



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ρευστών
Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών

Διδακτορική Διατριβή

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΘΕΡΜΟ-ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΙΤΙΟΚΡΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

Ευγενίας Α. Κοντολέοντος

Αθήνα 2012

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

Περίληψη

Η διδακτορική διατριβή αυτή ασχολείται με την ανάπτυξη μεθόδων βελτιστοποίησης με κριτήρια που σχετίζονται με τη ρευστοδυναμική συμπεριφορά των σχεδιαζόμενων συστημάτων με ή χωρίς μεταφορά θερμότητας. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται έχουν ως βάση τις συνεχείς συζυγείς μεθόδους (ως η βασική συνιστώσα αιτιοκρατικών μεθόδων βελτιστοποίησης, όπου αυτές είναι εφαρμόσιμες) και τους εξελικτικούς αλγορίθμους (στοχαστικές πληθυσμιακές μεθόδους βελτιστοποίησης) ενώ επιχειρείται και ο συνδυασμός-υβριδισμός τους. Όσον αφορά στις συζυγείς μεθόδους, πέραν των εφαρμογών βελτιστοποίησης μορφής, παρουσιάζεται και μία νέα διαδικασία βελτιστοποίησης τοπολογίας για ρευστοδυναμικά προβλήματα, με ή χωρίς μεταφορά θερμότητας. Μέχρι τώρα, το πεδίο εφαρμογής των μεθόδων βελτιστοποίησης, που έχουν αναπτυχθεί στο πλαίσιο προηγούμενων διατριβών στη Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης (ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ), περιελάμβανε συναρτήσεις-στόχους οι οποίες αφορούσαν κυρίως στην αεροδυναμική απόδοση συστημάτων ή συνιστωσών τους, χωρίς να δίνεται έμφαση στη μεταφορά θερμότητας. Στην παρούσα διατριβή, το πεδίο εφαρμογής των μεθόδων συμπεριλαμβάνει συναρτήσεις-στόχους, στις οποίες η μεταφορά θερμότητας παίζει βασικό ρόλο. Ως εκ τούτου, το πεδίο εφαρμογής των μεθόδων, εκτός των στροβιλομηχανών, επεκτείνεται επίσης στη βελτιστοποίηση συστημάτων μεταφοράς θερμότητας, όπως συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συστήματα γεωθερμικών αντλιών θερμότητας καθώς και στη βελτιστοποίηση σημαντικών συνιστωσών αυτών των συστημάτων π.χ. εναλλακτών θερμότητας.

Οι νέες συζυγείς διατυπώσεις που θα παρουσιαστούν χρησιμοποιούν ως βάση τη συνεχή συζυγή (continuous adjoint) διατύπωση που έχει αναπτυχθεί στη ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ, στη διδακτορική διατριβή του Α. Ζυμάρη όπου για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία διατυπώθηκαν οι συζυγείς εξισώσεις γνωστών μοντέλων τύρβης για τον ακριβή υπολογισμό παραγώγων ευαισθησίας στην περίπτωση τυρβωδών ροών. Η παρούσα διατριβή επεκτείνει τη μέθοδο σε ασυμπίεστες ροές με μεταφορά θερμότητας, δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στον ακριβή υπολογισμό των παραγώγων ευαισθησίας. Για να επιτευχθεί αυτό, διατυπώνονται οι συζυγείς μερικές διαφορικές εξισώσεις για ασυμπίεστο ρευστό με την προσθήκη της ενεργειακής

εξίσωσης η οποία, ενώ στο ευθύ πρόβλημα λύνεται απεμπλεγμένη από τις υπόλοιπες εξισώσεις ροής και την εξίσωση του μοντέλου τύρβης (εδώ του μοντέλου μιας εξίσωσης των Spalart-Allmaras), στο συζυγές πρόβλημα παραμένει πεπλεγμένη με τη συζυγή εξίσωση της ορμής καθώς και τη συζυγή εξίσωση του μοντέλου τύρβης. Η διατύπωση των συζυγών εξισώσεων λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή εξίσωση αποτελεί το πρώτο στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας διατριβής. Το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου περιλαμβάνει κυρίως αγωγούς καθώς και εναλλάκτες θερμότητας. Η μείωση των απωλειών λόγω συνεκτικότητας και η αύξηση της μεταφοράς θερμότητας αποτελούν τις συναρτήσεις-στόχους των εφαρμογών. Από τις εφαρμογές συμπεραίνεται ότι η μέθοδος μπορεί να υπολογίσει παραγωγούς ευαισθησίας με υψηλή ακρίβεια. Από τη διερεύνηση της επίδρασης των νέων όρων που εμφανίζονται στις συζυγείς εξισώσεις της ορμής και του μοντέλου τύρβης λόγω της προσθήκης της εξίσωσης της ενέργειας στο σύστημα των εξισώσεων κατάστασης, συμπεραίνεται ότι οι όροι αυτοί συμβάλλουν στη διατήρηση της ακρίβειας των παραγώγων ευαισθησίας και, συνεπώς, κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιούνται.

Στοχεύοντας σε μείωση του υπολογιστικού κόστους μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης, παράλληλα με την κλασική αιτιοκρατική μέθοδο βελτιστοποίησης η οποία περιλαμβάνει, σε κάθε κύκλο βελτιστοποίησης, πρώτα την επίλυση των εξισώσεων ροής, μετά αυτήν των συζυγών εξισώσεων και, στο τέλος, την ανανέωση των μεταβλητών ελέγχου/σχεδιασμού βάσει των υπολογισθεισών παραγώγων ευαισθησίας, προγραμματίστηκε και παρουσιάζεται η επονομασθείσα “συγχρονισμένη επαναληπτική τεχνική επίλυσης” (one-shot technique). Η τεχνική αυτή βασίζεται στην ταυτόχρονη ανανέωση του ευθέος και συζυγούς πεδίου ροής καθώς και των μεταβλητών ελέγχου/σχεδιασμού και οδηγεί σε ταχύτερη εύρεση της βέλτιστης λύσης σε σχέση με την απεμπλεγμένη επαναληπτική διαχείριση/επίλυση αυτών. Με στόχο την περαιτέρω μείωση του υπολογιστικού κόστους, ο ίδιος αλγόριθμος της τεχνικής one-shot είναι πλέον προγραμματισμένος και σε επεξεργαστές καρτών γραφικών (GPUs), κάνοντας χρήση της σχετικής τεχνογνωσίας προγραμματισμού που ταυτόχρονα αναπτύσσεται από συναδέλφους στη ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ. Επιλύοντας προβλήματα βελτιστοποίησης μέσω αιτιοκρατικών μεθόδων, της συζυγούς one-shot τεχνικής, σε κάρτες γραφικών, επιτυγχάνεται αισθητή μείωση του πραγματικού χρόνου υλοποίησης της βελτιστοποίησης.

Παράλληλα με τη βελτιστοποίηση μορφής, η διατριβή επεκτείνεται και σε προβλήματα βελτιστοποίησης τοπολογίας στη μηχανική των ρευστών. Με τον όρο βελτιστοποίηση τοπολογίας νοείται η διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης (ως προς συγκεκριμένη συνάρτηση-στόχο) τοπολογίας της ροής (λ.χ. μορφής αγωγών και των διακλαδώσεών τους) σε ένα ευρύ χωρίο σχεδιασμού. Αυτό υλοποιείται ορίζοντας ένα πεδίο εικονικού “πορώδους” (σε διακριτή μορφή, κάθε κόμβος του πλέγματος φέρει, πέραν των μεγεθών της ροής, και μια τιμή του μεγέθους “πορώδες”) όπου ώστε αφού με βάση τις τοπικές τιμές πορώδους “στερεοποιηθεί” τμήμα του χωρίου, το απομένον τμήμα να αποτελεί το βέλτιστο (ως προς τα ίδια κριτήρια) αγωγό ροής. Στη βελτιστοποίηση τοπολογίας, οι τιμές του πορώδους σε κάθε σημείο-κόμβο του υπολογιστικού χωρίου, οι οποίες καθορίζουν τις περιοχές στερεού και ρευστού, αποτελούν τις μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος βελτιστοποίησης. Συνεπώς, οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι πολύ μεγάλου πλήθους (όσοι και οι κόμβοι του υπολογιστικού πλέγματος) και η συζυγής μέθοδος αποτελεί τη ενδεικνυόμενη τεχνική επίλυσης του σχετικού προβλήματος βελτιστοποίησης. Στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκε αλγόριθμος και προγραμματίστηκε λογισμικό βελτιστοποίησης τοπολογίας για προβλήματα στρωτής και τυρβώδους ροής ασυμπίεστου ρευστού με μεταφορά θερμότητας. Η διατύπωση των

εξισώσεων της ροής και των συζυγών εξισώσεων για στρωτές και τυρβώδεις ροές με μεταφορά θερμότητας, στις οποίες μέσω νέων όρων εισάγεται το πορώδες, παρουσιάζεται για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία. Για την περίπτωση των τυρβωδών ροών, οι διατυπώσεις αυτές καλύπτουν την περίπτωση χρήσης μοντέλων τύρβης χαμηλών αριθμών Reynolds. Με την εισαγωγή του πορώδους στην εξίσωση του μοντέλου τύρβης επιτυγχάνεται ακριβέστερος καθορισμός του στερεού τοιχώματος κατά τη διάρκεια των κύκλων βελτιστοποίησης (λόγω του ακριβέστερου υπολογισμού των παραγώγων ευαισθησίας). Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται για την εύρεση της βέλτιστης τοπολογίας δικτύου αγωγών. Σε προβλήματα με περισσότερες από μία εξόδους της ροής, αναγκαία είναι η επιβολή περιορισμών, αντιπροσωπευτικών με αυτούς που συναντά κανείς σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως περιορισμοί ως προς την ποσόστωση παροχής μάζας και/ή τη μέση θερμοκρασία της ροής σε κάθε έξοδο.

Όσον αφορά στις στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης και έχοντας ως στόχο την επίλυση μεγάλης κλίμακας (άρα και μεγάλου κόστους) υπολογιστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, με όσο το δυνατό χαμηλότερο υπολογιστικό κόστος, η διατριβή ασχολείται με τη σύζευξη ενός ασύγχρονου εξελικτικού αλγορίθμου (AEA, Asynchronous Evolutionary Algorithm), που αναπτύχθηκε στη διδακτορική διατριβή της Δρ. Β. Ασούτη, με μία μέθοδο τοπικής ανίχνευσης. Πρόκειται, ουσιαστικά, για μια σύνθετη μέθοδο βελτιστοποίησης η οποία συνδυάζει στοχαστικές και αιτιοκρατικές τεχνικές ανίχνευσης και η οποία εντάσσεται στις λεγόμενες “υβριδικές μεθόδους βελτιστοποίηση” ή, ειδικότερα, στους λεγόμενους μιμητικούς αλγορίθμους. Με τον προτεινόμενο υβριδισμό, εκμεταλλευόμαστε την προηγηθείσα ανάπτυξη συζυγών μεθόδων και λογισμικού για τη διεκπεραίωση της διαδικασίας τοπικής ανίχνευσης με τη μέθοδο απότομης καθόδου. Ο ασύγχρονος εξελικτικός αλγόριθμος παρουσιάζει ιδιαίτερα πλεονεκτήματα λόγω της κατάργησης της έννοιας της γενιάς, μεγιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο την εκμετάλλευση των διαθέσιμων επεξεργαστών. Ο υβριδισμός του AEA με μία μέθοδο τοπικής ανίχνευσης οδήγησε στην ανάπτυξη ενός ασύγχρονου μιμητικού αλγορίθμου υποστηριζόμενου από μεταπρότυπα (AMAMA, Asynchronous Metamodel-Assisted Memetic Algorithm), υπερτερεί σε απόδοση του AEA και παρουσιάζεται για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία.

Στο νέο αυτόν αλγόριθμο, στην περίπτωση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, κάθε άτομο που έχει ήδη αξιολογηθεί και εντάσσεται στο μέτωπο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων προωθείται για περαιτέρω βελτίωση με τη μέθοδο τοπικής ανίχνευσης. Η μέθοδος τοπικής ανίχνευσης απαιτεί τον υπολογισμό των παραγώγων ευαισθησίας, την ανανέωση του ατόμου μέσω ενός βήματος της μεθόδου απότομης καθόδου και την επαναξιολόγηση του νέου ατόμου, το οποίο, κατά περίπτωση, εκτοπίζει ή όχι το αρχικό στον τρέχοντα πληθυσμό. Για τον υπολογισμό των παραγώγων ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκε η προαναφερθείσα συζυγής μέθοδος. Ειδικά στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, προτείνεται ένας νέος τρόπος, χαμηλού κόστους, για τον υπολογισμό των παραγώγων ευαισθησίας στο μιμητικό αλγόριθμο ώστε να επιλύονται οι συζυγείς εξισώσεις μία φορά σε κάθε αξιολόγηση και όχι τόσες φορές όσες και οι στόχοι. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σύνθεση των στόχων σε μία βαθμωτή συνάρτηση με κατάλληλη επιλογή των συντελεστών βαρύτητας. Ο χειρισμός αυτός αποτελεί ένα ακόμη στοιχείο πρωτοτυπίας της διατριβής. Ο AMAMA εφαρμόζεται-πιστοποιείται σε αγωγούς, εναλλάκτες θερμότητας και πτερυγώσεις στροβιλομηχανών, όπου συμπεραίνεται ότι η εισαγωγή της μεθόδου τοπικής ανίχνευσης στον AEA μειώνει ακόμα περισσότερο το υπολογιστικό κόστος για την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Ο ασύγχρονος εξελικτικός αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε επίσης για τη βελτιστοποίηση συστημάτων μεταφοράς θερμότητας, όπως μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με

χρήση γεωθερμίας και γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Όσον αφορά στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη μιας πρότυπης μονάδας οργανικού κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle), χρησιμοποιώντας γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας, αποτέλεσαν βασικό στόχο του έργου LOW BIN, (Efficient Low Temperature Geothermal Binary Power (FP6)), του οποίου συντονιστής ήταν το ΚΑΠΕ (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εξοικονόμησης). Η συμμετοχή της ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ (όπως αποτυπώνεται και στην παρούσα διατριβή) έγκειται στην παροχή τεχνογνωσίας ως προς τις μεθόδους βελτιστοποίησης για το σχεδιασμό μιας τέτοιας μονάδας με στόχο τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης και την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής της. Η εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας ($65^{\circ}\text{C} < T < 90^{\circ}\text{C}$) καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση της τεχνολογίας του οργανικού κύκλου Rankine. Στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης του οργανικού κύκλου Rankine εντάσσεται η διερεύνηση για τον εντοπισμό του βέλτιστου οργανικού ρευστού καθώς και των βέλτιστων τύπων των εναλλακτών θερμότητας που χρησιμοποιούνται στον κύκλο. Για την επιλογή του βέλτιστου οργανικού μέσου, τα οργανικά μέσα τα οποία δοκιμάστηκαν είναι το R-134a, R-410A, R-407C και το R-600a, ενώ όσον αφορά στους εναλλάκτες θερμότητας συγκρίνονται πλακοειδείς εναλλάκτες και εναλλάκτες κελύφους-αυλών. Στο πλαίσιο του έργου LOW-BIN, μετά την ανάπτυξη της τεχνολογίας οργανικού κύκλου για χαμηλή ενθαλπία, μία πρότυπη μονάδα κατασκευάστηκε, εγκαταστάθηκε και λειτουργεί χρησιμοποιώντας το γεωθερμικό πεδίο της πόλης Simbach στη Γερμανία αποδίδοντας 200kWe ηλεκτρικής ενέργειας. Η δεύτερη εφαρμογή στο πεδίο της γεωθερμίας αφορά στο σχεδιασμό βέλτιστων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας κάνοντας χρήση του ΑΕΑ. Στο πλαίσιο του έργου GROUND-MED, (Advanced Ground Source Heat Pump Systems for Heating and Cooling in Mediterranean (FP7)), του οποίου συντονιστής είναι το ΚΑΠΕ, η ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ, δια της παρούσας διατριβής, συνέβαλε στο σχεδιασμό βέλτιστων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας με στόχους τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και, ταυτόχρονα, την ελαχιστοποίηση της επιφάνειας των εναλλακτών.