



**ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. κ. **Σαμούχου Κωνσταντίνου**, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ, την οποία εκπόνησε στον Τομέα Ρευστών. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί τη Δευτέρα 28 Φεβρουαρίου ώρα 14:30 διαδικτυακά. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής:

« Η μέθοδος των τεμνόμενων κυψελών για την πρόλεξη 2Δ/3Δ ροών σε σύνθετες γεωμετρίες και τη βελτιστοποίηση μορφής με τη συζυγή μέθοδο»

Και ο Αγγλικός ως εξής

«The cut-cell method for the prediction of 2D/3D flows in Complex Geometries and the adjoint –based shape optimization».

Ο Κοσμητόρας της Σχολής


N. Μαρμαράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

- Για οδηγίες για την πρόσβαση σας διαδικτυακά απευθυνθείτε στον Επιβλέποντα του Υ.Δ..Καθ. Κ. Γιαννάκογλου (kgianna@mail.ntua.gr)

Διδακτορική Διατριβή

**Τίτλος: Η Μέθοδος των Τεμνόμενων Κυψελών για την Πρόλεξη 2Δ/3Δ
Ροών σε Σύνθετες Γεωμετρίες και τη Βελτιστοποίηση Μορφής με τη
Συζυγή Μέθοδο**

Υποψήφιος Διδάκτορας: Κωνσταντίνος Δ. Σαμούχος

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου

Περίληψη

Η διδακτορική διατριβή αναπτύσσει εκ του μηδενός ένα αυτοτελές σύνολο εργαλείων με σκοπό τη ρευστοδυναμική ανάλυση και βελτιστοποίηση μορφής σε εφαρμογές της μηχανικής των ρευστών. Η διατριβή στηρίζεται στη μέθοδο των τεμνόμενων κυψελών, προκειμένου να άρει τις δυσκολίες που μπορεί να εισάγει η γένεση πλέγματος στην ανάλυση και σχεδιασμό μηχανολογικών προϊόντων πολύπλοκης μορφής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί καρτεσιανά πλέγματα τα οποία καλύπτουν ολόκληρο το υπολογιστικό χωρίο συμπεριλαμβανομένου του τμήματος που καταλαμβάνεται από τα στερεά σώματα. Κατά την επίλυση της ροής, το στερεό μέρος του πλέγματος δεν χρησιμοποιείται και, συνεπώς, αποκόπτεται εισάγοντας την έννοια των τεμνόμενων κυψελών. Πρόκειται για ορθογώνιες παραλληλόγραμμες (2Δ) ή παραλληλεπίπεδες (3Δ) κυψέλες που τέμνονται από το όριο της γεωμετρίας και τα οποία ανασχηματίζονται αποβάλλοντας το στερεό τους τμήμα.

Η μέθοδος των τεμνόμενων κυψελών παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα με βασικότερο αυτό της γρήγορης και αυτόματης πλεγματοποίησης που παραμένει ανεξάρτητη από την πολυπλοκότητα του υπολογιστικού χωρίου. Επιπλέον, η χρήση τους είναι πλεονεκτική σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν κινούμενα στερεά σώματα, καθώς αυτά μπορούν να κινούνται ελεύθερα πάνω από το απαραμόρφωτο καρτεσιανό πλέγμα. Έτσι, αποφεύγεται εκ νέου πλεγματοποίηση ή χρήση εργαλείων παραμόρφωσης πλεγμάτων, των οποίων η αποτελεσματικότητα είναι αμφίβολη σε περιπτώσεις έντονης μετατόπισης των στερεών ορίων. Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση μορφής, η χρήση καρτεσιανών πλεγμάτων κρίνεται ιδιαίτερα επωφελής. Σε αυτά τα προβλήματα, η αποφυγή διαρκούς γένεσης ή παραμόρφωσης οριόδετων πλεγμάτων και των εγγενών δυσκολιών τους επιτρέπει την αναζήτηση βέλτιστων λύσεων επιτρέποντας την ανάδειξη πιο εξεζητημένων γεωμετρικών σχημάτων.

Αρχικά, η διατριβή παρουσιάζει μεθόδους αυτόματης και γρήγορης γένεσης πλέγματος για την υποστήριξη της μεθόδου των τεμνόμενων κυψελών, με χαμηλές απαιτήσεις σε υπολογιστική μνήμη. Η υψηλή ποιότητα των καρτεσιανών πλεγμάτων εξασφαλίζεται με την ομαλή μεταβολή της πυκνότητάς τους κοντά στα στερεά όρια και σε περιοχές που λαμβάνουν χώρα ροϊκά φαινόμενα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Στο ίδιο πλαίσιο, εισάγονται νέοι αλγόριθμοι, ικανοί να υπολογίσουν την ακριβή τομή των καρτεσιανών κυψελών με τα στερεά όρια και να κατασκευάσουν τις αντίστοιχες τεμνόμενες κυψέλες καλύπτοντας όλο το φάσμα των πιθανών γεωμετρικών υποπεριπτώσεων. Επιπλέον, αποφεύγονται αριθμητικές αστάθειες κατά την αριθμητική επίλυση της ροής μέσω της συνένωσης γειτονικών κυψελών αρκετά διαφορετικού μεγέθους. Ακόμα, παρουσιάζονται μέθοδοι γρήγορης ανίχνευσης γειτονικών κυψελών, αρίθμησης κόμβων και εδρών, καθώς και τεχνικές διάσπασης του πλέγματος σε επιμέρους τμήματα με σκοπό την επίλυση της ροής σε πολυεπεξεργαστικό περιβάλλον.

λον.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα λογισμικά αριθμητικής επίλυσης συμπίεστης και ασυμπίεστης ροής όπου, για ασυμπίεστες ροές, εφαρμόζεται η τεχνική της ψευδοσυμπίεστότητας. Το προτεινόμενο σχήμα διακριτοποίησης επωφελείται από την ιδιαίτερη δομή του καρτεσιανού πλέγματος και βασίζεται σε μια κεντροκυβελική διατύπωση πεπερασμένων όγκων, εφαρμόζοντας το σχήμα MUSCL και την κατά Roe προσεγγιστική λύση του προβλήματος Riemann. Σε περιπτώσεις κινούμενων στερεών ορίων, η πυκνωση του πλέγματος μεταβάλλεται με το χρόνο ακολουθώντας την κίνησή τους. Εφαρμόζονται καινοτόμες μέθοδοι μεταφοράς του πεδίου ροής στο πλέγμα της επόμενης χρονικής στιγμής καθώς και τεχνικές χειρισμού των καρτεσιανών κυψελών, τα οποία μεταπηδούν από τη στερεή στη ρευστή περιοχή του πλέγματος και αντίστροφα.

Η ακρίβεια του αναπτυχθέντος λογισμικού πιστοποιείται μέσω της σύγκρισης των υπολογισμών του με αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις σε εφαρμογές που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων εσωτερικής και εξωτερικής, ατρίβους ή στρωτής ροής. Επιπλέον, παρουσιάζονται βιομηχανικές εφαρμογές που αναδεικνύουν τη χρηστικότητα και αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Αρχικά, μελετάται η ροή μέσα σε μια μηχανή κύλισης, κάτι το οποίο σπανίζει στη βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, εξετάζεται η ρευστοδυναμική συμπεριφορά μιας διαφραγματικής αντλίας χωρίς βαλβίδες, όπου παρά τον μεγάλο αριθμό κυψελών που σαρώνονται από το στερεό όριο κάθε χρονική στιγμή, το λογισμικό εγγυάται τη διατήρηση της μάζας. Τέλος, προσομοιώνεται η ροή σε βαθμίδα αντλίας εξόρυξης πετρελαίου μικτού τύπου όπου η μέθοδος των τεμνόμενων κυψελών προτείνεται ως εναλλακτικός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος αλληλεπίδρασης της κινούμενης και της ακίνητης πτερύγωσης.

Σε προβλήματα βελτιστοποίησης μορφής, εφαρμόζονται η συνεχής και διακριτή συζυγής διατύπωση για τον υπολογισμό της κλίσης της συνάρτησης στόχου. Οι μέθοδοι αυτές είναι ιδιαίτερα προσφιλείς λόγω του ιδιαίτερα χαμηλού υπολογιστικού τους κόστους, το οποίο παραμένει ανεξάρτητο του πλήθους των μεταβλητών σχεδιασμού που ελέγχουν το σχήμα της εκάστοτε γεωμετρίας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η μαθηματική διατύπωση των μεθόδων αυτών και ανάπτυξη του αντίστοιχου λογισμικού για συνεκτικές ή/και μη-μόνιμες ροές σε πλέγματα τεμνόμενων κυψελών παρουσιάζεται για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία. Όσον αφορά τη συνεχή διατύπωση, πραγματοποιείται διερεύνηση των τρόπων διακριτοποίησης των συζυγών εξισώσεων και προτείνονται τα συζυγή ισοδύναμα των σχημάτων FVS, HLLC και Roe.

Η ανάπτυξη του λογισμικού της διακριτής συζυγούς μεθόδου βασίζεται στη δια χειρός διαφόριση του αντίστοιχου λογισμικού επίλυσης της συμπίεστης και ασυμπίεστης ροής. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στο σωστό χειρισμό του χρονικού όρου, κάτι που συνεπάγεται τη διαφόριση των αλγορίθμων που είναι υπεύθυνοι για τη σωστή μεταφορά του στιγμιαίου πεδίου ροής στο πλέγμα της επόμενης χρονικής στιγμής. Στη συνέχεια, το λογισμικό εφαρμόζεται σε προβλήματα βιομηχανικού σχεδιασμού, όπως η ελαχιστοποίηση των απωλειών ολικής πίεσης ενός αγωγού, η μεγιστοποίηση της άνωσης πτέρυγας και η ελαχιστοποίηση της εφραπτομενικής ταχύτητας στην έξοδο βαθμίδας αντλίας εξόρυξης πετρελαίου. Τέλος, χρησιμοποιείται στη βελτιστοποίηση πολλών στόχων υπό περιορισμούς μιας διαφραγματικής αντλίας. Σε όλες τις περιπτώσεις, το λογισμικό παρήγαγε γεωμετρικά σχήματα αυξημένης απόδοσης, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της αναπτυχθείσας μεθόδου.

Ph.D. Thesis

**Title: The Cut-Cell Method for the Prediction of 2D/3D Flows
in Complex Geometries and the Adjoint-Based Shape Optimization**

Ph.D. Candidate: Konstantinos D. Samouchos

Supervisor: Kyriakos C. Giannakoglou

Abstract

This dissertation thesis develops integrated, robust, and reliable Computational Fluid Dynamics (CFD) methods and software for the analysis and shape optimization in real-world applications in fluid mechanics and aerodynamics. To this end, the cut-cell method, which removes mesh generation barriers from the flow analysis and design process is adopted. The computational domain is firstly covered with a Cartesian mesh and then parts occupied by the solid bodies are discarded, giving rise to the cut-cell mesh. The benefits of this method are profound in fluid problems with moving solid bodies which are allowed to move upon the stationary background mesh, avoiding the use of mesh deformation tools. Moreover, contrary to body-conforming approaches, the changes in shape during an optimization loop do not affect the surrounding mesh, preventing mesh generation failure and the premature breakdown of the optimization loop. Therefore, this dissertation thesis exploits these beneficial features and develops a cut-cell-based flow solver and shape optimization tool for compressible and incompressible flow problems.

Firstly, a fast and automated mesh generation method with low memory requirements is developed, which guarantees smooth mesh refinement close to solid boundaries and flow features that require higher mesh resolution. Cells intersected by the geometry get rid of their solid part by giving rise to the so-called cut-cells. New algorithms are proposed for computing their topological characteristics needed by the flow-solver and post-processor. Numerical instabilities caused by the presence of small cut-cells adjacent to much larger ones are avoided by cell-merging, according to which small cell fragments are geometrically merged with their neighbors. Furthermore, algorithms for fast neighbor detection, mesh connectivity computation, and mesh-partitioning are also developed and used.

Then, compressible and incompressible flow solvers are developed, the latter being based on the artificial compressibility method, to numerically solve the (U)RANS equations. The presented numerical scheme takes advantage of the Cartesian mesh structure and uses a cell-centered, finite volume approach employing the MUSCL scheme and the approximate Riemann solver of Roe for the convection terms. In applications concerning moving geometries, the mesh is continuously adapted to their motion, employing local refining and coarsening operations. Strategies to accurately extrapolate the current flow solution to the mesh of the next time step are presented. Additionally, a novel method to impose the flow conservation laws even in large geometry displacements is developed by performing a cell clustering algorithm which properly treats the sudden change in cells' status from solid to fluid and vice-versa.

The resulting software is parallelized using the Open MPI protocol and assessed in a series of tests concerning internal and external, inviscid and laminar flows. Moreover, comparisons with data provided by conventional body-conforming approaches indicate its ability to deliver flow solutions of the same accuracy. The method's effectiveness is demonstrated in several challenging applications of practical interest. Among other, the flow simulation in a scroll machine, which is quite rare in the literature due to its high complexity, is presented. Another application concerns the flow inside a valveless diaphragm micropump, where the mass conservation is successfully imposed despite the intensive deformation of the diaphragm. Finally, the flow within an Electrical Submersible Pump (ESP) stage is studied, introducing the cut-cell method as an alternative to address the rotor-stator interaction problem.

In the field of gradient-based shape optimization, the continuous and discrete adjoint approaches are developed, programmed, and used. These methods compute the gradient of the objective function at a cost, which is independent of the number of design variables, providing a viable tool for industrial design processes. Their mathematical formulation, software development, and implementation in cut-cell meshes for viscous and unsteady flows are presented for the first time in the literature. Concerning the continuous approach, different discretization schemes for the adjoint Partial Differential Equations (PDEs) are investigated, resulting in adjoint schemes which are equivalent to the FVS, HLLC, and Roe's approximate Riemann primal solvers.

Moreover, a discrete adjoint software is developed by accurately hand-differentiating both the compressible and incompressible flow cut-cell solvers. Particular emphasis is laid on properly treating the discrete adjoint time integration by differentiating algorithms dealing with flow field extrapolation between meshes of subsequent time steps. Furthermore, the adjoint cut-cell software is verified and applied to industrial optimization problems, such as the total pressure losses minimization of a duct, the lift maximization of a wing, and the outlet tangential velocity minimization of the Electrical Submersible Pump stage. Finally, the multi-objective optimization under uncertainties of the diaphragm micropump is carried out. In all cases, solutions of adequately improved performance are delivered, confirming the effectiveness of the developed method and software.