



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Διδακτορική Διατριβή

ΓΕΝΕΣΗ ΜΗ-ΔΟΜΗΜΕΝΩΝ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥΣ ΣΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ
ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ, ΑΞΙΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ (GRID COMPUTING)

Παναγιώτης Ιωάννης Καλοκτένης Διακόπουλος

Αθήνα 2008

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

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή αποτελεί συμβολή στην επίτευξη ενός από τους στόχους του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ (ΕΘΣ/ΕΜΠ), αυτού που αφορά στην ανάπτυξη αυτοματοποιημένου λογισμικού ανάλυσης και, κυρίως, βελτιστοποίησης - σχεδιασμού συνιστωσών στροβιλομηχανών και άλλων αεροδυναμικών σωμάτων. Η αεροδυναμική ή αεροθερμοδυναμική βελτιστοποίηση προϋποθέτει διαθεσιμότητα και συνδυαστική χρήση μιας διαδικασίας παραμετροποίησης της μορφής του μελετώμενου σώματος, λογισμικού γένεσης υπολογιστικού πλέγματος και αριθμητικής επίλυσης πεδίων ροής, λογισμικού αναζήτησης των βέλτιστων λύσεων και χρήζει, προφανώς, υπολογιστικής ισχύος. Η συμβολή της διατριβής είναι διττή, καλύπτοντας θέματα γένεσης και προσαρμογής μη-δομημένων πλεγμάτων και θέματα χρήσης τεχνολογίας αξιοποίησης Υπολογιστικών Πόρων. Ως προς το πρώτο θέμα, αναπτύχθηκε διαδικασία και προγραμματίστηκε λογισμικό γένεσης μη-δομημένων πλεγμάτων, τα βασικά στοιχεία του οποίου περιγράφονται σύντομα στη συνέχεια. Ως προς το δεύτερο, δημιουργήθηκε υποδομή, σε επίπεδο υλικού και λογισμικού, που επιτρέπει υπολογισμούς σε διασυνδεδεμένες συστοιχίες παράλληλης επεξεργασίας δηλαδή σε Πλέγμα Υπολογιστικών Πόρων (ΠΥΠ). Δεδομένης της δυνατότητας του λογισμικού βελτιστοποίησης του ΕΘΣ/ΕΜΠ να χρησιμοποιεί ένα πολυεπεξεργαστικό σύστημα (βλ. προηγούμενες διατριβές), η διατριβή αυτή υλοποιεί το 'πέρασμα' από το Cluster στο Grid Computing, αναβαθμίζοντας ουσιαστικά τις υπολογιστικές δυνατότητες από τη χρήση μόνο μιας συστοιχίας διασυνδεδεμένων επεξεργαστών, στην εκμετάλλευση 'γεωγραφικά απομακρυσμένων πόρων' (μεμονωμένων υπολογιστών ή συστοιχιών).

Η συμβολή της διατριβής στη γένεση μη-δομημένων πλεγμάτων έγκειται στον προγραμματισμό (με συγκεκριμένες παρεμβάσεις - προτάσεις ως προς τους υπάρχοντες αλγόριθμους) της τεχνικής του προελαύνοντος μετώπου (advancing front) για τη δημιουργία τριγωνικών, τετραπλευρικών (2Δ) και τετραεδρικών (3Δ) στοιχείων. Η ανάπτυξη του λογισμικού γένεσης 3Δ μη-δομημένων πλεγμάτων βασίστηκε σε προϋπάρχον λογισμικό γένεσης 2Δ πλεγμάτων. Το λογισμικό αυτό επεκτάθηκε-εξελίχθηκε ώστε με την κατάλληλη χρήση παραμετρικών καμπυλών και επιφανειών να μπορεί να δημιουργήσει επιφανειακά πλέγματα με τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Τα έτσι δημιουργούμενα επιφανειακά

πλέγματα αποτελούν την αφετηρία για τη γένεση του 3D πλέγματος. Το προγραμματισθέν λογισμικό περιλαμβάνει τη χρήση αριθμητικών μεθόδων για τη μετάβαση από τον παραμετρικό στον πραγματικό 2D χώρο και αντίστροφα, αφού ο έλεγχος της μορφής και του προσανατολισμού των στοιχείων διευκολύνεται από την απεικόνιση σε ένα μετασχηματισμένο χώρο στον οποίο το επιθυμητό στοιχείο είναι ισόπλευρο με πλευρά μοναδιαίου μήκους. Η μέθοδος εφαρμόζεται για τη γένεση επιφανειακών πλεγμάτων σε επιφάνειες διαφόρων μορφών (περυγία, πτέρυγες, αεροσκάφη και άλλες γεωμετρίες) και σε χωρία αποτελούμενα από πολύπλοκο συνδυασμό επιφανειών.

Αλγοριθμικά, η γένεση ενός 3D πλέγματος τετραεδρικών στοιχείων με τη χρήση της μεθόδου του προελαύνοντος μετώπου υλοποιείται είτε με την εισαγωγή, κάθε φορά, ενός νέου κόμβου και τη σύνδεσή του με μια τριγωνική έδρα του μετώπου είτε με το συνδυασμό δύο ή τριών εδρών του μετώπου. Η διαδικασία γένεσης επιταχύνεται εκθετικά σε σχέση με τον αριθμό των εδρών του αρχικού επιφανειακού πλέγματος με τη χρήση Ψηφιακών Γεωμετρικών Δένδρων. Στοιχείο πρωτοτυπίας της διατριβής αποτελεί η ανάδειξη της σημασίας του κριτηρίου της διεδρής γωνίας κατά το σχηματισμό τετραεδρικών στοιχείων, το οποίο βοηθά την επιτυχή ολοκλήρωση της διαδικασίας και τη βελτίωση της ποιότητας του τελικού πλέγματος. Το μη-δομημένο πλέγμα το οποίο προκύπτει από την εφαρμογή της προτεινόμενης διαδικασίας δύναται να συνδυαστεί με διαστρωματώσεις μη-δομημένων στοιχείων διαφόρων τύπων (τετράεδρα, πρίσματα, πυραμίδες, εξάεδρα) πλησίον των στερεών ορίων του πεδίου με σκοπό την ακριβέστερη πρόλεξη της ροής στο οριακό στρώμα. Ένα άλλο στοιχείο πρωτοτυπίας αποτελεί η δυνατότητα, μέσω κατάλληλων μετασχηματισμών, διεκπεραίωσης προβλημάτων γένεσης πλέγματος σε ιδιαίτερα δύσκολες γεωμετρίες. Η μέθοδος πιστοποιείται με τη γένεση μη-δομημένων πλεγμάτων σε περυγώσεις στροβιλομηχανών, χωρία εξωτερικής αεροδυναμικής και 3D αγωγών.

Η διατριβή επικεντρώνεται, στη συνέχεια, σε θέματα προσαρμογής πλεγμάτων στη διαμορφούμενη λύση του πεδίου ροής ή σε μεταβαλλόμενα όρια. Αναπτύσσεται μια τεχνική που περιλαμβάνει πύκνωση των στοιχείων του πλέγματος σε περιοχές με έντονη μεταβολή των ροϊκών μεγεθών ή μετακίνηση των κόμβων του πλέγματος με κριτήριο τις τιμές μεταβλητών που προκύπτουν από επίλυση συζυγών εξισώσεων (σε συνδυασμό με το λογισμικό αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων Navier-Stokes του ΕΘΣ/ΕΜΠ). Η τελευταία περίπτωση συναντάται συχνά κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης αεροδυναμικών μορφών καθώς τροποποιείται η προς σχεδιασμό μορφή, με την αλλαγή τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού. Προτείνεται μια νέα μέθοδος η οποία οδηγεί στην προσαρμογή του πλέγματος σε μεταβαλλόμενη γεωμετρία του ορίου μέσω διαδικασίας εξομάλυνσης της ποιότητας των στοιχείων του πλέγματος. Η ίδια μέθοδος χρησιμοποιείται και για τη γένεση 3D πλεγμάτων των οποίων το αρχικό επιφανειακό πλέγμα περιλαμβάνει έντονα στρεβλά στοιχεία.

Όπως προαναφέρθηκε, η δημιουργηθείσα διαδικασία και το αντίστοιχο λογισμικό γένεσης επιφανειακών και τριδιάστατων μη-δομημένων πλεγμάτων δεν αποτελεί αυτοσκοπό αλλά προσφέρει υποστήριξη στη βελτιστοποίηση και στο σχεδιασμό αεροδυναμικών μορφών. Εκτός από το προαναφερθέν λογισμικό επίλυσης των εξισώσεων ροής, το ολοκληρωμένο λογισμικό απαιτεί και τη χρήση μεθόδου βελτιστοποίησης. Για τις ανάγκες της διατριβής επιλέχθηκε η χρήση εξελικτικών αλγορίθμων, στη μορφή του λογισμικού EASY που έχει αναπτύξει το ΕΘΣ/ΕΜΠ. Η δεύτερη διακριτή συμβολή της παρούσας διατριβής έγκειται στη μεταφορά του λογισμικού των εξελικτικών αλγορίθμων σε Πλέγμα Υπολογιστικών Πόρων (ΠΥΠ). Η συμβολή αυτή σκοπεύει στην απόλυτη εκμετάλλευση των τριών συστοιχιών του ΕΘΣ/ΕΜΠ (που, συνολικά, αριθμούν περί τους 200 πυρήνες) σε προβλήματα σχεδιασμού με

ιδιαίτερα υψηλό υπολογιστικό κόστος ανά αξιολόγηση, για μέγιστη παράλληλη επιτάχυνση ή, πρακτικά, ελάχιστο χρόνο αναμονής του μηχανικού.

Η μεταφορά του λογισμικού σε ΠΥΠ απαιτήσε τη συνεργασία ενός συνόλου λογισμικού με το οποίο επιτυγχάνονται (α) η τοπική διαχείριση των υπολογιστικών πόρων εντός μιας συστοιχίας παράλληλης επεξεργασίας, (β) η υποβολή αιτημάτων επεξεργασίας σε απομακρυσμένα υπολογιστικά συστήματα και (γ) η ενοποίηση των απομακρυσμένων υπολογιστικών συστημάτων μέσω λογισμικού που διαχειρίζεται έναν κατάλογο διαθέσιμων πόρων αλλά δέχεται αιτήματα από τους χρήστες τα οποία παραπέμπει αυτόματα στον πρώτο κατάλληλο διαθέσιμο πόρο. Η τοπική διαχείριση των πόρων μιας συστοιχίας επιτυγχάνεται με τη χρήση του λογισμικού διαχείρισης Condor, ενώ το λογισμικό που επιτρέπει την υποβολή αιτημάτων σε απομακρυσμένους πόρους είναι το Globus Toolkit. Τέλος, το λογισμικό που επιτρέπει τη συνολική αξιοποίηση ενός Πλέγματος Υπολογιστικών Πόρων είναι το GridWay. Το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη DRMAA για τη διασύνδεσή του με τα λογισμικά διαχείρισης και αξιοποιεί τους υπολογιστικούς πόρους σύμφωνα με το πρότυπο του συντονιστή-εργάτη προωθώντας αιτήματα αξιολογήσεων προς τους υπολογιστικούς πόρους μέσω των λογισμικών διαχείρισης. Η συνεισφορά αυτής της διατριβής δεν περιορίζεται, προφανώς, στις τρεις συστοιχίες του ΕΘΣ/ΕΜΠ που, γεωγραφικά, είναι συγκεντρωμένες στη Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και Βελτιστοποίησης του Τομέα Ρευστών. Το ολοκληρωμένο λογισμικό βελτιστοποίησης, που προσαρμόστηκε σε ΠΥΠ, μπορεί να λειτουργήσει σε οποιοδήποτε σύνολο πραγματικά γεωγραφικά απομακρυσμένων συστοιχιών, υπό την προϋπόθεση ότι καθεμιά από αυτές διαθέτει το σύνολο του λογισμικού διαχείρισης κλπ που προαναφέρθηκε.

Μεταξύ των εφαρμογών γένεσης μη-δομημένων πλεγμάτων που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή, πέραν των απλών βασικών για την πιστοποίηση του λογισμικού γένεσης πλεγμάτων, υπάρχουν εφαρμογές (σε σταθερές και κινητές πτερυγώσεις συμπιεστών) που συνοδεύονται από προλέξεις πεδίων ροής οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο παράλληλα εξελισσόμενων διατριβών του ΕΘΣ. Ακόμη, ως προς τη βελτιστοποίηση και τη χρήση τεχνολογίας ΠΥΠ, επιδεικνύεται η περίπτωση βελτιστοποίησης της μορφής 3Δ αγωγού με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ολικής πίεσης.

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου ΠΕΝΕΔ01 (Μέτρο 8.3 του επιχειρησιακού προγράμματος 'Ανταγωνιστικότητα' το οποίο χρηματοδοτήθηκε κατά 75% από πόρους της Ευρωπαϊκής Ένωσης και κατά 25% από εθνικούς πόρους) με αριθμό προγράμματος 01ΕΔ131.