

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών**  
**Τομέας Ρευστών**  
**Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΕΘΣ)**  
**Μονάδα Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης (ΜΠΥΡ&Β)**

Περίληψη της Διδακτορικής Διατριβής του  
**Στυλιανού Α. Κυριάκου**

Επιβλέπων: Κ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Τίτλος Διατριβής:

**«Μέθοδοι Σχεδιασμού-Βελτιστοποίησης στις Στροβιλομηχανές  
βασισμένες στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους»**

Σκοπός της διδακτορικής διατριβής είναι να εμπλουτίσει/επεκτείνει υπάρχουσες μεθόδους (και λογισμικό) βελτιστοποίησης το οποίο βασίζεται στους εξελικτικούς αλγορίθμους (ΕΑ) ώστε, όταν χρησιμοποιείται σε πραγματικά, μεγάλης κλίμακας προβλήματα, να μειώνεται σημαντικά ο χρόνος αναμονής του σχεδιαστή, κάνοντας τη διαδικασία σχεδιασμού-βελτιστοποίησης «αποδεκτή» σε βιομηχανικό περιβάλλον. Οι προτεινόμενες μέθοδοι και το προγραμματιζόμενο λογισμικό εφαρμόζονται σε ευρύ φάσμα εφαρμογών σχεδιασμού-βελτιστοποίησης στις στροβιλομηχανές, θερμικές και υδροδυναμικές, βιομηχανικού ενδιαφέροντος.

Σε επίπεδο λογισμικού, οι προτεινόμενες μέθοδοι υλοποιούνται εντασσόμενες στο γενικής χρήσης λογισμικό βελτιστοποίησης EASY (Evolutionary Algorithm System) της ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ. Εκμεταλλεύονται τις προϋπάρχουσες δυνατότητες του EASY, όπως την «έξυπνη» χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (μεταπρότυπα, χαμηλού κόστους προσεγγιστικά πρότυπα αξιολόγησης, υποκατάστατα του λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής – αλγόριθμος MAEA: Metamodel-assisted EA), σχήματα κατανεμημένης ανίχνευσης του χώρου των λύσεων (DEA: Distributed EA), ιεραρχικά ή πολυεπίπεδα σχήματα βελτιστοποίησης, υβριδισμός με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης και χρήση πολυεπεξεργασίας. Καλύπτουν προβλήματα μονοκριτηριακής ή πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, με ή χωρίς περιορισμούς. Η συνεισφορά της διατριβής, σε σχέση με την προαναφερθείσα υποδομή, εντοπίζεται κυρίως στα παρακάτω τρία σημεία:

α) Προτείνεται και πιστοποιείται μια πρωτότυπη διαδικασία σχεδιασμού νέων προϊόντων (εδώ στροβιλομηχανών) που βασίζεται σε ένα μικρό αριθμό διαθέσιμων αρχειοθετημένων σχεδιασμών, οι οποίοι θεωρούνται βέλτιστοι ή, έστω, αποδεκτοί, για λειτουργία σε διαφορετικές συνθήκες. Η προτεινόμενη διαδικασία θα αναφέρεται ως Knowledge Based Design ή KBD. Η διαδικασία KBD αποτελεί απάντηση στον ενδοιασμό των μηχανικών της βιομηχανίας για το αν κάθε νέος σχεδιασμός προϊόντος πρέπει να ξεκινά «από το μηδέν» ή μπορεί να στηριχθεί στην υπάρχουσα εμπειρία. Για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, πρέπει αρχικά να απομονωθεί ένα μικρό σύνολο «σχετικών» σχεδιασμών του παρελθόντος. Ο τρόπος επιλογής του συνόλου των «σχετικών» σχεδιασμών, οι οποίοι πλέον θα αποκαλούνται «σχεδιασμοί βάσης», δεν εμπίπτει στα ενδιαφέροντα της διατριβής. Η διατριβή προτείνει ένα νέο μαθηματικό τρόπο έκφρασης κάθε νέου σχεδιασμού συναρτήσει των σχεδιασμών βάσης. Αυτός παρακάμπτει την παραμετροποίηση της σχεδιαζόμενης γεωμετρίας, η οποία εκ των πραγμάτων μπορεί να εισάγει εκατοντάδες βαθμούς ελευθερίας, καθυστερώντας έτσι τη σύγκλιση του ΕΑ. Αντ' αυτών, εισάγει ένα πραγματικά μικρό πλήθος νέων μεταβλητών σχεδιασμού και τον καθορισμό περιοχών

μεγαλύτερης σημαντικότητας, με σημαντική μείωση του χρόνου βελτιστοποίησης. Επιπλέον σημαντικό κέρδος από τη νέα παραμετροποίηση αποτελεί το ότι τα όρια των νέων μεταβλητών σχεδιασμού προκύπτουν εύκολα, ουσιαστικά «αυτόματα», χωρίς παρέμβαση του χρήστη. Η μέθοδος προγραμματίστηκε συμπληρωματικά στον EASY και χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό θερμικών και υδροδυναμικών μηχανών με μιας τάξης μεγέθους κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο, για παρόμοιας ποιότητας σχεδιασμούς.

β) Προτείνεται μέθοδος επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης που χαρακτηρίζονται από μη-διαχωρίσιμες (ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού) συναρτήσεις κόστους ή καταλληλότητας, με μεγάλο αριθμό μεταβλητών σχεδιασμού. Αυτά θα ονομάζονται «κακώς-τοποθετημένα» προβλήματα βελτιστοποίησης και η αντιμετώπισή τους με ΕΑ οδηγεί είναι γενικά χρονοβόρα. Η προτεινόμενη μέθοδος υλοποιείται επεμβαίνοντας κατάλληλα στον τρόπο που εφαρμόζονται οι τελεστές εξέλιξης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δυναμικά (δηλαδή, σε κάθε γενιά) ανανεούμενης επαναδιατύπωσης του προβλήματος βελτιστοποίησης, ώστε ο ΕΑ να χειρίζεται, κατά το δυνατό, προβλήματα των οποίων η συνάρτηση-στόχος να είναι διαχωρίσιμη ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού. Ο λόγος που μια τέτοια αντιμετώπιση επιφέρει μείωση στο χρόνο επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης μέσω ΕΑ είναι ότι κάθε πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας διαχωρίσιμης συνάρτησης  $N$  μεταβλητών μπορεί ιδεατά να αντιμετωπιστεί ως  $N$  διακριτά προβλήματα ελαχιστοποίησης κατάλληλων συναρτήσεων μιας μεταβλητής, με συνολικά μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Προαπαιτήση για την υλοποίησή της είναι η αυτόματη μετατροπή του πραγματικού προβλήματος σε πρόβλημα διαχωρίσιμων μεταβλητών, στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση της μεθόδου ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες (ΑσΚΣ, Principal Component Analysis, PCA). Σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, η ΑσΚΣ εφαρμόζεται στο σύνολο των επιλέκτων κάθε γενιάς πραγματοποιώντας κατάλληλη «στροφή» του χώρου σχεδιασμού. Η «στροφή» αυτή απαιτεί την επίλυση ενός προβλήματος ιδιοτιμών. Αποδεικνύεται ότι ο προκύπτων χώρος, ίδιας διάστασης με το χώρο σχεδιασμού, ο οποίος καθορίζεται με άξονες τα ιδιοδιανύσματα (τις λεγόμενες «κύριες συνιστώσες») που προκύπτουν από την διαδικασία ΑσΚΣ, έχει τις προαναφερθείσες ιδιότητες διαχωρισιμότητας. Οι τελεστές εξέλιξης (διασταύρωση, μετάλλαξη, κλπ) εφαρμόζονται στις νέες μεταβλητές σχεδιασμού, προκύπτουν οι νέοι απόγονοι, οι οποίοι τελικά επαναφέρονται (με «αντίθετη στροφή») στον αρχικό-πραγματικό χώρο σχεδιασμού. Η προτεινόμενη μέθοδος προγραμματίστηκε συμπληρωματικά στον EASY και αρχικά πιστοποιήθηκε σε μαθηματικές συναρτήσεις και ψευδο-μηχανολογικά προβλήματα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό του δρομέα ενός υδροστροβίλου HYDROMATRIX<sup>®</sup> με κέρδος την αναπαραγωγή παρόμοιας ποιότητας σχεδιασμών στο μισό χρόνο (μισός αριθμός κλήσεων του λογισμικού αξιολόγησης) σε σχέση με τον κλασικό ΕΑ.

γ) Ως προς τον ΕΑ που υποβοηθείται από μεταπρότυπα (ΜΑΕΑ, στη λογική της προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης των ατόμων κάθε γενιάς με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα) προτείνεται και πιστοποιείται νέα μέθοδος, ιδιαίτερα αποδοτική σε προβλήματα μεγάλης διάστασης. Είναι γνωστό από τη χρήση ΜΑΕΑ ότι το κέρδος (συγκριτικά με τους κλασικούς ΕΑ) μειώνεται όταν η διάσταση του χώρου σχεδιασμού αυξάνει σημαντικά. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται (α) στο ότι η έναρξη χρήσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων καθυστερεί, αναμένοντας την καταγραφή επαρκών ήδη αξιολογημένων υποψηφίων λύσεων στη βάση δεδομένων από την οποία αντλούνται τα δείγματα εκπαίδευσης των μεταπρότυπων και (β) στο ότι η αξιοπιστία των νευρωνικών δικτύων φθίνει αυξάνοντας τον αριθμό εισόδων σε αυτά (πλήθος μεταβλητών σχεδιασμού). Η προτεινόμενη αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος βασίζεται στην ελεγχόμενη μείωση των εισόδων (κρατώντας, ουσιαστικά, τις περισσότερο αντιπροσωπευτικές) του νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιείται ως μεταπρότυπο. Χρησιμοποιώντας και πάλι ανάλυση σε κύριες συνιστώσες, στο ίδιο σύνολο δυναμικά ανανεούμενων επιλέκτων, πραγματοποιείται εκ νέου στροφή/ευθυγράμμιση του χώρου σχεδιασμού με τις κύριες συνιστώσες λαμβάνοντας υπόψη την σημαντικότητα της κάθε μεταβλητής. Εδώ, πέραν των προαναφερθέντων, στο «στραμμένο» πλέον χώρο σχεδιασμού, γίνεται αποκοπή κρατώντας μικρό αριθμό των πλέον σημαντικών «στραμμένων» μεταβλητών σχεδιασμού. Με τις τελευταίες, και μόνο αυτές, εκπαιδεύεται το νευρωνικό δίκτυο. Η τεχνική αυτή οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του χρόνου βελτιστοποίησης αφού τα μεταπρότυπα παρέχουν προβλέψεις υψηλότερης αξιοπιστίας αλλά και μπορούν να ξεκινήσουν να χρησιμοποιούνται νωρίτερα κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε, με ή χωρίς την επικουρική χρήση της μεθόδου (α) και σε συνδυασμό με τη μέθοδο (β) στο σχεδιασμό-βελτιστοποίηση 2Δ και 3Δ πτερώγωσης συμπίεστη με κέρδος τη μείωση του χρόνου βελτιστοποίησης στο 1/3 του χρόνου ενός κλασικού ΜΑΕΑ.

Οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διδακτορική εργασία χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό και βελτιστοποίηση ενός καινοτόμου τύπου υδροστροβίλου “HYDROMATRIX<sup>®</sup>” ιδανικού για τοποθεσίες μικρού ύψους ( $H=5-10m$ ,  $Q>60m^3/s$ ). Οι υδροστροβίλοι “HYDROMATRIX<sup>®</sup>”, πατενταρισμένοι από την εταιρία Andritz-Hydro συνδυάζουν τη υψηλή αποδοτικότητα (10% υψηλότερη από άλλους τύπους υδροστροβίλων χαμηλού ύψους) με το χαμηλό κόστος εγκατάστασης, με περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Κάνοντας χρήση των τεχνικών που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή, επιτεύχθηκε μείωση του συνολικού χρόνου σχεδιασμού (όχι μόνο της διαδικασίας βελτιστοποίησης) σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50% από 120-140 μέρες σε μόλις 50. Η προαναφερθείσα μείωση του συνολικού χρόνου σχεδιασμού και η συνεπαγόμενη μείωση του κόστους σχεδιασμού μετατρέπουν σε οικονομικά επικερδή τη χρήση “HYDROMATRIX<sup>®</sup>” σε ακόμη μικρότερα ύψη,  $H=2-5m$ , και παροχές μικρότερες των  $60m^3/s$ . Η διαθεσιμότητα τοποθεσιών με αυτά τα χαρακτηριστικά, μόνο στην Ευρώπη, είναι της τάξης των 6000 GWh/year με ότι αυτό συνεπάγεται σε οικονομικά και περιβαλλοντολογικά οφέλη λόγω της αντίστοιχης μείωσης των εκπομπών  $CO_2$ .

Στο πλαίσιο συνεργασιών με την εταιρία Andritz-Hydro, η οποία χρηματοδότησε τμήμα της παρούσας διατριβής, οι αναπτυχθείσες τεχνικές εφαρμόστηκαν και σε μια σειρά άλλων σχεδιασμών υδροδυναμικών μηχανών ή συνιστωσών τους, όπως δρομείς όλων των κλασικών τύπων υδροδυναμικών στροβιλομηχανών αντίδρασης τόσο αξονικής όσο και μικτής ροής (Francis, Kaplan, Bulb, Pump και Pump-Turbines), με στόχο τόσο την αύξηση της απόδοσής τους όσο και τη βέλτιστη συνεργασία τους με τα υπόλοιπα μέρη της εγκατάστασης. Επίσης σχεδιάστηκαν σταθερές συνιστώσες υδροδυναμικών μηχανών όπως αγωγοί απαγωγής (draft tubes), με στόχο τη μέγιστη ανάκτηση πίεσης με τις ελάχιστες απώλειες και τμήματα αγωγών εισόδου υδροστροβίλων δράσης διανομείς-distributors), με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και απωλειών με παράλληλη αύξηση της ποιότητας της δέσμης ρευστού μετά το ακροφύσιο. Επιλεγμένο τμήμα των παραπάνω σχεδιασμών παρουσιάζεται στο κείμενο της διδακτορικής διατριβής.

Το έργο με τίτλο «HYDROACTION – Development and laboratory testing of improved action and Matrix hydro turbines designed by advanced analysis and optimization tools» (Project Number 211983), το οποίο χρηματοδότησε η Ευρωπαϊκή Ένωση, υποστήριξε το υπόλοιπο τμήμα της διατριβής. Το ΕΜΠ και η Andritz-Hydro υπήρξαν εταίροι στο έργο αυτό. Οι βιομηχανικής κλίμακας υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στα πολυεπεξεργαστικά συστήματα της ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ (Αθήνα) και της Andritz-Hydro (Linz, Graz & Vevey), ενίοτε και συνεργατικά μέσω τεχνικών Grid Computing, τις οποίες υποστηρίζει το λογισμικό EASY.

#### **Δημοσιεύσεις που προέκυψαν από τη διατριβή:**

1. K.C. Giannakoglou, V.G. Asouti, S.A. Kyriacou, X.S. Trompoukis: ‘Hierarchical, Metamodel-Assisted Evolutionary Algorithms, with Industrial Applications’, von Karman Institute Lectures Series on ‘Introduction to Optimization and Multidisciplinary Design in Aeronautics and Turbomachinery’, May 7-11, 2012.
2. S.A. Kyriacou, S. Weissenberger and K.C. Giannakoglou. Design of a matrix hydraulic turbine using a metamodel-assisted evolutionary algorithm with PCA-driven evolution operators. Int. J. of Mathematical Modelling and Numerical Optimization, Vol. 3, No. 1/2, pp. 45-63, 2012 2011
3. I.A. Skouteropoulou, S.A. Kyriacou, V.G. Asouti, K.C. Giannakoglou, S. Weissenberger, P. Grafenberger. Design of a Hydromatrix turbine runner using an Asynchronous Algorithm on a Multi-Processor Platform, 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Athens, 30 June-2 July, 2011
4. S.A. Kyriacou, S. Weissenberger, P. Grafenberger, K.C. Giannakoglou. Optimization of hydraulic machinery by exploiting previous successful designs. 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Romania, September 20-24, 2010.
5. H.A. Georgopoulou, S.A. Kyriacou, K.C. Giannakoglou, P. Grafenberger and E. Parkinson. Constrained multi-objective design optimization of hydraulic components using a hierarchical metamodel assisted evolutionary algorithm. Part 1: Theory. 24th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Foz do Iguassu, Brazil, October 27-31, 2008.
6. P. Grafenberger, E. Parkinson, H.A. Georgopoulou, S.A. Kyriacou and K.C. Giannakoglou. Constrained multi-objective design optimization of hydraulic components using a hierarchical metamodel assisted evolutionary algorithm. Part 2: Applications. 24th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Foz do Iguassu, October 27-31, 2008.
7. S. Erne, M. Lenarcic, S.A. Kyriacou. Shape Optimization of a Flows Around Circular Diffuser in a Turbulent Incompressible Flow. ECCOMAS 2012 Congress, Vienna, Austria, September 10-14, 2012.
8. S.A. Kyriacou, V.G. Asouti and K.C. Giannakoglou. Efficient PCA-driven EAs and Metamodel-Assisted EAs, with Applications in Turbomachinery. Engineering Optimization, 2013.