

Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΞΟΜΟΙΩΣΗ ΑΠΟΡΕΜΑΤΟΣ
ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΣΤΡΕΒΛΩΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΚΑΒΟΥΡΑΣ ΣΩΤΗΡΗΣ

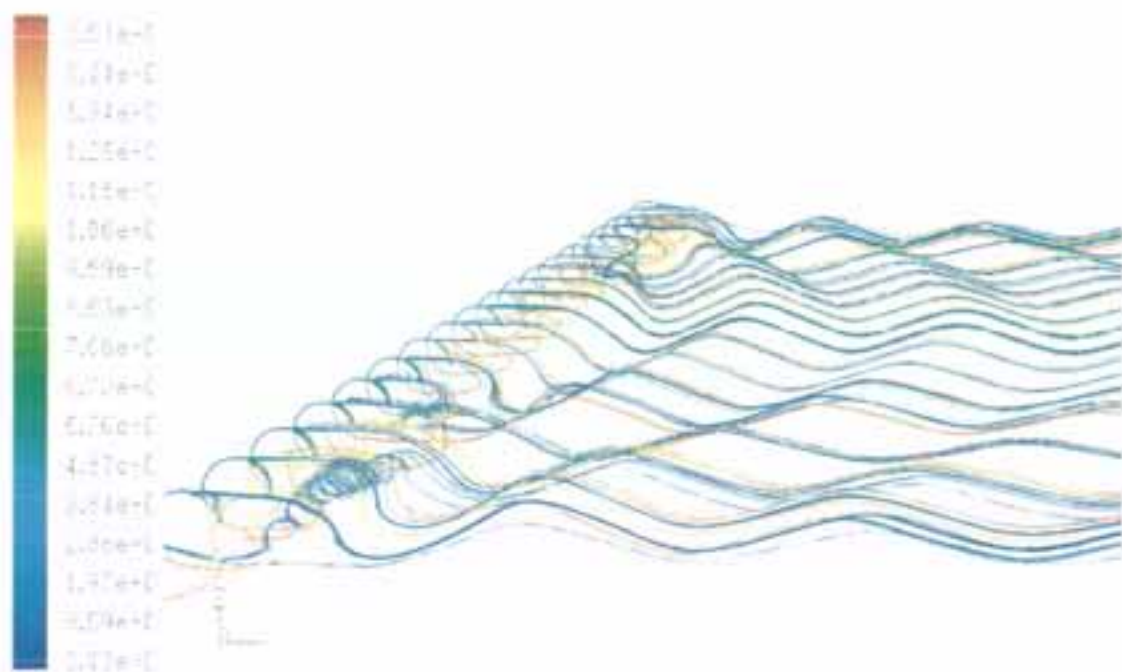
ΚΑΛΑΤΖΗΣ ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ



ΠΑΤΡΑ 2004

ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	7075
----------------------	------

ΘΑ ΘΕΛΑΜΕ ΝΑ ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΣΟΥΜΕ
ΤΟ ΚΑΘΗΓΗΤΗ ΜΑΣ ΧΡΗΣΤΟ ΣΤΑΜΟΥΤΣΟ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΛΥΤΙΜΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ
ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΓΓΡΑΦΗ ΑΥΤΗΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ



Path Lines (Colored by Particle ID, (Time=3.2075e+01)) May 11, 2004
F_001: t= 104, segregated, slow, unsteady

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1Ο

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1	Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD)	1
1.2	Η δομή ενός κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής	3
1.2.1	Προεπεξεργαστής (pre-processor)	3
1.2.2	Επιλύτης (solver)	5
1.2.3	Μεθεπεξεργαστής (post-processor)	5
1.3	Βασικές έννοιες	6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2Ο

ΠΛΕΓΜΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

2.1	Γενικά περί πλέγματος – Η ανάγκη για διακριτοποίηση	12
2.2	Τοπολογία πλέγματος – είδη κελιών για 2D και 3D ανάλυση	12
2.3	Κριτήρια επιλογής πλέγματος συναρτήσει του προβλήματος – Λειτουργικές παράμετροι	14
2.3.1	Χρόνος οργάνωσης	14
2.3.2	Υπολογιστικό κόστος	15
2.3.3	Αριθμητική διάχυση	15
2.4	Αναμενόμενες απαιτήσεις κατά τη σχεδίαση του πλέγματος	16
2.4.1	Απαιτήσεις για τη γεωμετρία/πλέγμα	16
2.4.2	Ποιότητα πλέγματος	17
2.4.2.1	Πυκνότητα και συγκέντρωση κόμβων	17
2.4.2.2	Ομαλότητα	19
2.4.2.3	Σχήμα κελιών	19
2.4.2.4	Εξάρτηση του πεδίου ροής	20
2.5	Λογισμικό και επικοινωνία του FLUENT με κατάλληλα προγράμματα	20
2.5.1	Αρχεία πλέγματος GAMBIT	20
2.5.2	Αρχεία πλέγματος GeoMesh	20
2.5.3	Αρχεία πλέγματος Tgrid	21

2.5.4	Αρχεία πλέγματος preBFC	21
2.5.5	Αρχεία πλέγματος ICEMCFD	21
2.5.6	Αρχεία πλέγματος από άλλα προγράμματα CAD	21
2.6	Τροποποίηση επί του πλέγματος και διεργασίες που πραγματοποιούνται επί αυτού	21
2.6.1	Τροποποίηση του πλέγματος υπό κλίμακα	22
2.6.2	Μετατόπιση του πλέγματος	22
2.6.3	Συγχώνευση ζωνών	23
2.6.4	Διαχωρισμός ζωνών	23
2.6.5	Δημιουργία περιοδικών ζωνών	23
2.6.6	Συγχώνευση περιοχών του πλέγματος	24
2.6.7	Διαχωρισμός επιφανειακών ζωνών	24
2.6.8	Εξώθηση των επιφανειακών ζωνών	24
2.6.9	Επαναδιάταξη του πεδίου και των ζωνών	25
2.7	Εισαγωγή πλέγματος	25
2.7.1	Εισαγωγή πολλαπλών αρχείων πλέγματος	25
2.7.2	Μή-σύμμορφα πλέγματα	25
2.7.2.1	Υπολογισμοί μη-σύμμορφου πλέγματος	26
2.7.2.2	Απαιτήσεις και περιορισμοί των μη-σύμμορφων πλεγμάτων	27
2.8	Έλεγχος του πλέγματος	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3Ο

ΕΠΙΛΥΣΗ

3	Γενικά περί επίλυσης	29
3.1	Επισκόπηση των αριθμητικών αλγορίθμων	29
3.2	Γραμμικοποίηση: Πεπλεγμένη (Implicit) και Ρητή (Explicit) Διαμόρφωση	31
3.2.1	Χρονική διακριτοποίηση	34
3.2.1.1	Πεπλεγμένη χρονική ολοκλήρωση	35
3.2.1.2	Ρητή χρονική ολοκλήρωση	36
3.3	Αλγόριθμοι Παρεμβολής Πίεσης	37
3.3.1	Επιλογή του αλγορίθμου παρεμβολής της πίεσης	38
3.4	Επιλογή της μεθόδου σύζευξης πίεσης – ταχύτητας	39

3.4.1	SIMPLE και SIMPLEC	39
3.4.2	PISO	40
3.5	Σύζευξη πίεσης – ταχύτητας	41
3.5.1	SIMPLE	41
3.5.2	SIMPLEC	43
3.5.3	PISO	43
3.5.3.1	Διόρθωση με συνεκτίμηση του πεδίου ταχυτήτων στα γειτνιάζοντα κελιά	44
3.5.3.2	Διόρθωση της επίδρασης της κυρτότητας	44
3.6	Διακριτοποίηση	45
3.6.1	Διακριτοποίηση της εξίσωσης της ορμής	47
3.6.2	Διακριτοποίηση της εξίσωσης της συνέχειας	47
3.7	1 ^{ης} Τάξης Ανάντη Αλγόριθμος	48
3.8	Αλγόριθμος Εκθετικού Νόμου	49
3.9	2 ^{ης} Τάξης Ανάντη Αλγόριθμος	51
3.10	Αλγόριθμος QUICK	51
3.11	Περιγραφή της τυρβώδους ροής	53
3.12	Τυρβώδη	60
3.12.1	Εισαγωγή	60
3.12.1	Επιλογή ενός τυρβώδους μοντέλου	61
3.13	Τυρβώδες μοντέλα Reynolds	62
3.13.1	Reynolds-Averaged Approach vs. LES	62
3.13.2	Reynolds (Ensemble) Averaging	64
3.13.3	Boussinesq Approach vs. Reynolds Stress Transport Models	65
3.14	Το μοντέλο LES (Large Eddy Simulation)	66
3.14.1	‘Φιλτραρισμένες’ εξισώσεις Navier – Stokes	69
3.14.2	Subgrid-Scale Models	70
3.14.3	Το μοντέλο Smagorinsky-Lilly	71
3.14.4	RNG-Based Subgrid-Scale Model	72
3.14.5	Οριακές συνθήκες για το μοντέλο LES	72
3.15	Λειτουργικές Συνθήκες (Operating Conditions)	74
3.15.1	Γενικά για την πίεση λειτουργίας	74
3.16	Η επιρροή του αριθμητικού λάθους στρογγυλοποίησης στον υπολογισμό της πίεσης σε ροές οι οποίες παρουσιάζουν μικρό αριθμό Mach	74

3.17	Πίεση λειτουργίας (Operating Pressure), Σχετική πίεση (Gauge Pressure) και Απόλυτη πίεση (Absolute Pressure)	74
3.18	Η σημασία της πίεσης λειτουργίας	75
3.18.1	Καθορισμός της πίεσης λειτουργίας	76
3.19	Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)	77
3.19.1	Μια περίληψη για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών	77
3.19.2	Διαθέσιμοι τύποι ορίων	77
3.19.3	Είσοδος και έξοδος ροής	79
3.19.4	Χρήση των οριακών συνθηκών ροής	79
3.20	Καθορισμός των τυρβωδών παραμέτρων	81
3.20.1	Προσδιορισμός των τυρβωδών ποσοτήτων με τη χρήση διανομών από το χρήστη	82
3.20.2	Ομοιόμορφος προσδιορισμός των τυρβωδών ποσοτήτων	82
3.20.3	Ένταση της Τύρβης	83
3.20.4	Τυρβώδης Κλίμακα Μήκους και Υδραυλική Διάμετρος	84
3.20.5	Λόγος του Τυρβώδους Ιξώδους	85
3.21	Σχέσεις για τον υπολογισμό των τυρβωδών ποσοτήτων	85
3.21.1	Υπολογισμός του Τροποποιημένου Τυρβώδους Ιξώδους από την Ένταση της Τύρβης και την Κλίμακα Μήκους	86
3.21.2	Υπολογισμός της Τυρβώδους Κινητικής Ενέργειας από την Ένταση της Τύρβης	86
3.21.3	Υπολογισμός του Τυρβώδους Βαθμού Σκέδασης συναρτήσει της Κλίμακας Μήκους	86
3.21.4	Υπολογισμός των συνιστωσών των τάσεων Reynolds από την Τυρβώδη	87
3.21.5	Προσδιορισμός της τύρβης κατά την είσοδο για το μοντέλο LES	87
3.22	Οριακές συνθήκες ταχύτητας κατά την είσοδο	88
3.22.1	Απαιτούμενα δεδομένα για την οριακή συνθήκη εισόδου κατά την οποία καθορίζεται η ταχύτητα	88
3.22.1.1	Περίληψη	88
3.22.2	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στα όρια ταχύτητας κατά την είσοδο	90
3.22.3	Υπολογιστική διαδικασία στα όρια ταχύτητας κατά την είσοδο	90
3.22.3.1	Επεξεργασία των συνθηκών ταχύτητας εισόδου στις εισόδους ροής	91
3.22.3.2	Επεξεργασία των συνθηκών ταχύτητας κατά την είσοδο στις εξόδους ροής	91

3.23	Υπολογισμός πυκνότητας	92
3.24	Οριακές συνθήκες εισόδου στις οποίες καθορίζεται η ροή μάζας	92
3.24.1	Εισαγωγή στην οριακή συνθήκη εισόδου όπου ορίζεται η μαζική παροχή	92
3.24.1.1	Περίληψη	92
3.24.2	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στα όρια εισόδου της παροχής μάζας	94
3.25	Υπολογιστική διαδικασία στα όρια της παροχής μάζας εισόδου	94
3.25.1	Υπολογισμοί ροής στα όρια της παροχής μάζας για ιδανικά αέρια	95
3.25.2	Υπολογισμοί ροής στα όρια της μάζας εισροής για ασυμπίστες ροές	96
3.25.3	Υπολογισμός των ρυθμών μεταβολής στα όρια της μαζικής εισροής	96
3.26	Οριακές συνθήκες πίεσης κατά την έξοδο	96
3.27	Απαιτούμενα δεδομένα για την οριακή συνθήκη πίεσης κατά την έξοδο	97
3.27.1	Περίληψη	97
3.27.2	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στα όρια πίεσης κατά την έξοδο	98
3.27.3	Υπολογιστική διαδικασία στα όρια της πίεσης κατά την έξοδο	98
3.28	Οριακές συνθήκες καθορισμού της πίεσης στο απομακρυσμένο πεδίο	98
3.28.1	Δεδομένα για την οριακή συνθήκη καθορισμού της πίεσης στο απομακρυσμένο πεδίο	99
3.28.1.1	Περίληψη	99
3.28.2	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τις οριακές συνθήκες πίεσης απομακρυσμένου πεδίου	100
3.28.3	Υπολογιστική διαδικασία των οριακών συνθηκών της πίεσης απομακρυσμένου πεδίου	100
3.29	Οριακές συνθήκες εκροής	101
3.29.1	Επεξεργασία των οριακών συνθηκών εκροής στο FLUENT	102
3.29.2	Χρήση των οριακών συνθηκών εκροής	103
3.30	Οριακές συνθήκες τοιχώματος	105
3.30.1	Δεδομένα που απαιτούνται για την οριακή συνθήκη τοιχώματος	106
3.30.1.1	Περίληψη	106
3.30.2	Καθορισμός θερμικών οριακών συνθηκών στα τοιχώματα	106
3.30.3	Διαδικασία υπολογισμού διατμητικής τάσης στα οριακά τοιχώματα	107
3.31	Υπολογισμός διατμητικής τάσης σε γραμμικές ροές	107
3.32	Προσαρμογή πλέγματος	109
3.32.1	Χρήση της προσαρμογής	109
3.32.2	Γενικές οδηγίες για την προσαρμογή του πλέγματος	109

3.33	Προσαρμογή του πλέγματος βάσει των κλίσεων του πεδίου	111
3.33.1	Προσέγγιση προσαρμογής της κλίσης	111
3.34	Προσαρμογή του πλέγματος βάσει της κατανομής ενός μεγέθους (Isovalue Adaption)	112
3.35	Προσαρμογή περιοχής του πλέγματος (region adaption)	114
3.35.1	Ορισμός της περιοχής προσαρμογής	114
3.36	Προσαρμογή του πλέγματος βάσει της τιμής του όγκου των κελιών	115
3.36.1	Προσέγγιση	115
3.37	Προσαρμογή του πλέγματος σε περιοχές με οριακά στρώματα βάσει της τιμής των y και y^*	116
3.37.1	Προσέγγιση	116

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4Ο

Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

4.1	Γενικά	118
4.2	Περιγραφή του πειράματος	123
4.3	Πειραματική συσκευή	125

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5Ο

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ

5.1	Γεωμετρία του προβλήματος	126
5.1.1	Γεωμετρία του θαλάμου δοκιμών	126
5.1.2	Γεωμετρία του αγωγού στρέβλωσης της ροής	128
5.2	Πλέγμα	130
5.3	Οριακές συνθήκες	131
5.4	Αριθμητικά μοντέλα και αλγόριθμοι	132
5.5	Διαδικασία επίλυσης του προβλήματος	135

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6Ο

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	137
6.1	Ταχύτητα στον άξονα x σε απόσταση $x/d = 6$	137
6.2	Ταχύτητα στον άξονα x σε απόσταση $x/d = 16$	140
6.3	Διαγράμματα ισοτιμών της ταχύτητας, ΤΚΕ και σκέδασης της ΤΚΕ	144

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1	Διαθέσιμοι για χρήση τύποι κελιών στο FLUENT	13
Σχήμα 2.2	Οργάνωση των αξονοσυμμετρικών γεωμετριών με το άξονα x παράλληλο ως προς τη γραμμή συμμετρίας	17
Σχήμα 2.3	Περίπτωση κατά την οποία οι δύο ζώνες επικαλύπτονται	26
Σχήμα 2.4	Περίπτωση κατά την οποία οι δύο ζώνες δεν επικαλύπτονται	26
Σχήμα 2.5	Προκύπτουσα επιφάνεια από την τομή δύο διεπιφανειακών ζωνών	27
Σχήμα 3.1	Επισκόπηση της συζευγμένης μεθόδου επίλυσης	32
Σχήμα 3.2	Όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση μιας βαθμωτής εξίσωσης μεταφοράς	46
Σχήμα 3.3	Συμπεριφορά μιας μεταβλητής ϕ μεταξύ $x = 0$ και $x = L$	50
Σχήμα 3.4	Μονοδιάστατος όγκος ελέγχου	52
Σχήμα 3.5	Μεταβολή της ταχύτητας με το χρόνο σε τυρβώδη ροή	53
Σχήμα 3.6	Μεταφορά ρευστών σωματιδίων εγκάρσια στο AB (τυρβώδης ροή)	58
Σχήμα 3.7	Μήκος αναμίξεως του Prandtl	60
Σχήμα 3.8	Επιλογή της τοποθεσίας των οριακών συνθηκών κατά την εκροή	104
Σχήμα 3.9	Η αλλαγή όγκου υπολογίζεται ως αναλογία των όγκων των γειτονικών κελιών στην επιφάνεια	116
Σχήμα 4.1	Πειραματική συσκευή για τη μελέτη τυρβώδους απορέματος κάτω από συνθήκες περιορισμού και στρέβλωσης της ροής	125
Σχήμα 5.1	Γεωμετρία του θαλάμου δοκιμών	127
Σχήμα 5.2	Γεωμετρία του αγωγού στρέβλωσης της ροής	129

Σχήμα 5.3	Το πλέγμα περί του κυλίνδρου	131
Σχήμα 5.4	Μεταβολή του αριθμού Strouhal συναρτήσει του αριθμού Reynolds	135

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1	Συνιστώμενες τιμές για την πίεση λειτουργίας	76
Πίνακας 2	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις (στο S.I.) για τις οριακές συνθήκες ταχύτητας κατά την είσοδο	90
Πίνακας 3	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις (στο S.I.) για τις οριακές συνθήκες ροής μάζας κατά την είσοδο	94
Πίνακας 4	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τις οριακές συνθήκες πίεσης κατά την έξοδο	98
Πίνακας 5	Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τις οριακές συνθήκες πίεσης απομακρυσμένου πεδίου	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1.1 Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD)

Σκοπός της **Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics)** είναι η αριθμητική επίλυση, με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, των διαφορικών εξισώσεων που εκφράζουν μαθηματικά τα πεδία ροής. Με τον τρόπο αυτό δύναται να αναλυθούν συστήματα τα οποία περιλαμβάνουν ροή ρευστού, μετάδοση θερμότητας και άλλα συναφή φαινόμενα (όπως χημικές αντιδράσεις) μέσω εξομοίωσης με χρήση υπολογιστή.

Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα ισχυρή και καλύπτει ένα μεγάλο εύρος βιομηχανικών και μη εφαρμογών. Μερικά παραδείγματα είναι:

- **Αεροδυναμική αεροπλάνων και οχημάτων:** υπολογισμός άνωσης και οπισθέλκουσας.
- **Υδροδυναμική πλοίων.**
- **Εγκαταστάσεις ισχύος:** καύση με μηχανές εσωτερικής καύσης (Μ.Ε.Κ.) και αεριοστρόβιλους.
- **Στροβιλομηχανές:** ροές σε περιστρεφόμενα διάκενα, διαχύτες κ.τ.λ.
- **Ηλεκτρική και ηλεκτρονική μηχανική:** ψύξη σε εξοπλισμό που περιλαμβάνει μικροκυκλώματα.
- **Μηχανική των χημικών διεργασιών:** μίξη και διαχωρισμός πολυμερών.
- **Εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον κτιρίων:** καταπόνηση από τον άνεμο, θέρμανση και εξαερισμός.
- **Θαλάσσια μηχανική:** φορτία σε θαλάσσιες κατασκευές.
- **Περιβαλλοντική μηχανική:** κατανομή μολυντών και αποβλήτων.
- **Υδρολογία και ωκεανογραφία:** ροές σε ποτάμια, κόλπους και ωκεανούς.
- **Μετεωρολογία:** πρόβλεψη καιρού.
- **Ενδοβιορευστομηχανική:** ροές αίματος σε αρτηρίες και φλέβες.

Από τη δεκαετία του '60, η αεροναυπηγική βιομηχανική συμπεριλαμβάνει τεχνικές CFD για το σχεδιασμό, την έρευνα, την ανάπτυξη και την κατασκευή αεροσκαφών και αεριοθούμενων μηχανών. Πρόσφατα, οι μεθοδολογίες αυτές έχουν εφαρμοσθεί για το σχεδιασμό θαλάμου καύσης αεριοστροβίλων, Μ.Ε.Κ. και κλιβάνων. Επιπλέον οι κατασκευαστές αυτοκινήτων μπορούν να προσδιορίσουν δυνάμεις αντίστασης και εσωτερικές ροές σε αυτοκίνητα (γενικότερα στο εσωτερικό περιβάλλον ενός αυτοκινήτου). Η Μεθοδολογία της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής αποτελεί διαρκώς αυξανόμενο το βασικό εργαλείο για το σχεδιασμό προϊόντων και διεργασιών.

Ο απόλυτος σκοπός της εξέλιξης στο πεδίο της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής είναι η ικανότητα ανάλυσης με τρόπο συγκρίσιμο των άλλων μεθόδων CAE όπως οι κώδικες ανάλυσης τάσεων. Βασικός λόγος υστέρησης είναι η υπερβολική πολυπλοκότητα των εμπλεκόμενων φαινομένων η οποία αποκλείει ροές που είναι ταυτόχρονα πραγματοποιήσιμες και ολοκληρωμένες. Η διαθεσιμότητα οικονομικά ανεκτού υπολογιστικού εξοπλισμού καθώς και η εισαγωγή υπολογισμού περιβαλλόντων φίλικών προς το χρήστη έχουν οδηγήσει στην πρόσφατη ανανέωση του ενδιαφέροντος για τη μεθοδολογία σε CFD με αποτέλεσμα αυτή να κάνει την εμφάνισή της στην ευρύτερη βιομηχανική κοινότητα τη δεκαετία του 1990.

Τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος **CFD** σε σύγκριση με πειραματικές μεθοδολογίες είναι:

- Σημαντική μείωση του χρόνου παράδοσης και του κόστους νέων σχεδιασμών.
- Ικανότητα μελέτης συστημάτων όπου ελεγχόμενα πειράματα είναι δύσκολο ή είναι αδύνατο να εκτελεστούν (π.χ. πολύ μεγάλα συστήματα).
- Ικανότητα μελέτης συστημάτων τα οποία πραγματοποιούνται κάτω από αντίξοες συνθήκες (και πέραν των ορίων κανονικής λειτουργίας) όπως για παράδειγμα η μελέτη ασφάλειας και τα σενάρια ατυχημάτων.
- Πρακτικά υπάρχει δυνατότητα πολύ μεγάλης ακρίβειας αποτελεσμάτων.

Το κόστος εκτέλεσης ενός πειράματος εξαρτάται από τον εμπλεκόμενο εξοπλισμό και τις ανθρωποώρες απασχόλησης, τον αριθμό των σταθμών μετρήσεως και τον αριθμό των ελεγχόμενων διαμορφώσεων. Αντιθέτως οι κώδικες CFD παράγουν μεγάλο όγκο αποτελεσμάτων χωρίς σημαντικό επιπρόσθετο κόστος και γενικά είναι πολύ εύκολη η

εκτέλεση παραμετρικών μελετών (όπως για παράδειγμα η βελτιστοποίηση της απόδοσης εξοπλισμού).

Η χρήση της μεθοδολογίας CFD απαιτεί, εκτός από την αρχική επένδυση σε εξοπλισμό, την ύπαρξη εξειδικευμένων επιστημόνων οι οποίοι θα αναλάβουν τη λειτουργία τους, την επικοινωνία και την επεξήγηση των αποτελεσμάτων τους.

1.2 Η δομή ενός κώδικα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Οι κώδικες CFD στηρίζονται σε αριθμητικούς αλγορίθμους που μπορούν να αντιμετωπίσουν ρευστομηχανικά προβλήματα. Προκειμένου να παρασχεθεί εύκολη πρόσβαση στην ικανότητα επίλυσης, όλοι οι εμπορικοί κώδικες CFD περιέχουν εξειδικευμένα περιβάλλοντα εργασίας για την εισαγωγή των παραμέτρων του προβλήματος και για την εξέταση των αποτελεσμάτων.

Ως εκ τούτου όλοι οι κώδικες περιλαμβάνουν τα εξής τρία κύρια στοιχεία:

- Τον προεπεξεργαστή (**pre-processor**),
- Τον επιλύτη (**solver**) και
- Τον μεθεπεξεργαστή (**post-processor**).

Εξετάζουμε εν συντομία τη λειτουργία καθενός από αυτά τα στοιχεία, τα οποία συμπεριλαμβάνονται σε ένα κώδικα CFD.

1.2.1 Προεπεξεργαστής (**pre-processor**)

Κατά την προεπεξεργασία εισάγεται το ροϊκό πρόβλημα, σε κατάλληλο λογισμικό με τη χρήση ενός κατάλληλου περιβάλλοντος εργασίας. Οι παράμετροι οι οποίες συνιστούν το εν λόγω πρόβλημα μετασχηματίζονται κατάλληλα σε μορφή αντιληπτή από τον επιλύτη.

Οι δραστηριότητες κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας περιλαμβάνουν:

- Καθορισμό της γεωμετρίας στο πεδίο ενδιαφέροντος: το *υπολογιστικό πεδίο*
- Παραγωγή πλέγματος: αποτελεί την υποδιαίρεση του πεδίου σε μικρότερα, μη-επικαλυπτόμενα υποπεδία τα οποία συνιστούν το *πλέγμα κελιών* ή των όγκων ελέγχου των στοιχείων (*grid/mesh*).
- Επιλογή των φυσικών και των χημικών φαινομένων που πρέπει να μοντελοποιηθούν.
- Καθορισμός των ιδιοτήτων του ρευστού.
- Προσδιορισμός των κατάλληλων οριακών συνθηκών στα κελιά τα οποία συμπίπτουν με τα όρια του υπολογιστικού χώρου.

Η λύση σε ένα πρόβλημα ροής (ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία κ.λ.π.) καθορίζεται στους *κόμβους* μέσα σε κάθε κελί. Η ακρίβεια μιας λύσης CFD είναι συνάρτηση του αριθμού των κελιών στο πλέγμα. Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κελιών τόσο περισσότερο η ακρίβεια της λύσης τείνει στην ιδανική. Τόσο η ακρίβεια της λύσης, όσο και το υπολογιστικό της κόστος, είναι συνάρτηση της πυκνότητας του πλέγματος. Τα βέλτιστα πλέγματα είναι συχνά ανομοιόμορφα: *πυκνά* σε περιοχές όπου παρατηρούνται οξείες κλίσεις των ενδιαφερόμενων μεγεθών και *αραιά* σε περιοχές όπου οι αντίστοιχες κλίσεις είναι σχετικά μικρότερες. Υπάρχει διαρκής προσπάθεια για τη δημιουργία κωδικών CFD οι οποίοι θα παράγουν αυτό-προσαρμοζόμενα πλέγματα των οποίων η τοπική πυκνότητα και η μορφή τους θα μεταβάλλεται βάσει του υπολογιζόμενου πεδίου. Οι τεχνικές αυτές δεν είναι σε μορφή άμεσα αξιοποιήσιμη από τη βιομηχανία ενώ υπάρχει διαρκής επιστημονική προσπάθεια για την μετεξέλιξη και βελτίωσή τους. Σήμερα, η δημιουργία ενός πλέγματος το οποίο έχει την απαιτούμενη ακρίβεια αλλά είναι ταυτόχρονα και οικονομικό εναπόκειται στις δυνατότητες του χειριστή ενός κώδικα CFD.

Πάνω από 50% του χρόνου που ξοδεύεται στη βιομηχανία σε ένα πρόγραμμα CFD αφιερώνεται για τον καθορισμό της γεωμετρίας του πεδίου και για την παραγωγή του πλέγματος. Οι κωδικές CFD συμπεριλαμβάνουν περιβάλλοντα εργασίας παρόμοια με αυτά των προγραμμάτων CAD με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας των χρηστών κωδικών CFD, ενώ παρέχεται η δυνατότητα συνεργασίας και εισαγωγής δεδομένων (γεωμετρία ή πλέγμα) από αυτά. Οι πιο εξελιγμένοι προεπεξεργαστές (pre-processors) παρέχουν πρόσβαση στο χρήστη σε βάσεις δεδομένων και τη δυνατότητα

επιλογής κατάλληλων μοντέλων που εξομοιώνουν το φυσικό πρόβλημα. Οι βάσεις δεδομένων που εμπεριέχονται σε ένα κώδικα CFD, παρέχουν πληροφορίες για τις φυσικές ιδιότητες ρευστών που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη βιομηχανία.

1.2.2 Επιλύτης (solver)

Υπάρχουν τρεις διαθέσιμες μεθοδολογίες για την αριθμητική επίλυση ροϊκών προβλημάτων: η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (ή πεπερασμένων όγκων), η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και οι φασματικές μέθοδοι. Εν περιλήψει οι αριθμητικές μέθοδοι που αποτελούν τη βάση του επιλυτή εκτελούν τα ακόλουθα βήματα:

- Προσέγγιση των άγνωστων μεταβλητών ροής με τη βοήθεια απλών συναρτήσεων.
- Διακριτοποίηση (*Discretisation*) με αντικατάσταση των προσεγγίσεων στις βασικές εξισώσεις της ροής η οποία ακολουθείται από κατάλληλους μαθηματικούς χειρισμούς.
- Λύση των αλγεβρικών εξισώσεων.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των τριών αυτών τεχνικών, σχετίζονται με τον τρόπο με τον οποίο οι μεταβλητές ροής προσεγγίζονται και με τις διαδικασίες διακριτοποίησης.

1.2.3 Μεθεπεξεργαστής (post-processor)

Το στάδιο της μεθεπεξεργασίας έχει εξελιχθεί σημαντικά ως αποτέλεσμα της διαρκούς έρευνας και επένδυσης στον τομέα αυτό. Αυτό οφείλεται στη συνεχή βελτίωση των σταθμών εργασίας οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε ακαδημαϊκό και βιομηχανικό περιβάλλον. Αυτοί οι σταθμοί εργασίας έχουν εκτεταμένες δυνατότητες επεξεργασίας γραφικών και προσφέρονται για την οπτικοποίηση δεδομένων που εξάγονται από την λύση ενός ρευστομηχανικού προβλήματος με χρήση ενός κώδικα CFD. Οι γραφικές εργασίες που μπορούν να επιτελέσουν μπορεί να είναι:

- Απεικόνιση της γεωμετρίας του πεδίου και του πλέγματος
- Διανυσματικά διαγράμματα
- Γραμμικά και ισοχρωματικά διαγράμματα
- Επιφανειακά 2D και 3D διαγράμματα
- Προσδιορισμός της διαδρομής σωματιδίου σε ροϊκό πεδίο
- Χειρισμός του γραφικού περιβάλλοντος (μετατόπιση, περιστροφή, θέαση υπό κλίμακα κ.λ.π.)
- Εξαγωγή έγχρωμων γραφημάτων σε μορφή postscript.

Πρόσφατα, η μεθεπεξεργασία έχει ενισχυθεί με τη δυνατότητα παραγωγής αρχείων κίνησης για τη δυναμική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Επιπρόσθετα όλοι οι κώδικες περιλαμβάνουν τη δυνατότητα αλφαριθμητικής εξόδου για περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

1.3 Βασικές έννοιες

Κατά την επίλυση ροϊκών προβλημάτων, πρέπει να είναι γνωστό ότι η εμπλεκόμενη φυσική είναι σύνθετη και τα αποτελέσματα που παράγονται από έναν κώδικα CFD στη καλλίστη των περιπτώσεων προσεγγίζει την ακρίβεια του φυσικού μοντέλου το οποίο ενσωματώνεται σε αυτόν ενώ στη χειρίστη συνδέεται άμεσα με την ικανότητα του χρήστη. Συγκεκριμένα, απαιτείται γνώση περισσότερων του ενός γνωστικών πεδίων για την ορθολογική αντιμετώπιση ενός ρευστομηχανικού προβλήματος το οποίο επιλύεται με την τεχνική CFD. Πριν από την οργάνωση και την εκτέλεση μιας προσομοίωσης CFD, υπάρχει το στάδιο του προσδιορισμού και της διατύπωσης του ροϊκού προβλήματος σε συνάρτηση με τα φυσικά και χημικά φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα. Για παράδειγμα θα πρέπει να ληφθούν αποφάσεις για το αν:

- το πρόβλημα θα μοντελοποιηθεί σε δύο ή τρεις διαστάσεις,
- θα αγνοηθούν οι επιδράσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ή οι επιδράσεις της μεταβολής της πίεσης στην πυκνότητα μιας ροής αέρα,
- θα λυθούν οι τυρβώδεις εξισώσεις ή για το αν θα αμεληθούν δευτερεύοντα φυσικά φαινόμενα.

Για τη σωστή επιλογή των παραπάνω απαιτείται καλή ικανότητα μοντελοποίησης επειδή για όλα τα προβλήματα, εκτός από τα σχετικά απλά, είναι αναγκαίο να γίνονται υποθέσεις για τη μείωση της πολυπλοκότητας σε ένα λειτουργικό επίπεδο ενώ παράλληλα να αναδεικνύονται τα εμφανή χαρακτηριστικά γνωρίσματα του προβλήματος.

Επίσης είναι απαραίτητη η πλήρης κατανόηση του αριθμητικού αλγορίθμου λύσης. Τρεις μαθηματικές έννοιες είναι χρήσιμες για την επίτευξη της επιτυχίας ή μη τέτοιων αλγορίθμων: είναι η *σύγκλιση*, η *συνέπεια* και η *σταθερότητα*. *Σύγκλιση* είναι η ιδιότητα μιας αριθμητικής μεθόδου να παράγει μια λύση η οποία προσεγγίζει την ακριβή λύση καθώς το διάστημα του πλέγματος, το μέγεθος του όγκου ελέγχου ή το μέγεθος των στοιχείων μειώνονται σε μηδέν. Οι 'συνεπείς' αριθμητικοί αλγόριθμοι παράγουν συστήματα αλγεβρικών εξισώσεων τα οποία μπορούν να αποδειχθούν ότι είναι ισοδύναμα με την αρχική βασική εξίσωση όταν το διάστημα του πλέγματος τείνει στο μηδέν. Η σταθερότητα συνδέεται με την απόσβεση των λαθών καθώς η αριθμητική μέθοδος εκτελείται. Αν μια τεχνική δεν είναι σταθερή, ακόμη και τα σφάλματα αποκοπής στα αρχικά δεδομένα μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες (μεγάλες) ταλαντώσεις ή ακόμα και απόκλιση. Η *σύγκλιση* είναι συνήθως πολύ δύσκολο να ορισθεί θεωρητικά και στην πράξη χρησιμοποιείται το θεώρημα ισοδυναμίας του Lax σύμφωνα με το οποίο για γραμμικά προβλήματα, ένας απαραίτητος και ικανοποιητικός όρος για τη σύγκλιση είναι ότι η μέθοδος διακρίνεται και από συνέπεια και από σταθερότητα. Στις μεθόδους CFD, αυτό το θεώρημα είναι περιορισμένης χρήσης αφού (όπως θα δούμε στο κεφάλαιο 2) οι βασικές εξισώσεις είναι μη γραμμικές. Σε τέτοια προβλήματα η *συνέπεια* και η *σταθερότητα* είναι απαραίτητοι όροι για τη *σύγκλιση* χωρίς όμως να την εξασφαλίζουν απόλυτα.

Η ανικανότητα να αποδειχθεί συμπερασματικά ότι ένας αριθμητικός αλγόριθμος λύσης συγκλίνει είναι κάπως μη ικανοποιητική από θεωρητικής πλευράς. Παρ' όλα αυτά, δε χρειάζεται να δίδεται μεγάλη σημασία στα ανωτέρω αφού η διαδικασία μείωσης του διαστήματος του πλέγματος σε σημείο που αυτό να προσεγγίζει το μηδέν, δεν είναι εφικτή σε υπολογιστές με πεπερασμένη ικανότητα ακρίβειας (π.χ. οκτώ ψηφία για μεταβλητές τύπου REAL*4). Τα λάθη αποκοπής θα αλλοίωναν την ακρίβεια της λύσης προτού γίνει εφικτή η επίτευξη δημιουργίας πλέγματος με εξαιρετικά πυκνή

κατανομή κελιών σε αυτό. Οι μηχανικοί απαιτούν από τους κώδικες CFD την παραγωγή φυσικών και ταυτόχρονα ρεαλιστικών αποτελεσμάτων με καλή ακρίβεια σε προσομοιώσεις με πεπερασμένα (μερικές φορές αρκετά αραιά) πλέγματα. Ο Patankar (1980) έχει διατυπώσει κανόνες που παράγουν ισχυρούς υπολογιστικούς αλγόριθμους πεπερασμένων όγκων. Στη συνέχεια δίνεται έμφαση σε τρεις κρίσιμες ιδιότητες αυτών των μεθόδων: την ικανότητα διατήρησης (*conservativeness*), την ικανότητα περιορισμού (*boundedness*) και την ικανότητα μεταφοράς (*transportiveness*).

Η προσέγγιση πεπερασμένων όγκων εξασφαλίζει την τοπική διατήρηση μιας ιδιότητας του ρευστού ϕ για κάθε όγκο ελέγχου. Οι αριθμητικοί αλγόριθμοι που κατέχουν την ικανότητα της διατήρησης εξασφαλίζουν επίσης καθολική διατήρηση της ιδιότητας του ρευστού σε όλο το πεδίο. Αυτό είναι σαφώς σημαντικό από φυσικής πλευράς και επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των συνεπών (ή σταθερών) εκφράσεων για τη ροή του ϕ διαμέσου των επιφανειών των κελιών των παρακείμενων όγκων ελέγχου. Η ικανότητα περιορισμού είναι συγγενική με τη σταθερότητα και απαιτεί ότι σε ένα γραμμικό πρόβλημα, χωρίς πηγές, η λύση έχει όρια τις μέγιστες και τις ελάχιστες οριακές τιμές της ροϊκής μεταβλητής. Η συγκεκριμένη ικανότητα μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση περιορισμών στο εύρος και στο πρόσημο των συντελεστών των αλγεβρικών εξισώσεων. Αν και τα προβλήματα ροής είναι μη γραμμικά, είναι σημαντική η μελέτη της ικανότητας περιορισμού ενός αλγόριθμου πεπερασμένων όγκων για σχετικά με αυτά, αλλά γραμμικά, προβλήματα.

Τελικά όλες οι ροϊκές διαδικασίες συνδέονται με φαινόμενα μεταφοράς (ή συναγωγής) και διάχυσης. Στα φαινόμενα διάχυσης, όπως η αγωγή θερμότητας, μια μεταβολή της θερμοκρασίας σε μια θέση έχει επιπτώσεις στη θερμοκρασιακή κατανομή περί αυτής σε μικρότερο ή μεγαλύτερο μέτρο. Τα φαινόμενα μεταφοράς επιδρούν στη ροή κατά τη διεύθυνση αυτής, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μεταβολή μιας παραμέτρου σε ένα σημείο του πεδίου να γίνεται αισθητή κατάντη αυτού. Οι αλγόριθμοι πεπερασμένων όγκων, έχοντας την ικανότητα μεταφοράς, οφείλουν να λαμβάνουν υπόψη τη κατεύθυνση της επίδρασης συνυπολογίζοντας τα φαινόμενα διάχυσης και συναγωγής.

Τα ανωτέρω κριτήρια συμπεριλαμβάνονται σε όλους τους αλγόριθμους πεπερασμένων όγκων και έχει ευρέως αποδειχθεί ότι οδηγούν σε επιτυχείς προσομοιώσεις CFD.

Επομένως, τα κριτήρια αυτά θεωρούνται αποδεκτά ως εναλλακτικές λύσεις για τις πιο αυστηρές έννοιες της σύγκλισης, της συνέπειας και της σταθερότητας από μαθηματική άποψη. Ένας ικανοποιητικός κώδικας CFD είθισται να 'ισορροπεί' μεταξύ της ακρίβειας λύσης και της σταθερότητας. Ο χειριστής χρειάζεται να έχει σαφή γνώση του βαθμού με τον οποίο οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται από έναν κώδικα.

Για την εκτέλεση ενός πραγματικού CFD υπολογισμού απαιτείται η εξοικείωση του χρήστη με τον κώδικα και η ικανότητα χειρισμού διαφόρων προβλημάτων με σχετική άνεση. Ο καθορισμός της γεωμετρίας και ο σχεδιασμός του πλέγματος αποτελούν τις αρχικές δραστηριότητες ενώ στη συνέχεια ο χρήστης θα πρέπει να είναι σε θέση να φέρει εις πέρας μια επιτυχή προσομοίωση. Οι δύο παράγοντες που χαρακτηρίζουν μια επιτυχή προσομοίωση είναι η σύγκλιση της επαναληπτικής διαδικασίας και η ανεξαρτησία του πλέγματος. Ο αλγόριθμος λύσης είναι επαναληπτικής φύσης και σε μια λύση η οποία συγκλίνει, τα αποκαλούμενα *υπόλοιπα* (residuals) - μέτρα της γενικής διατήρησης των ιδιοτήτων της ροής - θα πρέπει να είναι πολύ μικρά. Η προσεκτική επιλογή των διάφορων παραγόντων υπο-χαλάρωσης και των διαδικασιών επιτάχυνσης συντελούν στην επίτευξη μιας συγκλίνουσας λύσης μέσα στο μικρότερο δυνατό διάστημα. Ωστόσο, δεν υπάρχει προκαθορισμένη μεθοδολογία η οποία θα επιβάλλει την επιλογή των παραπάνω παραμέτρων αφού αυτές εξαρτώνται από το ίδιο το πρόβλημα. Για τη βελτιστοποίηση της ταχύτητας επίλυσης απαιτείται ιδιαίτερη εξοικείωση με τον ίδιο τον κώδικα, η οποία αποκτάται μόνο με εκτενή χρήση του κώδικα. Δεν υπάρχει κάποιος πρότυπος τρόπος πρόγνωσης των λαθών που υπεισέρχονται εξαιτίας της ανεπαρκούς σχεδίασης του πλέγματος στην περίπτωση μιας γενικής ροής. Ένας ικανοποιητικός αρχικός σχεδιασμός του πλέγματος στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη σωστή πρόβλεψη της μορφής της ροής. Είναι δηλαδή, ιδιαίτερα χρήσιμο ο σχεδιαστής του πλέγματος να γνωρίζει εκ των προτέρων (ή να είναι σε θέση να προβλέψει σωστά) τις περιοχές της ροής όπου παρουσιάζονται μεγάλες κλίσεις, ώστε το πλέγμα να είναι σχετικά πυκνότερο στις περιοχές αυτές. Επιπρόσθετα, είναι χρήσιμη η ύπαρξη ενός γνώστικού υπόβαθρου για τη δυναμική της ροής στο συγκεκριμένο πρόβλημα, ενώ σημαντική είναι και η σχετική εμπειρία με υπάρχοντα πλέγματα άλλων παρόμοιων προβλημάτων. Μια τεχνική η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αποφυγή σφαλμάτων τα οποία συνδέονται με ανεπαρκή σχεδίαση του πλέγματος είναι η διαδικασία της διαδοχικής βελτίωσης ενός αρχικά αραιού πλέγματος. Συγκεκριμένα, βελτιώνονται περιοχές του πλέγματος οι οποίες κρίνονται ως προβληματικές έως το

στάδιο στο οποίο η παραγόμενη λύση να είναι πλέον ανεξάρτητη του χρησιμοποιούμενου πλέγματος. Πέραν του σημείου αυτού, η προσθήκη περισσότερων κελιών δεν οδηγεί σε καλλίτερα αποτελέσματα άλλα σε επιπρόσθετη επιβράδυνση της προσομοίωσης. Μια συστηματική έρευνα, η οποία οδηγεί σε αποτελέσματα ανεξάρτητα του πλέγματος αποτελεί ένα ουσιαστικό κομμάτι όλων των μελετών CFD που χαρακτηρίζονται από υψηλή ποιότητα.

Κάθε αριθμητικός αλγόριθμος παρουσιάζει χαρακτηριστική συμπεριφορά όσον αφορά τα παραγόμενα σφάλματα. Ο όρος «σφάλμα» στο γνωστικό πεδίο της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής συχνά συνδέεται με όρους όπως η «αριθμητική διάχυση» ή «ψευδοδιάχυση» ή ακόμα και «αριθμητική ροή». Η μορφή των σφαλμάτων, που προκύπτουν κατά την επίλυση, μπορεί μόνο να καθορισθεί βάσει μιας ενδελεχούς γνώσης των αλγορίθμων. Στο τέλος μιας προσομοίωσης, ο χρήστης πρέπει να είναι ικανός να κρίνει αν τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Είναι αδύνατο να αξιολογηθεί η ισχύς των φυσικών και χημικών μοντέλων που ενσωματώνονται σε ένα πρόγραμμα τόσο σύνθετο όσο ένας κώδικας CFD ή να αξιολογηθεί η ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων του με οποιοδήποτε μέσο εκτός από τη σύγκρισή τους με πειραματικά αποτελέσματα. Πρέπει εκ των προτέρων να λεχθεί ότι η μεθοδολογία CFD δεν αποτελεί υποκατάστατο της πειραματικής διαδικασίας αλλά δρα συμπληρωματικά ως προς αυτήν, παρέχοντας στο μελετητή ένα ιδιαίτερα ισχυρό εργαλείο για την μελέτη ρευστομηχανικών προβλημάτων. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέρχονται από μια ανάλυση CFD απαιτεί την ύπαρξη ιδιαίτερα αναλυτικών πληροφοριών σχετικά με τις οριακές συνθήκες του προβλήματος και οδηγεί στην παραγωγή μεγάλου-όγκου-αποτελεσμάτων. Για την ουσιαστική επικύρωση, είναι απαραίτητη η παραγωγή πειραματικών δεδομένων για τον ίδιο πρόβλημα. Απαιτείται δηλαδή, η συλλογή σημειακών μετρήσεων της ροής με ανεμομετρία θερμού νήματος ή ταχυμετρία laser Doppler. Ωστόσο, αν το περιβάλλον δεν ενδείκνυται για εργαστηριακή εργασία ή ο απαιτούμενος εξοπλισμός δεν είναι διαθέσιμος, απλές μετρήσεις της στατικής πίεσης (με χρήση σωλήνων Pitot) και της θερμοκρασίας (χρησιμοποιώντας θερμοζεύγη) μπορούν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο βοήθημα για την επικύρωση μέρους του ροϊκού πεδίου.

Στην περίπτωση κατά την οποία ο εξοπλισμός για την εκτέλεση μιας πειραματικής εργασίας δεν υφίσταται, ο χρήστης CFD θα πρέπει να στηριχθεί στα εξής:

- σε προηγούμενη εμπειρία,
- σε συγκρίσεις με αναλυτικές λύσεις παρόμοιων αλλά απλούστερων ροών και
- σε συγκρίσεις με υψηλής ποιότητας δεδομένα από πολύ σχετικά προβλήματα τα οποία αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Ο υπολογισμός CFD περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός συνόλου αριθμών που (ενδεχομένως) αποτελεί μια ρεαλιστική προσέγγιση ενός πραγματικού συστήματος. Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας CFD είναι ότι ο χρήστης είναι σε θέση να επιλέξει το επίπεδο της λεπτομέρειας των αποτελεσμάτων.

Ο βασικός σκοπός μιας οποιασδήποτε προσομοίωσης CFD, είναι η βελτίωση της κατανόησης της συμπεριφοράς ενός συστήματος αλλά αφού δεν υφίσταται καμία πιστοποιημένη εγγύηση όσον αφορά την εξασφάλιση της ακρίβειας μιας προσομοίωσης, είναι απαραίτητος ο συχνός και αυστηρός έλεγχος των αποτελεσμάτων.

Είναι σαφές, ότι υπάρχουν οδηγίες για μια ορθή λειτουργική πρακτική που μπορεί να βοηθήσει το χρήστη ενός κώδικα CFD ενώ ο επαναλαμβανόμενος έλεγχος διαδραματίζει ένα βασικό ρόλο ως βασικός μηχανισμός ποιοτικού ελέγχου. Εντούτοις, οι κύριες παράμετροι για μια επιτυχημένη προσομοίωση CFD είναι η εμπειρία και η λεπτομερής κατανόηση της φυσικής του προβλήματος και των βασικών αρχών που διέπουν τους χρησιμοποιούμενους αριθμητικούς αλγόριθμους. Χωρίς τα ανωτέρω, είναι αδύνατη η μεγιστοποίηση των ωφελημάτων που προκύπτουν από τη χρήση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 20

ΠΛΕΓΜΑ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

2.1 Γενικά περί πλέγματος – Η ανάγκη για διακριτοποίηση

Τα αρχεία πλέγματος (*mesh files* ή *grid files*) δημιουργούνται κατά την προεπεξεργασία με την χρήση κατάλληλου λογισμικού όπως είναι το **GAMBIT**, το **TGrid**, το **GeoMesh** και το **preBFC** ή από άλλα προγράμματα **CAD**. Ένα αρχείο πλέγματος είναι - σύμφωνα με το **FLUENT** - απλά ένα υποσύνολο ενός αρχείου εργασίας (*case file*). Το αρχείο πλέγματος περιέχει:

- τις συντεταγμένες όλων των κόμβων,
- πληροφορίες διασύνδεσης που δείχνουν, τον τρόπο με τον οποίο ο κάθε κόμβος συνδέεται με τον άλλον για να δημιουργηθούν οι επιφάνειες (*faces*), τα κελιά, οι τύποι ζώνης και οι αριθμοί ταυτότητας (π.χ. *wall-1*, *pressure-inlet-5*, *symmetry-2*) όλων των δομικών στοιχείων του πλέγματος.

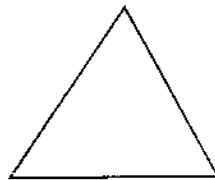
Το αρχείο πλέγματος δεν περιέχει ρητά τις οριακές συνθήκες, τις παραμέτρους ροής, ή τις παραμέτρους λύσης. Παρ' όλα αυτά ορίζεται ο τύπος των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται σε κάθε συνοριακή ακμή ή επιφάνεια.

2.2 Τοπολογία πλέγματος – είδη κελιών για 2D και 3D ανάλυση

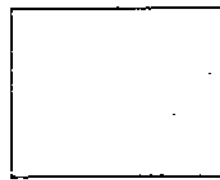
Δεδομένου ότι το **FLUENT** είναι ένα μη δομημένο πρόγραμμα επίλυσης προβλημάτων, χρησιμοποιεί εσωτερικές δομές δεδομένων για τη διαμόρφωση των κελιών, των επιφανειών, των σημείων του πλέγματος σε ένα πλέγμα και για τη διατήρηση της επαφής μεταξύ παρακείμενων κελιών. Επομένως, δεν απαιτείται καθορισμός συντεταγμένων (i, j, k) για να εντοπιστούν τα γειτονικά κελιά. Έτσι δίνεται η ευελιξία της χρήσης της τοπολογίας του πλέγματος που είναι η ιδανικότερη για το εκάστοτε πρόβλημα, αφού το πρόγραμμα δεν απαιτεί μια γενική δομή για το πλέγμα. Σε δισδιάστατα προβλήματα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο τα τετράπλευρα και τα τριγωνικά κελιά, ενώ στα τρισδιάστατα προβλήματα τα εξάεδρα, τα τετράεδρα, τα κελιά με μορφή πυραμίδας καθώς και τα κελιά με μορφή σφήνας (σχήμα 2.1).

Αποδεκτά είναι τα πλέγματα τα οποία συντίθενται από ένα τμήμα (*single-block*) ή και ακόμα από συνδυασμό τμημάτων (*multi-block*). Χρησιμοποιούνται επίσης υβριδικά πλέγματα τα οποία περιέχουν συνδυασμό τετράπλευρων, τριγωνικά κελιά για 2-D προβλήματα ή εξάεδρα, τετραεδρικά, πυραμιδοειδή και σφηνοειδή κελιά για 3-D προβλήματα. Επιπλέον, στο FLUENT μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλέγματα με εικονικούς κόμβους οι οποίοι έχουν προέλθει με τοπική βελτίωση του πλέγματος (*refining*). Τέλος παρουσιάζονται πλέγματα με μη-σύμμορφα όρια, δηλ. πλέγματα με πολλαπλά υποπεδία (*subdomains*) για τα οποία οι θέσεις των συνοριακών κόμβων δεν ταυτίζονται κατ' ανάγκη.

2D τύποι κελιών

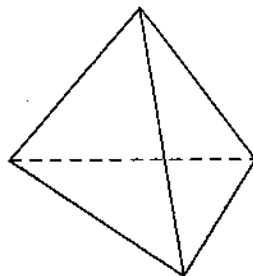


Τριγωνικό

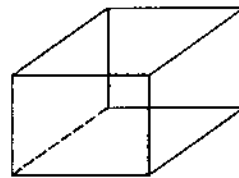


Τετραγωνικό

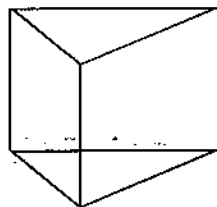
3D τύποι κελιών



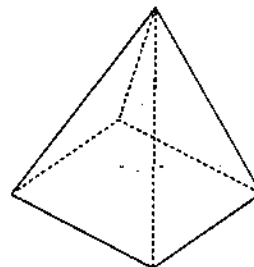
Τετραεδρικό



Εξαεδρικό



Πρίσμα/Σφήνα



Πυραμίδα

Σχήμα 2.1: Διαθέσιμοι τύποι κελιών για χρήση στο FLUENT

2.3 Κριτήρια επιλογής πλέγματος συναρτήσει του προβλήματος – Λειτουργικές παράμετροι

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε δισδιάστατα προβλήματα χρησιμοποιούνται πλέγματα που αποτελούνται από τριγωνικά ή τετράπλευρα κελιά (ή συνδυασμός τους) και σε τρισδιάστατα προβλήματα χρησιμοποιούνται πλέγματα από τετράεδρα, εξαέδρα κελιά, κελιά με μορφή πυραμίδας και σφηνοειδή κελιά (ή συνδυασμός τους). Η επιλογή του τύπου του πλέγματος στην πράξη εξαρτάται από τις απαιτήσεις του προβλήματος. Κατά την επιλογή του τύπου του πλέγματος, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Χρόνος οργάνωσης
- Υπολογιστικό κόστος
- Αριθμητική διάχυση
- Φυσική του προβλήματος

2.3.1 Χρόνος οργάνωσης

Πολλά πρακτικά ρευστομηχανικά προβλήματα που εμφανίζονται σε βιομηχανικό περιβάλλον είναι γεωμετρικά σύνθετα. Η δημιουργία δομημένων ή σύνθετα-δομημένων κατά ομάδες πλεγμάτων (που αποτελούνται από τετράπλευρα ή εξαέδρα κελιά) για τέτοια προβλήματα μπορεί να είναι εξαιρετικά χρονοβόρα, αν όχι αδύνατη. Ο χρόνος οργάνωσης για τη σύνθετη γεωμετρία είναι το σημαντικότερο κίνητρο για τη χρήση των μη-δομημένων πλεγμάτων χρησιμοποιώντας τριγωνικά ή τετραεδρικά κελιά. Εντούτοις, αν η γεωμετρία είναι σχετικά απλή, η δημιουργία του πλέγματος σε συνάρτηση με το χρόνο εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες του ίδιου του προβλήματος.

Εάν έχει ήδη δημιουργηθεί ένα πλέγμα για έναν δομημένο κώδικα όπως το FLUENT 4, είναι πρακτικό (όσον αφορά το χρόνο) να χρησιμοποιηθεί πάλι αυτό το πλέγμα παρά να αναπαραχθεί. Αυτό είναι ένα ισχυρό κίνητρο για τη χρησιμοποίηση των τετράπλευρων ή εξαεδρικών κελιών κατά την προσομοίωση. Στο FLUENT υπάρχει μια σειρά από φίλτρα που επιτρέπουν την εισαγωγή δομημένων πλεγμάτων από άλλους κώδικες, συμπεριλαμβανομένου και του FLUENT 4.

2.3.2 Υπολογιστικό κόστος

Όταν η γεωμετρία είναι σύνθετη ή το εύρος των χωροκλιμάκων είναι μεγάλο, ένα τριγωνικό/τετραεδρικό πλέγμα μπορεί να δημιουργηθεί με πολύ λιγότερα κελιά από ένα ισοδύναμο πλέγμα που αποτελείται από τετράπλευρα/εξάεδρα κελιά. Αυτό συμβαίνει επειδή σε ένα τριγωνικό/τετραεδρικό πλέγμα, τα κελιά συγκεντρώνονται σε επιλεγμένες περιοχές στη ροή, ενώ σε δομημένα τετράπλευρα/εξάεδρικά πλέγματα, τα κελιά είναι τοποθετημένα σε περιοχές όπου δεν απαιτούνται. Τα μη-δομημένα τετράπλευρα/εξάεδρικά πλέγματα έχουν πολλά από τα πλεονεκτήματα των τριγωνικών/τετραεδρικών πλεγμάτων για σύνθετες γεωμετρίες.

Ένα χαρακτηριστικό των πλεγμάτων που αποτελούνται από τετράπλευρα/εξάεδρικά κελιά, που μπορεί να τα κάνει πιο οικονομικά σε μερικές περιπτώσεις, είναι ότι με αυτά παρουσιάζεται ένας πολύ μεγαλύτερος λόγος διάστασης σε σχέση με ένα πλέγμα που αποτελείται από τριγωνικά/τετραεδρικά κελιά. Ένας μεγάλος λόγος διάστασης σε ένα τριγωνικό/τετραεδρικό κελί θα επηρεάσει την εκτροπή του, γεγονός το οποίο είναι ανεπιθύμητο γιατί αυτό μπορεί να εμποδίσει την ακρίβεια και τη σύγκλιση. Επομένως, σε μια σχετικά απλή γεωμετρία στην οποία το πλέγμα ευθυγραμμίζεται με τη ροή, όπως σε ένα μακρύ λεπτό αγωγό, είναι ικανοποιητική η χρήση ενός πλέγματος από τετράπλευρα/εξάεδρικά κελιά με υψηλό λόγο διάστασης. Το πλέγμα είναι πιθανό να έχει πολύ λιγότερα κελιά σε σχέση με ένα αντίστοιχο πλέγμα με τριγωνικά/τετράεδρα κελιά.

2.3.3 Αριθμητική διάχυση

Μια σημαντική πηγή λάθους σε πολυδιάστατες καταστάσεις είναι η αριθμητική διάχυση, ή ψευδοδιάχυση. (Ο όρος «ψευδοδιάχυση» χρησιμοποιείται επειδή η διάχυση αυτή δεν είναι ένα πραγματικό φαινόμενο, όμως η επίδρασή της αυξάνει τον πραγματικό συντελεστή διάχυσης.)

Λίγα λόγια για την αριθμητική διάχυση:

- Η αριθμητική διάχυση παρατηρείται καλύτερα όταν η πραγματική διάχυση είναι μικρή, δηλαδή όταν η ροή κυριαρχείται από φαινόμενα συναγωγής (ή μεταφοράς) και ο αριθμός Reynolds κατ' επέκταση είναι σχετικά μεγάλος.

- Όλοι οι πρακτικοί αριθμητικοί αλγόριθμοι για την επίλυση της ροής ενός ρευστού περιέχουν ένα πεπερασμένο ποσό αριθμητικής διάχυσης. Αυτό προκύπτει επειδή η αριθμητική διάχυση οφείλεται σε λάθη αποκοπής που είναι μια συνέπεια της μετατροπής των εξισώσεων της ροής σε διακριτή μορφή.
- Με τον αλγόριθμο διακριτοποίησης δευτέρας τάξης που χρησιμοποιείται στο FLUENT μπορούν να μειωθούν οι επιδράσεις της αριθμητικής διάχυσης κατά τη λύση.
- Το μέγεθος της αριθμητικής διάχυσης είναι αντιστρόφως ανάλογο με την ανάλυση του πλέγματος. Επομένως, ένας τρόπος να μειωθεί η αριθμητική διάχυση είναι να βελτιωθεί το πλέγμα (*grid refinement*).
- Η αριθμητική διάχυση ελαχιστοποιείται όταν ευθυγραμμίζεται η ροή με το πλέγμα.

Είναι σαφές ότι αν χρησιμοποιηθεί ένα τριγωνικό/τετραεδρικό πλέγμα, η ροή δεν μπορεί ποτέ να ευθυγραμμιστεί με το πλέγμα. Αφ' ετέρου, αν χρησιμοποιηθεί ένα τετράπλευρο/εξαεδρικό πλέγμα, υπάρχει η πιθανότητα η ροή να ευθυγραμμιστεί με το πλέγμα αλλά όχι για σύνθετες ροές. Σε μια απλή ροή, όπως στη ροή μέσω ενός αγωγού μεγάλου μήκους, η αριθμητική διάχυση ελαχιστοποιείται με τη χρήση ενός τετράπλευρου/εξαεδρικού πλέγματος και έτσι προκύπτει μια καλύτερη λύση με λιγότερα κελιά σε σχέση με τη λύση που θα προέκυπτε με ένα τριγωνικό/τετραεδρικό πλέγμα.

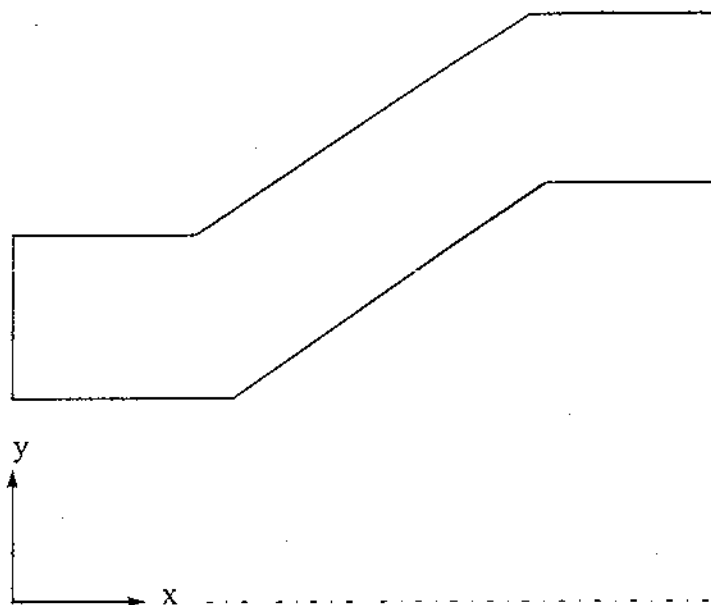
2.4 Αναμενόμενες απαιτήσεις κατά τη σχεδίαση του πλέγματος

Στην ενότητα που ακολουθεί παρέχονται πληροφορίες για τις ειδικές απαιτήσεις της γεωμετρίας και γενικά σχόλια για την ποιότητα του πλέγματος.

2.4.1 Απαιτήσεις για τη γεωμετρία/πλέγμα

Για την κατασκευή του πλέγματος και της γεωμετρίας στην αρχή της οργάνωσης του προβλήματός πρέπει να είναι γνωστά τα παρακάτω:

- Η αξονοσυμμετρική γεωμετρία πρέπει να καθοριστεί έτσι ώστε ο άξονας περιστροφής να είναι ο άξονας x στις καρτεσιανές συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της γεωμετρίας (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Οργάνωση των αξονοσυμμετρικών γεωμετριών με το άξονα x παράλληλο ως προς τη γραμμή συμμετρίας

- Είναι δυνατό να οργανωθούν τα περιοδικά όρια με τη χρήση είτε σύμμορφων είτε μη-σύμμορφων περιοδικών ζωνών. Για τα σύμμορφα περιοδικά όρια, οι περιοδικές ζώνες πρέπει να ταυτίζονται στα σύνορά τους. Τα σύμμορφα περιοδικά όρια μπορούν να δημιουργηθούν στο GAMBIT ή στο TGrid κατά τη δημιουργία των όγκων του πλέγματος. Εναλλακτικά, η δημιουργία σύμμορφων περιοδικών ορίων πραγματοποιείται με τη χρήση της σχετικής εντολής *'make-periodic'* και με διαδοχικές κατάλληλες επιλογές στη συνέχεια.

2.4.2 Ποιότητα πλέγματος

Η ποιότητα του πλέγματος διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια και τη σταθερότητα του αριθμητικού υπολογισμού. Οι ιδιότητες που συνδέονται με την ποιότητα του πλέγματος είναι η κατανομή της πυκνότητας των κόμβων, η διανομή τους και η ομαλότητα κατά τη διανομή.

2.4.2.1 Πυκνότητα και συγκέντρωση κόμβων

Η ακρίβεια της λύσης σε περιοχές οι οποίες παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες σε ένα ροϊκό πεδίο, όπως τα στρώματα διάτμησης, οι περιοχές αποκόλλησης, τα κρουστικά κύματα, τα οριακά στρώματα και οι ζώνες μίξης, εξαρτάται από την πυκνότητα και τη διανομή

των κόμβων στο πλέγμα. Σε πολλές περιπτώσεις, η μικρή ανάλυση σε κρίσιμες περιοχές μπορεί να μεταβάλλει δραματικά τα χαρακτηριστικά της ροής. Για παράδειγμα, η πρόβλεψη της αποκόλλησης εξαιτίας μιας αντίξοης κλίσης της πίεσης επιδρά σημαντικά στην ανάλυση του οριακού στρώματος ανάντη του σημείου αποκόλλησης.

Η ανάλυση του οριακού στρώματος (δηλ. το διάστημα του πλέγματος κοντά στα τοιχώματα) επίσης επηρεάζει την ακρίβεια υπολογισμού της διατμητικής τάσης στο τοίχωμα και την ακρίβεια του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα σε στρωτές ροές όπου το πλέγμα δίπλα στο τοίχωμα πρέπει να συμμορφώνεται με την παρακάτω σχέση:

$$y_p \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu x}} \leq 1 \quad (2.4.2.1)$$

όπου y_p απόσταση του τοιχώματος από το παρακείμενο κέντρο βάρους του κελιού
 u_∞ η ταχύτητα ελευθέρου ρεύματος
 ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού
 x η απόσταση κατά μήκος του τοιχώματος από την αφετηρία του οριακού στρώματος.

Η παραπάνω εξίσωση βασίζεται στη λύση του Blasius για τη στρωτή ροή σε μια επίπεδη πλάκα με μηδενική γωνία πρόσπτωσης.

Η κατάλληλη ανάλυση του πλέγματος για τις τυρβώδεις ροές είναι επίσης πολύ σημαντική. Λόγω της ισχυρής αλληλεπίδρασης της κύριας ροής με την τύρβη, τα αριθμητικά αποτελέσματα για τις τυρβώδεις ροές εξαρτώνται περισσότερο από το πλέγμα σε σχέση με εκείνα για τις στρωτές ροές. Στην περιοχή κοντά σε τοίχωμα (near-wall region), απαιτούνται διαφορετικές αναλύσεις πλέγματος ανάλογα με το μοντέλο που χρησιμοποιείται γι' αυτήν την περιοχή.

Γενικά, σε περιοχές διάβασης της ροής, ο ελάχιστος αριθμός των κελιών είναι 5. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτούνται πολλά περισσότερα κελιά ώστε η ροή να αναλυθεί επαρκώς. Σε περιοχές με μεγάλες κλίσεις, όπως σε στρώματα διάτμησης ή σε ζώνες μίξης, το πλέγμα πρέπει να είναι αρκετά πυκνό για να ελαχιστοποιηθούν οι μεταβολές των μεταβλητών της ροής από κελί σε κελί. Δυστυχώς, είναι συνήθως πολύ

δύσκολο να καθοριστούν εκ των προτέρων οι θέσεις των σημαντικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της ροής. Επιπλέον, η ανάλυση του πλέγματος στα περισσότερα περίπλοκα τρισδιάστατα πεδία ροής εξαρτάται και από τις δυνατότητες του υπολογιστή (δηλ. μνήμη και χωρητικότητα δίσκου). Αν και η ακρίβεια αυξάνεται με μεγαλύτερα πλέγματα, ωστόσο με τα πλέγματα αυτά αυξάνονται οι απαιτήσεις μνήμης και υπολογιστικός χρόνος (CPU) για τον υπολογισμό της λύσης και για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Η επιλογή για προσαρμοσμένη βελτίωση του πλέγματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση ή τη μείωση της πυκνότητάς του και με αυτόν τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα για μια πιο οικονομική χρήση των σημείων του πλέγματος (με αποτέλεσμα να μειώνονται ο χρόνος εκτέλεσης των διαδικασιών και οι απαιτήσεις υπολογιστικών πόρων).

2.4.2.2 Ομαλότητα

Οι ταχείες μεταβολές του όγκου των κελιών ανάμεσα στα παρακείμενα κελιά έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλων σφαλμάτων αποκοπής. Το σφάλμα αποκοπής είναι η διαφορά μεταξύ των μερικών παραγώγων στις βασικές εξισώσεις και των διακριτών προσεγγίσεών τους. Το FLUENT παρέχει τη δυνατότητα της βελτίωσης της ομαλότητας με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του πλέγματος ελέγχοντας τη μεταβολή του όγκου ή τον ρυθμό μεταβολής του.

2.4.2.3 Σχήμα κελιών

Το σχήμα του κελιού (συμπεριλαμβανομένου του λόγου εκτροπής και διάστασης) επίσης επηρεάζει την ακρίβεια της αριθμητικής λύσης. Η εκτροπή μπορεί να οριστεί ως η διαφορά μεταξύ του σχήματος ενός κελιού συγκρινόμενο με ισόπλευρο κελί ισοδύναμου όγκου. Κελιά τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη λοξότητα μπορούν να μειώσουν την ακρίβεια και να αποσταθεροποιήσουν τη λύση. Παραδείγματος χάριν, τα βέλτιστα τετράπλευρα πλέγματα θα έχουν γωνίες μεταξύ σημείων πλησίον των 90 μοιρών, ενώ οι γωνίες στα τριγωνικά πλέγματα πρέπει κατά προτίμηση να είναι πλησίον των 60 μοιρών ενώ όλες οι γωνίες να είναι μικρότερες των 90 μοιρών.

Ο λόγος διάστασης είναι ένα μέτρο προσδιορισμού της κατά μήκος επέκτασης ενός κελιού. Ακραίοι λόγοι διάστασης μπορούν να παράγουν ακριβή αποτελέσματα με

λιγότερα κελιά όταν η ροή είναι έντονα ανισότροπη. Εντούτοις, καλό είναι να αποφεύγονται οι λόγοι διάστασης μεγαλύτεροι του 5:1.

2.4.2.4 Εξάρτηση του πεδίου ροής

Η επίδραση της ανάλυσης, της ομαλότητας και της μορφής των κελιών στην ακρίβεια και τη σταθερότητα της διαδικασίας λύσης εξαρτάται έντονα από το πεδίο ροής που εξομοιώνεται. Παραδείγματος χάριν, τα κελιά με μεγάλο λόγο κυρτότητας είναι ανεκτά σε περιοχές της ροής με μικρή κλίση, αλλά δεν επιτρέπεται η χρήση τους σε περιοχές της ροής με μεγάλες κλίσεις. Δεδομένου ότι οι θέσεις των μεγάλων κλίσεων της ροής δεν μπορούν να καθοριστούν εκ των προτέρων, πρέπει να επιτευχθεί αρχικά ένα υψηλής ποιότητας πλέγμα για ολόκληρη την περιοχή της ροής.

2.5 Λογισμικό και επικοινωνία του FLUENT με κατάλληλα προγράμματα

Το FLUENT έχει τη δυνατότητα χειρισμού διαφορετικών τοπολογιών πλέγματος ενώ ταυτόχρονα υπάρχουν πολλές πηγές λήψης ενός πλέγματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εκάστοτε προσομοίωση. Ένα πλέγμα μπορεί να ληφθεί μέσω του **GAMBIT**, του **TGrid**, του **GeoMesh**, του **preBFC**, του **ICEMCFD**, του **I-DEAS**, του **NASTRAN**, του **PATRAN**, του **ARIES**, του **ANSYS**, ή άλλων προεπεξεργαστών. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί πλέγμα που περιλαμβάνεται σε αρχεία εργασίας των **FLUENT/UNS**, **RAMPANT** ή **FLUENT 4**. Τέλος υπάρχει η δυνατότητα της προετοιμασίας επιμέρους αρχείων πλέγματος τα οποία συνδυάζονται με σκοπό τη δημιουργία ενιαίου πλέγματος.

2.5.1 Αρχεία πλέγματος GAMBIT

Το **GAMBIT** χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δισδιάστατων και τρισδιάστατων δομημένων / μη δομημένων / υβριδικών πλεγμάτων.

2.5.2 Αρχεία πλέγματος GeoMesh

Το **GeoMesh** χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ολοκληρωμένων δισδιάστατων τετραπλεύρων ή τριγωνικών πλεγμάτων, τρισδιάστατων εξαεδρικών πλεγμάτων και επιφανειακών τριγωνικών πλεγμάτων για τρισδιάστατα τετραεδρικά πλέγματα. Για τη

δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων απαιτείται η εισαγωγή του επιφανειακού πλέγματος από το TGrid.

2.5.3 Αρχεία πλέγματος TGrid

Το TGrid χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δισδιάστατων και τρισδιάστατων μη-δομημένων τριγωνικών/τετραεδρικών πλεγμάτων από οριακά ή επιφανειακά πλέγματα.

2.5.4 Αρχεία πλέγματος preBFC

Το preBFC χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δύο διαφορετικών τύπων πλεγμάτων για το FLUENT: δομημένων τετραπλεύρων/εξαεδρικών και μη-δομημένων τριγωνικών/τετραεδρικών.

2.5.5 Αρχεία πλέγματος ICEMCFD

Το ICEMCFD χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δομημένων πλεγμάτων (FLUENT 4 format) και μη δομημένων πλεγμάτων (RAMPANT format).

2.5.6 Αρχεία πλέγματος από άλλα προγράμματα CAD

Με το FLUENT είναι δυνατή η εισαγωγή αρχείων πλέγματος από διάφορα προγράμματα CAD, συμπεριλαμβανομένων των I-DEAS, NASTRAN, PATRAN, και ANSYS.

2.6 Τροποποίηση επί του πλέγματος και διεργασίες που πραγματοποιούνται επί αυτού

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους ένα πλέγμα μπορεί να τροποποιηθεί ή να χειριστεί αφού έχει αρχικά εισαχθεί στο FLUENT. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι:

- η τροποποίηση του πλέγματος υπό κλίμακα,
- η συγχώνευση ή ο διαχωρισμός ζωνών,
- η δημιουργία ή ο διαχωρισμός περιοδικών ζωνών και
- η συγχώνευση οριακών συνθηκών

Επιπρόσθετα, υπάρχει η δυνατότητα επαναδιάταξης των κελιών του πεδίου με σκοπό τη μείωση του εύρους πληροφορίας. Η ομαλοποίηση και η διαγώνια αντιμετάθεση, μεθοδολογίες που συχνά χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση του πλέγματος, συζητούνται στη συνέχεια. Ομοίως συζητούνται μεθοδολογίες για τη διαμέριση του πλέγματος ώστε να είναι δυνατή η χρήση του από τον επιλύτη παράλληλης επεξεργασίας.

2.6.1 Τροποποίηση του πλέγματος υπό κλίμακα

Στο FLUENT, το υπολογιστικό πλέγμα είναι αποθηκευμένο σε μέτρα [m], τη μονάδα μήκους στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI). Όταν το πλέγμα εισάγεται στο πρόγραμμα επίλυσης (solver), θεωρείται ότι παρήχθη με μονάδα μήκους το μέτρο. Εάν το πλέγμα όμως δημιουργήθηκε με χρήση διαφορετικής μονάδας μήκους (π.χ. ίντσες [in], πόδια [ft], εκατοστά [cm]), πρέπει να τροποποιηθεί υπό κλίμακα. Για αυτό το λόγο, επιλέγεται η επιθυμητή μονάδα μήκους από έναν κατάλογο συνήθων μονάδων, με σκοπό τη μετατροπή του πλέγματος. Στη συνέχεια κάθε ομάδα συντεταγμένων πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο συντελεστή μετατροπής.

Η τροποποίηση υπό κλίμακα του πλέγματος, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αλλαγή του φυσικού μεγέθους του πλέγματος. Για παράδειγμα, είναι δυνατή η μη ιστροπική τροποποίηση του πλέγματος σε ένα εκ των αξόνων που χρησιμοποιούνται (π.χ. κατά τον άξονα των x). Ωστόσο, η ανισότροπη υπό κλίμακα τροποποίηση, πρέπει να χρησιμοποιείται λαμβάνοντας υπ' όψιν τη ταυτόχρονη μεταβολή του λόγου διαστάσεων των κελιών.

2.6.2 Μετατόπιση του πλέγματος

Η μετατόπιση του πλέγματος πραγματοποιείται με ορισμό των αντίστοιχων διαστημάτων για κάθε άξονα ενός καρτεσιανά ορισμένου πλέγματος. Η εφαρμογή αυτής της πρακτικής μπορεί να απαιτείται σε προβλήματα περιστροφής όπου ο άξονας δεν περνά από την αρχή των αξόνων ή δε συμπίπτει με ένα εκ των κυρίων αξόνων. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με σκοπό τη μετατόπιση της αρχής των αξόνων σε ένα σημείο, χαρακτηριστικό της ροής. Η μετατόπιση της αρχής των αξόνων έτσι ώστε

αυτή να ταυτίζεται με το χείλος προσβολής μιας επίπεδης πλάκας, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της συγκεκριμένης πρακτικής.

2.6.3 Συγχώνευση ζωνών

Για την απλοποίηση της διαδικασίας επίλυσης, υπάρχει η δυνατότητα της συγχώνευσης των ζωνών. Συγχώνευση ζωνών, καλείται ο συνδυασμός πολλαπλών ζωνών παρόμοιου τύπου με σκοπό τη δημιουργία μιας ενιαίας ζώνης. Με τη συγχώνευση ομοίων ζωνών, μπορεί να απλοποιηθεί η διαδικασία ορισμού οριακών συνθηκών καθώς και η μεθεπεξεργασία.

2.6.4 Διαχωρισμός ζωνών

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι με τις οποίες είναι δυνατός ο διαχωρισμός μιας ενιαίας επιφανειακής ζώνης ή ζώνης κελιών σε πολλαπλές ζώνες του ίδιου τύπου. Ο διαχωρισμός των ζωνών μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση που το πλέγμα περιέχει μια ζώνη η οποία πρέπει να χωριστεί σε μικρότερα κομμάτια. Για παράδειγμα, όταν κατά την κατασκευή του πλέγματος για έναν αγωγό έχει δημιουργηθεί μια ενιαία ζώνη τοιχωμάτων, υπάρχει η δυνατότητα του ορισμού διαφορετικών θερμοκρασιών σε συγκεκριμένες επιφάνειες του τοιχώματος, διαιρώντας τη συγκεκριμένη ζώνη τοιχώματος σε δύο ή περισσότερες ζώνες.

2.6.5 Δημιουργία περιοδικών ζωνών

Είναι δυνατή η χρήση περιοδικών οριακών συνθηκών με χρήση είτε σύμμορφων είτε μη-σύμμορφων περιοδικών ζωνών. Η περιοδικότητα στο πλέγμα πραγματοποιείται με τη σύνδεση δύο επιφανειακών ζωνών. Η δημιουργία μιας σύμμορφης περιοδικής ζώνης είναι δυνατή αν οι δύο ζώνες έχουν την ίδια κατανομή κόμβων και επιφανειών. Η δημιουργία μιας μη-σύμμορφης περιοδικής ζώνης χρησιμοποιείται, αν δεν υπάρχει ταύτιση των γεωμετρικών οντοτήτων εντός μιας καθορισμένης ανοχής, για τη σύνδεση δύο επιφανειακών ζωνών.

2.6.6 Συγχώνευση περιοχών του πλέγματος

Η συνένωση πολλαπλών περιοχών του πλέγματος που έχουν ξεχωριστά δημιουργηθεί μπορεί να γίνει διαμέσου της επιλογής «συγχώνευσης επιφανειών». Όταν το πεδίο έχει διαμοιραστεί σε πολλαπλά υποπεδία ενώ το αντίστοιχο πλέγμα έχει παραχθεί ξεχωριστά για κάθε ένα από αυτά, το αρχείο εργασίας που τα περιλαμβάνει πρέπει να δημιουργηθεί πρότερα της εισαγωγής του στον επιλύτη. Τα ανωτέρω έχουν εφαρμογή σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η δημιουργία και η αποθήκευση ενός συνθέτου πλέγματος γίνεται σε διακριτά αρχεία ενώ γίνεται προφανές ότι απαιτείται η χρήση ενός μοναδικού αρχείου πλέγματος. Κατά τη συγχώνευση δεν απαιτείται η ταύτιση των γεωμετρικών οντοτήτων καθώς αυτή η λειτουργία εκτελείται από την εφαρμογή.

2.6.7 Διαχωρισμός επιφανειακών ζωνών

Η λειτουργία του διαχωρισμού επιφανειακών ζωνών έχει δύο χρήσεις:

- Υπάρχει η δυνατότητα του διαχωρισμού μιας οριακής ζώνης η οποία βρίσκεται στην επιφάνεια συνένωσης δύο μη ταυτιζόμενων γεωμετρικά πλεγμάτων σε δύο διακριτές ζώνες.
- Υπάρχει η δυνατότητα του διαχωρισμού μιας συνδεδεμένης (coupled) ζώνης, ευρισκόμενης σε τοίχωμα, σε δύο διακριτές ζώνες τοιχωμάτων.

2.6.8 Εξώθηση των επιφανειακών ζωνών

Η επιλογή της εξώθησης μιας επιφανειακής οριακής ζώνης επιτρέπει την επέκταση του πεδίου λύσης χωρίς να χρειάζεται η έξοδος από το πρόγραμμα επίλυσης (solver). Μια χαρακτηριστική εφαρμογή της ικανότητας εξώθησης είναι η επέκταση του πεδίου λύσης για ροή η οποία περιέχει μια ανακυκλοφορία της οποίας το πραγματικό μήκος προσκρούει στην έξοδο. Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται πρισματικά ή εξαεδρικά στρώματα των οποίων η μορφή εξαρτάται από τη μορφή της επιφάνειας και των επιφανειακών διανυσμάτων. Οι τιμές των μεταφερόμενων ποσοτήτων στους κόμβους, υπολογίζονται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις επιφανειακά μέσες τιμές.

2.6.9 Επαναδιάταξη του πεδίου και των ζωνών

Η επαναδιάταξη του πεδίου μπορεί να βελτιώσει την υπολογιστική απόδοση του προγράμματος λύσης με την εκ νέου τακτοποίηση των κόμβων, των επιφανειών και των κελιών στη μνήμη. Υπάρχει η δυνατότητα της επαναδιάταξης του πεδίου και των ζωνών καθώς επίσης της εκτύπωσης του εύρους των εκάστοτε τμημάτων του πλέγματος. Το πεδίο μπορεί να επαναδιαταχθεί με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας πρόσβασης στη μνήμη ενώ οι ζώνες μπορούν να επαναδιαταχθούν με σκοπό τη βελτίωση της λειτουργικότητας κατά τη χρήση του προγράμματος.

2.7 Εισαγωγή πλέγματος

2.7.1 Εισαγωγή πολλαπλών αρχείων πλέγματος

Μπορούν να υπάρξουν περιπτώσεις κατά τις οποίες θα πρέπει να εισαχθούν πολλαπλά αρχεία πλέγματος (subdomains) με σκοπό τη διαμόρφωση του υπολογιστικού πεδίου. Μερικά παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων τίθενται παρακάτω:

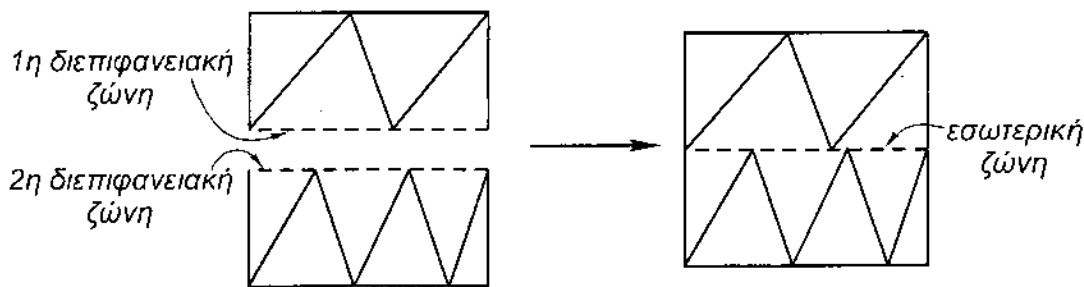
- Κατά τον προγραμματισμό της λύσης με χρήση πολλαπλών πλεγμάτων, είναι δυνατή η δημιουργία κάθε τμήματος του πλέγματος και η αποθήκευσή του σε διαφορετικό αρχείο πλέγματος.
- Για περίπλοκες γεωμετρίες, μπορεί να είναι αποδοτικότερο να αποθηκευθούν τα τμήματα του πλέγματος σε ξεχωριστά αρχεία πλέγματος.

2.7.2 Μη-σύμμορφα πλέγματα

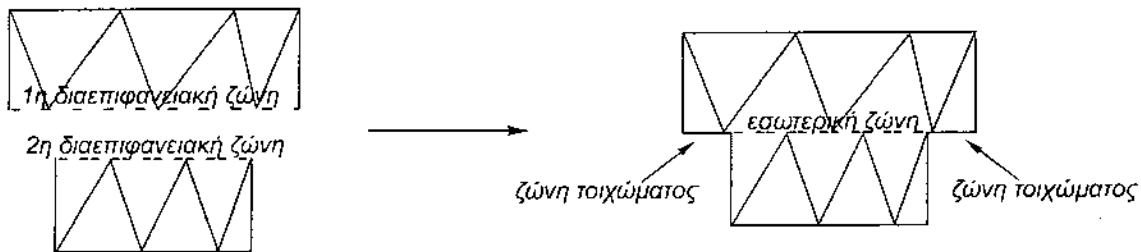
Στο FLUENT είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα πλέγμα που αποτελείται από ζώνες κελιών με μη-σύμμορφα όρια. Δηλαδή οι θέσεις των συνοριακών κόμβων του πλέγματος δεν ταυτίζονται σε περιοχές όπου συναντούνται δύο μη σύμμορφα πλέγματα. Στο FLUENT, ο χειρισμός τέτοιων πλεγμάτων πραγματοποιείται με την ίδια τεχνική που εφαρμόζεται σε μοντέλα ολίσθησης του πλέγματος.

2.7.2.1 Υπολογισμοί μη-σύμμορφου πλέγματος

Για τον υπολογισμό της ροής κατά μήκος ενός μη-σύμμορφου ορίου, πρέπει πρώτα να υπολογισθεί η τομή των δύο διεπιφανειών. Η προκύπτουσα τομή δημιουργεί μια εσωτερική ζώνη (interior zone) όπου οι δύο ζώνες επικαλύπτονται (σχήμα 2.3). Εάν μια από τις ζώνες εκτείνεται πέρα από την άλλη (σχήμα 2.4), δημιουργείται μια ή δύο πρόσθετες ζώνες τοιχώματος για το τμήμα (ή τα τμήματα) του ορίου όπου οι δύο ζώνες δεν επικαλύπτονται.



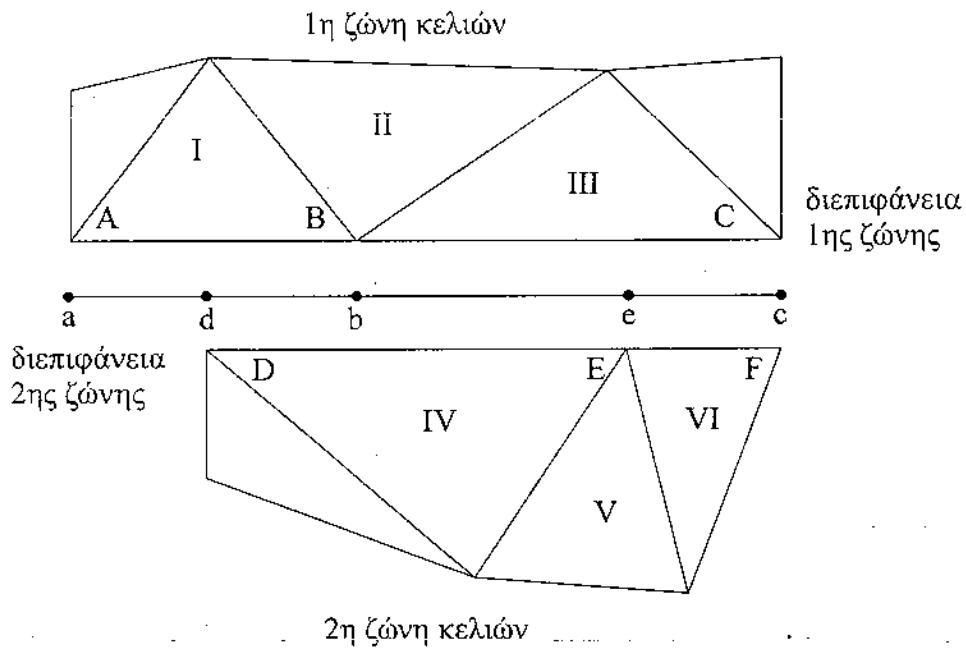
Σχήμα 2.3 Περίπτωση κατά την οποία οι δύο ζώνες επικαλύπτονται



Σχήμα 2.4 Περίπτωση κατά την οποία οι δύο ζώνες δεν επικαλύπτονται

Οι ροές κατά μήκος της διεπαφής του πλέγματος (grid interface) υπολογίζονται με τη χρήση των επιφανειών που προκύπτουν από τη τομή δύο διεπιφανειακών ζωνών και όχι από τις ίδιες τις επιφάνειες. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5, οι διεπιφανειακές ζώνες αποτελούνται από τις επιφάνειες A-B και B-C, και τις επιφάνειες D-E και E-F. Η τομή αυτών των ζωνών δημιουργεί τις επιφάνειες a-d, d-b, b-e και e-c. Οι επιφάνειες που παράγονται στην περιοχή όπου δύο ζώνες κελιών αλληλοκαλύπτονται (d-b, b-e, e-c), διαμορφώνουν μια εσωτερική ζώνη, ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια (a-d) χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση μιας ζώνης τοιχώματος. Για τον υπολογισμό της ροής κατά μήκος της διεπιφάνειας στο κελί IV, αμελείται η

επιφάνεια d-e και αντί αυτής χρησιμοποιούνται οι επιφάνειες d-b και b-e οι οποίες παρέχουν πληροφορίες στο κελί IV από τα κελιά I και III, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.5 Προκύπτουσα επιφάνεια απο την τομή δύο διεπιφανειακών ζωνών

2.7.2.2 Απαιτήσεις και περιορισμοί των μη-σύμμορφων πλεγμάτων

Σε αυτήν την παράγραφο αναφέρονται περιορισμοί και απαιτήσεις κατά τη χρήση των μη-σύμμορφων πλεγμάτων:

- Η διεπιφάνεια του πλέγματος μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή (συμπεριλαμβανομένης και μιας τρισδιάστατης μη επίπεδης επιφάνειας), με την προϋπόθεση ότι οι δύο οριακές διεπιφάνειες είναι της ίδιας γεωμετρίας. Εάν υπάρχουν απότομα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (π.χ. ορθές γωνίες) ή κυρτότητα στο πλέγμα, η γεωμετρία στη διεπιφάνεια ακολουθεί την ίδια μορφολογία και στις δύο πλευρές.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση δύο ομόκεντρων κύκλων στην οποία δύο ζώνες ρευστού χωρίζονται με μια κυκλική, μη-σύμμορφη διεπιφάνεια επειδή η απόσταση των κόμβων στην άκρη της διεπιφάνειας της εξωτερικής ζώνης ρευστού είναι μεγάλη σε σχέση με την ακτίνα καμπυλότητας, η προκύπτουσα

διεπιφάνεια δεν ακολουθεί απόλυτα τη συγκεκριμένη γεωμετρική μορφολογία (δηλαδή την κυκλική πλευρά).

Γενικά, η μέγιστη ανοχή μεταξύ δύο διεπιφανειών πρέπει να είναι μικρότερη από το μέγεθος των παρακείμενων κελιών τους στη συγκεκριμένη θέση.

- Μια επιφανειακή ζώνη μπορεί να μοιράζεται μια μη-σύμμορφη διεπιφάνεια μόνο με μία άλλη επιφανειακή ζώνη και όχι με περισσότερες.
- Για τη δημιουργία ενός ενιαίου πλέγματος με πολλαπλές ζώνες κελιών που χωρίζονται από ένα μη-σύμμορφο όριο, πρέπει κάθε ζώνη κελιών να έχει μια διακριτή επιφανειακή ζώνη στο μη-σύμμορφο όριο. Οι επιφανειακές ζώνες για δύο παρακείμενες ζώνες κελιών θα έχουν την ίδια θέση και μορφή, αλλά κάθε μια θα συνδέεται με την αντίστοιχη ζώνη.
- Όλες οι περιοδικές ζώνες πρέπει να είναι ορθά προσανατολισμένες (είτε περιστρεφόμενες ή μετατοπιζόμενες) πριν τη δημιουργία της μη-σύμμορφης διεπιφάνειας. Οι περιοδικές μη-σύμμορφες διεπιφάνειες πρέπει επακριβώς να επικαλύπτονται, δηλ. πρέπει να έχουν περιστραφεί ή μετατοπιστεί κατά το ίδιο απόσταση (γωνιακή ή γραμμική). Αυτό δεν ισχύει για διεπιφάνειες, όπου δημιουργείται μια ζώνη τοιχώματος για μη επικαλυπτόμενα πεδία.
- Για τρισδιάστατες περιπτώσεις, αν η διεπιφάνεια είναι περιοδική, μόνο ένα ζεύγος περιοδικών ορίων μπορεί να συνορεύει με τη διεπιφάνεια.

2.8 Έλεγχος του πλέγματος

Ο έλεγχος πλέγματος στο FLUENT παρέχει πληροφορίες για:

- όρια περιοχών,
- στατιστικές για τον όγκο των χρησιμοποιούμενων κελιών,
- την τοπολογία του πλέγματος και τις περιοδικές οριακές συνθήκες,
- την εξακρίβωση της θέσης των κόμβων σε σχέση με τον άξονα των x (για περιπτώσεις αξονοσυμμετρικών προβλημάτων).

3. Γενικά περί επίλυσης

Τα ρευστομηχανικά πεδία εκφράζονται στη γενικότητα τους από τις εξισώσεις Navier-Stokes ή, στην περίπτωση μη συνεκτικού ρευστού, από τις εξισώσεις Euler. Και στις δύο περιπτώσεις το πεδίο ροής εκφράζεται από ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων που είναι μη γραμμικές. Η μη γραμμικότητα των εξισώσεων αυτών οφείλεται στη χωρική επιτάχυνση του ρευστού και αποτελεί τη βασική αιτία της δυσκολίας επίλυσης τους. Παρά τις συνεχείς προσπάθειες των μαθηματικών για αναλυτικές λύσεις των εξισώσεων, οι εξισώσεις παραμένουν γενικά άλυτες εκτός από ορισμένες ειδικές περιπτώσεις απλών γεωμετριών πεδίων ροής.

Η συνεχής πρόοδος και ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ψηφιακών συστημάτων τις τελευταίες δεκαετίες, έχει συμβάλει σημαντικά στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων αυτών. Η βασική ιδέα της μεθοδολογίας αριθμητικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων είναι η αντικατάστασή τους με αλγεβρικές εξισώσεις οι οποίες όταν επιλυθούν με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή δίνουν αριθμητικά τις τιμές των ταχυτήτων ή άλλων χαρακτηριστικών μεγεθών σε διακριτές θέσεις μέσα στο πεδίο ροής.

Είναι φανερό ότι οι αλγεβρικές αυτές εξισώσεις πρέπει να εκφράζουν ικανοποιητικά τη μερική διαφορική εξίσωση ώστε η λύση τους να αντιπροσωπεύει με προσέγγιση, όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, τη λύση της διαφορικής εξίσωσης, δηλαδή η αντιπροσώπευσή της διαφορικής εξίσωσης από τις αλγεβρικές εξισώσεις να είναι όπως λέγεται *συνεπής*.

3.1 Επισκόπηση των αριθμητικών αλγορίθμων

Συγκεκριμένα στο FLUENT επιτρέπεται η επιλογή μιας εκ των δύο αριθμητικών μεθόδων:

- **μεμονωμένο επιλύτη** (segregated solver)
- **συζευγμένο επιλύτη** (coupled solver)

Στο FLUENT, με τη χρησιμοποίηση οποιασδήποτε μεθόδου, λύνονται οι κυρίαρχες ολοκληρωτικές εξισώσεις για τη διατήρηση της μάζας και της ορμής, και (όπου είναι απαραίτητο) οι εξισώσεις για την ενέργεια και για άλλα βαθμωτά μεγέθη όπως η τύρβη και τα χημικά είδη. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται μια διαδικασία αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος η οποία εκφράζει το φυσικό πρόβλημα που δύναται να τυποποιηθεί στα ακόλουθα βήματα:

- **Διακριτοποίηση Χώρου**

Χωρισμό του πεδίου σε διακριτούς όγκους ελέγχου με τη χρήση υπολογιστικού πλέγματος. Για ευκολία παρουσίασης της μεθοδολογίας, το πεδίο ροής και το αριθμητικό πλέγμα λαμβάνονται δισδιάστατα χωρίς όμως αυτό να μειώνει τη γενικότητα της μεθόδου.

- **Διακριτοποίηση Διαφορικών Εξισώσεων**

Ολοκλήρωση των κυρίαρχων εξισώσεων σε κάθε κόμβο του πλέγματος για δημιουργία αλγεβρικών εξισώσεων, καθώς και μετατροπή των αρχικών και οριακών συνθηκών τις διαφορικής εξίσωσης σε εκφράσεις πεπερασμένων διαφορών, για τις διακριτές εξαρτώμενες μεταβλητές. Τέτοιες άγνωστες ποσότητες είναι τα μεγέθη της ταχύτητας, πίεσης, θερμοκρασίας, και διατηρητικά βαθμωτά μεγέθη.

- **Αλγόριθμος Επίλυσης ή Μοντέλο Επίλυσης**

Γραμμικοποίηση των διακριτών εξισώσεων και λύση του γραμμικού συστήματος εξισώσεων που προκύπτει με σκοπό την παραγωγή ενημερωμένων τιμών των εξαρτώμενων μεταβλητών. Αυτή η μέθοδος επίλυσης υλοποιείται με τον αλγόριθμο ο οποίος είναι γραμμένος σε κάποια γλώσσα προγραμματισμού.

Οι δύο αριθμητικές μέθοδοι υιοθετούν μια παρόμοια διαδικασία διακριτοποίησης (πεπερασμένου όγκου), αλλά η προσέγγιση που χρησιμοποιείται για να γίνει το σύστημα γραμμικό και να λύσει τις διακριτές εξισώσεις είναι διαφορετική.

3.2 Γραμμικοποίηση: Πεπλεγμένη (Implicit) και Ρητή (Explicit) Διαμόρφωση

Και στις μεμονωμένες (*segregated*) και συζευγμένες (*coupled*) μεθόδους λύσης οι διακριτές, μη γραμμικές κυρίαρχες εξισώσεις μετατρέπονται σε γραμμικές με στόχο τη δημιουργία / παραγωγή ενός συστήματος εξισώσεων για τις εξαρτώμενες μεταβλητές σε κάθε υπολογιστικό κελί. Το επακόλουθο γραμμικό σύστημα λύνεται έπειτα για να παραγάγει μια ενημερωμένη λύση για το πεδίο της ροής.

Ο τρόπος με τον οποίο οι κυρίαρχες εξισώσεις γίνονται γραμμικές μπορεί να λάβει μια ρητή ή πεπλεγμένη μορφή σε σχέση με την εξαρτώμενη μεταβλητή (ή το σύνολο των μεταβλητών). Με τους όρους «πεπλεγμένη» και «ρητή» εννοούμε τα εξής:

- ‘πεπλεγμένη’ (implicit):

Για μια δεδομένη μεταβλητή, η άγνωστη τιμή σε κάθε κελί, υπολογίζεται με τη χρήση μιας σχέσης η οποία περιλαμβάνει τόσο τις υπάρχουσες όσο και τις άγνωστες τιμές από τα γειτονικά κελιά. Επομένως κάθε άγνωστη τιμή θα εμφανιστεί σε περισσότερες από μια εξισώσεις στο σύστημα, οι οποίες λύνονται ταυτόχρονα και με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται οι άγνωστες ποσότητες.

- ‘ρητή’ (explicit):

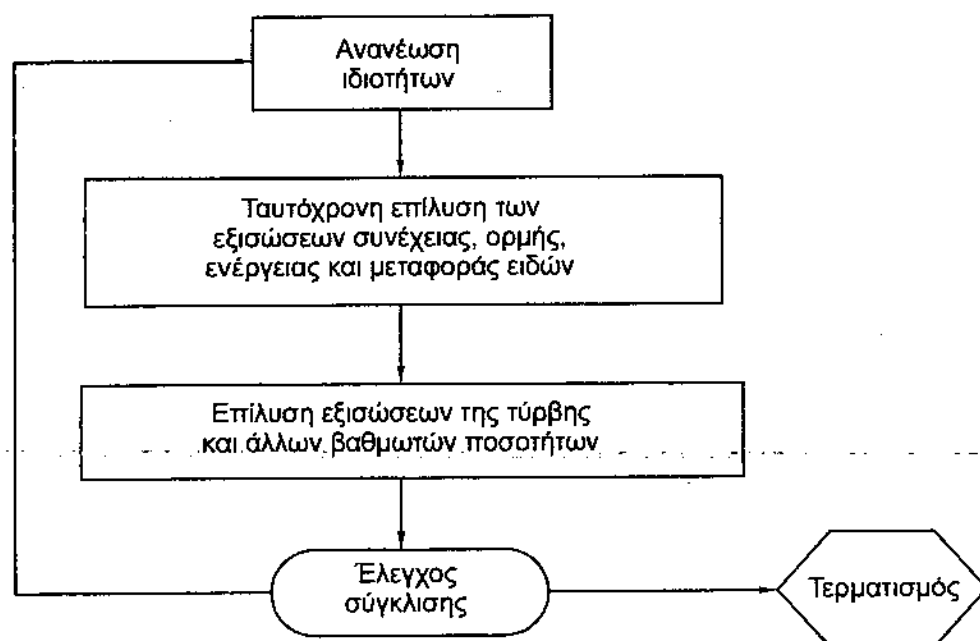
Αντίστοιχα για μια δεδομένη μεταβλητή, η άγνωστη αξία σε κάθε κελί υπολογίζεται με τη χρήση μιας σχέσης η οποία περιλαμβάνει μόνο τις υπάρχουσες τιμές. Επομένως κάθε άγνωστη τιμή θα εμφανιστεί μόνο σε μια εξίσωση στο σύστημα. Οι εξισώσεις αυτές δύναται να λυθούν μια κάθε φορά (ανά χρονικό βήμα) με αποτέλεσμα τον υπολογισμό των αγνώστων ποσοτήτων.

Στη μεμονωμένη (*segregated*) μέθοδο λύσης, κάθε διακριτή κυρίαρχη εξίσωση γραμμικοποιείται πεπλεγμένα σε σχέση με την εξαρτώμενη μεταβλητή της εξίσωσης. Η διαδικασία αυτή οδηγεί σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με μια εξίσωση για κάθε κελί στο πεδίο. Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχει μόνο μια εξίσωση για κάθε κελί το σύστημα, μερικές φορές, καλείται *βαθμωτό* (scalar system of equations). Η μέθοδος των Gauss-Seidel για την επίλυση γραμμικών συστημάτων χρησιμοποιείται από κοινού με μια αλγεβρική ‘πολυπλεγματική’ μέθοδο (AMG) για την επίλυση του

προκύπτοντος βαθμωτού συστήματος εξισώσεων για την εξαρτώμενη μεταβλητή σε κάθε κελί. Παραδείγματος χάριν, η εξίσωση της ορμής στον x άξονα, γραμμικοποιείται με σκοπό την παραγωγή ενός συστήματος εξισώσεων στο οποίο η συνιστώσα της ταχύτητας u είναι άγνωστη μεταβλητή. Η ταυτόχρονη λύση αυτού του συστήματος εξισώσεων (με χρησιμοποίηση του βαθμωτού επιλύτη AMG) παράγει το ενημερωμένο πεδίο της συνιστώσας της ταχύτητας, στον άξονα x , u .

Εν περιλήψει, η μεμονωμένη προσέγγιση λύνει για έναν ενιαίο μεταβλητό πεδίο (π.χ. πίεση p) με την εξέταση όλων των κελιών συγχρόνως. Έπειτα λύνεται το επόμενο πεδίο μεταβλητών λαμβάνοντας υπ'οψην όλα τα κελιά ταυτόχρονα κ.τ.λ. Για μεμονωμένο επιλύτη δεν είναι διαθέσιμη η επιλογή για τη ρητή επίλυση.

Στη συζευγμένη (coupled) μέθοδο λύσης υπάρχει μια μόνο επιλογή χρήσης είτε πεπλεγμένης είτε ρητής γραμμικοποίησης των κυρίαρχων εξισώσεων. Αυτή η επιλογή ισχύει μόνο για το συζευγμένο σύνολο των κυρίαρχων εξισώσεων. Οι κυρίαρχες εξισώσεις γραμμικοποιούνται για τα πρόσθετα βαθμωτά μεγέθη (scalars) που λύνονται μεμονωμένα από το συζευγμένο σύνολο, όπως για την τύρβη, την ακτινοβολία κ.λ.π., και λύνονται πεπλεγμένα με χρήση των ίδιων διαδικασιών όπως στη μεμονωμένη μέθοδο λύσης. Ανεξάρτητα από την επιλογή του πεπλεγμένου (implicit) ή ρητού (explicit) αλγορίθμου, η διαδικασία λύσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Επισκόπηση της συζευγμένης μεθόδου επίλυσης

Εάν επιλεγεί η πεπλεγμένη επιλογή (implicit option) από το συζευγμένο επιλύτη, κάθε εξίσωση στο συζευγμένο σύνολο κυρίαρχων εξισώσεων γραμμικοποιείται πεπλεγμένα σε σχέση με όλες τις εξαρτώμενες μεταβλητές στο σύνολο τους. Αυτό θα οδηγήσει σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με N εξισώσεις για κάθε κελί στο πεδίο, όπου N ο αριθμός των συζευγμένων εξισώσεων στο σύνολο. Στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχουν N εξισώσεις ανά κελί, το σύστημα αυτό καλείται 'ομαδικό σύστημα' των εξισώσεων. Ο επιλύτης γραμμικής εξίσωσης πεπλεγμένου σημείου (Gauss-Seidel) χρησιμοποιείται από κοινού με μια αλγεβρική πολυπλεγματική μέθοδο (AMG) για την επίλυση του επακόλουθου βαθμωτού συστήματος των εξισώσεων για όλες τις εξαρτώμενες μεταβλητές N σε κάθε κελί. Παραδείγματος χάριν, η γραμμικοποίηση των εξισώσεων της συνέχειας, της ορμής στους άξονες x -, y -, z - και της ενέργειας θα παραγάγουν ένα σύστημα εξισώσεων στο οποίο το p , το u , το v , το w και το T είναι τα άγνωστα μεγέθη. Η ταυτόχρονη λύση αυτού του συστήματος εξισώσεων (που χρησιμοποιεί τον επιλύτη AMG) παράγει αμέσως ενημερωμένα πεδία πίεσης, συνιστωσών της ταχύτητας u -, v -, w - και θερμοκρασίας.

Εν περιλήψει, η συζευγμένη πεπλεγμένη (coupled implicit) προσέγγιση δίνει λύση για όλες τις μεταβλητές (p, u, v, w, T) σε όλα τα κελιά συγχρόνως.

Με την ρητή επιλογή (explicit option) συζευγμένου επιλύτη, κάθε εξίσωση στο συζευγμένο σύνολο κυρίαρχων εξισώσεων γίνεται γραμμικά ρητή. Αντίστοιχα στην πεπλεγμένη επιλογή (implicit option), προκύπτει ένα σύστημα εξισώσεων με N εξισώσεις για κάθε κελί στο πεδίο. Επιπλέον, όλες οι εξαρτώμενες μεταβλητές στο σύνολο θα ενημερωθούν άμεσα. Ωστόσο, αυτό το σύστημα των εξισώσεων είναι ρητό για τις άγνωστες εξαρτώμενες μεταβλητές. Παραδείγματος χάριν, η εξίσωση της συνιστώσας της ορμής στον x -άξονα γράφεται με τέτοιο τρόπο ώστε η ενημερωμένη συνιστώσα της ταχύτητας στον άξονα x να είναι μια συνάρτηση των γνωστών τιμών των μεταβλητών του πεδίου. Λόγω αυτού, δεν απαιτείται ο γραμμικός επιλύτης των εξισώσεων. Αντ' αυτού, η λύση ενημερώνεται χρησιμοποιώντας τον επιλύτη πολλαπλών βημάτων (Runge-Kutta). Τότε διατίθεται η πρόσθετη επιλογή του πολυπλεγματικού αλγορίθμου (FAS) ώστε να επιταχυνθεί ο επιλύτης πολλαπλών βημάτων.

Εν περιλήψει, η συζευγμένη ρητή προσέγγιση επιλύει για όλες τις μεταβλητές (p, u, v, w, T) ένα κελί τη φορά.

3.2.1 Χρονική διακριτοποίηση

Για χρονικά μεταβαλλόμενες προσομοιώσεις, οι κυρίαρχες εξισώσεις πρέπει να διακριτοποιούνται τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Η χωρική διακριτοποίηση (*Spatial Discretization*) για τις χρονικά εξαρτώμενες εξισώσεις είναι ίδια με την περίπτωση της μόνιμης κατάστασης. Η χρονική διακριτοποίηση περιλαμβάνει την ενσωμάτωση κάθε όρου στις διαφορικές εξισώσεις σε κάθε χρονικό βήμα Δt . Η ολοκλήρωση των παροδικών όρων είναι απλή, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

Μια γενική έκφραση για τη χρονική εξέλιξη μιας μεταβλητής ϕ είναι:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (3.2.1.1)$$

όπου η συνάρτηση F περιγράφει μια οποιαδήποτε χωρική διακριτοποίηση. Αν η χρονική παράγωγος διακριτοποιείται με τη χρήση 'οπίσθιων διαφορών' (*backward differences*), η χρονική διακριτοποίηση 1^{ου} βαθμού δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi) \quad (3.2.1.2)$$

ενώ η διακριτοποίηση 2^{ης} τάξης από τη σχέση:

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi) \quad (3.2.1.3)$$

όπου ϕ ένα βαθμωτό μέγεθος

$n + 1$ η τιμή στο επόμενο χρονικό βήμα, $t + \Delta t$

n η τιμή στο χρονικό σημείο t

$n - 1$ η τιμή στο προηγούμενο χρονικό σημείο, $t - \Delta t$

Όταν η χρονική παράγωγος διακριτοποιηθεί, προκύπτει μια επιλογή για την αποτίμηση του $F(\phi)$.

3.2.1.1 Πεπλεγμένη χρονική ολοκλήρωση

Μία μέθοδος είναι η αποτίμηση της $F(\phi)$ στο επόμενο χρονικό σημείο:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi^{n+1}) \quad (3.2.1.1)$$

Η μέθοδος αυτή αναφέρεται ως 'πεπλεγμένη' ολοκλήρωση αφού το μέγεθος ϕ^{n+1} σε ένα δεδομένο κελί συσχετίζεται με το μέγεθος ϕ^{n+1} στα γειτονικά κελιά σύμφωνα με την παραπάνω έκφραση της $F(\phi^{n+1})$:

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^{n+1}) \quad (3.2.1.2)$$

Η παραπάνω πεπλεγμένη εξίσωση μπορεί να λυθεί επαναληπτικά με αρχικοποίηση του μεγέθους ϕ^i σε ϕ^n με χρήση μιας επαναληπτικής μέθοδο για την εξίσωση:

$$\phi^i = \phi^n + \Delta t F(\phi^i) \quad (3.2.1.3)$$

για την 1^{ης} τάξης πεπλεγμένη διατύπωση,

ή

$$\phi^i = \frac{4}{3}\phi^n - \frac{1}{3}\phi^{n-1} + \frac{2}{3}\Delta t F(\phi^i) \quad (3.2.1.4)$$

για τη 2^{ης} τάξης πεπλεγμένη διατύπωση, μέχρι τη σταθεροποίηση της ποσότητας ϕ^i (σύγκλιση). Στο δεδομένο σημείο η ποσότητα ϕ^{n+1} γίνεται ϕ^i .

Το πλεονέκτημα του πλήρως πεπλεγμένου (*implicit scheme*) αλγορίθμου είναι η **σταθερότητα** όσον αφορά το μέγεθος του χρονικού βήματος ανεξάρτητα τις οποιοσδήποτε συνθήκες.

3.2.1.2 Ρητή χρονική ολοκλήρωση

Μια δεύτερη μέθοδος η οποία διατίθεται όταν χρησιμοποιείται συζευγμένος ρητός (coupled explicit) επιλύτης. Αυτή η μέθοδος αποτιμεί την συνάρτηση $F(\phi)$ για μια δεδομένη χρονική στιγμή:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi^n) \quad (3.2.1.2.1)$$

Και αναφέρεται ως ρητή ολοκλήρωση αφού η ποσότητα ϕ^{n+1} μπορεί να εκφραστεί ρητά σε όρους των γνωστών τιμών λύσης, ϕ^n :

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t F(\phi^n) \quad (3.2.1.2.2)$$

Αυτή η μέθοδος αναφέρεται και ως μέθοδος 'καθολικού χρονικού βήματος' (global time stepping).

Εδώ, το χρονικό βήμα Δt είναι περιορισμένο από το όριο σταθερότητας του χρησιμοποιούμενου επιλύτη (δηλ., ένα χρονικό βήμα που αντιστοιχεί σε έναν αριθμό Courant περίπου 1). Προκειμένου η επίλυση να είναι χρονικά ακριβής, για όλα τα κελιά στο πεδίο πρέπει απαραίτητα να χρησιμοποιείται το ίδιο χρονικό βήμα. Για τη σταθερότητα, αυτό το χρονικό βήμα πρέπει να είναι το μικρότερο όλων των τοπικών χρονικών βημάτων στο πεδίο.

Η χρήση του χρονικά μεταβαλλόμενου ρητού αλγόριθμου είναι αρκετά περιορισμένη. Χρησιμοποιείται πρώτιστα για να συλλάβει την παροδική συμπεριφορά της κίνησης των κυμάτων, όπως τα κρουστικά κύματα, επειδή είναι περισσότερο ακριβείς και με μικρότερο υπολογιστικό κόστος σε σχέση με τις πεπλεγμένες χρονικά μεταβαλλόμενες μεθόδους. Η χρονικά μεταβαλλόμενη ρητή μέθοδος δεν χρησιμοποιείται στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Σε υπολογισμούς με μεμονωμένο ή συζευγμένο πεπλεγμένο επιλύτη. Η χρονικά μεταβαλλόμενη ρητή μέθοδος διατίθεται μόνο με τον συζευγμένο ρητό επιλύτη.

- Σε ασυμπίεστες ροές. Η χρονικά μεταβαλλόμενη ρητή μέθοδος επίλυσης δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει τις χρονικά ακριβείς ασυμπίεστες ροές (δηλ., νόμους αερίων εκτός απ' των ιδανικών αερίων). Οι ασυμπίεστες λύσεις προκύπτουν επαναληπτικά μετά από σύγκλιση για κάθε χρονικό βήμα.
- Επιτάχυνση σύγκλισης. Ο πολυπλεγματικός αλγόριθμος FAS και η ομαλοποίηση των υπολειμμάτων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη χρονικά μεταβαλλόμενη ρητή μέθοδος διότι αλλοιώνει την χρονική ακρίβεια του χρησιμοποιούμενου επιλύτη.

3.3 Αλγόριθμοι Παρεμβολής Πίεσης

Ο αλγόριθμος προεπιλογής (*default*) στο FLUENT παρεμβάλλει τις τιμές της πίεσης στις επιφάνειες με τη χρήση των συντελεστών εξίσωσης της ορμής. Αυτή η διαδικασία είναι αποτελεσματική εφ' όσον η μεταβολή της πίεσης (*pressure variation*) μεταξύ των κέντρων βάρους των κελιών είναι ομαλή. Όταν υπάρχουν μεγάλες κλίσεις στους πηγαίους όρους της ορμής μεταξύ των όγκων ελέγχου, η κατανομή της πίεσης έχει μια υψηλή κλίση στην επιφάνεια του κελιού και η παρεμβολή είναι αδύνατη με τη χρήση αυτού του αλγόριθμου. Κατά την χρησιμοποίηση αυτού του αλγόριθμου, η ανωμαλία παρουσιάζεται με τη μορφή μικρομεταβολών στην ταχύτητα των κελιών.

Οι ροές για τις οποίες ο προεπιλεγμένος αλγόριθμος παρεμβολής πίεσης δύναται να παρουσιάσει προβλήματα είναι οι ροές που διακρίνονται από μεγάλες καθολικές δυνάμεις, όπως σε ισχυρά περιδινιζόμενες ροές, σε ανωστικές ροές με υψηλό αριθμό Rayleigh κ.τ.λ. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητη η βελτίωση του πλέγματος στις περιοχές με υψηλή κλίση για την ικανοποιητική επίλυση της μεταβολής της πίεσης.

Μια άλλη πηγή λάθους κατά τη χρήση του FLUENT, προκύπτει στη περίπτωση κατά την οποία η κλίση της πίεσης στην επιφάνεια του τοιχώματος είναι μηδέν. Η παραπάνω πρόταση ισχύει για τα οριακά στρώματα δεδομένου της απουσίας καθολικών δυνάμεων ή παρουσίας κυρτότητας. Η αποτυχία ικανοποιητικού υπολογισμού της κλίσης της πίεσης στην επιφάνεια του τοιχώματος παρουσιάζεται όταν το διάνυσμα της ταχύτητας είναι κάθετο στο τοίχωμα.

Για περιπτώσεις που δεν ισχύει η προεπιλεγμένη μέθοδος για την παρεμβολή της πίεσης, διατίθενται διάφορες εναλλακτικές μέθοδοι:

- Ο γραμμικός αλγόριθμος, ο οποίος υπολογίζει την επιφανειακή πίεση λαμβάνοντας το μέσο όρο των τιμών της πίεσης στα παρακείμενα κελιά.
- Ο αλγόριθμος 2^{nd} τάξης, σύμφωνα με τον οποίο η επιφανειακή πίεση προκύπτει με ανάλογο τρόπο με αυτόν που χρησιμοποιείται για τους 2^{nd} ακρίβειας όρους μεταφοράς. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρέχει βελτίωση σε αντίθεση με τους προεπιλεγμένους και γραμμικούς αλγόριθμους, αν και μπορεί να παρουσιάσει και κάποιο πρόβλημα εάν χρησιμοποιείται κατά την έναρξη ενός υπολογισμού ή με την ύπαρξη ενός σχετικά αραιού πλέγματος. Ωστόσο, ο αλγόριθμος 2^{nd} τάξης δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί για ροές με ασυνεχείς κλίσεις πίεσης που ενδεχομένως προέρχονται είτε από την παρουσία ενός πορώδους μέσου στο πεδίο είτε από χρήση του μοντέλου VOF ή του μοντέλου μίξης για πολυφασική ροή.
- Ο αλγόριθμος *body-force-weighted* (μέσω του οποίου η τιμή υπολογίζεται κατ' όγκο βεβαρημένα) υπολογίζει την επιφανειακή πίεση με την υπόθεση ότι η κάθετη κλίση της διαφοράς μεταξύ της πίεσης και των καθολικών δυνάμεων είναι σταθερή. Η χρήση του ενδείκνυται εφόσον οι καθολικές δυνάμεις στις εξισώσεις της ορμής είναι γνωστές εκ των προτέρων (π.χ., πλευστότητα και αξοσυμμετρικοί υπολογισμοί δίνης).
- Ο αλγόριθμος **PRESTO!** (**PRE**ssure **ST**agging **O**ption) ο οποίος χρησιμοποιεί το διακριτό ισοζύγιο μάζας για ένα 'επικαλυπτόμενο' όγκο ελέγχου ο οποίος περικλείει την επιφάνεια έτσι ώστε να υπολογιστεί η πίεση. Αυτή η διαδικασία είναι στο πνεύμα του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται σε επικαλυπτόμενα πλέγματα σε δομημένη μορφή. Αξιοσημείωτο είναι ότι στα τριγωνικά και τετραεδρικά πλέγματα, σημαντική ακρίβεια επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας παρόμοιο αλγόριθμο.

3.3.1 Επιλογή του αλγορίθμου παρεμβολής της πίεσης

Όπως προαναφέρθηκε ανωτέρω, διάφοροι αλγόριθμοι παρεμβολής πίεσης είναι διαθέσιμοι κατά τη χρήση του μεμονωμένου επιλύτη στο FLUENT. Για τις περισσότερες των περιπτώσεων ο προεπιλεγμένος αλγόριθμος είναι αποδεκτός, αλλά

για μερικούς τύπους προβλημάτων ίσως χρειαστεί η επιλογή άλλων αλγορίθμων παρεμβολής της πίεσης:

- Σε προβλήματα που περιλαμβάνουν μεγάλες καθολικές δυνάμεις, συστήνεται ο αλγόριθμος *body-force-weighted*.
- Σε ροές με υψηλούς αριθμούς περιδίνησης, ανωστικές ροές υψηλού αριθμού Rayleigh, υψηλής ταχύτητας περιστρεφόμενες ροές, ροές που περιλαμβάνουν πορώδη μέσα και για ροές σε έντονα κυρτά πεδία, συστήνεται ο αλγόριθμος **PRESTO!**
- Σε συμπίεστες ροές, συστήνεται αντίστοιχα ο αλγόριθμος 2^{ης} τάξης.
- Στην περίπτωση κατά την οποία κανένας από τους άλλους αλγόριθμους δεν ισχύει, συστήνεται ο αλγόριθμος 2^{ης} τάξης για βελτιωμένη ακρίβεια.

3.4 Επιλογή της μεθόδου σύζευξης πίεσης - ταχύτητας

Στο FLUENT διατίθενται τρεις μέθοδοι σύζευξης πίεσης – ταχύτητας στο μεμονωμένο επιλύτη και είναι οι εξής:

- **SIMPLE**,
- **SIMPLEC** και
- **PISO**.

Για μόνιμους υπολογισμούς (*steady-state*) χρησιμοποιούνται κυρίως οι μέθοδοι **SIMPLE** ή **SIMPLEC**, ενώ η μέθοδος **PISO** συστήνεται για χρονικά μεταβαλλόμενους (*transient*). Η μέθοδος **PISO** επίσης μπορεί να είναι χρήσιμη και για μόνιμους αλλά και για χρονικά μεταβαλλόμενους υπολογισμούς σε πλέγματα υψηλής εκτροπής (*on highly skewed meshes*).

3.4.1 SIMPLE και SIMPLEC

Στο FLUENT, διατίθενται ο αλγόριθμος **SIMPLE** καθώς και ο αλγόριθμος **SIMPLEC** (**SIMPLE - Consistent**). Ο αλγόριθμος **SIMPLE** είναι η προεπιλογή, αλλά σε πολλά προβλήματα χρησιμεύει ο αλγόριθμος **SIMPLEC**, ιδιαίτερα λόγω της δυνατότητας αύξησης της υπό-χαλάρωσης και συνεπώς επιτάχυνσης της διαδικασίας σύγκλισης.

Για σχετικά απλά προβλήματα (όπως γραμμικές ροές χωρίς πρόσθετα ενεργοποιημένα μοντέλα) στα οποία η σύγκλιση περιορίζεται από τη σύζευξη της πίεσης και της ταχύτητας, η λύση συγκλίνει γρηγορότερα με τη χρήση της μεθόδου SIMPLEC. Γενικά στη μέθοδο SIMPLEC, ο συντελεστής υπό-χαλάρωσης για τη διόρθωση της πίεσης ισούται με 1, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η επιτάχυνση της σύγκλισης. Ωστόσο σε μερικά προβλήματα, η τιμή του παραπάνω συντελεστή (ο οποίος ισούται με 1) μπορεί να προκαλέσει αστάθεια. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι απαραίτητη η χρήση είτε μιας πιο συντηρητικής τιμής του συντελεστή υπο-χαλάρωσης (μικρότερη του 1) είτε η χρήση του αλγόριθμου SIMPLE. Για σχετικά περίπλοκες ροές που εμπεριέχουν τύρβη ή πρόσθετα φυσικά μοντέλα, με τη μέθοδο SIMPLEC, η σύγκλιση βελτιώνεται όταν ο μόνος περιοριστικός παράγοντας είναι η σύζευξη της πίεσης και της ταχύτητας. Σε αυτήν την περίπτωση, οι μέθοδοι SIMPLE και SIMPLEC δίνουν παρόμοιο βαθμό σύγκλισης.

3.4.2 PISO

Ο αλγόριθμος PISO με διόρθωση με συνεκτίμηση του πεδίου ταχυτήτων στα γειτνιάζοντα κελιά (*neighbor correction*) συστήνεται ιδιαίτερα για όλους τους υπολογισμούς χρονικά μεταβαλλόμενης ροής, ιδιαίτερα στην περίπτωση μεγάλου χρονικού βήματος. (Στα προβλήματα που χρησιμοποιείται το τυρβώδες μοντέλο LES, στο οποίο τα χρονικά βήματα είναι μικρά, με την ταυτόχρονη χρήση της μεθόδου PISO υπεισέρχεται αυξανόμενο υπολογιστικό κόστος. Στην περίπτωση αυτή συστήνεται μια από τις δύο μεθόδους SIMPLE ή SIMPLEC). Με τη μέθοδο PISO διατηρείται σταθερός ο υπολογισμός για ένα μεγαλύτερο χρονικό βήμα με συντελεστή υπό-χαλάρωσης ίσο με 1.0 τόσο για την ορμή όσο και για την πίεση. Για μόνιμα προβλήματα, η μέθοδος PISO με διόρθωση με συνεκτίμηση του πεδίου ταχυτήτων στα γειτνιάζοντα κελιά δεν παρέχει σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις μεθόδους SIMPLE ή SIMPLEC με ιδανικούς συντελεστές υπό-χαλάρωσης.

Η μέθοδος PISO με διόρθωση της επίδρασης κυρτότητας (*skewness correction*) συστήνεται και για μόνιμους αλλά και για χρονικά μεταβαλλόμενους υπολογισμούς σε πλέγματα με υψηλό βαθμό παραμόρφωσης.

Κατά τη χρήση της μεθόδου PISO με διόρθωση με συνεκτίμηση του πεδίου ταχυτήτων στα γειτνιάζοντα κελιά, προτείνεται όλοι οι συντελεστές υπο-χαλάρωσης να ισούνται

με 1 (ή περίπου 1) για όλες τις εξισώσεις. Κατά τη χρήση της μεθόδου PISO με διόρθωση της επίδρασης της κυρτότητας για ισχυρά παραμορφωμένα πλέγματα, πρέπει το άθροισμα των συντελεστών υπό-χαλάρωσης για την ορμή και για την πίεση να είναι ίσο με 1 (π.χ., 0.3 για την πίεση και 0.7 για την ορμή). Κατά την περίπτωση της δυνατότητας χρήσης και των δύο μεθόδων PISO, συστήνεται η εφαρμογή της μεθόδου PISO με διόρθωση με συνεκτίμηση του πεδίου ταχυτήτων στα γειτνιάζοντα κελιά.

3.5 Σύζευξη πίεσης - ταχύτητας

Η σύζευξη πίεσης-ταχύτητας επιτυγχάνεται με τη χρήση της εξίσωσης:

$$J_f = \hat{J}_f + d_f(p_{c0} - p_{c1}) \quad (3.5.1)$$

για την εξαγωγή μιας εξίσωσης για την πίεση από τη διακριτοποιημένη εξίσωση της συνέχειας:

$$\sum_f^{N_{faces}} J_f A_f = 0 \quad (3.5.2)$$

Στο FLUENT διατίθεται η επιλογή ανάμεσα σε τρεις αλγορίθμους σύζευξης πίεσης-ταχύτητας, όπως προαναφέρθηκε παραπάνω:

- SIMPLE,
- SIMPLEC και
- PISO.

3.5.1 SIMPLE

Ο αλγόριθμος SIMPLE χρησιμοποιεί μια σχέση μεταξύ των διορθώσεων της ταχύτητας και της πίεσης για την επιβολή της διατήρησης της μάζας και για τη λήψη του πεδίου της πίεσης.

Αν η εξίσωση της ορμής λύνεται με ένα υποθετικό πεδίο της πίεσης p^* , η προκύπτουσα επιφανειακή ροή, J_f^* , που υπολογίζεται από την εξίσωση (3.5.1):

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f(p_{c0}^* - p_{c1}^*) \quad (3.5.1.1)$$

δεν ικανοποιεί την εξίσωση της συνέχειας. Συνεπώς, μια διόρθωση J'_f προστίθεται στην επιφανειακή παροχή J_f^* ώστε η διορθωμένη επιφανειακή παροχή, J_f :

$$J_f = J_f^* + J'_f \quad (3.5.1.2)$$

να ικανοποιεί την εξίσωση της συνέχειας. Στον αλγόριθμο SIMPLE, η διόρθωση J'_f γράφεται:

$$J'_f = d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.5.1.3)$$

όπου p' είναι η διόρθωση της πίεσης στο κελί.

Ο αλγόριθμος SIMPLE αντικαθιστά τις εξισώσεις διορθώσεων της ροής (3.5.1.2) και (3.5.1.3) στη διακριτοποιημένη εξίσωση της συνέχειας (3.5.2) για να προκύψει μια διακριτοποιημένη εξίσωση για τη διόρθωση της πίεσης p' στο κελί:

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad (3.5.1.4)$$

όπου ο πηγαίος όρος b είναι το καθαρό ποσοστό εισροής στο κελί:

$$b = \sum_f^{N_{\text{faces}}} J_f^* A_f \quad (3.5.1.5)$$

Η εξίσωση διόρθωσης της πίεσης (3.5.1.4) μπορεί να λυθεί με τη χρήση αλγεβρικής πολυπλεγματικής μεθόδου (AMG). Μόλις ληφθεί μια λύση, η πίεση στα κελιά και η επιφανειακή παροχή διορθώνονται με χρήση των σχέσεων:

$$p = p^* + a_p p' \quad (3.5.1.6)$$

$$J_f = d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.5.1.7)$$

Εδώ η ποσότητα a_p είναι ο συντελεστής υπό-χαλάρωσης για την πίεση. Η διορθωμένη επιφανειακή ροή, J_f , ικανοποιεί τη διακριτοποιημένη εξίσωση της συνέχειας σε κάθε επανάληψη κατ' όμοιο τρόπο.

3.5.2 SIMPLEC

Γενικά διάφορες παραλλαγές του βασικού αλγορίθμου SIMPLE είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Εκτός από τον αλγόριθμο SIMPLE, στο FLUENT παρέχεται ο αλγόριθμος **SIMPLEC** (**SIMPLE-Consistent**). Ο αλγόριθμος SIMPLE είναι η προεπιλογή, αλλά πολλά προβλήματα αντιμετωπίζονται με τη χρήση του SIMPLEC.

Η διαδικασία **SIMPLEC** είναι παρόμοια με τη διαδικασία SIMPLE που περιγράφεται ανωτέρω. Η μόνη διαφορά βρίσκεται στην έκφραση για τη διόρθωση της επιφανειακής ροής, J'_f . Όπως στον αλγόριθμο SIMPLE, η εξίσωση διόρθωσης μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$J_f = J'_f + d_f (p'_{c0} - p'_{c1}) \quad (3.5.2.1)$$

Εντούτοις, ο συντελεστής d_f επαναπροσδιορίζεται ως συνάρτηση της ποσότητας $\left(a_p - \sum_{nb} a_{nb} \right)$. Η χρήση αυτής της τροποποιημένης εξίσωσης διόρθωσης έχει αποδειχθεί ότι επιταχύνει τη σύγκλιση σε προβλήματα όπου η σύζευξη πίεσης-ταχύτητας είναι ο κύριος αποτρεπτικός παράγοντας στη λήψη μιας λύσης.

3.5.3 PISO

Ο αλγόριθμος σύζευξης πίεσης-ταχύτητας **PISO** (**Pressure-Implicit with Splitting of Operators**), μέρος του συνόλου των αλγορίθμων SIMPLE, είναι βασισμένος στον υψηλότερο βαθμό της κατά προσέγγιση σχέσης η οποία συνδέει τις διορθώσεις της πίεσης και της ταχύτητας. Ένας από τους περιορισμούς των αλγορίθμων SIMPLE και

SIMPLEC είναι ότι οι νέες ταχύτητες και οι αντίστοιχες νέες ροές δεν ικανοποιούν το ισοζύγιο της ορμής μετά τη λύση της εξίσωσης διόρθωσης της πίεσης. Κατά συνέπεια, ο υπολογισμός πρέπει να επαναληφθεί μέχρι να αποκατασταθεί η ισορροπία. Για την βελτίωση της αποδοτικότητας αυτού του υπολογισμού, ο αλγόριθμος PISO εκτελεί δύο πρόσθετες διορθώσεις (όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.4.2): τη **διόρθωση με συνεκτίμηση του πεδίου ταχυτήτων στα γειτνιάζοντα κελιά** και τη **διόρθωση της επίδρασης της κυρτότητας** (*neighbor correction* και *skewness correction*).

3.5.3.1 Διόρθωση με συνεκτίμηση του πεδίου ταχυτήτων στα γειτνιάζοντα κελιά

Η κύρια λειτουργία του αλγορίθμου PISO είναι να αφαιρεθούν οι επαναλαμβανόμενοι υπολογισμοί που απαιτούνται από τους αλγορίθμους SIMPLE και SIMPLEC μέσα στο πλαίσιο λύσης της εξίσωσης διόρθωσης πίεσης. Μετά από μια ή περισσότερες επαναλήψεις κατά τη χρήση του PISO, οι διορθωμένες ταχύτητες ικανοποιούν τις εξισώσεις συνέχειας και ορμής με μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία καλείται **διόρθωση ορμής ή διόρθωση με συνεκτίμηση του πεδίου ταχυτήτων στα γειτνιάζοντα κελιά**. Ο αλγόριθμος PISO παίρνει λίγο περισσότερο υπολογιστικό χρόνο ανά επανάληψη, αλλά μπορεί να μειώσει εντυπωσιακά τον αριθμό επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση, ιδιαίτερα για τα χρονικά μεταβαλλόμενα προβλήματα.

3.5.3.2 Διόρθωση της επίδρασης της κυρτότητας

Για τα πλέγματα που παρουσιάζουν εκτροπής σε κάποιο βαθμό, η κατά προσέγγιση σχέση μεταξύ της διόρθωσης της μαζικής ροής στην επιφάνεια των κελιών και η διαφορά των διορθώσεων πίεσης στα παρακείμενα κελιά είναι πολύ έντονες. Δεδομένου ότι οι συνιστώσες της κλίσης για τη διόρθωση της πίεσης κατά μήκος των επιφανειών των κελιών δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων, είναι επιθυμητή μια επαναληπτική διαδικασία παρόμοια με τη διόρθωση με συνεκτίμηση του πεδίου ταχυτήτων στα γειτνιάζοντα κελιά PISO. Μετά από την αρχική λύση της εξίσωσης για τη διόρθωση της πίεσης, η κλίση της διόρθωσης της πίεσης υπολογίζεται εκ νέου και χρησιμοποιείται για να ενημερώσει τις διορθώσεις της μαζικής ροής. Αυτή η διαδικασία, που αναφέρεται ως **διόρθωση της επίδρασης της κυρτότητας**, μειώνει σημαντικά τις δυσκολίες σύγκλισης που συνδέονται με τα ιδιαίτερα παραμορφωμένα πλέγματα. Η διόρθωση της επίδρασης της κυρτότητας με τον αλγόριθμο PISO

επιτρέπει στο FLUENT να επιτύχει μια λύση σε ένα ιδιαίτερα κυρτό πλέγμα με τον ίδιο αριθμό επαναλήψεων που απαιτούνται για ένα σχετικά ορθογώνιο πλέγμα.

3.6 Διακριτοποίηση

Στο FLUENT χρησιμοποιείται μια τεχνική που βασίζεται σε όγκους ελέγχου για την μετατροπή των βασικών εξισώσεων σε αλγεβρικές οι οποίες μπορούν να λυθούν αριθμητικά. Αυτή η τεχνική στηρίζεται στην ολοκλήρωση των βασικών εξισώσεων σε κάθε όγκο ελέγχου και έτσι παράγονται διακριτοποιημένες εξισώσεις για τη διατήρηση κάθε ποσότητας στον όγκο ελέγχου.

Η διακριτοποίηση των κυρίαρχων εξισώσεων μπορεί να κατανοηθεί ευκολότερα συνυπολογίζοντας τη μόνιμη εξίσωση σε συντηρητική για τη μεταφορά μιας βαθμωτής ποσότητας ϕ . Αυτό δείχνεται στην ακόλουθη εξίσωση που είναι γραμμένη σε ολοκληρωτική μορφή για έναν αυθαίρετο όγκο ελέγχου V :

$$\oint \rho \phi \vec{u} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (3.6.1)$$

όπου ρ η πυκνότητα

\vec{u} το διάνυσμα της ταχύτητας (= $u\hat{i} + v\hat{j}$ σε 2D)

\vec{A} το επιφανειακό διάνυσμα

Γ_{ϕ} ο συντελεστής διάχυσης για το ϕ

$\nabla \phi$ η κλίση του ϕ (= $\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)\hat{i} + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)\hat{j}$ σε 2D)

S_{ϕ} ο πηγαίος όρος του ϕ ανά μονάδα όγκου

Η εξίσωση (3.6.1) εφαρμόζεται σε κάθε όγκο ελέγχου, ή σε κάθε κελί, στο υπολογιστικό πεδίο. Το δισδιάστατο, τριγωνικό κελί που παρουσιάζεται στο σχήμα

1.4.1 είναι ένα παράδειγμα ενός τέτοιου όγκου ελέγχου. Η διακριτοποίηση της εξίσωσης (3.6.1) σε ένα δεδομένο κελί παράγει:

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho_f \bar{u}_f \phi_f \cdot \bar{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi (\nabla \phi)_n \cdot \bar{A}_f + S_\phi V \quad (3.6.2)$$

όπου N_{faces} ο αριθμός επιφανειών που περιβάλλουν το κελί

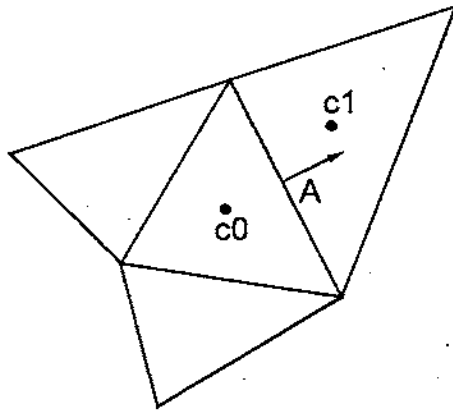
ϕ_f η τιμή του ϕ η οποία συνάγεται διαμέσου της επιφάνειας f

$\rho_f \bar{u}_f \cdot \bar{A}_f$ η μαζική παροχή διαμέσου της επιφάνειας

\bar{A}_f το μέτρο της επιφάνειας f , $|A| (= |A_x \hat{i} + A_y \hat{j}|$ σε 2D)

$(\nabla \phi)_n$ το μέτρο της κλίσης του ϕ , $\nabla \phi$ κάθετα στην επιφάνεια f

Οι εξισώσεις που λύνονται στο FLUENT παίρνουν την ίδια γενική μορφή με αυτήν που δίνεται ανωτέρω και ισχύουν για τα πολυδιάστατα, μη δομημένα πλέγματα που αποτελούνται από αυθαίρετα πολύεδρα.



Σχήμα 3.2: Όγκος ελέγχου που χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση μιας βαθμωτής εξίσωσης μεταφοράς

3.6.1 Διακριτοποίηση της εξίσωσης της ορμής

Ο αλγόριθμος διακριτοποίησης για την εξίσωση μεταφοράς ενός βαθμωτού χρησιμοποιείται επίσης για την διακριτοποίηση των εξισώσεων της ορμής. Για παράδειγμα, η εξίσωση της ορμής στον άξονα x λαμβάνεται θέτοντας $\phi = u$:

$$a_p u = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A_f \hat{i} + S \quad (3.6.1.1)$$

Αν το πεδίο της πίεσης και οι επιφανειακές μαζικές παροχές είναι γνωστές, η εξίσωση (3.6.1.1) μπορεί να λυθεί με τον τρόπο που περιγράφηκε στην ενότητα 3.6, και να ληφθεί το πεδίο ταχύτητας. Εντούτοις, το πεδίο της πίεσης και οι επιφανειακές μαζικές παροχές δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων και λαμβάνονται ταυτόχρονα ως ένα μέρος της λύσης. Υπάρχουν σημαντικά ζητήματα που απαιτούν εξέταση όσον αφορά την αποθήκευση της πίεσης και τη διακριτοποίηση του όρου της κλίσης της πίεσης, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

Στο FLUENT χρησιμοποιείται ένας ‘συνδυασμένος’ (co-located) αλγόριθμος, όπου και η πίεση και η ταχύτητα αποθηκεύονται στα κέντρα των κελιών. Ωστόσο, η εξίσωση (3.6.1.1) απαιτεί μια τιμή για την πίεση στην επιφάνεια μεταξύ των κελιών $c0$ και $c1$, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2. Επομένως, απαιτείται η χρήση ενός αλγόριθμου παρεμβολής για τον υπολογισμό των επιφανειακών τιμών της πίεσης από τις τιμές των κελιών.

3.6.2 Διακριτοποίηση της εξίσωσης της συνέχειας

Με την ολοκλήρωση της εξίσωσης $\oint \rho \vec{u} \cdot d\vec{A} = 0$ (3.6.2.1) για τον όγκο ελέγχου στο σχήμα 3.2, προκύπτει η ακόλουθη διακριτοποιημένη εξίσωση:

$$\sum_f^{N_{faces}} J_f A_f = 0 \quad (3.6.2.2)$$

όπου J_f είναι η μαζική ροή μέσω της επιφάνειας f , ρu_n .

Όπως περιγράφεται παραπάνω (στην ενότητα 3.1), η ορμή και οι εξισώσεις της συνέχειας επιλύονται διαδοχικά. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, η εξίσωση της συνέχειας χρησιμοποιείται ως μια εξίσωση για τον προσδιορισμό της πίεσης. Εντούτοις, η πίεση δεν εμφανίζεται ρητά στην εξίσωση (3.6.2.2) για ασυμπίεστες ροές, αφού η πυκνότητα δεν συσχετίζεται άμεσα με την πίεση. Το σύνολο των αλγορίθμων SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση της πίεσης στην εξίσωση της συνέχειας. Αυτή η διαδικασία αναφέρθηκε στην ενότητα 3.5.1.

Όσον αφορά την περαιτέρω διαδικασία, είναι απαραίτητος ο συσχετισμός των επιφανειακών τιμών της ταχύτητας, \bar{u}_n , με τις καταχωρημένες τιμές της ταχύτητας στα κέντρα των κελιών. Η γραμμική παρεμβολή των ταχυτήτων στο κέντρο των κελιών οδηγεί σε μη φυσικά αποδεκτές τιμές της πίεσης. Στο FLUENT χρησιμοποιείται μια διαδικασία παρόμοια με αυτήν που περιγράφεται από τους Rhie και Chow για την αποφυγή λήψης φυσικά μη αποδεκτού πεδίου πιέσεων. Η επιφανειακή τιμή της ταχύτητας δεν υπολογίζεται γραμμικά κατά μέσο όρο, αντιθέτως υπολογίζεται βεβαρημένα κατά το πεδίο της ορμής χρησιμοποιώντας συντελεστές βαρύτητας σύμφωνα με το συντελεστή a_p της εξίσωσης (3.6.1.1). Με αυτήν τη διαδικασία, η επιφανειακή παροχή, J_f , μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$J_f = \hat{J}_f + d_f(p_{c0} - p_{c1}) \quad (3.6.2.3)$$

όπου p_{c0} και p_{c1} είναι οι αντίστοιχες πιέσεις στα δύο κελιά εκατέρωθεν της υπό εξέταση πλευράς και η ποσότητα \hat{J}_f περιέχει την επιρροή των ταχυτήτων στα κελιά αυτά (σχήμα 3.2). Ο όρος d_f είναι μια συνάρτηση της ποσότητας \bar{a}_p , με \bar{a}_p τον μέσο όρο των συντελεστών των εξισώσεων της ορμής για τα εν λόγω κελιά σε κάθε μια πλευρά της επιφάνειας f .

3.7 1^{ης} Τάξης Ανάντη Αλγόριθμος

Όταν απαιτείται ακρίβεια 1^{ης} τάξης, οι ποσότητες στις επιφάνειες των κελιών καθορίζονται με την υπόθεση ότι οι κεντρικές τιμές σε κάθε κελί, οποιουδήποτε πεδίου μεταβλητών, αντιπροσωπεύουν μια μέση τιμή στο κελί αυτό και είναι ίδιες σε

ολόκληρο το κελί. Με άλλα λόγια οι επιφανειακές ποσότητες είναι ίδιες με τις ποσότητες των κελιών. Κατά συνέπεια όταν επιλέγεται ο αλγόριθμος 1^{ης} τάξης ανάντη, η επιφανειακή τιμή ϕ_i τίθεται ίση με την τιμή στο κέντρο του κελιού ϕ στο ανάντη κελί.

3.8 Αλγόριθμος Εκθετικού Νόμου

Ο αλγόριθμος διακριτοποίησης εκθετικού νόμου (Power Law Scheme) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιφανειακής τιμής μέσω παρεμβολής της μεταβλητής ϕ , με τη χρήση της ακριβής λύσης σε μια μονοδιάστατη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3.8.1)$$

με τα Γ και ρu σταθερά κατά μήκος του διαστήματος ∂x . Με την ολοκλήρωση της εξίσωσης (3.8.1), προκύπτει η ακόλουθη λύση που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο το ϕ μεταβάλλεται συναρτήσει του x :

$$\frac{\phi(x) - \phi_0}{\phi_L - \phi_0} = \frac{\exp(Pe \frac{x}{L}) - 1}{\exp(Pe) - 1} \quad (3.8.2)$$

όπου $\phi_0 = \phi_{x=0}$

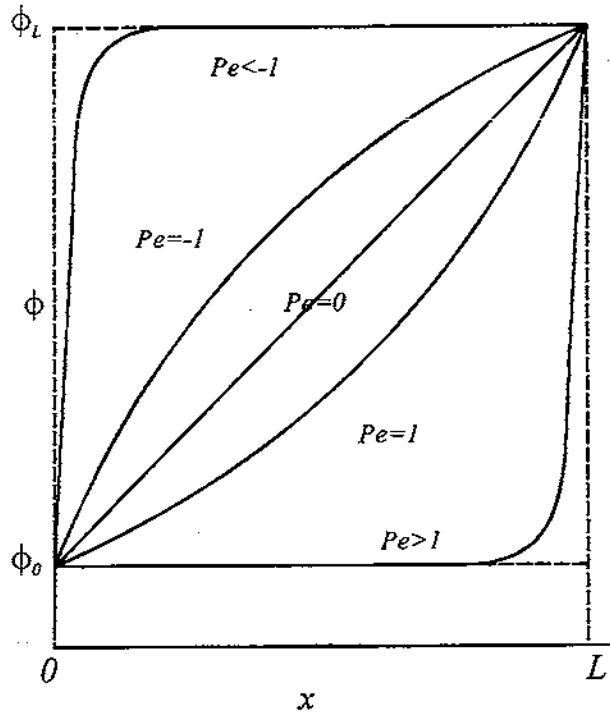
$$\phi_L = \phi_{x=L}$$

όπου Pe ο αριθμός Peclet:

$$Pe = \frac{\rho u L}{\Gamma} \quad (3.8.3)$$

Η συμπεριφορά της συναρτήσεως $\phi(x)$ για το διάστημα από $x=0$ έως $x=L$ απεικονίζεται στο σχήμα 3.3 για μια σειρά τιμών του αριθμού Peclet. Από το σχήμα 3.3 είναι φανερό ότι για μεγάλο Pe , η τιμή ϕ για $x = \frac{L}{2}$ είναι προσεγγιστικά ίση με την ανάντη τιμή. Αυτό υποδεικνύει ότι όταν η ροή κυριαρχείται από συναγωγή, η παρεμβολή μπορεί να ολοκληρωθεί απλά με την επιφανειακή τιμή της μεταβλητής να

είναι ίση με την ανάντη τιμή σε αυτήν. Αυτός είναι ο προεπιλεγμένος αλγόριθμος 1^{ης} τάξης για το FLUENT.



Σχήμα 3.3: Συμπεριφορά μιας μεταβλητής ϕ μεταξύ $x = 0$ και $x = L$

Στο FLUENT χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.8.2) με μια ισοδύναμη μορφή του αλγόριθμου εκθετικού νόμου, όπως στον αλγόριθμο παρεμβολής της.

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω στη ενότητα 3.7, το σχήμα 3.3 δείχνει ότι για μεγάλο Pe , η τιμή του ϕ για $x = \frac{L}{2}$ είναι προσεγγιστικά ίση με την ανάντη τιμή.

Αντίστοιχα για $Pe = 0$ (παρατηρείται απουσία ροής ή περίπτωση καθαρής διάχυσης) το ϕ μπορεί να παρεμβληθεί χρησιμοποιώντας έναν απλό γραμμικό μέσο όρο μεταξύ των τιμών $x = 0$ και $x = L$ (σχ. 3.3). Για μια ενδιάμεση τιμή του αριθμού *Peclet*, η τιμή του

ϕ για $x = \frac{L}{2}$ δύναται να προσδιοριστεί με εφαρμογή της ισοδύναμου εξίσωσης (3.8.2)

του εκθετικού αλγορίθμου.

3.9 2^{ης} Τάξης Ανάντη Αλγόριθμος

Αντίστοιχα όταν επιδιώκεται η ακρίβεια 2^{ης} τάξεως, οι ποσότητες στις επιφάνειες των κελιών υπολογίζονται με τη χρήση μιας πολυδιάστατης γραμμικής αναδομημένης προσέγγισης. Σύμφωνα μ' αυτήν την προσέγγιση, η υψηλής τάξης ακρίβεια επιτυγχάνεται στις επιφάνειες των κελιών, μέσω μιας επέκτασης της σειράς Taylor για τη τιμή στο κέντρο του κελιού περί του αντιστοίχου κεντροειδούς. Κατά συνέπεια όταν επιλέγεται ο 2^{ης} τάξης ανάντη αλγόριθμος, η επιφανειακή τιμή ϕ_f υπολογίζεται με τη χρήση της ακόλουθης έκφρασης:

$$\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \Delta\bar{s} \quad (3.9.1)$$

όπου ϕ και $\nabla\phi$ είναι η τιμή στο κέντρο του κελιού και η κλίση της στο ανάντη κελί αντίστοιχα, ενώ το $\Delta\bar{s}$ είναι το διάνυσμα αντικατάστασης του ανάντη κέντρου βάρους του κελιού στο κέντρο βάρους της επιφάνειας. Αυτή η διατύπωση απαιτεί τον προσδιορισμό της κλίσης $\nabla\phi$ σε κάθε κελί. Η κλίση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το θεώρημα απόκλισης, το οποίο με διακριτή μορφή γράφεται ως εξής:

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \sum_f^{N_{faces}} \tilde{\phi}_f \bar{A} \quad (3.9.2)$$

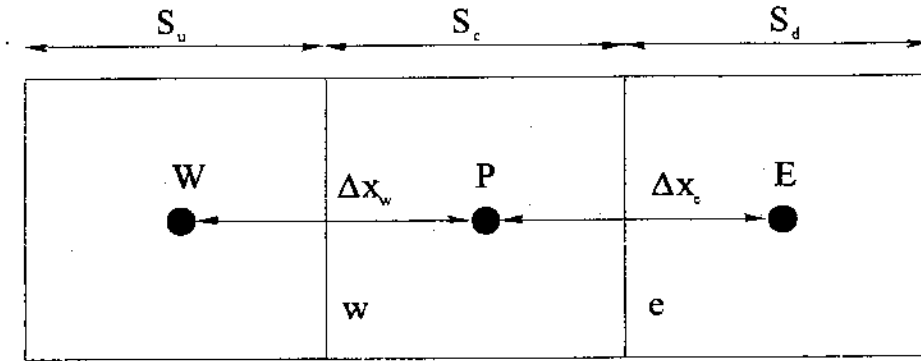
Οι επιφανειακές τιμές $\tilde{\phi}_f$ υπολογίζονται διαμέσου του υπολογισμού του μέσου όρου ϕ στα δύο παρακείμενα κελιά. Τελικά, η κλίση $\nabla\phi$ είναι περιορισμένη έτσι ώστε κανένα νέο μέγιστο (maxima) ή ελάχιστο (minima) να εισάγεται.

3.10 Αλγόριθμος QUICK

Για τετραπλευρικά και εξαεδρικά πλέγματα, όπου είναι δυνατόν να προσδιοριστούν κατά τρόπο μονοσήμαντο οι ανάντη και κατάντη επιφάνειες και κελιά, το FLUENT παρέχει επίσης τον αλγόριθμο QUICK για τον υπολογισμό μιας υψηλότερης τάξης τιμής για τη συναγόμενη μεταβλητή ϕ σε μια επιφάνεια. Ο αλγόριθμος QUICK βασίζεται στον υπολογισμό των βεβαρημένων μέσων τιμών των παρεμβολών, δευτέρας τάξης ανάντη και κεντρικά, για μια μεταβλητή. Για την επιφάνεια e στο σχήμα 3.4,

στην περίπτωση κατά την οποία η ροή είναι από τα αριστερά προς τα δεξιά, μια τέτοια τιμή μπορεί να εκφρασθεί ως εξής:

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_P + \frac{S_c}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_P - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_w \right] \quad (3.10.1)$$



Σχήμα 3.4: Μονοδιάστατος όγκος ελέγχου

Η τιμή $\theta=1$ στην ανωτέρω εξίσωση έχει ως αποτέλεσμα μια κεντρική παρεμβολή 2^{ης} τάξεως ενώ αντίστοιχα η τιμή $\theta=0$ δίνει μια ανάντη 2^{ης} τάξεως τιμή.

Ο κλασικός αλγόριθμος QUICK λαμβάνεται για $\theta = \frac{1}{8}$. Η εφαρμογή του στο FLUENT, απαιτεί μια μεταβλητή, εξαρτώμενη από τη λύση του θ , η οποία επιλέγεται για την αποφυγή μιας νέας μη αποδεκτής ακρότατης λύσης (extrema).

Ο αλγόριθμος QUICK είναι συνήθως πιο ακριβής σε δομημένα πλέγματα τα οποία ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση της ροής. Επίσης επιτρέπεται η χρήση του για μη δομημένα ή υβριδικά πλέγματα Σε τέτοιες περιπτώσεις ο συνήθης 2^{ης} τάξης ανάντη αλγόριθμος διακριτικοποίησης (που περιγράφεται στην ενότητα 3.9) χρησιμοποιείται στις επιφάνειες των μη-εξαεδρικών κελιών (ή μη-τετραπλευρικών, σε 2-D εφαρμογές). Ο 2^{ης} τάξης ανάντη αλγόριθμος χρησιμοποιείται επίσης κατά τον διαχωρισμό των ορίων όταν ο παράλληλος επιλύτης χρησιμοποιείται.

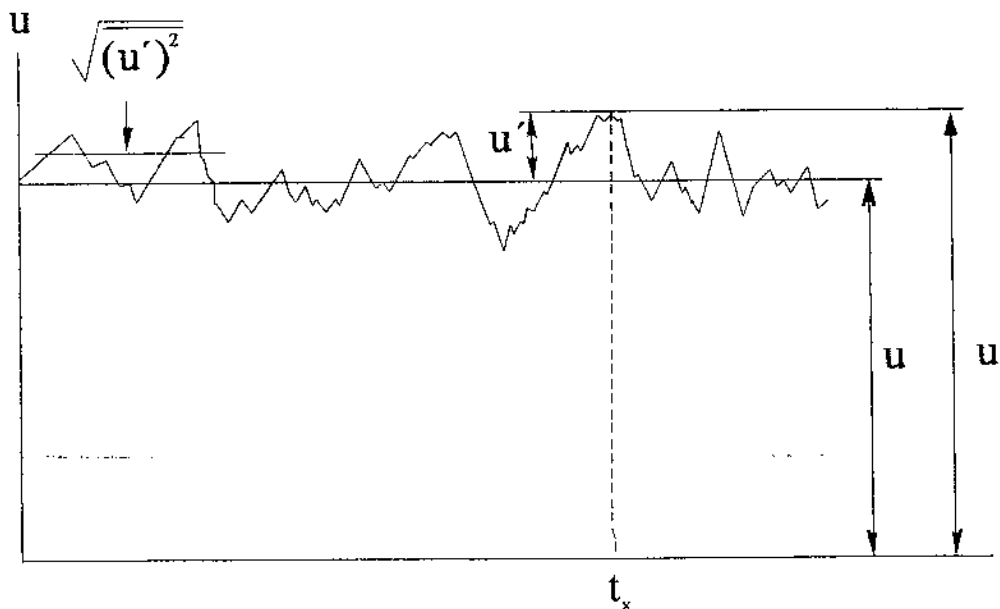
3.11 Περιγραφή της τυρβώδους ροής

Η τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από έντονες χρονικές και τοπικές διακυμάνσεις των διαφόρων ροϊκών μεγεθών, ώστε να είναι αδύνατο να περιγραφούν με ακρίβεια ως προς το χρόνο και το χώρο. Για αυτό κρίνεται σκόπιμο καθένα μέγεθος να θεωρείται σαν άθροισμα μιας μέσης τιμής και μιας μεταβαλλόμενης συνιστώσας. Έτσι για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας και την πίεση μπορούμε να γράψουμε:

$$u_i = \bar{u} + u', v_i = \bar{v} + v', w_i = \bar{w} + w', P = \bar{P} + P' \quad (3.11.1)$$

όπου με $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{P}$ παριστάνονται οι μέσες τιμές και με u', v', w', P' οι μεταβαλλόμενες.

Στο Σχήμα 3.5 δείχνονται οι διακυμάνσεις της ταχύτητα u σε συνάρτηση με το χρόνο t . Κατά τη χρονική στιγμή t_x η ταχύτητα του ρευστού είναι $u_i = \bar{u} + u'$



Σχήμα 3.5: Μεταβολή της ταχύτητας με το χρόνο σε τυρβώδη ροή

Η μέση ταχύτητα σε συνάρτηση με το χρόνο Δt , ορίζεται από τη σχέση

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u_i dt \quad (3.11.2)$$

όπου ο χρόνος Δt είναι αρκετά μεγάλος ώστε η μέση τιμή της ταχύτητας να είναι ανεξάρτητη απ' αυτόν.

Η μέση τιμή της μεταβαλλόμενης συνιστώσας, επειδή παίρνει θετικές και αρνητικές τιμές, είναι μηδέν. Είναι δηλαδή

$$\overline{u'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u' dt = 0 \quad (3.11.3)$$

Αν και η μέση τιμή της u' (όπως και των v' , w') είναι μηδέν, εντούτοις υπάρχει η τετραγωνική ρίζα της μέσης χρονικής τιμής του τετραγώνου της διακυμάνσεως $\sqrt{u'^2}$, με

$$\sqrt{u'^2} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} u'^2 dt \quad (3.11.4)$$

η οποία καλείται και ένταση της τύρβης.

Πολλές φορές η ένταση της τύρβης ορίζεται από τους λόγους

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{\overline{u}}, \frac{\sqrt{v'^2}}{\overline{v}} \text{ και } \frac{\sqrt{w'^2}}{\overline{w}} \quad (3.11.5)$$

οι οποίοι εκφράζουν το σχετικό μέγεθος των διακυμάνσεων προς τη μέση ταχύτητα. Η παραγωγή της εξίσωσης

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{Du}{Dt} \quad (3.11.6)$$

έγινε χωρίς να υπάρχει περιορισμός στο είδος της ροής. Έτσι θα ισχύει και για την περίπτωση της τυρβώδους ροής, όπου όμως οι στιγμιαίες συνθήκες είναι χωρίς πρακτική χρησιμότητα εφόσον δεν μπορούν να περιγραφούν χρονικά και τοπικά.

Χρήσιμες πληροφορίες προκύπτουν αν οι στιγμιαίες τιμές των ταχυτήτων και των πιέσεων αντικατασταθούν με τις εκφράσεις της (3.11.1) και πάρουμε τις μέσες χρονικές στιγμές. Με στιγμιαίες τιμές η εξίσωση (3.11.6) γίνεται:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_i}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} = u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} + \frac{\partial u_i}{\partial t} \quad (3.11.7)$$

Στο δεξιό μέλος της εξίσωσης αυτής μπορούμε να προσθέσουμε τον όρο $u_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} + v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} \right)$ χωρίς να μεταβληθεί η ισότητα αφού η ποσότητα που βρίσκεται μέσα στην παρένθεση για ασυμπίεστη ροή είναι ίση με μηδέν. Το δεύτερο μέλος της (3.11.7) γίνεται

$$u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + v_i \frac{\partial u_i}{\partial y} + u_i \frac{\partial v_i}{\partial y} + \frac{\partial u_i}{\partial t}$$

που είναι ισοδύναμο με:

$$\frac{\partial u_i^2}{\partial x} + \frac{\partial (v_i u_i)}{\partial y} + \frac{\partial u_i}{\partial t}$$

Έτσι η εξίσωση (3.11.7) παίρνει τη μορφή

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_i}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial y^2} = \frac{\partial u_i^2}{\partial x} + \frac{\partial (v_i u_i)}{\partial y} + \frac{\partial u_i}{\partial t}$$

ή

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_i}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial y} - v_i u_i \right) = \frac{\partial u_i^2}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial t} \quad (3.11.8)$$

Αντικαθιστώντας τις στιγμιαίες τιμές με τις εκφράσεις (3.11.1) και παίρνοντας τις μέσες χρονικές στιγμές, έχουμε:

Για τον πρώτο όρο

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}_i}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} (\overline{P} + \overline{P}') = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{P}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{P}'}{\partial x} \right)$$

και

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}_i}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{P}}{\partial x} \quad (3.11.9)$$

διότι η μέση τιμή της P' είναι μηδέν.

Για το δεύτερο όρο

$$\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial y} - \overline{v_i u_i} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u} + u') - \overline{(\overline{u} + u')(\overline{v} + v')} = \quad (3.11.10)$$

$$= \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{u}}{\partial y} + \frac{\partial u'}{\partial y} \right) - (\overline{u\overline{v}} + \overline{u'v'} + \overline{u'v} + \overline{u\overline{v}'})$$

Η μέση τιμή των όρων $\overline{u'v'}$ και $\overline{u'v}$ είναι ίση με μηδέν, διότι και οι δύο είναι γινόμενα μιας σταθερής και μιας μεταβαλλόμενης τιμής. Επίσης με μηδέν ισούται και η μέση τιμή της u' . Έτσι η προηγούμενη σχέση γίνεται

$$\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial y} - \overline{v_i u_i} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} - \overline{u\overline{v}} - \overline{u'\overline{v}'} \quad (3.11.11)$$

Παραγωγίζοντας την ανωτέρω σχέση ως προς y , παίρνουμε

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial y} - \overline{v_i u_i} \right) = \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2} - \overline{u} \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} - \overline{v} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} - \frac{\partial (\overline{v' u'})}{\partial y} \quad (3.11.12)$$

Για το πρώτο όρο του δεξιού μέλους της (3.11.8)

$$\frac{\partial \overline{u_i^2}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \overline{(\overline{u} + u')^2} = \frac{\partial}{\partial x} \overline{(\overline{u}^2 + 2\overline{u}u' + u'^2)} = \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u}^2 + \overline{u'^2}) = 2\overline{u} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} \quad (3.11.13)$$

Για το τελευταίο όρο της (3.11.8) είναι

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial t}} = \overline{\frac{\partial}{\partial t}(\bar{u} + u')} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u'}}{\partial t} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (3.11.14)$$

Με αντικατάσταση των (3.11.9), (3.11.12), (3.11.13) και (3.11.14) στην (3.11.8), προκύπτει

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{(u'v')}}{\partial y} = 2\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (3.11.15)$$

$$\text{Επειδή } \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \text{ και } \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{D\bar{u}}{Dt} \quad (3.11.16)$$

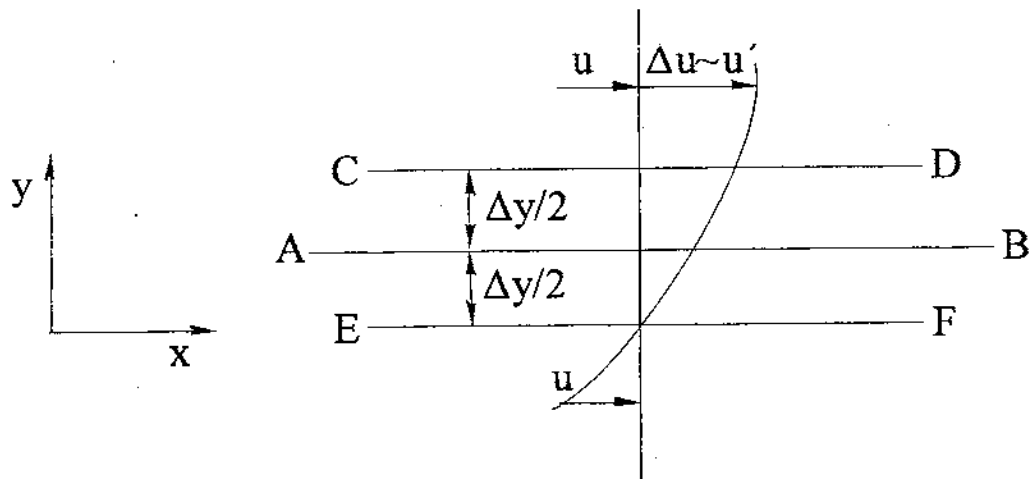
$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} = \frac{D\bar{u}}{Dt} \quad (3.11.17)$$

Συγκρίνοντας την (3.11.17) με την (3.11.6) βλέπουμε ότι η πρώτη εξίσωση περιέχει επιπλέον το άθροισμα $\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{(u'v')}}{\partial y}$, αποτελούμενο από δύο όρους, οι οποίοι περιγράφουν την επίδραση των τυρβωδών διακυμάνσεων. Η εξίσωση (3.11.15) μπορεί να γραφεί με τη μορφή

$$-\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\rho \overline{u'^2}) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho \overline{u'v'}) = \rho \frac{D\bar{u}}{Dt} \quad (3.11.18)$$

Παρατηρούμε ότι η επίδραση της τύρβης εκφράζεται με την εμφάνιση των τάσεων της μορφής $-\rho \overline{u'^2}$, $-\rho \overline{u'v'}$ οι οποίες καλούνται **φαινομενικές τάσεις ή τάσεις Reynolds**. Για την πληρέστερη εικόνα της εμφανίσεως των φαινομενικών τάσεων θα θεωρήσουμε την περίπτωση της παραλλήλου ροής κατά τον άξονα x όπου υπάρχει κλίση της μέσης ταχύτητας \bar{u} κατά τον άξονα y (Σχήμα 3.6). Εξαιτίας των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας, ρευστά σωματίδια προερχόμενα από τις επιφάνειες CD και EF ανταλλάσσουν ορμή διαμέσου της επιφάνειας AB. Έτσι μία

μάζα κινούμενη από την επιφάνεια EF όπου η μέση ταχύτητα είναι \bar{u} , προς την επιφάνεια CD, όπου η μέση ταχύτητα είναι $\bar{u} + \Delta\bar{u}$, αυξάνει την αρχική της ορμή. Αντίθετα μία μάζα που κινείται από την ανώτερη ζώνη προς την κατώτερη, ελαττώνει την ορμή της.



Σχήμα 3.6: Μεταφορά ρευστών σωματιδίων εγκάρσια στο AB (τυρβώδης ροή)

Αποτέλεσμα αυτής της μεταφοράς ορμής διαμέσου της AB είναι η εμφάνιση των τάσεων Reynolds.

Η στιγμιαία παροχή μάζας ανά μονάδα επιφάνειας διαμέσου της AB είναι $\rho u'$. Αν η απόσταση Δy εκλεγεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η μέση τιμή του $+u'$ στην ανώτερη ζώνη να είναι ίση με $\Delta\bar{u}$, τότε η διατμητική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας κατά μήκος του επιπέδου AB είναι $-\rho u' \Delta\bar{u} = -\rho u' u'$ ενώ κατά τον άξονα των y η ανά μονάδα επιφάνειας ασκούμενη δύναμη είναι $-\rho v' v' = -\rho v'^2$. Παίρνοντας τις μέσες τιμές αυτών των ποσοτήτων, έχουμε τις φαινομενικές τάσεις

$$\tau_n = -\overline{\rho v'^2} \text{ και } -\overline{\rho u' v'} = -\overline{\rho u' v'} \quad (3.11.19)$$

Τα αρνητικά πρόσημα εμφανίζονται διότι τα $\overline{v'^2}$, $\overline{u' v'}$ κατά μέσο όρο είναι αρνητικά. Οι τάσεις αυτές, οι οποίες προέρχονται από την επίδραση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι προστίθενται στις

τάσεις οι οποίες οφείλονται στη μοριακή συνεκτικότητα του ρευστού. Για την περίπτωση της παραλλήλου ροής η συνολική διατμητική τάση θα είναι

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \overline{\rho u'v'} \quad (3.11.20)$$

Στην πλήρη τυρβώδη ροή, η στρωτή διατμητική τάση $\mu \frac{\partial u}{\partial y}$ είναι αμελητέα σε σύγκριση με την τυρβώδη διατμητική τάση γι'αυτό και παραλείπεται. Ο όρος $-\overline{\rho u'v'}$ μηδενίζεται όταν η ροή είναι στρωτή. Την έκφραση που συνδέει τη διατμητική τάση της τυρβώδους ροής με τη βαθμίδα της ροικής ταχύτητας, έδωσε ο **Boussinesq** εισάγοντας το συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας σε αναλογία με το συντελεστή μοριακής συνεκτικότητας. Η ολική διατμητική τάση κατά Boussinesq στην τυρβώδη ροή δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} + n \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.11.21)$$

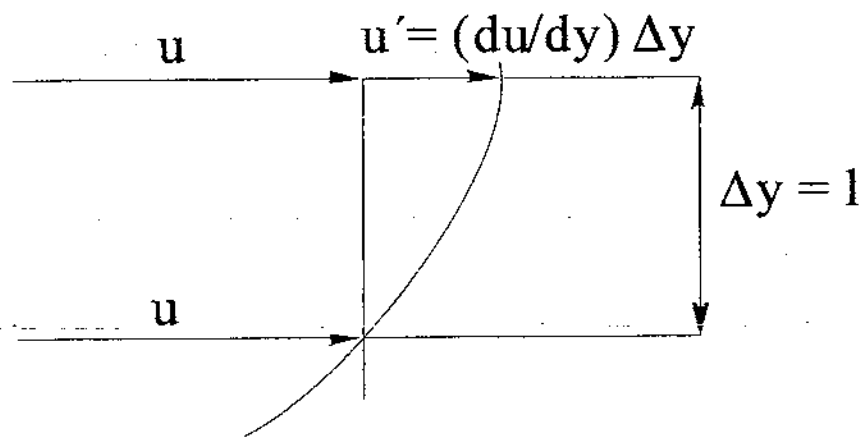
όπου n ο συντελεστής της τυρβώδους συνεκτικότητας. Σε αντιστοιχία με το κινηματικό ιξώδες $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ο Boussinesq όρισε και το κινηματικό ιξώδες δίνης

$$\varepsilon = \frac{n}{\rho} \quad (3.11.22)$$

στις συνήθεις εφαρμογές είναι $\varepsilon > \nu$. Γι'αυτό το ιξώδες δίνης έχει μεγαλύτερη σημασία στους υπολογισμούς. Ο Boussinesq θεώρησε ότι ο συντελεστής n είναι σταθερός. Στην πραγματικότητα όμως, όπως αποδεικνύεται πειραματικά, το n εξαρτάται από την ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων των διαφόρων μεγεθών οι οποίες δύσκολα μπορούν να μετρηθούν. Θα έπρεπε επομένως να βρεθεί μια σχέση του συντελεστή n με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής. Αυτό το πέτυχε ο Prandtl εισάγοντας την έννοια του μήκους αναμίξεως l . Σαν μήκος αναμίξεως l όρισε την απόσταση κατά την οποία πρέπει να μετακινηθεί ένα σύνολο ρευστών σωματιδίων κάθετα προς τη διεύθυνση ροής με την αρχική μέση ταχύτητα, ώστε η διαφορά της αρχικής μέσης ταχύτητας και της μέσης ταχύτητας στη νέα θέση να

εξισωθεί με τη διακύμανση της ταχύτητας κατά τη διεύθυνση της μέσης ροής, δηλαδή $\Delta \bar{u} = \overline{u'}$.

Επίσης έδειξε ότι σε κάθε τυρβώδη ροή οι ταχύτητες $\overline{u'}$ και $\overline{v'}$ πρέπει να είναι ανάλογες μεταξύ τους και της αυτής τάξεως μεγέθους. Από το Σχήμα 3.6 έχουμε ότι $\Delta u = l \frac{du}{dy}$ και επομένως $\overline{u'} = l \frac{du}{dy}$



Σχήμα 3.7: Μήκος αναμίξεως του Prandtl

3.12 Τυρβώδη Μοντέλα

Στην ενότητα αυτή παρέχονται λεπτομέρειες για τα διάφορα τυρβώδη μοντέλα που είναι διαθέσιμα στο FLUENT.

Οι πληροφορίες παρουσιάζονται στα εξής τμήματα:

3.12.1 Εισαγωγή

Οι τυρβώδεις ροές χαρακτηρίζονται από κυμαινόμενα πεδία ταχυτήτων. Οι διακυμάνσεις αυτές αναμιγνύουν μεταφερόμενες ποσότητες όπως είναι η ορμή, η ενέργεια, και η συγκέντρωση ειδών π.χ. χημικών, με αποτέλεσμα οι τελευταίες (δηλαδή οι μεταφερόμενες ποσότητες) να κυμαίνονται επίσης. Δεδομένου ότι αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να είναι μικρής κλίμακας και υψηλής συχνότητας, η άμεση εξομοίωση τους απαιτεί υψηλό υπολογιστικό κόστος και δεν συνίσταται η χρήση τους σε βιομηχανικό περιβάλλον. Αντ' αυτού, είναι δυνατόν να ληφθεί η χρονικά μέση

μορφή, η σύνθετη μέση μορφή ή να τροποποιηθούν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να απομακρυνθούν οι μικροκλίμακες με τελικό σκοπό τη λήψη ενός συνόλου εξισώσεων του οποίου η λύση να απαιτεί μικρό υπολογιστικό κόστος. Εντούτοις, οι τροποποιημένες εξισώσεις εμπεριέχουν πρόσθετες άγνωστες μεταβλητές, ο υπολογισμός των οποίων βάσει γνωστών ποσοτήτων απαιτεί τη χρήση τυρβωδών μοντέλων.

Το FLUENT παρέχει τις ακόλουθες επιλογές τυρβωδών μοντέλων:

- Μοντέλο **Spalart-Allmaras**
- Μοντέλα $k-\varepsilon$
 - Standard $k-\varepsilon$
 - RNG - $k-\varepsilon$
 - Realizable $k-\varepsilon$
- Μοντέλο $k-w$
 - Standard $k-w$
 - SST $k-w$
- Μοντέλο **Τάσεων Reynolds** (*Reynolds stress model* - Reynolds RSM)
- Μοντέλο Προσομοίωσης Μεγάλων Δινών (*Large eddy simulation- LES*)

3.12.2 Επιλογή ενός τυρβώδους μοντέλου

Δυστυχώς, κανένα τυρβώδες μοντέλο δε γίνεται γενικώς αποδεκτό για την επίλυση όλων των ροϊκών προβλημάτων. Η επιλογή του τυρβώδους μοντέλου εξαρτάται από εκτιμήσεις όπως είναι η φυσική ερμηνεία της ροής, η καθιερωμένη πρακτική για την επίλυση μιας δεδομένης κατηγορίας προβλημάτων, το απαιτούμενο επίπεδο ακρίβειας, οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι και το διαθέσιμο χρονικό διάστημα για την προσομοίωση. Για την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα απαιτείται αντίληψη των ικανοτήτων και των περιορισμών του εκάστοτε μοντέλου.

Ο σκοπός της ενότητας αυτής είναι να δοθεί μια γενική επισκόπηση των παραμέτρων που σχετίζονται με τα τυρβώδη μοντέλα και παρέχονται απ' το FLUENT. Ενώ είναι αδύνατη η αντιστοιχία ενός δεδομένου μοντέλου για μια συγκεκριμένη εφαρμογή,

ωστόσο παρέχονται γενικές οδηγίες για την επιλογή του κατάλληλου τυρβώδους μοντέλου συναρτήσει της ροής η οποία πρόκειται να εξομοιωθεί.

3.13 Τυρβώδη μοντέλα Reynolds

3.13.1 Reynolds-Averaged Approach vs. LES

Μια πλήρης λύση των εξισώσεων Navier-Stokes για χρονικά μεταβαλλόμενες, τυρβώδεις, υψηλού αριθμού Reynolds ροές, και σύνθετης γεωμετρίας πλέγματος είναι δύσκολο να παραχθεί με τα διαθέσιμα τεχνολογικά μέσα. Σε αντιδιαστολή με την παραπάνω πρόταση, δύο εναλλακτικές μέθοδοι μπορούν να υιοθετηθούν για το μετασχηματισμό των εξισώσεων Navier-Stokes κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι απαραίτητη η άμεση προσομοίωση των μικρής κλίμακας τυρβωδών διακυμάνσεων. Αυτές οι μέθοδοι είναι: η μέθοδος λήψης μέσων τιμών κατά **Reynolds** και η χρήση φίλτρων για τις τάσεις **Reynolds**. Και οι δύο μέθοδοι εισάγουν πρόσθετους όρους στις κυρίαρχες εξισώσεις οι οποίοι πρέπει να μοντελοποιηθούν, δηλαδή να βρεθούν κατάλληλες επιπρόσθετες εξισώσεις οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των αγνώστων ποσοτήτων.

Οι εξισώσεις *Reynolds* (**RANS**) είναι ουσιαστικά εξισώσεις μεταφοράς για τις μέσες ποσότητες ροής, ενώ ταυτόχρονα οι όροι οι οποίοι περιέχουν τυρβώδεις διακυμάνσεις μοντελοποιούνται. Η προσέγγιση η οποία επιτρέπει μια λύση για τις μεταβλητές της μέσης ροής μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος. Εάν η μέση ροή είναι μόνιμη, οι βασικές εξισώσεις δεν περιέχουν χρονικές παραγώγους και η λήψη μιας λύσης με οικονομικό τρόπο είναι εφικτή. Ένα υπολογιστικό πλεονέκτημα διαφαίνεται ακόμη και στις χρονικά μεταβαλλόμενες καταστάσεις, δεδομένου ότι το χρονικό βήμα καθορίζεται από τις χρονικές κλίμακες της μέσης ροής παρά από χρονοκλίμακες της τύρβης. Η προσέγγιση των εξισώσεων Reynolds υιοθετείται γενικά για πρακτικούς υπολογισμούς και χρησιμοποιεί μοντέλα όπως το **Spalart-Allmaras**, το $k-\epsilon$ και τις διάφορες μορφές του, το $k-w$ και τις διάφορες μορφές του καθώς και το **RSM**.

Το τυρβώδες μοντέλο **LES** παρέχει μια εναλλακτική προσέγγιση στην οποία οι μεγάλες δίνες υπολογίζονται σε μια χρονικά εξαρτημένη προσομοίωση που χρησιμοποιεί ένα σύνολο 'φιλτραρισμένων' εξισώσεων. Το 'φιλτράρισμα' είναι ουσιαστικά η τροποποίηση των ακριβών εξισώσεων Navier-Stokes με σκοπό την

αφαίρεση των δινών των οποίων το μέγεθος είναι μικρότερο από το μέγεθος του φίλτρου, το οποίο λαμβάνεται συνήθως ως η μέση χωρική διάσταση του πλέγματος.

Κατ' αναλογία με την λήψη της χρονικά μέσης μορφής των εξισώσεων Reynolds, η διαδικασία χρήσης φίλτρων δημιουργεί πρόσθετους άγνωστους όρους που πρέπει να μοντελοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί το "κλείσιμο του συστήματος". Στατιστικά δεδομένα των ποσοτήτων της μέσης ροής, που συγκεντρώνουν το βασικό ενδιαφέρον της εφαρμοσμένης μηχανικής, συλλέγονται κατά τη διάρκεια μιας χρονικά εξαρτημένης προσομοίωσης. Βασικό πλεονέκτημα του μοντέλου LES αποτελεί η μοντελοποίηση μέρους του τυρβώδους πεδίου (ενώ αντίθετα το πιο σημαντικό μέρος της ροής επιλύεται) έτσι ώστε το σφάλμα που προκαλείται από τη χρήση ενός τυρβώδους μοντέλου να μειώνεται. Είναι γενικώς αποδεκτό, ότι είναι ευκολότερο να βρεθεί ένα 'καθολικό' (γενικά εφαρμόσιμο) μοντέλο για τις μικρές κλίμακες, οι οποίες τείνουν να είναι πιο ισοτροπικές και να δέχονται ελάχιστη επιρροή από τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ροής απ'ότι στην περίπτωση των μεγάλων δινών.

Πρέπει, εντούτοις, να τονιστεί ότι η εφαρμογή του τυρβώδους μοντέλου LES στις βιομηχανικές ρευστομηχανικές προσομοιώσεις είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Όπως τονίζεται σε μια πρόσφατη αναθεωρημένη δημοσίευση, χαρακτηριστικές εφαρμογές του τυρβώδους μοντέλου LES μέχρι σήμερα ήταν για σχετικά απλές γεωμετρίες. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη υπολογιστική ισχύ που απαιτείται για να επιλυθούν οι τυρβώδεις δίνες που εμπεριέχουν κινητική ενέργεια. Οι πιο επιτυχείς προσομοιώσεις με το μοντέλο LES έχουν γίνει χρησιμοποιώντας υψηλής τάξης χωρική διακριτοποίηση, όπου μεγάλη προσοχή έχει ληφθεί για την επίλυση όλων των κλιμάκων που είναι μεγαλύτερες από το αδρανειακό εύρος των μικρών κλιμάκων. Η υποβάθμιση της ακρίβειας στις ποσότητες μέσης ροής με κακή χρήση του μοντέλου LES δεν είναι επαρκώς τεκμηριωμένη. Επιπλέον, η χρήση των συναρτήσεων τοιχώματος (wall functions) με το LES είναι, επίσης, μια προσέγγιση που απαιτεί περαιτέρω πιστοποίηση.

Σαν γενική οδηγία, επομένως, συνιστάται η χρήση των συμβατικών τυρβωδών μοντέλων που υιοθετούν την προσέγγιση των εξισώσεων Reynolds για πρακτικούς υπολογισμούς.

Η προσέγγιση LES, περιγράφεται περαιτέρω στην ενότητα 3.14. Στη συνέχεια της ενότητας αυτής θα εξετασθεί η επιλογή των μοντέλων χρησιμοποιώντας τη προσέγγιση των εξισώσεων Reynolds.

3.13.2 Εξισώσεις Reynolds

Για τη λήψη των εξισώσεων Reynolds, οι μεταφερόμενες μεταβλητές αναλύονται στις μέσες χρονικά τιμές και στις κυμαινόμενες. Συγκεκριμένα η ταχύτητα μπορεί να γραφεί ως:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad (3.13.2.1)$$

Όπου \bar{u}_i και u_i' είναι η μέση και η κυμαινόμενη συνιστώσα της ταχύτητας, αντίστοιχα ($i = 1..2,3$).

Αντίστοιχα, η πίεση και οι άλλες βαθμωτές ποσότητες γράφονται:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3.13.2.2)$$

όπου το ϕ εκφράζει ένα βαθμωτό μέγεθος όπως η πίεση, η ενέργεια, ή η συγκέντρωση ειδών.

Η αντικατάσταση των εξισώσεων αυτής της μορφής για τις μεταβλητές της ροής στις στιγμιαίες εξισώσεις της συνέχειας και της ορμής και η ταυτόχρονη λήψη της μέσης χρονικά τιμής (ή της σύνθετης μέσης τιμής) δίνει (με ταυτόχρονη παύση της χρήσης του συμβόλου της παύλας για τη δήλωση της μέσης τιμής μιας ποσότητας) τις εξισώσεις της ορμής στη σύνθετη μέση μορφή τους. Σε μορφή καρτεσιανών ταυνοστών γράφονται:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.13.2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (3.13.2.4)$$

Οι εξισώσεις (3.13.2.3) και (3.13.2.4) καλούνται μέσες εξισώσεις Reynolds ή απλά εξισώσεις Reynolds. Έχουν την ίδια γενική μορφή με τις στιγμιαίες εξισώσεις Navier-Stokes ενώ τώρα οι ταχύτητες και οι άλλες μεταβλητές της ροής αντιπροσωπεύουν τώρα τις χρονικά μέσες τιμές. Οι επιπρόσθετοι όροι που εμφανίζονται αντιπροσωπεύουν τις επιδράσεις της τóρβης. Αυτές οι τάσεις Reynolds $(-\overline{\rho u_i u_j})$, πρέπει να μοντελοποιηθούν κατάλληλα για το κλείσιμο των εξισώσεων (3.13.2.4).

Για ροές κατά τις οποίες η πυκνότητα μεταβάλλεται, οι εξισώσεις (3.13.2.3) και (3.13.2.4) μπορούν να ερμηνευθούν και ως εξισώσεις 'Favre-averaged Navier-Stokes', με τις ταχύτητες τώρα να αντιπροσωπεύουν μέσες μαζικά τιμές. Υπό αυτήν τη μορφή, οι εξισώσεις (3.13.2.3) και (3.13.2.4) μπορούν να εφαρμοστούν για ροές μεταβλητής πυκνότητας (συμπιεστές ροές).

3.13.3 Boussinesq Approach vs. Reynolds Stress Transport Models

Η κατά Reynolds προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της τóρβης απαιτεί την κατάλληλη μοντελοποίηση των τάσεων Reynolds στην εξίσωση (3.13.3.4). Μια κοινή μεθοδολογία αξιοποιεί την υπόθεση του Boussinesq για τη συσχέτιση των τάσεων Reynolds με τις μέσες κλίσεις της ταχύτητας:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3.13.3.1)$$

Η υπόθεση του Boussinesq εφαρμόζεται στα μοντέλα Spalart-Allmaras, $k-\epsilon$ και $k\omega$. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι το σχετικά χαμηλό υπολογιστικό κόστος που συνδέεται με τον υπολογισμό του τυρβώδους ιξώδους μ_t .

Στην περίπτωση του μοντέλου Spalart-Allmaras, μόνο μια πρόσθετη εξίσωση μεταφοράς (που αντιπροσωπεύει το τυρβώδες ιξώδες) επιλύεται. Στην περίπτωση των μοντέλων $k-\epsilon$ και $k-w$, επιλύονται δύο πρόσθετες εξισώσεις μεταφοράς (μια για την τυρβώδη κινητική ενέργεια, k , και μια είτε για το ρυθμό σκέδασης της τύρβης ϵ , είτε για το σχετικό ποσοστό καταστροφής της τύρβης w). Η ποσότητα μ_t επίσης υπολογίζεται ως συνάρτηση του k και του ϵ . Το μειονέκτημα της υπόθεσης Boussinesq όπως παρουσιάζεται, είναι ότι αποδέχεται πως η ποσότητα μ_t είναι μια ισοτροπική βαθμωτή ποσότητα, πρόταση η οποία δεν είναι αυστηρά ορθή.

Μια εναλλακτική προσέγγιση, η οποία ενσωματώνεται στο RSM, είναι η επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς για καθέναν από τους όρους του τανυστή των τάσεων Reynolds. Επίσης απαιτείται μια πρόσθετη εξίσωση για τον προσδιορισμό της κλίμακας (συνήθως για το ϵ). Σύμφωνα με τα παραπάνω, πέντε πρόσθετες εξισώσεις μεταφοράς απαιτούνται σε δισδιάστατες (2D) και επτά σε τρισδιάστατες (3D) ροές.

Σε πολλές περιπτώσεις, τα μοντέλα που βασίζονται στην υπόθεση του Boussinesq αποδίδουν καλύτερα, με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η πρόσθετη υπολογιστική δαπάνη στο μοντέλο τάσεων του Reynolds. Εντούτοις, το RSM είναι σαφώς ανώτερο για καταστάσεις στις οποίες η ανισοτροπία της τύρβης έχει καθολική επίδραση στη μέση ροή. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν οι υψηλά περιδινιζόμενες και οι επηρεαζόμενες από διατμητικές τάσεις δευτερογενείς ροές.

3.14 Το μοντέλο LES (Large Eddy Simulation)

Είναι γνωστό πλέον ότι η απ'ευθείας προσομοίωση της τύρβης για όλες τις κλίμακες της τυρβώδους κίνησης, περιορίζεται στους χαμηλούς αριθμούς Reynolds λαμβάνοντας υπ' όψη τους περιορισμούς μνήμης των σύγχρονων Η/Υ.

Για να επιτύχουμε υπολογιστικές προσομοιώσεις σε υψηλότερους αριθμούς Re (με τα σημερινά δεδομένα) μπορούμε να εφαρμόσουμε την μεθοδολογία Προσομείωσης Μεγάλων Δινών (Large Eddy Simulation) ή LES. Παρακάτω θα δοθεί μια συνοπτική περιγραφή της μεθόδου.

Για εκτενέστερη ανάλυση αυτής της μεθοδολογίας ο αναγνώστης μπορεί να αναφερθεί στους Deardorf (1970), Yang και Ferziger (1993) και Neto et al (1993). Εδώ είναι απαραίτητη η εισαγωγή ενός μοντέλου για τις υποπλεγματικές κλίμακες (μοντέλο ΥΠΚ, Subgrid-Scale model, SGS), που να μοντελοποιεί την ίση των κλιμάκων που είναι μικρότερες από την κλίμακα του υπολογιστικού πλέγματος Δx (Martenson, 1991; Marcell Lesieur, 1994).

Θεωρώντας ένα χωρικό φίλτρο με πλάτος αυτό του υπολογιστικού πλέγματος, π.χ. για ομοιόμορφο πλέγμα όπου $\Delta x = \Delta y = \Delta z$, εισάγουμε την διατύπωση του μοντέλου LES. Οι εξισώσεις Reynolds έχουν να κάνουν με ένα μέσο πεδίο το οποίο χρονικά είναι σταθερό ή ελαφρώς μεταβαλλόμενο και χωρικά ομαλά μεταβαλλόμενο. Αντιθέτως οι προσομοιώσεις LES έχουν να κάνουν με μέσο πεδίο που ενδέχεται να είναι ακραίως χαοτικό στον χωροχρόνο εάν το Δx είναι μικρό.

Σύμφωνα με την διατύπωση του LES κάθε μεταβλητή του πεδίου ροής π.χ. η ταχύτητα u διαχωρίζεται στην μεγάλης κλίμακας ταχύτητα \bar{u} και στην διακόμανση u' της υποπλεγματικής κλίμακας, δηλ:

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.14.1)$$

Οι τυρβώδεις ροές χαρακτηρίζονται από στρόβιλους με ένα ευρύ φάσμα μήκους και χρονικών κλιμάκων. Οι μεγαλύτεροι στρόβιλοι είναι χαρακτηριστικά συγκρίσιμοι στο μέγεθος με το χαρακτηριστικό μήκος της κύριας ροής. Η σκέδαση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας οφείλεται στις μικρότερες κλίμακες.

Θεωρητικά είναι δυνατή η άμεση επίλυση ολόκληρου του φάσματος των τυρβωδών κλιμάκων με τη χρήση μιας γνωστής προσέγγισης που είναι γνωστή ως άμεση αριθμητική προσομοίωση (Direct Numerical Simulation ή DNS). Ωστόσο η προσέγγιση DNS δεν είναι εφικτή για πρακτικά μηχανικά προβλήματα. Το υπολογιστικό κόστος της προσέγγισης DNS είναι μεγάλο, αφού ο λόγος των μεγάλων κλιμάκων (που περιέχουν ενέργεια) προς τις μικρές κλίμακες (που καταστρέφουν την ενέργεια) είναι ανάλογος με την ποσότητα $Re_i^{3/4}$, με Re_i να είναι ο τυρβώδης αριθμός

Reynolds. Επομένως, για την επίλυση όλων των κλιμάκων, το μέγεθος του πλέγματος στις τρεις διαστάσεις θα είναι ανάλογο προς την ποσότητα $Re_i^{9/4}$. Με απλά μαθηματικά, για υψηλούς αριθμούς Reynolds, τα μεγέθη πλέγματος που απαιτούνται για την προσέγγιση DNS είναι απαγορευτικά. Μια επιπλέον προσθήκη στο υπολογιστικό κόστος αποτελεί το γεγονός ότι η προσομοίωση θα είναι παροδική με πολύ μικρά χρονικά βήματα, δεδομένου ότι οι χρονικές απαιτήσεις ανάλυσης κυριαρχούνται από κλίμακες σκέδασης και όχι από την κύρια ροή ή τους στροβίλους που περιέχουν ενέργεια.

Η συμβατική προσέγγιση στις εξομοιώσεις της ροής προϋποθέτει τη λύση των εξισώσεων RANS, δηλαδή των εξισώσεων Reynolds και τις εξισώσεις των μέσων εξισώσεων Navier – Stokes (averaged Navier – Stokes equations). Στην προσέγγιση RANS, όλες οι τυρβώδεις κινήσεις μοντελοποιούνται, με συνέπεια σημαντικό υπολογιστικό κέρδος.

Εννοιολογικά, η προσέγγιση LES είναι τοποθετημένη κάπου μεταξύ της προσέγγισης DNS και της προσέγγισης RANS. Βασικά οι μεγάλοι στρόβιλοι επιλύονται άμεσα με την προσέγγιση LES, ενώ οι μικροί στρόβιλοι μοντελοποιούνται. Η λογική για την προσέγγιση LES μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- Η ορμή, η μάζα, η ενέργεια, και άλλα παθητικά βαθμωτά μεταφέρονται κυρίως από μεγάλους στροβίλους.
- Οι μεγάλοι στρόβιλοι εξαρτώνται από τη γεωμετρία και τις οριακές συνθήκες.
- Οι μικροί στρόβιλοι εξαρτώνται λιγότερο από τη γεωμετρία, τείνουν να είναι πιο ισοτροπικοί και συνεπώς πιο καθολικοί.
- Η πιθανότητα της εύρεσης ενός καθολικού μοντέλου είναι μεγαλύτερη όταν μόνο μικροί στρόβιλοι μοντελοποιούνται.

Η επίλυση μόνο των μεγάλων στροβίλων και η μοντελοποίηση των μικρότερων κλιμάκων απαιτεί μία ανάλυση πλέγματος που είναι λιγότερο περιοριστική σε σχέση με την προσέγγιση DNS. Χαρακτηριστικά, τα μεγέθη πλέγματος μπορούν να είναι τουλάχιστον ένα μέγεθος μικρότερα εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα μεγέθη στην προσέγγιση DNS. Ωστόσο πρακτικά, διατηρείται η απαίτηση εξαιρετικά λεπτών πλεγμάτων. Η δυνατότητα χρήσης της προσέγγισης LES σε μηχανικούς υπολογισμούς,

οφείλεται στις αντίξοες αυξήσεις της υπολογιστικής ισχύος που συνδέονται με τη διαθεσιμότητα της παράλληλης επεξεργασίας.

Στις παρακάτω ενότητες παρέχονται λεπτομέρειες για τις κυρίαρχες εξισώσεις για την προσέγγιση LES και παρουσιάζονται δύο επιλογές για τη μοντελοποίηση των subgrid-scale τάσεων (απαραίτητη για το κλείσιμο των κυρίαρχων εξισώσεων) καθώς επίσης γίνεται αναφορά για τις σχετικές οριακές συνθήκες.

3.14.1 'Φιλτραρισμένες' εξισώσεις Navier – Stokes

Οι κυρίαρχες εξισώσεις για την προσέγγιση LES λαμβάνονται με το φιλτράρισμα των χρονικά εξαρτώμενων εξισώσεων Navier - Stokes είτε στο διάστημα Fourier (κυματάριθμος) είτε στο διάστημα διαμόρφωσης (φυσικό). Η διαδικασία φιλτραρίσματος φιλτράρει αποτελεσματικά τους στροβίλους των οποίων οι κλίμακες είναι μικρότερες από το πλάτος του φίλτρου ή το διάστημα του πλέγματος που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς. Οι εξισώσεις που προκύπτουν αντιπροσωπεύουν τη δυναμική των μεγάλων στροβίλων.

Μια φιλτραρισμένη μεταβλητή καθορίζεται ως εξής:

$$\bar{\phi}(x) = \int_D \phi(x') G(x, x') dx' \quad (3.14.1.1)$$

όπου D είναι το πεδίο του ρευστού και G η συνάρτηση του φίλτρου που καθορίζει την κλίμακα των προς επίλυση στροβίλων.

Στο FLUENT, η διακριτοποίηση πεπερασμένων όγκων παρέχει πεπλεγμένα τη λειτουργία φιλτραρίσματος:

$$\bar{\phi}(x) = \frac{1}{V} \int_V \phi(x') dx', \quad x' \in V \quad (3.14.1.2)$$

όπου V ο όγκος ενός υπολογιστικού κελιού.

Η συνάρτηση φιλτραρίσματος, $G(x, x')$, είναι:

$$G(x, x') = \frac{1}{V}, x' \in V$$

$$G(x, x') = 0, x' \notin V \quad (3.14.1.3)$$

Δεδομένου ότι η εφαρμογή LES για συμπιεστές ροές βρίσκεται ακόμα υπό έρευνα, η θεωρία που παρουσιάζεται, εφαρμόζεται για ουσιαστικά ασυμπιεστές ροές χωρίς όμως να είναι απαραίτητο η πυκνότητα να παραμένει σταθερή.

Με το φιλτράρισμα των ασυμπιεστών εξισώσεων Navier - Stokes, είναι

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (3.14.1.4)$$

και

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \bar{v}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.14.1.5)$$

όπου τ_{ij} είναι οι *subgrid-scale* τάσεις που καθορίζονται ως εξής:

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u_i u_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (3.14.1.6)$$

Η ομοιότητα μεταξύ των φιλτραρισμένων εξισώσεων, (3.14.1.4) μέσω της εξίσωσης (3.14.1.6), και της ασυμπιεστής μορφής των εξισώσεων RANS, δηλαδή οι εξισώσεις (3.13.2.3) και (3.13.2.4), είναι εμφανής. Η σημαντικότερη διαφορά τους είναι ότι οι εξαρτώμενες μεταβλητές είναι πλέον φιλτραρισμένες ποσότητες και όχι κύριες ποσότητες, με αποτέλεσμα οι εκφράσεις για τις τυρβώδεις τάσεις να διαφέρουν.

3.14.2 Μοντέλα υπο-πλεγματοκλιμάκων (Subgrid-Scale Models)

Οι τάσεις των υπο-πλεγματοκλιμάκων οι οποίες προκύπτουν από τη διαδικασία φιλτραρίσματος αποτελούν άγνωστες ποσότητες και απαιτείται μοντελοποίηση για τον καθορισμό αυτών. Η πλειοψηφία των μοντέλων υποπλεγματοκλιμάκων που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα είναι μοντέλα τυρβώδους συνεκτικότητας (eddy viscosity models) της ακόλουθης μορφής:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3.14.2.1)$$

όπου μ_t το τυρβώδες ιξώδες υπο-πλεγματικών κλιμάκων 'subgrid-scale turbulent viscosity', και \bar{S}_{ij} είναι ο λόγος που καθορίζεται ως εξής:

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.14.2.2)$$

Στο FLUENT περιέχονται δυο μοντέλα για τον προσδιορισμό του μ_t : το μοντέλο Smagorinsky-Lilly και το μοντέλο RNG-based subgrid-scale.

3.14.3 Το μοντέλο Smagorinsky-Lilly

Το πιο βασικό από τα subgrid-scale μοντέλα προτάθηκε από τον Smagorinsky και έπειτα από τον Lilly. Στο μοντέλο Smagorinsky - Lilly, η τυρβώδης μοριακή συνεκτικότητα ορίζεται ως εξής:

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (3.14.3.1)$$

Όπου L_s είναι το μήκος μίξης για τις υποπλεγματικές κλίμακες και είναι $|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$, C_s είναι η σταθερά Smagorinsky.

Στο FLUENT, η ποσότητα L_s υπολογίζεται ως εξής:

$$L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3}) \quad (3.14.3.2)$$

όπου κ είναι η σταθερά του von Kármán, d είναι η απόσταση από το κοντινότερο τοίχωμα, και V είναι ο όγκος του υπολογιστικού κελιού.

Ο Lilly προσδιόρισε τη σταθερά C_s ίση με 0,23 από την ομογενοποιημένη ισοτροπική τύρβη στο αδρανές υπο-πεδίο. Εντούτοις, αυτή η τιμή προσδιορίστηκε για να προκαλέσει υπερβολική απόσβεση των μεγάλης κλίμακας διακυμάνσεων όταν παρουσιάζεται κύρια διάτμηση. Όταν $C_s = 0,1$ προκύπτουν καλύτερα αποτελέσματα για τα περισσότερα είδη ροών και είναι η προκαθορισμένη τιμή στο FLUENT.

3.14.4 RNG-Based Subgrid-Scale Model

Η RNG θεωρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός μοντέλου για την τυρβώδη μοριακή συνεκτικότητα υποπλεγμάτων κλιμάκων. Η διαδικασία RNG δίνει την αποτελεσματική υποπλεγματική τυρβώδη συνεκτικότητα, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, που είναι:

$$\mu_{eff} = \mu [1 + H(x)]^{1/3} \quad (3.14.4.1)$$

όπου $H(x)$ ο συντελεστής Heaviside:

$$H(x) = x, \quad x > 0$$

$$H(x) = 0, \quad x \leq 0 \quad (3.14.4.2)$$

όπου

$$x = \frac{\mu_s^2 \mu_{eff}}{\mu^3} - C \quad (3.14.4.3)$$

$$\text{και } \mu_s = (C_{rng} V^{1/3})^2 \sqrt{2 \overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}}} \quad (3.14.4.4)$$

και

$$\mu_s = (C_{rng} V^{1/3})^2 \sqrt{2 \overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}}} \quad (3.14.4.4)$$

όπου V ο όγκος του υπολογιστικού κελιού. Σύμφωνα με αυτήν τη θεωρία είναι $C_{rng} = 0.157$ και $C = 100$.

Στις ιδιαίτερα τυρβώδεις περιοχές της ροής ($\mu_t \gg \mu$), είναι $\mu_{eff} \approx \mu_s$, και το μοντέλο υποπλεγματικών τάσεων που βασίζεται στο μοντέλο RNG-based subgrid-scale εκπίπτει στο μοντέλο Smagorinsky - Lilly με μια διαφορετική σταθερά.

3.14.5 Οριακές συνθήκες για το μοντέλο LES

Οι συνιστώσες της ροής στα όρια εισόδου που χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα αποτελούνται από τυχαίες διαταραχές στα επιμέρους τμήματα της ταχύτητας όπως

$$\overline{u_i} = \langle \overline{u_i} \rangle + I \psi |\overline{u}| \quad (3.14.5.1)$$

όπου I είναι η ένταση της διακύμανσης, ψ είναι ένας (Gaussian random number) τυχαίος αριθμός του Gauss που ικανοποιεί τις ιδιότητες $\bar{\psi} = 0$ και $\sqrt{\bar{\psi^2}} = 1$.

Όταν το πλέγμα είναι αρκετά πυκνό για να επιλύσει το στρωτό υπόστρωμα, η διατμητική τάση στο τοίχωμα λαμβάνεται από την γραμμική stress-strain σχέση:

$$\frac{\bar{u}}{u_r} = \frac{\rho u_r y}{\mu} \quad (3.14.5.2)$$

Στην περίπτωση κατά την οποία το πλέγμα είναι αρκετά αραιό για την ανάλυση του γραμμικού υποστρώματος, υποτίθεται ότι το κέντρο βάρους του παρακείμενου στο κελί τοιχώματος εκπίπτει στο λογαριθμικό πεδίο του οριακού στρώματος και με αυτόν τον τρόπο εφαρμόζεται ο νόμος του τοιχώματος:

$$\frac{\bar{u}}{u_r} = \frac{1}{\kappa} \ln E \left(\frac{\rho u_r y}{\mu} \right) \quad (3.14.5.3)$$

όπου κ είναι η σταθερά του von Kármán και $E = 9.793$

3.15 Λειτουργικές Συνθήκες (Operating Conditions)

3.15.1 Γενικά για την πίεση λειτουργίας

Ο προσδιορισμός της πίεσης λειτουργίας επηρεάζει τον γενικότερο υπολογισμό με διαφορετικούς τρόπους για διαφορετικές μορφές της ροής. Αυτή η ενότητα παρουσιάζει πληροφορίες για την πίεση λειτουργίας, τη σχετικότητά της για διαφορετικές περιπτώσεις και τον τρόπο με τον οποίο τίθεται.

3.16 Η επιρροή του αριθμητικού λάθους στρογγυλοποίησης στον υπολογισμό της πίεσης σε ροές οι οποίες παρουσιάζουν μικρό αριθμό Mach

Για συμπιεστή ροή με μικρό αριθμό Mach, η συνολική πτώση πίεσης είναι μικρή σε σχέση με την απόλυτη στατική πίεση και μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από το αριθμητικό λάθος στρογγυλοποίησης. Για παράδειγμα, σε συμπιεστή ροή με αριθμό Mach $M \ll 1$, οι μεταβολές της πίεσης, Δp , συσχετίζονται με το ύψος δυναμικής πίεσης $\frac{1}{2} \gamma \rho M^2$, όπου p είναι η στατική πίεση και γ είναι ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η απλή σχέση $\Delta p / p \sim M^2$, έτσι ώστε $\Delta p / p \rightarrow 0$ καθώς $M \rightarrow 0$. Επομένως, αν δε δοθεί η απαραίτητη προσοχή, το λάθος στρογγυλοποίησης μπορεί να επηρεάσει τους υπολογισμούς της ροής για μικρό αριθμό Mach.

3.17 Πίεση λειτουργίας (Operating Pressure), Σχετική πίεση (Gauge Pressure) και Απόλυτη πίεση (Absolute Pressure)

Στο FLUENT αποφεύγεται το πρόβλημα του αριθμητικού λάθους στρογγυλοποίησης (ενότητα 3.16) με την αφαίρεση της πίεσης λειτουργίας (γενικά μια μεγάλη πίεση σχεδόν ίση με τη μέση απόλυτη πίεση της ροής) από την απόλυτη πίεση και τη χρήση του αποτελέσματος το οποίο προκύπτει και καλείται σχετική πίεση. Η σχέση μεταξύ της πίεσης λειτουργίας, της σχετικής πίεσης και της απόλυτης πίεσης παρουσιάζεται παρακάτω. Η απόλυτη πίεση είναι απλά το άθροισμα της πίεσης λειτουργίας και της σχετικής πίεσης:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{op}} + P_{\text{gauge}} \quad (3.17.1)$$

Όλες οι πιέσεις που καθορίζονται, υπολογίζονται ή αναφέρονται στο FLUENT είναι πιέσεις σχετικές.

3.18 Η σημασία της πίεσης λειτουργίας

Η πίεση λειτουργίας είναι σημαντική για ασυμπίεστες ροές ιδανικού αερίου επειδή μέσω αυτής καθορίζεται άμεσα η πυκνότητα: για ένα ασυμπίεστο ιδανικό αέριο, η πυκνότητα υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση
$$p = \frac{P_{op}}{\frac{R}{M_w} T}$$

απαραίτητος ο ορθός καθορισμός της πίεσης λειτουργίας.

Η πίεση λειτουργίας είναι σημαντική για συμπιεστές ροές με μικρό αριθμό Mach επειδή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο κατά την αποφυγή αριθμητικών λαθών στρογγυλοποίησης (ή λαθών αποκοπής), όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.16. Για χρονικά εξαρτώμενες συμπιεστές ροές, είναι δυνατός ο προσδιορισμός μιας μεταβαλλόμενης πίεσης λειτουργίας αντί μιας σταθερής πίεσης λειτουργίας.

Η πίεση λειτουργίας είναι λιγότερο σημαντική για συμπιεστές ροές με υψηλό αριθμό Mach. Οι μεταβολές της πίεσης σε αυτές τις ροές είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες στις συμπιεστές ροές με μικρό αριθμό Mach και γι' αυτό το λόγο δεν υπάρχει κάποια πιθανότητα εμφάνισης του λάθους αποκοπής, καθώς επίσης δεν υπάρχει κανένας λόγος να χρησιμοποιηθεί η σχετική πίεση. Πρακτικά, συνηθίζεται η χρήση της απόλυτης πίεσης στους υπολογισμούς αυτούς. Δεδομένου ότι στο FLUENT χρησιμοποιείται πάντα η σχετική πίεση, απαιτείται η ρύθμιση της πίεσης λειτουργίας να ισούται με μηδέν έτσι ώστε η σχετική πίεση να εξισώνεται με την απόλυτη.

Αν η πυκνότητα θεωρείται σταθερή ή αν παράγεται από μια συνάρτηση της θερμοκρασίας, η πίεση λειτουργίας δε χρησιμοποιείται καθόλου.

Τέλος η προεπιλεγμένη πίεση λειτουργίας είναι 101325 Pa.

3.18.1 Καθορισμός της πίεσης λειτουργίας

Τα κριτήρια με τα οποία επιλέγεται η κατάλληλη πίεση λειτουργίας βασίζονται στο μέγεθος του αριθμού Mach της ροής και στη σχέση που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της πυκνότητας. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιείται ο ιδανικός νόμος των αερίων σε έναν υπολογισμό ασυμπίεστης ροής (π.χ. για ένα φυσικό πρόβλημα μεταφοράς), απαιτείται η χρήση μιας αντιπροσωπευτικής τιμής για την μέση πίεση της ροής.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται συνιστώμενες τιμές για την πίεση λειτουργίας σε συνάρτηση με τη σχέση που καθορίζει την πυκνότητα και τον αριθμό Mach. Υπενθυμίζεται ότι η προεπιλεγμένη πίεση λειτουργίας είναι 101325 Pa.

Πίνακας 1: Συνιστώμενες τιμές για την πίεση λειτουργίας		
Σχέση που καθορίζει την πυκνότητα	Μέγεθος αριθμού Mach	Πίεση λειτουργίας
Νόμος των ιδανικών αερίων	$M > 0.1$	0 ή \approx πίεση κύριας ροής
	$M < 0.1$	\approx πίεση κύριας ροής
Συνάρτηση της θερμοκρασίας	ασυμπίεστη ροή	δε χρησιμοποιείται
Σταθερή	ασυμπίεστη ροή	δε χρησιμοποιείται
Νόμος ασυμπίεστου ιδανικού αερίου	ασυμπίεστη ροή	\approx πίεση κύριας ροής

3.19 Οριακές Συνθήκες

Σε αυτήν την ενότητα περιγράφονται οι οριακές συνθήκες οι οποίες διατίθενται στο FLUENT. Παρέχονται λεπτομέρειες σχετικά με την εισαγωγή των κατάλληλων οριακών συνθηκών καθώς και λεπτομέρειες για τον χειρισμό των εσωτερικών ορίων.

3.19.1 Μια περίληψη για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των τιμών των ροϊκών και θερμικών μεταβλητών στα όρια του φυσικού χώρου και επομένως αποτελούν μια κρίσιμη παράμετρο κατά την προσομοίωση στο FLUENT. Η κατάλληλη διευκρίνισή τους κρίνεται ως εξαιρετικά σημαντική.

3.19.2 Διαθέσιμοι τύποι ορίων

Οι τύποι των διατιθέμενων ορίων στο FLUENT ταξινομούνται ως εξής:

- Οριακές συνθήκες για την είσοδο και έξοδο του ρευστού στο φυσικό χώρο.
 - καθορισμός της πίεσης και των παραμέτρων της τύρβης στην είσοδο (pressure inlet)
 - καθορισμός της ταχύτητας και των παραμέτρων της τύρβης στην είσοδο (velocity inlet)
 - καθορισμός της μαζικής παροχής και των παραμέτρων της τύρβης στην είσοδο (mass flow inlet)
 - καθορισμός των ροϊκών παραμέτρων για την προσομοίωση εισόδου ρευστού μέσω αγωγού (inlet vent)
 - καθορισμός των ροϊκών παραμέτρων για την προσομοίωση εισόδου ρευστού στο υπολογιστικό πεδίο μέσω εργοστροβιλομηχανής αερίων (intake fan)
 - καθορισμός της στατικής πίεσης κατά την έξοδο (pressure outlet)
 - καθορισμός της στατικής πίεση στο απομακρυσμένο πεδίο (pressure far field)
 - Επιβολή μηδενικής κάθετης κλίσης στην έξοδο για όλες τις ροϊκές παραμέτρους εκτός της πίεσης και χρησιμοποιείται για πλήρως ανεπτυγμένες ροές (outflow)

- Καθορισμός των παραμέτρων της ροής για έξοδο της ροής σε αγωγό (outlet vent)
 - Καθορισμός των παραμέτρων της ροής για έξοδο της ροής σε εργοστροβιλομηχανή αερίων (exhaust fan).
- Οριακές συνθήκες για τον ορισμό τοιχωμάτων, επαναλαμβανόμενων ορίων και πολικής συμμετρίας:
 - Ορισμός μιας συνοριακής περιοχής ως τοίχωμα (wall boundary condition)
 - Ορισμός συνοριακής περιοχής ως συμμετρικής (symmetry boundary condition)
 - Ορισμός συνοριακής περιοχής ως περιοδικής (periodic boundary condition)
 - Ορισμός συνοριακής περιοχής ως αξονοσυμμετρικής (axisymmetric boundary condition)
- Εσωτερικές ζώνες στο υπολογιστικό πεδίο:
 - Καθορισμός περιοχής του πεδίου ως καταλαμβανόμενης από ρευστό (fluid zone)
 - Καθορισμός των στερεών περιοχών του πεδίου (solid zone)
- Εσωτερικές οριακές συνθήκες:
 - εσωτερική οριακή συνθήκη προσομοίωσης ανεμιστήρα στο ροϊκό πεδίο (fan)
 - εσωτερική οριακή συνθήκη προσομοίωσης ενός στοιχείου εναλλαγής θερμότητας στο ροϊκό πεδίο (radiator)
 - εσωτερική οριακή συνθήκη προσομοίωσης τοποθέτησης στο πεδίο πορώδους μεμβράνης (porous jump)
 - εσωτερικό τοίχωμα στο πεδίο

(Οι εσωτερικές οριακές συνθήκες επιφάνειας καθορίζονται στις επιφάνειες των κελιών, με αποτέλεσμα να μην έχουν πεπερασμένο πάχος και παρέχουν μια μεθοδολογία για την εισαγωγή μιας βηματικής μεταβολής στις ιδιότητες του πεδίου. Οι οριακές συνθήκες αυτές χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή φυσικών μοντέλων τα οποία εξομοιώνουν ανεμιστήρες, λεπτές πορώδεις μεμβράνες και στοιχεία εναλλαγής θερμότητας. Η εφαρμογή του εσωτερικού τύπου δεν απαιτεί από το χρήστη την εισαγωγή επιπλέον δεδομένων.)

Σε αυτήν την ενότητα, περιγράφονται οι οριακές συνθήκες, οι οποίες αναφέρονται παραπάνω, ενώ παρέχονται διευκρινίσεις για τον τρόπο με τον οποίο αυτές τίθενται καθώς και πληροφορίες όσον αφορά την κατάλληλη επιλογή τους ανάλογα με το πρόβλημα (για το πότε είναι πιο κατάλληλη η χρήση αυτών).

3.19.3 Είσοδος και έξοδος ροής

Στο FLUENT παρέχεται ένα ευρύ φάσμα οριακών συνθηκών σύμφωνα με τις οποίες καθορίζεται ο τρόπος με τον οποίο το ρευστό εισέρχεται και εξέρχεται μέσα από το πεδίο λύσης. Αυτή η ενότητα περιλαμβάνει πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται κάθε τύπος από τις οριακές συνθήκες (με στόχο την επιλογή της πιο κατάλληλης στην εκάστοτε εφαρμογή), καθώς και πληροφορίες για το τι απαιτείται για την καθεμιά. Επίσης παρέχονται συστάσεις για τον καθορισμό των τυρβωδών παραμέτρων κατά την είσοδο.

3.19.4 Χρήση των οριακών συνθηκών ροής

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζεται μια επισκόπηση των ορίων της ροής στο FLUENT και ο τρόπος με τον οποίο αυτά χρησιμοποιούνται.

Στο FLUENT παρέχονται 10 είδη τύπων οριακών ζωνών για τον καθορισμό της ροής κατά την είσοδο και κατά την έξοδο.

Στο FLUENT, οι οριακές συνθήκες στην είσοδο και στην έξοδο είναι οι ακόλουθες:

- Οι οριακές συνθήκες ταχύτητας κατά την είσοδο χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ταχύτητας και των βαθμωτών ιδιοτήτων της ροής στα όρια της εισόδου.

- Οι οριακές συνθήκες πίεσης κατά την είσοδο χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της συνολικής στατικής πίεσης και άλλων βαθμωτών ποσοτήτων στα όρια της εισόδου.
- Οι οριακές συνθήκες παροχής μάζας κατά την είσοδο χρησιμοποιούνται για συμπίεστες ροές και καθορίζουν τη μαζική παροχή στην είσοδο. Οι οριακές αυτές συνθήκες δεν χρησιμοποιούνται σε ασυμπίεστες ροές επειδή στην περίπτωση κατά την οποία η πυκνότητα είναι σταθερή, η μαζική ροή καθορίζεται από τις οριακές συνθήκες ταχύτητας κατά την είσοδο.
- Οι οριακές συνθήκες πίεσης κατά την έξοδο χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της στατικής πίεσης στις εξόδους ροής (και επίσης άλλων βαθμωτών μεταβλητών, για την περίπτωση της αναστροφής της ροής). Στην περίπτωση κατά την οποία εμφανίζεται αναστροφή της ροής κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων για την επίλυση, η χρήση της οριακής συνθήκης αυτής προτιμάται περισσότερο σε σχέση με μια συνθήκη εκροής γιατί συνήθως προκαλεί ένα καλύτερο βαθμό σύγκλισης.
- Οι οριακές συνθήκες πίεσης μακριά από το πεδίο χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση ενός ελεύθερου ρεύματος συμπίεστης ροής στο απομακρυσμένο πεδίο (δηλαδή μακριά από το πεδίο), με τον αριθμό Mach του ελεύθερου ρεύματος και τις στατικές συνθήκες να είναι καθορισμένες. Αυτός ο τύπος οριακών συνθηκών χρησιμοποιείται μόνο σε συμπίεστες ροές.
- Οι οριακές συνθήκες εκροής χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των εξόδων ροής όπου οι λεπτομέρειες για την ταχύτητα του ρευστού και για την πίεση δεν είναι γνωστές πριν από τη λύση του ροϊκού προβλήματος. Οι οριακές συνθήκες αυτές είναι κατάλληλες σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η ροή στην έξοδο είναι κοντά σε μια πλήρως αναπτυγμένη κατάσταση, καθώς η οριακή συνθήκη εκροής προϋποθέτει μια μηδενική κάθετη κλίση για όλες τις ροϊκές μεταβλητές εκτός της πίεσης. Αυτός ο τύπος οριακών συνθηκών δε προτείνεται για υπολογισμούς συμπίεστης ροής.

- Οι οριακές συνθήκες για την είσοδο στο πεδίο μέσω αγωγού χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση ενός της χρήσης αγωγού για τον οποίο απαιτείται η γνώση του συντελεστή τοπικών απωλειών, της κατεύθυνσης της ροής, της περιβαλλοντικής συνολικής πίεσης (κατά την είσοδο) και της θερμοκρασίας.
- Οι οριακές συνθήκες για την είσοδο μέσω ανεμιστήρα χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της χρήσης μιας εξωτερικής εργοστροβιλομηχανής αερίων μέσω της οποίας εισάγεται το ρευστό στο υπολογιστικό πεδίο και για την οποία είναι γνωστά τα μεγέθη της προσαύξησης της πίεσης, της κατεύθυνσης της ροής, της περιβαλλοντικής συνολικής πίεσης (εισόδου) και της θερμοκρασίας.
- Οι οριακές συνθήκες εξόδου μέσω αγωγού χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της χρήσης ενός αγωγού απαγωγής για το οποίο πρέπει να καθοριστούν ο συντελεστής τοπικών απωλειών, η περιβαλλοντική (καταθλιπτική) στατική πίεση και η θερμοκρασία.
- Οι οριακές συνθήκες για την προσαγωγή του ρευστού σε εργοστροβιλομηχανή αερίων χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση μιας τέτοιας συσκευής για την οποία καθορίζονται η προσαύξηση της πίεσης και η περιβαλλοντική καταθλιπτική στατική πίεση.

3.20 Καθορισμός των τυρβωδών παραμέτρων

Στο FLUENT, όταν η ροή εισέρχεται στο πεδίο μέσω μιας εισόδου, μιας εξόδου, ή μέσω ενός απομακρυσμένου ορίου, απαιτείται ο προσδιορισμός των μεταφερμένων τυρβωδών ποσοτήτων. Σε αυτήν την ενότητα περιγράφεται ποιες ποσότητες απαιτούνται για συγκεκριμένα τυρβώδη μοντέλα και ο τρόπος με τον οποίο αυτές οι ποσότητες διευκρινίζονται. Επίσης παρέχονται γενικές οδηγίες για τον πιο κατάλληλο τρόπο καθορισμού των οριακών τιμών κατά την εισροή.

3.20.1 Προσδιορισμός των τυρβωδών ποσοτήτων με τη χρήση διανομών από το χρήστη

Αν είναι σημαντική η ακριβής αναπαράσταση ενός οριακού στρώματος ή μιας πλήρως αναπτυγμένης τυρβώδους ροής σε μια είσοδο, είναι απαραίτητη η ακριβής διευκρίνιση των ποσοτήτων της τύρβης με τη χρήση ενός αρχείου διανομής (προφίλ) από πειραματικά δεδομένα ή από εμπειρικούς τύπους (εμπειρικές εξισώσεις). Στην περίπτωση κατά την οποία διατίθεται μια αναλυτική περιγραφή της διανομής και όχι οι πειραματικές τιμές, είναι δυνατή είτε η χρήση αυτής της αναλυτικής περιγραφής για τη δημιουργία ενός αρχείου διανομής, είτε η δημιουργία μιας συνάρτησης από το χρήστη για την παραγωγή των αναγκαίων πληροφοριών οι οποίες αφορούν τις οριακές συνθήκες κατά την είσοδο.

3.20.2 Ομοιόμορφος προσδιορισμός των τυρβωδών ποσοτήτων

Σε μερικές περιπτώσεις, είναι κατάλληλος ο προσδιορισμός μιας ομοιόμορφης τιμής της τυρβώδους ποσότητας στο όριο όπου λαμβάνει χώρα η εισροή του ρευστού. Μερικά τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι περιπτώσεις ρευστού το οποίο εισέρχεται σε έναν αγωγό, τα όρια μακριά από το πεδίο, ή ακόμα και οι πλήρως αναπτυγμένες τυρβώδεις ροές σε αγωγούς όπου οι ακριβείς διανομές των τυρβωδών ποσοτήτων είναι άγνωστες.

Στις περισσότερες τυρβώδεις ροές, ο ρυθμός παραγωγής της τύρβης είναι υψηλότερος μέσα σε στρώματα διάτμησης τα οποία εισέρχονται στο πεδίο από τα όρια της, καθιστώντας το αποτέλεσμα του υπολογισμού σχετικά ανεξάρτητο από τις τιμές των οριακών συνθηκών κατά την είσοδο. Εντούτοις, απαιτείται προσοχή ώστε οι οριακές τιμές να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές για να μην αλλοιωθεί η λύση και να επιτευχθεί η σύγκλιση. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των εξωτερικών ροών κατά τις οποίες μη φυσικές μεγάλες τιμές του πραγματικού ιξώδους στο ελεύθερο ρεύμα μπορούν να οδηγήσουν τα οριακά στρώματα να εκταθούν πέραν του πραγματικού χώρου τον οποίο θα κατελάμβαναν.

Η χρήση των ανωτέρω μεθόδων προσδιορισμού της τύρβης για την εισαγωγή ομοιόμορφων σταθερών τιμών αντί της χρήσης διανομών είναι δυνατή. Εναλλακτικά, υπάρχει η δυνατότητα του προσδιορισμού των ποσοτήτων της τύρβης με τη βοήθεια

καταλληλότερων ποσοτήτων όπως η ένταση της τύρβης, ο λόγος του τυρβώδους ιξώδους, η υδραυλική διάμετρος και η κλίμακα μήκους της τύρβης.

3.20.3 Ένταση της Τύρβης

Η ένταση της Τύρβης, I , ορίζεται ως ο λόγος της μέσης τετραγωνικής τιμής των διακυμάνσεων της ταχύτητας, u' , προς τη μέση ταχύτητα της ροής, u_{avg} .

Η ένταση της τύρβης της τάξης του 1% (ή λιγότερο του 1%) θεωρείται γενικά χαμηλή και οι εντάσεις της τύρβης της τάξης του 10% (και περισσότερο) θεωρούνται υψηλές. Μια ικανοποιητική εκτίμηση της έντασης της τύρβης στο όριο εισόδου παρέχεται από εξωτερικά, πειραματικά δεδομένα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κατά την οποία εξομοιώνεται μια αεροσήραγγα, η ένταση της τύρβης στο ελεύθερο ρεύμα είναι συνήθως διαθέσιμη (γνωστή) από τις προδιαγραφές της συγκεκριμένης αεροσήραγγας. Σε σύγχρονες αεροσήραγγες χαμηλής τύρβης, η ένταση της τύρβης του ελεύθερου ρεύματος μπορεί να είναι ακόμα και 0.05%.

Στις εσωτερικές ροές, η ένταση της τύρβης στις εισόδους εξαρτάται ολοκληρωτικά από την ανάντη εξέλιξη της ροής. Σε μια υπό ανάπτυξη και ελεύθερη ροή ανάντη, αντιστοιχεί μια σχετικά χαμηλή ένταση της τύρβης. Στην περίπτωση κατά την οποία η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη, η ένταση της τύρβης μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο και 10%. Η ένταση της τύρβης στον πυρήνα μιας πλήρως αναπτυγμένης ροής σε κλειστούς αγωγούς δύναται να υπολογιστεί με την ακόλουθη σχέση η οποία προέρχεται από προσαρμογή πειραματικών δεδομένων για ροές σε σωλήνες:

$$I \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16 (Re_{D_H})^{-1/8} \quad (3.20.3.1)$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, για έναν αριθμό Reynolds ίσο με 50000, η ένταση της τύρβης προκύπτει 4%.

3.20.4 Τυρβώδης Κλίμακα Μήκους και Υδραυλική Διάμετρος

Η κλίμακα μήκους της τύρβης, l , είναι μια φυσική ποσότητα που σχετίζεται με το μέγεθος των μεγάλων στροβίλων οι οποίοι περιέχουν την ενέργεια στις τυρβώδεις ροές.

Σε πλήρως αναπτυγμένες ροές σε αγωγούς, η κλίμακα μήκους της τύρβης, l , περιορίζεται από το μέγεθος του αγωγού, αφού οι τυρβώδεις στρόβιλοι δε δύναται να είναι μεγαλύτεροι σε μέγεθος από τον αγωγό. Μια προσεγγιστική σχέση μεταξύ της τυρβώδους κλίμακας μήκους και του φυσικού μεγέθους του αγωγού είναι:

$$l = 0.07L \quad (3.20.4.1)$$

όπου L είναι η χαρακτηριστική διάσταση του αγωγού. Ο συντελεστής 0.07 βασίζεται στη μέγιστη τιμή του μήκους μίξης σε πλήρως αναπτυγμένη τυρβώδη ροή σε σωλήνα, με L τη διάμετρο του σωλήνα. Σε ένα κανάλι μη κυκλικής διατομής, το L αντιστοιχεί στην υδραυλική διάμετρο.

Αν το χαρακτηριστικό μήκος της τύρβης παράγεται από ένα εμπόδιο στη ροή, όπως από μια διατρυπημένη πλάκα, είναι καταλληλότερη η αντιστοίχιση της κλίμακας μήκους της τύρβης με το χαρακτηριστικό μήκος του εμποδίου και όχι με το μέγεθος (μήκος) του αγωγού.

Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι η σχέση (3.20.4.1), η οποία συσχετίζει τη φυσική διάσταση (L) με την κλίμακα μήκους της τύρβης (l), δεν εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις. Ωστόσο, για τις περισσότερες από αυτές αποτελεί μια ικανοποιητική προσέγγιση.

Παρακάτω παρέχονται γενικές οδηγίες για την επιλογή του χαρακτηριστικού μήκους L ή της κλίμακας μήκους της τύρβης l σε συνάρτηση με το είδος των ροών:

- Για πλήρως αναπτυγμένες εσωτερικές ροές, συνίσταται η επιλογή της μεθόδου καθορισμού της **έντασης της τύρβης και της υδραυλικής διαμέτρου** με ορισμό της υδραυλικής διαμέτρου ($L = D_H$) στο πεδίο της **Υδραυλικής Διαμέτρου**.
- Για κατάντη ροές περιστρεφόμενων πτερυγίων, διατρυπημένων ελασμάτων κ.λ.π., συνίσταται η επιλογή της μεθόδου καθορισμού της **έντασης της τύρβης και της υδραυλικής διαμέτρου** και ο καθορισμός του πλάτους του διακένου ως το χαρακτηριστικό μήκος της ροής L .

- Για περιορισμένες από τοιχώματα ροές στις εισόδους των οποίων παρουσιάζονται τυρβώδη οριακά στρώματα, συνίσταται η επιλογή της μεθόδου καθορισμού της έντασης και μήκους κλίμακας της τύρβης και η χρήση του πάχους του οριακού στρώματος, δ_{gg} , για τον υπολογισμό της τυρβώδους κλίμακας μήκους, l , από τη σχέση:

$$l = 0.4\delta_{gg} \quad (3.20.4.2)$$

Η τιμή αυτή του l εισάγεται στο πεδίο της **Τυρβώδους Κλίμακας Μήκους**.

3.20.5 Λόγος του Τυρβώδους Ιξώδους

Ο λόγος του τυρβώδους ιξώδους, μ_t / μ , σχετίζεται άμεσα με τον τυρβώδη αριθμό Reynolds ($Re_t = \frac{k^2}{\epsilon \nu}$). Ο τυρβώδης αριθμός Reynolds είναι μεγάλος (της τάξης του 100 ως 1000) σε οριακά στρώματα με υψηλό αριθμό Reynolds, σε στρώματα διάτμησης και σε πλήρως αναπτυγμένες ροές σε αγωγούς. Ωστόσο, στα όρια του ελευθέρου ρεύματος των περισσότερων εξωτερικών ροών, ο λόγος μ_t / μ είναι αρκετά μικρός. Τυπικά, οι τυρβώδεις παράμετροι τίθενται κατά τέτοιο τρόπο ώστε

$$1 < \mu_t / \mu < 10.$$

Για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων τυρβωδών ποσοτήτων συναρτήσει του λόγου του τυρβώδους ιξώδους, συνίσταται η επιλογή καθορισμού του λόγου του τυρβώδους ιξώδους για το μοντέλο Spalart-Allmaras, ή η επιλογή καθορισμού της έντασης της τύρβης και του λόγου των ιξωδών για τα μοντέλα $k-\epsilon$, $k-w$ και το μοντέλο RSM.

3.21 Σχέσεις για τον υπολογισμό των τυρβωδών ποσοτήτων

Για να προκύψουν οι τιμές των μεταφερομένων τυρβωδών ποσοτήτων από γνωστές ποσότητες όπως είναι η ένταση της τύρβης I , το χαρακτηριστικό μήκος L ή ο λόγος του τυρβώδους ιξώδους μ_t / μ , είναι απαραίτητη χρήση εμπειρικών σχέσεων. Διάφορες χρήσιμες εξισώσεις, οι περισσότερες από τις οποίες χρησιμοποιούνται στο FLUENT, παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.21.1 Υπολογισμός του Τροποποιημένου Τυρβώδους Ιξώδους από την Ένταση της Τύρβης και την Κλίμακα Μήκους

Για το μοντέλο Spalart-Allmaras, το τροποποιημένο τυρβώδες ιξώδες, $\tilde{\nu}$, προκύπτει συναρτήσει της έντασης της τύρβης, I , και της κλίμακα του μήκους, l , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\tilde{\nu} = \sqrt{\frac{3}{2}} u_{avg} l I \quad (3.21.1.1)$$

Η εξίσωση αυτή χρησιμοποιείται στο FLUENT όταν εμπλέκεται η μέθοδος προσδιορισμού των τυρβωδών ποσοτήτων δίδοντας την ένταση της τύρβης και την υδραυλική διάμετρο παράλληλα με την επιλογή του μοντέλου Spalart-Allmaras. Η τυρβώδης κλίμακα μήκους l λαμβάνεται από την εξίσωση (3.20.4.1).

3.21.2 Υπολογισμός της Τυρβώδους Κινητικής Ενέργειας από την Ένταση της Τύρβης

Η σχέση μεταξύ της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (k) και της έντασης της τύρβης (I) είναι:

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2 \quad (3.21.2.1)$$

όπου u_{avg} είναι η μέση ταχύτητα της ροής.

Η τελευταία σχέση χρησιμοποιείται στο FLUENT στην περίπτωση κατά την οποία ο καθορισμός των τυρβωδών ποσοτήτων γίνεται παρέχοντας την ένταση της τύρβης και την υδραυλική διάμετρο ή τη κλίμακα μήκους ή εναλλακτικά το λόγο των ιξωδών αντί του ρητού καθορισμού των τιμών για το k και το ϵ .

3.21.3 Υπολογισμός του Τυρβώδους Βαθμού Σκέδασης συναρτήσει της Κλίμακας Μήκους

Αν η τυρβώδης κλίμακα μήκους, l , είναι γνωστή, η σκέδαση της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, ϵ , υπολογίζεται με τη σχέση:

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (3.21.3.1)$$

όπου C_{μ} είναι μια εμπειρική σταθερά η οποία καθορίζεται από το τυρβώδες μοντέλο (και προσεγγιστικά ισούται με 0.09). Η διαδικασία υπολογισμού του l αναφέρεται παραπάνω.

Η σχέση (3.21.3.1) χρησιμοποιείται στο FLUENT όποτε επιλέγεται η μέθοδος κατά την οποία δίδονται η ένταση της τύρβης και η υδραυλική Διάμετρος ή η μέθοδος στην οποία παρέχονται από το χρήστη οι τιμές της εντάσεως της τύρβης και η αντίστοιχη κλίμακα μήκους αντί του ρητού καθορισμού των τιμών για το k και το ε .

3.21.4 Υπολογισμός των συνιστωσών των τάσεων Reynolds από την Τυρβώδη Κινητική Ενέργεια

Ο προσδιορισμός των τάσεων Reynolds πραγματοποιείται προσεγγιστικά από τις αντίστοιχες οριακές τιμές του k στην περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιείται το μοντέλο RSM και οι τάσεις αυτές δεν καθορίζονται ρητά στην είσοδο με τη χρήση της επιλογής κατά την οποία δίδονται οι συνιστώσες των τάσεων Reynolds. Η τύρβη λαμβάνεται ως ιστροπική έτσι ώστε

$$\overline{u_i' u_j'} = 0 \quad (3.21.4.1)$$

και

$$\overline{u_{\alpha}' u_{\alpha}'} = \frac{2}{3} k \quad (3.21.4.2)$$

3.21.5 Προσδιορισμός της τύρβης κατά την είσοδο για το μοντέλο LES

Η τιμή της έντασης της τύρβης η οποία καθορίζεται σε μια είσοδο του ρευστού όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο LES, αξιοποιείται για τη δημιουργία μιας τυχαίας διαταραχής του στιγμιαίου πεδίου ταχύτητας εισόδου και δεν καθορίζει μια προσομοιωμένη τυρβώδη ποσότητα. Αντίθετα, οι στοχαστικές συνιστώσες της ροής στο όριο εισόδου συνυπολογίζονται με υπέρθεσή των τυχαίων διαταραχών στις διακριτές συνιστώσες της ταχύτητας.

3.22 Οριακές συνθήκες ταχύτητας κατά την είσοδο

Οι οριακές συνθήκες ταχύτητας κατά την είσοδο χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ταχύτητας της ροής, μαζί με όλες τις σχετικές βαθμωτές ιδιότητες της ροής, στις εισόδους της ροής. Οι συνολικές (ή σε κατάσταση στασιμότητας) ιδιότητες της ροής δεν είναι προκαθορισμένες και έτσι αποκτούν οποιαδήποτε τιμή είναι απαραίτητη για να παρέχουν την καθορισμένη κατανομή της ταχύτητας.

Αυτή η οριακή συνθήκη προορίζεται για ασυμπίεστες ροές και η χρήση της στις συμπιεστές ροές οδηγεί σε ένα μη αποδεκτό φυσικό αποτέλεσμα επειδή επιτρέπει στους όρους στασιμότητας να αυξάνονται απροσδιόριστα. Επίσης δεν πρέπει να τοποθετείται ταχύτητα εισόδου πλησίον ενός στερεού εμποδίου, αφού σε μια τέτοια περίπτωση οι ιδιότητες στασιμότητας εισροής γίνονται ιδιαίτερα ανομοιόμορφες.

Σε ειδικές περιπτώσεις, μια ταχύτητα εισόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο FLUENT για τον καθορισμό της ταχύτητας ροής στις εξόδους ροής (οι βαθμωτές ποσότητες δεν εισάγονται σε τέτοιες περιπτώσεις). Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητο να εξασφαλισθεί η συνθήκη της συνέχειας στο υπολογιστικό πεδίο.

3.22.1 Απαιτούμενα δεδομένα για την οριακή συνθήκη εισόδου κατά την οποία καθορίζεται η ταχύτητα.

3.22.1.1 Περίληψη

Ο χρήστης εισάγει τις ακόλουθες πληροφορίες για μια τέτοια οριακή συνθήκη εισόδου:

- Το εύρος ταχύτητας και την κατεύθυνση ή τις συνιστώσες της ταχύτητας
- Την ταχύτητα περιδίνισης (για 2-D αξονοσυμμετρικά προβλήματα με περιδίνιση)
- Τη θερμοκρασία (για ενεργειακούς υπολογισμούς)
- Την σχετική πίεση εκροής (για υπολογισμούς με πεπλεγμένους επιλύτες)

- Τις τυρβώδεις παραμέτρους (για υπολογισμούς οι οποίοι σχετίζονται με την τύρβη)
- Τις παραμέτρους ακτινοβολίας (για προσομοιώσεις στις οποίες γίνεται υπολογισμός της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία και χρησιμοποιείται ανάλογο μοντέλο)
- Τα κλάσματα μάζης των μεταφερόμενων χημικών ειδών (για αντιδράσεις ροές)
- Τα κλάσματα μάζης και ο βαθμός προόδου (για προαναμεμιγμένες η μερικώς προαναμεμιγμένες ροές καύσης)
- Οριακές συνθήκες των διακριτών φάσεων (για υπολογισμούς διακριτής φάσης)
- Πολυφασικές οριακές συνθήκες (για γενικούς πολυφασικούς υπολογισμούς)

3.22.2 Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στα όρια ταχύτητας κατά την είσοδο

Οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις (στο SI) για τις οριακές συνθήκες ταχύτητας κατά την είσοδο είναι οι ακόλουθες:

Θερμοκρασία	300
Εύρος ταχύτητας	0
X-συνιστώσα της κατεύθυνσης της ροής	1
Y-συνιστώσα της κατεύθυνσης της ροής	0
Z-συνιστώσα της κατεύθυνσης της ροής	0
X-ταχύτητα	0
Y- ταχύτητα	0
Z- ταχύτητα	0
Τυρβώδης κινητική ενέργεια	1
Τυρβώδης ρυθμός σκέδασης	1
Ατμοσφαιρική πίεση εκροής	0

Πίνακας 2: Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις (στο S.I.) για τις οριακές συνθήκες ταχύτητας κατά την είσοδο

3.22.3 Υπολογιστική διαδικασία στα όρια ταχύτητας κατά την είσοδο

Στο FLUENT, τα δεδομένα των οριακών συνθηκών στις εισόδους ταχύτητας χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μαζικής παροχής στο πεδίο και για τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής της ορμής, της ενέργειας και των ειδών μέσω της εισόδου. Αυτή η ενότητα περιγράφει τους προαναφερθέντες υπολογισμούς για την περίπτωση της ροής που εισέρχεται στο πεδίο μέσω του ορίου της ταχύτητας εισόδου και για τις περιπτώσεις εκείνες στις οποίες η ροή εξέρχεται από το πεδίο μέσω του ορίου της ταχύτητας εισόδου.

3.22.3.1 Επεξεργασία των συνθηκών ταχύτητας εισόδου στις εισόδους ροής

Όταν η οριακή συνθήκη της ταχύτητας εισόδου καθορίζει τη ροή η οποία εισέρχεται στο φυσικό πεδίο του μοντέλου, το FLUENT χρησιμοποιεί και τις συνιστώσες της ταχύτητας και τις βαθμωτές ποσότητες οι οποίες έχουν καθορισθεί ως οριακές συνθήκες για τον υπολογισμό του ρυθμού της μαζικής παροχής στην είσοδο και των ρυθμών μεταβολής της ορμής, της ενέργειας και των χημικών ειδών.

Ο ρυθμός παροχής μάζας ο οποίος εισέρχεται σε ένα κελί ρευστού παρακείμενο σε ένα όριο ταχύτητας εισόδου υπολογίζεται ως εξής:

$$\dot{m} = \int \rho \vec{u} \cdot d\vec{A} \quad (3.22.3.1.1)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η κάθετος συνιστώσα της ταχύτητας στην επιφάνεια του όγκου ελέγχου συνεισφέρει στη μαζική παροχής στην είσοδο.

3.22.3.2 Επεξεργασία των συνθηκών ταχύτητας κατά την είσοδο στις εξόδους ροής

Μερικές φορές μια συνθήκη ταχύτητας εισόδου χρησιμοποιείται εκεί όπου η ροή εξέρχεται από το φυσικό πεδίο. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για παράδειγμα, όταν είναι γνωστή η μαζική παροχή διαμέσου μιας εξόδου ή όταν η δεδομένη μαζική παροχή πρέπει να επιβληθεί.

Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να εξασφαλισθεί η αρχή διατήρησης της μάζας στο πεδίο.

Στο μεμονωμένο επιλύτη, όταν η ροή εξέρχεται από το πεδίο μέσω του ορίου της ταχύτητας εισόδου, το FLUENT χρησιμοποιεί την τιμή της οριακής συνθήκης για τη συνιστώσα της ταχύτητας στην περιοχή εξόδου της ροής. Δεν χρησιμοποιεί άλλες οριακές συνθήκες οι οποίες έχουν εισαχθεί. Αντ' αυτού, όλες οι συνθήκες ροής εκτός από τη κάθετο συνιστώσα της ταχύτητας θεωρείται ότι είναι ίσες με αυτές του ανάντη κελιού.

Στον πεπλεγμένο επιλύτη, αν η ροή εξέρχεται από το πεδίο σε οποιαδήποτε επιφάνεια στο όριο, η επιφάνεια αυτή θα αντιμετωπιστεί ως έξοδος πίεσης με την πίεση να ορίζεται στο ίση με αυτή που έχει εισαχθεί στο πεδίο της σχετικής πίεσης εκροής.

3.23 Υπολογισμός πυκνότητας

Η πυκνότητα στο επίπεδο της εισόδου είναι είτε σταθερή είτε υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, της πίεσης ή/και των κλασμάτων μάζας των μεταφερόμενων στο πεδίο ειδών, όπου τα κλάσματα μάζας είναι ίσα με τις τιμές οι οποίες εισάγονται ως συνθήκες εισόδου.

3.24 Οριακές συνθήκες εισόδου στις οποίες καθορίζεται η ροή μάζας

Οι οριακές συνθήκες παροχής μάζας μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο FLUENT για τον προσδιορισμό μιας δεδομένης μαζικής παροχής ή μιας κατανομής αυτής στην είσοδο. Φυσικά, ο προσδιορισμός της μαζικής παροχής επιτρέπει στη συνολική πίεση να μεταβάλλεται συναρτήσει της εσωτερικής λύσης. Αυτό είναι σε αντιδιαστολή με την οριακή συνθήκη πίεσης κατά την είσοδο, όπου η συνολική πίεση καθορίζεται ενώ η ροή μάζας μεταβάλλεται.

Η μαζική παροχή κατά την είσοδο συχνά χρησιμοποιείται όταν κρίνεται πιο αναγκαία η αντιστοίχιση μιας δεδομένης μαζικής παροχής στο ρεύμα εισόδου σε σχέση με την εφαρμογή μιας συνολικής πίεσης σε αυτό.

Η χρήση της οριακής συνθήκης για την επιβολή μιας συνολικής πίεσης στην είσοδο ίσως οδηγήσει σε μια πιο αργή σύγκλιση. Έτσι, αν είναι αποδεκτοί και οι δύο τύποι οριακών συνθηκών ο καθορισμός της μαζικής παροχής συνίσταται.

Σε ασυμπίεστες ροές δεν είναι απαραίτητη η χρήση της μαζικής παροχής στην είσοδο επειδή όταν η πυκνότητα είναι σταθερή, οι οριακές συνθήκες ταχύτητας στην είσοδο θα οδηγήσουν στο ίδιο αποτέλεσμα υπολογίζοντας τη μαζική παροχή.

3.24.1 Εισαγωγή στην οριακή συνθήκη εισόδου όπου ορίζεται η μαζική παροχή.

3.24.1.1 Περίληψη

Για την οριακή συνθήκη της μαζικής παροχής στην είσοδο εισάγονται οι ακόλουθες πληροφορίες:

- Η μαζική παροχή

- Η συνολική θερμοκρασία (στασιμότητας)
- Η στατική πίεση
- Η κατεύθυνση ροής
- Οι παράμετροι της τύρβης (για τυρβώδεις υπολογισμούς)
- Οι παράμετροι της ακτινοβολίας όταν χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ακτινοβολίας
- Τα κλάσματα μάζης των χημικών ειδών
- Τα κλάσματα μίξης (για υπολογισμούς προαναμεμιγμένης ή μερικώς προαναμεμιγμένης καύσης)
- Ο βαθμός προόδου (για υπολογισμούς προαναμεμιγμένης ή μερικώς προαναμεμιγμένης καύσης)
- Οι οριακές συνθήκες διακριτής φάσης (για υπολογισμούς διακριτής φάσης)
- Πολυφασικές οριακές συνθήκες (για γενικούς πολυφασικούς υπολογισμούς)

3.24.2 Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στα όρια εισόδου της παροχής μάζας

Οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις (στο SI) για τις οριακές συνθήκες ροής μάζας κατά την είσοδο είναι οι ακόλουθες:

Μαζική παροχή	1
Συνολική θερμοκρασία	300
Υπερηχητική/αρχική σχετική πίεση	0
X-συνιστώσα της κατεύθυνσης της ροής	1
Y-συνιστώσα της κατεύθυνσης της ροής	0
Z-συνιστώσα της κατεύθυνσης της ροής	0
Τυρβώδης κινητική ενέργεια	1
Βαθμός σκέδασης της τύρβης	1

Πίνακας 3: Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις (στο S.I.) για τις οριακές συνθήκες μαζικής παροχής κατά την είσοδο

3.25 Υπολογιστική διαδικασία στα όρια της παροχής μάζας εισόδου

Όταν οι οριακές συνθήκες μαζικής παροχής χρησιμοποιούνται για μια ζώνη εισόδου, υπολογίζεται μια ταχύτητα για κάθε επιφάνεια σε αυτή τη ζώνη η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ρυθμών μεταβολής όλων των σχετικών μεταβλητών της λύσης στο πεδίο. Σε κάθε επανάληψη, η υπολογισμένη ταχύτητα ρυθμίζεται έτσι ώστε να ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας.

Για τον υπολογισμό αυτής της ταχύτητας, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα για τη μαζική παροχή, για την κατεύθυνση της ροής, για τη στατική πίεση και για τη συνολική θερμοκρασία.

Υπάρχουν δύο τρόποι για τον προσδιορισμό της μαζικής παροχής. Ο πρώτος καθορίζει τη συνολική μαζική παροχή \dot{m} , για την είσοδο. Ο δεύτερος διευκρινίζει τη μαζική

παροχή ανά μονάδα επιφάνειας, ρu_n . Αν καθορίζεται μια συνολική μαζική παροχή, το FLUENT τη μετατρέπει εσωτερικά σε μια ομοιόμορφη μαζική παροχή διαιρώντας τη με τη συνολική επιφάνεια εισόδου σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho u_n = \frac{\dot{m}}{A} \quad (3.25.1)$$

Αν χρησιμοποιηθεί η επιλογή του άμεσου προσδιορισμού της μαζικής παροχής, αυτή δύναται να μεταβάλλεται στο όριο με τη χρησιμοποίηση αρχείων διανομής ή καθορισμένων από το χρήστη συναρτήσεων (UDF). Αν επίσης διευκρινίζεται η μέση μαζική παροχή (είτε ρητά από το χρήστη είτε αυτόματα από το FLUENT), τότε αυτή χρησιμοποιείται για τη διόρθωση της κατανομής της μαζικής παροχής, με τρόπο ανάλογο με αυτόν που παρουσιάστηκε παραπάνω σε αυτήν την ενότητα.

Μόλις καθοριστεί η τιμή της ποσότητας ρu_n σε μια δεδομένη επιφάνεια, πρέπει να προσδιορισθεί η πυκνότητα στην επιφάνεια, ρ , προκειμένου να προκύψει η κάθετος σε αυτή την επιφάνεια ταχύτητα, u_n . Ο τρόπος με τον οποίο η πυκνότητα λαμβάνεται εξαρτάται από το αν το ρευστό μοντελοποιείται ως ιδανικό αέριο ή όχι. Κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις εξετάζεται παρακάτω.

3.25.1 Υπολογισμοί ροής στα όρια της παροχής μάζας για ιδανικά αέρια

Αν το ρευστό είναι ιδανικό αέριο, η στατική θερμοκρασία και η στατική πίεση απαιτούνται για τον υπολογισμό την πυκνότητας:

$$p = \rho RT \quad (3.25.1.1)$$

Αν η είσοδος είναι υπερηχητική, η στατική πίεση η οποία χρησιμοποιείται είναι η τιμή που έχει τεθεί ως οριακή συνθήκη. Αν η είσοδος είναι υποηχητική, η στατική πίεση εξάγεται από τα παρακείμενα κελιά της επιφάνειας εισόδου.

Η στατική θερμοκρασία στην είσοδο υπολογίζεται μέσω της συνολικής ενθαλπίας η οποία καθορίζεται από τη συνολική θερμοκρασία που έχει τεθεί ως οριακή συνθήκη. Η συνολική ενθαλπία δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$h_o(T_o) = h(T) + \frac{1}{2}u^2 \quad (3.25.1.2)$$

με την ταχύτητα να συσχετίζεται με τη μαζική παροχή που δίδεται από την εξίσωση (3.25.1). Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.25.1.1) για τη συσχέτιση της πυκνότητας με τη (γνωστή) στατική πίεση και την (άγνωστη) θερμοκρασία, η εξίσωση (3.25.1.2) μπορεί να λυθεί για να προκύψει η στατική θερμοκρασία.

3.25.2 Υπολογισμοί ροής στα όρια της μάζας εισροής για ασυμπίστες ροές

Κατά τη μοντελοποίηση ασυμπίεστων ροών, η στατική θερμοκρασία είναι σχεδόν ίση με τη συνολική θερμοκρασία. Η πυκνότητα στην είσοδο είτε είναι σταθερή είτε υπολογίζεται άμεσα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και (προαιρετικά) από τα κλάσματα μάζας των μεταφερομένων ειδών. Η ταχύτητα τότε υπολογίζεται με τη χρήση της εξίσωσης (3.25.1).

3.25.3 Υπολογισμός των ρυθμών μεταβολής στα όρια της μαζικής εισροής

Για τον υπολογισμό των ρυθμών μεταβολής όλων των μεταβλητών στην είσοδο, η ταχύτητα της ροής, v_n , χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την τιμή εισόδου της εν λόγω μεταβλητής. Για παράδειγμα, η μαζική ροή (ανά μονάδα επιφανείας) είναι ρu_n και ο ρυθμός μεταβολής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας είναι $\rho k u_n$. Αυτές οι ρυθμοί μεταβολής χρησιμοποιούνται ως οριακές συνθήκες για τις αντίστοιχες συντηρητικές εξισώσεις κατά τη διάρκεια της λύσης.

3.26 Οριακές συνθήκες πίεσης κατά την έξοδο

Στις οριακές συνθήκες πίεσης κατά την έξοδο απαιτείται η προσδιορισμός μιας στατικής σχετικής πίεσης στο όριο εξόδου. Η τιμή της στατικής πίεσης που προσδιορίζεται χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση κατά την οποία η ροή είναι υποηχητική. Αν η ροή μετατραπεί τοπικά υπερηχητική, η πίεση αυτή δεν χρησιμοποιείται πλέον για το λόγο αυτό η πίεση θα εξαχθεί από τη ροή στο εσωτερικό. Όλες οι άλλες ροϊκές ποσότητες εξάγονται επίσης από την ανάντη ροή εσωτερικά του πεδίου.

Ένα σύνολο συνθηκών αναστροφής της ροής καθορίζεται επίσης για να χρησιμοποιηθεί, αν η ροή αλλάζει κατεύθυνση στο όριο πίεσης εξόδου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης. Οι δυσκολίες σύγκλισης ελαχιστοποιούνται αν διευκρινιστούν ρεαλιστικές τιμές για τις ποσότητες οι οποίες είναι πιθανόν να αναστραφούν.

Στο FLUENT επίσης διατίθεται η επιλογή της χρήσης της οριακής συνθήκης της ακτινικής ισορροπίας κατά την έξοδο.

3.27 Απαιτούμενα δεδομένα για την οριακή συνθήκη πίεσης κατά την έξοδο

3.27.1 Περίληψη

Για τα όρια της πίεσης κατά την έξοδο εισάγονται οι ακόλουθες πληροφορίες:

- Στατική πίεση
- Συνθήκες αναστροφής
 - Η συνολική θερμοκρασία (στασιμότητας)
 - Οι τυρβώδεις παράμετροι (για υπολογισμούς σχετικά με την τύρβη)
 - Τα κλάσματα μάζης των μεταφερόμενων χημικών ειδών
 - Τα κλάσματα μίξης (για υπολογισμούς προαναμεμιγμένης ή μερικώς προαναμεμιγμένης καύσης)
 - Ο βαθμός προόδου (για υπολογισμούς προαναμεμιγμένης ή μερικώς προαναμεμιγμένης καύσης)
 - Οι πολυφασικές οριακές συνθήκες (για γενικούς πολυφασικούς υπολογισμούς)
- Οι παράμετροι της ακτινοβολίας όταν χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ακτινοβολίας
- Οι οριακές συνθήκες διακριτής φάσης (για υπολογισμούς διακριτής φάσης)

3.27.2 Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στα όρια πίεσης κατά την έξοδο

Οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τις οριακές συνθήκες πίεσης κατά την έξοδο είναι οι ακόλουθες:

Σχετική Πίεση	0
Συνολική θερμοκρασία αναστροφής της ροής	300
Τυρβώδης κινητική ενέργεια αναστροφής της ροής	1
Τυρβώδης βαθμός καταστροφής της τύρβης κατά την αναστροφή της ροής	1

Πίνακας 4: Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τις οριακές συνθήκες πίεσης κατά την έξοδο

3.27.3 Υπολογιστική διαδικασία στα όρια της πίεσης κατά την έξοδο

Στις εξόδους πίεσης, το FLUENT χρησιμοποιεί την οριακή συνθήκη της πίεσης η οποία έχει εισαχθεί (από το χρήστη) ως η στατική πίεση του ρευστού στο επίπεδο εξόδου, p_s , και εξάγει όλες τις άλλες συνθήκες από το εσωτερικό του πεδίου.

3.28 Οριακές συνθήκες καθορισμού της πίεσης στο απομακρυσμένο πεδίο

Οι συνθήκες πίεσης στο απομακρυσμένο πεδίο ροής, χρησιμοποιούνται απ' το FLUENT για τη μοντελοποίηση μιας συνθήκης ελευθέρου ρεύματος στο άπειρο, με τον αριθμό Mach ελευθέρου ρεύματος και τις στατικές συνθήκες να θεωρούνται δεδομένα. Η οριακή συνθήκη της πίεσης στο απομακρυσμένο πεδίο συχνά καλείται χαρακτηριστική οριακή συνθήκη, αφού χρησιμοποιεί χαρακτηριστικές πληροφορίες (σταθερές Riemann) για τον καθορισμό των ροϊκών μεταβλητών στα όρια.

Αυτή η οριακή συνθήκη ισχύει μόνο όταν η πυκνότητα υπολογίζεται με τη χρήση του νόμου των τελείων αερίων (*ideal-gas law*). Δε συνίσταται η χρήση αυτής της οριακής συνθήκης για άλλες ροές. Για την αποτελεσματική προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών στο άπειρο, το 'απομακρυσμένο' όριο πρέπει να τοποθετηθεί αρκετά μακριά από το υπό μελέτη αντικείμενο. Για παράδειγμα, κατά τον υπολογισμό των ανωστικών

ιδιοτήτων μιας αεροτομής, το όριο μακριά από το πεδίο είθισται να είναι ένας κύκλος με ακτίνα ίση με το μήκος 20 χορδών.

3.28.1 Δεδομένα για την οριακή συνθήκη καθορισμού της πίεσης στο απομακρυσμένο πεδίο.

3.28.1.1 Περίληψη

Για την οριακή συνθήκη καθορισμού της πίεσης στο απομακρυσμένο πεδίο εισάγονται οι ακόλουθες πληροφορίες:

- Η στατική πίεση
- Ο αριθμός Mach
- Η θερμοκρασία
- Η κατεύθυνση της ροής
- Οι παράμετροι της τύρβης (για υπολογισμούς σχετικά με την τύρβη)
- Οι παράμετροι της ακτινοβολίας όταν χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ακτινοβολίας
- Τα κλάσματα μάζης των μεταφερόμενων χημικών ειδών
- Οι οριακές συνθήκες διακριτής φάσης (για υπολογισμούς διακριτής φάσης)

3.28.2 Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τις οριακές συνθήκες πίεσης απομακρυσμένου πεδίου

Οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις (στο S.I.) για τις οριακές συνθήκες πίεσης του απομακρυσμένου πεδίου είναι οι ακόλουθες:

Σχετική πίεση	0
Αριθμός Mach	0.6
Θερμοκρασία	300
X-συνιστώσα της κατεύθυνσης της ροής	1
Y-συνιστώσα της κατεύθυνσης της ροής	0
Z-συνιστώσα της κατεύθυνσης της ροής	0
Τυρβώδης κινητική ενέργεια	1
Βαθμός καταστροφής της τύρβης	1

Πίνακας 5: Προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για τις οριακές συνθήκες πίεσης απομακρυσμένου πεδίου

3.28.3 Υπολογιστική διαδικασία των οριακών συνθηκών της πίεσης απομακρυσμένου πεδίου

Οι οριακή συνθήκη της πίεσης απομακρυσμένου πεδίου είναι μια οριακή συνθήκη οποία δεν αλληλεπιδρά με το πεδίο και η οποία βασίζεται στην εισαγωγή των σταθερών Riemann (δηλ. τις χαρακτηριστικές μεταβλητές) για μονοδιάστατη ροή κάθετη στο όριο. Για μια υποηχητική ροή υπάρχουν δύο σταθερές Riemann οι οποίες αντιστοιχούν σε εισερχόμενα και εξερχόμενα κύματα:

$$R_{\infty} = u_{\infty} - \frac{2c_{\infty}}{\gamma - 1} \quad (3.28.3.1)$$

$$R_i = u_{n_i} + \frac{2c_i}{\gamma - 1} \quad (3.28.3.2)$$

όπου ν_n το εύρος της ταχύτητας κάθετο στο όριο,
 c η τοπική ταχύτητα του ήχου και
 γ ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων (για ιδανικό αέριο).

Ο δείκτης ∞ αναφέρεται στις συνθήκες οι οποίες εφαρμόζονται στο άπειρο (δηλ. τις οριακές συνθήκες), και ο δείκτης i αναφέρεται στις συνθήκες στο εσωτερικό του πεδίου (δηλ. στο κελί το οποίο είναι παρακείμενο στην οριακή επιφάνεια). Αυτές οι δύο σταθερές μπορούν να προστεθούν και να αφαιρεθούν έτσι ώστε να προκύψουν οι ακόλουθες δύο εξισώσεις

$$u_n = \frac{1}{2}(R_i + R_\infty) \quad (3.28.3.3)$$

$$c = \frac{\gamma - 1}{4}(R_i - R_\infty) \quad (3.28.3.4)$$

όπου τα u_n και c γίνονται οι τιμές της κάθετης ταχύτητας και της ταχύτητας του ήχου που εφαρμόζονται στο όριο.

Σε μια επιφάνεια μέσω της οποίας εξέρχεται η ροή, οι εφαπτομενικές συνιστώσες της ταχύτητας και η εντροπία εξάγονται από το εσωτερικό σε μια επιφάνεια εισροής, οι ποσότητες αυτές αντιστοιχούν στις τιμές του ελευθέρου ρεύματος. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των u_n , c από τις εφαπτομενικές συνιστώσες της ταχύτητας και από την εντροπία μπορούν να υπολογισθούν η πυκνότητα, η ταχύτητα, η θερμοκρασία και η πίεση στην οριακή επιφάνεια.

3.29 Οριακές συνθήκες εκροής

Οι οριακές συνθήκες εκροής στο FLUENT χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των εξόδων ροής όταν οι λεπτομέρειες για την ταχύτητα της ροής και την πίεση δεν είναι γνωστές πριν από τη λύση του ροϊκού προβλήματος. Δεν απαιτείται κανένας άλλος καθορισμός οποιασδήποτε συνθήκης στα όρια εκροής (εκτός αν μοντελοποιείται μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, ή μια διακριτή φάση σωματιδίων, ή μια διαχωρισμένη ροή: το FLUENT εξάγει τις απαραίτητες πληροφορίες από το εσωτερικό.

Ωστόσο είναι σημαντικό να γίνουν κατανοητοί οι περιορισμοί των οριακών συνθηκών αυτού του είδους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι οριακές συνθήκες εκροής δε χρησιμοποιούνται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- κατά τη μοντελοποίηση προβλήματος το οποίο περιέχει οριακές συνθήκες πίεσης κατά την είσοδο. Σε αυτήν την περίπτωση συνίσταται η χρήση της οριακής συνθήκης πίεσης κατά την έξοδο.
- κατά τη μοντελοποίηση συμπιεστής ροής
- κατά τη μοντελοποίηση μη σταθερών ροών με μεταβαλλόμενη πυκνότητα, με τη ροή να παραμένει ασυμπιεστή.

3.29.1 Επεξεργασία των οριακών συνθηκών εκροής στο FLUENT

Οι οριακές συνθήκες οι οποίες χρησιμοποιούνται στο FLUENT στα όρια εκροής είναι οι ακόλουθες:

- Μηδενική ροή διάχυσης για όλες τις ροϊκές μεταβλητές
- Συνολική διόρθωση ισορροπίας μάζας

Η συνθήκη μηδενικής ροής διάχυσης η οποία εφαρμόζεται στα κελιά εκροής σημαίνει ότι οι συνθήκες του επιπέδου εξόδου εξάγονται από το εσωτερικό του πεδίου και δεν ασκούν καμία επίδραση στην ανάντη ροή. Η διαδικασία της εξαγωγής η οποία χρησιμοποιείται στο FLUENT ενημερώνει την ταχύτητα εκροής και την πίεση με έναν τρόπο τέτοιον ώστε να είναι συνεπείς με την παραδοχή μιας πλήρως αναπτυγμένης ροής, όπως σημειώνεται παρακάτω, όταν δεν υπάρχει καμία μεταβολή εμβαδού της επιφάνειας εξόδου στο όριο εκροής.

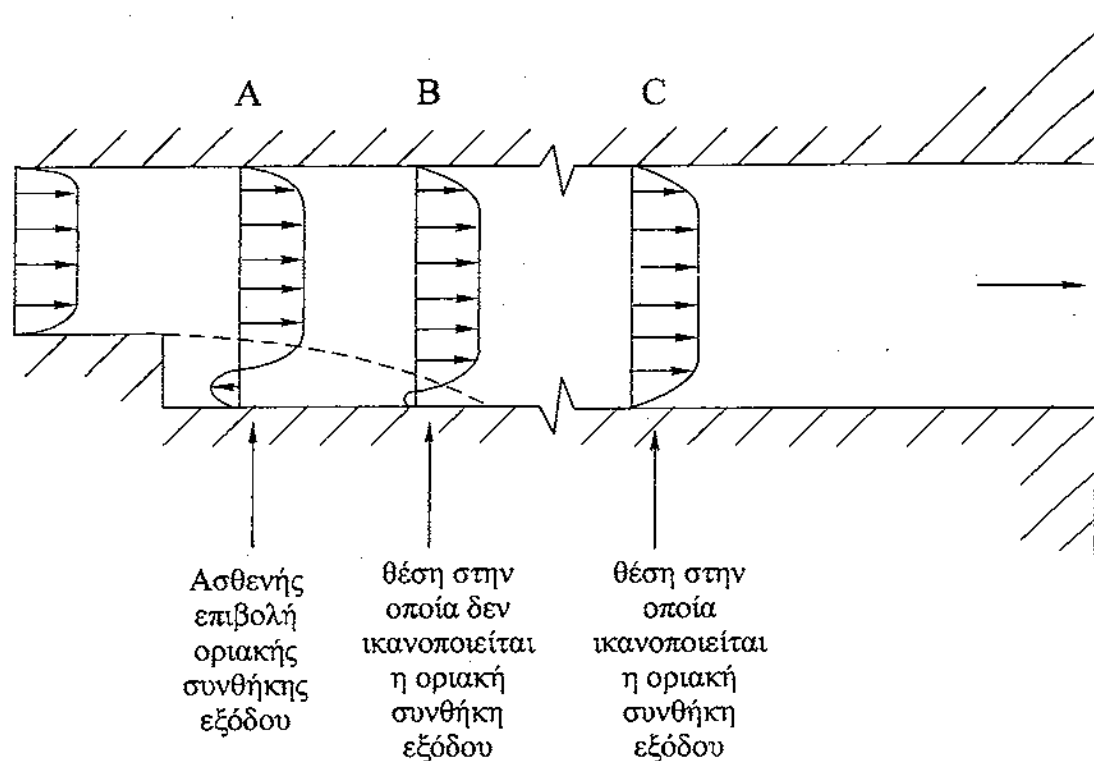
Η συνθήκη μηδενικής ροής διάχυσης η οποία εφαρμόζεται στο FLUENT στα όρια εκροής προσεγγίζεται φυσικά σε πλήρως αναπτυγμένες ροές. Οι πλήρως αναπτυγμένες ροές είναι ροές στις οποίες η διανομή της ταχύτητας ροής (ή/και οι διανομές άλλων ιδιοτήτων όπως η θερμοκρασία) είναι αμετάβλητα κατά την κατεύθυνση της ροής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορούν να υπάρξουν κλίσεις στην εγκάρσια κατεύθυνση σε ένα όριο εκροής. Μόνο η διάχυση της ροής στην κάθετη κατεύθυνση επίπεδο εξόδου θεωρείται ότι είναι μηδέν.

3.29.2 Χρήση των οριακών συνθηκών εκροής

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω (ενότητα 3.29.1), η οριακή συνθήκη εκροής εφαρμόζεται σε πλήρως αναπτυγμένες ροές όπου η ροή διάχυσης είναι μηδενική για όλες τις ροϊκές μεταβλητές στην κατεύθυνση της εξόδου. Ωστόσο, είναι δυνατός ο καθορισμός των ορίων εκροής στα φυσικά όρια όπου η ροή δεν είναι πλήρως αναπτυγμένη. Αυτός ο καθορισμός συστήνεται με την υπόθεση ότι μια μηδενική ροή διάχυσης στην έξοδο αναμένεται να μην αλλοιώσει σημαντικά τη ροϊκή λύση. Η κατάλληλη τοποθέτηση ενός ορίου εκροής περιγράφεται από το παρακάτω παράδειγμα.

- Όρια εκροής όπου οι κάθετες κλίσεις είναι αμελητέες: Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται ένα απλό δισδιάστατο πρόβλημα ροής και διάφορες πιθανές επιλογές θέσης ορίου εκροής. Στη θέση C παρουσιάζεται το όριο εκροής που βρίσκεται ανάντη της εξόδου αλλά σε μια περιοχή του αγωγού όπου η ροή είναι πλήρως αναπτυγμένη. Σε αυτήν την θέση, μπορεί να εφαρμοστεί η οριακή συνθήκη εκροής



Σχήμα 3.8: Επιλογή της τοποθεσίας των οριακών συνθηκών κατά την εκροή

- Ασθενώς επιβεβλημένα όρια εκροής: Στη θέση B (σχήμα 3.6) παρουσιάζεται το όριο εκροής κοντά στο σημείο επανακόλλησης της ανακυκλοφορίας στο απόρρευμα μιας οπίσθιας βηματικής εκτόνωσης. Αυτή η επιλογή της οριακής συνθήκης εκροής είναι ασθενώς επιβεβλημένη καθώς οι κλίσεις κάθετα στο επίπεδο εξόδου είναι αρκετά μεγάλες σε αυτό το σημείο και αναμένεται να ασκήσουν σημαντική επίδραση στο ανάντη πεδίο της ροής. Η θέση B δε θεωρείται καλή θέση για να τοποθετηθεί οριακή συνθήκη εκροής, επειδή η οριακή συνθήκη εκροής αγνοεί τις αξονικές κλίσεις της ροής. Η θέση εξόδου πρέπει να κινηθεί κατάντη του σημείου επανακόλλησης.

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται ένα δεύτερο ασθενώς επιβεβλημένο όριο εκροής στη θέση A. Σε αυτήν την περίπτωση, η εκροή βρίσκεται εκεί όπου η ροή εισάγεται στο υπολογιστικό πεδίο μέσω του ορίου εκροής. Σε καταστάσεις όπως αυτή, ο υπολογισμός (στο FLUENT) δε συγκλίνει και τα αποτελέσματα του υπολογισμού δεν είναι έγκυρα. Αυτό συμβαίνει επειδή η μαζική παροχή στο πεδίο είναι μεταβαλλόμενη ή ακαθόριστη καθώς η ροή στο πεδίο ελκύεται μέσω της εκροής. Επιπλέον, όταν η ροή εισέρχεται στο πεδίο μέσω ενός ορίου εκροής, οι βαθμωτές ιδιότητες της δεν καθορίζονται. Για παράδειγμα, η

θερμοκρασία της ροής που ελκύεται μέσω της εκροής δεν καθορίζεται. (το FLUENT επιλέγει τη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία του ρευστού δίπλα στην εκροή, μέσα στο πεδίο.) Κατά συνέπεια απαιτείται προσοχή κατά την επίβλεψη όλων των υπολογισμών οι οποίοι σχετίζονται με ροή που εισέρχεται στο πεδίο μέσω ενός ορίου εκροής. Γι' αυτούς τους υπολογισμούς, συστήνεται η τοποθέτηση οριακών συνθηκών πίεσης κατά την έξοδο (ενότητα 3.25).

Σημειώνεται ότι η σύγκλιση μπορεί να επηρεαστεί αν εμφανιστεί ανακυκλοφορία η οποία συναντά το όριο εκροής σε οποιοδήποτε σημείο κατά τη διάρκεια των υπολογισμών, ακόμα κι αν η τελική λύση δεν αναμένεται να παρουσιάζει ροή η οποία να εισέρχεται εκ νέου στο πεδίο. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για προσομοιώσεις τυρβώδους ροής.

3.30 Οριακές συνθήκες τοιχώματος

Οι οριακές συνθήκες τοιχώματος χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό των ρευστών περιοχών από τις στερεές. Σε συνεκτικές ροές, η οριακή συνθήκη μη ολίσθησης ενεργοποιείται στα τοιχώματα από την αρχή (by default), αλλά είναι δυνατός ο προσδιορισμός μιας επαπτομενικής συνιστώσας της ταχύτητας λόγω συναρτήσεως της μεταφορικής ή της περιστροφικής κίνησης του ορίου του τοιχώματος, ή η μοντελοποίηση ενός 'ολισθαίνοντος' τοιχώματος προσδιορίζοντας τη διάτμηση. (Επίσης είναι δυνατή η μοντελοποίηση ενός 'ολισθαίνοντος' τοιχώματος με μηδενική διάτμηση με τη χρήση του οριακού τύπου συμμετρίας, αλλά η χρησιμοποίηση αυτού του οριακού τύπου θα εφαρμόσει τις συνθήκες συμμετρίας για όλες τις εξισώσεις.)

Η διατμητική τάση και η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του ρευστού και του τοιχώματος υπολογίζονται βάσει των λεπτομερειών της ροής στο τοπικό πεδίο της ροής.

Στη συνέχεια ακολουθούν πληροφορίες για τις οριακές συνθήκες τοιχώματος:

3.30.1 Δεδομένα που απαιτούνται για την οριακή συνθήκη τοιχώματος

3.30.1.1 Περίληψη

Για τις οριακές συνθήκες τοιχώματος εισάγονται οι ακόλουθες πληροφορίες:

- Θερμικές οριακές συνθήκες (για υπολογισμούς μεταφοράς θερμότητας)
- Συνθήκες κίνησης τοιχωμάτων (για κινούμενα ή περιστρεφόμενα τοιχώματα)
- Συνθήκες διάτμησης (για 'ολισθαίνοντα' τοιχώματα)
- Τραχύτητα τοιχώματος (για τυρβώδεις ροές)
- Τα κλάσματα μάζης των μεταφερόμενων χημικών ειδών
- Οριακές συνθήκες χημικών αντιδράσεων (για επιφανειακές αντιδράσεις)
- Οι παράμετροι της ακτινοβολίας όταν χρησιμοποιείται ένα μοντέλο ακτινοβολίας
- Οριακές συνθήκες διακριτής φάσης (για υπολογισμούς διακριτής φάσης)
- Πολυφασικές οριακές συνθήκες (για γενικούς πολυφασικούς υπολογισμούς)

3.30.2 Καθορισμός θερμικών οριακών συνθηκών στα τοιχώματα

Κατά την επίλυση της εξίσωσης της ενέργειας, απαιτείται ο καθορισμός των θερμικών οριακών συνθηκών στα όρια των τοιχωμάτων. Διατίθενται πέντε τύποι οριακών συνθηκών:

- Μόνιμη ροή θερμότητας
- Μόνιμη θερμοκρασία
- Μετάδοση θερμότητας με μεταφορά
- Μετάδοση θερμότητας με εξωτερική ακτινοβολία
- Συνδυασμένη μετάδοση θερμότητας με μεταφορά και εξωτερική ακτινοβολία

Αν μια ζώνη τοιχώματος έχει δύο πλευρές (two-sided wall), (τοιχώμα το οποίο δημιουργεί μια διεπαφή-μεταξύ δύο περιοχών, όπως η διεπαφή-ρευστού-στερεού για ένα συζευγμένο πρόβλημα μεταφοράς θερμότητας) διατίθεται ένα υποσύνολο των παραπάνω θερμικών συνθηκών με το χρήστη να είναι σε θέση να επιλέξει αν οι δύο πλευρές του τοιχώματος είναι πεπλεγμένες ή όχι.

Παρακάτω περιγράφονται οι εισαγωγές για κάθε τύπο θερμικών συνθηκών. Αν το τοίχωμα έχει μη μηδενικό πάχος, είναι απαραίτητος ο καθορισμός παραμέτρων για τον υπολογισμό της θερμικής αντίστασης του λεπτού τοιχώματος και για τον υπολογισμό της παραγωγής θερμότητας στο τοίχωμα, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Είναι δυνατή η εξομοίωση της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή μέσα στα οριακά τοιχώματα και στα εσωτερικά τοιχώματα (δηλ. τοιχώματα 'δύο πλευρών') του μοντέλου. Αυτός ο τύπος αγωγής, αποκαλούμενος αγωγή σε κέλυφος, επιτρέπει την εύκολη μοντελοποίηση της αγωγής θερμότητας σε τοιχώματα όπου το πάχος τους είναι μικρό σε σχέση με την υπόλοιπη γεωμετρία. Η δημιουργία πλέγματος σε αυτά τα τοιχώματα με τα στερεά κελιά θα οδηγούσε σε υψηλής ποιότητας πλέγματα με σημαντική αύξηση στο συνολικό αριθμό των κελιών.

3.30.3 Διαδικασία υπολογισμού διατμητικής τάσης στα οριακά τοιχώματα

Για τις συνθήκες μη ολισθαίνοντος τοιχώματος, το FLUENT χρησιμοποιεί τις ιδιότητες της ροής δίπλα στο όριο μεταξύ τοιχώματος-ρευστού για την πρόβλεψη της διατμητικής τάσης του ρευστού στο τοίχωμα. Στις γραμμικές ροές αυτός ο υπολογισμός εξαρτάται μόνο από την κλίση της ταχύτητας στο τοίχωμα.

Για τοιχώματα στα οποία η διάτμηση είναι καθορισμένη, το FLUENT υπολογίζει την εφαπτομενική ταχύτητα στο όριο.

Κατά την μοντελοποίηση ιδανικής ροής (στο FLUENT), χρησιμοποιείται η συνθήκη ολίσθησης για τα τοιχώματα, ώστε να μη δημιουργείται τριβή και διατμητική τάση μεταξύ των τοιχωμάτων και του παρακείμενου ρευστού.

3.31 Υπολογισμός διατμητικής τάσης σε γραμμικές ροές

Σε μια γραμμική ροή, η διατμητική τάση στο τοίχωμα προσδιορίζεται μέσω της κανονικής κλίσης της ταχύτητας στο τοίχωμα με την παρακάτω σχέση:

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial n} \quad (3.31.1)$$

Όταν παρουσιάζεται μια απότομη κλίση ταχύτητας στο τοίχωμα, ο χρήστης πρέπει να είναι βέβαιος ότι το πλέγμα είναι αρκετά πυκνό για την ικανοποιητική ανάλυση του οριακού στρώματος

3.32 Προσαρμογή πλέγματος

Στο FLUENT διατίθεται η επιλογή της προσαρμοζόμενης κατά την επίλυση βελτίωσης του πλέγματος με την οποία επιτρέπεται η τροποποίησή του τοπικά ώστε να είναι πιο πυκνό ή πιο αραιό ανάλογα με τη γεωμετρία και τα αριθμητικά δεδομένα επίλυσης. Επιπλέον, παρέχονται εργαλεία για τη δημιουργία και την παρατήρηση των προσαρμοσμένων πεδίων για ειδικές εφαρμογές. Η διαδικασία προσαρμογής του πλέγματος περιγράφεται λεπτομερώς στις επόμενες ενότητες:

3.32.1 Χρήση της προσαρμογής

Δύο σημαντικά πλεονεκτήματα του μη δομημένου πλέγματος στο FLUENT είναι:

- Ο μειωμένος χρόνος οργάνωσης σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο στα δομημένα πλέγματα
- Η δυνατότητα της προσαρμοζόμενης κατά την επίλυση βελτίωσης του πλέγματος.

Με τη χρήση της προσαρμοζόμενης κατά την επίλυση βελτίωσης του πλέγματος, επιτρέπεται η προσθήκη κελιών σε επιλεγμένες περιοχές του πλέγματος (όπου απαιτούνται) με στόχο την όσο το δυνατό ιδανικότερη επίλυση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της ροής. Όταν η προσαρμογή χρησιμοποιείται κατάλληλα, το προκύπτον πλέγμα είναι βελτιστοποιημένο για την επίλυση της συγκεκριμένης ροής επειδή η λύση χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της περιοχής στην οποία θα προστεθούν επιπλέον κελιά. Με άλλα λόγια, δε δαπανούνται υπολογιστικοί πόροι για το υπολογισμό περιττών κελιών, σε αντίθεση με την προσέγγιση των δομημένων πλεγμάτων. Επιπλέον, η επίδραση της βελτίωσης του πλέγματος στην επίλυση δύναται να μελετηθεί χωρίς την αναπαραγωγή του πλέγματος από την αρχή.

3.32.2 Γενικές οδηγίες για την προσαρμογή του πλέγματος

Τα πλεονεκτήματα της προσαρμοζόμενης κατά την επίλυση βελτίωσης του πλέγματος, όταν χρησιμοποιείται κατάλληλα, είναι σημαντικά. Εντούτοις, η δυνατότητα αυτή πρέπει να χρησιμοποιείται προσεκτικά για την αποφυγή ορισμένων σφαλμάτων.

Ακολουθούν μερικές γενικές οδηγίες για την κατάλληλη προσαρμοζόμενη κατά την επίλυση βελτίωση του πλέγματος:

- Το επιφανειακό πλέγμα πρέπει να είναι αρκετά πυκνό για την επαρκή αντιπροσώπευση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της γεωμετρίας. Για παράδειγμα, δεν αποτελεί λειτουργική πρακτική η τοποθέτηση λίγων κόμβων στην επιφάνεια μιας ιδιαίτερα καμπυλωμένης αεροτομής σε συνδυασμό με τη διαδικασία βελτίωσης του πλέγματος για την προσθήκη κόμβων στην επιφάνεια αυτή. Σε αυτήν την περίπτωση, η επιφάνεια θα περιέχει πάντα τις έδρες της επιφάνειας που περιλαμβάνονται στο αρχικό πλέγμα, ανεξάρτητα από τους πρόσθετους κόμβους που εισάγονται κατά τη βελτίωση.
- Το αρχικό πλέγμα πρέπει να περιέχει έναν ικανοποιητικό αριθμό κελιών για να αντιπροσωπεύσει τα ουσιαστικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής. Για παράδειγμα, έστω η περίπτωση κατά την οποία απαιτείται η πρόβλεψη του κρουστικού κύματος που δημιουργείται γύρω από ένα εμπόδιο σε υπερηχητική ροή. Το αρχικό πλέγμα πρέπει να περιέχει αρκετά κελιά ώστε να είναι εφικτός ο υπολογισμός μια σχετικά ικανοποιητικής πρώτης λύσης, ενώ παράλληλα θα πρέπει να παρέχεται ένα ευκρινές περίγραμμα της επιφάνειας για την αναπαράσταση του σχήματος του σώματος. Για τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης του κρουστικού κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια επόμενη προσαρμογή της κλίσης στο πλέγμα για την εύρεση μιας λύσης ανεξάρτητης από το πλέγμα.
- Πριν την έναρξη της προσαρμογής είναι απαραίτητη μια ικανοποιητικά συγκλίνουσα λύση. Η προσαρμογή για μια σχετικά ανακριβή λύση, προκαλεί την πρόσθεση κελιών σε λανθασμένες περιοχές της ροής. Εντούτοις, ο χρήστης θα πρέπει να είναι σε θέση να κρίνει αν ο βαθμός σύγκλισης είναι ικανοποιητικός πριν την προσαρμογή της λύσης, λόγω της αλληλουχίας που υπάρχει μεταξύ μιας πρόωρης προσαρμογής σε μια μη συγκλίνουσα λύση, με την σπατάλη χρόνου λόγω των συνεχών επαναλήψεων χωρίς όμως η λύση να μεταβάλλεται σημαντικά.
- Προτού αρχίσει η διαδικασία προσαρμογής είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός αρχείου εργασίας (*case file*) και ενός αρχείου δεδομένων (*data file*), ώστε στην περίπτωση κατά την οποία παραχθεί ένα μη επιθυμητό πλέγμα, να υπάρχει η

δυνατότητα επανεκκίνησης της διαδικασίας προσαρμογής με τα αποθηκευμένα παραπάνω αρχεία.

- Κατά την διαδικασία εκτέλεσης προσαρμογής της κλίσης, απαιτείται η επιλογή κατάλληλων μεταβλητών. Για μερικές ροές, η επιλογή αυτή είναι σχετικά απλή. Για παράδειγμα, η προσαρμογή στις κλίσεις της πίεσης είναι ένα καλό κριτήριο για τον καθορισμό της περιοχής των κρουστικών κυμάτων. Εντούτοις, στις περισσότερες ασυμπιέστες ροές δεν έχει νόημα ο καθορισμός των κλίσεων της πίεσης. Σε περίπτωση ασυμπιέστης ροής, σημαντικές παράμετροι αποτελούν οι μέσες κλίσεις της ταχύτητας. Εάν το αντικείμενο ενδιαφέροντος είναι μια τυρβώδης διατμητική ροή, είναι απαραίτητο να επιλυθούν οι κλίσεις της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και οι κλίσεις της τυρβώδους σκέδασης της ενέργειας, ώστε να αποτελούν οι πιο κατάλληλες μεταβλητές βελτίωσης της λύσης. Σε αντιδρώσες ροές, η θερμοκρασία ή η συγκέντρωση (ή τα κλάσματα μάζας ή γραμμομορίων) των αντιδρώντων ειδών πρέπει να είναι κατάλληλες.
- Μια ανεπαρκής προσαρμογή μπορεί να προκαλέσει δυσμενή αποτελέσματα. Ένα από τα πιο συνήθη λάθη είναι να υπερ-βελτιωθεί μια συγκεκριμένη περιοχή στο πεδίο της λύσης, προκαλώντας αντίξοες κλίσεις στον όγκο των κελιών, με αποτέλεσμα να αλλοιωθεί η ακρίβεια της λύσης.

3.33 Προσαρμογή του πλέγματος βάσει των κλίσεων του πεδίου

Η λειτουργία προσαρμογής του πλέγματος βάσει των κλίσεων του πεδίου, επιτρέπει τον χαρακτηρισμό των κελιών ή την προσαρμογή του πλέγματος βάσει της κλίσης (ή καμπυλότητας) των επιλεγμένων μεταβλητών του πεδίου.

3.33.1 Προσέγγιση προσαρμογής της κλίσης

Ο αρχικός στόχος της προσαρμοζόμενης κατά την επίλυση βελτίωσης του πλέγματος είναι η αποτελεσματική μείωση του αριθμητικού λάθους κατά την ψηφιακή επίλυση. Δυστυχώς, η άμεση εκτίμησή του λάθους για προσαρμοζόμενους αλγόριθμους με εισαγωγή σημείων είναι δύσκολη λόγω της πολυπλοκότητας της ακριβούς εκτίμησης και της μοντελοποίησης του λάθους στα προσαρμοσμένα πλέγματα. Στην περίπτωση κατά την οποία το μέγιστο λάθος εμφανίζεται σε περιοχές υψηλής κλίσης, τα διαθέσιμα φυσικά χαρακτηριστικά του πεδίου ροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καθοδήγηση της διαδικασίας προσαρμογής του πλέγματος. Η τεχνική ισοκατανομής

της προσαρμογής που χρησιμοποιείται στο FLUENT πολλαπλασιάζει τον αδιαίρετο τελεστή Laplace της επιλεγμένης μεταβλητής επίλυσης με μια χαρακτηριστική κλίμακα μήκους. Η κλίμακα μήκους είναι η τετραγωνική ρίζα του όγκου των κελιών (για 2D προβλήματα) ή η κυβική ρίζα του όγκου των κελιών (για 3D προβλήματα). Η εισαγωγή αυτής της κλίμακας μήκους επιτρέπει την επίλυση και των ισχυρών και των ασθενέστερων διαταραχών, αυξάνοντας τη δυνατότητα για πιο ακριβείς λύσεις. Παραδείγματος χάριν, η συνάρτηση προσαρμογής της κλίσης σε δύο διαστάσεις έχει την ακόλουθη μορφή:

$$|e_i| = A_{cell}^{\frac{r}{2}} |3^{-2} f| \quad (3.33.1.1)$$

όπου e_i ο δείκτης σφάλματος,

A_{cell} το εμβαδόν των κελιών,

r το βάρος όγκου της κλίσης και

$3^{-2} f$ ο αδιαίρετος τελεστής Laplace της επιθυμητής μεταβλητής του πεδίου, f .

Η προκαθορισμένη τιμή του βάρους όγκου της κλίσης είναι η μονάδα και αντιστοιχεί στην πλήρη στάθμιση του όγκου. Η τιμή μηδέν θα αποβάλει τη στάθμιση του όγκου, ενώ οι τιμές μεταξύ 0 και 1 θα χρησιμοποιήσουν ανάλογη στάθμιση του όγκου.

Στη συνάρτηση προσαρμογής της κλίσης, οποιεσδήποτε από τις διαθέσιμες μεταβλητές του πεδίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη χάραξη του περιγράμματος. Κατά ενδιαφέροντα τρόπο, αυτές οι βαθμωτές συναρτήσεις περιέχουν τόσο γεωμετρικά όσο και φυσικά χαρακτηριστικά της αριθμητικής επίλυσης. Επομένως, εκτός από την παραδοσιακή προσαρμογή στα φυσικά χαρακτηριστικά, όπως η ταχύτητα, δύναται να επιλεγεί η προσαρμογή στο πεδίο του όγκου των κελιών για να μειωθούν οι γρήγορες μεταβολές στον όγκο των κελιών.

3.34 Προσαρμογή του πλέγματος βάσει της κατανομής ενός μεγέθους (προσαρμογή ισοτιμής)

Μερικές ροές μπορούν να περιέχουν χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ροής που είναι εύκολο να προσδιοριστούν βάσει των τιμών μιας ορισμένης ποσότητας. Παραδείγματος χάριν, τα απορεύματα προκαλούν μια συνολική πτώση πίεσης, και οι δέσμες διακρίνονται ως μια περιοχή σχετικά μεγάλης ταχύτητας του ρευστού.

Δεδομένου ότι αυτές οι περιοχές περιέχουν επίσης μεγάλες κλίσεις των σημαντικών ποσοτήτων ροής (όπως το k και Φ στις τυρβώδεις ροές) μπορεί να είναι καταλληλότερο να εκτελεσθεί μια προσαρμογή του πλέγματος βάσει της κατανομής ενός μεγέθους στη σχετική ποσότητα ροής από το να καθοριστούν οι κλίσεις των μεμονωμένων μεταβλητών ροής.

Η λειτουργία προσαρμογής του πλέγματος βάσει της κατανομής ενός μεγέθους (προσαρμογή ισοτιμής) επιτρέπει το χαρακτηρισμό ή τον καθορισμό των κελιών εντός ή εκτός μιας δεδομένης σειράς μιας επιλεγμένης μεταβλητής συνάρτησης του πεδίου. Το πλέγμα μπορεί να βελτιωθεί ή να επιλεγθεί για βελτίωση βάσει των γεωμετρικών ή/και διανυσματικών στοιχείων λύσης. Συγκεκριμένα, οποιαδήποτε ποσότητα στον κατάλογο επιλογής των μεταβλητών του πεδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσαρμογή του πλέγματος βάσει της κατανομής ενός μεγέθους. Μερικά παραδείγματα για την χρήση του χαρακτηριστικού γνωρίσματος προσαρμογής του πλέγματος βάσει της κατανομής ενός μεγέθους, περιλαμβάνουν τα εξής:

- Δημιουργία εικονικών επιφανειών με χρήση συντεταγμένων ή της δευτεροβάθμιας εξίσωσης.
- Καθορισμός των κελιών η ταχύτητα εντός των οποίων βρίσκεται εντός ενός καθορισμένου εύρους.
- Επιλογή και παρουσίαση των κελιών εντός των οποίων η πίεση ή το υπόλοιπο της εξίσωσης της συνέχειας βρίσκονται εκτός ενός επιθυμητού εύρους με σκοπό τον καθορισμό της περιοχής στην οποία η αριθμητική λύση μεταβάλλεται ταχέως.

Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται στη λειτουργία προσαρμογής του πλέγματος βάσει της κατανομής ενός μεγέθους (προσαρμογή ισοτιμής) είναι ο υπολογισμός μιας συγκεκριμένης τιμής για κάθε κελί (ταχύτητα, δευτεροβάθμια εξίσωση, κεντροβαρική συντεταγμένη x , κ.λπ.) και έπειτα την επισκόπηση κάθε κελιού να επιλέγονται τα κελιά αυτά των οποίων οι τιμές να βρίσκονται που έχουν τιμές εντός (ή εκτός) των καθορισμένων ορίων.

3.35 Προσαρμογή περιοχής του πλέγματος (region adaption)

Πολλές γεννήτριες πλέγματος δημιουργούν πλέγματα με τους όγκους των κελιών να αυξάνονται πολύ γρήγορα με την απόσταση από τα όρια. Σύμφωνα με αυτό αποφεύγεται ένα πυκνό πλέγμα φυσικά, ωστόσο δημιουργεί προβλήματα εάν το πλέγμα δεν είναι αρκετά λεπτό να επιλύσει τη ροή. Αλλά εάν είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι απαιτείται ένα λεπτότερο πλέγμα σε μια ορισμένη περιοχή της περιοχής λύσης, το πλέγμα μπορεί να καθοριστεί με τη χρήση προσαρμογής της περιοχής του πλέγματος.

Η λειτουργία προσαρμογής της περιοχής του πλέγματος χαρακτηρίζει ή καθορίζει τα κελιά εντός ή εκτός μιας περιοχής που καθορίζεται μέσω ηλεκτρολογίου ή του γραφικού περιβάλλοντος. Το πλέγμα μπορεί να καθοριστεί ή να χαρακτηριστεί χρησιμοποιώντας μια απλή γεωμετρική οντότητα η οποία περικλείει την περιοχή ενδιαφέροντος. Αυτή η γεωμετρική οντότητα μπορεί να είναι ένα εξάεδρο (τετράπλευρο σε διδιάστατα προβλήματα), μια σφαίρα (κύκλος σε διδιάστατα προβλήματα) ή ένας κύλινδρος. Η δυνατότητα βελτίωσης του πλέγματος επιλέγοντας μια περιοχή είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες απαιτείται η τοπική βελτίωση του πλέγματος και από τη φύση τους περιλαμβάνουν περιοχές που χρήζουν καλής ανάλυσης όπως είναι για παράδειγμα το απόρευμα κατάντη ενός αντικειμένου με απότομη γεωμετρία. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία εικονικών επιφανειών για τον περαιτέρω έλεγχο της αραίωσης ή πυκνώσης του πλέγματος.

3.35.1 Ορισμός της περιοχής προσαρμογής

Η βασική προσέγγιση στη λειτουργία προσαρμογής περιοχών του πλέγματος είναι ο καθορισμός αρχικά μια εξαεδρικής (τετράπλευρης), σφαιρική (κυκλικής), ή κυλινδρικής περιοχής. Το εξάεδρο (τετράπλευρο) μπορεί να καθοριστεί με την εισαγωγή των συντεταγμένων δύο σημείων καθορίζοντας έτσι τη διαγώνιο. Η σφαίρα (κύκλος) καθορίζεται με την είσοδο των συντεταγμένων του κέντρου της σφαίρας και της ακτίνας της. Αντίστοιχα για να καθοριστεί ένας κύλινδρος, θα διευκρινιστούν οι συντεταγμένες των σημείων καθορίζοντας τον άξονα κυλίνδρων, και την ακτίνα. Σε τρισδιάστατο πεδίο με τον τρόπο αυτό καθορίζεται ένας κύλινδρος. Στις δύο διαστάσεις, θα δημιουργήσει ένα αυθαίρετα προσανατολισμένο ορθογώνιο με το μήκος

ίσο με το μήκος του κυλίνδρου και το πλάτος ίσο με την ακτίνα. Ένα ορθογώνιο που καθορίζεται χρησιμοποιώντας την επιλογή κυλίνδρων διαφέρει από ένα που καθορίζεται με την τετράπλευρη επιλογή, δεδομένου ότι το πρώτο μπορεί να προσανατολιστεί αυθαίρετα στην περιοχή ενώ το τελευταίο πρέπει να ευθυγραμμιστεί με τους ισότιμους άξονες.

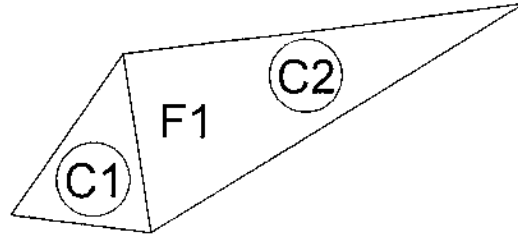
Μπορείτε είτε να εισάγετε τις ακριβείς συντεταγμένες στους κατάλληλους πραγματικούς τομείς εισόδων, είτε να επιλέξετε τις θέσεις με το ποντίκι στις επιδείξεις του τομέα πλέγματος είτε στο πεδίο της λύσης. Αφότου καθοριστεί το πεδίο, κάθε κελί που έχει ένα κεντροειδές (centroid) εσωτερικά/έξωτερικά από τη διευκρινισμένη περιοχή έχει επιλεχθεί για τον καθαρισμό.

3.36 Προσαρμογή του πλέγματος βάσει της τιμής του όγκου των κελιών

Όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.31.1, είναι προτιμότερο για την ακρίβεια και για τη σύγκλιση να υπάρξει ένα πλέγμα στο οποίο οι αλλαγές στον όγκο των κελιών του να είναι βαθμιαίες. Εάν η διαδικασία δημιουργίας ή προσαρμογής του πλέγματος έχει καταλήξει σε ένα πλέγμα που δεν έχει αυτήν την ιδιότητα, το πλέγμα μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση της προσαρμογής του πλέγματος βάσει της τιμής του όγκου των κελιών με την επιλογή του καθορισμού βασισμένη είτε στον όγκο κελιών είτε στην μεταβολή του όγκου μεταξύ των κελιών και των αντιστοίχων γειτονικών.

3.36.1 Προσέγγιση

Η επιλογή ή η βελτίωση του πλέγματος βάσει της τιμής του όγκου των κελιών χρησιμοποιείται συχνά για την αφαίρεση των μεγάλων κελιών ή για την καθολική βελτίωση του πλέγματος. Η διαδικασία που ακολουθείται συνίσταται από την επιλογή προς βελτίωση οποιoδήποτε κελιού με όγκο μεγαλύτερο από την οριακή τιμή. Η μεταβολή του όγκου υπολογίζεται ελέγχοντας για κάθε επιφάνεια το λόγο των παρακείμενων όγκων και συγκρίνοντάς τον με την οριακή τιμή. Παραδείγματος χάριν, στο σχήμα 3.9 η αναλογία V_1 / V_2 και η αναλογία V_2 / V_1 συγκρίνονται με την τιμή των κατώτατων ορίων. Εάν η τιμή V_2 / V_1 , παραδείγματος χάριν, είναι μεγαλύτερη από το κατώτατο όριο, το c2 επιλέγεται προς καθαρισμό.



Σχήμα 3.9: Η αλλαγή όγκου υπολογίζεται ως αναλογία των όγκων των γειτονικών κελιών στην επιφάνεια

3.37 Προσαρμογή του πλέγματος σε περιοχές με οριακά στρώματα βάσει της τιμής των y και y^* .

Το FLUENT παρέχει τρεις διαφορετικές επιλογές για τη μοντελοποίηση της τύρβης πλησίον τοιχώματος (τυπικές συναρτήσεις τοιχωμάτων, μη ισοσταθμισμένες συναρτήσεις τοιχωμάτων, και η βελτιωμένη μεταχείριση τοιχωμάτων). Για καθεμιά από αυτές τις επιλογές μοντελοποίησης της ροής σε περιοχές πλησίον τοιχωμάτων, υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις για το πλέγμα.

Δεδομένου ότι είναι συχνά είναι δύσκολο να εκτιμηθούν οι απαιτήσεις ανάλυσης στην περιοχή πλησίον του τοιχώματος κατά τη δημιουργία του πλέγματος παρέχεται η δυνατότητα βελτίωσης του πλέγματος συναρτήσει της τιμής των y και y^* κατά την επίλυση ενός προβλήματος. Για την περίπτωση χρήσης του μοντέλου της βελτιωμένης μεταχείρισης τοιχωμάτων, η βελτίωση του πλέγματος γίνεται βάσει της τιμής του y . Στην περίπτωση χρήσης των άλλων δύο μοντέλων η βελτίωση του πλέγματος μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο χαρακτηριστικές ιδιότητες του οριακού στρώματος (y και y^*).

3.37.1 Προσέγγιση

Η προσέγγιση της βελτίωσης του πλέγματος σε περιοχές πλησίον τοιχωμάτων συνίσταται από τον υπολογισμό των y και y^* για τα κελιά που βρίσκονται εντός της συνεκτικής περιοχής του οριακού στρώματος και την επιλογή ή προσαρμογή του πλέγματος στα επιλεχθέντα βάσει της ελαχίστης ή μεγίστης τιμής των υπό έλεγχο ποσοτήτων. Τα κελιά με τιμές των y και y^* κάτω από τον ελάχιστο επιτρεπόμενο

όριο θα επιλεγθούν για αραίωση ενώ τα κελιά με τιμές y και y^* πάνω από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο θα επιλεγθούν για βελτίωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 40

Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

4.1 Γενικά

Το αντικείμενο αυτής της διατριβής είναι η πειραματική μελέτη του τυρβώδους πεδίου ενός επίπεδου απορρέματος που σχηματίζεται πίσω από κυκλικός κύλινδρο σε μια συσκευή που περιλαμβάνει δύο σημαντικά μέρη: έναν ορθογωνικό αγωγό και έναν αγωγό στρέβλωσης της ροής. Η εγγύτητα των περιοριστικών τοιχωμάτων που έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός λόγου απόφραξης 14% στον πρώτο αγωγό και η επιβολή μιας ομογενούς επιβαλλόμενης αστρόβιλης στρέβλωσης στη ροή, αφού αυτή διέλθει κάποιο αρχικό στάδιο ανάπτυξης, είναι τα κυριότερα φαινόμενα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της ροής.

Οι ροές που δημιουργούνται πίσω από αντικείμενα (απορέματα) διαφόρων γεωμετριών, είναι μια από τις πιο απαιτητικές μελέτες τυρβωδών ροών λόγω της σημαντικής μηχανικής και ακαδημαϊκής τους σημασίας καθώς και εξαιτίας της συχνότητας με την οποία παρατηρούνται σε αντίστοιχες πρακτικές εφαρμογές. Η αναμενόμενη ευκολία κατά τη σύσταση μιας πειραματικής πρακτικής επίλυσης, ή μιας επίλυσης βάσει αριθμητικής εξομοίωσης για τη μελέτη τέτοιων ροών, έρχεται σε άμεση αντίθεση στην εκ των προτέρων γνωστή πολυλοκότητα αφού εμπλέκει την αλληλεπίδραση ενός οριακού στρώματος, ενός διαχωριζόμενου ελεύθερου διατμητικού στρώματος και ενός αρχικά περιοδικού συστήματος δινών το οποίο απορρίπτεται εν συνεχεία από το σώμα. Η εναλλαγή δινών στο εγγύς πεδίο προκαλεί την εξάσκηση μεγάλων κυμαινόμενων δυνάμεων στο σώμα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση δομικών δονήσεων, θορύβου και πιθανής καταστροφής τους. Επομένως, η επίγνωση της δυναμικής της περιοδικής ροής κοντά στο πεδίο, η εξέλιξη της ροής μακριά από αυτό αλλά και η πιθανή σχέση της με τις αρχικές συνθήκες, αποτελεί εξαιρετικό αντικείμενο μελέτης για μηχανικούς και επιστήμονες. Η συστηματική προσπάθεια αποτελεί βασική προϋπόθεση όχι μόνο για τη διευκρίνιση των σχετικών φυσικών μηχανισμών αλλά και για τον ενεργητικό έλεγχο καθώς και για τη διαχείριση της ροής.

Το πιο σχετικό χαρακτηριστικό γνώρισμα όλων των ροών είναι η αρχή ενός περιοδικού καθεστώτος το οποίο χαρακτηρίζεται από εναλλαγή δινών που απορρίπτονται αμέσως κατάντη του σώματος και έχει μελετηθεί συστηματικά τουλάχιστον από τον 19^ο αιώνα (Strouhal 1878). Από την εποχή αυτή έχει ξεκινήσει μια σημαντική ερευνητική προσπάθεια η οποία σχετίζεται με τη δυναμική της ροής σε τρία κύρια πεδία εξέλιξης απορρεμάτων: το εγγύς πεδίο, το ενδιάμεσο πεδίο και το απομακρυσμένο ή πεδίο ισορροπίας. Είναι ορθά τεκμηριωμένη η άποψη πως μιας μεγάλης κλίμακας κίνηση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα δύο πρώτα πεδία, ενώ στην περίπτωση του απομακρυσμένου πεδίου ο ρόλος της είναι λιγότερο κατανοητός, κυρίως λόγω της αυξανόμενης τυχαιότητας των μεγάλων δομών με την κατάντη απόσταση.

Αργότερα ο Von Kármán (1912) μελέτησε το κριτήριο ευστάθειας της οδού στροβίλων και τη σχέση της τελευταίας με την οπισθέλκουσα, η οποία προκάλεσε μεγάλο ενδιαφέρον για έρευνα στις ροές αυτές. Αυτή η ανάλυση της ευστάθειας αναφέρεται σε περιοχές στροβίλων απείρου μήκους απουσία του σώματος, ενώ οι μελέτες αυτές είναι ανεξάρτητες με το μηχανισμό σχηματισμού στροβίλων κατάντη του σώματος αυτού. Μια φαινομενική ανάλυση σχετικά με την επιρροή της εγκάρσιας μεταφοράς στροβιλότητας αναπτύχθηκε από τον Geirard (1966), ο οποίος πρότεινε πως η αναπτυσσόμενη δίνη έλκει το αντίθετο διατμητικό στρώμα κατά μήκος της αξονικής γραμμής, αποκόπτοντας την τροφοδοσία στροβιλότητας στην αναπτυσσόμενη δίνη. Μια περιγραφική κατανόηση για τη μορφή των δινών παρέχεται από τους Perry *et al.* (1982) που σχεδίασαν στιγμιαίες ροϊκές γραμμές της τοπολογίας απόρριψης στροβίλων. Αυτό χαρακτηρίζεται από την παρουσία του *σάγγατος* (saddle point) μετά τη δημιουργία κάθε νέου κυκλικού πεδίου. Έπειτα, η περαιτέρω τροφοδοσία της στροβιλότητας στην αναπτυσσόμενη δίνη διακόπτεται και αντ'αυτού μια νέα δίνη διαφορετικού προσήμου σχηματίζεται στο σώμα.

Μια μεγάλη πειραματική και αριθμητική μελέτη έχει πραγματοποιηθεί για το δημιουργούμενο από το σώμα απόρρεμα, η οποία περιέχει ανάλυση του κριτηρίου ευστάθειας, των αριθμών Strouhal, των συντελεστών άνωσης και οπισθέλκουσας, την πίεση στην 'πλάτη' του σώματος (πίεση βάσης), των σημείων διαχωρισμού, του μέσου και κυμαινόμενου πεδίου ταχυτήτων, την τοπολογία των δομών της δίνης και εκτιμήσεις των διαστάσεων στο σχηματιζόμενο πεδίο. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται πληθώρα πειραματικών δεδομένων για το ποσοστό μείωσης της περιεχόμενης

στροβιλότητας, για στρωτά ή τυρβώδη απορρέματα, στο αποκολλούμενο από το αντικείμενο οριακό στρώμα π.χ. Berger & Wille (1972), Oertel (1990) και Williamson (1996). Επίσης, πειραματικές έρευνες (Bloor 1964, Bearman 1967, Cantwell & Coles 1983, Ferre *et al.* 1990, Hayalawa & Hussain 1989, Monkewitz & Nfuyen 1986, Roshko 1955, 1967, Strykowski & Sreenivasan 1990, Williamson 1989, 1992a) και αριθμητικές προβλέψεις (Braza *et al.* 1986, Henderson 1995, Karniadakis & Triantafyllou 1989, Mittal & Balachandar 1995, Triantafyllou *et al.* 1986), μεταξύ άλλων, προσέφεραν πολύτιμες πληροφορίες για τα προαναφερθέντα ζητήματα στην εγγύς περιοχή του πεδίου.

Οπτικές απεικονίσεις (π.χ. Taneda 1959, Papailiou & Lykoudis 1974, Cimbala *et al.* 1988) και μετρήσεις HWA (π.χ. Grant 1958, Townsend 1979, Mumford 1983, Brown *et al.* 1986, Bisset *et al.* 1990a,b) στο τυρβώδες απομακρυσμένο απόρρεμα έχουν τονίσει ιδιαίτερα την ύπαρξη οργανωμένων κινήσεων μεγάλης κλίμακας συχνά εναλλασσόμενες ως προς τον κεντρικό άξονα. Η περιγραφή της οργανωμένης κίνησης στο τυρβώδες απομακρυσμένο απόρρεμα πραγματοποιείται γενικά μέσω δυο τύπων δομών. Ο πρώτος τύπος συνίσταται από αντίθετης περιστροφής διπλούς κυλινδρικούς στροβίλους με περιστροφή κυρίως στο κάθετο επίπεδο της κατεύθυνσης της ροής. Οι άξονές τους είναι παράλληλοι, μετατοπισμένοι στην παράπλευρη συντεταγμένη (παράλληλα στον άξονα του σώματος) και προσεγγιστικά ευθυγραμμισμένοι με την κύρια διεύθυνση της μέσης παραμόρφωσης. Ο δεύτερος τύπος αναφέρεται σε παράπλευρους στροβίλους, που μερικές φορές περιγράφονται σαν 'jets μίξης' ή 'δίνες εισροής', με περιστροφή κυρίως στο αζιμούθιο επίπεδο κατά την ανάπτυξη της ροής. Μια θεμελιώδης ερώτηση που φυσιολογικά προκύπτει είναι η σύνδεση στα δομικά στοιχεία των οργανωμένων κινήσεων.

Η οπτικοποίηση της ροής καθώς επίσης και τα ποιοτικά δεδομένα, (Bisset *et al.* 1990a,b, Ferré & Giralt 1989a,b, Ferré *et al.* 1990) παρέχουν στοιχεία για τους δύο αυτούς τύπους οργανωμένων στροβίλων. ότι πιθανόν να αποτελούν την ίδια τρισδιάστατη δομή η οποία διαφαίνεται από δύο διαφορετικές γωνίες παρατήρησης. Οι Hayakawa & Hussain (1989) ανέφεραν ότι οι δομές τύπου πεταλοδίνης ή/και ένας πλόκαμος από διαμήκεις στροβίλους είναι φαινόμενα υπεύθυνα για ισχυρή τρισδιάστατότητα στο απόρρεμα πολύ πιο κοντά στον κύλινδρο. Σχετικά ένας μικρός αριθμός ερευνών αφορούν το συσχετισμό της δυναμικής της ροής κοντά στο πεδίο και μακριά από αυτό. Ένα κεφαλαιώδες ζήτημα

το οποίο σχετίζεται με το δεδομένο πρόβλημα είναι αν το απομακρυσμένο απόρρεμα έχει κάποια σχέση με τη φυσική της ροής που επικρατεί ακριβώς πίσω από το σώμα. Δεδομένου ότι το απομακρυσμένο απόρρεμα αναπτύσσεται με νόμο $x^{1/2}$ στην κατάντη απόσταση x , και στις δύο περιπτώσεις στρωτών - τυρβωδών ροών, αναμένεται η αύξηση του μεγέθους της δομής μεγαλύτερης κλίμακας με ταυτόχρονη μείωση της συχνότητας διέλευσής της. Η ισχύς των παραπάνω ισχυρισμών έχουν επιβεβαιωθεί πειραματικά. Ένα δευτερεύον απόρρεμα μεγαλύτερης κλίμακας αναπτύσσεται αφού η οδός Κάτμάν έχει ήδη καταστραφεί. Η υδροδυναμική αστάθεια του τοπικού μέσου προφίλ ταχυτήτων, (Taneda 1959, Cimbala *et al.* 1988), ενώ σε αντίθεση, η συγχώνευση ή ένωση των δινών, (Matsui & Okude 1981, Meiburg 1987), έχουν προταθεί ως πιθανοί ανερχόμενοι μηχανισμοί της μετέπειτα δομής. Περισσότερο ή λιγότερο, αυτές οι μελέτες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η δομή του απομακρυσμένου πεδίου δεν εξαρτάται από την κλίμακα ή τη συχνότητα των δινών Κάτμάν και εξελίσσεται ανεξάρτητα των αρχικών συνθηκών.

Ωστόσο, υπάρχουν πτυχές της κίνησης της ροής του απομακρυσμένου πεδίου όπως η ύπαρξη ή μη, τρισδιάστατων κυψελοειδών μορφών (3-D honeycomb-like patterns) κατά την κάλυψη στην παράπλευρη επέκτασης της ροής, που σχετίζεται με την πλάγια ή παράλληλη απόρριψη των δινών αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, παρατηρούνται εξαιρετικά μικρής συχνότητας κορυφές οι οποίες υφίστανται στο ελεύθερο ρεύμα για να εμμείνουν ενισχυμένες στο κατάντη φάσμα. Αυτά τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι μια σύνδεση μεταξύ της ροής κοντά και μακριά από το πεδίο, υφίσταται. Γενικά, η δομή του απομακρυσμένου πεδίου είναι ευαίσθητη σε ποικίλες διαταραχές και εξαρτάται κυρίως από την πειραματική διάταξη στην οποία εμφανίζεται.

Περιορισμένη προσοχή έχει προκαλέσει η σχετική περίπτωση κατά την οποία η ροή εξελίσσεται με την παρουσία επιπέδων ορίων. Τα περιοριστικά τοιχώματα τροποποιούν την δυναμική της ροής όσον αφορά την ελεύθερη περίπτωση πρώτιστα λόγω της επιβολής ενός αστρόβιλου περιορισμού στην εγκάρσια ανάπτυξη της. Κατά δεύτερον, λαμβάνει χώρα η αλληλεπίδραση του οριακού στρώματος του τοιχώματος με την αναπτυσσόμενη ροή. Κατά συνέπεια, η περιορισμένη δομή της ροής είναι περισσότερο σύνθετη απ'ότι η αντίστοιχη ελεύθερη λόγω των αποτελεσμάτων από τον συνδυασμό της στροβιλότητας που απορρίπτεται από τον κύλινδρο και από τα αναπτυσσόμενα οριακά στρώματα.

Στη βιβλιογραφία, είναι περιορισμένος ο αριθμός των πειραματικών ερευνών για τη ροή του απορρέματος παρουσία ενός επίπεδου ορίου και για τις σχετικές τροποποιήσεις των βασικών παραμέτρων σχετικά με τις περιπτώσεις ελευθέρως δίνης, (Bearman & Zdravkovich 1978, Taniguchi & Miyakoshi 1990, Lei *et al.* 1999). Αυτές οι μελέτες αναφέρονται στη μεταβολή των συντελεστών της άνωσης και της οπισθέλκουσας, στη θέση του σημείου ευστάθειας, στην πίεση βάσης, στον αριθμό Strouhal και στην παρουσία ή στην καταστολή της απόρριψης στροβίλων ως συνάρτηση της απόστασης σώματος – τοιχώματος και του πάχους του οριακού στρώματος. Στην περίπτωση του κυκλικού κυλίνδρου ο οποίος τοποθετείται μεταξύ δύο παράλληλων τοιχωμάτων με έναν υψηλό βαθμό απόφραξης 20%, έχει μελετηθεί αριθμητικά από τους Zovatto & Pedrizzetti (2001) για μια γραμμική ροή (Poiseuille) που προσεγγίζει το σώμα. Ένα από τα σημαντικά τους ευρήματα είναι η αλλαγή της τοπολογίας του εγγύς πεδίου όχι μόνο σε περιπτώσεις όπου το σώμα τοποθετείται κοντά σε ένα τοίχωμα αλλά επίσης στην περίπτωση κατά την οποία το σώμα τοποθετείται στο κέντρο της πειραματικής διάταξης. Όλες οι προαναφερθείσες μελέτες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι τροποποιήσεις που προκύπτουν είναι περισσότερο έντονες όταν το σώμα πλησιάζει το στερεό όριο. Σχετικές στην περίπτωση με το περιορισμένο απόρρεμα, είναι οι μελέτες των Shair *et al.* (1963) που εξέτασαν την επιρροή των περιοριστικών τοιχωμάτων στη ευστάθεια ενός στρωτού απορρέματος και αυτές των West & Apelt (1982) οι οποίοι μελέτησαν τα αποτελέσματα του βαθμού απόφραξης και της επίδρασης του *διατάματος* (aspect ratio) στους συντελεστές αντίστασης και πίεσης και στον αριθμό Strouhal. Η παρούσα εργασία συμπληρώνει τις προαναφερθείσες συνεισφορές, δεδομένου ότι παρέχει εκτενή ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία τομέων ορμής στο εγγύς και απομακρυσμένο κατάντη πεδίο για περιορισμένα τυρβώδη απορρέματα.

Οι αγωγοί στρέβλωσης της ροής έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τη μελέτη των αποτελεσμάτων μη περιστροφικής στρέβλωσης σε διάφορες μορφές της ροής που αντιμετωπίζονται σε ποικίλες τυρβώδεις διατμητικές ροές συμπεριλαμβανομένου των απορρεμάτων, (Reynolds 1962, Keffer 1965, Elliot & Townsend 1981, Kopp *et al.* 1995). Η εξωτερικά επιβαλλόμενη στρέβλωση ενισχύει τις συνεκτικές δομές που ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του θετικού βαθμού στρέβλωσης και την ίδια στιγμή μειώνει τις κινήσεις με τους κύριους άξονες στροβιλότητας στις άλλες κατευθύνσεις. Αυτή η εκλεκτική ενίσχυση των στροβίλων απαγορεύει την επίτευξη μιας

κατάστασης αυτό-ομοιότητας για το στρεβλωμένο απόρρεμα. Επιπλέον, όσον αφορά τη μεγάλη κλίμακα, δεν παρατηρείται κανένα σημάδι δομικής ισορροπίας όπως διαφαίνεται από την κατάντη εξέλιξη των κατάλληλων δομικών παραμέτρων. Αντ' αυτού, η τυρβώδης δομή είναι σε ένα καθεστώς συνεχόμενης ανάπτυξης σε αντιδιαστολή με τη μη περιστροφική στρέβλωση. Η θεωρία της ταχείας στρέβλωσης (Rapid Distortion Theory - RDT) αρχικά ισοτροπικής, (Batchelor & Proudman 1954; Townsend 1954, 1976) ή αξονοσυμμετρικής τύρβης, (Sreenivasan & Narasimha 1978; Maxey 1982) έχει εφαρμοσθεί για την σύγκριση της θεωρίας με το πείραμα σε διάφορους αγωγούς στρέβλωσης. Γενικά, έχει παρατηρηθεί περιορισμένη συμφωνία μεταξύ της θεωρίας και του πειράματος. Η παραπάνω πρόταση οφείλεται κυρίως στη γραμμικοποίηση των εξισώσεων της κίνησης την οποία το μοντέλο RDT εφαρμόζει. Με τον τρόπο αυτό αγνοούνται οι μη γραμμικές τυρβώδεις αλληλεπιδράσεις οι οποίες είναι μεγάλης σημασίας σε ροές οι οποίες παρουσιάζουν υψηλό βαθμό ανισοτροπίας.

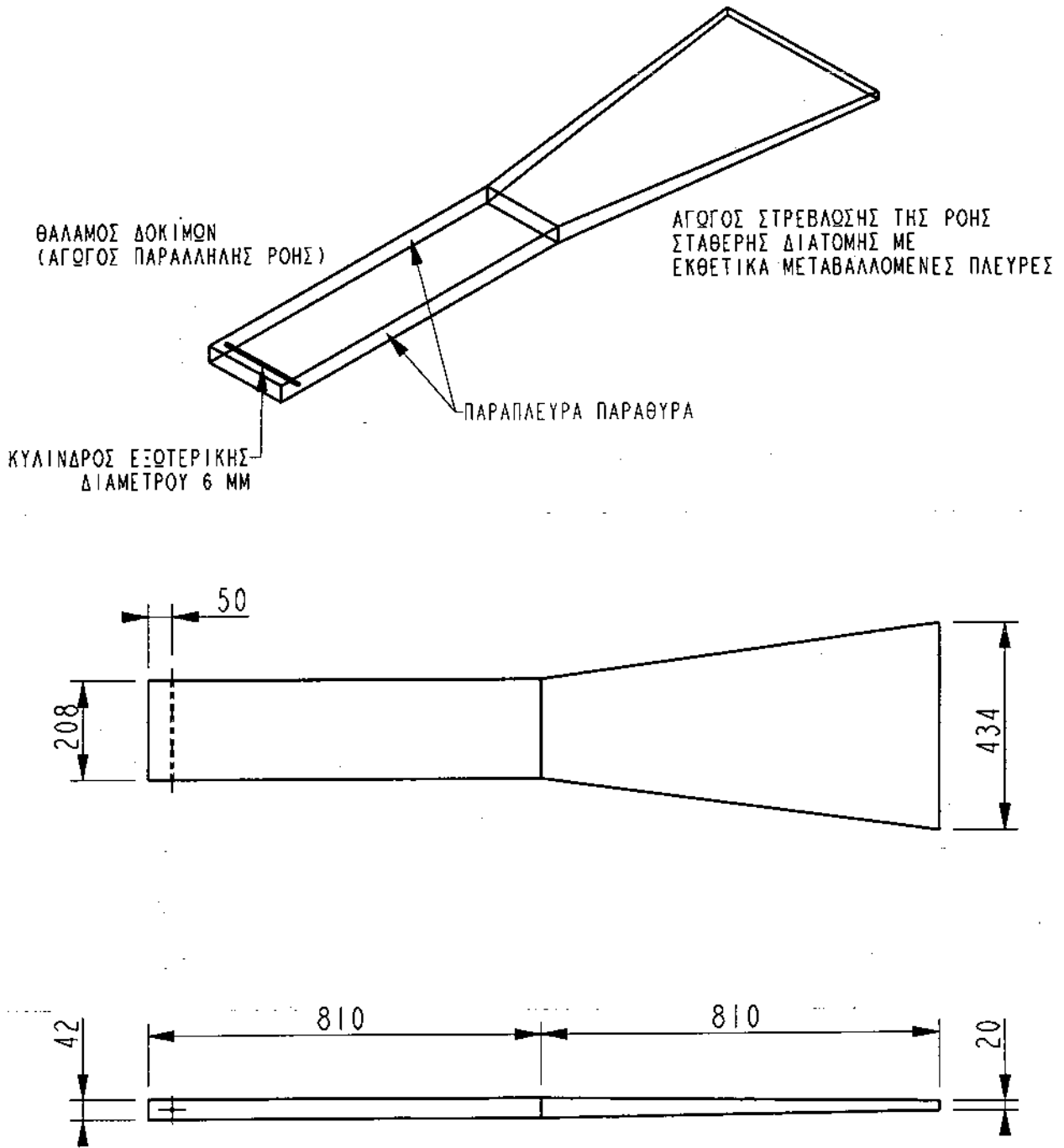
4.2 Περιγραφή του πειράματος

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε κατά την διενέργεια του πειράματος είναι μια αεροσήραγγα ανοιχτού κυκλώματος αποτελούμενη από δύο εξίσου σημαντικά μέρη, έναν αγωγό παράλληλης ροής ή θάλαμος δοκιμών και ένα αγωγό στρέβλωσης της ροής, ίσου μήκους, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Το τμήμα κατά την οποία ευθυγραμμίζεται η ροή (θάλαμος καθυσυχασμού) έχει μήκος 810 mm, ενώ οι διαστάσεις διατομής του είναι $42 \times 208 \text{ mm}^2$ (κάθετα σε οριζόντια). Ο κύλινδρος παραγωγής του απορρέματος, με μια εξωτερική διάμετρο των 6 mm τοποθετείται 50 mm κατάντη της εισόδου της συσκευής με τον άξονα του κάθετο στη ροή εκτεινόμενο παράλληλα με τη μέγιστη διάσταση της διατομής. Ο χρησιμοποιούμενος λόγος απόφραξης από τον κύλινδρο είναι 14%. Αυτό το υψηλό περιορισμένο απόρρεμα αφού ξεπέρασε ένα αρχικό στάδιο ανάπτυξης από 125 κυλινδρικές διαμέτρους κάτω από συνθήκες έλλειψης στρέβλωσης, εισάγεται σε αγωγό στρέβλωσης σταθερής διατομής. Οι πλευρικές διαστάσεις του τμήματος της στρέβλωσης της ροής ποικίλουν εκθετικά με την κατάντη απόσταση πέρα από την οποία το τμήμα εξόδου του αλλάζει σε $20 \times 434 \text{ mm}^2$.

Οι μετρήσεις του πεδίου ροής ήταν αποτέλεσμα χρήσης αισθητήρων θερμού νήματος σε διάταξη x, σε έναν αριθμό Reynolds ίσο με 4300 βάσει της διαμέτρου του

κυλίνδρου. Τα τύπου x θερμά νήματα βαθμονομήθηκαν στην είσοδο της αεροσήραγγας κατά την απουσία του κυλίνδρου υπό τους ίδους όρους ροής με τις αρχικές μετρήσεις. Όλα τα σήματα των ανεμόμετρων διέρχονται από χαμηλοπερατό φίλτρο (low-pass filter) αποτρέποντας την πιθανότητα παραμόρφωσης (aliasing) του σήματος και έπειτα διακριτοποιείται σε μετατροπέα 12-bit A/D με δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων σε υπολογιστή. Στατιστικές αναλύσεις των καταγεγραμμένων σημάτων ταχύτητας επέτρεψαν τον προσδιορισμό των μέσων ταχυτήτων, των απλών και μεικτών παράγωγων της ταχύτητας μέχρι και τετάρτου βαθμού, τα παράγωγα της έντασης καθώς επίσης τον υπολογισμό των συναρτήσεων φασματικής πυκνότητας και συσχέτισης, αλλά και τις τυρβώδεις κλίμακες μήκους καθ' όλη τη ροή.

4.3 Πειραματική συσκευή



Σχήμα 4.1: Πειραματική συσκευή για τη μελέτη τυρβώδους απορέματος κάτω από συνθήκες περιορισμού και στρέβλωσης της ροής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ

5.1 Γεωμετρία του προβλήματος

Για τη δημιουργία της γεωμετρίας και του πλέγματος του αριθμητικού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ο προεπεξεργαστής GAMBIT 2 του κώδικα FLUENT. Η γεωμετρία είναι τρισδιάστατη και ακολουθουθήθηκε η προσέγγιση «bottom-up» για την υλοποίηση της, δηλαδή η σχεδίαση αρχίζοντας από τις γεωμετρικές οντότητες της χαμηλότερης διάστασης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε συνίσταται από τα κάτωθι βήματα:

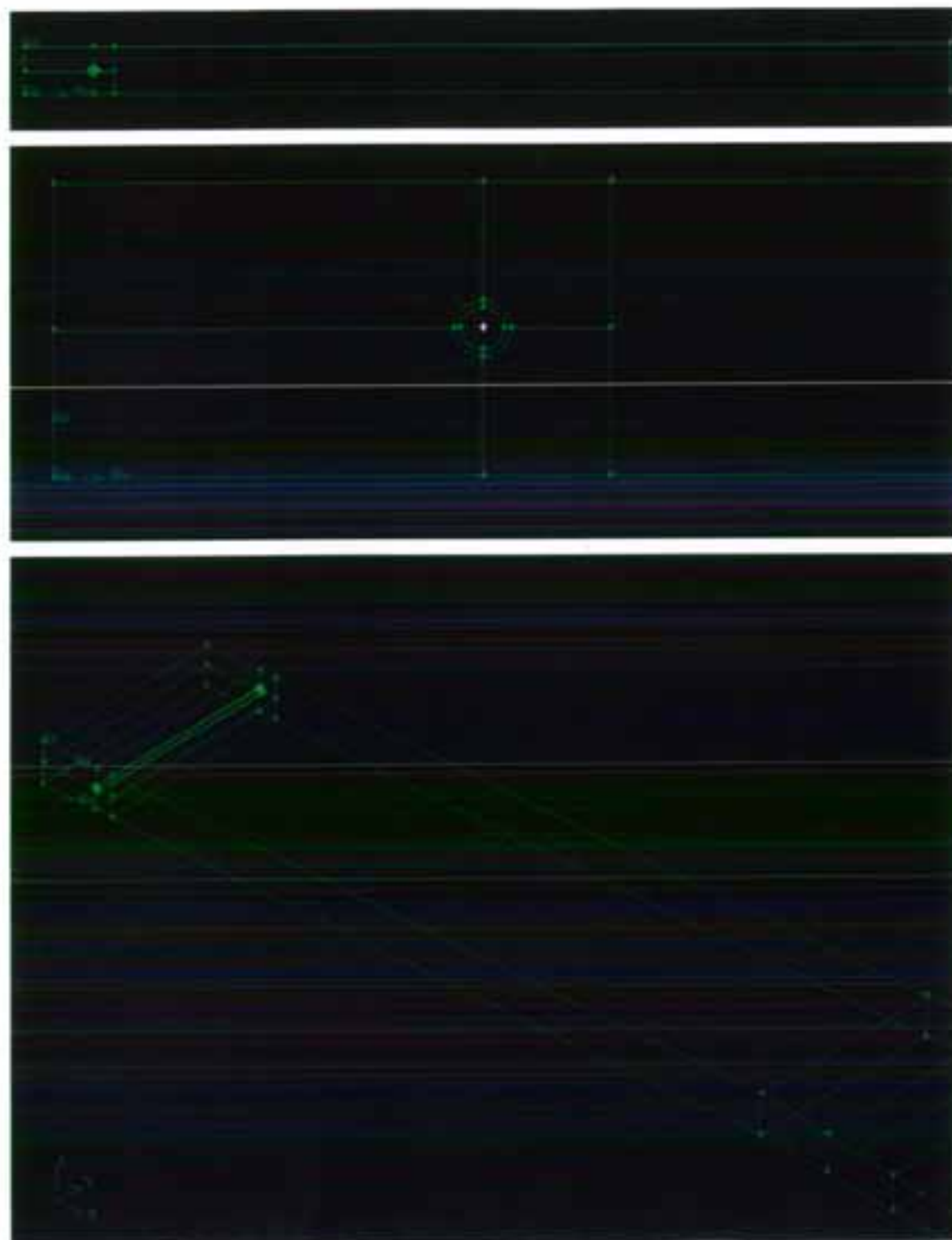
- Σχεδίαση των σημείων που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία καθώς και των βοηθητικών που απαιτούνται για το πλέγμα.
- Σχεδίαση των απαραίτητων μονοδιάστατων οντοτήτων (γραμμές και καμπύλες για τον αγωγό στρέβλωσης)
- Σχεδίαση των επιφανειών με ένωση των 1-D οντοτήτων που παρήχθησαν στο προηγούμενο βήμα
- Σχεδίαση των όγκων του πεδίου αντός των οποίων θα λυθούν οι βασικές εξισώσεις της ροής.

Το περίγραμμα της γεωμετρίας του μοντέλου ταυτίζεται με τη γεωμετρία της πειραματικής συσκευής. Τα υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία που σχεδιάζονται είναι ο κύλινδρος ο οποίος είναι βυθισμένος στη ροή και βοηθητικές γραμμές και επιφάνειες των οποίων ο ρόλος είναι η βέλτιστη διεύθυνση του πλέγματος έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η λύση του προβλήματος σε εύλογο χρονικό διάστημα ενώ ταυτόχρονα να αναλύονται επαρκώς τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής.

5.1.1 Γεωμετρία του θαλάμου δοκιμών

Ο θάλαμος δοκιμών είναι ένας αγωγός ορθογωνικής διατομής με διαστάσεις $810 \times 42 \times 208 \text{ mm}^3$. Η διάμετρος του κυλίνδρου είναι 6mm. Για την σχεδίαση του

θαλάμου δοκιμών γίνεται δισδιάστατη αποτύπωση στο επίπεδο $x-z$ και στη θέση $y=0$. Οι επιφάνειες που δημιουργούνται στη συνέχεια εξωθούνται στη y -διάσταση για την δημιουργία των όγκων του μοντέλου. Ο κύλινδρος περιβάλλεται από βοηθητικές επιφάνειες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία πλέγματος υψηλής ανάλυσης στην περιοχή του τοιχώματος.



Σχήμα 5.1 Γεωμετρία του θαλάμου δοκιμών

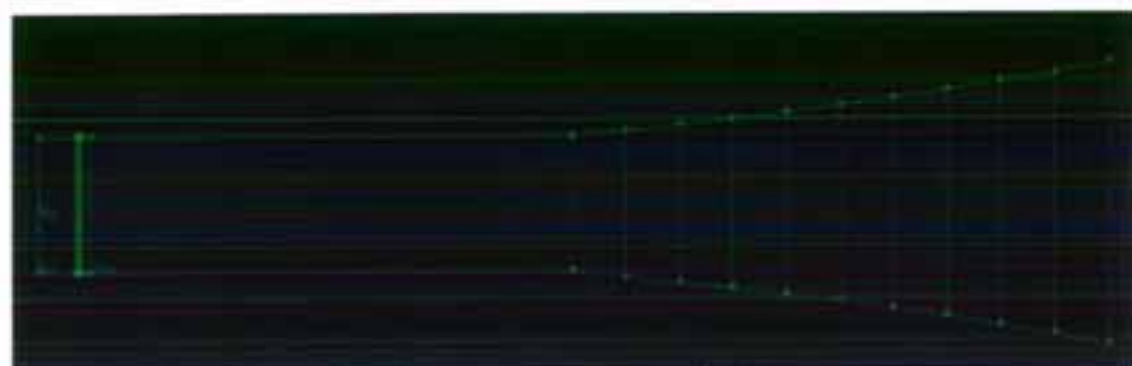
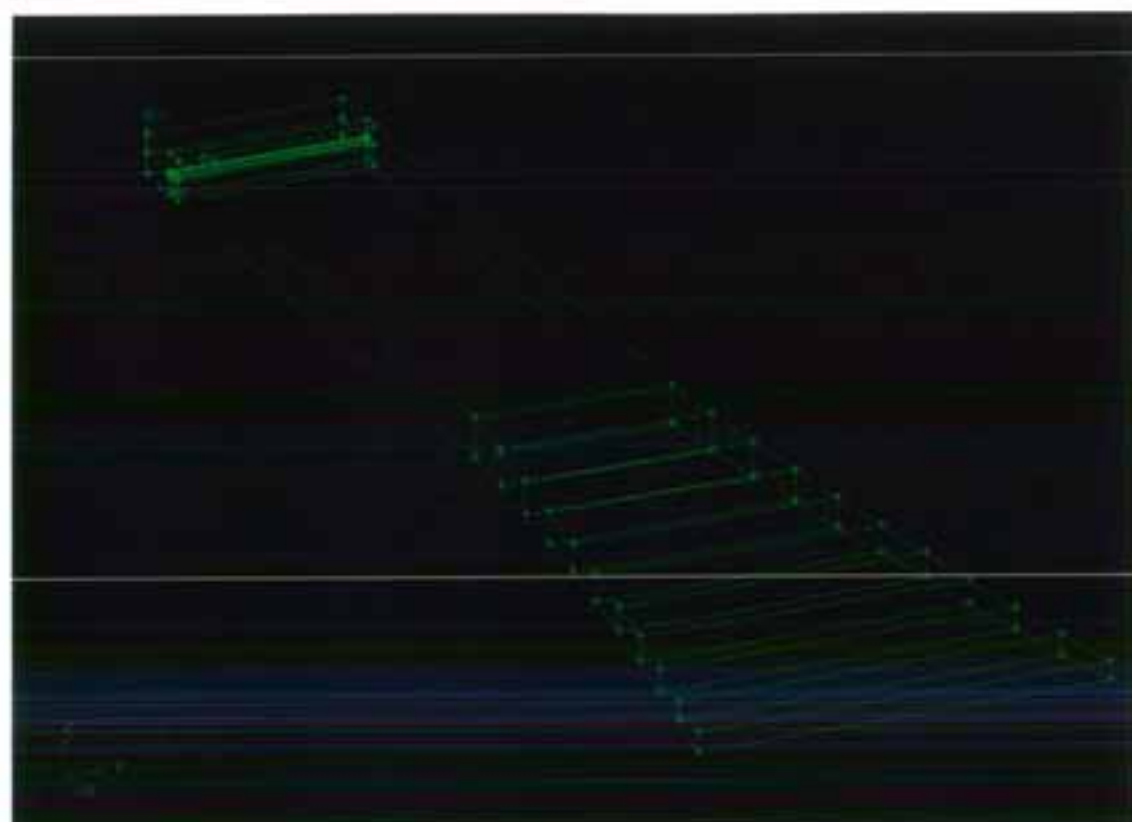
5.1.2 Γεωμετρία του αγωγού στρέβλωσης της ροής

Ο αγωγός στρέβλωσης είναι και αυτός ορθογωνικής διατομής ίσου μήκους με το θάλαμο δοκιμών. Το πλάτος του αυξάνεται εκθετικά κατά e^{ax} όπου x η διαμήκης απόσταση μετρούμενη από την αρχή του αγωγού και $c = 0.908$ σχεδιαστική σταθερά, ενώ το ύψος του μειώνεται κατά e^{-ax} , με αποτέλεσμα να διατηρείται σταθερή η επιφάνεια της διατομής του αγωγού και η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας. Η αρχική διατομή του αγωγού στρέβλωσης είναι $42 \cdot 208mm^2$ και η τελική $20 \cdot 434mm^2$.

Για το σχεδιασμό της γεωμετρίας υπολογίζονται οι συντεταγμένες σημείων που βρίσκονται στο περίγραμμα του θαλάμου στρέβλωσης της ροής. Συγκεκριμένα οι συντεταγμένες υπολογίζονται σε 10 σταθμούς στο τρέχον σύστημα συντεταγμένων οι οποίοι συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Σταθμός	x^*	x	b_0	y_1	y_2	b	h_0	z_1	z_2	h
0	0	0,81	0,208	0,208	0	0,208	0,042	0,042	0	0,042
1	0,081	0,891	0,208	0,215937	-0,00794	0,223875	0,042	0,040511	0,001489	0,039022
2	0,162	0,972	0,208	0,22448	-0,01648	0,240961	0,042	0,039127	0,002873	0,036255
3	0,243	1,053	0,208	0,233675	-0,02568	0,259351	0,042	0,037842	0,004158	0,033684
4	0,324	1,134	0,208	0,243572	-0,03557	0,279145	0,042	0,036648	0,005352	0,031296
5	0,405	1,215	0,208	0,254225	-0,04622	0,300449	0,042	0,035538	0,006462	0,029076
6	0,486	1,296	0,208	0,26569	-0,05769	0,323379	0,042	0,034507	0,007493	0,027015
7	0,567	1,377	0,208	0,27803	-0,07003	0,34806	0,042	0,03355	0,00845	0,025099
8	0,648	1,458	0,208	0,291312	-0,08331	0,374624	0,042	0,03266	0,00934	0,023319
9	0,729	1,539	0,208	0,305608	-0,09761	0,403215	0,042	0,031833	0,010167	0,021666
10	0,81	1,62	0,208	0,320994	-0,11299	0,433989	0,042	0,031065	0,010935	0,02013

Τα σημεία τα οποία προκύπτουν ενώνονται και μέσω παρεμβολής τύπου spline προκύπτουν τα καμπύλα τμήματα. Στα σχήματα στα οποία ακολουθούν απεικονίζεται η γεωμετρία του αγωγού στρέβλωσης της ροής.



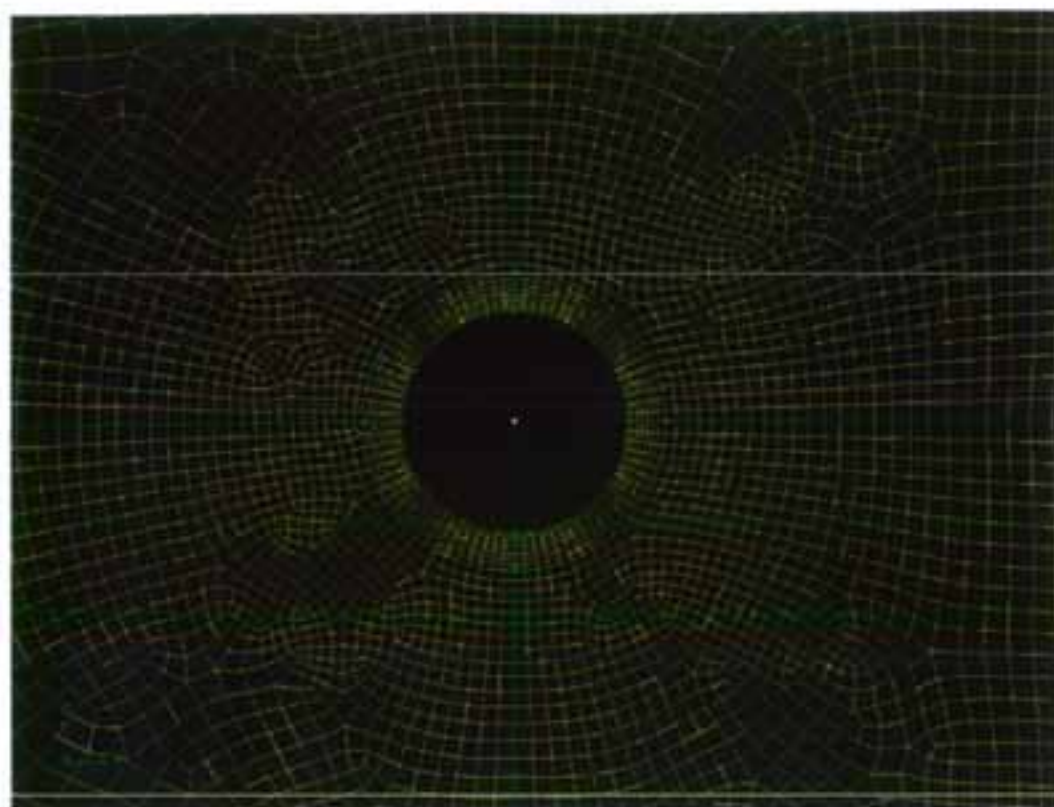


Σχήμα 5.2 Γεωμετρία του αγωγού στρέβλωσης της ροής

5.2 Πλέγμα

Η διακριτοποίηση των γεωμετρικών οντοτήτων πραγματοποιείται με παρόμοια προσέγγιση. Αρχικά διακριτοποιούνται οι μονοδιάστατες γεωμετρικές οντότητες και στη συνέχεια οι επιφάνειες. Το πλέγμα των όγκων στην περιοχή του θαλάμου δοκιμών δημιουργείται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Cooper. Ο αλγόριθμος αυτός απαιτεί τον καθορισμό μιας επιφάνειας ως πηγής και άλλων επιφανειών που έχουν το ρόλο οδηγού. Κατ' αυτόν τον τρόπο διατηρείται η ομοιομορφία του πλέγματος κατά την y -διεύθυνση και αποφεύγεται η χρήση τετράεδρων που οδηγούν σε αυξημένη αριθμητική διάχυση. Στον αγωγό στρέβλωσης της ροής χρησιμοποιούνται εξαεδρικά κελλιά.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η διακριτοποίηση του όγκου απαιτεί την ύπαρξη μιας επιφάνειας η οποία έχει το ρόλο πηγής. Η επιφάνεια αυτή βρίσκεται στο επίπεδο $y=0$. Ουσιαστικά, η μορφή του πλέγματος στην επιφάνεια αυτή καθορίζει το αντίστοιχο πλέγμα στους όγκους που καταλαμβάνουν το χώρο στην περιοχή του θαλάμου δοκιμών καθώς το εν λόγω πλέγμα αντιγράφεται σε επίπεδα παράλληλα κατά τη διεύθυνση των y .



Σχήμα 5.3 Το πλέγμα περί του κυλίνδρου

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.3 το πλέγμα είναι ιδιαίτερα πυκνό πλησίον του στερεού τοιχώματος ενώ αραιώνει πλησιάζοντας τα πλευρικά τοιχώματα του θαλάμου δοκιμών. Η αυξημένη πυκνότητα επιδιώκεται έτσι ώστε να αναλυθεί επαρκώς το στρώμα διάτμησης και το απόρευμα κατάντη του κυλίνδρου. Στον υπολοιπο χώρο τόσο του θαλάμου δοκιμών όσο και του αγωγού στρέβλωσης της ροής το μέσο μέγεθος των κελιών δε διαφοροποιείται. Για τις επιφάνειες χρησιμοποιούνται τετραγωνικά κελιά ενώ για τους όγκους εξαεδρικά. Ο συνολικός αριθμός των κόμβων είναι 485373 ενώ των κελιών 446300.

5.3 Οριακές συνθήκες

Για την είσοδο του θαλάμου δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν οριακές συνθήκες εισόδου ταχύτητας (velocity inlet). Αυτό το είδος οριακής συνθήκης απαιτεί τον ορισμό των συνιστωσών της ταχύτητας και των παραμέτρων της τύρβης. Αναλυτικά οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ως εξής:

- $V_x = 11.25m / sec$

- $V_y = 0 \text{ m/sec}$
- $V_z = 0 \text{ m/sec}$
- $T_i = 1\%$
- $l = 0.00042$

Η κλίμακα μήκους υπολογίστηκε από την εμπειρική σχέση $l = 0.07L$ όπου L μια χαρακτηριστική διάσταση της ροής (στη συγκεκριμένη περίπτωση η διάμετρος D του κυλίνδρου). Η τυρβώδης κινητική ενέργεια και η σκέδασή της υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$k = \frac{3}{2} U_8 T_i^2$$

$$\text{και } \varepsilon = C_\mu^{3/2} \frac{k^{3/2}}{l}$$

όπου $C_\mu = 0.09$ σταθερά του μοντέλου k-ε.

Για τα τοιχώματα του θαλάμου δοκιμών, του αγωγού στρέβλωσης της ροής και του κυλίνδρου χρησιμοποιούνται οριακές συνθήκες τοιχώματος (wall boundary conditions) με τυπικές συναρτήσεις τοιχώματος (standard wall functions).

Στην έξοδο της ροής χρησιμοποιείται η οριακή συνθήκη εξόδου πίεσης. Το μέγεθος του οποίου η γνώση απαιτείται είναι η ατμοσφαιρική πίεση η οποία ορίζεται ίση με 101325Pa. Η συνήθης συνθήκη εξόδου ταχύτητας η οποία χρησιμοποιείται συνήθως σε προβλήματα κλειστών αγωγών και καναλιών δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθώς οι αξονικές κλίσεις των ποσοτήτων που μεταφέρονται δεν είναι μηδενικές.

5.4 Αριθμητικά μοντέλα και αλγόριθμοι

Το πρόβλημα λύνεται ως τρισδιάστατο, ασυμπιεστο, ισόθερμο και τυρβώδες. Οι άγνωστες ποσότητες της ροής είναι η στατική πίεση p , οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας, η τυρβώδης κινητική ενέργεια k και η σκέδασή της ε . Οι εξισώσεις που λύνονται είναι η εξίσωση της συνέχειας, οι τρεις εξισώσεις της ορμής και οι δύο εξισώσεις του τυρβώδους μοντέλου:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} + \bar{F}$$

όπου $\bar{\tau}$ είναι ο τανυστής των τάσεων, $\rho \bar{g}$ η καθολική δύναμη της βαρύτητας και \bar{F} τυχόν εξωτερικές καθολικές δυνάμεις ή άλλες πηγές. Ο τανυστής των τάσεων δίδεται από την εξίσωση:

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \bar{u} I \right]$$

όπου I είναι ο μοναδιαίος τανυστής.

Οι εξισώσεις της ΤΚΕ και της σκέδασης της είναι:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

και

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

όπου G_k είναι ο όρος της δημιουργίας της ΤΚΕ εξαιτίας των μέσων κλίσεων της ταχύτητας:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

η οποία υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$G_k = \mu_t S^2$$

με

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

Η τυρβώδης συνεκτικότητα υπολογίζεται βάσει της τιμής των k και ε από την εξίσωση:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Οι σταθερές του μοντέλου λαμβάνουν τις τιμές:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Οι βασικές εξισώσεις επιλύονται με τη χρήση της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων όγκων. Βάσει αυτής της μεθόδου το πεδίο διαιρείται σε πεπερασμένους όγκους χρησιμοποιώντας ένα υπολογιστικό πλέγμα. Οι εξισώσεις της ροής στη συνέχεια ολοκληρώνονται στους διακριτούς πεπερασμένους όγκους με σκοπό τη δημιουργία ενός συστήματος εξισώσεων για τις εξαρτημένες μεταβλητές. Το τελευταίο βήμα πριν από την επίλυση είναι η γραμμικοποίηση των εξισώσεων και η λύση του συστήματος των εξισώσεων.

Για τη λύση των γραμμικοποιημένων εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της μεμονωμένης επίλυσης (segregated solver). Αρχικά το πρόβλημα λύθηκε ως μόνιμο ως προς το χρόνο έτσι ώστε να αρχικοποιηθεί το πεδίο και να επιταχυνθεί η διαδικασία της σύγκλισης. Στη συνέχεια ακολούθησε η επίλυση σε χρονικά εξαρτημένη μορφή και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τη χρονική διακριτοποίηση ήταν δευτέρας τάξης και πεπλεγμένος. Η ρητή διακριτοποίηση δεν κατέστη δυνατό να χρησιμοποιηθεί καθώς οδηγούσε σε απόκλιση της λύσης μετά από μερικά χρονικά βήματα.

Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε ήταν αέρας με φυσικές ιδιότητες:

$$\rho = 1.225 \text{ kg} / \text{m}^3$$

και
$$\mu = 1.789 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{sec}}$$

Οι συντελεστές υποχαλάρωσης χρειάστηκε να μεταβληθούν έτσι ώστε να διασφαλιστεί η σύγκλιση και να αποτραπούν πιθανές αποκλίσεις. Οι τιμές που έλαβαν για τις διάφορες μεταφερόμενες ποσότητες του πεδίου έχουν ως εξής:

Πίεση	1
Πυκνότητα	1
Εξισώσεις ορμής	0.9
Τυρβώδης κινητική ενέργεια	0.8
Σκέδαση της ΤΚΕ	0.8
Τυρβώδης συνεκτικότητα	1

Ο αλγόριθμος διακριτοποίησης της πίεσης ήταν ο δευτέρας τάξεως ανάντη και για τη σύζευξη των πεδίων ταχύτητας και πίεσης χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμός SIMPLIC. Για τις εξισώσεις της ορμής στις τρεις διαστάσεις, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και της σκέδασης της, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος δευτέρας τάξης ανάντη.

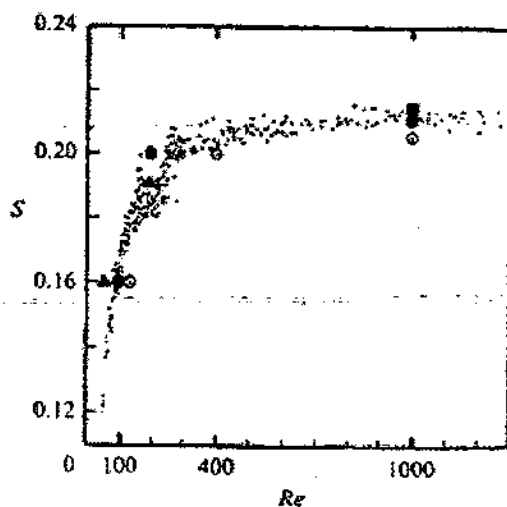
5.5 Διαδικασία επίλυσης του προβλήματος

Όπως αναφέρθηκε και στη προηγούμενη παράγραφο το πρόβλημα λύθηκε αρχικά ως μόνιμο ως προς το χρόνο. Η επαναληπτική διαδικασία διακόπηκε όταν η μέση τιμή των αδιάστατων υπολοίπων προσέγγισε την οριακή τιμή 10^{-4} . Το πεδίο που προέκυψε χρησιμοποιήθηκε για την αρχικοποίηση της χρονικά μεταβαλλόμενης λύσης ενώ έδωσε μια αρχική εκτίμηση.

Το χρονικό βήμα που χρησιμοποιήθηκε αρχικά ήταν 10^{-3} sec . Κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας παρατηρείται το πεδίο των ταχυτήτων έτσι ώστε να ελεγχθεί η σύγκλιση. Ταυτόχρονα γίνεται εξέταση της περιοδικότητας της ροής συγκρίνοντας την περίοδο που παρατηρείται με την τιμή:

$$\tau = \frac{D}{S \cdot U_{\infty}} = \frac{6 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0.21 \cdot 11.25 \text{ m/sec}} = 2.53 \cdot 10^{-3} \text{ sec}$$

Ο αριθμός Strouhal λαμβάνεται από το διάγραμμα:



Σχήμα 5.4 Μεταβολή του αριθμού Strouhal συναρτήσει του αριθμού Reynolds

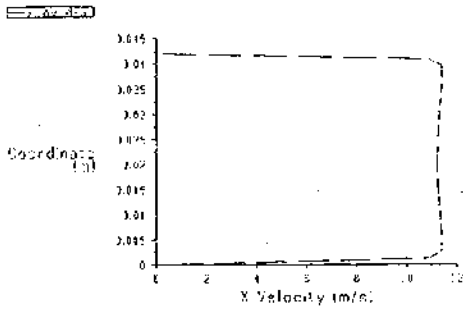
Το τελευταίο στάδιο της επίλυσης περιλαμβάνει τη βελτίωση του χρονικού βήματος στην τιμή $10^{-4}sec$. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στην ενότητα που ακολουθεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 60

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

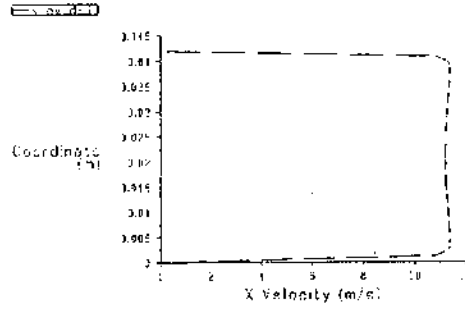
6. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

6.1 Ταχύτητα στον άξονα x σε απόσταση $x/d = 6$



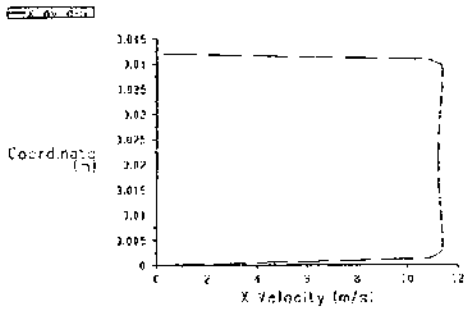
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8175e-01; May 19, 2004
11:01:16.63 (3); Integrated; (kg; Unitless))

$t = 0.38075$



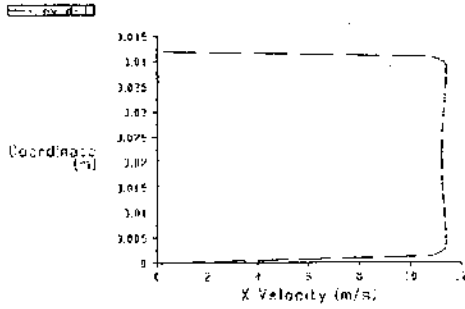
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8180e-01; May 19, 2004
11:01:16.63 (3); Integrated; (kg; Unitless))

$t = 0.38080$



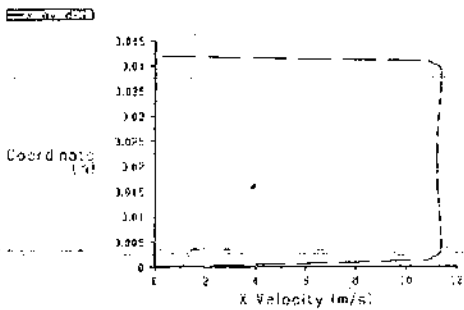
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8185e-01; May 19, 2004
11:01:16.63 (3); Integrated; (kg; Unitless))

$t = 0.38085$



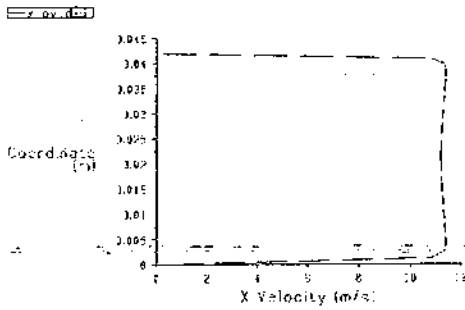
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8190e-01; May 19, 2004
11:01:16.63 (3); Integrated; (kg; Unitless))

$t = 0.38090$



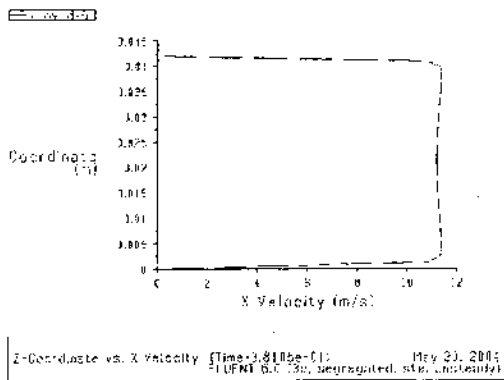
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8195e-01; May 19, 2004
11:01:16.63 (3); Integrated; (kg; Unitless))

$t = 0.38095$

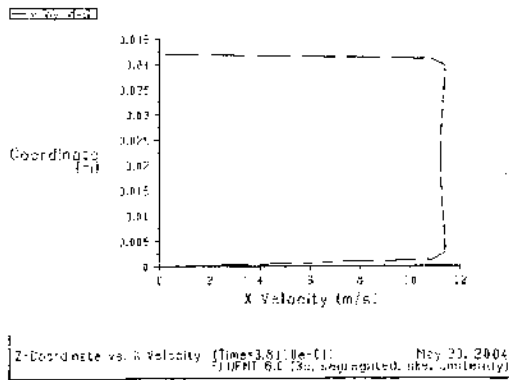


Z-Coordinate vs. Y Velocity (Time=3.8100e-01; May 19, 2004
11:01:16.63 (3); Integrated; (kg; Unitless))

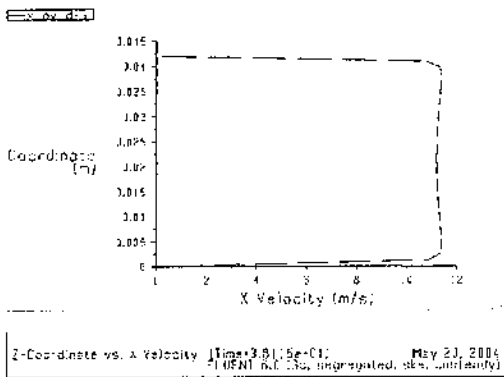
$t = 0.38100$



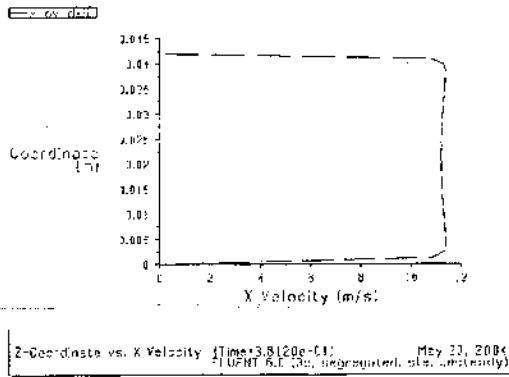
t = 0.38105



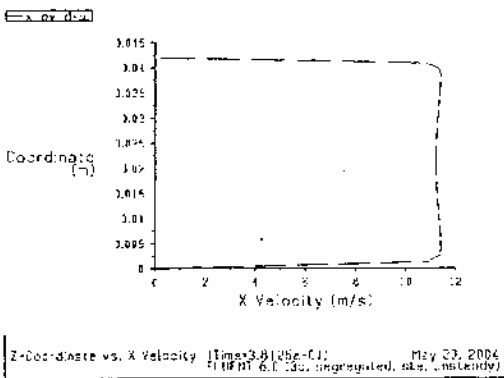
t = 0.38110



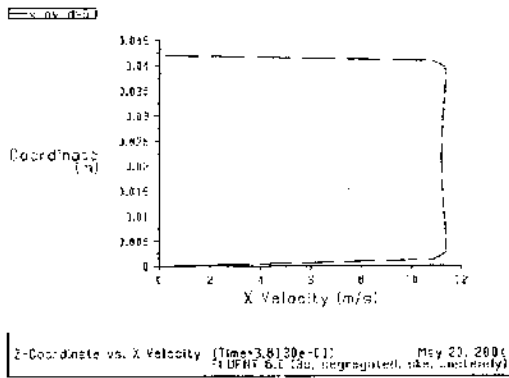
t = 0.38115



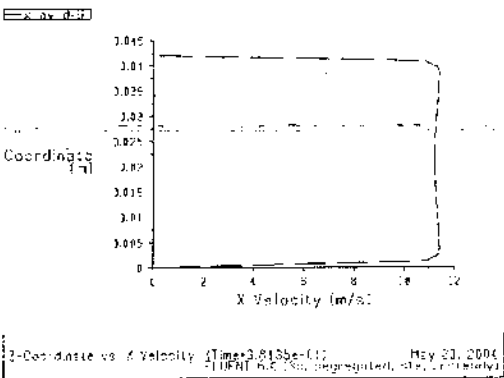
t = 0.38120



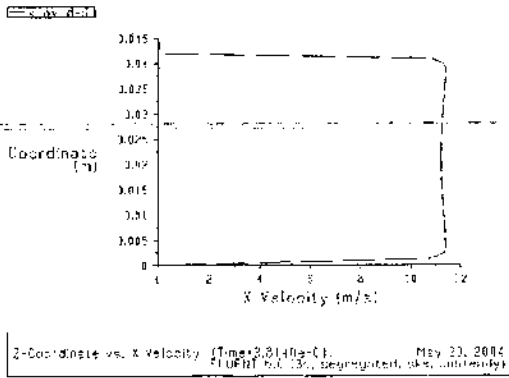
t = 0.38125



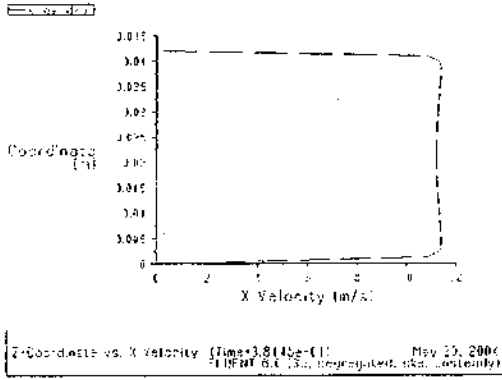
t = 0.38130



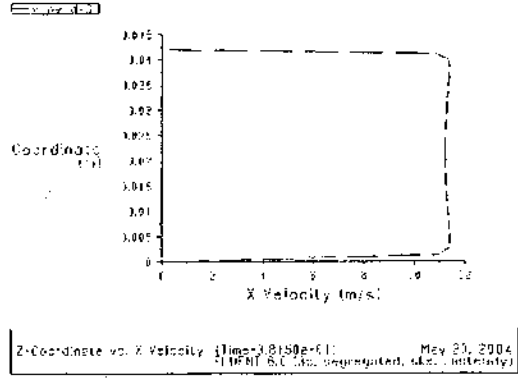
t = 0.38135



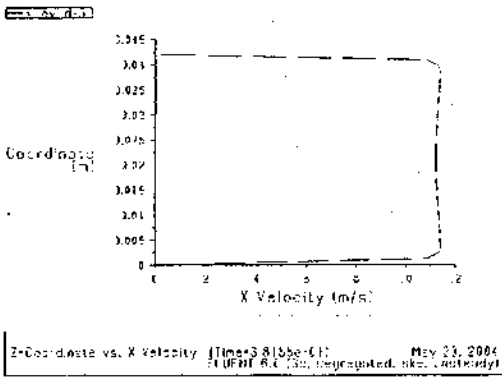
t = 0.38140



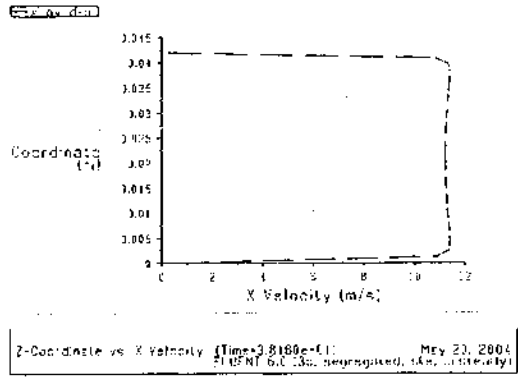
t = 0.38145



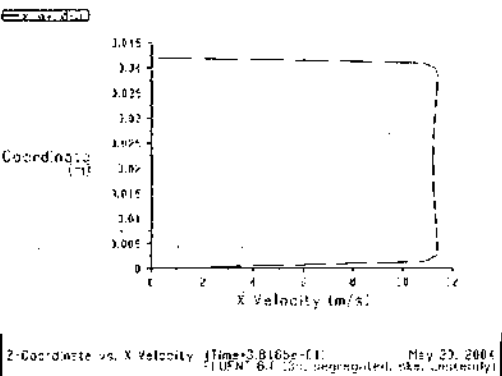
t = 0.38150



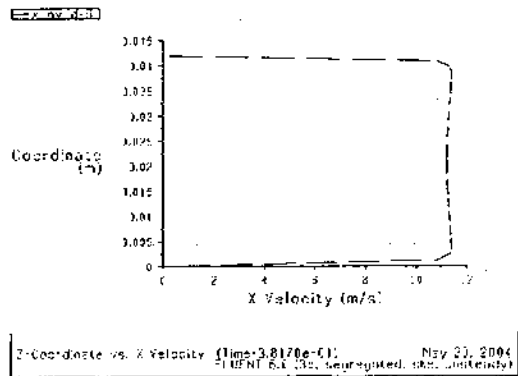
t = 0.38155



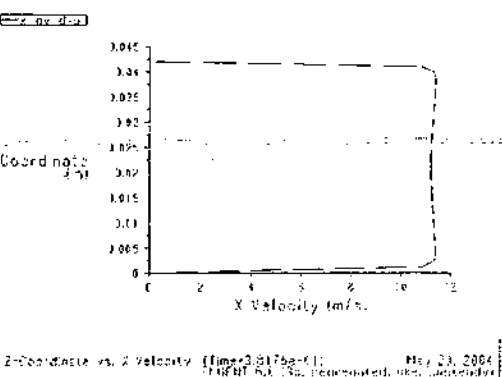
t = 0.38160



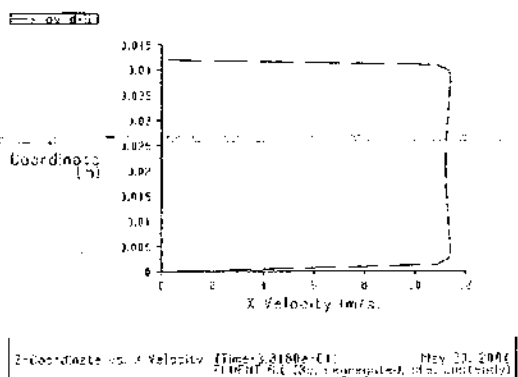
t = 0.38165



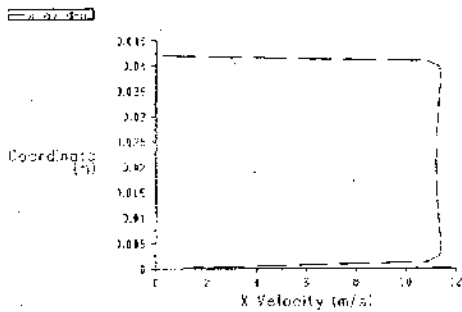
t = 0.38170



t = 0.38175

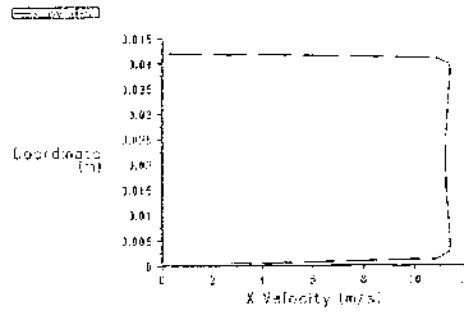


t = 0.38180



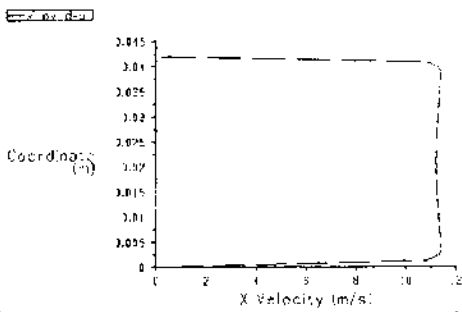
Z-Coordinate vs. X Velocity [Time=3.8185e-01] May 21, 2004
11PNT 6.0 (3d, segregated, sbs, unsteady)

t = 0.38185



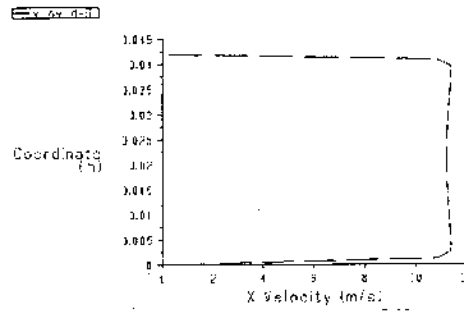
Z-Coordinate vs. X Velocity [Time=3.8190e-01] May 21, 2004
11PNT 6.0 (3d, segregated, sbs, unsteady)

t = 0.38190



Z-Coordinate vs. X Velocity [Time=3.8195e-01] May 21, 2004
11PNT 6.0 (3d, segregated, sbs, unsteady)

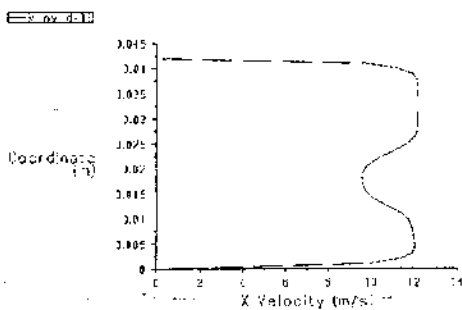
t = 0.38195



Z-Coordinate vs. X Velocity [Time=3.8200e-01] May 21, 2004
11PNT 6.0 (3d, segregated, sbs, unsteady)

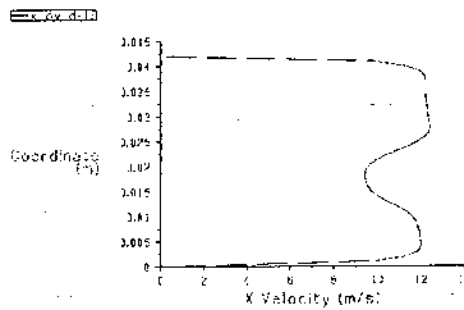
t = 0.38200

6.2 Ταχύτητα στον άξονα x σε απόσταση $x/d = 16$



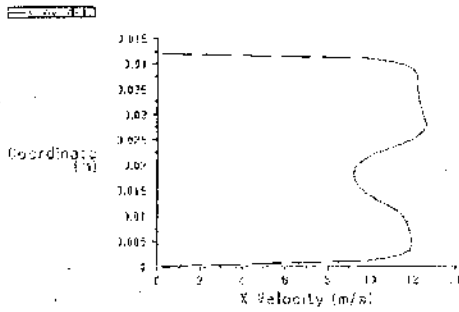
Z-Coordinate vs. X Velocity [Time=3.8075e-01] May 18, 2004
11PNT 6.0 (3d, segregated, sbs, unsteady)

t = 0.38075



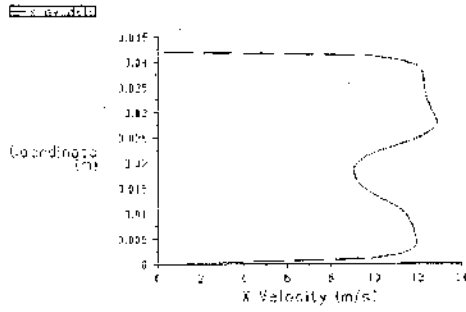
Z-Coordinate vs. X Velocity [Time=3.8080e-01] May 19, 2004
11PNT 6.0 (3d, segregated, sbs, unsteady)

t = 0.38080



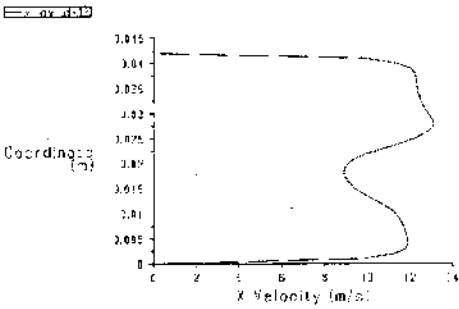
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8085e-01) May 19, 2004
11:07:11.61 (3s, segregated, ssa, unsteady)

t = 0.38085



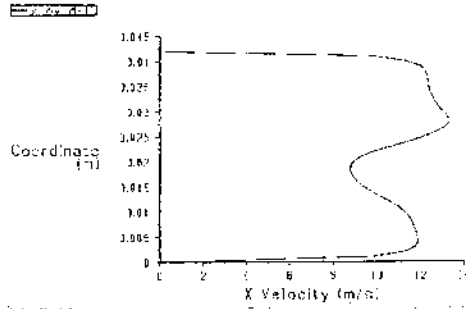
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8090e-01) May 19, 2004
11:07:11.61 (3s, segregated, ssa, unsteady)

t = 0.38090



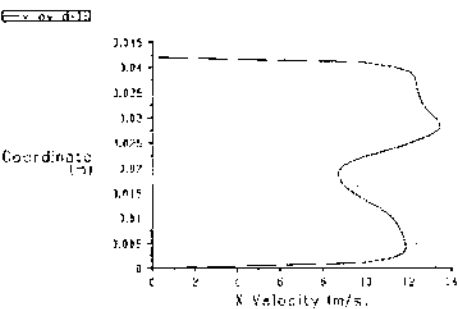
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8095e-01) May 19, 2004
11:07:11.61 (3s, segregated, ssa, unsteady)

t = 0.38095



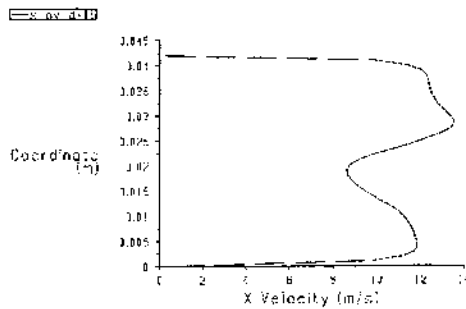
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8100e-01) May 19, 2004
11:07:11.61 (3s, segregated, ssa, unsteady)

t = 0.38100



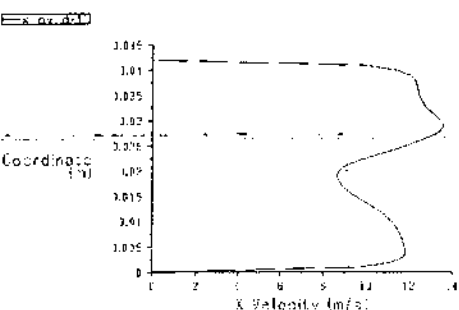
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8105e-01) May 23, 2004
11:07:11.61 (3s, segregated, ssa, unsteady)

t = 0.38105



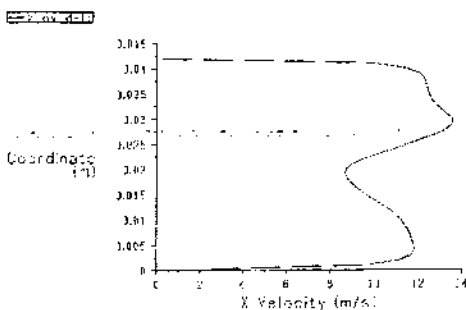
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8110e-01) May 23, 2004
11:07:11.61 (3s, segregated, ssa, unsteady)

t = 0.38110



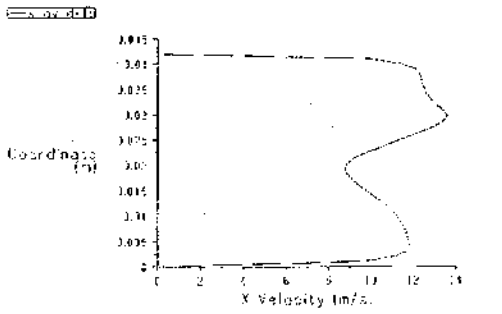
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8115e-01) May 23, 2004
11:07:11.61 (3s, segregated, ssa, unsteady)

t = 0.38115



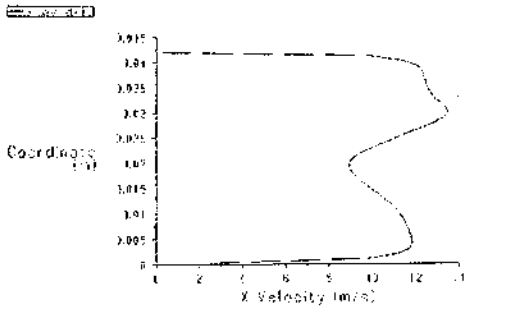
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8120e-01) May 23, 2004
11:07:11.61 (3s, segregated, ssa, unsteady)

t = 0.38120



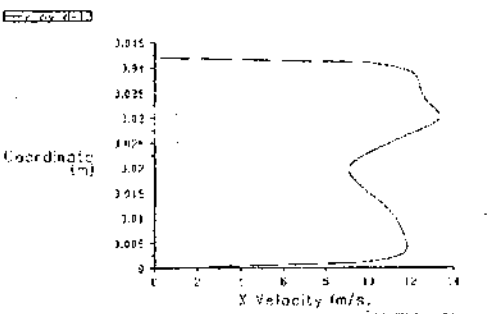
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8125e-01) May 23, 2004
 TUFNT 6.C (3a, Segregated, aka, Unsteady)

t = 0.38125



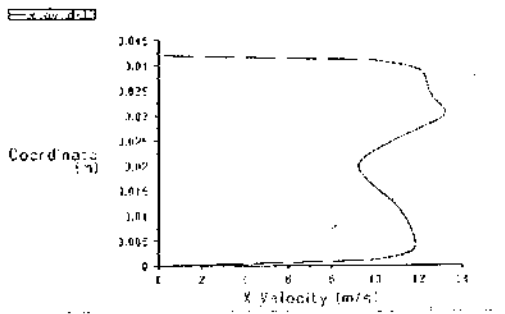
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8130e-01) May 23, 2004
 TUFNT 6.C (3a, Segregated, aka, Unsteady)

t = 0.38130



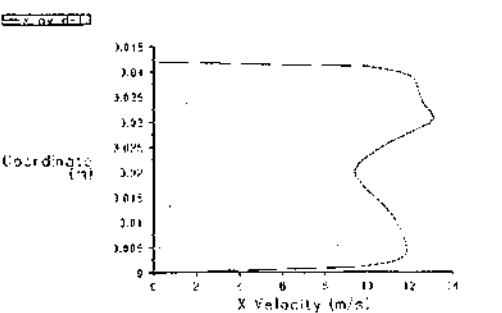
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8135e-01) May 23, 2004
 TUFNT 6.C (3a, Segregated, aka, Unsteady)

t = 0.38135



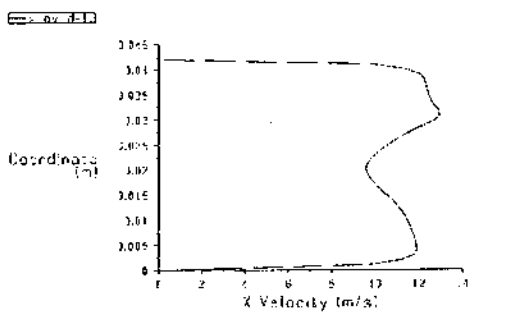
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8140e-01) May 23, 2004
 TUFNT 6.C (3a, Segregated, aka, Unsteady)

t = 0.38140



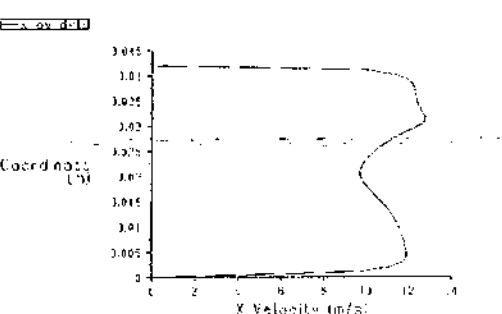
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8145e-01) May 23, 2004
 TUFNT 6.C (3a, Segregated, aka, Unsteady)

t = 0.38145



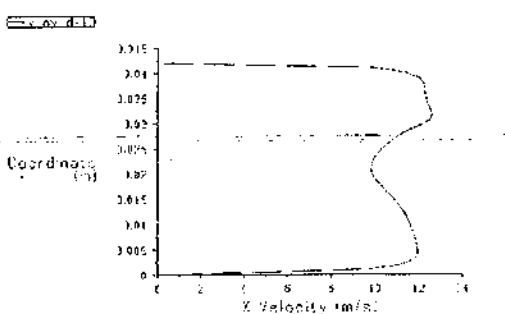
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8150e-01) May 23, 2004
 TUFNT 6.C (3a, Segregated, aka, Unsteady)

t = 0.38150



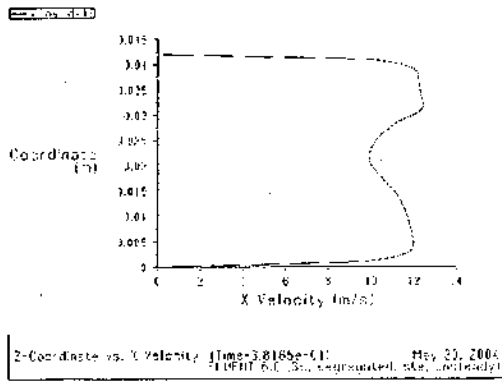
Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8155e-01) May 23, 2004
 TUFNT 6.C (3a, Segregated, aka, Unsteady)

t = 0.38155

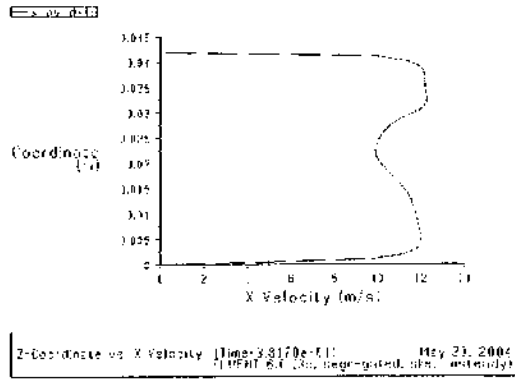


Z-Coordinate vs. X Velocity (Time=3.8160e-01) May 23, 2004
 TUFNT 6.C (3a, Segregated, aka, Unsteady)

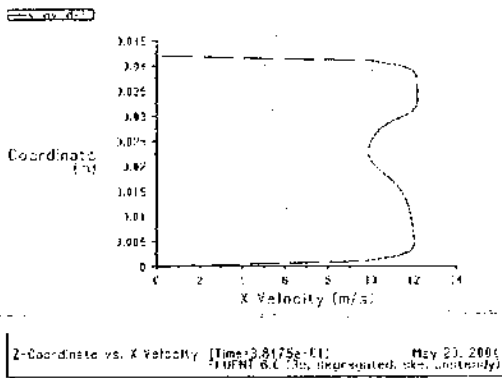
t = 0.38160



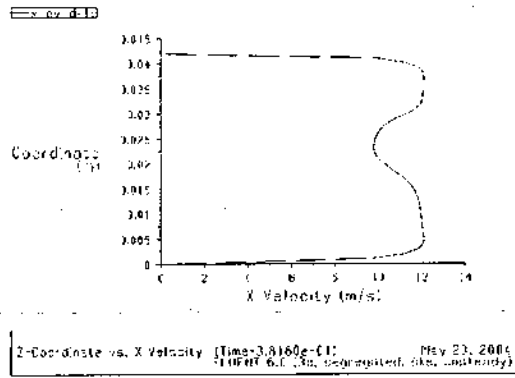
t = 0.38165



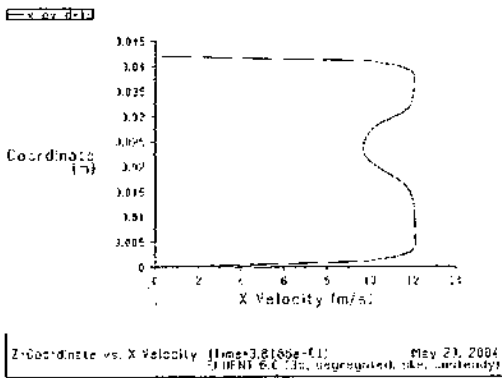
t = 0.38170



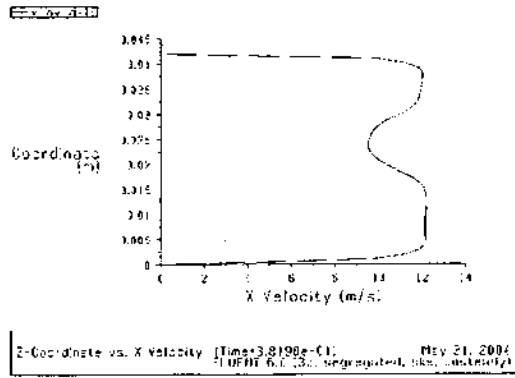
t = 0.38175



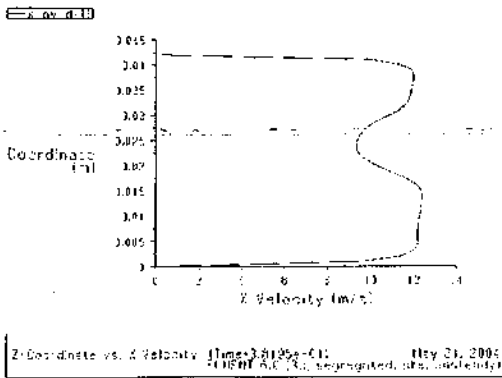
t = 0.38180



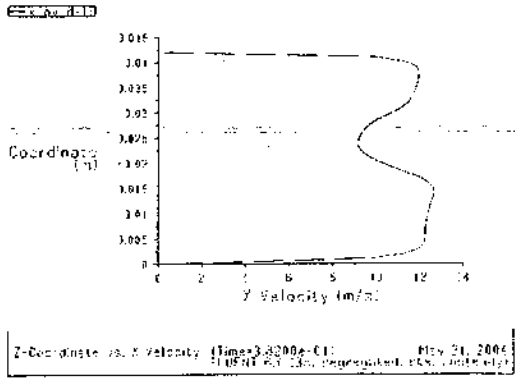
t = 0.38185



t = 0.38190

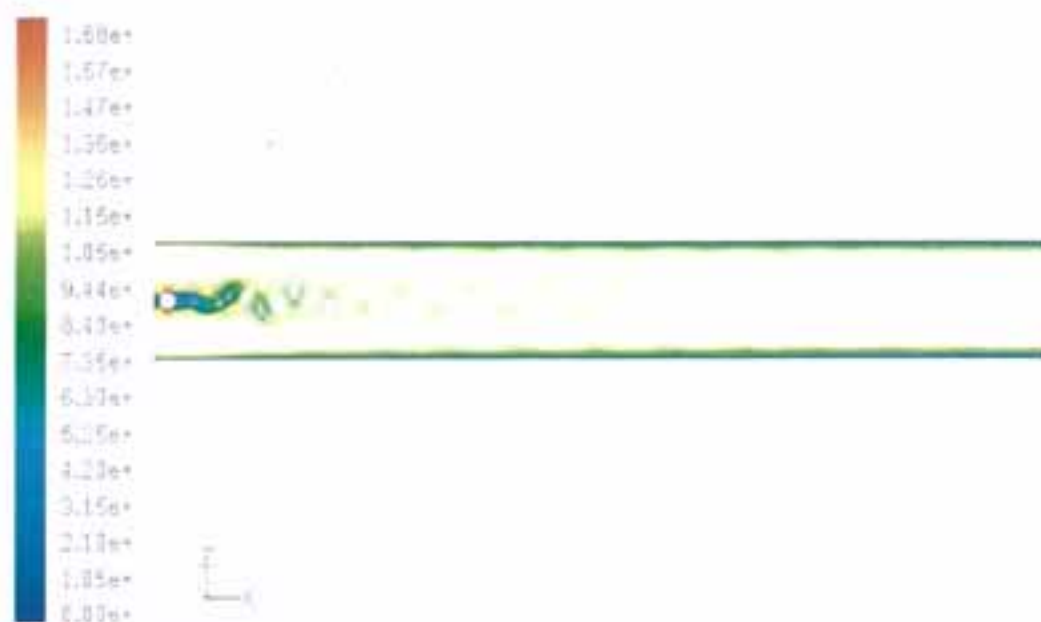


t = 0.38195



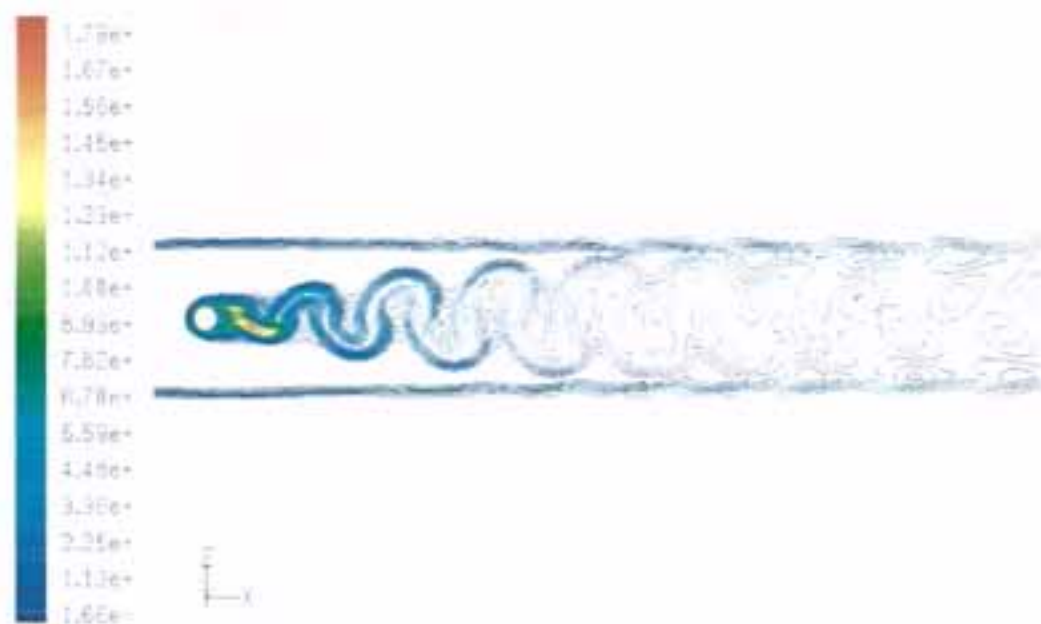
t = 0.38200

6.3 Διαγράμματα ισοτιμών της ταχύτητας, ΤΚΕ και σκέδασης της ΤΚΕ



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8075e-01) May 14, 2004
FLUENT 6.3 (3d, segregated, s-c, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38075$



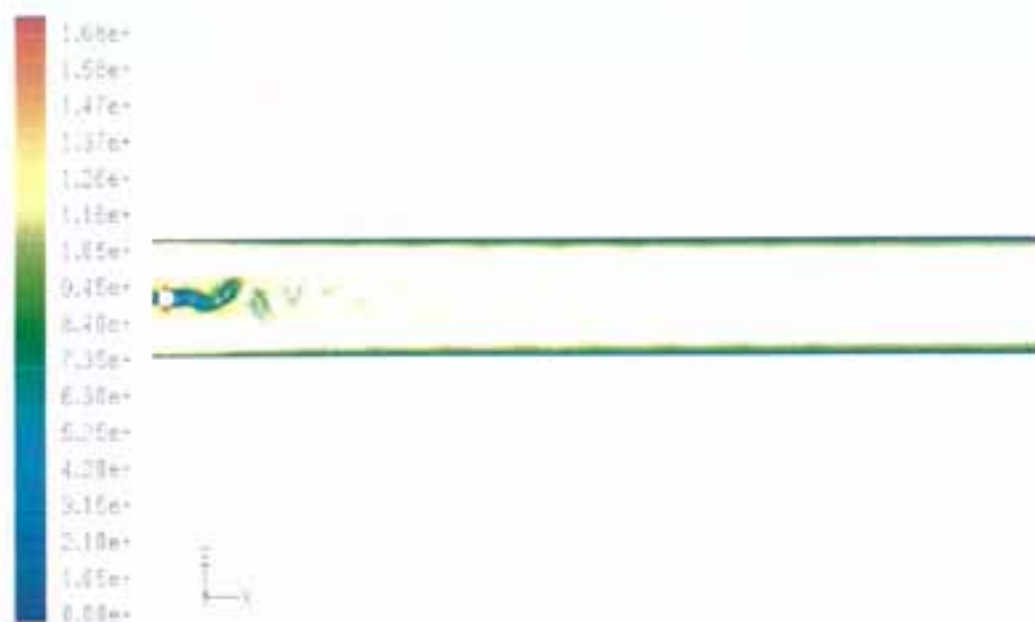
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=3.8075e-01) May 14, 2004
FLUENT 6.3 (3d, segregated, s-c, unsteady)

Πεδίο ΤΚΕ για $t=0.38075$



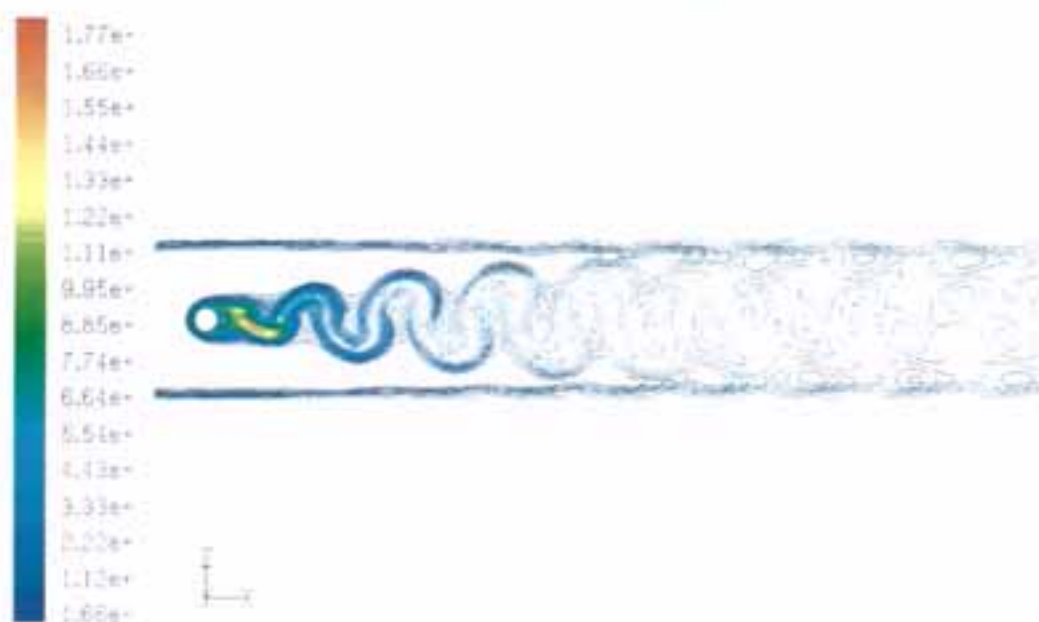
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=3.8000e-01)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38075



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8080e-01) May 14, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για t=0.38080



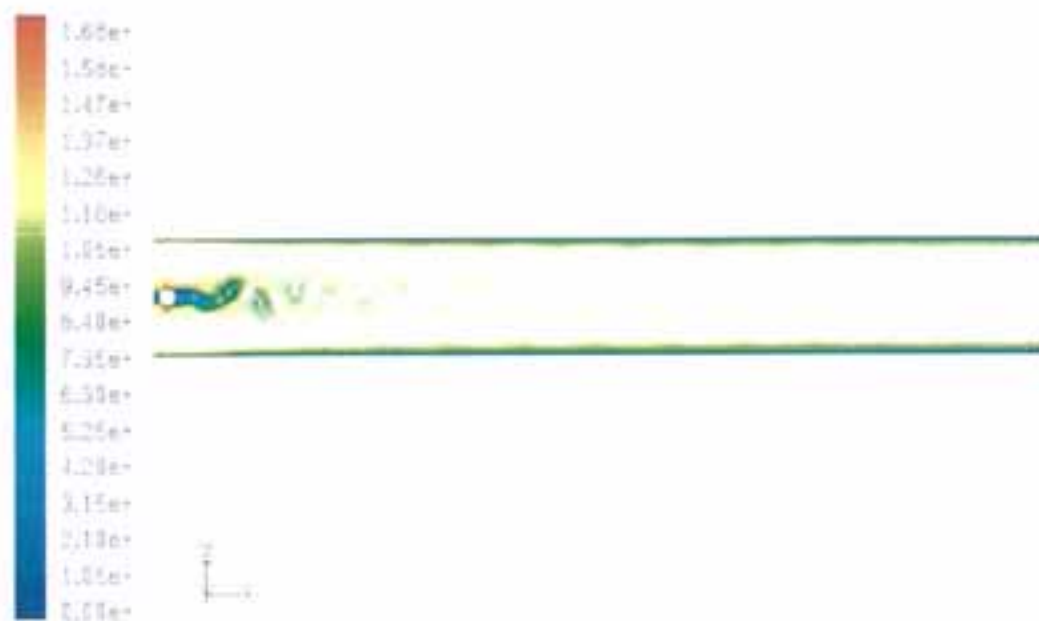
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=3.87904e17; 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady))

Πεδίο TKE για $t=0.38080$



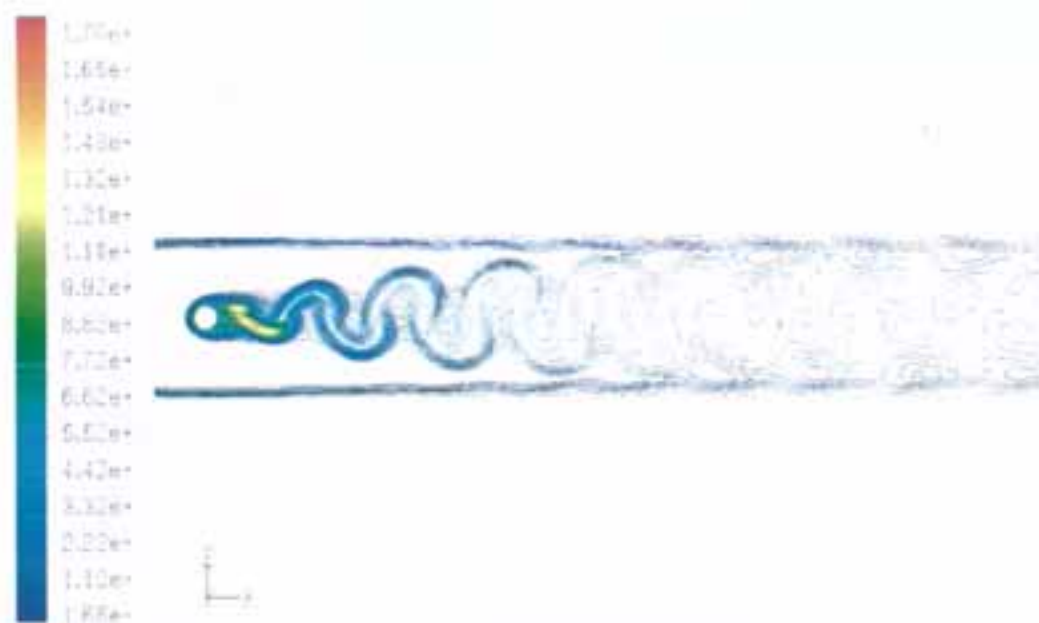
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=3.87904e17;
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady))

Πεδίο σκέδασης TKE για $t=0.38080$



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8080e-01) May 14, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38085$



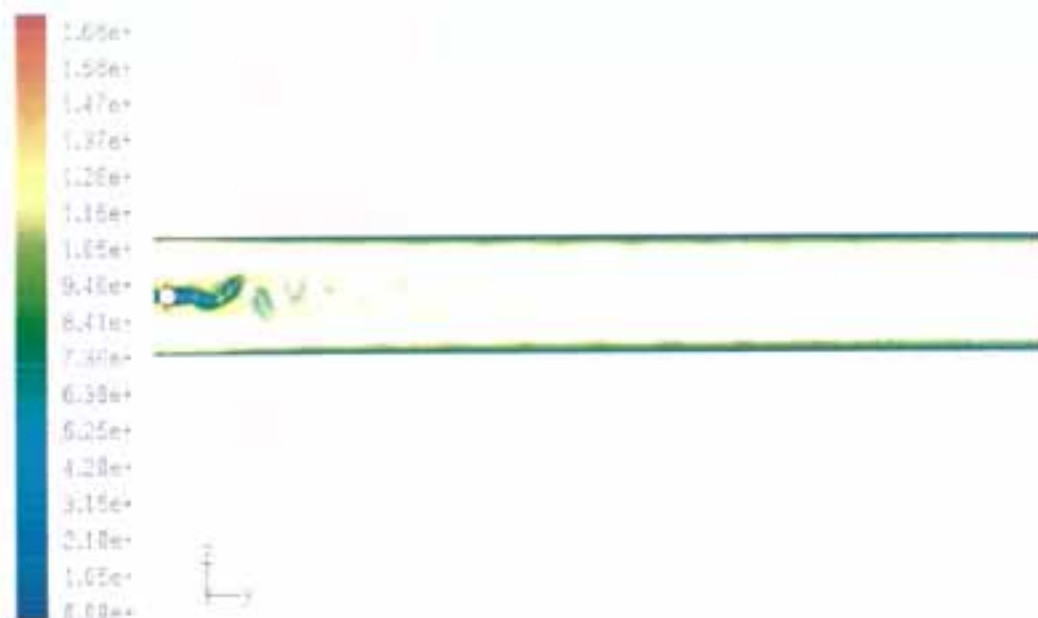
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.8080e-01) May 14, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38085$



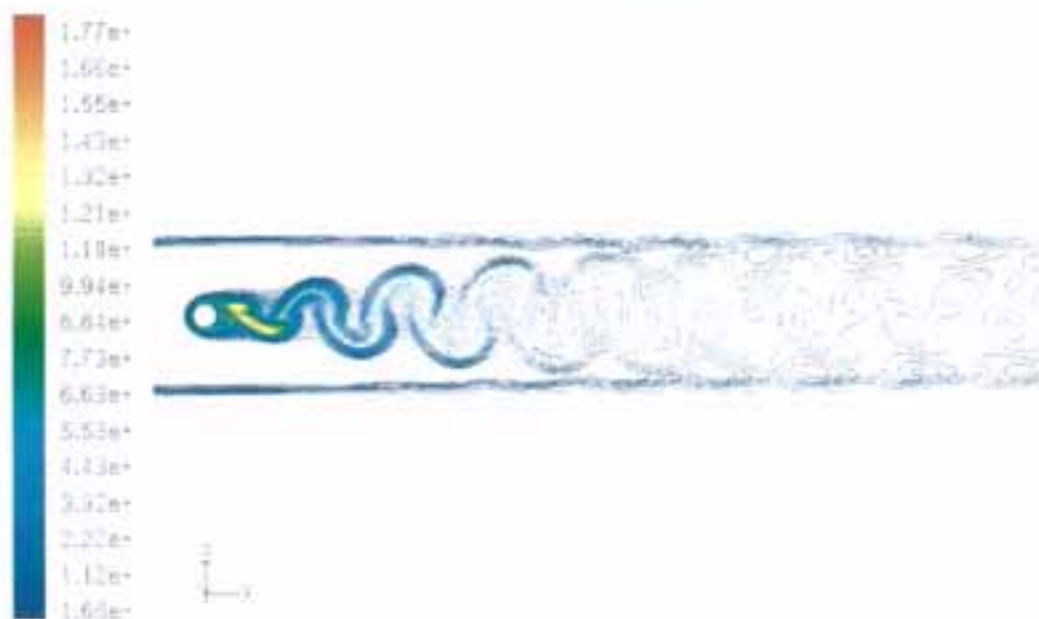
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=3.80885e-01)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38085



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8085e-01) May 14, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για t=0.38090



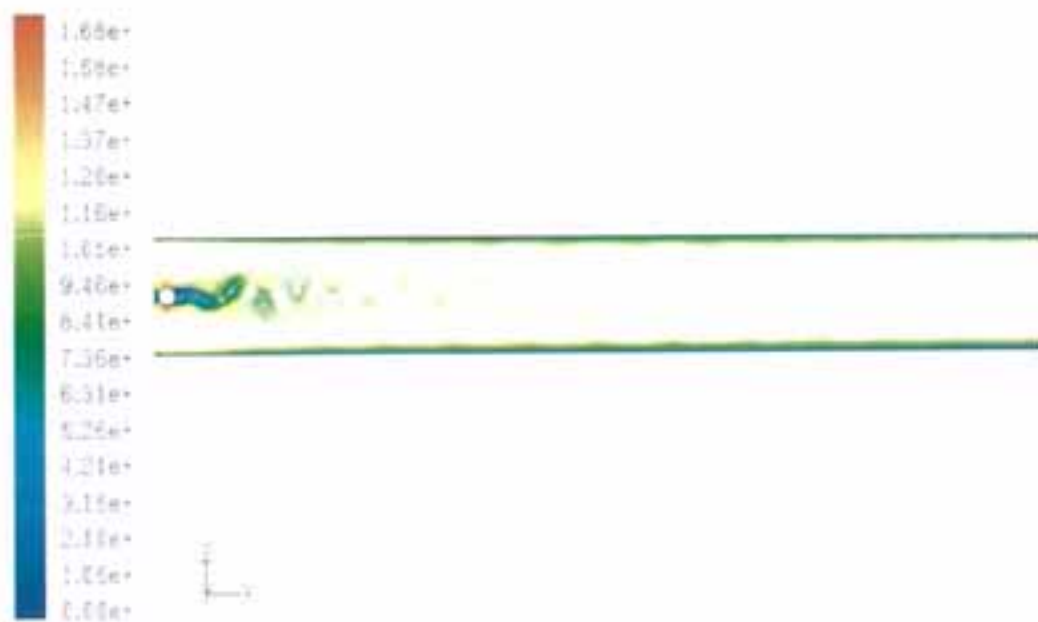
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.879641712004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για t=0.38090



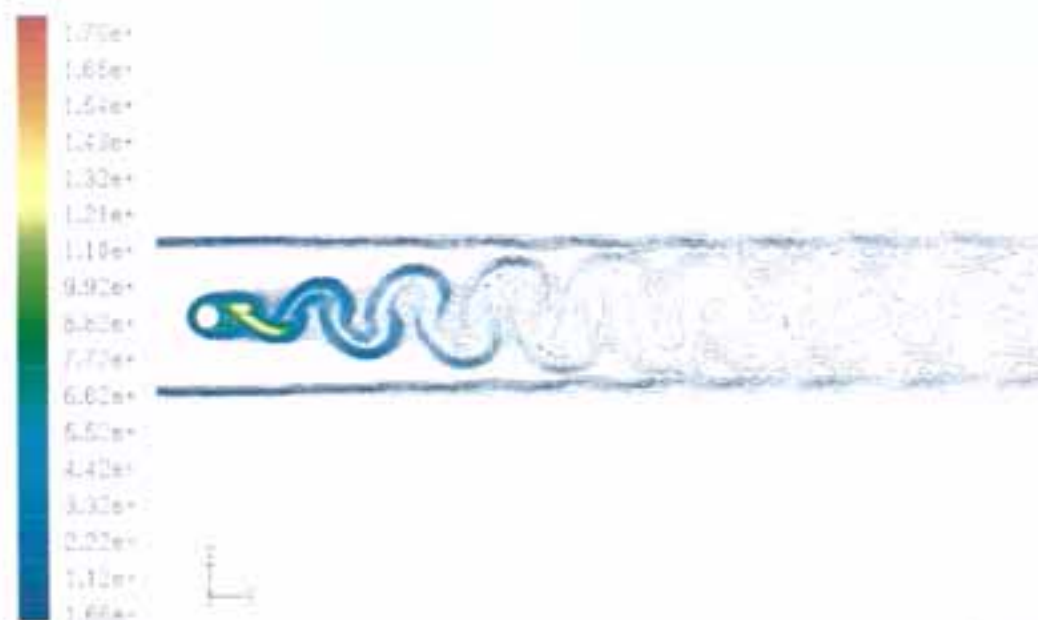
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.879641712004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38090



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8095e-01) May 14, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38095$



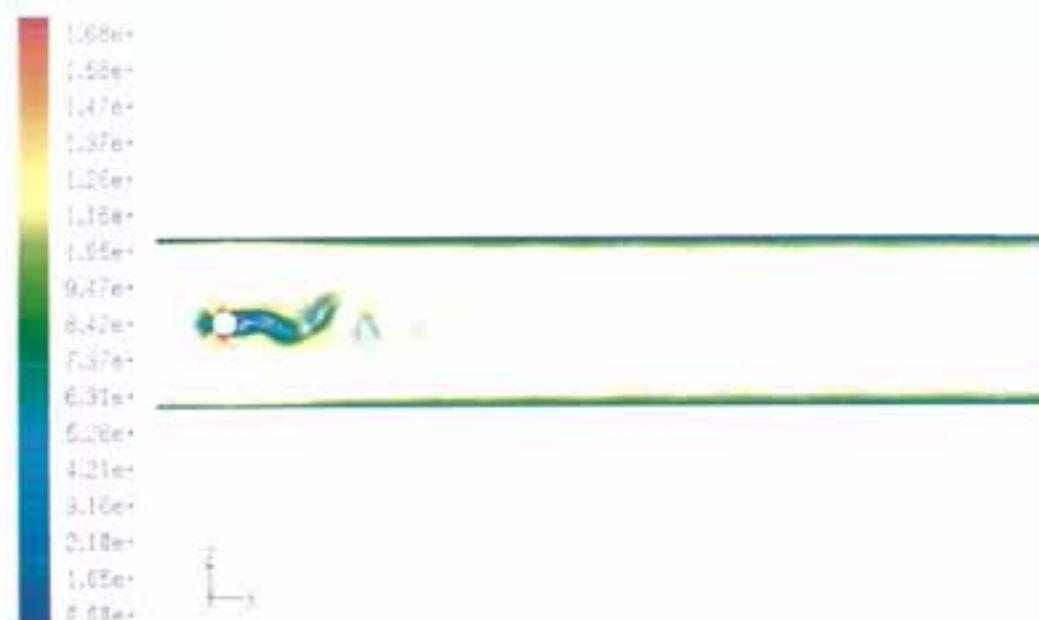
Contours of Turbulent Kinetic Energy, (k) (m2/s2) (Time=3.8095e-01) May 14, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38095$



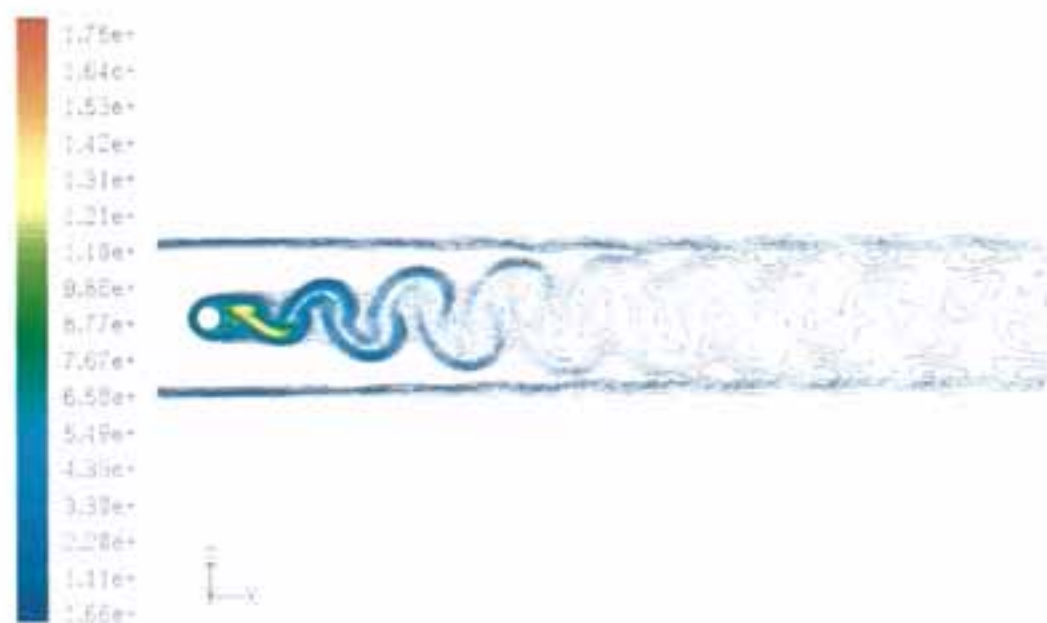
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=0.38095)
 FLUENT 6.3 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38095



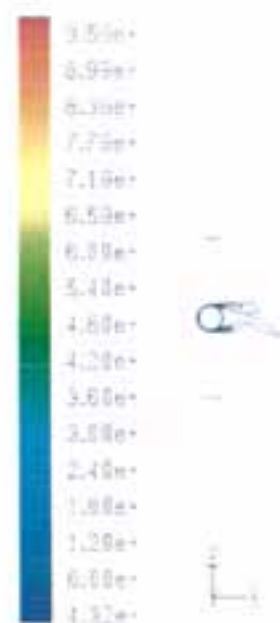
Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.6100e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.3 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για t=0.38100



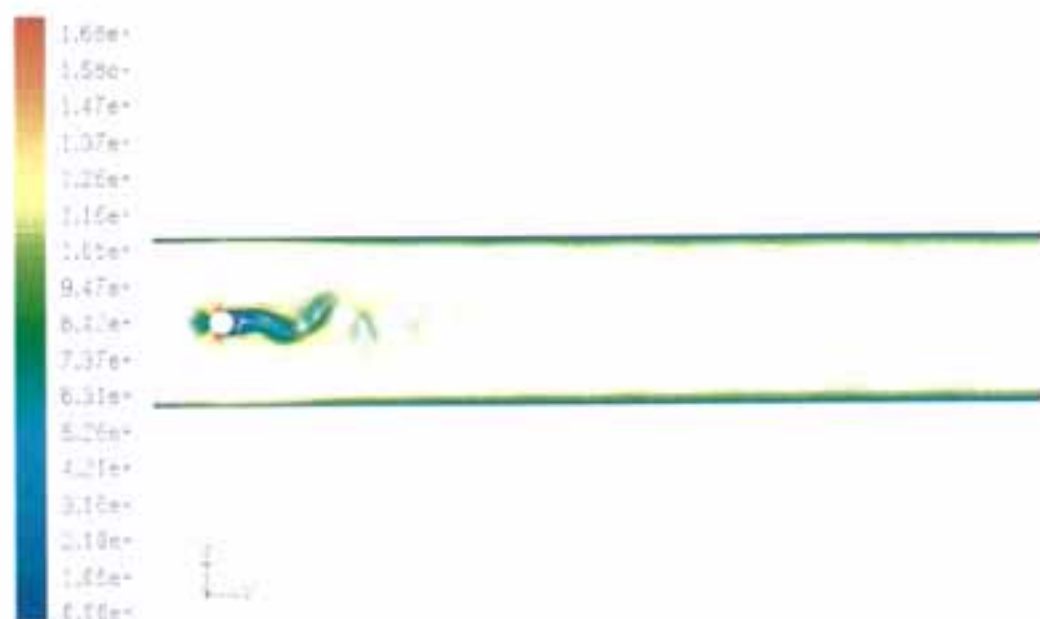
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.88100e-17) (1) (1)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για t=0.38100



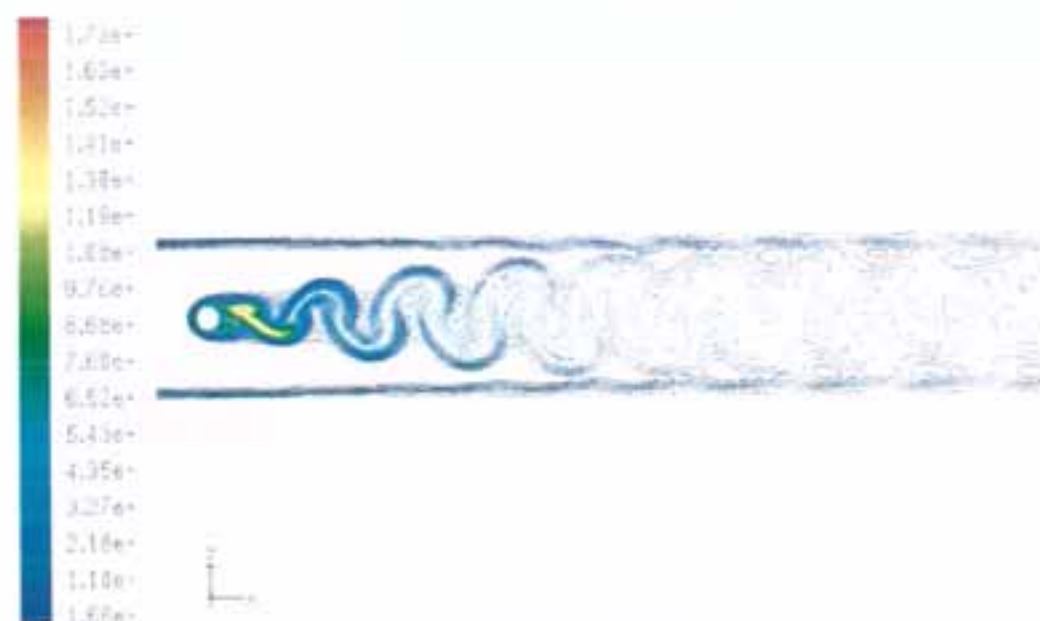
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.88100e-17) (1) (1)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38100



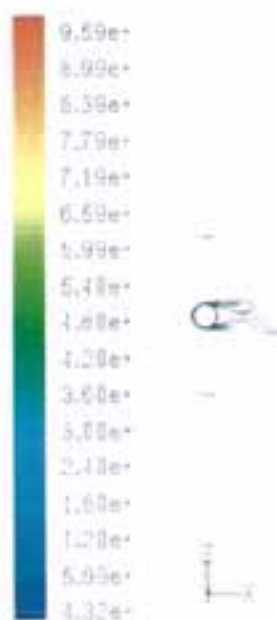
Contours of Velocity Magnitude [m/s] (Time=3.8100e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38105$



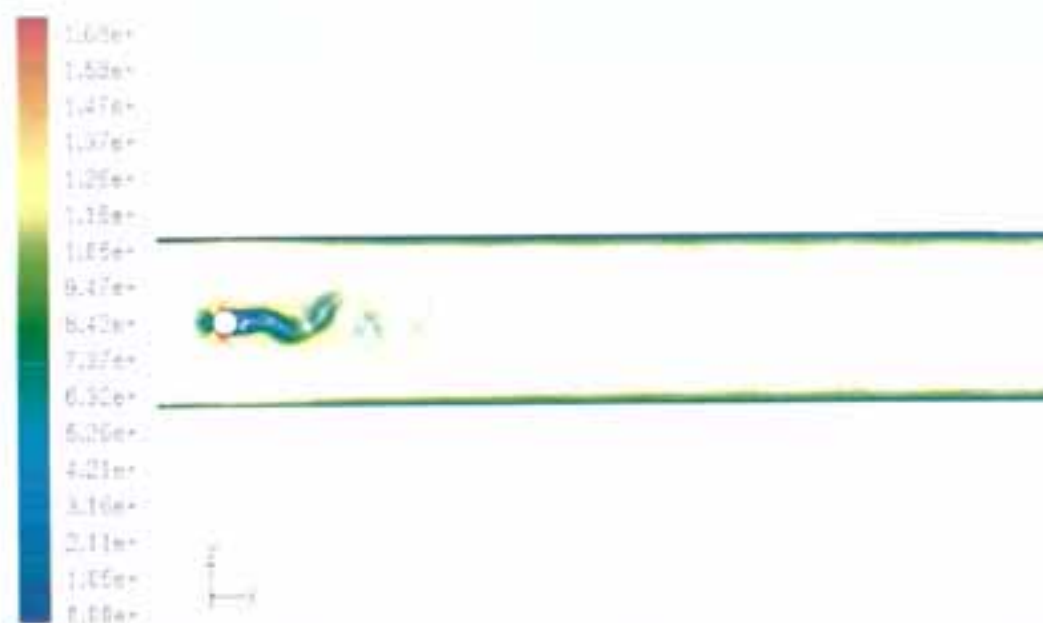
Contours of Turbulent Kinetic Energy, (k) [m²/s²] (Time=3.8100e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38105$



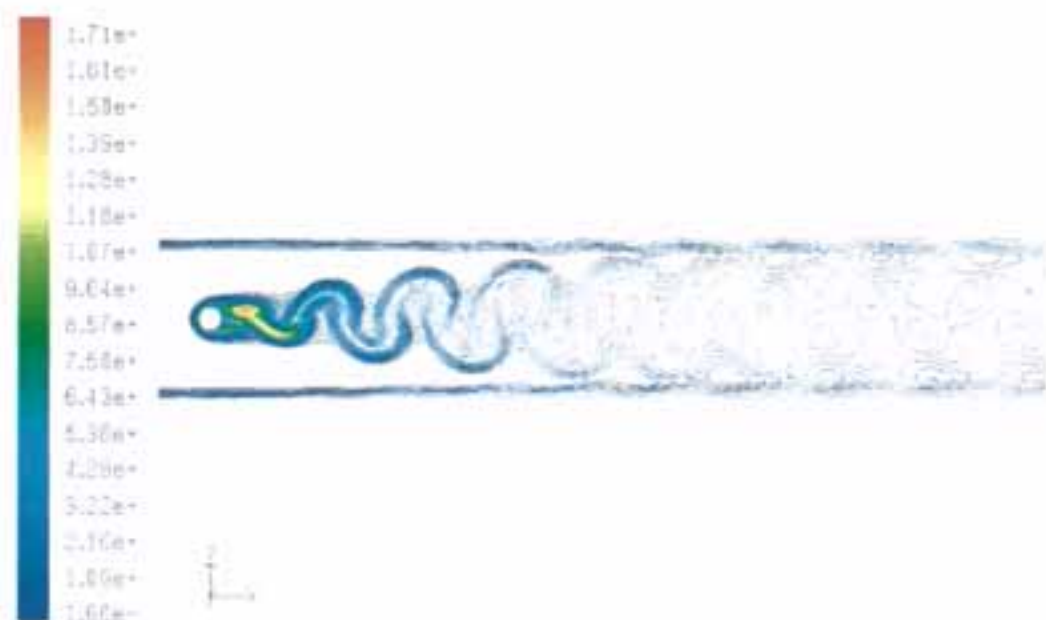
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=0.38105)
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38105



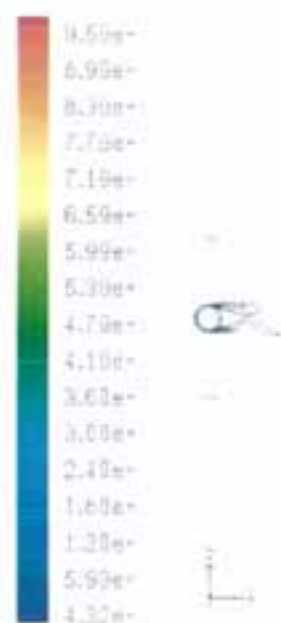
Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8105e-01) (May 21, 2004)
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για t=0.38110



Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.81110e-04) (FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady))

Πεδίο TKE για t=0.38110



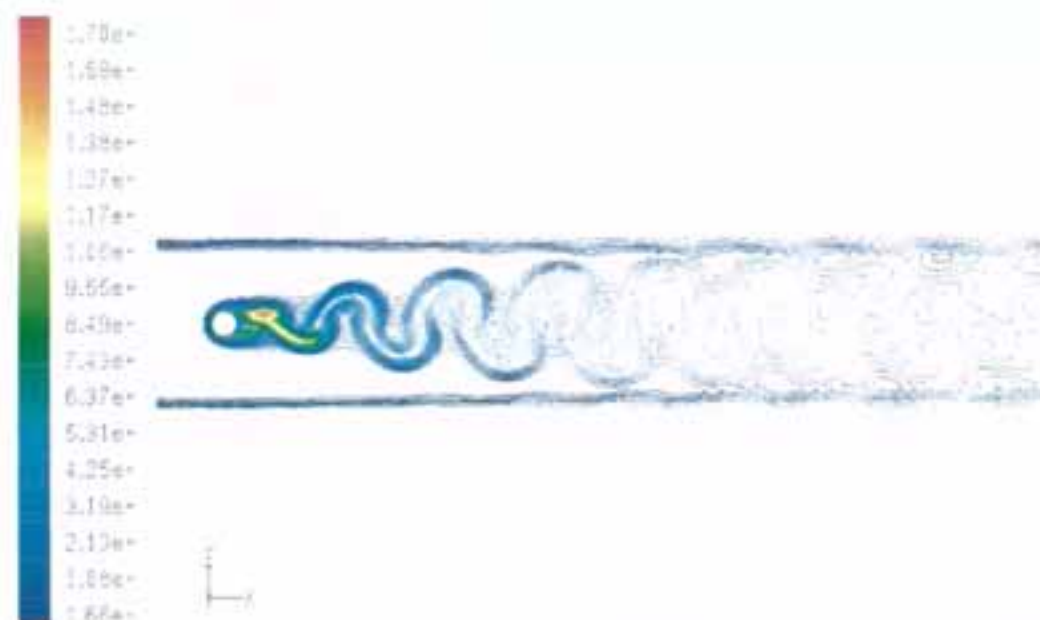
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.81110e-04) (FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady))

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38110



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8115e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38115$



Contours of Turbulent Kinetic Energy, (k) (m2/s2) (Time=3.8115e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38115$



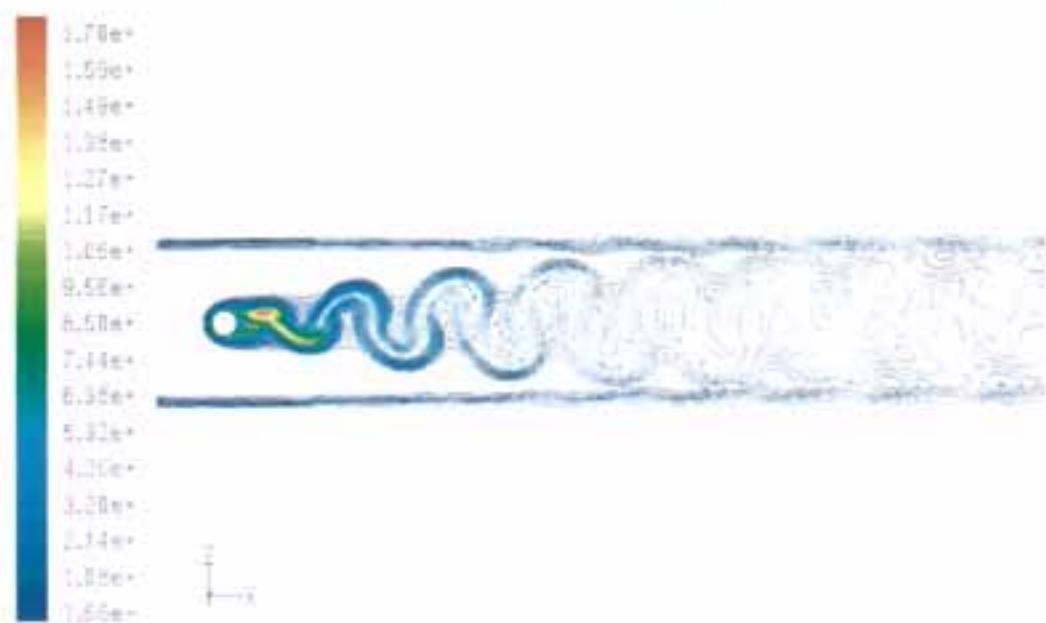
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.6120e-01
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης ΤΚΕ για t=0.38115



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.6120e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για t=0.38120



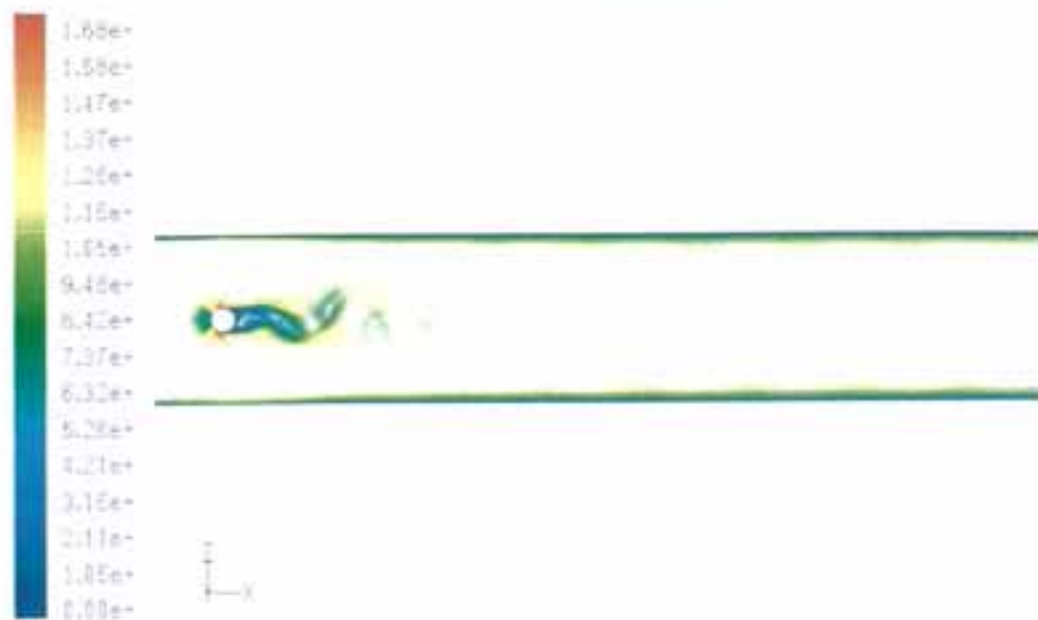
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.8120e2012004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για t=0.38120

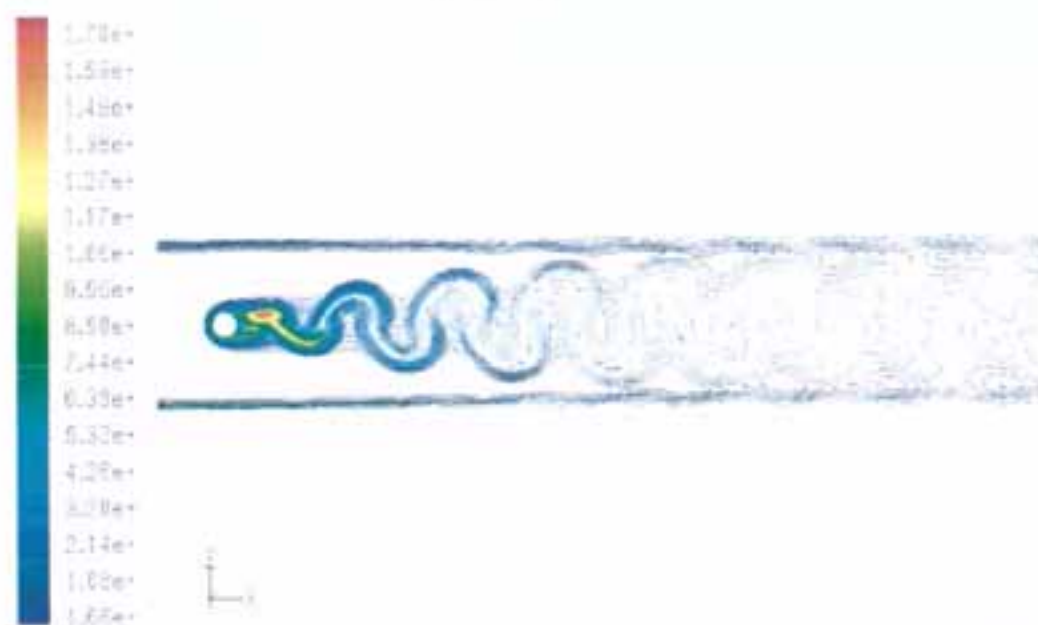


Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.8120e2012004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38120



Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38125$



Πεδίο TKE για $t=0.38125$



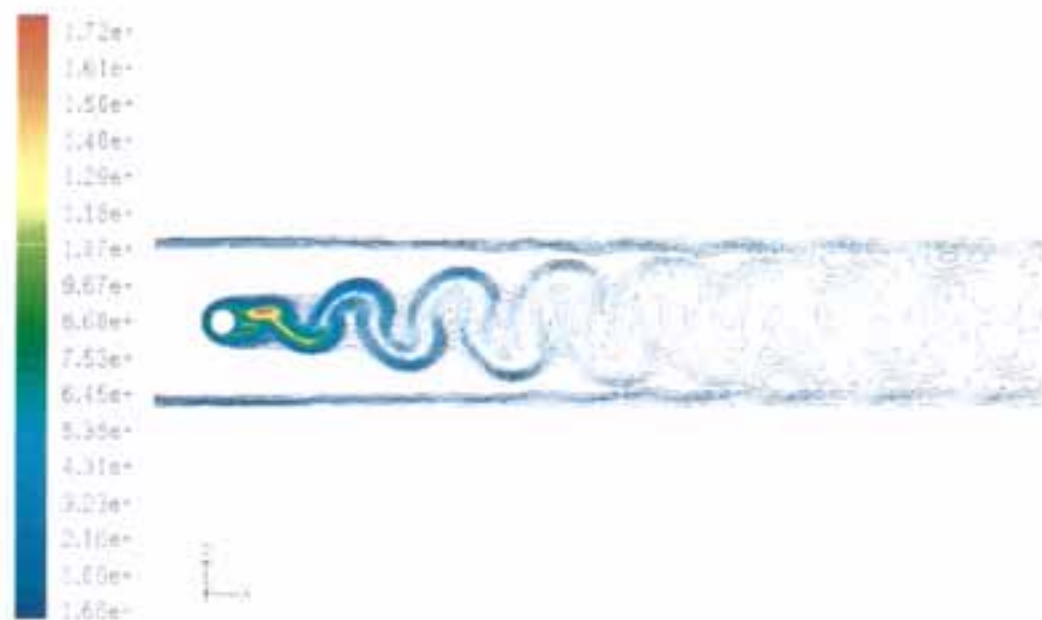
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Max=9.55e+)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για $t=0.38125$



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8130e-01) (Max=1.60e+)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38130$



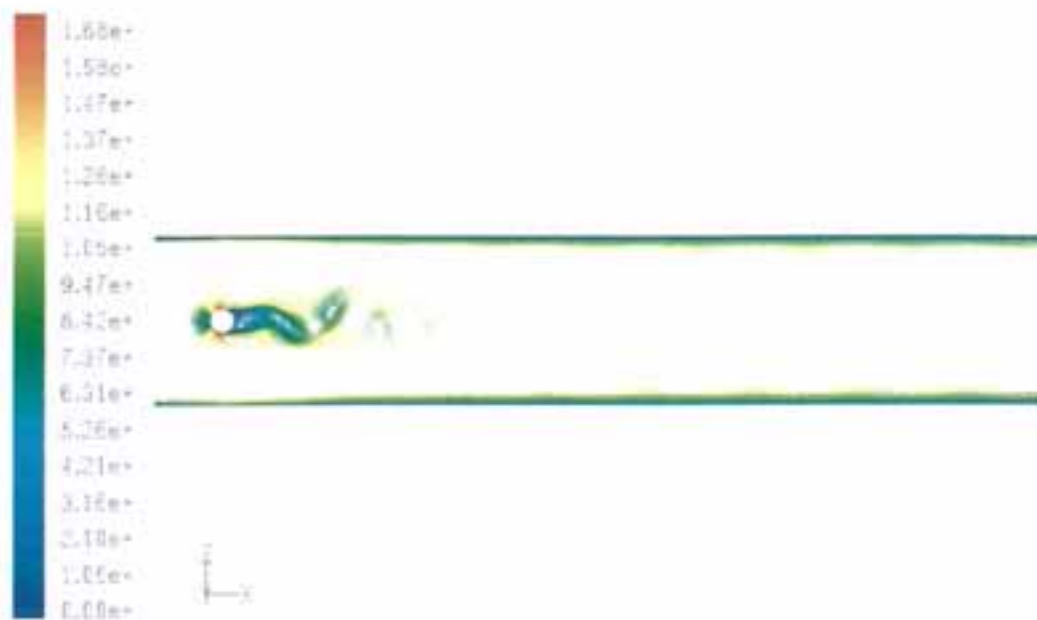
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.81304e-01 s) (FLUENT 6.0.13d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για t=0.38130



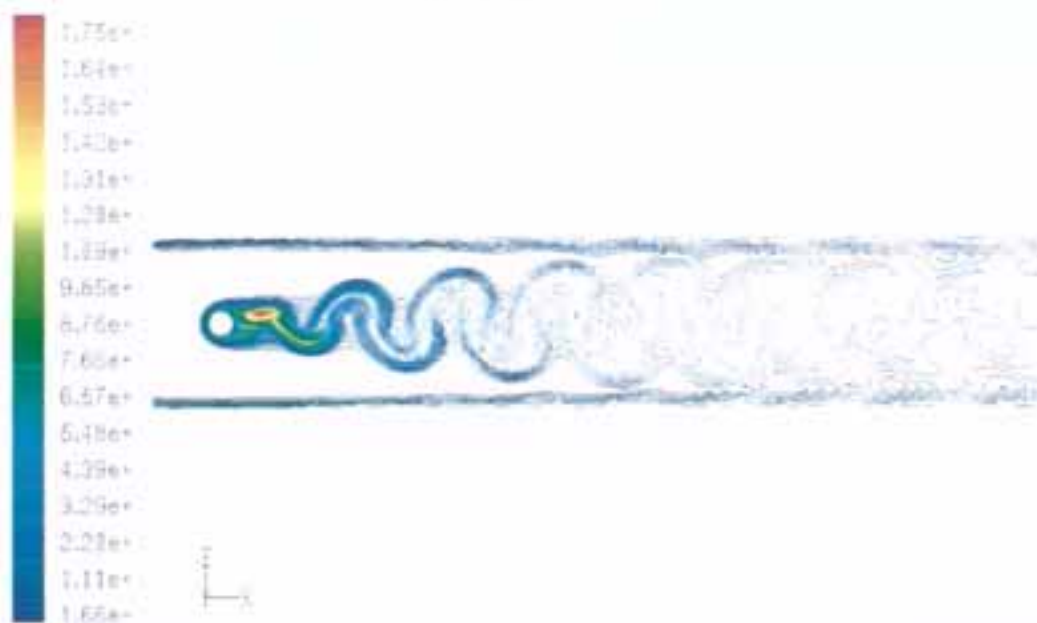
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.81304e-01 s) (FLUENT 6.0.13d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38130



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8135e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38135$



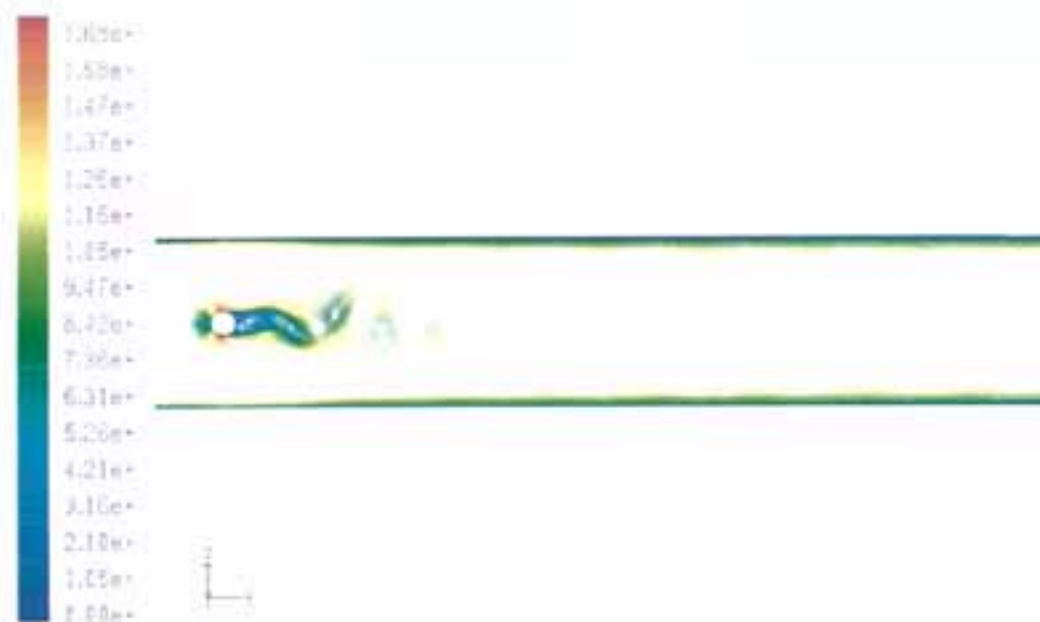
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=3.8135e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38135$



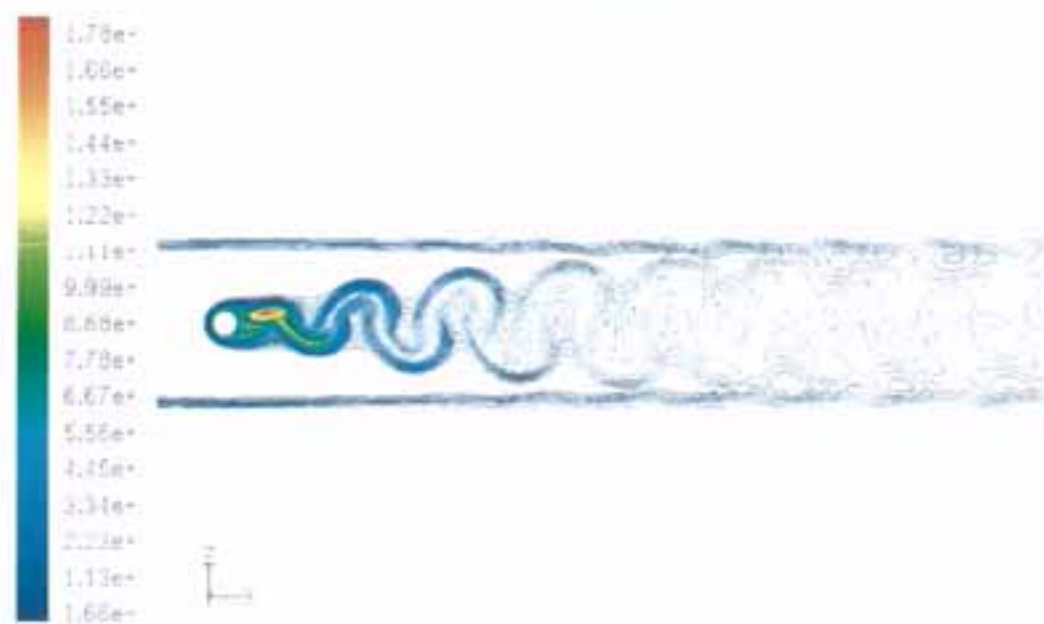
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=3.8135e-01)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για $t=0.38135$



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8140e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38140$



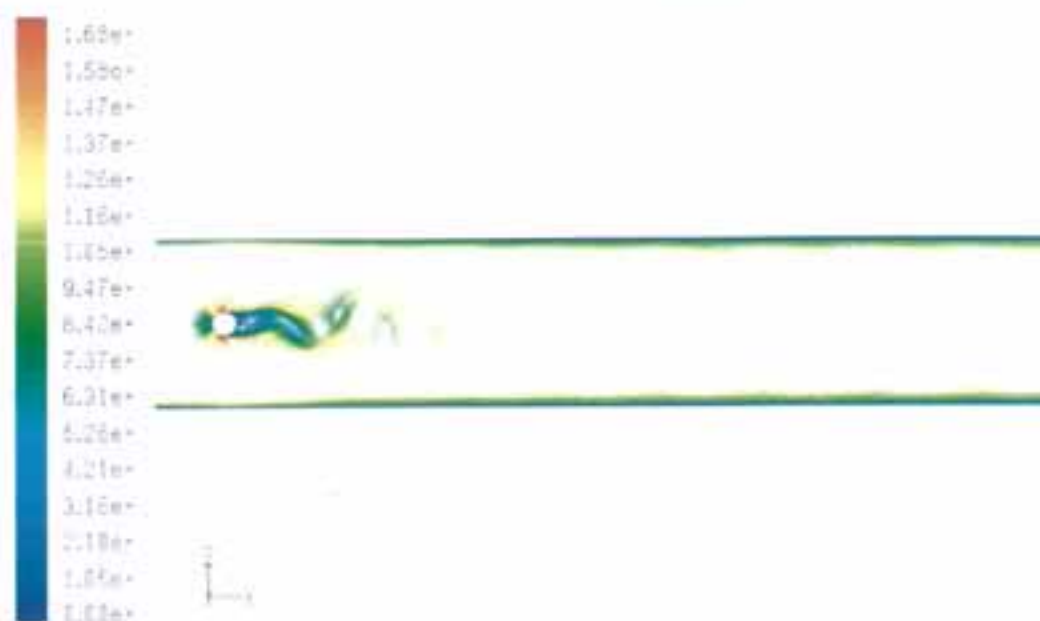
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.8140e-01 (004)
FLUENT 6.2 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για t=0.38140



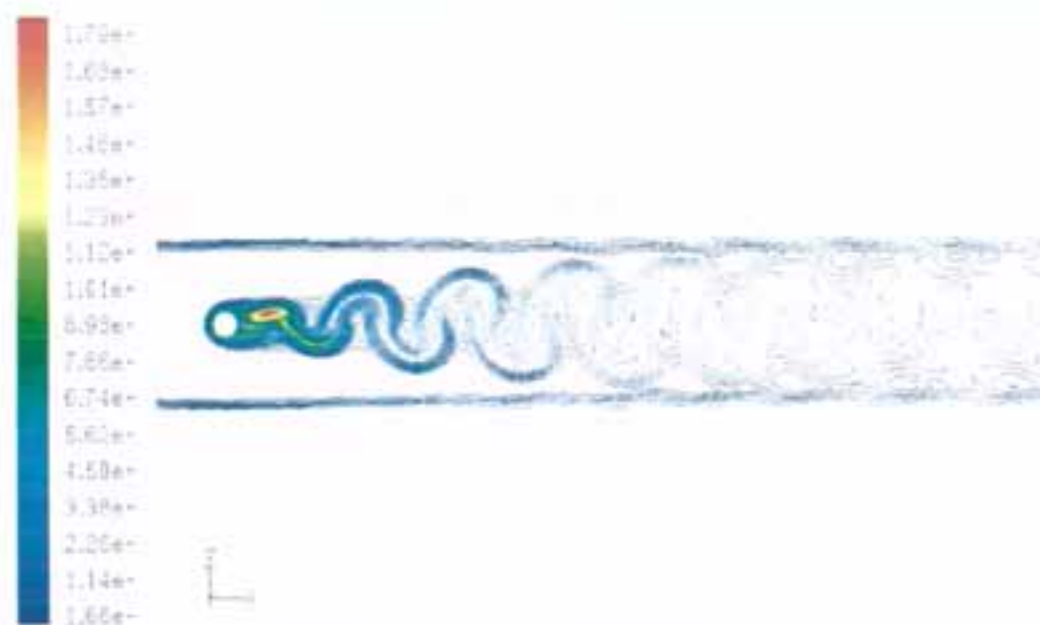
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.8140e-01
FLUENT 6.2 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38140



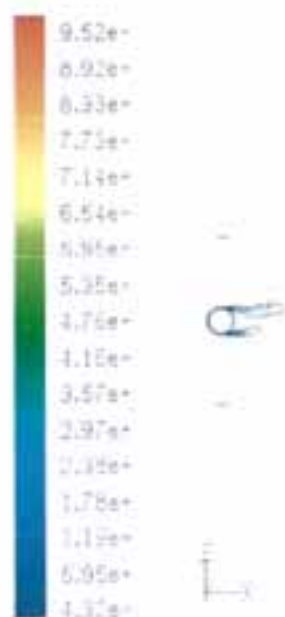
Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8145e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38145$



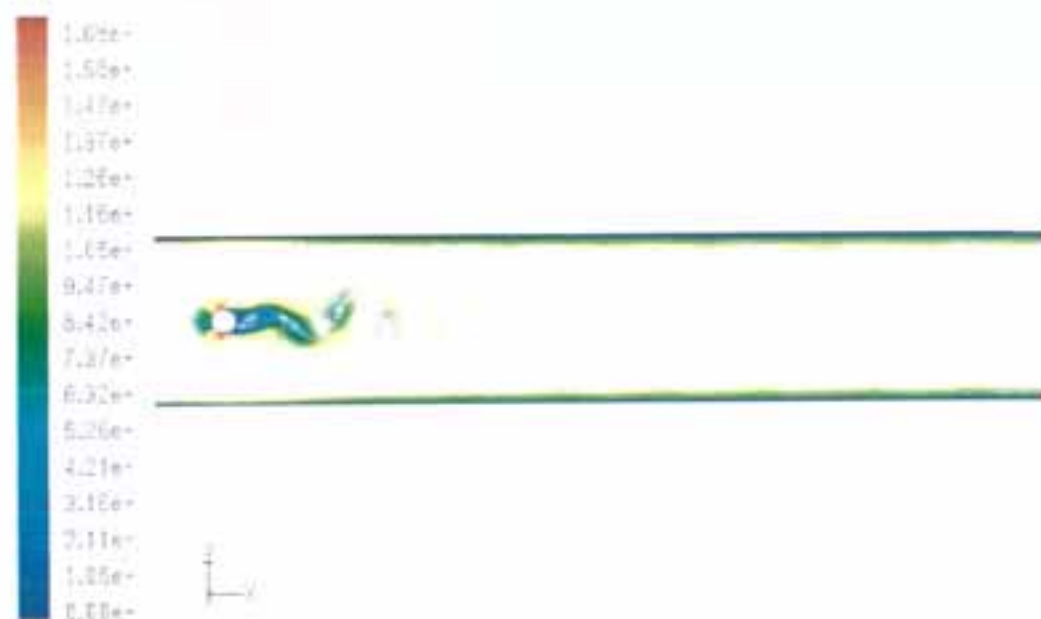
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.8145e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38145$



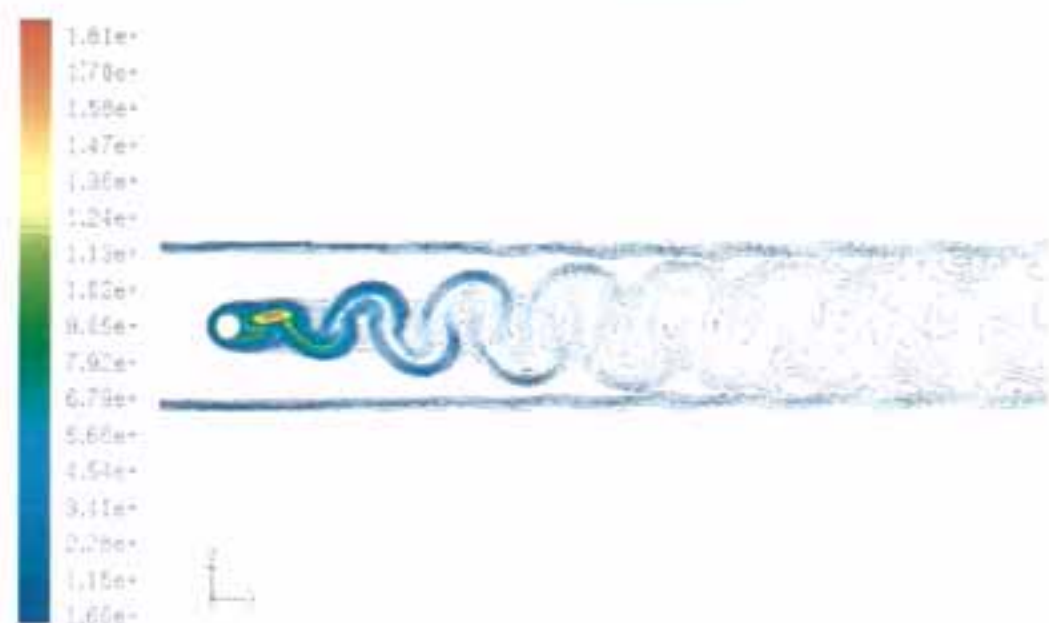
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=0.38145) FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για $t=0.38145$



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=0.38150) May 21, 2004 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38150$



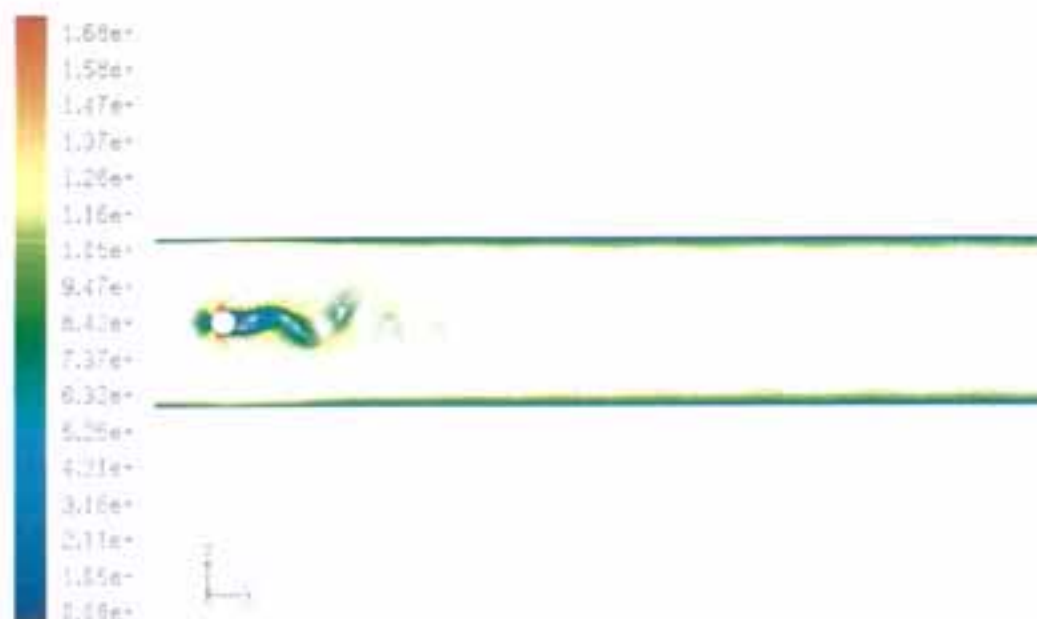
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.8150e-04) (FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady))

Πεδίο TKE για t=0.38150



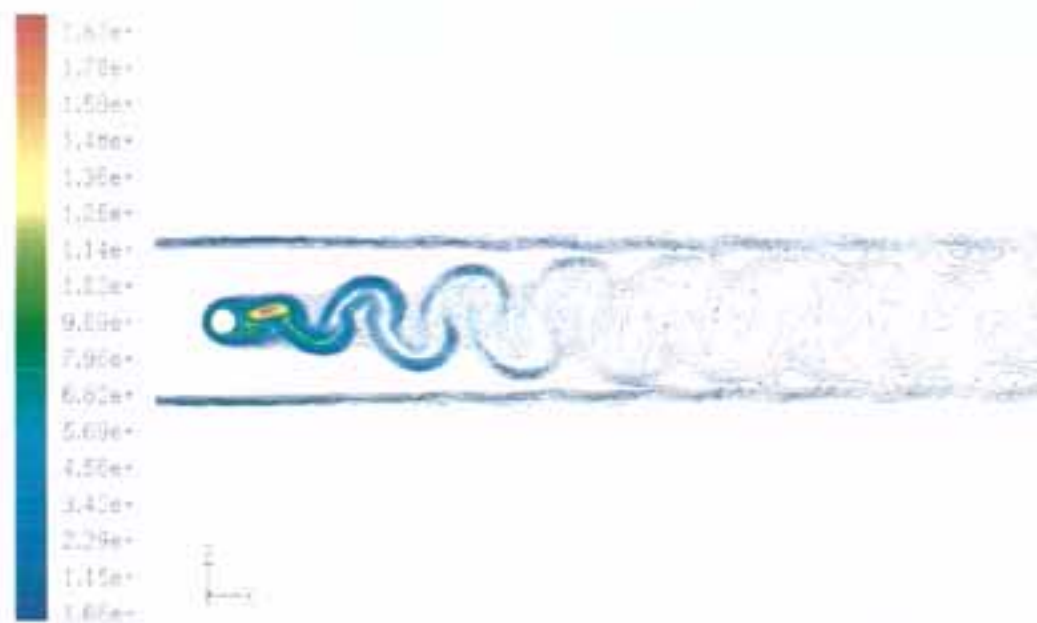
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.8150e-04) (FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady))

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38150



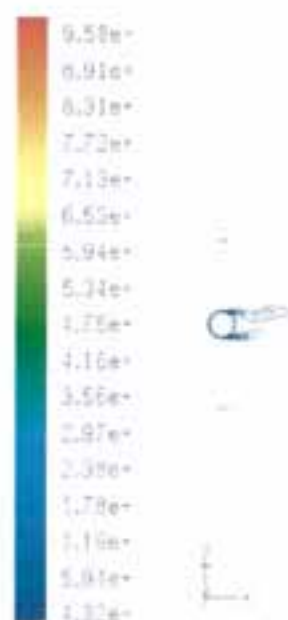
Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8155e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38155$



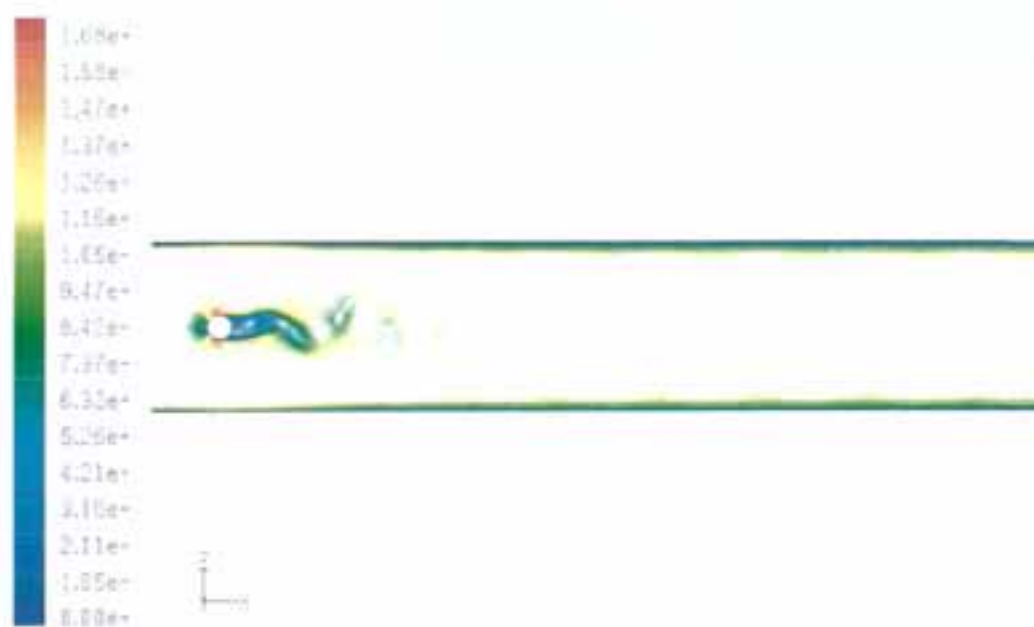
Contours of Turbulent Kinetic Energy, (k) (m2/s2) (Time=3.8155e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38155$



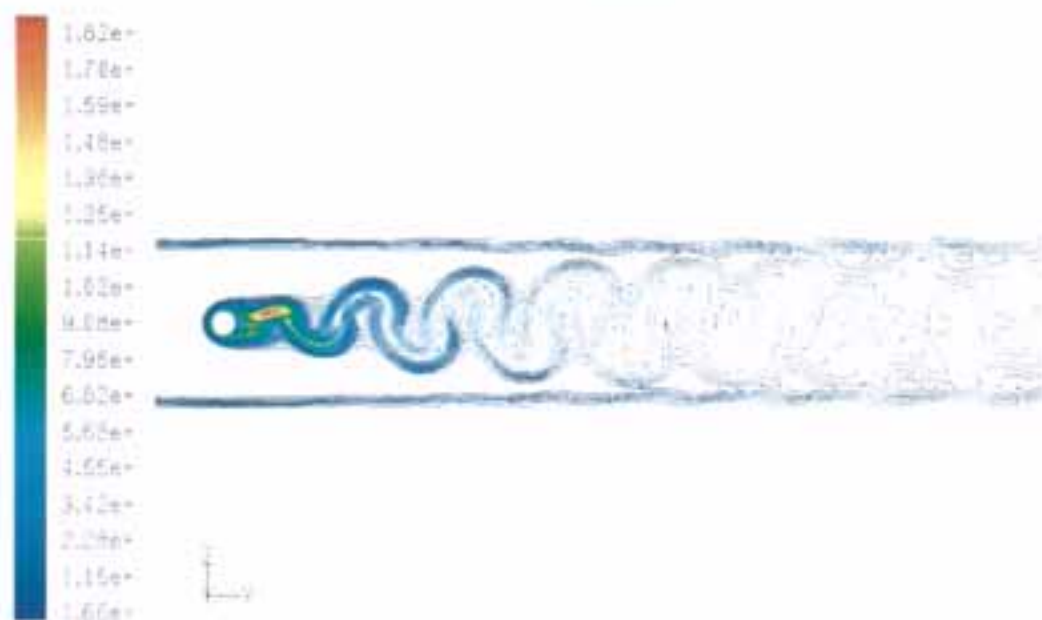
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=3.8155e-01)
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38155



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8160e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για t=0.38160



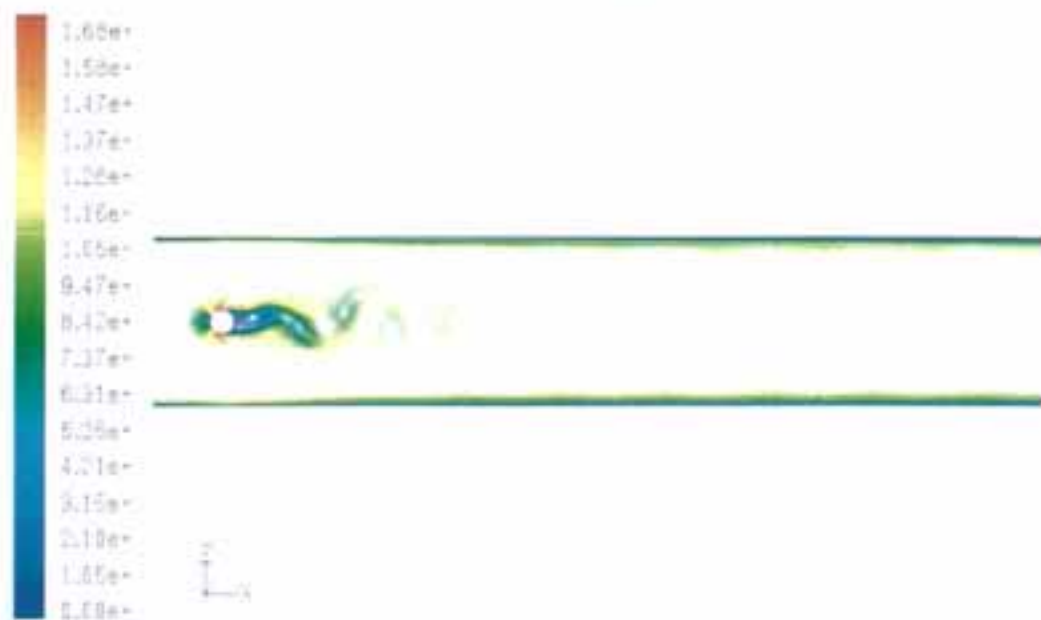
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.8166e-01) 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για t=0.38160



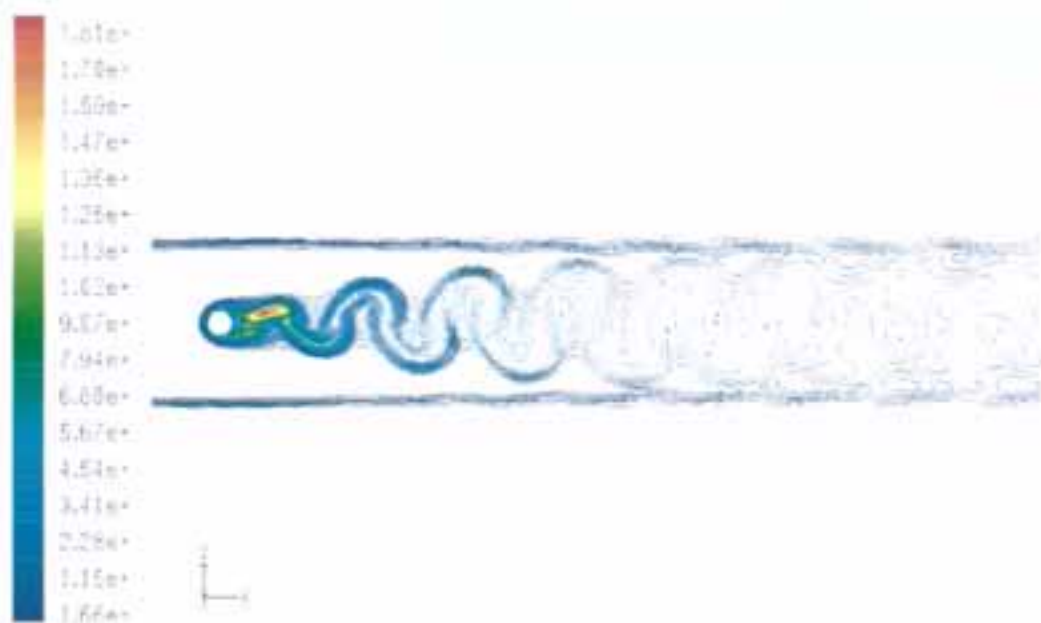
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.8166e-01)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38160



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8165e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38165$



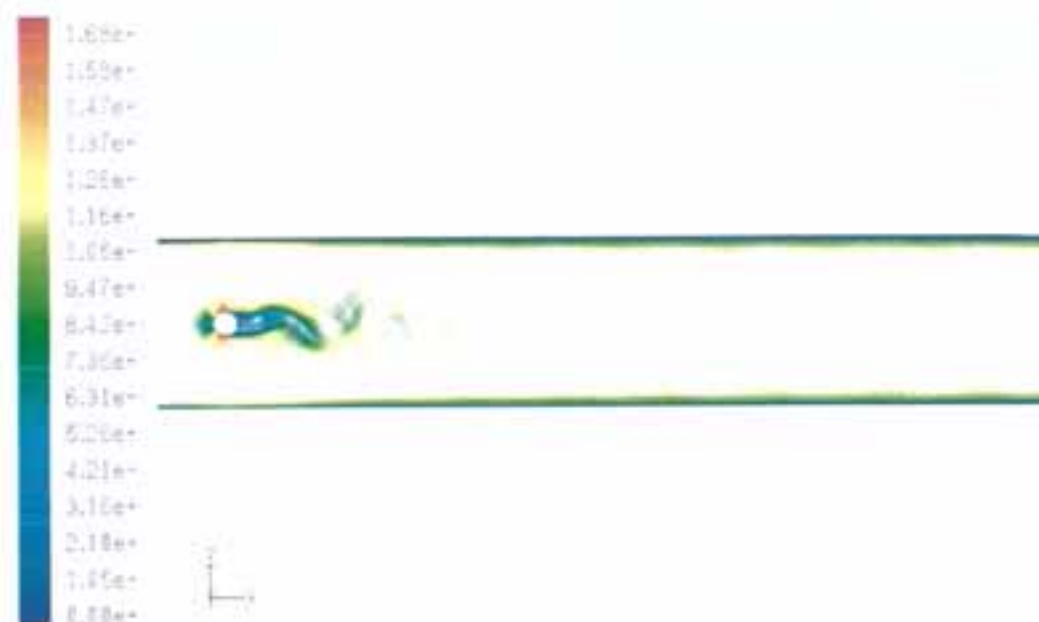
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=3.8165e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38165$



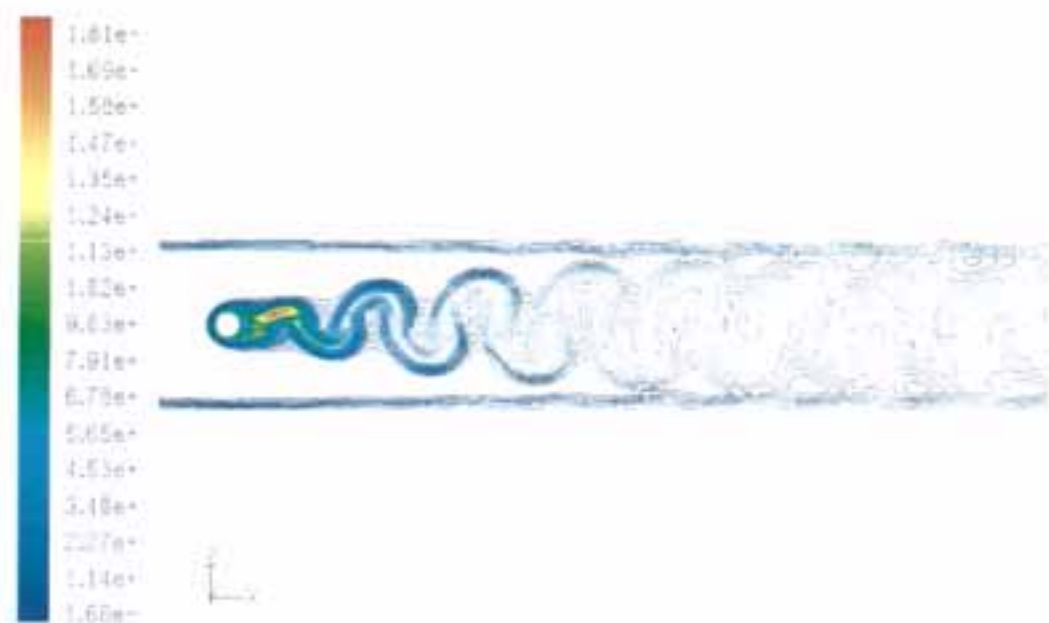
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.8165e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης ΤΚΕ για t=0.38165



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8170e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για t=0.38170



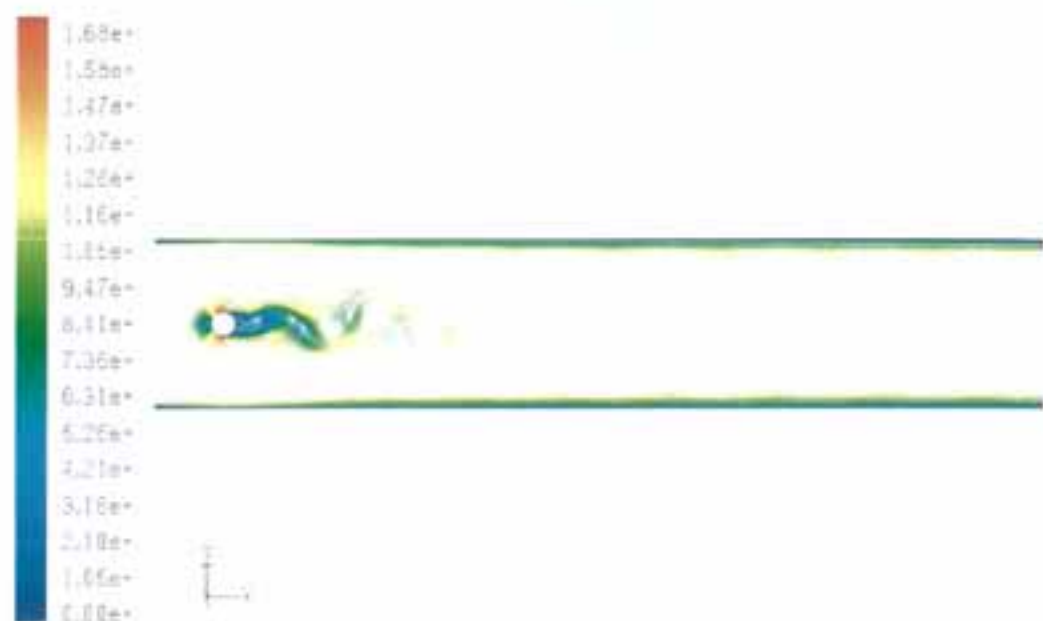
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.8170e-04, 2004)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για t=0.38170



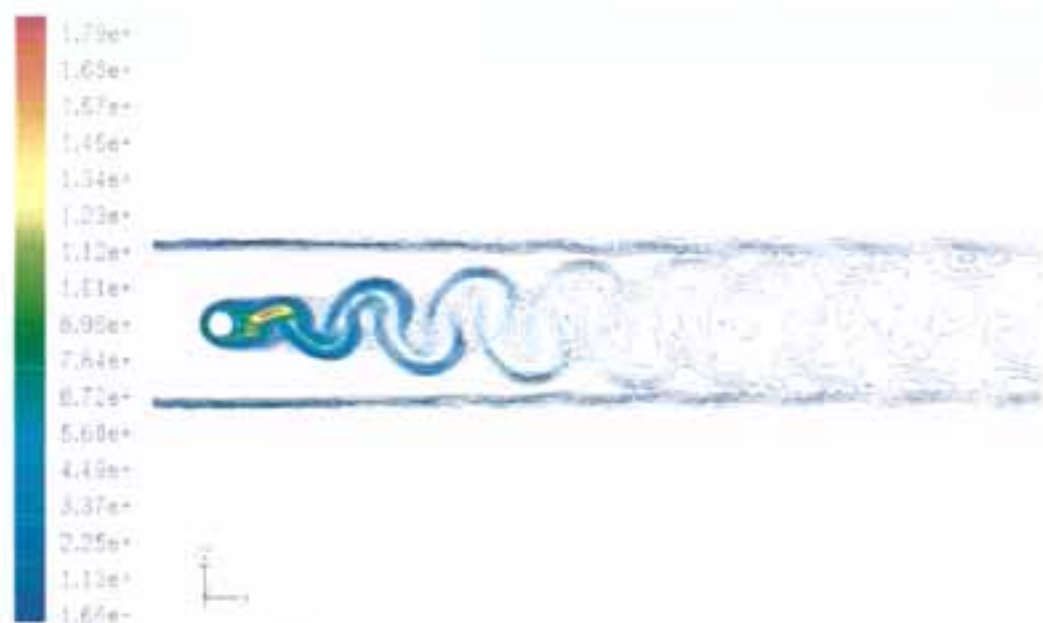
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.8170e-04, 2004)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38170



Contours of Velocity Magnitude [m/s] (Time=3.8175e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38175$



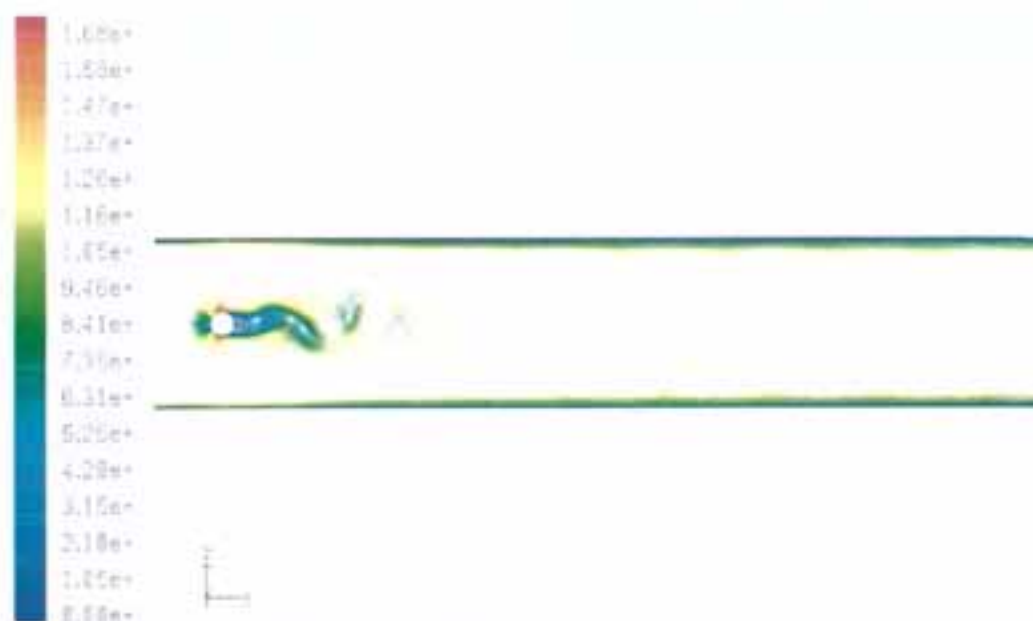
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) [m2/s2] (Time=3.8175e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38175$



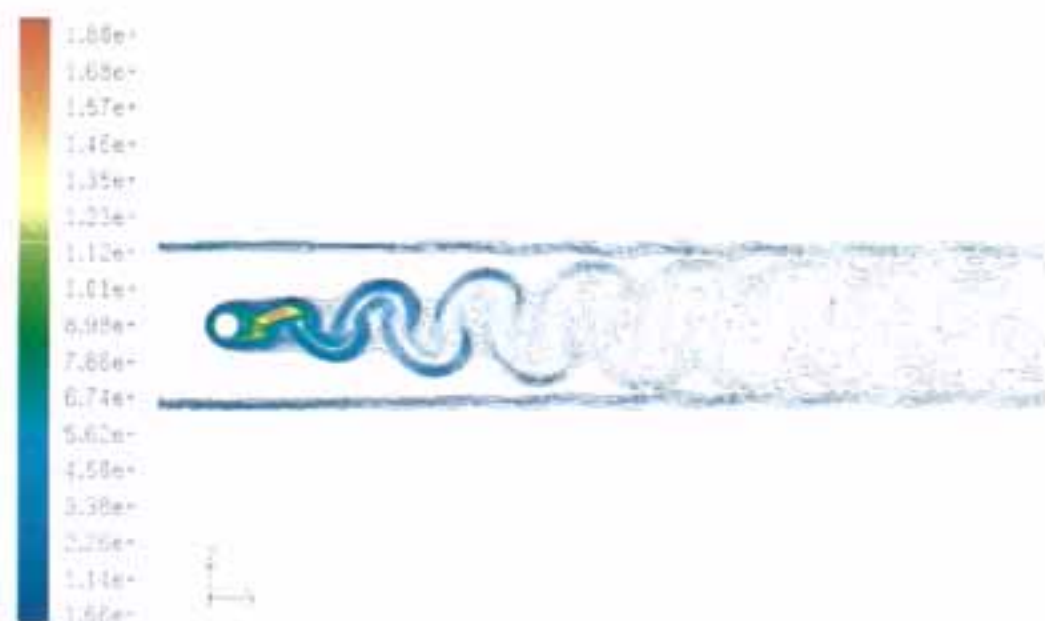
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=3.8160e-01)
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38175



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8160e-01) May 21, 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για t=0.38180



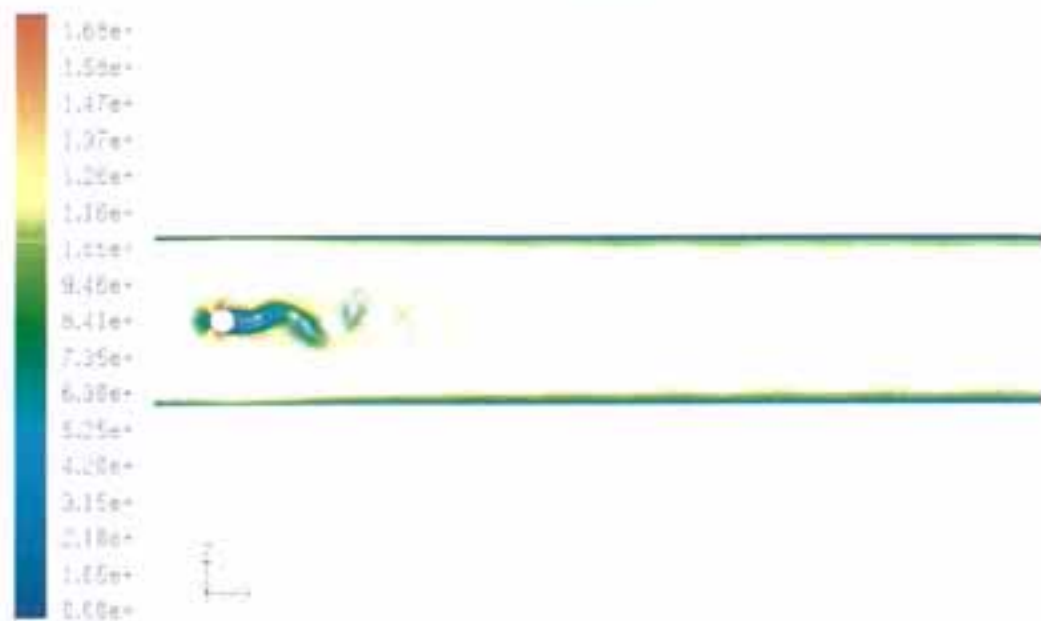
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=3.8180e-01 s)
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38180$



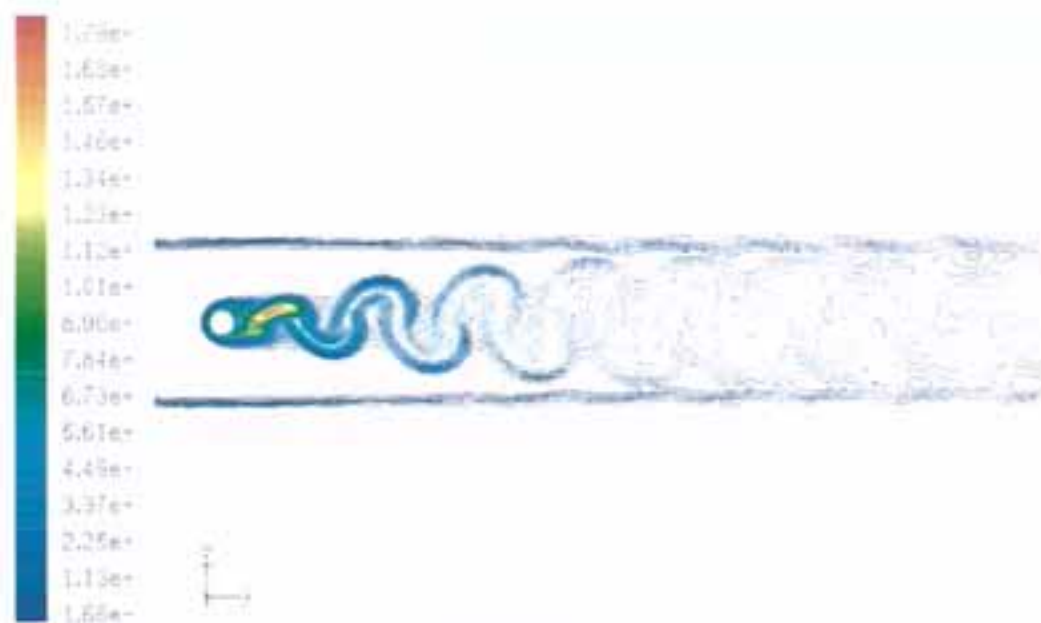
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=3.8180e-01 s)
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για $t=0.38180$



Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8185e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38185$



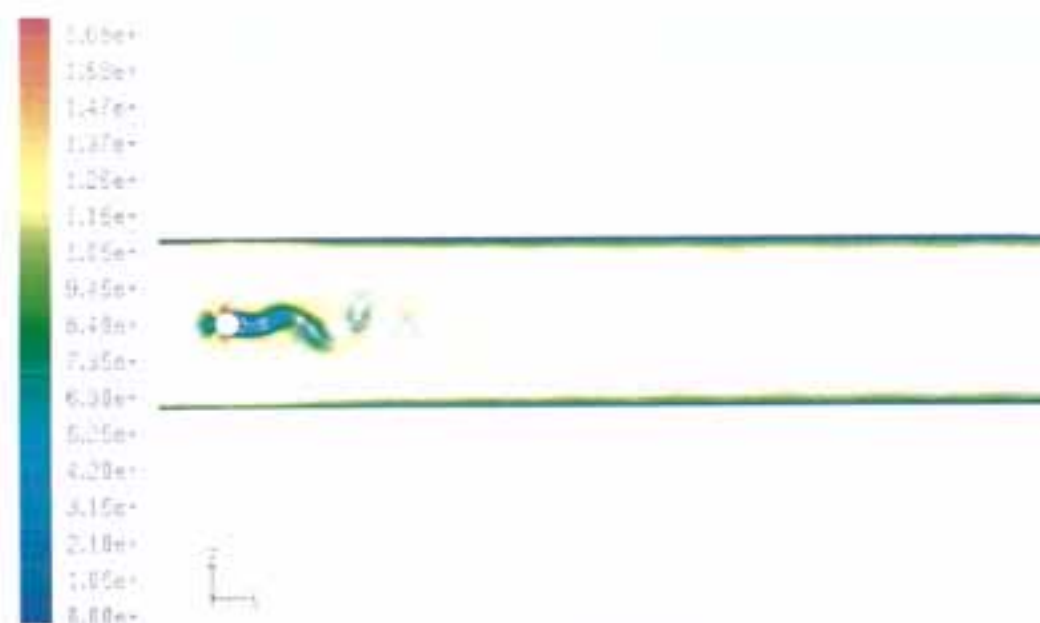
Contour of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2) (Time=3.8185e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για $t=0.38185$



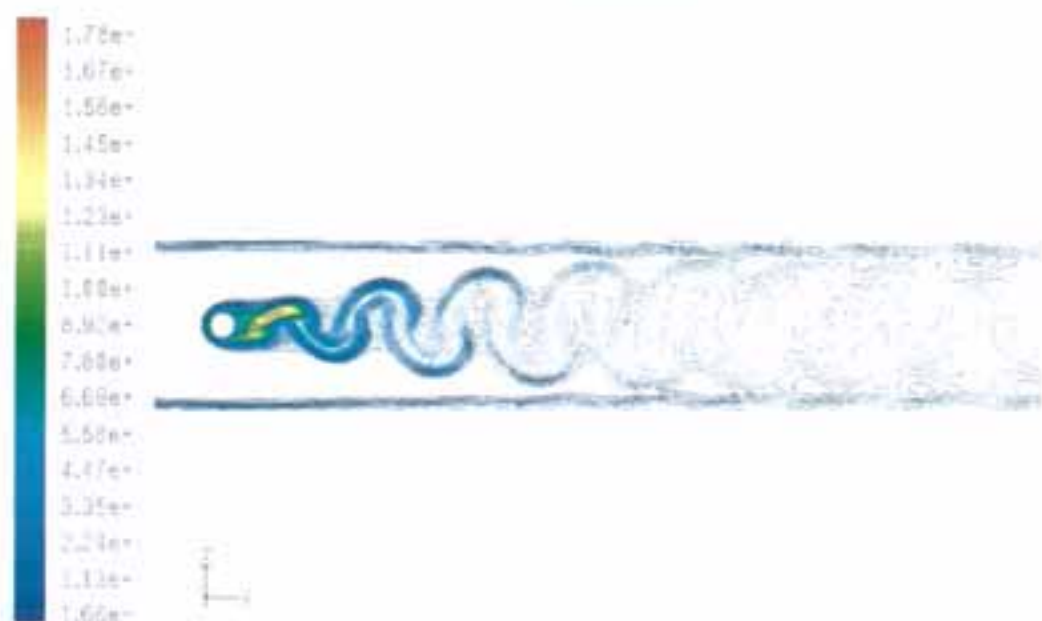
Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Time=3.8185e-01
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης ΤΚΕ για t=0.38185



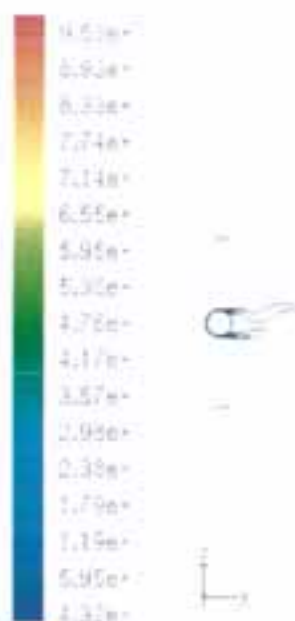
Contours of Velocity Magnitude (m/s) (Time=3.8190e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για t=0.38190



Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.8190e-04) 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο TKE για t=0.38190



Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.8190e-04) 2004
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38190



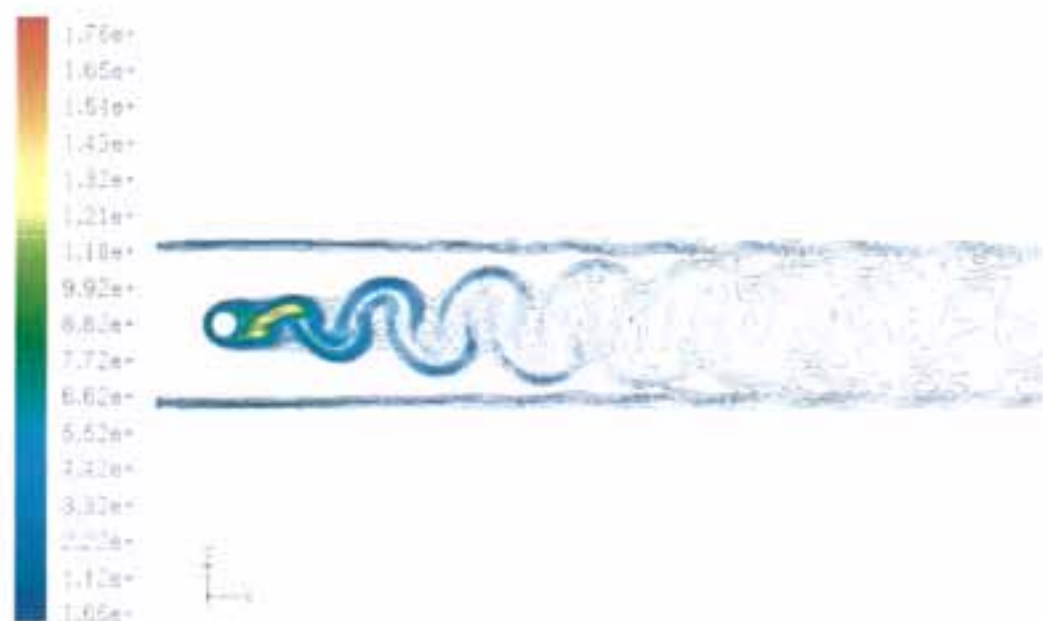
Contours of Velocity Magnitude [m/s] (Time=3.8195e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο ταχύτητας για $t=0.38195$



Contour of Static Pressure [pascal] (Time=3.8195e-01) May 21, 2004
FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο πίεσης για $t=0.38195$



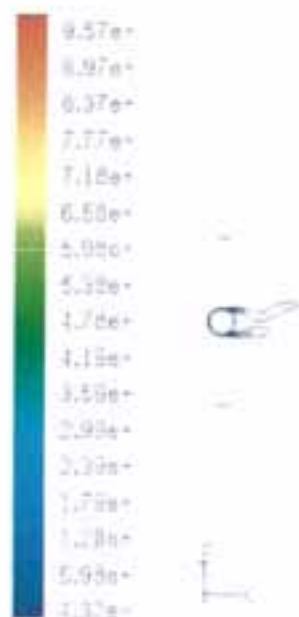
Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m²/s²) (Time=3.8195e-04) (FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady))

Πεδίο TKE για t=0.38195



Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m²/s³) (Time=3.8195e-04) (FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady))

Πεδίο σκέδασης TKE για t=0.38195



Contours of Turbulent Dissipation Rate (Epsilon) (m2/s3) (Name=318200W-
 FLUENT 6.0 (3d, segregated, ske, unsteady)

Πεδίο σκέδασης TKE για $t=0.38200$

