

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Χρήση της Υπολογιστικής μεθόδου LES στην επίλυση
τυρβωδών προβλημάτων ροής**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΑΥΓΕΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ-ΑΥΓΕΡΙΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: 1) ΜΑΥΡΙΑΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
2) ΓΙΑΝΝΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΠΑΤΡΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην ανάλυση της υπολογιστικής μεθόδου LES για τη χρήση της στην επίλυση δύσκολων προβλημάτων σε τρισδιάστατες ροϊκές περιπτώσεις.

Στην αρχή μελετάται η σημασία της τύρβης στην δυσκολία υπολογισμού ροϊκών πεδίων και αναλύονται οι δυνατότητες επίλυσης μέσω των διαφορετικών αριθμητικών προσεγγίσεων.

Στην συνέχεια αναλύεται η μέθοδος LES και οι διάφορες παράμετροι που την αφορούν και στο τέλος αναλύεται ο ορθός τρόπος μελέτης ενός προβλήματος στην υπολογιστική ρευστομηχανική και επιλύεται ένα πρόβλημα υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Ευχαριστώ θερμά τους Επιβλέποντες Καθηγητές μου κ. Κ. Μαυρίδη και κ. Ιωάννη Γιαννάκη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφεραν για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

ΑΥΓΕΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ-ΑΥΓΕΡΙΝΗ

Φεβρουάριος 2015

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Η σπουδάστρια

ΑΥΓΕΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΓΑΡΙΤΑ-ΑΥΓΕΡΙΝΗ

.....

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία αναφέρεται ανάλυση της υπολογιστικής μεθόδου LES για τη χρήση της στην επίλυση δύσκολων προβλημάτων σε τρισδιάστατες ροϊκές περιπτώσεις.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε πέντε Κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσεται ο ρόλος της τύρβης στην επίλυση υπολογισμού ροϊκών πεδίων και αναλύονται οι δυνατότητες επίλυσης μέσω των διαφορετικών αριθμητικών προσεγγίσεων.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία της μεθόδου LES και η σχέση του με άλλες μαθηματικές προσεγγίσεις με τις οποίες μπορεί να συνδυάζεται για να παρέχει καλύτερα αποτελέσματα.

Στο τρίτο Κεφάλαιο αναλύονται τα μοντέλα κλίμακας υποπλέγματος που περιέχονται στην τεχνική LES και παρουσιάζονται οι διαφορετικές κατηγορίες αυτών.

Στο τέταρτο Κεφάλαιο αναλύεται η δομή ενός οποιουδήποτε λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, δίνονται στοιχεία για την τύρβη, αναλύονται τα κριτήρια για την επιλογή ενός μοντέλου στην επίλυση προβλημάτων ροής, και δίνονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μοντέλων που υπάρχουν διαθέσιμα για την επίλυση ροϊκών προβλημάτων σε έναν εμπορικό κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο επιλύεται ένα πρόβλημα υπολογιστικής ρευστομηχανικής κάνοντας χρήση του διαθέσιμου εμπορικού κώδικα και λαμβάνοντας στοιχεία από μια πειραματική διάταξη.

Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

	ΣΕΛΙΔΑ
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	3
Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή	5
1.1 Η σημασία της τύρβης στη Μηχανική Ρευστών	5
1.2 Χαρακτηριστικά της τύρβης	6
1.3 Υπολογιστικές προσεγγίσεις τυρβωδών ροών	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Μεθοδολογία του LES	20
2.1 Εξισώσεις RANS	20
2.2 Ανάλυση του ΠΜΔ	22
2.3 Χωρικό φιλτράρισμα/μεσοστάθμιση και εξισώσεις	25
2.4 Σχέση του LES με το DNS και το RANS	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Μοντέλα Κλίμακας Υποπλέγματος (SGS)	31
3.1 Ρόλος και επιθυμητές ποσότητες σε ένα μοντέλο SGS	31
3.2 Μοντέλο Smagorinsky	34
3.3 Βελτιωμένες εκδόσεις του μοντέλου ιξώδους δίνης	38
3.3.1 Δυναμική διαδικασία	38
3.3.2 Μοντέλο WALE	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ-ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	42
4.1 Πως δουλεύει ένας κώδικας CFD	42
4.2 ΤΥΡΒΗ	45
4.3 Κριτήρια για την αξιολόγηση των μοντέλων	46
4.4 Διαδικασία υπολογιστικής προσομοίωσης	50
4.5 Επιλέγοντας ένα τυρβώδες μοντέλο	55
4.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υπολογιστικών μοντέλων	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΕΠΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	58
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ –ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	58
5.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΩΔΟΥΣ ΦΛΟΓΑΣ ΣΤΟ FLUENT	64
5.3 ΛΙΜΝΩΔΕΙΣ ΦΛΟΓΕΣ	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Εισαγωγή

Όπως και σε άλλα πεδία της Μηχανικής, στην Μηχανική Ρευστών αριθμητικές υπολογιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για μελέτη των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα και για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων.

Με την αυξημένη υπολογιστική δύναμη και διαθεσιμότητα των προκεχωρημένων αριθμητικών μεθόδων, ανοδικά περισσότερο πολύπλοκα και πρακτικά ρεαλιστικά προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων.

Μια δυσκολία στην λήψη ρεαλιστικών προβλέψεων είναι το γεγονός ότι όλες οι ροές στη Μηχανική Ρευστών, είτε γεωφυσικές, είτε ανθρωπογενείς ροές είναι τυρβώδεις, εκτός από τις υπόγειες ροές που δεν είναι πάντα τυρβώδεις.

Η ασταθής ακανόνιστη κίνηση στροβίλων (δινών) σχετίζεται με την τύρβη αυξάνοντας πολύ την ορμή, την μεταφορά μάζας και θερμότητας και επομένως αυτό έχει μεγάλη επίδραση σε όλες τις πτυχές της ροής και των σχετικών φαινομένων όπως η θερμοκρασία, οι κατανομές συγκεντρώσεων, η μεταφορά ειδών (αερίων ή υγρών ρύπων και άλλων ουσιών) κ.α.

Έτσι, σε κάθε επιτυχημένο υπολογισμό της ροής και των σχετικών φαινομένων, μια ρεαλιστική προσομοίωση του αποτελέσματος της τύρβης είναι σημαντική.

Αυτή η εργασία στοχεύει στην ανάλυση μιας ισχυρής μεθόδου προσομοίωσης της τύρβης, που ονομάζεται Large Eddy Simulation (LES) (Προσομοίωση των Μεγάλων Δινών), που σαν μέθοδος είναι μια από τις σημαντικότερες στην επίλυση πρακτικών αλλά και δύσκολων προβλημάτων στην ευρύτερη επιστημονική περιοχή Μηχανικής και Δυναμικής των Ρευστών.

1.1 Η σημασία της τύρβης στη Μηχανική Ρευστών

Προκειμένου να δώσουμε έμφαση στην ανάγκη για ρεαλιστική προσομοίωση της τύρβης και των αποτελεσμάτων της, η σπουδαιότητα και ο ρόλος που η τύρβη παίζει στα προβλήματα της Μηχανικής των Ρευστών είναι πολύ σημαντική αν όχι απολύτως απαραίτητη για την ορθή επίλυση κάθε είδους προβλήματος.

Η αύξηση στη μεταφορά ορμής που προκαλείται από την διακυμαινόμενη τυρβώδη κίνηση αυξάνει την τριβή στα στερεά όρια της ροής και σαν συνέπεια προκαλούνται απώλειες στις ροές μέσω αγωγών και γύρω από δομές.

Έτσι, προσδιορίζει το ρυθμό ροής και την πτώση πίεσης στους αγωγούς και το επίπεδο του νερού στους ανοικτούς αγωγούς και επίσης προσδιορίζει το ρυθμό της σκέδασης της ενέργειας.

Η τύρβη έχει επίσης επιτελική επίδραση στις λεπτομέρειες της ανάπτυξης της ροής, όπως την κατανομή της ταχύτητας, την κατανομή της πίεσης στη ροή και κατά μήκος των ορίων της και ως εκ τούτου των δυνάμεων στις δομές και κατασκευές περιλαμβάνοντας ασταθείς δυνάμεις.

Για παράδειγμα, η τύρβη προκαλεί την κατανομή της ταχύτητας στη ροή αγωγών να είναι περισσότερο ανομοιόμορφη από ότι η στρωτή ροή σε αγωγούς (παραβολική κατανομή) και η τύρβη είναι που προκαλεί δευτερεύουσες κινήσεις σε μη κυκλικούς αγωγούς και ανοικτά κανάλια.

Η ανάμιξη λόγω της διακυμαινόμενης τυρβώδους κίνησης είναι υπεύθυνη π.χ. για την διάδοση των δεσμών (jets) ρευστού, την είσοδο ρύπων, την διασπορά ρύπων και γενικά κάθε κίνησης ρευστού σε ακανόνιστες μορφές με μεγάλες ταχύτητες και τυχαιότητα στην κίνηση και στις επιπτώσεις όλων αυτών των μεταβολών.

Γενικά, η τύρβη δημιουργεί αλλά και ελέγχει βιολογικές διαδικασίες άλλες φορές προς την ορθή κατεύθυνση και άλλες φορές προς την καταστροφή όπως π.χ. σε ρύπανση του περιβάλλοντος λόγω της τυρβώδους διασποράς ρύπων στον αέρα ή στην θάλασσα.

Επίσης ελέγχει βιολογικές αντιδράσεις μέσα σε σώματα νερού και έχει μεγάλη επίδραση στην ποιότητα του νερού αφού ανάλογα με τις κινήσεις άλλες φορές το σώμα του νερού καθαρίζει και άλλοτε μπορεί να ρυπαίνεται λόγω των τυρβωδών διαδικασιών και κινήσεων.

1.2 Χαρακτηριστικά της τύρβης

Για μια εκτίμηση του έργου και των δυσκολιών προσομοίωσης της τύρβης και των επιδράσεων στην υπολογιστική διαδικασία, τα βασικά χαρακτηριστικά της αναλύονται συνοπτικά.

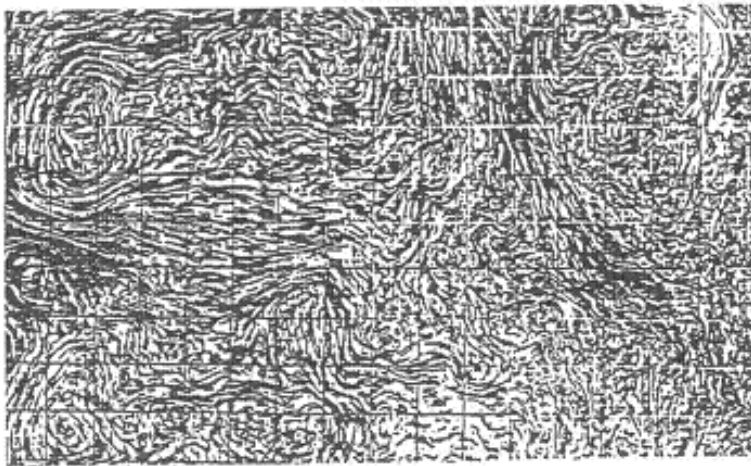
Μια εξαιρετική εισαγωγή στο αντικείμενο της τύρβης και της οπτικοποίησης της μπορεί να βρεθεί σε ένα παλιό αλλά πολύ σημαντικό φιλμ του Stewart (1969) που είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο αλλά και στα σχετικά βιβλία επιστημόνων ανά τον κόσμο που εργάζονται πάνω στη βελτίωση των τρόπων πρόβλεψης της τύρβης και των επιδράσεων της στις ροές και στις φυσικές διεργασίες.

Δυστυχώς, για τον δημιουργό μοντέλων τύρβης, οι τυρβώδεις κινήσεις είναι πολύ σύνθετες αφού είναι αρκετά ακανόνιστες, πάντα ασταθείς και τριών διαστάσεων. Αυτό είναι σε αντίθεση με την στρωτή ροή που είναι κανονική και τακτική όσον αφορά τις ροικές γραμμές, είναι συνήθως σταθερή και μονοδιάστατη ή/και διδιάστατη.

Στην τύρβη, οι ποσότητες της ροής όπως η ταχύτητα, η θερμοκρασία ή η συγκέντρωση υποβάλλονται σε σύνθετες μεταβολές στο χώρο και στο χρόνο, που εκδηλώνονται από τις διακυμάνσεις. Αυτές οι τυρβώδεις διακυμάνσεις προκαλούν σημαντική μεταφορά ορμής-μάζας-θερμότητας και πολύ σημαντικά αυξάνουν την μοριακή μεταφορά λόγω της κίνησης Brown στην στρωτή ροή.

Αυτή η αυξημένη μεταφορά και η ισχυρή ανάμιξη που προκαλείται είναι πρακτικά το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της τύρβης.

Η τυρβώδης κίνηση μεταφέρει στροβιλότητα με περιστρεφόμενους άξονες σε όλες τις κατευθύνσεις και αποτελείται από στροβίλους που αλληλεπιδρούν ο ένας στον άλλον, και ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της τύρβης είναι το φάσμα των μεγεθών των δινών (στροβίλων) που η ευρύτητα είναι αρκετά μεγάλη (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Τυρβώδεις δίνες στην επιφάνεια δεξαμενής ανάδευσης νερού.

Το μέγεθος των δινών κυμαίνεται από μεγάλες δίνες του μεγέθους του πεδίου ροής, π.χ. τη διάμετρο του σωλήνα ή το πλάτος μιας δέσμης ρευστού, αντιστοιχώντας σε χαμηλής συχνότητας διακυμάνσεις έως και μικρές δίνες στις οποίες οι ιξώδεις δυνάμεις δρουν και σκέδαση λαμβάνει μέρος, αντιστοιχώντας σε υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις.

Η εικόνα 1.2 παρέχει ένα παράδειγμα του τυρβώδους φάσματος που δείχνει την κατανομή της κινητικής ενέργειας των διακυμάνσεων με τον αριθμό k της τύρβης που είναι ανάλογος με την συχνότητα αλλά είναι ο αντίστροφος των μεγεθών των δινών.

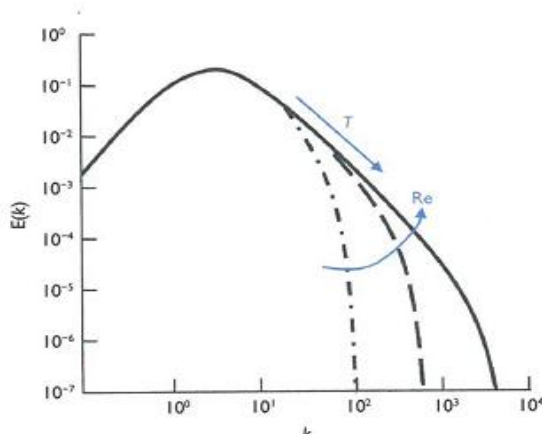
Οι μεγάλες δίνες είναι γενικά οι πιο ενεργητικές και εξάγουν ενέργεια από την μέση κίνηση και διασπώνται σε μικρότερες δίνες και μεταφέρουν την ενέργεια διακύμανσης σε μικρότερες δίνες με υψηλότερη συχνότητα διακυμάνσεων, μια διαδικασία που ονομάζεται κλιμάκωση ενέργειας (energy cascade).

Αυτή η διάσπαση και η μεταφορά σε μικρότερες και ακόμα πιο μικρές δίνες συνεχίζεται μέχρι οι ιξώδεις δυνάμεις να γίνουν ενεργές και οι διακυμάνσεις να αποσβεστούν από αυτές που είναι η διαδικασία της σκέδασης της ενέργειας διακύμανσης που λαμβάνει χώρα σε μικρότερες δίνες.

Στην εικόνα 1.2, φάσματα δίνονται για 3 αριθμούς Re και αποδεικνύεται ότι το πλάτος του φάσματος αυξάνει με τον αριθμό Re . Αυτό σημαίνει ότι σε υψηλούς αριθμούς Re η σκέδαση λαμβάνει μέρος σε μικρότερες δίνες και ότι ο λόγος των μεγεθών των μικρότερων προς τις μεγαλύτερες δίνες αυξάνεται με την αριθμό Re .

Σε επαρκώς υψηλούς Re υπάρχει ένα μέσο πεδίο μεγεθών δινών και αριθμών k όπου η ενέργεια ούτε τροφοδοτείται από τη μέση κίνηση ούτε από τη σκέδαση των ιξωδών δυνάμεων από τις μικρότερες δίνες αλλά μόνο μεταφέρεται από τις μεγαλύτερες στις μικρότερες δίνες. Αυτό ονομάζεται αδρανειακή υποσειρά (υποπεδίο) (inertial sub-range) που υποδεικνύεται από το T στην εικόνα και εδώ το φάσμα συμπεριφέρεται σαν $E \sim k^{-3/5}$.

Το πλάτος αυτού του πεδίου αυξάνεται με τον αριθμό Re όπως είναι εμφανές στην Εικόνα 1.2.



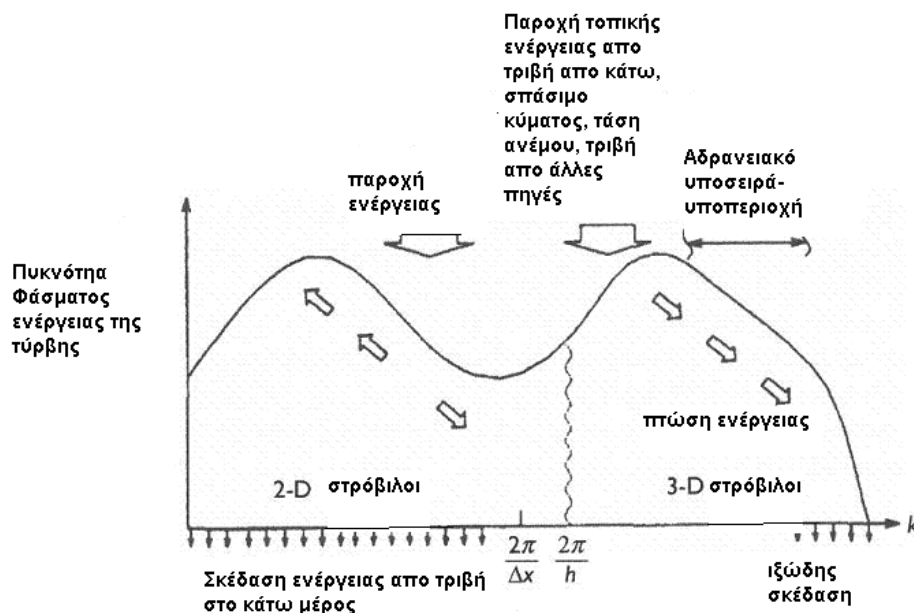
Εικόνα 1.2: Φάσμα τύρβης με $Re (=tke^{1/2} L/v, tke = \text{Κινητική ενέργεια και } L = \text{κλίμακα μήκους τύρβης})$.

Εάν θέλουμε να ερευνήσουμε ποτάμια ή λιμναία συστήματα με αβαθή ροές νερού, η κατάσταση μπορεί να είναι διαφορετική: εδώ η οριζόντια έκταση του σώματος του νερού είναι πολύ μεγαλύτερη από το βάθος του νερού και κατά κύριο λόγο διδιάστατες δίνες με κάθετους άξονες περιστροφής μπορούν να υπάρχουν με μεγέθη σχετικά μεγαλύτερα από αυτά που δημιουργούνται σε τρισδιάστατη τυρβώδη ροή που περιορίζονται από το βάθος του νερού.

Σε αυτή την περίπτωση, ένα φάσμα δύο πεδίων μπορεί να υπάρχει όπως δείχνεται σχηματικά στην Εικόνα 1.3. Ο χαμηλός αριθμός κύματος στο φάσμα των διδιάστατων δινών με οριζόντια κίνηση και το πεδίο του υψηλότερου αριθμού κύματος αναπαριστά το φάσμα των τρισδιάστατων δινών με μέγεθος μικρότερο από το βάθος του νερού.

Στο πεδίο των διδιάστατων δινών, η ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται από μικρότερες σε μεγαλύτερες δίνες και αυτό είναι στο μέρος του φάσματος που μπορεί να υπάρχει αντίστροφη μορφή όπως φαίνεται στην εικόνα. Αυτή όμως δεν είναι γνήσια τύρβη, ακόμα οι δίνες είναι υψηλά ασταθείς και περιέχουν σημαντική ενέργεια και επομένως έχουν μια υψηλή επιρροή στη μεταφορά ορμής και βαθμωτών ποσοτήτων.

Για μια επιτυχημένη υπολογιστική μελέτη ροών ρηχών νερών, τα αποτελέσματα και των δύο πεδίων χρειάζεται να προσομοιωθούν.

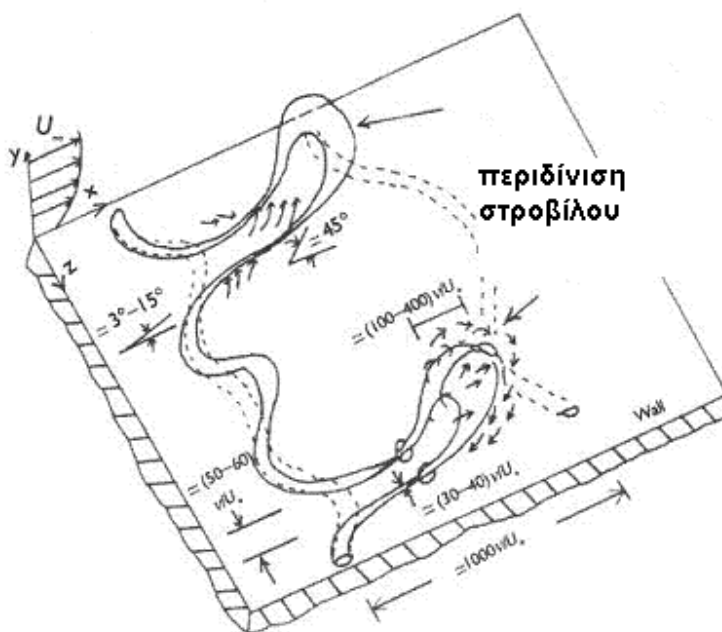


Εικόνα 1.3: Φάσμα δύο πεδίων.

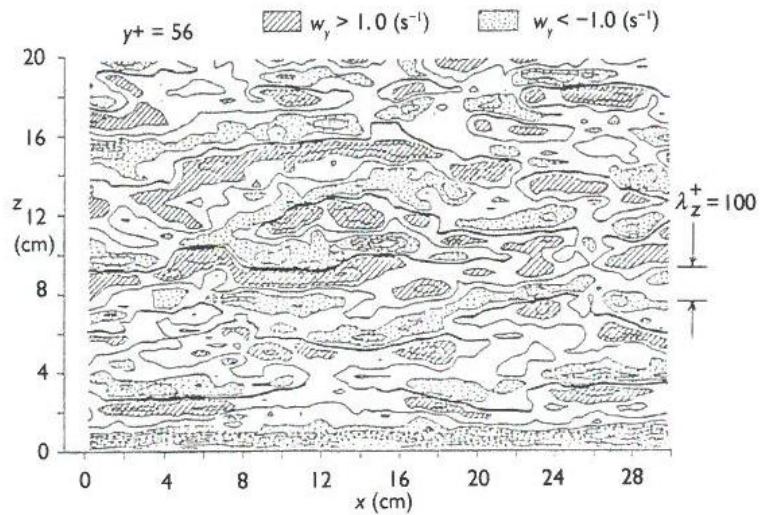
Οι τυρβώδεις κινήσεις μικρής κλίμακας, όπου οι ιξώδεις δυνάμεις δρουν, και επίσης αυτές στην αδρανειακή υποπεριοχή συμπεριφέρονται αρκετά τυχαία, έτσι οι διακυμάνσεις μπορούν να περιγραφούν από μια συνάρτηση πυκνότητας-πιθανότητας Gauss.

Οι μεγαλύτερες δίνες αλληλεπιδρούν με τη μέση ροή και εξαρτώνται από τις οριακές συνθήκες και επομένως η θεωρούμενη ροική κατάσταση δεν είναι ανεξάρτητη της τυχαιότητας αλλά συχνά έχει κάποια τάξη και διορθωμένη συμπεριφορά. Αυτές οι δομές (coherent =συνεκτικές-συναπτόμενες) έχουν έναν κύκλο ζωής περιλαμβάνοντας τη δημιουργία, την ανάπτυξη και την μεταγωγή από τη μέση κίνηση κατά τη διάρκεια της οποίας διατηρούν τη μορφή τους, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και τελικά διασπώνται.

Αυτές οι δομές χωρίζονται σε δύο κύριες ομάδες: α) φαινόμενα εκρήξεων κοντά σε τοιχώματα που περιλαμβάνουν εγχύσεις και αποσπάσεις, δίνες με περιδινούμενη κίνηση όπως και χαμηλής και υψηλής ταχύτητας ραβδώσεις της ροής, β) μεγάλης κλίμακας κάθετες κινήσεις μακριά από τοιχώματα που προκαλούνται από τη μέση ροή και/ή από τη γεωμετρία των ορίων της ροής. Ένα σκίτσο των φαινομένων έκρηξης παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4 και ένα παράδειγμα μιας ραβδωτής δομής διακυμάνσεων τύρβης πολύ κοντά σε τοιχώματα όπως έχει εξαχθεί από πειράματα φαίνεται στην Εικόνα 1.5.



Εικόνα 1.4: Σκίτσο φαινομένου έκρηξης.

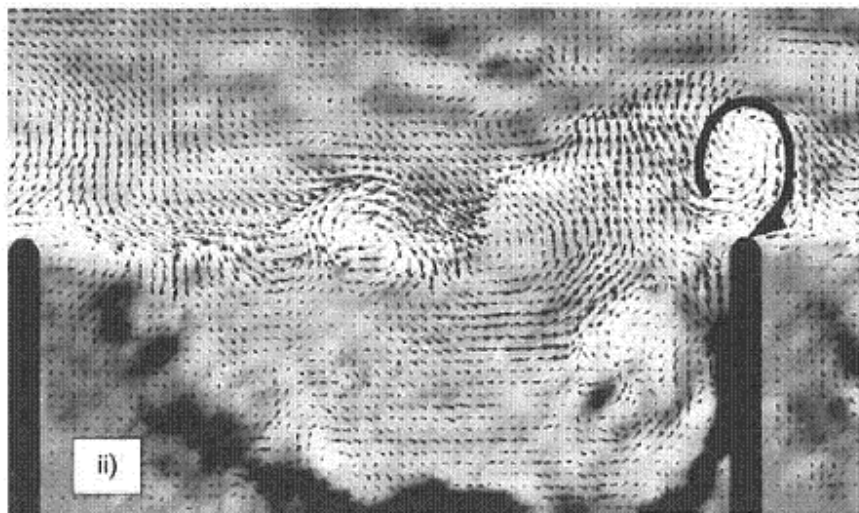
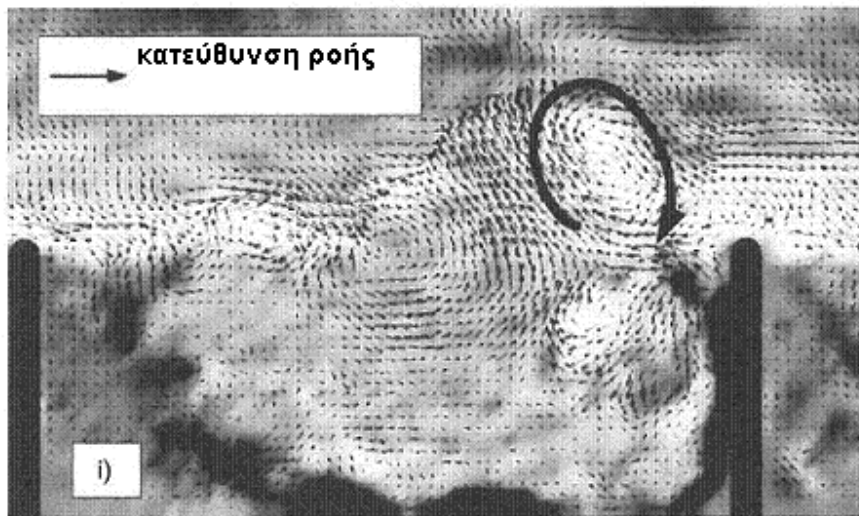


Εικόνα 1.5: Ροϊκές δομές σε ροή ανοικτού καναλιού- μετρήσεις συνιστώσας στροβιλότητας.

Παραδείγματα δομών μεγάλης κλίμακας δινών μακριά από τοίχωματα παρουσιάζεται στις Εικόνες 1.6 και 1.7. Η Εικόνα 1.6 παρουσιάζει δομές σε ένα επίπεδο ανάμιξης που προκύπτει από την αστάθεια του διατμητικού στρώματος μεταξύ των ρευμάτων με διαφορετική ταχύτητα και η Εικόνα 1.7 δείχνει δομές που περιβάλλουν ένα φράγμα που σε αυτή την περίπτωση προκαλείται από την σχετική γεωμετρία.



Εικόνα 1.6: Δομές σε ένα ρηχό επίπεδο ανάμιξης.



Εικόνα 1.7: Μετρούμενες συνεκτικές δομές σε ροή ανοικτού καναλιού με φράγμα.

Ένα ειδικό χαρακτηριστικό της τεχνικής της Προσομοίωσης των Μεγάλων Δινών (Π.Μ.Δ) σε αντίθεση με άλλες τεχνικές υπολογισμού του μέσου όρου της τύρβης, είναι ότι αυτή η μέθοδος επιλύει τις συνεκτικές δομές και έτσι υπολογίζει απευθείας την συχνή δυνατή επίδρασή τους στη μεταφορά ορμής, θερμότητας και μάζας.

1.3 Υπολογιστικές προσεγγίσεις τυρβωδών ροών

Σε αυτήν την ενότητα οι τρεις κύριες προσεγγίσεις για προσομοίωση τυρβωδών κινήσεων και τα αποτελέσματα τους αναλύονται σύντομα.

Η τύρβη καθοδηγείται από τις ίδιες βασικές εξισώσεις σαν τις γενικές στρωτές ροές, που ονομάζονται ασταθείς 3D Navier Stokes εξισώσεις που μαζί με την εξίσωση της συνέχειας μπορούν να περιγράψουν όλες τις σύνθετες λεπτομέρειες της τυρβώδους διακυμαινόμενης κίνησης.

Σε περιπτώσεις με μεταφορά μάζας και θερμότητας, η σχετική εξίσωση μεταφοράς βαθμωτών μεγεθών χρειάζεται να προστεθεί.

Στη σημερινή εποχή, αυτές οι εξισώσεις μπορούν να λυθούν αριθμητικά και μια μέθοδος που το πραγματοποιεί χωρίς την εισαγωγή κανενός μοντέλου ονομάζεται DNS (Direct Numerical Simulation = Απευθείας Αριθμητική Προσομοίωση). Σε αυτήν την προσέγγιση όλες οι κλίμακες της τυρβώδους κίνησης από τις μεγάλες έως και τις μικρότερες, κλίμακες σκέδασης πρέπει να επιλυθούν. Έτσι, το μέγεθος του αριθμητικού πλέγματος πρέπει να είναι μικρότερο από το μέγεθος των κινήσεων της μικροκλίμακας όπου η σκέδαση λαμβάνει μέρος. Στην Εικόνα 1.1 ένα πλέγμα ένα πλέγμα υποδεικνύεται και μπορεί να φανεί ότι οι υπάρχουσες δίνες με μέγεθος μικρότερο από το μέγεθος του πλέγματος έτσι αυτές δεν θα επιλυθούν στο δοσμένο πλέγμα. Ένα περισσότερο λεπτότερο αριθμητικό πλέγμα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για λήψη της ανάλυσης όλων των δινών σε αυτή την τυρβώδη ροή.

Καθώς, η σχέση του μεγέθους των μικρότερων δινών στο μέγεθος της κίνησης σε μεγάλη κλίμακα και επομένως του πεδίου ροής μεταβάλλεται αντιστρόφως με τον αριθμό Re και οι υπολογισμοί πρέπει να γίνονται σε 3D, ο αριθμός των σημείων στο πλέγμα και το υπολογιστικό κόστος που απαιτείται αυξάνει περίπου με Re^3 . Σαν αποτέλεσμα, οι αριθμοί Re είναι μεγάλης πρακτικής σημασίας και ο αριθμός των σημείων του πλέγματος που απαιτείται γίνεται τόσο μεγάλος που η υπολογιστική προσπάθεια που απαιτείται ξεπερνά τις ικανότητες των διαθέσιμων Η/Υ.

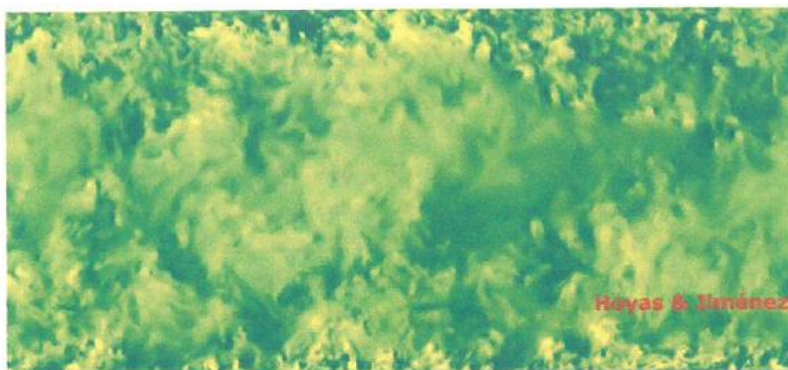
Ακόμα και σε μέσους αριθμούς Re και για απλές ροές η υπολογιστική προσπάθεια είναι μεγάλη. Αυτή η προσπάθεια μπορεί να απλουστευθεί με τη χρήση συστοιχίας Η/Υ που μπορούν να κάνουν παράλληλη επεξεργασία (parallel processing) ή αλλιώς για αρκετά δύσκολα προβλήματα που απαιτούν ακρίβεια και έχουν χρονικό ορίζοντα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας υπερ-υπολογιστής σαν τον Cray που θα έχει αποτελέσματα γρήγορα και ακριβή.

Έτσι, προς το παρόν και στο άμεσο μέλλον η μέθοδος DNS δεν είναι κατάλληλη μέθοδος για μεγάλης κλίμακας υπολογισμούς αλλά και στους υπολογισμούς μικρής ή/και μεσαίας κλίμακας υστερεί σε ακρίβεια. Όμως είναι πολύ χρήσιμο εργαλείο για την μελέτη λεπτομερειών της

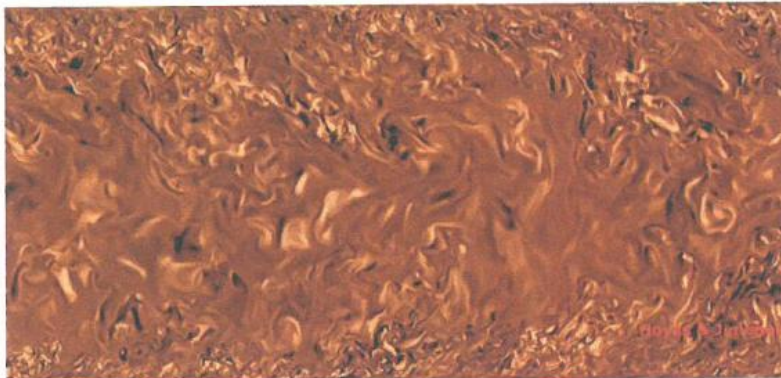
τύρβης σε χαμηλότερους αριθμούς Re καθώς οι πλήρεις πληροφορίες για όλες τις λεπτομέρειες της τυρβώδους κίνησης μπορούν να εξαχθούν από υπολογιστικές προσομοιώσεις.

Σαν παράδειγμα, αποτελέσματα από την προσομοίωση ροής σε κανάλι παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.8 που δείχνει την στροβιλότητα από άκρο σε άκρο της δομής έναντι του καναλιού.

Ένα δεύτερο παράδειγμα, η Εικόνα 1.9 παρουσιάζει μια δομή περιδινούμενου στροβίλου κοντά σε τοίχωμα που προέρχεται από DNS ροή σε κανάλι σε χαμηλό αριθμό Re , που δείχνει ότι η μέθοδος DNS επιτρέπει μια λεπτομερή μελέτη της ανάπτυξης τέτοιων δομών.

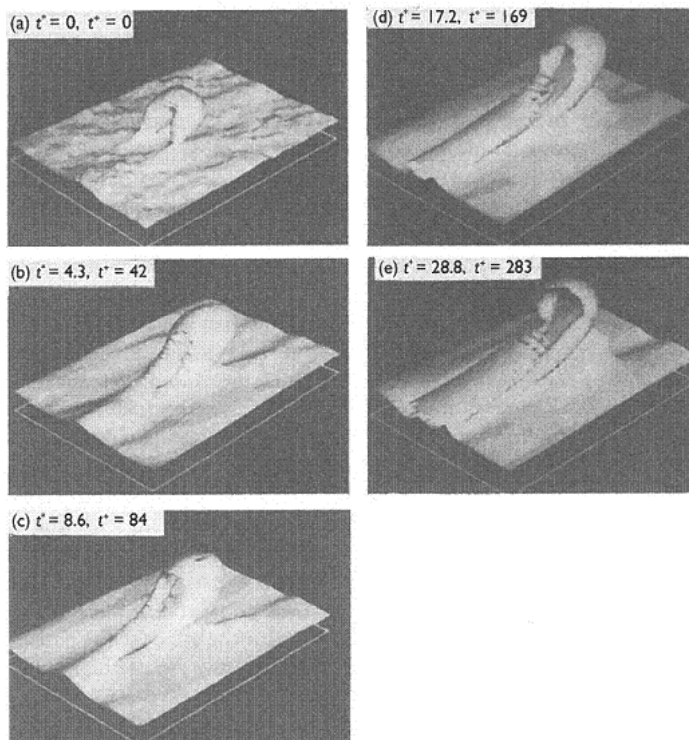


(a)



(b)

Εικόνα 1.8: Δομές από DNS ροής σε κανάλι σε $Re = 87.000$ οπτικοποιημένη από την συνιστώσα της ταχύτητας (α), από άκρο σε άκρο στροβιλότητα, (β) τα πάνω και κάτω όρια σε λεία τοιχώματα μη ολίσθησης.



Εικόνα 1.9: Στρόβιλοι περιδινούμενοι στο κάτω μέρος ροής σε κανάλι από DNS.

Επειδή, λίγες δεκαετίες πριν κανένας δεν θα μπορούσε ούτε να σκεφτεί να λύσει τις Navier Stokes εξισώσεις για τυρβώδη ροή, στατιστικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν στις οποίες οι τυρβώδεις διακυμάνσεις γίνονται μέσοι όροι και μόνο οι κυρίαρχες εξισώσεις των ποσοτήτων της μέσης ροής επιλύονται. Αυτές είναι οι Reynolds-averaged equations (εξισώσεις μέσω των όρων του Reynolds) και αυτές οι μέθοδοι ονομάζονται μέθοδοι RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes = Μέσων τιμών Re Navier-Stokes).

Διασπώντας τις τιμές των στιγμιαίων ποσοτήτων της ροής σε μέσες και διακυμαινόμενες τιμές και μετά λαμβάνοντας το μέσο όρο των μη γραμμικών αρχικών εξισώσεων Navier-Stokes οδηγούμαστε στην εμφάνιση των συσχετισμών μεταξύ των διακυμάνσεων της ταχύτητας, που δρά σαν τάσεις στη μέση ροή και ονομάζονται τυρβώδεις ή τάσεις Reynolds. Αυτές αναπαριστούν τη μεταφορά της μέσης ορμής από τις τυρβώδεις διακυμάνσεις. Ομοίως, οι εξισώσεις μεταφοράς μέσου όρου βαθμωτών περιέχουν συσχετισμούς αναπαριστώντας τη μεταφορά θερμότητας ή μάζας από τις τυρβώδεις διακυμάνσεις.

Ετσι, οι συσχετισμοί που εμφανίζονται στις εξισώσεις μέσω των όρων εκφράζουν την επίδραση της τύρβης στις ποσότητες της μέσης ροής. Αυτοί οι όροι είναι άγνωστοι και πρέπει να περιγραφούν από ένα μοντέλο πριν οι εξισώσεις της μέσης ροής επιλυθούν.

Μοντέλα αυτού του είδους, που πρέπει να παίρνονται υπόψη για το αποτέλεσμα όλου του φάσματος των τυρβωδών κινήσεων σε έναν υπολογισμό ονομάζονται στατιστικά τυρβώδη μοντέλα ή μοντέλα RANS.

Είναι μέθοδοι που χρησιμοποιούν τέτοια μοντέλα που σήμερα χρησιμοποιούνται στους περισσότερους πρακτικούς υπολογισμούς στη μελέτη προβλημάτων ροής.

Η υπολογιστική προσπάθεια επίλυσης των εξισώσεων RANS αποδίδοντας τις μέσες ποσότητες είναι σίγουρα πολύ λιγότερη από αυτή που απαιτείται από μια DNS αναλύοντας την διακυμαινόμενη τυρβώδη κίνηση σε όλες τις κλίμακες.

Ως εκ τούτου, σε Η/Υ που είναι διαθέσιμοι σήμερα οι υπολογισμοί RANS μπορούν να πραγματοποιηθούν για ρεαλιστικές περιπτώσεις που συμβαίνουν στην πράξη, ακόμα και για σύνθετες γεωμετρίες και για μεγάλα ροικά πεδία ειδικά όταν διδιάστατα μοντέλα βάθους-μέσου όρου χρησιμοποιούνται.

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία τυρβωδών μοντέλων RANS στη διεθνή βιβλιογραφία και αγορά για μεγάλο εύρος εφαρμογών αλλά συνεχώς δημιουργούνται και άλλα πιο βελτιωμένα και εξειδικευμένα για ειδικές περιπτώσεις και ειδικές συνθήκες.

Τυρβώδη μοντέλα μεταβλητής πολυπλοκότητας είναι σε χρήση από το απλό μοντέλο μήκους ανάμιξης έως και τα μοντέλα τάσεων Reynolds που χρησιμοποιούν διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς για τις ατομικές τάσεις Reynolds. Τα περισσότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην πράξη χρησιμοποιούν την έννοια του τυρβώδους ιξώδους/διαχυτότητα και εκτιμούν το τυρβώδες ιξώδες σχετίζοντάς το με τις ποσότητες της μέσης ροής μέσω απλών αλγεβρικών σχέσεων (μοντέλο μήκους ανάμιξης) ή μοντέλο εξισώσεων μεταφοράς για την χαρακτηριστική ταχύτητα και κλίμακες μήκους ή χρόνου της τύρβης (π.χ. το k-ε μοντέλο).

Οι μέθοδοι RANS είναι οικονομικοί αλλά υποφέρουν από μικρή γενικότητα και έχουν δυσκολίες στην επαρκή αντιμετώπιση με πολλές από τα σύνθετα ροικά φαινόμενα που συχνά απαντώνται σε περιπτώσεις ροών υγρών αλλά και περιβαλλοντικών ροών ειδικά όταν μεγάλης κλίμακας δομές παίζουν κυρίαρχο ρόλο στη μεταφορά της ορμής, της θερμότητας και μάζας ή όταν λεπτομέρειες της ροής, όπως μια ασταθής διαδικασία όπως απόρριψη στροβίλου ή διτροπική

συμπεριφορά της ροής και ασταθείς δυνάμεις στις δομές είναι σημαντικά και είναι απαραίτητη η επιλυσή τους.

Οι μέθοδοι RANS μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ασταθείς υπολογισμούς (URANS), αλλά βασικά μπορούν μόνο να αντιμετωπίσουν την αστάθεια της μέσης ροής, π.χ. όταν οι οριακές συνθήκες είναι χρονο-εξαρτώμενες όπως στην παλιρροιακή ροή σε κανάλι. Είναι κατάλληλοι μόνο όταν υπάρχει ένας ξεκάθαρος διαχωρισμός κλίμακας π.χ. όταν η κλίμακα του χρόνου της αστάθειας της μέσης ροής είναι ξεκάθαρα μεγαλύτερη από την χρονοκλίμακα των τυρβωδών διακυμάνσεων. Αυτό δεν μπορεί να επιλυθεί με τέτοιους υπολογισμούς.

Μια μέθοδος πιο ταιριαστή και πιο ισχυρή για επίλυση προβλημάτων περιλαμβάνοντας τα παραπάνω σύνθετα φαινόμενα είναι η τεχνική της Προσομοίωσης των Μεγάλων Δινών (ΠΜΔ).

Αυτή η μέθοδος, είναι μεταξύ της DNS και της RANS. Όπως η DNS, επίσης επιλύει 3D χρονο-εξαρτώμενες ροικές εξισώσεις, αλλά μόνο για τις κινήσεις στην μεγαλύτερη κλίμακα στο φάσμα και μπορεί να αναλυθεί σε ένα δοσμένο αριθμητικό πλέγμα (Εικόνα 1.1). Οι κινήσεις με κλίμακες μικρότερες από το μέγεθος του πλέγματος φιλτράρονται ή τοπικά γίνονται μέσοι όροι και το αποτέλεσμα τους μπορεί να λαμβάνεται υπόψη από μια κλίμακα υποπλέγματος (Sub-Grid-Scale- SGS μοντέλο).

Σε αντίθεση με το RANS μοντέλο, που πρέπει να υπολογίζει την επίδραση όλου του φάσματος των τυρβωδών κινήσεων, ένα SGS μοντέλο πρέπει να υπολογίζει για υψηλούς αριθμούς ενέργειας του φάσματος με μικρές κινήσεις της κλίμακας.

Καθώς το LES επιλύει τις 3D χρονο-εξαρτώμενες εξισώσεις Navier-Stokes και την εξίσωση συνέχειας, είναι υπολογιστικά σχετικά ακριβή, συχνά λόγω των μεγάλων χρόνων τρεξίματος που είναι απαραίτητα για την λήψη ρεαλιστικών στατιστικών.

Μακριά από τα τοιχώματα, οι μεγαλύτεροι τυρβώδεις στρόβιλοι που περιέχουν την περισσότερη από την ενέργεια και συνεισφέρουν περισσότερο στην μεταφορά ορμής, θερμότητας και μάζας είναι πρακτικώς ανεξάρτητοι από τον αριθμό Re, έτσι εδώ η LES δεν έχει πρόβλημα με τον αριθμό Re όπως με μέθοδος DNS.

Όμως, κοντά στα τοιχώματα η κλίμακα μήκους της τύρβης μειώνεται με την αύξηση του Re έτσι ο αριθμός των σημείων του πλέγματος που απαιτείται για να επιλύσει επαρκώς τη ζώνη κοντά στον τοίχο αυξάνεται προσεγγιστικά με Re^2 .

Ετσι, τέτοια επίλυση τοιχώματος LES απαιτεί πολύ μεγάλη υπολογιστική προσπάθεια, έτσι η εφαρμογή τους δεν είναι δυνατή σε υψηλούς αριθμούς Re που συχνά συμβαίνουν στην πράξη.

Ετσι, ειδική μοντελοποίηση κοντά στο τοίχωμα είναι απαραίτητη και μέθοδοι βελτιώσεων και θεραπείας των σφαλμάτων χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση και ανάλογα τη διαθεσιμότητα και την επιστημονική επάρκεια του μελετητή.

Στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics=CFD) γενικά, περιλαμβάνοντας και τους εμπορικούς κώδικες, η μέθοδος LES χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για υπολογισμό τυρβωδών ροών, αντικαθιστώντας αυξητικά την RANS ειδικά όταν σύνθετα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν μεγάλης κλίμακας δομές είναι σημαντική.

Κεφάλαιο 2^ο: Μεθοδολογία του LES

2.1 Εξισώσεις RANS

Το σημείο εκκίνησης όλων των μεθόδων προσομοίωσης για τυρβώδεις ροές, είτε για τις DNS, είτε LES ή RANS μεθόδους, είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes μαζί με μια αντίστοιχη εξίσωση για βαθμωτές ποσότητες όπως θερμοκρασία ή συγκέντρωση ειδών.

Για ασυμπίεστες ροές αυτές οι εξισώσεις εκφράζουν τους νόμους διατήρησης για τη μάζα, την ορμή, την θερμική ενέργεια και την συγκέντρωση των ειδών σε σημειογραφία με τανυστές.

Διατήρησης Μάζας: Εξίσωση Συνέχειας:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

Διατήρησης Ορμής: Εξισώσεις Navier-Stokes:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \frac{\rho - \rho_t}{\rho_t} \quad (2.2)$$

Διατήρηση Θερμικής ενέργειας/συγκέντρωσης ειδών:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial u_i f}{\partial x_i} = G \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_i} + S_f \quad (2.3)$$

Όπου: u_i είναι στιγμιαία συνιστώσα της ταχύτητας στην κατεύθυνση x_i , p είναι η στιγμιαία στατική πίεση και ρ είναι η βαθμωτή ποσότητα που μπορεί να σταθεί για είτε την θερμοκρασία T ή τη συγκέντρωση των ειδών C . S_f είναι η ογκομετρική πηγή/δεξαμενή που εκφράζει π.χ. τη παραγωγή θερμότητας λόγω των χημικών ή βιολογικών αντιδράσεων ή π.χ. αιωρούμενα ιζήματα κάποιας ροής βιομηχανικής ή φυσικής.

ν και Γ είναι το κινηματικό ιξώδες και η διαχυτότητα (του ϕ) αντίστοιχα.

Χρήση στις παραπάνω εξισώσεις έχει γίνει της προσέγγισης του Boussinesq έτσι ώστε η μεταβλητή πυκνότητα να εμφανίζεται μόνο στον ανωστικό όρο που είναι ο τελευταίος όρος της

δεξιάς μεριάς της Εξίσωσης 2.2 περιλαμβάνοντας την πυκνότητα αναφοράς ρ_τ και την επιτάχυνση της βαρύτητας g_i στην διεύθυνση x_i .

Μαζί με μια εξίσωση κατάστασης που συσχετίζει την τοπική πυκνότητα ρ με την τοπικές τιμές του T και του C , οι εξισώσεις (2.1) έως (2.3) δημιουργούν μια κλειστή ομάδα και είναι οι ακριβείς εξισώσεις που περιγράφουν όλες τις λεπτομέρειες της τυρβώδους κίνησης, περιλαμβάνοντας όλες τις διακυμάνσεις.

Η DNS μέθοδος λύνει αυτές τις εξισώσεις με μια κατάλληλη αριθμητική μέθοδο, και δεν εισάγει κάποιο μοντέλο.

Όπως είδαμε στην εισαγωγή, τέτοιοι υπολογισμοί δεν είναι εφικτοί στο άμεσο μέλλον για πρακτικές ροές που συνήθως έχουν υψηλούς αριθμούς Reynolds καθώς η υπολογιστική προσπάθεια για επίλυση όλων των κλιμάκων περιλαμβάνοντας την κίνηση σκέδασης μικρής κλίμακας μπορεί να είναι υπερβολική.

Έτσι, η μέθοδος RANS έχει γίνει η κυριότερη και μέχρι πρόσφατα ήταν το μόνο εργαλείο για επίλυση πρακτικών τυρβώδους ροής προβλημάτων. Σε αυτή τη μέθοδο, οι τυρβώδεις δεν επιλύονται με τον υπολογισμό αλλά με μέσω μεσοστάθμισης από ένα χρονικό φίλτρο που εφαρμόζεται στην διακυμαινόμενη κίνηση.

Προκειμένου να γίνει ξεκάθαρη η διαφορά με την χωρική φίλτρανση που χρησιμοποιείται στη μέθοδο LES, τα βασικά την μεσοστάθμισης του Reynolds παρουσιάζονται σύντομα με περιορισμό στο πεδίο ταχύτητας.

Μεσοσταθμισμένες χρονικές/φιλτραρισμένες ποσότητες της μέσης ροής παρουσιάζονται και επιλύονται και είναι οι παρακάτω:

$$\begin{aligned} \langle u_i \rangle &= \bar{u}_i^{RANS} = \frac{1}{T} \int_0^T u_i dt \\ \langle p \rangle &= \bar{p}^{RANS} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \end{aligned} \quad (2.4)$$

Ο χρόνος ενσωμάτωσης/μεσοστάθμισης T μπορεί να είναι μεγαλύτερος από τη χρονική κλίμακα των τυρβωδών διακυμάνσεων αλλά μικρότερος από τη χρονική κλίμακα της μέσης κίνησης εάν αυτό είναι ασταθές.

Οι στιγμιαίες ποσότητες διαχωρίζονται σε μέσες τιμές και διακυμάνσεις γύρω από τις μέσες, έτσι π.χ. για το u_i προκύπτει:

$$u_i(x_i, t) = \bar{u}_i^{RANS}(x_i, t) + u'_{iRANS}(x_i, t)$$

Εισαγωγή αυτού στην εξίσωση συνέχειας και στις εξισώσεις Navier-Stokes (2.1) και (2.2) και μεσοστάθμιση στη διαδικασία στην εξίσωση (2.4) αποδίδει τις εξισώσεις RANS να κυριαρχούν στις ποσότητες της μέσης ροής \bar{u}_i^{RANS} και \bar{p}^{RANS} που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο RANS.

Αυτές οι εξισώσεις είναι επίσημα όμοιες με τις εξισώσεις (2.9)-(2.11) που παρουσιάζονται σε επόμενη παράγραφο.

Όταν εκτελείται στον μη γραμμικό όρο $\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j}$ στις εξισώσεις Navier-Stokes, ο διαχωρισμός και

η διαδικασία μεσοστάθμισης οδηγεί στην εισαγωγή συσχετίσεων μεταξύ διακυμαινόμενων ταχυτήτων $\langle u'_{iRANS} u'_{jRANS} \rangle$. Αυτές ενεργούν σαν τάσεις και εκπροσωπούν τις τάσεις Reynolds $\tau_{ij}^{RANS} = - \langle u'_{iRANS} u'_{jRANS} \rangle$ εκφράζοντας όλη την επίδραση της τύρβης στη μέση κίνηση και απαιτεί μοντελοποίηση, π.χ. ένα RANS μοντέλο.

Ένα τέτοιο μοντέλο λογαριάζεται για όλες τις κλίμακες, περιλαμβάνοντας το αποτέλεσμα των μεγάλων, που περιέχουν ενέργεια και εξαρτώνται ισχυρά από τις οριακές συνθήκες και επομένως όλη η ροική κατάσταση λαμβάνεται υπόψη.

Ετσι, όπως φάνηκε και από την εισαγωγή είναι αδύνατο να αναπτυχθεί ένα γενικό μοντέλο που να αντιμετωπίζει όλες τις καταστάσεις πρακτικού ενδιαφέροντος.

2.2 Ανάλυση του ΠΜΔ

Όπως εξηγήθηκε στην εισαγωγή η τύρβη είναι ένα φαινόμενο πολλών κλιμάκων με ευρύ φάσμα κλιμάκων της κίνησης του ρευστού.

Μεγάλες και μικρές κλίμακες κίνησης έχουν εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά και αυτές οι διαφορές συγκεντρώνονται στον πίνακα 2.1. Η ιδέα του LES είναι να υπολογίζει ρητώς (με σαφήνεια) την κίνηση των μεγάλων κλιμάκων (ή στροβίλων ή δινών) επιλύοντας τις κυρίαρχες 3D χρονο-εξαρτώμενες εξισώσεις και να μοντελοποιούνται οι κινήσεις των μικρών κλιμάκων.

Αυτή η τακτική αποφεύγει το πρόβλημα της μεθόδου RANS έχοντας να μοντελοποιηθεί η μεγάλη κλίμακα, ενεργητική και κίνηση εξαρτώμενη από τις οριακές συνθήκες και την ίδια ώρα του πρόβλημα του DNS έχοντας να επιλυθεί η κίνηση σκέδασης της μικρής κλίμακας.

Όπως παρουσιάζεται συγκεντρωμένο στον Πίνακα 2.1, το τελευταίο που αντιπροσωπεύει ένα μικρό κομμάτι του φάσματος, είναι περισσότερο καθολικό και επομένως ευκολότερο για μοντελοποίηση από ότι η κίνηση σε μεγάλη κλίμακα, και έχει βρεθεί ότι εντελώς απλά μοντέλα είναι συνήθως επαρκή.

Το γεγονός ότι η μικρής κλίμακας κίνηση δεν χρειάζεται να επιλυθεί μετακινεί τον περιορισμό της μεθόδου σε περιπτώσεις χαμηλού αριθμού Reynolds που είναι συμφυής με την μέθοδο DNS. Η έννοια της μεθόδου LES παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.1 απέναντι από τη ροή ενέργειας στις τυρβώδεις ροές. Οι μεγάλες κλίμακες αφαιρούν ενέργεια από τη μέση ροή και τη μεταφέρουν σε μικρότερες κλίμακες στο διαμόρφωση της ενέργειας, και στις μικρές κλίμακες που μοντελοποιούνται σε LES, η κινητική ενέργεια αποσύρεται από το μηχανισμό της σκέδασης.

Το πρώτο βήμα κατανόησης της ιδέας της μεθόδου LES είναι ο χωρισμός της τυρβώδους κίνησης με μεγάλες κλίμακες ή στροβίλους (δίνες) προς επίλυση και οι μικρές κλίμακες να μοντελοποιηθούν.

Αρκετές προσεγγίσεις για αυτό το διαχωρισμό παρουσιάζονται παρακάτω.

Ιδανικά ο διαχωρισμός πρέπει να συμβεί σε μια φασματική περιοχή όπου μόνο μεταφορά ενέργειας λαμβάνει χώρα (π.χ. μη είσοδος ενέργειας από τη μέση κίνηση, μη σκέδαση), που είναι στην αδρανειακή υποπεριοχή (Εικόνα 2.1), έτσι ξεκάθαρα οι ενεργητικές δίνες εξαρτώμενες από τις οριακές συνθήκες, επιλύονται και μόνο η κίνηση σκέδασης χρειάζεται να μοντελοποιηθεί.

Αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, αλλά τουλάχιστον οι αναλυμένες δίνες θα περιέχουν την περισσότερη από την ενέργεια (περίπου 80-90%).

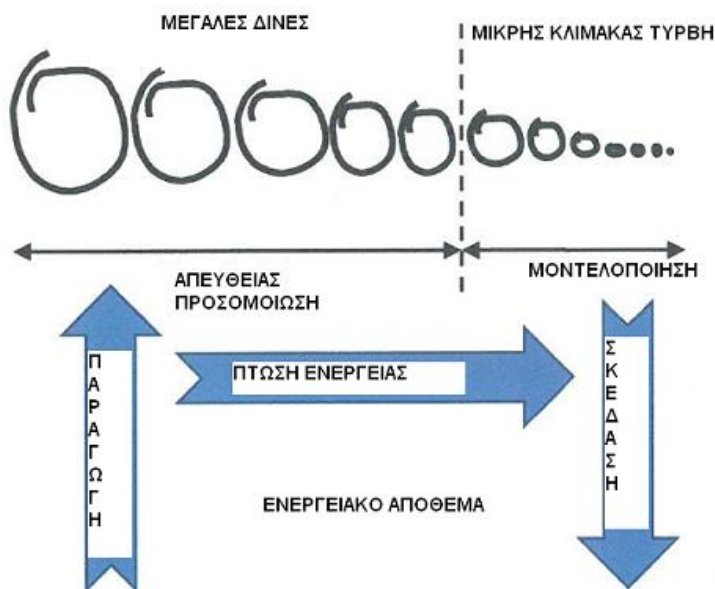
Ο διαχωρισμός της κλίμακας είναι στην πράξη συχνά καθοδηγούμενος από την λεπτότητα του πλέγματος που είναι δυνατόν να παροχετευθεί.

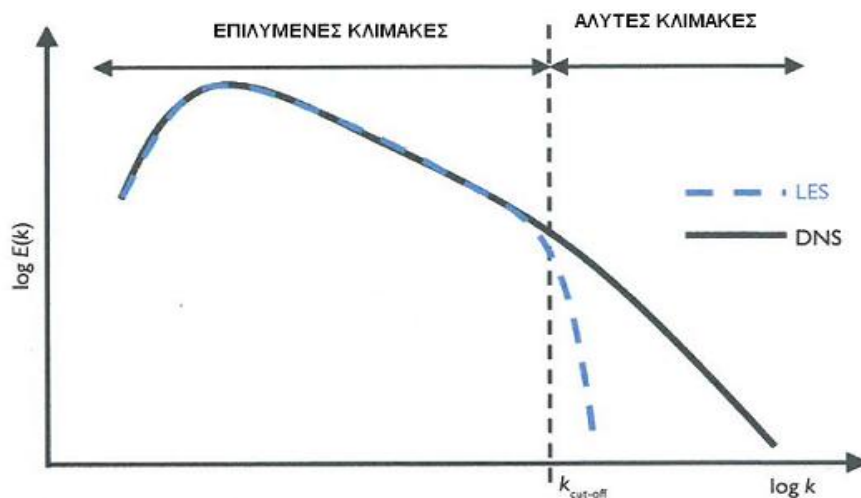
Η μέθοδος LES μπορεί επομένως να θεωρηθεί σαν μια μέθοδος που επιλύει όσο περισσότερη από την κίνηση είναι δυνατή σε ένα δοσμένο/εφικτό πλέγμα.

Πίνακας 2.1: Διαφορές μεταξύ μεγάλων δινών και τύρβης μικρής κλίμακας.

Μεγάλες Δίνες	Τύρβη μικρής κλίμακας
Παράγονται από τη μέση ροή	Παράγεται από τις μεγάλες δίνες
Εξαρτώνται από τη γεωμετρία και τα όρια	Καθολική
Ταξινομούνται	Τυχαία
Απαιτούν προσδιοριστική περιγραφή	Μπορεί να μοντελοποιηθεί στατιστικά

(ντετερμινιστική)	
Ανομοιογενείς	Ομοιογενής
Ανισοτροπικές	Ισοτροπική
Μεγάλης διάρκειας ζωής και ενεργητικές	Μικρής διάρκειας ζωής και μη ενεργητική
Διαχυτικές	Διασπάται
<ul style="list-style-type: none"> - δύσκολο το έργο της μοντελοποίησης - αδύνατη η δημιουργία καθολικού μοντέλου 	<ul style="list-style-type: none"> - εύκολη η μοντελοποίηση - δυνατή η δημιουργία καθολικού μοντέλου.





Εικόνα 2.1: Ιδέα της μεθόδου LES σε σχέση με την ροή ενέργειας και το φάσμα ενέργειας.

2.3 Χωρικό φιλτράρισμα/μεσοστάθμιση και εξισώσεις

Αντίθετα με την προσέγγιση RANS που περιλαμβάνει χρονική μεσοστάθμιση ή φιλτράρισμα, στην LES η κίνηση της μικρής κλίμακας αφαιρείται από χωρική μεσοστάθμιση ή φιλτράρισμα. Τοπικές ποσότητες f μπορούν μετά να χωριστούν σε αναλυμένες ποσότητες \bar{f} και παρεκκλίσεις f' από αυτές (Εικόνες 2.4 , 2.5):

$$f = \bar{f} + f\phi \quad (2.5)$$

Στην πράξη, η απομάκρυνση της μικρής κλίμακας κίνησης και επομένως η μεσοστάθμιση εκτελείται περισσότερο από το αριθμητικό πλέγμα, όπως σε ένα δοσμένο πλέγμα μόνο κινήσεις με κλίμακες μεγαλύτερες από το μέγεθος του πλέγματος μπορούν να επιλυθούν, οι άλλες εκπίπτουν μέσω του πλέγματος και η ποσότητα που υπολογίζεται είναι μια μεσοστάθμιση απο τον όγκο ελέγχου που έχει δημιουργηθεί από το πλέγμα (Εικόνα 2.2).

Αυτή είναι η μέθοδος του Schumann, που εισάγει απευθείας τις διακριτοποιημένες εξισορροπημένες εξισώσεις όγκου που σχετίζονται με την αριθμητική επίλυση. Μια μέθοδος ανεξάρτητη από αυτή είναι το φιλτράρισμα.

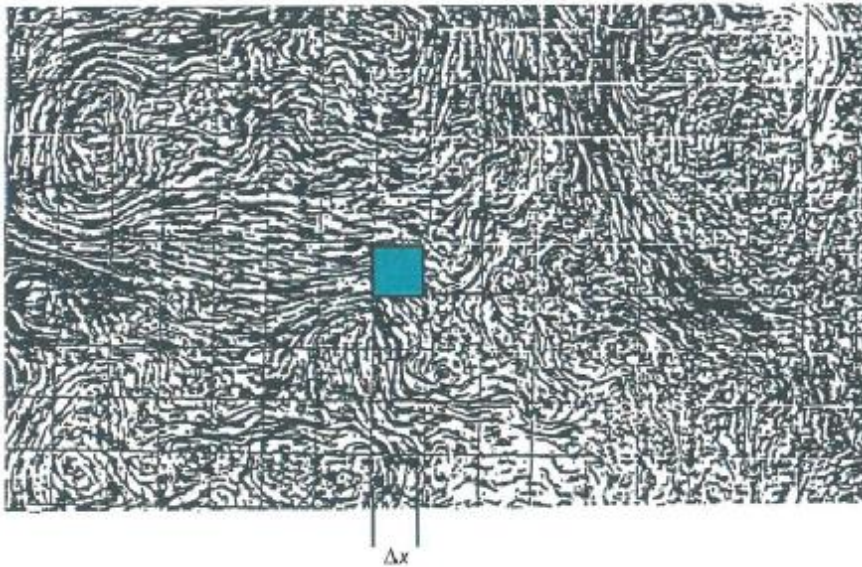
Μιας και αυτή η μέθοδος που εισάχθηκε αρχικά από τον Leonard είναι περισσότερο γενική και εννοιολογικά ξεκάθαρη θα αναλυθεί πρώτη.

Η διεσπασμένη ποσότητα \bar{f} ορίζεται στη μέθοδο φιλτραρίσματος ως εξής:

$$\bar{f}(r,t) = \int_D G(r,r') f(r',t) dV' \quad (2.6)$$

Εδώ r είναι η θέση όπου το \bar{f} θα προσδιοριστεί και r' είναι η θέση όπου το f εισάγεται στην χωρική ενσωμάτωση. Η ενσωμάτωση πραγματοποιείται πάνω από όλο το ροικό πεδίο D και G είναι μια συμπαγώς υποστηριζόμενη (π.χ. το \bar{f} υποθέτει μεγάλες τιμές όταν $r' \approx r$) συνάρτηση φιλτραρίσματος με πλάτος φίλτρου Δ , κανονικοποιημένη και έτσι προκύπτει:

$$\int_D G(r,r') dV' = 1 \quad (2.7)$$



Εικόνα 2.2: Ανάλυση των μεσοσταθμισμένων στο κελί ποσοτήτων .

Για μια χωρική κατεύθυνση (2.6) γίνεται:

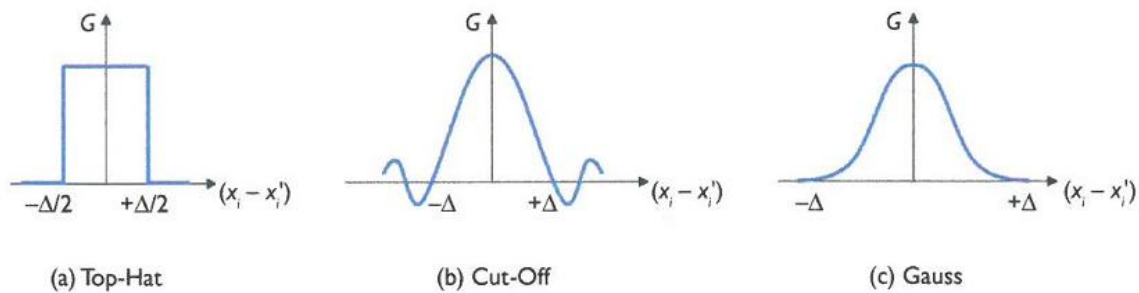
$$\bar{f}(x_i,t) = \int_D G(x_i,x_i',t) f(x_i',t) dx_i' \quad (2.8)$$

Οι πιο συνηθισμένες συναρτήσεις φίλτρων δείχνονται στην Εικόνα 2.3. Αυτές είναι οι: top-hat (ή κουτί) φίλτρο $G = \frac{1}{D}$ για $|x - x_i| \leq \frac{D}{2}$ που αντιστοιχεί σε μεσοστάθμιση σε αυτή την περιοχή,

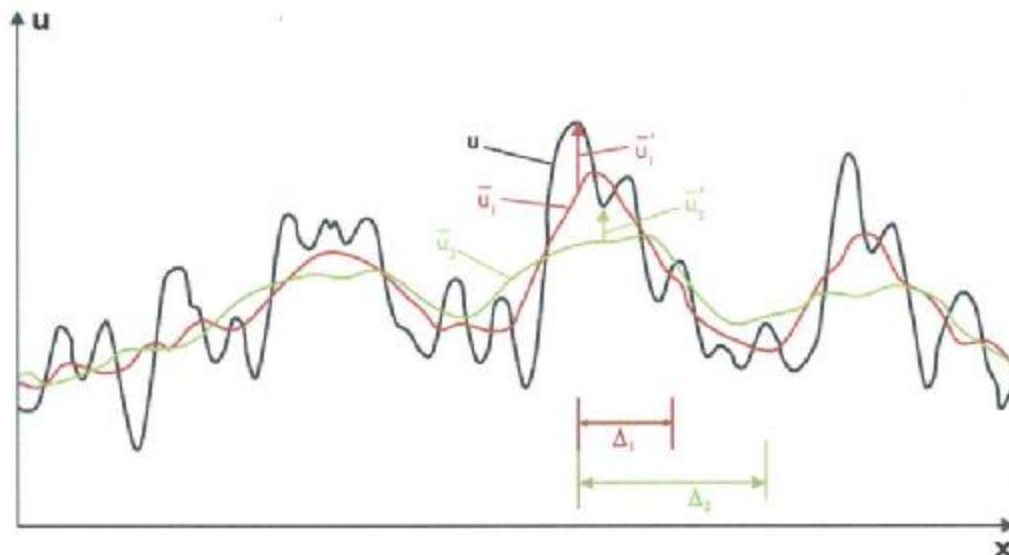
αλλιώς $G=0$, το φίλτρο Gauss και το cut-off (αποκοπής) φίλτρο. Το τελευταίο αντιστοιχεί σε αποκοπή όλων των διακυμάνσεων πέρα από έναν αριθμό κύματος $k_{\text{cut-off}}$ στο φάσμα ενώ τα άλλα δύο φίλτρα (top hat και Gauss) οδηγούν σε μια χωρική κατανομή όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1 από τη γραμμή που ορίζεται σαν LES.

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής των φίλτρων top-hat σε διαφορετικά πλάτη Δ σε σχέση με την χωρική κατανομή της ποσότητας f παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4.

Όσο μεγαλύτερο το πλάτος του φίλτρου Δ , μεγαλύτερο είναι το μέρος των διακυμάνσεων μικρής κλίμακας που φιλτράρονται και απομακρύνονται και ομαλότερη η μεταβολή του \bar{f} .



Εικόνα 2.3: Συναρτήσεις φίλτρου G που χρησιμοποιούνται συχνά στην τεχνική LES.



Εικόνα 2.4: Φιλτραρισμένες συναρτήσεις \bar{u} που προήλθε από την $u(x)$ εφαρμόζοντας φίλτρα top-hat ή διαφορετικό φίλτρο πλάτους Δ .

Όπως προκύπτει, το φιλτράρισμα οδηγεί σε μια συνεχή συνάρτηση \bar{f} . Επίσης, γενικά, εφαρμόζοντας το φίλτρο δύο φορές, εξομαλύνει επιπλέον την κατανομή f (έτσι $\bar{\bar{f}} \neq \bar{f}$) και επίσης $\bar{\bar{f}} \neq 0$.

Εφαρμόζοντας την λειτουργία του φίλτρου στις εξισώσεις (2.1)-(2.3) οδηγεί στις ακόλουθες φιλτραρισμένες εξισώσεις που κυριαρχούν στις διεσπασμένες ποσότητες στο LES:

Εξίσωση Συνέχειας:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.9)$$

Εξισώσεις Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}^{SGS}}{\partial x_j} + g_i \frac{\bar{\rho} - \rho_t}{\rho_t} \quad (2.10)$$

Εξίσωση μεταφοράς βαθμωτού:

$$\frac{\partial \bar{f}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{f}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial q_i^{SGS}}{\partial x_i} + \bar{S}_f \quad (2.11)$$

Ο μη γραμμικός όρος $u_i u_j$ στις εξισώσεις Navier Stokes (2.2) οδηγεί αρχικά στη φιλτραρισμένη ποσότητα $\overline{u_i u_j}$ στον όρο της μεταγωγής.

Όταν αυτό εκφράζεται σαν μεταγωγή των διεσπασμένων ποσοτήτων $\bar{u}_i \bar{u}_j$, η διαφορά που προκύπτει παριστάνει την επίδραση των άλυτων διακυμάνσεων στην επιλυμένη κίνηση, δρώντας σαν τάσεις που ως εκ τούτου καλούνται τάσεις κλίμακας υποπλέγματος. Αυτές οι τάσεις

χρειάζεται μα μοντελοποιηθούν από ένα μοντέλο κλίμακας υποπλέγματος. Είναι ανάλογες με τις τάσεις Reynolds t_{ij}^{RANS} στην προσέγγιση RANS, αλλά ενώ το τελευταίο παρουσιάζει την επίδραση ολόκληρων των τυρβωδών διακυμάνσεων στη μέση κίνηση, το t_{ij}^{SGS} μόνο υπολογίζει την επίδραση της κίνησης της μικρής κλίμακας.

$$t_{ij}^{SGS} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (2.12)$$

Ομοίως, στην φιλτραρισμένη εξίσωση μεταφοράς του βαθμωτού (2.11) ένας όρος παρουσιάζεται όπου είναι η τυρβώδης ροή της κλίμακας του υποπλέγματος και αναπαριστά την επίδραση της άλυτης κίνησης μικρής κλίμακας στο επιλυμένο βαθμωτό πεδίο.

$$q_i^{SGS} = \overline{u_i f} - \bar{u}_i \bar{f} \quad (2.13)$$

Όταν γράφονται σύμφωνα με την εξίσωση (2.5) τις αφιλτράριστες ταχύτητες u_i και u_j εμφανίζονται στους όρους στη δεξιά μεριά της εξίσωσης (2.12) σαν άθροισμα των αναλυμένων ταχυτήτων (\bar{u}_i) και των άλυτων διακυμάνσεων (u_i'), t_{ij}^{SGS} , μπορούν να διαχωριστούν σε 3 όρους, δηλαδή τις τάσεις Leonard που περιγράφουν την αλληλεπίδραση των διακυμάνσεων της μεγάλης κλίμακας του επιλυμένου πεδίου, τους όρους που είναι για την αλληλεπίδραση του επιλυμένου πεδίου και των άλυτων διακυμάνσεων και τελευταία έναν συγκεκριμένης κλίμακας όρο που εκπροσωπεί την αλληλεπίδραση των άλυτων διακυμάνσεων $\overline{u_i' u_j'}$.

2.4 Σχέση του LES με το DNS και το RANS

Όταν το πλάτος του φίλτρου ή το μέγεθος του πλέγματος είναι αρκετά μικρό έτσι ώστε οι διακυμάνσεις όλων των κλιμάκων να επιλυθούν, οι υποπλεγματικές τάσεις t_{ij}^{SGS} οδηγούνται στο μηδέν και οι πρωτότυπες Navier-Stokes εξισώσεις (2.1)-(2.2) επιλύονται έτσι λοιπόν η προσομοίωση είναι μια DNS. Αυτό συμβαίνει αυτόματα επειδή τα μοντέλα υποπλεγματικής κλίμακας αποδίδουν $t_{ij}^{SGS} \rightarrow 0$ όταν το πλάτος φίλτρου/μέγεθος πλέγματος πλησιάζει στο μηδέν.

Στο άλλο άκρο, δηλαδή η μέθοδος RANS, όλες οι διακυμάνσεις είναι χρονο-φιλτραρισμένες/μεσοσταθμισμένες και μόνο ποσότητες της μέσης ροής επιλύονται. Όταν η μέση ροή είναι ασταθής, η μέθοδος ονομάζεται URANS και η χρονο-φίλτραση/μεσοστάθμιση

απομακρύνει μόνο τις τυρβώδεις διακυμάνσεις, αλλά όχι την χαμηλής συχνότητας αστάθεια της μέσης ροής. Σε κάθε περίπτωση, το αποτέλεσμα όλης της τύρβης δηλαδή τις διακυμάνσεις της σε όλες τις κλίμακες εκπροσωπούνται από τις τάσεις Reynolds, t_{ij}^{SGS} , και χρειάζεται να υπολογιστούν με τη χρήση ενός μοντέλου.

Στην URANS, οι εξισώσεις για την επίλυση των ποσοτήτων της μέσης ροής είναι οι ίδιες με τις εξισώσεις LES (2.9)-(2.11) για την επίλυση των αναλυμένων ποσοτήτων και μαζί περιέχουν έναν τυρβώδη όρο τάσης τ_{ij} που χρειάζεται να μοντελοποιηθεί.

Η διαφορά κείται στο μοντέλο για αυτήν την τάση – ενώ η t_{ij}^{SGS} απαιτεί μόνο ένα μοντέλο για το αποτέλεσμα της άλυτης κίνησης της μικρής κλίμακας, ενώ η t_{ij}^{RANS} απαιτεί ένα μοντέλο για όλο το φάσμα των διακυμάνσεων.

Πρέπει να τονίσουμε ότι αν και τα μοντέλα LES και URANS έχουν και διαφορές αλλά και σχέση μεταξύ τους, για να λυθούν κάποια ιδιαίτερα προβλήματα εντάσσονται και στην κατηγορία των Υβριδικών Μεθόδων Επίλυσης αφού συνδυάζονται για να καλύψει η μία τεχνική τις αδυναμίες της άλλης με σκοπό την καλύτερη προσομοίωση του πεδίου ροής.

Μια σημαντική άποψη πρέπει επίσης είναι ότι: ένα μοντέλο RANS περιλαμβάνει ταχύτητα και κλίμακες μήκους της τύρβης που είναι χαρακτηριστικά της ενεργητικής, μεγάλης κλίμακας κίνησης συνεισφέροντας περισσότερο στις τάσεις Reynolds, και τα αποτελέσματα του RANS/URANS υπολογισμού μπορούν να είναι ανεξάρτητα της αριθμητικής λύσης των εξισώσεων, περιλαμβάνοντας την χωρική και χρονική διακριτοποίηση (μετατροπή των διαφορικών και ολοκληρωματικών εξισώσεων σε αλγεβρικές μέσω διαφορετικών τεχνικών).

Από την άλλη πλευρά, στην LES το SGS μοντέλο εξαρτάται από τον διαχωρισμό της κλίμακας, δηλαδή το πλάτος του φίλτρου και στην πράξη γενικότερα το μέγεθος του πλέγματος, που προσδιορίζει την κλίμακα μήκους της μικρής κλίμακας κίνησης που θα μοντελοποιηθεί από ένα μοντέλο SGS και όταν το μέγεθος του πλέγματος προσδιορίζει τον διαχωρισμό κλίμακας, η λύση εξαρτάται από το πλέγμα και καθώς η διακριτοποίηση βελτιώνεται πλησιάζει την λύση της DNS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Μοντέλα Κλίμακας Υποπλέγματος (SGS)

3.1 Ρόλος και επιθυμητές ποσότητες σε ένα μοντέλο SGS

Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το χωρικό φιλτράρισμα/ μεσοστάθμιση εισάγει τις SGS τάσεις t_{ij}^{SGS} και βαθμωτές ροές q_{ij}^{SGS} στις εξισώσεις για τις επιλυμένες ποσότητες που χρησιμοποιούνται στην LES, εκπροσωπώντας τα αποτελέσματα των άλυτων μικρής κλίμακας τύρβη στην επιλυμένη/φιλτραρισμένη κίνηση. Ένας τρόπος για τον υπολογισμό αυτού του αποτελέσματος είναι η χρήση ενός ρητού (σαφούς) μοντέλου SGS για την t_{ij}^{SGS} . Καθώς το αποτέλεσμα είναι κυρίως διαχυτικό, δηλαδή η απόσυρση ενέργειας από την επιλυμένη κίνηση, άλλη προσέγγιση χρειάζεται να γίνει για αυτό στην διαδικασία λύσης μέσω άλλης μεθόδου πιο βελτιωμένης όπως π.χ. μέσω των μεθόδων Implicit LES (ILES).

Ο κύριος στόχος ενός μοντέλου SGS είναι η διάχυση της σωστής ποσότητας ενέργειας από την απευθείας υπολογισμένη μεγάλης κλίμακας ροή και να επιτρέπει τη φυσική ρεαλιστική ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των επιλυμένων κλιμάκων.

Ένα επιτυχημένο μοντέλο SGS πρέπει έπειτα να αποδώσει ακριβή στατιστικά της ενέργειας που περιέχεται στις κλίμακες της κίνησης που έχουν επιλυθεί μέσω της προσομοίωσης.

Οι πιο σημαντικές αλληλεπιδράσεις για μοντελοποίηση από ένα μοντέλο SGS είναι αυτές μεταξύ των μεγαλύτερων άλυτων (υποπλέγμα) κλιμάκων και των μικρότερων αναλυμένων κλιμάκων.

Σε ένα καλά επιλυμένο LES, το όριο μεταξύ της επιλυμένης (μεγαλύτερης) και της άλυτης (μικρότερης) κλίμακας βρίσκεται μέσα στην αδρανειακή υποσειρά (που δείχνεται από την λεπτή διακεκομμένη γραμμή στο φάσμα της Εικόνας 2.1).

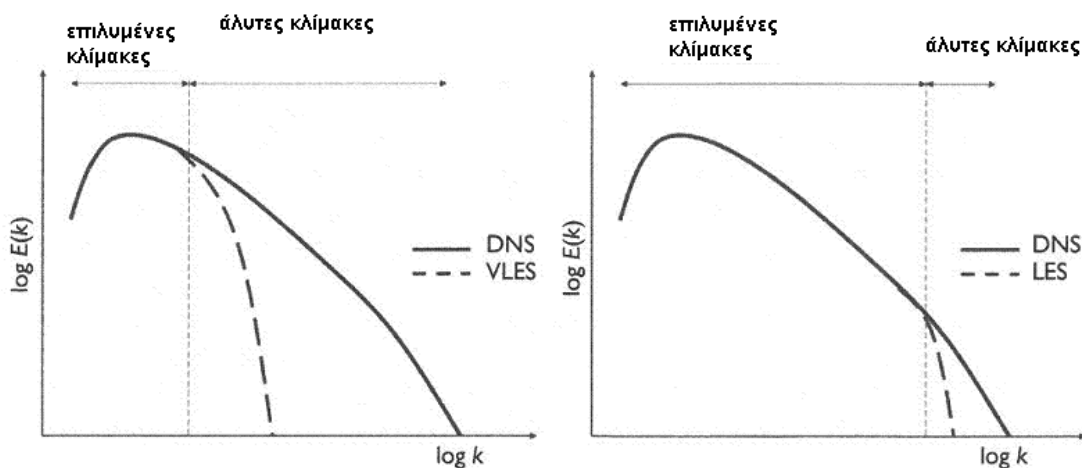
Το αποτέλεσμα του μοντέλου SGS στην φασματική κατανομή της ενέργειας είναι ορατή στη γειτνίαση του αποκομμένου αριθμού του κύματος k . Πέρα από αυτόν τον αριθμό του κύματος δηλαδή στις μικρότερες κλίμακες, το μοντέλο SGS σε μια LES προκαλεί πολύ ταχύτερη σκέδαση από στην DNS.

Η εικόνα 3.1 παρουσιάζει το αποτέλεσμα του πλάτους του φίλτρου και επομένως τον αποκομμένο αριθμό κύματος στο τελικό φάσμα στη ροή. Στο αριστερό φάσμα ένα αρκετά μεγάλο πλάτος φίλτρου χρησιμοποιείται και επομένως ένας μικρός αποκομμένος αριθμός κύματος k .

Ετσι, η ποσότητα των άλυτων κλιμάκων είναι σχετικά μεγάλη και έτσι πιο πολύ μοντελοποίηση SGS απαιτείται, ειδικά όταν οι άλυτες κλίμακες εκπροσωπούν ανισοτροπικούς στροβίλους που περιέχουν ενέργεια. Αυτή η προσέγγιση συχνά αναφέρεται σαν VLES (Very- Large-Eddy-Simulation = Πολύ Μεγάλη Προσομοίωση Δίνης).

Από την άλλη μεριά, όταν ένα σχετικά μικρότερο πλάτος φίλτρου επιλεγεί, έτσι ώστε ο αποκομμένος αριθμός κύματος είναι στην άλλη πλευρά της αδρανειακής υποσειράς (το δεξί φάσμα στην εικόνα 3.1), η περισσότερη από την κίνηση αναλύεται και λιγότερη προσπάθεια μοντελοποίησης απαιτείται έτσι ώστε σχετικά απλά μοντέλα SGS να χρησιμοποιούνται.

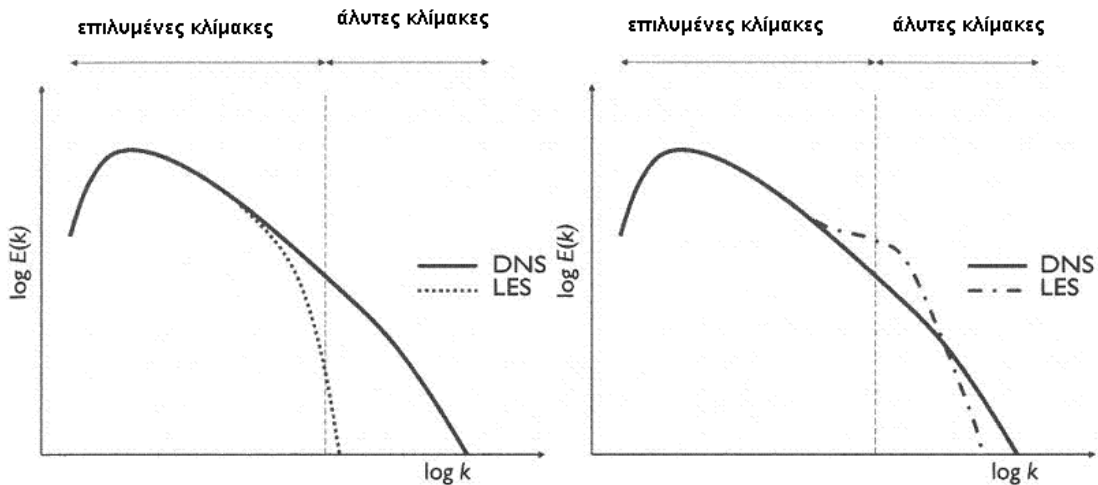
Σε μια καλά επιλυμένη LES η διατήρηση της ενέργειας επιτυγχάνεται και ως εκ τούτου μια σημαντική απαίτηση του SGS μοντέλου είναι να παρέχει φυσική ορθή σκέδαση, ο οποίος είναι ο μόνος τρόπος η τυρβώδης κινητική ενέργεια να μετακινηθεί από τις επιλυμένες κλίμακες.



Εικόνα 3.1: Αποτέλεσμα του πλάτους φίλτρου στο φάσμα ενέργειας του LES έναντι του DNS φάσματος. Το φάσμα του LES με μεγάλο πλάτος φίλτρου (αριστερά) και το φάσμα του LES με μικρό πλάτος φίλτρου (δεξιά).

Μια τόσο μεγάλη σκέδαση μπορεί τεχνητά να αυξήσει τις διαχυτικές ροές οδηγώντας σε υπερβολική απόσβεση των επιλυόμενων κλιμάκων (το αριστερό φάσμα στην Εικόνα 3.2), μειώνοντας την ακρίβεια της προσομοίωσης.

Μια πολύ μικρή σκέδαση του μοντέλου SGS θα οδηγήσει σε μια σύγκρουση ενέργειας γύρω από τον αποκομμένο αριθμό κύματος (το δεξί φάσμα στην εικόνα 3.2). Αυτό οδηγεί σε ανακριβή στατιστικά ροής ή η αριθμητική λύση γίνεται ασταθής.



Εικόνα 3.2: Αποτέλεσμα της σκέδασης ενέργειας SGS στο φάσμα ενέργειας του LES έναντι του DNS φάσματος. Το φάσμα LES με υψηλότερης σκέδασης μοντέλο SGS (αριστερά) και φάσμα LES με χαμηλής σκέδασης μοντέλο SGS (δεξιά).

Γενικά, ο τανυστής τάσης της κλίμακας υποπλέγματος t_{ij}^{SGS} χωρίζεται σε μια ισοτροπική και σε μια ανισοτροπική συνιστώσα ως εξής:

$$t_{ij}^{SGS} = t_{ij} + \frac{1}{3} t_{kk}^{SGS} d_{ij} \quad (3.1)$$

ανισοτροπικό ισοτροπικό

Το ισοτροπικό μέρος του τανυστή τάσης SGS περιέχει το άθροισμα των SGS κανονικών τάσεων t_{kk}^{SGS} που είναι διπλάσια της κινητικής ενέργειας k^{SGS} των διακυμάνσεων SGS και δρά σαν πίεση. Αυτό το συστατικό επομένως συχνά προστίθεται στον φιλτραρισμένο όρο της πίεσης, και οδηγεί σε μια νέα μεταβλητή πίεσης:

$$P = \bar{p} + \frac{1}{3} t_{kk}^{SGS} \quad (3.2)$$

Αυτός ο χωρισμός της ιστροπικής τάσης από το ανιστροπικό μέρος είναι βολικός όταν χρησιμοποιούνται μοντέλα SGS σχετίζοντας την τ_{ij} με τις κλίσεις της επιλυμένης ταχύτητας μέσω του ιξώδους της δίνης.

Αυτό είναι σε άμεση αναλογία με τη χρήση μιας τέτοιας σχέσης στα μοντέλα RANS. Η κύρια προσπάθεια μοντελοποίησης είναι κατόπιν μετατοπισμένη στον προσδιορισμό του ιξώδους της δίνης ν_t .

Ακολουθως, τα πιο συνήθη χρησιμοποιούμενα μοντέλα ιξώδους δίνης περιγράφονται, όπως το καθαρώς αλγεβρικό μοντέλο Smagorinsky και η παραλλαγή του, το μοντέλο WALE και ένα μοντέλο που χρησιμοποιεί μια εξίσωση μεταφοράς για την διακυμαινόμενη κινητική ενέργεια κλίμακας υποπλέγματος k^{SGS} .

3.2 Μοντέλο Smagorinsky

Το πιο δημοφιλές μοντέλο ιξώδους δίνης SGS είναι το μοντέλο Smagorinsky. Σε αναλογία με την ιξώδη τάση στις στρωτές ροές, ο ανιστροπικός τανυστής τ_{ij} προσεγγίζεται σχετίζοντάς τον με την αναλυμένο ρυθμό της έντασης, \bar{S}_{ij} , που περιέχει κλίσεις ταχύτητας, μέσω ενός τεχνητού ιξώδους δίνης (τυρβώδες) ν_t , σαν:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \text{ στην οποία } \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.3)$$

Πρέπει να δοθεί έμφαση ότι το ιξώδες της δίνης δεν είναι μια ιδιότητα του ρευστού αλλά χαρακτηρίζει τις άλλτες διακυμάνσεις της κλίμακας υποπλέγματος και εξαρτάται από το άλυτο πεδίο ταχύτητας \bar{u}_i .

Λόγω της διάσπασης της τάσης SGS σε ιστροπικό και ανιστροπικό μέρος στην εξίσωση (3.1), το τελευταίο μπορεί να συνδυαστεί με τον όρο της ιξώδους τάσης στην εξίσωση (2.10) και μπορεί να επεξεργάζεται μαζί σε μια αριθμητική διαδικασία.

Από την διαστατική ανάλυση προκύπτει:

$$\nu_t \propto l q \quad (3.4)$$

Όπου l και q είναι αντίστοιχα οι κλίμακες του χαρακτηριστικού μήκους και ταχύτητας της κίνησης στην κλίμακα του υποπλέγματος.

Η επιλογή της κλίμακας του χαρακτηριστικού μήκους l στην LES είναι πολύ απλούστερη από την μοντελοποίηση RANS. Στην LES, οι μεγαλύτερες κλίμακες της άλυτης τύρβης, που αλληλεπιδρά πιο ενεργά με την επιλυμένη κίνηση, είναι στο μέγεθος του πλάτους του φίλτρου Δ . Έτσι, η κλίμακα του χαρακτηριστικού μήκους στο μοντέλο Smagorinsky επιλέγεται σαν:

$$l = C_s \Delta \quad (3.5)$$

στην οποία το C_s είναι η σταθερά Smagorinsky, μια εμπειρική παράμετρος που η τιμή της μπορεί να ληφθεί από θεωρητικές θεωρήσεις ή από δοκιμές.

Ο προσδιορισμός της κλίμακας της χαρακτηριστικής ταχύτητας μπορεί να γίνει σε αναλογία με τη θεωρία μήκους ανάμιξης του Prandtl, με το πλεονέκτημα ότι στην LES η κλίμακα μήκος είναι ήδη γνωστή.

Αυτό οδηγεί σε:

$$q = l |\bar{S}_{ij}| = C_s D |\bar{S}_{ij}| \quad \text{με} \quad |\bar{S}_{ij}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (3.6)$$

που αποδίδει το ιξώδες δίνης σαν:

$$\nu_t = l \cdot q = l^2 |\bar{S}_{ij}| = (C_s D)^2 |\bar{S}_{ij}| \quad (3.7)$$

Η σχέση για το ιξώδες δίνης μπορεί επίσης να προκύψει από την παραδοχή τοπικής ισορροπίας μεταξύ της δημιουργίας και της σκέδασης της κινητικής ενέργειας της κλίμακας υποπλέγματος k^{SGS} .

Το μοντέλο έχει έναν ρυθμιστικό παράγοντα τη σταθερά Smagorinsky, που θεωρείται σταθερή στην αρχική διαμόρφωση του μοντέλου. Για ισοτροπική τύρβη, ο Lilly προέβλεψε $C_s=0.165$ βασισμένος στην θεώρηση της τοπικής ισορροπίας στην αδρανειακή υποπεριοχή. Για διατμητικές τάσεις (π.χ. ροές σε κανάλια) βέλτιστες τιμές βρίσκονται στο πεδίο $C_s=0.065-0.1$, που μπορεί να αποδίδει 6 φορές διαφορά στις τιμές του ν_t που προβλέπονται από το μοντέλο Smagorinsky.

Μια σημαντική αδυναμία του μοντέλου είναι ότι η ν_t που προβλέφθηκε από την εξίσωση (3.7) δεν μειώνεται στο μηδέν στο ιξώδες υποεπίπεδο στο οποίο τυρβώδεις διακυμάνσεις μπορούν να αποσβεστούν σαν αδιαπέραστες επιφάνειες π.χ. τοιχώματα.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεγάλες κλίσεις της ταχύτητας υπερσχύουν στο οριακό στρώμα και οδηγούν σε μεγάλες τιμές του ρυθμού της έντασης $\left| \overline{S}_{ij} \right|$.

Ετσι, το τυρβώδες ιξώδες δίνης χρειάζεται να αποσβεστεί κοντά στις αδιαπέραστες επιφάνειες από μια συνάρτηση απόσβεσης.

Η πιο δημοφιλής από αυτές είναι η $f(z^+)$ που προτάθηκε από τον van Driest στο μήκος ανάμιξης του μοντέλου RANS.

Χρησιμοποιείται στο μοντέλο Smagorinsky για να μειώσει την κλίμακα μήκους l :

$$l = C_s \Delta f(z^+) \quad \text{με} \quad f(z^+) = 1 - e^{-z^+/A^+} \quad (3.8)$$

όπου: z^+ είναι η κανονική απόσταση στο τοίχωμα z σε μονάδες τοιχώματος και A^+ είναι μια εμπειρική σταθερά ($A^+=25$).

Η συνάρτηση απόσβεσης του van Driest είναι εύκολη στην εφαρμογή της αλλά δεν παράγει πάντα ακριβή αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι με την αρχική απόσβεση van Driest όλες οι μοντελοποιημένες τάσεις SGS κλιμακώνονται γραμμικά με την απόσταση από το τοίχωμα δηλαδή $t_{ij} \mu (z^+)$, ενώ τα πιο σχετικά συστατικά της SGS από τον τανυστή τάσης SGS, δηλαδή η διατμητική τάση θα πρέπει να κλιμακώνεται με την τρίτη δύναμη της απόστασης από το τοίχωμα, δηλαδή $t_{ij} \mu (z^+)^3$.

Ετσι, ο Piomelli et al πρότεινε μια ελαφρώς διαφοροποιημένη έκδοση της συνάρτησης του van Driest, που είναι:

$$f(z^+) = \sqrt{(1 - e^{-z^+/A^+})^3} \quad (3.9)$$

που παρέχει τη σωστή συμπεριφορά για τα πιο σχετικά συστατικά του τανυστή τάσης SGS και τώρα είναι περισσότερο σε χρήση από την εξίσωση (3.8).

Μια δεύτερη αδυναμία του μοντέλου Smagorinsky είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή μιας και το ιξώδες δίνης είναι

μηδέν μόνο εάν οι κλίσεις της ταχύτητας είναι απύσες, έτσι ώστε $v_t \ll 0$, ενώ στην στρωτή ροή το v_t πρέπει να είναι μηδέν.

Βέβαια στα περισσότερα προβλήματα των ρευστών η μετάβαση δεν είναι πρακτικής σημασίας αλλά μελετάται με ειδικά μοντέλα μόνο εφόσον υπάρχει έλλειμμα στους υπολογισμούς.

Το γεγονός ότι σε τυρβώδεις ροές $v_t \ll 0$ συνεπάγεται ότι η κινητική ενέργεια μεταφέρεται μόνο από μεγάλες επιλυμένες κλίμακες στις μικρές κλίμακες, δηλαδή το μοντέλο Smagorinsky είναι αυστηρά σκεδαστικό και δεν επιτρέπει την οπισθοσκέδαση από μικρές άλυτες κλίμακες σε μεγάλες κλίμακες.

Επιπλέον, σε πολύπλοκες τρισδιάστατες ροές (π.χ. ροή γύρω από εμπόδια (bluff bodies) η βέλτιστη τιμή του C_s ποικίλει τοπικά μέσα στο πεδίο ροής και είναι βασικά αδύνατος ο προσδιορισμός εξ ορισμού. Η σταθερά χρειάζεται να επιπλέον διαμόρφωση για να υπολογίζει αποτελέσματα περιστροφών και στρωμάτωσης.

Παρά τις αδυναμίες του, το μοντέλο εφαρμόζεται ευρέως σε πολλές μελέτες τυρβωδών ροών στη Μηχανική των Ρευστών. Αυτό είναι λόγω της απλότητας στους όρους υπολογισμού των τάσεων SGS μέσω μιας αλγεβρικής σχέσης και σε όρους ενσωμάτωσης μέσα σε ένα κώδικα, στον οποίο ο όρος του συνολικού ιξώδους μπορεί να εισαχθεί σαν:

$$V_{\text{total}} = V + V_t \quad (3.10)$$

Το μοντέλο Smagorinsky έχει μόνο μια ρυθμιστική παράμετρο, της οποίας το αποτέλεσμα στη στατιστική της ροής εξαφανίζεται όταν μειώνεται το πλάτος του φίλτρου.

Πολλά τροποποιημένα μοντέλα ιξώδους δίνης έχουν προταθεί για να μειώσουν τις αδυναμίες και τις ελλείψεις του κλασσικού μοντέλου Smagorinsky. Αυτά περιλαμβάνουν τη χρήση μιας τροποποιημένης κλίμακας ταχύτητας για τις μεγάλες άλυτες κλίμακες που επίσης συντελεί σε ένα μοντέλο που δεν χρειάζεται απόσβεση τοιχώματος (μοντέλο WALE), τη χρήση μιας δυναμικής διαδικασίας για υπολογισμό του συντελεστή του μοντέλου (δυναμικό μοντέλο Smagorinsky) και λύνοντας μια εξίσωση μεταφοράς για την SGS κινητική ενέργεια k^{SGS} που παρέχει την κλίμακα της ταχύτητας των μεγαλύτερων άλυτων κλιμάκων (μοντέλα μιας εξίσωσης SGS).

3.3 Βελτιωμένες εκδόσεις του μοντέλου ιξώδους δίνης

Παρακάτω θα αναλυθούν σύντομα κάποιες βελτιωμένες εκδόσεις του μοντέλου ιξώδους δίνης.

3.3.1 Δυναμική διαδικασία

Η κύρια ιδέα της δυναμικής διαδικασίας είναι ο υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου ενός μοντέλου βάσης (π.χ. η σταθερά C_s όταν εφαρμόζεται στο μοντέλο Smagorinsky) όταν γίνεται χρήση πληροφοριών από μικρότερες επιλυμένες κλίμακες. Για να επιτευχθεί αυτό, ο Germano et al, πρότειναν την εισαγωγή ενός δεύτερου φίλτρου, ενός φίλτρου ελέγχου, με πλάτος \tilde{D} μεγαλύτερο από το αρχικό φίλτρο Δ , και να χρησιμοποιηθεί το ίδιο μοντέλο για υπολογισμό των τάσεων κλίμακας υποπλέγματος τ_{ij} και των τάσεων T_{ij} που προκύπτουν από τις κινήσεις του υποφίλτρου ελέγχου (εικόνα 3.3).

Σε αναλογία με την εξίσωση (2.12) προσδιορισμού των τάσεων τ_{ij} , οι τάσεις T_{ij} προκύπτουν:

$$T_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} \quad (3.11)$$

Όπου, η περισπωμένη αντιπροσωπεύει το 2^ο φίλτρο της διαδικασίας. Όταν η παραπάνω συσχέτιση των $\overline{u_i u_j}$ στην (3.11) διασπαστεί στη συνεισφορά $\overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j}$ επιλυόμενο στο πλέγμα Δ και την τάση τ_{ij} και το 2^ο φίλτρο εφαρμόζεται, τότε ακολουθεί η σχέση γνωστή και σαν ταυτότητα του Germano :

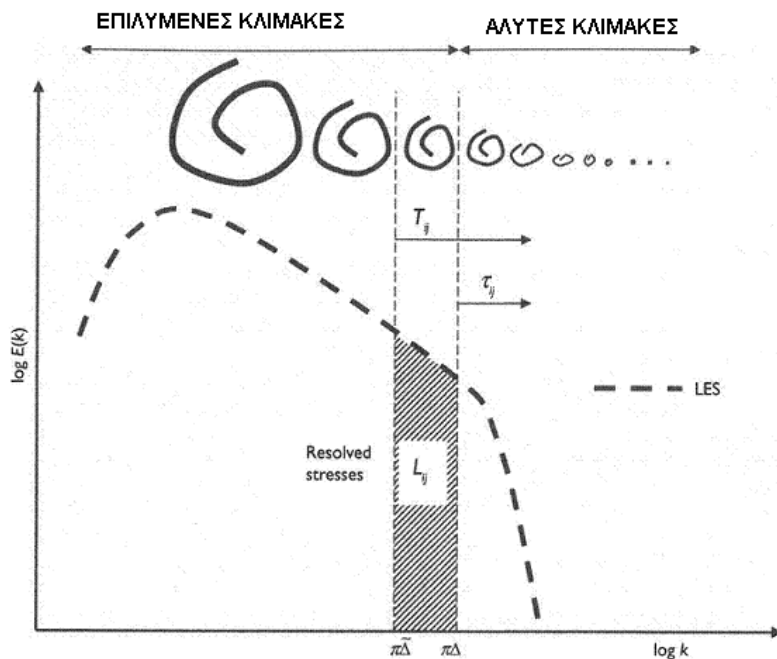
$$T_{ij} = -L_{ij} + \tilde{\tau}_{ij} \quad (3.12)$$

Όπου:

$$L_{ij} = -\overline{u_i u_j} + \overline{\tilde{u}_i \tilde{u}_j} \quad (3.13)$$

εμφανίζοντας το μέρος των τάσεων κλίμακας της περιοχής ελέγχου που επιλύθηκαν μεταξύ των Δ και \tilde{D} (εικόνα 3.3), δηλαδή τις μικρότερες επιλυμένες κλίμακες.

Αυτός ο όρος μπορεί να υπολογιστεί ρητά από τις αναλυμένες ταχύτητες.



Εικόνα 3.3: Τυπικό φάσμα ταχύτητας μιας LES που χρησιμοποιεί ένα μοντέλο δυναμικής διαδικασίας SGS.

Για τον προσδιορισμό της τιμής της σταθεράς C_s στο μοντέλο Smagorinsky από τις μικρότερες αναλυμένες ταχύτητες, αυτό το μοντέλο (Εξισώσεις 3.3 και 3.7) εφαρμόζονται τώρα για να αναπαραστήσουν το ανισοτροπικό κομμάτι των T_{ij} και τ_{ij} στην (3.12):

$$t_{ij} = -2(C_s D)^2 |\bar{S}_{ij}| \bar{S}_{ij} \quad (3.14)$$

$$T_{ij} = -2(C_s \tilde{D})^2 |\tilde{S}_{ij}| \tilde{S}_{ij} \quad (3.15)$$

στις οποίες ο διπλοφίτρισμένος ταυνοστής ρυθμού έντασης προσδιορίζεται ως:

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad \text{και}$$

$$\left| \tilde{\tilde{S}}_{ij} \right| = \sqrt{2\tilde{\tilde{S}}_{ij}\tilde{\tilde{S}}_{ij}} \quad (3.16)$$

Εάν εισαχθεί η T_{ij} από την (3.15) και η τ_{ij} από την (3.14) με εφαρμογή 2^{00} φίλτρου στην (3.12) προκύπτει:

$$L_{ij} = 2(C_s D)^2 \frac{\tilde{\tilde{D}}}{\tilde{\tilde{D}}} \left| \tilde{\tilde{S}}_{ij} \right| \tilde{\tilde{S}}_{ij} - \left| \tilde{\tilde{S}}_{ij} \right| \tilde{\tilde{S}}_{ij} \frac{\dot{\tilde{\tilde{u}}}}{\tilde{\tilde{u}}} = 2(C_s D)^2 M_{ij} \quad (3.17)$$

Στην οποία:

$$M_{ij} = \frac{\tilde{\tilde{D}}}{\tilde{\tilde{D}}} \left| \tilde{\tilde{S}}_{ij} \right| \tilde{\tilde{S}}_{ij} - \left| \tilde{\tilde{S}}_{ij} \right| \tilde{\tilde{S}}_{ij} \frac{\dot{\tilde{\tilde{u}}}}{\tilde{\tilde{u}}} \quad (3.18)$$

Από το φιλτραρισμένο πεδίο ταχύτητας, ένα πεδίο ταχύτητας με φίλτρο ελέγχου μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας μια διαδικασία φιλτραρίσματος με μεγαλύτερο πλάτος φίλτρου. Οι φιλτραρισμένοι και οι φιλτραρισμένοι με φίλτρο ελέγχου τανυστές τάσης όπως και τα προϊόντα από το φιλτράρισμα με φίλτρο ελέγχου μπορούν να υπολογιστούν με σαφήνεια.

Ετσι, ο L_{ij} και ο M_{ij} μπορούν να υπολογιστούν για την λήψη της σταθεράς C_s . Όμως μιας και η εξίσωση (3.17) είναι μια εξίσωση τανυστών, και περιέχει 6 ανεξάρτητες εξισώσεις για τον προσδιορισμό μιας παραμέτρου C_s , μπορεί να ικανοποιείται προσεγγιστικά ή σε κάποια αίσθηση μεσοσταθμική. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος των πλατών του φίλτρου $\tilde{\tilde{D}}/D$ που εμφανίζεται στην εξίσωση (3.18) συχνά επιλέγεται σαν 2.

Ένα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής (Dynamic Smagorinsky Model, DSM) είναι ότι προβλέπει τη συμπεριφορά του v_t κοντά σε στερεές επιφάνειες σωστά χωρίς την αν'αγκη εμπειρικών συναρτήσεων απόσβεσης.

Επιπλέον η DSM προβλέπει μηδενικές τιμές της v_t σε στρωτή ροή, και δεν απαιτεί ειδικές διορθώσεις για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων περιστροφής και στρωμάτωσης.

Μια εναλλακτική προσέγγιση μεσοστάθμισης για την εφαρμογή της δυναμικής διαδικασίας σε ροές με σύνθετες διαμορφώσεις προτάθηκε από τον Meneveau et al. και πρότειναν τη χρήση μεσοστάθμισης Lagrange. Με αυτόν τον τρόπο στην εκτίμηση του συντελεστή του μοντέλου, ο

αριθμός των σημείων στα οποία το μοντέλο προβλέπει αρνητικές τιμές και η χωρική ποικιλομορφία στις τιμές του δυναμικού συντελεστή μειώνονται. Και έτσι η ευρωστία της αριθμητικής προσομοίωσης βελτιώνεται. Αυτό το μοντέλο μπορεί να συνδυαστεί και με άλλα παρέχοντας καλύτερη απόδοση και ακρίβεια στα αποτελέσματα σε σχέση με άλλες τεχνικές αριθμητικής προσομοίωσης.

3.3.2 Μοντέλο WALE

Το μοντέλο WALE (Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity = Τοπικής προσαρμογής τοιχώματος ιξώδους δίνης) (Nicoud and Ducros) έχει βρει αυξανόμενο ενδιαφέρον αφού είναι ένα σχετικά εύκολο μοντέλο ιξώδους δίνης που μπορεί να υπολογίσει τα αποτελέσματα του τοιχώματος χωρίς να χρησιμοποιεί συναρτήσεις απόσβεσης τοιχώματος.

Το μοντέλο προτείνει τη χρήση πληροφοριών από τον αναλυμένο τανυστή της κλίσης ταχύτητας $g_{ij} = \nabla \bar{u}_i / \nabla x_j$ για υπολογισμό του ιξώδους της δίνης.

Το μοντέλο WALE χρησιμοποιεί το ανεξιχνίαστο συμμετρικό κομμάτι του τετραγώνου του g_{ij} για τον υπολογισμό του ιξώδους της δίνης, έτσι:

$$v_t = (C_w D)^2 \frac{|G_{ij}^a|^{6/2}}{(S_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + |G_{ij}^a|^{5/2}} \quad (3.19)$$

Όπου: G_{ij}^a είναι το ανεξιχνίαστο μέρος του $G_{ij} = 1/2(g_{ik}g_{kj} + g_{jk}g_{ki})$, C_w είναι η σταθερά του μοντέλου για την οποία οι τιμές στο πεδίο 0.45-0.5 συνιστώνται βασιζόμενοι στην πληροφορία που εξήχθη από την προσομοίωση της ισοτροπικής ομογενούς τύρβης.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι ότι προβλέπει σωστά την συμπεριφορά του ιξώδους δίνης κοντά σε στερεές επιφάνειες.

Άλλο πλεονέκτημα είναι ότι το μοντέλο WALE μπορεί να εφαρμόζεται σε σύνθετες γεωμετρίες με είτε δομημένα ή αδόμητα πλέγματα επειδή καθόλου σαφές φιλτράρισμα σχετιζόμενο με την εισαγωγή ενός φίλτρου ελέγχου όπως στη δυναμική διαδικασία δεν χρειάζεται.

Επιπλέον, παρά τη χρήση ενός σταθερού συντελεστή, το μοντέλο προβλέπει μια τιμή μηδέν του v_t σε στρωτή διατμητική ροή (ειδικά στην περίπτωση της στρωτής ροής οριζόμενης από τοίχωμα) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί να προσομοιώνει σωστά ροές με περιοχές στις οποίες επαναγραμμικοποίηση ή μετάβαση στην τύρβη συμβαίνει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

4.1 Πως δουλεύει ένας κώδικας CFD

Οι κώδικες CFD είναι κατασκευασμένοι γύρω από τους αριθμητικούς αλγόριθμους που καταπιάνονται με τα προβλήματα ροής ρευστών. Με σκοπό να επιτρέπουν εύκολη πρόσβαση στο χειριστή τους, όλα τα εμπορικά πακέτα κωδικών CFD περιέχουν εκλεπτυσμένο περιβάλλον εργασίας για να εισαγάγουμε τις παραμέτρους του προβλήματος και να εξετάσουμε τα αποτελέσματα. Άρα, όλοι οι κώδικες περιέχουν τρία βασικά στοιχεία:

- i. τον προ-επεξεργαστή
- ii. τον επιλυτή
- iii. τον μεθ-επεξεργαστή

Θα εξετάσουμε περιληπτικά τη λειτουργία του κάθε στοιχείου.

Προ-επεξεργαστής (PRE-PROCESSOR)

Ο προ-επεξεργαστής αποτελείται από την είσοδο των δεδομένων ενός προβλήματος ροής σ' ένα CFD πρόγραμμα διαμέσου ενός φιλικού περιβάλλοντος για τον χειριστή και τον επακόλουθο μετασχηματισμό αυτών των δεδομένων σε μια μορφή κατάλληλη για χρήση. Οι ενέργειες του χειριστή στο στάδιο της προ-επεξεργασίας αφορούν:

1. Καθορισμός της γεωμετρίας της περιοχής ενδιαφέροντος, δηλαδή του υπολογιστικού χώρου.
2. Δημιουργία του πλέγματος, δηλαδή η διαίρεση του χώρου σε μικρότερες περιοχές (όγκοι ελέγχου ή κελιά).
3. Επιλογή των φυσικών και χημικών φαινομένων που θα εξομοιωθούν.
4. Καθορισμός των ιδιοτήτων του ρευστού.
5. Καθορισμός των οριακών συνθηκών στα κελιά που είναι στα όρια του υπολογιστικού χώρου.

Η λύση ενός προβλήματος ροής (ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία, κτλ) καθορίζεται σε κόμβους σε κάθε κελλί. Η ακρίβεια μιας CFD λύσης εξαρτάται από τον αριθμό των κελλιών στο πλέγμα. Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κελλιών τόσο ακριβέστερη είναι η λύση. Η ακρίβεια της λύσης και το κόστος αυτής (απαραίτητο computer hardware και χρόνος υπολογισμού) εξαρτώνται από την ποιότητα του πλέγματος. Πάνω από το 50% του χρόνου που ξοδεύεται στη βιομηχανία σ' ένα CFD πρόβλημα αφοσιώνεται στον καθορισμό της γεωμετρίας και την κατασκευή του πλέγματος. Με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η παραγωγικότητα του προσωπικού που δουλεύει σ' ένα CFD πρόβλημα, όλοι οι βασικοί κώδικες περιέχουν το δικό τους CAD-style περιβάλλον και/ή ευκολία στην εισαγωγή δεδομένων από διαμορφωτές επιφανειών και κατασκευαστές πλέγματος όπως τους PATRAN και I-DEAS. Ακόμη οι τωρινοί προ-επεξεργαστές δίνουν στο χειριστή πρόσβαση σε βιβλιοθήκες που περιέχουν τις υλικές ιδιότητες συνηθισμένων ρευστών και την ευκολία να επικαλεστούν ειδικά φυσικά και χημικά μοντέλα (τυρβώδη μοντέλα, μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, μοντέλα καύσης) μαζί με τις εξισώσεις της κύριας ροής του ρευστού.

Επιλύτης (SOLVER)

Υπάρχουν 3 διακεκριμένα ρεύματα αριθμητικών τεχνικών για τη λύση ενός προβλήματος CFD: **πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων και φασματική μέθοδος**. Γενικά οι αριθμητικές μέθοδοι που σχηματίζουν τη βάση του επιλυτή πραγματοποιούν τα παρακάτω βήματα:

1. Προσέγγιση των αγνώστων μεταβλητών της ροής μέσα από απλές διεργασίες.
2. Διακριτοποίηση με αντικατάσταση των προσεγγίσεων στις εξισώσεις της κύριας ροής και τους επακόλουθους μαθηματικούς χειρισμούς.
3. Λύση των αλγεβρικών εξισώσεων.

Οι βασικές διαφορές μεταξύ των 3 ξεχωριστών ρευμάτων σχετίζονται με τον τρόπο με τον οποίο οι μεταβλητές της ροής υπολογίζονται και με τις διαδικασίες διακριτοποίησης.

Μέθοδοι πεπερασμένων όγκων: Οι μέθοδοι πεπερασμένων όγκων αρχικά εξελίχθηκαν σαν μια ειδική φόρμουλα των πεπερασμένων διαφορών. Ο αριθμητικός της αλγόριθμος αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Τυπική ολοκλήρωση των κυρίων εξισώσεων της ροής του ρευστού σε όλους τους (πεπερασμένους) όγκους ελέγχου του χώρου λύσης.
2. Διακριτοποίηση, η οποία περιλαμβάνει την αντικατάσταση αρκετών προσεγγίσεων τύπου πεπερασμένων διαφορών ώστε η ολοκληρωμένη εξίσωση να αναπαριστά διαδικασίες ροής όπως **συναγωγή, διάχυση και πηγές**. Αυτό μετατρέπει τις ακέραιες εξισώσεις σ' ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων.
3. Λύση των αλγεβρικών εξισώσεων με μια επαναληπτική μέθοδο.

Το πρώτο βήμα, η ολοκλήρωση του όγκου ελέγχου ξεχωρίζει την μέθοδο πεπερασμένων όγκων από όλες τις άλλες CFD τεχνικές. Τα απορρέοντα στοιχεία δείχνουν την ακριβή διατήρηση των σχετικών ιδιοτήτων του κάθε κελλιού με πεπερασμένο μέγεθος. Αυτή η καθαρή σχέση ανάμεσα στον αριθμητικό αλγόριθμο και τη διατήρηση των αρχών της Φυσικής είναι μια από τις κύριες έλξεις της μεθόδου πεπερασμένων όγκων και κάνει τα περιεχόμενά της πολύ πιο εύκολα κατανοητά από τους μηχανικούς απ' ότι οι άλλες μέθοδοι.

Η διατήρηση μιας γενικής μεταβλητής ροής Φ , για παράδειγμα η ταχύτητα των συστατικών μερών ή η ενθαλπία μέσα σ' ένα όγκο ελέγχου μπορεί να εκφραστεί σαν το ισοζύγιο μεταξύ των διαφόρων διαδικασιών που τείνουν να αυξήσουν ή να μειώσουν αυτή. Έχουμε λοιπόν :

$$\begin{aligned}
 & \text{Ρυθμός μεταβολής της ποσότητας } \Phi \text{ στον όγκο ελέγχου σε σχέση με το χρόνο διάχυσης} \\
 & = \text{Αμιγής ροή της ποσότητας } \Phi \text{ στον όγκο ελέγχου} \\
 & + \text{Αμιγής ροή της ποσότητας } \Phi \text{ λόγω όγκο ελέγχου} + \text{Αμιγής ρυθμός της δημιουργίας } \Phi \text{ του} \\
 & \quad \quad \quad \text{όγκου ελέγχου}
 \end{aligned}$$

Οι κώδικες CFD περιέχουν τεχνικές διακριτοποίησης κατάλληλες για το χειρισμό του κλειδιού-φαινομένου μεταφοράς, συναγωγής (μεταφορά λόγω της ροής του ρευστού) και διάχυσης (μεταφορά λόγω των διαφορών της ποσότητας Φ από σημείο σε σημείο) όπως και όρους πηγής (συνδέεται με τη δημιουργία ή καταστροφή του Φ) και το ρυθμό μεταβολής σε σχέση με το χρόνο. Τα φυσικά φαινόμενα είναι πολύπλοκα και μη-γραμμικά έτσι απαιτείται μια προσέγγιση με επαναληπτική λύση.

Μεθ-επεξεργαστής (POST-PROCESSOR)

Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης μηχανολογικών πακέτων εργασίας, πολλά εκ των οποίων έχουν εκπληκτικές ικανότητες για γραφική απεικόνιση, τα κύρια CFD πακέτα έχουν εφοδιαστεί με οπτικά εργαλεία πολλών χρήσεων. Αυτά περιλαμβάνουν:

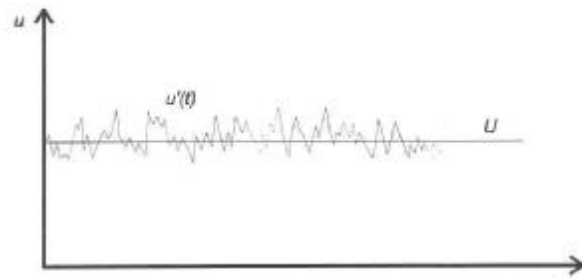
1. Γεωμετρία χώρου και προβολή του πλέγματος.
2. Χάραξη διανυσμάτων.
3. Χάραξη γραμμών και σκιασμένων περιμέτρων.
4. Χάραξη επιφανειών 2D και 3D.
5. Ανίχνευση μορίων.
6. Χειρισμός εικόνας (μετάφραση, περιστροφή κτλ).
7. Έγχρωμη απόδοση στην έξοδο.

Οι παραπάνω υπηρεσίες μπορεί ακόμα να περιέχουν animation για δυναμική προβολή των αποτελεσμάτων και επιπλέον μαζί με τα γραφικά όλοι οι κώδικες παράγουν αξιόπιστα αλφαριθμητικά στοιχεία και υπάρχει η δυνατότητα για εξαγωγή δεδομένων για επεξεργασία αυτών εξωτερικά του κώδικα.

4.2 ΤΥΡΒΗ

Ο αριθμός Reynolds δίδει μια ένδειξη της σχέσης των δυνάμεων αδράνειας (που σχετίζονται με φαινόμενα συναγωγής) και των δυνάμεων τριβής (που σχετίζονται με φαινόμενα διάχυσης). Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι για τιμές κάτω του λεγόμενου κρίσιμου αριθμού Reynolds Re_{crit} η ροή είναι ομαλή και γειτονικά στρώματα του ρευστού μετακινούνται το ένα 'παράλληλα' με το άλλο. Εάν οι εφαρμοζόμενες οριακές συνθήκες δεν μεταβληθούν με το χρόνο η ροή είναι μόνιμη. Αυτό το είδος της ροής καλείται **στρωτή**.

Όταν ο αριθμός Reynolds υπερβαίνει την τιμή Re_{crit} λαμβάνει χώρα μια πολύπλοκη σειρά γεγονότων που σταδιακά οδηγεί στη μεταβολή του χαρακτήρα της ροής. Εν τέλει η ροή γίνεται τυχαία και χαοτική. Η κίνηση του ρευστού γίνεται ιδιαίτερα ασταθής ακόμα και με αμετάβλητες οριακές συνθήκες. Η ταχύτητα και άλλες ροικές ιδιότητες μεταβάλλονται επίσης συνεχώς. Αυτό το είδος της ροής καλείται **τυρβώδης**. Η μέτρηση της ταχύτητας σε ένα συγκεκριμένο σημείο θα παρουσιάσει την μορφή του παρακάτω διαγράμματος :



Ορισμός τύρβης:

Ένας πληρέστερος αλλά πιο εκτενής ορισμός δίνεται από τον Bradshaw κατά τον οποίο: **‘Τύρβη είναι μια τρισδιάστατη χρονικά μεταβαλλόμενη ροή στην οποία η έκταση των δινοσωλήνων προκαλεί διαταραχές ταχύτητας σε όλες τις συχνότητες μεταξύ ελαχίστης που καθορίζεται από τις οριακές συνθήκες και μεγίστης που καθορίζεται από τη συνεκτικότητα του ρευστού’**.

Ο παραπάνω ορισμός προκύπτει από τον μηχανισμό μετάπτωσης της διαταραχής από ορισμένη συχνότητα (οριακή συνθήκη) στις συχνότητες του φάσματος κατά τη διαδικασία του ‘σπασίματος’ της αρχικής διαταραχής και μεταφοράς της ενέργειας της διαταραχής στις υψηλές συχνότητες όπου δι’ απορροφήσεως (λόγω συνεκτικότητας του ρευστού) μετατρέπεται σε θερμότητα.

Ίσως αναρωτηθεί κανείς για ποιο λόγο χρειάζεται να επιλύσουμε το πρόβλημα της τύρβης. Η απάντηση είναι εύκολο να δοθεί αν αναλογισθεί κανείς ότι όλα τα πεδία ροής πρακτικού ενδιαφέροντος είναι τυρβώδη.

4.3 Κριτήρια για την αξιολόγηση των μοντέλων

Ο σκοπός αυτής των επόμενων παραγράφων αυτής της ενότητας του κεφαλαίου είναι να δώσει μια γενική εικόνα για τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των μοντέλων. Ιστορικά, πολλά μοντέλα έχουν προταθεί και πολλά είναι αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα. Είναι σημαντικό να εκτιμήσουμε ότι υπάρχει ένα ευρύ φάσμα τυρβωδών ροών, όπως επίσης και ένα ευρύ φάσμα ερωτήσεων που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Κατά συνέπεια είναι χρήσιμο και κατάλληλο να έχουμε ένα ευρύ φάσμα μοντέλων τα οποία ποικίλουν σε περιπλοκότητα, ακρίβεια και άλλα χαρακτηριστικά.

Τα κύρια κριτήρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογήσουμε διάφορα μοντέλα είναι

- i) επίπεδο περιγραφής
- ii) πληρότητα
- iii) κόστος και ευκολία στη χρήση
- iv) εύρος εφαρμοσιμότητας
- v) ακρίβεια

· **Πληρότητα**

Ένα μοντέλο θεωρείται πλήρες όταν οι εξισώσεις που το αποτελούν είναι απαλλαγμένες από ορισμούς εξαρτημένους από τη ροή. Τα χαρακτηριστικά που κάνουν μια ροή να διαφέρει από μια άλλη είναι μόνο οι ιδιότητες της μάζας και οι οριακές αρχικές συνθήκες. Ημιτελή μοντέλα μπορούν να φανούν χρήσιμα για ροές μέσα σε μια στενή κατηγορία (πχ προσαρτημένα οριακά στρώματα πάνω σε αεροτομές) για τα οποία υπάρχει ένας κορμός από ημι-εμπειρική γνώση πάνω στους κατάλληλους ορισμούς που εξαρτώνται από τη ροή. Παρ' όλα αυτά, η πληρότητα εννοείται πως είναι επιθυμητή.

· **Κόστος και ευκολία στη χρήση**

Για όλες τις ροές, οι αριθμητικές μέθοδοι απαιτούνται για τη λύση των πρότυπων εξισώσεων. Η δυσκολία να αποδοθεί ένας υπολογισμός μοντέλου τύρβης εξαρτάται και από τη ροή αλλά και από το μοντέλο. Η υπολογιστική δυσκολία αυξάνεται με την στατιστική διάσταση της ροής, η οποία μειώνεται αν η ροή είναι στατιστικά αμετάβλητη ενώ μειώνεται περισσότερο αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις οριακών στρωμάτων. Σε ορισμένες μεθόδους (π.χ. DNS) το υπολογιστικό κόστος είναι μια αυξανόμενη συνάρτηση του αριθμού Reynolds της ροής, ενώ σε άλλες (δηλ. στο μοντέλο μίξης μήκους) η αύξηση του κόστους με τον αριθμό Reynolds είναι αμελητέα ή μηδενική.

Για να εκτελεστεί ένας υπολογισμός τυρβώδους ροής, για μια συγκεκριμένη ροή, γίνεται σε δύο μέρη. Αρχικά, το πρόγραμμα (λογισμικό) για να λύσει τις πρότυπες εξισώσεις πρέπει να ληφθεί ή να κατασκευαστεί και να ρυθμιστεί για τη ροή από κοντά (δηλ. καθορίζοντας κατάλληλες

οριακές συνθήκες). Δεύτερον, το πρόγραμμα (λογισμικό) εκτελείται για να πραγματοποιήσει τον υπολογισμό, από τον οποίο εξάγονται τα απαιτούμενα αποτελέσματα. Το κόστος και η δυσκολία του πρώτου μέρους εξαρτάται από το διαθέσιμο λογισμικό και τους αλγόριθμους, αλλά και από την πολυπλοκότητα του μοντέλου.

Η προσπάθεια που χρειάζεται για να κατασκευαστεί ένα πρόγραμμα υπολογιστή για μια συγκεκριμένη κλάση ροών και μοντέλων είναι πολύ μεγάλη, και ως εκ τούτου αυτό είναι ένα σημαντικό εμπόδιο στην αξιολόγηση και χρήση νέων μοντέλων τα οποία χρειάζονται νέα προγράμματα. Είναι όμως δαπάνες που θα γίνουν μια φορά.

Το κόστος και η δυσκολία του δεύτερου μέρους -εκτέλεση του υπολογισμού- εξαρτάται από το εύρος του υπολογιστή που θα χρησιμοποιηθεί (δηλ. ένας πάγκος εργασίας ή ένας υπερ-υπολογιστής), από τις εργατοώρες και την δεξιότητα για να γίνει ο υπολογισμός, και στην κατανάλωση 'πόρων' υπολογιστή (πχ μνήμη, επεξεργαστής). Αυτές είναι επαναλαμβανόμενες δαπάνες.

Όσον αφορά το χρόνο υπολογιστή που καταναλώνεται, υπάρχει το ερώτημα 'ποια υπολογιστική δαπάνη είναι αποδεκτή'. Η απάντηση ποικίλει ανάλογα με την περίπτωση. Το ποσό των υπολογισμών, το οποίο μετράται σε flops (floating-point operations=λειτουργίες κινητής υποδιαστολής), που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ορισμένο χρόνο καθορίζεται από την ταχύτητα του υπολογιστή, που μετράται σε megaflops, gigaflops, ή teraflops δηλ. $10^6, 10^9$, ή 10^{12} flops ανά δευτερόλεπτο¹.

Μπορεί να θεωρηθεί ότι η ταχύτητα έχει αυξηθεί εκθετικά, από ένα συντελεστή 30 ανά δεκαετία. Αυτό είναι ένα αξιοσημείωτο ποσό αύξησης, ένας συντελεστής 100 σε 20 χρόνια και ένα εκατομμύριο σε 40 χρόνια. Αν και για το μέλλον δεν υπάρχει καμία στερεή βάση για υπολογισμό κατά προσέγγιση, ωστόσο θεωρείται πως αυτή η τάση θα συνεχιστεί. Συμπερασματικά, σημερινές ερευνητικές προσεγγίσεις μπορεί να είναι εφικτές για 'εφαρμογές' σε 20 χρόνια και για επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς σε 40 χρόνια. Από την άλλη μεριά, το διάστημα των 40 ετών μεταξύ μεγάλης κλίμακας έρευνα και επαναλαμβανόμενων υπολογισμών απεικονίζει την ανάγκη για ένα εύρος μοντέλων, τα οποία να διαφέρουν στις υπολογιστικές τους απαιτήσεις.

· **Εύρος εφαρμοσιμότητας**

Δεν είναι όλα τα μοντέλα εφαρμόσιμα σε όλες τις ροές. Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλά μοντέλα βασισμένα στο φάσμα της ταχύτητας ή σε συσχετισμούς δύο σημείων τα οποία

εφαρμόζονται μόνο σε ομοιογενή τύρβη . Ως δεύτερο παράδειγμα, κάποια συγκεκριμένα μοντέλα μίξης μήκους συνήθως υποθέτουν τη γεωμετρία της ροής στον προσδιορισμό της μίξης μήκους κι έτσι μπορούν να εφαρμοστούν μονάχα σε ροή τέτοιας γεωμετρίας. Οι ανάγκες υπολογισμού θέτουν έναν ακόμη ρεαλιστικό περιορισμό όσον αφορά στην εφαρμοσιμότητα κάποιων μοντέλων. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί πως σε αρκετές ροές στις οποίες εφαρμόζονται τα μοντέλα τύρβης υπάρχουν επιπρόσθετα φαινόμενα ‘όπως η μεταφορά θερμότητας και μάζας, χημικές αντιδράσεις, η άνωση, η συμπίεστικότητα καθώς και η ροή πολλαπλών φάσεων. Έτσι αποτελεί σημαντικό ζήτημα το μέτρο στο οποίο οι προσεγγίσεις που μελετώνται μπορούν να εφαρμοστούν ή και να επεκταθούν σ’ αυτές τις πιο περίπλοκες ροές. Στα ζητήματα αυτά είναι σημαντικό να γίνει σαφές πως διαχωρίζονται η έννοια της εφαρμοσιμότητας από αυτήν της ακρίβειας. Ένα μοντέλο είναι εφαρμόσιμο σε μια ροή εάν οι εξισώσεις του τίθενται σωστά και μπορούν να λυθούν, ανεξάρτητα από το αν οι λύσεις είναι σωστές.

· **Ακρίβεια**

Είναι προφανές πως η ακρίβεια αποτελεί ένα επιθυμητό στοιχείο κάθε μοντέλου. Στην εφαρμογή μιας συγκεκριμένης ροής, η ακρίβεια ενός μοντέλου μπορεί να καθοριστεί συγκρίνοντας υπολογισμούς ενός μοντέλου με πειραματικές μετρήσεις. Αυτή η διαδικασία εξέτασης ενός μοντέλου είναι θεμελιώδους σημασίας και χρήζει ιδιαίτερης μελέτης.

Η αριθμητική λύση της εξίσωσης μοντέλου αναπόφευκτα εμπεριέχει αριθμητικό λάθος. Αυτό οφείλεται σε διάφορες πηγές αλλά το συχνότερο είναι το χωρικό σφάλμα αποκοπής. Σε μια μέθοδο πεπερασμένων διαφορών ή στοιχείων, για παράδειγμα, αυτό το σφάλμα κλιμακώνεται, ενώ το υπολογιστικό κόστος αυξάνει.

Συνοπτικά, η ασυμφωνία μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων ιδιοτήτων της ροής προκύπτει από:

- i) ανακρίβειες του μοντέλου
- ii) αριθμητικό λάθος
- iii) λάθος μέτρησης
- iv) ασυμφωνίες στις οριακές συνθήκες

Το σημαντικό συμπέρασμα είναι πως μια σύγκριση μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων ιδιοτήτων ροής καθορίζει την ακρίβεια του μοντέλου μόνο εφόσον τα λάθη που ανακύπτουν από το ii) έως και το iv) είναι σχετικά μικρά. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει κίνδυνος

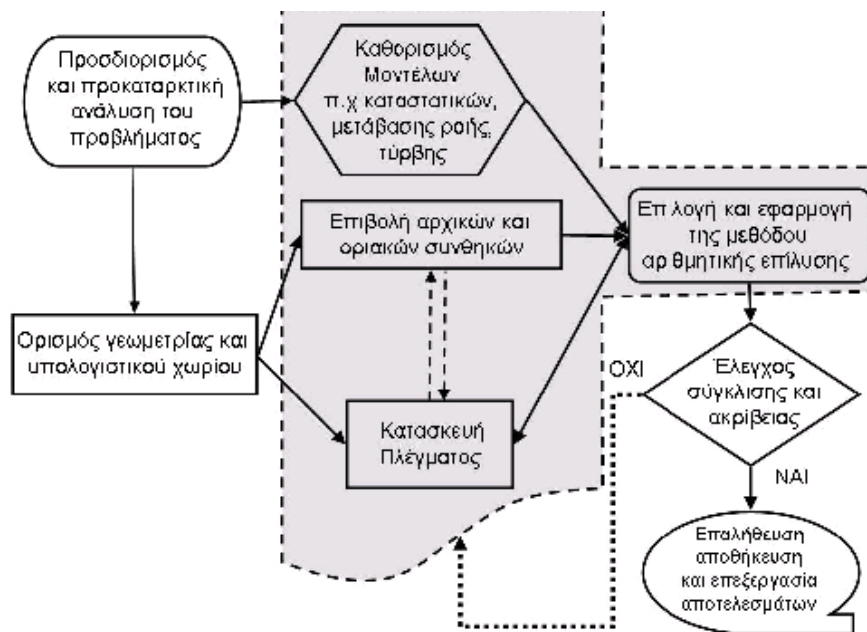
να βγούν εσφαλμένα συμπεράσματα όσον αφορά στην ακρίβεια ενός μοντέλου από υπολογισμούς που περιέχουν μεγάλα ή μη ποσοστιαία αριθμητικά λάθη.

· **Τελικές παρατηρήσεις**

Η καταλληλότητα ενός συγκεκριμένου μοντέλου για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα τυρβώδους ροής εξαρτάται από ένα σταθμισμένο συνδυασμό όλων των προηγούμενων κριτηρίων. Και αυτή η στάθμιση της σπουδαιότητας των διάφορων κριτηρίων εξαρτάται ιδιαίτερος από το πρόβλημα. Συνεπώς όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, τώρα αλλά και στο μέλλον, δεν υπάρχει ένα μοντέλο καλύτερο από τα άλλα παρά μόνο μια σειρά από μοντέλα που μπορούν να εφαρμοστούν επωφελώς στην ευρεία σειρά των προβλημάτων τυρβώδους ροής.

4.4 Διαδικασία υπολογιστικής προσομοίωσης

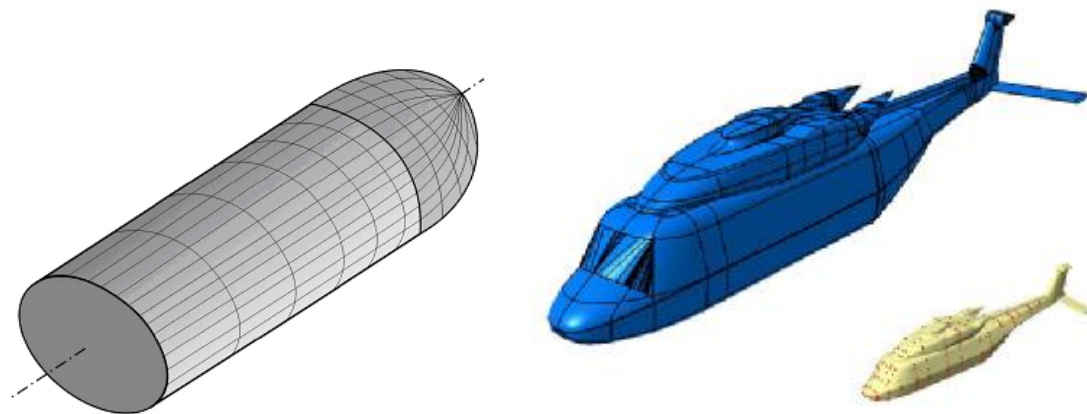
Η διαδικασία της υπολογιστικής προσομοίωσης για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων με εμπορικό λογισμικό περιλαμβάνει τα στάδια που φαίνονται στο διάγραμμα του Σχ. 1. Τα στάδια αυτά επεξηγούνται αναλυτικά παρακάτω:



Στάδια υπολογιστικής προσομοίωσης

Ορισμός γεωμετρίας και υπολογιστικού χωρίου

Ο ορισμός της γεωμετρίας είναι ένα σημαντικό αρχικό στάδιο προετοιμασίας της υπολογιστικής διαδικασίας. Υπάρχουν απλές δυσδιάστατες γεωμετρίες που υπολογίζονται από αναλυτικές εκφράσεις όπως π.χ. κύλινδρος, αεροτομή NACA και άλλες απλές γεωμετρίες που ορίζονται από ευθύγραμμα τμήματα. Υπάρχουν ακόμη και τρισδιάστατα σώματα όπως π.χ. κύλινδρος με ημισφαιρικό άκρο όπου η γεωμετρία μπορεί να κατασκευαστεί αναλυτικά. Οι απλές αυτές γεωμετρίες αντιπροσωπεύουν συχνά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται για μετρήσεις σε αεροσήραγγες και δεν απαιτούν ειδικά εργαλεία για την κατασκευή τους.



Ο καθαρισμός κατάλληλης γεωμετρίας είναι το πρώτο σημαντικό στάδιο για την κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος. Εξαιρουμένης της περίπτωσης εσωτερικών ροών, όπως η ροή σε αγωγούς, οι εξωτερικές ροές όπως η ροή γύρω από το ελικόπτερο ή μια πτέρυγα απαιτούν τον προσδιορισμό του χωρίου ροής. Στην περίπτωση που η γεωμετρία βρίσκεται στην αεροσύραγγα τα τοιχώματά της καθορίζουν το υπολογιστικό χωρίο.

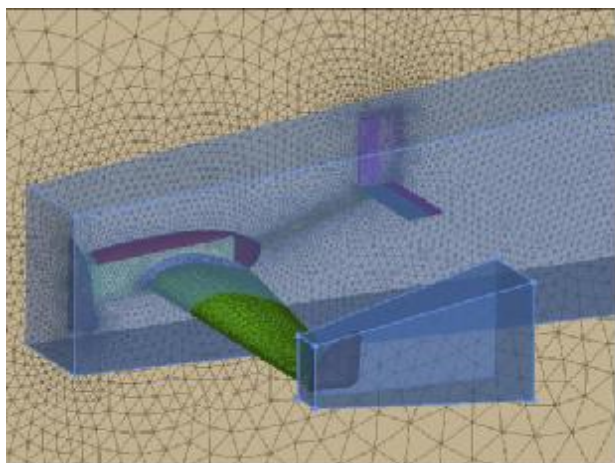
Κατασκευή πλέγματος

Η κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος πραγματοποιείται είτε με λογισμικό το οποίο έχουμε προγραμματίσει ή συνήθως με την χρήση εμπορικών λογισμικών τα οποία δίνουν την δυνατότητα κατασκευής πλεγμάτων για βιομηχανικές εφαρμογές με ιδιαίτερη περιπλοκότητα. Τα

υπολογιστικά πλέγματα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις της ομαλότητας ομοιογένειας και να παρέχουν την απαραίτητη ακρίβεια για τον υπολογισμό της ροής. Είναι προφανές ότι πριν την κατασκευή του πλέγματος απαιτείται προεργασία και εντοπισμός των περιοχών όπου απαιτείται πυκνωση του υπολογιστικού πλέγματος. Πολλές φορές δεν είναι αναγκαίο να γίνει μια προκαταρκτική προσομοίωση σε ένα σχετικά αραιό υπολογιστικό πλέγμα ώστε να εντοπισθούν καλύτερα οι περιοχές όπου απαιτείται επιπλέον ακρίβεια στον υπολογισμό. Τέτοιες περιοχές είναι οι γωνίες αποκολλημένης ροής, τα ωστικά κύματα, οι στροβιλισμοί κ. λ. π. Παραδείγματα πλεγμάτων δίνονται παρακάτω:



Πλέγμα ανεμογεννήτριας



Επιφανειακό πλέγμα και χωρία καθορισμού μήκους πλέγματος που επιτρέπουν τον ακριβέστερο υπολογισμό των απορευμάτων.

Επιβολή αρχικών και οριακών συνθηκών

Στην υπολογιστική ρευστομηχανική χρησιμοποιούμε σχεδόν πάντοτε την χρονομεταβλητή μορφή των εξισώσεων ροής που εκφράζουν τους νόμους διατήρησης. Οι αρχικές συνθήκες για την περίπτωση που αναζητούμε την σταθερά λύση είναι σχετικά απλές και συνήθως είναι η ομοιόμορφη ροή. Στην περίπτωση ασταθών ροών ο προσδιορισμός των αρχικών συνθηκών είναι πιο περίπλοκος.

Οι οριακές συνθήκες ουσιαστικά προσδιορίζουν την λύση του προβλήματος και ο προσδιορισμός που πρέπει, να γίνεται με μεγάλη προσοχή. Τα περισσότερα εμπορικά και ερευνητικά λογισμικά παρέχουν μεγάλο αριθμό οριακών συνθηκών όπως στερεό τοίχωμα, συμμετρίας, καθορισμένη πίεση εισόδου, έξοδος με μηδενική κλίση κ. λ. π. Οι οριακές συνθήκες που επιβάλουμε πρέπει να είναι εφικτές και συμβατές με την ροή. Σε ένα αγωγό π. χ. δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε ταυτοχρόνως τις πίεσης εισόδου και εξόδου και την παροχή. Παρόμοια ο αριθμός των μεταβλητών που προσδιορίζουμε στα όρια εισόδου και εξόδου για συμπιεστή ροή δεν είναι αυθαίρετος και εξαρτάται από την ταχύτητα της ροής (υποηχητική ή υπερηχητική) όπως επιβάλλει η θεωρία των χαρακτηριστικών για την συμπιεστή ροή.

Καθορισμός μοντέλων

Οι εξισώσεις ροής, ασυμπίεστης ή συμπιεστής, περιγράφουν με ακρίβεια όλα τα περίπλοκα φαινόμενα ροής όπως την μετάβαση ροής, τύρβη, ωστικά κύματα κ. λ. π. Ο ακριβής υπολογισμός της και της μετάβασης ροής απαιτεί μεγάλη ακρίβεια για να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των μικρών κλιμάκων που τις χαρακτηρίζουν. Οι διαθέσιμες προσεγγίσεις είναι η χρήση πυκνού υπολογιστικού πλέγματος, μεγάλη τάξη ακρίβειας ή συνδυασμός των δυο. Η προσομοίωση τυρβωδών ροών βιομηχανικού ενδιαφέροντος απαιτεί πολύ μεγάλο αριθμό υπολογιστικών κελιών και είναι αδύνατη με την διαθέσιμη υπολογιστική δύναμη ακόμη και για σχετικά περιορισμένου μεγέθους υπολογισμούς όπως μεμονωμένες πτέρυγες αεροσκάφους ή στροβιλοκινητήρα. Οι υπολογισμοί τυρβωδών ροών πραγματοποιούνται σήμερα με την χρήση μοντέλων τύρβης που αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια και επιτρέπουν την προσομοίωση τύρβης με ικανοποιητική ακρίβεια και εφικτό υπολογιστικό κόστος ακόμα και για πλήρες αεροσκάφος ή στροβιλοκινητήρα.

Στις σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές πλην της τύρβης υπάρχουν και άλλα φαινόμενα όπως ο βρασμός (διφασική ροή), η καύση, η επίρεια ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε ιονισμένα υγρά και αέρια κ. λ. π. η ακριβής προσομοίωση των οποίων επίσης απαιτεί υπολογιστική ισχύ πέραν της διαθέσιμης. Τα φαινόμενα αυτά προσομοιώνονται επίσης με την χρήση μοντέλων τα οποία υπάρχουν στα περισσότερα εμπορικά αλλά και σε πολλά λογισμικά ερευνητικού χαρακτήρα. Η αριθμητική επίλυση εξαρτάται από την ορθή επιλογή του μοντέλου και σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαίο να γίνουν προσομοιώσεις με διαφορετικά μοντέλα για να διαπιστωθεί πιο από αυτά προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το υπό μελέτη φαινόμενο.

Επιλογή και εφαρμογή της μεθόδου

Η επιλογή της αριθμητικής μεθόδου επίλυσης είναι το πιο σημαντικό στάδιο της προσομοίωσης για το πρόβλημα που μας ενδιαφέρει. Η αριθμητική μέθοδος καθορίζει το σφάλμα αποκοπής και κατά συνέπεια την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, τα όρια ευστάθειας και κατά συνέπεια το μέγεθος του χρονικού βήματος το οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την προσομοίωση. Η επιλογή της αριθμητικής μεθόδου ακόμη εξαρτάται και από τον τρόπο κατασκευής του πλέγματος, π. χ. πεπερασμένες διαφορές έχουν εφαρμογή μόνο σε δομημένα πλέγματα ενώ η εφαρμογή μεθόδων πεπερασμένων όγκων ή πεπερασμένων στοιχείων για αδόμητα πλέγματα παρουσιάζει διαφοροποιήσεις.

Η προσομοίωση πραγματοποιείται με το συγκεκριμένο πλέγμα που κατασκευάστηκε το μοντέλο και την μέθοδο αριθμητικής επίλυσης που επιλέχθηκαν. Αρχικά πραγματοποιείται έλεγχος σύγκλισης και εάν διαπιστωθεί ότι η σύγκλιση δεν είναι δυνατή για τις επιλογές που έγιναν και το συγκεκριμένο υπολογιστικό πλέγμα τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται και γίνονται κατάλληλες διορθώσεις. Η επίτευξη σύγκλισης είναι το πρώτη στάδιο περάτωσης της διαδικασίας προσομοίωσης. Το επόμενο σημαντικό στάδιο είναι η επαλήθευση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Ο πλέον αποτελεσματικός και αποδεκτός τρόπος πιστοποίησης της αριθμητικών προσομοίωσης είναι η σύγκριση με πειραματικές μετρήσεις. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν αριθμητικές μετρήσεις είναι αναγκαίο να γίνουν τουλάχιστον μια ή και δυο προσομοιώσεις με πυκνότερο πλέγμα.

Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν μόνο τις εξαρτημένες μεταβλητές οι οποίες για μεν την ασυμπιεστή ροή είναι το διάλυμα της ταχύτητας και η πίεση σε κάθε σημείο υπολογισμού. Τα σημεία υπολογισμού μπορεί να είναι οι κόμβοι του πλέγματος για πεπερασμένες διαφορές, το κέντρο βάρους των στοιχείων ή κόμβοι του πλέγματος για cell centered και vertex based μεθόδους πεπερασμένων όγκων αντίστοιχα, ενώ σημεία υπολογισμού για μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων είναι τα κομβικά σημεία (quadrature points) τα οποία δεν συμπίπτουν κατ' ανάγκη με τους κόμβους του πλέγματος. Για συμπιεστή ροή οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι η πυκνότητα το διάλυμα της ορμής και η ολική ενέργεια. Οι ποσότητες που ενδιαφέρουν τον περαιτέρω σχεδιασμό όπως ολική άντωση και οπισθέλκουσα μπορούν να εξαχθούν από τις τιμές των ανεξαρτήτων μεταβλητών. Άλλες ποσότητες όπως ο τοπικός αριθμός Mach της ροής πρέπει να βρεθούν μετά από επεξεργασία των δεδομένων η οποία γίνεται συνήθως σε ξεχωριστό λογισμικό (π.χ. techplot) το οποίο παρέχει την δυνατότητα οπτικοποίησης του πεδίου ροής και τον υπολογισμό ποσοτήτων όπως ο τοπικός αριθμός Mach και η κατανομή της πίεσης.

Ο σχεδιασμός λογισμικού για υπολογιστική μηχανική ρευστών είναι σημαντικά περίπλοκος. Τα βασικά στάδια είναι η επιλογή της μεθόδου χωρικής διακριτοποίησης και η εκλογή της μεθόδου ολοκλήρωσης στον χρόνο. Το τελικό στάδιο πιστοποίησης είναι επίσης πολύ σημαντικό και η απουσία πιστοποίησης και επιθυμητού επίπεδου ακρίβειας συχνά μπορεί να οδηγήσει στην αναθεώρηση της μεθόδου. Η προσθήκη μοντέλων οριακών συνθηκών και άλλων αναγκαίων εργαλείων τα οποία καθιστούν το λογισμικό κατάλληλο για πρακτικά προβλήματα γίνεται σε επόμενα στάδια τα οποία είναι επίσης χρονοβόρα.

4.5 Επιλέγοντας ένα τυρβώδες μοντέλο

Είναι ατυχές το γεγονός ότι κανένα μεμονωμένο τυρβώδες μοντέλο δεν είναι καθολικά αποδεκτό ως ανώτερο για όλες τις τάξεις προβλημάτων. Η επιλογή του μοντέλου θα εξαρτηθεί από ζητήματα όπως οι φυσικοί νόμοι που συμπεριλαμβάνονται στη ροή, η συνήθης τακτική για την λύση μιας συγκεκριμένης τάξης προβλημάτων, το απαιτούμενο επίπεδο ακρίβειας, οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι, και το διαθέσιμο ποσό χρόνου για την εξομοίωση. Για να γίνει η επιλογή του πιο κατάλληλου μοντέλου για την εκάστοτε εφαρμογή, χρειάζεται να καταλάβει κανείς τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των διαφόρων επιλογών.

Το υπολογιστικό κόστος και προσπάθεια σε όρους χρόνου του κεντρικού επεξεργαστή (CPU) και μνήμης του εκάστοτε μοντέλου εξετάζονται. Ενώ είναι αδύνατο να δηλώσει κανείς κατηγορηματικά ποιο μοντέλο είναι το καλύτερο για μια εφαρμογή, γενικές οδηγίες παρουσιάζονται για να βοηθήσουν στη επιλογή του κατάλληλου τυρβώδους μοντέλου για το εκάστοτε μοντέλο ροής που θέλουμε να μελετήσουμε.

4.6 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα υπολογιστικών μοντέλων

1. Μοντέλο μήκους ανάμιξης

Πλεονεκτήματα:

- εύκολο στην εφαρμογή και φθινό σε υπολογιστικούς όρους επεξεργασίας
- καλές προβλέψεις για λεπτά διατμητικά στρώματα: δέσμες ρευστού, επίπεδα ανάμιξης, απορρεύματα και οριακά στρώματα.
- Καλά εδραιωμένο.

Μειονεκτήματα:

- παντελώς ανίκανο περιγραφής ροών με διαχωρισμό και ανακυκλοφορία.
- υπολογίζει μόνο τις ιδιότητες της μέσης ροής και τυρβώδεις διατμητικές τάσεις.

2. Μοντέλο k-ε

Πλεονεκτήματα:

- το απλούστερο τυρβώδες μοντέλο για το οποίο μόνο αρχικές οριακές συνθήκες χρειάζεται να δοθούν.
- εξαιρετική απόδοση για πολλές βιομηχανικά σχετιζόμενες ροές.
- καλά εδραιωμένο, το πλέον ευρέως αξιοποιήσιμο τυρβώδες μοντέλο.

Μειονεκτήματα:

- ακριβότερο για εκτέλεση από το μοντέλο μήκους πρόσμιξης
- φτωχή απόδοση σε πλήθος σημαντικών περιπτώσεων όπως:
 - ι) ακαθόριστες ροές
 - ιι) ροές με επιπλέον μεγάλες εντάσεις

3. RSM μοντέλα

Πλεονεκτήματα:

- πιθανόν το πιο γενικό από όλα τα κλασσικά τυρβώδη μοντέλα
- μόνο αρχικές και/ή οριακές συνθήκες χρειάζεται να δοθούν.
- Πολύ ακριβές στον υπολογισμό των ιδιοτήτων της μέσης ροής και όλων των τάσεων Reynolds για πολλές απλές και πιο σύνθετες ροές συμπεριλαμβανομένων δεσμών τοίχου, ασύμμετρα κανάλια και μη κυκλικές ροές σε αγωγούς και κυκλικές ροές.

Μειονεκτήματα:

- πολύ μεγάλα υπολογιστικά κόστη (7 επιπλέον μερικές διαφορικές εξισώσεις)
- όχι τόσο καλή εδραίωση σε κάθε περίπτωση όπως τα μοντέλα μήκους ανάμιξης και k-ε.
- αποδίδει τόσο φτωχά όσο και το k-ε μοντέλο σε μερικές ροές εξαιτίας παρομοίων προβλημάτων με τη μοντελοποίηση της εξίσωσης ε (π.χ. αξονοσυμμετρικές δέσμες ρευστού και ανακυκλοφορούσες ροές).

4. Spalart-Allmaras μοντέλο

Πλεονεκτήματα: Εφαρμόζεται σε εξωτερικές αεροδυναμικές ροές και δίνει καλά αποτελέσματα σε οριακά στρώματα και κλίσεις αντίθετης πίεσης. Επίσης χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές στροβιλομηχανικής.

Μειονεκτήματα: Σε σύνθετες γεωμετρίες είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η κλίμακα μήκους και έτσι το μοντέλο είναι ακατάλληλο να εφαρμοστεί στις πιο πολλές εσωτερικές ροές. Επίσης δεν έχει ευαισθησία σε διαδικασίες μεταφοράς σε ταχέως μεταβαλλόμενες ροές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει η επίλυση ενός προβλήματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής με τη χρήση του λογισμικού FLUENT.

Εγινε χρήση στοιχείων υπάρχουσας πειραματικής διάταξης με σκοπό την σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα υπολογιστικά που θα προκύψουν από τη μελέτη του προβλήματος με χρήση του μοντέλου LES για διάφορες περιπτώσεις αφού πρόκειται για ροή τριών διαστάσεων.

Το πρόβλημα αφορά τα μελέτη μιας διάταξης λιμνώδους φλόγας σε μια αξονοσυμμετρική πειραματική διάταξη που καίγεται προπάνιο.

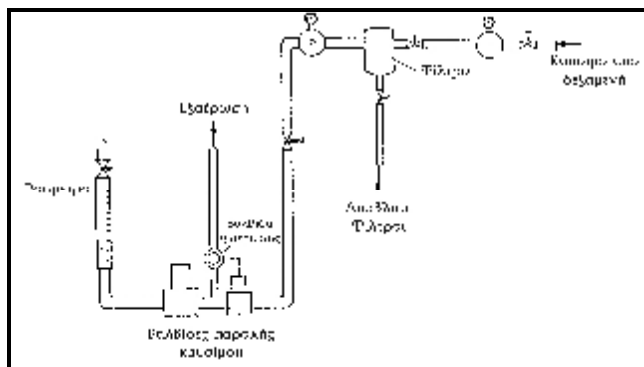
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ -ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Στον καυστήρα ο θάλαμος είναι μια διάταξη κυκλικής διατομής, διαμέτρου 1500mm και ύψους 2000mm, που στηρίζεται σε ορθογωνική βάση διαστάσεων 1600 ´ 1000 ´ 310mm. Το υλικό κατασκευής του θαλάμου είναι γαλβανισμένη λαμαρίνα πάχους 3mm, ώστε να αντέχει τις υψηλές θερμοκρασίες (<1400°K) που αναπτύσσονται λόγω της φλόγας. Ο θάλαμος φέρει 6 παράθυρα κατασκευασμένα από πλεξιγκλάς πάχους 8mm, τρία από την κάθε πλευρά κατά ύψος. Οι διαστάσεις των παραθύρων ξεκινώντας από την κορυφή του θαλάμου προς τα κάτω είναι : 580 ´ 500 mm , 700 ´ 500mm και 640 ´ 500mm (ύψος ´ πλάτος). Το πάνω μέρος του θαλάμου καταλήγει σε κόλουρο κώνο βάσεως ίση με την διάμετρο του θαλάμου (1500mm) που σε ύψος 430mm συνδέεται με καπνοδόχο διαμέτρου 125mm. Το κάτω μέρος του, στηρίζεται πάνω στην ορθογωνική βάση η οποία περιβάλλεται από πλέγμα 1 x 1mm , ώστε να εξομαλύνεται η ροή του αέρα που εισέρχεται στο εσωτερικό του θαλάμου από την βάση του.

Κύκλωμα Παροχής Καυσίμου

Κατά την διαδικασία της καύσης, το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι προπάνιο C_3H_8 , αποθηκευμένο σε ειδική δεξαμενή και το οποίο παροχετεύεται στον καυστήρα μέσω συστήματος σωλήνων και βαλβίδων. Στο σχήμα δίνεται μια άποψη της συνδεσμολογίας του κυκλώματος.

Το σύστημα αποτελείται από το κύκλωμα παροχής καυσίμου, που περιλαμβάνει το απαραίτητο δίκτυο σωλήνων, ρυθμιστές πίεσης (υψηλής, χαμηλής), βαλβίδες κτλ. και το σύστημα ελέγχου και ασφάλειας. Η έναυση της φλόγας γίνεται με ειδικό φλόγιστρο. Η παροχή του καυσίμου μετريέται με τη χρήση παροχόμετρου, το οποίο είναι τοποθετημένο πριν τον καυστήρα και απ' το οποίο μέσω συστήματος (από ελαστικό σωλήνα υψηλής αντοχής σε πίεση (20 bar) και χάλκινα σωληνάκια), το καύσιμο καταλήγει στον πυθμένα του καυστήρα.



Διεξαγωγή των Πειραματικών Μετρήσεων

Για την εξασφάλιση μιας ομοιόμορφης πειραματικής προσομοίωσης με τις λιμνώδεις φωτιές, πριν την έναρξη των μετρήσεων αφήναμε τον καυστήρα να λειτουργήσει για τουλάχιστον 10 min πριν την έναρξη καταγραφής των μετρήσεων. Το παροχόμετρο του προπανίου είναι βαθμονομημένο από 30 lt/h έως 340 lt/h. Παρατηρήθηκε αδυναμία έναυσης του προπανίου για παροχές μικρότερες από 80 lt/h, καθώς και απουσία φλόγας στο κέντρο του καυστήρα (δημιουργία δακτυλίου φλόγας περιμετρικά του επιπέδου εκβολής του καυσίμου) σε παροχές από 80 lt/h έως 130 lt/h. Επίσης αποκλείστηκαν οι παροχές καυσίμου μεγαλύτερες από 260 lt/h, διότι η φλόγα είχε μεγάλες εκπομπές σε καπναέρια (παραγωγή αιθάλης λόγω πυρόλυσης στην κατώτερη ζώνη) επηρεάζοντας τις μετρήσεις, διότι τα κολλώδη (λόγω υψηλών θερμοκρασιών) άκαυστα σωματίδια δημιουργούσαν ένα αδιαπέραστο “πέπλο” πάνω στο

αισθητήριο (θερμοζεύγος) με αποτέλεσμα την αύξηση της αδρανείας του στις μεταβολές της θερμοκρασίας καθώς και λήψη χαμηλότερων ενδείξεων.

Μετά από υπολογιστική προσομοίωση αλλά και οπτική παρατήρηση επιλέχθηκαν τελικά, δύο διαφορετικές παροχές: η 160 lt/h και 225 lt/h για τις οποίες και έγινε η δειγματοληψία.

Λόγω κατασκευαστικής συμμετρίας του καυστήρα αλλά και του θαλάμου πειραματικών δοκιμών υπήρξε και συμμετρία στο ανάπτυγμα της φλόγας γεγονός που λειτουργούσε ευνοϊκά για τον τρόπο λήψης των μετρήσεων. Σύμφωνα με το προηγούμενο σκεπτικό πήραμε ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων ακτινικά της ευρείας επιφάνειας του καυστήρα για αρκετά επίπεδα αξονικά της επιφάνειας εκβολής του καυσίμου, μέχρι και σε ύψη αρκετά απομακρυσμένα από αυτό (ασθενή ανωστική ζώνη πλουμίου). Εκτός από τα διαγράμματα των ακτινικών μετρήσεων στο τέλος παραθέτουμε και ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα (για τις θερμοκρασίες της λιμνώδους φλόγας αλλά και του πλουμίου της) από το κέντρο του καυστήρα μέχρι και σε αξονική μετατόπιση ύψους 1 m για την παροχή των 160 lt/h και 1.2m για την παροχή των 225 lt/h.

Στα διαγράμματα όπως θα δούμε ο ένας άξονας έχει τις αδιάστατες ακτινικές μετατοπίσεις R/R₀ (όπου R₀=ακτίνα κυκλικού καυστήρα + πλάτος δακτυλίου =250 mm) και ο άλλος άξονας τις θερμοκρασίες στα αντίστοιχα σημεία σε (°C). Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η λήψη των ακτινικών μετρήσεων έγινε ανά 10mm για τις τρεις πρώτες (ξεκινώντας από την άκρη του δακτυλίου), και όλες οι υπόλοιπες ανά 5mm μέχρι το κέντρο του καυστήρα. Για την 1^η περίπτωση για παροχή καυσίμου 160 lt/h ο αριθμός Gr είναι Gr=2.394e¹² ενώ για την 2^η περίπτωση για παροχή καυσίμου 225 lt/h ο αριθμός Gr είναι Gr=3.31 e¹²

Υπολογισμός του αριθμού Grashof

Αν η ροή θερμότητας Q που εκλύεται από την πηγή είναι γνωστή, τότε ορίζεται ο αριθμός

Grashof: $Gr_{D,Q} = \frac{D^3 W}{\rho \eta^3}$, όπου W είναι το «έλλειμμα βάρους» και χαρακτηρίζει την ανωστική

δύναμη της πηγής: $W = 2g \int_0^{\frac{D}{2}} (\rho_a - \rho) U dx$

Επειδή στο πλούμιο πυρκαγιάς που μελετάται η ροή δημιουργείται από πηγή θερμότητας και το ρευστό μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό αέριο, η πυκνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της

θερμοκρασίας, και επομένως το W μπορεί να γραφεί σαν: $W = \frac{Qg}{c_p T_a}, \frac{kg}{s^3}$

Η εκλυόμενη ροή θερμότητας ανά μονάδα μήκους του καυστήρα μπορεί να υπολογιστεί

από τη σχέση:
$$Q = \frac{\dot{m} \Delta H - Q_C}{L}$$

$$Q_C = \dot{m}_C c_{pc} \Delta \theta_C$$

όπου:

Q: Η εκλυόμενη ανά μονάδα μήκους και χρόνο θερμότητα από την πυρκαγιά (KW/m)

\dot{m} : Ο ρυθμός καύσης του καυσίμου (gr/s)

ΔH : Η θερμογόνο δύναμη του καυσίμου (kJ/gr)

Q_C : Η απαγόμενη θερμότητα ανά μονάδα χρόνου από το κύκλωμα ψύξης (KW)

m_C : Η παροχή του νερού στο κύκλωμα ψύξης (kg/s)

$\Delta \theta_C$: Η διαφορά θερμοκρασίας του νερού στη είσοδο και στην έξοδο του καυστήρα

D: Το πλάτος του καυστήρα (0,02m)

L: Το μήκος του καυστήρα (2m)

ρ : Η πυκνότητα του αέρα (1,2 kg/m³ στους 30°C)

ν : Το κινηματικό ιξώδες του αέρα (1,57*10⁻⁵ m²/s στους 30°C)

g: Η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81m/s²)

c_p : Η ειδική θερμότητα του αέρα (1,005 kJ/kg °C)

c_{pc} : Η ειδική θερμότητα του νερού (4,187kJ/kg °C)

T_a : Η θερμοκρασία περιβάλλοντος (27°C ή 300 K)

Απόκριση θερμοζεύγους :

Το αναλογικό σήμα από την έξοδο του θερμοζεύγους καταχωρείται σε αρχεία στο σκληρό δίσκο προσωπικού υπολογιστή. Τα δεδομένα επεξεργάζονται με τη βοήθεια υπολογιστικού πακέτου Matlab και τα στατιστικά μεγέθη που υπολογίζονται είναι:

Οι μέσες θερμοκρασίες (mean): $\bar{T}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N T(x, y, t_i)}{N}$, όπου N ο αριθμός καταγραφών της

κάθε μέτρησης και T η στιγμιαία τιμή της θερμοκρασίας.

Την τυπική απόκλιση (Standard deviation): $S = \sqrt{T'^2}$

όπου T'^2 η δεύτερη κεντρική ροπή των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας που δίνεται από τον

$$\text{τύπο: } S^2 = \overline{T'^2} = \overline{(T - \bar{T})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{N}$$

Τον συντελεστή λοξότητας (skewness): $S = \frac{\overline{T'^3}}{S^3}$

όπου T'^3 η τρίτη ροπή των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας που δίνεται από τον τύπο:

$$\overline{T'^3} = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^3}{N}$$

Τον συντελεστή κύρτωσης (kurtosis): $F = \frac{\overline{T'^4}}{S^4}$

όπου T'^4 η τέταρτη ροπή των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας που δίνεται από τον τύπο:

$$T'^4 = \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^4}{N}$$

Το φάσμα ισχύος των τυρβωδών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας (Power spectrum density): Τα φάσματα ισχύος των τυρβωδών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας προκύπτουν με απευθείας μετασχηματισμό Fourier των μετρήσεων στιγμιαίας θερμοκρασίας. Η μελέτη των φασμάτων ισχύος επιτρέπει την ανάλυση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας σε συχνότητες και επομένως σε κυματαριθμούς ή μήκη κύματος. Έτσι είναι δυνατή η εκτίμηση της ενεργειακής

προσφοράς των διαφόρων δομών που υπάρχουν στη ροή, όπως επίσης και του ρυθμού με τον οποίο ανταλλάσσουν ενέργεια.

Αδιαστατοποίηση τιμών:

Σε ένα απομονωμένο πλούμιο που δημιουργείται από λιμνάζουσα φλόγα, το μικρότερο χαρακτηριστικό μήκος που πρέπει να χρησιμοποιηθεί είναι η θεωρητικά υπολογισμένη κλίμακα της δομής του πλουμίου:

$$D^* = \frac{\alpha Q}{\rho_0 C_p T_0 \sqrt{g}} \frac{\sigma^{2/5}}{\theta^{3/5}}$$

όπου: ρ_0 η πυκνότητα του αέρα, C_p η ειδική θερμότητα του αέρα, T_0 η θερμοκρασία περιβάλλοντος και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Το D^* είναι άμεσα συσχετιζόμενο με την διάμετρο του πλουμίου πολύ κοντά στην βάση του.

Όλες οι αποστάσεις σε όλες τις διαστάσεις για γενίκευση και ευκολότερη σύγκριση των αποτελεσμάτων έχουν αδιαστατοποιηθεί βάση του χαρακτηριστικού μήκους με τον γενικό τύπο:

$$x' = \frac{x}{D^*}$$

Οι τιμές της μέσης θερμοκρασίας έχουν αδιαστατοποιηθεί βάση της μετρούμενης σε κάθε καταγραφή θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, βάση του τύπου: $\overline{T}' = \frac{(\overline{T} - T_0)}{T_0}$. Η ένταση των

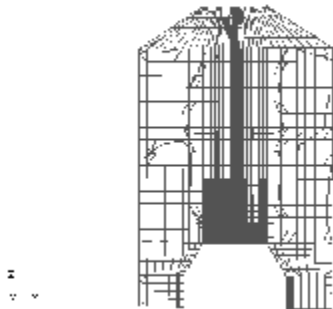
διακυμάνσεων της τυρβώδους θερμοκρασίας δηλαδή η τυπική απόκλιση έχει αδιαστατοποιηθεί με την μέση θερμοκρασία στον άξονα του πλουμίου T_{CL} (centerline) με βάση τον τύπο:

$$s' = \frac{\sqrt{T'^2}}{T_{CL} - T_0}$$

5.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΛΙΜΝΩΔΟΥΣ ΦΛΟΓΑΣ ΣΤΟ FLUENT

Αρχικά, το όλο σύστημα του πειραματικού πλαισίου και καυστήρα σχεδιάστηκε και πλεγματοποιήθηκε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα του GAMBIT. Κατόπιν το σχέδιο εισήχθη στο FLUENT όπου έγιναν οι σχετικές ρυθμίσεις των διαφόρων παραμέτρων κυρίως όσον αφορά το χρησιμοποιούμενο μοντέλο, το είδος της ροής, τα καυσαέρια και κυρίως τις οριακές συνθήκες επίλυσης.

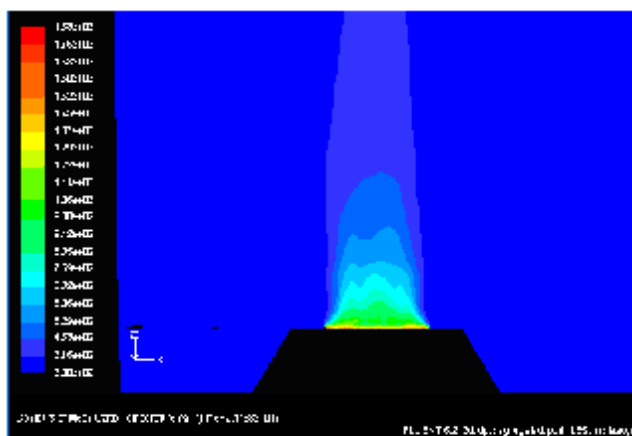
Τα πλέγμα ακριβώς πάνω από την επιφάνεια του καυστήρα επεκτάθηκε μέχρι και το ύψος του 0,8m προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη σύγκλιση των επαναληπτικών λύσεων του FLUENT για το μοντέλο LES Smagorinsky-Lilly.



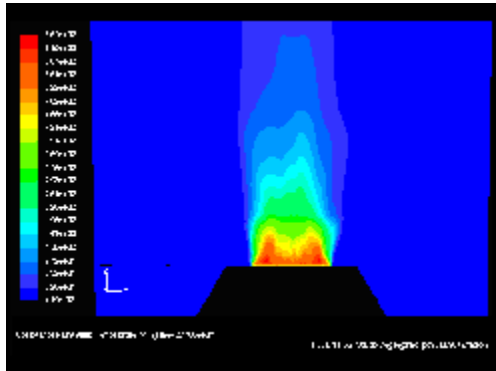
Αποτελέσματα και συγκρίσεις με πειραματικές μετρήσεις

Γραφικές λύσεις καυστήρα παροχής **160 Lt/h**:

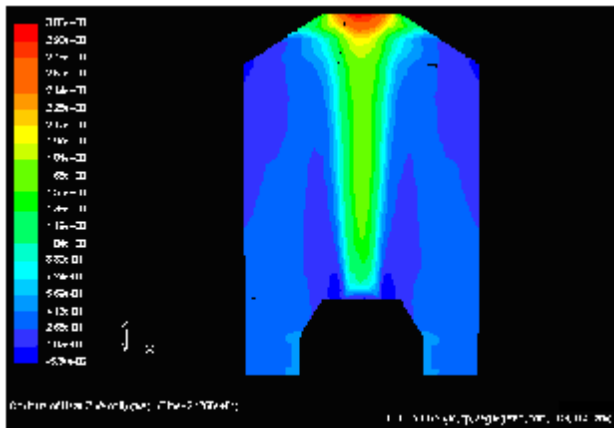
ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ:



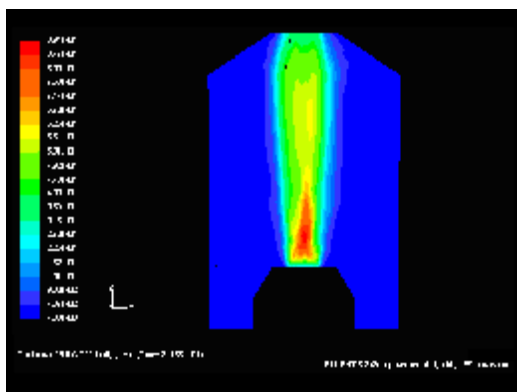
RMS ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ:



ΜΕΣΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΣΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ:

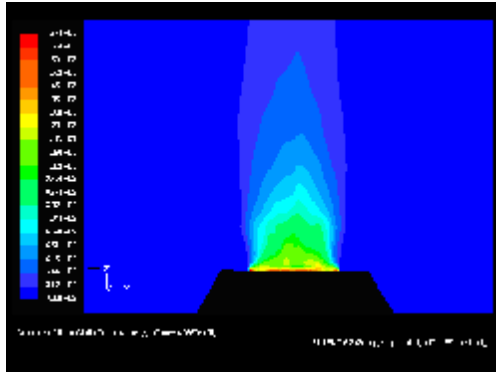


RMS ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΣΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ:

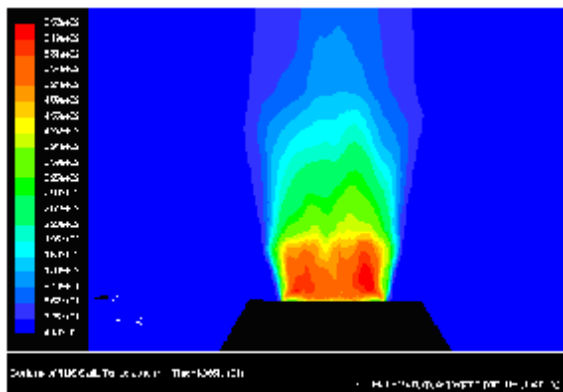


Γραφικές λύσεις καυστήρα παροχής 225 Lt/h:

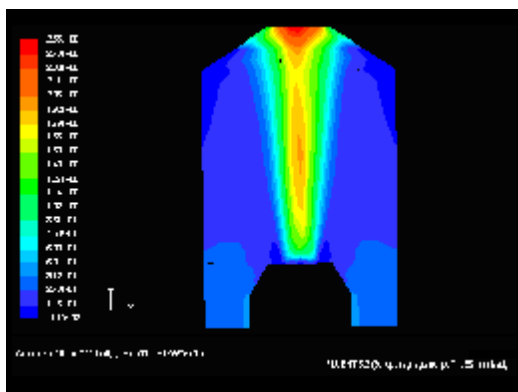
ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ:



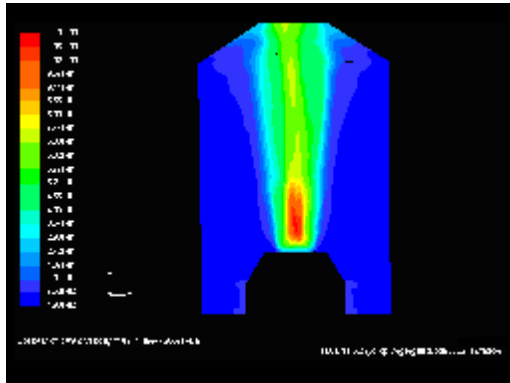
RMS ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ:



ΜΕΣΕΣ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΣΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ:



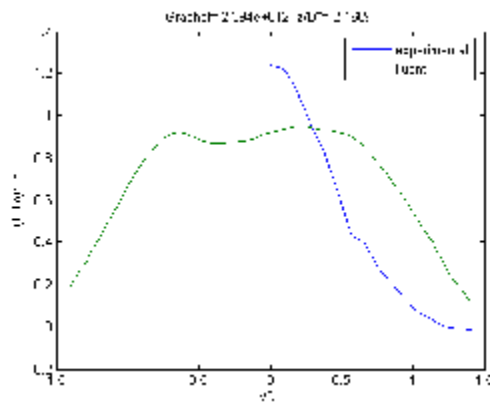
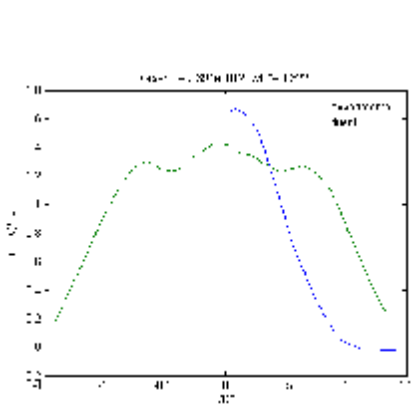
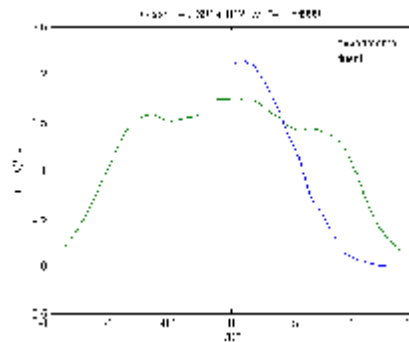
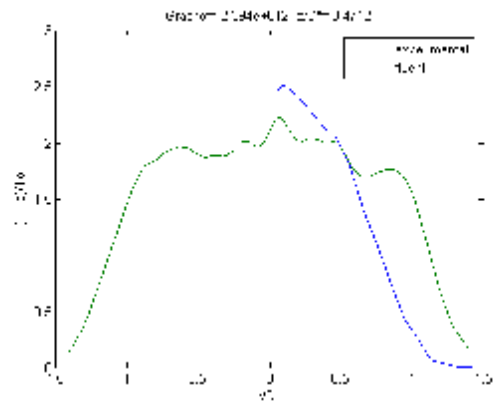
RMS ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΣΤΟΝ Ζ ΑΞΟΝΑ:

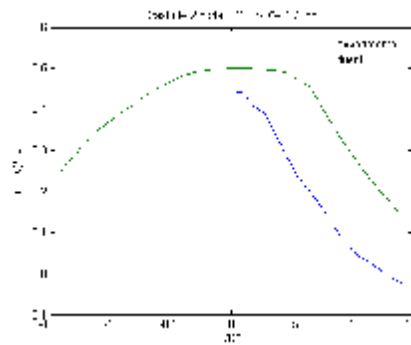
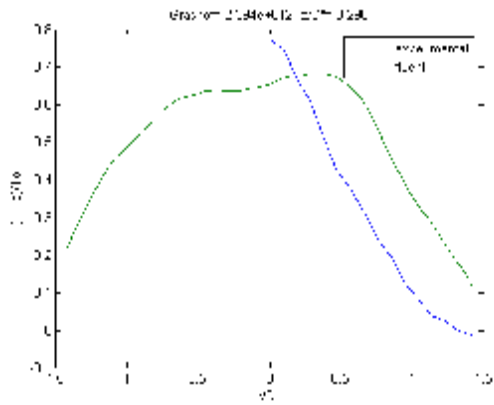


ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

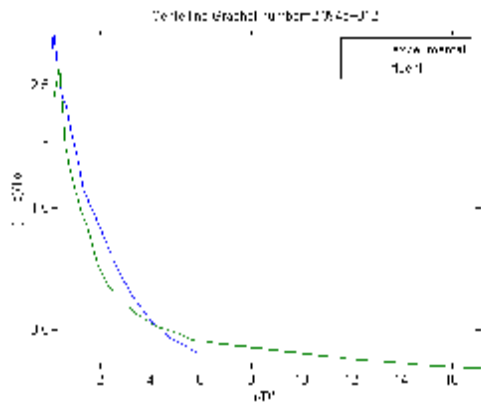
Διαγράμματα για παροχή καυσίμου 160 Lt/h

Προφίλ μέσων θερμοκρασιών:

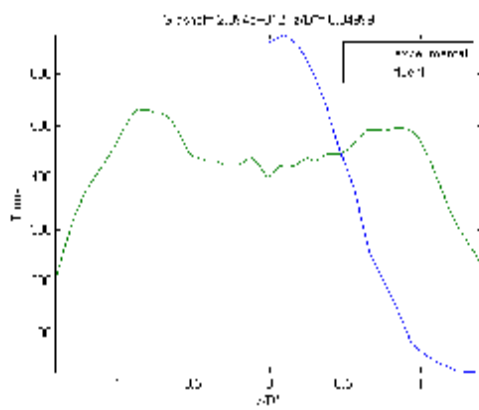
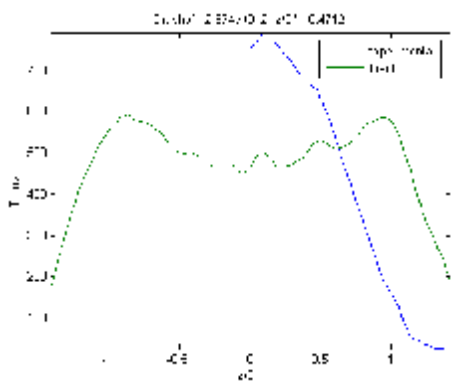


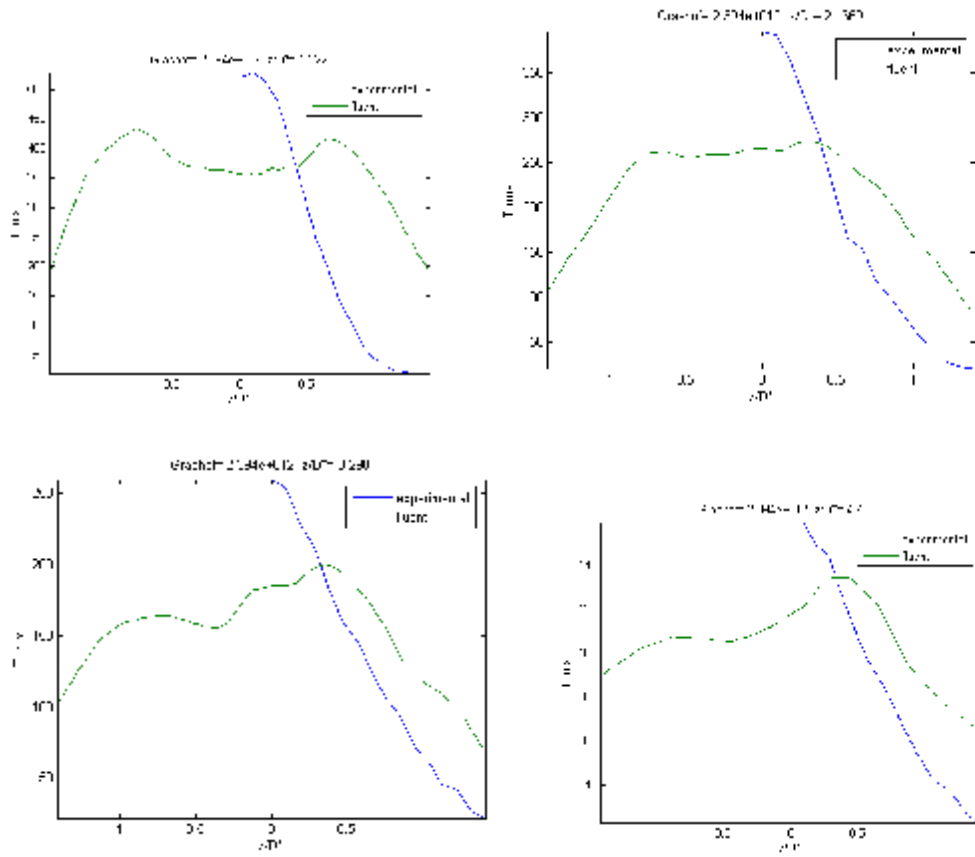


Διάγραμμα αξονικής γραμμής μέσων θερμοκρασιών (CENTERLINE):

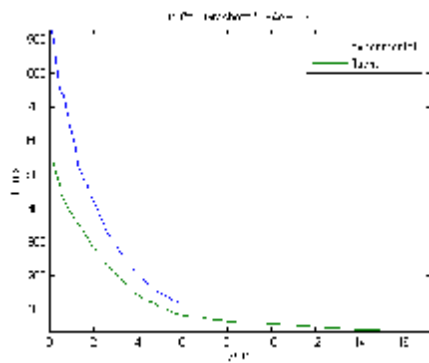


Προφίλ τυρβώδους θερμοκρασίας RMS:

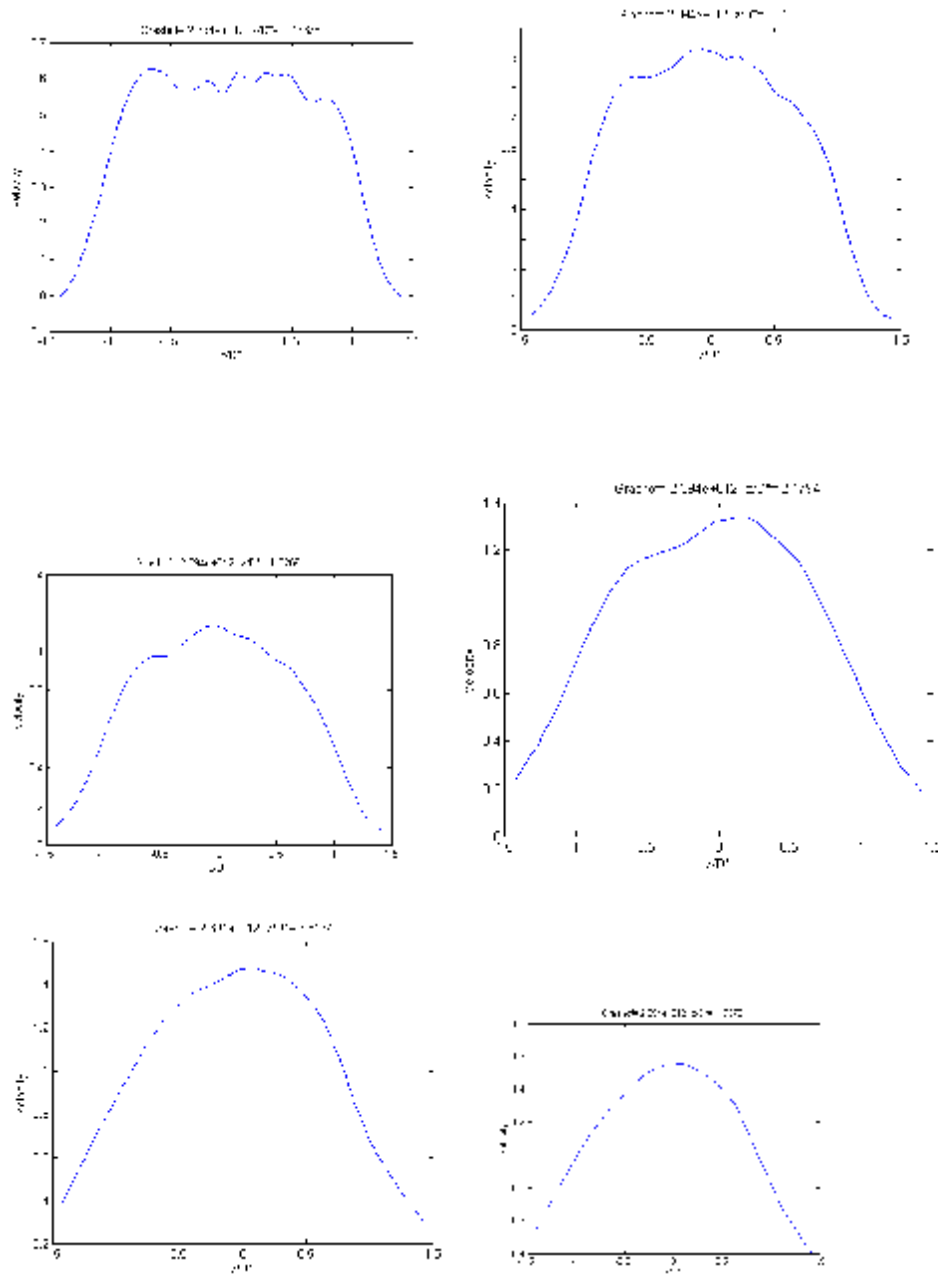




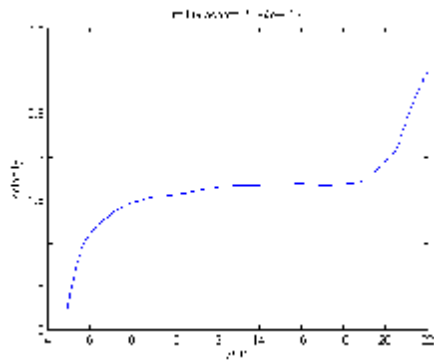
Διάγραμμα αξονικής γραμμής θερμοκρασιών RMS (CENTERLINE):



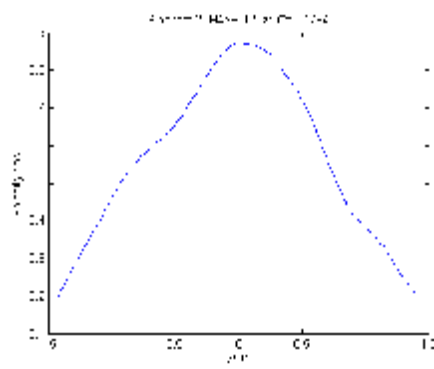
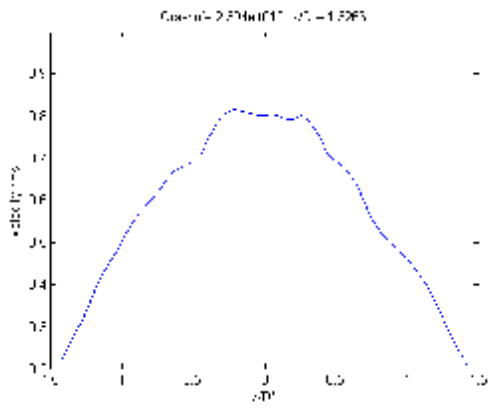
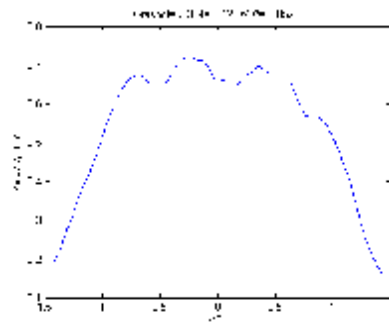
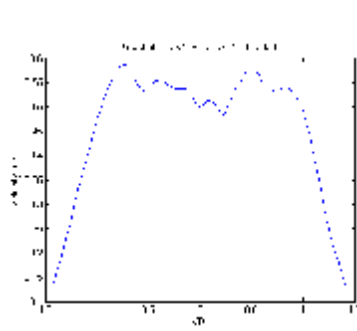
Προφίλ μέσων ταχυτήτων:

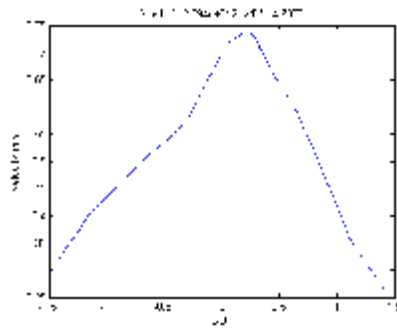
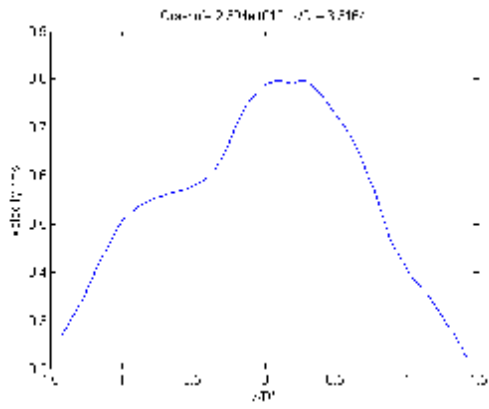


Διάγραμμα αξονικών Ταχυτήτων (CENTERLINE):

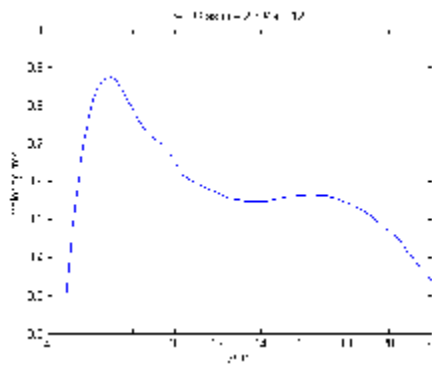


Προφίλ Ταχυτήτων RMS:



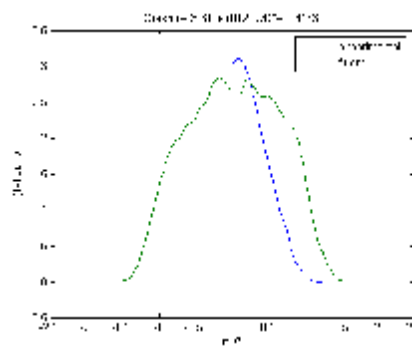
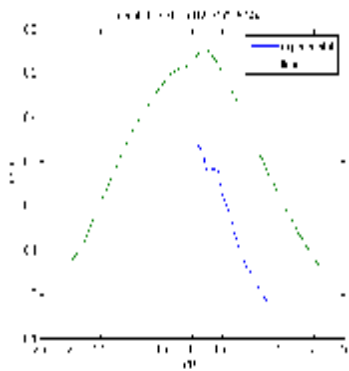


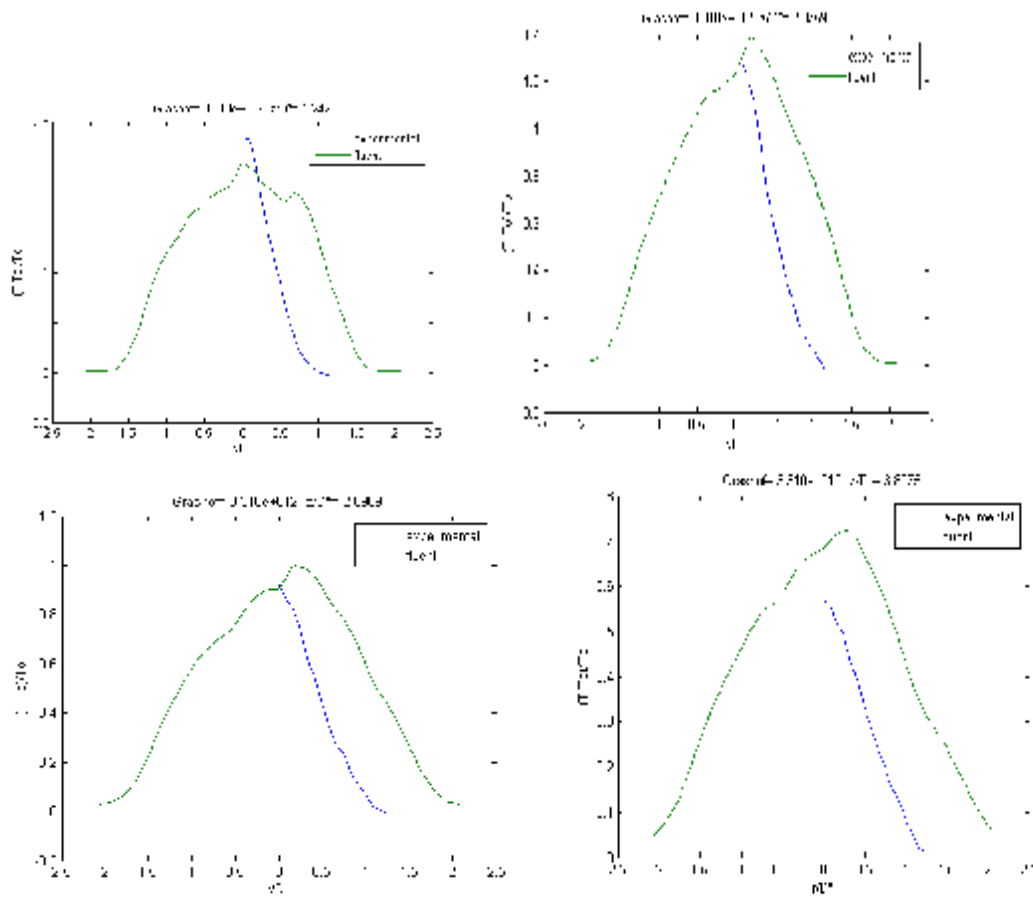
Διάγραμμα αξονικών Ταχυτήτων RMS (CENTERLINE):



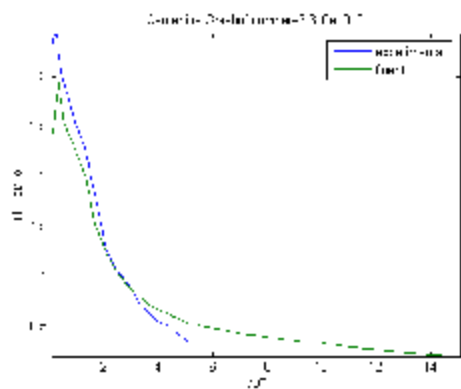
Διαγράμματα για παροχή καυσίμου **225 Lt/h**

Προφίλ μέσων θερμοκρασιών:

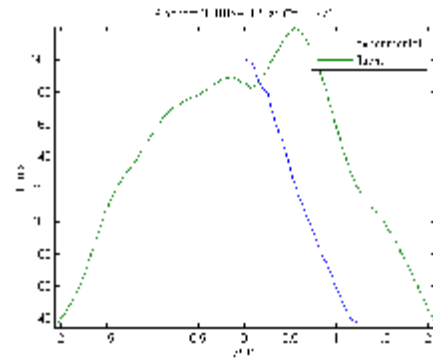
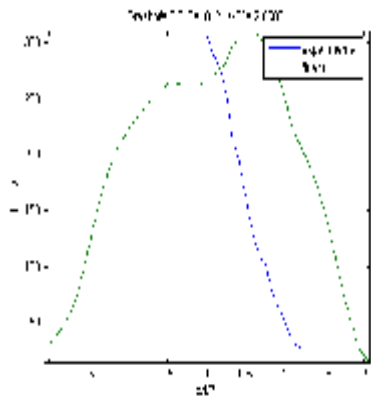
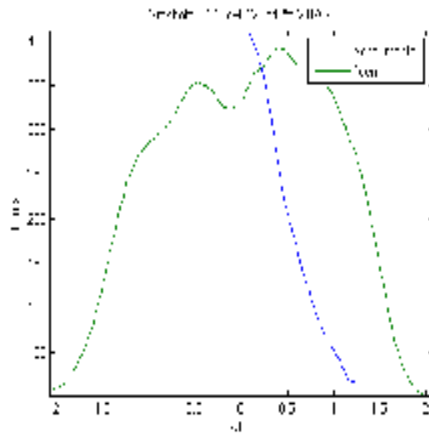
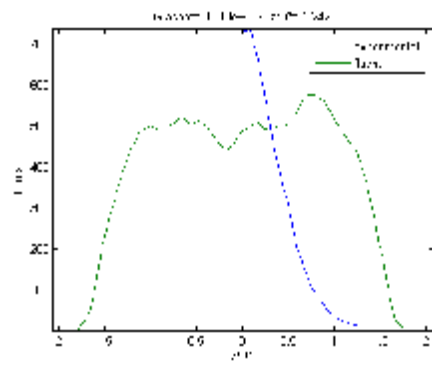
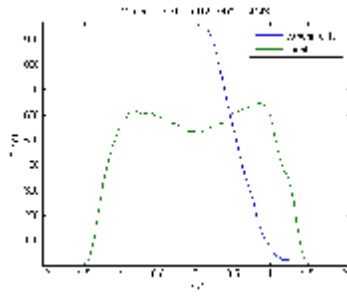
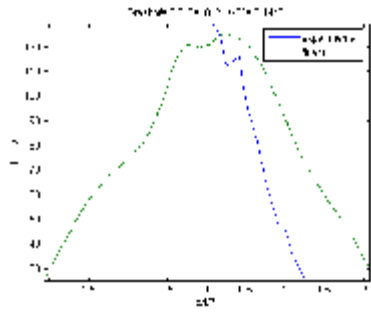




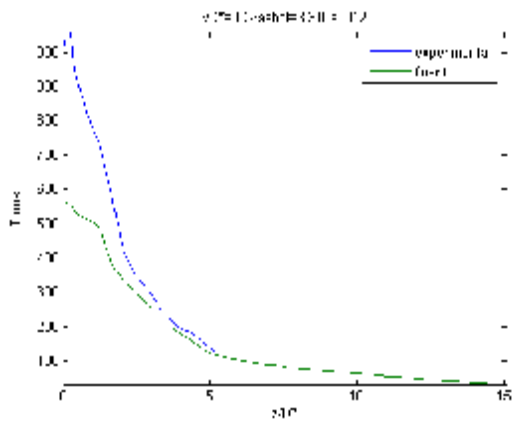
Διάγραμμα αξονικής μέσης θερμοκρασίας (CENTERLINE):



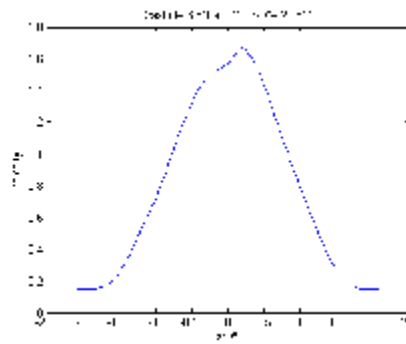
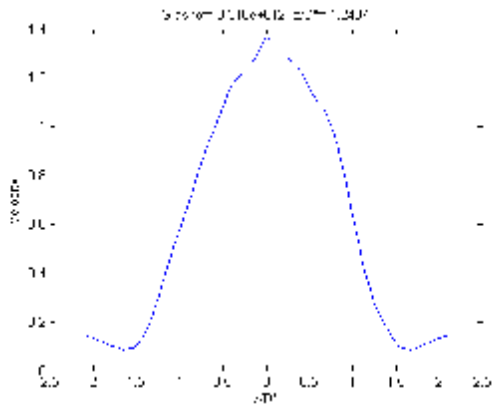
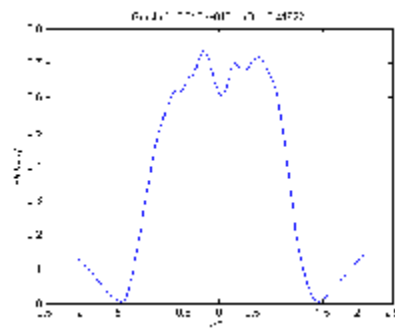
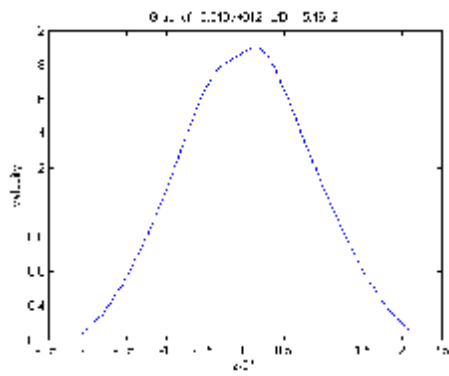
Προφίλ τυρβωδών θερμοκρασιών RMS:

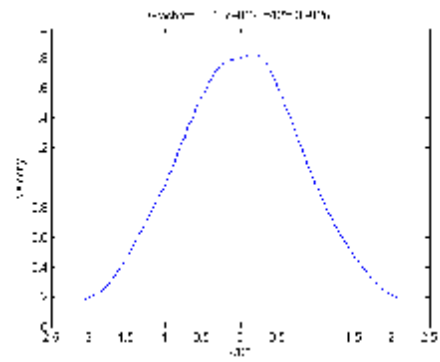
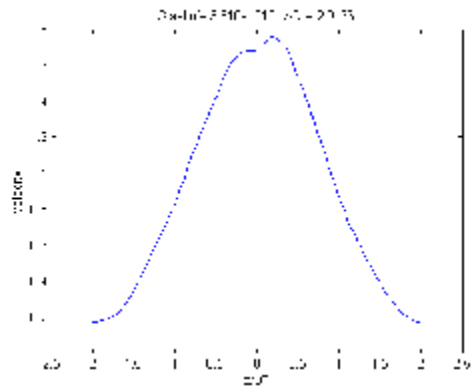


Διάγραμμα αξονικών τυρβωδών θερμοκρασιών RMS (CENTERLINE):

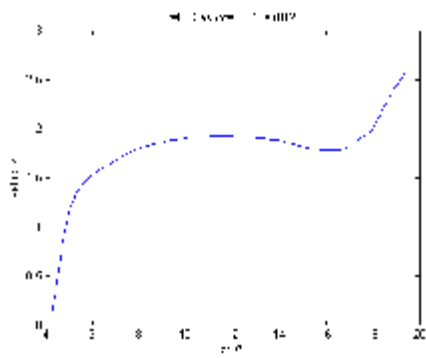


Προφίλ μέσωσ ταχυτήτων:

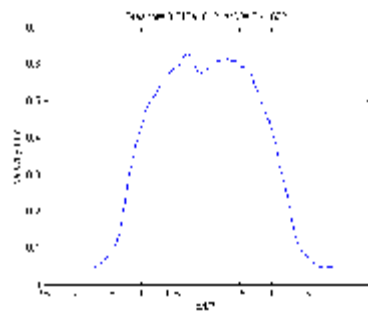
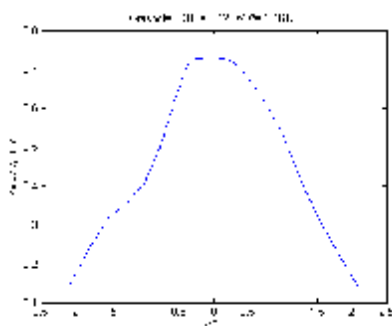


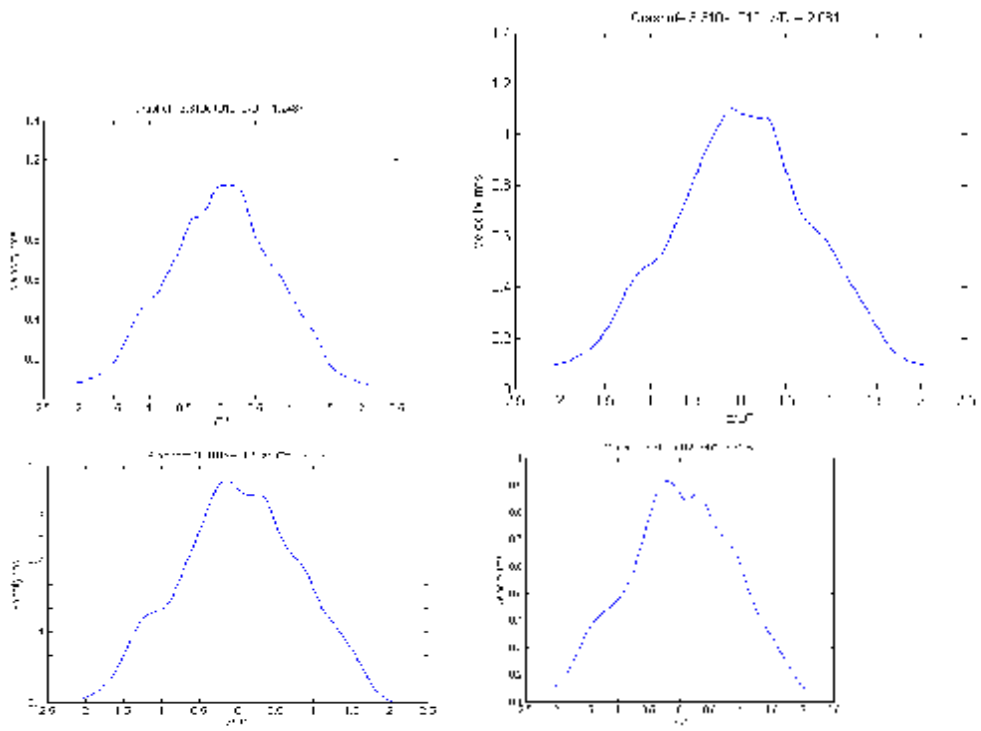


Διάγραμμα αξονικών μέσων ταχυτήτων (CENTERLINE):

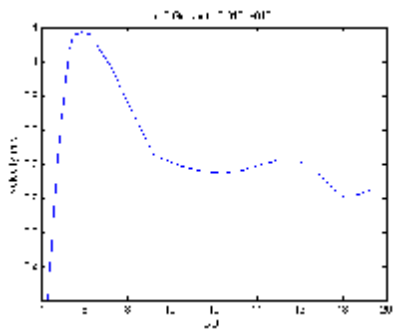


Προφίλ ταχυτήτων RMS:





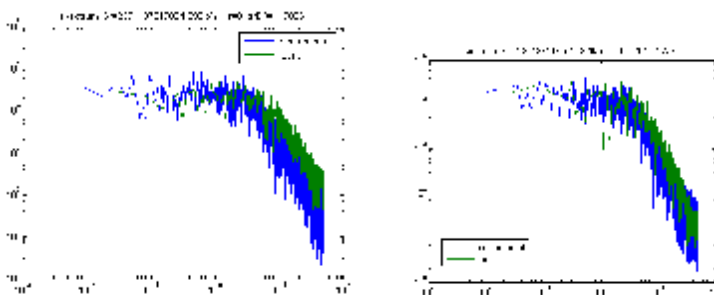
Διάγραμμα αξονικών ταχυτήτων RMS (CENTERLINE):



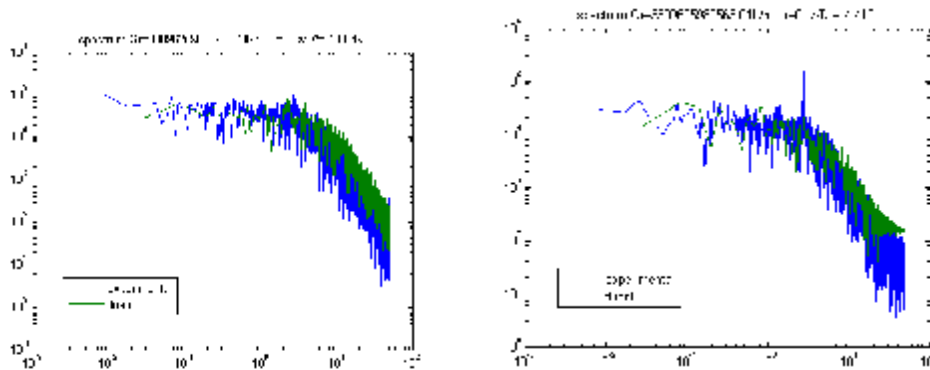
Φάσματα Ισχύος

Το φάσμα ισχύος δίνει πληροφορίες για την ενέργεια που έχει σε μια ορισμένη συχνότητα ή μήκος κύματος, ένα κύμα ή μια δίνη. Έτσι περνώντας από συνάρτηση χρόνου σε συνάρτηση συχνοτήτων, είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για την κατανομή της ενέργειας στις δίνες, καθώς και για τον ρυθμό με τον οποίο την ανταλλάσσουν. Στα παρακάτω φάσματα ισχύος υπάρχουν οργανωμένες κινήσεις στο ροϊκό πεδίο που δημιουργούν έντονα μέγιστα στην συχνότητα 1,8. Εμφανίζονται επίσης στις διπλάσιες και τριπλάσιες αρμονικές συχνότητες των βασικών, μικρότερες κορυφές, οι οποίες γίνονται ασθενέστερες αυξανόμενης της απόστασης από τον καυστήρα. Σε αυτή την συχνότητα δημιουργούνται ανωστικοί στρόβιλοι εισροής στις εξωτερικές πλευρές του πλουμίου και επαγόμενες από αυτές θερμές ανωστικές δομές από την βάση της φλόγας. Καθώς ανεβαίνουμε σε υψηλότερα σημεία παρατηρούμε ότι το μέγιστο του φάσματος στην συχνότητα 1,8 μειώνεται που σημαίνει ότι μειώνεται και η ισχύς του. Παράλληλα, βλέπουμε μια βαθμιαία ανάπτυξη πολλαπλών μικρότερων κορυφών σε μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες συχνότητες. Η εξέλιξη αυτή των φασμάτων αντικατοπτρίζει τα φυσικά φαινόμενα, δηλαδή τους μηχανισμούς ανταλλαγής ενέργειας, μίξης και διάχυσης των δομών σ' αυτή την περιοχή του πλουμίου. Τα φάσματα ισχύος της προσομοίωσης έχουν σχεδόν την ίδια μορφή με αυτά των πειραματικών μετρήσεων παρόλο που τα τελευταία εμφανίζουν μέγιστη συχνότητα στο 2,5 .

Για παροχή **160 Lt/h**:



Για παροχή 225 Lt/h:



Συμπεράσματα:

Συγκρίνοντας τα παραπάνω διαγράμματα, μπορούμε να δούμε ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων τα θεωρητικά αποτελέσματα, συγκλίνουν προς τα πειραματικά. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες δυνατότητες που προσφέρει η σωστή χρήση του υπολογιστικού προγράμματος FLUENT. Έχοντας επομένως, στη διάθεσή μας το συγκεκριμένο πρόγραμμα μπορούμε να αντιμετωπίσουμε ποικίλα και πολύπλοκα προβλήματα, αποφεύγοντας τις δυσκολίες κατασκευής και το χάσιμο χρόνου. Η σωστή μοντελοποίηση απαιτεί μεγάλη εμπειρία προκειμένου να επιτύχει κανείς το βέλτιστο αποτέλεσμα. Το παραπάνω μοντέλο επίλυσης τυρβώδους ανωστικής φλόγας, σε γενικές γραμμές, μας έδωσε εξαιρετικά αποτελέσματα σε σχέση με τα πραγματικά. Η μόνη διαφοροποίηση παρατηρήθηκε στην βάση της φλόγας, όπου υπάρχει μια θερμοκρασιακή διαφορά της τάξης των (100-150) K.

Παρατηρώντας κανείς τα διαγράμματα CENTERLINE των θερμοκρασιών, οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται. Συνεπώς η χρήση του υπολογιστικού προγράμματος FLUENT βοήθησε σε πάρα πολύ μεγάλο βαθμό, να γίνει πολύ καλή προσομοίωση της λιμνώδους πυρκαγιάς, και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά της σε εργαστηριακές συνθήκες.

5.3 ΛΙΜΝΩΔΕΙΣ ΦΛΟΓΕΣ

Μια λιμνώδης φλόγα έχει ενδιαφέρον και σε θεωρητικό αλλά και σε πρακτικό επίπεδο, διότι είναι μια από τις σημαντικότερες μορφές καύσης που συναντάμε στις μέρες μας (πυρκαγιές). Σύμφωνα με τον Joulain (1998), μια λιμνώδης φλόγα με ελεύθερη μετάφραση μπορεί να οριστεί ως η φυσική καύση ενός καυσίμου που εκρέει από μια επίπεδη επιφάνεια (όπως συμβαίνει στην περίπτωση καύσης υγρών καυσίμων πάνω στο πάτωμα ενός δωματίου ή στην περίπτωση ανοικτών δεξαμενών αποθήκευσης καυσίμων).

Χαρακτήρας και Δομή των Λιμνωδών Φλογών

Πολλά συνηθισμένα σενάρια που συμβαίνουν στην καθημερινή μας ζωή μπορούν να προσδιοριστούν ως λιμνώδεις φλόγες. Αυτά περιλαμβάνουν φωτιές που ποικίλουν σε μέγεθος όπως την περίπτωση ενός κοινού αναπτήρα, όπου η διάμετρος επιφανείας του είναι της τάξεως των 10^{-3} m, μέχρι και την περίπτωση ενός καιγόμενου δάσους, όπου η διάμετρος είναι αρκετά μεγάλη της τάξεως των 10^5 m. Μια λιμνώδης φωτιά καθορίζεται από την υπερκείμενη φλόγα διάχυσης στην οποία το καύσιμο εκρέει από επίπεδο καυστήρα. Αν και ο όρος “λιμνώδης” μας φέρνει στην σκέψη ότι αυτού του είδους η φλόγα προϋποθέτει την χρήση υγρών καυσίμων, παρ’ όλα αυτά το καύσιμο μπορεί να είναι ακόμα και αέριο ή στερεό. Η βασική παράμετρος που ουσιαστικά κυριαρχεί στην κατηγορία αυτή των φλογών είναι ότι η εκρέουσα ταχύτητα του καυσίμου είναι σχεδόν μηδενική (όπως παρατηρείται στα υγρά και στερεά καύσιμα), καθώς και ότι η είσοδος του οξειδωτή και η τελική του ανάμειξη με το καύσιμο πραγματοποιείται στο επίπεδο εκροής του καυσίμου.

Πέρα από τις φανερές διαφορές που μπορεί να υπάρχουν στην κλίμακα του χώρου καύσης, μια καταστροφική φωτιά μπορεί να χαρακτηριστεί από τους όρους της χημικής κινητικής του καυσίμου όπως:

- την αντίστασή του στην καταστολή
 - το σημείο έναυσής του
 - την ικανότητά του για διατήρηση της φλόγας σε χαμηλές θερμοκρασίες
- ή και από τους ορούς της μετάδοσης θερμότητας κατά την διάρκεια της καύσης όπως:
- ο ολικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας
 - ο ρυθμός εξάπλωσης της φλόγας

- η ισχύς που ακτινοβολείται προς το περιβάλλοντα χώρο
- Όροι που μπορούν να τροποποιήσουν την εξάπλωση της φωτιάς είναι συνήθως εξωτερικοί παράγοντες όπως:
- η απουσία ή η παρουσία εξωτερικού τοιχώματος
 - η παρουσία μιας θερμής επιφάνειας
 - ο άνεμος
 - ρεύματα αέρα
 - ο εξαερισμός χώρων

Όλοι αυτοί οι παράγοντες παίζουν κυρίαρχο ρόλο και στην ακριβή δομή και την κατεύθυνση της φωτιάς, καθώς και στο μέγεθος της καταστροφής που ενδεχομένως θα προκαλέσει.

Μπορεί στην κατηγορία αυτή των φλογών να εντάσσουμε μια πληθώρα φυσικών φαινομένων, όμως οι μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας καθώς και η ζώνη ενδιαφέροντος διαφέρει από φλόγα σε φλόγα, ανάλογα με την γεωμετρία του καυστήρα καθώς επίσης και το χρησιμοποιούμενο καύσιμο.

Σχήμα και Χαρακτήρας Λιμνώδους Φλόγας

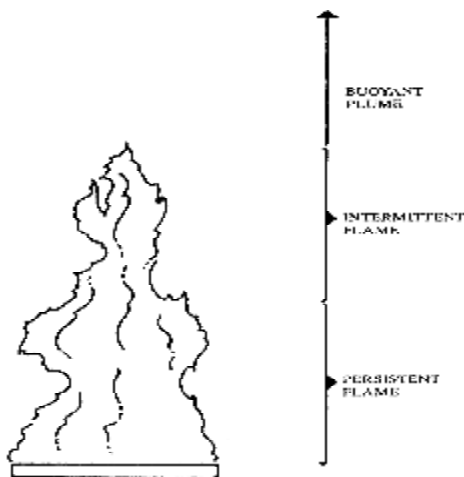
Όταν ο συνολικός ρυθμός της καύσης μιας φλόγας ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή, η ροή παύει να είναι στρωτή. Καθώς ο ρυθμός καύσης συνεχίζει και αυξάνεται, το ροϊκό πεδίο αλλάζει από ανωστικό σε πεδίο που κυριαρχούν οι δυνάμεις αδρανείας.

Ατυχήματα πυρκαγιών που έχουν προκληθεί από υγρά καύσιμα που από απροσεξία έπεσαν στο δάπεδο, οδήγησαν στην δημιουργία λιμνώδους φωτιάς, στην οποία κυριαρχούσαν οι έντονες ανωστικές δυνάμεις και το έντονα τυρβώδες πεδίο. Ίναι κοινώς αποδεκτό ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός παροχής του καυσίμου τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός εκπομπής θερμότητας και μεγαλύτερο το ύψος της φλόγας. Το μοντέλο προσομοίωσης του Froude για τις λιμνώδεις πυρκαγιές υποστηρίζει, ότι η αναλογία των δυνάμεων αδρανείας προς τις ανωστικές δυνάμεις είναι το κλειδί στην προσομοίωση των δυναμικών ροών που αναμένουμε να έχουν οι λιμνώδεις φλόγες, ενώ η χημική κινητική του καυσίμου παίζει δευτερεύοντα ρόλο. Έχοντας ως υπόβαθρο το μοντέλο αυτό, όλοι οι μεταγενέστεροι μελετητές ανέπτυξαν απλούστερα υπομοντέλα ότι

αφορά το ύψος της φλόγας, την περιοδικότητά της και τους ρυθμούς καύσης του καυσίμου στις λιμνώδεις πυρκαγιές.

Ο McCaffrey (1979) παρατήρησε ότι η ορατή δομή μιας τυρβώδους ανωστικής φλόγας υπεράνω ενός επίπεδου τετραγωνικού καυστήρα πλευράς 30 cm αποτελείται από τρεις διακριτές περιοχές:

- η κατώτερη περιοχή υπεράνω της επιφάνειας του καυστήρα, όπου παρατηρείται η συνεχής φλόγα και μια επιταχυνόμενη ροή των καιγόμενων αερίων (ζώνη πλούσιου πυρήνα καυσίμου)
- η ενδιάμεση περιοχή στην οποία παρατηρείται μια περιοδικά ασυνέχεια της φλόγας και μια σχεδόν σταθερή ταχύτητα της ροής (καθώς και εμφάνιση φλογιδίων αποκομμένων από την κυρίως φλόγα)
- και το ανωστικό πλούμιο το οποίο χαρακτηρίζεται από μείωση της ταχύτητας και της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το ύψος (συμπεριφορά ασθενώς ανωστική).



Εικόνα 1: Οι τρεις περιοχές της λιμνώδους φλόγας όπως τις παρατήρησε ο McCaffrey

Η περιοχή του πλούσιου από καύσιμο πυρήνα (κατώτερη ζώνη) και η περιοχή του ανωστικού πλουμίου μπορούν να θεωρηθούν ως ανενεργές ζώνες σε ότι αφορά τις χημικές αντιδράσεις, επειδή η πλειονότητα της θερμικής έκλυσης πραγματοποιείται στην ενδιάμεση ζώνη μεταξύ των δύο. Η περιοχή του πλούσιου από καύσιμο πυρήνα, παρατηρείται πάνω από την επιφάνεια του καυστήρα λόγω του ότι δεν έχει προλάβει ικανή ποσότητα οξυγόνου να διεισδύσει στο κέντρο του με αποτέλεσμα στην συγκεκριμένη θέση να έχουμε και μικρότερες θερμοκρασίες φλόγας,

καθώς και φαινόμενα πυρόλυσης. Η περιοχή αυτή εκτείνεται μέχρι και το 20% του μέσου ύψους της φλόγας. Υπεράνω της ζώνης του πλούσιου σε καύσιμο πυρήνα όπου εκτείνεται η διακοπτόμενη περιοχή της φλόγας (ενδιάμεση ζώνη), εξαναγκάζεται λόγω της ροής η είσοδος του αέρα κάθετα στην φλόγα. Θερμότητα εκλύεται καθώς τα παραπροϊόντα της πυρόλυσης αντιδρούν με τον εισερχόμενο αέρα και οδηγούν σε υποπροϊόντα, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και τα σωματίδια όπως αιθάλη, αλλά και προϊόντα όπως οι ατμοί του νερού και το διοξείδιο του άνθρακα. Στην περιοχή του πλουμίου της φλόγας οι χημικές αντιδράσεις μειώνονται εκθετικά καθώς η θερμοκρασία ελαττώνεται και μεγάλοι όγκοι κρύου αέρα εισρέουν μέσα (μηχανισμός εισροής). Μικρές ποσότητες υποπροϊόντων όπως αιθάλη ή CO μπορούν να διαφύγουν από την ενδιάμεση ζώνη προς την περιοχή του πλουμίου όπου οι χαμηλές θερμοκρασίες δεν επιτρέπουν την περαιτέρω οξείδωσή τους.

Η δομή και το σχήμα των φλογών είναι σημαντική για την κατανόηση του μικρού πεδίου επιφανείας τους που συνεισφέρουν στην θερμότητα λόγω ακτινοβολίας. Γενικότερα το σχήμα της φλόγας αλλάζει με χρονική περιοδικότητα. Στις τυρβώδεις φλόγες το σχήμα είναι κωνικό, με βάση το επίπεδο της επιφάνειας εκροής του καυσίμου και κορυφή το ορατό ύψος της φλόγας. Εμπειρικά αποτελέσματα από τους Orloff και de Ris έδειξαν ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του μέσου χρόνου του σχήματος της φλόγας για μια πληθώρα μέσης διαμέτρου καυστήρες (από 0.1 μέχρι 0.7 m), καθώς και τύπους καυσίμου και ρυθμούς παροχής μάζας καυσίμου. Η έκφραση της σχέσης τους παράγει μια υπερβολική καμπύλη η οποία αντιγράφει ουσιαστικά και την μορφή των ορίων του φακέλου της φλόγας, όπως παρατηρείται και στην πραγματικότητα.

Η δομή της φλόγας στις λιμνώδεις φλόγες καθορίζεται κυρίως από τον αδιάστατο αριθμό του Froude (Fr) ο οποίος καθορίζεται και από τον λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις ανωστικές δυνάμεις :

$$Fr = \frac{V^2}{L * g}$$

όπου :g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s²), V: η ταχύτητα εκροής από τον καυστήρα, L: το χαρακτηριστικό μήκος (συνήθως είναι η διάμετρος της επιφανείας του καυστήρα)

Για αριθμούς Fr >> 1 το πεδίο της ροής χαρακτηρίζεται αδρανειακό, ενώ για Fr << 1 το πεδίο χαρακτηρίζεται ως ανωστικό.

Το Ύψος της Φλόγας

Το ύψος και το σχήμα της φλόγας έχουν ουσιαστικές επιπτώσεις στο μέγεθος της καταστροφής που μπορεί να προκαλέσει μια φωτιά. Σε ένα κλειστό χώρο, η έκθεση ενός τοίχου σε άμεση μεταφορά θερμότητας από την φλόγα μπορεί να έχει δραματικές επιπτώσεις σε ότι αφορά τον χρόνο ανάφλεξης του. Το ύψος της φλόγας είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος, διότι η ακτινοβολούσα θερμότητα, η οποία εξαρτάται από το ύψος της, μπορεί να προκαλέσει ανάφλεξη σε ένα δευτερεύον αντικείμενο που βρίσκεται έξω από την εστία πυρκαγιάς.

Ο McCaffrey μελετώντας μια πληθώρα από διατριβές που ως σκοπό είχαν τον ορισμό του ύψους της φλόγας για διάφορα καύσιμα, διαμέτρους και διαμορφώσεις καυστήρων όρισε ως ύψος της φλόγας: **το ορατό δια γυμνού οφθαλμού μήκος μέχρι την άκρη της αιχμής της.**

Το Πλούμιο

Ο Morton (1965) ήταν ο πρώτος που εισήγαγε τον όρο «πλούμιο», για να περιγράψει ολόκληρη την τυρβώδη ανωστική στήλη που δημιουργείται όταν ατμοί καυσίμου καίγονται πάνω από μια πηγή στερεού ή υγρού καυσίμου. Σύμφωνα με τον συγγραφέα το πλούμιο μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές:

- **την κατώτερη περιοχή**, που περιέχει φλόγες διάχυσης, όπου οι θερμοκρασίες είναι υψηλές, η ακτινοβολία είναι σημαντική, και τα αέρια είναι ισχυρώς ανωστικά .
- **την ενδιάμεση περιοχή**, όπου οι θερμοκρασίες παραμένουν υψηλές, η φλόγα είναι χρονικά μεταβλητή, ενώ η ροή εξακολουθεί να είναι ισχυρώς ανωστική.
- **την υψηλότερη περιοχή**, όπου οι θερμοκρασίες έχουν μειωθεί σε επίπεδα τέτοια ώστε το πλούμιο να συμπεριφέρεται σαν ασθενώς ανωστικό.

Τα πλούμια διακρίνονται σε :

- **Ασθενή ανωστικά πλούμια** , τα οποία δημιουργούνται από ασθενής πηγές θερμότητας ή άλλες πηγές άνωσης .Οι μεταβολές της πυκνότητας θεωρούνται πολύ μικρές $\frac{D_r}{r_a} < 1$ και λαμβάνονται υπ' όψιν μόνο στον όρο άνωσης της εξίσωσης της ορμής .
- **Ισχυρώς ανωστικά πλούμια** , τα οποία δημιουργούνται από πολύ θερμές πηγές , οι δε μεταβολές στην πυκνότητα είναι σημαντικές και δεν μπορούν να αγνοηθούν στις εξισώσεις.

Εντούτοις, ο μηχανισμός εισροής μειώνει γρήγορα την άνωση και τα ισχυρώς ανωστικά πλούμια αποκτούν σε μικρό ύψος ασθενώς ανωστική συμπεριφορά.

Βασικές παράμετροι της ροής του πλουμίου

Η ροή γενικά σε μια ανωστική φλέβα (buoyant jet) επηρεάζεται από τις αδρανειακές, τις ανωστικές και τις δυνάμεις ιξώδους. Ο τοπικός χαρακτήρας της ροής, δηλαδή αν η ροή συμπεριφέρεται σαν φλέβα, σαν φλέβα σε μετάβαση σε πλούμιο, ή σαν καθαρό πλούμιο, προσδιορίζεται από την σχετική βαρύτητα αυτών των δυνάμεων σε κάθε σημείο της ροής. Ο συνολικός χαρακτήρας της ροής εξαρτάται από την ισχύ αυτών των δυνάμεων στην πηγή της φλέβας και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

- **στην καθαρή φλέβα**, το ρευστό κινείται εξαιτίας των δυνάμεων αδράνειας και η ροή χαρακτηρίζεται από τον αριθμό Reynolds της πηγής.

$$Reynolds = \frac{Dυνάμει Vαδρ άνει aV}{Dυνάμει VxώδουV}$$

$$Re = \frac{V_o * D}{\nu}$$

- **στην ανωστική φλέβα**, το ρευστό κινείται υπό την επίδραση και των δυνάμεων αδράνειας και των ανωστικών δυνάμεων. Οι ανωστικές δυνάμεις χαρακτηρίζονται από τον αριθμό Grashof

$$Grashof = \frac{Dυνάμει VάνwshV}{Dυνάμει VxώδουV}$$

$$Gr = \frac{g * b * DT * x^3}{\nu^2}$$

$$Gr = \frac{g * (r_a - r_o) * D^3}{r_o * \nu^3}$$

ωστόσο, επειδή η ροή στην ανωστική φλέβα δεν περιγράφεται από το απόλυτο μέγεθος των δυνάμεων που επιδρούν σε αυτήν, αλλά από την μεταξύ τους σχέση, η παράμετρος που χαρακτηρίζει την ροή είναι ο λόγος των αδρανειακών προς τις ανωστικές δυνάμεις που ορίζει τον αδιάστατο αριθμό Froude

$$Froude = \frac{\text{Dυνάμει Vadr άνει aV}}{\text{Anwst iké Vdunάμει V}}$$

$$Fr = \frac{\bar{V}_o}{\sqrt{g * D * \frac{(r_a - r_o)}{r_o}}}$$

στην βιβλιογραφία αντί του αριθμού Froude χρησιμοποιείται συχνά και ο αριθμός Richardson , ο οποίος είναι ο αντίστροφος του Froude εις το τετράγωνο :

$$R = \frac{\frac{(r_a - r_o)}{r_o} * g * D}{\bar{V}_o^2} = \frac{1}{Fr^2}$$

- **στα καθαρά πλούμια** , το ρευστό κινείται υπό την επίδραση μόνο των ανωστικών δυνάμεων και η ροή περιγράφεται από τον αριθμό Grashof. Η ανωστική δύναμη του πλουμίου χαρακτηρίζεται από το «έλλειμμα βάρους» W, όπου

$$W = 2g \bar{Q} (r_a - r) * \bar{V} dx$$

- **σε πλούμια στα οποία η διαφορά πυκνότητας δημιουργείται από την θερμοκρασιακή διαφορά**, και το ρευστό μπορεί να θεωρηθεί σαν ιδανικό αέριο, η πυκνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας, όπως προκύπτει από την καταστατική εξίσωση :

$$\frac{\rho_a - \rho}{\rho} = \frac{\bar{T} - T_a}{T_a}$$

σε αυτή την περίπτωση το W μπορεί να γραφεί συναρτήσει της ροής θερμότητας Q ως εξής :

$$W = \frac{Q^* g}{C_p^* T_a}$$

$$\text{όπου } Q = 2 \int_0^R C_p^* r^* (\bar{T} - T_a)^* \bar{V} dx$$

για ιδανικά αέρια και για σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος τα W και Q είναι ανεξάρτητα της απόστασης από την πηγή .Όπου : D διάμετρος καυστήρα, Gr αριθμός Grashof, St αριθμός Strouhal, R αριθμός Richardson, Q εκλυόμενο ποσό θερμότητας ανά μονάδα μήκους και χρόνου, W ποσότητα που χαρακτηρίζει την ανωστική ισχύ, V στιγμιαία ταχύτητα στην διεύθυνση Z , \bar{V} μέση στον χρόνο ταχύτητα στην διεύθυνση Z , T στιγμιαία θερμοκρασία, \bar{T} μέση στον χρόνο θερμοκρασία, T_a θερμοκρασία περιβάλλοντος, ρ πυκνότητα του ρευστού, ρ_a πυκνότητα του περιβάλλοντος αέρα, ρ_0 πυκνότητα του ρευστού στην έξοδο του καυστήρα.

Στη βιβλιογραφία, αλλά και στην παρούσα εργασία, όταν είναι γνωστή η θερμότητα Q που εκλύεται από την πηγή χρησιμοποιείται για τον αριθμό Grashof η έκφραση:

$$Gr_{D,Q} = \frac{D^3 W}{r \eta^3}$$



Εικόνα 2: Δισδιάστατο πλούμιο.

Ρυθμός Έκλυσης Θερμότητας στις Φλόγες Διάχυσης

Υπάρχουν μεγάλες διαφορές στην ακτινοβολούσα θερμότητα των φλογών ανάλογα με την σύνθεση του καυσίμου που χρησιμοποιούμε. Για παράδειγμα οι φλόγες του αναδύουν από την καύση της μεθυλικής αλκοόλης δεν περιέχουν σωματίδια αιθάλης και εμφανίζουν χρώμα μπλε. Οι φλόγες του καιγόμενου H_2 δεν είναι καν ορατές. Σε αντίθεση με τα παραπάνω καύσιμα οι φλόγες των υδρογονανθράκων είναι εξαιρετικά φωτεινές, εξ' αιτίας των σημαντικών συγκεντρώσεων σε σωματίδια αιθάλης που εκλύουν. Τα σωματίδια αυτά ακτινοβολούν με αποτέλεσμα σε εμάς να είναι ορατό ένα χρώμα κιτρινόμαυρο. Τα αέρια σωματίδια όπως διοξείδιο του άνθρακα, νερό, μονοξείδιο του άνθρακα (σε μικρότερες ποσότητες) καθώς και τα παραπροϊόντα υδρογονανθράκων εκλύουν υπεριώδεις ακτινοβολίες κατά την καύση υδρογονανθράκων, αλλά η ορατή ακτινοβολία που εκπέμπει η αιθάλη υπερκαλύπτει όλες τις υπόλοιπες. Για μερικά καύσιμα, καθώς η παροχή μάζας του καιγόμενου καυσίμου αυξάνει ο ρυθμός παραγωγής αιθάλης υπερκαλύπτει τον ρυθμό οξειδώσής της, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται δια μέσου της ανωστικής δύναμης της φλόγας προς τα τοιχώματα και να προσκολλάται πάνω σε αυτά. Αν πάλι η παραγωγή κάπνας είναι πολύ μεγάλη, τότε η ακτινοβολία της φλόγας θα μπλοκαρισθεί με αποτέλεσμα η κλασματική αναλογία της ακτινοβολίας να ελαττωθεί. Πέρα από τις φασματικές διαφορές, η ακτινοβολούσα ισχύς διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του καυσίμου ακόμα και για την ίδια θερμική έκλυση, (\dot{Q}). Αυτό σημαίνει ότι οι απλές υποθέσεις που κάνουμε για να έχει ισχύ το μοντέλο του Froude θα πρέπει να τροποποιηθούν ανάλογα με τις χημικές επιδράσεις στην δομή της φλόγας.

Η ακτινοβολούσα ενέργεια από μια φλόγα είναι η ουσιαστική παράμετρος για να μπορέσουμε να κάνουμε ασφαλείς προβλέψεις για την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς. Το μέγεθος της ακτινοβολίας που μεταφέρεται στα αντικείμενα που βρίσκονται παρακείμενα της φλόγας, είναι υπεύθυνο για την πρόκληση νέας εστίας πυρκαγιάς επηρεάζοντας έτσι τους ρυθμούς εξάπλωσής της. Η επιστρέφουσα ακτινοβολία από την φλόγα προς την επιφάνεια εκβολής του καυσίμου, είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός επιστροφής της θερμότητας στις μεγάλες φλόγες ρυθμίζοντας και τον ρυθμό εξάτμισης στα υγρά καύσιμα.

Εκφράζοντας έτσι την θερμική ισορροπία που θα πρέπει να ισχύει για τις φλόγες διάχυσης μπορούμε να την αποδώσουμε με την ακόλουθη σχέση:

$$\dot{Q}_a = \chi_a \cdot \dot{Q} = \dot{Q}_r + \dot{Q}_c + \dot{Q}_s$$

όπου \dot{Q}_a ο πραγματικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας από τις χημικές αντιδράσεις, χ_a συντελεστής απόδοσης της καύσης, \dot{Q} ο θεωρητικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας, \dot{Q}_r ο ρυθμός της ακτινοβολούσας ενέργειας από υψηλής θερμοκρασίας αιθάλης και αέρια σωματίδια \dot{Q}_c , ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας δια μεταφορά από το ανωστικό πλούμιο προς τον περιβάλλοντα χώρο, \dot{Q}_s ο ρυθμός θερμότητας που επιστρέφει προς την επιφάνεια του καυσίμου. Ο θεωρητικός ρυθμός θερμότητας δίνεται από την σχέση:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot H_c$$

όπου: \dot{m} η παροχή μάζας σε (Kg/s), H_c : η θερμογόνο δύναμη του καυσίμου σε (MJ/Kg)

Διαιρώντας την σχέση με τον παράγοντα \dot{Q} προκύπτει η κάτωθι σχέση:

$$\chi_a = \chi_r + \chi_c + \chi_s$$

όπου: χ_s : το κλάσμα της επιστρέφουσας θερμότητας στην επιφάνεια του καυσίμου (λόγω ακτινοβολίας, μεταφοράς και αγωγιμότητας), χ_c : το κλάσμα της θερμικής απώλειας της φλόγας λόγω μεταφοράς, χ_r : το κλάσμα της θερμικής απώλειας από ακτινοβολία

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Σημειώσεις εργαστηρίου «Εξομοίωσης Ενεργειακών συστημάτων», ΤΕΙ Πάτρας, 2013.
2. Μαυρίδης Κωνσταντίνος, «Υπολογιστική μεταφορά Θερμότητας και Μάζας», Εκδόσεις ΙΩΝ, 2008.
3. Σημειώσεις εταιρίας SimTec, Software & Services, Θεσσαλονίκη, 2012.
4. Thierry Poinsot, “Theoretical and Numerical Combustion”, 2nd edition, Edwards Publishing, 2005.
5. K.K. Kuo, "Principles of combustion", Wiley, 1986
6. Σημειώσεις από τις Πανεπιστημιακές Παραδόσεις του Μαθήματος Θεωρία και Μοντελοποίηση Τυρβωδών Ροών υπό του Καθ. του Τμήματος Μηχ/γων και Αεροναυπηγών Δρ. Π. Κούτμου και του Δρ. Θ. Πανίδα
7. Σημειώσεις από τις Πανεπιστημιακές Παραδόσεις του Μαθήματος Καύση και Ρύποι υπό του Καθ. του Τμήματος Μηχ/γων και Αεροναυπηγών Δρ. Π. Κούτμου
8. S. Turns, “Introduction to combustion”, McGraw-Hill, 1996
9. R.A. Strehlow, "Fundamentals of Combustion ", Int. Textbook Company, 1968
10. D.B. Spalding, " Combustion and Mass Transfer", Pergamon, New York, 1965
11. R.B. Bird, W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, New York, 1960
12. J.O. Hinze, "Turbulence", McGraw-Hill Book Company, New York, 1975
13. H. Tennekes and J.C. Lumley, "A First Course in Turbulence", MIT Press, Cambridge, Mass., 1972
14. Σημειώσεις λογισμικού Fluent
15. P. Bradshaw, "Turbulence", Topics in Applied Physics, Vol. 12, Springer-Verlag, New York, 1976
16. E.R. Eckert and R.M. Drake, "Heat and Mass Transfer", McGraw-Hill, 1989
17. D. B. Spalding, “Combustion and Mass Transfer”, Pergamon Press, 1979
18. Peters, N. “Lectures on laminar and Turbulent combustion”, Ercoftac Summer School, September 1992, Aachen, Germany.
19. Pope, S.B., “Turbulent Flows”, Cup, 2006.
20. Μαρκάτος Νικόλαος, Υπολογιστική ρευστοδυναμική, Εκδ. Παπασωτηρίου, 1995.
21. Geurts, B.J. and Leonard, A. (2005), Is LES ready for complex flows ?
22. Hanjalic, K. (2004), Closure models for Incompressible turbulent Flows, VKI Lecture Series.

