



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 της Υ.Δ. **κας ΚΟΝΤΟΥ Μαρίας**, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ (Integrated Master), την οποία εκπόνησε στον Τομέα Ρευστών. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Τετάρτη 6 Δεκεμβρίου 2023 και ώρα 10:00 π.μ. στο αμφιθέατρο Πολυμέσων του κτιρίου της Βιβλιοθήκης του ΕΜΠ, με δυνατότητα διαδικτυακής παρακολούθησης*. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής της Διατριβής έχει ως εξής:

«Η συνεχής Συζυγής Μέθοδος με Συμβατά Σχήματα Διακριτοποίησης για Ροές με Μετάβαση και η Χρήση Βαθέων Νευρωνικών Δικτύων στη Βελτιστοποίηση Μορφής στη Ρευστομηχανική»

Και ο Αγγλικός τίτλος έχει ως εξής:

«The Continuous Adjoint Method with consistent Discretization Schemes for Transitional Flows and the use of Deep Neural Networks in Shape Optimization in Fluid Mechanics»

Ο Κοσμήτορας της Σχολής

Ι. Αντωνιάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

- Όποιος ενδιαφέρεται για διαδικτυακή παρακολούθηση παρακαλούμε να στείλει e-mail στον επιβλέποντα της Δ.Δ. **Καθ. Κ. Γιαννάκογλου** kgianna@central.ntua.gr



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

Η Συνεχής Συζυγής Μέθοδος με Συμβατά Σχήματα Διακριτοποίησης για Ροές με Μετάβαση και η Χρήση Βαθέων Νευρωνικών Δικτύων στη Βελτιστοποίηση Μορφής στη Ρευστομηχανική

Μαρίνα Γ. Κοντού

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

Η Διδακτορική αυτή Διατριβή πραγματεύεται την ανάπτυξη, πιστοποίηση και εφαρμογή μεθόδων και λογισμικού για προβλήματα βελτιστοποίησης μορφής στη ρευστοδυναμική. Έμφαση δίνεται (α) στη μαθηματική διατύπωση, προγραμματισμό και πιστοποίηση της συνεχούς συζυγούς μεθόδου για βελτιστοποίηση μορφής σε ροές συμπιεστού ρευστού με μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή, (β) την ανάπτυξη συμβατών σχημάτων διακριτοποίησης για τις εξισώσεις και οριακές συνθήκες της συνεχούς συζυγούς μεθόδου και (γ) τη χρήση Βαθέων Νευρωνικών Δικτύων (ΒΝΔ) για προβλέψεις ροής και την αποτίμηση του κέρδους στη βελτιστοποίηση μορφής. Τα δύο πρώτα θέματα σχετίζονται με μεθόδους αιτιοκρατικής βελτιστοποίησης, ενώ το τελευταίο με τη μείωση κόστους στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους.

Στη Διατριβή, χρησιμοποιείται ο οικείος επιλύτης PUMA των εξισώσεων (U)RANS που εκτελείται σε επεξεργαστές καρτών γραφικών και έχει αναπτυχθεί από τη Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης (ΜΠΥΡ&Β) του ΕΜΠ. Ο επιλύτης συμπιεστών τυρβωδών ροών του PUMA επεκτείνεται για να προσομοιώσει και τη μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή. Εφαρμόζεται το μοντέλο μετάβασης $\gamma - \bar{R}e_{\theta t}$, συζευγμένο με τα μοντέλα τύρβης $k-\omega$ SST και Spalart-Allmaras. Η πιστοποίηση του μοντέλου μετάβασης πραγματοποιείται σε 2D και 3D εφαρμογές με διαθέσιμα πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα. Αυτές περιλαμβάνουν ροές με μετάβαση σε επίπεδες πλάκες αλλά και σε περύγωση διηχητικού στροβίλου. Επιπλέον, στην εξωτερική αεροδυναμική, μελετώνται μια μεμονωμένη αεροτομή και δύο πτέρυγες σε συνθήκες φυσικά στρωτής ροής.

Στην αιτιοκρατική βελτιστοποίηση μορφής, η συνεχής συζυγής μέθοδος αποτελεί τον πιο αποδοτικό τρόπο υπολογισμού των παραγώγων ευαισθησίας μιας συνάρτησης-στόχου ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού. Εδώ, αναπτύσσεται, για πρώτη φορά στη σχετική βιβλιογραφία, η συνεχής συζυγής μέθοδος για το μοντέλο μετάβασης $\gamma - \bar{R}e_{\theta t}$ συζευγμένου με το μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras. Δείχνεται ότι υπερτερεί της συζυγούς μεθόδου με "παγωμένη μετάβαση" (χωρίς, δηλαδή, την επίλυση του συζυγούς προβλήματος του μοντέλου μετάβασης) ως προς την ακρίβεια υπολογισμού των παραγώγων ευαισθησίας.

Το κύριο πλεονέκτημα της συνεχούς συζυγούς μεθόδου είναι η φυσική εποπτεία των συζυγών ΜΔΕ και των οριακών συνθηκών τους, και, ειδικότερα, οι χαμηλές απαιτήσεις σε μνήμη του σχετικού λογισμικού. Τα σχήματα διακριτοποίησης που χρησιμοποιούνται για τις συζυγείς εξισώσεις, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ακρίβεια υπολογισμού των παραγώγων ευαισθησίας, όσο αυτά δεν είναι συμβατά με το διακριτοποιημένο ροϊκό (πρωτεύον) πρόβλημα. Η διακριτή συζυγής μέθοδος εξασφαλίζει αυτή τη συμβατότητα, αλλά με ενδεχομένως υπέρογκες απαιτήσεις μνήμης, ενώ υστερεί στην ερμηνεία των συζυγών εξισώσεων. Η Διατριβή γεφυρώνει το χάσμα ανάμεσα στις δύο παραλλαγές αναπτύσσοντας συμβατά

σχήματα διακριτοποίησης (τα οποία εμπνέονται από τη διακριτή μέθοδο) για τις συνεχείς συζυγείς εξισώσεις και τις οριακές τους συνθήκες, εστιάζοντας ταυτόχρονα στη φυσική τους σημασία. Η νέα συζυγής μέθοδος, επονομαζόμενη *Think-Discrete Do-Continuous (TDDC)*, αναπτύσσεται για τον επιλύτη εξισώσεων υπερβολικού τύπου συμπιεστών ρευστών του PUMA. Σύμφωνα με αυτή, οι παράγωγοι ευαισθησίας υπολογίζονται με τη λογική της συνεχούς αλλά την ακρίβεια της διακριτής μεθόδου με χαμηλές απαιτήσεις μνήμης και με φυσική εποπτεία του συζυγούς προβλήματος. Η *TDDC* συζυγής μέθοδος υπερτερεί της συζυγούς μεθόδου με τα "κλασικά" σχήματα διακριτοποίησης και οι ακριβέστερες παράγωγοι οδηγούν σε καλύτερη σύγκλιση της βελτιστοποίησης.

Η συνεχής συζυγής μέθοδος για ροές με φαινόμενα μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη, με τα προτεινόμενα *TDDC* σχήματα διακριτοποίησης, χρησιμοποιείται σε δύο βελτιστοποιήσεις μορφής βιομηχανικού ενδιαφέροντος, μιας μεμονωμένης πτέρυγας και μιας πτέρυγας αεροσκάφους.

Στην κατεύθυνση της μείωσης του υπολογιστικού κόστους σε προβλήματα βελτιστοποίησης, στο τελευταίο τμήμα της, η Διατριβή εστιάζει στη χρήση BND για προβλέψεις ροής και χρήση σε βελτιστοποίηση μορφής στην αεροδυναμική. Μια πρώτη χρήση των BND είναι ως υποκατάστατα της επίλυσης των εξισώσεων μοντέλων τύρβης και μετάβασης παρέχοντας το πεδίο της τυρβώδους συνεκτικότητας κατά την επαναληπτική επίλυση των εξισώσεων RANS. Το βέλτιστο BND (αρχιτεκτονική και δεδομένα εισόδου) απορρέει από ένα Εξελικτικό Αλγόριθμο Υποβοηθούμενο από Μεταπρότυπα (Metamodel-Assisted Evolutionary Algorithm, MAEA). Ο νέος υπολογιστικά αποδοτικός επιλύτης χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση μορφής μεμονωμένης αεροτομής, πτερυγίου στροβιλομηχανής και μοντέλου αυτοκινήτου με τον MAEA του λογισμικού βελτιστοποίησης EASY.

Μια δεύτερη προσέγγιση είναι η χρήση των BND σε πολυπεδικά προβλήματα και προβλήματα βελτιστοποίησης στροβιλομηχανών που εμπλέκουν αλληλεπίδραση περιστρεφόμενων και σταθερών πτερυγώσεων. Προτείνεται η χρήση της δίκλαδης αρχιτεκτονικής λ-DNN, με χαρακτηριστικό γνώρισμά της τη χωριστή επεξεργασία δεδομένων εισόδου διαφορετικής φύσης. Εδώ, χρησιμοποιείται σε προβλήματα βελτιστοποίησης συζευγμένης μεταφοράς θερμότητας αντικαθιστώντας τον επιλύτη της εξίσωσης αγωγής της θερμότητας για το στερεό υλικό. Ο νέος οικονομικότερος επιλύτης χρησιμοποιείται ως λογισμικό αξιολόγησης για τη βελτιστοποίηση μορφής ενός αγωγού ψύξης και ενός εσωτερικά ψυχόμενου πτερυγίου στροβίλου. Τέλος, προτείνεται ένα υποκατάστατο μοντέλο βασιζόμενο σε BND στο πλαίσιο της τεχνικής επιφάνειας ανάμειξης μεταξύ περιστρεφόμενων και σταθερών πτερυγώσεων για εφαρμογή σε προβλήματα βελτιστοποίησης πτερυγώσεων στροβιλομηχανών. Συνολικά, η χρήση των BND ως υποκατάστατα λογισμικά μειώνει το υπολογιστικό κόστος βελτιστοποιήσεων μορφής με MAEA και της πλατφόρμας EASY, ειδικότερα.

Λέξεις κλειδιά: Αεροδυναμική Βελτιστοποίηση Μορφής, Συνεχής Συζυγής Μέθοδος, Σχήματα Διακριτοποίησης των Συζυγών Εξισώσεων, Μοντέλα Μετάβασης, Βαθιά Νευρωνικά Δίκτυα, Μεταπρότυπα Μοντέλων Τύρβης, Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Αθήνα, 2023