



ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. : 31421
Αθήνα, 21/7/20

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

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

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. κ. Γκαραγκούνη Κωνσταντίνου του Θεοφάνη, κατόχου Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού, την οποία εκπόνησε στον Τομέα Ρευστών. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Τρίτη 1 Σεπτεμβρίου 2020, ώρα 09:00π.μ διαδικτυακά. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής :


«Η συνεχής συζυγής μέθοδος για τη βελτιστοποίηση μορφής στην αεροδυναμική και τη συζευγμένη μεταφορά θερμότητας, με τυρβώδεις ροές»

Και ο Αγγλικός ως εξής:

«*The continuous adjoint method in aerodynamic and conjugate heat transfer shape optimization, for turbulent flows*»

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

Ο Κοσμήτορας της Σχολής


Ν. Μαρμαράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης

The Continuous Adjoint Method in Aerodynamic and Conjugate Heat Transfer Shape Optimization, for Turbulent Flows

Η Συνεχής Συζυγής Μέθοδος για τη Βελτιστοποίηση Μορφής στην Αεροδυναμική και τη Συζευγμένη Μεταφορά Θερμότητας, με Τυρβώδεις Ροές

Κωνσταντίνος Θ. Γκαραγκούνης

Επιβλέπων Καθηγητής: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

Η διδακτορική διατριβή στοχεύει στην ανάπτυξη, προγραμματισμό και πιστοποίηση μεθόδων βελτιστοποίησης μορφής (shape optimization) οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια και χαμηλό υπολογιστικό κόστος και στηρίζονται στη συνεχή συζυγή μέθοδο (continuous adjoint). Οι μέθοδοι που αναπτύσσονται αντιμετωπίζουν προβλήματα είτε (μόνο) ροής ρευστού είτε συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας (Conjugate Heat Transfer, CHT). Επιπλέον, διερευνώνται μέθοδοι υπολογισμού του μετώπου μη-κυριαρχούμενων λύσεων (Pareto) σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, οι οποίες βασίζονται στην κλίση των συναρτήσεων-στόχου. Τέλος, αναπτύσσεται η επεμβατική μέθοδος αναπτύγματος πολυωνυμικού χάους (intrusive Polynomial Chaos Expansion, iPCE) για προβλήματα βελτιστοποίησης CHT με αβεβαιότητες. Η διδακτορική διατριβή διαρθρώνεται σε τέσσερις άξονες:

Ο πρώτος άξονας της διατριβής αφορά στη διαχείριση των παραγώγων ευαισθησίας πλέγματος, δηλαδή των παραγώγων της θέσης των κόμβων του πλέγματος ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού, στη συνεχή συζυγή μέθοδο. Μέχρι τώρα, οι μετατοπίσεις των εσωτερικών κόμβων του πλέγματος λαμβανόταν υπόψη κατά στην κλίση της συνάρτησης-στόχου, στις οποίες εμφανίζονται οι παράγωγοι ευαισθησίας πλέγματος μέσα σε Χωρικά Ολοκληρώματα (Field Integral adjoint - συζυγής διατύπωση FI). Ο υπολογισμός των παραγώγων ευαισθησίας πλέγματος στο εσωτερικό του χωρίου έχει κόστος ίσο με τη μετατόπιση του πλέγματος τόσες φορές όσες είναι και οι μεταβλητές σχεδιασμού. Αποφεύγεται δε διατυπώνοντας το συζυγές πρόβλημα του μοντέλου μετατόπισης πλέγματος. Έτσι προκύπτουν παράγωγοι που αποτελούνται μόνο από επιφανειακά ολοκληρώματα και η μέθοδος ονομάζεται συζυγής διατύπωση E-SI (Enhanced-Surface Integral adjoint). Με τον όρο 'Enhanced' διαφοροποιείται από προγενέστερες της στις οποίες η μετατόπιση των εσωτερικών κόμβων του πλέγματος δεν λαμβάνεται υπόψη (Severed SI). Η ανάπτυξη της μεθόδου E-SI βασίστηκε στην υπόθεση ότι τη μετατόπιση των κόμβων του πλέγματος διέπουν εξισώσεις Laplace. Εδώ εξετάζεται, εάν αυτή η παραδοχή είναι ασφαλής ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικά μοντέλα μετατόπισης πλέγματος. Συγκρίνονται παράγωγοι που υπολογίζονται με βάση άλλα, ευρέως διαδεδομένα, μοντέλα μετατόπισης (ογκομετρικές B-Splines, Γράφοι Delaunay, μέθοδος Inverse Distance Weighting), δείχνοντας ότι το είδος του μοντέλου μετατόπισης δεν επιδρά στις τιμές των παραγώγων. Συνεπώς, δεν απαιτείται η ανάπτυξη της συνεχούς συζυγούς διατύπωσης E-SI εξαρχής, κάθε φορά που αλλάζει το μοντέλο μετατόπισης πλέγματος το οποίο υποστηρίζει μεθόδους βελτιστοποίησης μορφής.

Στον δεύτερο άξονα της διατριβής επεκτείνονται οι συζυγείς διατυπώσεις E-SI και FI που είχαν αναπτυχθεί σε προηγούμενες διδακτορικές διατριβές στην ΜΠΥΡ&B ΕΜΠ για προβλήματα μόνο ροής, σε προβλήματα CHT. Ο υπολογισμός παραγώγων με ακρίβεια εξασφαλίζεται μέσω της διαφόρισης του μοντέλου τύρβης, που στη διατριβή αυτή είναι το Spalart-Allmaras. Στα προβλήματα CHT, εκτός από τις εξισώσεις συνέχειας, ορμής και μοντέλου τύρβης, επιλύονται η ενεργειακή εξίσωση στο ρευστό και η εξίσωση αγωγής της θερμότητας στο στερεό, λαμβάνοντας υπόψη και τη συναλλαγή θερμότητας μέσω της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού. Επιβεβαιώθηκε ότι, και σε προβλήματα CHT, μειώνεται η ακρίβεια των παραγώγων, όταν υιοθετείται η παραδοχή της 'παγωμένης τύρβης', με την οποία θεωρείται αμελητέα η εξάρτηση της τυρβώδους συνεκτικότητας από τις μεταβλητές σχεδιασμού. Επιπλέον, επεκτείνεται η κατάλληλη διαχείριση των παραγώγων ευαισθησίας πλέγματος σε προβλήματα CHT, διατυπώνοντας συζυγείς εξισώσεις

μετατόπισης για το στερεό πέρα από το ρευστό. Συγκρίσεις ανάμεσα στις μεθόδους FI και E-SI επιβεβαιώνουν ότι και σε προβλήματα CHT η δεύτερη μέθοδος είναι οικονομικότερη. Επίσης, ο υπολογισμός παραγώγων μέσω της διατύπωσης (Severed) SI συχνά βλάπτει την ακρίβεια των παραγώγων. Τέλος, και σε προβλήματα CHT είναι αμελητέα η επίδραση της επιλογής του μοντέλου μετατόπισης πλέγματος στις παραγώγους.

Στον τρίτο άξονα της διατριβής, παραλλαγές ενός αλγορίθμου πρόβλεψης-διόρθωσης οι οποίες βασίζονται στη συζυγή μέθοδο, υπολογίζουν το μέτωπο Pareto για προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Οι παραλλαγές του αλγορίθμου πρόβλεψης-διόρθωσης αρχικοποιούνται εντοπίζοντας ένα σημείο του μετώπου Pareto, μέσω βελτιστοποίησης για μία μόνο από τις αντικρουόμενες συναρτήσεις-στόχους. Στα συστήματα, για την ανανέωση των μεταβλητών σχεδιασμού, στα βήματα πρόβλεψης και διόρθωσης, αποφεύγεται ο ακριβός υπολογισμός του ακριβούς Εσσιανού μητρώου των συναρτήσεων-στόχου, είτε με: (α) τον υπολογισμό γινομένων Εσσιανού-διανυσμάτων, που χρησιμοποιούνται σε έναν αλγόριθμο επίλυσης εξισώσεων τύπου Krylov είτε με (β) την προσέγγιση του Εσσιανού μητρώου μέσω της μεθόδου BFGS. Προκειμένου να υπολογιστούν οικονομικά τα γινόμενα Εσσιανού-διανυσμάτων, διατυπώνονται νέες εξισώσεις μέσω της Ευθείας Διαφορίσης των πρωτευουσών και συζυγών εξισώσεων. Συγκρίνοντας τις δύο εναλλακτικές, αυτή που προσεγγίζει το Εσσιανό μητρώο στο βήμα πρόβλεψης έχει το χαμηλότερο κόστος ενώ δείχνεται ότι η παράλειψη του βήματος πρόβλεψης οδηγεί στην αύξηση του υπολογιστικού κόστους. Περαιτέρω συγκρίσεις κόστους μεταξύ του πιο οικονομικού αλγορίθμου πρόβλεψης-διόρθωσης και μεθόδων βελτιστοποίησης με χρήση βαρών δείχνουν την υπεροχή της πρώτης μεθόδου.

Ο τελευταίος άξονας αφορά στη βελτιστοποίηση μορφής σε προβλήματα CHT με αβεβαιότητες, με τη μέθοδο iPCE. Εξετάζονται προβλήματα με δύο αβέβαιες μεταβλητές που ακολουθούν κανονική κατανομή. Οι μεταβλητές στις πρωτεύουσες και συζυγείς εξισώσεις χωρίς αβεβαιότητες και οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες αναλύονται σε γραμμικούς συνδυασμούς ορθογωνίων πολυωνύμων για τάξη χάους ίση με δύο. Προκύπτουν νέα συστήματα εξισώσεων, που επιλύονται για να υπολογιστούν οι στατιστικές ροπές και οι παράγωγοί τους. Η ακρίβεια των στατιστικών ροπών, που προσεγγίζονται με τη μέθοδο iPCE, πιστοποιείται χρησιμοποιώντας πιο κοστοβόρες μεθόδους, τη μη-επεμβατική μέθοδο PCE (non-intrusive PCE-niPCE) και τη Monte Carlo. Επιπλέον, λαμβάνουν χώρα βελτιστοποιήσεις μορφής με αβεβαιότητες στις συνθήκες εισόδου του ρευστού και το πάχος θερμικής μόνωσης στη διεπιφάνεια ρευστού-στερεού.

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι πιστοποιούνται αρχικά σε 2D προβλήματα μόνο ροής, για ροές γύρω από αεροτομές και μέσα σε αγωγούς σχήματος 'S' και σε προβλήματα CHT με αγωγό σχήματος 'S' σε επαφή με στερεό. Σε προβλήματα ροής γύρω από αεροτομές υπολογίζονται μέτωπα Pareto για αντικρουόμενους στόχους την άνωση και την αεροδυναμική αντίσταση. Σε πρόβλημα CHT για ένα εσωτερικά ψυχόμενα 2D πτερύγια σταθερής πτερύγωσης στροβίλου, ελαχιστοποιείται η μέση θερμοκρασία του, μεταβάλλοντας το σχήμα του και τις θέσεις των οπών εσωτερικής ψύξης. Επίσης, βελτιστοποιείται 2D αγωγός σε επαφή με στερεό, για ελάχιστες απώλειες ολικής πίεσης του ρευστού, επιβάλλοντας περιορισμούς που αποτρέπουν την υπερθέρμανση του στερεού. Επιπλέον, πραγματοποιούνται βελτιστοποιήσεις σε αγωγό ψύξης μέσα σε στερεό, θέτοντας ως στόχους τη μεγιστοποίηση της θερμορροής από το στερεό προς το ψυκτικό και την ελαχιστοποίηση του ποσοστού του όγκου του στερεού με υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, βελτιστοποιείται ο αγωγός ψύξης κυλινδροκεφαλής σε μηχανή εσωτερικής καύσης ενός αυτοκινήτου, με δύο διαφορετικούς στόχους: (α) ελάχιστες μέγιστες θερμοκρασίες της κυλινδροκεφαλής και (β) ελάχιστες απώλειες ολικής πίεσης στο ψυκτικό. Τέλος, υπολογίζεται μέτωπο Pareto σε πτερύγια ψύξης, με τις δύο προαναφερθείσες συναρτήσεις ως τους δύο στόχους.

Οι προαναφερθείσες μέθοδοι προγραμματίστηκαν στο περιβάλλον ανοιχτού κώδικα OpenFOAM[®], το οποίο παρέχει υποδομή που βασίζεται στην κεντροκυβελική διατύπωση πεπερασμένων όγκων.

Η ερευνητική εργασία υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) και από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ), στο πλαίσιο της Δράσης «Υποτροφίες ΕΛΙΔΕΚ Υποψηφίων Διδακτόρων» (αρ.Σύμβασης 1796).



Λέξεις κλειδιά: Συζευγμένη Μεταφορά Θερμότητας, Αεροδυναμική Βελτιστοποίηση Μορφής, Συνεχής Συζυγής Μέθοδος, Συζυγές Μοντέλο Τύρβης, Παράγωγοι Ευαισθησίας Πλέγματος, Μοντέλο Μετατόπισης Πλέγματος, Μέτωπα Pareto, Ποσοτικοποίηση Αβεβαιοτήτων, Βελτιστοποίηση υπό Αβεβαιότητες, Επεμβατικό Ανάπτυγμα Πολυωνυμικού Χάους

Αθήνα, 2020