



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Διδακτορική Διατριβή

ΠΟΛΥΕΠΙΠΕΔΟΙ, ΠΟΛΥΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΙΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΕΣ

Ιωάννης Χ. Καμπόλης

Αθήνα 2009

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

Περίληψη

Η διδακτορική διατριβή ασχολείται με την ανάπτυξη και πιστοποίηση ενός ολοκληρωμένου λογισμικού βελτιστοποίησης βασισμένου κυρίως στους εξελικτικούς αλγόριθμους. Το λογισμικό (λογισμικό EASY, <http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/EASY>) είναι γενικής χρήσης και χρησιμοποιείται σε προβλήματα σχεδιασμού βέλτιστων μορφών στις στροβιλομηχανές και την αεροδυναμική, γενικότερα. Έμφαση δίνεται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού υπολογιστικού χρόνου, χρησιμοποιώντας υποκατάστατα πρότυπα αξιολόγησης (τα λεγόμενα 'μεταπρότυπα', σε προϋπάρχουσες αλλά και νέες παραλλαγές τους που εδώ προτείνονται) στα ιεραρχικά δομημένα, πολυεπίπεδα σχήματα αναζήτησης βέλτιστων λύσεων και στην πολυεπεξεργασία (στη μορφή cluster/ grid computing).

Η υποστήριξη της διατριβής από λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (ΥΡΔ) είναι απαραίτητη. Προς τούτο, χρησιμοποιείται λογισμικό γένεσης πλέγματος και αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων Navier--Stokes που έχει αναπτυχθεί από παλαιότερες διατριβές στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ. Πέραν αυτού, όμως, η παρούσα διατριβή συνεισφέρει και σε θέματα ΥΡΔ αναπτύσσοντας (α) ένα νέο λογισμικό γένεσης μη-δομημένων 3D υβριδικών πλεγμάτων για πτερυγώσεις, που μοντελοποιεί το χωρίο ροής με τετράεδρα, εξάεδρα, τετραπλευρικές πυραμίδες και τριγωνικά πρίσματα καθώς και (β) ένα νέο λογισμικό παράλληλης επίλυσης των εξισώσεων ροής σε κάρτες γραφικών (GPUs).

Ο πολυεπίπεδος αλγόριθμος βελτιστοποίησης χρησιμοποίησε ως λογισμικό βάσης έναν ιεραρχικό εξελικτικό αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στο ΕΘΣ, στο πλαίσιο δύο προηγούμενων διατριβών. Εξελίσσοντάς τον περαιτέρω, η παρούσα διατριβή προτείνει έναν αποδοτικότερο πολυεπίπεδο αλγόριθμο σε πολλές παραλλαγές του, στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση της απόδοσης του. Με τον όρο 'πολυεπίπεδο σχήμα', η διατριβή αναφέρεται στην ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης σε διαφορετικά επίπεδα με ιεραρχική χρήση διαφορετικών προτύπων αξιολόγησης (πολυεπίπεδη αξιολόγηση), διαφορετικών μεθόδων βελτιστοποίησης (πολυεπίπεδη αντίχτυση) ή/ και διαφορετικών διανυσμάτων μεταβλητών σχεδιασμού και περιορισμών (πολυεπίπεδη παραμετροποίηση). Τα χαμηλότερα επίπεδα στηρίζονται σε υπολογιστικά εργαλεία χαμηλής πιστότητας και κόστους και σε στοχαστικές μεθόδους οι οποίες δεν χρειάζονται την κλίση των συναρτήσεων στόχων, χρησιμοποιώντας

ταυτόχρονα λίγες μεταβλητές σχεδιασμού ή χαλαρωμένους περιορισμούς. Οι 'βέλτιστες' λύσεις που εντοπίζονται εκεί είναι προσεγγιστικές και προωθούνται στα ανώτερα επίπεδα, εμπλουτίζοντάς τα. Τα τελευταία χρησιμοποιούν πρότυπο αξιολόγησης υψηλής πιστότητας και υπολογιστικού κόστους, το πλήρες διάνυσμα μεταβλητών σχεδιασμού και τους αρχικούς περιορισμούς του προβλήματος ενώ προαιρετική είναι η χρήση αιτιοκρατικών μεθόδων σε αυτό. Στη διατριβή διερευνήθηκε η χρήση κάθε συνιστώσας του πολυεπίπεδου (αξιολόγηση/ ανίχνευση/ παραμετροποίηση) χωριστά και, στο τέλος, η συνδυασμένη χρήση όλων αυτών.

Πέραν των προηγούμενων προτάσεων, η διατριβή συνεισφέρει μια επιπλέον παραλλαγή της πολυεπίπεδης αξιολόγησης, που χαρακτηρίζεται από τη διαδοχική και επιλεκτική χρήση προτύπων και μεταπροτύπων αξιολόγησης μέσα στον ίδιο δήμο. Το νέο σχήμα, στο οποίο οι δήμοι επικοινωνούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας τις τρέχουσες καλύτερες λύσεις, ονομάζεται κατανεμημένος ιεραρχικός αλγόριθμος (σε αντίθεση με τον ιεραρχικό κατανεμημένο αλγόριθμο της προηγούμενης παραγράφου, στον οποίο ο πληθυσμός κάθε επιπέδου υποδιαιρείται σε δήμους με το ίδιο πρότυπο αξιολόγησης και κοινή βάση δεδομένων).

Σε οποιοδήποτε από τα προαναφερθέντα πολυεπίπεδα σχήματα βελτιστοποίησης, όπως και στα μονοεπίπεδα, τα μεταπρότυπα συνεισφέρουν σημαντικά στη μείωση του υπολογιστικού κόστους. Χρησιμοποιούνται για την προσεγγιστική προ-αξιολόγηση των υποψηφίων λύσεων, περιορίζοντας τη χρήση του ακριβούς προτύπου μόνο για τα υποσχόμενα μέλη της κάθε γενιάς του εξελικτικού αλγορίθμου. Ως μεταπρότυπα χρησιμοποιήθηκαν δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης και το πολυεπίπεδο αντίληπτρο. Επιπλέον, διατυπώνεται και πιστοποιείται επέκτασή τους, σύμφωνα με την οποία αυτά εκπαιδεύονται όχι μόνο ως προς την τιμή καταλληλότητας των διαθέσιμων δειγμάτων αλλά και ως προς τις παραγώγους αυτής. Επικουρούνται δε από υπάρχουσα συζυγή μέθοδο, για τον υπολογισμό των παραγώγων των συναρτήσεων-στόχων σε εφαρμογές αεροδυναμικής. Στην περίπτωση αυτή, το κόστος εκπαίδευσης ανά δείγμα αυξάνει αλλά απαιτούνται πολύ λιγότερα δείγματα για εκπαίδευση της ίδιας ακρίβειας. Με τις μελετούμενες εφαρμογές δείχνεται ότι συνολικά επέρχεται σημαντική οικονομία, συνοδευόμενη από περισσότερο αξιόπιστες προβλέψεις από τα νέα μεταπρότυπα. Κατά περίπτωση, υιοθετείται και η πρόσθετη χρήση μηχανών διανυσμάτων υποστήριξης τα οποία κατηγοριοποιούν τις υποψήφιες λύσεις σε εφικτές ή μη. Οι υποδεικνυόμενες ως εφικτές λύσεις αποκτούν προσεγγιστική τιμή κόστους από άλλα μεταπρότυπα, τα οποία εκπαιδεύονται με διαθέσιμη πληροφορία από την εφικτή περιοχή του χώρου σχεδιασμού. Τέλος, εφαρμόζεται, επικουρικά και αντί των προαναφερθέντων μεταπροτύπων, και η χρήση κληρονομικής απόδοσης τιμής καταλληλότητας.

Η χρήση πολυεπεξεργασίας άπτεται κάθε αλγορίθμου που παρουσιάζεται στη διατριβή. Εφαρμόζονται τρία είδη πολυεπεξεργασίας: (α) η παράλληλη εξέλιξη κάθε επιπέδου/ δήμου χρησιμοποιώντας πολλά νήματα εκτέλεσης, (β) η ταυτόχρονη αξιολόγηση περισσότερων της μιας υποψηφίων λύσεων που εξετάζονται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και (γ) η παράλληλη εκτέλεση του λογισμικού αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης. Οι (β) και (γ) έχουν ως σκοπό τη μείωση του χρόνου εκτέλεσης και τη μέγιστη αξιοποίηση μιας συστοιχίας επεξεργαστών (ή πλέγματος συστοιχιών). Η (β) υλοποιείται με τη σύνδεση του πολυεπίπεδου αλγορίθμου με κατάλληλα ενδιάμεσα λογισμικά (Condor & Gridway) ώστε να δρομολογείται με αυτοματοποιημένο τρόπο κάθε διεργασία αξιολόγησης στους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους. Η (γ) αναπτύχθηκε πολύ πρόσφατα για να ακολουθήσει τις τελευταίες τάσεις στο

χώρο της παράλληλης επεξεργασίας και υλοποιείται επαναδιατυπώνοντας τον επιλύτη των εξισώσεων ροής σε κάρτες γραφικών (NVIDIA GeForce GTX280). Όλοι οι υπολογισμοί, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που έγιναν σε κάρτες γραφικών, πραγματοποιήθηκαν στις τρεις συστοιχίες του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών και της Μονάδας Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και Βελτιστοποίησης του Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ.

Ο πολυεπίπεδος αλγόριθμος πιστοποιείται αρχικά σε ένα πλήθος γνωστών από τη βιβλιογραφία μαθηματικών προβλημάτων ελαχιστοποίησης και, στη συνέχεια σε πραγματικές εφαρμογές: προβλήματα σχεδιασμού μεμονωμένων αεροτομών (αντίστροφου σχεδιασμού, αύξησης άνωσης & μείωσης οπισθέλκουσας) και αεροτομών πτερυγίων στροβιλομηχανών (μείωση απωλειών ολικής πίεσης, αύξηση συντελεστή πίεσης). Εκτός από τις 2D αυτές εφαρμογές παρουσιάζονται δύο μεγάλης κλίμακας προβλήματα: (α) ο σχεδιασμός ενός υπερηχητικού μικρού επιβατικού αεροσκάφους, για το οποίο χρησιμοποιείται λογισμικό δομικής ανάλυσης (NASTRAN), αεροδυναμικής ανάλυσης και διαδικασία αλληλεπίδρασης ροής--κατασκευής και (β) η βελτιστοποίηση μιας 3D περιφερειακής πτερυγώσης αξονικού συμπιεστή, παρουσία ακτινικού διακένου, για την οποία υπάρχουν διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις. Η πρώτη άπτεται πολλών επιστημονικών περιοχών, ανήκει δηλαδή στην περιοχή που διεθνώς αποκαλείται 'multidisciplinary optimization'.

Λέξεις κλειδιά: Θερμικές Στροβιλομηχανές, Βελτιστοποίηση, Εξελικτικοί Αλγόριθμοι, Πολυεπίπεδες Τεχνικές, Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, Τεχνολογίες Πλέγματος.