

Η υπολογιστική ρευστομηχανική στις ενεργειακές διεργασίες

Περίληψη.

Στην εργασία αυτή, παρουσιάζονται οι πρόσφατες επιστημονικές προόδους του εργαστηρίου Αεροδυναμικής του Ε. Μ. Πολυτεχνείου στην Υπολογιστική Ρευστομηχανική (μεθοδολογία πεπερασμένων όγκων), με εφαρμογές σε ενεργειακές διεργασίες. Οι επιστημονικές αναφορές εστιάζονται στην ανάπτυξη μεθοδολογίας αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων της ρευστομηχανικής, με εφαρμογή της τοπικής πύκνωσης πλέγματος, της παράλληλης επεξεργασίας υποχωρίων, της εφαρμογής τηλεσκοπικών μεθόδων πύκνωσης πλέγματος, στην ανάπτυξη μεθόδων διακριτοποίησης ανώτερης τάξης, και προηγμένων μοντέλων τύρβης.

1. Εισαγωγή.

Είναι γενικώς αποδεκτό στη μηχανική των ρευστών ότι, για δεδομένες αρχικές και οριακές συνθήκες ταχυτήτων, πιέσεων και λοιπών μεταβλητών σε μια χρονική στιγμή t_0 , το πεδίο ροής σε κάθε χρονική στιγμή $t_0 < t < T$, είναι μονοσήμαντα καθορισμένο (ντετερμινιστικό), τουλάχιστον μέχρι το χρόνο T , πριν την εμφάνιση χηλατικής συμπεριφοράς στο πεδίο. Μαθηματικά, αυτή η πρόταση μεταφράζεται στην υπόθεση ύπαρξης και μοναδικότητας της λύσης των εξισώσεων Navier-Stokes. Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της υπολογιστικής ρευστομηχανικής, ως αξιόπιστου επιστημονικού εργαλείου διερεύνησης πεδίων ροής, αρχίζει να διαφαίνεται η δυνατότητα μιας ντετερμινιστικής αντιμετώπισης, ακόμη και τυρβωδών πεδίων ροής σε τρεις διαστάσεις, μέσω της απ' ευθείας επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes (Direct Numerical Simulation-DNS). Ωστόσο, για προβλήματα πρακτικού ενδιαφέροντος, η προσέγγιση αυτή δεν προβλέπεται να είναι εφικτή (από άποψη υπολογιστικών δυνατοτήτων) για αρκετά χρόνια ακόμη και έτσι, υπάρχει η ανάγκη για την μοντελοποίηση της τύρβης. Τα τεχνολογικά όμως προβλήματα της ρευστομηχανικής, παρουσιάζουν συνθετότητα, τόσο από την φυσική άποψη (διαφο-

ρές ροές, διεργασίες καύσης, παραγωγή ρυπαντών, εξάτμιση, ανακυκλοφορίες, μεταβατικά φαινόμενα, κ.λπ.), όσο και από την άποψη της γεωμετρίας της συσκευής. Γι' αυτό και η διεθνής επιστημονική προσπάθεια, εστιάζεται, όχι μόνο στο μεγάλο πρόβλημα της προσομοίωσης της τύρβης, αλλά και στην ανάπτυξη γρήγορων και αξιόπιστων αλγορίθμων αριθμητικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων-αλγεβρικών του πεδίου ροής, στην αξιόπιστη διακριτοποίηση του σύνθετου τοπολογικά χώρου και στην επιτάχυνση της διαδικασίας λύσης, εντός εύλογου υπολογιστικού χρόνου, ώστε να είναι δυνατή, μέσω παραμετρικής μελέτης, η βελτιστοποίηση της ενεργειακής διεργασίας και συσκευής.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται επιστημονικά αποτελέσματα από την δραστηριότητα της ερευνητικής μου ομάδας τα τελευταία χρόνια, στην περιοχή των ενεργειακών διεργασιών, με επίκληση των κατάλληλων δημοσιεύσεων, για παραπέρα αναφορά.

2. Πρόσφατες ερευνητικές εξελίξεις.

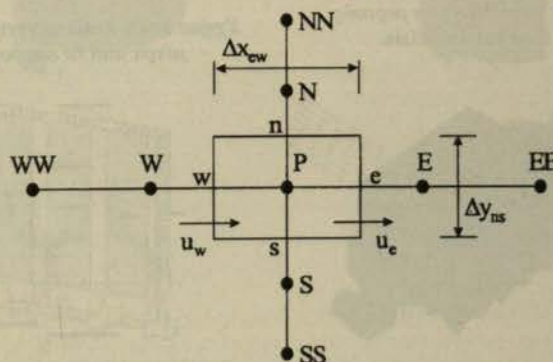
2.1 Τα σχήματα BSOU και VONOS αριθμητικής διακριτοποίησης των όρων συναγωγής.

Σκοπός του σχήματος διακριτοποίησης, είναι να προσεγγιστούν οι τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών σε θέσεις του πεδίου, που είναι διαφορετικές από τις

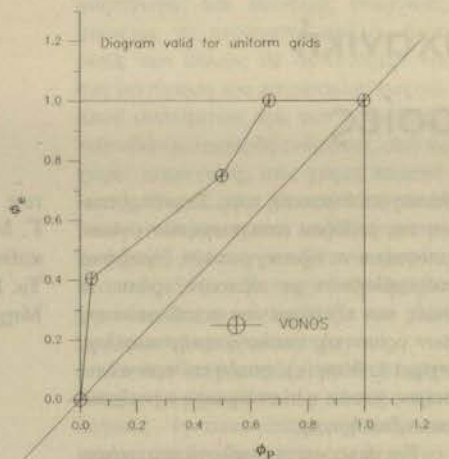
θέσεις αποθήκευσής τους. Στην περίπτωση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων, απαιτείται να προσεγγιστούν, δηλαδή να παρεμβληθούν με κάποιον τρόπο, οι τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών επί των ορίων της υπολογιστικής κυψέλης, σχήμα 1, θέση (e), επειδή επί των τελευταίων, γίνεται η ολοκλήρωση των εξισώσεων διατήρησης.

Κριτήρια για την επιλογή του σχήματος διακριτοποίησης, αποτελούν η τάξη ακριβείας του, η ευσταθής ή ασταθής συμπεριφορά του, κατά τη σύγκλιση της επαναληπτικής διαδικασίας, καθώς και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, σε σχέση με τον αριθμό των πλεγματοειδών γραμμών που χρησιμοποιούνται. Τυπικό χαρακτηριστικό των σχημάτων πρώτης τάξης ακριβείας είναι η αυξημένη αριθμητική διάχυση που εισάγουν στις διακριτοποιημένες εξισώσεις. Από την άλλη πλευρά, τα σχήματα ανώτερης τάξης (δευτέρα και άνω), παρουσιάζουν μη φραγμένες λύσεις και συχνά, προκαλούν ταλαντώσεις στην επαναληπτική διαδικασία, οι οποίες ενδέχεται να αποτρέψουν την πλήρη σύγκλιση της μεθόδου. Γι' αυτόν τον λόγο, έχουν αναπτυχθεί τα φραγμένα σχήματα ανώτερης τάξης, τα οποία δίδουν αποτελέσματα αυξημένης ακριβείας, χωρίς να εμφανίζουν τα μειονεκτήματα της ταλαντωτικής συμπεριφοράς. Προσφάτως, αναπτύχθηκαν τα σχήματα BSOU [1] και VONOS [2], τα οποία εφαρμόστηκαν με επιτυχία σε διαφορετι-

του
Γ. Μπεργελέ
καθηγητή
Τμ. Μηχανολόγων
Μηχανικών, ΕΜΠ



Σχήμα 1: Τομή και διαστάσεις υπολογιστικής κυψέλης στο επίπεδο x-y.



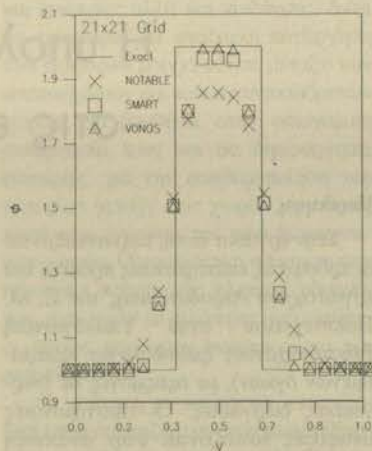
Σχήμα 2: Το σχήμα VONOS.

κές περιπτώσεις ροών. Στα σχήματα 2 και 3 δίδονται, η έκφραση του σχήματος VONOS και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του στην περίπτωση συναγωγής βηματικού παλμού. Διαπιστώνεται η ανωτερότητα του σχήματος VONOS, έναντι των άλλων σχημάτων, στη προσομοίωση των ασυνεχειών (Τα σχήματα VONOS, SMART και NOTABLE, είναι επίσης τρίτης τάξης ακριβείας). Σημειώνεται ότι ισχύει:

$$\hat{\phi}_k = \frac{\phi_k - \phi_w}{\phi_E - \phi_w}, \quad k = W, w, P, e, E$$

2.2. Μεταχείριση κεκλιμένων τοιχωμάτων - Η μέθοδος των μερικώς καλυμμένων κυφελών.

Στις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου πεπερασμένων όγκων σε ενεργειακές διεργασίες, η γεωμετρία του πεδίου ροής, περιλαμβάνει κεκλιμένα τοιχώματα και όρια, τα οποία δεν συμπίπτουν με τις πλεγματοειδείς γραμμές των καρτεσιανών πλεγμάτων. Ο απλούστερος τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι, το κεκλιμένο όριο του πεδίου να περιγραφεί κλιμακωτά, αφαιρώντας από την υπολογιστική διαδικασία όσες κυφέλες έχουν κέντρο που κείται εκτός των ορίων του πεδίου. Όμως, αυτή η απλή αντιμετώπιση, δημιουργεί τοπικές ασυνέχειες κατά την επίλυση των εξισώσεων, οι οποίες είναι ανεπαθίμητες. Ο βέλτιστος τρόπος περιγραφής του κεκλιμένου ορίου, εφόσον χρησιμοποιούνται καρτεσιανά πλέγματα, είναι η μέθοδος των μερικώς καλυμμένων κυφελών (porosity method). Με αυτή τη μέθοδο [3], τα κεκλιμένα όρια περιγράφονται με ακρίβεια (σχήμα 4), ενώ η διακριτοποίηση των εξισώσεων, παραμένει κατά βάση η

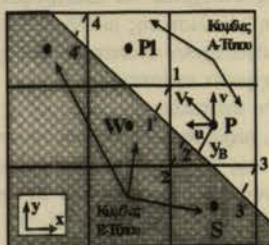


Σχήμα 3: Συναγωγή βηματικού παλμού.

ίδια με ορισμένες απλές μετατροπές, που αφορούν μόνο τις οριακές κυφέλες.

Τα σχήματα 5 και 6, παρουσιάζουν αποτελέσματα του πεδίου ταχυτήτων και συγκεντρώσεων ρυπαντών (CO) στο έδαφος στην Αττική, με τη προσομοίωση των ανωμαλιών εδάφους, με τη μεθοδολογία των μερικώς καλυμμένων κελιών.

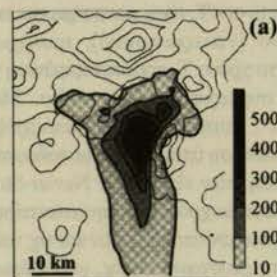
Στα σχήματα 7, 8 και 9, παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου των μερικώς καλυμμένων κυφελών σε ηλεκτροστατικό φίλτρο της ΔΕΗ.



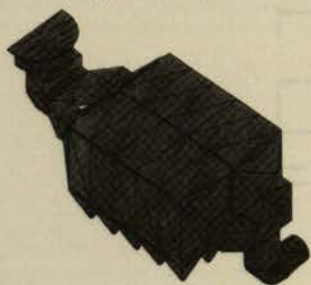
Σχήμα 4: Αντιμετώπιση κεκλιμένων ορίων με τη μέθοδο των μερικώς καλυμμένων κυφελών.



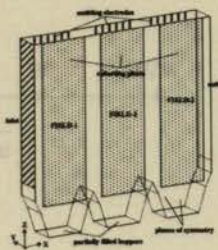
Σχήμα 5: Το πεδίο ταχυτήτων 10 μέτρα από το έδαφος.



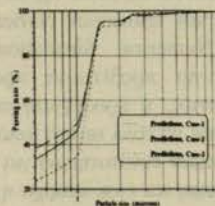
Σχήμα 6: Συγκέντρωση ρυπαντών στο έδαφος.



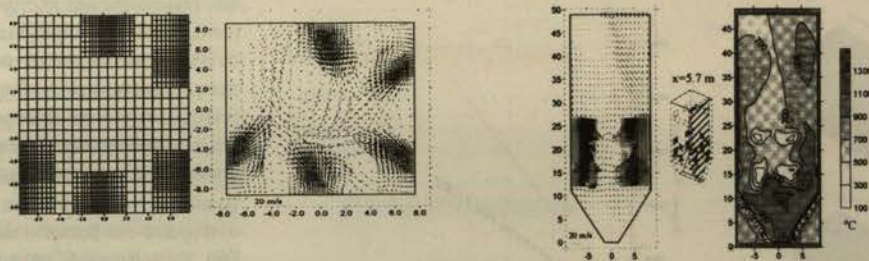
Σχήμα 7: Η σύνθετη γεωμετρία του H/Φ.



Σχήμα 8: Η ροή ανάμεσα στις πλάκες συλλογής.



Σχήμα 9: Βαθμός απόδοσης H/Φ.



Σχήμα 8(α,β,γ): Τοπικές πυκνώσεις πλέγματος-πεδία ροής και θερμοκρασιών σε λέβητα.

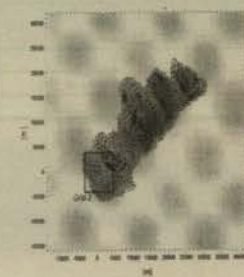
2.3. Τοπική πυκνωση πλέγματος.

Στην περίπτωση που η προσομοιούμενη ενεργειακή διεργασία λαμβάνει χώρα σε μεγάλο εύρος κλιμάκων μήκους, η μέθοδος τοπικής πυκνωσης πλέγματος, διευκολύνει την διακριτοποίηση του υπολογιστικού χωρίου, επειδή η αύξηση της πυκνότητας των πλεγματικών γραμμών, γίνεται μόνο στις περιοχές άμεσου ενδιαφέροντος. Τέτοιες είναι οι περιοχές όπου εμφανίζονται μεγάλες κλίσεις των εξαρτημένων μεταβλητών ή περιοχές, όπου λαμβάνουν χώρα φαινόμενα εξάτμισης ή καύσης. Η εφαρμογή της μεθόδου, παρέχει σημαντικό κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο και μνήμη, αφού η αποθήκευση των μεταβλητών και ο χρόνος, διατίθενται μόνο για τις περιοχές που έχουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Στα σχήματα 8(α,β,γ), παρουσιάζεται εφαρμογή της μεθόδου σε εστία βιομηχανικού ατμοπαραγωγού 1000 MWth[4].

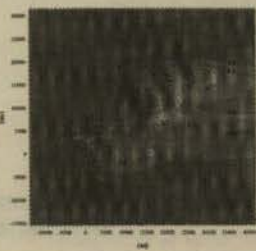
Η τοπική πυκνωση πλέγματος, μπορεί να έχει τηλεσκοπικό χαρακτήρα, μεθοδολογία που επιτρέπει τη σύνδεση τοπικών πεδίων ροής μικροκλίμακας, με πεδία ροής μακροκλίμακας. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι απαραίτητο στην χωροθέτηση αιολικών πάρκων και εκτίμηση αιολικού δυναμικού, όπως φαίνεται και στα σχήματα 9(α,β), για το αιολικό δυναμικό της Άνδρου.

2.4. Κινούμενα πλέγματα - Πεδία ροής σε μηχανές εσωτερικής καύσης.

Η αύξηση μέσα στις τρεις τελευταίες δεκαετίες, της ρύπανσης του ατμοσφαιρικού αέρα στις μεγαλουπόλεις των αναπτυγμένων κοινωνιών, οφειλόμενη σε μεγάλο βαθμό στις ΜΕΚ των αυτοκινήτων, καθώς και μια αυξημένη οικολογική ευαισθησία που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια στις δυτικές κοινωνίες, οδήγησε στην θέσπιση από τις κυβερνήσεις,



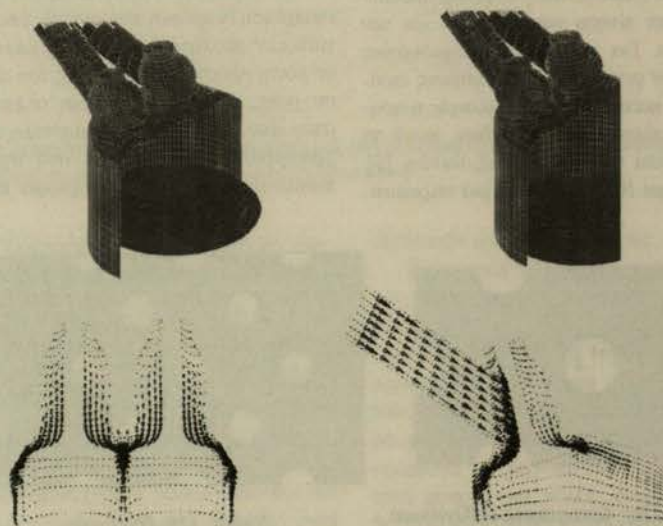
Σχήμα 9α: Τοπογραφία Άνδρου με τηλεσκοπική πυκνωση στη θέση του αιολικού πάρκου.



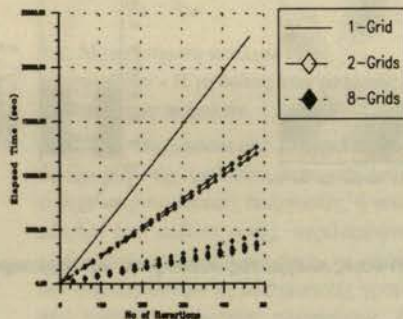
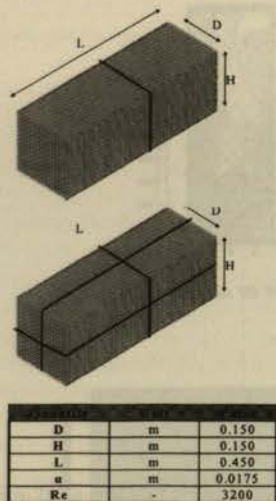
Σχήμα 9β: Το πεδίο ταχυτήτων 10 μέτρα από το έδαφος (συντελεστής επιτάχυνσης).

αυστηρότερων προδιαγραφών ορίων εκπομπής ρυπαντών. Αυτό οδήγησε τις κατασκευαστικές βιομηχανίες αυτοκινήτων, να στρέψουν το ερευνητικό τους ενδιαφέρον, στην αύξηση του βαθμού απόδοσης (άρα και στη μείωση της κατα-

νάλωσης καυσίμων) αλλά και στη μείωση των εκπεμπόμενων ρυπαντών των κινητήρων (έγχυση στον αυλό εισαγωγής, έγχυση απ' ευθείας στη μηχανή, δημιουργία στρωματοποίησης, επανακυκλοφορία καυσαερίων). Η βασική δυσκολία στην



Σχήμα 10 (α,β): Εκτόξευση καυσίμου στον αυλό εισαγωγής. Τροχιές σταγόνων καυσίμου, 10(γ,δ) Το πεδίο ταχυτήτων στη φάση εισαγωγής, 45 από το ΑΝΣ.



Case	(Speed-up)	Perf.
1-G	-	-
2-G	1.88	0.94
8-G	5.78	0.72

Σχήμα 11 (α,β): Διαμέριση υπολογιστικού χώρου σε υποχωρία και επιτάχυνση εκτέλεσης προγράμματος.

πρόβλεψη του πεδίου ροής σε MEK, έγκεται κυρίως, στην συνθετότητα της γεωμετρίας (σύνθετη γεωμετρία και ανοιόμενα όρια, βαλβίδες και έμβολο) και στο χρονικά μεταβαλλόμενο πεδίο ροής, σε συνδυασμό με τον ψεκασμό και καύση του καυσίμου. Το αριθμητικό πλέγμα που χρησιμοποιείται για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ροής, είναι γενικευμένο αμυτιλόγραμμα σύστημα, προσαρμοσμένο στη γεωμετρία και στα ανοιόμενα όρια. Έτσι, οι υπολογιστικές κυψέλες, ακολουθούν την κίνηση των βαλβίδων και του εμβόλου. Για την αποφυγή δημιουργίας κυψελών μεγάλου λόγου επιμήκους εισάγεται η καινοτομία της αταλοφής ή εισαγωγής πλεγματοικών επιπέδων, κατά τη διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων [5]. Το σχήμα 10, παρουσιάζει μια πειραματι-

κή γεωμετρία της εταιρίας Ford, με τις 2 βαλβίδες εισαγωγής. Η εκτόξευση καυσίμου, γίνεται στον ανό εισαγωγής και οι σταγόνες καυσίμου παρακολουθούνται κατά Lagrangian τρόπο [σχήματα 10(α,β)]. Τα σχήματα 10 (γ,δ), παρουσιάζουν την ανάπτυξη της ροής, κατά την φάση εισαγωγής.

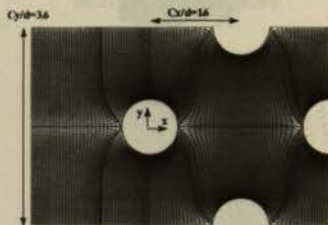
2.5 Παράλληλη επεξεργασία υποχωρίων-Λογισμικό PVM.

Το λογισμικό PVM, επιτρέπει την ενοποίηση διαφόρων ετερογενών υπολογιστικών συστημάτων ή επεξεργαστών, σε κοινή προσπάθεια επίλυσης του πεδίου ροής, χωρίς την ανάγκη αλλαγών στον ίδιο τον κώδικα. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται, βασίζεται στη σχέση master-slave, όπου το πρόγραμμα mas-

ter, δημιουργεί και ελέγχει τα προγράμματα slaves, τα οποία και αναθέτει στα διάφορα υπολογιστικά συστήματα. Το πρόγραμμα master, ελέγχει τη ροή πληροφοριών από τα προγράμματα slaves και των κοινών οριακών συνθηκών στα κοινά υπολογιστικά όρια. Κάθε πρόγραμμα slave, διαθέτει για εκτέλεση, ένα αντίγραφο του βασικού κώδικα και επάλλει το πεδίο ροής σε κάθε υποχωρίο, που έχει χωρισθεί ο υπολογιστικός χώρος. Ορίζεται ως επιτάχυνση $speedup = T_{ser}/T_{PVM}$ όπου T_{ser} είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος από τον σειριακό κώδικα με ένα επεξεργαστή και T_{PVM} είναι ο χρόνος με τη χρήση της μεθοδολογίας PVM, ενώ ως απόδοση ορίζεται η, $performance = speedup/N_{proc}$, όπου N_{proc} ο αριθμός των επεξεργαστών που χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αποτελέσματα επίλυσης του πεδίου ροής σε ορθογωνική κοιλότητα, με πλέγμα $41 \times 41 \times 82$. Ο υπολογιστικός χώρος, χωρίστηκε σε 2 ή 8 υποχώρους. Τα σχήματα δείχνουν την επιτάχυνση που επιτυγχάνεται και έτσι, είναι φανερό ότι, δεν υπάρχει η ανάγκη παραλληλοποίησης του σειριακού κώδικα.

2.6 Πρότυπο τύφης μεγάλων δινών-Διφασική Ροή σε εναλλάκτες θερμότητας.

Για τα μοντέλα τυρβώδους συνεκτικότητας, το βασικό μέλημα είναι να βρεθεί η έκφραση για την τυρβώδη συνεκτικότητα μ_t που εισάγεται από την υπόθεση Boussinesq, στις εξισώσεις διατήρησης ορμής Reynolds. Στη διεθνή βιβλιογραφία, έχει επικρατήσει το μοντέλο δύο εξισώσεων k-ε για την τυρβώδη κινητική ενέργεια και τον ρυθμό καταστροφής της. Το μοντέλο αυτό, εμφανίζει μια ευρύτατη περιοχή αξιοπιστίας, παρά τα πολλά επιστημονικά μειονεκτήματα που παρουσιάζει, ιδιαίτερα σε χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία ροής. Τα τελευταία χρόνια, με την αύξηση της ταχύτητας των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έγινε δυνατή η εφαρμογή της προσομοίωσης των μεγάλων δινών, η οποία επιτρέπει την προσομοίωση των μεγάλων κλιμάκων του πεδίου ροής, σε κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε σημείο του υπολογιστικού πλέγματος, ενώ εισάγονται οι υποπλεγματοικές τάσεις, οι οποίες μοντελοποιούνται ακριβέστερα (μοντέλο Smagorinsky), λόγω του ιστροπικού



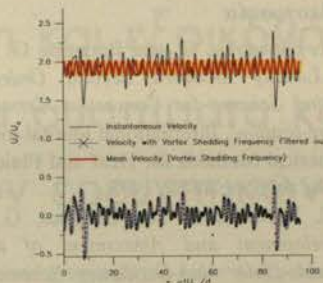
Σχήμα 12α: Δεπτομέρεια ορθογώνιου αμυτιλόγραμμου πλέγματος (συνολικά 280×280) για τη Π.Μ.Δ. σε μετατοπισμένη διάταξη κυλίνδρων.



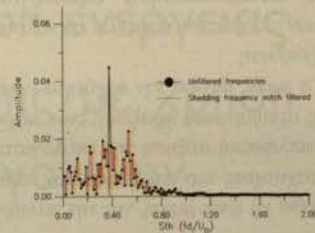
Σχήμα 12β: Περιοχές ισο-στροβιλότητας στη μετατοπισμένη διάταξη κυλίνδρων.

χαρακτήρα της τύφης στις μικρές κλίμακες. Οι προλέξεις με το μοντέλο των μεγάλων δινών, απαιτούν παρατέρα επεξεργασία της χρονοσειράς ταχύτητας, πίεσης, ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή του πεδίου και οι συχνότητες τύφης με τις πιθανές ιδιοσυχνότητες εκπομπής στροβίλων.

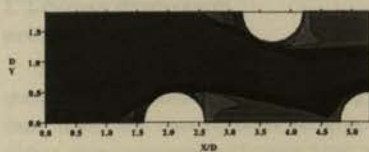
Το μοντέλο των μεγάλων δινών, εφαρμόστηκε, μεταξύ άλλων, στην πρόλεξη της τυρβώδους ροής σε μετατοπισμένη διάταξη σωλήνων εναλλάκτη θερμότητας, που χρησιμοποιείται ως υπερθερμαντήρας ατμού στους λέβητες της ΔΕΗ, [6]. Το σχήμα 12 α, δείχνει τη περιοχή επίλυσης του πεδίου ροής με το καμπυλόγραμμο ορθογώνιο πλέγμα γύρω από τους αλούς, οι οποίοι περιρρέονται, από αριστερά προς τα δεξιά, από τα καυσαέρια που μεταφέρουν και στερεά σωματίδια από τη καύση του λιγνίτη. Στο σχήμα 12 β, παρουσιάζονται οι ισοτροβιλότητες του πεδίου ροής, όπου είναι εμφανής η εκπομπή στροβίλων πίσω από τους κυλίνδρους. Να σημειωθεί ότι, ο χρονικός χαρακτήρας του πεδίου ροής και η εκπομπή στροβίλων, δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν με το μοντέλο k-ε. Η πρόλεξη του πεδίου ταχυτήτων και η ανά-



Σχήμα 12γ: Χρονοσειρά στο $x/d=1.6$, $y/d=0.6$ της στιγμιαίας και περιοδικής ταχύτητας καθώς και της τυρβώδους διαταραχής της ταχύτητας στη κατεύθυνση της κύριας ροής.

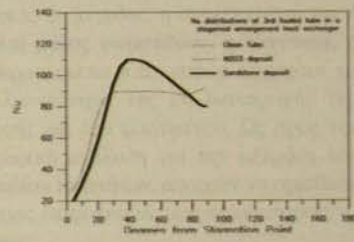
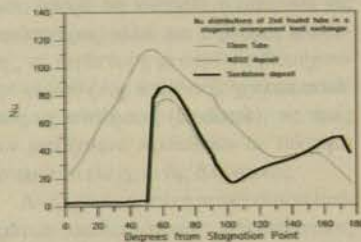
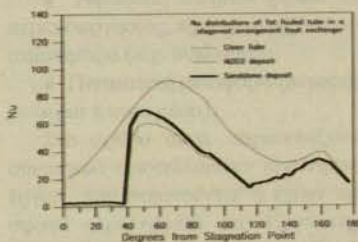
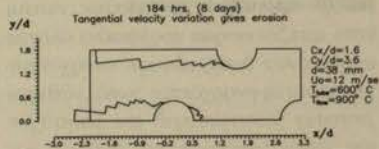


Σχήμα 12δ: Αδιαστατοποιημένο φάσμα συχνοτήτων της στιγμιαίας ταχύτητας στη κατεύθυνση της κύριας ροής (στο $x/d=1.6$, $y/d=0.6$).



Υλικό Επικάθισης Al_2O_3 : $\lambda=7$,
 $W/m/K$, $C_p=245 J/kg/K$

Σχήμα 12ε: Διανομές θερμοκρασίας σε μετατοπισμένη διάταξη κυλίνδρων της ΔΕΗ, $T_{max}=1200C$, $T_{min}=700 C$



Σχήμα 12ζ: Διανομή αριθμού Nusselt στην επιφάνεια των τριών κυλίνδρων της μετατοπισμένης διάταξης με καθαρούς κυλίνδρους και κυλίνδρους με σχηματισμένη επικάλυψη.

λυση της χρονοσειράς κατά Fourier, οδηγεί στην εύρεση της συχνότητας εκπομπής των στροβίλων κατάντα και τον υπολογισμό του αντίστοιχου αριθμού Strouhal, σχήματα 12 γ και 12 δ.

Τέλος το σχήμα 12ε, παρουσιάζει την επικάλυψη των σωματιδίων πάνω στους αλούς και την εξ' αυτής μείωση της μεταφοράς θερμότητας στους σωλήνες του εναλλάκτη, σχήμα 12ζ. Οι επικαθίσεις στους αλούς εναλλάκτη ΔΕΗ, φαίνεται ότι φθάνουν σε ένα αμετάβλητο χρονικά ύψος, μέσα σε 12 ημέρες.

3. Συμπεράσματα προοπτικής της υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Η υπολογιστική ρευστομηχανική, ως επιστημονικός κλάδος διερεύνησης πεδίων ροής παρουσιάζει στα τελευταία χρόνια ενδείξεις επιστημονικής ωρίμανσης, τουλάχιστον από τη σκοπιά της μεθοδολογίας αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes (μέθοδοι διακριτοποίησης, ταχύτεροι επλυτές, τοπικά πλέγματα, αποσύνδεση χωρίων, παράλληλη επεξεργασία, κινούμενα πλέγματα) και απέδειξε ότι, αποτελεί

αξιόπιστο εργαλείο σχεδίασης.

Τρία είναι τα σοβαρά προβλήματα που αναμένουν επίλυση τα επόμενα χρόνια. Το πρώτο αφορά τη προσομοίωση της τύφης, που παρά την ουσιαστική πρόοδο που επιτεύχθηκε με το μοντέλο των μεγάλων δινών, η επίλυση θα προέλθει με DNS μεθοδολογία, της οποίας η εφαρμογή σε τεχνολογικά προβλήματα είναι μακριά για πολλές δεκαετίες. Το δεύτερο πρόβλημα δεν είναι επιστημονικό, αλλά κυρίως τεχνολογικό και είναι αυτό της δημιουργίας αριθμητικού πλέγματος, δομημένου ή μη, σε σύνθετες γεωμετρίες.

Η αυτοματοποίηση δημιουργίας τέτοιων πλεγμάτων, αποτελεί τεχνολογική πρόκληση.

Το τρίτο, αφορά την ταχύτητα εκτέλεσης αριθμητικών πράξεων, που παρά την εκπληκτική αύξηση της υπολογιστικής ταχύτητας των επεξεργαστών, εξακολουθεί να είναι μικρή, για την κάλυψη των αναγκών της υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Πάντως, είναι πλέον ή φανερό ότι, η εισαγωγή της υπολογιστικής ρευστομηχανικής στη διαδικασία σχεδίασης (π.χ μηχανών εσωτερικής καύσης, λεβήτων, κ.λπ), μείωσε το χρόνο μεταξύ πρωτοτύπου και παραγωγής στο 10%, περίπου, από ότι πριν από 10 χρόνια.

Βιβλιογραφία

1. Papadakis, G. and Bergeles, G. , "A Locally Modified Second Order Upwind Scheme for Convection Terms Discretization", International Journal for Numerical Methods for Heat and Fluid Flows, vol.5, pp.49-62, 1995.
2. Varonos, A. and Bergeles, G., "Development and Assessment of a Variable-Order Non-Oscillatory Scheme for Convection Term Discretization", International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol.26, pp.1-16, (1998).
3. Giabanis, A., Anagnostopoulos, J. and Bergeles, G. , "Numerical Simulation of Pollutant Dispersion and Photochemical Kinetics over Complex Terrain",

Applied Mathematical Modelling, vol.22, pp.313-329, (1998).

4. A. Varonos, G. Bergeles, Performance predictions in a 450 MWth utility boiler with Nox emissions reduction configuration, Proceedings 4th International conference on Technologies and combustion for clean environment, vol I, 7-10 July 1997, Lisbon.

5. A. Theodorakakos, G. Bergeles, Numerical Investigation of the flow inside a 4-X IC model diesel engine, ENTROPIE, no 200, pp 53-63, 1996

6. D. Bouris , G. Bergeles, Two dimensional time dependent simulation of the subcritical flow in a staggered tube bundle using a subgrid scale model, International JHFF, Vol. 20, pp 105-114, 1999.