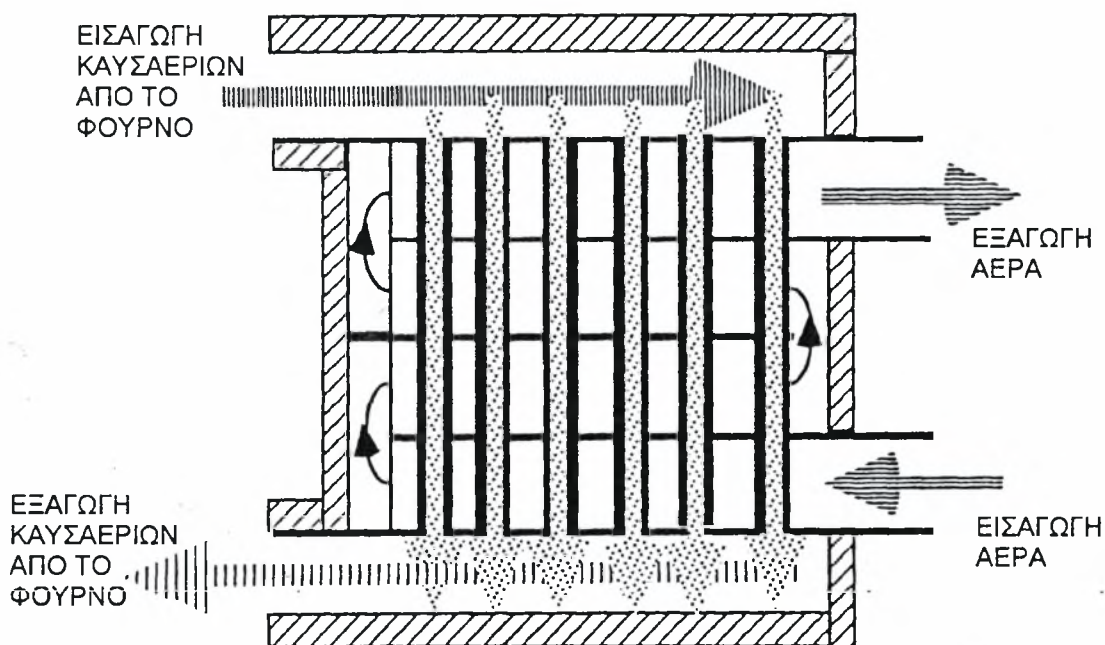
	Αντίδραση	KJ / mole
1.	$C + O_2 \Leftrightarrow CO_2$	-393
2.	$CO + \frac{1}{2} O_2 \Leftrightarrow CO_2$	-283
3.	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \Leftrightarrow H_2O$	-242
4.	$CH_4 + 2O_2 \Leftrightarrow CO_2 + H_2O$	-803
5.	$C_2H_6 + \frac{1}{2} O_2 \Leftrightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	

Αυτές οι αντιδράσεις γίνονται με μια συγκεκριμένη ποσότητα αέρα. Εκτός από τα αέρια των παραπάνω αντιδράσεων παράγονται υποπροϊόντα όπως NO<sub>x</sub> και SO<sub>x</sub> υπεύθυνα για την όξινη βροχή. Γενικά τα καυσαέρια περιέχουν ρυπαντές όπως NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>x=1,2</sub>, ατμοί γυαλιού, κ.λ.π.



Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να ανακτηθεί από τα καυσαέρια χρησιμοποιώντας προθερμαντήρες του αέρα καύσης ή συστήματα ανάκτησης θερμότητας. Αυτή η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει τη θερμιδική αξία των καυσίμων και να μειώσει την ενέργεια που απαιτείται για την τήξη των πρώτων υλών. Είναι φανερό ότι τα καυσαέρια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα εξαιτίας της πιθανότητάς τους να προκαλέσουν διάβρωση. Γι' αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθούν συστήματα ανταλλαγής θερμότητας.

Ο εναλλάκτης θερμότητας τύπου "Recuperator" ή ανακομιστής χρησιμοποιείται συνήθως για κλιβάνους με μια παραγωγή λιγότερο από 50 τόνους. Τα εισερχόμενα καυσαέρια περνούν μέσα από κανάλια που είναι σε επαφή με κανάλια εισερχόμενου αέρα. Ο εξερχόμενος αέρας μπορεί να φτάσει σε μια θερμοκρασία μεταξύ 600 και 800° C. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας ενός ανακομιστή θερμότητας :



**Σχήμα 6 : Τρόπος λειτουργίας ανακομιστή θερμότητας**

Όταν οι φούρνοι γυαλιού θερμαίνονται, χρησιμοποιείται κατά την καύση μια μεγάλη ποσότητα αέρα. Ο αέρας, που χρησιμοποιείται για την καύση πρέπει να προθερμαίνεται, για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή θερμοκρασία στο φούρνο, που απαιτείται για την τήξη του γυαλιού. Στους αναγεννητικούς φούρνους αυτή η προθέρμανση γίνεται στους αναγεννητές. Υπάρχουν δύο αναγεννητές για κάθε φούρνο. Ένας αναγεννητής αποτελείται από μια πυρίμαχη κατασκευή με χαλαρά πυρίμαχα τούβλα. Το αποβαλλόμενο αέριο περνά μέσα από τον ένα αναγεννητή και από εκεί θερμαίνει τα τούβλα που δρουν ως αποθήκες θερμότητας. Ο

νεοεισερχόμενος αέρας περνά μέσα από το άλλο αναγεννητικό κελί που είχε θερμανθεί από τα αποβαλλόμενα αέρια προηγουμένως. Τα τούβλα θερμαίνονται περίπου στους  $1300^{\circ}\text{C}$ . Ο αέρας καύσης θερμαίνεται περίπου στους  $900 - 1000^{\circ}\text{C}$  προτού εισαχθεί στο φούρνο. Αυτό το σύστημα βοηθά στη χρήση καυσίμων με θερμιδική αξία πάνω από 85%. Οι θερμικές απώλειες σε φούρνο - δεξαμενή με αναγεννητές είναι γι' αυτό 65 με 75%. Τα περισσότερα από τα καύσιμα χρησιμοποιούνται για να διατηρήσουν το γυαλί και το φούρνο ζεστό.

### **2.11 Η παραγωγική διαδικασία της Αφοι Βαλαβάνη Α.Ε.**

Στις εγκαταστάσεις της εταιρείας λειτουργεί ένας κλίβανος συνεχούς καύσεως για την παραγωγή υάλινων φιαλών για την εμφιάλωση οίνων και ποτών. Η δυναμική της εταιρείας βασίζεται στο σχεδιασμό και την παραγωγή γυαλιών διαφόρων σχημάτων και μεγεθών, σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές και απαιτήσεις των πελατών. Η παραγωγική δυναμικότητα της εταιρείας ανέρχεται στους 20.000 τόνους υαλομάζας τον χρόνο.

Η βασική διαδικασία παραγωγής αρχίζει με την ανάμειξη και τροφοδοσία των πρώτων υλών στον κλίβανο. Το μίγμα των πρώτων υλών αποτελείται από χαλαζιακή άμμο, ανθρακική σόδα, μαρμαρόσκονη, υαλόθραυσμα, χρωστικές ύλες και οξειδία καθαρισμού της υαλομάζας από τις φυσαλίδες. Το μίγμα τροφοδοτείται στον κλίβανο όπου λιώνει στους  $1550^{\circ}\text{C}$  και δημιουργεί ένα παχύρρευστο υγρό. Η καύση του κλιβάνου γίνεται με μαζούτ ή αέριο. Ο κλίβανος είναι κατασκευασμένος με πυρίμαχα υλικά μεγάλης αντοχής στις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ τα εξωτερικά τοιχώματα είναι μονωμένα, ώστε να έχουμε μικρές μόνο απώλειες θερμότητας.

Ο κλίβανος είναι εξοπλισμένος με εναλλάκτες θερμότητας για την προθέρμανση του αέρα καύσης, ενώ για την καύση του κλιβάνου χρησιμοποιείται φυσικός ελκυσμός. Το σύστημα καύσης βρίσκεται στο πίσω μέρος του κλιβάνου, η λειτουργία του είναι συνεχής και ως καύσιμη ύλη για το τμήμα τήξεως του γυαλιού χρησιμοποιείται μαζούτ.

Από το τμήμα τήξεως το γυαλί ρέει διαμέσου μιας διώρυγας στο τμήμα κατεργασίας, το οποίο είναι ανεξάρτητο. Από το τμήμα αυτό το γυαλί κατανέμεται με ειδικά κανάλια τροφοδοσίας προς τις αυτόματες μηχανές. Η προϋπόθεση εδώ είναι ότι η πλαστική μάζα του γυαλιού στο κάθε κανάλι πρέπει να έχει τη σωστή θερμοκρασία και τις απαραίτητες τιμές ιξώδους, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με την παραγωγική διαδικασία. Στην μορφοποίηση η ροή του γυαλιού κόβεται με ειδικό μηχανισμό ψαλιδιών σε κομμάτια, τα οποία ονομάζονται στάγματα. Τα στάγματα αυτά οδηγούνται στην μηχανή για να σχηματίσουν τα γυάλινα μπουκάλια.



Το πρώτο στάδιο κατασκευής ενός γυάλινου μπουκαλιού λαμβάνει χώρα στο πρώτο καλούπι που ονομάζεται προφόρμα. Εδώ δίνεται ένα πρότυπο σχήμα στο μπουκάλι και σχηματίζεται ο λαιμός του και κατόπιν η μάζα του γυαλιού μεταφέρεται στο δεύτερο καλούπι, όπου γίνεται το τελικό φύσημα. Όταν σχηματιστούν τα μπουκάλια, εξέρχονται από την μηχανή και με ειδική μεταφορική ταινία μεταφέρονται στον κλίβανο ανόπτησης, για να απελευθερωθούν από τις τάσεις που έχουν δημιουργηθεί κατά την διάρκεια της σχηματοδότησης. Πριν εισέλθουν στο κλίβανο ανόπτησης τα μπουκάλια επιδέχονται κάποια επιφανειακή προστασία για καλύτερη μηχανική συμπεριφορά στις γραμμές εμφιάλωσης. Στο άλλο άκρο του κλιβάνου ανόπτησης γίνεται και δεύτερη επιφανειακή προστασία των μπουκαλιών για την ευκολότερη διακίνηση στις γραμμές εμφιάλωσης. Μετά τη διαδικασία ανόπτησης πραγματοποιείται ποιοτικός έλεγχος και τέλος τα μπουκάλια συσκευάζονται σε παλέτες και οδηγούνται στην αποθήκευση. Ολόκληρη η παραγωγική διαδικασία ελέγχεται με σύγχρονο ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

Η εταιρεία Αφοι Βαλαβάνη Α.Ε. ιδρύθηκε στη Λάρισα ως μικρή επιχείρηση το 1959. Ο σκοπός της επιχείρησης ήταν η παραγωγή γυάλινων ειδών οικιακής χρήσης. Η επιχείρηση αυτοματοποιήθηκε το 1979. Από τότε κατασκευάζει γυάλινες φιάλες για τη βιομηχανία κρασιού και αναψυκτικών. Λειτουργεί με 4 βάρδιες 24 ώρες την ημέρα και 7 ημέρες την εβδομάδα. Ο κλίβανος γυαλιού έχει διάρκεια ζωής 5-6 χρόνια. Μετά από αυτή την περίοδο ο κλίβανος πρέπει να ξαναχτιστεί. Η εταιρεία τον αναβάθμισε, ώστε να έχει δυνατότητα παραγωγής 80 τόνων την ημέρα, προκειμένου να ικανοποιήσει τις ανάγκες των πελατών της και να μειώσει την ποσότητα των εισαγωγών από τις βαλκανικές χώρες. Γενικά κινείται προς μια ανανέωση της τεχνολογίας και του προσωπικού της για να αντέξει στον ανταγωνισμό από το εξωτερικό για τα επόμενα πέντε χρόνια.

Τα επενδυτικά προγράμματα ανάπτυξης της επιχείρησης στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας στα προϊόντα, στην αύξηση της παραγωγικότητας και στη μείωση του κόστους παραγωγής. Η βελτίωση της παραγωγικότητας θα κάνει πιθανή την αύξηση του μεριδίου της εταιρείας στην ελληνική αγορά, που για την ώρα καλύπτεται από τις εισαγωγές. Η εταιρεία επίσης σχεδιάζει μια στρατηγική εξαγωγών για τις χώρες των Βαλκανίων και της Μεσογείου. Είναι φανερό ότι η αποδοχή των προϊόντων στο εσωτερικό και στο εξωτερικό απαιτεί συνεχή ποιότητα, χαμηλό κόστος και συνεχή κατάρτιση του τεχνικού προσωπικού. Το παρόν πρόγραμμα θα φέρει την εταιρεία σε ένα επίπεδο με τις πρώτες ευρωπαϊκές χώρες.

### 3. Το Γενικό Μαθηματικό Πρόβλημα

#### 3.1 Οι γενικές εξισώσεις ροής

Για να καθοριστούν οι ιδιότητες της ροής σε οποιοδήποτε σημείο μιας ροής, πρέπει να επιλυθούν ταυτόχρονα οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας, της ορμής και άλλων ιδιοτήτων της ροής. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να εκφραστούν, σε μορφή τανυστών, ως εξής:

Εξίσωση διατήρησης της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho V_i = 0 \quad (3.1-1)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα,  $V_i$  είναι το διάνυσμα ταχύτητας του ρευστού στο σημείο  $P$  και  $t$  είναι ο χρόνος, αν πρόκειται να εξεταστούν χρονικά ασταθείς ροές.

Εξίσωση διατήρησης της ορμής:

$$\frac{\partial \rho V_i}{\partial t} + \nabla \cdot \rho V_i V_j = -\nabla \cdot \tau_{ij} - \nabla p + f_i \quad (3.1-2)$$

όπου  $\tau_{ij}$  είναι ο τανυστής τάσης,  $p$  είναι η στατική πίεση και  $f_i$  είναι οποιαδήποτε ασκούμενη δύναμη σώματος.

Οι όροι  $\nabla \cdot \rho V_i V_j$  και  $\nabla \cdot \tau_{ij}$ , για καρτεσιανές συντεταγμένες, δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\nabla \cdot \rho V_i V_j = \sum_i \sum_j \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot V_i \cdot V_j) \cdot x_i \right] \quad (3.1-3)$$

και

$$\nabla \cdot \tau_{ij} = \sum_i \sum_j \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} (\tau_{ij}) \cdot x_i \right] \quad (3.1-4)$$

όπου  $x_i$  είναι τα μοναδιαία διανύσματα του συστήματος συντεταγμένων.

Εξίσωση διατήρησης της γενικής ιδιότητας  $\phi$ :

Παρόμοια, η γενική ιδιότητα  $\phi$ , που μπορεί να παρουσιάζει φαινόμενα συναγωγής και διάχυσης, είναι δυνατόν να καθοριστεί μέσω ταυτόχρονης επίλυσης με τις προηγούμενες εξισώσεις και να γραφεί ως εξής:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \rho V_i \phi = -\nabla \cdot j_{\phi,i} + g_{\phi} \quad (3.1-5)$$

όπου  $j_{\phi,i}$  είναι η ροή διάχυσης του  $\phi$  και  $g_{\phi}$  είναι η παραγωγή του  $\phi$ .

Στην εξίσωση αυτή, το  $\phi$  μπορεί να αντιπροσωπεύει ενθαλπία, συγκέντρωση, ενέργεια τύρβης κ.λ.π. Η ομοιότητα με την εξίσωση (3.1-2) είναι εμφανής. Αυτή η ομοιότητα μας επιτρέπει να συμπεριλάβουμε τις εξισώσεις για βαθμωτές μεταβλητές.

Η αναλυτική μορφή των εξισώσεων για την περίπτωση δυδιάστατης σταθερής ροής με ανακυκλοφορία, χρησιμοποιώντας καρτεσιανές συντεταγμένες, είναι:

Εξίσωση διατήρησης της μάζας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v) \right] = 0 \quad (3.1-6)$$

όπου  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ , αφού έχουμε χρονικά σταθερή ροή.

Εξίσωση διατήρησης της ορμής στην  $x$  - διεύθυνση:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot u \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v \cdot u) \right] = \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \\ + \left( \frac{\partial \mu}{\partial x} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \mu}{\partial y} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) + f_x \end{aligned} \quad (3.1-7)$$

όπου  $\frac{\partial \rho u}{\partial t} = 0$ , αφού έχουμε χρονικά σταθερή ροή.

Ο πρώτος όρος του αριστερού μέλους της εξίσωσης (3.1-7) είναι ο όρος για χρονικά μεταβαλλόμενη ροή και ο δεύτερος είναι ο όρος της συναγωγής. Στο δεξιό μέλος της εξίσωσης ο πρώτος όρος είναι ο όρος της πίεσης, ο δεύτερος είναι ο όρος της διάχυσης, ο τρίτος είναι ένας πρόσθετος όρος διάχυσης για την περίπτωση μεταβλητού ιξώδους και ο τελευταίος όρος εκφράζει την ασκούμενη δύναμη σώματος (διανεμυμένη).

Εξίσωση διατήρησης της ορμής στην  $y$  - διεύθυνση:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot u \cdot v) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v \cdot v) \right] = \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \\ + \left( \frac{\partial \mu}{\partial x} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \mu}{\partial y} \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \right) + f_y \end{aligned} \quad (3.1-8)$$

όπου  $\frac{\partial \rho v}{\partial t} = 0$ , αφού έχουμε χρονικά σταθερή ροή.

Εξίσωση διατήρησης της ιδιότητας  $\phi$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot u \cdot \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \cdot v \cdot \phi) \right] = \\ = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma_\phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma_\phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] + g_\phi \end{aligned} \quad (3.1-9)$$

όπου  $\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} = 0$ , αφού έχουμε χρονικά σταθερή ροή.

### 3.2 Οριακές και αρχικές συνθήκες

#### (α) Οριακές συνθήκες

Για την εφαρμογή των διαφορικών εξισώσεων (3.1-6) ως (3.1-9) σε ένα πρόβλημα ροής, απαιτείται ο καθορισμός οριακών συνθηκών. Όταν οι εξισώσεις αυτές είναι ελλειπτικές, πρέπει οι οριακές συνθήκες να καθοριστούν σε όλες τις πλευρές των συνόρων. Πρέπει, δηλαδή, να καθοριστεί είτε η τιμή της μεταβλητής στο σύνορο είτε η κανονική της κλίση. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες, ανάλογα με το που παρουσιάζονται: στις περιοχές εισόδου, στις περιοχές εξόδου, στα τοιχώματα και στους άξονες συμμετρίας.

##### 1. Περιοχές εισόδου :

Γενικά, οι συνθήκες του ρευστού στην είσοδο δίνονται ως τμήμα των δεδομένων του προβλήματος. Π.χ. μπορούν να δίνονται η ταχύτητα, η πίεση και η θερμοκρασία του εισερχόμενου ρευστού. Κατά αυτόν τον τρόπο, μπορούν να υπολογιστούν οι εξαρτημένες μεταβλητές, αν έχουν δοθεί οι ανεξάρτητες στην είσοδο.

##### 2. Περιοχές εξόδου :

Για ελλειπτικές ροές πρέπει να προσδιοριστεί για κάθε μεταβλητή μια οριακή συνθήκη στην έξοδο. Για το δικό μας πρόβλημα, οι οριακές συνθήκες θα δοθούν στο κεφάλαιο 6.

##### 3. Στερεά τοιχώματα :

Για ένα στερεό, αδιαπέραστο τοίχωμα, η συνθήκη της μη ολίσθησης δηλώνει πως οι εφαπτομενικές και κανονικές συνιστώσες της ταχύτητας πρέπει να είναι μηδέν. Για την εξίσωση της ενθαλπίας πρέπει να προσδιοριστεί είτε η θερμοκρασία είτε η θερμορροή κατά μήκος του τοιχώματος.

##### 4. Άξονες συμμετρίας :

Αναγνωρίζοντας ότι δεν θα υπάρξει μεταφορά μάζας, ταχύτητας ή μετάδοση θερμότητας κατά μήκος ενός άξονα ή ενός επιπέδου συμμετρίας, μπορούμε να εξάγουμε την κατάλληλη οριακή συνθήκη. Έτσι λοιπόν η

κανονική συνιστώσα της ταχύτητας και οι κανονικές ροές πρέπει να είναι μηδέν.

(β) Αρχικές συνθήκες

Γενικά, για μια ελλειπτική ροή, η επαναληπτική φύση της διαδικασίας επίλυσης δεν απαιτεί τον προσδιορισμό αρχικών συνθηκών. Στην πράξη, όμως, μια κοντινή υπόθεση του πεδίου των μεταβλητών αποτελεί πλεονέκτημα και υποβοηθά στη σύγκλιση.

### 3.3 Βοηθητικές πληροφορίες

Για να ολοκληρωθεί το μαθηματικό πρόβλημα είναι απαραίτητες κάποιες πρόσθετες πληροφορίες. Π.χ. για τη συμπιεστή ροή ενός αερίου, η πυκνότητα μπορεί να υπολογιστεί από την καταστατική εξίσωση των αερίων. Για την εξίσωση ενθαλπίας μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες από το νόμο συναγωγής του Fourier:

$$q_i = k \cdot \nabla T \quad (3.3-1)$$

όπου  $k$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας,  $q_i$  είναι το διάνυσμα θερμοροής και  $T$  είναι η θερμοκρασία του ρευστού.

Για την εξίσωση συγκέντρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο νόμος διάχυσης της μάζας του Fick :

$$\dot{m}_c = k_c \cdot \nabla c \quad (3.3-2)$$

όπου  $\dot{m}_c$  είναι η ροή μάζας,  $c$  είναι η συγκέντρωση και  $k_c$  είναι ο συντελεστής διάχυσης της μάζας.

Για ένα νευτώνειο ρευστό η διατμητική τάση δίνεται από το νόμο του Νεύτωνα:

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \Delta_{ij} \quad (3.3-3)$$

όπου ο συντελεστής ιξώδους  $\mu$  είναι ανεξάρτητος από το ρυθμό φόρτισης  $\Delta_{ij}$ .

### 3.4 Μέθοδος αριθμητικής προσέγγισης

Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται στην περίπτωση που εξετάζουμε, παίρνει την ταχύτητα και την πίεση σαν εξαρτημένες μεταβλητές που



περιγράφουν το υδροδυναμικό πεδίο και ο αλγόριθμος επίλυσης βασίζεται στις προτάσεις του CHORIN (1968).

Η αρχή των μεθόδων με πεπερασμένες διαφορές είναι να αντικαθιστά τα διαφορικά μιας μεταβλητής με τη διαφορά σε πεπερασμένα διαστήματα. Γι'αυτό είναι απαραίτητο να αντικαταστήσουμε το συνεχές αυτό χώρο με ένα πλέγμα γραμμών, που καλύπτουν το χώρο αυτό. Για να φέρουμε τις διαφορικές εξισώσεις σε μορφή εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών, ακολουθούμε τους εξής κανόνες:

1. Καθορίζουμε ένα πλέγμα (στην περίπτωση μας ορθογώνιο) που να καλύπτει όλο τον εξεταζόμενο χώρο. Στα κέντρα των κυψελών που προκύπτουν δίνουμε τιμές στις ιδιότητες του ρευστού ή τις υπολογίζουμε μέσω υποθέσεων ή πειραματικών αποτελεσμάτων.
2. Για κάθε μεταβλητή, οι παράγωγοι υπολογίζονται παίρνοντας τις διαφορές στα γειτονικά διαστήματα του πλέγματος.
3. Υποθέτουμε ότι ιδιότητες και μεταβλητές μεταβάλλονται γραμμικά μεταξύ διαδοχικών περιοχών.
4. Εφαρμόζουμε μια προσέγγιση ημιολοκλήρωσης, υποθέτοντας έναν πεπερασμένο όγκο ελέγχου, που περιλαμβάνει κάθε περιοχή και κατά συνέπεια οι δυνάμεις (του σώματος), οι πηγές θερμότητας κ.λ.π., οι οποίες γενικά ονομάζονται πηγαίοι όροι, παίρνουν μια γραμμική μορφή. Κάθε μεταβλητή θεωρείται σταθερή μέσα στον όγκο ελέγχου.

Η γραμμική μεταβολή των ιδιοτήτων και μεταβλητών οδηγεί στην έκφραση των διαφορών παραγώγων, που εμφανίζονται στις βασικές εξισώσεις με τη μορφή “κεντρικών διαφορών”. Στο παρελθόν, αριθμητικές διαδικασίες, που χρησιμοποιούσαν τη μέθοδο των “κεντρικών διαφορών”, δεν ήταν πάντα επιτυχείς και παρουσιάζονταν προβλήματα για αριθμούς Reynolds πάνω από 500. Οι δυσκολίες αυτές προέκυπταν από τη μη γραμμικότητα των διαφορικών εξισώσεων και από την ισχυρή επιρροή, που είχαν οι όροι συναγωγής. Έτσι έγινε η εισαγωγή της μεθόδου των “ανάντη διαφορών” ή της “κυψέλης-δότη” για να ξεπεραστεί το πρόβλημα απόκλισης σε υψηλούς αριθμούς Reynolds. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, τα ποικίλα διαφορικά υπολογίζονται παίρνοντας διαφορές, βασιζόμενοι στις τιμές της μεταφερόμενης ιδιότητας που μελετούμε, στην ανάντη πλευρά, δηλαδή θεωρούμε πάντα ότι αυτή η ιδιότητα, που υφίσταται συναγωγή προς τον όγκο ελέγχου, έχει την ανάντη τιμή.

Εν τούτοις, αυτή η μέθοδος δεν είναι πάντα η πιο ικανοποιητική και έτσι εφαρμόζεται μια εναλλακτική προσέγγιση, που είναι η λεγόμενη μέθοδος των “υβριδικών διαφορών”. Βασική φιλοσοφία της μεθόδου αυτής είναι ότι παραλείπεται η διάχυση, όταν η ροή παρουσιάζει ισχυρή συναγωγή και ότι χρησιμοποιείται η μέθοδος των “ανοδικών διαφορών” για να εκφράσει τα διαφορικά. Αντίθετα, όταν η διάχυση είναι συγκρίσιμη με τη συναγωγή, χρησιμοποιείται η μέθοδος των “κεντρικών διαφορών”. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, προτάθηκε η χρησιμοποίηση ενός μεγέθους, που να εκφράζει τη σχέση συναγωγής και διάχυσης και που ονομάζεται αριθμός Peclet. Ο αριθμός αυτός ορίζεται ως  $Pe = \frac{\text{συναγωγή}}{\text{διάχυση}}$  και

αν είναι:  $|Pe| \leq 2$ , χρησιμοποιούμε τη μέθοδο των “κεντρικών διαφορών”, ενώ αν είναι  $|Pe| > 2$ , χρησιμοποιούμε τη μέθοδο των “ανάντη διαφορών”.

Στην περίπτωση μας χρησιμοποιείται η μέθοδος των “υβριδικών διαφορών” οπουδήποτε υφίσταται η ανάγκη να εκτιμηθεί η σχέση συναγωγής και διάχυσης κατά το μετασχηματισμό των διαφορικών εξισώσεων σε μορφή εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών.

### 3.5. Γενική διαδικασία επίλυσης

Αυτό το σύστημα των εξισώσεων μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας είτε άμεσες μεθόδους είτε επαναληπτικές μεθόδους (σημείο προς σημείο) του τύπου Gauss-Seidel. Στην πράξη, οι περισσότερες επαναληπτικές διαδικασίες, που αφορούν ροές, μεταχειρίζονται ενδιάμεσες μεθόδους, που περιλαμβάνουν τον αλγόριθμο του τριδιαγώνιου πίνακα (Tridiagonal Matrix Algorithm, TDMA), ο οποίος χρησιμοποιείται και στην παρούσα περίπτωση για την επίλυση των εξισώσεων (για την περιγραφή του αλγορίθμου TDMA, δες Παράρτημα Α).

Η γενική μορφή των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών της ροής είναι η εξής:

$$\varphi_P = \sum_{i=N,S,E,W} A_i^p \cdot \varphi_i + S^p \quad (3.5-1)$$

ή

$$\varphi_P = A_N^p \cdot \varphi_N + A_S^p \cdot \varphi_S + (A_E^p \cdot \varphi_E + A_W^p \cdot \varphi_W + S^p) \quad (3.5-2)$$

όπου  $N, S, E, W$  είναι οι γειτονικές περιοχές (βόρεια, νότια, ανατολικά, δυτικά) του  $P$  και  $S^p$  μια σταθερά. Με τη βοήθεια των γνωστών οριακών συνθηκών είναι δυνατόν να λύσουμε για όλα τα  $\varphi_P$  κατά μήκος μιας γραμμής του πλέγματος,



θεωρώντας γνωστή την ποσότητα στην παρένθεση. Αφού υπολογιστούν οι τιμές αυτές, ακολουθούμε την ίδια διαδικασία και για την επόμενη γραμμή του πλέγματος. Κατ'αυτόν τον τρόπο γίνεται μια σάρωση του χώρου απ'τη μια μεριά του συνόρου ως την άλλη, η οποία μπορεί να επαναληφθεί όσες φορές είναι απαραίτητο. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια διπλή σάρωση κατά μήκος της κάθετης διεύθυνσης. Γι' αυτό το λόγο, η εξίσωση (3.5-2) γράφεται με τη μορφή :

$$\varphi_P = A_E^p \cdot \varphi_E + A_W^p \cdot \varphi_W + (A_N^p \cdot \varphi_N + A_S^p \cdot \varphi_S + S^p) \quad (3.5-3)$$

και έτσι πραγματοποιείται μια εγκάρσια σάρωση από τη μια πλευρά του συνόρου στην άλλη.

Για να εξακριβωθεί ο βέλτιστος αριθμός μονών ή διπλών σαρώσεων, που δίνει την καλύτερη σύγκλιση στο πρόβλημα ροής που εξετάζουμε, πρέπει να γίνουν αριθμητικά πειράματα.

### 3.6. Ακρίβεια των λύσεων, σύγκλιση και υποχαλάρωση

Η πρόβλεψη ενός πεδίου ροής δεν περιλαμβάνει μόνο τη δημιουργία μιας αριθμητικής μεθόδου επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων, αλλά και την έκφραση των χαρακτηριστικών της ροής μέσα από αυτές. Λόγω των υποθέσεων, που έχουμε χρησιμοποιήσει, δεν μπορούμε να αποφύγουμε κάποια σφάλματα στις αριθμητικές μεθόδους πρόβλεψης. Είναι προφανές ότι τα σφάλματα αυτά είναι δύσκολο να προσδιοριστούν και ο μόνος τρόπος για να αποδειχθεί η σημασία τους είναι η σύγκριση μεταξύ αριθμητικών λύσεων και πειραματικών δεδομένων.

Η διαφορά μεταξύ της αριθμητικής λύσης των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών και της αναλυτικής λύσης των διαφορικών εξισώσεων ορίζεται ως το συνολικό αριθμητικό σφάλμα. Η αντικατάσταση των συνεχών εκφράσεων με διακριτοποιημένες εισάγει το σφάλμα διακριτοποίησης. Όταν αυτές οι διακριτοποιημένες εξισώσεις λυθούν με επαναληπτικές μεθόδους, εμφανίζεται το σφάλμα των επαναλήψεων. Επίσης, υπάρχει και το σφάλμα στρογγυλοποίησης, καθώς κάθε Η/Υ έχει συγκεκριμένο βαθμό ακρίβειας στην παράσταση αριθμών. Το σφάλμα διακριτοποίησης ελαττώνεται με τη μείωση του μεγέθους του πλέγματος, ενώ το σφάλμα των επαναλήψεων γενικά αυξάνεται. Γι'αυτό το λόγο δεν είμαστε πάντα σίγουροι, ότι, κάνοντας το πλέγμα πιο μικρό, θα έχουμε και μεγαλύτερη ακρίβεια. Εν τούτοις, για να έχουμε μια ακριβή και ταχεία διαδικασία επίλυσης, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τον ολικό υπολογιστικό χρόνο και την ακρίβεια της λύσης. Οι απαιτήσεις στους υπολογισμούς μας συνοψίζονται στα εξής: Σύγκλιση έχει επιτευχθεί, αν, σε οποιοδήποτε σημείο, οι προβλεφθείσες τιμές δεν μεταβάλλονται

περισσότερο από ένα συγκεκριμένο ποσοστό μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων. Γι'αυτό παρακολουθούμε ταυτόχρονα τα αθροίσματα των απόλυτων των υπολειμματικών ποσοτήτων των ταχυτήτων, της πίεσης κ.λ.π., για να δούμε κατά πόσο συγκλίνουν σε μικρές ποσότητες. Το κριτήριο σύγκλισης μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής:

$$\frac{R_{\phi}^i}{R_{N,\phi}} < \varepsilon \quad (3.6-1)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι μια μικρή ποσότητα (συνήθως  $10^{-4}$ ),  $R_{\phi}^i$  είναι το άθροισμα των απόλυτων των υπολειμματικών ποσοτήτων του  $\phi$  στην  $i$  επανάληψη και  $R_{N,\phi}$  είναι μια ποσότητα αδιαστατοποίησης, π.χ. η ροή μάζας, η ταχύτητα εισόδου του ρευστού, η ενθαλπία εισόδου του ρευστού κ.λ.π. Όταν ικανοποιηθεί το κριτήριο αυτό, ο υπολογισμός διακόπτεται και η λύση έχει συγκλίνει.

Σχεδόν σε όλα τα προβλήματα που περιλαμβάνουν επαναληπτικές διαδικασίες υπάρχει έλλειψη αρχικών συνθηκών. Αν οι υποτιθέμενες τιμές είναι αρκετά λανθασμένες, μπορεί να παρουσιαστούν προβλήματα αστάθειας, που, για να αποφευχθούν κατά τη διάρκεια της επίλυσης, συχνά χρησιμοποιούμε τη μέθοδο της υποχαλάρωσης. Η μέθοδος αυτή συνοψίζεται στα εξής:

Έστω  $\phi_{i-1}$  είναι η τιμή της μεταβλητής  $\phi$  στην  $(i-1)$  επανάληψη και  $\phi_i^0$  είναι η πρόσφατα υπολογισμένη τιμή στην  $i$  επανάληψη. Η τελική τιμή του  $\phi$  στην  $i$  επανάληψη υπολογίζεται από τον τύπο:

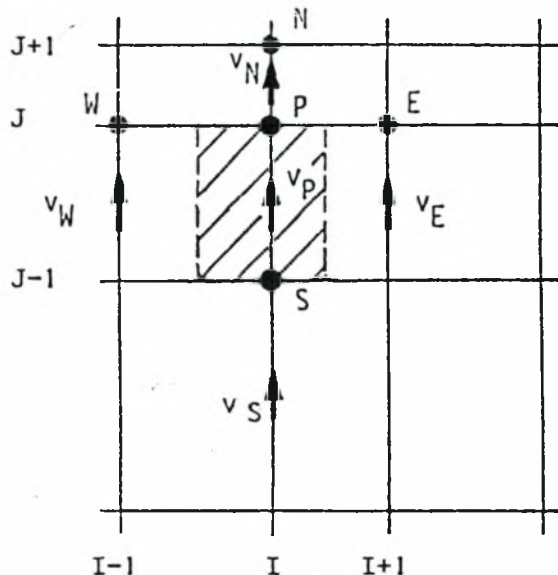
$$\phi_i = \alpha \cdot \phi_i^0 + (1 - \alpha) \cdot \phi_{i-1} \quad (3.6-2)$$

όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής υποχαλάρωσης ( $0 < \alpha < 1$ ). Όταν  $\alpha > 1$ , η λύση είναι υπερχαλαρωμένη. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται συνήθως μόνο στις διαδικασίες ελλειπτικής ροής, αφού η φύση των παραβολικών ροών δεν απαιτεί επαναλήψεις. Αριθμητικά πειράματα έχουν αποδείξει ότι η βέλτιστη τιμή του  $\alpha$  για τα πεδία ταχυτήτων είναι της τάξης του 0.5. Δεν εφαρμόστηκε υποχαλάρωση στα πεδία πιέσεων και θερμοκρασιών ( $\alpha = 1.0$ ).

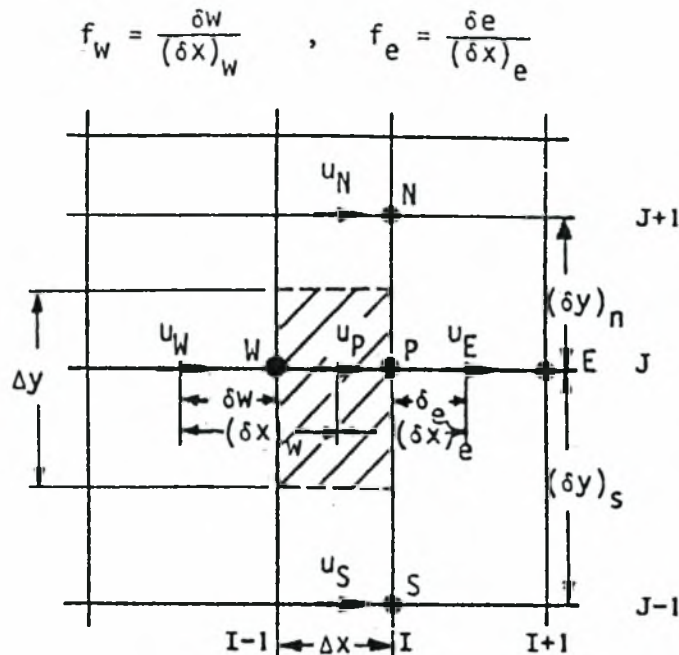
## 4. Ανάλυση του Προβλήματος

### 4.1 Το πλέγμα

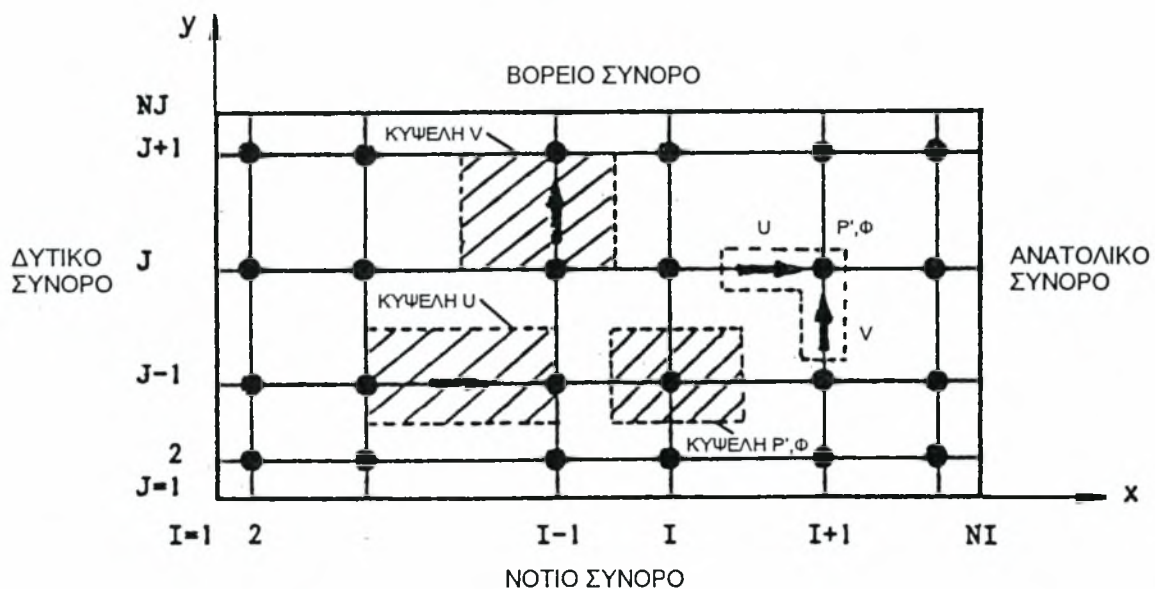
Τα σχήματα 7, 8 και 9 παριστάνουν το πλέγμα, τη διάταξη των κυψελών και τη θέση των ιδιοτήτων του ρευστού και των εξαρτημένων μεταβλητών. Οι ιδιότητες του ρευστού, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες, η θερμική αγωγιμότητα κ.λ.π. είναι αποθηκευμένες στους κόμβους του πλέγματος, όπως και η πίεση και η ιδιότητα  $\varphi$ . Οι συνιστώσες  $u$  και  $v$  της ταχύτητας αποθηκεύονται μεταξύ των κόμβων. Έτσι κάθε σημείο  $P$  του πλέγματος έχει τέσσερα γειτονικά σημεία, βόρειο, νότιο, ανατολικό και δυτικό, που χαρακτηρίζονται ως  $N$ ,  $S$ ,  $E$  και  $W$ . Σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητο ένα ανομοιόμορφο πλέγμα για να διευκολύνει την ακριβέστερη πρόβλεψη. Αυτό το σημείο είναι πολύ βασικό σε εφαρμογές, που μελετούν ροές με εμπόδια, όπως και η παρούσα. Απαιτείται ειδική δομή και μεταχείριση των κυψελών για να αντισταθμιστεί το γεγονός ότι οι ιδιότητες και οι ροές μάζας δεν είναι διαθέσιμες στις πλευρές των κυψελών.



Σχήμα 7 : Διάταξη της κυψέλης της ταχύτητας  $v$



Σχήμα 8 : Διάταξη της κυψέλης της ταχύτητας  $u$  και οι συντελεστές βαρύτητας  $f_w$  και  $f_e$



Σχήμα 9 : Διάταξη του πλέγματος

#### 4.2 Οι εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών

Με ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων (3.1-6) ως (3.1-9) στους όγκους ελέγχου, που περικλείουν την κάθε μεταβλητή, παίρνουμε τις εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών, οι οποίες γράφονται ως εξής (για τη λεπτομερέστερη παρουσίαση της παραγωγής των εξισώσεων αυτών, δες Παράρτημα Β) :

Εξίσωση διατήρησης της μάζας :

$$[(\rho \cdot u \cdot A)_e - (\rho \cdot u \cdot A)_w] + [(\rho \cdot v \cdot A)_n - (\rho \cdot v \cdot A)_s] = 0 \quad (4.2-1)$$

Εξίσωση διατήρησης της ορμής στη  $x$  - διεύθυνση :

$$A_p^u \cdot u_p = A_N^u \cdot u_N + A_S^u \cdot u_S + A_E^u \cdot u_E + A_W^u \cdot u_W + S^u + D^u \cdot (p_W - p_P) \quad (4.2-2)$$

Εξίσωση διατήρησης της ορμής στην  $y$  - διεύθυνση :

$$A_p^v \cdot v_p = A_N^v \cdot v_N + A_S^v \cdot v_S + A_E^v \cdot v_E + A_W^v \cdot v_W + S^v + D^v \cdot (p_S - p_P) \quad (4.2-3)$$

Εξίσωση διατήρησης της ιδιότητας  $\varphi$  :

$$A_p^\varphi \cdot \varphi_p = A_N^\varphi \cdot \varphi_N + A_S^\varphi \cdot \varphi_S + A_E^\varphi \cdot \varphi_E + A_W^\varphi \cdot \varphi_W + S^\varphi \quad (4.2-4)$$

Στις εξισώσεις αυτές, τα  $A$  και  $D$  είναι εμβαδά των επιφανειών του όγκου ελέγχου και τα  $A_i$  είναι συντελεστές που συνδυάζουν, το πόσο επηρεάζουν η συναγωγή και η διάχυση την ροή και υπολογίζονται από τη γεωμετρία, τις ιδιότητες και τις τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών από την προηγούμενη επανάληψη. Οι ποσότητες  $S$  αντιπροσωπεύουν οποιουσδήποτε υπάρχοντες πηγαίους όρους και εκφράζονται σε γραμμική μορφή ως εξής:

$$S^\varphi = S_p \cdot \varphi + S_u \quad (4.2-5)$$

όπου οι ποσότητες  $S_p$  και  $S_u$  είναι ανεξάρτητες του  $\varphi$ , και υπολογίζονται κι αυτές από γεωμετρικά δεδομένα, ιδιότητες του ρευστού και τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών από την προηγούμενη επανάληψη.

### 4.3 Η διαδικασία επίλυσης

Τα απαραίτητα βήματα για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών, που είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και δεν μπορούν να λυθούν ανεξάρτητα, είναι δυνατόν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας, εισάγουμε υποτιθέμενες τιμές των ταχυτήτων  $u$  και  $v$ , της πίεσης και της ιδιότητας  $\varphi$ .
2. Λύνουμε την εξίσωση διατήρησης της ταχύτητας στην  $x$  - διεύθυνση (4.2-2) για να πάρουμε ενδιάμεσες τιμές ταχυτήτων  $u^\circ$ .

3. Όμοια, λύνοντας ταυτόχρονα το σύστημα των εξισώσεων (4.2-3) παίρνουμε ενδιάμεσες τιμές ταχυτήτων  $v^{\circ}$  για το πεδίο ταχυτήτων στην  $y$  - διεύθυνση.

4. Τα νέα πεδία ταχυτήτων  $u^{\circ}$  και  $v^{\circ}$  ικανοποιούν τις εξισώσεις ταχυτήτων (4.2-2) και (4.2-3), αλλά δεν ικανοποιούν απαραίτητα την τοπική συνέχεια. Γι' αυτό αναζητείται μια διόρθωση του πεδίου πιέσεων  $p'$ , που να ικανοποιεί την τοπική συνέχεια με σχέσεις της μορφής :

$$u_p = u_p^{\circ} + u'_p = u_p^{\circ} + D^u \cdot (p'_w - p'_p) \quad (4.3-1)$$

$$v_p = v_p^{\circ} + v'_p = v_p^{\circ} + D^v \cdot (p'_s - p'_p) \quad (4.3-2)$$

$$p_p = p_p^{\circ} + p'_p \quad (4.3-3)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις αυτές στην εξίσωση (4.2-1), παίρνουμε μια εξίσωση διόρθωσης της πίεσης, που δίνεται από τον τύπο :

$$A_p^p \cdot p'_p = A_N^p \cdot p'_N + A_S^p \cdot p'_S + A_E^p \cdot p'_E + A_W^p \cdot p'_W + S^p \quad (4.3-4)$$

Η ταυτόχρονη επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (4.3-4) δίνει ένα πεδίο διόρθωσης της πίεσης. Στη συνέχεια, οι νέες τιμές των ταχυτήτων  $u$  και  $v$  και της πίεσης υπολογίζονται από τις εξισώσεις (4.3-1), (4.3-2) και (4.3-3), αντίστοιχα.

5. Το σύστημα των εξισώσεων (4.2-4) λύνεται ταυτόχρονα και δίνει ένα πεδίο για τη γενική ιδιότητα  $\varphi$ .

6. Οι νέες αυτές τιμές των ταχυτήτων  $u$  και  $v$ , της πίεσης  $p$  και της ιδιότητας  $\varphi$  χρησιμοποιούνται σαν υποτιθέμενες τιμές για την νέα επανάληψη και η διαδικασία επαναλαμβάνεται ώσπου να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης που έχουμε θέσει.



## 5. Το Πρόγραμμα Ηλεκτρονικού Υπολογιστή GLASS

Το πρόγραμμα GLASS βασίζεται στον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.3, είναι γραμμένο σε γλώσσα Fortran 77 και η δομή του θα περιγραφεί στα επόμενα υποκεφάλαια. Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν αναλυτικά στο κεφάλαιο 6.

### 5.1 Η κύρια ρουτίνα του προγράμματος

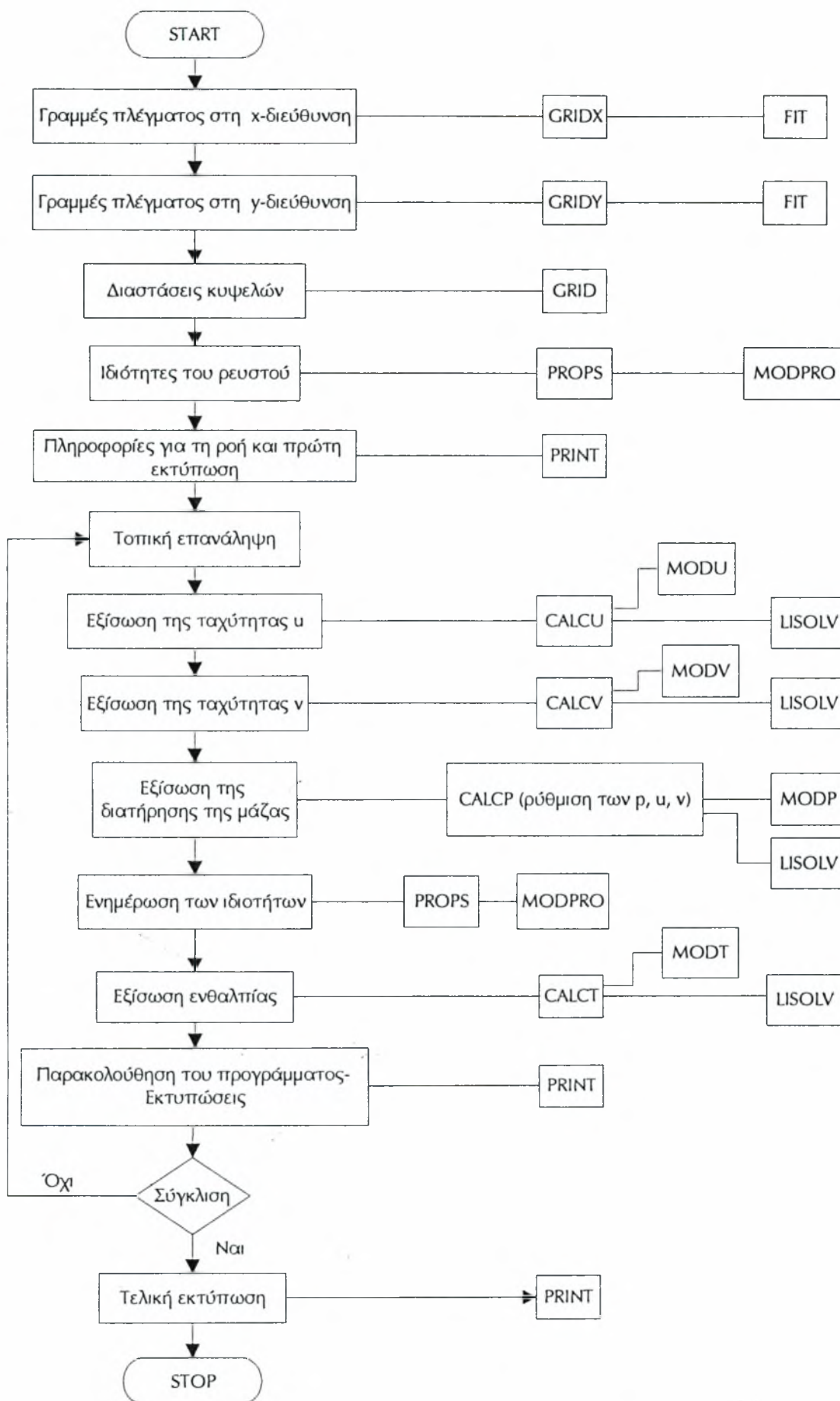
Η κύρια ρουτίνα του προγράμματος, που ονομάζεται CONTRO, δρα σαν ρουτίνα ελέγχου όλου του προγράμματος. Ελέγχει την εκτέλεση λαμβάνοντας δεδομένα από υπορουτίνες ή καλώντας άλλες για την υλοποίηση συγκεκριμένων καθηκόντων. Η ροή εκτέλεσης του προγράμματος δίνεται περιληπτικά στο σχήμα 10.

Η κύρια ρουτίνα και οι υπορουτίνες οργανώθηκαν σε υποκεφάλαια με σκοπό την καλύτερη κατανόηση.

Η λειτουργία της κύριας ρουτίνας μπορεί να συνοψιστεί στα εξής:

- Chapter 0 : Όλα τα απαραίτητα δεδομένα λαμβάνονται μέσω του common block και του αρχείου GLASS.DAT. Για παράδειγμα, το σύστημα συντεταγμένων, οι ιδιότητες του ρευστού, το είδος της εξεταζόμενης ροής και οι οριακές και αρχικές συνθήκες καθορίζονται εδώ. Τα υπόλοιπα σταθερά δεδομένα του προγράμματος δίνονται στην υπορουτίνα BLOCK DATA.

- Chapter 1 : Καταρχήν ανοίγονται αρχεία για την αποθήκευση αποτελεσμάτων διαφόρων μεγεθών της ροής, που είναι τα διανύσματα ταχυτήτων (VECTOR.DAT), η πίεση (PRESSURE.DAT), η θερμοκρασία (TEMPERAT.DAT), το ιξώδες (VISCOSIT.DAT), ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (THERCONDUC.DAT), η ειδική θερμότητα (SPEHEAT.DAT), ο αριθμός Prandtl (PRANDTL.DAT) και η ροϊκή συνάρτηση (STREAM.DAT). Επίσης ανοίγεται ένα αρχείο (RESIDUAL.DAT), όπου αποθηκεύονται οι υπολειμματικές τιμές των εξισώσεων των ταχυτήτων  $u$  και  $v$ , της πίεσης και της θερμοκρασίας σε συνάρτηση του αριθμού επαναλήψεων. Έπειτα, μέσω της υπορουτίνας GRIDX και GRIDY, γίνεται μια ειδική διάταξη του πλέγματος στην  $x$  και στην  $y$  - διεύθυνση αντίστοιχα, για να ληφθεί υπόψη το εμπόδιο στη ροή. Επίσης, ορίζονται οι αποστάσεις πλέγματος στην  $x$  και στην  $y$  - διεύθυνση και οι διάφοροι δείκτες παρακολούθησης.



Σχήμα 10 : Το λογικό διάγραμμα ροής του προγράμματος GLASS

- Chapter 2 : Καλώντας την υπορουτίνα GRID γίνεται μια εκτίμηση των διαστάσεων των κυψελών και των σχετικών γεωμετρικών ποσοτήτων. Έπειτα καθορίζονται οι αρχικές συνθήκες του πεδίου, βασισμένες σε πληροφορίες για τη συμπεριφορά της ροής, όπως η ταχύτητα και η θερμοκρασία εισόδου, οι θερμοκρασίες στα σύνορα της ροής και μέσα στο εμπόδιο και ακόμη, οι ταχύτητες μέσα στο εμπόδιο (που είναι μηδέν) και οι ταχύτητες στον πυθμένα της λεκάνης (που επίσης είναι μηδέν). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ιδιότητες του ρευστού καλώντας την υπορουτίνα PROPS. Μετά υπολογίζονται ονομαστικές τιμές του ιξώδους, του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, της ειδικής θερμότητας, καθώς και του αριθμού Reynolds και του αριθμού Prandtl. Τέλος γίνεται μια αρχική εκτύπωση στην οθόνη όλων των πληροφοριών, που αφορούν τα χαρακτηριστικά της ροής, των ιδιοτήτων της ροής και των αρχικών τιμών των μεταβλητών της ροής.

- Chapter 3 : Στο παρόν πρόβλημα, οι βασικές μεταβλητές είναι οι ταχύτητες  $u$  και  $v$ , η πίεση και η θερμοκρασία. Μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, τα πεδία ροής ανανεώνονται με τη σειρά, λύνοντας τις αντίστοιχες εξισώσεις που τα περιγράφουν. Έτσι, καλώντας την υπορουτίνα CALCU, λύνεται η εξίσωση της ταχύτητας  $u$ . Το ίδιο γίνεται και για την εξίσωση της ταχύτητας  $v$ , καλώντας την υπορουτίνα CALCV. Έπειτα, γίνεται ο έλεγχος της τοπικής συνέχειας με την επίλυση της εξίσωσης διατήρησης της μάζας καλώντας την υπορουτίνα CALCP. Επομένως, διορθώνονται η πίεση και οι ταχύτητες  $u$  και  $v$ . Στη συνέχεια μπορεί να λυθεί η εξίσωση της ενθαλπίας καλώντας την υπορουτίνα CALCT. Μετά πραγματοποιούμε μια ρύθμιση των τιμών του ιξώδους, της πυκνότητας, της ειδικής θερμότητας και της θερμικής αγωγιμότητας, αφού μεταβάλλονται με την θερμοκρασία, καλώντας την υπορουτίνα PROPS. Στη συνέχεια ο τρέχων αριθμός επανάληψης και οι υπολειμματικές πηγές τυπώνονται μέσα στο αρχείο RESIDUAL.DAT. Για την παρακολούθηση της διαδικασίας τυπώνονται και στην οθόνη μαζί με τις τιμές των μεταβλητών της ροής σε ένα επιλεγμένο σημείο της, που συγκλίνει δυσκολότερα και που συνήθως βρίσκεται κοντά στο εμπόδιο. Τέλος, αν θέλουμε, γίνονται και ενδιάμεσες εκτυπώσεις των βασικών μεταβλητών στην οθόνη, χρησιμοποιώντας την υπορουτίνα PRINT.

- Chapter 4 : Μετά από κάθε κλίση των υπορρουτίνων CALCU, CALCV, CALCP και CALCT, σχηματίζουμε το άθροισμα των απόλυτων των υπολειμματικών πηγών και γίνεται έλεγχος ως προς τη σύγκλιση. Αν η λύση δεν έχει συγκλίνει, η διαδικασία των επαναλήψεων συνεχίζεται, ενώ, αν έχει επιτευχθεί σύγκλιση, γίνεται η τελική εκτύπωση στην οθόνη όλων των τιμών των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν, καλώντας την υπορρουτίνα PRINT.
- Chapter 5 : Εδώ γίνεται ο υπολογισμός των διανυσμάτων των ταχυτήτων και της ροϊκής συνάρτησης.
- Chapter 6 : Τα αποτελέσματα των πεδίων των διανυσμάτων των ταχυτήτων, της πίεσης, της θερμοκρασίας, του ιξώδους, του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, της ειδικής θερμότητας, του αριθμού Prandtl και της ροϊκής συνάρτησης αποθηκεύονται στα αντίστοιχα αρχεία προς επεξεργασία και η διαδικασία τελειώνει.

## 5.2 Οι υπορρουτίνες του προγράμματος

Οι υπορρουτίνες του προγράμματος και ο βασικός τους σκοπός δίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Υπορρουτίνα	Σκοπός
FIT	Προσαρμογή $n$ διαστελλόμενων / συστελλόμενων γραμμών σε ένα μήκος $l_m$
GRIDX	Προσαρμογή γραμμών πλέγματος στη $x$ - διεύθυνση (για εμπόδια)
GRIDY	Προσαρμογή γραμμών πλέγματος στη $y$ - διεύθυνση (για εμπόδια)
GRID	Εκτίμηση διαστάσεων των κυψελών
PROPS	Υπολογισμός των ιδιοτήτων του ρευστού
CALCU	Συλλογή των συντελεστών των εξισώσεων της ταχύτητας $u$
CALCV	Συλλογή των συντελεστών των εξισώσεων της ταχύτητας $v$
CALCP	Συλλογή των συντελεστών των εξισώσεων της διόρθωσης τη πίεσης και των ταχυτήτων $u$ και $v$
CALCT	Συλλογή των συντελεστών των εξισώσεων της θερμοκρασίας
LISOLV	Επίλυση των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών (TDMA)
PRINT	Εκτύπωση των τιμών του πεδίου

Υπορουτίνα	Σκοπός
PROMOD	Τροποποίηση των συντελεστών για τον χειρισμό των συνόρων
BLOCK DATA	Παροχή δεδομένων

Πιο αναλυτικά οι υπορουτίνες αυτές εκπληρώνουν τα εξής καθήκοντα :

#### FIT

Καλείται μέσα στις υπορουτίνες GRIDX και GRIDY για να προσαρμόσει  $n$  διαστελλόμενες / συστελλόμενες γραμμές πλέγματος σε ένα μήκος  $l_m$ .

#### GRIDX

Η υπορουτίνα αυτή καλείται για να δημιουργήσει ένα πλέγμα που διαστέλλεται ή συστέλλεται στη  $x$  - διεύθυνση, ώστε να μπορούμε να χειριστούμε απότομες κλίσεις στις ιδιότητες της ροής και των ρευστών, όπως συμβαίνει κοντά σε εμπόδια.

#### GRIDY

Αυτή η υπορουτίνα πραγματοποιεί ό,τι ακριβώς και η GRIDX, αλλά για την  $y$  - διεύθυνση.

#### GRID

Καλείται από την κύρια ρουτίνα του προγράμματος και έχει στόχο την εκτίμηση των διαστάσεων των κυψελών των ταχυτήτων  $u$  και  $v$ , της πίεσης και της θερμοκρασίας και των γεωμετρικών ποσοτήτων, που σχετίζονται με τις κυψέλες αυτές.

#### PROPS

Σ' αυτήν την υπορουτίνα, που καλείται απ' την κύρια ρουτίνα CONTRO, υπολογίζονται οι ιδιότητες του ρευστού, που είναι το ιξώδες, η πυκνότητα, η ειδική θερμότητα, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ο συντελεστής θερμικής εναλλαγής (συντελεστής διάχυσης) και ο αριθμός Prandtl.

Καλώντας την θέση εισαγωγής MODPRO στην υπορουτίνα PROMOD, υπολογίζονται οι τιμές του ιξώδους στα όρια.

## CALCU

Στην υπορουτίνα CALCU, που κι αυτή είναι οργανωμένη σε κεφάλαια, γίνεται η συλλογή των συντελεστών της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών της ταχύτητας  $u$ , η τροποποίηση τους για το χειρισμό των οριακών συνθηκών και τέλος η επίλυση των εξισώσεων για να πάρουμε τις ενημερωμένες τιμές του πεδίου ταχυτήτων  $u$ .

- Chapter 0 : Τα απαιτούμενα δεδομένα μεταφέρονται μέσω του common block και κατά συνέπεια οι συντελεστές υπολογίζονται με τις τιμές του πεδίου της προηγούμενης επανάληψης.
- Chapter 1 : Γίνεται εκτίμηση των συντελεστών στο κεφάλαιο αυτό.
- Chapter 2 : Οι συντελεστές τροποποιούνται για το χειρισμό των οριακών συνθηκών. Αυτό επιτυγχάνεται καλώντας την θέση εισαγωγής MODU στην υπορουτίνα PROMOD.
- Chapter 3 : Οι συντελεστές συλλέγονται και παίρνουν μια τελική μορφή, κατάλληλη για την εφαρμογή του αλγορίθμου TDMA. Σ' αυτό το στάδιο γίνεται υποχαλάρωση του πεδίου λύσεων.
- Chapter 4 : Τέλος, καλώντας την υπορουτίνα LISOLV, παίρνουμε τη λύση της εξίσωσης της ταχύτητας  $u$ , χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο TDMA.

## CALCV

Η δομή της υπορουτίνας αυτής είναι ίδια με αυτήν της CALCU. Παρ' όλα αυτά, η υπορουτίνα CALCV, που αναφέρεται στην εξίσωση της ταχύτητας  $v$ , χρησιμοποιεί διαφορετικά γεωμετρικά μεγέθη εξαιτίας της διαφορετικής διάταξης των κυψελών  $u$  και  $v$ .

## CALCP

Η υπορουτίνα CALCP ενσωματώνει τη ρύθμιση των συνιστωσών της πίεσης και των ταχυτήτων  $u$  και  $v$  μέσω της εξίσωσης της διατήρησης της μάζας. Η δομή της είναι βασικά ίδια με αυτήν της CALCU, αλλά τα γεωμετρικά μεγέθη είναι διαφορετικά, λόγω των διαφορών στις υπολογιστικές κυψέλες.

Αφού έχουν γίνει οι διορθώσεις της πίεσης μέχρι το Chapter 3, πραγματοποιείται και η ενημέρωση της πίεσης και των ταχυτήτων  $u$  και  $v$  στο Chapter 4.



## CALCT

Έχει την ίδια δομή όπως η CALCU, αλλά παρόμοια γεωμετρικά μεγέθη με την CALCP εξαιτίας της ομοιότητας των κυψελών  $p'$  και  $T$ .

## LISOLV

Σ' αυτήν την υπορουτίνα υλοποιείται η επίλυση της εξίσωσης υπό τη μορφή πίνακα με εφαρμογή του αλγορίθμου TDMA. Πραγματοποιούνται δύο σαρώσεις του πεδίου, μια από το δυτικό στο ανατολικό όριο και η άλλη από το βόρειο στο νότιο όριο. Από τον τρόπο που λαμβάνεται η λύση των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών, μπορεί να συμβεί να μην είναι επαρκής μια σάρωση για να έχουμε ακριβή λύση. Αυτό αληθεύει κυρίως για λεπτά πλέγματα και είναι πιθανόν η LISOLV να καλείται περισσότερες φορές μέσα στην ίδια επανάληψη.

## PRINT

Καλώντας την υπορουτίνα αυτή παίρνουμε μια εκτύπωση των τιμών του πεδίου μιας ιδιότητας του ρευστού. Μπορούν, δηλαδή, να εκτυπωθούν οι ταχύτητες  $u$  και  $v$ , η πίεση, η θερμοκρασία, η πυκνότητα, το ιξώδες, κ.λ.π.

## PROMOD

Ο κύριος σκοπός της υπορουτίνας αυτής, που κι αυτή είναι οργανωμένη σε κεφάλαια (ή θέσεις εισαγωγής), είναι να τροποποιήσει τις ιδιότητες του ρευστού, τις μεταβλητές ροής και τους συντελεστές των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών για το χειρισμό των οριακών συνθηκών. Η κάθε θέση εισαγωγής παρουσιάζεται αναλυτικότερα παρακάτω.

- MODPRO

Το ιξώδες τροποποιείται για να λάβει υπόψη τα όρια της ροής. Αυτή καλείται από την υπορουτίνα PROPS.

- MODU

Οι συντελεστές της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών της ταχύτητας  $u$  τροποποιούνται ανάλογα με τις πληροφορίες από τα όρια της ροής. Για παράδειγμα, η διατμητική τάση στο τοίχωμα των εμποδίων μπορεί να υπολογισθεί και να ενσωματωθεί στον πηγαίο όρο. Παρόμοια οι ταχύτητες θέτονται μηδέν μέσα στο εμπόδιο.

- MODV

Λειτουργεί όπως η MODU, αλλά για τις εξισώσεις της ταχύτητας  $v$ .

- MODP

Για λόγους εκτύπωσης, η πίεση μπορεί να τεθεί μηδέν.

- MODT

Λειτουργεί όπως η MODU, μόνο που τώρα υπολογίζεται η ροή θερμότητας από το τοίχωμα και ενσωματώνεται στους πηγαίους όρους.

## BLOCK DATA

Χρησιμοποιείται για τον εφοδιασμό των παρακάτω πληροφοριών:

- Λογικές μεταβλητές των χαρακτηριστικών της ροής προς υπολογισμό
- Λογικές μεταβλητές παρακολούθησης
- Επικεφαλίδες εκτύπωσης των πεδίων των μεταβλητών της ροής
- Μέγιστος αριθμός γραμμών πλέγματος
- Σταθερές του προγράμματος
- Συντελεστές υποχαλάρωσης
- Αρχικές τιμές των πεδίων των μεταβλητών της ροής

### 5.3 Οι χρησιμοποιούμενες μεταβλητές του προγράμματος

Για να εξοικειωθούμε με τις διάφορες μεταβλητές της γλώσσας προγραμματισμού Fortran, που εμφανίζονται στο πρόγραμμα, παραθέτουμε έναν πίνακα μαζί με μια σύντομη περιγραφή :

Όνομα μεταβλητής	Σημασία
AE(I,J), AN(I,J), AP(I,J), AS(I,J), AN(I,J)	Συντελεστές των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών
AAK, BAK	Συντελεστές της εξίσωσης, που συνδέει το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία
AK(I,J)	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του ρευστού
CONDUC	Ονομαστικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του

Όνομα μεταβλητής	Σημασία
	ρευστού
CPF(I,J)	Ειδική θερμότητα του ρευστού
ACPF, BCPF	Συντελεστές της εξίσωσης, που συνδέει την ειδική θερμότητα με τη θερμοκρασία
AVIS, BVIS	Συντελεστές της εξίσωσης, που συνδέει το ιξώδες με τη θερμοκρασία
DEN(I,J)	Πυκνότητα του ρευστού
DENSIT	Πυκνότητα αναφοράς του ρευστού
DU(I,J), DV(I,J)	Συντελεστές της πίεσης για τις ταχύτητες $u$ και $v$ αντίστοιχα
DXEP(I), DXPW(I)	Αποστάσεις μεταξύ του κόμβου $P$ και των κόμβων $E$ και $W$ του πλέγματος, αντίστοιχα
DXEPU(I), DXPWU(I)	Αποστάσεις μεταξύ της θέσης της ταχύτητας $u$ στο $P$ και στο $E$ και $W$ , αντίστοιχα
DXI,DXO	Αποστάσεις μεταξύ των γραμμών του πλέγματος στην $x$ - διεύθυνση στο τμήμα εισόδου (αριστερό) και εξόδου (δεξιό) του πεδίου ροής, αντίστοιχα
DYNP(J), DYPS(J)	Αποστάσεις μεταξύ του κόμβου $P$ και των κόμβων $N$ και $S$ του πλέγματος, αντίστοιχα
DYNPV(J), DYPSV(J)	Αποστάσεις μεταξύ της θέσης της ταχύτητας $v$ στο $P$ και στο $N$ και $S$ , αντίστοιχα
DYI,DYO	Αποστάσεις μεταξύ των γραμμών του πλέγματος στην $y$ - διεύθυνση στο άνω και κάτω τμήμα του πεδίου ροής, αντίστοιχα
FLOWIN	Ροή μάζας του ρευστού
GAMH(I,J)	Συντελεστής διάχυσης του ρευστού
GREAT	Μεγάλη ποσότητα, που χρησιμοποιείται εσωτερικά στο πρόγραμμα, π.χ $10^{30}$
HEDAK, HEDCPF, HEDDEN, HEDGAM,	Αλφαριθμητικές συστοιχίες που περιέχουν τις επικεφαλίδες για τα πεδία του συντελεστή θερμικής

Όνομα μεταβλητής	Σημασία
HEDP, HEDPRA, HEDT, HEDU, HEDV, HEDVIS	αγωγιμότητας, της ειδικής θερμότητας, της πυκνότητας, του συντελεστή διάχυσης, της πίεσης, του αριθμού Prandtl, της θερμοκρασίας, της ταχύτητας $u$ , της ταχύτητας $v$ και του ιξώδους, αντίστοιχα
HYDIAM	Υδραυλική διάμετρος
I	Δείκτης της $i$ διαχωριστικής γραμμής του πλέγματος στον άξονα $x$
IMON	Δείκτης της διαχωριστικής γραμμής στον άξονα $x$ του κόμβου, που παρακολουθούμε
INAK, INCALP, INCALT, INCALU, INCALV, INCPF, INDEN, INGAM, INPRA, INVIS	Λογικοί δείκτες που επιτρέπουν τον υπολογισμό των πεδίων του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, της πίεσης, της θερμοκρασίας, της ταχύτητας $u$ , της ταχύτητας $v$ , της ειδικής θερμότητας, της πυκνότητας, του συντελεστή διάχυσης, του αριθμού Prandtl και του ιξώδους, αντίστοιχα Π.χ. Αν INCALU=.FALSE., η εξίσωση της ταχύτητας $u$ δεν θα λυθεί. Αν INCALU=.TRUE., η εξίσωση θα λυθεί (το πεδίο των ταχυτήτων $u$ θα ενημερωθεί).
INDCOS	Δείκτης για το χρησιμοποιούμενο σύστημα συντεταγμένων Αν INDCOS=1, έχουμε καρτεσιανές συντεταγμένες. Αν INDCOS=2, έχουμε κυλινδρικές συντεταγμένες.
INDMON	Αριθμός επαναλήψεων μεταξύ εκτυπώσεων των μεταβλητών, που παρακολουθούμε
INDPRI	Αριθμός επαναλήψεων μεταξύ εκτυπώσεων των μεταβλητών του πεδίου ροής
IPREF	Δείκτης της διαχωριστικής γραμμής στον άξονα $x$ του κόμβου αναφοράς της πίεσης
ISTEP	Τελευταία διαχωριστική γραμμή στον άξονα $x$ πριν από εμπόδιο

Όνομα μεταβλητής	Σημασία
ISTEPP	Εσωτερική μεταβλητή του προγράμματος, που ορίζεται ως : $ISTEPP = ISTEP + 1$
IT	Μέγιστος αριθμός διαχωριστικών γραμμών στον άξονα x
J	Δείκτης της j διαχωριστικής γραμμής του πλέγματος στον άξονα y
JMON	Δείκτης της διαχωριστικής γραμμής στον άξονα y του κόμβου, που παρακολουθούμε
JPREF	Δείκτης της διαχωριστικής γραμμής στον άξονα y του κόμβου αναφοράς της πίεσης
JSTEP	Τελευταία διαχωριστική γραμμή στον άξονα y πριν από εμπόδιο
JSTEPP	Εσωτερική μεταβλητή του προγράμματος, που ορίζεται ως : $JSTEPP = JSTEP + 1$
JT	Μέγιστος αριθμός διαχωριστικών γραμμών στον άξονα y
MAXIT	Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων
NI, NJ	Αριθμός των διαχωριστικών γραμμών στον άξονα x και y, αντίστοιχα
NIM1, NJM1	Εσωτερικές μεταβλητές, που είναι: $NIM1 = NI - 1$ και $NJM1 = NJ - 1$
NSWPP, NSWPT, NSWPU, NSWPV	Αριθμοί που δείχνουν, πόσες φορές καλούμε την υπορουτίνα LISOLV για τις εξισώσεις της μάζας, της θερμοκρασίας και των ταχυτήτων u και v, αντίστοιχα
NUMMON	Αριθμός εκτυπώσεων των τιμών στον κόμβο, που παρακολουθούμε
NUMPRI	Αριθμός εκτυπώσεων των τιμών του πεδίου ροής
NXI, NXO	Αριθμός διαχωριστικών γραμμών στον άξονα x κατά μήκος της εισόδου (αριστερό τμήμα) και της εξόδου (δεξί τμήμα) του πεδίου ροής, αντίστοιχα
NYI, NYO	Αριθμός διαχωριστικών γραμμών στον άξονα y κατά μήκος του άνω και του κάτω τμήματος του πεδίου ροής,

Όνομα μεταβλητής	Σημασία
	αντίστοιχα
P(I,J)	Στατική πίεση του ρευστού
PP(I,J)	Διόρθωση της πίεσης
PRAN(I,J)	Αριθμός Prandtl
PRANDT	Ονομαστικός αριθμός Prandtl
PREF	Πίεση αναφοράς του ρευστού
RE	Αριθμός Reynolds
RESORM, RESORT, RESORU, RESORV	Αθροίσματα των απόλυτων των υπολειμματικών πηγών των εξισώσεων της διόρθωσης της πίεσης, της θερμοκρασίας, της ταχύτητας $u$ και της ταχύτητας $v$ , αντίστοιχα.
SEW(I), SEWU(I)	Διαστάσεις των κυψελών $\rho'$ ή $\varphi$ και $u$ στη $x$ - διεύθυνση, αντίστοιχα
SMALL	Μικρή ποσότητα που χρησιμοποιείται εσωτερικά στο πρόγραμμα, π.χ. $10^{-30}$
SORMAX	Μέγιστη επιτρεπόμενη αδιαστατοποιημένη υπολειμματική πηγή (χρησιμοποιείται για τον έλεγχο σύγκλισης)
SP(I,J), SU(I,J)	Συντελεστές του πηγαίου όρου
SPHEAT	Ονομαστική ειδική θερμότητα του ρευστού
T(I,J)	Θερμοκρασία του ρευστού
TIN	Θερμοκρασία εισόδου του ρευστού
TWALL	Θερμοκρασία τοιχώματος
TOBS	Θερμοκρασία του εμποδίου
TFREE	Θερμοκρασία της ελεύθερης επιφάνειας (βόρειο σύνορο) του πεδίου ροής
U(I,J)	Συνιστώσα $u$ της ταχύτητας
UIN	Μέση ταχύτητα εισόδου του ρευστού
URFP, URFT, URFU,	Συντελεστές υποχαλάρωσης για τα πεδία διόρθωσης της



Όνομα μεταβλητής	Σημασία
URFV, URFVIS	πίεσης, της θερμοκρασίας, της ταχύτητας $u$ , της ταχύτητας $v$ και του ιξώδους, αντίστοιχα
V(I,J)	Συνιστώσα $v$ της ταχύτητας
VIS(I,J)	Ιξώδες του ρευστού
VISCOS	Ονομαστικό ιξώδες του ρευστού
WFE(I), WFW(I)	Συντελεστές βαρύτητας της ταχύτητας $u$ στις ανατολικές και δυτικές πλευρές των κυψελών $u$ , αντίστοιχα
WFN(J), WFS(J)	Συντελεστές βαρύτητας της ταχύτητας $v$ στις βόρειες και δυτικές πλευρές των κυψελών $v$ , αντίστοιχα
X(I), XU(I)	Συνιστώσα $x$ της $i$ διαχωριστικής γραμμής και της θέσης της ταχύτητας $u$ , αντίστοιχα
XIN, XOUT	Μήκη εισόδου και εξόδου του πεδίου ροής, αντίστοιχα
XTOT	Συνολικό μήκος του πεδίου ροής στην $x$ - διεύθυνση
Y(J), YV(J)	Συνιστώσα $y$ της $j$ διαχωριστικής γραμμής και της θέσης της ταχύτητας $v$ , αντίστοιχα
YIN,YOUT	Μήκη του άνω και του κάτω τμήματος του πεδίου ροής, αντίστοιχα
YTOT	Συνολικό μήκος του πεδίου ροής στην $y$ - διεύθυνση

## 6. Εφαρμογή της Διαδικασίας Επίλυσης στη Μελέτη Διαφόρων Ροών

### 6.1 Ιδιότητες του γυαλιού

Η πυκνότητα του γυαλιού δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, είναι σταθερή και ίση με  $2510 \frac{kg}{m^3}$ .

Το ιξώδες ενός τήγματος που σχηματίζει γυαλί και η μεταβολή του είναι τεράστιας σημασίας για την υαλουργία. Η αλλαγή στο ιξώδες με την θερμοκρασία είναι πολύ μεγάλη και συχνά καταγράφεται ως  $\log \mu$ . Τιμές του ιξώδους σε διάφορες συνθήκες δίνονται στον παρακάτω πίνακα :

Κατάσταση	Θερμοκρασία (°C)	Δεκαδικός λογάριθμος ιξώδους $\log \mu \left( \frac{N s}{m^2} \right)$
Ανόπτηση	544	12.4
Σημείο ελαστικότητας	728	6.6
Σημείο ροής	915	4
Κατεργασία	1030	3
Στάγμα	1198	2
Τήγμα	1465	1

Το ιξώδες στην τροφοδοσία είναι 10 προς 100 φορές μεγαλύτερο από ότι είναι στο τέλος της τήξης και όταν το γυαλί αποβάλλεται έτοιμο λίγα δευτερόλεπτα αργότερα, το ιξώδες του είναι 100000 φορές μεγαλύτερο από ότι στο τέλος της τήξης. Η μεταβολή στο ιξώδες με τη θερμοκρασία για κάποια υγρά, συμπεριλαμβανομένου και του λιωμένου γυαλιού, μπορεί να εκφραστεί από την εμπειρική έκφραση γνωστή στη βιβλιογραφία σαν εξίσωση Fulcher:

$$\mu = A \exp \left[ \frac{B}{T - T_0} \right]$$

όπου  $A$ ,  $B$  και  $T_0$  είναι σταθερές και  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία. Η ευκολία με την οποία ένα γυαλί μπορεί να κατεργαστεί σε ποικιλία μορφών εξαρτάται από τις θερμοκρασίες ελαχίστου και μεγίστου ιξώδους, με τις οποίες αυτό μορφοποιείται.

Συνήθως όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή αυτή θερμοκρασίας τόσο πιο αρεστό είναι στους υαλουργούς το γυαλί. Αυτά τα γυαλιά αποκαλούνται “γλυκά” ή “μαλακά”. Άλλα γυαλιά που μορφοποιούνται πιο γρήγορα αποκαλούνται “σκληρά”.

Χρησιμοποιώντας προσαρμογή εκθετικής καμπύλης για να βρούμε τη σχέση που συνδέει το ιξώδες με τη θερμοκρασία παίρνουμε:

$$\mu = 3.662 \cdot 10^7 \cdot \exp[-1.041 \cdot 10^{-2} \cdot T]$$

Η σχέση αυτή παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 11.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του γυαλιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία δίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Θερμοκρασία (°C)	Θερμική αγωγιμότητα $k \left( \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$
200	1.04
300	1.13
400	1.21
500	1.38
600	1.54
700	1.59
800	1.71
900	2.09
1000	2.21
1100	2.47
1200	2.72

Με προσαρμογή εκθετικής καμπύλης βρίσκουμε τη σχέση μεταξύ συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και θερμοκρασίας, που είναι:

$$k = 8.389 \cdot 10^{-1} \cdot \exp[9.706 \cdot 10^{-4} \cdot T]$$

Η γραφική παράσταση της σχέσης αυτής δίνεται στο σχήμα 12.

Η μεταβολή της ειδικής θερμότητας του γυαλιού με τη θερμοκρασία παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Θερμοκρασία (°C)	Ειδική θερμότητα $c_p \left( \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right)$
60	870.9

Θερμοκρασία (°C)	Ειδική θερμότητα $c_p \left( \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right)$
160	937.89
260	1004.88
360	1071.87
510	1143.05
660	1205.86

Χρησιμοποιώντας προσαρμογή εκθετικής καμπύλης, υπολογίζουμε τη σχέση που δίνει την ειδική θερμότητα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, η οποία είναι η εξής:

$$c_p = 8.612 \cdot 10^2 \cdot \exp[5.421 \cdot 10^{-4} \cdot T]$$

Το σχήμα 13 παριστά γραφικά τη σχέση αυτή.

## 6.2 Γενική περιγραφή και χαρακτηριστικά του πεδίου ροής

Το πεδίο ροής που εξετάζουμε είναι ένα τμήμα της λεκάνης τήξεως του υαλουργικού κλιβάνου και συγκεκριμένα είναι το τμήμα μετά την τροφοδοσία του μίγματος μέχρι το τέλος της διώρυγας (εμπόδιο), που το γυαλί οδεύει πλέον στη λεκάνη εργασίας.

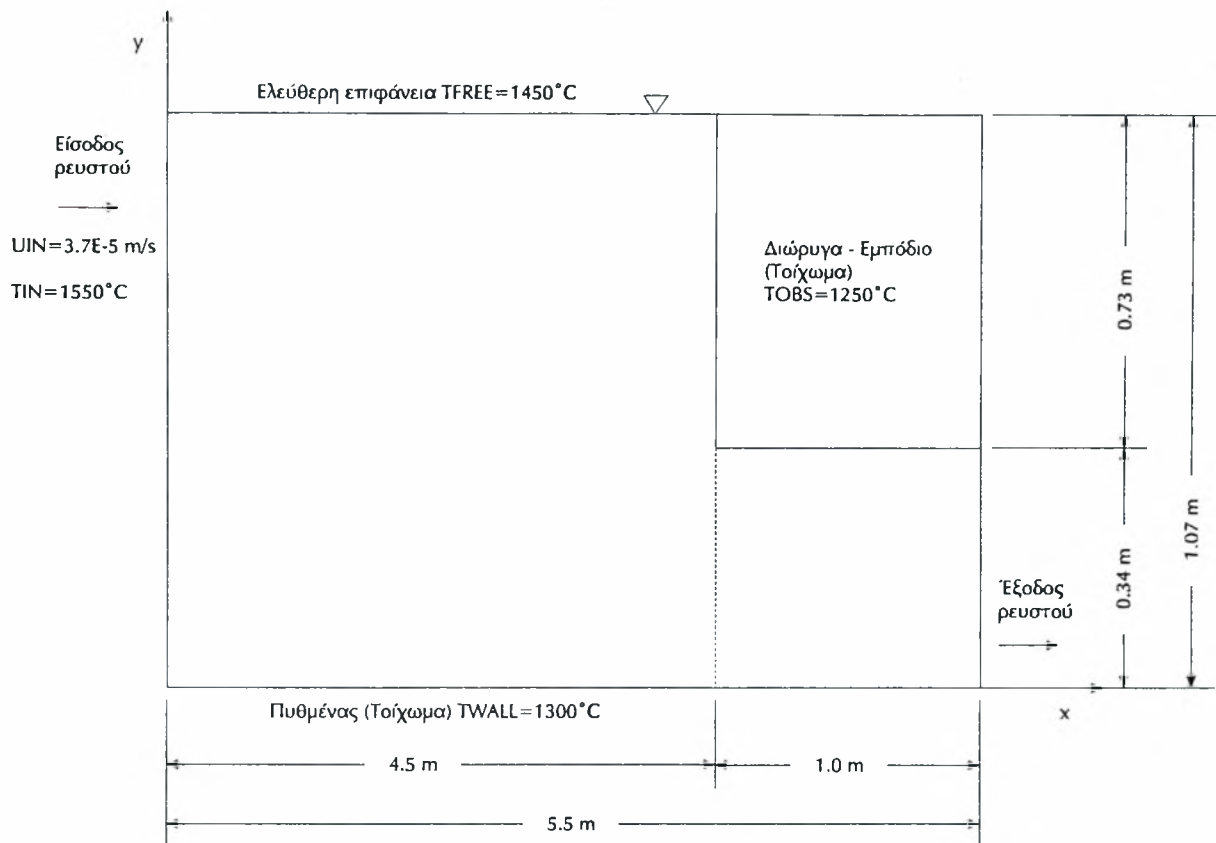
Το τμήμα εισόδου έχει μήκος 4.5 m ως την αρχή της διώρυγας και συνολικό μήκος 5.5 m, που σημαίνει πως η διώρυγα έχει μήκος 1 m. Το συνολικό ύψος είναι 1.07 m, που είναι το ύψος του λουτρού του τηγμένου γυαλιού. Το ύψος της διώρυγας (άνω τμήμα) είναι 0.73 m, ενώ το κάτω τμήμα έχει ύψος 0.34 m.

Το τηγμένο γυαλί εισέρχεται από τα αριστερά και εξέρχεται από την έξοδο που βρίσκεται δεξιά, κάτω από τη διώρυγα όπως φαίνεται στο σχήμα 14. Η διατομή εισόδου είναι 4.7 m πλάτος επί 1.07 m ύψος, δηλαδή 5.029 m<sup>2</sup>.

Η θερμοκρασία εισόδου του γυαλιού είναι 1550 °C, ο τοίχος - πυθμένας της λεκάνης έχει θερμοκρασία 1300 °C και η ελεύθερη επιφάνεια έχει θερμοκρασία 1450 °C. Η διώρυγα - εμπόδιο έχει θερμοκρασία 1250 °C.

Η τροφοδοσία γυαλιού είναι 40 τόνοι μίγματος / 24 ώρες, που μεταφράζεται

$$\text{σε ροή μάζας: } \dot{m}_{IN} = \frac{40 \cdot 1000}{24 \cdot 60 \cdot 60} \frac{kg}{s} = 0.463 \frac{kg}{s}.$$



Σχήμα 14 : Το πεδίο ροής

Αν διαιρέσουμε με την πυκνότητα, υπολογίζεται η ροή όγκου, που είναι:

$$\dot{Q}_{IN} = \frac{\dot{m}_{IN}}{\rho} = \frac{0.463 \frac{kg}{s}}{2510 \frac{kg}{m^3}} = 184 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Στη συνέχεια, αν διαιρέσουμε με την επιφάνεια διατομής, παίρνουμε την ταχύτητα εισόδου του γυαλιού, η οποία είναι:

$$v_{IN} = \frac{\dot{Q}_{IN}}{A} = \frac{184 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{5.029 m^2} = 3.7 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$$

Ο αριθμός Reynolds για μια μέση θερμοκρασία 1400 °C, όπου το ιξώδες του γυαλιού έχει τιμή  $17.226 \frac{Ns}{m^2}$  και παίρνοντας σαν χαρακτηριστικό μήκος το συνολικό ύψος, που είναι 1.07 m, υπολογίζεται :

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{IN} \cdot x}{\mu} = \frac{2510 \frac{kg}{m^3} \cdot 3.7 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s} \cdot 1.07 m}{17.226 \frac{Ns}{m^2}} = 5.77 \cdot 10^{-3}$$

Αυτό δείχνει πως η ροή δεν είναι στρωτή, αλλά "νηματώδης".

Ενδεικτικά, υπολογίζουμε και τον αριθμό Prandtl για την ίδια μέση θερμοκρασία 1400 °C, όπου ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του γυαλιού είναι  $3.265 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$  και η ειδική θερμότητα του γυαλιού είναι  $1839.533 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$  :

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} = \frac{17.226 \frac{Ns}{m^2} \cdot 1839.533 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C}}{3.265 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 9705.295$$

Επίσης, αναφέρουμε ότι εξετάζουμε λευκό γυαλί φιαλών με κ.β. σύσταση: SiO<sub>2</sub> 72%, Na<sub>2</sub>O 14%, CaO 9%, MgO 2.2%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2%, BaO 0.45%, SO<sub>3</sub> 0.3% και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.05%.

### 6.3. Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του προγράμματος

Στην αρχή, το πρόγραμμα μας δίνει πληροφορίες για την ροή που εξετάζουμε, όπως το μέγεθος πλέγματος, οι διαστάσεις του πεδίου ροής, οι ιδιότητες του ρευστού στην είσοδο και οι θερμοκρασίες στον πυθμένα, στην ελεύθερη επιφάνεια και στο εμπόδιο της ροής.

Στη συνέχεια γίνεται η αρχική εκτύπωση, όπου εκτυπώνονται όλα τα πεδία των μεταβλητών της ροής : ταχύτητες  $u$  και  $v$ , πίεση, θερμοκρασία, ιξώδες, συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ειδική θερμότητα, αριθμός Prandtl, συντελεστής θερμικής εναλλαγής, εκτός της πυκνότητας, που είναι σταθερή για το γυαλί.

Η εκτύπωση των μεταβλητών γίνεται υπό μορφή πίνακα, δηλαδή στις στήλες δίνονται οι τιμές των μεταβλητών στις γραμμές του πλέγματος κατά τη  $x$  - διεύθυνση και στις γραμμές δίνονται οι τιμές τους στις γραμμές του πλέγματος κατά την  $y$  - διεύθυνση αντίστοιχα. Επίσης δίνονται οι αποστάσεις των γραμμών πλέγματος στην  $x$  και  $y$  - διεύθυνση.

Μετά την αρχική εκτύπωση αρχίζει η καθεαυτού διαδικασία των επαναλήψεων με την εκτύπωση της πορείας της σύγκλισης μέσω των υπολειμματικών τιμών των εξισώσεων των ταχυτήτων  $u$  και  $v$ , της μάζας και της θερμοκρασίας.

Αν το επιθυμούμε, μπορούμε να παίρνουμε και ενδιάμεσες εκτυπώσεις όπου εκτυπώνονται μόνο τα πεδία των βασικών μεταβλητών της ροής (ταχύτητες  $u$  και  $v$ , πίεση και θερμοκρασία).

Για να δούμε κατά πόσο έχει συγκλίνει το πρόβλημά μας παρατηρούμε τις τιμές των υπολειμματικών πηγών των ταχυτήτων  $u$  και  $v$ , της μάζας και της



θερμοκρασίας στην αρχή και στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας. Οι αριθμοί αυτοί πρέπει να έχουν μειωθεί αρκετά και να παλινδρομούν γύρω από μια τιμή ο καθένας, αν το πρόβλημα δεν έχει συγκλίνει τέλεια. Αντίθετα, αν επιτευχθεί σύγκλιση με την επιθυμητή ακρίβεια πριν από το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, η επαναληπτική διαδικασία διακόπτεται και εκτυπώνονται τα αποτελέσματα. Επιπλέον, στο τέλος των επαναλήψεων, το πρόγραμμα μας πληροφορεί για την επιτευχθείσα ακρίβεια, η οποία πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην ακρίβεια που έχουμε εισάγει εμείς.

Στο πέρας της επαναληπτικής διαδικασίας πραγματοποιείται η τελική εκτύπωση, όπου εκτυπώνονται τα πεδία όλων των μεταβλητών και επίσης και το πεδίο της ροϊκής συνάρτησης.

Σε όλες τις εκτυπώσεις (αρχική, ενδιάμεση και τελική) η διώρυγα - εμπόδιο διακρίνεται ως εξής : Στα πεδία ταχυτήτων  $u$  και  $v$  και στο πεδίο πιέσεων έχουμε μηδενικές τιμές, αφού δεν υπάρχει ροή μέσα στο εμπόδιο. Στο πεδίο θερμοκρασιών έχουμε τη σταθερή θερμοκρασία του εμποδίου. Στα πεδία του ιξώδους, του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, της ειδικής θερμότητας, του αριθμού Prandtl και του συντελεστή διάχυσης έχουμε τη σταθερή τιμή των παραπάνω ιδιοτήτων στη θερμοκρασία του εμποδίου, αφού έχουμε θεωρήσει ότι εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία. Στο πεδίο της ροϊκής συνάρτησης έχουμε μια σταθερή τιμή.

Η συνολική διαδικασία εκτέλεσης του προγράμματος και δημιουργίας των γραφικών παραστάσεων περιγράφεται στο παράρτημα Δ.

#### 6.4 Παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων

Στην αρχική επίλυση του προβλήματός μας, θα χρησιμοποιήσουμε μέγιστο αριθμό επαναλήψεων 1000, ακρίβεια  $5 \cdot 10^{-4}$ , και εκτύπωση των υπολειμματικών ποσοτήτων κάθε 5 επαναλήψεις. Δεν θα γίνουν ενδιάμεσες εκτυπώσεις.

Όσον αφορά το πλέγμα θα χρησιμοποιήσουμε αριθμό γραμμών  $x$  στο τμήμα εισόδου  $NXI=6$ , στο τμήμα εξόδου  $NXO=2$ , αριθμό γραμμών  $y$  στο άνω τμήμα  $NYI=4$  και στο κάτω τμήμα  $NYO=4$ , συνεπώς προκύπτει ένα πλέγμα 10 επί 10, αφού  $NI=NXI+NXO+2$  και  $NJ=NYI+NYO+2$ , όπως ορίζεται μέσα στο πρόγραμμα. Το πλέγμα αυτό συστέλλεται όσο πλησιάζουμε το εμπόδιο κατά τη διεύθυνση του άξονα  $x$  και διαστέλλεται στην  $y$  διεύθυνση, όσο πλησιάζουμε το βόρειο (άνω) σύνορο, επειδή στο τμήμα της ροής, το οποίο βρίσκεται κάτω από το εμπόδιο, η ροή αλλάζει και συνεπώς απαιτούνται περισσότερες γραμμές πλέγματος, για να περιγραφεί. Έπειτα από τις πληροφορίες αυτές, το αρχείο εισόδου GLASS.DAT γίνεται:

$$UIN = 3.7 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$$

$$TIN = 1550 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$TWALL = 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$TFREE = 1450 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$TOBS = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$XIN = 4.5 \text{ m}$$

$$XOUT = 1.0 \text{ m}$$

$$NXI = 6$$

$$NXO = 2$$

$$YIN = 0.73 \text{ m}$$

$$YOUT = 0.34 \text{ m}$$

$$NYI = 4$$

$$NYO = 4$$

$$DENSIT = 2510 \frac{kg}{m^3}$$

$$AVIS = 3.662 \cdot 10^7$$

$$BVIS = -1.041 \cdot 10^{-2}$$

$$AAK = 8.389 \cdot 10^{-1}$$

$$BAK = 9.706 \cdot 10^{-4}$$

$$ACPF = 8.612 \cdot 10^2$$

$$BCPF = 5.421 \cdot 10^{-4}$$

$$INDCOS = 1$$

$$MAXIT = 1000$$

$$SORMAX = 5 \cdot 10^{-4}$$

$$INDPRI = 1000$$

$$NUMPRI = 1$$

$$INDMON = 5$$

$$\text{NUMMON} = 1$$

$$\text{NSWPU} = 1$$

$$\text{NSWPV} = 1$$

$$\text{NSWPP} = 2$$

$$\text{NSWPT} = 1$$

Θέτουμε μέγιστο αριθμό γραμμών πλέγματος 50 στον άξονα  $x$  και  $y$ , άρα το μέγιστο μέγεθος πλέγματος γίνεται  $50 \times 50$  και δίνουμε σ' όλα τα πεδία των ιδιοτήτων του ρευστού την αρχική τιμή μηδέν, επειδή, όπως ειπώθηκε νωρίτερα, οι ελλειπτικές ροές δεν απαιτούν οπωσδήποτε υποτιθέμενες τιμές για τον υπολογισμό τους.

Επισημαίνουμε πως ο υπολογιστικός χρόνος για το αυθεντικό πρόβλημα χρησιμοποιώντας πλέγμα  $10$  επί  $10$  ανέρχεται σε  $26$  δευτερόλεπτα σε υπολογιστή με επεξεργαστή  $486/66\text{MHz}$  της Intel™.

Τα αποτελέσματα που δίνει η εκτέλεση του προγράμματος για την περίπτωση αυτή παρουσιάζονται ολοκληρωμένα στο παράρτημα Ε. Οι γραφικές παραστάσεις των υπολειμματικών τιμών των εξισώσεων της ταχύτητας  $u$  (RESU), της ταχύτητας  $v$  (RESV), της μάζας (RESM) και της θερμοκρασίας (REST) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER) παρουσιάζονται στα σχήματα 15 - 18. Επίσης, οι γραφικές παραστάσεις των ιδιοτήτων της ροής που μας ενδιαφέρουν δίνονται στα σχήματα 19 - 23. Όλα τα σχήματα βρίσκονται σε ακόλουθες σελίδες.

Καταρχήν, παρατηρούμε τα διαγράμματα των υπολειμματικών τιμών για να δούμε κατά πόσο έχει συγκλίνει το πρόβλημά μας. Πράγματι και στα τέσσερα διαγράμματα οι υπολογισμοί έχουν συγκλίνει, επειδή κατέρχονται από μια υψηλή τιμή σε μια χαμηλή και παλινδρομώντας γύρω απ' αυτήν. Η παλινδρόμηση αυτή εξηγείται από το γεγονός ότι η ακρίβεια που δίνουμε ( $5 \cdot 10^{-4}$ ) δεν μπορεί να επιτευχθεί εύκολα σε μια ροή με τόσο μικρή ταχύτητα (νηματώδης ροή).

Τη σύγκλιση υποστηρίζουν επίσης και οι τιμές του κόμβου, που παρακολουθούμε κατά τη διάρκεια των επαναληπτικών υπολογισμών και που μένουν σταθεροί από ένα σημείο και πέρα. Η μέση πτώση τάξεως μεγέθους των υπολειμματικών πηγών που επιτυγχάνεται με το πλέγμα  $10 \times 10$  είναι 5.6.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα των διανυσμάτων των ταχυτήτων (σχήμα 19) το τηγμένο γυαλί εισρέει στο εξεταζόμενο πεδίο ροής με ταχύτητα εισόδου UIN στην ελεύθερη επιφάνεια (βόρειο σύνορο) και με ταχύτητα μηδέν στον πυθμένα της λεκάνης (νότιο σύνορο) σχηματίζοντας ένα παραβολικό προφίλ. Η ταχύτητα,

δηλαδή, μειώνεται παραβολικά όσο πλησιάζουμε στον πυθμένα, όπου μηδενίζεται, αφού ο πυθμένας είναι ακίνητος.

Η ροή, όταν φτάσει κοντά στο εμπόδιο, αναγκάζεται να περάσει κάτω απ' αυτό, αφού δεν υπάρχει άλλη δυνατότητα κίνησης και επιταχύνεται, έτσι ώστε να ισχύει η διατήρηση της μάζας. Η ροή στο "κανάλι" κάτω από τη διώρυγα είναι λοιπόν ταχύτερη και παρουσιάζει παραβολικό προφίλ, αφού είναι ροή ανάμεσα σε δύο τοιχώματα (το νότιο τοίχωμα του εμποδίου και ο πυθμένας), που είναι ακίνητα.

Στη σχήμα 20 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της ροϊκής συνάρτησης, που ουσιαστικά είναι οι γραμμές ροής του τηγμένου γυαλιού. Εδώ φαίνεται ακόμη καλύτερα η πορεία της ροής και η θέση του εμποδίου. Επίσης φαίνεται πως το πλέγμα 10x10 είναι κάπως ανεπαρκές για την περιγραφή του προβλήματος, επειδή σε μερικά σημεία οι γραμμές ροής δεν είναι ομαλές. Αυτό διορθώνεται σε πλέγματα μεγαλύτερων διαστάσεων.

Στο επόμενο σχήμα (σχήμα 21) παρίσταται η κατανομή των θερμοκρασιών μέσα στη μάζα του γυαλιού. Όπως φαίνεται το ρευστό χάνει θερμότητα προς την ελεύθερη επιφάνεια, που έχει θερμοκρασία 1450°C, δηλαδή 100°C λιγότερο από τη θερμοκρασία εισόδου των 1550°C και προς τον πυθμένα της λεκάνης, όπου η θερμοκρασία βρίσκεται στους 1300°C.

Το τμήμα της μάζας του ρευστού, που είναι συγκεντρωμένο κοντά στον πυθμένα, στην ελεύθερη επιφάνεια και στο εμπόδιο παρουσιάζει μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές σε σχέση με την κύρια μάζα του ρευστού, επειδή η πτώση της θερμοκρασίας συμβαίνει σε μικρή απόσταση, συνεπώς έχουμε τοπικές συγκεντρώσεις ισοθερμοκρασιακών καμπυλών στα σημεία αυτά. Αντίθετα στο κύριο μέρος της μάζας έχουμε μικρότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, δηλαδή εκεί το ρευστό ψύχεται πιο ομαλά.

Στο σχήμα 22 παρουσιάζεται η κατανομή του ιξώδους στο πεδίο ροής. Αφού το ιξώδες εξαρτάται ισχυρά από τη θερμοκρασία, το σχήμα αυτό παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με το διάγραμμα των θερμοκρασιών. Η μόνη διαφορά συνίσταται στο ότι το ιξώδες στην περιοχή θερμοκρασιών κοντά στους 1500°C έχει πολύ χαμηλή τιμή, που δεν μεταβάλλεται πολύ με τη μεταβολή της θερμοκρασίας και έτσι εξηγείται η μεγάλη περιοχή στο σχήμα, η οποία παρουσιάζει ίδιο ιξώδες.

Στο σχήμα 23 παρίσταται γραφικά η μεταβολή του αριθμού Prandtl. Ο αριθμός αυτός εξαρτάται πολύ από τη θερμοκρασία, αφού τα μεγέθη, από τα οποία αποτελείται, μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία και ειδικά το ιξώδες. Οι άλλες ιδιότητες του ρευστού δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην περίπτωση

ροής με τόσο χαμηλή ταχύτητα γι' αυτόν δεν παρουσιάζονται εδώ, αλλά έχουν φυλαχτεί για οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο.

Η μικρή τιμή του αριθμού Reynolds (τάξεως  $10^{-3}$ ), ο οποίος εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδρανείας προς τις δυνάμεις ιξώδους, δηλώνει πως πραγματοποιείται μεγάλη διάχυση της ταχύτητας σε μοριακό επίπεδο στο ρευστό σε σχέση με τη ταχύτητα ροής του γυαλιού. Η μεγάλη τιμή του αριθμού Prandtl (τάξεως  $10^3$ ), που είναι ο λόγος της μεταφοράς ορμής προς τη μεταφορά θερμότητας, επιβεβαιώνει τον ισχυρισμό αυτό, προσθέτοντας πως έχουμε μικρή διάχυση θερμότητας μέσα στο πεδίο ροής. Συνεπώς ο κύριος μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας στο ρευστό είναι η φυσική συναγωγή, εφόσον δεν προσδίδεται θερμότητα από εξωτερικά αίτια, με τη διάχυση να παίζει μικρό ρόλο. Σημαντικό όμως ρόλο παίζει η ακτινοβολία, αφού οι θερμοκρασίες είναι υψηλές, αλλά η επίδρασή της αγνοείται στο παρόν πρόβλημα προς απλούστευση των υπολογισμών.

### 6.5 Δοκιμή ανεξαρτησίας πλέγματος

Στο σημείο αυτό θα πραγματοποιήσουμε μια σύντομη δοκιμή ανεξαρτησίας πλέγματος, για να δούμε κατά πόσο η αλλαγή μεγέθους του πλέγματος επηρεάζει τα αποτελέσματα που παίρνουμε. Τα πλέγματα που δοκιμάστηκαν φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Μέγεθος πλέγματος	Χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος	Μέση πτώση τάξεως μεγέθους υπολειμματικών πηγών
20x10	51"	5.1
20x20	1'49"	4.6
30x10	1'17"	5.3
30x20	2'46"	4.8
40x10	1'43"	5.1
40x20	3'43"	4.8

Από τον πίνακα συμπεραίνουμε πως το πιο κατάλληλο πλέγμα για το πεδίο ροής που εξετάζουμε είναι το 20x20, εφόσον συγκλίνει με μικρότερη πτώση των υπολειμματικών πηγών, δηλαδή παρουσιάζει πιο οικονομική σύγκλιση.

Η διάταξη του πλέγματος 20x20 φαίνεται στο σχήμα 24. Για σύγκριση με το πλέγμα 10x10 παραθέτουμε τα αποτελέσματα για το πλέγμα 20x20 και 40x20



(σχήματα 25-33 και 34-38, αντίστοιχα). Βλέπουμε πως στο πλέγμα 20x20 η σύγκλιση είναι πιο ομαλή, δηλαδή ότι η παλινδρόμηση δεν παρουσιάζει τις διακυμάνσεις του πλέγματος 10x10. Στα διαγράμματα των ταχυτήτων και της ροϊκής συνάρτησης παίρνουμε μια καλύτερη εικόνα της κίνησης του ρευστού, αφού το πεδίο ροής περιγράφεται πιο λεπτομερώς απ' ό,τι στα πλέγματα μικρού μεγέθους. Τα υπόλοιπα διαγράμματα είναι παρόμοια με αυτά του πλέγματος 10x10.

## 6.6 Παραμετρικές μελέτες

### 1. Ταχύτητα εισόδου

Βασιζόμενοι στο πλέγμα 20x20, που παρουσίασε την καλύτερη σύγκλιση, προχωρούμε στην παρουσίαση ορισμένων ενδιαφέρουσων περιπτώσεων υπό τη μορφή παραμετρικών μελετών.

Αρχικά θα εξετάσουμε δύο περιπτώσεις με αυξημένη ταχύτητα εισόδου. Στη μια το ρευστό εισέρχεται με ταχύτητα  $UIN = 3.7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ , ενώ στην άλλη έχει ταχύτητα  $UIN = 3.7 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$ . Το μέγεθος πλέγματος είναι 20x20. Τα αποτελέσματα των περιπτώσεων αυτών δίνονται στα σχήματα 39-43 και 44-52, αντίστοιχα.

Μια πρώτη παρατήρηση που κάνουμε αφορά τη σύγκλιση, που γίνεται γρηγορότερα απ' ό,τι στο αυθεντικό πρόβλημα, λόγω της αυξημένης ταχύτητας. Με ταχύτητα  $UIN = 3.7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  έχουμε σύγκλιση στις 493 επαναλήψεις με ακρίβεια  $4.941 \cdot 10^{-4}$ , ενώ με ταχύτητα  $UIN = 3.7 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$  η σύγκλιση επιτυγχάνεται στις 350 επαναλήψεις (σχήματα 44-47) με ακρίβεια  $4.94 \cdot 10^{-4}$ . Οι αντίστοιχοι χρόνοι εκτέλεσης του προγράμματος ανέρχονται σε 57" και 43", αντίστοιχα.

Η αυξημένη ταχύτητα φαίνεται στα διαγράμματα της ροϊκής συνάρτησης (σχήματα 40 και 49 αντίστοιχα) όπου η κλίση των καμπυλών της ροής στο δυτικό τοίχωμα του εμποδίου είναι πιο απότομη απ' ό,τι στην αυθεντική περίπτωση με την ταχύτητα των  $3.7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . Στα διαγράμματα των θερμοκρασιών (σχήματα 41 και 50 αντίστοιχα) βλέπουμε ότι στην πρώτη περίπτωση η πτώση θερμοκρασίας του ρευστού περιορίζεται στα τοιχώματα, αφού η κύρια μάζα του ρευστού δεν προλαβαίνει να κρυώσει λόγω της υψηλής ταχύτητας του, ενώ στην δεύτερη όλες σχεδόν οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες είναι προσκολλημένες στα τοιχώματα.

Το αποτέλεσμα αυτών των κατανομών των θερμοκρασιών φαίνεται στα διαγράμματα, που παριστάνουν το ιξώδες στα σχήματα 42 και 51 αντίστοιχα. Η κατανομή του ιξώδους, που ακολουθεί την κατανομή των θερμοκρασιών, παρουσιάζει μια μεγάλη περιοχή, στην οποία παραμένει σταθερό, ιδιαίτερα στην περίπτωση της



μεγαλύτερης ταχύτητας  $UIN = 3.7 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$ . Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό για την παραγωγή του γυαλιού, το οποίο θέλουμε να έχει ομοιογενείς και σταθερές ιδιότητες.

Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τα διαγράμματα των αριθμών Prandtl, ότι δηλαδή σε μεγαλύτερες ταχύτητες παραμένει σταθερός σε μια μεγάλη περιοχή του πεδίου ροής και μεταβάλλεται μόνο κοντά στα τοιχώματα. Η περιοχή, που ο αριθμός Prandtl μένει σταθερός, αυξάνεται, όσο αυξάνει η ταχύτητα ροής.

## 2. Θερμοκρασία εισόδου

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε δύο περιπτώσεις, όπου στην πρώτη η θερμοκρασία εισόδου ισούται με τη θερμοκρασία του πυθμένα της λεκάνης ( $TIN = T_{WALL} = 1300^\circ\text{C}$ ) και στη δεύτερη με τη θερμοκρασία της ελεύθερης επιφάνειας ( $TIN = T_{FREE} = 1450^\circ\text{C}$ ). Τα αποτελέσματα τους παρίστανται στα σχήματα 53-57 και 58-62, αντίστοιχα. Η ταχύτητα εισόδου του ρευστού είναι και στις δύο περιπτώσεις ίση με την αυθεντική:  $UIN = 3.7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ . Το μέγεθος πλέγματος είναι  $20 \times 20$ . Οι χρόνοι εκτέλεσης είναι ίδιοι με τιμή  $1'49''$ . Όσον αφορά τη σύγκλιση, εμφανίζεται ξανά το φαινόμενο της παλινδρόμησης, αλλά οι λύσεις είναι αποδεκτές.

Περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα διαγράμματα κατανομής των θερμοκρασιών (σχήματα 55 και 60), του ιξώδους (σχήματα 56 και 61) και του αριθμού Prandtl (σχήματα 57 και 62). Αυτό που προκύπτει από τα διαγράμματα αυτά είναι ότι, επειδή οι θερμοκρασιακές συνθήκες δύο συνόρων είναι ίδιες, η θερμοκρασία στο τμήμα της ροής, που είναι κοντά στα σύνορα αυτά, είναι σταθερή και το ρευστό ψύχεται κοντά σε τοιχώματα με χαμηλότερη θερμοκρασία. Κατά τα άλλα, η θερμοκρασιακή κατανομή είναι η ίδια όπως στην αυθεντική περίπτωση. Φυσικά το ιξώδες και ο αριθμός Prandtl ακολουθούν την κατανομή των θερμοκρασιών.

Η πληροφορία, που προσκομίζουμε από την εξέταση των περιπτώσεων αυτών είναι πως θα πρέπει να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερες διαφορές στην θερμοκρασία μέσα στο πεδίο ροής για να έχουμε σταθερές τιμές στις ιδιότητες του γυαλιού. Μεγάλες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία έχουν ως αποτέλεσμα την ανισοτροπία του τήγματος και τη μεταφορά της στα παραγόμενα προϊόντα.

### 3. Διαστάσεις του εξεταζόμενου πεδίου ροής (τμήμα της λεκάνης)

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε δύο περιπτώσεις που αφορούν το ύψος της διώρυγας - εμποδίου, το οποίο θα είναι 0.17 m την πρώτη φορά και 0.95 m στη δεύτερη, για να δούμε πως επιδρά το μέγεθος του εμποδίου στη ροή. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι και στις περιπτώσεις 20x16, όπου στην πρώτη έχουμε την εξής διαμόρφωση των γραμμών : NXI=10, NXO=8 και NYI=2, NYO=12, ενώ στη δεύτερη είναι : NXI=10, NXO=8 και NYI=12, NYO=2. Στον  $y$  - άξονα χρησιμοποιήθηκαν 16 γραμμές, επειδή λόγω της διαμόρφωσης του εμποδίου δεν ήταν εύκολο να προσαρμοστούν 20 γραμμές, που χρησιμοποιούνταν κανονικά. Η ταχύτητα εισόδου είναι :  $UIN = 3.7 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$  οπότε η σύγκλιση εμφανίζει παλινδρόμηση. Οι χρόνοι εκτέλεσης είναι ίσοι με 1'25" αφού το μέγεθος πλέγματος είναι ίδιο και στις δύο περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 63-67 και 68-72, αντίστοιχα.

Η παρατήρηση που κάνουμε αφορά τα διανύσματα ταχυτήτων (σχήματα 63 και 68), όπου στην περίπτωση με το μικρό εμπόδιο η ροή απλά αλλάζει κατεύθυνση και δεν επιταχύνεται σχεδόν καθόλου, ενώ στην άλλη η ροή αναγκάζεται να περάσει από ένα κανάλι ύψους περίπου ενός δεκάτου του συνολικού ύψους με συνέπεια να επιταχυνθεί αρκετά (η ταχύτητα να αυξηθεί κατά μια τάξη μεγέθους). Όσον αφορά τα υπόλοιπα διαγράμματα, η ροή δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τη μεταβολή του ύψους της διώρυγας.

Μετά από τις αλλαγές του εμποδίου κατά ύψος, θα περάσουμε σε δύο περιπτώσεις μεταβολής του μήκους εισόδου του πεδίου ροής. Θα εξεταστεί πρώτα ένα πεδίο ροής με μεγάλο μήκος εισόδου ( $XIN=10$  m) και σαν δεύτερο ένα με μήκος εισόδου ίσο με το μήκος του εμποδίου ( $XIN=XOUT=1$  m).

Η ταχύτητα εισόδου παραμένει :  $UIN = 3.7 \cdot 10^{-5} \frac{m}{s}$ . Τα μεγέθη πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι ένα πλέγμα 50x20 στην πρώτη περίπτωση για να καλυφθεί το μεγάλο μήκος εισόδου των 10 m ( $NXI=40$ ,  $NXO=10$  και  $NYI=10$ ,  $NYO=8$ ), ενώ στη δεύτερη είναι ένα διαφοροποιημένο πλέγμα 20x20 ( $NXI=8$ ,  $NXO=10$  και  $NYI=10$ ,  $NYO=8$ ). Οι χρόνοι εκτέλεσης του προγράμματος βρίσκονται στα 4'38" και στα 1'49" αντίστοιχα. Οι γραφικές παραστάσεις των μεταβλητών και των ιδιοτήτων του ρευστού φαίνονται στα σχήματα 73-77 και 78-82, αντίστοιχα.

Η σύγκλιση ακολουθεί τα πρότυπα της αυθεντικής περίπτωσης. Η μεταβολή του μήκους εισόδου φαίνεται δεν επιφέρει καμία σοβαρή αλλαγή στις ιδιότητες του ρευστού. Η μόνη παρατήρηση που μπορεί να γίνει αφορά το πεδίο των θερμοκρασιών (σχήματα 75 και 80, αντίστοιχα): Όταν το μήκος εισόδου είναι

μεγάλο, το γυαλί ψύχεται οδεύοντας προς τη διώρυγα με αργό ρυθμό, αφού το θερμοκρασιακό πεδίο αναπτύσσεται αργά, ενώ αν είναι μικρό, η μεταβολή της θερμοκρασίας πραγματοποιείται πολύ απότομα, πράγμα που δεν ευνοεί τις ιδιότητες του γυαλιού.

Τέλος θα εξετάσουμε και μια περίπτωση, όπου το συνολικό ύψος του πεδίου ροής είναι διπλάσιο από το κανονικό ( $Υ_{TOT}=2.14$  m), χωρίς να μεταβάλλουμε το λόγο του ύψους του εμποδίου προς το ύψος του καναλιού, ενώ οι υπόλοιπες αρχικές και οριακές συνθήκες παραμένουν σταθερές. Το μέγεθος του πλέγματος είναι  $30 \times 30$  ( $N_{XI}=20, N_{XO}=8$  και  $N_{YI}=16, N_{YO}=12$ ). Ο χρόνος εκτέλεσης της περίπτωσης αυτής είναι  $4'16''$ . Τα αποτελέσματα βρίσκονται στα σχήματα 83-87.

Από την παρατήρηση των σχημάτων αυτών καταλαβαίνουμε ότι μια τέτοια αύξηση του ύψους του πεδίου ροής δεν έχει σχεδόν καμία επίπτωση πάνω στο ρευστό.

## 7. Συμπεράσματα - Προτάσεις

### 7.1 Συμπεράσματα

Το αριθμητικό μοντέλο ροής που παρουσιάστηκε αποτελεί πρωτοπορία στην περιοχή της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής για το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, αφού είναι το πρώτο μοντέλο προσομοίωσης ροής, που χρησιμοποιεί το Εργαστήριο Ρευστομηχανικής από τότε που άρχισε η λειτουργία του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών. Δεν προσφέρει βέβαια τις δυνατότητες των πακέτων προσομοίωσης ροών, που κυκλοφορούν στην αγορά, αλλά η απλότητα χρήσης του και η ικανότητα εξέτασης αρκετών περιπτώσεων ελλειπτικών ροών το καθιστούν ένα καλό εργαλείο για ερευνητικούς σκοπούς. Μπορεί να γίνει ανάλυση νευτώνειων ή μη ροών, χρονικά μόνιμων ή μεταβαλλόμενων ροών, ροών σε σωλήνες ή μεταξύ παραλλήλων πλακών και ροών με ένα ή περισσότερα εμπόδια. Το μοντέλο καλύπτει ροές μέχρι τη στρωτή κατάσταση.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας ήταν, μέσω της εξέτασης του πεδίου ροής μέσα στον υαλουργικό κλίβανο, να δώσει κάποιες γενικές κατευθύνσεις για την καλύτερη ρύθμιση των παραγόντων, που επηρεάζουν τη ροή στο χώρο εκείνο.

Με βάση την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

**A)** Η ταχύτητα της ροής μέσα στη λεκάνη τήξεως έχει μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες του γυαλιού. Η μικρή ταχύτητα ροής, όπως διαμορφώνεται στην παρούσα κατάσταση, δημιουργεί θερμοκρασιακές μεταβολές μέσα στην μάζα του τηγμένου γυαλιού και ιδιαίτερα στις περιοχές των συνόρων (τον πυθμένα και της ελεύθερης επιφάνειας) και της διώρυγας της λεκάνης με συνέπεια την ανομοιόμορφη κατανομή των ιδιοτήτων μέσα στο γυαλί. Αν όμως η ταχύτητα ροής αυξηθεί αρκετά (κατά 100 φορές) οι θερμοκρασιακές διαφορές σχεδόν απαλείφονται και οι ιδιότητες παρουσιάζουν μεγάλη ομοιογένεια.

**B)** Σημαντικό ρόλο παίζουν επίσης και οι θερμοκρασίες του πυθμένα, της ελεύθερης επιφάνειας και της διώρυγας (του εμποδίου στη ροή). Αν εξομαλυνθούν οι διαφορές, που εμφανίζουν οι τιμές των θερμοκρασιών στα σημεία αυτά, το θερμοκρασιακό πεδίο γίνεται πιο σταθερό και συνεπώς οι ιδιότητες του γυαλιού βελτιώνονται. Η ιδανική περίπτωση θα ήταν να επικρατούσε η ίδια θερμοκρασία σ' όλο το πεδίο ροής.

**Γ)** Οι διαστάσεις της λεκάνης, ένα τμήμα της οποίας εξετάστηκε στην εργασία αυτή, δεν φάνηκε να έχουν ιδιαίτερη συμμετοχή στην διαμόρφωση των ιδιοτήτων του γυαλιού. Το μόνο που μπορεί να επισημανθεί αφορά το τμήμα της λεκάνης από την περιοχή τροφοδοσίας του μίγματος των πρώτων υλών μέχρι τη διώρυγα. Στο τμήμα αυτό, όσο γίνεται πιο μεγάλο, η θερμοκρασιακή κατανομή γίνεται πιο ομαλή, χωρίς απότομες αλλαγές, αφού το προφίλ των θερμοκρασιών, έχει τη δυνατότητα να αναπτυχθεί. Αυτό συνεπάγεται και καλύτερη διαμόρφωση των ιδιοτήτων του γυαλιού.

Πιο εύκολα πραγματοποιήσιμα από τα παραπάνω είναι η αύξηση της ταχύτητας και η ρύθμιση των θερμοκρασιών στα σύνορα του πεδίου ροής, ενώ η μεταβολή των διαστάσεων της λεκάνης απαιτεί νέο σχεδιασμό και επανακατασκευή της.

## **7.2 Προτάσεις**

Για την ανάπτυξη του αριθμητικού αυτού μοντέλου δαπανήθηκε αρκετός χρόνος και κατεβλήθη μεγάλη προσπάθεια για να γίνει όσο το δυνατόν ακριβέστερο στις προβλέψεις του. Σίγουρα μπορούν να ενσωματωθούν σ' αυτό και άλλα χαρακτηριστικά, που θα οδηγήσουν στη βελτίωση του. Γι' αυτό ακριβώς το λόγο γίνονται μερικές προτάσεις-συστάσεις στους συνεχιστές του έργου αυτού.

**Α)** Καταρχήν, στη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμογής του, το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της ακτινοβολίας, που εμφανίζεται σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, δηλαδή ότι τα τοιχώματα της λεκάνης και της διώρυγας εκλύουν θερμότητα ακτινοβολίας προς το ρευστό.

**Β)** Επίσης, έχει αγνοηθεί και το φαινόμενο της άνωσης που είναι η επίδραση της βαρύτητας από τα ανώτερα στα κατώτερα στρώματα ροής.

**Γ)** Ακόμη, το μοντέλο δεν εξετάζει αν ισχύει το ισοζύγιο ενέργειας για το πεδίο ροής και θεωρεί ότι αυτό ικανοποιείται αυτόματα.

**Δ)** Πρέπει να αναφερθεί επίσης, πως τα στοιχεία των θερμοκρασιών που δόθηκαν δεν ήταν ακριβή και στην είσοδο του πεδίου ροής το προφίλ των θερμοκρασιών ήταν αφύσικο να έχει τέτοιες διαφορές. Αυτές οι μεταβολές της θερμοκρασίας δυσχεραίνουν τους υπολογισμούς του πεδίου θερμοκρασιών, άρα πρέπει το προφίλ στην είσοδο να απεικονίζει την πραγματική κατάσταση μέσα στο ρευστό.

**Ε)** Ακόμη, θα ήταν σκόπιμο για ερευνητικούς λόγους ο αλγόριθμος να περιλαμβάνει και μοντέλο τύρβης, για να υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού και περιπτώσεων τυρβώδους ροής.

**ΣΤ)** Επιπλέον, για την καλύτερη εποπτεία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα ήταν σημαντικό να δημιουργηθεί να μπορούν να χρησιμοποιηθούν χρώματα στις γραφικές παραστάσεις.

**Ζ)** Τέλος, με την ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου μοντέλου, θα δημιουργηθεί η βάση για τη μελέτη τρισδιάστατων ελλειπτικών ροών, ώστε να εξεταστούν πιο ρεαλιστικά τα φαινόμενα μετάδοσης θερμότητας και ροής, π.χ. πιθανή δευτερεύουσα ανακυκλοφορία, συναγωγή και διάχυση στην τρίτη διάσταση κ.λ.π.



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- AMES, W. F., Numerical methods for partial differential equations, Nelson, 1969.
- BIRD, R. B., LIGHTFOOT, E. N. and STEWART, W. E., Transport Phenomena, Wiley, 1960.
- CHORIN, A. J., Numerical solution of the Navier-Stokes equations, Math. of Computations, vol. 22, no. 104, 745-762, 1968.
- CHRISTIANSEN, E. B., KELSEY, S. J. and CARTER, T. R., Laminar tube flow through an abrupt contraction, AIChE J., vol. 18, no. 2, 372-380, 1972.
- FORSYTHE, G. W. and WASOW, W. R., Finite difference methods for partial differential equations, Wiley, 1960.
- GOSMAN, A. D., VLACHOS, N. S. and WHITELAW, J. H., Low Reynolds number pipe flow in the vicinity of three-dimensional obstacles, J. Mech. Eng. Sci., vol. 21, 335-343, 1979.
- GREENSPAN, D., Numerical studies of viscous, incompressible flow through an orifice for arbitrary Reynolds numbers, Int. J. Num. Methods Eng., vol. 6, 489-496, 1973.
- JENSON, V. G., Viscous flow round a sphere at low Reynolds numbers ( $<40$ ), Proc. Royal Soc., A249, 346-366, 1959.
- ΚΟΡΔΑΣ, Γ., ΒΛΑΧΟΣ, Ν. και ΒΑΛΑΒΑΝΗΣ, Ν., Βελτίωση της ποιότητας και παραγωγικότητας της ελληνικής βιομηχανίας γυαλιού, Ερευνητικό Πρόγραμμα (ΕΠΕΤ II), 1995-1997.
- LAUNDER, B. and SPALDING, D. B., Mathematical models of turbulence, Academic Press, 1972.
- MACAGNO, E. O. and HUNG, T. K., Computational and experimental study of a captive annular eddy, J. Fluid Mech., vol. 28, no. 1, 43-64, 1967.
- MILLS, R. D., Numerical solutions of viscous flow through a pipe orifice at low Reynolds numbers, J. Mech. Eng. Science, vol. 10, no. 2, 133-140, 1968.
- PANTANKAR, S. V. and SPALDING, D. B., A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 15, 1787-1806, 1972.

PEACEMAN, D. W. and RACHFORD, H. H., The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations, J. Soc. Ind. Appl. Maths., no. 3, 28-41, 1955.

RUNCHAL, A. K., Convergence and accuracy of three finite difference schemes for a two-dimensional conduction and convection problem, Int. J. Num. Mech. Eng., vol. 4, 541-550, 1972.

RUNCHAL, A. K. and WOLFSTEIN, M., A finite difference procedure for the investigation of the Navier-Stokes equations, J. Mech. Eng. Sciences, vol. 11, 445-453, 1969.

SCHLICHTING, H., Boundary layer theory, McGraw-Hill, 1968.

SMITH, G. D., Numerical solution of partial differential equations, Oxford, 1965.

SPALDING, D. B., A novel finite difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives, Int. Num. Mech. Eng., vol. 4, 551-559, 1972.

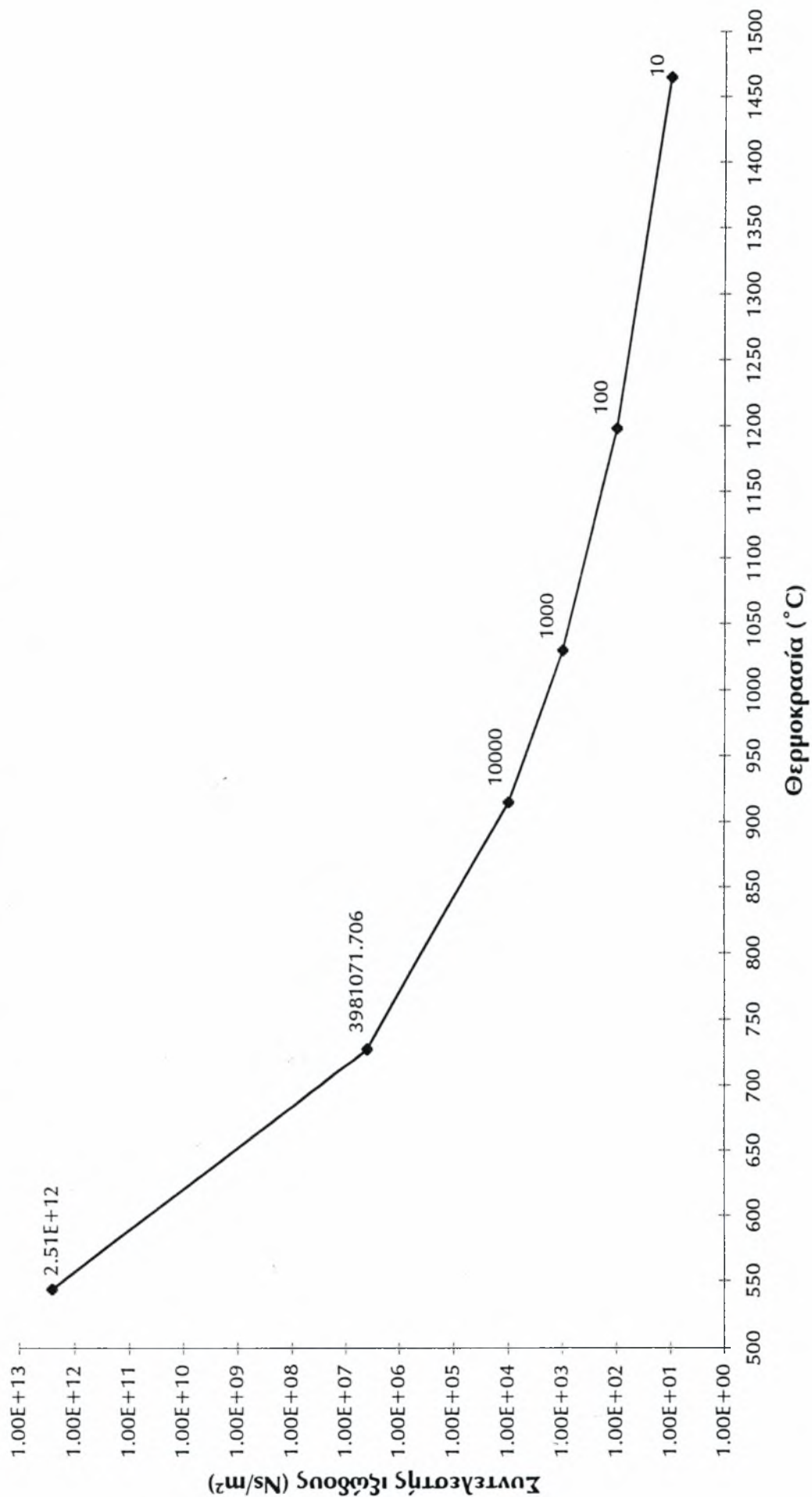
THOM, A., The flow past circular cylinders and low speeds, Proc. Royal Soc., London, A141, 651-669, 1933.

TRIER, W., Glassschmelzöfen, Konstruktion und Betriebsverhalten, Springer Verlag, 1984.

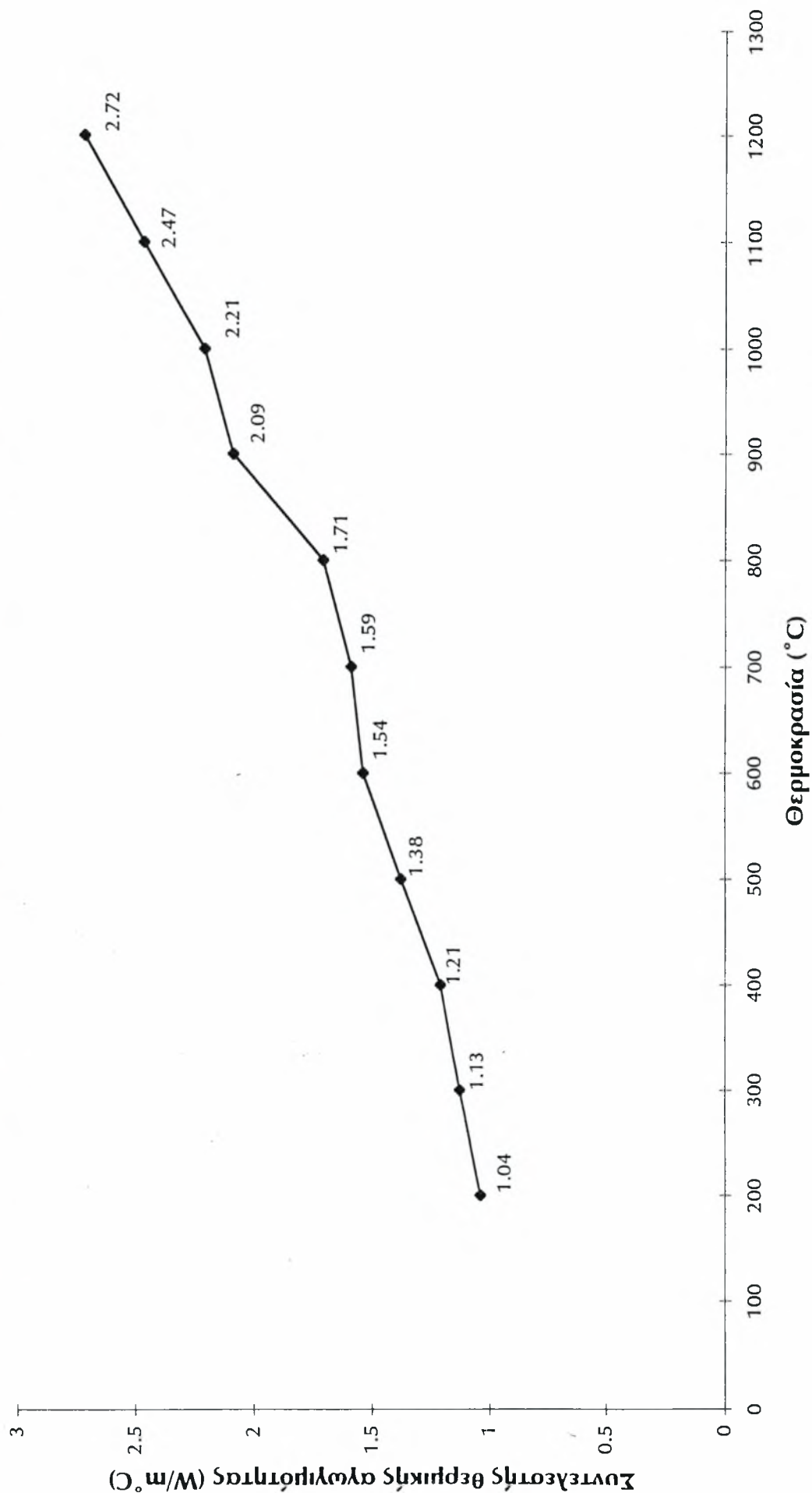
VLACHOS, N. S., Blood flow in small diameter ducts; particularly in venules, Ph. D. Thesis, London University, 1977.

VLACHOS, N. S. and WHITELAW, J. H., Low Reynolds number flow in the vicinity of axisymmetric constrictions, J. Mech. Eng. Sci., vol. 21, 73-84, 1979.

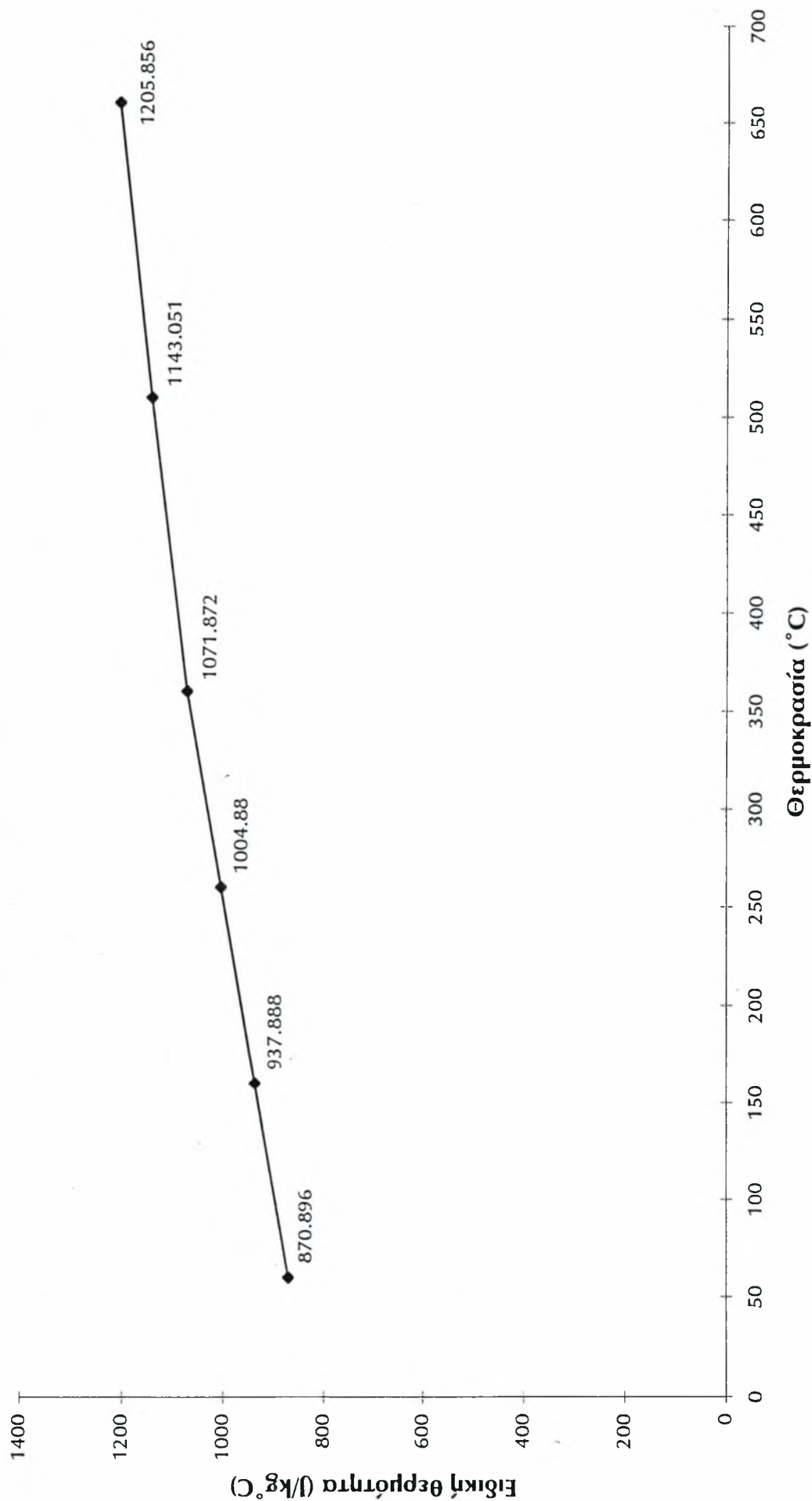
# Ο συντελεστής ιξώδους του γυαλιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία



Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του γυαλιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία



# Η ειδική θερμότητα του γυαλιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

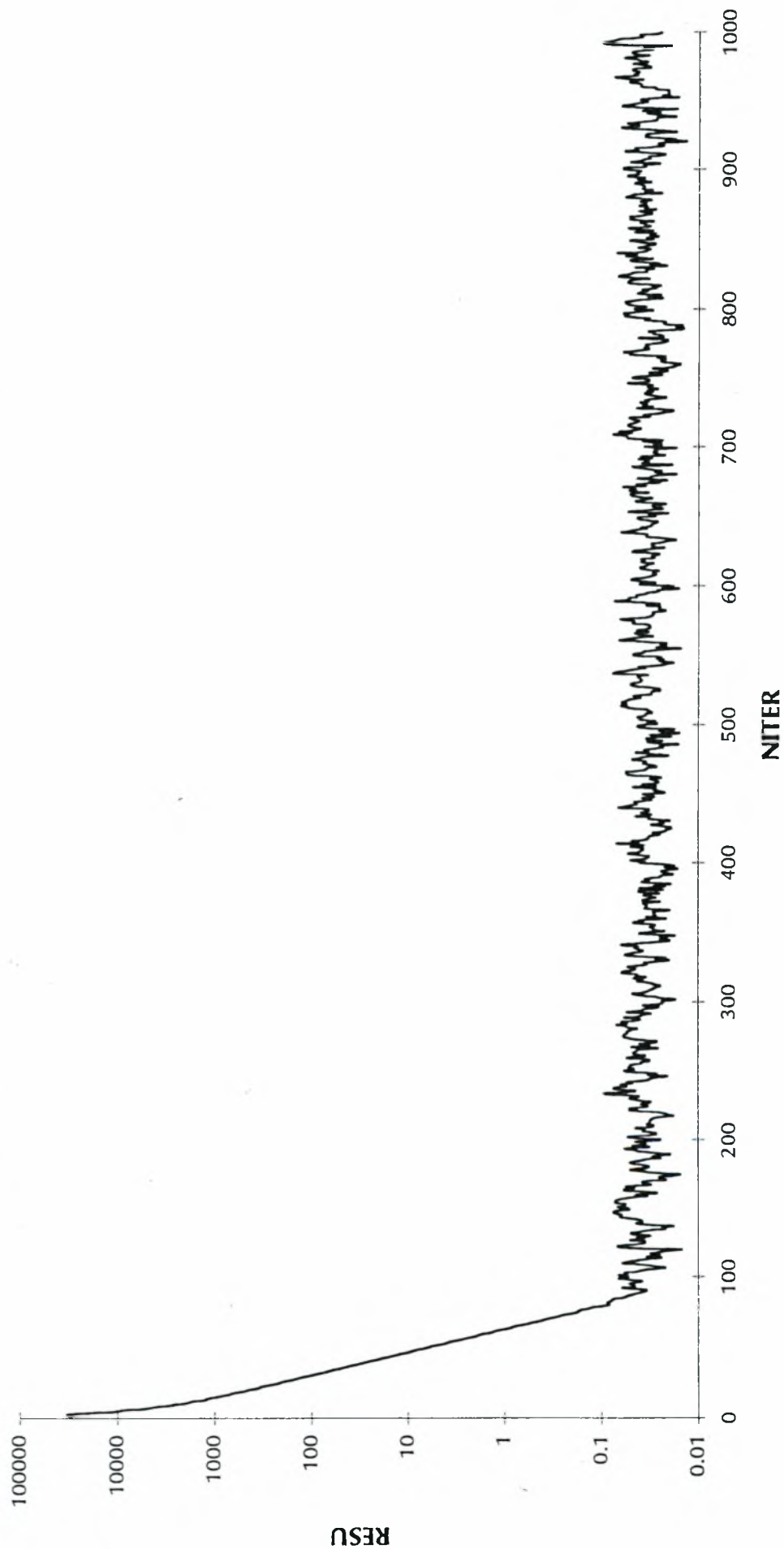


Αποτελέσματα για πλέγμα 10x10

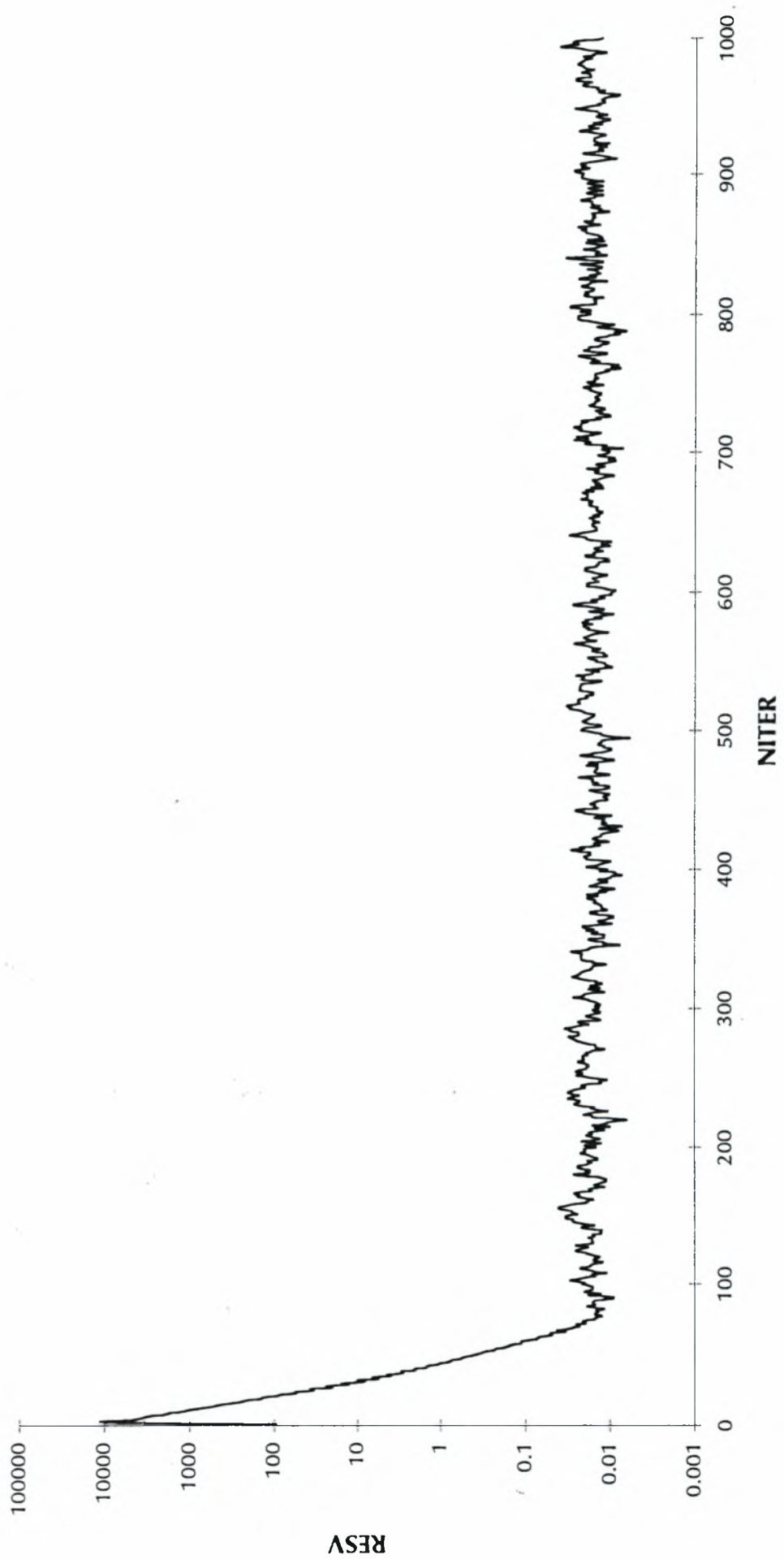
$$\left( UIN = 3.7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s} \right)$$



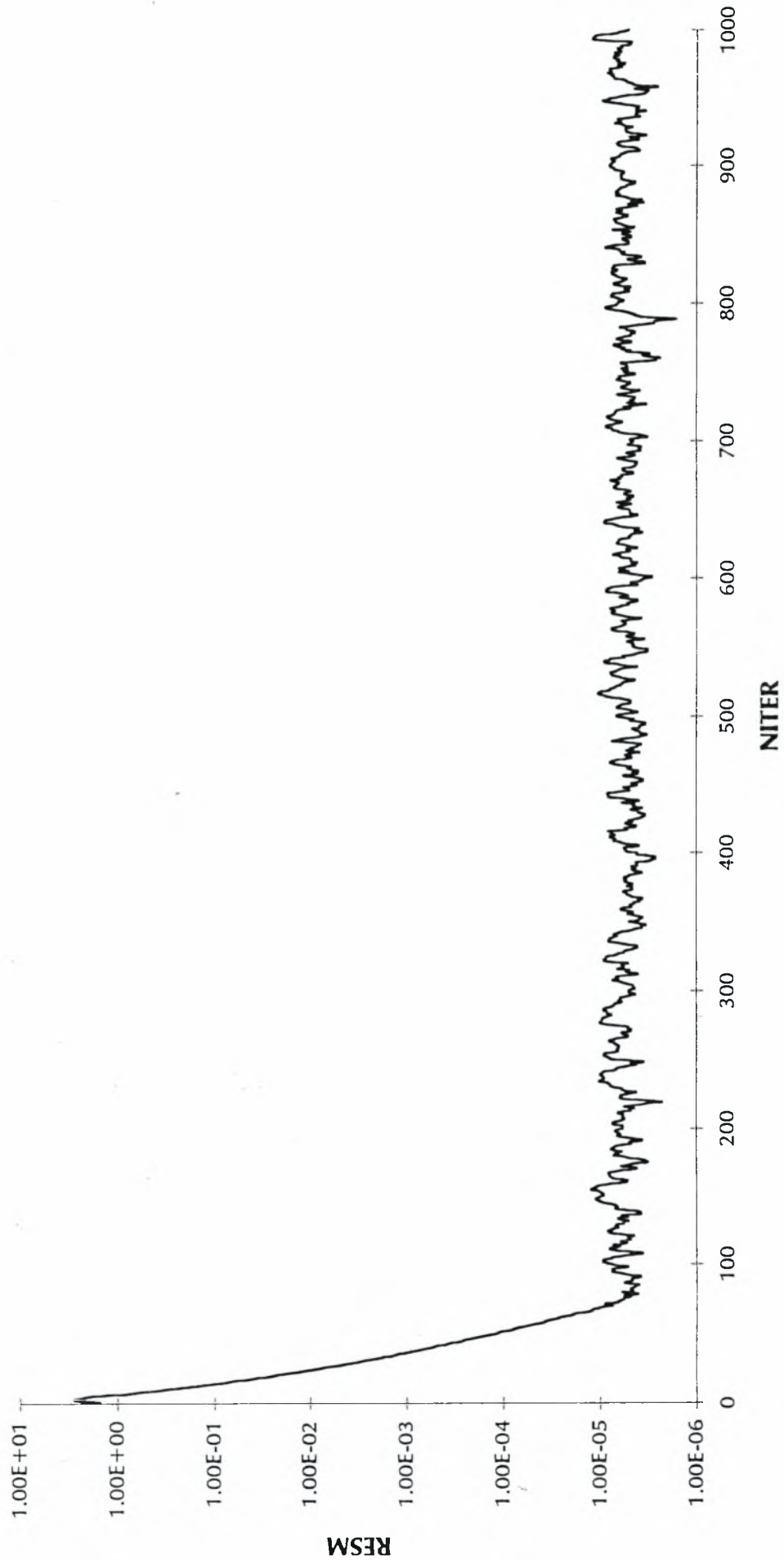
Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της ταχύτητας  $u$  (RESU) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)



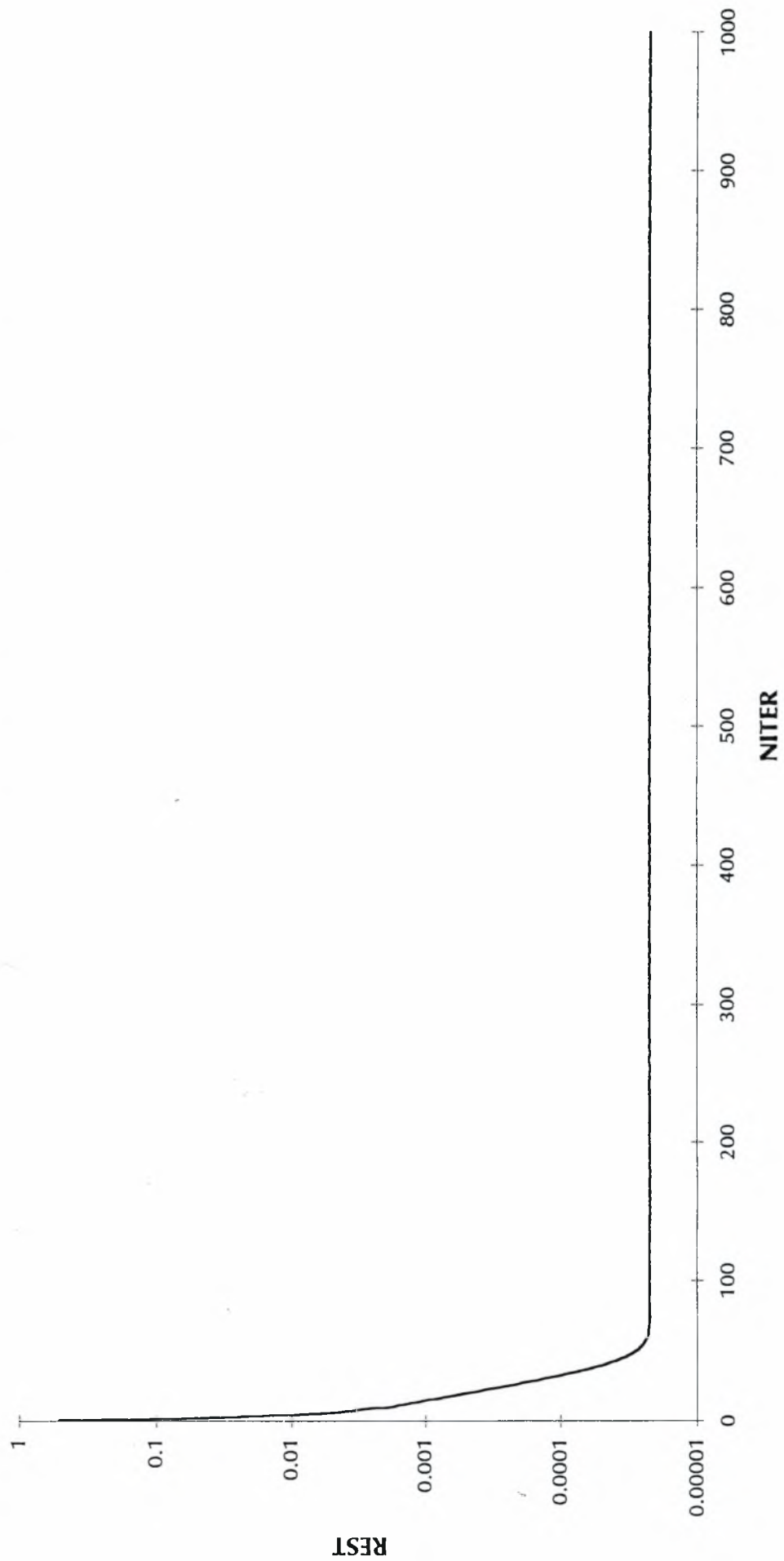
Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της ταχύτητας  $v$  (RESV) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)



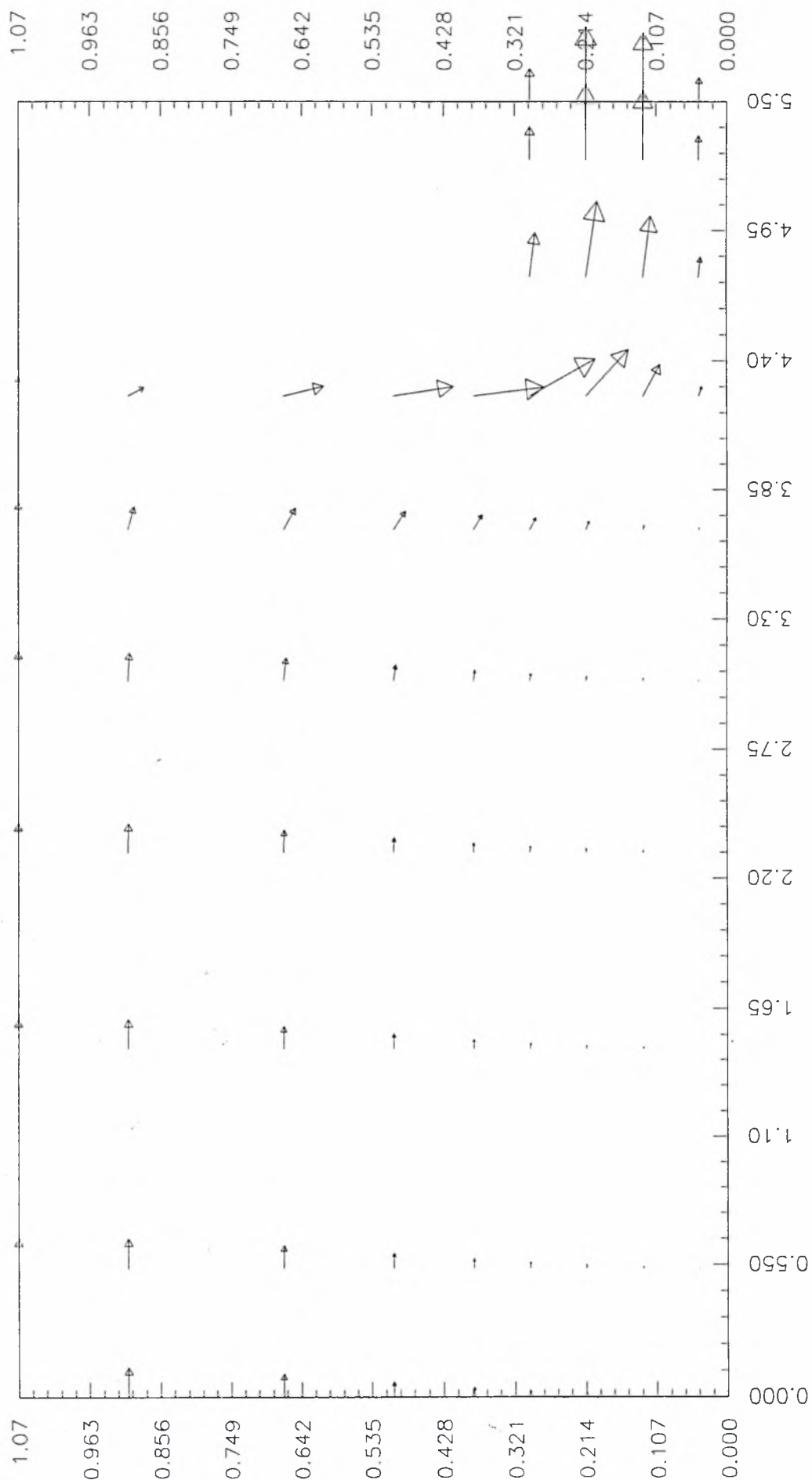
Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της μάζας (RESM) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)



Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της θερμοκρασίας (REST) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)

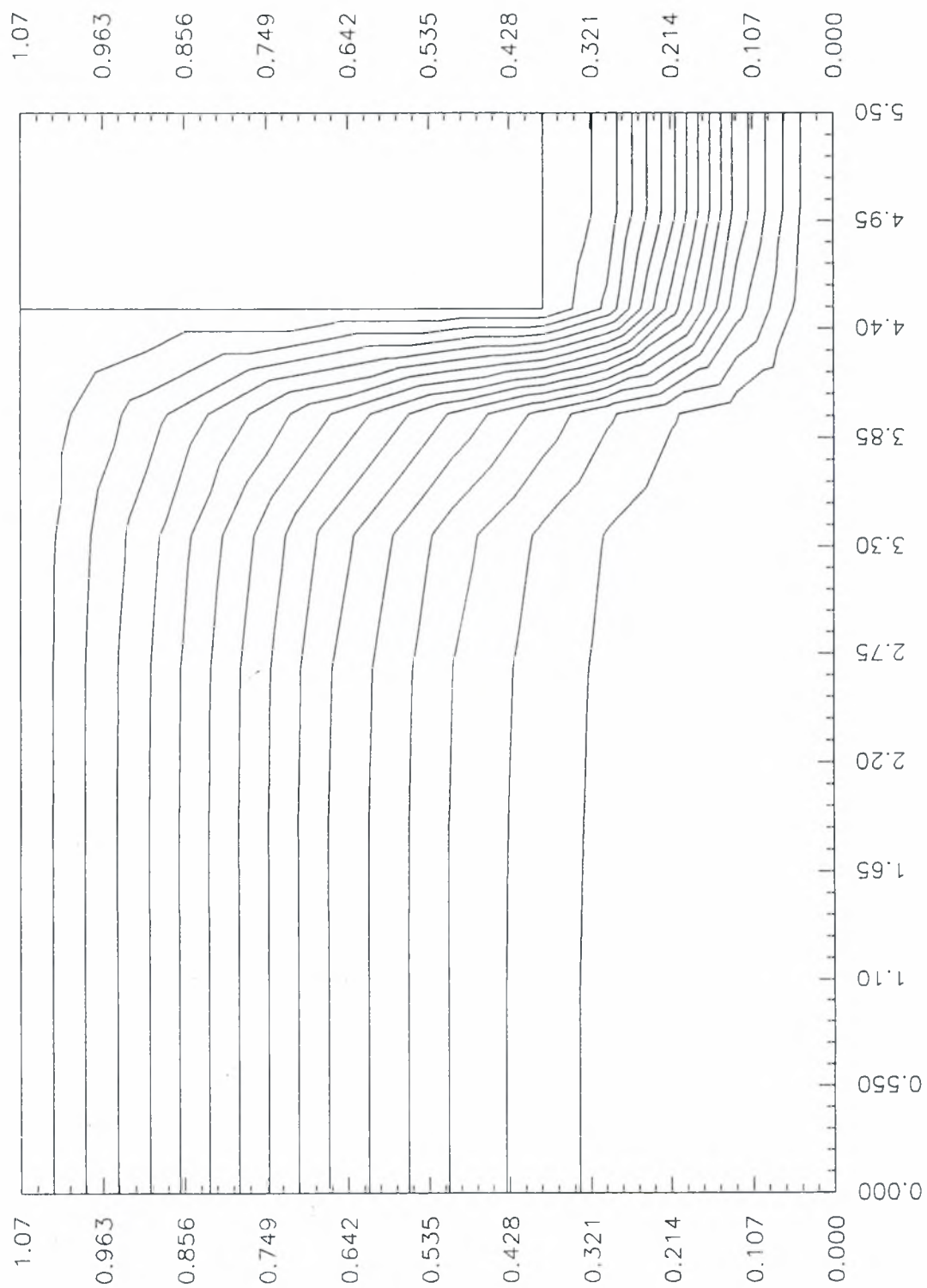


Vector Plot for VECTORS.DAT

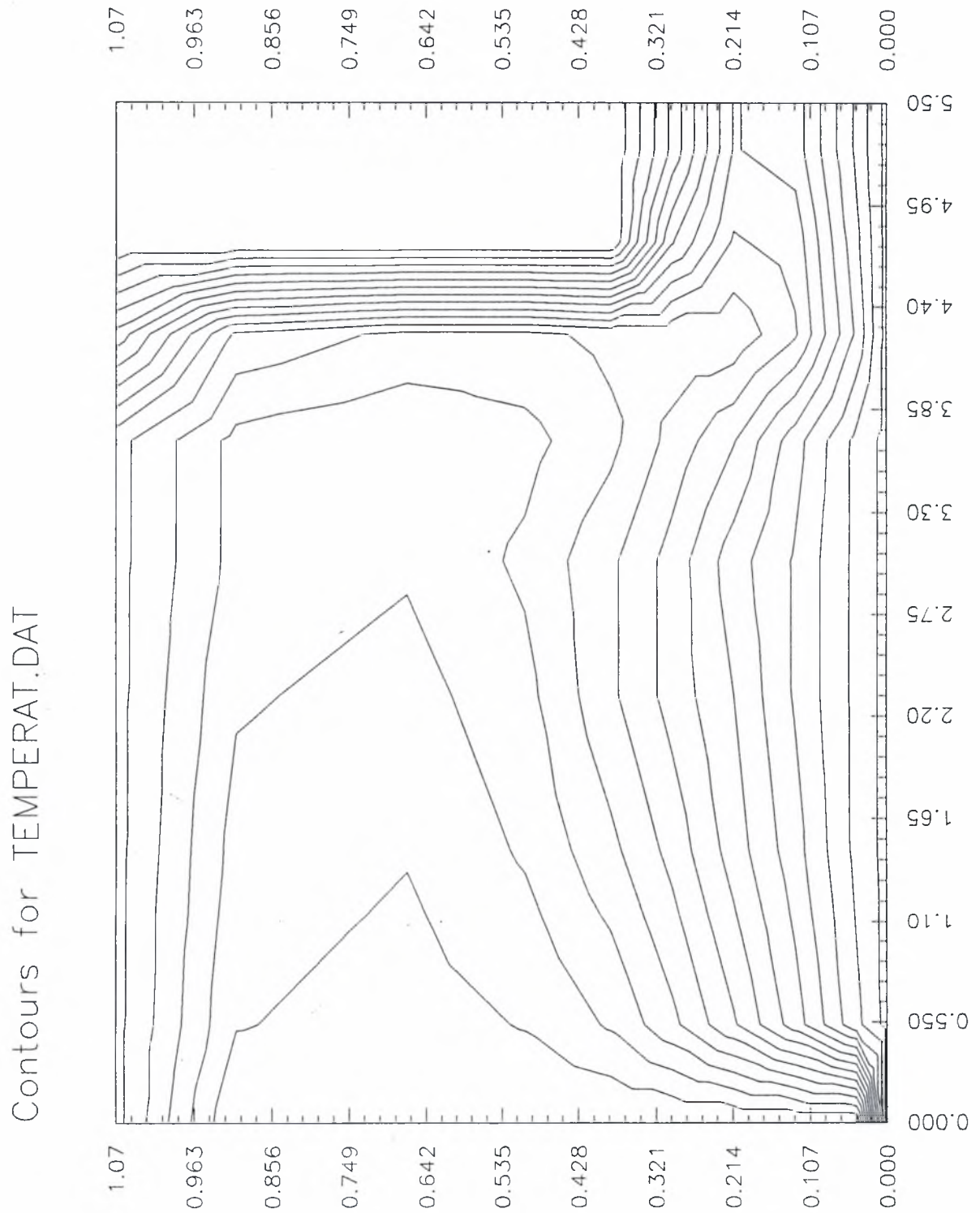




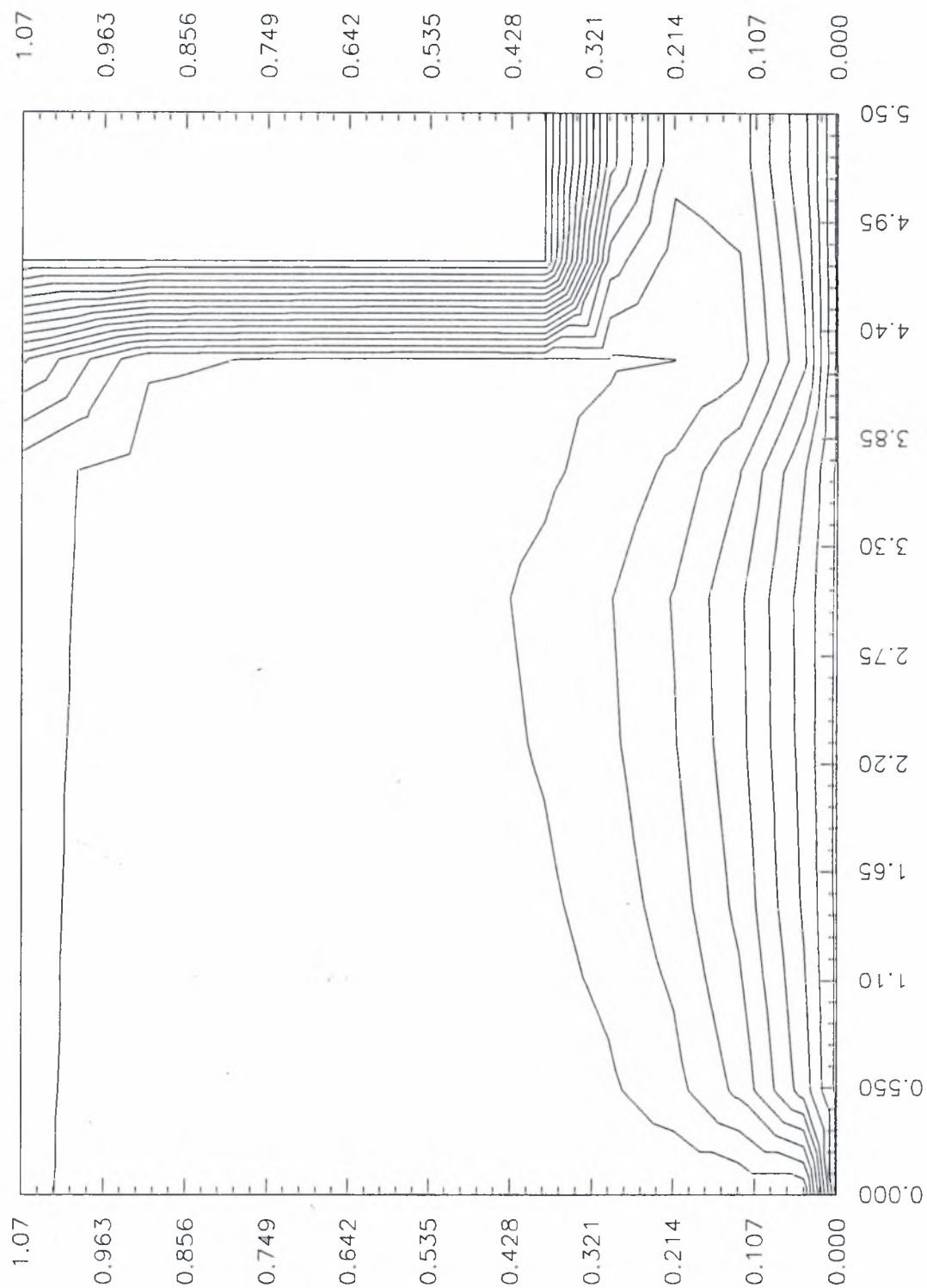
Contours for STREAM.DAT

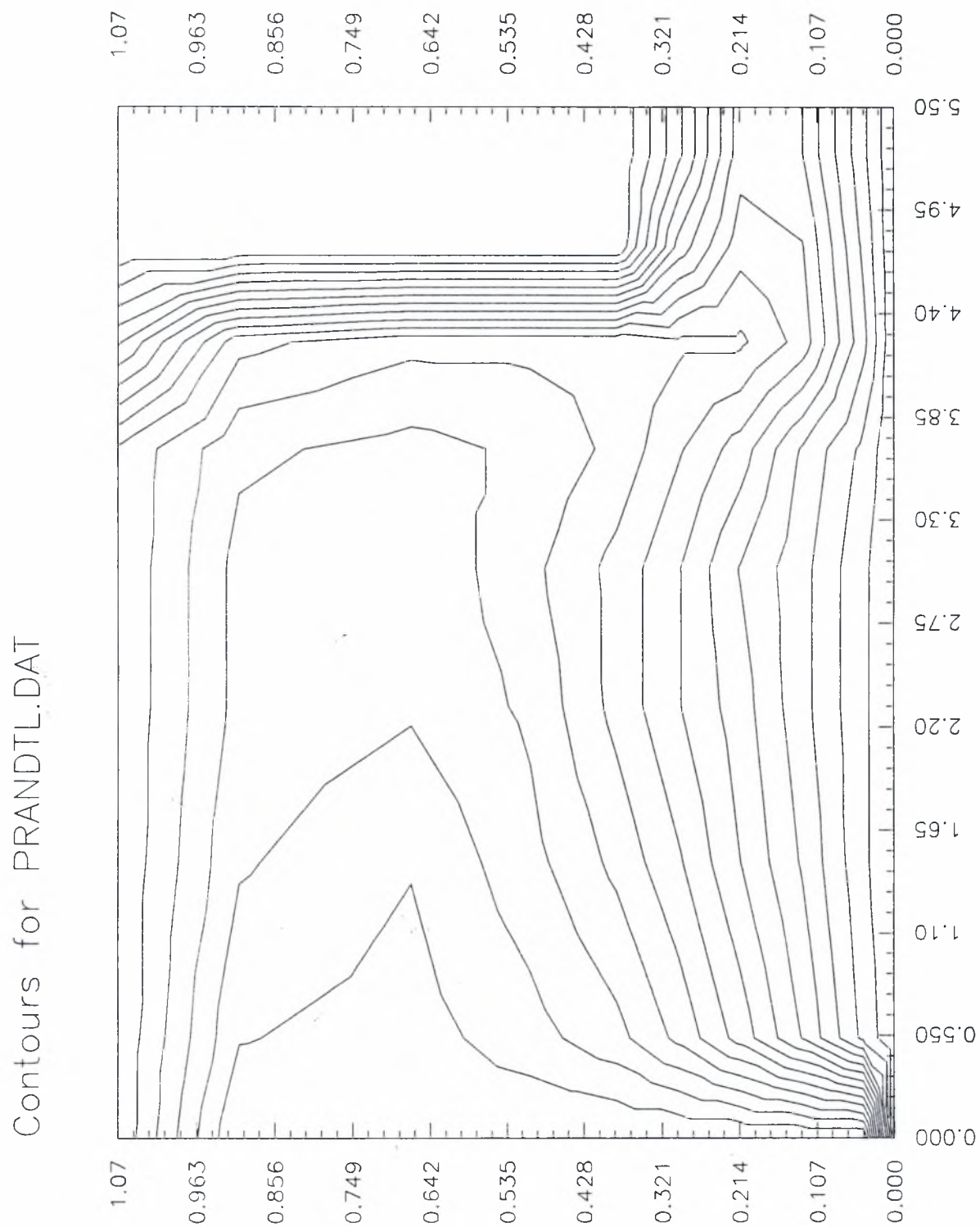






Contours for VISCOSIT.DAT

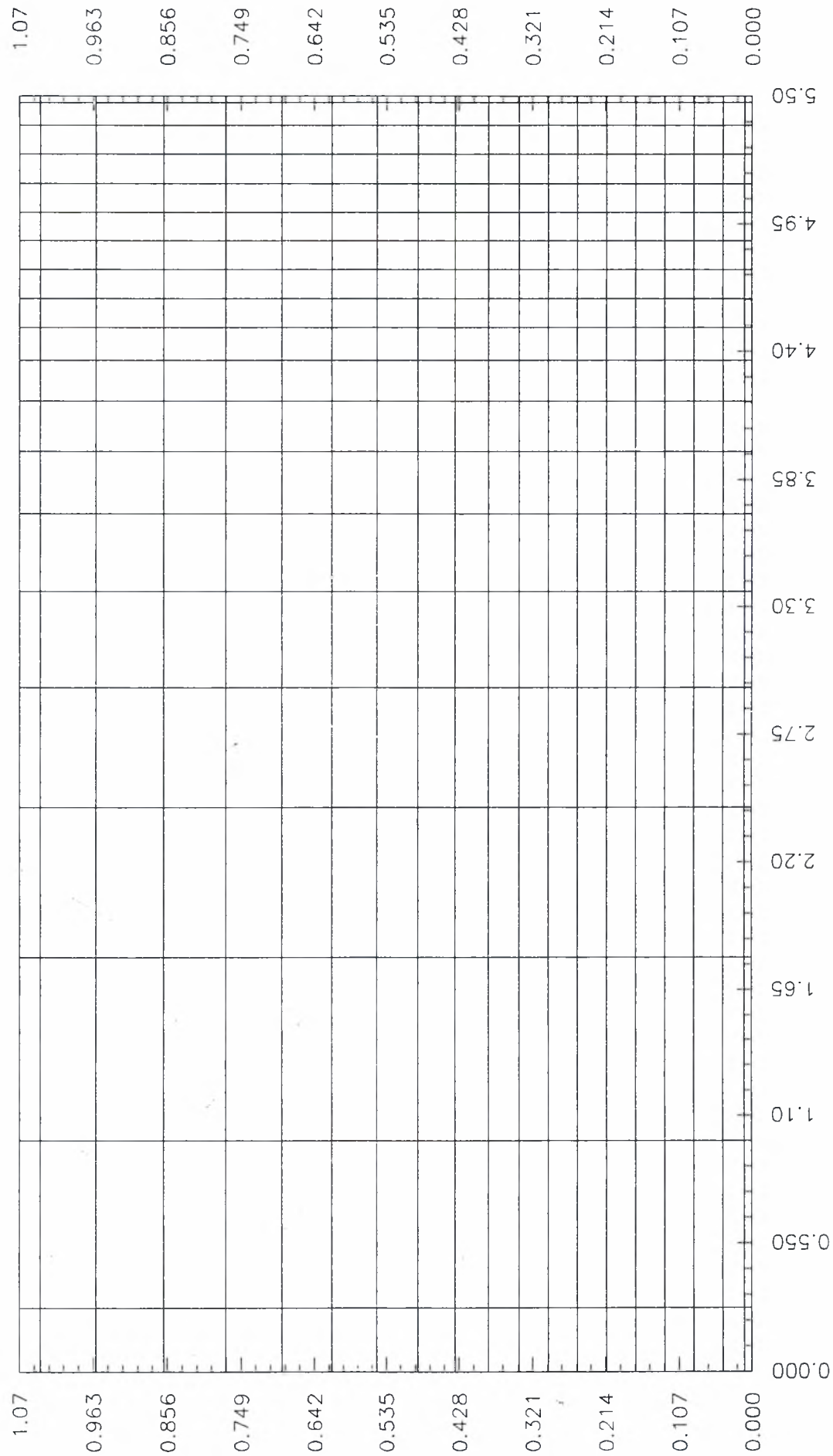




Αποτελέσματα για πλέγμα 20x20

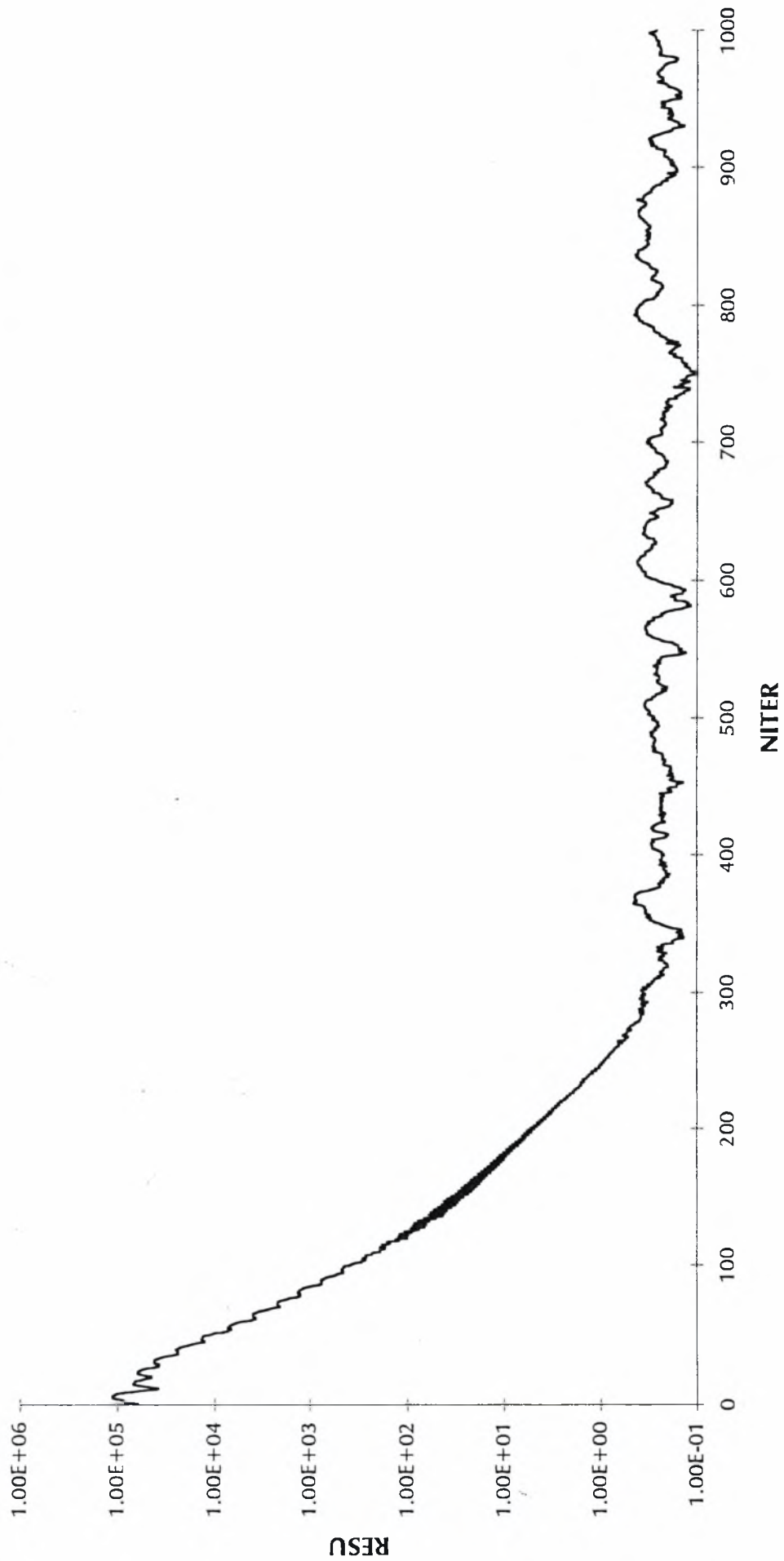
$$(UIN = 3.7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s})$$

Grid cells for VECTORS.DAT



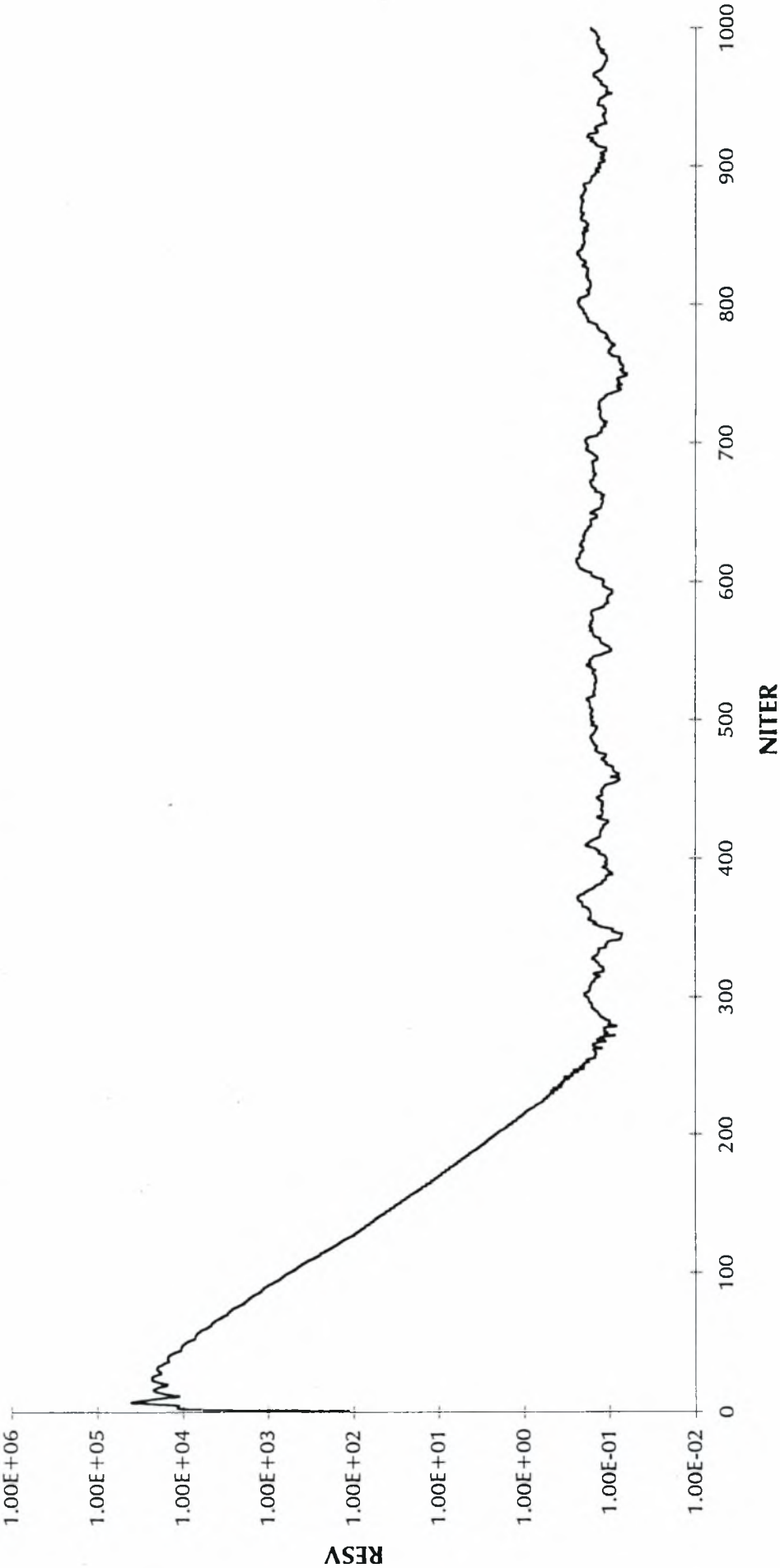
Σχήμα 24 : Πλέγμα προσομοίωσης ροής (20x20)

Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της ταχύτητας  $u$  (RESU) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)

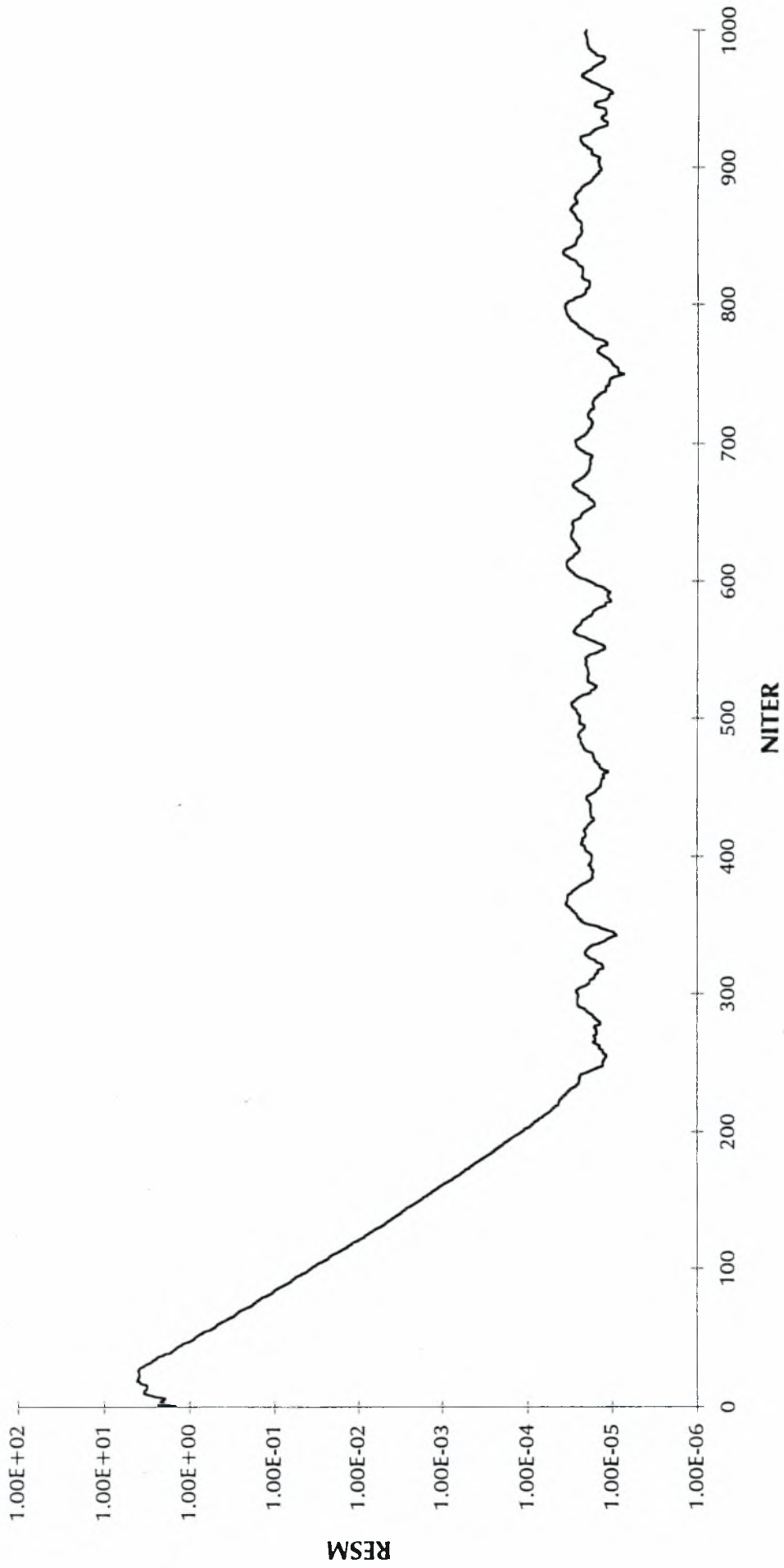




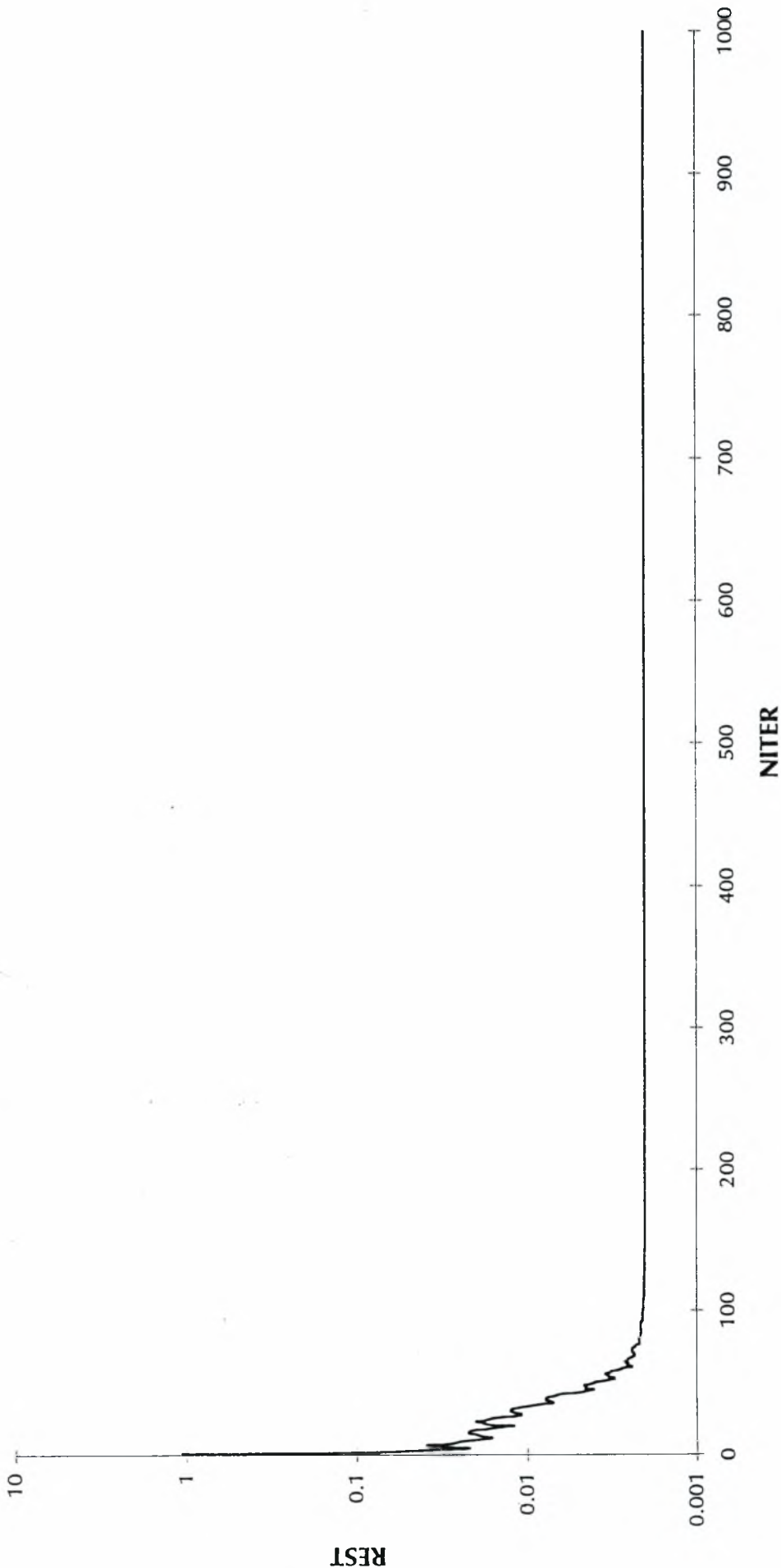
Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της ταχύτητας  $v$  (RESV) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)



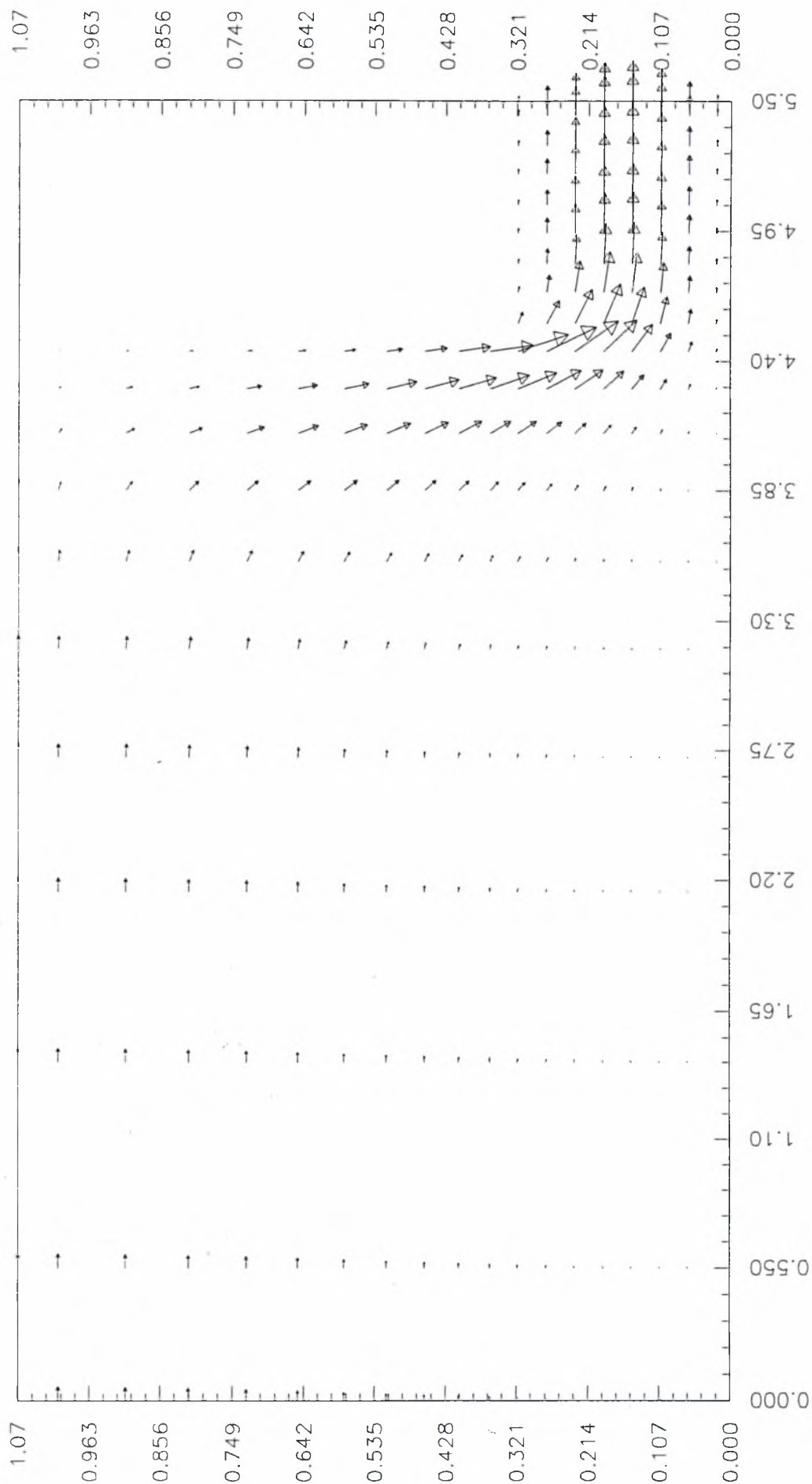
Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της μάζας (RESM) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)



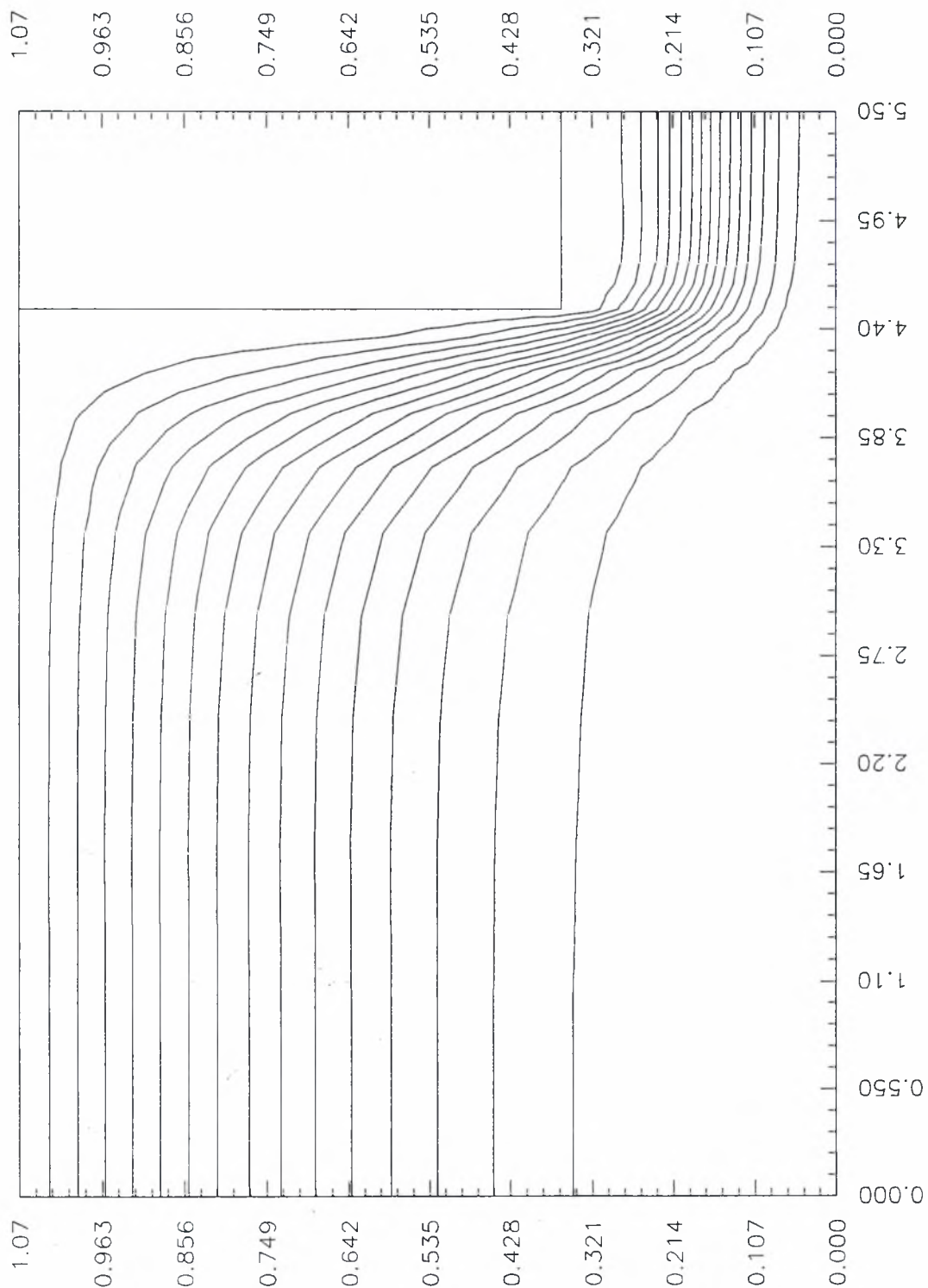
Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της θερμοκρασίας (REST) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)

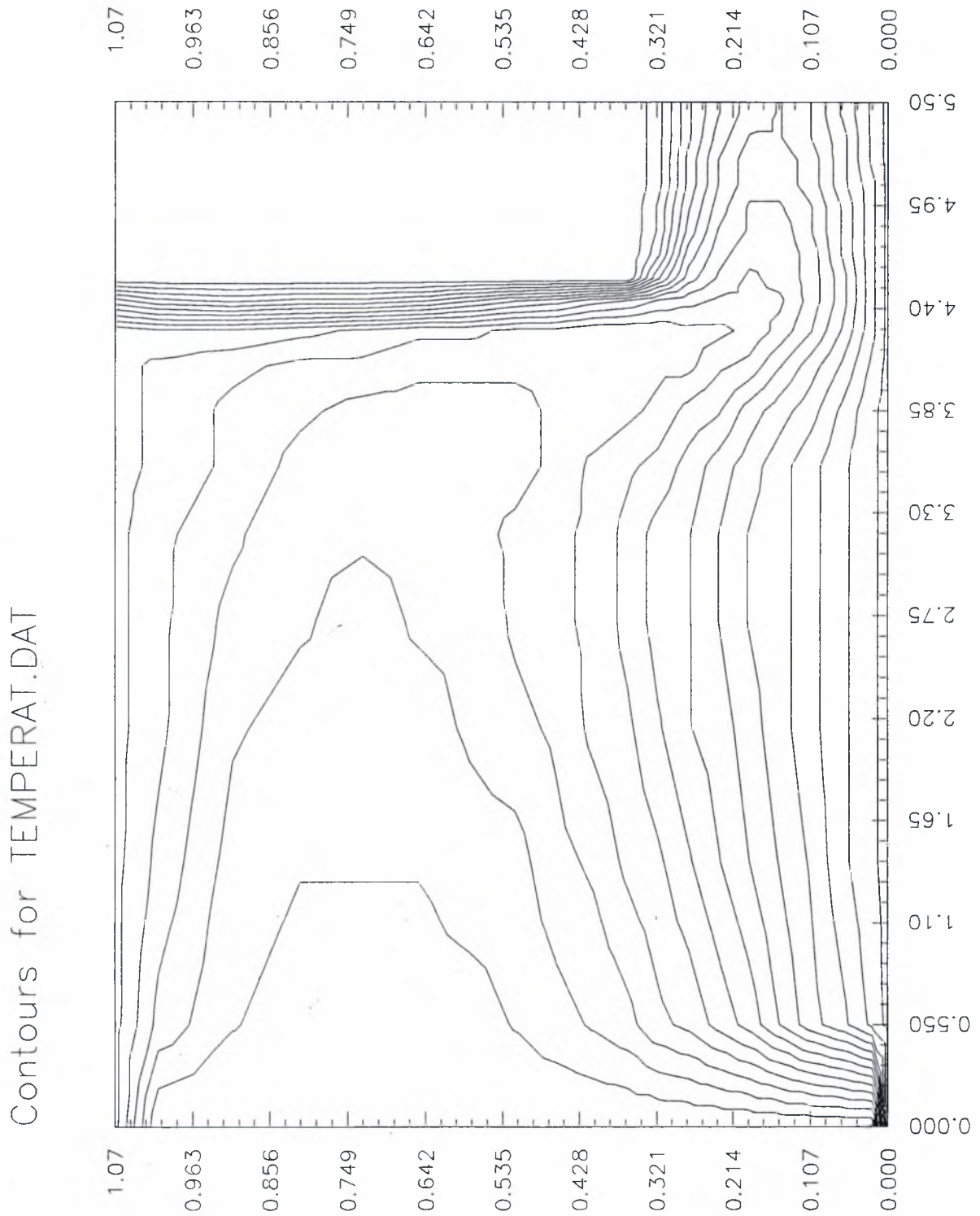


Vector Plot for VECTORS.DAT

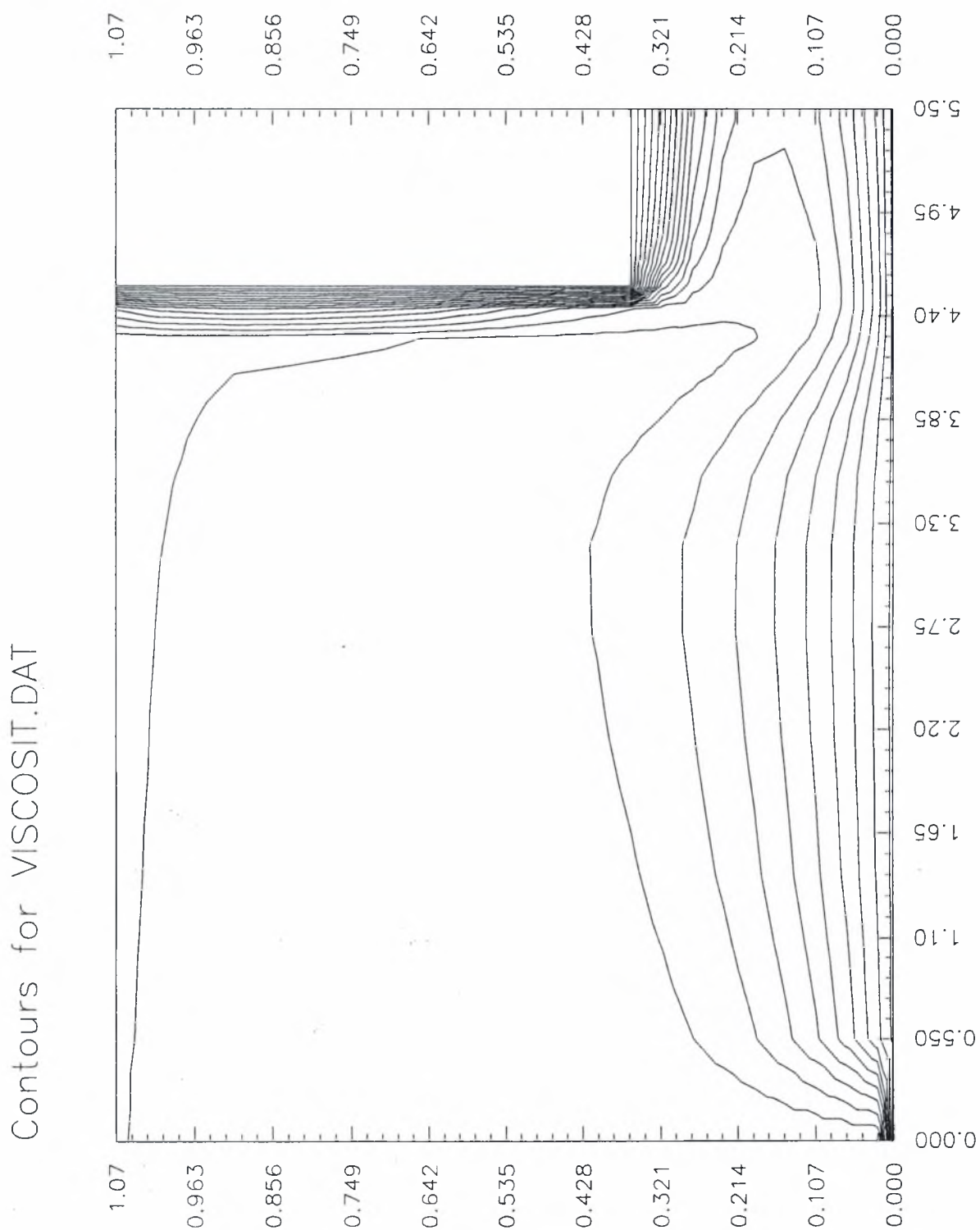


Contours for STREAM.DAT

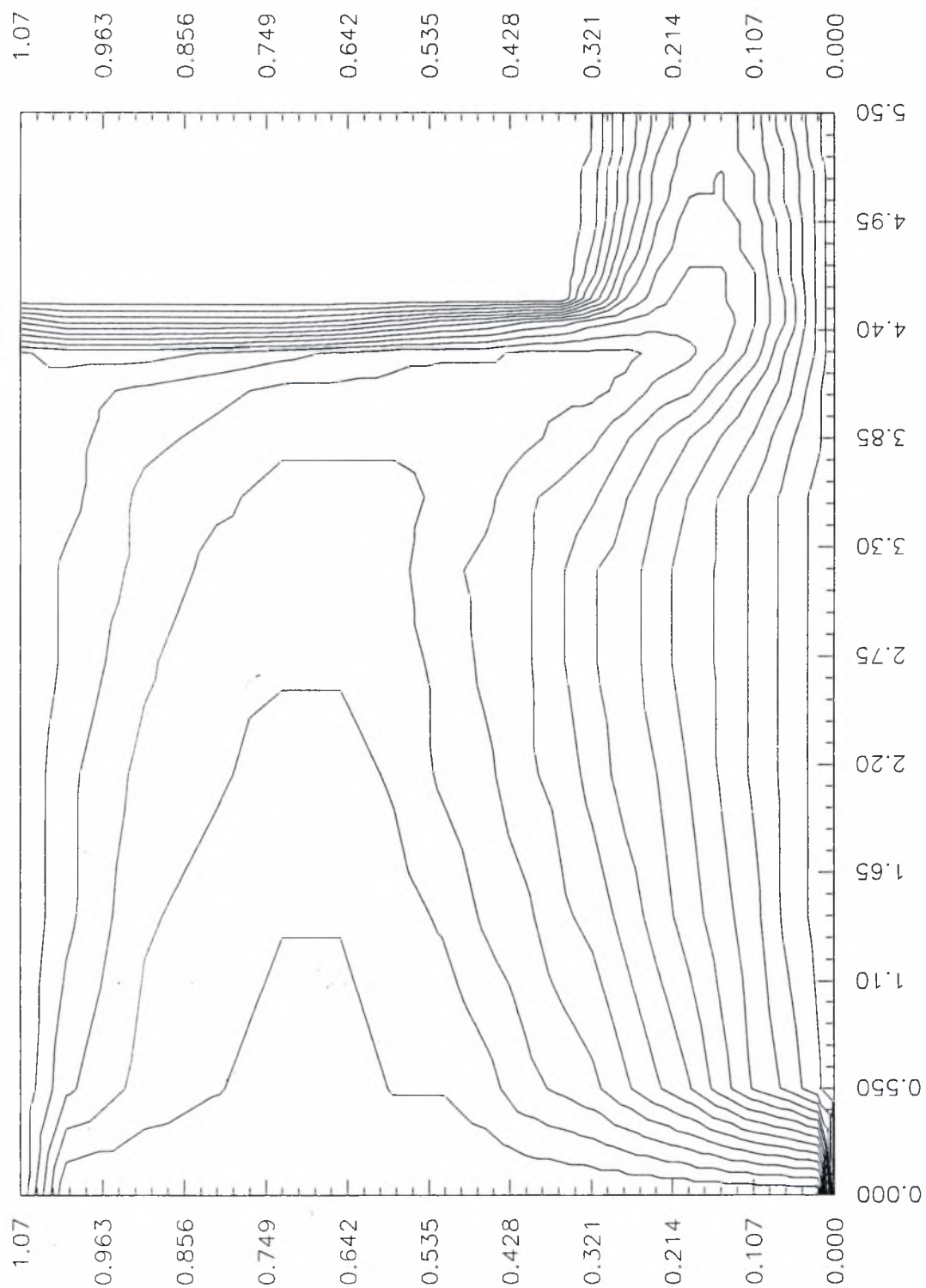








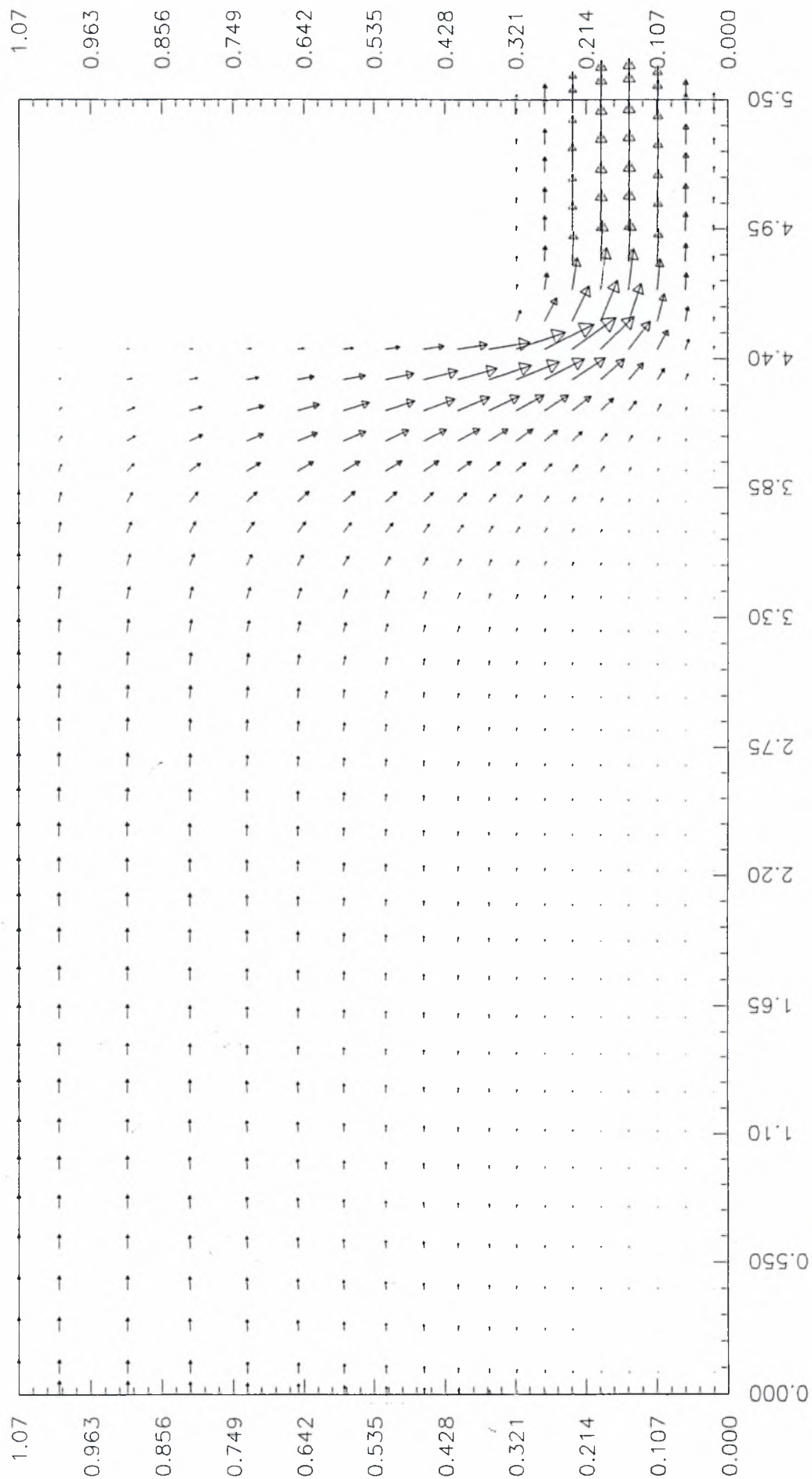
Contours for PRANDTL.DAT



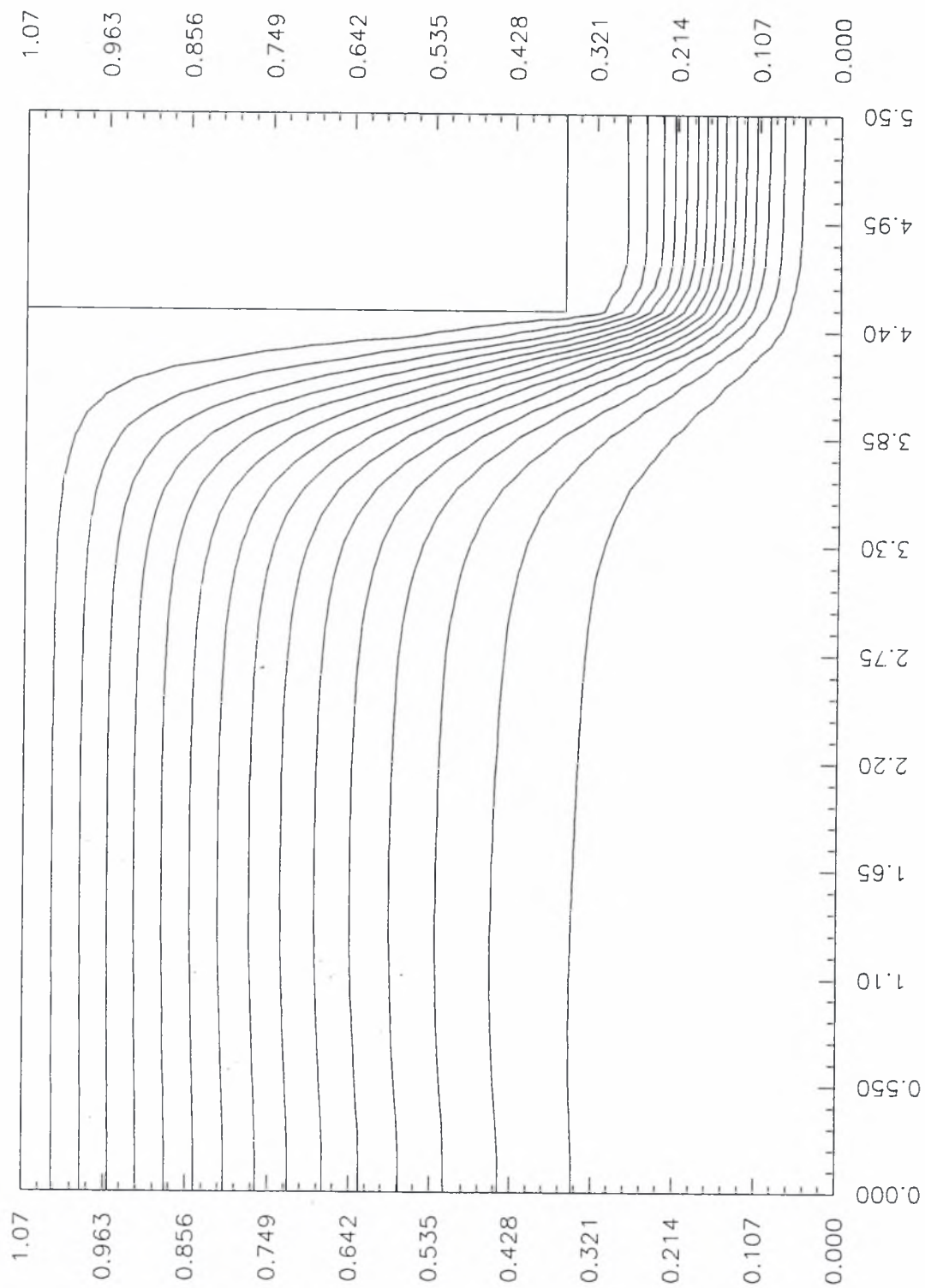
Αποτελέσματα για πλέγμα 40x20

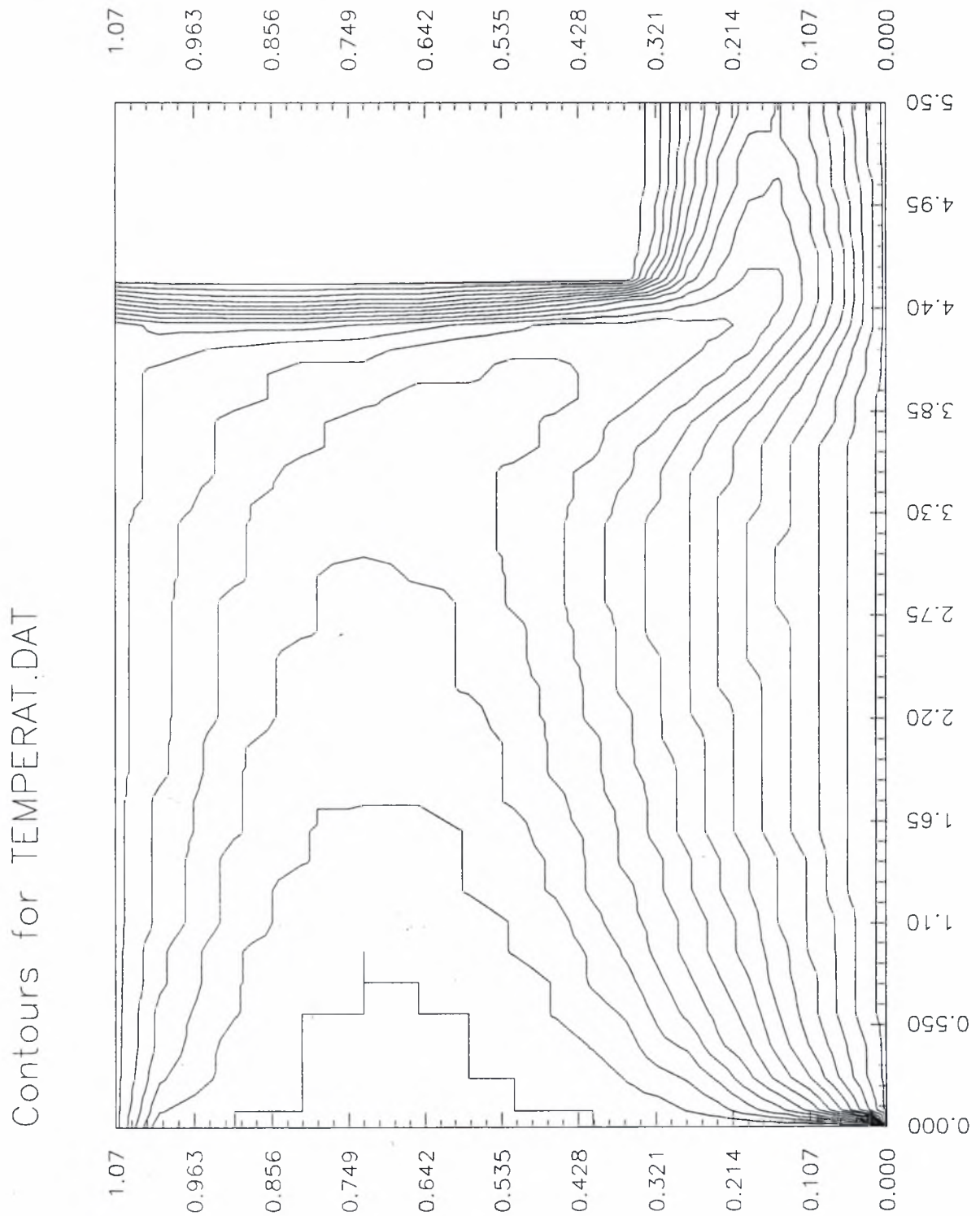
$$(UIN = 3.7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s})$$

Vector Plot for VECTORS.DAT

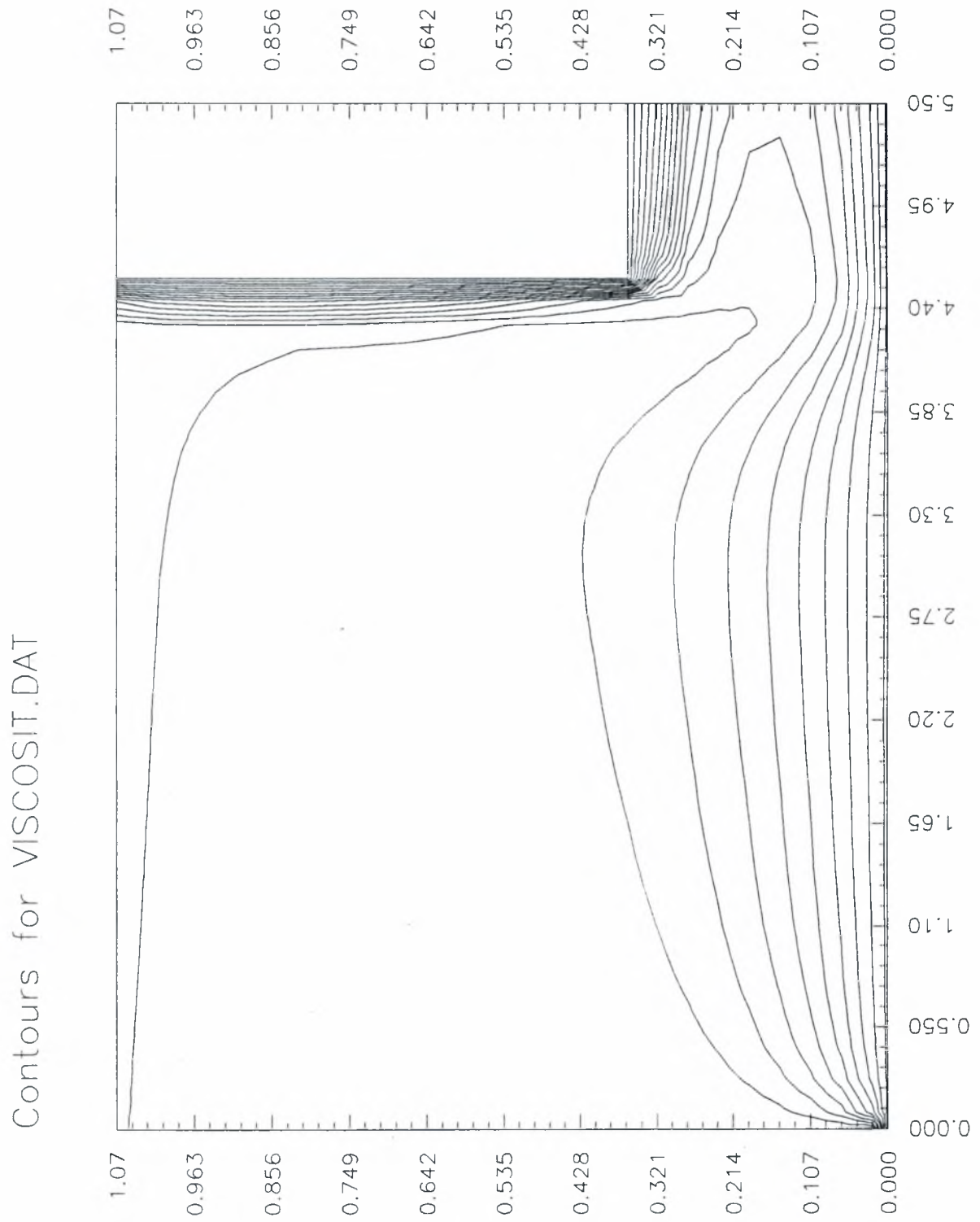


Contours for STREAM.DAT

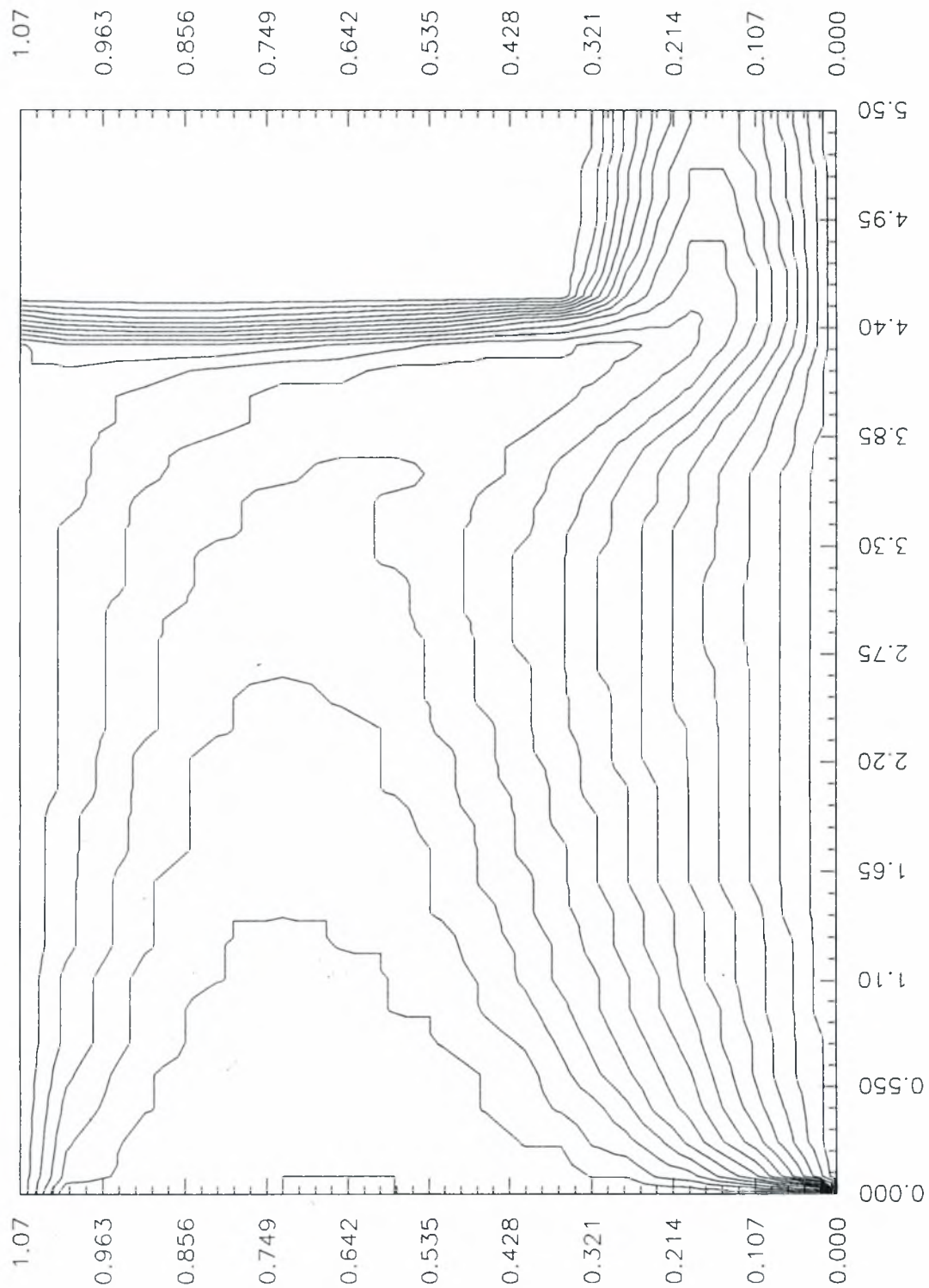






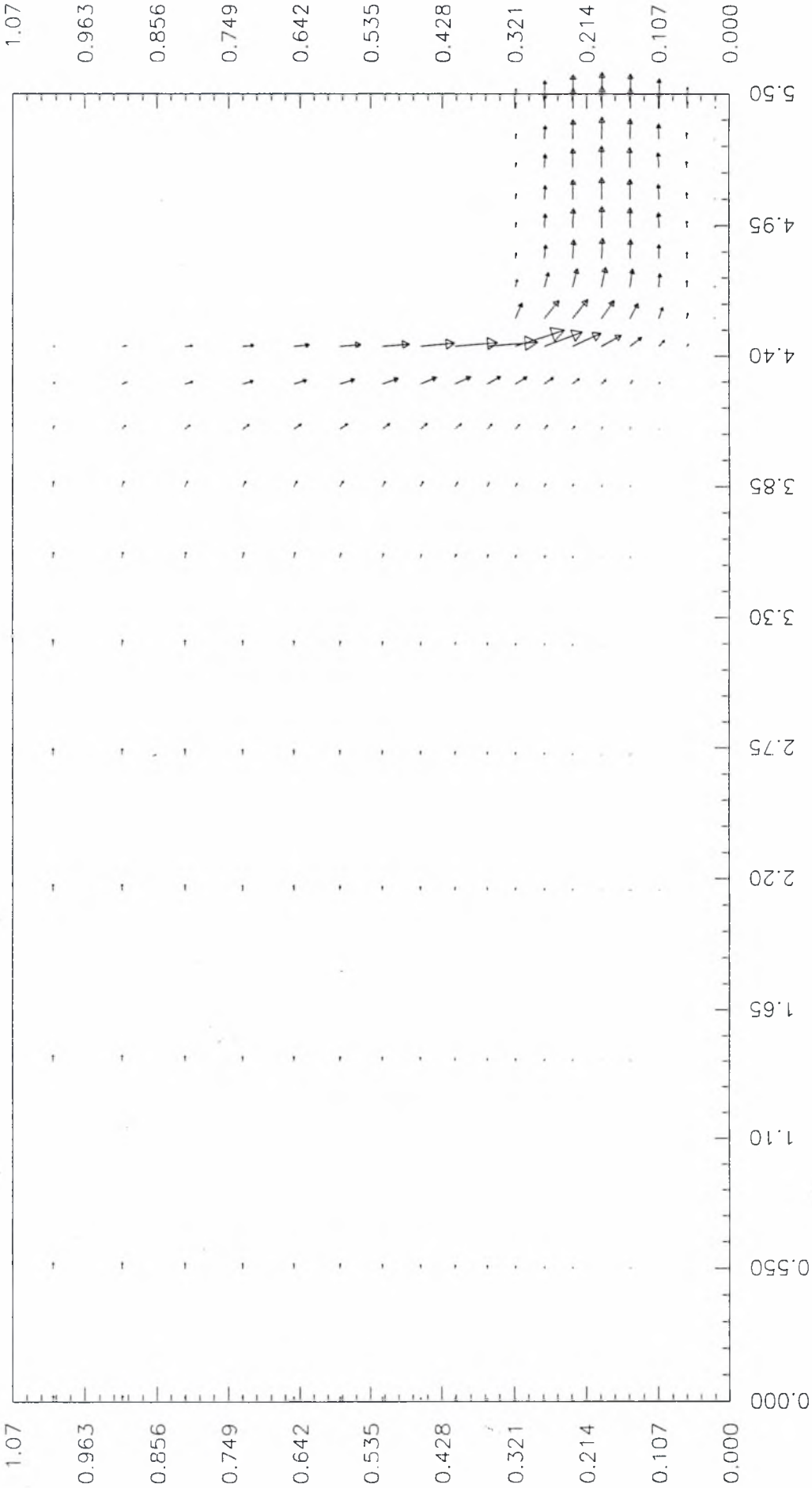


Contours for PRANDTL.DAT

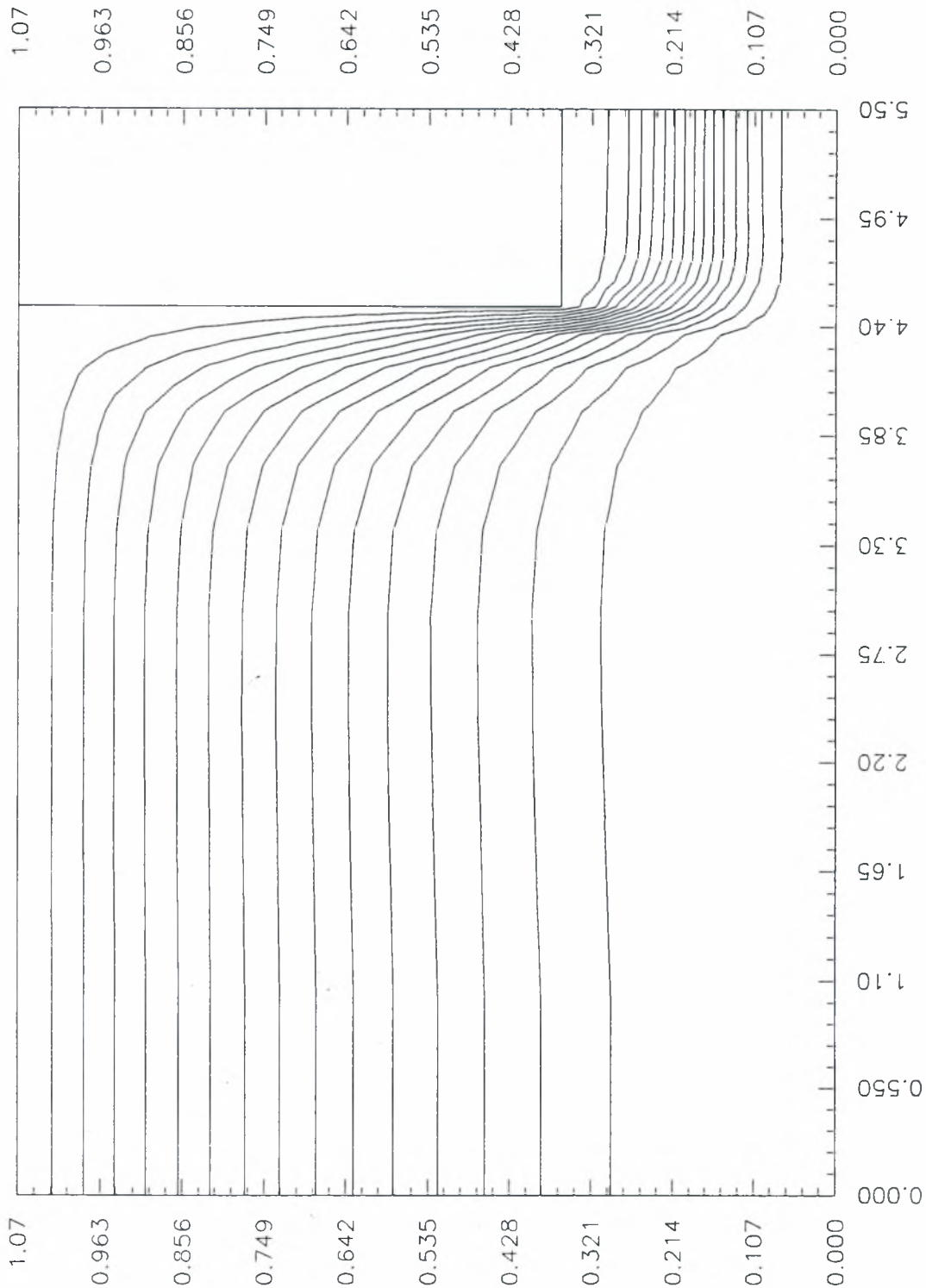


Αποτελέσματα με ταχύτητα εισόδου  $UIN = 3.7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

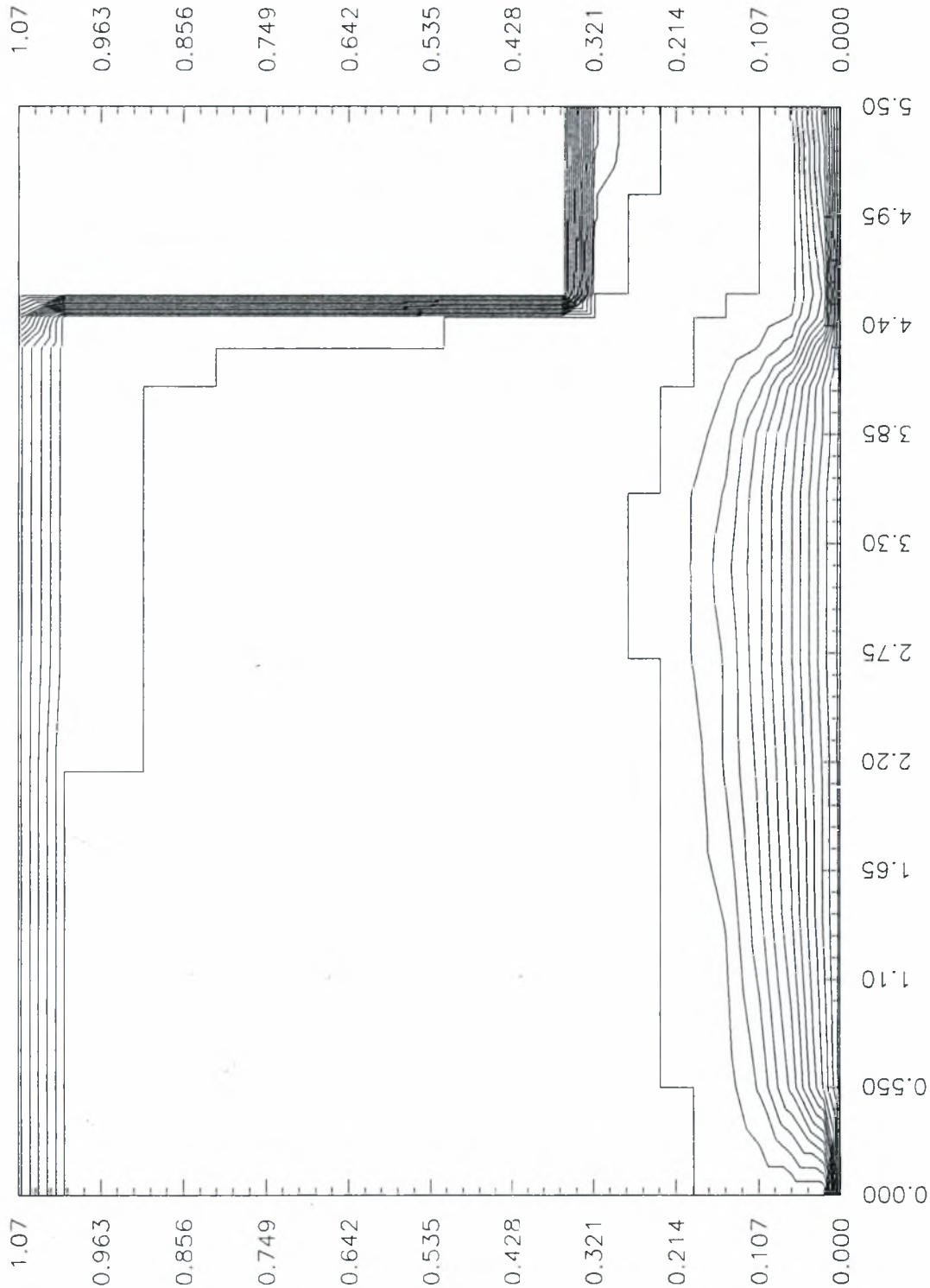
Vector Plot for VECTORS.DAT



Contours for STREAM.DAT

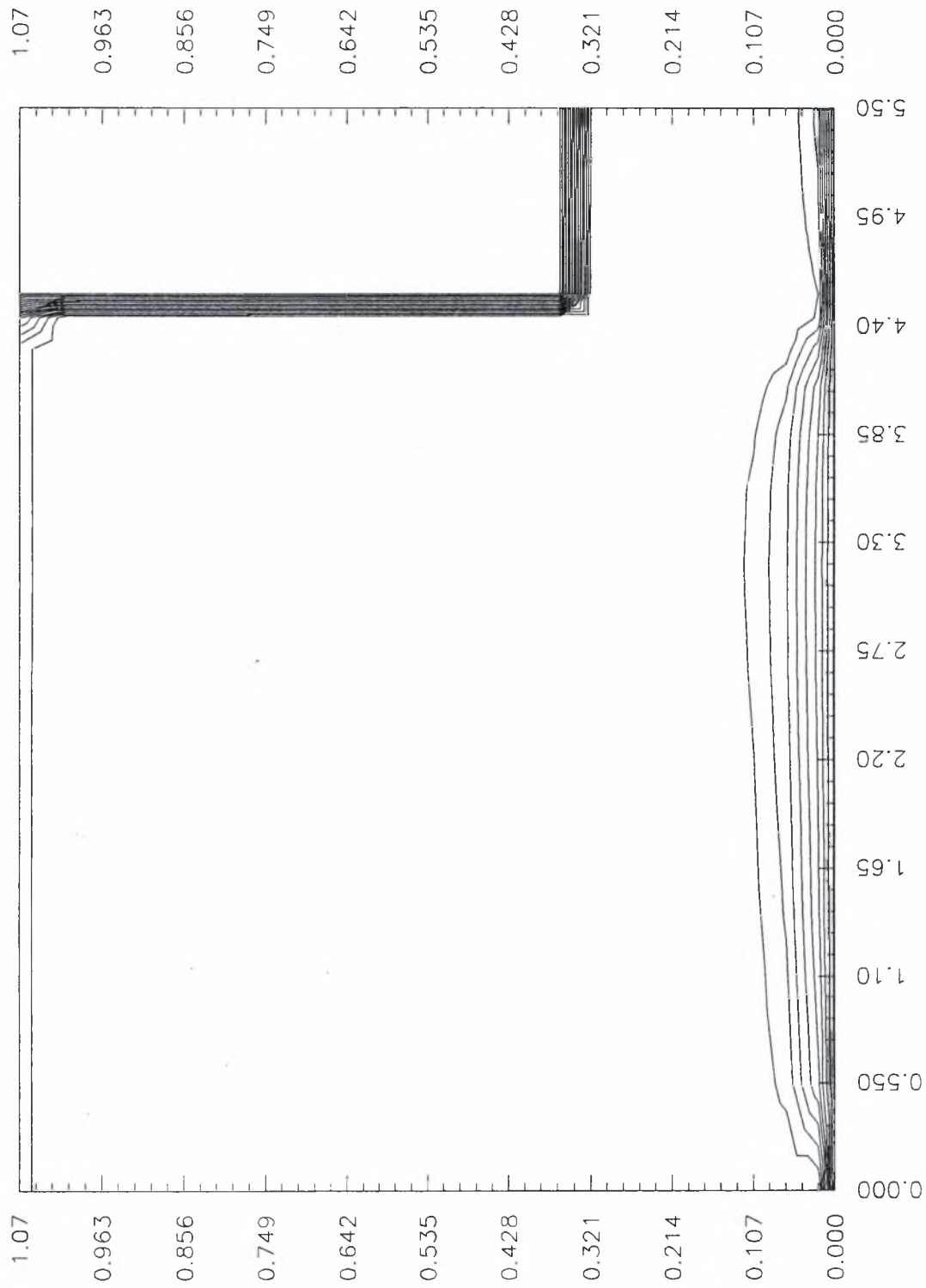


Contours for TEMPERAT.DAT

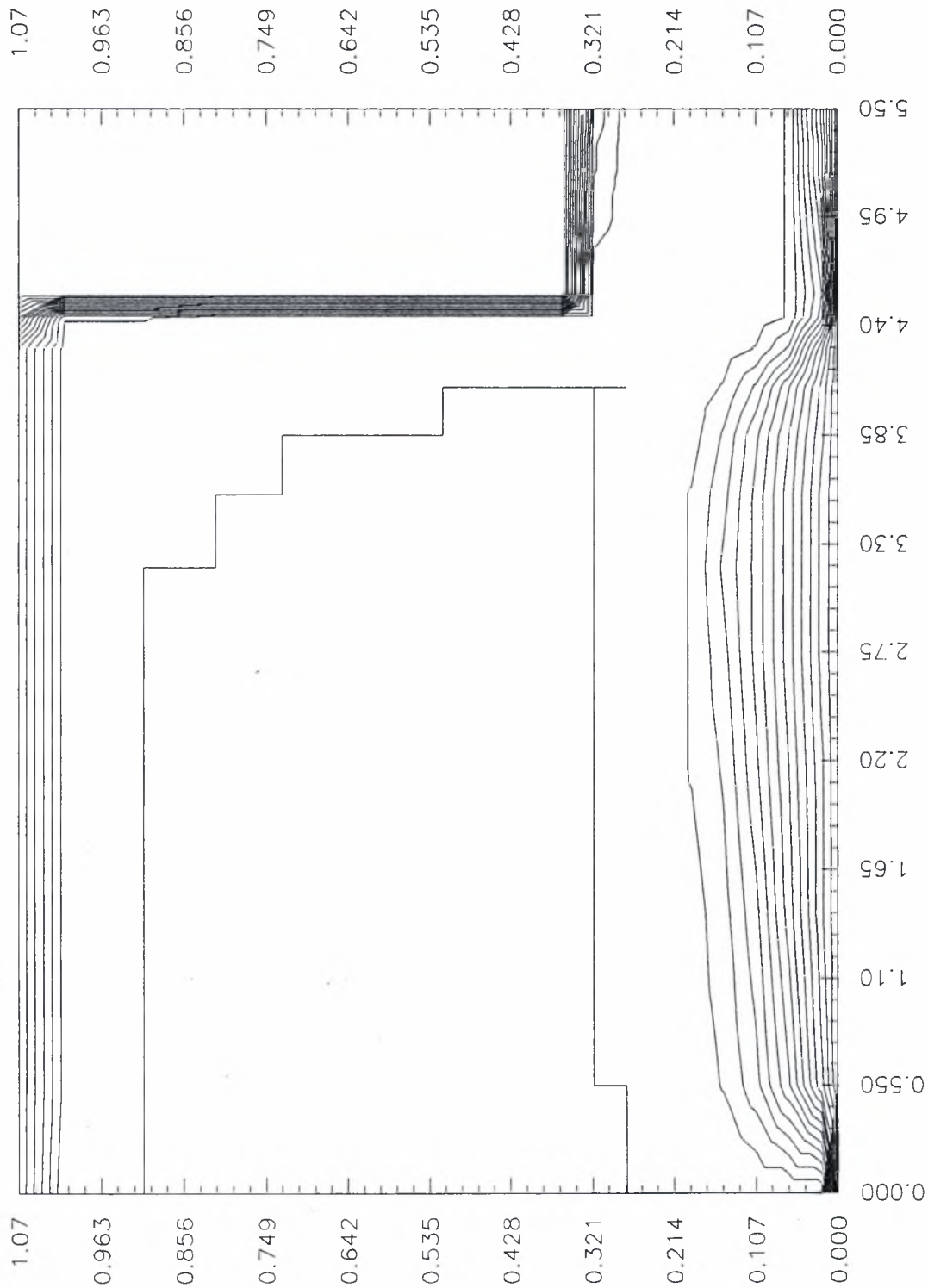




Contours for VISCOSIT.DAT



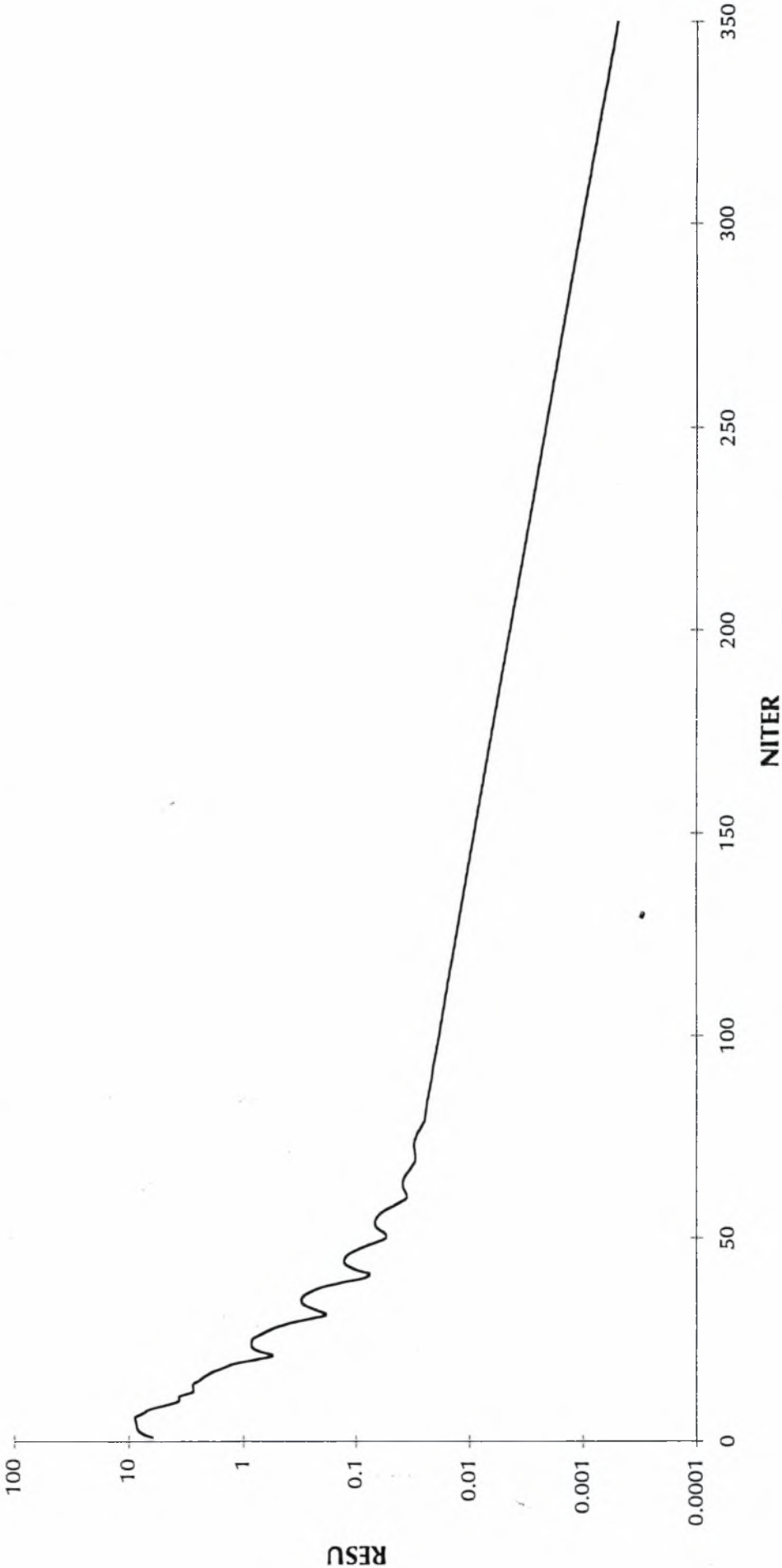
Contours for PRANDTL.DAT



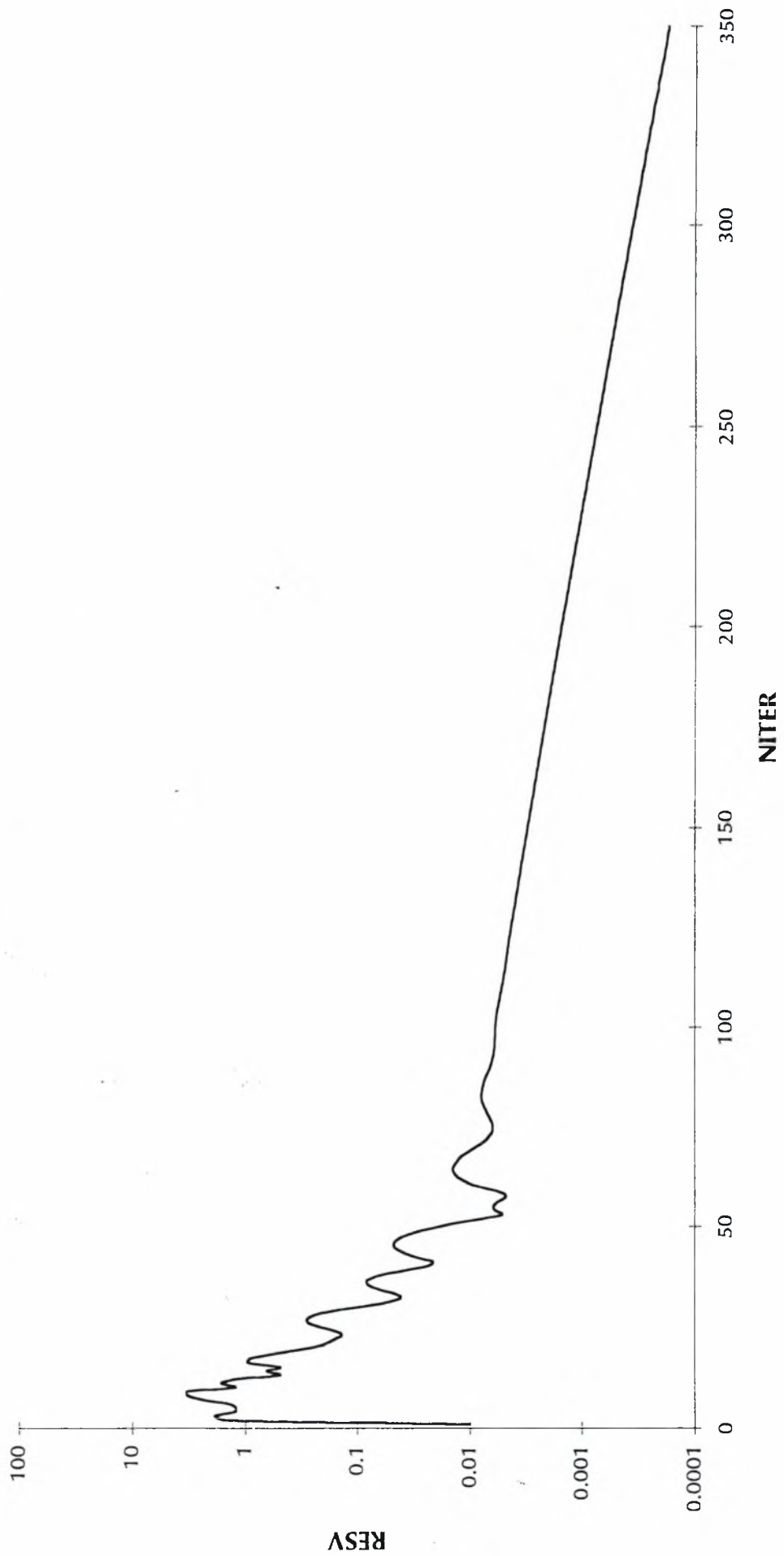
Αποτελέσματα με ταχύτητα εισόδου  $UIN = 3.7 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$



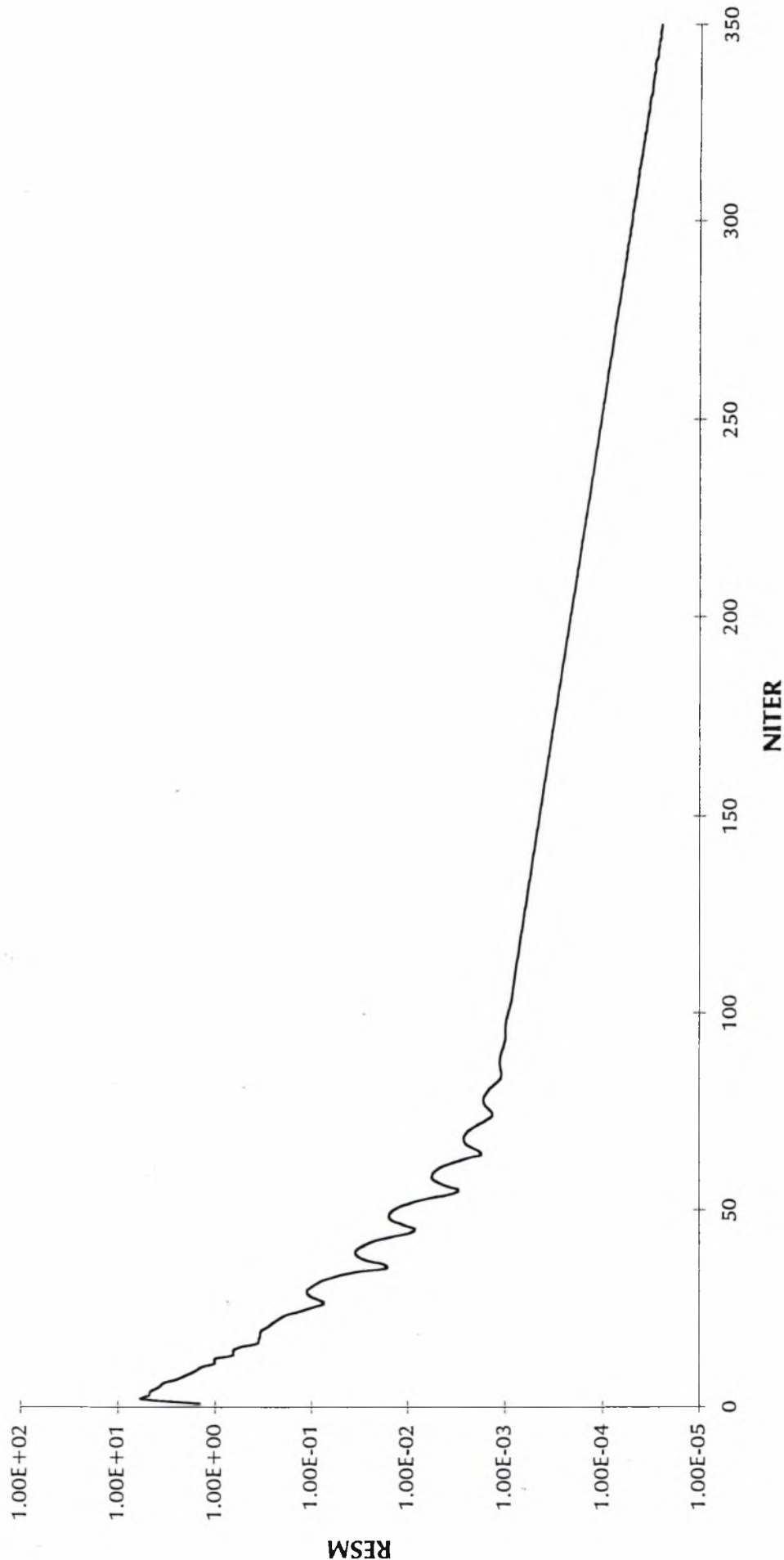
Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της ταχύτητας u (RESU) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)



Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της ταχύτητας  $v$  (RESV) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)

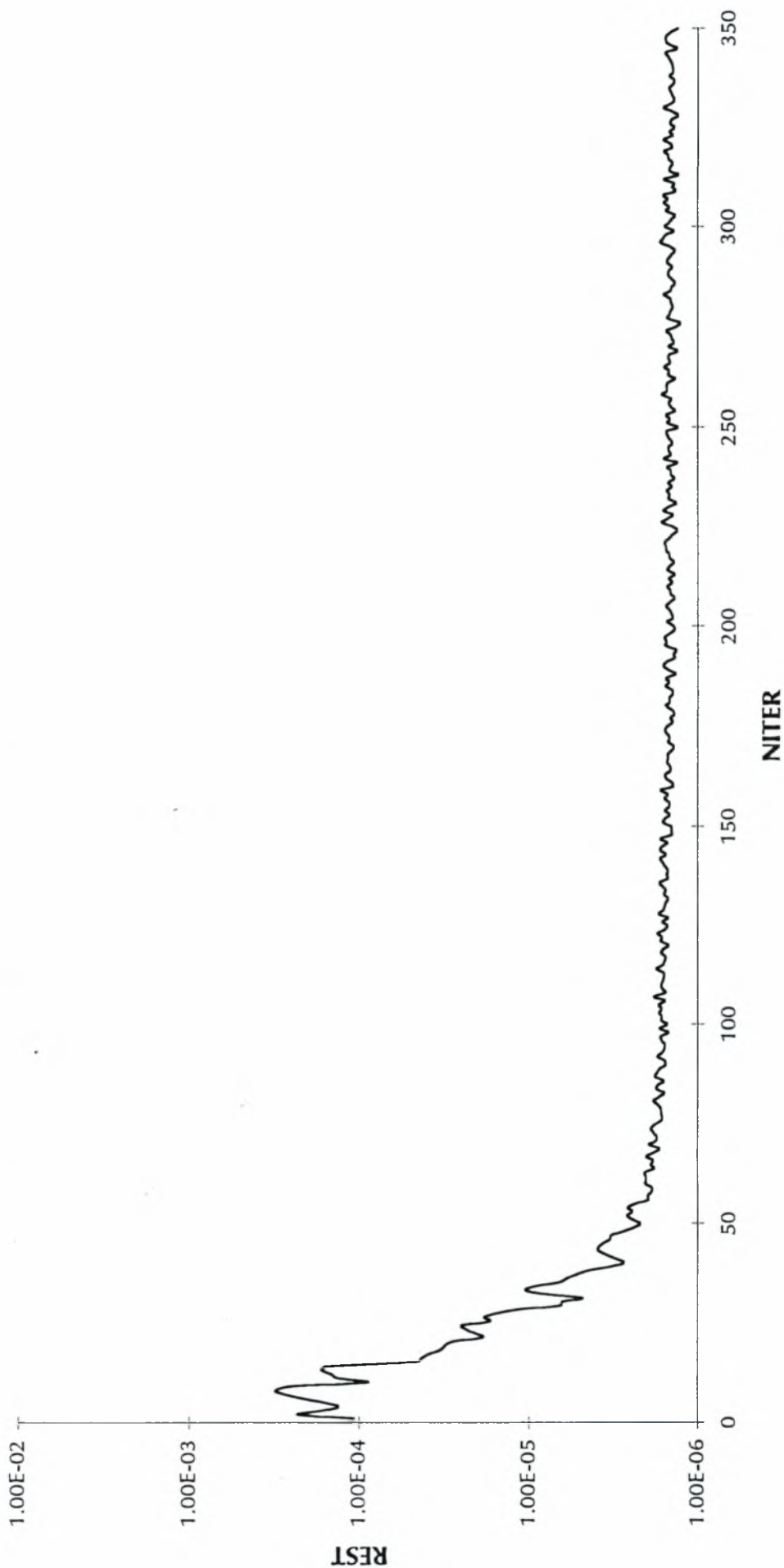


Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της μάζας (RESM) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)

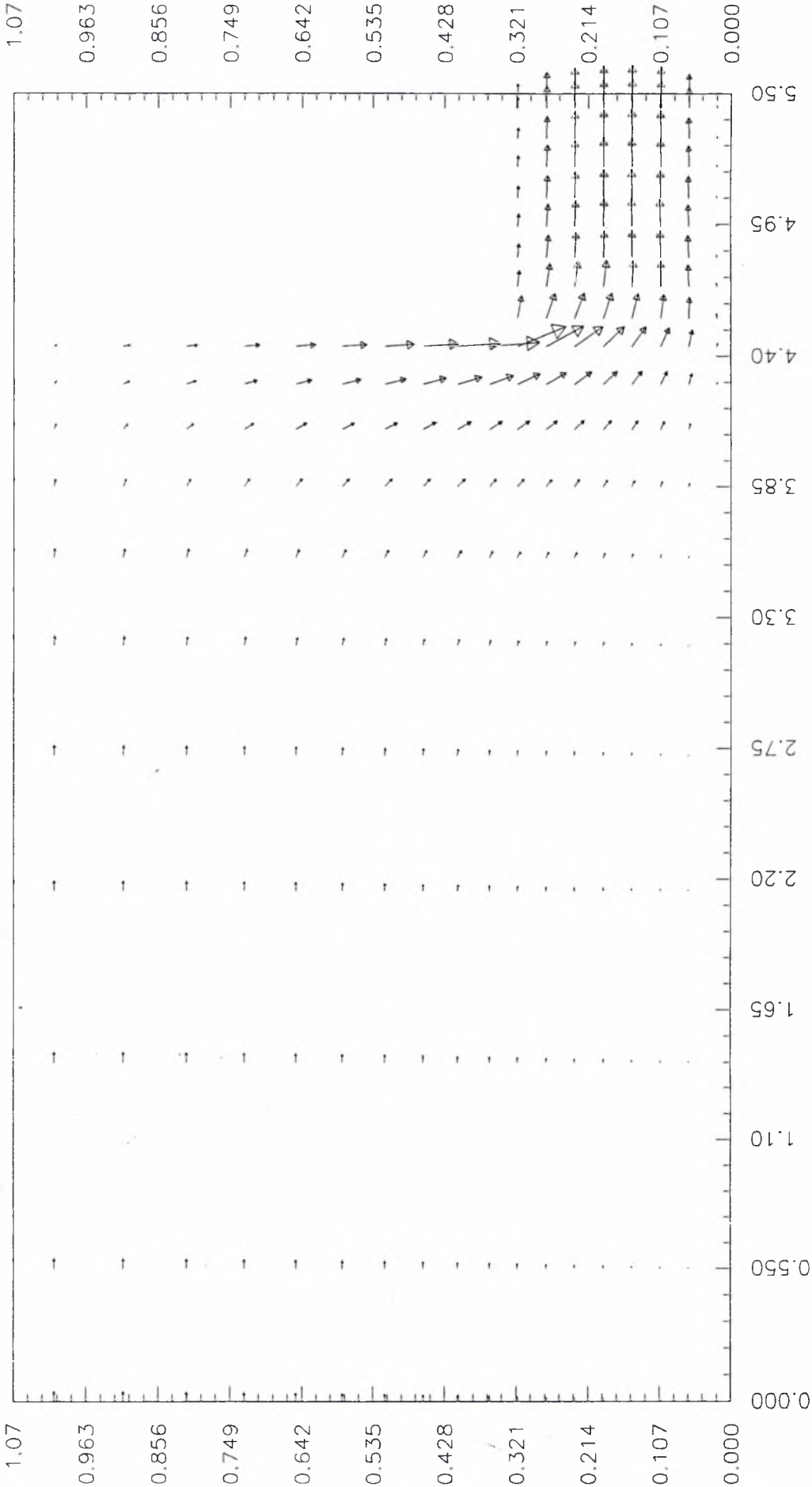




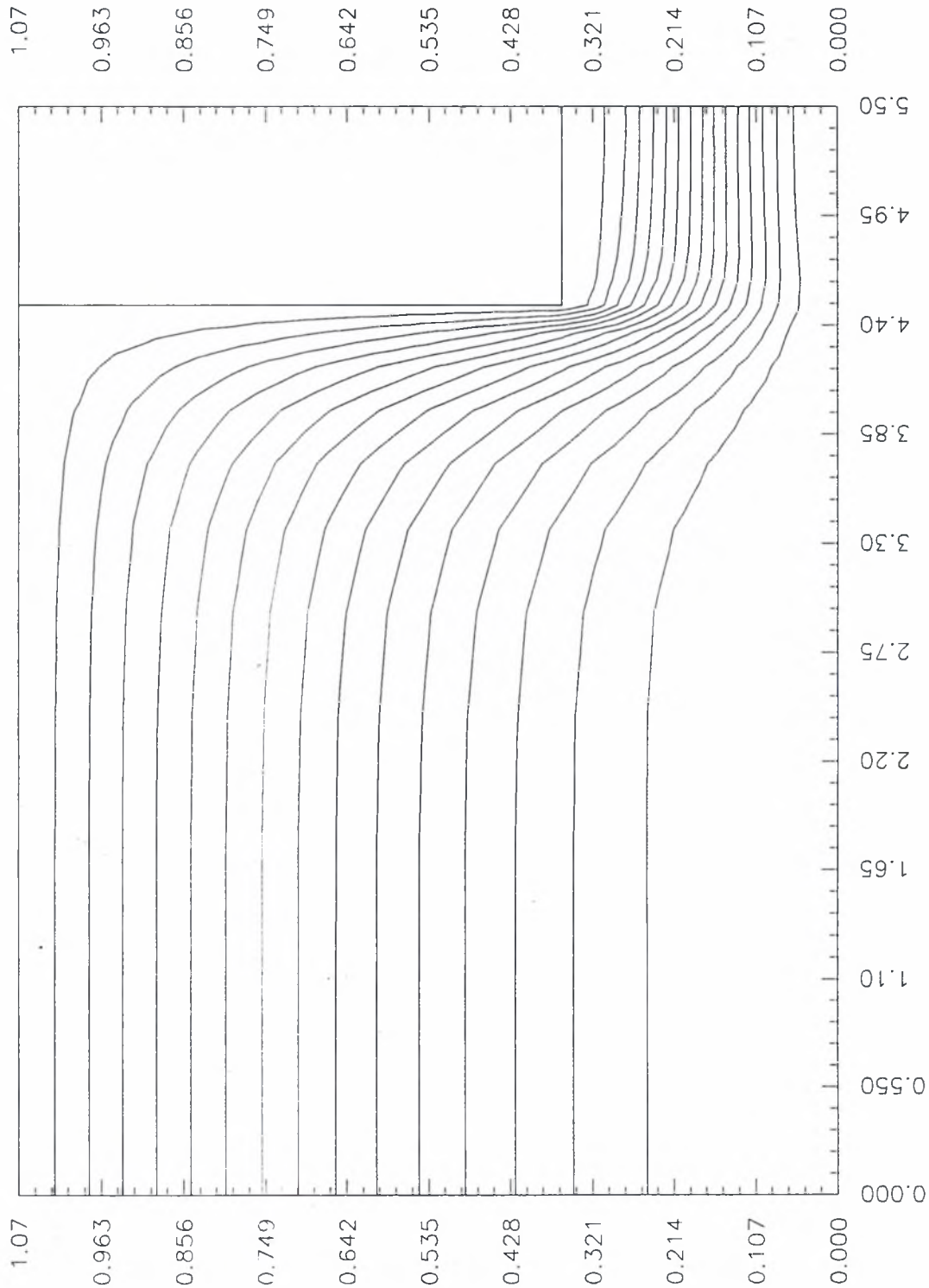
Λογαριθμικό διάγραμμα της συνολικής υπολειμματικής τιμής των εξισώσεων της θερμοκρασίας (REST) σε συνάρτηση με τον αριθμό επαναλήψεων (NITER)



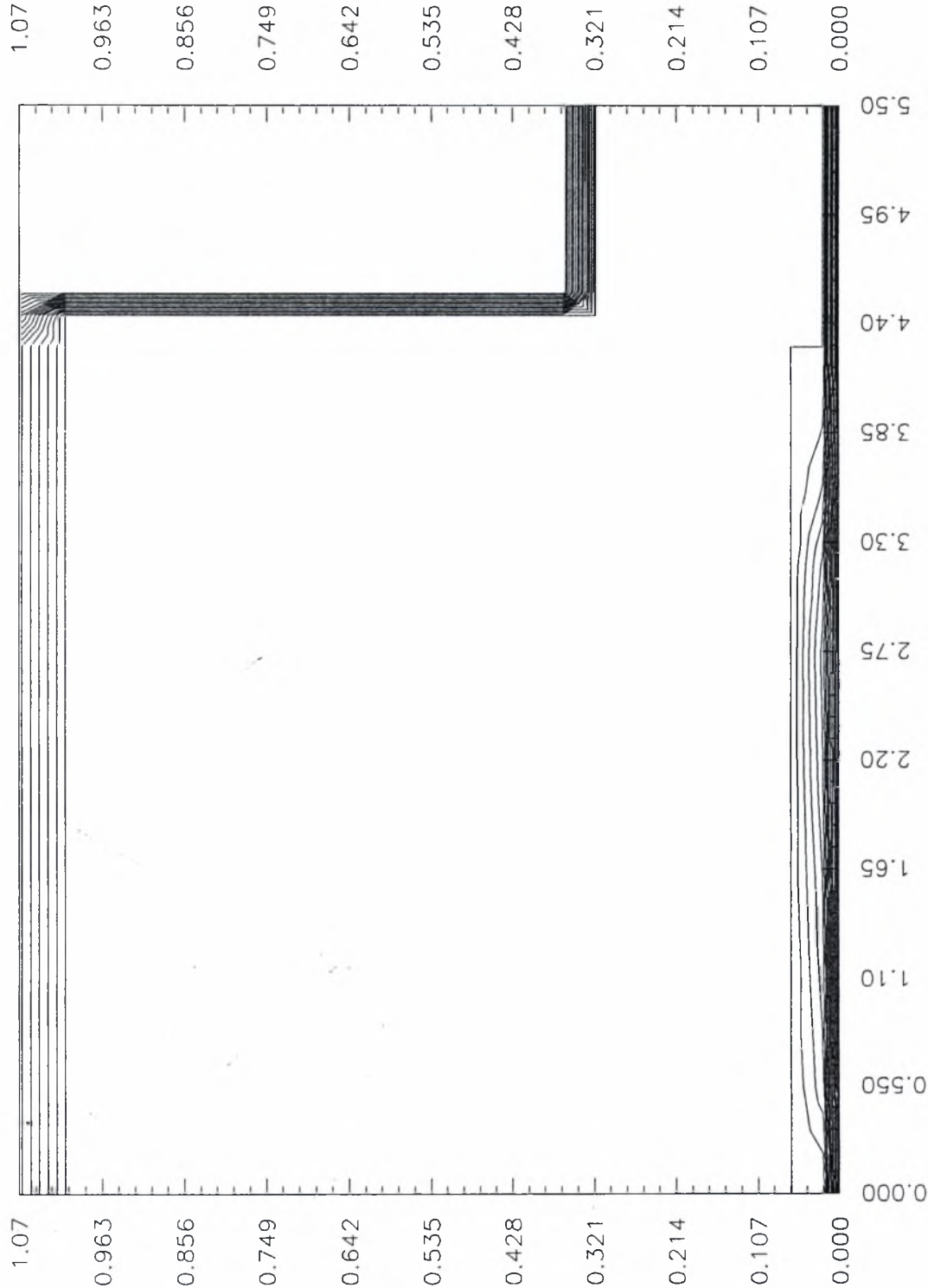
Vector Plot for VECTORS.DAT



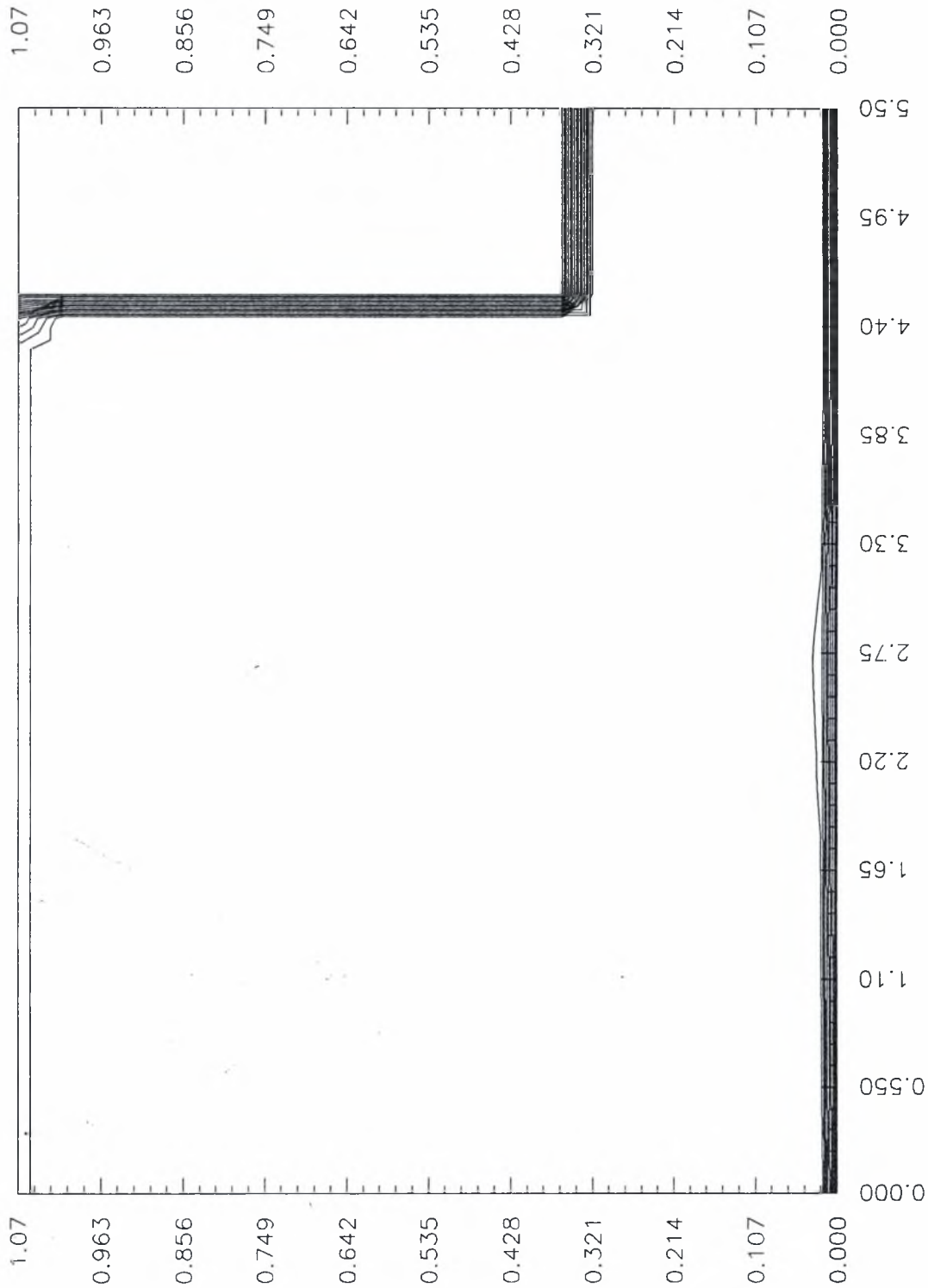
Contours for STREAM.DAT



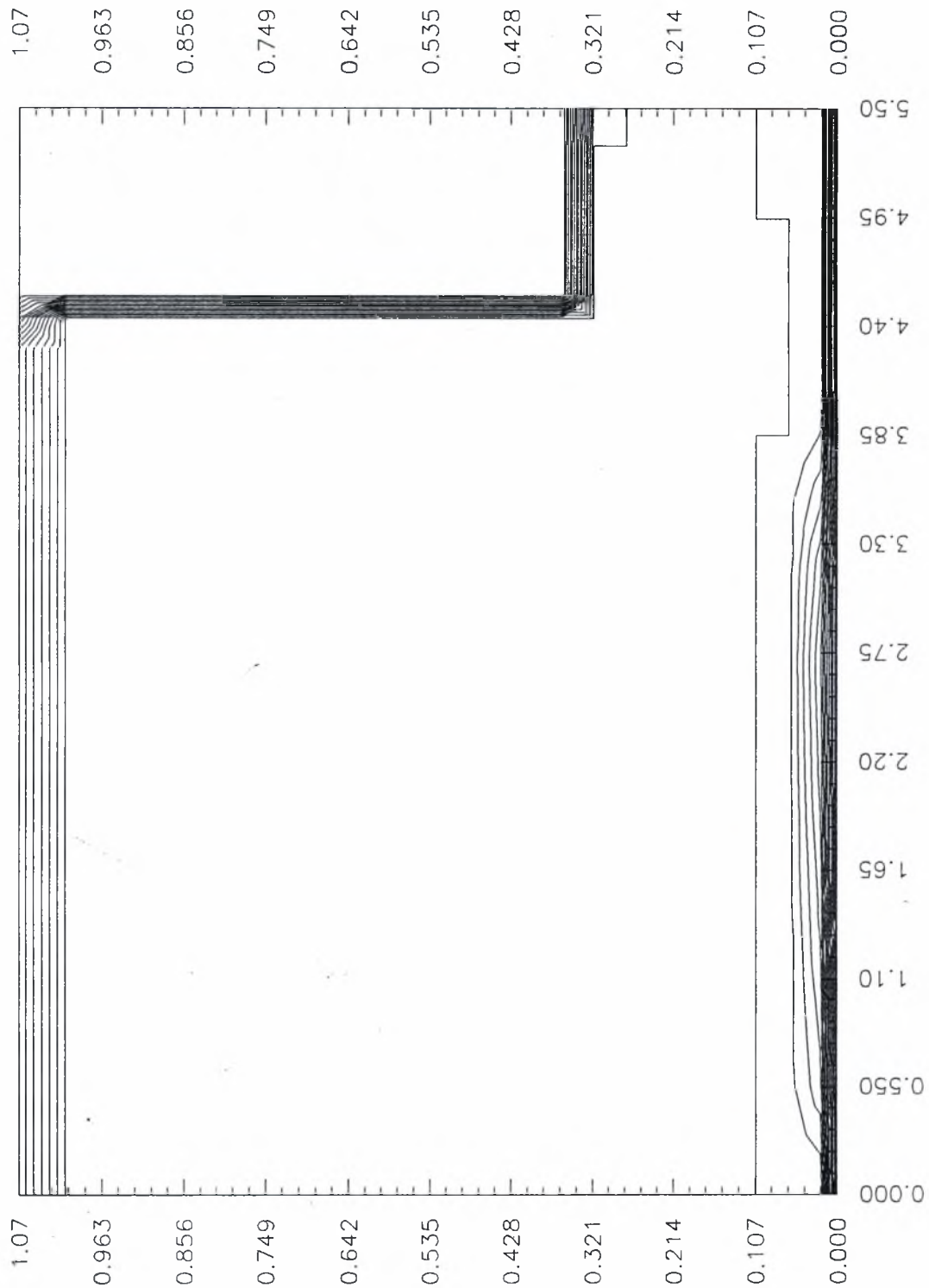
Contours for TEMPERAT.DAT



Contours for VISCOSIT.DAT



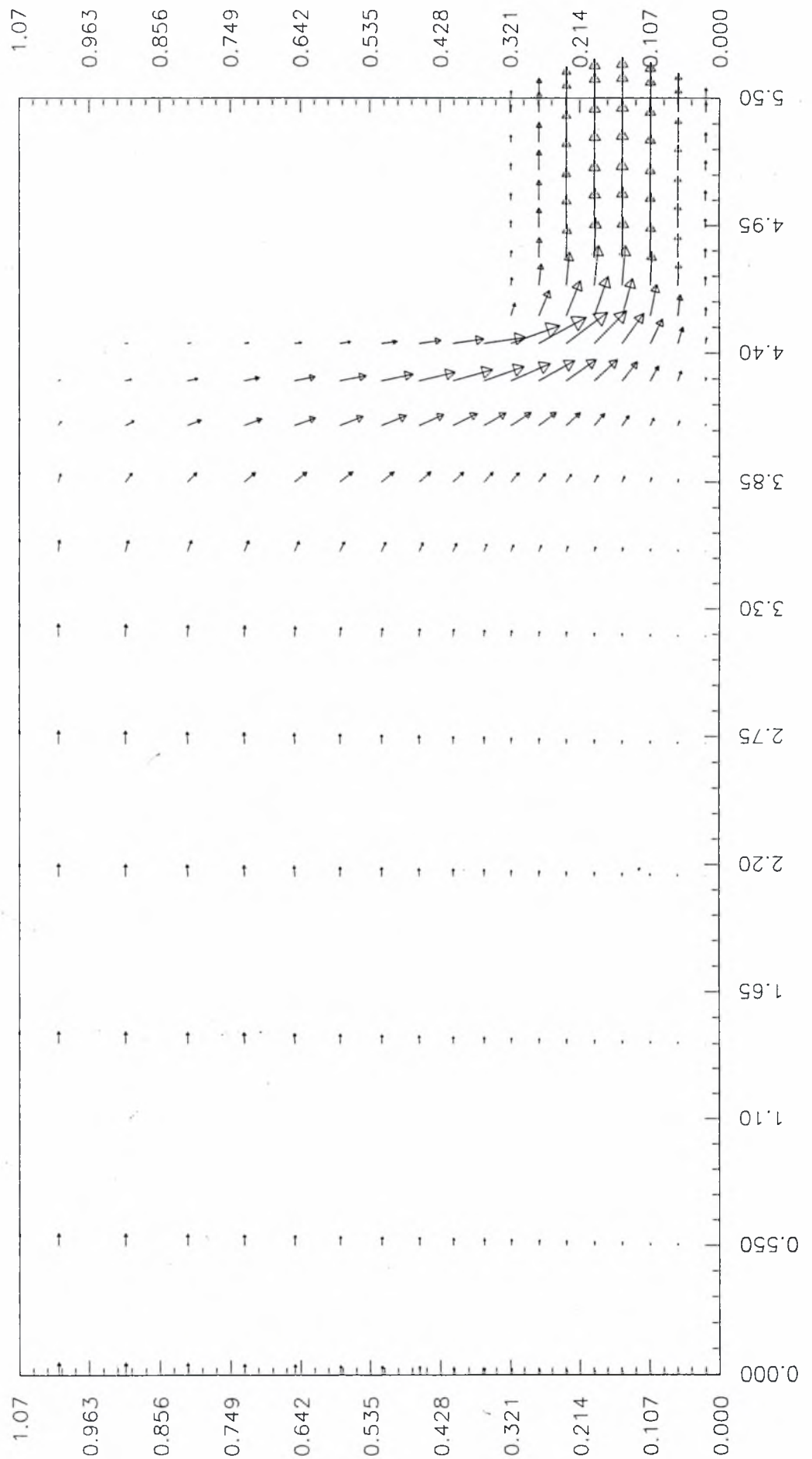
Contours for PRANDTL.DAT



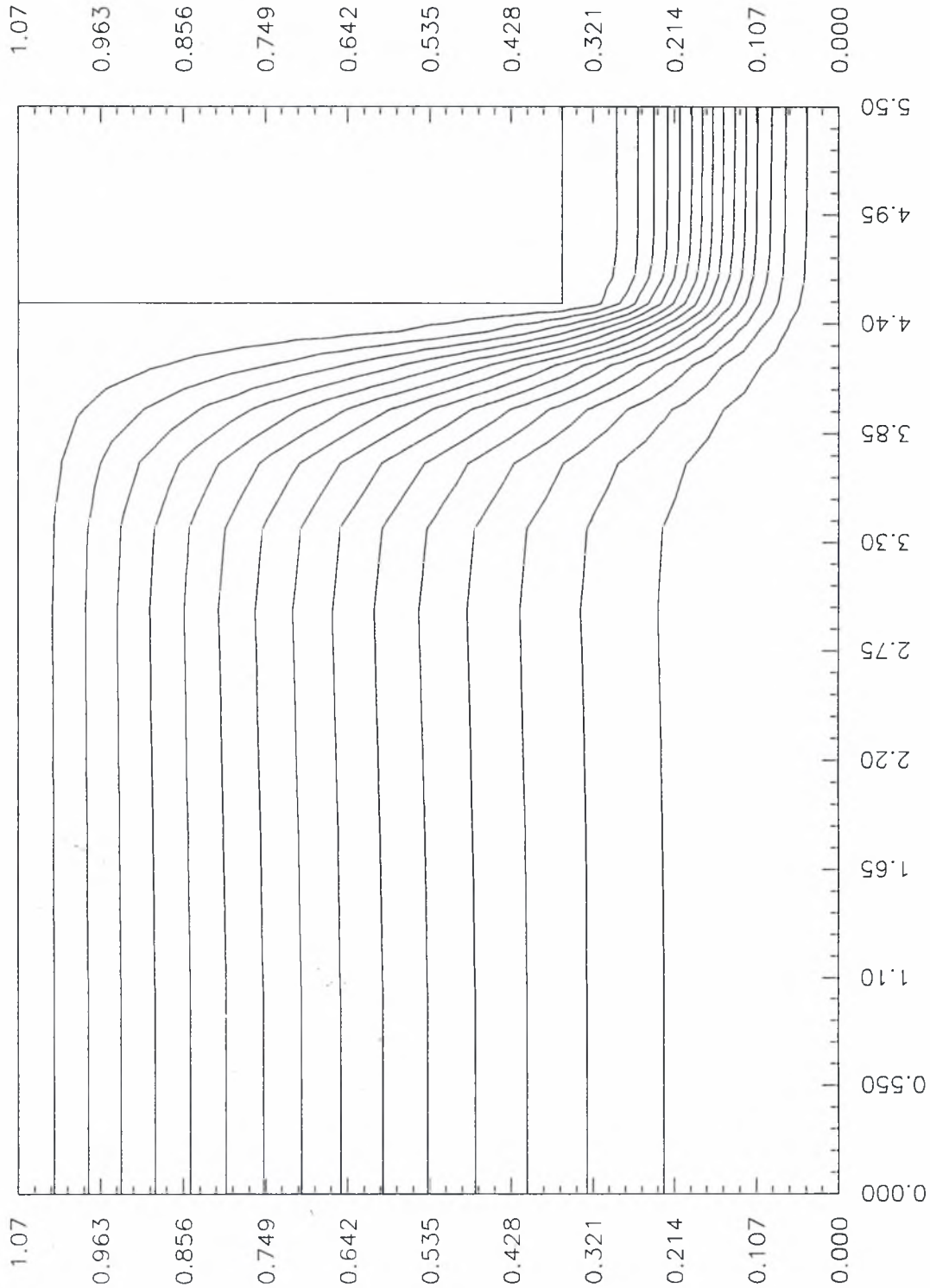


Αποτελέσματα με θερμοκρασία εισόδου  $T_{IN}=1300^{\circ}\text{C}$

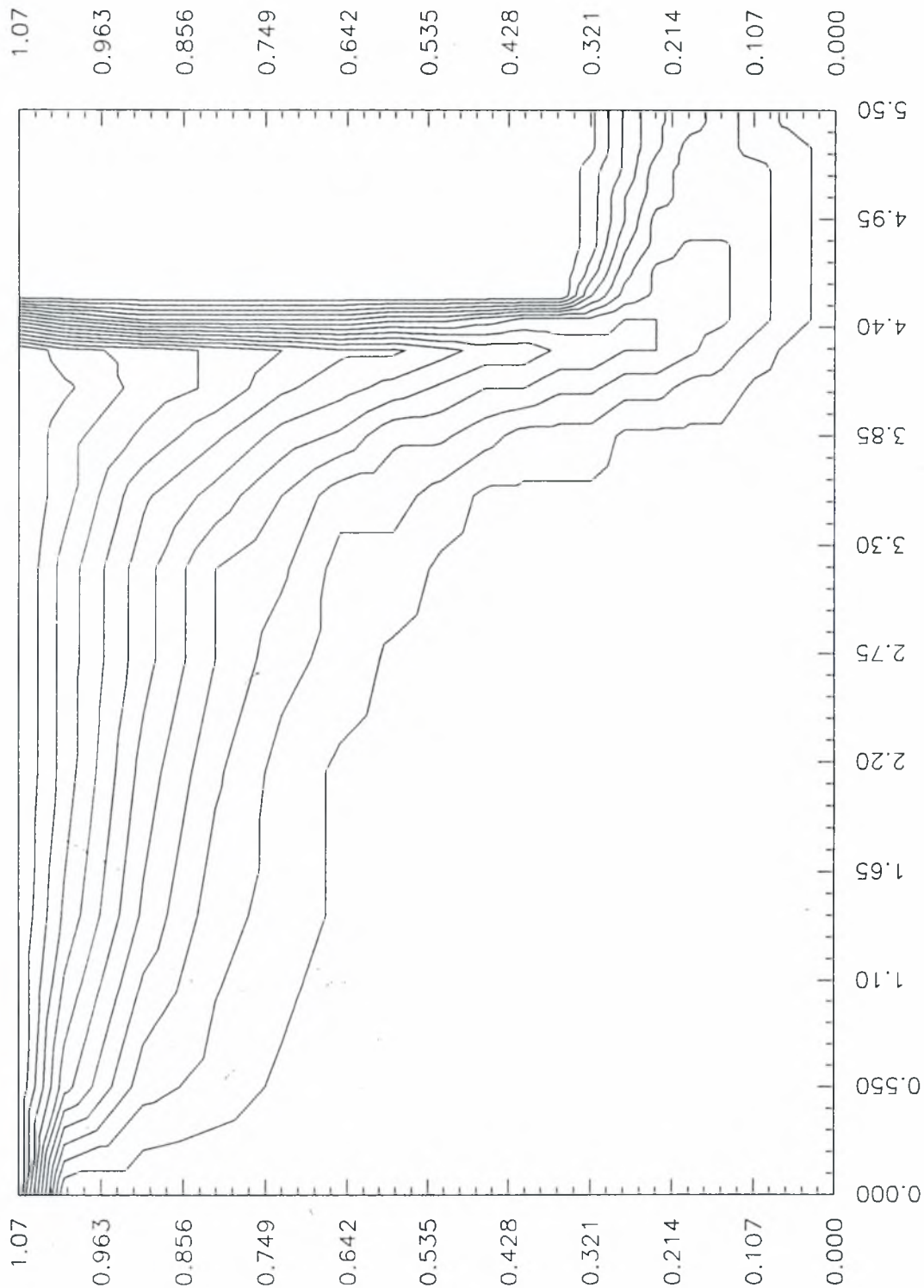
Vector Plot for VECTORS.DAT



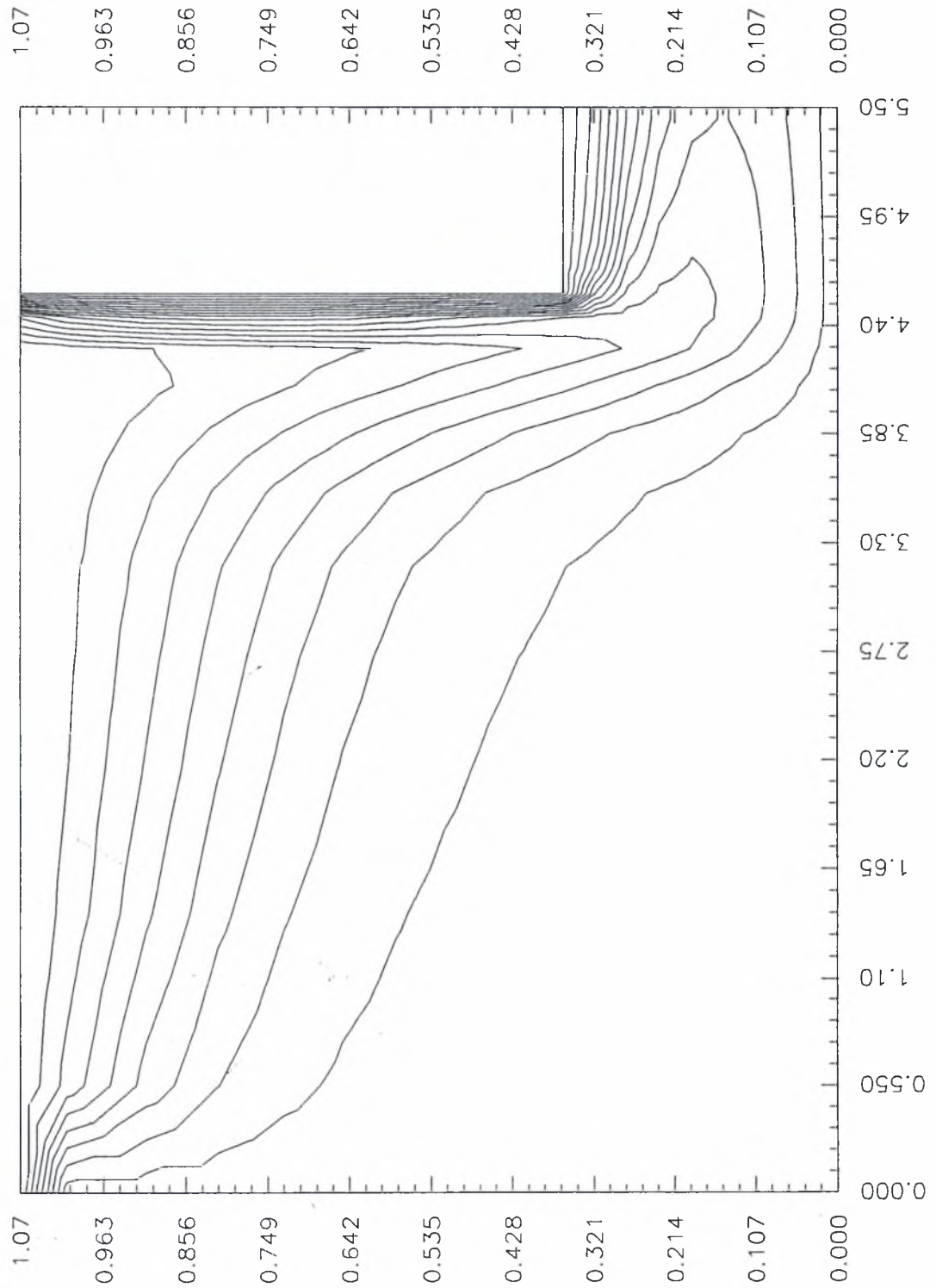
Contours for STREAM.DAT

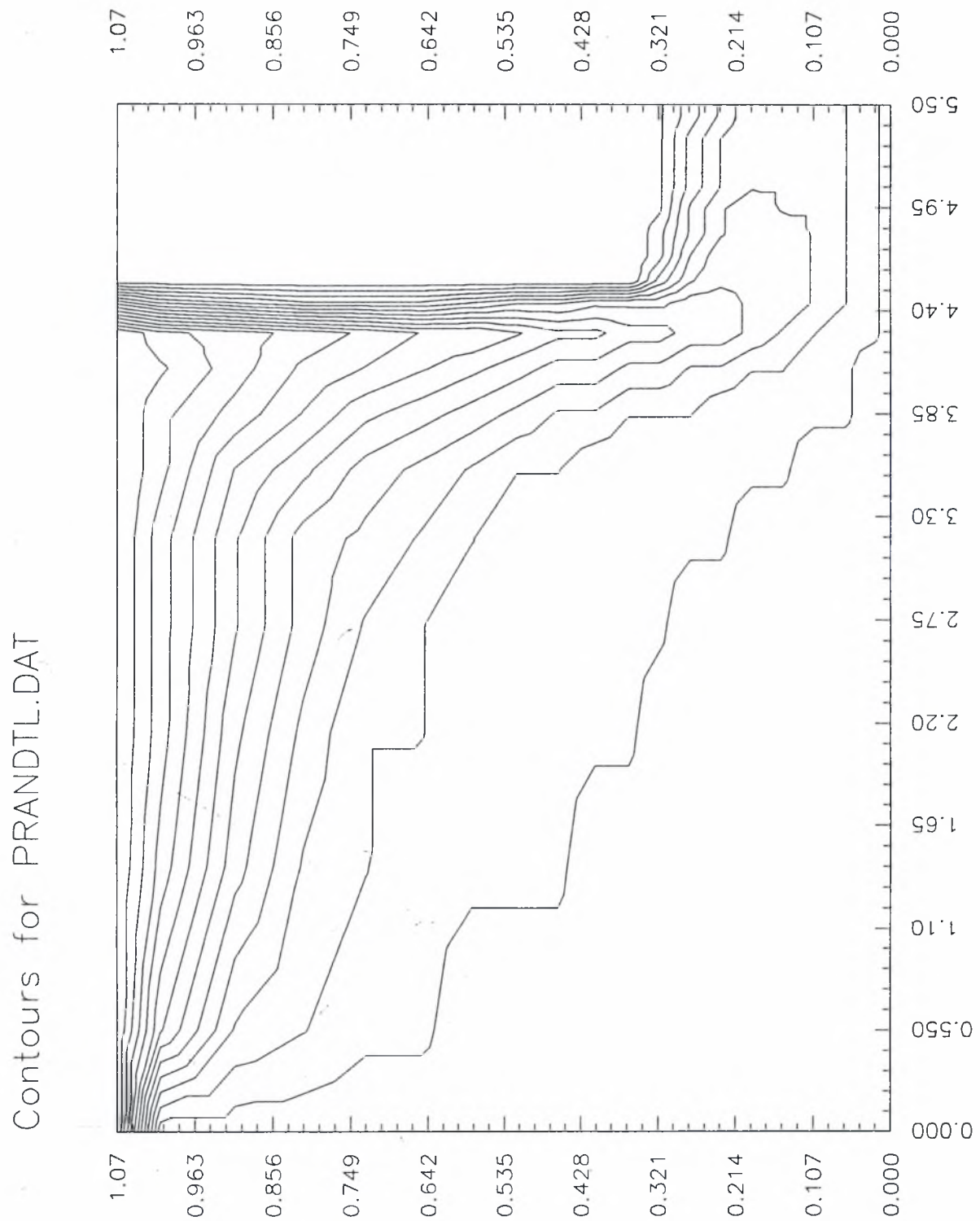


Contours for TEMPERAT.DAT



Contours for VISCOSIT.DAT

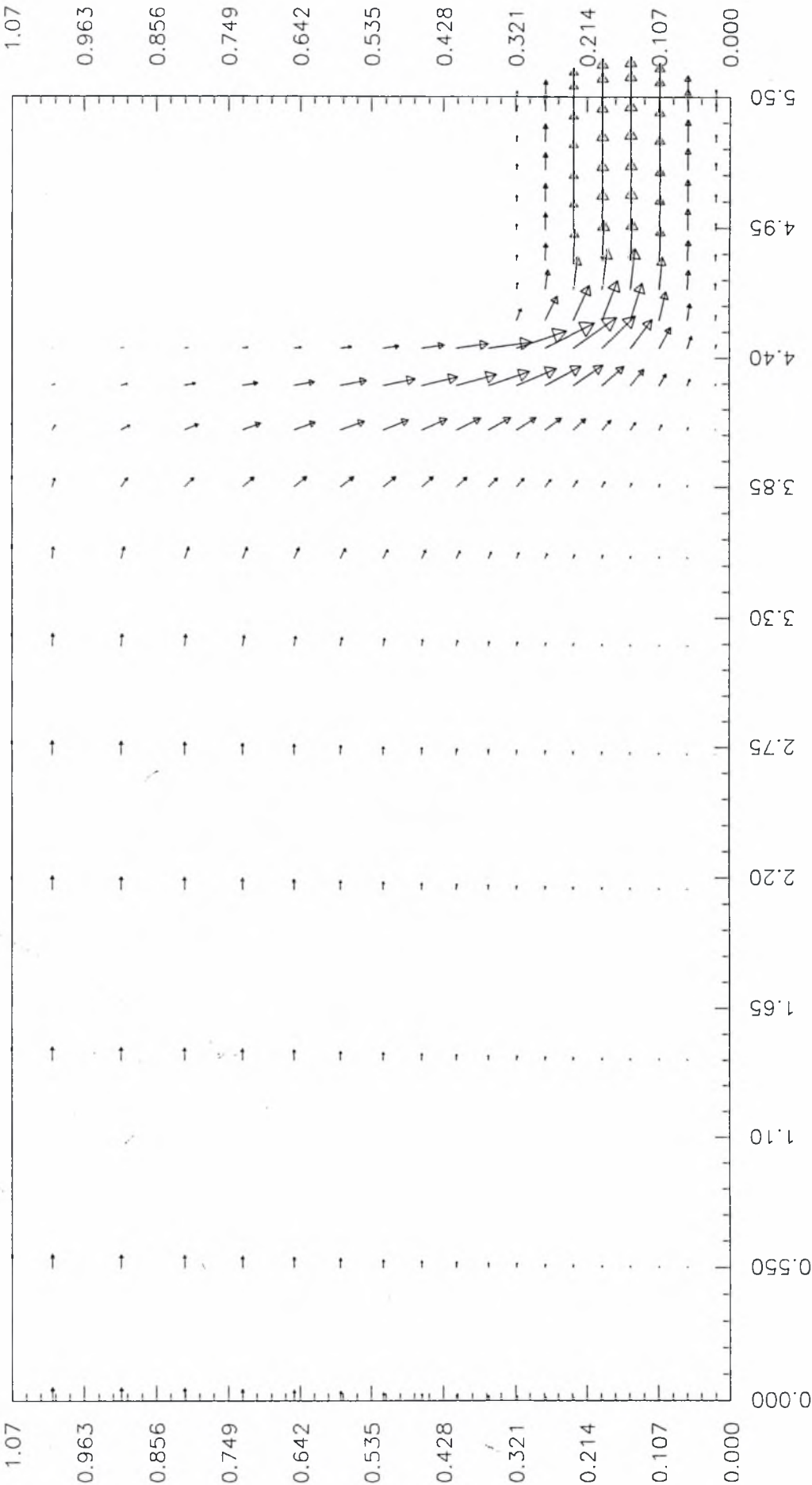




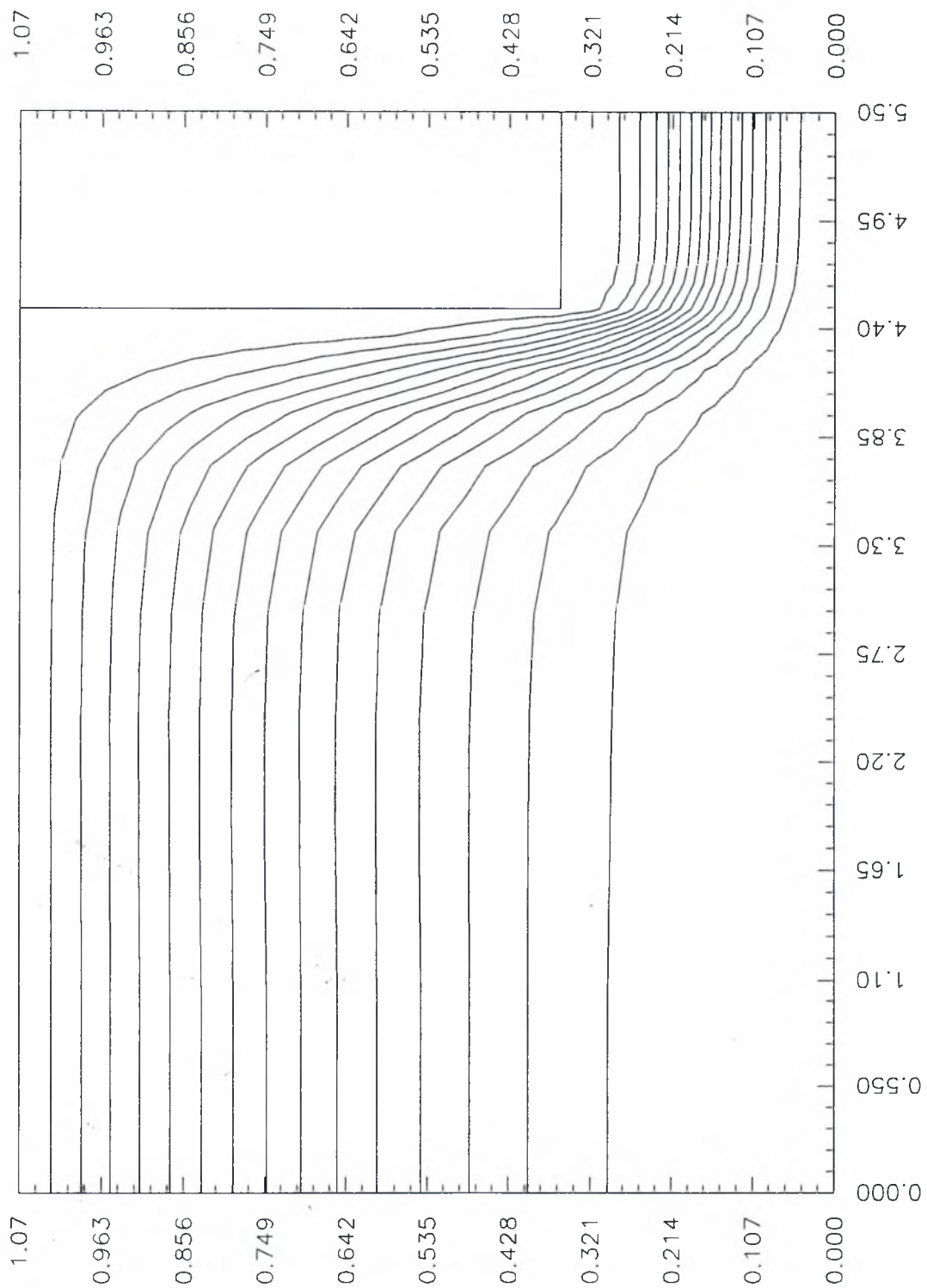


Αποτελέσματα με θερμοκρασία εισόδου  $TIN=1450^{\circ}C$

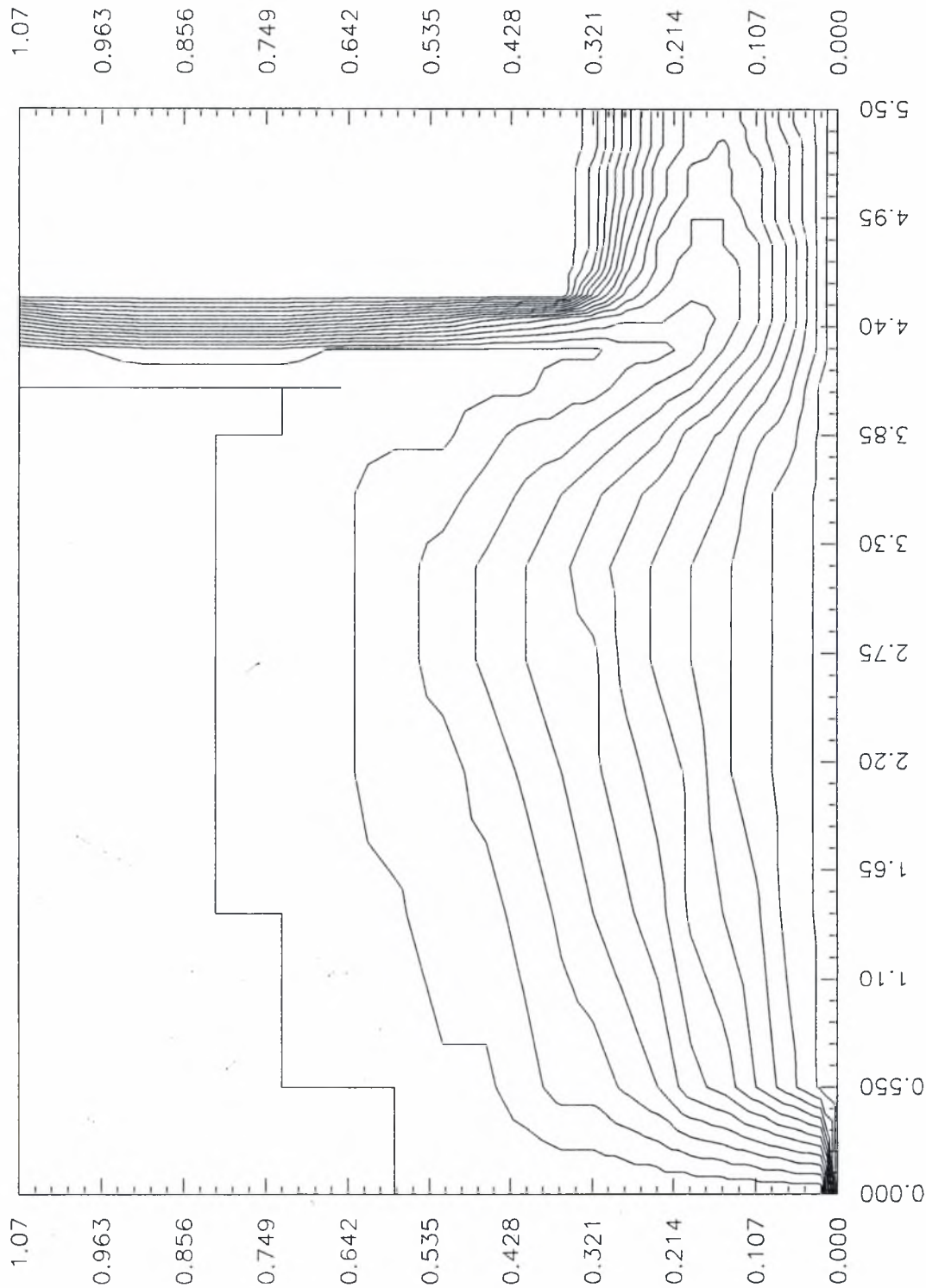
Vector Plot for VECTORS.DAT



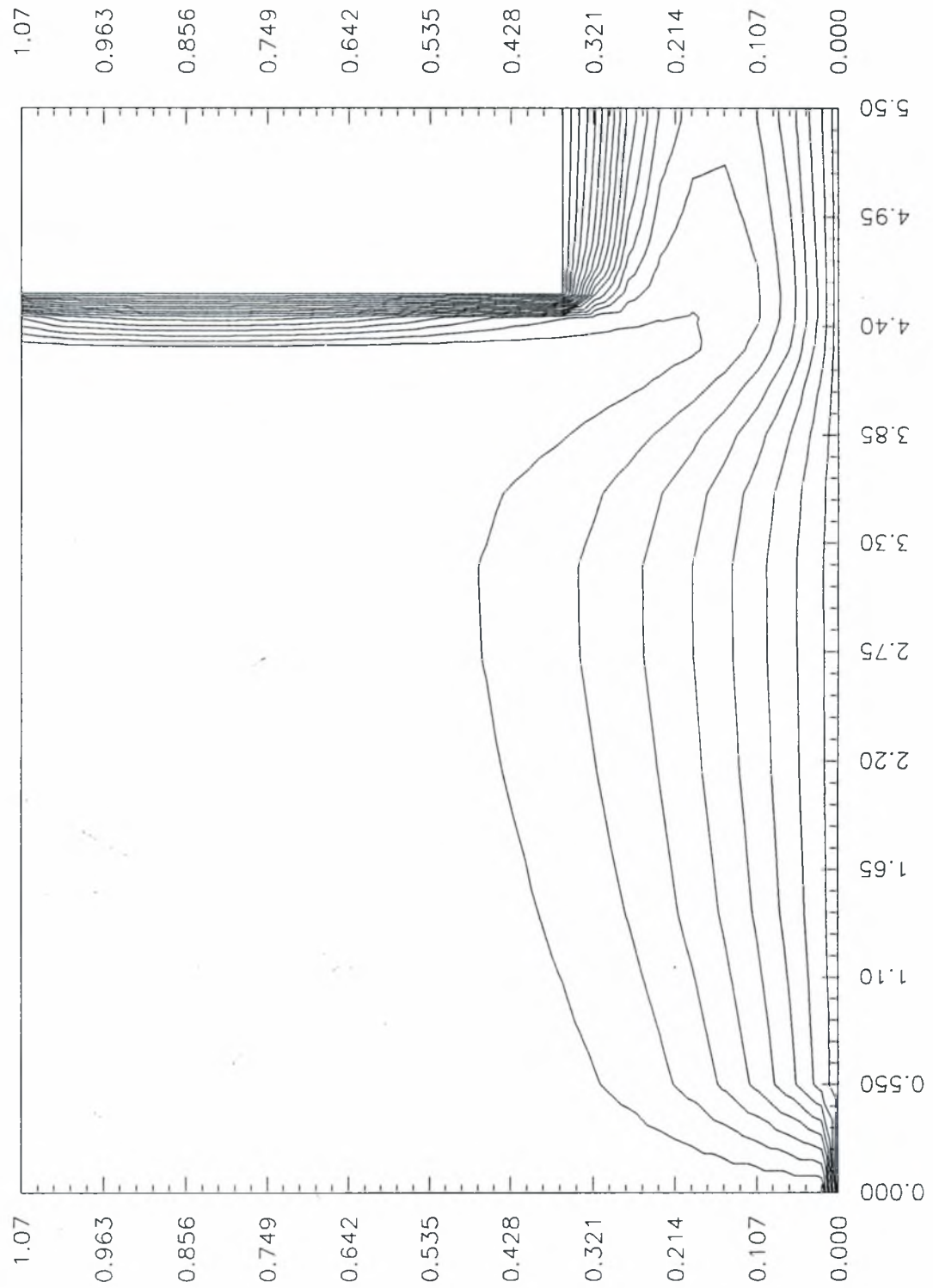
Contours for STREAM.DAT



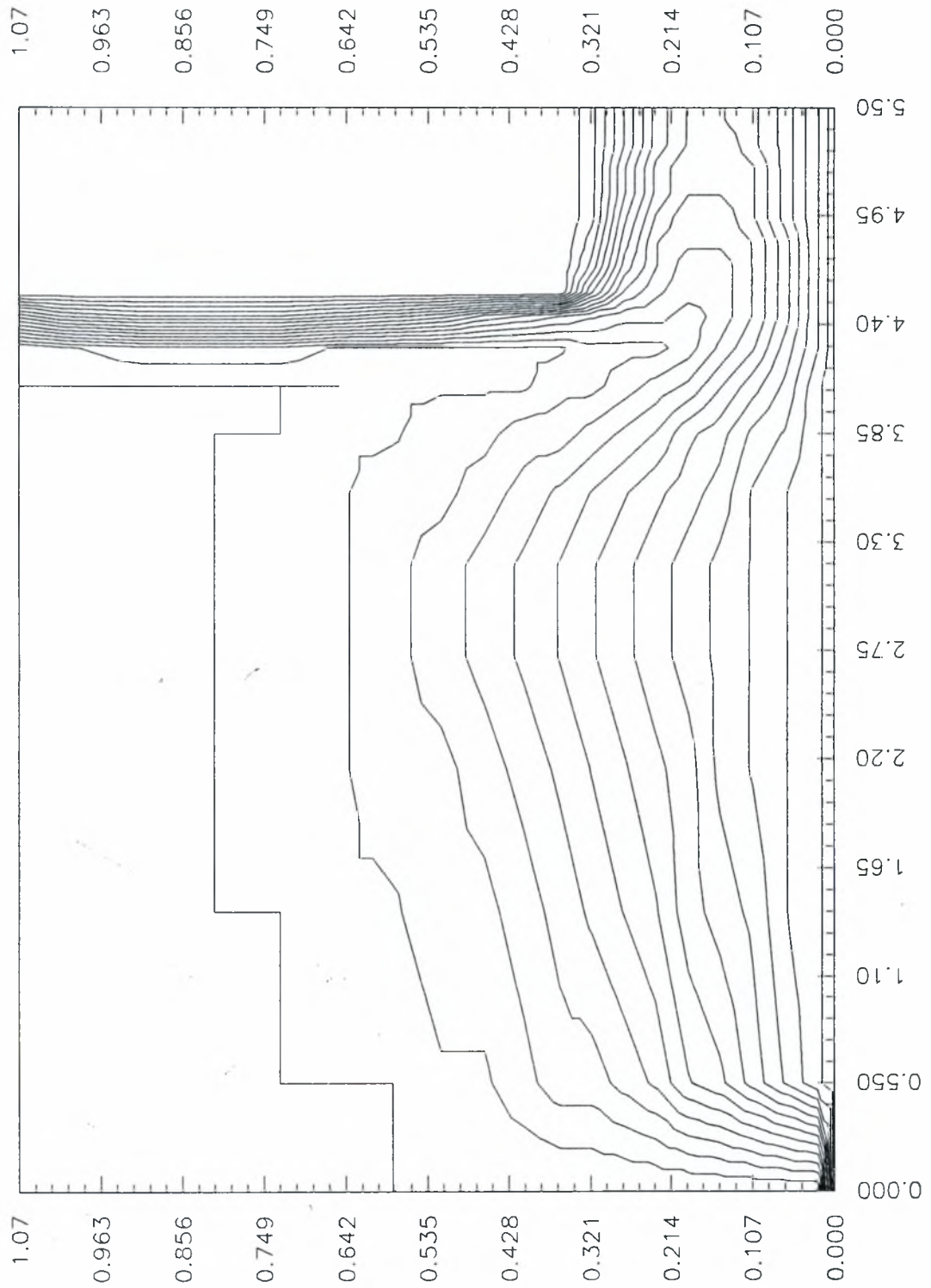
Contours for TEMPERAT.DAT



Contours for VISCOSIT.DAT



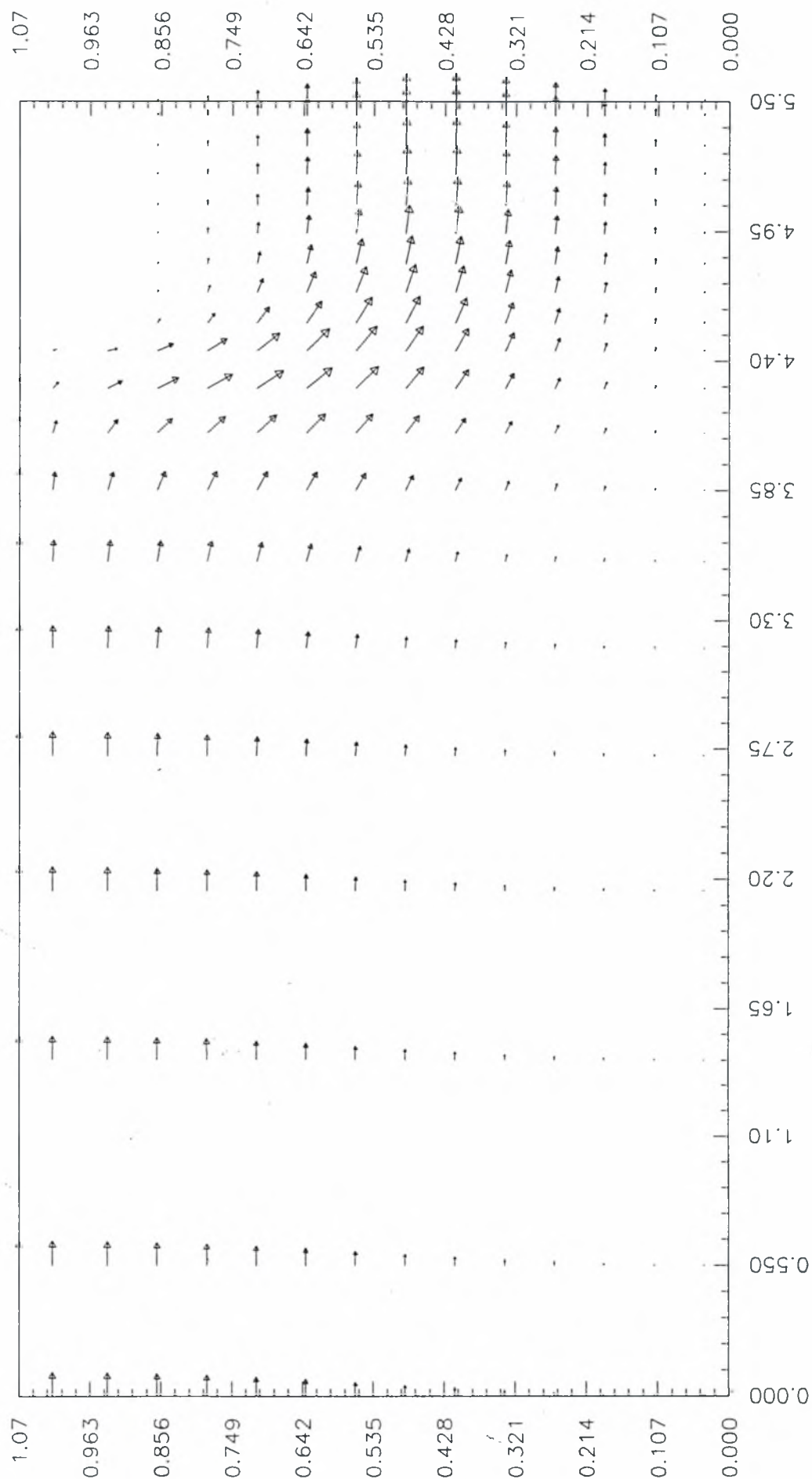
Contours for PRANDTL.DAT

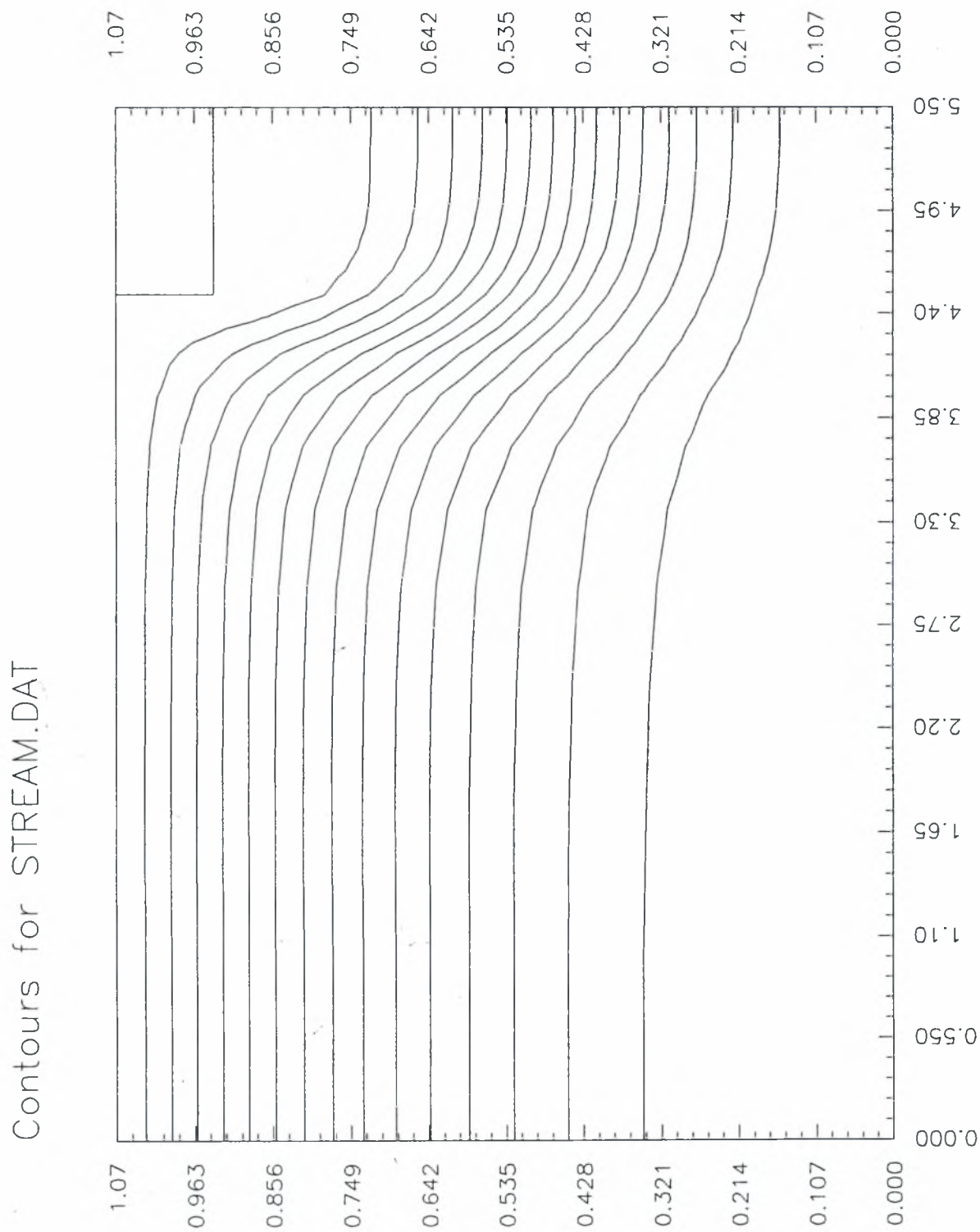


Αποτελέσματα με ύψος εμποδίου  $Y/N=0.17$  m

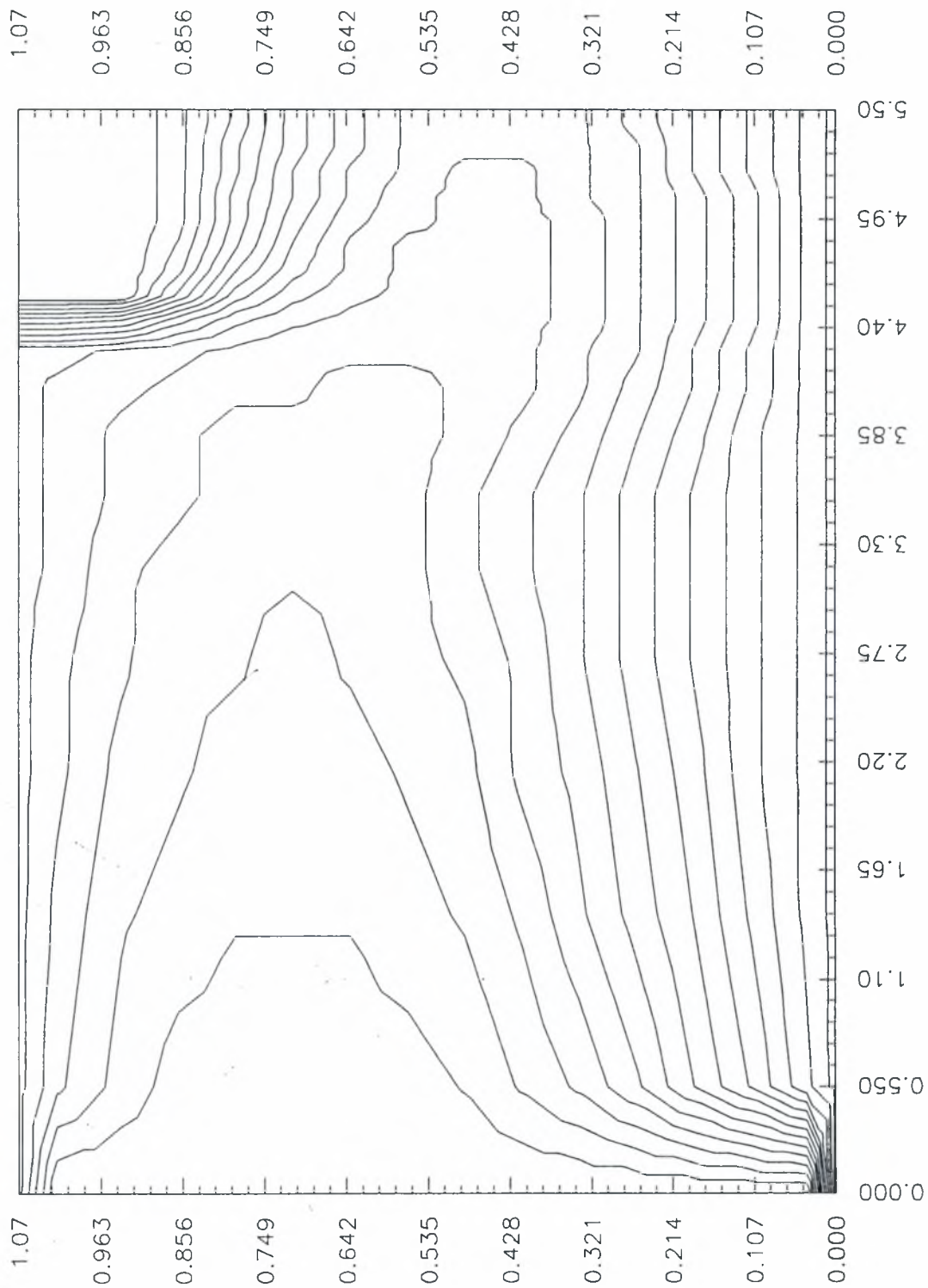


Vector Plot for VECTORS.DAT

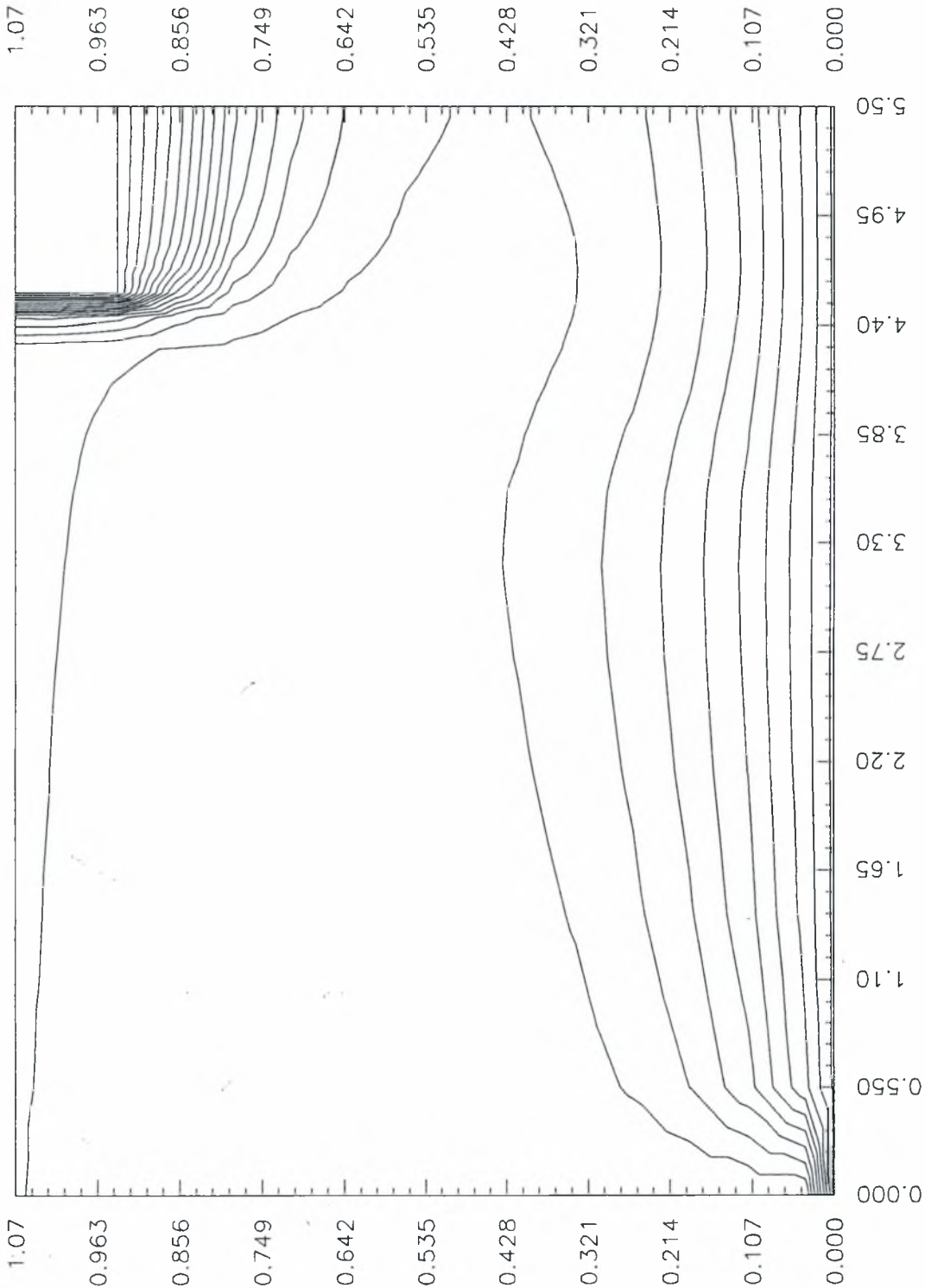




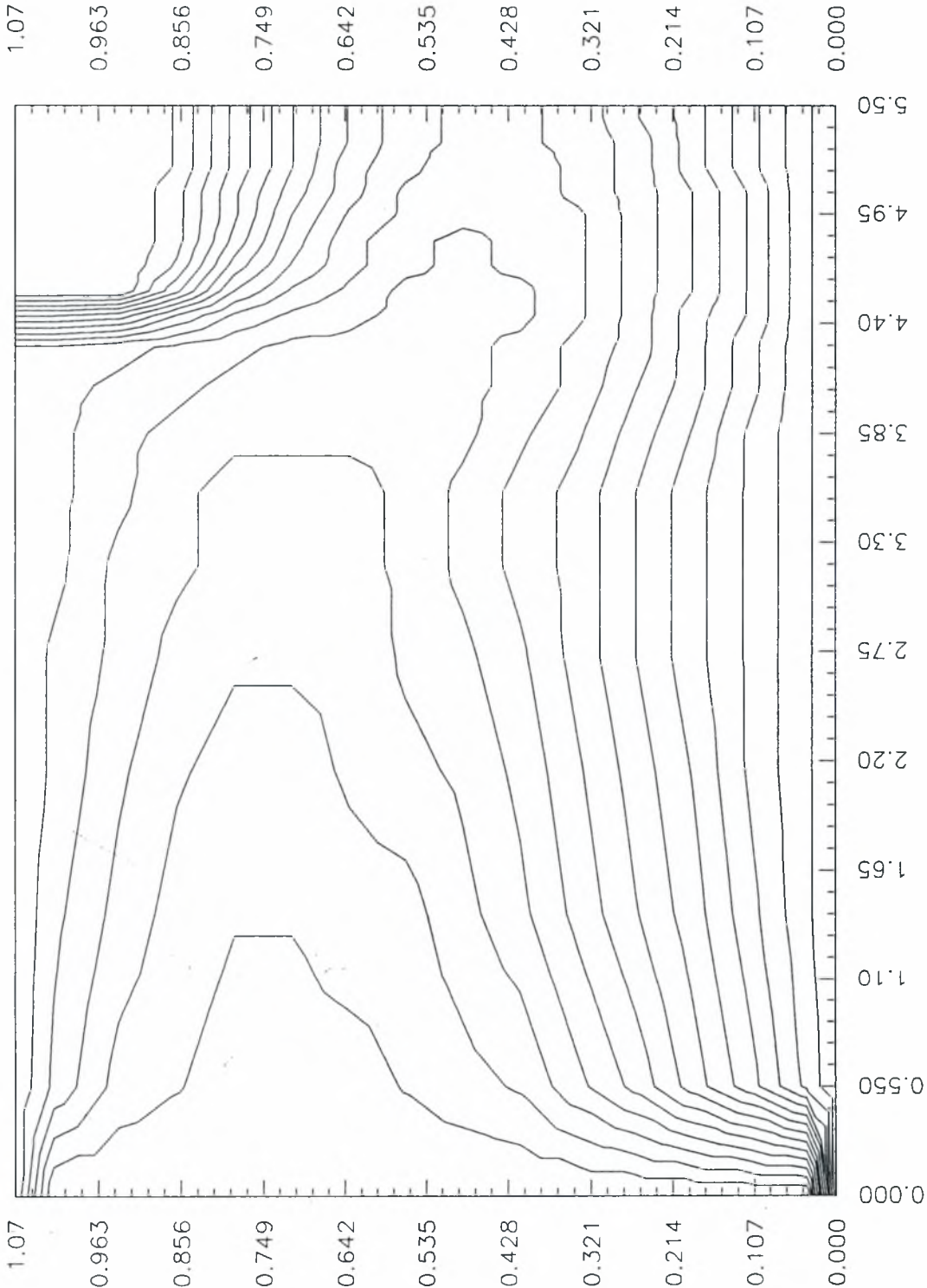
Contours for TEMPERAT.DAT



Contours for VISCOSIT.DAT

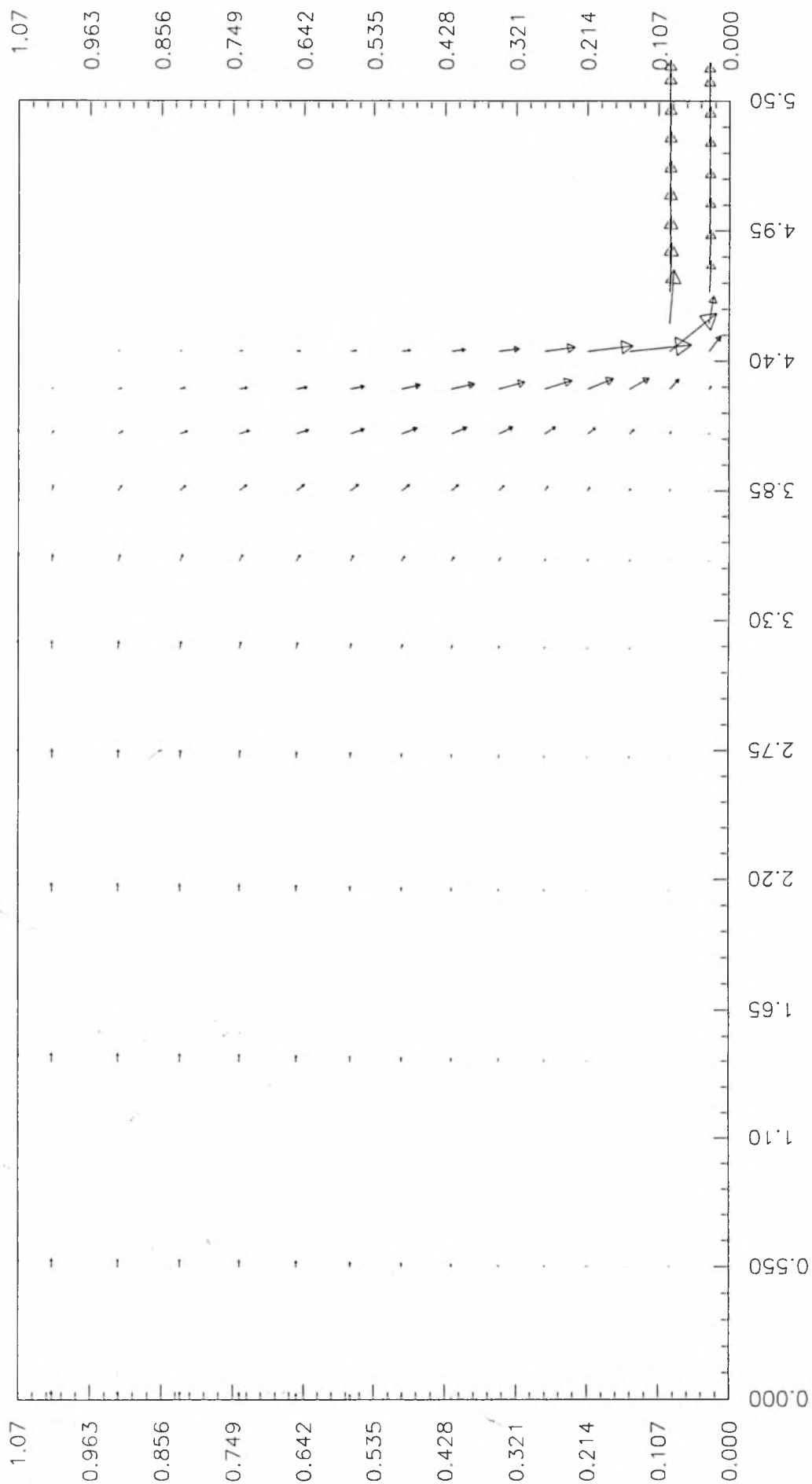


Contours for PRANDTL.DAT



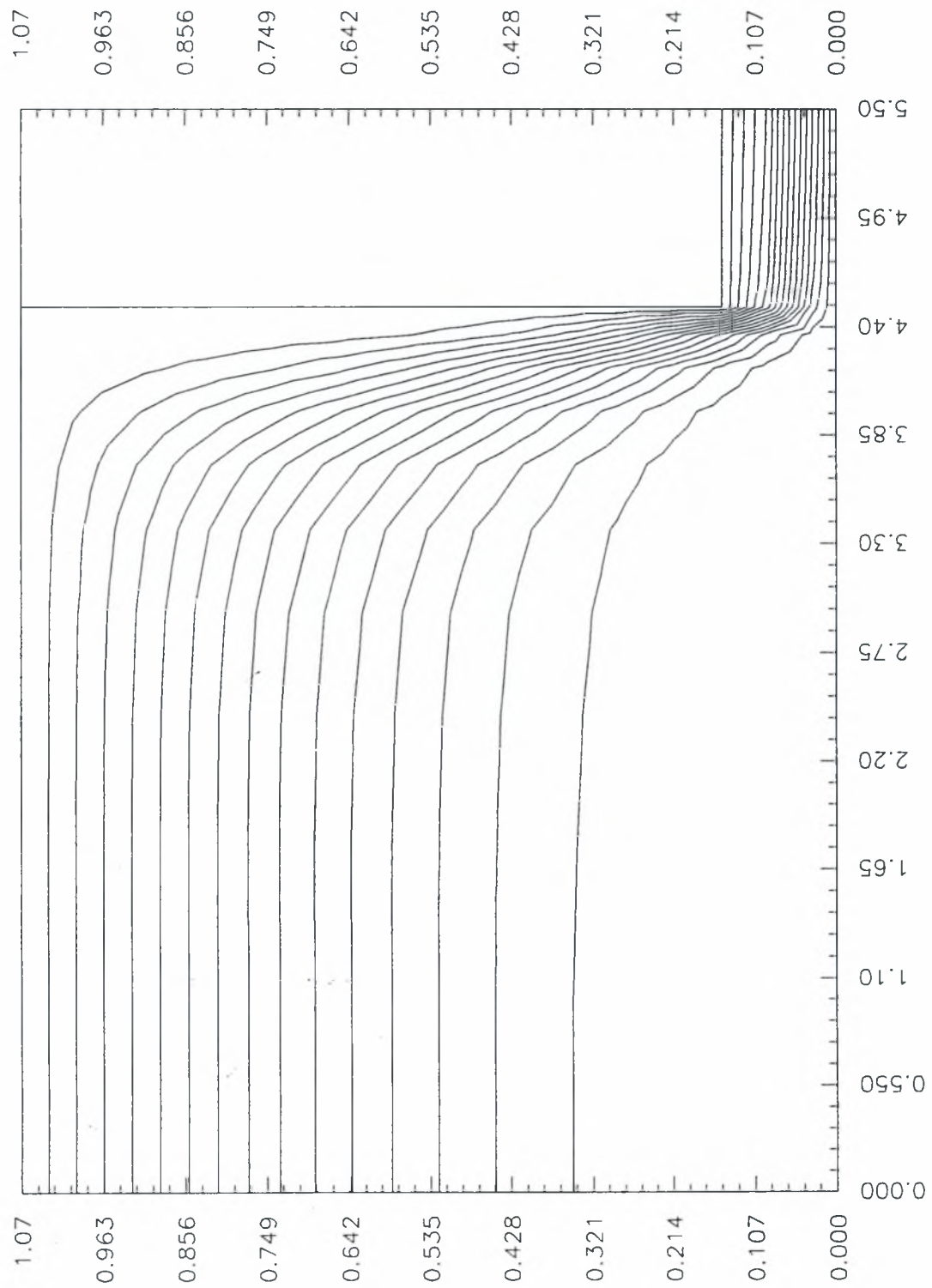
Αποτελέσματα με ύψος εμποδίου  $Y/N=0.95$  m

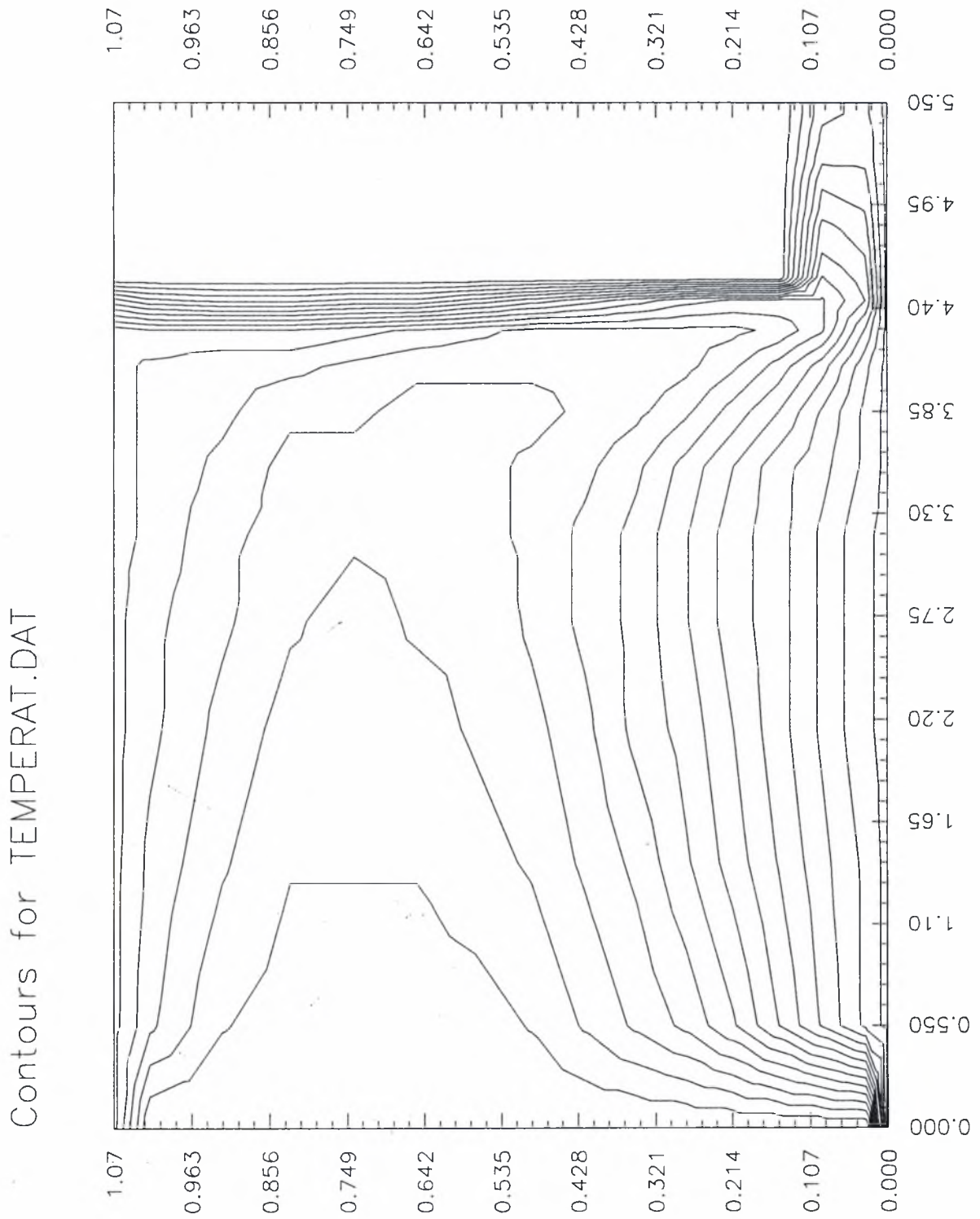
Vector Plot for VECTORS.DAT

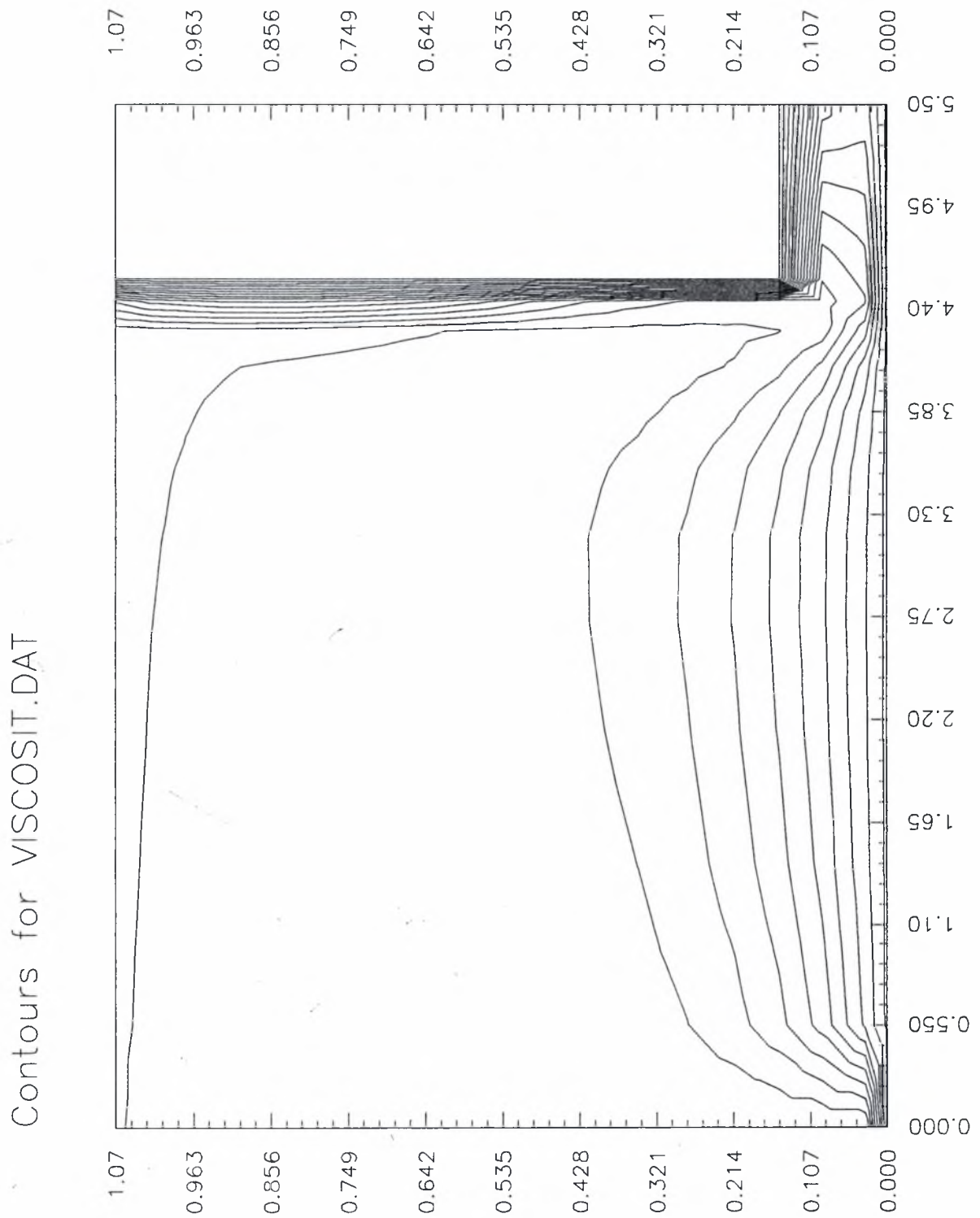




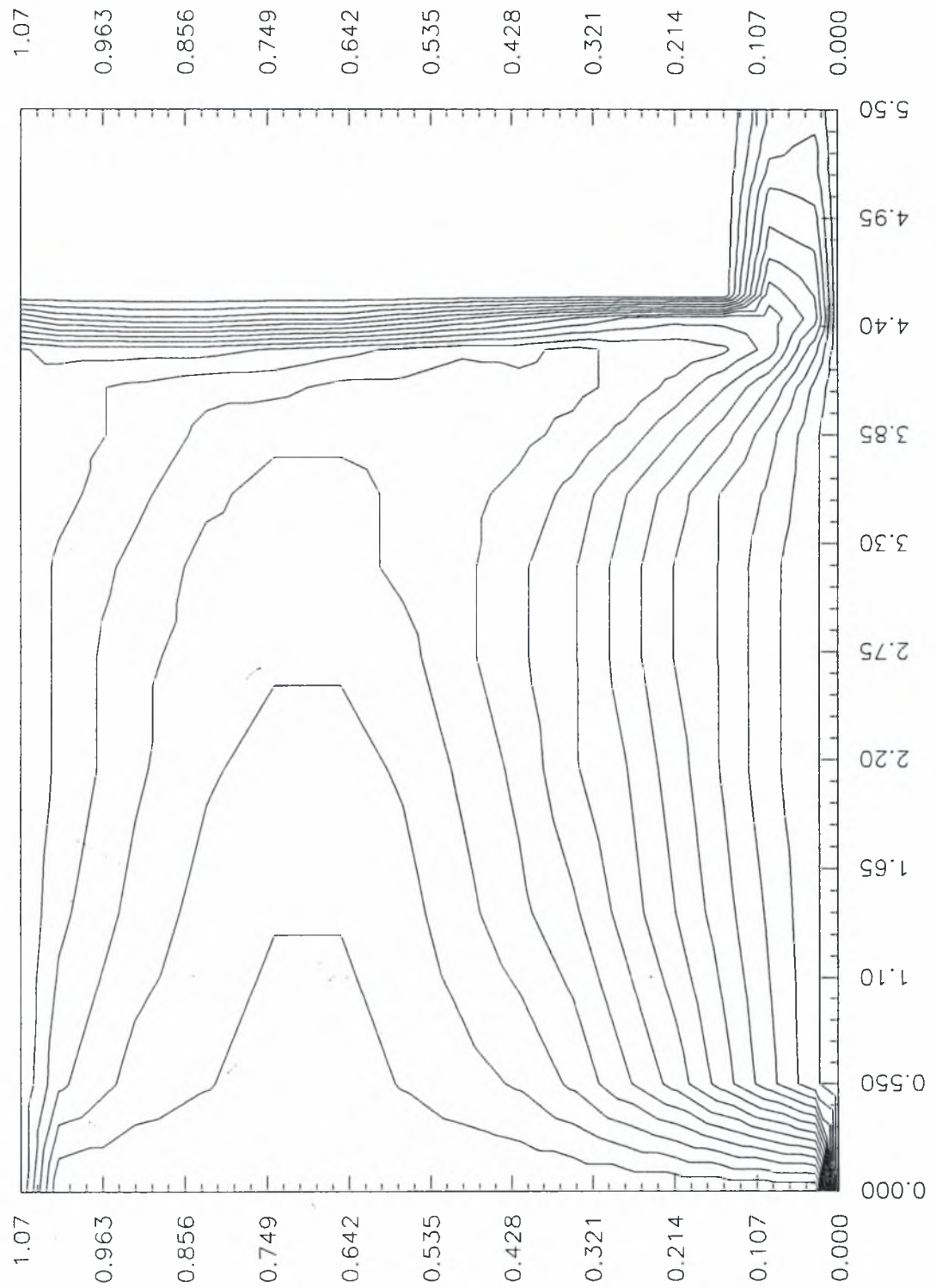
Contours for STREAM.DAT





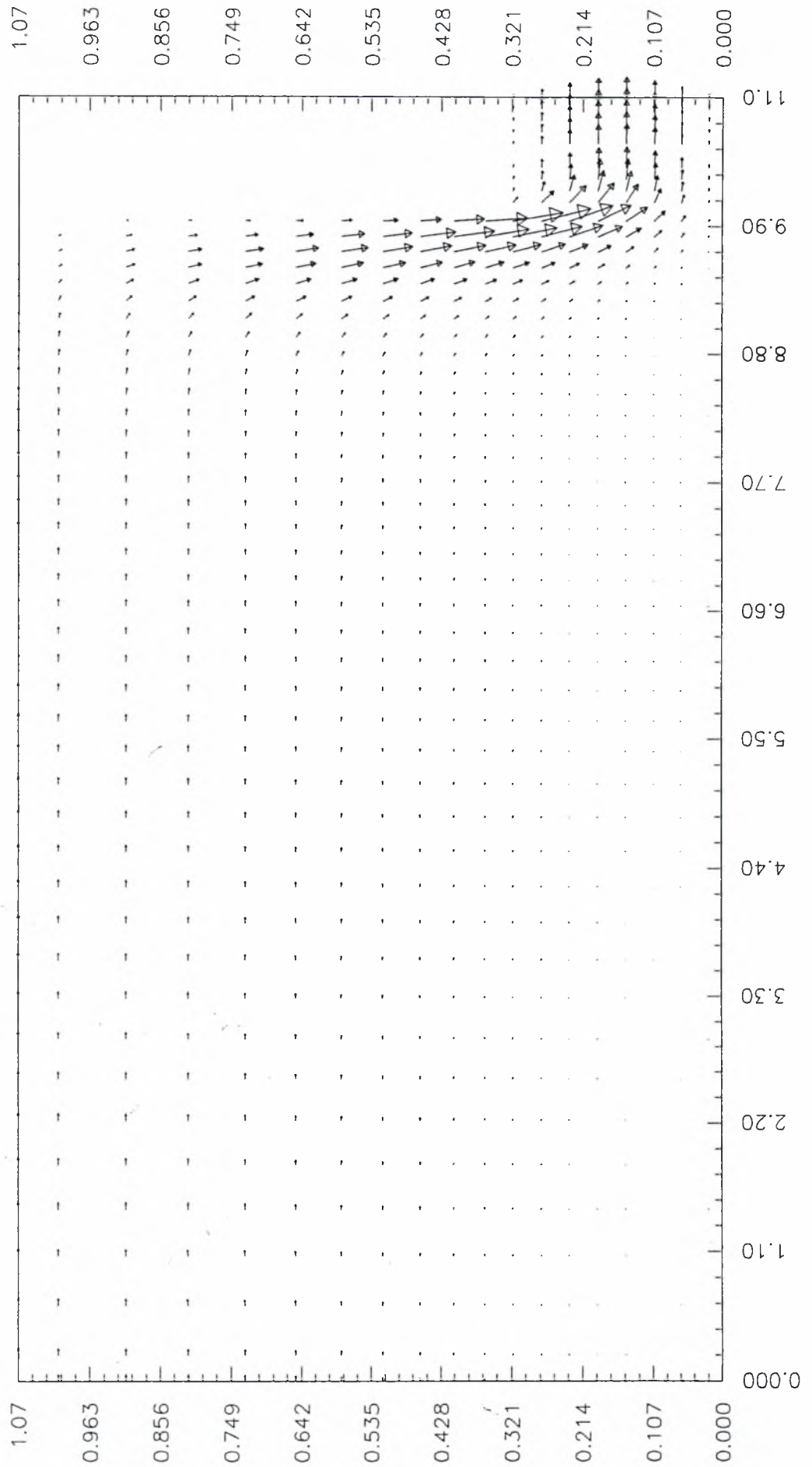


Contours for PRANDTL.DAT



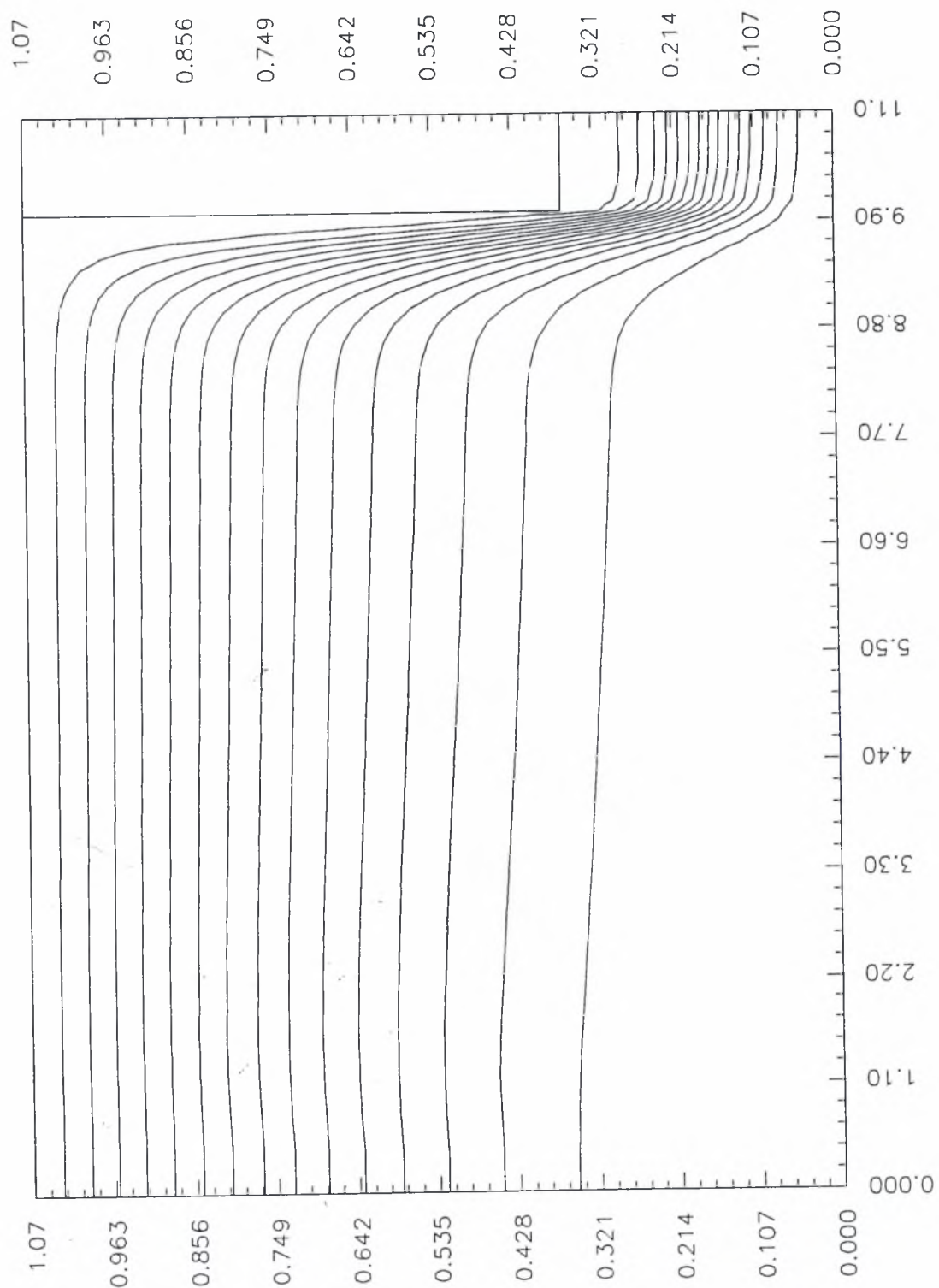
Αποτελέσματα με μήκος εισόδου  $X/N=10$  m

Vector Plot for VECTORS.DAT

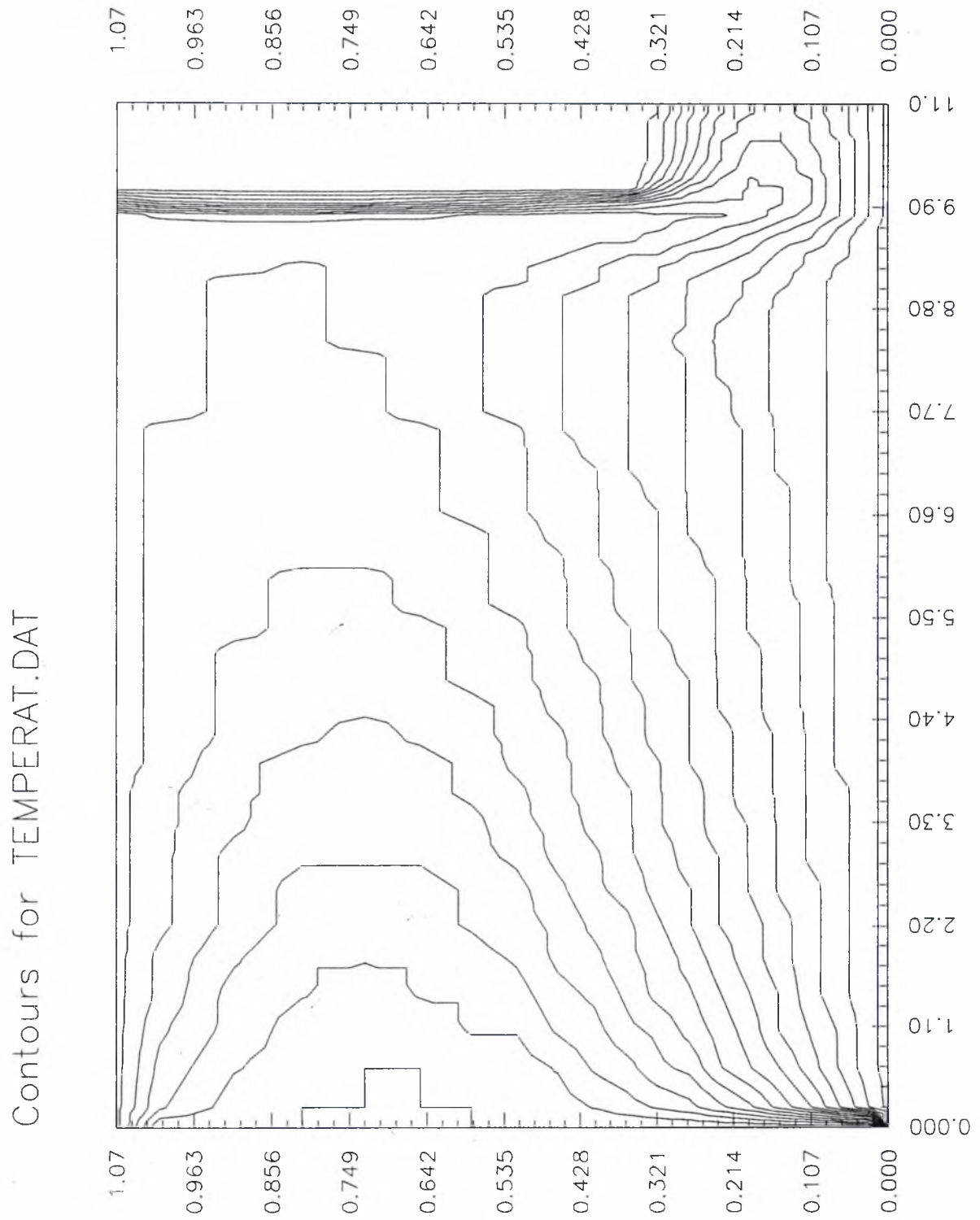


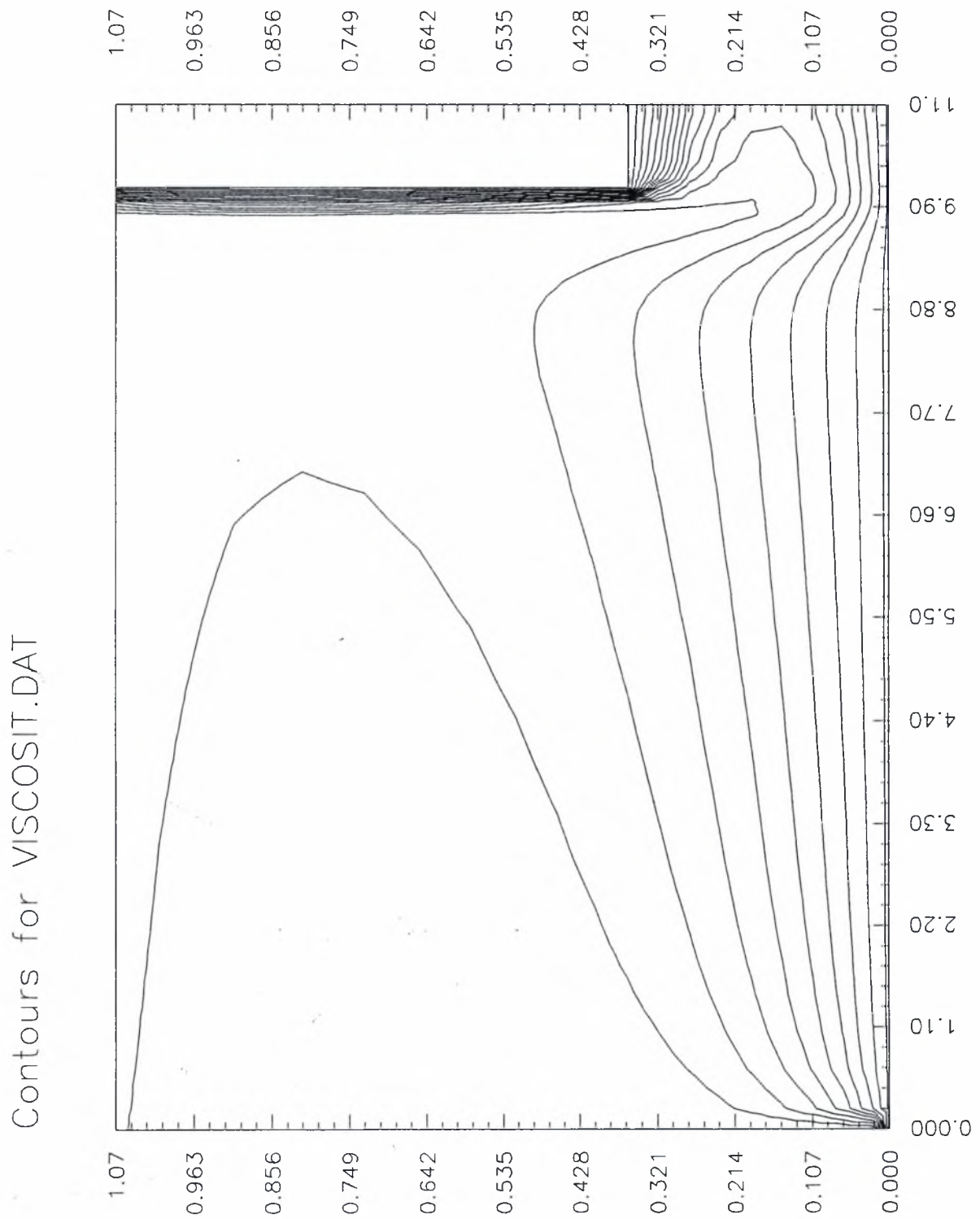


Contours for STREAM.DAT

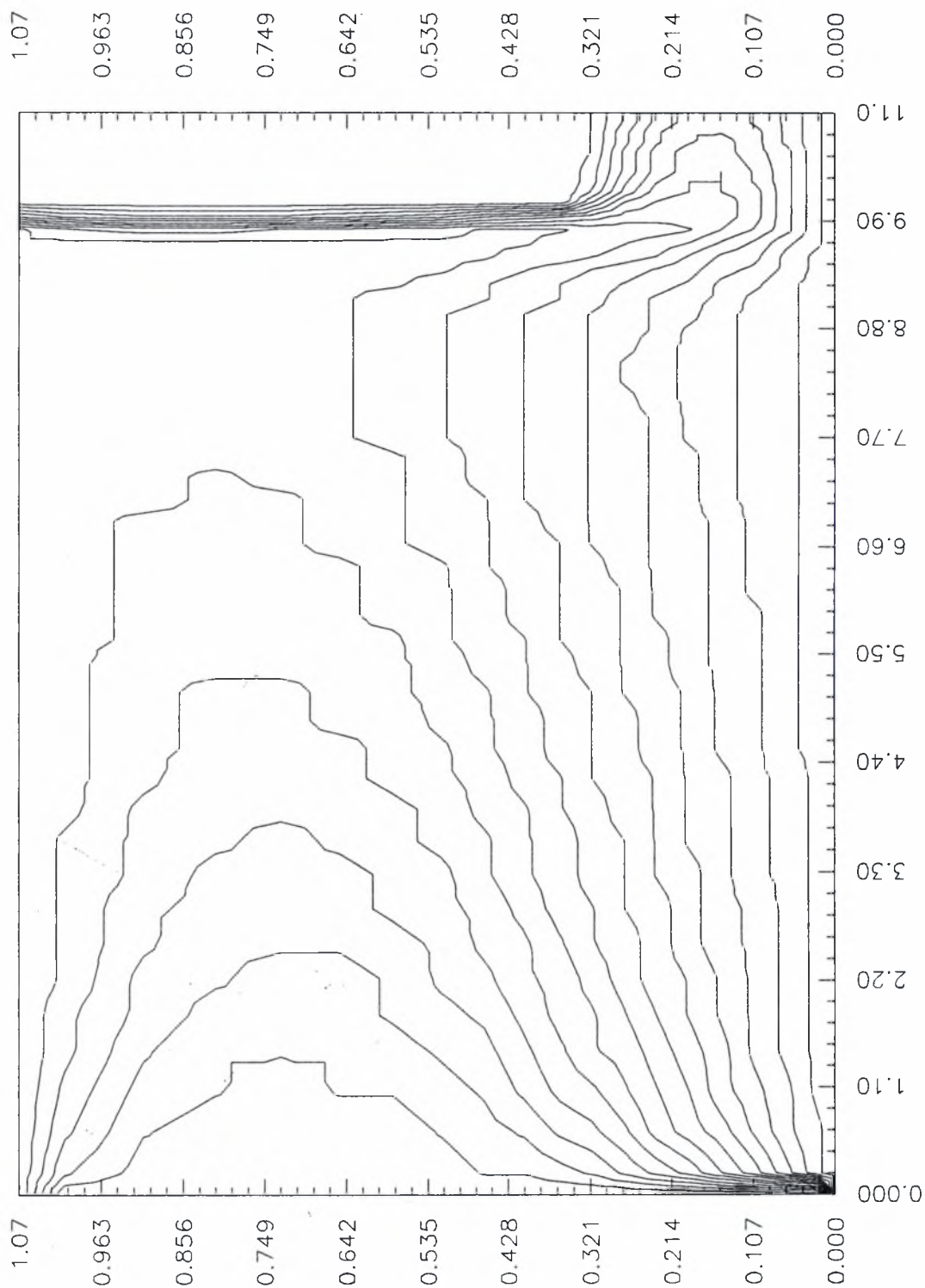






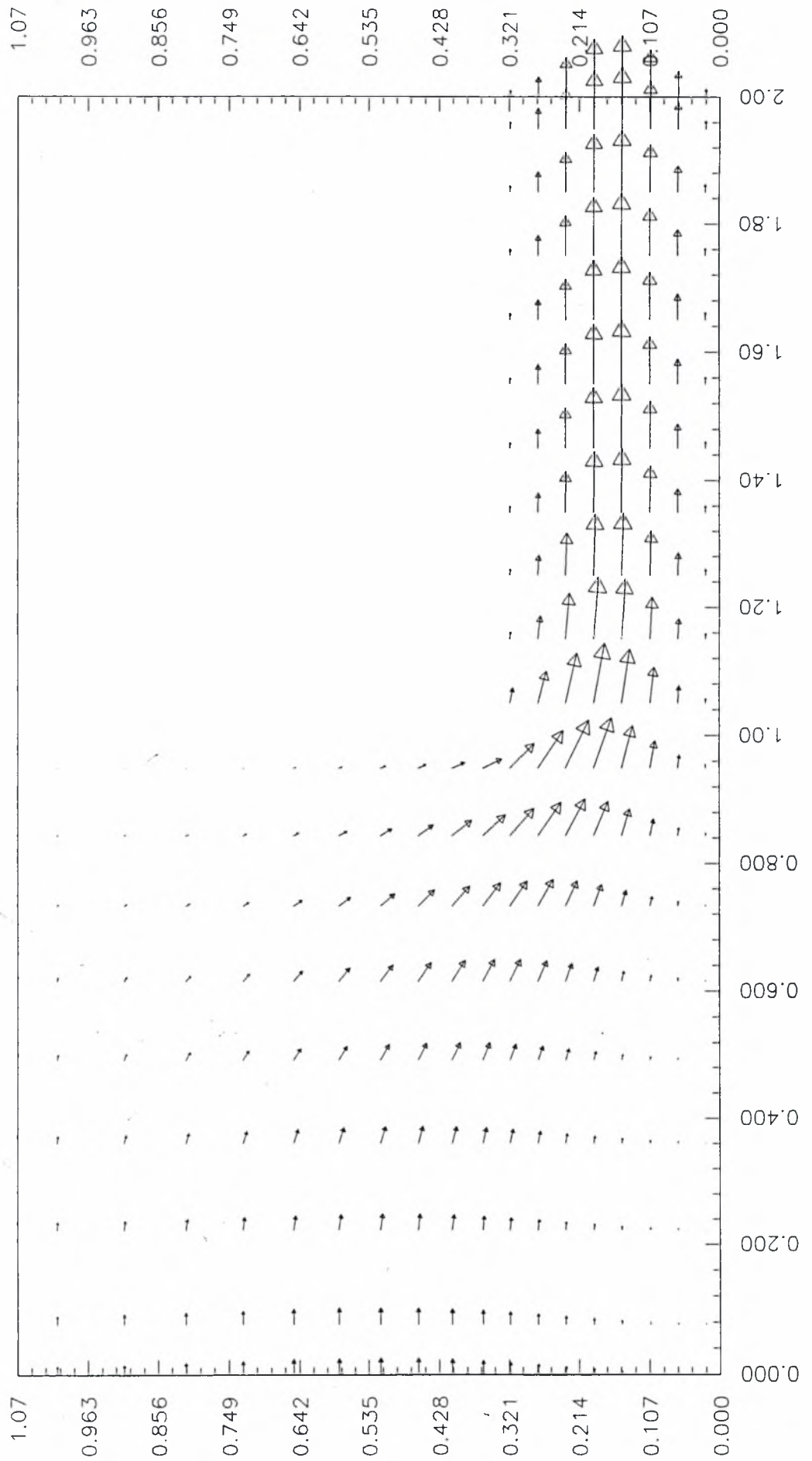


Contours for PRANDTL.DAT

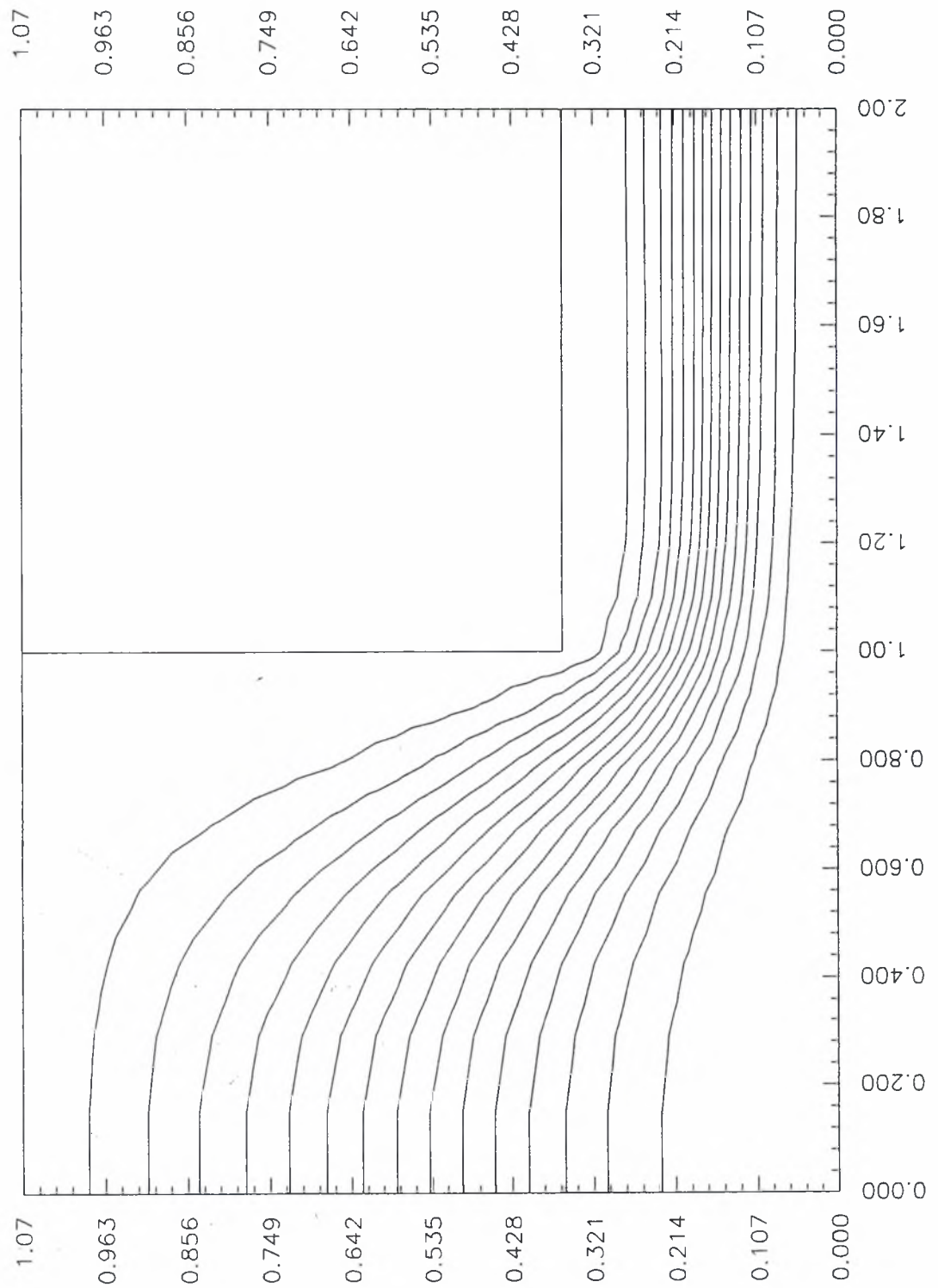


Αποτελέσματα με μήκος εισόδου  $X/N=1$  m

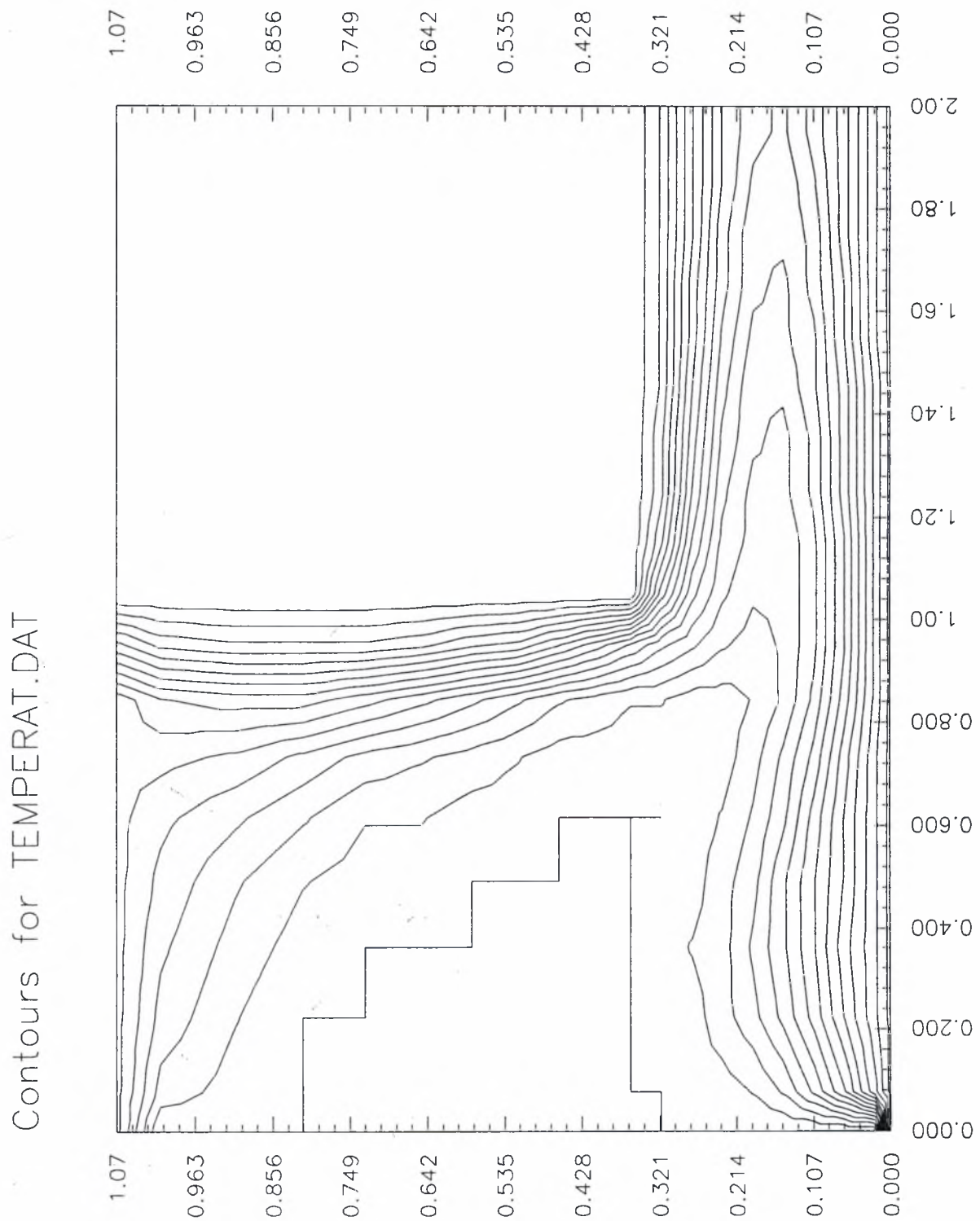
Vector Plot for VECTORS.DAT



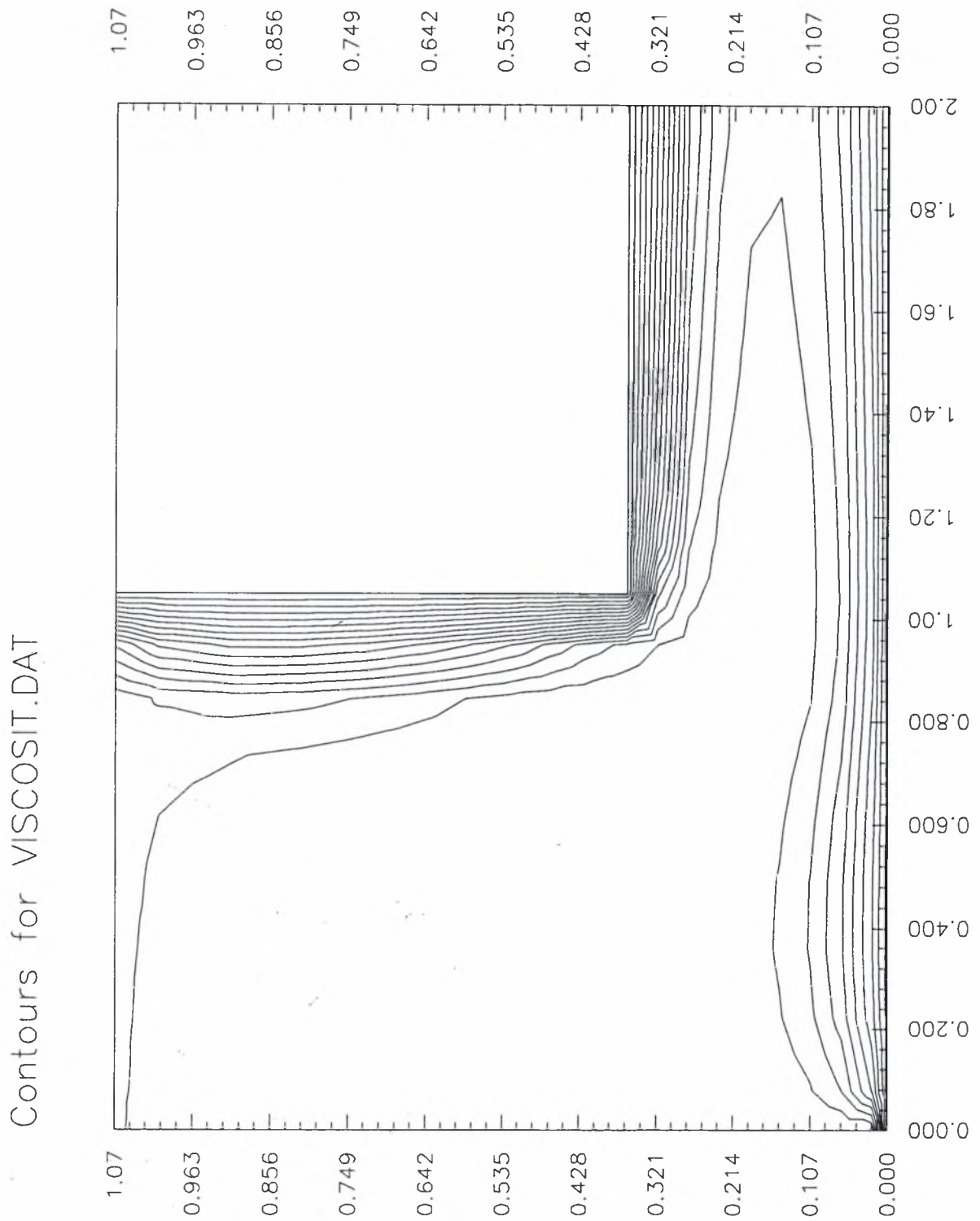
Contours for STREAM.DAT



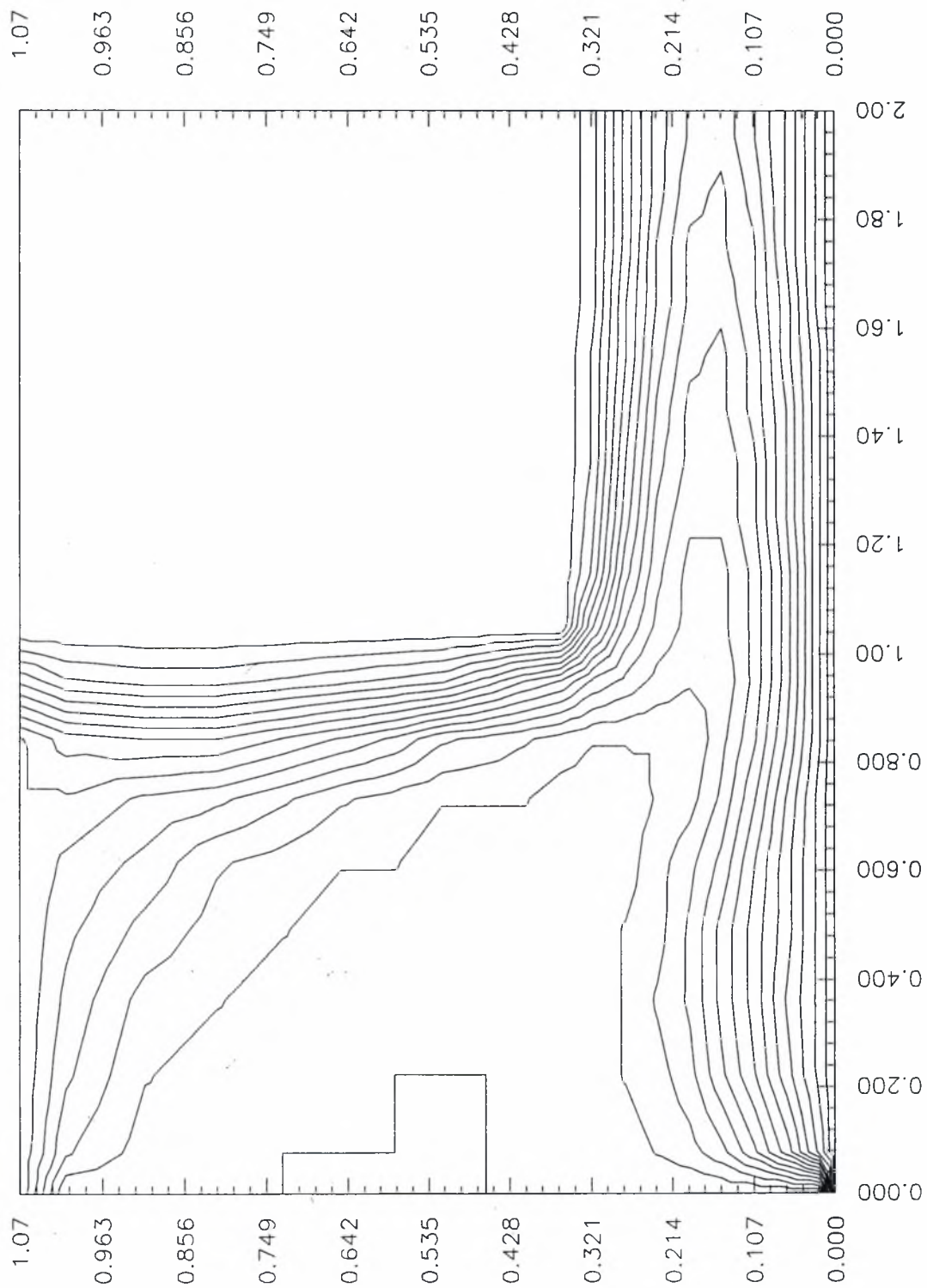






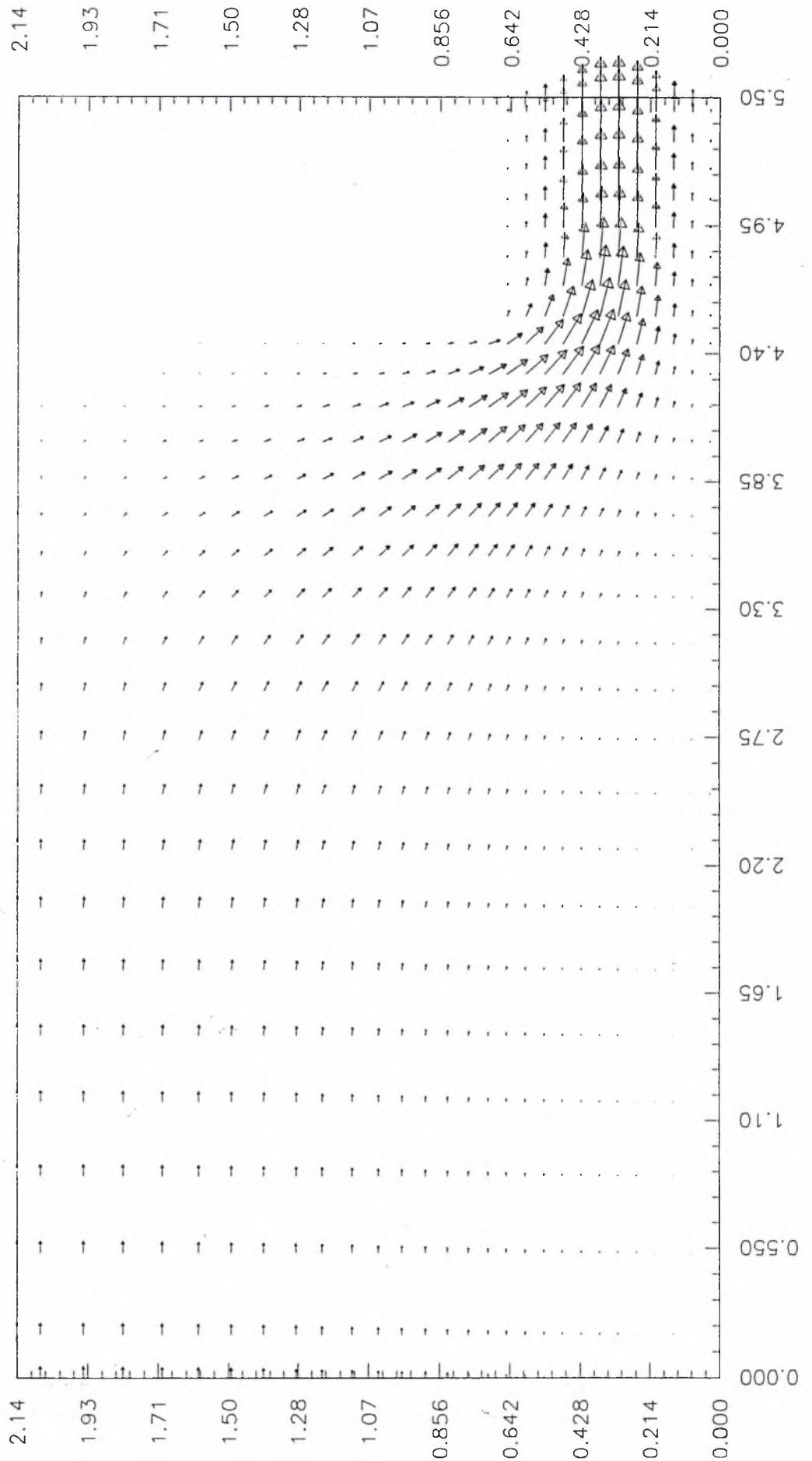


Contours for PRANDTL.DAT

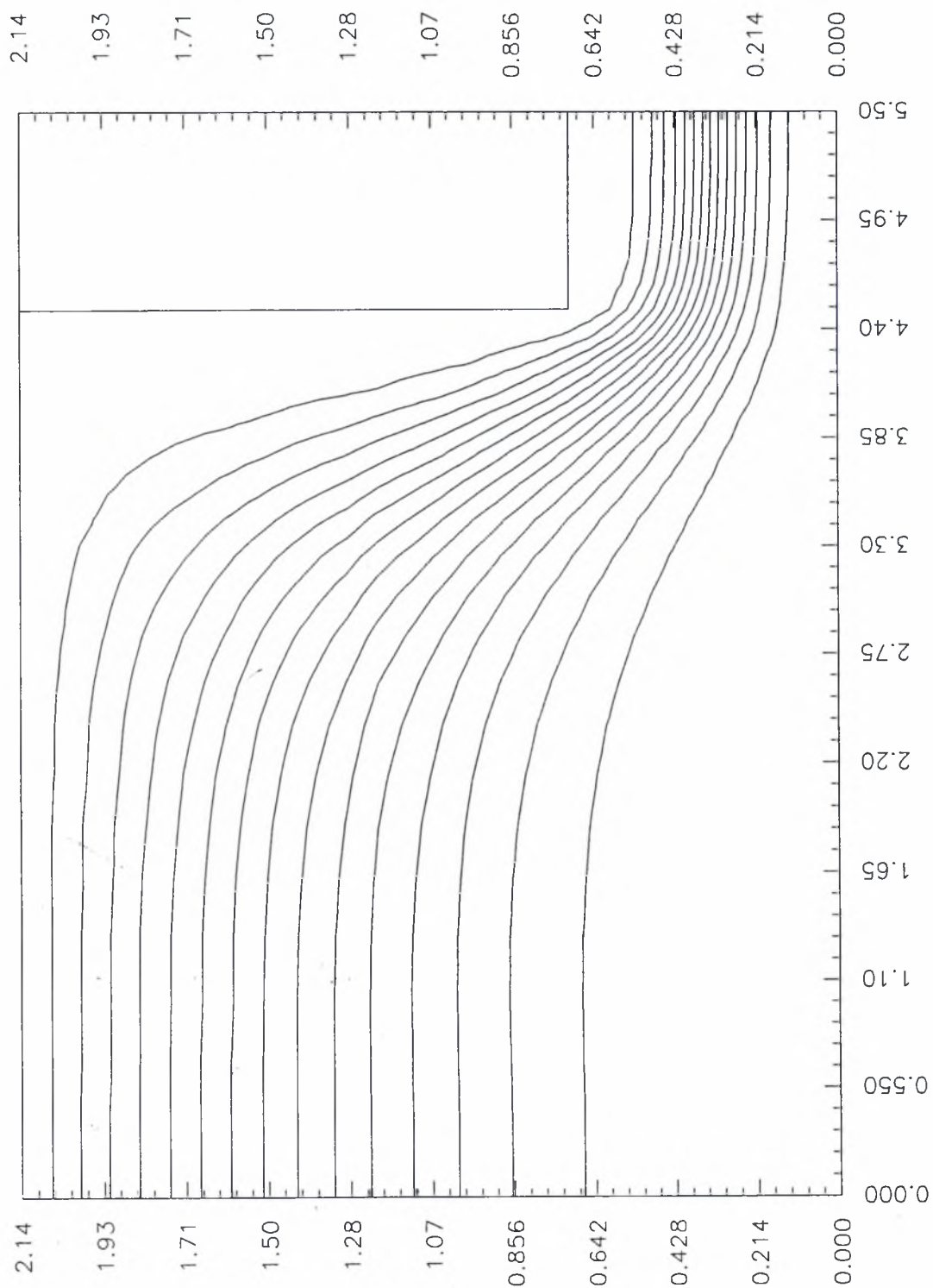


Αποτελέσματα με συνολικό ύψος  $Y_{TOT}=2.14$  m

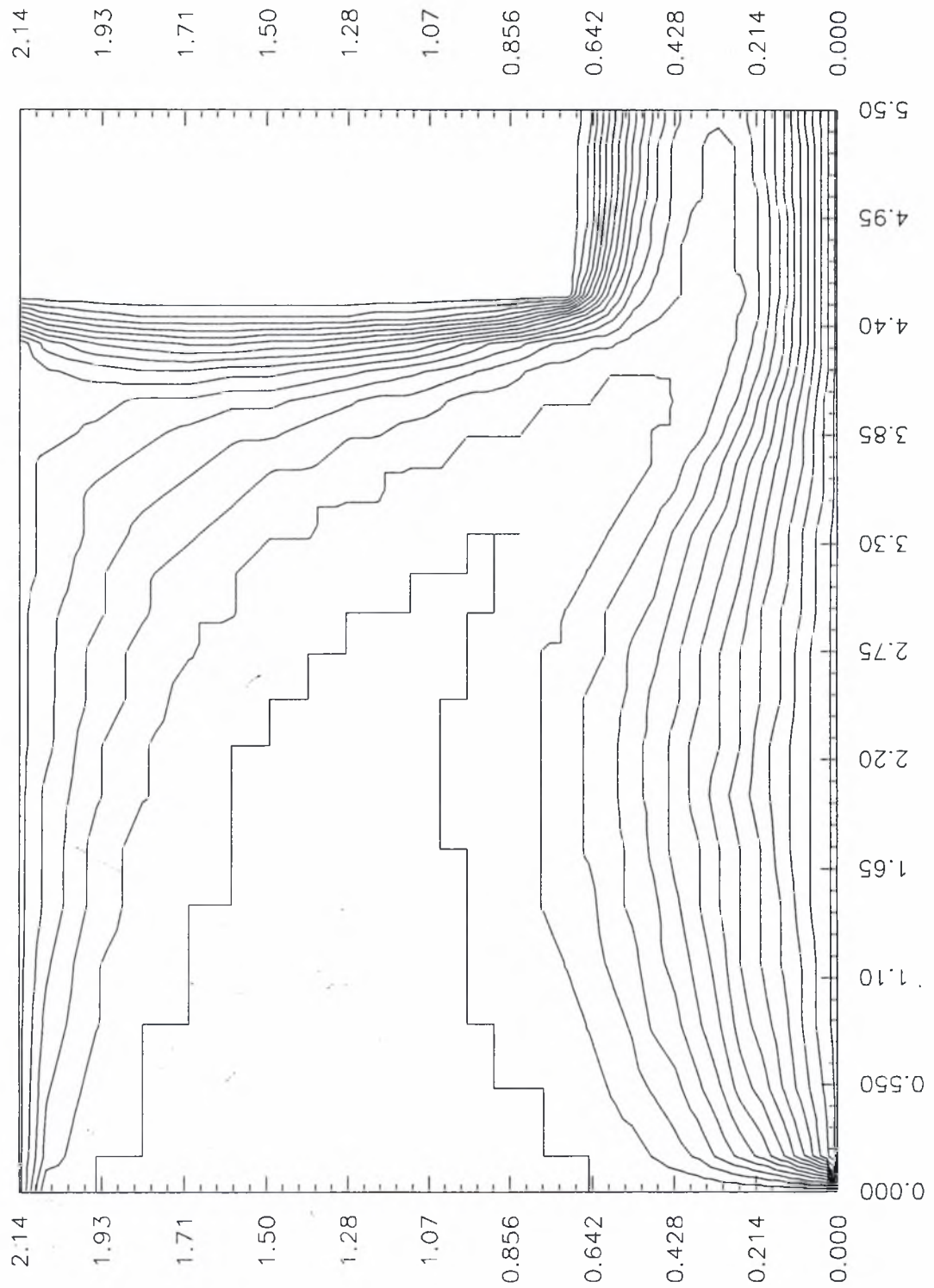
Vector Plot for VECTORS.DAT



Contours for STREAM.DAT

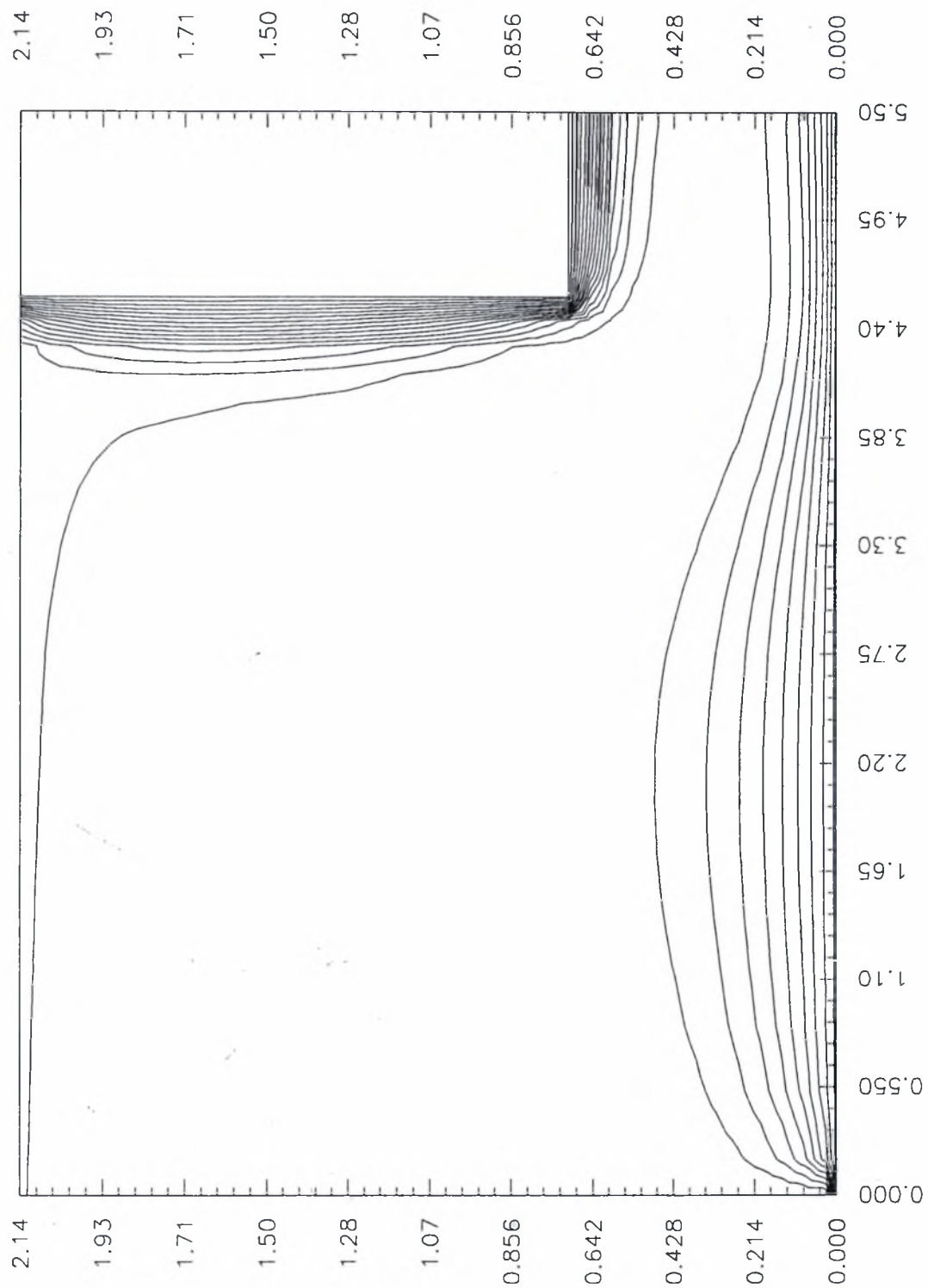


Contours for TEMPERAT.DAT



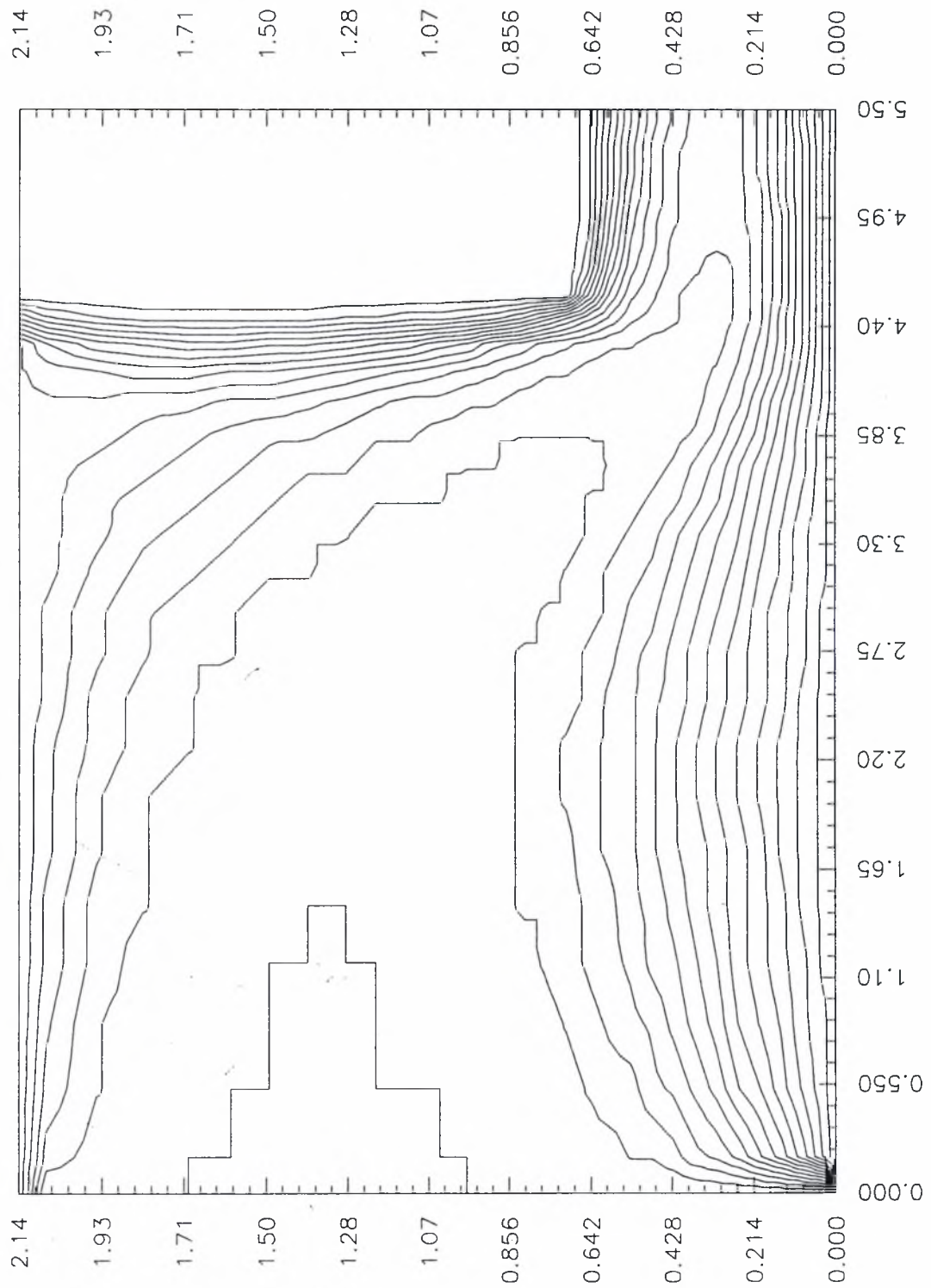


Contours for VISCOSIT.DAT





Contours for PRANDTL.DAT



## Παράρτημα Α

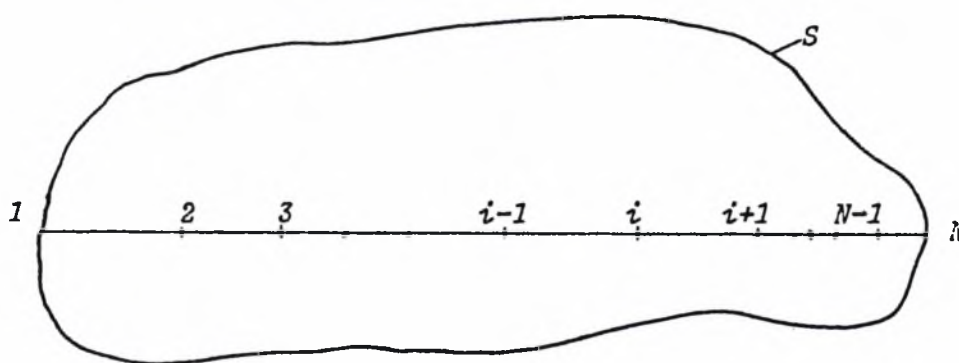
### Αλγόριθμος Τριδιαγώνιου Πίνακα (TDMA)

Περίληπτικά, η λύση των εξισώσεων πεπτερασμένων διαφορών της ροής, που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4, μπορεί να αποδοθεί ως εξής :

Θεωρούμε το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων της μορφής:

$$x_i = \alpha_i \cdot x_{i+1} + \beta_i \cdot x_{i-1} + c_i, i=1,2,\dots,N \quad (\text{A-1})$$

που ισχύει σε μια περιοχή που περικλείεται από μια κλειστή καμπύλη  $S$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 88 :



Σχήμα 88 : Περιοχή ισχύος του TDMA

Οι οριακές συνθήκες είναι :

$$\alpha_N=0, \beta_1=0, x_1,\dots,x_N=\text{γνωστά} \quad (\text{A-2})$$

Εφόσον το  $x_1$  είναι γνωστό, το  $x_2$  μπορεί να εκφραστεί ως :

$$x_2 = \alpha'_2 \cdot x_3 + c_2 \quad (\text{A-3})$$

$$\text{όπου } \alpha'_2=\alpha_2 \text{ και } c'_2 = \beta_2 \cdot x_1 + c_2 \quad (\text{A-4})$$

Στη συνέχεια έχουμε:

$$x_2 = \alpha'_2 \cdot x_3 + c_2 \quad (\text{A-5})$$

$$\text{όπου } \alpha'_3 = \frac{\alpha_3}{1 - \beta_3 \cdot \alpha'_2} \text{ και } c'_3 = \frac{\beta_3 \cdot c'_2 - 1 + c_3}{1 - \beta_3 \cdot \alpha'_2} \quad (\text{A-6})$$

Έτσι, ο γενικός επαναληπτικός τύπος μπορεί να γραφεί με τη μορφή :

$$x_i = \alpha'_i \cdot x_{i+1} + c_i \quad (\text{A-7})$$

$$\text{όπου } \alpha'_i = \frac{\alpha_i}{1 - \beta_i \cdot \alpha'_{i-1}} \text{ και } c'_i = \frac{\beta_i \cdot c'_{i-1} - 1 + c_i}{1 - \beta_i \cdot \alpha'_{i-1}} \quad (\text{A-8})$$

Αυτή η εξίσωση χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο TDMA για να βρεθεί λύση για το σύστημα των εξισώσεων (A-1) στην κλειστή περιοχή, που καθορίζεται από τις οριακές συνθήκες (A-2). Κατά αυτόν τον τρόπο, οι συντελεστές της γενικής επαναληπτικής εξίσωσης (A-7) υπολογίζονται από τις σχέσεις (A-8). Στη συνέχεια, αντικαθιστώντας στην εξίσωση (A-7), παίρνουμε τις τιμές της μεταβλητής  $x_i$ .

Η διεύθυνση του TDMA μπορεί να αντιστραφεί. Στην περίπτωση αυτή, οι τύποι γίνονται:

$$x_i = \alpha'_i \cdot x_{i-1} + c_i \quad (\text{A-9})$$

$$\text{όπου } \alpha'_i = \frac{\beta_i}{1 - \alpha_i \cdot \beta'_{i+1}} \text{ και } c'_i = \frac{\alpha_i \cdot c'_{i+1} - 1 + c_i}{1 - \alpha_i \cdot \beta'_{i+1}} \quad (\text{A-10})$$



## Παράρτημα Β

### Παραγωγή των εξισώσεων ροής

Εξαιτίας της ομοιότητας των εξισώσεων, θα παραγωγηθούν μόνο οι εξισώσεις της ταχύτητας  $u$  (3.1-7) και της διατήρησης της μάζας (3.1-6).

### Εξίσωση της ταχύτητας $u$

Η ολοκλήρωση της εξίσωσης (3.1-7) στον πεπερασμένο όγκο ελέγχου του σχήματος 8 δίνει:

$$\begin{aligned} & \left[ (\rho \cdot u^2 \cdot A)_e - (\rho \cdot u^2 \cdot A)_w + (\rho \cdot u \cdot v \cdot A)_n + (\rho \cdot u \cdot v \cdot A)_s \right] - \\ & - \left[ \left( \left( \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot A \right)_e - \left( \left( \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) \cdot A \right)_w + \left( \left( \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) \cdot A \right)_n - \left( \left( \mu \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) \cdot A \right)_s \right] = \\ & = (\rho \cdot A)_w - (\rho \cdot A)_e + f_x \cdot (\text{όγκος κυψέλης}) \end{aligned} \quad (\text{B-1})$$

όπου τα  $A$  αντιπροσωπεύουν τα εμβαδά των επιφανειών των κυψελών και το  $f_x$  είναι ο όρος παραγωγής (πηγαίος όρος).

Με τη βοήθεια των υποθέσεων του κεφαλαίου 3.4 για τη μεταβολή των μεταβλητών και με αντικατάσταση των γεωμετρικών στοιχείων των σχημάτων 7 και 8, η εξίσωση (B-1) γίνεται:

$$\begin{aligned} & \left[ (\rho \cdot u^* \cdot \Delta y)_e \cdot (u_p \cdot f_e + u_E \cdot (1 - f_e)) - (\rho \cdot u^* \cdot \Delta y)_w \cdot (u_p \cdot f_w + u_W \cdot (1 - f_w)) + \right. \\ & + (\rho \cdot u^* \cdot \Delta x)_n \cdot \left( \frac{u_N + u_p}{2} \right) - (\rho \cdot u^* \cdot \Delta x)_s \cdot \left( \frac{u_s + u_p}{2} \right) \left. \right] - \\ & - \left[ \left( \frac{\mu \cdot \Delta x}{\delta x} \right)_e \cdot (u_E - u_p) - \left( \frac{\mu \cdot \Delta y}{\delta x} \right)_w \cdot (u_p - u_W) + \right. \\ & + \left( \frac{\mu \cdot \Delta x}{\delta y} \right)_n \cdot (u_N - u_p) - \left( \frac{\mu \cdot \Delta x}{\delta y} \right)_s \cdot (u_p - u_s) \left. \right] = \\ & = \rho_w^* \cdot \Delta y_w - \rho_p^* \cdot \Delta y_e + f_x \cdot (\text{όγκος κυψέλης}) \end{aligned} \quad (\text{B-2})$$

όπου  $f_e$  και  $f_w$  είναι οι συντελεστές βαρύτητας, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ταχυτήτων στις επιφάνειες των κυψελών και το \* συμβολίζει υποτιθέμενες ή πρόσφατα υπολογισμένες τιμές. Αναδιαμορφώνοντας τους όρους της εξίσωσης (B-2), παίρνουμε την τελική μορφή, που είναι:

$$A_p^u \cdot u_p = A_e^u \cdot u_e + A_w^u \cdot u_w + A_n^u \cdot u_n + A_s^u \cdot u_s + S^u \quad (B-3)$$

όπου οι συντελεστές είναι ένας συνδυασμός όρων συναγωγής και διάχυσης, που δίνονται ως εξής:

$$A_p = A_n + A_s + A_e + A_w - S_p$$

$$S^u = S_p \cdot u_p + S_u$$

$$A_e^u = D_e - (1 - f_e) \cdot C_e$$

$$A_w^u = D_w + (1 - f_w) \cdot C_w$$

(B-4)

$$A_n^u = D_n - \frac{C_n}{2}$$

$$A_s^u = D_s + \frac{C_s}{2}$$

$$S_p = C_e - C_w + C_n - C_s$$

$$S_u = f_x \cdot (\Delta x \cdot \Delta y) + [\rho_w * (\Delta y)_w - \rho_p * (\Delta y)_e]$$

Οι όροι συναγωγής δίνονται απ'τους τύπους:

$$C_e = (\rho \cdot u * \Delta y)_e$$

$$C_w = (\rho \cdot u * \Delta y)_w$$

(B-5)

$$C_n = (\rho \cdot v * \Delta x)_n$$

$$C_s = (\rho \cdot v * \Delta x)_s$$

και οι όροι διάχυσης είναι:

$$D_e = \left( \frac{\mu \cdot \Delta y}{\delta x} \right)_e$$

$$D_w = \left( \frac{\mu \cdot \Delta y}{\delta x} \right)_w \quad (B-6)$$

$$D_n = \left( \frac{\mu \cdot \Delta x}{\delta y} \right)_n$$

$$D_s = \left( \frac{\mu \cdot \Delta x}{\delta y} \right)_s$$

### Εξίσωση της διατήρησης της μάζας

Η ολοκλήρωση της εξίσωσης της διατήρησης της μάζας (3.1-6) στον πεπερασμένο όγκο ελέγχου του σχήματος 9 δίνει:

$$(\rho \cdot u \cdot A)_e - (\rho \cdot u \cdot A)_w + (\rho \cdot v \cdot A)_n - (\rho \cdot v \cdot A)_s = 0 \quad (B-7)$$

Η λύση των εξισώσεων διατήρησης της ορμής της μορφής:

$$A_p^u \cdot u_p^* = \sum A_i^u \cdot u_i^* + S^u + D^u \cdot (\rho_w^* - \rho_p^*)$$

και (B-8)

$$A_p^v \cdot v_p^* = \sum A_i^v \cdot v_i^* + S^v + D^v \cdot (\rho_s^* - \rho_p^*)$$

μας δίνει ταχύτητες  $u^*$  και  $v^*$ , οι οποίες, γενικά, δεν ικανοποιούν την τοπική συνέχεια της μάζας.

Γι'αυτό, εφαρμόζονται διορθώσεις της πίεσης σε κάθε σημείο  $P$  για να ικανοποιηθεί η τοπική ισορροπία της μάζας. Αν  $p'_E$ ,  $p'_W$ ,  $p'_N$ ,  $p'_S$  και  $p'_P$  είναι οι απαραίτητες διορθώσεις στο  $P$ , οι ακόλουθες σχέσεις παράγονται από τις εξισώσεις (B-8), παραλείποντας τους όρους υψηλότερης τάξης:

$$u_p = u_p^* + u'_p = u_p^* + D^u \cdot (p'_W - p'_p)$$

$$v_p = v_p^* + v'_p = v_p^* + D^v \cdot (p'_S - p'_p) \quad (B-9)$$

$$p_p = p_p^* + p'_p$$

όπου  $u'_p$  και  $v'_p$  είναι οι διορθώσεις της ταχύτητας. Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (B.9) στη σχέση (B.7), παίρνουμε την εξίσωση της διόρθωσης της πίεσης στην τελική της μορφή:

$$A_p^p \cdot p_p' = A_e^p \cdot p_e' + A_w^p \cdot p_w' + A_n^p \cdot p_n' + A_s^p \cdot p_s' + S^p \quad (\text{B-10})$$

όπου οι συντελεστές ορίζονται ως εξής:

$$S^p = S_p \cdot p_p' + S_u$$

$$A_p^p = A_e^p + A_w^p + A_n^p + A_s^p$$

$$A_e^p = (\rho \cdot D^u \cdot \Delta y)_e$$

$$A_w^p = (\rho \cdot D^u \cdot \Delta y)_w$$

(B-11)

$$A_n^p = (\rho \cdot D^v \cdot \Delta x)_n$$

$$A_s^p = (\rho \cdot D^v \cdot \Delta x)_s$$

$$S_p = 0$$

$$S_u = C_e - C_w + C_n - C_s$$

Οι όροι συναγωγής  $C_e$ ,  $C_w$ ,  $C_n$ ,  $C_s$  ορίζονται όπως και για την εξίσωση της ταχύτητας  $u$ . Τα  $D^u$  και  $D^v$  ορίζονται από τις σχέσεις:

$$D_e^u = \left( \frac{\Delta y}{A_p} \right)_e$$

$$D_w^u = \left( \frac{\Delta y}{A_p} \right)_w$$

(B-12)

$$D_n^v = \left( \frac{\Delta x}{A_p} \right)_n$$

$$D_s^v = \left( \frac{\Delta x}{A_p} \right)_s$$

όπου τα  $A_p$  ορίζονται στις αντίστοιχες εξισώσεις των ταχυτήτων.

Οι συντελεστές αυτοί τροποποιούνται με δύο τρόπους. Ο πρώτος ονομάζεται τροποποίηση για σταθερότητα της μάζας και χρησιμοποιείται για την αποφυγή αύξησης των υπολειμματικών πηγαίων όρων της μάζας στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας, όπου τα πεδία των μεταβλητών που υποθέσαμε δεν



είναι ικανοποιητικά. Ο δεύτερος, που ονομάζεται τροποποίηση για υψηλή ροή, είναι ένας τρόπος εφαρμογής της μεθόδου των “υβριδικών διαφορών”, που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.4.

### Τροποποίηση για σταθερότητα της μάζας

Οι συντελεστές  $A_p$  των εξισώσεων της ταχύτητας  $u$  και  $v$  περιλαμβάνουν ένα άθροισμα:

$$\text{άθροισμα} = C_e - C_w + C_n - C_s$$

που είναι η υπολειμματική πηγή της μάζας.

Αν το άθροισμα αυτό γίνεται αρνητικό, είναι σαν να τροφοδοτείται η κυψέλη με μια μάζα, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει αστάθεια κατά την επίλυση, αυξάνοντας απεριόριστα τις υπολογισμένες τιμές. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού έχει ενσωματωθεί ένα τέχνασμα, που θέτει το άθροισμα μηδέν, αν είναι αρνητικό και περιλαμβάνει έναν πρόσθετο πηγαίο όρο στο  $S_u$ . Έτσι έχουμε:

$$C_p = \max\{0, \text{άθροισμα}\}$$

$$S_p = \text{άλλοι όροι} - C_p$$

$$S_u = \text{άλλοι όροι} - C_p \cdot u_p^*$$

### Τροποποίηση για υψηλή ροή

Η μέθοδος των “υβριδικών διαφορών”, που αναφέρεται στο κεφάλαιο 3.4, εφαρμόζεται με τον τρόπο που φαίνεται παρακάτω. Η ίδια πρακτική χρησιμοποιείται και στις δύο εξισώσεις ταχύτητας και έτσι αναφερόμαστε μόνο στην εξίσωση διατήρησης της ταχύτητας  $u$ . Για το σκοπό αυτό, οι συντελεστές  $A_i$  των εξισώσεων πεπτερασμένων διαφορών τροποποιούνται ως εξής:

$$A_e^u = \max\{0, D_e - (1 - f_e) \cdot C_e, -C_e\}$$

$$A_w^u = \max\{0, D_w + (1 - f_w) \cdot C_w, C_w\}$$

$$A_n^u = \max\left\{0, D_n - \frac{C_n}{2}, -C_n\right\}$$

$$A_s^u = \max\left\{0, D_s + \frac{C_s}{2}, C_s\right\}$$

## Παράρτημα Γ

### Λίστα του προγράμματος GLASS

```

C-----*****
C  GRADUATING PROJECT : ANDREAS ATZEMIAN
C  MECHANICAL & INDUSTRIAL ENGINEERING DEPARTMENT
C  UNIVERSITY OF THESSALY , VOLOS , GREECE
C-----*****
C  *
C  *          PROGRAM GLASS
C  *
C  *  MODELLING OF FLOW PROCESSES
C  *          IN A GLASS FURNACE
C  *
C-----*****
C  ADVISOR : PROFESSOR N.S.VLACHOS
C  MECHANICAL & INDUSTRIAL ENGINEERING DEPARTMENT
C  UNIVERSITY OF THESSALY , VOLOS , GREECE
C-----*****
C  PROGRAM BASED ON *HELIOS/TEACH* , BY N.S.VLACHOS
C-----*****
C  MAIN ROUTINE *CONTRO*
C-----*****
C  PURPOSE...PROGRAM CONTROL
C  IE...CONTROL OF CALCULATION PROCEDURE
C-----*****
C
C  PROGRAM GLASS
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0 0 0
C
COMMON
1/HEAD/HEDU,HEDV,HEDP,HEDT,HEDDEN,HEDVIS,HEDGAM,HEDAK,HEDCPF
1  ,HEDPRA,HEDPSI
1/UVEL/RSU,NSWPU,URFU,DXEPU(50),DXPWU(50),SEWU(50)
1/VVEL/RSV,NSWPV,URFV,DYNPV(50),DYPSV(50),SNSV(50)
1/PCOR/RSM,NSWPP,URFP,DU(50,50),DV(50,50),IPREF,JPREF
1/TEMP/RST,NSWPT,URFT
1/VARI/U(50,50),V(50,50),P(50,50),T(50,50),PP(50,50)
1/INDI/IT,JT,NI,NJ,NIM1,NJM1,GREAT,SMALL
1/GEOM/INDCOS,R(50),RV(50),RCV(50)
1  ,Y(50),DYNP(50),DYPS(50),SNS(50),YV(50),WFN(50),WFS(50)
1  ,X(50),DXEP(50),DXPW(50),SEW(50),XU(50),WFE(50),WFW(50)
1/PROP/VISCOS,DENSIT,CONDUCT,SPHEAT,PRANDT
1  ,AVIS,BVIS,AAK,BAK,ACPF,BCPF
1  ,DEN(50,50),VIS(50,50),GAMH(50,50),AK(50,50),CPF(50,50)
1  ,PRAN(50,50)
1/VECT/VX(50,50),VY(50,50),PSI(50,50)
COMMON
1/PROG/MAXIT,SORMAX,PREF,IMON,JMON,INDPRI,NUMPRI,INDMON,NUMMON
1/PROB/UIN,TIN,TWALL,TFREE,TOBS,FLOWIN
1/STEP/JSTEP,JSTEPP,ISTEP,ISTEPP
1/INDC/RE

```

```

1/DIST/HYDIAM,XTOT,YTOT
1/XOBS/XIN,XOUT,NXI,NXO
1/YOBS/YIN,YOUT,NYI,NYO
1/LOGI/INCALU,INCALV,INCALP,INCALT,INDEN,INVIS,INGAM,INAK,INCPF,INP
1  RA,INPSI
LOGICAL INCALU,INCALV,INCALP,INCALT,INDEN,INVIS,INGAM,INAK,INCPF,I
1  NPRA,INPSI
CHARACTER*30 HEDU,HEDV,HEDP,HEDT,HEDDEN,HEDVIS,HEDGAM,HEDAK,HEDCPF
1  ,HEDPRA,HEDPSI
C
CHAPTER 1 1 1 1 1 DATA,PARAMETERS AND CONTROL INDICES 1 1 1 1 1
C
C-----OPEN FILE 'GLASS.DAT' FOR INITIAL DATA AND READ IT
C
OPEN(1,FILE='GLASS.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
READ(1,40) UIN,TIN,TWALL,TFREE,TOBS,XIN,XOUT,NXI,NXO,YIN,YOUT,NYI,
1  NYO,DENSIT,AVIS,BVIS,AAK,BAK,ACPF,BCPF,INDCOS,MAXIT,SOR MAX,
1  INDPRI,NUMPRI,INDMON,NUMMON,NSWPU,NSWPV,NSWPP,NSWPT
40 FORMAT (9X,E10.3,/,6(9X,E10.3,/),2(9X,I3,/),2(9X,E10.3,/),2(9X,I3,
1  /),9X,E10.3,/,6(9X,E10.3,/),9X,I3,/,9X,I4,/,9X,E10.3,/,
1  9X,I4,/,6(9X,I3,/),9X,I3)
C
C-----OPEN FILE 'RESIDUAL.DAT' TO STORE RESIDUAL DATA
C
OPEN(2,FILE='RESIDUAL.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
C
C-----OPEN FILE 'VECTORS.DAT' TO STORE VECTOR DATA
C
OPEN(3,FILE='VECTORS.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
C
C-----OPEN FILE 'PRESSUR1.DAT' TO STORE PRESSURE CONTOUR DATA
C
OPEN(4,FILE='PRESSUR1.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
C
C-----OPEN FILE 'PRESSUR2.DAT' TO STORE PRESSURE CONTOUR DATA (CONTINUED)
C
OPEN(7,FILE='PRESSUR2.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
C
C-----OPEN FILE 'TEMPERAT.DAT' TO STORE TEMPERATURE CONTOUR DATA
C
OPEN(8,FILE='TEMPERAT.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
C
C-----OPEN FILE 'VISCOSIT.DAT' TO STORE VISCOSITY CONTOUR DATA
C
OPEN(9,FILE='VISCOSIT.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
C
C-----OPEN FILE 'THCONDUCT.DAT' TO STORE THERMAL CONDUCTIVITY CONTOUR DATA
C
OPEN(10,FILE='THCONDUCT.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
C
C-----OPEN FILE 'SPEHEAT.DAT' TO STORE SPECIFIC HEAT CONTOUR DATA
C
OPEN(11,FILE='SPEHEAT.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
C
C-----OPEN FILE 'PRANDTL.DAT' TO STORE PRANDTL NUMBER CONTOUR DATA

```

```

C
  OPEN(12,FILE='PRANDTL.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
C
C-----OPEN FILE 'STREAM.DAT' TO STORE STREAM FUNCTION CONTOUR DATA
C
  OPEN(13,FILE='STREAM.DAT',FORM='FORMATTED',ACCESS='SEQUENTIAL')
C
C-----FLOW CONFIGURATION
C
C-----GRID SPACING IN THE X-DIRECTION
  X(1)=0.0
  CALL GRIDX(NI,X)
  XTOT=X(NI)
C-----GRID SPACING IN THE Y-DIRECTION
  Y(1)=0.0
  CALL GRIDY(NJ,Y)
  YTOT=Y(NJ)
  HYDIAM=YTOT
C-----PROGRAM CONTROL AND MONITOR
  NIM1=NI-1
  NJM1=NJ-1
  ISTEP=NXI+1
  JSTEP=NYO+1
  ISTEPP=ISTEP+1
  JSTEPP=JSTEP+1
  IMON=ISTEP
  JMON=JSTEP
C
CHAPTER 2 2 2 2 2 2 2 2 INITIAL OPERATIONS 2 2 2 2 2 2
C
C-----CALCULATE GRID AND CELL DIMENSIONS
  CALL GRID
C-----INITIALISE VARIABLE FIELDS
  P(IPREF,JPREF)=PREF
C-----SET INITIAL U-VELOCITIES TO *UIN*
  DO 200 J=2,NJ
    DO 200 I=2,NI
      200 U(I,J)=UIN
C-----SET SOUTH BOUNDARY U-VELOCITIES TO ZERO
  DO 202 I=2,NI
    202 U(I,1)=0.0
C-----SET U-VELOCITIES WITHIN OBSTACLE TO ZERO
  DO 201 I=ISTEPP,NI
    DO 201 J=JSTEPP,NJ
      201 U(I,J)=0.0
C-----SET INITIAL TEMPERATURES TO *TIN*
  DO 223 J=1,NJ
    DO 223 I=1,NI
      223 T(I,J)=TIN
C-----SET FREE BOUNDARY TEMPERATURE TO *TFREE*
  DO 224 I=1,ISTEP
    224 T(I,NJ)=TFREE
C-----SET SOUTH BOUNDARY TEMPERATURE TO *TWALL*
  DO 225 I=1,NI
    225 T(I,1)=TWALL

```

```

C-----SET OBSTACLE TEMPERATURE TO *TOBS*
  DO 226 I=ISTEPP,NI
  DO 226 J=JSTEPP,NJ
  226 T(I,J)=TOBS
C-----TREAT UPPER RIGHT CORNER CELL
  T(ISTEP,NJ)=0.5*(TFREE+TOBS)
C-----SET FLUID PROPERTIES
  CALL PROPG
C-----CALCULATE NOMINAL VALUES OF PROPERTIES
  VISCOS=0.0
  CONDUCT=0.0
  SPHEAT=0.0
  DO 110 J=2,NJM1
  VISCOS=VISCOS+VIS(2,J)
  CONDUCT=CONDUCT+AK(2,J)
  SPHEAT=SPHEAT+CPF(2,J)
  110 CONTINUE
  VISCOS=VISCOS/FLOAT(NJ-2)
  CONDUCT=CONDUCT/FLOAT(NJ-2)
  SPHEAT=SPHEAT/FLOAT(NJ-2)
  RE=DENSIT*UIN*HYDIAM/VISCOS
  PRANDT=VISCOS*SPHEAT/CONDUCT
C
C-----PROBLEM HEADING AND INFORMATION
C
  WRITE (6,220)
  220 FORMAT(' ',120('-'))
  WRITE(6,210)
  210 FORMAT(T30,'2-D ELLIPTIC FLOW COMPUTATIONS')
  WRITE(6,290)
  290 FORMAT(T30,'CREEPING FLOW')
  WRITE(6,291)
  291 FORMAT(T30,'OF MELTING GLASS')
  IF(INDCOS.EQ.1) WRITE(6,293)
  293 FORMAT(T30,'USING CARTESIAN COORDINATES')
  IF(INDCOS.EQ.2) WRITE(6,294)
  294 FORMAT(T30,'USING CYLINDRICAL COORDINATES')
  WRITE(6,295) NI,NJ
  295 FORMAT(/,T30,'THE USED GRID IS: ',I2,' x ',I2)
  WRITE(6,245) XTOT,XIN,XOUT,HYDIAM,YIN,YOUT
  245 FORMAT(/,T15,'FURNACE DIMENSIONS ARE: ',/,
  1T25,'TOTAL LENGTH          = ',1PE11.3/,
  1T25,'INLET LENGTH           = ',1PE11.3/,
  1T25,'OUTLET LENGTH          = ',1PE11.3/,
  1T25,'TOTAL HEIGHT           = ',1PE11.3/,
  1T25,'HEIGHT OF OBSTACLE     = ',1PE11.3/,
  1T25,'HEIGHT OF CHANNEL      = ',1PE11.3/)
  WRITE(6,230) UIN
  230 FORMAT(T20,'INLET FLUID VELOCITY ',T60,1H=,3X,1PE11.3)
  WRITE(6,240) RE
  240 FORMAT(T20,'REYNOLDS NUMBER ',T60,1H=,3X,1PE11.3)
  WRITE(6,250) PRANDT
  250 FORMAT(T20,'PRANDTL NUMBER ',T60,1H=,3X,1PE11.3)
  WRITE(6,270) VISCOS
  270 FORMAT(T20,'FLUID VISCOSITY ',T60,1H=,3X,1PE11.3)

```

```

WRITE(6,280) DENSIT
280 FORMAT(T20,'FLUID DENSITY',T60,1H=,3X,1PE11.3)
WRITE(6,282) CONDUCT
282 FORMAT(T20,'FLUID THERMAL CONDUCTIVITY FACTOR',T60,1H=,3X,1PE11.3)
WRITE(6,284) SPHEAT
284 FORMAT(T20,'FLUID SPECIFIC HEAT FACTOR',T60,1H=,3X,1PE11.3)
WRITE(6,297) TIN,TWALL,TFREE,TOBS
297 FORMAT(/,T15,'TEMPERATURE BOUNDARY CONDITIONS ARE: ',/
1T25,'INLET TEMPERATURE      = ',1PE11.3/
1T25,'WALL TEMPERATURE      = ',1PE11.3/
1T25,'FREE BOUNDARY TEMPERATURE = ',1PE11.3/
1T25,'OBSTACLE TEMPERATURE   = ',1PE11.3)
WRITE (6,220)
C-----INITIAL OUTPUT
IF(INCALU) CALL PRINT(2,1,NI,NJ,IT,JT,XU,Y,U,HEDU)
IF(INCALV) CALL PRINT(1,2,NI,NJ,IT,JT,X,YV,V,HEDV)
IF(INCALP) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,P,HEDP)
IF(INCALT) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,T,HEDT)
IF(INDEN) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,DEN,HEDDEN)
IF(INVIS) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,VIS,HEDVIS)
IF(INAK) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,AK,HEDAK)
IF(INCPF) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,CPF,HEDCPF)
IF(INPRA) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,PRAN,HEDPRA)
IF(INGAM) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,GAMH,HEDGAM)
C
CHAPTER 3 3 3 3 3 3 3 ITERATION LOOP 3 3 3 3 3 3 3
C
C-----CALCULATE INLET MASS FLOW RATE
FLOWIN=0.0
I=2
DO 211 J=2,NJM1
211 FLOWIN=FLOWIN+RCV(J)*DEN(I,J)*SNS(J)*U(I,J)
WRITE(6,241) RE
241 FORMAT(/,35X,'REYNOLDS NUMBER ',T60,1H=,3X,1PE11.3)
WRITE(6,265) FLOWIN
265 FORMAT(35X,'MASS FLOW RATE',T60,1H=,3X,1PE11.3)
C-----RESIDUAL SOURCES NORMALISING VALUES
RSU=0.0
RSV=0.0
RSM=0.0
RST=0.0
SORU=FLOWIN*UIN
SORV=SORU
SORM=FLOWIN
SORT=FLOWIN*TIN
WRITE(6,310) IMON,JMON
310 FORMAT(1H0,'ITER I-----ABSOLUTE RESIDUAL SOURCE SUMS-----I
11-FIELD VALUES AT MONITORING LOCATION('I2,',',I2,')-I',/,2X,'NO.'
1,4X,'UMOM',7X,'VMOM',7X,'MASS',7X,'ENER',15X,'U',10X,'V',10X,'P',1
10X,'T',/)
NITER=0
300 NITER=NITER+1
C-----UPDATE MAIN DEPENDENT VARIABLES
IF(INCALU) CALL CALCU
IF(INCALV) CALL CALCV

```



```

      IF(INCALP) CALL CALCP
      IF(INCALT) CALL CALCT
C-----UPDATE FLUID PROPERTIES
      CALL PROPG
C-----INTERMEDIATE OUTPUT
      RSU=RSU/SORU
      RSV=RSV/SORV
      RSM=RSM/SORM
      RST=RST/SORT
      IF(NITER.EQ.1) GO TO 305
      IF((NITER+INDMON-NUMMON)/INDMON.NE.NITER/INDMON) GO TO 304
305 CONTINUE
      WRITE(6,311) NITER,RSU,RSV,RSM,RST,U(IMON,JMON),
1          V(IMON,JMON),P(IMON,JMON),T(IMON,JMON)
311 FORMAT(1H ,I4,1X,4(1PE10.3,1X),6X,4(1PE10.3,1X))
304 CONTINUE
      IF(NITER.EQ.MAXIT) GO TO 302
      IF((NITER+INDPRI-NUMPRI)/INDPRI.NE.NITER/INDPRI) GO TO 301
      IF(INCALU) CALL PRINT(2,1,NI,NJ,IT,JT,XU,Y,U,HEDU)
      IF(INCALV) CALL PRINT(1,2,NI,NJ,IT,JT,X,YV,V,HEDV)
      IF(INCALP) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,P,HEDP)
      IF(INCALT) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,T,HEDT)
      WRITE(6,310) IMON,JMON
301 CONTINUE
C
CHAPTER 4 4 4 4 4 4 FINAL OPERATIONS AND OUTPUT 4 4 4 4 4 4
C
C-----TERMINATION TESTS
      SORCE=AMAX1(RSU,RSV,RSM,RST)
302 IF(SORCE.GT.SORMAX.AND.NITER.LT.MAXIT) THEN
      WRITE(2,1000) NITER,RSU,RSV,RSM,RST,SORCE
1000 FORMAT(I4,4(1PE11.3),1PE11.3)
      GO TO 300
      ELSE IF(SORCE.GT.SORMAX.AND.NITER.EQ.MAXIT) THEN
      WRITE(2,1000) NITER,RSU,RSV,RSM,RST,SORCE
      WRITE(6,307) MAXIT,SORCE
307 FORMAT(' ',120('-'),/, ' AFTER ',I4, ' ITERATIONS:',/, ' DIVERGENCE O
1R SUCCESSFUL CONVERGENCE',/, ' BUT NOT WITH THE PRESENT PRECISION'
1,/, ' THE ACHIEVED PRECISION IS: ',1PE11.3,/,120('-'))
      GOTO 306
      ELSE
      WRITE(2,1000) NITER,RSU,RSV,RSM,RST,SORCE
      WRITE(6,311) NITER,RSU,RSV,RSM,RST,U(IMON,JMON),
1          V(IMON,JMON),P(IMON,JMON),T(IMON,JMON)
      WRITE(6,308) NITER,SORCE
308 FORMAT(' ',120('-'),/, ' SUCCESSFUL CONVERGENCE AFTER ',I4, ' ITERAT
1IONS',/, ' THE ACHIEVED PRECISION IS: ',1PE11.3,/,120('-'))
      GOTO 306
      END IF
306 IF(INCALU) CALL PRINT(2,1,NI,NJ,IT,JT,XU,Y,U,HEDU)
      IF(INCALV) CALL PRINT(1,2,NI,NJ,IT,JT,X,YV,V,HEDV)
      IF(INCALP) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,P,HEDP)
      IF(INCALT) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,T,HEDT)
      IF(INDEN) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,DEN,HEDDEN)
      IF(INVIS) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,VIS,HEDVIS)

```



```

      IF(INAK) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,AK,HEDAK)
      IF(INCPF) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,CPF,HEDCPF)
      IF(INPRA) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,PRAN,HEDPRA)
      IF(INGAM) CALL PRINT(1,1,NI,NJ,IT,JT,X,Y,GAMH,HEDGAM)
C-----CLOSE FILE 'RESIDUAL.DAT'
      CLOSE(2,STATUS='KEEP')
C-----CLOSE FILE 'GLASS.DAT'
      CLOSE(1,STATUS='KEEP')
C
CHAPTER 5 5 5 5  ADDITIONAL CALCULATIONS FOR PLOTTING  5 5 5 5
C
C-----CALCULATE VELOCITY VECTORS
C
C-----U-VELOCITIES AT PLOTTING NODES
      DO 22 J=2,NJM1
      DO 22 I=2,NIM1
      VX(I,J)=(U(I,J)*WFE(I)+U(I+1,J)*(1.0-WFE(I)))
22 CONTINUE
C-----U-VELOCITIES ON THE BOUNDARY NODES
      DO 21 J=2,NJM1
      VX(1,J)=U(2,J)
      VX(NI,J)=U(NI,J)
21 CONTINUE
      DO 13 I=2,NIM1
      VX(I,1)=U(I,1)
      VX(I,NJ)=U(I,NJ)
13 CONTINUE
C-----V-VELOCITIES AT PLOTTING NODES
      DO 33 J=2,NJM1
      DO 33 I=2,NIM1
      VY(I,J)=(V(I,J)*WFN(J)+V(I,J+1)*(1.0-WFN(J)))
33 CONTINUE
C-----V-VELOCITIES ON THE BOUNDARY NODES
      DO 32 J=2,NJM1
      VY(1,J)=V(1,J)
      VY(NI,J)=V(NI,J)
32 CONTINUE
      DO 34 I=2,NIM1
      VY(I,1)=V(I,2)
      VY(I,NJ)=V(I,NJ)
34 CONTINUE
      DO 35 J=1,NJ
35 VY(1,J)=0.0
C-----CALCULATE STREAM FUNCTION
      DO 817 I=1,NI
      HPS1=0.0
      PSI(I,1)=0.0
      PSI(I,NJ)=FLOWIN
      DO 818 J=2,NJM1
      HPS2=0.5*(YV(J+1)-YV(J))*DEN(I,J)*U(I,J)
      DPSI=HPS1+HPS2
      PSI(I,J)=PSI(I,J-1)+DPSI
      HPS1=HPS2
818 CONTINUE
817 CONTINUE

```

```

C
  IF(INPSI) CALL PRINT(2,1,NI,NJ,IT,JT,XU,Y,PSI,HEDPSI)
C
CHAPTER 6 6 6 6 6 6 DATA TRANSFER TO FILES 6 6 6 6 6 6
C
C-----WRITE DATA TO FILE 'VECTORS.DAT'-----
  DO 70 J=1,NJ
  DO 70 I=1,NI
    WRITE(3,71) X(I),Y(J),VX(I,J),VY(I,J)
  70 CONTINUE
  71 FORMAT(1X,1PE9.2,1X,1PE9.2,1X,1PE9.2,1X,1PE9.2)
C-----CLOSE FILE 'VECTORS.DAT'-----
  CLOSE(3,STATUS='KEEP')
C-----WRITE DATA TO FILE 'PRESSUR1.DAT'-----
  DO 72 J=2,NJM1
  DO 72 I=2,ISTEP
    WRITE(4,73) X(I),Y(J),P(I,J)
  72 CONTINUE
  73 FORMAT(1X,1PE9.2,1X,1PE9.2,1X,1PE9.2)
C-----CLOSE FILE 'PRESSUR1.DAT'-----
  CLOSE(4,STATUS='KEEP')
C-----WRITE DATA TO FILE 'PRESSUR2.DAT'-----
  DO 74 J=2,NJM1
  DO 74 I=ISTEP,NIM1
    WRITE(7,75) X(I),Y(J),P(I,J)
  74 CONTINUE
  75 FORMAT(1X,1PE9.2,1X,1PE9.2,1X,1PE9.2)
C-----CLOSE FILE 'PRESSUR2.DAT'-----
  CLOSE(7,STATUS='KEEP')
C-----WRITE DATA TO FILE 'TEMPERAT.DAT'-----
  DO 76 J=1,NJ
  DO 76 I=1,NI
    WRITE(8,77) X(I),Y(J),T(I,J)
  76 CONTINUE
  77 FORMAT(1X,1PE9.2,1X,1PE9.2,1X,1PE9.2)
C-----CLOSE FILE 'TEMPERAT.DAT'-----
  CLOSE(8,STATUS='KEEP')
C-----WRITE DATA TO FILE 'VISCOSIT.DAT'-----
  DO 78 J=1,NJ
  DO 78 I=1,NI
    WRITE(9,79) X(I),Y(J),VIS(I,J)
  78 CONTINUE
  79 FORMAT(1X,1PE9.2,1X,1PE9.2,1X,1PE9.2)
C-----CLOSE FILE 'VISCOSIT.DAT'-----
  CLOSE(9,STATUS='KEEP')
C-----WRITE DATA TO FILE 'THCONDUCT.DAT'-----
  DO 80 J=1,NJ
  DO 80 I=1,NI
    WRITE(10,81) X(I),Y(J),AK(I,J)
  80 CONTINUE
  81 FORMAT(1X,1PE9.2,1X,1PE9.2,1X,1PE9.2)
C-----CLOSE FILE 'THCONDUCT.DAT'-----
  CLOSE(10,STATUS='KEEP')
C-----WRITE DATA TO FILE 'SPEHEAT.DAT'-----
  DO 82 J=1,NJ

```

```

DO 82 I=1,NI
WRITE(11,83) X(I),Y(J),CPF(I,J)
82 CONTINUE
83 FORMAT(1X,1PE9.2,1X,1PE9.2,1X,1PE9.2)
C-----CLOSE FILE 'SPEHEAT.DAT'-----
CLOSE(11,STATUS='KEEP')
C-----WRITE DATA TO FILE 'PRANDTL.DAT'-----
DO 84 J=1,NJ
DO 84 I=1,NI
WRITE(12,85) X(I),Y(J),CPF(I,J)
84 CONTINUE
85 FORMAT(1X,1PE9.2,1X,1PE9.2,1X,1PE9.2)
C-----CLOSE FILE 'SPEHEAT.DAT'-----
CLOSE(12,STATUS='KEEP')
C-----WRITE DATA TO FILE 'STREAM.DAT'-----
DO 86 J=1,NJ
DO 86 I=2,NI
WRITE(13,87) XU(I),Y(J),PSI(I,J)
86 CONTINUE
87 FORMAT(1X,1PE9.2,1X,1PE9.2,1X,1PE9.2)
C-----CLOSE FILE 'STREAM.DAT'-----
CLOSE(13,STATUS='KEEP')
C
STOP
END
C
SUBROUTINE FIT(NOD,L,DOUT,DL,FF,D)
C-----*****
C SUBROUTINE *FIT* *A.ATZEMIAN/1995/*
C-----*****
C PURPOSE...FIT *L* GRID LINES
C IN A *DL* DISTANCE STARTING FROM *DOUT*
C-----*****
XMAX=DL
AC=1E-4
ACM=1.0-AC
ACP=1.0+AC
F=1.0
DF=0.1
AF=-0.1
10 F=F+DF
DX=DOUT
XTOT=0.5*DOUT
DO 100 I=2,L
DX=DX*F
100 XTOT=XTOT+DX
DXH=0.5*DX*F
XTOT=XTOT+DXH
IF(NOD.EQ.1) XTOT=XTOT+DXH
IF(ABS((XTOT-XMAX)/XMAX).LE.AC) GO TO 50
IF(XTOT.LT.ACM*XMAX.AND.DF.LT.0) DF=AF*DF
IF(XTOT.LT.ACM*XMAX) GO TO 10
IF(XTOT.GT.ACP*XMAX.AND.DF.GT.0) DF=AF*DF
GO TO 10
50 FF=F

```

```

D=XTOT
RETURN
END
C
SUBROUTINE GRIDX(NI,X)
C-----*****
C SUBROUTINE *GRIDX* *A.ATZEMIAN/1995/*
C-----*****
C PURPOSE...CALCULATE X-GRID
C IE...X-DIRECTION GRID LINES
C IN THE PRESENCE OF OBSTACLES
C-----*****
C DIMENSION X(1)
C COMMON/XOBS/XIN,XOUT,NXI,NXO
C-----INLET *DXI*
C DXI=XIN/FLOAT(NXI)
C-----OUTLET *DXO*
C DXO=XOUT/FLOAT(NXO)
C
C IF(DXI.LT.DXO) STOP 'WARNING!...DXI<DXO...TRY AGAIN!'
C
C-----TREAT FIRST HALF GRID LINES
C
C X(NXI+1)=XIN-0.5*DXO
C NOD=0
C CALL FIT(NOD,NXI,DXO,XIN,FXI,XIN)
C DX=DXO
C F=FXI
C DO 110 II=2,NXI
C DX=DX*F
C I=NXI+2-II
C X(I)=X(I+1)-DX
110 CONTINUE
C
C-----TREAT LAST HALF GRID LINES
C
C X(NXI+2)=X(NXI+1)+DXO
C DO 140 II=2,NXO
C I=NXI+1+II
C X(I)=X(I-1)+DXO
140 CONTINUE
C NI=NXI+NXO+2
C X(NI)=XIN+XOUT
C RETURN
C END
C
SUBROUTINE GRIDY(NJ,Y)
C-----*****
C SUBROUTINE *GRIDY* *A.ATZEMIAN/1995/*
C-----*****
C PURPOSE...CALCULATE Y-GRID
C IE...Y-DIRECTION GRID LINES
C IN THE PRESENCE OF OBSTACLES
C-----*****
C DIMENSION Y(1)

```

```

COMMON/YOBS/YIN,YOUT,NYI,NYO
C-----UPPER *DYI*
  DYI=YIN/FLOAT(NYI)
C-----LOWER *DYO*
  DYO=YOUT/FLOAT(NYO)
C
  IF(DYI.LT.DYO) STOP 'WARNING!...DYI<DYO...TRY AGAIN!'
C
C-----TREAT LOWER HALF GRID LINES
C
  Y(2)=0.5*DYO
  DO 140 J=3,NYO+1
    Y(J)=Y(J-1)+DYO
  140 CONTINUE
C
C-----TREAT UPPER HALF GRID LINES
C
  Y(NYO+2)=Y(NYO+1)+DYO
  NOD=0
  CALL FIT(NOD,NYI,DYO,YIN,FYI,YIN)
  DY=DYO
  F=FYI
  DO 110 JJ=2,NYI
    DY=DY*F
    J=NYO+JJ+1
    Y(J)=Y(J-1)+DY
  110 CONTINUE
  NJ=NYI+NYO+2
  Y(NJ)=YIN+YOUT
  RETURN
  END
C
  SUBROUTINE GRID
C-----*****
C  SUBROUTINE *GRID*                                *N.S.VLACHOS/1977/*
C-----*****
C  PURPOSE...GRID CALCULATION
C    IE...DISTANCES OF GRID LINES
C    CELL DIMENSIONS
C    RADIAL DISTANCES
C-----*****
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0
C
COMMON
1/UVEL/RSU,NSWPU,URFU,DXEPU(50),DXPWU(50),SEWU(50)
1/VVEL/RSV,NSWPV,URFV,DYNPV(50),DYPSV(50),SNSV(50)
1/INDI/IT,JT,NI,NJ,NIM1,NJM1,GREAT,SMALL
1/GEOM/INDCOS,R(50),RV(50),RCV(50)
1  ,Y(50),DYNP(50),DYPS(50),SNS(50),YV(50),WFN(50),WFS(50)
1  ,X(50),DXEP(50),DXPW(50),SEW(50),XU(50),WFE(50),WFW(50)
C
CHAPTER 1 1 1 1 1 CALCULATE GEOMETRICAL QUANTITIES 1 1 1 1 1
C
C-----DINSTANCES OF P,T-CELLS

```

```

DXPW(1)=0.0
DXEP(NI)=0.0
DO 101 I=1,NIM1
DXEP(I)=X(I+1)-X(I)
101 DXPW(I+1)=DXEP(I)
DYPS(1)=0.0
DYNP(NJ)=0.0
DO 102 J=1,NJM1
DYNP(J)=Y(J+1)-Y(J)
102 DYPS(J+1)=DYNP(J)
C-----P,T-CELL DIMENSIONS
SEW(1)=0.0
SEW(2)=DXPW(2)+0.5*DXEP(2)
SEW(NIM1)=0.5*DXPW(NIM1)+DXEP(NIM1)
SEW(NI)=0.0
NIM2=NIM1-1
DO 103 I=3,NIM2
103 SEW(I)=0.5*(DXEP(I)+DXPW(I))
SNS(1)=0.0
SNS(2)=DYPS(2)+0.5*DYNP(2)
SNS(NJM1)=0.5*DYPS(NJM1)+DYNP(NJM1)
SNS(NJ)=0.0
NJM2=NJM1-1
DO 104 J=3,NJM2
104 SNS(J)=0.5*(DYNP(J)+DYPS(J))
C-----LOCATIONS AND DISTANCES OF U-CELLS
XU(1)=X(1)
XU(2)=X(1)
DO 105 I=3,NIM1
105 XU(I)=0.5*(X(I)+X(I-1))
XU(NI)=X(NI)
DXPWU(1)=0.0
DXPWU(2)=0.0
DXEPU(1)=0.0
DXEPU(NI)=0.0
DO 106 I=2,NIM1
DXEPU(I)=XU(I+1)-XU(I)
106 DXPWU(I+1)=DXEPU(I)
C-----U-CELL DIMENSIONS
SEWU(1)=0.0
DO 107 I=2,NI
107 SEWU(I)=X(I)-X(I-1)
C-----U-VELOCITIES WEIGHTING FACTORS
DO 303 I=3,NIM1
WFW(I)=SEWU(I-1)/(SEWU(I-1)+SEWU(I))
WFE(I)=SEWU(I+1)/(SEWU(I+1)+SEWU(I))
303 CONTINUE
WFW(3)=SEWU(2)/(SEWU(2)+0.5*SEWU(3))
WFE(NIM1)=SEWU(NI)/(SEWU(NI)+0.5*SEWU(NIM1))
WFE(2)=1.0-WFW(3)
C-----LOCATIONS AND DISTANCES OF V-CELLS
YV(1)=Y(1)
YV(2)=Y(1)
YV(NJ)=Y(NJ)
DO 108 J=3,NJM1

```

```

108 YV(J)=0.5*(Y(J)+Y(J-1))
  DYPSV(1)=0.0
  DYPSV(2)=0.0
  DYNPV(1)=0.0
  DYNPV(NJ)=0.0
  DO 109 J=1,NJM1
    DYNPV(J)=YV(J+1)-YV(J)
109 DYPSV(J+1)=DYNPV(J)
C-----V-CELL DIMENSIONS
  SNSV(1)=0.0
  DO 110 J=2,NJ
    SNSV(J)=Y(J)-Y(J-1)
C-----V-VELOCITIES WEIGHTING FACTORS
  DO 403 J=3,NJM1
    WFS(J)=SNSV(J-1)/(SNSV(J-1)+SNSV(J))
    WFN(J)=SNSV(J+1)/(SNSV(J+1)+SNSV(J))
403 CONTINUE
  WFS(3)=SNSV(2)/(SNSV(2)+0.5*SNSV(3))
  WFN(NJM1)=SNSV(NJ)/(SNSV(NJ)+0.5*SNSV(NJM1))
  WFN(2)=1.0-WFS(3)
C
CHAPTER 2 2 2 2 2 2 CYLINDRICAL COORDINATES 2 2 2 2 2 2
C
C-----EXTRA VARIABLES DEFINED FOR CYLINDRICAL COORDINATES
  DO 100 J=1,NJ
    R(J)=Y(J)
100 IF(INDCOS.EQ.1)R(J)=1.0
  RV(1)=R(1)
  RV(2)=R(1)
  RV(NJ)=R(NJ)
  DO 601 J=3,NJM1
    RV(J)=0.5*(R(J)+R(J-1))
  RCV(1)=R(1)
  RCV(NJ)=R(NJ)
  DO 602 J=2,NJM1
    RCV(J)=0.5*(RV(J+1)+RV(J))
  RETURN
  END
C
  SUBROUTINE PROPS
C-----*****
C  SUBROUTINE *PROPS* *A.ATZEMIAN/1995/*
C-----*****
C  PURPOSE...PROPERTY CALCULATION
C    IE...CALCULATE VISCOSITY
C    THERMAL DIFFUSION COEFFICIENTS,ETC.
C-----*****
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0 0
C
  COMMON
  1/UVEL/RSU,NSWPU,URFU,DXEPU(50),DXPWU(50),SEWU(50)
  1/VVEL/RSV,NSWPV,URFV,DYNPV(50),DYPSV(50),SNSV(50)
  1/VARI/U(50,50),V(50,50),P(50,50),T(50,50),PP(50,50)
  1/INDI/IT,IT,NI,NJ,NIM1,NJM1,GREAT,SMALL

```



```

1/GEOM/INDCOS,R(50),RV(50),RCV(50)
1  ,Y(50),DYNP(50),DYPS(50),SNS(50),YV(50),WFN(50),WFS(50)
1  ,X(50),DXEP(50),DXPW(50),SEW(50),XU(50),WFE(50),WFW(50)
1/PROP/VISCOS,DENSIT,CONDUCT,SPHEAT,PRANDT
1  ,AVIS,BVIS,AAK,BAK,ACPF,BCPF
1  ,DEN(50,50),VIS(50,50),GAMH(50,50),AK(50,50),CPF(50,50)
1  ,PRAN(50,50)
1/PROB/UIN,TIN,TWALL,TFREE,TOBS,FLOWIN
C
CHAPTER 1 1 DENSITY,VISCOSITY AND THERMAL EXCHANGE COEFFICIENT 1 1
C
ENTRY PROPG
C-----PROPERTIES ARE NON-UNIFORM FOR THIS PROBLEM
DO 100 J=1,NJ
DO 100 I=1,NI
DEN(I,J)=DENSIT
VIS(I,J)=AVIS*EXP(BVIS*T(I,J))
AK(I,J)=AAK*EXP(BAK*T(I,J))
CPF(I,J)=ACPF*EXP(BCPF*T(I,J))
PRAN(I,J)=VIS(I,J)*CPF(I,J)/AK(I,J)
GAMH(I,J)=VIS(I,J)/PRAN(I,J)
100 CONTINUE
RETURN
C
CHAPTER 2 2 2 2 2 PROBLEM MODIFICATIONS 2 2 2 2 2 2 2 2
C
CALL MODPRO
RETURN
END
C
SUBROUTINE CALCU
C-----*****
C SUBROUTINE *CALCU* *N.S.VLACHOS/1977/*
C-----*****
C PURPOSE...U-MOMENTUM EQUATION
C IE...CALCULATE COEFFICIENTS OF F.D EQUATIONS
C SOLVE MATRIX-EQUATION BY *TDMA*
C-----*****
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0 0
C
COMMON
1/PCOR/RSM,NSWPP,URFP,DU(50,50),DV(50,50),IPREF,JPREF
1/UVEL/RSU,NSWPU,URFU,DXEPU(50),DXPWU(50),SEWU(50)
1/VARI/U(50,50),V(50,50),P(50,50),T(50,50),PP(50,50)
1/INDI/IT,JT,NI,NJ,NIM1,NJM1,GREAT,SMALL
1/GEOM/INDCOS,R(50),RV(50),RCV(50)
1  ,Y(50),DYNP(50),DYPS(50),SNS(50),YV(50),WFN(50),WFS(50)
1  ,X(50),DXEP(50),DXPW(50),SEW(50),XU(50),WFE(50),WFW(50)
1/COEF/AP(50,50),AN(50,50),AS(50,50),AE(50,50),AW(50,50)
1  ,SU(50,50),SP(50,50)
1/PROP/VISCOS,DENSIT,CONDUCT,SPHEAT,PRANDT
1  ,AVIS,BVIS,AAK,BAK,ACPF,BCPF
1  ,DEN(50,50),VIS(50,50),GAMH(50,50),AK(50,50),CPF(50,50)
1  ,PRAN(50,50)

```

```

1/PROB/UIN,TIN,TWALL,TFREE,TOBS,FLOWIN
1/STEP/JSTEP,JSTEPP,ISTEP,ISTEPP
C
CHAPTER 1 1 1 1 1 1 ASSEMBLY OF COEFFICIENTS 1 1 1 1 1 1
C
DO 100 J=2,NJM1
DO 100 I=3,NIM1
C-----COMPUTE AREAS AND VOLUME
AREAN=RV(J+1)*SEWU(I)
AREAS=RV(J)*SEWU(I)
AREAEW=RCV(J)*SNS(J)
VOL=RCV(J)*SEWU(I)*SNS(J)
C-----CALCULATE CONVECTION COEFFICIENTS
GN=0.5*(DEN(I,J+1)+DEN(I,J))*V(I,J+1)
GNW=0.5*(DEN(I-1,J)+DEN(I-1,J+1))*V(I-1,J+1)
GS=0.5*(DEN(I,J-1)+DEN(I,J))*V(I,J)
GSW=0.5*(DEN(I-1,J)+DEN(I-1,J-1))*V(I-1,J)
GE=DEN(I,J)*(U(I+1,J)*(1.0-WFE(I))+U(I,J)*WFE(I))
GW=DEN(I-1,J)*(U(I-1,J)*(1.0-WFW(I))+U(I,J)*WFW(I))
CN=0.5*(GN+GNW)*AREAN
CS=0.5*(GS+GSW)*AREAS
CE=GE*AREAEW
CW=GW*AREAEW
C-----CALCULATE DIFFUSION COEFFICIENTS
VISN=0.25*(VIS(I,J)+VIS(I,J+1)+VIS(I-1,J)+VIS(I-1,J+1))
VISS=0.25*(VIS(I,J)+VIS(I,J-1)+VIS(I-1,J)+VIS(I-1,J-1))
DN=VISN*AREAN/DYNP(J)
DS=VISS*AREAS/DYPS(J)
DE=VIS(I,J)*AREAEW/DXEPU(I)
DW=VIS(I-1,J)*AREAEW/DXPWU(I)
C-----CALCULATE SOURCE TERM (MASS-STABILITY MODIFICATION)
SMP=CN-CS+CE-CW
CP=AMAX1(0.0,SMP)
CPO=CP
C-----ASSEMBLE MAIN COEFFICIENTS (HIGH-FLUX MODIFICATION)
AN(I,J)=AMAX1(ABS(0.5*CN),DN)-0.5*CN
AS(I,J)=AMAX1(ABS(0.5*CS),DS)+0.5*CS
DE=AMAX1(DE,-WFE(I)*CE,(1.0-WFE(I))*CE)
DW=AMAX1(DW,WFW(I)*CW,-(1.0-WFW(I))*CW)
AE(I,J)=DE-(1.0-WFE(I))*CE
AW(I,J)=DW+(1.0-WFW(I))*CW
DU(I,J)=AREAEW
SU(I,J)=CPO*U(I,J)+DU(I,J)*(P(I-1,J)-P(I,J))
SP(I,J)=-CP
C-----EXTRA SOURCE TERMS FOR VARIABLE VISCOSITY
DMX=(VIS(I,J)-VIS(I-1,J))/SEWU(I)
DUX=0.5*(U(I+1,J)-U(I,J))/DXEPU(I)+0.5*(U(I,J)-U(I-1,J))/DXPWU(I)
DMY=0.25*(VIS(I,J+1)+VIS(I-1,J+1)-VIS(I,J)-VIS(I-1,J))/DYNP(J)
1+0.25*(VIS(I,J)+VIS(I-1,J)-VIS(I,J-1)-VIS(I-1,J-1))/DYPS(J)
DVX=0.5*(V(I,J+1)+V(I,J)-V(I-1,J+1)-V(I-1,J))/SEWU(I)
SU(I,J)=SU(I,J)+(DMX*DUX+DMY*DVX)*VOL
100 CONTINUE
C
C
CHAPTER 2 2 2 2 2 2 2 PROBLEM MODIFICATIONS 2 2 2 2 2 2 2

```

```

C
  CALL MODU
C
CHAPTER 3 FINAL COEFF. ASSEMBLY AND RESIDUAL SOURCE CALCULATION 3 3
C
  RSU=0.0
  DO 300 J=2,NJM1
  DO 300 I=3,NIM1
    AP(I,J)=AN(I,J)+AS(I,J)+AE(I,J)+AW(I,J)-SP(I,J)
    DU(I,J)=DU(I,J)/AP(I,J)
    RESOR=AN(I,J)*U(I,J+1)+AS(I,J)*U(I,J-1)+AE(I,J)*U(I+1,J)
    1 +AW(I,J)*U(I-1,J)-AP(I,J)*U(I,J)+SU(I,J)
C-----TREAT SPECIAL CELLS
  VOL=RCV(J)*SEWU(I)*SNS(J)
  SORVOL=GREAT*VOL
  IF(-SP(I,J).GT.0.5*SORVOL) RESOR=RESOR/SORVOL
  RSU=RSU+ABS(RESOR)
C-----SOLUTION RELAXATION
  AP(I,J)=AP(I,J)/URFU
  SU(I,J)=SU(I,J)+(1.-URFU)*AP(I,J)*U(I,J)
  DU(I,J)=DU(I,J)*URFU
  300 CONTINUE
C
C
CHAPTER 4 4 4 SOLUTION OF FINITE DIFFERENCE EQUATIONS (TDMA) 4 4
C
  DO 400 N=1,NSWPU
  400 CALL LISOLV(3,2,NI,NJ,IT,JT,U)
  RETURN
  END
C
  SUBROUTINE CALCV
C-----*****
C  SUBROUTINE *CALCV* *N.S.VLACHOS/1977/*
C-----*****
C  PURPOSE...V-MOMENTUM EQUATION
C    IE...CALCULATE COEFFICIENTS OF F.D EQUATIONS
C    SOLVE MATRIX-EQUATION BY *TDMA*
C-----*****
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0 0
C
  COMMON
  1/VVEL/RSV,NSWPV,URFV,DYNPV(50),DYPSV(50),SNSV(50)
  1/PCOR/RSM,NSWPP,URFP,DU(50,50),DV(50,50),IPREF,JPREF
  1/VARI/U(50,50),V(50,50),P(50,50),T(50,50),PP(50,50)
  1/INDI/IT,JT,NI,NJ,NIM1,NJM1,GREAT,SMALL
  1/GEOM/INDCOS,R(50),RV(50),RCV(50)
  1 ,Y(50),DYNP(50),DYPS(50),SNS(50),YV(50),WFN(50),WFS(50)
  1 ,X(50),DXEP(50),DXPW(50),SEW(50),XU(50),WFE(50),WFW(50)
  1/PROP/VISCOS,DENSIT,CONDUC,SPHEAT,PRANDT
  1 ,AVIS,BVIS,AAK,BAK,ACPF,BCPF
  1 ,DEN(50,50),VIS(50,50),GAMH(50,50),AK(50,50),CPF(50,50)
  1 ,PRAN(50,50)
  1/COEF/AP(50,50),AN(50,50),AS(50,50),AE(50,50),AW(50,50)

```

```

1      ,SU(50,50),SP(50,50)
1/PROB/UITN,TIN,TWALL,TFREE,TOBS,FLOWIN
1/STEP/JSTEP,JSTEPP,ISTEP,ISTEPP
C
CHAPTER 1 1 1 1 1 1 ASSEMBLY OF COEFFICIENTS 1 1 1 1 1 1
C
      DO 100 J=3,NJM1
      DO 100 I=2,NIM1
C-----COMPUTE AREAS AND VOLUME
      AREAN=R(J)*SEW(I)
      AREAS=R(J-1)*SEW(I)
      AREAEW=RV(J)*SNSV(J)
      VOL=RV(J)*SEW(I)*SNSV(J)
C-----CALCULATE CONVECTION COEFFICIENTS
      GN=DEN(I,J)*(V(I,J+1)*(1.0-WFN(J))+V(I,J)*WFN(J))
      GS=DEN(I,J-1)*(V(I,J-1)*(1.0-WFS(J))+V(I,J)*WFS(J))
      GE=0.5*(DEN(I+1,J)+DEN(I,J))*U(I+1,J)
      GSE=0.5*(DEN(I,J-1)+DEN(I+1,J-1))*U(I+1,J-1)
      GW=0.5*(DEN(I,J)+DEN(I-1,J))*U(I,J)
      GSW=0.5*(DEN(I,J-1)+DEN(I-1,J-1))*U(I,J-1)
      CN=GN*AREAN
      CS=GS*AREAS
      CE=0.5*(GE+GSE)*AREAEW
      CW=0.5*(GW+GSW)*AREAEW
C-----CALCULATE DIFFUSION COEFFICIENTS
      VISE=0.25*(VIS(I,J)+VIS(I+1,J)+VIS(I,J-1)+VIS(I+1,J-1))
      VISW=0.25*(VIS(I,J)+VIS(I-1,J)+VIS(I,J-1)+VIS(I-1,J-1))
      DN=VIS(I,J)*AREAN/DYNPV(J)
      DS=VIS(I,J-1)*AREAS/DYPSV(J)
      DE=VISE*AREAEW/DXEP(I)
      DW=VISW*AREAEW/DXPW(I)
C-----CALCULATE SOURCE TERM (MASS-STABILITY MODIFICATION)
      SMP=CN-CS+CE-CW
      CP=AMAX1(0.0,SMP)
      CPO=CP
C-----ASSEMBLE MAIN COEFFICIENTS (HIGH-FLUX MODIFICATION)
      DN=AMAX1(DN,-WFN(J)*CN,(1.0-WFN(J))*CN)
      DS=AMAX1(DS,WFS(J)*CS,-(1.0-WFS(J))*CS)
      AN(I,J)=DN-(1.0-WFN(J))*CN
      AS(I,J)=DS+(1.0-WFS(J))*CS
      AE(I,J)=AMAX1(ABS(0.5*CE),DE)-0.5*CE
      AW(I,J)=AMAX1(ABS(0.5*CW),DW)+0.5*CW
      DV(I,J)=0.5*(AREAN+AREAS)
      SU(I,J)=CPO*V(I,J)+DV(I,J)*(P(I,J-1)-P(I,J))
      SP(I,J)=-CP
C-----EXTRA SOURCE TERMS FOR VARIABLE VISCOSITY
      DMX=0.25*(VIS(I+1,J)+VIS(I+1,J-1)-VIS(I,J)-VIS(I,J-1))/DXEP(I)
      1+0.25*(VIS(I,J)+VIS(I,J-1)-VIS(I-1,J)-VIS(I-1,J-1))/DXPW(I)
      DUY=0.5*(U(I+1,J)+U(I,J)-U(I+1,J-1)-U(I,J-1))/SNSV(J)
      DMY=(VIS(I,J)-VIS(I,J-1))/SNSV(J)
      DVY=0.5*(V(I,J+1)-V(I,J))/DYNPV(J)+0.5*(V(I,J)-V(I,J-1))/DYPSV(J)
      SU(I,J)=SU(I,J)+(DMX*DUY+DMY*DVY)*VOL
100 CONTINUE
C
CHAPTER 2 2 2 2 2 2 PROBLEM MODIFICATIONS 2 2 2 2 2 2

```

```

C
  CALL MODV
C
CHAPTER 3 FINAL COEFF. ASSEMBLY AND RESIDUAL SOURCE CALCULATION 3 3
C
  RSV=0.0
  DO 300 J=3,NJM1
  DO 300 I=2,NIM1
  AP(I,J)=AN(I,J)+AS(I,J)+AE(I,J)+AW(I,J)-SP(I,J)
  DV(I,J)=DV(I,J)/AP(I,J)
  RESOR=AN(I,J)*V(I,J+1)+AS(I,J)*V(I,J-1)+AE(I,J)*V(I+1,J)
  1 +AW(I,J)*V(I-1,J)-AP(I,J)*V(I,J)+SU(I,J)
C-----TREAT SPECIAL CELLS
  VOL=RV(J)*SEW(I)*SNSV(J)
  SORVOL=GREAT*VOL
  IF(-SP(I,J).GT.0.5*SORVOL) RESOR=RESOR/SORVOL
  RSV=RSV+ABS(RESOR)
C-----SOLUTION RELAXATION
  AP(I,J)=AP(I,J)/URFV
  SU(I,J)=SU(I,J)+(1.-URFV)*AP(I,J)*V(I,J)
  DV(I,J)=DV(I,J)*URFV
  300 CONTINUE
C
C
CHAPTER 4 4 4 SOLUTION OF FINITE DIFFERENCE EQUATIONS (TDMA) 4 4
C
  DO 400 N=1,NSWPV
  400 CALL LISOLV(2,3,NI,NJ,IT,JT,V)
  RETURN
  END
C
  SUBROUTINE CALCP
C-----*****
C  SUBROUTINE *CALCP* *N.S.VLACHOS/1977/*
C-----*****
C  PURPOSE...PRESSURE-CORRECTION EQUATION
C  IE...CALCULATE COEFFICIENTS OF F.D EQUATIONS
C  SOLVE MATRIX-EQUATION BY *TDMA*
C-----*****
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0
C
  COMMON
  1/PCOR/RSM,NSWPP,URFP,DU(50,50),DV(50,50),IPREF,JPREF
  1/VARI/U(50,50),V(50,50),P(50,50),T(50,50),PP(50,50)
  1/INDI/IT,JT,NI,NJ,NIM1,NJM1,GREAT,SMALL
  1/GEOM/INDCOS,R(50),RV(50),RCV(50)
  1 ,Y(50),DYNP(50),DYPS(50),SNS(50),YV(50),WFN(50),WFS(50)
  1 ,X(50),DXEP(50),DXPW(50),SEW(50),XU(50),WFE(50),WFW(50)
  1/PROP/VISCOS,DENSIT,CONDUCT,SPHEAT,PRANDT
  1 ,AVIS,BVIS,AAK,BAK,ACPF,BCPF
  1 ,DEN(50,50),VIS(50,50),GAMH(50,50),AK(50,50),CPF(50,50)
  1 ,PRAN(50,50)
  1/COEF/AP(50,50),AN(50,50),AS(50,50),AE(50,50),AW(50,50)
  1 ,SU(50,50),SP(50,50)

```

```

1/PROB/UIN,TIN,TWALL,TFREE,TOBS,FLOWIN
1/STEP/JSTEP,JSTEPP,ISTEP,ISTEPP
C
RSM=0.0
C
CHAPTER 1 1 1 1 1 1 ASSEMBLY OF COEFFICIENTS 1 1 1 1 1 1
C
DO 100 J=2,NJM1
DO 100 I=2,NIM1
C-----COMPUTE AREAS AND VOLUME
AREAN=RV(J+1)*SEW(I)
AREAS=RV(J)*SEW(I)
AREAEW=RCV(J)*SNS(J)
VOL=RCV(J)*SEW(I)*SNS(J)
C-----CALCULATE COEFFICIENTS
DENN=0.5*(DEN(I,J)+DEN(I,J+1))
DENS=0.5*(DEN(I,J)+DEN(I,J-1))
DENE=0.5*(DEN(I,J)+DEN(I+1,J))
DENW=0.5*(DEN(I,J)+DEN(I-1,J))
AN(I,J)=DENN*AREAN*DV(I,J+1)
AS(I,J)=DENS*AREAS*DV(I,J)
AE(I,J)=DENE*AREAEW*DU(I+1,J)
AW(I,J)=DENW*AREAEW*DU(I,J)
C-----CALCULATE SOURCE TERMS
CN=DENN*V(I,J+1)*AREAN
CS=DENS*V(I,J)*AREAS
CE=DENE*U(I+1,J)*AREAEW
CW=DENW*U(I,J)*AREAEW
SMP=CN-CS+CE-CW
SP(I,J)=0.0
SU(I,J)=-SMP
C-----COMPUTE SUM OF ABSOLUTE MASS SOURCES
RSM=RSM+ABS(SMP)
100 CONTINUE
C
CHAPTER 2 2 2 2 2 2 PROBLEM MODIFICATIONS 2 2 2 2 2 2
C
CALL MODP
C
CHAPTER 3 3 3 3 3 FINAL COEFFICIENT ASSEMBLY 3 3 3 3 3 3
C
DO 300 J=2,NJM1
DO 300 I=2,NIM1
AP(I,J)=AN(I,J)+AS(I,J)+AE(I,J)+AW(I,J)-SP(I,J)
300 CONTINUE
C
CHAPTER 4 4 4 SOLUTION OF FINITE DIFFERENCE EQUATIONS (TDMA) 4 4
C
DO 400 N=1,NSWPP
400 CALL LISOLV(2,2,NI,NJ,IT,JT,PP)
C
CHAPTER 5 5 5 5 CORRECT VELOCITIES AND PRESSURE 5 5 5 5 5 5
C
C-----VELOCITIES
DO 500 J=2,NJM1

```



```

DO 500 I=2,NIM1
  U(I,J)=U(I,J)+DU(I,J)*(PP(I-1,J)-PP(I,J))
  V(I,J)=V(I,J)+DV(I,J)*(PP(I,J-1)-PP(I,J))
500 CONTINUE
C-----PRESSURES ( WITH PROVISION FOR RELAXATION )
  PPREF=PP(IPREF,JREF)
  DO 502 J=2,NJM1
    DO 502 I=2,NIM1
      P(I,J)=P(I,J)+URFP*(PP(I,J)-PPREF)
      PP(I,J)=0.0
502 CONTINUE
C-----SET PRESSURES WITHIN OBSTACLE TO ZERO
  DO 503 J=JSTEPP,NJ
    DO 503 I=ISTEPP,NI
      P(I,J)=0.0
503 CONTINUE
  RETURN
  END

C
  SUBROUTINE CALCT
C-----*****
C  SUBROUTINE *CALCT*                                *N.S.VLACHOS/1977/*
C-----*****
C  PURPOSE...THERMAL-ENERGY EQUATION
C          IE...CALCULATE COEFFICIENTS OF F.D EQUATIONS
C          SOLVE MATRIX-EQUATION BY *TDMA*
C-----*****
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0
C
  COMMON
  1/TEMP/RST,NSWPT,URFT
  1/VARI/U(50,50),V(50,50),P(50,50),T(50,50),PP(50,50)
  1/INDI/IT,JT,NI,NJ,NIM1,NJM1,GREAT,SMALL
  1/GEOM/INDCOS,R(50),RV(50),RCV(50)
  1  ,Y(50),DYNP(50),DYPS(50),SNS(50),YV(50),WFN(50),WFS(50)
  1  ,X(50),DXEP(50),DXPW(50),SEW(50),XU(50),WFE(50),WFW(50)
  1/PROP/VISCOS,DENSIT,CONDUCT,SPHEAT,PRANDT
  1  ,AVIS,BVIS,AAK,BAK,ACPF,BCPF
  1  ,DEN(50,50),VIS(50,50),GAMH(50,50),AK(50,50),CPF(50,50)
  1  ,PRAN(50,50)
  1/COEF/AP(50,50),AN(50,50),AS(50,50),AE(50,50),AW(50,50)
  1  ,SU(50,50),SP(50,50)
C
CHAPTER 1 1 1 1 1 1 ASSEMBLY OF COEFFICIENTS 1 1 1 1 1 1
C
  DO 100 J=2,NJM1
    DO 100 I=2,NIM1
C-----COMPUTE AREAS AND VOLUME
      AREAN=RV(J+1)*SEW(I)
      AREAS=RV(J)*SEW(I)
      AREAEW=RCV(J)*SNS(J)
      VOL=RCV(J)*SEW(I)*SNS(J)
C-----CALCULATE CONVECTION COEFFICIENTS
      GN=0.5*(DEN(I,J)+DEN(I,J+1))*V(I,J+1)

```



```

GS=0.5*(DEN(I,J)+DEN(I,J-1))*V(I,J)
GE=0.5*(DEN(I,J)+DEN(I+1,J))*U(I+1,J)
GW=0.5*(DEN(I,J)+DEN(I-1,J))*U(I,J)
CN=GN*AREAN
CS=GS*AREAS
CE=GE*AREA EW
CW=GW*AREA EW
C-----CALCULATE DIFFUSION COEFFICIENTS
GAMN=0.5*(GAMH(I,J)+GAMH(I,J+1))
GAMS=0.5*(GAMH(I,J)+GAMH(I,J-1))
GAME=0.5*(GAMH(I,J)+GAMH(I+1,J))
GAMW=0.5*(GAMH(I,J)+GAMH(I-1,J))
DN=GAMN*AREAN/DYNP(J)
DS=GAMS*AREAS/DYPS(J)
DE=GAME*AREA EW/DXEP(I)
DW=GAMW*AREA EW/DXPW(I)
C-----CALCULATE SOURCE TERM (MASS-STABILITY MODIFICATION)
SMP=CN-CS+CE-CW
CP=AMAX1(0.0,SMP)
CPO=CP
C-----ASSEMBLE MAIN COEFFICIENTS (HIGH-FLUX MODIFICATION)
AN(I,J)=AMAX1(ABS(0.5*CN),DN)-0.5*CN
AS(I,J)=AMAX1(ABS(0.5*CS),DS)+0.5*CS
AE(I,J)=AMAX1(ABS(0.5*CE),DE)-0.5*CE
AW(I,J)=AMAX1(ABS(0.5*CW),DW)+0.5*CW
SU(I,J)=CPO*T(I,J)
SP(I,J)=-CP
100 CONTINUE
C
CHAPTER 2 2 2 2 2 2 PROBLEM MODIFICATIONS 2 2 2 2 2 2
C
CALL MODT
C
CHAPTER 3 FINAL COEFFICIENT ASSEMBLY AND RESIDUAL SOURCE CALCULATION 3
C
RST=0.0
DO 300 J=2,NJM1
DO 300 I=2,NIM1
AP(I,J)=AN(I,J)+AS(I,J)+AE(I,J)+AW(I,J)-SP(I,J)
RESOR=AN(I,J)*T(I,J+1)+AS(I,J)*T(I,J-1)+AE(I,J)*T(I+1,J)
1 +AW(I,J)*T(I-1,J)-AP(I,J)*T(I,J)+SU(I,J)
C-----TREAT SPECIAL CELLS
VOL=RCV(J)*SEW(I)*SNS(J)
SORVOL=GREAT*VOL
IF(-SP(I,J).GT.0.5*SORVOL) RESOR=RESOR/SORVOL
RST=RST+ABS(RESOR)
C-----SOLUTION RELAXATION
AP(I,J)=AP(I,J)/URFT
SU(I,J)=SU(I,J)+(1.-URFT)*AP(I,J)*T(I,J)
300 CONTINUE
C
CHAPTER 4 4 4 SOLUTION OF FINITE DIFFERENCE EQUATIONS (TDMA) 4 4
C
DO 400 N=1,NSWPT
400 CALL LISOLV(2,2,NI,NJ,IT,JT,T)

```

```

RETURN
END
C
SUBROUTINE LISOLV(ISTART,JSTART,NI,NJ,IT,JT,PHI)
C-----*****
C SUBROUTINE *LISOLV* *N.S.VLACHOS/1977/*
C-----*****
C PURPOSE...SOLUTION OF MATRIX EQUATION
C IE...APPLICATION OF *TDMA*
C-----*****
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0 0
C
DIMENSION PHI(IT,JT),A(52),B(52),C(52),D(52)
COMMON
1/COEF/AP(50,50),AN(50,50),AS(50,50),AE(50,50),AW(50,50)
1 SU(50,50),SP(50,50)
NIM1=NI-1
NJM1=NJ-1
ISTA=ISTART
JSTA=JSTART
JSTM1=JSTA-1
A(JSTM1)=0.0
C-----COMMENCE W-E SWEEP
DO 100 I=ISTA,NIM1
C(JSTM1)=PHI(I,JSTM1)
C-----COMMENCE S-N TRAVERSE
DO 101 J=JSTA,NJM1
C-----ASSEMBLE TDMA COEFFICIENTS
A(J)=AN(I,J)
B(J)=AS(I,J)
C(J)=AE(I,J)*PHI(I+1,J)+AW(I,J)*PHI(I-1,J)+SU(I,J)
D(J)=AP(I,J)
C-----CALCULATE COEFFICIENTS OF RECURRENCE FORMULA
TERM=1./(D(J)-B(J)*A(J-1))
A(J)=A(J)*TERM
101 C(J)=(C(J)+B(J)*C(J-1))*TERM
C-----OBTAIN NEW PHI'S
DO 102 JJ=JSTA,NJM1
J=NJ+JSTM1-JJ
102 PHI(I,J)=A(J)*PHI(I,J+1)+C(J)
100 CONTINUE
C
C-----***** DOUBLE SWEEP *****
C
ISTM1=ISTA-1
A(ISTM1)=0.0
C-----COMMENCE N-S SWEEP
DO 200 J=JSTA,NJM1
C(ISTM1)=PHI(ISTM1,J)
C-----COMMENCE W-E TRAVERSE
DO 201 I=ISTA,NIM1
C-----ASSEMBLE TDMA COEFFICIENTS
A(I)=AE(I,J)
B(I)=AW(I,J)

```

```

C(I)=AN(I,J)*PHI(I,J+1)+AS(I,J)*PHI(I,J-1)+SU(I,J)
D(I)=AP(I,J)
C-----CALCULATE COEFFICIENTS OF RECURRENCE FORMULA
TERM=1.0/(D(I)-B(I)*A(I-1))
A(I)=A(I)*TERM
201 C(I)=(C(I)+B(I)*C(I-1))*TERM
C-----OBTAIN NEW PHI'S
DO 203 II=ISTA,NIM1
I=NI+ISTM1-II
203 PHI(I,J)=A(I)*PHI(I+1,J)+C(I)
200 CONTINUE
RETURN
END

C
SUBROUTINE PRINT(ISTART,JSTART,NI,NJ,IT,JT,X,Y,PHI,HEAD)
C-----*****
C SUBROUTINE *PRINT* *A.ATZEMIAN/1995/*
C-----*****
C PURPOSE...PRINTOUT FIELD VALUES
C-----*****
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0 0
C
DIMENSION PHI(IT,JT),X(IT),Y(JT),STORE(52)
DIMENSION F(7),F4(11)
CHARACTER*30 HEAD
DATA F/4H(1H ,4H,A6,,4HI3, ,4H11I ,4H10, ,4H5X, ,
14HA6) /
DATA F4/4H 1I ,4H 2I ,4H 3I ,4H 4I ,4H 5I ,4H 6I ,
1 4H 7I ,4H 8I ,4H 9I ,4H10I ,4H11I /
DATA HI,HY/6H I = , 6H Y = /

C
CHAPTER 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
C
ISKIP=1
JSKIP=1
WRITE(6,110)HEAD
ISTA=ISTART-12
JSTA=JSTART
100 CONTINUE
ISTA=ISTA+12
IEND=ISTA+11
IEND=MIN0(NI,IEND)
F(4)=F4(IEND-ISTA)
WRITE(6,F) HI, (I,I=ISTA,IEND,ISKIP), HY
WRITE(6,112)
DO 101 JJ=JSTA,NJ,JSKIP
J=JSTA+NJ-JJ
DO 120 I=ISTA,IEND
A=PHI(I,J)
IF(ABS(A).LT.1.E-20) A=0.0
120 STORE(I)=A
101 WRITE(6,113) J,(STORE(I),I=ISTA,IEND,ISKIP),Y(J)
WRITE(6,114) (X(I),I=ISTA,IEND,ISKIP)
IF(IEND.LT.NI)GO TO 100

```

```

      RETURN
110 FORMAT(1H0,50(''),A30,50(''))
112 FORMAT(3H J)
113 FORMAT(1H ,I3,1P12E10.2,0PF7.3)
114 FORMAT(4H0X= ,12E10.3)
      END
C
      SUBROUTINE PROMOD
C-----*****
C   SUBROUTINE *PROMOD*                               *A.ATZEMIAN/1995/*
C-----*****
C   PURPOSE...PROBLEM MODIFICATIONS
C           IE...MODIFY COEFFICIENTS OF F.D EQUATIONS
C           TO FIT SPECIFIC BOUNDARIES
C-----*****
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0 0 0
C
      COMMON
1/UVEL/RSU,NSWPU,URFU,DXEPU(50),DXPWU(50),SEWU(50)
1/VVEL/RSV,NSWPV,URFV,DYNPV(50),DYPSV(50),SNSV(50)
1/PCOR/RSM,NSWPP,URFP,DU(50,50),DV(50,50),IPREF,JPREF
1/TEMP/RST,NSWPT,URFT
1/VARI/U(50,50),V(50,50),P(50,50),T(50,50),PP(50,50)
1/INDI/IT,JT,NI,NJ,NIM1,NJM1,GREAT,SMALL
1/GEOM/INDCOS,R(50),RV(50),RCV(50)
1   ,Y(50),DYNP(50),DYPS(50),SNS(50),YV(50),WFN(50),WFS(50)
1   ,X(50),DXEP(50),DXPW(50),SEW(50),XU(50),WFE(50),WFW(50)
1/PROP/VISCOS,DENSIT,CONDUC,SPHEAT,PRANDT
1   ,AVIS,BVIS,AAK,BAK,ACPF,BCPF
1   ,DEN(50,50),VIS(50,50),GAMH(50,50),AK(50,50),CPF(50,50)
1   ,PRAN(50,50)
1/COEF/AP(50,50),AN(50,50),AS(50,50),AE(50,50),AW(50,50)
1   ,SU(50,50),SP(50,50)
1/PROB/UIN,TIN,TWALL,TFREE,TOBS,FLOWIN
1/STEP/JSTEP,JSTEPP,ISTEP,ISTEPP
C
CHAPTER 1 1 1 1 1 1 1 PROPERTIES 1 1 1 1 1 1 1 1 1
C
      ENTRY MODPRO
      RETURN
C
CHAPTER 2 2 2 2 2 2 2 U MOMENTUM 2 2 2 2 2 2 2 2 2
C
      ENTRY MODU
C-----CHECK OUTLET FLOW RATE AND ADJUST
      ARDEN=0.0
      FLOW=0.0
      DO 204 J=2,JSTEP
      DENAR=0.5*(DEN(NIM1,J)+DEN(NIM1-1,J))*RCV(J)*SNS(J)
      ARDEN=ARDEN+DENAR
204 FLOW=FLOW+DENAR*U(NIM1,J)
      UINC=(FLOWIN-FLOW)/ARDEN
      DO 205 J=2,JSTEP
205 U(NI,J)=U(NIM1,J)+UINC

```

C-----ADJUST INLET U-VELOCITY PROFILE

DO 206 J=2,NJ

206 U(2,J)=U(3,J)

C-----TREAT NORTH (FREE) BOUNDARY

DO 270 I=3,NIM1

AN(I,NJM1)=0.0

U(I,NJ)=U(I,NJM1)

270 CONTINUE

C-----SET U VELOCITY WITHIN OBSTACLE TO ZERO

DO 210 I=ISTEPP,NIM1

DO 210 J=JSTEPP,NJM1

SU(I,J)=0.0

SP(I,J)=-GREAT

210 CONTINUE

C-----BREAK PRESSURE LINK ON EAST WALL

DO 220 J=JSTEPP,NJM1

220 DU(ISTEPP,J)=0.0

C-----TREAT SOUTH BLOCK WALL

J=JSTEP

DY=YV(J+1)-Y(J)

DO 230 I=ISTEPP,NIM1

FACTOR=1.0

IF (I.EQ.ISTEPP) FACTOR=0.5

AN(I,J)=0.0

SP(I,J)=SP(I,J)-0.5\*(VIS(I,J)+VIS(I-1,J))\*SEWU(I)\*FACTOR/DY

230 CONTINUE

RETURN

C

CHAPTER 3 3 3 3 3 3 3 V MOMENTUM 3 3 3 3 3 3 3

C

ENTRY MODV

C-----SET V VELOCITY WITHIN OBSTACLE TO ZERO

DO 310 I=ISTEPP,NIM1

DO 310 J=JSTEPP,NJM1

SU(I,J)=0.0

SP(I,J)=-GREAT

310 CONTINUE

C-----BREAK PRESSURE LINK ON NORTH WALL

DO 320 I=ISTEPP,NIM1

320 DV(I,JSTEPP)=0.0

C-----TREAT EAST BLOCK WALL

I=ISTEP

DX=XU(I+1)-X(I)

DO 330 J=JSTEPP,NJM1

FACTOR=1.0

IF (J.EQ.JSTEPP) FACTOR=0.5

AE(I,J)=0.0

SP(I,J)=SP(I,J)-0.5\*(VIS(I,J)+VIS(I,J-1))\*SNSV(J)\*FACTOR/DX

330 CONTINUE

RETURN

C

CHAPTER 4 4 4 4 4 4 PRESSURE CORRECTION 4 4 4 4 4 4 4

C

ENTRY MODP

RETURN

```

C
CHAPTER 5 5 5 5 5 5 5 THERMAL ENERGY 5 5 5 5 5 5 5 5
C
ENTRY MODT
C-----TREAT WEST BLOCK WALL
I=ISTEP
DX=XU(I+1)-X(I)
DO 520 J=JSTEPP,NJM1
AREA=RCV(J)*SNS(J)
TERM=AREA*GAMH(I,J)/DX
SU(I,J)=SU(I,J)+TERM*TOBS
SP(I,J)=SP(I,J)-TERM
AE(I,J)=0.0
520 CONTINUE
C-----TREAT SOUTH BLOCK WALL
J=JSTEP
DY=YV(J+1)-Y(J)
DO 540 I=ISTEPP,NIM1
AREA=RV(J+1)*SEW(I)
TERM=AREA*GAMH(I,J)/DY
SU(I,J)=SU(I,J)+TERM*TOBS
SP(I,J)=SP(I,J)-TERM
AN(I,J)=0.0
540 CONTINUE
C-----TREAT OUTLET
DO 550 J=1,JSTEP
T(NI,J)=T(NIM1,J)
550 CONTINUE
C-----SET TEMPERATURE WITHIN OBSTACLE TO *TOBS*
DO 560 J=JSTEPP,NJ
DO 560 I=ISTEPP,NI
SU(I,J)=TOBS*GREAT
SP(I,J)=-GREAT
560 CONTINUE
RETURN
END
C
BLOCK DATA
C-----*****
C SUBROUTINE *DATA* *A.ATZEMIAN/1995/*
C-----*****
C PURPOSE...DATA SUPPLY
C IE...PROGRAM CONTROL INDICES
C FLOW GEOMETRY AND RATE
C VISCOSITY LAW , ETC.
C-----*****
C
CHAPTER 0 0 0 0 0 0 0 0 PRELIMINARIES 0 0 0 0 0 0 0 0
C
COMMON
1/HEAD/HEDU,HEDV,HEDP,HEDT,HEDDEN,HEDVIS,HEDGAM,HEDAK,HEDCPF
1 ,HEDPRA,HEDPSI
1/UVEL/RSU,NSWPU,URFU,DXEPU(50),DXPWU(50),SEWU(50)
1/VVEL/RSV,NSWPV,URFV,DYNPV(50),DYPV(50),SNSV(50)
1/PCOR/RSM,NSWPP,URFP,DU(50,50),DV(50,50),IPREF,JPREF

```



```

1/TEMP/RST,NSWPT,URFT
1/VARI/U(50,50),V(50,50),P(50,50),T(50,50),PP(50,50)
1/INDI/IT,JT,NI,NJ,NIM1,NJM1,GREAT,SMALL
1/GEOM/INDCOS,R(50),RV(50),RCV(50)
1  ,Y(50),DYNP(50),DYPS(50),SNS(50),YV(50),WFN(50),WFS(50)
1  ,X(50),DXEP(50),DXPW(50),SEW(50),XU(50),WFE(50),WFW(50)
1/PROP/VISCOS,DENSIT,CONDUCT,SPHEAT,PRANDT
1  ,AVIS,BVIS,AAK,BAK,ACPF,BCPF
1  ,DEN(50,50),VIS(50,50),GAMH(50,50),AK(50,50),CPF(50,50)
1  ,PRAN(50,50)
COMMON
1/PROG/MAXIT,SORMAX,PREF,IMON,JMON,INDPRI,NUMPRI,INDMON,NUMMON
1/PROB/UIN,TIN,TWALL,TFREE,TOBS,FLOWIN
1/STEP/JSTEP,JSTEPP,ISTEP,ISTEPP
1/INDC/RE
1/DIST/HYDIAM,XTOT,YTOT
1/LOGI/INCALU,INCALV,INCALP,INCALT,INDEN,INVIS,INGAM,INAK,INCPF,INP
1  RA,INPSI
LOGICAL INCALU,INCALV,INCALP,INCALT,INDEN,INVIS,INGAM,INAK,INCPF,I
1  NPRA,INPSI
CHARACTER*30 HEDU,HEDV,HEDP,HEDT,HEDDEN,HEDVIS,HEDGAM,HEDAK,HEDCPF
1  ,HEDPRA,HEDPSI
C
CHAPTER 1 1 1 1 1 1 1 INPUT DATA 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
C
C-----LOGICAL CONTROL INDICES
DATA INCALU,INCALV,INCALP,INCALT/.TRUE.,.TRUE.,.TRUE.,.TRUE./
DATA INDEN,INVIS,INGAM/.FALSE.,.TRUE.,.TRUE./
DATA INAK,INCPF,INPRA,INPSI/.TRUE.,.TRUE.,.TRUE.,.TRUE./
C-----HEADINGS OF FIELD VARIABLES
DATA HEDU/' U-VELOCITY '/'
DATA HEDV/' V-VELOCITY '/'
DATA HEDP/' P-PRESSURE '/'
DATA HEDT/' T-TEMPERATURE '/'
DATA HEDDEN/' DEN-DENSITY '/'
DATA HEDVIS/' VIS-VISCOSITY '/'
DATA HEDGAM/' GAMH-DIFFUSION COEFFICIENT '/'
DATA HEDAK/' AK-HEAT CONDUCTIVITY FACTOR '/'
DATA HEDCPF/' CPF-SPECIFIC HEAT FACTOR '/'
DATA HEDPRA/' PRAN-PRANDTL NUMBER '/'
DATA HEDPSI/' PSI-STREAM FUNCTION '/'
C-----MAXIMUM NUMBER OF GRID LINES
DATA IT,JT/50,50/
C-----GENERAL CONSTANTS
DATA GREAT,SMALL/1E30,1E-30/
C-----UNDER-RELAXATION FACTORS
DATA URFU,URFV,URFP,URFT/0.5,0.5,1.0,1.0/
C-----PRESSURE CONSTANTS
DATA PREF,IPREF,JPREF/0.0,2,2/
C
CHAPTER 2 2 2 2 2 2 2 INITIAL FIELD VARIABLES 2 2 2 2 2 2
C
C-----U-VELOCITY
DATA U/2500*0.0/
C-----V-VELOCITY

```



DATA V/2500\*0.0/  
C-----P-PRESSURE  
DATA P/2500\*0.0/  
C-----PP-PRESSURE  
DATA PP/2500\*0.0/  
C-----T-TEMPERATURE  
DATA T/2500\*0.0/  
C-----PRESSURE COEFFICIENTS  
DATA DU/2500\*0.0/  
DATA DV/2500\*0.0/  
END

## Παράρτημα Δ

### Περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης ενός προβλήματος ροής

Καταρχήν, ανοίγουμε το αρχείο GLASS.DAT χρησιμοποιώντας κάποιον Editor (π.χ. τον Editor του MS-DOS) γράφοντας : `edit data.dat` [Enter], για να ελέγξουμε και να αλλάξουμε, αν θέλουμε, τα δεδομένα του προβλήματος, που είναι τα UIN, TIN, TWALL, TFREE, TOBS, HYDIAM, XIN, XOUT, NXI, NXO, YIN, YOUT, NYI, NYO, DENSIT, AVIS, BVIS, AAK, BAK, ACPF, BCPF, INDCOS, MAXIT, SORMAX, INDPRI, NUMPRI, INDMON, NUMMON, NSWPU, NSWPV, NSWPP και NSWPT, που έχουν οριστεί στο κεφάλαιο 5.3. Αφού γίνουν οι απαραίτητες αλλαγές, κλείνουμε το αρχείο.

Στη συνέχεια εκτελούμε το πρόγραμμα GLASS. Αν επιθυμούμε να βλέπουμε τα αποτελέσματά του στην οθόνη, πληκτρολογούμε : `glass` [Enter]. Αν θέλουμε να τα δούμε τμηματικά στην οθόνη γράφουμε : `glass | more` [Enter]. Αν πάλι θέλουμε να αποθηκεύσουμε όλη τη διαδικασία του προγράμματος σε ένα αρχείο, π.χ. `output.txt`, πληκτρολογούμε : `glass > output.txt` [Enter]. Κατόπιν, γράφοντας : `edit output.txt` [Enter], μπορούμε να παρατηρήσουμε όλα τα αποτελέσματα και την πορεία της σύγκλισης. Το αρχείο `output.txt` μπορεί και να εκτυπωθεί σε χαρτί.

Τρέχοντας το πρόγραμμα GLASS, δημιουργούνται τα αρχεία VECTORS.DAT, PRESSURE.DAT, TEMPERAT.DAT, VISCOSIT.DAT, THCONDUCT.DAT, SPEHEAT.DAT, PRANDTL.DAT, STREAM.DAT και RESIDUAL.DAT, στα οποία έχουν αποθηκευθεί τα διανύσματα ταχυτήτων, οι πιέσεις, οι θερμοκρασίες, το ιξώδες, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, η ειδική θερμότητα, ο αριθμός Prandtl, η ροϊκή συνάρτηση και οι υπολειμματικές τιμές, αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα προβολής διανυσμάτων και καμπυλών στην οθόνη, μπορούμε να δούμε τις γραφικές παραστάσεις των μεγεθών της ροής που μας ενδιαφέρουν. Εδώ χρησιμοποιούνται δύο προγράμματα : το ARROW για τη γραφική παράσταση διανυσμάτων, το οποίο έχει δυνατότητα επεξεργασίας πλεγμάτων μεγέθους μέχρι 100 x 100 και το CONTOUR για τη γραφική παράσταση καμπυλών, στο οποίο μπορούμε να επεξεργαστούμε πλέγματα μέχρι 130 x 130.

Για να γίνει η επεξεργασία των αποτελεσμάτων, μεταφέρουμε το αρχείο VECTORS.DAT στο φάκελο (directory), που περιέχει το πρόγραμμα ARROW και τα αρχεία PRESSURE.DAT, TEMPERAT.DAT, VISCOSIT.DAT, THCONDUCT.DAT, SPEHEAT.DAT, PRANDTL.DAT και STREAM.DAT στο φάκελο, που περιέχει το πρόγραμμα CONTOUR, αντίστοιχα.

Για να δούμε τα διανύσματα ταχυτήτων, ακολουθούμε την εξής διαδικασία :

Εκτέλουμε το πρόγραμμα ARROW με την εντολή : arrow [Enter]. Στο κύριο μενού του προγράμματος, επιλέγουμε την εντολή : Load vector data, στη συνέχεια πατούμε το [F5] για τη λίστα του τρέχοντος φακέλου και με το πληκτρολόγιο επιλέγουμε το αρχείο VECTORS.DAT. Στο κύριο μενού τώρα διαλέγουμε την εντολή : Vector plot για την προβολή των διανυσμάτων και ανοίγει ένα δεύτερο μενού, στο οποίο έχουμε τις εξής επιλογές :

- View vectors : Βλέπουμε τα διανύσματα.
- Data info : Παίρνουμε πληροφορίες για το τρέχον αρχείο.
- Color : Δίνουμε χρώμα(τα) στα διανύσματα.
- Vector scale : Μεταβάλλουμε την κλίμακα (μέγεθος) των διανυσμάτων.
- Vector width : Διαλέγουμε το ποσοστό του διανύσματος που καταλαμβάνει το βέλος.
- Lower filter : Επιλέγουμε αν θέλουμε να αποκόπτονται μικρές τιμές διανυσμάτων από μια τιμή που ορίζουμε εμείς και κάτω (κάτω φίλτρο).
- Upper filter : Με τον ίδιο τρόπο, επιλέγουμε την αποκοπή μεγάλων τιμών διανυσμάτων από μια τιμή και πάνω (άνω φίλτρο).
- Axes plotting : Διαλέγουμε την προβολή ή όχι των αξόνων και των μονάδων τους στην οθόνη.
- Axes scaling : Επιλέγουμε αν θέλουμε την προβολή των αξόνων σε ό,τι αναλογία βρίσκονται ή, αν όχι, σε ποιά αναλογία επιθυμούμε να βρίσκονται.
- Plot window : Εισάγουμε στον Η/Υ τις συντεταγμένες του παραθύρου προβολής.
- Title size : Μεταβάλλουμε το μέγεθος του τίτλου του γραφήματος.
- Plot file : Επιλέγουμε το είδος του αρχείου γραφικών, στο οποίο θα μετατραπεί το αρχείο που επεξεργαζόμαστε και δίνουμε σ' αυτό ένα όνομα, π.χ. VECTORS.DXF.
- Save options : Αποθηκεύουμε τυχόν αλλαγές, που έγιναν στις παραπάνω επιλογές, για την επόμενη φορά που θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα.

- Main menu : Επιστρέφουμε στο κύριο μενού.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ακόμη η εντολή : Grid plot στο κύριο μενού του προγράμματος, με την οποία γίνεται η προβολή του πλέγματος. Αυτή, εκτός ορισμένων επιλογών, που είναι ίδιες με αυτές της εντολής Vector plot, έχει και τις εξής :

- View grid : Βλέπουμε το πλέγμα.
- Grid type : Επιλέγουμε τον τρόπο προβολής του πλέγματος (καμία προβολή, μόνο κόμβοι, μόνο κυψέλες, κόμβοι και κυψέλες).

Εγκαταλείπουμε το πρόγραμμα ARROW με την εντολή Quit από το κύριο μενού.

Τα προγράμματα ARROW και CONTOUR έχουν σχεδόν την ίδια δομή και έτσι η διαδικασία για την προβολή καμπυλών είναι η εξής :

Εκτελούμε το πρόγραμμα CONTOUR με την εντολή : contour [Enter]. Στο κύριο μενού του προγράμματος επιλέγουμε την εντολή : Load data, έπειτα πατούμε το [F5] και επιλέγουμε κάποιο από τα αρχεία, εκτός του VECTORS.DAT, για να δούμε τις καμπύλες. Στη συνέχεια στο κύριο μενού διαλέγουμε την εντολή : Contour plot και ανοίγει ένα δεύτερο μενού με τις εξής νέες εντολές, σε σχέση με το πρόγραμμα ARROW :

- View plot : Βλέπουμε τις καμπύλες.
- Grid lines : Έχει τα ίδια αποτελέσματα όπως η εντολή Grid type στο πρόγραμμα ARROW.
- Levels : Διαλέγουμε το πλήθος των καμπυλών που θα προβληθούν ταυτόχρονα στην οθόνη.
- Contour labels : Επιλέγουμε αν επιθυμούμε την προβολή ή όχι των τιμών στις καμπύλες. Αν ναι, τότε εισάγουμε και τη συχνότητα εμφάνισης των τιμών αυτών.
- Label size : Δίνουμε το μέγεθος που θέλουμε να έχουν οι τιμές στις καμπύλες.

Στην επιλογή Plot file, το αντίστοιχο όνομα αρχείου γραφικών για ένα αρχείο, π.χ. STREAM.DAT, μπορεί να είναι STREAM.DXF.

Το πρόγραμμα CONTOUR το εγκαταλείπουμε με την εντολή Quit από το κύριο μενού, όπως ακριβώς και στο πρόγραμμα ARROW.

Τα αρχεία γραφικών VECTORS.DXF, PRESSURE.DXF, TEMPERAT.DXF κ.λ.π. μπορούν να εκτυπωθούν και σε χαρτί, εισάγοντάς τα είτε σε κάποιο πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου, όπως το Microsoft Word™, με την εντολή : Insert – Picture, είτε σε κάποιο πρόγραμμα σχεδιασμού και επεξεργασίας εικόνων, όπως το Corel Draw™, με την εντολή : Import.

Όσον αφορά το αρχείο RESIDUAL.DAT, πρέπει να το εισάγουμε σε κάποιο πρόγραμμα spreadsheet, όπως το Microsoft Excel™, χρησιμοποιώντας την εντολή : Open και κάνοντας Text Import. Αφού το αρχείο εισαχθεί μέσα στο πρόγραμμα, επιλέγουμε κάθε φορά τις δύο στήλες που επιθυμούμε να γίνουν διάγραμμα, επιλέγοντας πάντα πρώτη αυτήν, που θα μπει στο διάγραμμα σαν άξονας x και μετά χρησιμοποιούμε την εντολή : Insert – Chart – As New Sheet, δηλώνοντας σαν τύπο γραφήματος τη διασπορά XY. Στη συνέχεια μπορούμε να εκτυπώσουμε τα διαγράμματα αυτά σε χαρτί.





***** V-VELOCITY *****										
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
J	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
4	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01
***** P-PRESSURE *****										
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
J	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
9	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
8	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
7	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
6	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
4	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01
***** T-TEMPERATURE *****										
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
J	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
10	1.45E+03	1.45E+03	1.45E+03	1.45E+03	1.45E+03	1.45E+03	1.35E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.07E+00
9	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.25E+03	1.25E+03	9.05E-01
8	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.25E+03	1.25E+03	6.69E-01
7	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.25E+03	1.25E+03	5.02E-01
6	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.25E+03	1.25E+03	3.83E-01
5	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	2.98E-01
4	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	2.13E-01
3	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.27E-01
2	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	1.55E+03	4.25E-02
1	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01
***** VIS-VISCOSITY *****										
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
J	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
10	1.02E+01	1.02E+01	1.02E+01	1.02E+01	1.02E+01	1.02E+01	2.89E+01	8.17E+01	8.17E+01	1.07E+00
9	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	8.17E+01	8.17E+01	9.05E-01
8	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	8.17E+01	8.17E+01	6.69E-01
7	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	8.17E+01	8.17E+01	5.02E-01
6	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	8.17E+01	8.17E+01	3.83E-01



5	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	2.98E-01
4	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	2.13E-01
3	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	1.27E-01
2	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	3.60E+00	4.25E-02
1	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01		
***** AK-HEAT CONDUCTIVITY FACTOR *****												
J	I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =
10	3.43E+00	3.43E+00	3.43E+00	3.43E+00	3.43E+00	3.43E+00	3.43E+00	3.11E+00	2.82E+00	2.82E+00	2.82E+00	1.07E+00
9	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	2.82E+00	2.82E+00	2.82E+00	9.05E-01
8	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	2.82E+00	2.82E+00	2.82E+00	6.69E-01
7	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	2.82E+00	2.82E+00	2.82E+00	5.02E-01
6	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	2.82E+00	2.82E+00	2.82E+00	3.83E-01
5	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	2.98E-01
4	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	2.13E-01
3	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	1.27E-01
2	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	3.78E+00	4.25E-02
1	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01		
***** CPF-SPECIFIC HEAT FACTOR *****												
J	I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =
10	1.89E+03	1.89E+03	1.89E+03	1.89E+03	1.89E+03	1.89E+03	1.89E+03	1.79E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.07E+00
9	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	9.05E-01
8	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	6.69E-01
7	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	5.02E-01
6	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	3.83E-01
5	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.98E-01
4	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.13E-01
3	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	1.27E-01
2	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	2.00E+03	4.25E-02
1	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01		
***** PRAN-PRANDTL NUMBER *****												
J	I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =
10	5.62E+03	5.62E+03	5.62E+03	5.62E+03	5.62E+03	5.62E+03	5.62E+03	1.66E+04	4.91E+04	4.91E+04	4.91E+04	1.07E+00
9	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	4.91E+04	4.91E+04	4.91E+04	9.05E-01
8	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	4.91E+04	4.91E+04	4.91E+04	6.69E-01
7	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	4.91E+04	4.91E+04	4.91E+04	5.02E-01
6	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	4.91E+04	4.91E+04	4.91E+04	3.83E-01
5	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	2.98E-01
4	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	2.13E-01
3	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.27E-01
2	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.90E+03	4.25E-02
1	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01		

***** GAMH-DIFFUSION COEFFICIENT *****											
J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =
10	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.74E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.07E+00
9	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.66E-03	9.05E-01
8	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.66E-03	6.69E-01
7	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.66E-03	5.02E-01
6	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.66E-03	3.83E-01
5	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	2.98E-01
4	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	2.13E-01
3	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.27E-01
2	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.89E-03	4.25E-02
1	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01	
<div> <div>REYNOLDS NUMBER</div> <div>MASS FLOW RATE</div> <div>= 2.761E-02</div> <div>= 9.937E-02</div> </div>											
***** ITER 1-----ABSOLUTE RESIDUAL SOURCE SUMS-----I *****											
NO.	UMOM	VMOM	MASS	ENER	I--FIELD VALUES AT MONITORING LOCATION( 7, 5)--I						
					U	V	P	T			
1	2.981E+04	9.359E+01	1.531E+00	5.113E-01	3.220E-05	-3.322E-06	6.297E-03	1.470E+03			
5	1.084E+04	3.969E+03	2.120E+00	8.515E-03	4.561E-05	-4.322E-05	6.799E-03	1.471E+03			
10	2.551E+03	1.298E+03	3.288E-01	1.852E-03	4.063E-05	-4.517E-05	-5.191E-03	1.471E+03			
15	9.400E+02	3.954E+02	7.602E-02	9.716E-04	3.816E-05	-4.601E-05	-4.650E-03	1.472E+03			
20	4.583E+02	1.338E+02	2.374E-02	4.965E-04	3.699E-05	-4.632E-05	-5.298E-03	1.472E+03			
25	2.179E+02	3.188E+01	7.928E-03	2.577E-04	3.649E-05	-4.644E-05	-5.401E-03	1.473E+03			
30	1.069E+02	1.534E+01	2.962E-03	1.397E-04	3.627E-05	-4.650E-05	-5.511E-03	1.473E+03			
35	5.192E+01	3.966E+00	1.256E-03	7.959E-05	3.618E-05	-4.652E-05	-5.546E-03	1.473E+03			
40	2.547E+01	2.083E+00	5.330E-04	4.984E-05	3.614E-05	-4.653E-05	-5.569E-03	1.473E+03			
45	1.239E+01	7.894E-01	2.585E-04	3.963E-05	3.612E-05	-4.653E-05	-5.578E-03	1.473E+03			
50	6.070E+00	3.863E-01	1.167E-04	2.852E-05	3.611E-05	-4.653E-05	-5.583E-03	1.473E+03			
55	2.983E+00	1.773E-01	5.953E-05	2.493E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.586E-03	1.473E+03			
60	1.438E+00	8.935E-02	3.038E-05	2.315E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.587E-03	1.473E+03			

160	4.429E-02	1.848E-02	6.039E-06	2.223E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
165	4.566E-02	2.300E-02	7.918E-06	2.235E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
170	3.402E-02	1.424E-02	4.676E-06	2.228E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
175	1.563E-02	1.132E-02	3.233E-06	2.208E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
180	3.276E-02	2.672E-02	7.220E-06	2.228E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
185	4.020E-02	2.403E-02	7.656E-06	2.224E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
190	1.950E-02	1.860E-02	4.933E-06	2.214E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
195	3.192E-02	2.003E-02	6.042E-06	2.228E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
200	2.462E-02	1.463E-02	5.841E-06	2.222E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
205	2.720E-02	1.923E-02	7.060E-06	2.236E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
210	3.102E-02	1.617E-02	5.712E-06	2.225E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
215	3.120E-02	9.936E-03	4.398E-06	2.236E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
220	2.319E-02	6.284E-03	2.127E-06	2.213E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
225	3.417E-02	1.835E-02	6.127E-06	2.224E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
230	4.243E-02	1.538E-02	5.999E-06	2.222E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
235	9.449E-02	2.634E-02	1.018E-05	2.219E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
240	5.476E-02	3.129E-02	9.938E-06	2.225E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
245	3.160E-02	2.208E-02	6.499E-06	2.215E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
250	5.112E-02	1.350E-02	5.174E-06	2.219E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
255	5.094E-02	2.536E-02	8.753E-06	2.230E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
260	5.419E-02	1.894E-02	6.289E-06	2.244E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
265	4.398E-02	2.137E-02	7.168E-06	2.211E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
270	4.065E-02	1.656E-02	5.874E-06	2.225E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
275	5.921E-02	1.831E-02	6.743E-06	2.242E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
280	5.046E-02	3.110E-02	9.422E-06	2.231E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
285	5.407E-02	3.086E-02	8.507E-06	2.227E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
290	4.055E-02	2.289E-02	7.104E-06	2.226E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
295	3.618E-02	1.932E-02	6.174E-06	2.229E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
300	2.307E-02	1.390E-02	5.085E-06	2.233E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
305	4.000E-02	1.538E-02	5.257E-06	2.238E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
310	2.887E-02	2.047E-02	6.872E-06	2.229E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
315	4.272E-02	1.306E-02	4.925E-06	2.238E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
320	4.247E-02	1.437E-02	5.163E-06	2.204E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
325	5.418E-02	2.265E-02	8.224E-06	2.216E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
330	1.986E-02	1.607E-02	4.645E-06	2.223E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
335	5.038E-02	2.178E-02	7.053E-06	2.234E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
340	4.234E-02	2.268E-02	6.620E-06	2.222E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
345	2.484E-02	1.056E-02	4.247E-06	2.228E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
350	3.364E-02	1.794E-02	4.933E-06	2.238E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
355	2.774E-02	1.406E-02	4.622E-06	2.233E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
360	2.157E-02	1.626E-02	5.782E-06	2.222E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
365	2.954E-02	1.052E-02	3.805E-06	2.224E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
370	3.530E-02	1.565E-02	5.284E-06	2.211E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
375	2.754E-02	1.347E-02	4.597E-06	2.223E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
380	4.118E-02	1.855E-02	5.582E-06	2.219E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
385	1.918E-02	1.357E-02	4.065E-06	2.203E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
390	2.486E-02	1.354E-02	4.670E-06	2.219E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
395	2.210E-02	9.796E-03	2.900E-06	2.203E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
400	3.994E-02	1.076E-02	4.070E-06	2.241E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
405	3.265E-02	1.134E-02	3.922E-06	2.207E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
410	3.670E-02	1.873E-02	6.841E-06	2.243E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
415	4.154E-02	2.035E-02	7.424E-06	2.216E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
420	3.121E-02	1.040E-02	4.181E-06	2.211E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
425	1.896E-02	1.284E-02	4.218E-06	2.194E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
430	2.492E-02	1.193E-02	4.017E-06	2.228E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03



435	3.062E-02	1.169E-02	4.536E-06	2.238E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
440	6.546E-02	1.999E-02	5.588E-06	2.221E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
445	3.936E-02	1.578E-02	5.945E-06	2.228E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
450	3.676E-02	1.079E-02	4.109E-06	2.237E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
455	4.723E-02	1.212E-02	4.000E-06	2.235E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
460	2.803E-02	1.065E-02	3.948E-06	2.226E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
465	5.442E-02	1.612E-02	7.130E-06	2.222E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
470	2.719E-02	1.541E-02	4.660E-06	2.248E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
475	4.826E-02	1.907E-02	5.344E-06	2.230E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
480	4.435E-02	1.206E-02	3.782E-06	2.248E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
485	2.474E-02	1.112E-02	3.982E-06	2.208E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
490	3.458E-02	1.397E-02	4.306E-06	2.246E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
495	1.953E-02	5.860E-03	3.386E-06	2.219E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
500	3.834E-02	2.225E-02	6.710E-06	2.216E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
505	3.906E-02	1.774E-02	5.039E-06	2.207E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
510	3.312E-02	1.667E-02	4.777E-06	2.222E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
515	5.255E-02	2.481E-02	8.867E-06	2.223E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
520	3.957E-02	2.310E-02	7.732E-06	2.224E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
525	2.477E-02	1.964E-02	5.795E-06	2.225E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
530	4.636E-02	2.339E-02	7.509E-06	2.228E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
535	4.284E-02	1.470E-02	5.924E-06	2.228E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
540	4.690E-02	2.529E-02	9.053E-06	2.241E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
545	1.797E-02	1.207E-02	4.439E-06	2.224E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
550	4.540E-02	1.509E-02	4.328E-06	2.241E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
555	1.511E-02	1.176E-02	4.815E-06	2.215E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
560	3.980E-02	1.585E-02	4.402E-06	2.246E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
565	4.101E-02	1.486E-02	6.360E-06	2.234E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
570	3.190E-02	1.475E-02	4.956E-06	2.201E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
575	4.901E-02	2.098E-02	7.598E-06	2.221E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
580	2.866E-02	1.959E-02	6.024E-06	2.236E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
585	2.494E-02	1.181E-02	5.001E-06	2.236E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
590	5.141E-02	2.675E-02	8.533E-06	2.215E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
595	3.484E-02	1.339E-02	4.142E-06	2.210E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
600	1.847E-02	9.609E-03	3.343E-06	2.209E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
605	4.569E-02	1.829E-02	5.006E-06	2.229E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
610	2.907E-02	1.640E-02	4.694E-06	2.221E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
615	3.415E-02	2.008E-02	6.054E-06	2.217E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
620	2.878E-02	1.378E-02	4.863E-06	2.201E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
625	4.607E-02	1.930E-02	6.612E-06	2.214E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
630	3.049E-02	1.398E-02	5.079E-06	2.219E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
635	3.461E-02	1.177E-02	4.206E-06	2.227E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
640	4.586E-02	3.015E-02	8.844E-06	2.238E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
645	2.836E-02	1.454E-02	4.691E-06	2.218E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
650	2.762E-02	1.364E-02	5.095E-06	2.206E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
655	2.333E-02	1.605E-02	6.686E-06	2.231E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
660	4.101E-02	1.426E-02	4.571E-06	2.236E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
665	5.016E-02	1.628E-02	6.625E-06	2.220E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
670	4.743E-02	1.974E-02	6.835E-06	2.219E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
675	3.277E-02	1.704E-02	6.084E-06	2.217E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
680	1.701E-02	1.648E-02	5.676E-06	2.252E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
685	4.637E-02	1.546E-02	4.387E-06	2.225E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
690	3.321E-02	1.185E-02	4.353E-06	2.232E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
695	2.809E-02	1.073E-02	3.971E-06	2.217E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
700	3.583E-02	1.018E-02	4.508E-06	2.227E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
705	2.363E-02	1.132E-02	4.160E-06	2.237E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03

710	4.910E-02	1.832E-02	8.414E-06	2.227E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
715	5.358E-02	1.965E-02	6.579E-06	2.229E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
720	4.899E-02	2.243E-02	7.129E-06	2.206E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
725	2.326E-02	1.496E-02	5.691E-06	2.216E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
730	3.799E-02	1.535E-02	4.919E-06	2.212E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
735	2.602E-02	1.611E-02	5.640E-06	2.233E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
740	2.957E-02	1.546E-02	6.001E-06	2.229E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
745	3.033E-02	1.808E-02	6.700E-06	2.229E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
750	4.858E-02	1.744E-02	5.628E-06	2.215E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
755	2.204E-02	1.558E-02	5.348E-06	2.249E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
760	1.557E-02	1.143E-02	2.666E-06	2.210E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
765	2.688E-02	1.748E-02	5.294E-06	2.251E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
770	4.125E-02	2.382E-02	7.181E-06	2.219E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
775	3.086E-02	1.811E-02	6.150E-06	2.233E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
780	2.333E-02	1.083E-02	4.671E-06	2.215E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
785	1.729E-02	1.072E-02	3.276E-06	2.212E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
790	2.306E-02	1.248E-02	3.499E-06	2.212E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
795	5.786E-02	1.787E-02	7.088E-06	2.225E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
800	4.605E-02	1.788E-02	6.630E-06	2.217E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
805	5.750E-02	3.021E-02	7.700E-06	2.235E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
810	2.443E-02	1.500E-02	5.534E-06	2.212E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
815	2.782E-02	1.862E-02	6.597E-06	2.234E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
820	5.283E-02	2.237E-02	6.954E-06	2.234E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
825	5.252E-02	2.320E-02	7.480E-06	2.228E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
830	4.553E-02	1.465E-02	3.550E-06	2.235E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
835	5.141E-02	1.962E-02	5.283E-06	2.242E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
840	7.008E-02	3.369E-02	8.730E-06	2.223E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
845	3.645E-02	1.425E-02	5.141E-06	2.231E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
850	3.010E-02	1.559E-02	5.930E-06	2.251E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
855	4.590E-02	1.317E-02	4.464E-06	2.235E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
860	3.621E-02	2.271E-02	6.824E-06	2.237E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
865	4.825E-02	1.954E-02	6.290E-06	2.233E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
870	4.184E-02	1.660E-02	4.833E-06	2.225E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
875	3.535E-02	1.309E-02	3.681E-06	2.215E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
880	5.615E-02	1.675E-02	6.787E-06	2.222E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
885	3.047E-02	1.249E-02	5.272E-06	2.230E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
890	4.628E-02	1.894E-02	5.975E-06	2.227E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
895	5.488E-02	1.256E-02	5.604E-06	2.234E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
900	6.003E-02	2.152E-02	8.000E-06	2.217E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
905	5.020E-02	2.267E-02	7.696E-06	2.226E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
910	2.518E-02	1.264E-02	5.266E-06	2.224E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
915	4.522E-02	2.172E-02	6.550E-06	2.254E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
920	1.350E-02	1.151E-02	4.057E-06	2.200E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
925	3.548E-02	1.589E-02	5.392E-06	2.228E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
930	6.355E-02	1.731E-02	5.921E-06	2.224E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
935	3.030E-02	1.852E-02	4.759E-06	2.226E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
940	3.454E-02	1.113E-02	3.380E-06	2.227E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
945	6.293E-02	1.487E-02	6.097E-06	2.221E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
950	4.078E-02	1.373E-02	6.404E-06	2.231E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
955	2.103E-02	1.254E-02	3.220E-06	2.232E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
960	3.989E-02	1.440E-02	4.663E-06	2.241E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
965	3.850E-02	2.208E-02	7.247E-06	2.247E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
970	4.351E-02	2.283E-02	7.981E-06	2.204E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
975	3.383E-02	2.023E-02	5.582E-06	2.222E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03
980	4.386E-02	2.490E-02	7.276E-06	2.235E-05	3.610E-05	-4.654E-05	-5.588E-03	1.473E+03

985 4.970E-02 1.743E-02 6.411E-06 2.229E-05 3.610E-05 -4.654E-05 -5.588E-03 1.473E+03  
 990 1.980E-02 1.467E-02 4.821E-06 2.236E-05 3.610E-05 -4.654E-05 -5.588E-03 1.473E+03  
 995 6.724E-02 2.482E-02 1.154E-05 2.216E-05 3.610E-05 -4.654E-05 -5.588E-03 1.473E+03  
 1000 2.450E-02 1.284E-02 5.070E-06 2.224E-05 3.610E-05 -4.654E-05 -5.588E-03 1.473E+03

-----  
 AFTER 1000 ITERATIONS:

DIVERGENCE OR SUCCESSFUL CONVERGENCE,  
 BUT NOT WITH THE PRESENT PRECISION  
 THE ACHIEVED PRECISION IS: 2.450E-02  
 -----

\*\*\*\*\* U-VELOCITY \*\*\*\*\*

I 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Y =

J  
 10 6.83E-05 6.83E-05 6.85E-05 6.77E-05 6.28E-05 4.36E-05 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 1.07E+00  
 9 6.83E-05 6.83E-05 6.85E-05 6.77E-05 6.28E-05 4.36E-05 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 9.05E-01  
 8 5.30E-05 5.30E-05 5.27E-05 5.25E-05 5.25E-05 4.68E-05 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 6.69E-01  
 7 3.50E-05 3.50E-05 3.44E-05 3.48E-05 3.81E-05 4.63E-05 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 5.02E-01  
 6 2.20E-05 2.20E-05 2.18E-05 2.25E-05 2.61E-05 4.22E-05 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 3.83E-01  
 5 1.42E-05 1.42E-05 1.44E-05 1.51E-05 1.81E-05 3.61E-05 1.29E-04 7.65E-05 7.65E-05 2.98E-01  
 4 8.13E-06 8.13E-06 8.60E-06 9.18E-06 1.12E-05 2.63E-05 1.76E-04 1.74E-04 1.74E-04 2.13E-01  
 3 3.86E-06 3.86E-06 4.30E-06 4.88E-06 5.69E-06 1.43E-05 1.23E-04 1.59E-04 1.59E-04 1.27E-01  
 2 1.04E-06 1.04E-06 1.23E-06 1.35E-06 1.62E-06 4.18E-06 3.78E-05 5.60E-05 5.60E-05 4.25E-02  
 1 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00

X= .000E+00 .101E+01 .189E+01 .267E+01 .336E+01 .397E+01 .450E+01 .500E+01 .550E+01

\*\*\*\*\* V-VELOCITY \*\*\*\*\*

I 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Y =

J  
 10 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 1.07E+00  
 9 0.00E+00 -8.61E-12 7.39E-08 -3.14E-07 -2.00E-06 -8.98E-06 -2.31E-05 0.00E+00 0.00E+00 7.87E-01  
 8 0.00E+00 -6.66E-13 -2.22E-09 -3.54E-07 -1.99E-06 -1.09E-05 -4.08E-05 0.00E+00 0.00E+00 5.86E-01  
 7 0.00E+00 3.97E-14 -1.02E-07 -2.80E-07 -1.31E-06 -8.93E-06 -5.32E-05 0.00E+00 0.00E+00 4.42E-01  
 6 0.00E+00 8.67E-14 -1.25E-07 -1.94E-07 -7.74E-07 -6.22E-06 -6.13E-05 0.00E+00 0.00E+00 3.40E-01  
 5 0.00E+00 -2.87E-14 -1.04E-07 -1.19E-07 -4.04E-07 -3.69E-06 -4.65E-05 -8.88E-06 -2.84E-13 2.55E-01  
 4 0.00E+00 6.63E-15 -5.97E-08 -5.51E-08 -1.58E-07 -1.56E-06 -2.27E-05 -9.19E-06 1.79E-12 1.70E-01  
 3 0.00E+00 -1.48E-14 -1.76E-08 -1.38E-08 -3.32E-08 -3.59E-07 -5.35E-06 -3.10E-06 1.05E-12 8.50E-02  
 2 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00

X= .000E+00 .535E+00 .148E+01 .231E+01 .304E+01 .368E+01 .425E+01 .475E+01 .525E+01 .550E+01

\*\*\*\*\* P-PRESSURE \*\*\*\*\*

I 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Y =

J  
 10 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 1.07E+00  
 9 0.00E+00 2.60E-04 -6.86E-04 -1.67E-03 -2.61E-03 -3.40E-03 -4.16E-03 0.00E+00 0.00E+00 9.05E-01  
 8 0.00E+00 2.48E-04 -6.92E-04 -1.68E-03 -2.64E-03 -3.52E-03 -4.62E-03 0.00E+00 0.00E+00 6.69E-01  
 7 0.00E+00 2.32E-04 -7.03E-04 -1.69E-03 -2.66E-03 -3.60E-03 -5.18E-03 0.00E+00 0.00E+00 5.02E-01  
 6 0.00E+00 2.04E-04 -7.23E-04 -1.71E-03 -2.68E-03 -3.65E-03 -5.87E-03 0.00E+00 0.00E+00 3.83E-01  
 5 0.00E+00 1.72E-04 -7.44E-04 -1.73E-03 -2.68E-03 -3.69E-03 -5.59E-03 -8.64E-02 -2.38E-01 2.98E-01  
 4 0.00E+00 1.26E-04 -7.70E-04 -1.74E-03 -2.67E-03 -3.73E-03 -6.84E-03 -8.77E-02 -2.37E-01 2.13E-01  
 3 0.00E+00 6.85E-05 -7.94E-04 -1.75E-03 -2.66E-03 -3.68E-03 -7.42E-03 -8.89E-02 -2.37E-01 1.27E-01  
 2 0.00E+00 0.00E+00 -8.05E-04 -1.76E-03 -2.64E-03 -3.54E-03 -8.61E-03 -9.04E-02 -2.38E-01 4.25E-02  
 1 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00



X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01	
***** T-TEMPERATURE *****											
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =
J	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
10	1.45E+03	1.45E+03	1.45E+03	1.45E+03	1.45E+03	1.45E+03	1.35E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.07E+00
9	1.55E+03	1.53E+03	1.52E+03	1.51E+03	1.50E+03	1.50E+03	1.46E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.25E+03	9.05E-01
8	1.55E+03	1.54E+03	1.53E+03	1.52E+03	1.51E+03	1.51E+03	1.48E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.25E+03	6.69E-01
7	1.55E+03	1.53E+03	1.51E+03	1.50E+03	1.49E+03	1.50E+03	1.48E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.25E+03	5.02E-01
6	1.55E+03	1.51E+03	1.48E+03	1.46E+03	1.46E+03	1.48E+03	1.47E+03	1.25E+03	1.25E+03	1.25E+03	3.83E-01
5	1.55E+03	1.48E+03	1.45E+03	1.43E+03	1.43E+03	1.45E+03	1.47E+03	1.38E+03	1.33E+03	1.33E+03	2.98E-01
4	1.55E+03	1.44E+03	1.41E+03	1.40E+03	1.39E+03	1.42E+03	1.47E+03	1.44E+03	1.42E+03	1.42E+03	2.13E-01
3	1.55E+03	1.39E+03	1.37E+03	1.36E+03	1.36E+03	1.37E+03	1.44E+03	1.43E+03	1.41E+03	1.41E+03	1.27E-01
2	1.55E+03	1.33E+03	1.32E+03	1.32E+03	1.32E+03	1.32E+03	1.36E+03	1.35E+03	1.34E+03	1.34E+03	4.25E-02
1	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	1.30E+03	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01	
***** VIS-VISCOSITY *****											
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =
J	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
10	1.02E+01	1.02E+01	1.02E+01	1.02E+01	1.02E+01	1.02E+01	2.89E+01	8.17E+01	8.17E+01	8.17E+01	1.07E+00
9	3.60E+00	4.32E+00	4.92E+00	5.43E+00	5.88E+00	6.32E+00	9.07E+00	8.17E+01	8.17E+01	8.17E+01	9.05E-01
8	3.60E+00	3.91E+00	4.36E+00	4.85E+00	5.28E+00	5.61E+00	7.85E+00	8.17E+01	8.17E+01	8.17E+01	6.69E-01
7	3.60E+00	4.42E+00	5.39E+00	6.28E+00	6.76E+00	6.22E+00	7.70E+00	8.17E+01	8.17E+01	8.17E+01	5.02E-01
6	3.60E+00	5.69E+00	7.57E+00	8.97E+00	9.54E+00	7.76E+00	7.87E+00	8.17E+01	8.17E+01	8.17E+01	3.83E-01
5	3.60E+00	7.68E+00	1.06E+01	1.24E+01	1.31E+01	1.01E+01	8.04E+00	2.05E+01	3.46E+01	3.46E+01	2.98E-01
4	3.60E+00	1.16E+01	1.57E+01	1.79E+01	1.86E+01	1.46E+01	8.45E+00	1.12E+01	1.46E+01	1.46E+01	2.13E-01
3	3.60E+00	1.94E+01	2.44E+01	2.65E+01	2.71E+01	2.29E+01	1.13E+01	1.31E+01	1.59E+01	1.59E+01	1.27E-01
2	3.60E+00	3.51E+01	3.85E+01	3.96E+01	3.99E+01	3.76E+01	2.71E+01	2.91E+01	3.20E+01	3.20E+01	4.25E-02
1	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	4.86E+01	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01	
***** AK-HEAT CONDUCTIVITY FACTOR *****											
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =
J	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
10	3.43E+00	3.43E+00	3.43E+00	3.43E+00	3.43E+00	3.43E+00	3.11E+00	2.82E+00	2.82E+00	2.82E+00	1.07E+00
9	3.78E+00	3.71E+00	3.67E+00	3.63E+00	3.61E+00	3.58E+00	3.46E+00	2.82E+00	2.82E+00	2.82E+00	9.05E-01
8	3.78E+00	3.75E+00	3.71E+00	3.67E+00	3.64E+00	3.62E+00	3.51E+00	2.82E+00	2.82E+00	2.82E+00	6.69E-01
7	3.78E+00	3.70E+00	3.64E+00	3.59E+00	3.56E+00	3.52E+00	3.52E+00	2.82E+00	2.82E+00	2.82E+00	5.02E-01
6	3.78E+00	3.62E+00	3.52E+00	3.47E+00	3.45E+00	3.52E+00	3.51E+00	2.82E+00	2.82E+00	2.82E+00	3.83E-01
5	3.78E+00	3.52E+00	3.41E+00	3.36E+00	3.35E+00	3.43E+00	3.50E+00	3.21E+00	3.06E+00	3.06E+00	2.98E-01
4	3.78E+00	3.39E+00	3.29E+00	3.25E+00	3.24E+00	3.31E+00	3.49E+00	3.40E+00	3.31E+00	3.31E+00	2.13E-01
3	3.78E+00	3.23E+00	3.16E+00	3.14E+00	3.13E+00	3.18E+00	3.40E+00	3.35E+00	3.29E+00	3.29E+00	1.27E-01
2	3.78E+00	3.05E+00	3.03E+00	3.02E+00	3.02E+00	3.03E+00	3.13E+00	3.11E+00	3.08E+00	3.08E+00	4.25E-02
1	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	2.96E+00	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01	
***** CPF-SPECIFIC HEAT FACTOR *****											
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =
J	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
10	1.89E+03	1.89E+03	1.89E+03	1.89E+03	1.89E+03	1.89E+03	1.79E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.07E+00





9	2.00E+03	1.98E+03	1.96E+03	1.95E+03	1.95E+03	1.94E+03	1.90E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	9.05E-01
8	2.00E+03	1.99E+03	1.98E+03	1.96E+03	1.96E+03	1.95E+03	1.92E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	6.69E-01
7	2.00E+03	1.97E+03	1.95E+03	1.94E+03	1.93E+03	1.94E+03	1.92E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	5.02E-01
6	2.00E+03	1.95E+03	1.92E+03	1.90E+03	1.90E+03	1.92E+03	1.92E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	1.70E+03	3.83E-01
5	2.00E+03	1.92E+03	1.89E+03	1.87E+03	1.87E+03	1.89E+03	1.91E+03	1.82E+03	1.77E+03	1.77E+03	1.77E+03	2.98E-01
4	2.00E+03	1.88E+03	1.85E+03	1.84E+03	1.83E+03	1.86E+03	1.91E+03	1.88E+03	1.86E+03	1.86E+03	1.86E+03	2.13E-01
3	2.00E+03	1.83E+03	1.81E+03	1.80E+03	1.80E+03	1.81E+03	1.88E+03	1.87E+03	1.85E+03	1.85E+03	1.85E+03	1.27E-01
2	2.00E+03	1.77E+03	1.76E+03	1.76E+03	1.76E+03	1.77E+03	1.80E+03	1.79E+03	1.78E+03	1.78E+03	1.78E+03	4.25E-02
1	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	1.74E+03	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01		
*****												
J	I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =
10	5.62E+03	5.62E+03	5.62E+03	5.62E+03	5.62E+03	5.62E+03	5.62E+03	1.66E+04	4.91E+04	4.91E+04	4.91E+04	1.07E+00
9	1.90E+03	2.30E+03	2.63E+03	2.92E+03	3.17E+03	3.42E+03	3.42E+03	4.98E+03	4.91E+04	4.91E+04	4.91E+04	9.05E-01
8	1.90E+03	2.07E+03	2.32E+03	2.60E+03	2.83E+03	3.02E+03	3.02E+03	4.28E+03	4.91E+04	4.91E+04	4.91E+04	6.69E-01
7	1.90E+03	2.35E+03	2.90E+03	3.39E+03	3.67E+03	3.36E+03	3.36E+03	4.20E+03	4.91E+04	4.91E+04	4.91E+04	5.02E-01
6	1.90E+03	3.06E+03	4.13E+03	4.92E+03	5.25E+03	4.23E+03	4.23E+03	4.29E+03	4.91E+04	4.91E+04	4.91E+04	3.83E-01
5	1.90E+03	4.18E+03	5.85E+03	6.91E+03	7.28E+03	5.57E+03	4.39E+03	1.16E+04	2.00E+04	2.00E+04	2.00E+04	2.98E-01
4	1.90E+03	6.42E+03	8.84E+03	1.01E+04	1.05E+04	8.15E+03	4.62E+03	6.19E+03	8.15E+03	8.15E+03	8.15E+03	2.13E-01
3	1.90E+03	1.10E+04	1.39E+04	1.52E+04	1.55E+04	1.30E+04	6.24E+03	7.33E+03	8.90E+03	8.90E+03	8.90E+03	1.27E-01
2	1.90E+03	2.04E+04	2.24E+04	2.31E+04	2.33E+04	2.19E+04	1.56E+04	1.67E+04	1.85E+04	1.85E+04	1.85E+04	4.25E-02
1	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	2.86E+04	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01		
*****												
J	I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =
10	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.74E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.07E+00
9	1.89E-03	1.88E-03	1.87E-03	1.86E-03	1.85E-03	1.85E-03	1.82E-03	1.82E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.66E-03	9.05E-01
8	1.89E-03	1.89E-03	1.88E-03	1.87E-03	1.86E-03	1.86E-03	1.83E-03	1.83E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.66E-03	6.69E-01
7	1.89E-03	1.88E-03	1.86E-03	1.85E-03	1.84E-03	1.84E-03	1.83E-03	1.83E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.66E-03	5.02E-01
6	1.89E-03	1.86E-03	1.84E-03	1.82E-03	1.82E-03	1.83E-03	1.83E-03	1.83E-03	1.66E-03	1.66E-03	1.66E-03	3.83E-01
5	1.89E-03	1.83E-03	1.81E-03	1.80E-03	1.79E-03	1.81E-03	1.83E-03	1.83E-03	1.72E-03	1.72E-03	1.72E-03	2.98E-01
4	1.89E-03	1.80E-03	1.78E-03	1.77E-03	1.77E-03	1.79E-03	1.83E-03	1.83E-03	1.81E-03	1.79E-03	1.79E-03	2.13E-01
3	1.89E-03	1.77E-03	1.75E-03	1.74E-03	1.74E-03	1.75E-03	1.81E-03	1.81E-03	1.78E-03	1.78E-03	1.78E-03	1.27E-01
2	1.89E-03	1.72E-03	1.72E-03	1.71E-03	1.71E-03	1.72E-03	1.74E-03	1.74E-03	1.73E-03	1.73E-03	1.73E-03	4.25E-02
1	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	1.70E-03	0.00E+00
X=	.000E+00	.535E+00	.148E+01	.231E+01	.304E+01	.368E+01	.425E+01	.475E+01	.525E+01	.550E+01		
*****												
J	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Y =	
10	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	1.07E+00	
9	7.51E-02	7.51E-02	7.50E-02	7.53E-02	7.71E-02	8.39E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.05E-01	
8	3.75E-02	3.75E-02	3.74E-02	3.80E-02	4.15E-02	5.66E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	6.69E-01	
7	1.78E-02	1.78E-02	1.79E-02	1.85E-02	2.14E-02	3.64E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	5.02E-01	
6	8.63E-03	8.63E-03	8.88E-03	9.35E-03	1.12E-02	2.27E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	9.94E-02	3.83E-01	
5	4.29E-03	4.29E-03	4.55E-03	4.85E-03	5.87E-03	1.34E-02	8.56E-02	9.12E-02	9.12E-02	9.12E-02	2.98E-01	
4	1.91E-03	1.91E-03	2.10E-03	2.27E-03	2.75E-03	6.75E-03	5.32E-02	6.45E-02	6.45E-02	6.45E-02	2.13E-01	
3	6.34E-04	6.34E-04	7.20E-04	7.88E-04	9.53E-04	2.41E-03	2.12E-02	2.89E-02	2.89E-02	2.89E-02	1.27E-01	

2 1.11E-04 1.11E-04 1.31E-04 1.44E-04 1.73E-04 4.46E-04 4.03E-03 5.97E-03 5.97E-03 4.25E-02  
 1 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00  
 X= .000E+00 .101E+01 .189E+01 .267E+01 .336E+01 .397E+01 .450E+01 .500E+01 .550E+01  
 Stop - Program terminated.



ΑΤΣΕΜΙΑΝ, ΑΝΔΡΕΑΣ.  
 ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ  
 Αριθμητικό μοντέλο ροής τμήματος  
 γυαλιού.  
 ΤΙΤΛΟΣ  
 Αρ.ειδ. 14/1995

Α Η Ξ Η	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
 ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ  
 ΒΟΛΟΣ : ΚΤΗΡΙΟ Π. ΑΡΕΩΣ  
 ΤΗΛ. (0421) 65.659