



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Διδακτορική Διατριβή

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΟΛΥΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΗ-ΔΟΜΗΜΕΝΑ ΠΛΕΓΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ
ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΕΔΙΩΝ ΡΟΗΣ ΣΤΙΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ, ΣΕ ΠΟΛΥΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΙΚΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ**

Νικόλαος Λαμπρόπουλος

Αθήνα 2005

Επιβλέπων: **Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου**, Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

Περίληψη

Η ένταξη των επιλυτών των εξισώσεων Navier-Stokes σε διαδικασίες βελτιστοποίησης-σχεδίασης πτερυγώσεων στροβιλομηχανών ή συνιστωσών αεροσκάφους αποτελεί σύγχρονη απαίτηση της αεροναυπηγικής βιομηχανίας. Οι μελέτες αυτές γίνονται με τη χρήση δομημένων πλεγμάτων πολλαπλών υποχωρίων ή Μη-Δομημένων Πλεγμάτων (ΜΔΠ) της τάξης των 10^6 έως 10^7 κόμβων και εκτελούνται συνήθως σε πολυεπεξεργαστικά υπολογιστικά συστήματα. Μολονότι οι υπολογιστικές αυτές πλατφόρμες είναι σε θέση να εκτελέσουν τους υπολογισμούς σε χρόνο υποπολλαπλάσιο μιας σειριακής εκτέλεσης, υπάρχει η ανάγκη περαιτέρω επιτάχυνσης του ρυθμού σύγκλισης των επιλυόμενων εξισώσεων ο οποίος μειώνεται δραματικά όταν προσομοιώνονται ροές υψηλού αριθμού Reynolds με χρήση πλεγμάτων μεγάλου μεγέθους.

Το πρόβλημα αυτό καλείται να επιλύσει η Τεχνική Πολυπλέγματος (ΤΠΠ), χωρίς να επιφέρει μεγάλες επιπλέον απαιτήσεις σε μνήμη, συνδυαζόμενη αρμονικά με την παράλληλη επεξεργασία. Μολονότι, η εφαρμογή της ΤΠΠ σε δομημένα πλέγματα έχει φτάσει σε επίπεδο ωριμότητας, στα ΜΔΠ υπάρχουν ανοικτά πεδία προς διερεύνηση. Αυτό οφείλεται στην ανάγκη να αντιμετωπισθούν προσεκτικά και αποδοτικά προβλήματα που σχετίζονται με τη μέθοδο δημιουργίας των αραιότερων πλεγμάτων, τη διακριτοποίηση των εξισώσεων σε αυτά, τα σχήματα ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των διαδοχικών πλεγμάτων (τελεστές περιορισμού και επέκτασης) καθώς και την ένταξη της ΤΠΠ στην επίλυση των εξισώσεων των μοντέλων τύρβης. Τα σχετικά προβλήματα εντείνονται όταν χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα πυκνά πλέγματα στην περιοχή του τοιχώματος για την επίλυση των εξισώσεων των μοντέλων τύρβης χαμηλού αριθμού Reynolds. Επίσης, η τροποποίηση του αλγορίθμου της ΤΠΠ ώστε να επιδέχεται παράλληλη επεξεργασία σε συστήματα καταναμημένης μνήμης με τη μέθοδο των πολλαπλών υποχωρίων αποτελεί μια επιπλέον σημαντική υπολογιστική δυσκολία. Ο επιτυχής συνδυασμός των παραπάνω εργαλείων επιτάχυνσης για τη μελέτη ροών υψηλών αριθμών Reynolds σε ΜΔΠ, αποτελούμενα από μεγάλο αριθμό στοιχείων με έντονη ανισοτροπία, αποτελεί το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία επιδίωξε την αποδοτική προσαρμογή της ΤΠΠ σε λογισμικό πρόλεξης διδιάστατων και τριδιάστατων συμπιεστών ροών με χρήση ΜΔΠ, σε πολυεπεξεργαστικό περιβάλλον με τη μέθοδο των πολλαπλών υποχωρίων. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί το δεύτερης τάξης ανάντι σχήμα του Roe και την τεχνική των πεπερασμένων όγκων για διδιάστατα και τριδιάστατα ΜΔΠ αποτελούμενα από τριγωνικά (2Δ) ή τετραεδρικά (3Δ) στοιχεία. Η μοντελοποίηση της τύρβης γίνεται με τη χρήση γνωστών μοντέλων που βασίζονται στην υπόθεση Boussinesq και τα οποία χρησιμοποιούνται ευρύτατα για βιομηχανικές εφαρμογές. Αφετηρία της διατριβής αποτέλεσε κώδικας ροής που είχε αναπτυχθεί σε προηγούμενες διατριβές ενώ η παραλληλοποίηση αφορά συστοιχία επεξεργαστών προσωπικών υπολογιστών με χρήση του πρωτοκόλλου ανταλλαγής μηνυμάτων PVM.

Τα βασικά θέματα που διαπραγματεύθηκε η διατριβή ήταν τα εξής:

- Διατύπωση του αλγορίθμου της ΤΠΠ σε ΜΔΠ για την επίλυση των 3Δ εξισώσεων Navier-Stokes σε περιπτώσεις εξωτερικής αεροδυναμικής αλλά κυρίως σε σταθερές και περιστρεφόμενες πτερυγώσεις στροβιλομηχανών, σε συνδυασμό με ικανό αριθμό μοντέλων τύρβης.
- Δημιουργία και διερεύνηση της αποδοτικότητας των διαδικασιών ορισμού των αραιότερων πλεγμάτων που απαιτούνται για την εφαρμογή της ΤΠΠ.
- Διατύπωση σχημάτων ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των διαδοχικών πλεγμάτων (τελεστές περιορισμού και επέκτασης) ώστε να εξασφαλιστεί η ευστάθεια και η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου της ΤΠΠ.
- Δημιουργία αποδοτικού σχήματος διακριτοποίησης των εξισώσεων μέσης ροής και των εξισώσεων των μοντέλων τύρβης στα αραιά ΜΔΠ για τις ανάγκες της ΤΠΠ.
- Παραλληλοποίηση του αλγορίθμου της ΤΠΠ. Η μέθοδος των πολλαπλών υποχωρίων εφαρμόστηκε σε όλα τα πλέγματα εκτελώντας διαμερισμό μόνο του αρχικού πλέγματος σε υποχωρία. Κατά τη διαδικασία παραλληλοποίησης επιδιώχθηκε η ελαχιστοποίηση των επικοινωνιών στα αραιά πλέγματα ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοση της παράλληλης επεξεργασίας.
- Πιστοποίηση της πρόλεξης της ροής και της απόδοσης των μεθόδων επιτάχυνσης (ΤΠΠ και παράλληλη επεξεργασία, χωριστά αλλά κυρίως συνδυαστικά) με μελέτη 2Δ και 3Δ ροών στροβιλομηχανών και εξωτερικής αεροδυναμικής.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της εργασίας ήταν τα εξής:

- Η διακριτοποίηση των όρων διάχυσης στα αραιά πλέγματα συνιστάται να γίνεται με σάρωση των εικονικών ακμών που συνδέουν τους εικονικούς κόμβους του πλέγματος που αντιστοιχούν στους όγκους ελέγχου. Στη βιβλιογραφία, για τη διακριτοποίηση των όρων αυτών χρησιμοποιούνται ιδέες από την αλγεβρική τεχνική πολυπλέγματος και τη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων οι οποίες όμως δεν είναι απόλυτα ακριβείς.
- Κατά τη εφαρμογή της ΤΠΠ στις εξισώσεις των μοντέλων τύρβης χαμηλού αριθμού Reynolds που επιλύονται σε ιδιαίτερα πυκνά πλέγματα εμφανίζονται προβλήματα αριθμητικής ευστάθειας λόγω της ύπαρξης των όρων πηγής. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την τροποποίηση των τελεστών μεταφοράς δεδομένων μεταξύ των διαδοχικών αραιότερων πλεγμάτων ώστε να αποφεύγονται οι αρνητικές τιμές των τυρβωδών μεταβλητών σε όλα τα πλέγματα και να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του αλγορίθμου της ΤΠΠ.
- Η υιοθέτηση λειτουργικών και υπολογιστικά γρήγορων συσσωμάτωσης των όγκων ελέγχου, για τη δημιουργία των αραιότερων πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται στην ΤΠΠ, αποδεικνύεται επαρκής στα σχετικά αραιά πλέγματα, όχι όμως και στα

ιδιαίτερα πυκνά και ανισότροπα στην περιοχή του τοιχώματος, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επίλυση των εξισώσεων των μοντέλων τύρβης χαμηλού αριθμού Reynolds, όπου απαιτούνται τεχνικές κατευθυνόμενης συσσωμάτωσης.

- Η απόδοση της ΤΠΠ μειώνεται όταν στο πεδίο εμφανίζονται κύματα κρούσης ή περιοχές υπερηχητικής ροής. Ανεξάρτητα από το είδος των επιλυόμενων εξισώσεων η ΤΠΠ επηρεάζεται σημαντικά από την ανισοτροπία του πλέγματος, η οποία αυξανόμενη μειώνει το ρυθμό σύγκλισης των εξισώσεων.
- Η παραλληλοποίηση του αλγορίθμου της ΤΠΠ, όπως εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία, θεωρείται γενικά επιτυχής, καθώς είναι λειτουργική σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ροής δίνοντας ταυτόσημα αποτελέσματα με τη σειριακή έκδοση του αλγορίθμου. Επίσης, η μείωση της παράλληλης επιτάχυνσης της ΤΠΠ συγκριτικά με τον επιλύτη στο είναι πλέγμα, η οποία είναι αναπόφευκτη λόγω των επιπλέον εμπλεκόμενων υπολογισμών, είναι σχετικά μικρή.
- Για την εκτίμηση της απόδοσης της ΤΠΠ απαιτείται η σύγκλιση των εξισώσεων κατά αρκετές τάξεις μεγέθους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση συναρτήσεων περιορισμού όπως αυτή που προτάθηκε από τον Venkatakrishnan. Στην παρούσα εργασία επεκτάθηκε και διερευνήθηκε η χρήση της συναρτήσεως, που αρχικά αναπτύχθηκε από τον Venkatakrishnan για περιπτώσεις 2Δ ατριβούς υπερηχητικής ροής σε ισότροπα ΜΔΠ, σε τυρβώδεις 2Δ και 3Δ ροές με χρήση ανισότροπων ΜΔΠ.

Κάνοντας απολογισμό της εργασίας, σημειώνουμε πως στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει περιορισμένος αριθμός δημοσιεύσεων στο αντικείμενο της διατριβής το οποίο συνδυάζει την παράλληλη επεξεργασία και την ΤΠΠ για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes με χρήση ΜΔΠ. Αποτιμώντας το κέρδος από την συνδυασμένη εφαρμογή των δύο αυτών μεθόδων επιτάχυνσης, σημειώνουμε πως η χρήση της ΤΠΠ επιφέρει μείωση του χρόνου επίλυσης περίπου στο ένα τρίτο για διδιάστατες τυρβώδεις ροές υψηλού αριθμού Reynolds με χρήση ιδιαίτερα πυκνών πλεγμάτων στην περιοχή του τοιχώματος και στο ένα τρίτο με ένα δεύτερο για αντίστοιχες τριδιάστατες ροές.