



**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. ΒΡΥΩΝΗ Παναγιώτη-Γιάννη**, κατόχου Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού, την οποία εκπόνησε στον Τομέα **Ρευστών**. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί τη Μεγάλη Δευτέρα 18 Απριλίου, ώρα 9:00π.μ διαδικτυακά. Ο τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής :

«Βελτιστοποίηση Μορφής και Τοπολογίας με τη Μέθοδο των Τεμνομένων Κυψελών και τη Συνεχή Συζυγή της για Μονοφασικές και Διφασικές Τυρβώδεις Ροές, σε Πολύ επεξεργαστικό Περιβάλλον»

Όποιος ενδιαφέρεται να την παρακολουθήσει παρακαλείται να στείλει email (kgianna@mail.ntua.gr) ώστε να του δοθεί πρόσβαση.





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών
Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης

Βελτιστοποίηση Μορφής και Τοπολογίας με τη Μέθοδο των Τεμνόμενων Κυψελών και τη Συνεχή Συζυγή της για Μονο/Διφασικές Τυρβώδεις Ροές, σε Πολύ-επεξεργαστικό Περιβάλλον

Βρυώνης Παναγιώτης-Γιάννης

Επιβλέπων: Κυριάκος Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

Η διδακτορική αυτή διατριβή ασχολείται με την ανάπτυξη ενός ευρείας χρήσης λογισμικού ανάλυσης και σχεδιασμού πρακτικών εφαρμογών της μηχανικής των ρευστών με βάση τη Μέθοδο Τεμνόμενων Κυψελών. Η τελευταία βασίζεται στην τροποποίηση Καρτεσιανών πλεγμάτων, αποκόπτοντας τμήματα που καταλαμβάνονται από τα στερεά σώματα, ούτως ώστε να κατασκευάσει οριόδετα πλέγματα. Συνεπώς, το τελικό υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται κυρίως από Καρτεσιανές κυψέλες και εκείνες που τέμνονται με το στερεό σώμα και τους έχει αποκοπεί ένα τμήμα. Η χρήση Καρτεσιανών πλεγμάτων εισάγει αυτοματοποίηση στη διαδικασία γένεσης πλέγματος και, συνεπώς, η ανάπτυξη εξειδικευμένων μεθόδων που εκμεταλλεύονται αυτήν την ιδιότητα είναι επίσης κύριος στόχος της διατριβής. Σημείο αναφοράς αποτελεί ένα υπάρχον λογισμικό που υλοποιεί τη Μέθοδο Τεμνόμενων Κυψελών για την επίλυση ασυμπίεστων, στρωτών, μονοφασικών ροών, με τη χρήση της μεθόδου της ψευδοσυμπίεστότητας, το οποίο επεκτείνεται τυρβώδεις διφασικές ροές που παρουσιάζουν σπηλαίωση και σε εφαρμογές σχεδιασμού με τη χρήση της συνεχούς συζυγούς μεθόδου για τον υπολογισμό παραγώγων ευαισθησίας.

Αρχικά, η επέκταση σε τυρβώδεις ροές γίνεται με την υλοποίηση του μοντέλου τύρβης $k - \varepsilon$ των Launder και Spalding. Το σύστημα εξισώσεων (μέσης ροής και τυρβωδών μεταβλητών) επιλύεται πεπλεγμένα. Η επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου τύρβης βασίστηκε στην ευρεία χρήση του σε διφασικές ροές, καθώς επίσης και στη δυσκολία της Μεθόδου Τεμνόμενων Κυψελών να δημιουργεί, τοπικά, κυψέλες μεγάλου λόγου διαστάσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία χρήσης μοντέλων τύρβης χαμηλών αριθμών Reynolds λόγω των τεράστιων απαιτήσεων πυκνωσης. Έτσι, η χρήση συναρτήσεων τοίχου αποτελεί, ουσιαστικά, μονόδρομο. Παρόλα αυτά, η χρήση συναρτήσεων τοίχου παρουσιάζει επίσης κάποιες ιδιαιτερότητες λόγω της αρκετά μεταβαλλόμενης απόστασης των βαρύκεντρων των Τεμνόμενων Κυψελών από το στερεό όριο και τροποποιείται καταλλήλως.

Όσον αφορά την ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων ανάλυσης διφασικών ροών που παρουσιάζουν σπηλαίωση, η αριθμητική μέθοδος βασίζεται στη θεώρηση ενός ομογενούς μείγματος. Πρακτικά, γίνεται η εισαγωγή ενός ψευδο-ρευστού, του οποίου η πυκνότητα και μοριακή συνεκτικότητα προκύπτει βάσει της τοπικής συγκέντρωσης των ουσιών που το αποτελούν. Έτσι, οι εξισώσεις ροής για τη διατήρηση όγκου-ορμής και τη μεταφορά των τυρβωδών μεταβλητών μπορούν να εκφραστούν ως προς το μείγμα και τη μεταφορά της δευτερεύουσας φάσης, μειώνοντας το συνολικό υπολογιστικό κόστος. Το φαινόμενο της σπηλαίωσης εισάγεται στην αριθμητική μέθοδο μέσω του μοντέλου του Kunz, που μοντελοποιεί τις διαδικασίες εξάτμισης και συμπύκνωσης. Η αριθμητική μέθοδος που αναπτύχθηκε για την επίλυση των εξισώσεων, βασίζεται στην ήδη υπάρχουσα υποδομή της κεντροκυψελικής διατύπωσης πεπερασμένων όγκων. Ο υπολογισμός των ατριβών όρων γίνεται μέσω του σχήματος MUSCL και του κατά Roe επιλύτη. Στο τμήμα αυτό απαιτείται η τροποποίηση του σχήματος το οποίο λαμβάνει υπόψη τις επιπλέον ιδιοτιμές και προσταθεροποίηση κατά Kunz. Συνολικά, το αριθμητικό σχήμα που υλοποιήθηκε επιτρέπει την ανάλυση διφασικών ροών μεγάλου λόγου πυκνοτήτων και επωφελείται τοπικών τεχνικών πυκνωσης του Καρτεσιανού πλέγματος.

Στο τμήμα της διατριβής που αφορά την ανάπτυξη μεθόδων σχεδιασμού καθοδηγούμενων από την κλίση της συνάρτησης-στόχου (παραγώγων ευαισθησίας), έγινε ανάπτυξη εργαλείων βελτιστοποίησης μορφής. Για τον υπολογισμό των παραγώγων ευαισθησίας έγινε η μαθηματική διατύπωση και ανάπτυξη του συζυγούς προβλήματος, με βάση τη συνεχή συζυγή μέθοδο, που διέπεται από τις διφασικές, τυρβώδεις εξισώσεις ροής που μοντελοποιούν και φαινόμενα σπηλαίωσης. Η συζυγής μέθοδος είναι η κυρίαρχη μέθοδος υπολογισμού παραγώγων ευαισθησίας αφού μπορεί να τις υπολογίζει με κόστος ανεξάρτητο του πλήθους των μεταβλητών σχεδιασμού, επιτρέποντας την εφαρμογή του σε προβλήματα μεγάλης κλίμακας. Η αναπτυχθείσα μέθοδος εντάσσεται σε ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης μορφής, και εφαρμόζεται σε μεμονωμένες αερο/υδροτομές και αγωγούς, παραμετροποιημένες με τη χρήση πολυωνύμων Bézier–Bernstein. Πλεονεκτήματα, που σχετίζονται με τη χρήση της Μεθόδου των Τεμνόμενων Κυψελών, είναι το ότι επιτρέπει μεγάλες μετατοπίσεις του υπό μελέτη σώματος, περιορίζει τις αλλαγές του πλέγματος κοντά στο στερεό σώμα, και εγγυάται τη γένεση καλής ποιότητας πλεγμάτων κατά τη βελτιστοποίηση.

Η δυνατότητα της Μεθόδου των Τεμνόμενων Κυψελών να παράγει καλής ποιότητας πλέγματα γύρω από στερεά σώματα που επιδέχονται μεγάλες αλλαγές, ενέπνευσε την ανάπτυξη μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης τοπολογίας. Η αναπτυχθείσα μέθοδος προσφέρει υψηλή ακρίβεια κατά τη διάρκεια επίλυσης του προβλήματος τοπολογίας, μέσω της κατασκευής των στερεών ορίων. Για την υλοποίηση αυτής της μεθόδου, ήταν, αρχικά, αναγκαία η τροποποίηση του τρόπου κατασκευής των Τεμνόμενων Κυψελών. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης τοπολογίας χαρακτηρίζονται από μεγάλο αριθμό οριοθετημένων μεταβλητών σχεδιασμού και την εισαγωγή συναρτήσεων περιορισμού. Συνεπώς, ήταν απαραίτητη η υλοποίηση μιας μεθόδου ανανέωσης των μεταβλητών σχεδιασμού που να μπορεί να διαχειριστεί τέτοιου είδους προβλήματα βελτιστοποίησης (GCMMA). Για την αξιολόγηση της νέας μεθόδου, έγιναν συγκρίσεις με κλασική μέθοδο βελτιστοποίησης τοπολογίας, που βασίζεται στην τεχνική του πορώδους, για να εξαχθούν αποτελέσματα. Στο τμήμα αυτό, αναπτύχθηκε εργαλείο επαναξιολόγησης λύσεων, που προκύπτουν από την τεχνική του πορώδους σε οριόδετα πλέγματα, ώστε να είναι πιο αντιπροσωπευτική η σύγκριση.

Όλα τα παραπάνω εντάχθηκαν στο οικείο λογισμικό Τεμνόμενων Κυψελών και επιτρέπουν την παράλληλη εκτέλεση σε πολλούς επεξεργαστές μέσω του προτύπου MPI. Επιπρόσθετα, έγινε χρήση εντολών OpenMP που αξιοποιούν νήματα εντός των επεξεργαστών για την παραλληλοποίηση υπολογιστικά ακριβών διεργασιών.

Λέξεις Κλειδιά: Μέθοδοι Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, Διφασικές ροές, Βελτιστοποίηση Μορφής και Τοπολογίας, Συνεχής Συζυγής Μέθοδος, Μέθοδος Τεμνόμενων Κυψελών.

Αθήνα, 2022



National Technical University of Athens
School of Mechanical Engineering
Fluids Section
Laboratory of Thermal Turbomachines
Parallel CFD & Optimization Unit

Shape and Topology Optimization using the Cut-Cell Method and its Continuous Adjoint for Single- and Two-phase Turbulent flows, in a Multiprocessor Environment

Vryonis Panayiotis-Yiannis

Supervisor: Kyriakos C. Giannakoglou, Professor NTUA

PhD Thesis Abstract

This PhD thesis focuses on developing a highly automated, general-purpose software for the analysis and design of practical applications in the field of fluid mechanics by exploiting the merits of the Cut-Cell method. The principal idea of the Cut-Cell method lies in the generation of simple Cartesian meshes, subsequently modified by discarding parts that reside in the solid region. This process creates cut cells that conform with the body surface. The use of Cartesian meshes eases the mesh generation process of the entire workflow, regardless of the body surface complexity. Emphasis is laid on the extension of the existing Cut-Cell software, capable of numerically solving laminar, incompressible single-phase flows, via the artificial compressibility method, to turbulent, single- and two-phase flows exhibiting cavitation. In addition, the developed Cut-Cell method is applied in gradient-based optimization using the continuous adjoint method.

The Cut-Cell software is extended to the RANS equations using the standard $k - \varepsilon$ turbulence model, solved coupled with the mean flow equations. The choice of this turbulence model is its broad usage in two-phase flows. In addition, the Cut-Cell method necessitates the use of a high Reynolds turbulence model, due to difficulties in refining along the normal-to-the-wall direction to accurately resolve the turbulent boundary layers, which results in impractical meshing requirements. Thus, closure is realized via a modified wall functions technique, while also accounting for varying first cell distances, normal to the wall.

The analysis of two-phase flows that include cavitation effects follows the homogeneous mixture assumption. Thus, a mixture pseudo-fluid is introduced, the properties of which arise based on the local composition of each constituent. These are assumed to have a constant density. The RANS equations are, thus, expressed for the mixture fluid and an additional species transport equation is included. Cavitation effects are introduced using the Kunz cavitation model, which quantifies the appropriate mass transfer between constituents, to account for evaporation and condensation. Numerically, a shock-capturing scheme is employed to account for the large flow variable gradients present at the two-phase interfaces, opting for their flexibility and the straightforward extension from the existing gas-dynamics solver. In detail, the numerical solution process uses a cell-centered finite volume method that compute inviscid numerical fluxes via the MUSCL scheme and Roe's approximate Riemann solver. Due to the homogeneous mixture assumption and the involvement of additional transport equations for the species, the resulting governing equation need be appropriately preconditioned (Kunz preconditioner). The resulting numerical scheme allows for the simulation of two-phase flows with large density gradients and benefits from the localized mesh refinement from the Cut-Cell method.

In the field of gradient-based optimization, the development of both shape and topology optimization tools based on the Cut-Cell method is pursued. The continuous adjoint equivalent to the described two-phase RANS equations and cavitation model is mathematically formulated to compute objective function gradients at a cost that is independent to the number of design variables. The method is integrated into a shape optimization framework and applied to isolated air/hydrofoils and ducts, parameterized using Bézier–Bernstein polynomials. The inclusion of the Cut-Cell method in a shape optimization framework confines mesh changes at the immediate vicinity of the body surface, circumventing the need for mesh displacement techniques, and allows large displacements without aggravating the Cut-Cell mesh quality.

The ability of the Cut-Cell method to automatically generate valid meshes around rapidly changing solid boundaries inspired the development of a new topology optimization workflow. The new method overcomes the low near-wall accuracy of porosity-based optimization methods by reconstructing the solid walls in each optimization cycle. This is achieved by modifying the process that generates the Cut-Cells. Furthermore, the GCMMA algorithm is implemented to facilitate the large number of bounded design variables and introduced constraint function, typically used in topology optimization. The developed method is assessed through comparisons with a porosity-based topology optimization solver. For the sake of fairness, porosity-based optimized solutions are re-evaluated on body-fitted Cut-Cell meshes, using a utility tool developed herein.

The extensions are integrated into the existing Cut-Cell software and allow parallel computations on many processors using the MPI protocol. Additionally, selected computationally intensive tasks are locally parallelized using threads via OpenMP directives.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Two-Phase flow, Shape and Topology Optimization, Continuous Adjoint Method, Cut-Cell Method.

Athens, 2022