



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

Μέθοδοι Σχεδιασμού-Βελτιστοποίησης στις
Στροβιλομηχανές βασισμένες στους Εξελικτικούς
Αλγορίθμους

Διδακτορική Διατριβή

Στυλιανός Α. Κυριάκου

Επιβλέπων : ΚΥΡΙΑΚΟΣ Χ. ΓΙΑΝΝΑΚΟΓΛΟΥ
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2013

Nomeclature

ΕΑ	Εξελικτικός Αλγόριθμος
EA	Evolutionary Algorithm
ΠΠΑ	Προσεγγιστική Προ-Αξιολόγηση
IPE	Inexact Pre-Evaluation
ΥΡΔ	Υπολογιστική Ρευστοδυναμική
CFD	Computational Fluid Dynamics
ΑσΚΣ	Ανάλυση σε Κύριες Συνιστώσες
PCA	Principal Component Analysis
ΜΦ	Μερικό Φορτίο
PL	Part Load
ΠΦ	Πλήρες Φορτίο
FL	Full Load
ΜΑ	Μέγιστη Απόδοση
BE	Best Efficiency
HEA	Hierarchical Evolutionary Algorithm
KBD	Knowledge Based Design
MAEA	Metamodel-Assisted Evolutionary Algorithm
MAEA(PCA)	MAEA with PCA-Driven Evolution Operators
M(PCA)AEA(PCA)	MAEA(PCA) with PCA-Driven Metamodels
TE	Trailing Edge
LE	Leading Edge

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Συνεισφορά της διατριβής	2
1.2	Μελετούμενες Εφαρμογές	4
1.3	Βιβλιογραφική επισκόπηση	5
1.4	Δομή της Διατριβής	6
2	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι	9
2.1	Εισαγωγή	9
2.2	Βασικές Έννοιες	10
2.2.1	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση	12
2.2.2	Βελτιστοποίηση με Περιορισμούς	14
2.3	ΕΑ Υποβοηθούμενοι από Μεταπρότυπα	15
2.4	Ιεραρχική-Πολυεπίπεδη Βελτιστοποίηση	16
3	Σχεδιασμός στη Βάση Αρχαιοθετημένης Γνώσης	19
3.1	Διατύπωση Νέου Σχεδιασμού	20
3.2	Εφαρμογή: Σχεδιασμός 2Δ πτερύγωσης συμπίεστή	22
4	ΕΑ και ΜΑΕΑ Υποβοηθούμενοι από Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών	27
4.1	Δυσκολίες λόγω Ιδιαιτερότητας της Συνάρτησης Κόστους	28
4.2	Η Προτεινόμενη ΑσΚΣ	30
4.3	Εξελικτικοί Τελεστές Υποβοηθούμενοι από ΑσΚΣ	31
4.3.1	Πιστοποίηση εξελικτικών τελεστών υποβοηθούμενων από ΑσΚΣ	32
4.4	Μεταπρότυπα Υποβοηθούμενα από ΑσΚΣ	33
4.4.1	Πιστοποίηση του $M(PCA)AEA(PCA)$	33
4.5	Εφαρμογή: Σχεδιασμός 2Δ Πτερύγωσης Συμπίεστή	35
5	Βελτιστοποίηση Υδροδυναμικών Στροβιλομηχανών	37
5.1	Βελτιστοποίηση Υδροστροβίλου <i>Francis</i>	38

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

5.1.1	Αρχειοθετημένοι Σχεδιασμοί Βάσης	39
5.1.2	Αποτελέσματα - Συγκρίσεις	40
5.2	Βελτιστοποίηση Υδροστροβίλου <i>Hydromatrix®</i>	45
5.2.1	Αποτελέσματα - Συγκρίσεις	46
6	Βελτιστοποίηση Περιφερειακής Πτερύγωσης Συμπιεστή	49
6.1	Αποτελέσματα - Συγκρίσεις	50
7	Σύνοψη - Συμπεράσματα - Παρόν & Μέλλον	53
7.1	Μελλοντική Έρευνα	54
7.2	Δημοσιεύσεις από τη διατριβή	55
	Βιβλιογραφία	57

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Σκοπός της διδακτορικής διατριβής είναι να εμπλουτίσει και να επεκτείνει υπάρχουσες μεθόδους (και λογισμικό) βελτιστοποίησης το οποίο βασίζεται στους εξελικτικούς αλγόριθμους (EA). Στόχος του νέου λογισμικού είναι, όταν αυτό χρησιμοποιείται σε πραγματικά μεγάλης κλίμακας προβλήματα της βιομηχανίας, να μειώνεται σημαντικά ο χρόνος ολοκλήρωσης του έργου, κάνοντας τη διαδικασία σχεδιασμού-βελτιστοποίησης ελκυστική για χρήση σε βιομηχανικό περιβάλλον. Οι προτεινόμενες μέθοδοι και το προγραμματισθέν λογισμικό εφαρμόζονται σε ένα φάσμα εφαρμογών σχεδιασμού-βελτιστοποίησης στις στροβιλομηχανές, θερμικές και υδροδυναμικές, οι περισσότερες από τις οποίες είναι βιομηχανικού ενδιαφέροντος.

Σε επίπεδο λογισμικού, οι προτεινόμενες μέθοδοι υλοποιούνται εντασσόμενες στο γενικής χρήσης λογισμικό βελτιστοποίησης EASY (Evolutionary Algorithm SYstem), της Μονάδας Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής & Βελτιστοποίησης του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ (ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ), (23, 25, 32, 36). Εκμεταλλεύονται προϋπάρχουσες δυνατότητες του λογισμικού EASY, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται η «έξυπνη» χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ως μεταπροτύπων, δηλαδή προσεγγιστικών προτύπων αξιολόγησης χαμηλού κόστους, υποκατάστατων του ακριβούς αλλά και ακριβού λογισμικού υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, ΥΡΔ – αλγόριθμος MAEA: Metamodel-Assisted EA), σχήματα κατανεμημένης ανίχνευσης του χώρου των λύσεων μέσω EA (DEA: Distributed EA), ιεραρχικά ή πολυεπίπεδα σχήματα βελτιστοποίησης, υβριδισμός με μεθόδους βελτιστοποίησης διαφορετικές των EA αλλά και η χρήση πολυεπεξεργασίας. Καλύπτουν δε προβλήματα μονοκριτηριακής ή πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, με ή χωρίς περιορισμούς.

1. Εισαγωγή

1.1 Συνεισφορά της διατριβής

Σε σχέση με την προαναφερθείσα υποδομή, η συνεισφορά της διατριβής εντοπίζεται κυρίως στα παρακάτω τρία σημεία:

α) Προτείνεται και πιστοποιείται μια πρωτότυπη διαδικασία σχεδιασμού στροβιλομηχανών ή συνιστωσών αυτών, η οποία βασίζεται σε ένα μικρό αριθμό διαθέσιμων αρχειοθετημένων παρόμοιων σχεδιασμών υψηλής ποιότητας. Οι τελευταίοι θεωρείται ότι αποτελούν δοκιμασμένες υπάρχουσες λύσεις σε συναφή προβλήματα τα οποία, συνήθως, αφορούν λειτουργία σε λίγο διαφορετικές συνθήκες. Πάντως, ουδόλως υπονοείται ότι οι χρησιμοποιούμενοι αρχειοθετημένοι σχεδιασμοί, για τις δικές τους συνθήκες λειτουργίας, είναι βέλτιστοι (με την αυστηρή έννοια του όρου). Η προτεινόμενη διαδικασία θα αναφέρεται ως Knowledge Based Design ή KBD. Η διαδικασία KBD επιχειρεί να δώσει απάντηση στον ενδοιασμό των μηχανικών της βιομηχανίας για το αν κάθε νέος σχεδιασμός πρέπει να ξεκινά «από το μηδέν» ή μπορεί να στηριχθεί στην υπάρχουσα εμπειρία. Για την εφαρμογή της μεθόδου KBD, πρέπει αρχικά να απομονωθεί ένα μικρό σύνολο «συναφών» σχεδιασμών του παρελθόντος. Αν λ.χ. το τρέχον πρόβλημα αφορά στο σχεδιασμό μιας στροβιλομηχανής σε συνθήκες «Α», με στόχους «Β» και περιορισμούς «Γ», το σύνολο αυτό μπορεί να αποτελείται από ένα (συνήθως μονοψήφιο) αριθμό στροβιλομηχανών που έχουν σχεδιαστεί στο παρελθόν και ήδη λειτουργούν με καλή απόδοση σε συνθήκες διαφορετικές μεν, πλησίον δε των «Α», για ίδια ή περίπου ίδια με τα «Β» κριτήρια απόδοσης («στόχους» στην ορολογία των μεθόδων βελτιστοποίησης) και ικανοποιούν περιορισμούς περισσότερο ή λιγότερο συναφείς με τους «Γ». Ο τρόπος επιλογής του συνόλου των απαραίτητων «συναφών» σχεδιασμών, οι οποίοι πλέον θα αποκαλούνται «σχεδιασμοί βάσης», δεν εμπίπτει στα ενδιαφέροντα της διατριβής. Επίσης, σε αυτά δεν εμπίπτει η διαδικασία ενιαίας παραμετροποίησης των σχεδιασμών βάσης σε τρόπο συμβατό με το προς υλοποίηση πρόβλημα σχεδιασμού. Για την περίπτωση που αυτή δεν υφίσταται, επισημαίνεται ότι αυτή μπορεί να υλοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Η διατριβή προτείνει ένα νέο μαθηματικό τρόπο διατύπωσης του προβλήματος του νέου σχεδιασμού συναρτήσει των σχεδιασμών βάσης. Ο τρόπος αυτός παρακάμπτει ουσιαστικά την παραμετροποίηση της σχεδιαζόμενης γεωμετρίας, η οποία εκ των πραγμάτων μπορεί να εισάγει εκατοντάδες βαθμούς ελευθερίας, με αποτέλεσμα να καθυστερεί η σύγκλιση της βασισμένης στους ΕΑ μεθόδου βελτιστοποίησης. Αντ' αυτών, εισάγεται ένα μικρό πλήθος νέων μεταβλητών σχεδιασμού (θα ονομάζονται μεταβλητές βελτιστοποίησης ώστε να υπάρχει διάκριση με τις προηγούμενες) και καθορίζονται περιοχές μεγαλύτερης σημαντικότητας, με όφελος την αισθητή μείωση του χρόνου βελτιστοποίησης. Επιπλέον σημαντικό κέρδος από τη νέα παραμετροποίηση αποτελεί το ότι τα όρια των νέων μεταβλητών σχεδιασμού προκύπτουν εύκολα, ουσιαστικά «αυτόματα» και χωρίς παρέμβαση του χρήστη. Η προτεινόμενη μέθοδος, αφού προγραμματίστηκε και εντάχθηκε στο λογισμικό EASY, χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό στροβιλομηχανών επιφέροντας κέρδος μιας τάξης μεγέθους

σε υπολογιστικό χρόνο για την επίτευξη παρόμοιας ποιότητας σχεδιασμών.

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 αντιμετώπιση τους μέσω ΕΑ οδηγεί, σχεδόν πάντα, σε πολύ χρονοβόρους υπολογισμούς. 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 είναι ότι οι ΕΑ, εκ φύσεως, κερδίζουν σημαντικά σε ταχύτητα όταν χειρίζονται προβλήματα ελαχιστοποίησης διαχωρίσιμων συναρτήσεων-στόχων. Αυτό οφείλεται στο ότι κάθε πρόβλημα ελαχιστοποίησης μιας διαχωρίσιμης συνάρτησης (N σε πλήθος μεταβλητών) μπορεί ιδεατά να αντιμετωπιστεί ως N διακριτά προβλήματα ελαχιστοποίησης κατάλληλων συναρτήσεων μιας μεταβλητής, με συνολικά μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Αυτό εκμεταλλεύεται η προτεινόμενη μέθοδος. 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 τη μέθοδο Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες (29, 31) (ΑσΚΣ, Principal Component Analysis, PCA). Σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, η ΑσΚΣ εφαρμόζεται στο σύνολο των επιλέκτων κάθε γενιάς και, ουσιαστικά, πραγματοποιεί κατάλληλη «στροφή» του χώρου σχεδιασμού. Η «στροφή» αυτή απαιτεί την επίλυση ενός προβλήματος ιδιοτιμών με ασήμαντο υπολογιστικό κόστος. 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 ΑσΚΣ, έχει τις προαναφερθείσες ιδιότητες διαχωρισιμότητας. Οι τελεστές εξέλιξης (διασταύρωση, μετάλλαξη, κλπ) εφαρμόζονται στις νέες μεταβλητές σχεδιασμού και, έτσι, προκύπτουν νέοι απόγονοι, οι οποίοι τελικά επαναφέρονται (με «αντίθετη στροφή») στον αρχικό-πραγματικό χώρο σχεδιασμού. Η προτεινόμενη μέθοδος θα αναφέρεται ως ΕΑ(PCA) ή ΜΑΕΑ(PCA), τονίζοντας έτσι ότι η χρήση PCA ή ΑσΚΣ αφορά στους ΕΑ και όχι στα μεταπρότυπα. Η εναλλακτική επιλογή παρουσιάζεται στο (γ) και προγραμματίστηκε συμπληρωματικά στον ΕΑΣΥ. Αρχικά, πιστοποιήθηκε σε μαθηματικές συναρτήσεις και ψευδο-μηχανολογικά προβλήματα χαμηλού κόστους της βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό του δρομέα ενός υδροστροβίλου Hydromatrix® με κέρδος την αναπαραγωγή παρόμοιας ποιότητας σχεδιασμών στο μισό περίπου χρόνο (μισός αριθμός κλήσεων του λογισμικού ΥΡΔ, το οποίο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των υποψήφιων λύσεων) σε σχέση με τον κλασικό ΕΑ.

γ) Ως προς τον ΕΑ που υποβοηθείται από μεταπρότυπα (ΜΑΕΑ, στη λογική

1. Εισαγωγή

της προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης – ΠΠΑ – των ατόμων κάθε γενιάς με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (22, 24, 37)) προτείνεται και πιστοποιείται μέθοδος η οποία αντιμετωπίζει με επιτυχία ένα σημαντικό πρόβλημα το οποίο ανακύπτει όταν αυτές χρησιμοποιούνται σε προβλήματα μεγάλης διάστασης. Από τη μέχρι σήμερα εμπειρία από τη χρήση ΜΑΕΑ, είναι γνωστό ότι το κέρδος (συγκριτικά με τους κλασικούς ΕΑ) μειώνεται όταν η διάσταση του χώρου σχεδιασμού αυξάνει σημαντικά. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται (i) στο ότι η έναρξη χρήσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων καθυστερεί, αναμένοντας την καταγραφή επαρκούς πλήθους ήδη αξιολογημένων υποψηφίων λύσεων στη βάση δεδομένων από την οποία αντλούνται τα δείγματα εκπαίδευσης των μεταπροτύπων και (ii) στο ότι η αξιοπιστία των νευρωνικών δικτύων φθίνει καθώς αυξάνει ο αριθμός εισόδων σε αυτά, άρα το πλήθος μεταβλητών σχεδιασμού. Η προτεινόμενη αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος βασίζεται στην ελεγχόμενη μείωση των εισόδων (κρατώντας, ουσιαστικά, τις περισσότερες αντιπροσωπευτικές) του νευρωνικού δικτύου. Εδώ, χρησιμοποιούνται δίκτυα ακτινικών συναρτήσεων βάσης, Radial Basis Function network, RBF(29)) που χρησιμοποιούνται ως μεταπρότυπα. Μέσω ΑσΚΣ, εφαρμοζόμενης στο σύνολο των δυναμικά ανανεούμενων επιλέκτων, πραγματοποιείται εκ νέου στροφή/ευθυγράμμιση του χώρου σχεδιασμού με τις κύριες συνιστώσες λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντικότητα κάθε μεταβλητής. Η τελευταία είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής της σχετικής ι-διοτιμής που προέκυψε από την ΑσΚΣ. Εδώ, επιπλέον στοιχείο είναι ότι στο «στραμμένο» χώρο σχεδιασμού, γίνεται αποκοπή και κρατείται μικρός αριθμός των πλέον σημαντικών «στραμμένων» μεταβλητών σχεδιασμού. Με τις τελευταίες και μόνο αυτές, εκπαιδεύεται το δίκτυο RBF. Η τεχνική αυτή θα αναφέρεται ως M(PCA)ΑΕΑ, υποδηλώνοντας τη χρήση της ΑσΚΣ κατά την εκπαίδευση των μεταπροτύπων. Η M(PCA)ΑΕΑ οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του χρόνου βελτιστοποίησης αφού τα μεταπρότυπα παρέχουν προβλέψεις υψηλότερης αξιοπιστίας αλλά, επίσης, μπορούν να ξεκινήσουν να χρησιμοποιούνται νωρίτερα κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η M(PCA)ΑΕΑ χρησιμοποιήθηκε, με ή χωρίς την επικουρική χρήση της μεθόδου (α) και σε συνδυασμό με τη μέθοδο (β), στο σχεδιασμό-βελτιστοποίηση 2Δ και 3Δ πτερύγωσης συμπίεστη, με κέρδος τη μείωση του χρόνου βελτιστοποίησης στο 1/3 του χρόνου του προϋπάρχοντος ΜΑΕΑ. Η πλέον ενισχυμένη παραλλαγή θα αναφέρεται ως M(PCA)ΑΕΑ(PCA).

1.2 Μελετούμενες Εφαρμογές

Οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διδακτορική εργασία χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό-βελτιστοποίηση ενός καινοτόμου τύπου υδροστροβίλου, του Hydromatrix®, ιδανικού για τοποθεσίες μικρού ύψους και μικρών παροχών. Οι υδροστροβίλοι Hydromatrix®, πατενταρισμένοι από την εταιρία Andritz-Hydro, έχουν υψηλότερη αποδοτικότητα από άλλους τύπους υδροστροβίλων χαμηλού ύψους,

χαμηλό κόστος εγκατάστασης και περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Κάνοντας χρήση των τεχνικών που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή, επιτεύχθηκε μείωση του συνολικού χρόνου σχεδιασμού τους άνω του 50%. Η μείωση του συνολικού χρόνου σχεδιασμού και του κόστους μετατρέπουν σε οικονομικά επικερδή τη χρήση Hydromatrix® σε ακόμη μικρότερα ύψη και παροχές μικρότερες.

Σε συνεργασία 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. Περισσότερο αναλυτικά, με βάση τις τεχνικές αυτές οργανώθηκαν διαδικασίες σχεδιασμού δρομέων όλων των κλασικών τύπων υδροδυναμικών στροβιλομηχανών αντίδρασης τόσο αξονικής όσο και μιχτής 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, αλλά και τμήματα αγωγών εισόδου υδροστροβίλων δράσης (διανομείς-distributors), με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και των απωλειών και με παράλληλη αύξηση της ποιότητας της δέσμης ρευστού μετά το ακροφύσιο. Επιλεγμένο τμήμα των παραπάνω σχεδιασμών παρουσιάζεται στο πλήρες κείμενο της διατριβής.

Το ερευνητικό έργο με τίτλο «HYDROACTION – Development and Laboratory Testing of Improved Action and Matrix Hydro Turbines Designed by Advanced Analysis and Optimization Tools» (FP7: 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 στις προαναφερθείσες εφαρμογές στροβιλομηχανών πραγματοποιήθηκαν, εκ των πραγμάτων, σε πολυεπεξεργαστικά συστήματα. Ως τέτοια χρησιμοποιήθηκαν τα πολυεπεξεργαστικά συστήματα της ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ (ΕΜΠ, Αθήνα) και της Andritz-Hydro (στις εγκαταστάσεις της εταιρίας στις πόλεις Linz, Graz και Vevey), ενίοτε και συνεργατικά μέσω τεχνικών Grid Computing (45), τις οποίες υποστηρίζει το λογισμικό EASY.

1.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Η βιβλιογραφική επισκόπηση ως προς τη χρήση μεθόδων σχεδιασμού και βελτιστοποίησης στις θερμικές αλλά και υδροδυναμικές μηχανές αναδεικνύει ότι τέτοιες εφαρμογές υπάρχουν πολλές. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι σχεδιαστές επωφελούνται της «με ελάχιστο κόπο» υλοποίησης της βελτιστοποίησης μέσω ΕΑ, όταν είναι διαθέσιμο το λογισμικό ΥΡΔ και αυτό της παραμετροποίησης της γεωμετρίας τους. Στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν δίνεται έμφαση στο υπολογιστικό κόστος αλλά, κυρίως, στις νέες βέλτιστες λύσεις που αναδεικνύουν οι ΕΑ. Την τελευταί-

1. Εισαγωγή

α δεκαετία, όλα τα γνωστά επιστημονικά συνέδρια στην περιοχή των στροβιλομηχανών έχουν ιδιαίτερες συνεδρίες σε θέματα βελτιστοποίησης, με τους ΕΑ να διεκδικούν συνήθως σημαντικό μερίδιο στις εκεί παρουσιαζόμενες εργασίες. Εφαρμογές στις θερμικές στροβιλομηχανές συναντώνται σε αριθμό δημοσιεύσεων της ΜΠΤΡ&Β/ΕΘΣ (5, 6, 22, 24, 34, 38, 39). Με την εφαρμογή ΕΑ στις υδροδυναμικές μηχανές ασχολείται και το Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών του ΕΜΠ. Το έργο του εκτείνεται από το σχεδιασμό βέλτιστων υδροδυναμικών μηχανών και συνιστωσών αυτών (2) μέχρι τη βελτιστοποίηση ολοκληρωμένων υδροηλεκτρικών σταθμών και σταθμών αποθήκευσης ενέργειας σε συνεργασία με άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (1, 3).

1.4 Δομή της Διατριβής

Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει, σε συντομία, τους ΕΑ στους οποίους βασίστηκε αλλά και επέκτεινε η παρούσα διατριβή με όσα προαναφέρθηκαν. Παρουσιάζεται ο γενικευμένος ΕΑ και η σύζευξή του με τα μεταπρότυπα.

Το Κεφάλαιο 3 παρουσιάζει την προτεινόμενη μέθοδο σχεδιασμού στη βάση αρχειοθετημένης γνώσης (τεχνική KBD) και αποτιμά την επιτάχυνση της διαδικασίας σχεδιασμού-βελτιστοποίησης μέσω της εκμετάλλευσης αρχειοθετημένων σχεδιασμών, που επιταχύνεται μέσω του υβριδισμού των ΕΑ με συστήματα που βασίζονται στη γνώση (Knowledge Based Systems).

Το Κεφάλαιο 4 ασχολείται με την έννοια των «κακώς-τοποθετημένων» (ill-posed) προβλημάτων βελτιστοποίησης και τη βέλτιστη αντιμετώπιση τους μέσω ΕΑ. Ορίζονται ισότροπες και διαχωρίσιμες συναρτήσεις-στόχοι και προσδιορίζονται τα λεγόμενα «κακώς τοποθετημένα» προβλήματα βελτιστοποίησης και τρόποι αντιμετώπισής τους. Εξετάζεται η επίδρασή τους στην απόδοση των ΕΑ και προτείνεται η χρήση της ΑσΚΣ για τον εντοπισμό τους καθώς και η εισαγωγή νέων τελεστών εξέλιξης για την αντιμετώπιση τους. Ακόμη, προτείνεται η χρήση των ιδιοτιμών που προκύπτουν από την ΑσΚΣ για τη βελτίωση της απόδοσης των τοπικών μεταπρωτύπων που χρησιμοποιούνται στους ΜΑΕΑ. Το κέρδος από τη χρήση της προτεινόμενης μεθόδου ποσοτικοποιείται κατά το σχεδιασμό-βελτιστοποίηση μιας 2Δ πτερύγωσης συμπίεστή.

Στο Κεφάλαιο 5 πιστοποιούνται οι προτεινόμενες στα Κεφάλαια 3 και 4 μέθοδοι στο σχεδιασμό-βελτιστοποίηση υδροδυναμικών μηχανών. Αρχικά παρουσιάζονται τα «υπολογιστικά εργαλεία», δηλαδή η παραμετροποίηση των προς σχεδιασμό μορφών, η διαδικασία γένεσης υπολογιστικού πλέγματος και ο επιλύτης των εξισώσεων της ροής. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι μετρικές ποιότητας που χαρακτηρίζουν την απόδοση κάθε υποψήφιας λύσης. Αυτές, καθεμιά ξεχωριστά ή σε γραμμικούς συνδυασμούς με κατάλληλους συντελεστές βαρύτητας, αποτελούν τους στόχους των προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η προτεινόμενη μέθοδος KBD χρησιμοποιείται στο

σχεδιασμό-βελτιστοποίηση ενός υδροστροβίλου τύπου Francis και η MAEA(PCA) στο σχεδιασμό ενός υδροστροβίλου τύπου Hydromatrix®.

Το Κεφάλαιο 6 αναφέρεται στη βελτιστοποίηση μορφής των πτερυγίων της περύγωσης συμπίεστή η οποία είναι εγκατεστημένη στο ΕΘΣ/ΕΜΠ. Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης εφαρμόζεται η μέθοδος M(PCA)AEA(PCA). Πρόκειται για εφαρμογή στην περιοχή της αεροδυναμικής υψηλών ταχυτήτων, σε αντίθεση με τις εφαρμογές ασυμπίεστων ροών του Κεφαλαίου 5.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7^ο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάπτυξη μεθόδων βελτιστοποίησης και τις εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν.

Τα κεφάλαια, όπως αριθμούνται στην εκτενή περίληψη στην Ελληνική γλώσσα, αντιστοιχούν σε αυτά του πλήρους κειμένου της διατριβής στην Αγγλική γλώσσα. Γενικά, όμως, ενδέχεται οι ενότητες των κεφαλαίων να αριθμούνται διαφορετικά.

1. Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2

Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

2.1 Εισαγωγή

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση της προϋπάρχουσας υποδομής, όπως αυτή διαμορφώθηκε στο πλαίσιο προηγούμενων διατριβών στη ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ του ΕΜΠ, σχετικής με την ανάπτυξη αποδοτικών μεθόδων βελτιστοποίησης βασισμένων στους ΕΑ (4, 18, 25, 32, 36, 42). Η υποδομή αυτή (23) χρησιμοποιήθηκε ως αλγοριθμική βάση στην παρούσα διδακτορική διατριβή και εμπλουτίστηκε με νέες μεθόδους που παρουσιάζονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια, αυξάνοντας ακόμη περισσότερο την ήδη υψηλή απόδοση αυτών.

Οι ΕΑ ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών, πληθυσμιακών μεθόδων βελτιστοποίησης και μιμούνται τη θεωρία εξέλιξης των ειδών του Δαρβίνου (10). Οι πρώτες προσπάθειες χρήσης ΕΑ για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης ξεκίνησαν σχεδόν ταυτόχρονα κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1950, από τους Friedberg (16, 17), Bremermann (9) και Box (8). Στις αρχές της δεκαετίας του 1960, είχαν διαμορφωθεί οι τρεις κύριες μορφές των ΕΑ οι οποίες, στη συνέχεια, κυριάρχησαν: ο Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming, EP) από τον Fogel (15), οι Στρατηγικές Εξέλιξης (Evolutionary Strategies, ES) από τον Rechenberg (47) και οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms, GA) από τον Holland (30).

Το λογισμικό βελτιστοποίησης EASY (Evolutionary Algorithm System) της ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ κάνει χρήση του προτεινόμενου στην (25) γενικευμένου $(\mu, \lambda)EA$ ο οποίος μπορεί να μετατραπεί, με κατάλληλες ρυθμίσεις, τόσο σε GA όσο και σε ES. Οι αμέριστε ποσότητες μ και λ αναφέρονται στο πλήθος των γονέων και απογόνων κάθε γενιάς, αντίστοιχα. Ο $(\mu, \lambda)EA$ χρησιμοποιεί τους τελεστές εξέλιξης (επιλογής γονέων, διασταύρωσης, μετάλλαξης, ελιτισμού) για τη δημιουργία του πληθυσμού των απογόνων.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΕΑ που τους μετατρέπουν σε ελκυστικά, για τη βιομηχανία, εργαλεία σχεδιασμού-βελτιστοποίησης είναι: α) η ικανότητά τους να εντο-

2. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

πίζουν το καθολικό βέλτιστο, αποφεύγοντας τα τοπικά ακρότατα και β) η ικανότητα τους να χρησιμοποιούν οποιοδήποτε λογισμικό αξιολόγησης χωρίς ανάγκη πρόσβασης στον πηγαίο κώδικα αυτού. Προαπαιτούμενα για την πραγματοποίηση μιας βελτιστοποίησης με χρήση ΕΑ είναι η διαθεσιμότητα λογισμικού αξιολόγησης ικανού να αναλύει κάθε υποψήφια λύση και να ποσοτικοποιήσει την απόδοση/ποιότητά της με βάση τα τεθέντα κριτήρια και την ικανοποίηση των τεθέντων περιορισμών (αν και εφόσον αυτοί υπάρχουν), ο καθορισμός των μεταβλητών σχεδιασμού (και των ορίων τους) και των συναρτήσεων κόστους.

Η ανάγκη αξιολόγησης όλων των υποψηφίων λύσεων που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της εξέλιξης, ώστε να αποδοθούν σε αυτές οι τιμές των συναρτήσεων κόστους, είναι το αδύνατο σημείο των ΕΑ. Το πρόβλημα γίνεται σημαντικό σε περιπτώσεις όπου το λογισμικό αξιολόγησης έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος. Η βελτιστοποίηση μορφής, τόσο στην αεροδυναμική όσο και στην υδροδυναμική, ανήκει σε αυτήν την κατηγορία λόγω της χρήσης κωδικών ΥΡΔ ως λογισμικού αξιολόγησης. Αυτό αυξάνει αισθητά το χρόνο ολοκλήρωσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Για να αντιμετωπισθεί η προαναφερθείσα αδυναμία, έχουν αναπτυχθεί τρόποι που α) ελαχιστοποιούν τον αριθμό κλήσεων στο λογισμικό αξιολόγησης, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το συνολικό υπολογιστικό κόστος της βελτιστοποίησης και β) εκμεταλλεύονται τη διαθεσιμότητα πολυεπεξεργαστικών συστημάτων, αξιολογώντας ταυτοχρόνως πολλές υποψήφιες λύσεις και, έτσι, μειώνοντας το συνολικό χρόνο της αναμονής του σχεδιαστή. Οι δύο αυτές τεχνικές, στις διάφορες παραλλαγές τους, εντάχθηκαν στο λογισμικό EASY από παλαιότερες διδακτορικές διατριβές της ερευνητικής ομάδας της ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ του ΕΜΠ (4, 25, 32, 36) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τις προτεινόμενες, σε αυτήν τη διατριβή, μεθόδους. Σχετικές είναι και οι εργασίες (6, 13, 19, 22, 24, 34, 35, 37, 38, 39, 39, 43) από την ερευνητική ομάδα της ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ.

2.2 Βασικές Έννοιες

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης που επιλύονται σε αυτήν τη διατριβή διατυπώνονται γενικά ως προβλήματα ελαχιστοποίησης M στόχων και K περιορισμών. Μια γενική διατύπωσή τους είναι η

$$\begin{aligned} \min \vec{F}(\vec{x}) &= (f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_M(\vec{x})) \in \mathbb{R}^M \\ \text{υπό τους περιορισμούς } c_k(\vec{x}) &\leq d_k, \quad k = 1, K \end{aligned} \quad (2.1)$$

όπου $\vec{x} \in X \subseteq \mathbb{R}^N$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού και X ο χώρος σχεδιασμού. Περιορισμοί ισότητας της μορφής $c^*(\vec{x}) = d^*$ καλύπτονται από τη διατύπωση 2.1 αν γραφούν ως $c(\vec{x}) = |c^*(\vec{x}) - d^*| < d$, όπου $d \in \mathbb{R}^K$ ένας απειροστικά μικρός αριθμός.

Ο γενικευμένος ΕΑ, (25), που χρησιμοποιήθηκε ως λογισμικό βάσης στην παρούσα διδακτορική διατριβή διαχειρίζεται, σε κάθε γενιά (g), τρεις πληθυσμούς: τον πληθυσμό P_λ^g των λ απογόνων, τον P_μ^g των μ γονέων και τον P_e^g των e επιλέκτων της γενιάς g . Η πιθανότητα επιλογής μίας υποψήφιας λύσης ως γονέα είναι αντιστρόφως ανάλογη της τιμής της προς ελαχιστοποίηση βαθμωτής συνάρτησης κόστους Φ . Η συνάρτηση Φ ορίζεται στη συνέχεια. Το σύνολο P_e^g εμπεριέχει τις καλύτερες, μέχρι στιγμής, λύσεις που ανέδειξε η εξέλιξη. Ακολουθεί ο αλγόριθμος του γενικευμένου ΕΑ (25), στη μορφή που καλύπτει τόσο μονοκριτηριακή και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.

Βήμα 1: (Αρχικοποίηση) Τίθεται $g=0$, $P_e^{g-1} = \emptyset$ και $P_\mu^{g-1} = \emptyset$. Κάθε μέλος του συνόλου των απογόνων P_λ^g αρχικοποιείται μέσω μίας ομοιόμορφης γεννήτριας ψευδοτυχαίων αριθμών¹ λαμβάνοντας υπόψη τα τεθέντα άνω και κάτω όρια των μεταβλητών σχεδιασμού. Ένα, συνήθως μικρό, υποσύνολο του P_λ^g μπορεί να επιβληθεί εξωτερικά από το χρήστη. Τέτοια άτομα συνήθως αποτελούν βέλτιστες λύσεις παρόμοιων προβλημάτων ή άλλες λύσεις που σέβονται όμως τους περιορισμούς.

Βήμα 2: (Αξιολόγηση) Κάθε μέλος του συνόλου απογόνων αξιολογείται χρησιμοποιώντας το πρότυπο αξιολόγησης, υπολογίζεται δηλαδή το διάνυσμα τιμών $\vec{F}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^M$, για κάθε $\vec{x} \in P_\lambda^g$.

Βήμα 3: (Απόδοση βαθμωτού κόστους) Για κάθε $\vec{x} \in P_\lambda^g \cup P_\mu^g \cup P_e^{g-1}$, υπολογίζεται μια βαθμωτή τιμή κόστους $\Phi(\vec{x})$ συναρτήσει του $\vec{F}(\vec{x})$. Για προβλήματα ενός στόχου $\Phi(\vec{x}) \equiv F(\vec{x})$.

Βήμα 4: (Ανανέωση επιλέκτων) Τα e^* καλύτερα μέλη του $P_\lambda^g \cup P_e^{g-1}$ επιλέγονται ως μέλη του P_e^g . Αν $e^* > e$, εφαρμόζεται τελεστής αραίωσης (25) για να αφαιρεθούν τα επιπλέον $e^* - e$ άτομα.

Βήμα 5: (Ελιτισμός) Μικρός αριθμός επιλέκτων, ο οποίος επιλέγεται τυχαία από το P_e^g , αντικαθιστά τα χειρότερα μέλη του P_λ^g .

Βήμα 6: (Επιλογή γονέων) Τα μέλη του P_μ^g επιλέγονται από το $P_\lambda^g \cup P_\mu^{g-1}$ λαμβάνοντας υπόψη το επιτρεπόμενο όριο ζωής κ (εκφρασμένο σε αριθμό γενιών) κάθε γονέα και απογόνου. Σε συμβολική γραφή, $P_\mu^g = S(P_\mu^{g-1}, P_\lambda^g, \kappa)$.

Βήμα 7: (Διασταύρωση & μετάλλαξη) Η επόμενη γενιά απογόνων P_λ^{g+1} διαμορφώνεται από το P_μ^g κάνοντας χρήση των τελεστών, διασταύρωσης (\mathcal{R}) και μετάλλαξης (\mathcal{M}). Σε συμβολική γραφή, $P_\lambda^{g+1} = \mathcal{M}(\mathcal{R}(P_\mu^g))$.

¹Pseudo Random Number Generator, PRNG.

2. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Βήμα 8: (Έλεγχος τερματισμού) Αν ικανοποιείται κάποιο από τα τεθέντα κριτήρια σύγκλισης του ΕΑ ο αλγόριθμος τερματίζεται, αλλιώς $g \leftarrow g + 1$ και επιστροφή στο βήμα 2.

Οι βασικοί ορισμοί συμβόλων που χρησιμοποιούνται στο (μ, λ) ΕΑ παρέχονται στον πίνακα 2.1.

2.2.1 Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση

Αν $M > 1$, το πρόβλημα (2.1) είναι ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης πολλών στόχων. Στην περίπτωση που υπάρχει μία λύση \vec{x}^* , η οποία συγχρόνως ελαχιστοποιεί όλους τους στόχους, αυτή αποτελεί την καθολικά βέλτιστη λύση του προβλήματος. Στη συνήθη περίπτωση όπου οι στόχοι είναι αντικρουόμενοι, χρησιμοποιείται η έννοια της κυριαρχίας κατά Pareto, όπως αυτή ορίζεται στη συνέχεια.

Για να γίνει δυνατή η χρήση ενός ΕΑ στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι απαραίτητη μία εμβόλιμη τεχνική που θα μετατρέπει το διάνυσμα $\vec{F}(\vec{x})$ σε βαθμωτό $\Phi(\vec{x})$. Με τον τρόπο αυτό, όλες οι τεχνικές που αναπτύσσονται για μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση εφαρμόζονται και στην πολυκριτηριακή. Στην παρούσα διατριβή, αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση της τεχνικής SPEA2, (53, 54), η οποία βασίζεται στην έννοια της κυριαρχίας κατά Pareto. Ακολουθούν οι ορισμοί της κυριαρχίας και της βέλτιστης λύσης κατά Pareto:

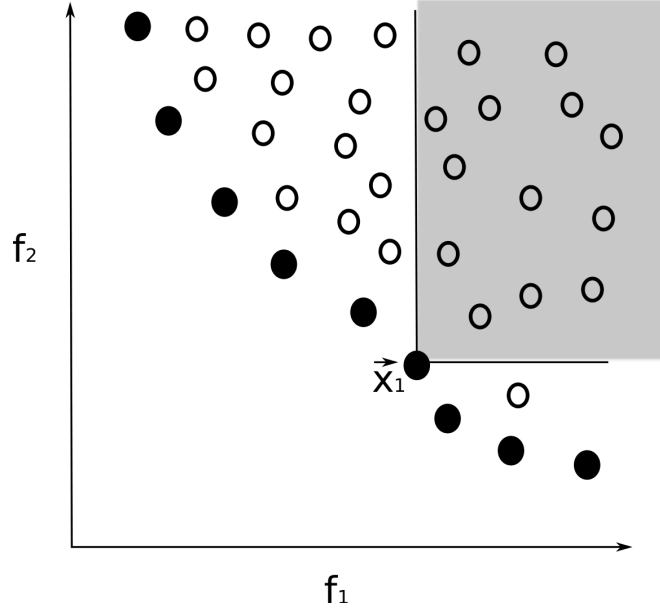
Κυριαρχία κατά Pareto: Η λύση $\vec{x}_1 \in X$ κυριαρχεί κατά Pareto της $\vec{x}_2 \in X$ ($\vec{x}_1 \prec \vec{x}_2$) αν και μόνο αν δεν παρουσιάζει χειρότερη (μεγαλύτερη, σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης) τιμή για όλες τις συναρτήσεις κόστους, ενώ τουλάχιστον μια από αυτές παρουσιάζει καλύτερη (χαμηλότερη σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης) τιμή ως προς την αντίστοιχη της λύσης \vec{x}_2 , (26). Μαθηματικά διατυπωμένο:

$$\vec{x}_1 \prec \vec{x}_2 \Leftrightarrow (\forall i \in [1, M] : f_i(\vec{x}_1) \leq f_i(\vec{x}_2)) \wedge (\exists i : f_i(\vec{x}_1) < f_i(\vec{x}_2)) \quad (2.2)$$

Βέλτιστη κατά Pareto λύση: Μια λύση $\vec{x}_1 \in X$ (X είναι το σύνολο των αποδεκτών λύσεων) είναι βέλτιστη κατά Pareto αν και μόνο αν δεν κυριαρχείται κατά Pareto από καμία άλλη λύση $\vec{x} \in X$, δηλαδή αν και μόνο αν, (26),

$$\nexists \vec{x} : \vec{x} \prec \vec{x}_1, \quad \vec{x}, \vec{x}_1 \in X \subseteq \mathbb{R}^N \quad (2.3)$$

Ακολουθεί η παρουσίαση της τεχνικής SPEA2, (53, 54), που χρησιμοποιείται για να μετατρέψει τα διανύσματα τιμών F των μελών του τρέχοντος πληθυσμού σε βαθμωτές τιμές Φ , με βάση την έννοια της κυριαρχίας κατά Pareto. Η SPEA2 αποδίδει σε κάθε άτομο μια βαθμωτή τιμή αντιπροσωπευτική της αλληλοκυριαρχίας των ατόμων της ένωσης των συνόλων P_λ^g , P_μ^g και P_e^{g-1} .



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της κυριαρχίας κατά Pareto σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων ($M=2$). Η λύση \vec{x}_1 είναι βέλτιστη κατά Pareto καθώς δεν κυριαρχείται από οποιαδήποτε άλλη λύση. Η λύση \vec{x}_1 , αυτή καθαυτή, κυριαρχεί σε όλες τις λύσεις που υπάρχουν στη σκιασμένη περιοχή. Το μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, το οποίο εδώ απεικονίζεται με μαύρους κύκλους, δεν είναι υποχρεωτικά συνεχές.

Βήμα 1: (Υπολογισμός δύναμης) Για κάθε μέλος (i) του πληθυσμού $P = P_\lambda^g \cup P_\mu^g \cup P_e^{g-1}$ υπολογίζεται η τιμή της δύναμης $S_i = \frac{\sum(j:j \in P \wedge i < j)}{\sum P}$. Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, η δύναμη ενός μέλους i ορίζεται ως το πλήθος των μελών του πληθυσμού στα οποία κυριαρχεί, διαιρεμένο με το συνολικό μέγεθος του πληθυσμού P .

Βήμα 2: (Υπολογισμός πυκνότητας) Για κάθε μέλος i του πληθυσμού υπολογίζεται η τιμή πυκνότητας $D_i = \frac{1}{a_i+2}$, ως συνάρτηση της απόστασής του $a_i = \min(\|\vec{F}_i - \vec{F}_k\|)$ από το κοντινότερο μέλος του πληθυσμού.

Βήμα 3: (Υπολογισμός Φ) Η βαθμωτή τιμή κόστους υπολογίζεται για κάθε άτομο του πληθυσμού και ορίζεται ως το άθροισμα $\Phi_i = R_i + D_i$ όπου $R_i = \sum_{j \in P \wedge i < j} |S_j|$ είναι μια βοηθητική ποσότητα (raw fitness) ίση με το άθροισμα της δύναμης των ατόμων από τα οποία κυριαρχείται το υπόψη άτομο. Μεγάλες τιμές της ποσότητας R_i υποδηλώνουν ότι το άτομο κυριαρχείται από πολλά άλλα άτομα. Τα μέλη του μετώπου Pareto λαμβάνουν εξ ορισμού μηδενική τιμή ($R_i = 0$).

2. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

2.2.2 Βελτιστοποίηση με Περιορισμούς

Στην πλειονότητα τους, τα προβλήματα βελτιστοποίησης, κυρίως αυτά που αφορούν σε βιομηχανικές εφαρμογές, πρέπει να ικανοποιούν και ένα σύνολο περιορισμών. Οι περιορισμοί μπορεί να σχετίζονται με γεωμετρικά χαρακτηριστικά ή λειτουργικές επιδόσεις λ.χ. της σχεδιαζόμενης στροβιλομηχανής. Σε αυτήν τη διατριβή, οι ΕΑ αντιμετωπίζουν τα προβλήματα με περιορισμούς κάνοντας χρήση συναρτήσεων ποινής (penalty functions (11, 46)).

Οι όροι ποινής είναι ανάλογοι του κατά πόσο παραβιάζεται ο κάθε περιορισμός και προστίθενται στην Φ . Για κάθε περιορισμό, εκτός της τιμής του κατωφλίου d_k της σχέσης 2.1, ορίζεται επιπλέον και μια «χαλαρωμένη» τιμή $d_k^* > d_k$. Στην περίπτωση που το άτομο υπερβεί το «χαλαρωμένο» κατώφλι d_k^* , τότε αυτομάτως αποδίδεται «ποινή θανάτου» (death penalty), η οποία πρακτικά ισοδυναμεί με «άπειρη» τιμή της ποσότητας Φ . Στην περίπτωση που κανένας περιορισμός δεν υπερβαίνει το «χαλαρωμένο» όριο, η τιμή της Φ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Phi(\vec{x}) = \Phi(\vec{x}) + \prod_{k=1}^K \begin{cases} \exp(a_k \frac{c_k(x) - d_k}{d_k^* - d_k}) & , c_k(x) > d_k \\ 1 & , c_k(x) \leq d_k \end{cases} \quad (2.4)$$

όπου οι συντελεστές a_k καθορίζονται από το χρήστη και ρυθμίζουν τη σημαντικότητα κάθε περιορισμού.

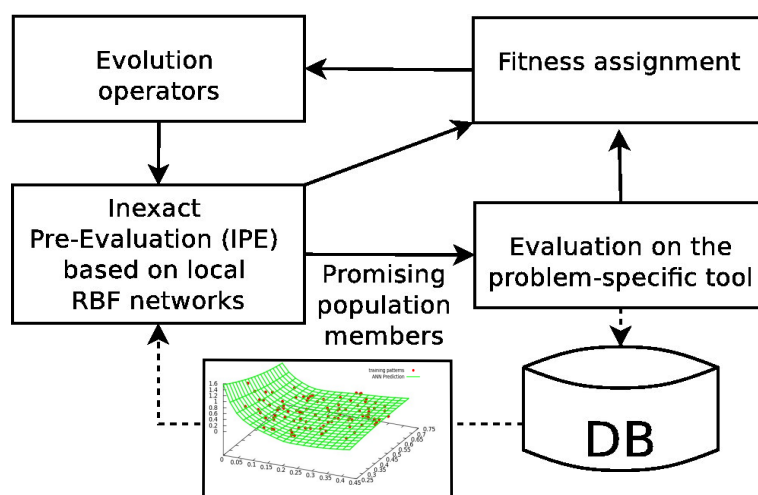
Πλήθος μεταβλητών σχεδιασμού	N
Πλήθος στόχων	M
Πλήθος περιορισμών	K
Υποψήφια λύση, διάνυσμα μεταβλητών σχεδιασμού	$\vec{x} = (x_1, \dots, x_N)$
Συνάρτηση-στόχος	$f_i(\vec{x})$
Διάνυσμα στόχων (αν $M > 1$)	$\vec{F} = (f_1(\vec{x}), \dots, f_M(\vec{x}))$
Συνάρτηση-περιορισμός	$c_i(\vec{x})$
Διάνυσμα περιορισμών	$\vec{C} = (c_1(\vec{x}), \dots, c_K(\vec{x}))$
Βαθμωτή συνάρτηση κόστους	Φ
Πλήθος απογόνων ανά γενιά	λ
Πλήθος γονέων ανά γενιά	μ
Πλήθος επιλέκτων ανά γενιά	e
Διάρκεια ζωής ατόμου (μετρούμενη σε γενιές)	κ
Πλήθος γονέων που σχηματίζουν έναν απόγονο	ρ

Πίνακας 2.1: Γενικευμένος Εξελικτικός Αλγόριθμος (μ, λ) ΕΑ: Βασικοί Συμβολισμοί.

2.3 ΕΑ Υποβοηθούμενοι από Μεταπρότυπα

Η αντικατάσταση του ακριβούς προτύπου αξιολόγησης (λ.χ. του κώδικα ΥΡΔ στις εφαρμογές αερο- ή υδροδυναμικής) με κάποιο άλλο πρότυπο αξιολόγησης (μεταπρότυπο/metamodel), το οποίο έχει αρκετά μικρότερο υπολογιστικό κόστος και, συνήθως, είναι μια γενική μέθοδος παρεμβολής ή προσέγγισης, είναι η βασική ιδέα των υποβοηθούμενων από μεταπρότυπα ΕΑ (Metamodel-Assisted Evolutionary Algorithms ή MAEA).

Σε αυτήν τη διατριβή χρησιμοποιούνται ΕΑ με μεταπρότυπα συνδεδεμένα με την εξέλιξη μέσω της τεχνικής της προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης (ΠΠΑ), Inexact Pre-Evaluation (IPE), (4, 24, 25, 32, 33, 36). Η φάση της ΠΠΑ ξεκινά όταν στη βάση δεδομένων του ΕΑ έχει αρχειοθετηθεί ένας ελάχιστος αριθμός (ορίζεται από το χρήστη) αξιολογημένων υποψήφιων λύσεων. Κατά τη φάση της ΠΠΑ, εκπαιδεύονται $(\lambda - \lambda^*)$ μεταπρότυπα, όπου λ^* ο αριθμός των ατόμων του τρέχοντος πληθυσμού που υπάρχουν ήδη στη βάση δεδομένων. Ασφαλώς, αυτά τα λ^* άτομα δεν χρειάζεται να αξιολογηθούν, για την απόδοση προσεγγιστικής τιμής κόστους Φ^* στις $(\lambda - \lambda^*)$ υποψήφιες λύσεις. Κάθε μεταπρότυπο δίνει μια εκτίμηση της τιμής της συνάρτησης-στόχου του αντίστοιχου ατόμου. Με αυτήν την έννοια, τα μεταπρότυπα χαρακτηρίζονται ως «τοπικά» (local metamodels). Τέλος, τα λ_e καλύτερα άτομα του πληθυσμού, με βάση τις αποδοθείσες τιμές Φ^* , προκρίνονται για αξιολόγηση με το ακριβές πρότυπο, εδώ το λογισμικό ΥΡΔ. Λεπτομερέστερη περιγραφή της τεχνικής ΠΠΑ βρίσκεται στο Κεφάλαιο 2 του πλήρους κειμένου. Το σχήμα 2.2 σκιαγραφεί ένα MAEA.



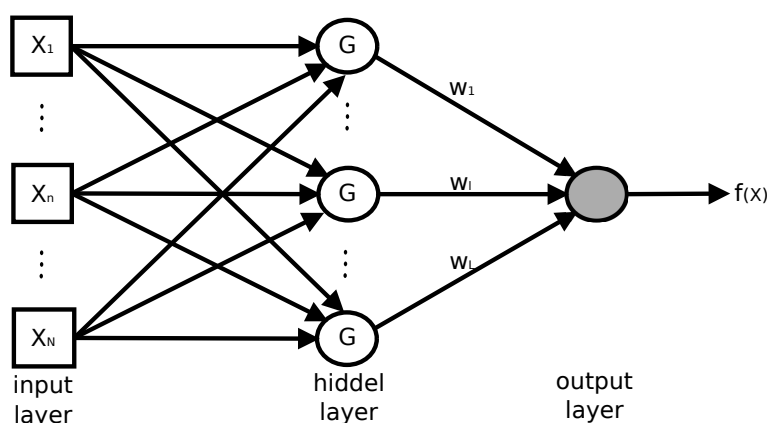
Σχήμα 2.2: Ο MAEA με μεταπρότυπα συνδεδεμένα με την εξέλιξη μέσω της τεχνικής της προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης (ΠΠΑ).

Στην παρούσα διατριβή, ως μεταπρότυπα χρησιμοποιούνται τεχνητά νευρωνικά

2. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

δίκτυα (ΤΝΔ, Artificial Neural Networks, ANN) και, συγκεκριμένα, Δίκτυα Συναρτήσεων Ακτινικής Βάσης (Radial Basis Function networks, RBF) (29).

Ένα τυπικό δίκτυο RBF, με N εισόδους και μία έξοδο, κατάλληλο για την πρόβλεψη τιμής μιας συνάρτησης κόστους φαίνεται στο σχήμα 2.3. Η συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιήθηκε είναι η $G(u, r) = \exp(-\frac{u^2}{r^2})$ όπου $u = \|\vec{x} - \vec{c}_i\|_2$ είναι η απόσταση από το i^o κέντρο \vec{c}_i της συνάρτησης ακτινικής βάσης.



Σχήμα 2.3: Δίκτυο συναρτήσεων ακτινικής βάσης N εισόδων και μίας εξόδου, το οποίο χρησιμοποιείται ως μεταπρότυπο του MAEA της παρούσας διατριβής.

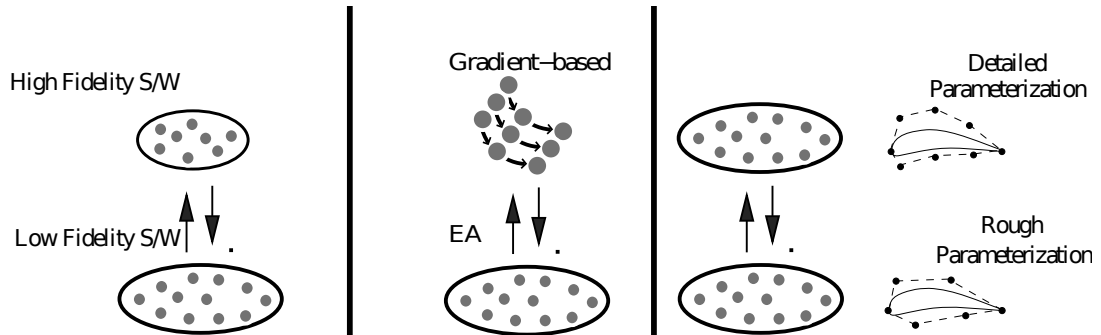
2.4 Ιεραρχική-Πολυεπίπεδη Βελτιστοποίηση

Η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης σε έναν αριθμό «επιπέδων βελτιστοποίησης», χρησιμοποιώντας στο κάθε επίπεδο: α) υπολογιστικά εργαλεία αξιολόγησης των υποψήφιων λύσεων διαφορετικού κόστους και ακρίβειας, β) μεθόδους ανίχνευσης διαφορετικού τύπου, ενδεχομένως στοχαστικές σε κάποια επίπεδα και αιτιοκρατικές σε άλλα, γ) παραμετροποίηση της προς σχεδιασμό μορφής με διαφορετικούς βαθμούς ελευθερίας, αποτελεί τη βασική ιδέα της ιεραρχικής (Hierarchical EA, HEA) ή πολυεπίπεδης βελτιστοποίησης, (20, 27, 32, 33, 39).

Οι προαναφερθείσες μορφές ιεραρχικής-πολυεπίπεδης βελτιστοποίησης (σχήμα 2.4) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό, χρησιμοποιώντας δύο ή περισσότερα επίπεδα.

Στο σχήμα 2.4, αριστερά, απεικονίζεται ο πολυεπίπεδος (διεπίπεδος EA) με ιεραρχική αξιολόγηση (Hierarchical Evaluation). Χρησιμοποιεί λογισμικό χαμηλού υπολογιστικού κόστους και πιστότητας στο χαμηλό επίπεδο και λογισμικό υψηλού κόστους και πιστότητας στο υψηλό επίπεδο, το οποίο χειρίζεται μικρότερο πληθυσμό. Στο μέσο, απεικονίζεται παραλλαγή βασισμένη στην ιεραρχική ανίχνευση (Hierarchical Search) που υλοποιείται συνήθως εφαρμόζοντας EA στο χαμηλό επίπεδο

2.4 Ιεραρχική-Πολυεπίπεδη Βελτιστοποίηση



Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση των τριών τύπων ιεραρχικής-πολυεπίπεδης βελτιστοποίησης. Παρουσιάζεται η πλέον συνηθισμένη διεπίπεδη μορφή του προαναφερθέντος γενικού τρόπου σε τρεις εναλλακτικές διατυπώσεις, (32).

και αιτιοκρατικές μεθόδους βελτιστοποίησης στο υψηλό επίπεδο. Τέλος, δεξιά, απεικονίζεται μια τρίτη παραλλαγή που βασίζεται στην ιεραρχική παραμετροποίηση (Hierarchical Parameterization). Αυτή συνδυάζει την αδρή παραμετροποίηση της προς σχεδιασμό μορφής με λίγες μεταβλητές σχεδιασμού στο χαμηλό επίπεδο με τη λεπτομερή παραμετροποίησή της, με όλους τους βαθμούς ελευθερίας, στο υψηλό επίπεδο.

Η ιεραρχική βελτιστοποίηση δεν χρησιμοποιείται στις εφαρμογές που παρουσιάζει η διατριβή αυτή. Η χρήση των εδώ προτεινόμενων τεχνικών μείωσης του υπολογιστικού κόστους είναι, όμως, άμεσα επεκτάσιμη και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ιεραρχικός ΕΑ. Το κέρδος από τις νέες μεθόδους αναμένεται να υπερτίθεται σε αυτό των ιεραρχικών ΕΑ.

2. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Κεφάλαιο 3

Σχεδιασμός στη Βάση Αρχειοθετημένης Γνώσης

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται, υλοποιείται και αξιολογείται μια πρωτότυπη διαδικασία σχεδιασμού στροβιλομηχανών η οποία εκμεταλλεύεται τη διαθεσιμότητα παλαιότερων αρχειοθετημένων σχεδιασμών. Οι τελευταίοι θεωρούνται βέλτιστοι ή πολύ ικανοποιητικοί για λειτουργία σε διαφορετικές μεν, αλλά «συναφείς» συνθήκες. Αυτή η διαδικασία θα ονομάζεται σχεδιασμός στη βάση αρχειοθετημένης γνώσης ή Knowledge Based Design (KBD), (28). Αν και το υλικό που παρουσιάζεται περιορίζεται σε περιπτώσεις στροβιλομηχανών, η μέθοδος είναι γενική και άμεσα εφαρμόσιμη σε οποιαδήποτε άλλη επιστημονική περιοχή.

Η προτεινόμενη διαδικασία σχεδιασμού αποτελεί ένα πρωτότυπο συνδυασμό της γενικότερης μεθόδου «Αιτιολογίας Κατά Περίπτωση» (Case Based Reasoning, CBR), (41, 48, 51), που εντάσσεται στην κατηγορία «Συστημάτων Αρχειοθετημένης Γνώσης» (Knowledge Based Systems, KBS) και των ΕΑ. Η προτεινόμενη KBD αποτελεί μία εντελώς αυτοματοποιημένη διαδικασία, από τη στιγμή που έχουν επιλεγεί οι αρχειοθετημένοι σχεδιασμοί (σχεδιασμοί βάσης) και δεν απαιτεί παρέμβαση του χρήστη κατά τη διαδικασία αναθεώρησης της προτεινόμενης λύσης, όπως αυτό συμβαίνει στη συμβατική CBR. Το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα θα μπορούσε, εν μέρει, να επιτευχθεί με απλή ένταξη των αρχειοθετημένων σχεδιασμών στην πρώτη γενιά του ΕΑ, μαζί με κατάλληλο καθορισμό των ορίων των μεταβλητών σχεδιασμού. Αντ' αυτού, στην προτεινόμενη διαδικασία, χρησιμοποιούνται τεχνικές στατιστικής ανάλυσης έτσι ώστε να επιτευχθεί περαιτέρω επιτάχυνση του ΕΑ. Η προτεινόμενη διαδικασία KBD επιτυγχάνει:

- α) Αισθητή μείωση των μεταβλητών σχεδιασμού που χειρίζεται ο ΕΑ, επιφέροντας σημαντική επιτάχυνση της βελτιστοποίησης. Ουσιαστικά, επιτυγχάνει τον εντοπισμό της/των βέλτιστης/ων λύσης/ων με μικρότερο αριθμό κλήσεων του λογισμικού αξιολόγησης. Επιπλέον, προκαλεί ακόμη μεγαλύτερη επιτάχυνση

3. Σχεδιασμός στη Βάση Αρχαιοθετημένης Γνώσης

λόγω της αύξησης του κέρδους από τη χρήση μεταπροτύπων. Στην προτεινόμενη μέθοδο, τα μεταπρότυπα εκπαιδεύονται αποκτώντας μεγαλύτερη ακρίβεια πρόβλεψης ενώ η διαδικασία της ΠΠΑ μπορεί να εκκινεί νωρίτερα, με αρκετά λιγότερα πιθανά δείγματα εκπαίδευσης στη βάση δεδομένων την οποία διατηρεί και ανανεώνει ο ΕΑ, κατά την εξέλιξή του.

- β) Τον αυτόματο/άκοπο καθορισμό των ορίων των μεταβλητών σχεδιασμού, απαλλάσσοντας έτσι το σχεδιαστή από τη διαδικασία επιλογής τους και εξαλείφοντας παράλληλα τον κίνδυνο λάθους (η βέλτιστη λύση να βρίσκεται έξω από τα όρια των μεταβλητών σχεδιασμού). Υπενθυμίζεται ότι η βελτιστοποίηση μέσω ΕΑ προαπαιτεί τον καθορισμό άνω και κάτω ορίων τιμών για κάθε μεταβλητή.
- γ) Τη δυνατότητα αντιστοίχισης τιμών σημαντικότητας στις περιοχές του χώρου σχεδιασμού, όπως αυτές υπολογίζονται από τη στατιστική ανάλυση των αρχειοθετημένων σχεδιασμών. Η απόδοση υψηλής σημαντικότητας σε μια υποπεριοχή του χώρου σχεδιασμού μετουσιώνεται σε μεγαλύτερη πιθανότητα δημιουργίας απογόνων σε αυτήν, κατά τη διαδικασία της εξέλιξης.

Οι προαναφερθείσες ιδιότητες της KBD επιτρέπουν την αποδοτική ανίχνευση μεγάλων χώρων σχεδιασμού, τόσο ως προς το πλήθος των μεταβλητών σχεδιασμού όσο και ως προς το εύρος αυτών, εκμεταλλευόμενη την πληροφορία/γνώση που ενυπάρχει στους αρχειοθετημένους σχεδιασμούς.

3.1 Διατύπωση Νέου Σχεδιασμού

Στην προτεινόμενη μέθοδο, ο τρόπος διατύπωσης κάθε νέου σχεδιασμού είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την εισαγωγή των λεγόμενων μεταβλητών βελτιστοποίησης (optimization variables). Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης αποτελούν ένα διαφορετικό σύνολο μεταβλητών σχεδιασμού, μικρότερης κατά κανόνα διάστασης από αυτό που προκύπτει από την κλασική παραμετροποίηση μορφής. Στη μέθοδο KBD, οι άγνωστοι του προβλήματος θα ονομάζονται σκόπιμα «μεταβλητές βελτιστοποίησης» για να υπάρξει αντιδιαστολή ως προς τις «μεταβλητές σχεδιασμού» που αντιστοιχούν στην κλασική παραμετροποίηση μορφής. Στην τελευταία περίπτωση, λ.χ. μεταβλητές σχεδιασμού θα μπορούσαν να είναι οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου συναρτήσεων Bezier κ.ο.κ.

Η διαδικασία εισαγωγής των μεταβλητών βελτιστοποίησης έχει ως αφετηρία τους m σχεδιασμούς βάσης (m αρχειοθετημένα πτερύγια, αν λ.χ. σχεδιάζεται ένα νέο πτερύγιο στροβιλομηχανής). Αυτά θα συμβολίζονται ως $GEO_i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_N^i)$, $i = 1, \dots, m$ όπου x_j , $j = 1, \dots, N$ οι μεταβλητές σχεδιασμού όπως αυτές προκύπτουν από την παραμετροποίηση μορφής. Θεωρείται ότι οι m σχεδιασμοί βάσης περιγράφονται όλοι με την ίδια παραμετροποίηση. Σε διαφορετική περίπτωση, επαφίεται στο

3.1 Διατύπωση Νέου Σχεδιασμού

σχεδιαστή να δημιουργήσει κοινή παραμετροποίηση. Αυτό μπορεί να γίνει λ.χ. μέσω ΕΑ αλλά το θέμα ξεφεύγει από το πλαίσιο της παρούσας διατριβής.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι μέσες τιμές (μ_j) και οι τυπικές αποκλίσεις (σ_j) όλων των μεταβλητών σχεδιασμού των m σχεδιασμών βάσης. Συμβολικά,

$$\begin{pmatrix} x_1^1 \\ \vdots \\ x_N^1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^i \\ \vdots \\ x_N^i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^m \\ \vdots \\ x_N^m \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \vdots \\ \sigma_N \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Οι N μεταβλητές σχεδιασμού ομαδοποιούνται σε K ομάδες. Τα κριτήρια για την ομαδοποίηση μπορεί να είναι πολλά. Συνήθως, αλλά όχι αναγκαστικά, όλες οι μεταβλητές σχεδιασμού που αναφέρονται στην ίδια συνιστώσα της προς σχεδιασμό γεωμετρίας εντάσσονται στην ίδια ομάδα. Ενδεικτικά, κατά το σχεδιασμό λ.χ. μιας πτερύγωσης στροβιλομηχανής, οι μεταβλητές σχεδιασμού που παραμετροποιούν τη γενέτειρα του κελύφους ποδός συνήθως ανήκουν στην ίδια ομάδα, αυτές της γενέτειρας κελύφους κεφαλής σε μια άλλη, μια τρίτη ομάδα μπορεί να αποτελείται από τις μεταβλητές που σχετίζονται με τη μέση επιφάνεια κυρτότητας του πτερυγίου, κ.ο.κ.

Στη σχέση που ακολουθεί εισάγονται συντελεστές βάρους $w_{i,k}$, όπου ο δεύτερος δείκτης αφορά στην ομάδα ($k = 1, \dots, K$) στην οποία εντάχθηκε η αντίστοιχη μεταβλητή σχεδιασμού x_j . Κάθε νέος σχεδιασμός (άρα και ο ζητούμενος βέλτιστος) προκύπτει ως

$$x_j^{new} = \Phi_j^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^m w_{i,k} \Phi_j(x_j^i)}{\sum_{i=1}^m w_{i,k}} \right) \quad (3.2)$$

όπου Φ_j η σιγμοειδής αθροιστική συνάρτηση κανονικής κατανομής για την j , δηλαδή η

$$\Phi_j(x) = \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(u - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) du \quad (3.3)$$

ενώ τα σ_j και μ_j υπολογίζονται από τη σχέση 3.1. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί η διάκριση στα χρησιμοποιούμενα σύμβολα. Υπενθυμίζεται ότι x_j^i ($i = 1, \dots, m$ και $j = 1, \dots, N$) συμβολίστηκε η τιμή της j μεταβλητής σχεδιασμού σύμφωνα με την παραμετροποίηση της σχεδιαζόμενης μορφής για τον i -ιοστό σχεδιασμό βάσης. Αντιθέτως, οι νέες μεταβλητές που θα χειριστεί ο ΕΑ («μεταβλητές βελτιστοποίησης») συμβολίζονται με $w_{i,k}$ και είναι mK σε πλήθος. Σε αυτές, προστίθεται προαιρετικά μια ακόμη μεταβλητή, η Ψ .

3. Σχεδιασμός στη Βάση Αρχαιοθετημένης Γνώσης

Η προαιρετική μεταβλητή προεκβολής (Ψ) δίνει την επιπλέον δυνατότητα δημιουργίας νέων σχεδιασμών και εκτός του εύρους $\mu_j \pm 3\sigma_j$, (40). Χρησιμοποιώντας τη μεταβλητή αυτή, τα σ_j (που υπολογίστηκαν από τη 3.1, τα οποία στη συνέχεια θα συμβολίζονται με $\sigma_j^{computed}$ για να διακρίνονται από τα τελικά σ_j τα οποία θα προκύψουν τελικά από τη σχέση 3.4) υπολογίζονται από την

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \vdots \\ \sigma_N \end{pmatrix} = \Psi \begin{pmatrix} \sigma_1^{computed} \\ \vdots \\ \sigma_N^{computed} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

και είναι αυτά που θα χρησιμοποιηθούν για το σχηματισμό των νέων σχεδιασμών.

Ο αριθμός των μεταβλητών βελτιστοποίησης που προκύπτει, ισούται με $mK + 1$, συνυπολογίζοντας και την προαιρετική μεταβλητή Ψ .

3.2 Εφαρμογή: Σχεδιασμός 2Δ πτερύγωσης συμπίεστή

Η προτεινόμενη μέθοδος πιστοποιείται στο σχεδιασμό της αεροτομής 2Δ πτερύγωσης συμπίεστή. Η πτερύγωση λειτουργεί σε αριθμό Mach εισόδου $M_1 = 0.54$, γωνία εισόδου ροής $\alpha_1 = 44^\circ$ και αριθμό Reynolds της ροής βασισμένο στη χορδή c ίσο με $Re = 4 \times 10^5$. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ολικής πίεσης P_t , στη μορφή του ομώνυμου συντελεστή

$$\omega = \frac{p_{t1} - p_{t2}}{p_{t1} - p_1} \quad (3.5)$$

όπου ο δείκτης 1 υποδηλώνει την είσοδο ενώ ο δείκτης 2 την έξοδο της πτερύγωσης.

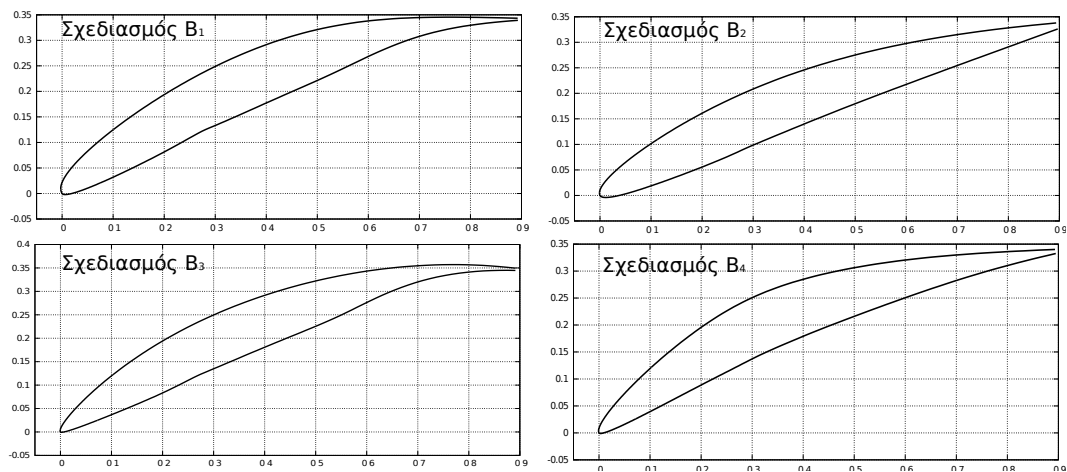
Η προς σχεδιασμό αεροτομή υπόκειται σε γεωμετρικούς περιορισμούς που αφορούν στο ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος της σε διάφορες θέσεις. Στις θέσεις $0.3c$, $0.6c$ και $0.9c$, όπου c είναι το μήκος της αεροτομής, το ελάχιστο επιτρεπτό πάχος της αεροτομής είναι $0.10c$, $0.08c$ και $0.01c$, αντίστοιχα. Επίσης, η προς σχεδιασμό αεροτομή απαιτείται να προκαλεί στροφή της ροής $\Delta\alpha = |\alpha_2 - \alpha_1|$ μεγαλύτερη των 30° . Η παραμετροποίηση υλοποιείται χωριστά για τη μέση γραμμή κυρτότητας και την κατανομή πάχους και χρησιμοποιεί 27 μεταβλητές σχεδιασμού. Κατά τον επιχειρούμενο με KBD σχεδιασμό, το διάνυσμα μεταβλητών σχεδιασμού χωρίζεται σε τρεις ομάδες ($K = 3$) ως εξής: i) αυτές που ελέγχουν το σχήμα της μέσης γραμμής κυρτότητας ii) αυτές που ελέγχουν την κατανομή πάχους στην πλευρά υπερπίεσης και iii) αυτές που ελέγχουν την κατανομή πάχους στην πλευρά υποπίεσης. Στη διάθεσή του σχεδιαστή υπάρχουν $m = 4$ αρχαιοθετημένοι σχεδιασμοί που χρησι-

3.2 Εφαρμογή: Σχεδιασμός 2Δ πτερύγωσης συμπίεστή

μπορούνται ως γεωμετρικές βάσης. Τελικώς, οι μεταβλητές βελτιστοποίησης είναι $mK + 1 = 13$ και αυτές, αντί των 27, χειρίζεται ο ΕΑ. Λογισμικό αξιολόγησης είναι μια ολοκληρωματική μέθοδος επίλυσης των συνεκτικών στρωμάτων, σε συνδυασμό με επιλύτη των εξισώσεων Euler για την εξωτερική ροή, (12).

Οι επιδόσεις των $m = 4$ σχεδιασμών βάσης (σχήμα 3.1) στις επιθυμητές συνθήκες ροής μαζί με την προκαλούμενη στροφή της ροής έχουν ως εξής:

- Σχεδιασμός βάσης B_1 : $\omega = 0.0207$ και $\Delta a = 36.3^\circ$.
- Σχεδιασμός βάσης B_2 : $\omega = 0.0278$ και $\Delta a = 27.8^\circ$.
- Σχεδιασμός βάσης B_3 : $\omega = 0.0201$ και $\Delta a = 37.5^\circ$.
- Σχεδιασμός βάσης B_4 : $\omega = 0.0237$ και $\Delta a = 33.1^\circ$.



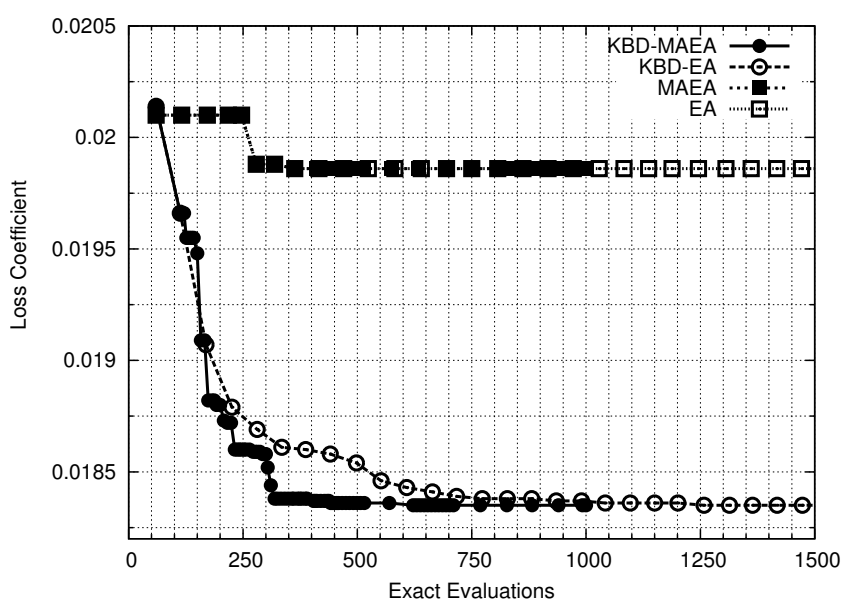
Σχήμα 3.1: Σχεδιασμός 2Δ πτερύγωσης συμπίεστή: Οι 4 αεροτομές που χρησιμοποιήθηκαν ως σχεδιασμοί βάσης κατά την εφαρμογή της μεθόδου KBD, τοποθετημένες στην επιθυμητή γωνία κλίσης της πτερύγωσης.

Παρατηρείται ότι και οι 4 σχεδιασμοί βάσης, όταν χρησιμοποιηθούν στις επιθυμητές συνθήκες ροής αντί των συνθηκών για τις οποίες είχαν σχεδιαστεί (περιγράφονται στο πλήρες κείμενο), έχουν σχετικά μεγάλες τιμές απωλειών ω . Επιπροσθέτως, ο σχεδιασμός β , δεν σέβεται τον περιορισμό στροφής της ροής. Και οι 4 σχεδιασμοί βάσης σέβονται, από σύμπτωση ενδεχομένως, τους γεωμετρικούς περιορισμούς.

Για τη μελέτη των επιδράσεων που έχει η χρήση της μεθόδου KBD τόσο στην εξέλιξη αυτή καθαυτή όσο και στη χρήση μεταπροτύπων κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, πραγματοποιήθηκαν 4 ξεχωριστές διαδικασίες βελτιστοποίησης. Η πρώτη έκανε χρήση του κλασικού ΕΑ, η δεύτερη ενός ΕΑ υποβοηθούμενου από μεταπρότυπα (MAEA), η τρίτη ενός ΕΑ με KBD (KBD-EA) και, τέλος, η τέταρτη ενός MAEA με KBD (KBD-MAEA). Λεπτομερής περιγραφή των παραμέτρων

3. Σχεδιασμός στη Βάση Αρχαιοθετημένης Γνώσης

εξέλιξης που χρησιμοποιήθηκαν υπάρχει στο πλήρες κείμενο της διατριβής, στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Είναι όμως σημαντικό να αναφερθεί ότι οι 27 μεταβλητές σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο πρώτες μεθόδους, σύμφωνα με την παραμετροποίηση της γεωμετρίας με NURBS, έδωσαν τη θέση τους σε μόνο 13 μεταβλητές βελτιστοποίησης κατά την εφαρμογή των δύο τελευταίων. Οι πορείες σύγκλισης των προαναφερθεισών διαδικασιών βελτιστοποίησης συγκεντρώνονται στο σχήμα 3.2.

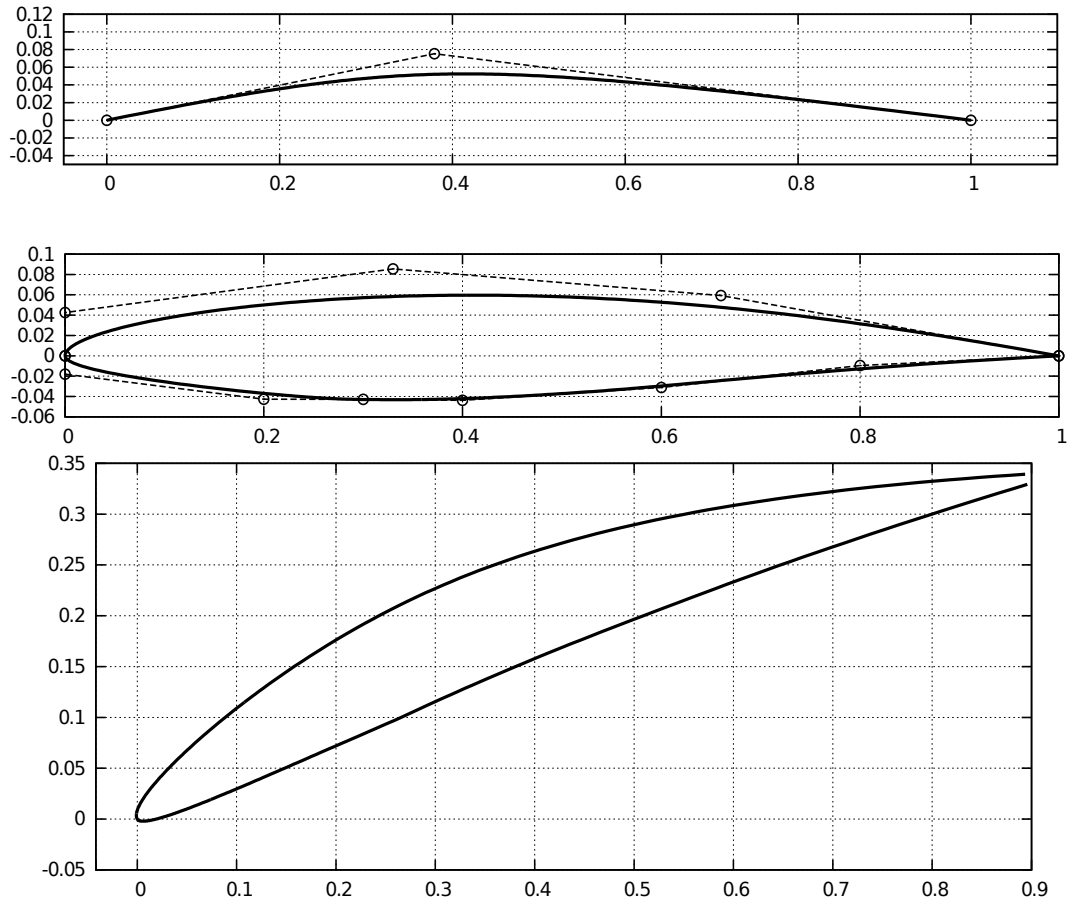


Σχήμα 3.2: Σχεδιασμός 2Δ πτέρυγωσης συμπίεστη: Πορείες σύγκλισης των EA, MAEA, KBD-EA και KBD-MAEA. Ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί σε κλήσεις στο λογισμικό ΥΠΔ. Η εκπαίδευση των μεταπροτύπων έχει μηδενικό πρόσθετο κόστος.

Παρατηρείται ότι η χρήση μεταπροτύπων στον EA (ή MAEA) χωρίς επιπρόσθετη χρήση KBD δεν απέφερε κέρδος. Αυτό, κατά μεγάλο βαθμό, οφείλεται στο σχετικά πολύ μεγάλο εύρος του χώρου σχεδιασμού. Ακόμη, παρατηρείται η καθολική υπεροχή της μεθόδου KBD-EA συγκριτικά με τον κλασικό EA, αποδεικνύοντας έτσι την επιτάχυνση της εξέλιξης όταν χρησιμοποιούνται οι νέες μεταβλητές βελτιστοποίησης (μειωμένος αριθμός και εισαγωγή σημαντικότητας στις περιοχές του χώρου σχεδιασμού). Επίσης, παρατηρείται η επανεμφάνιση του «απωλεσθέντος» κέρδους λόγω της χρήσης μεταπροτύπων κατά τη διαδικασία της ΠΠΑ στον KBD-MAEA. Τα παραπάνω συνηγορούν στην αξία της μεθόδου KBD, είτε αυτή χρησιμοποιείται μαζί με τον EA ή το MAEA.

Η βέλτιστη αεροτομή που υπολογίστηκε από τον KBD-MAEA παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3. Έχει απώλειες ολικής πίεσης $\omega = 0.01834$, τιμή αρκετά μικρότερη από όλους τους σχεδιασμούς βάσης. Επίσης ικανοποιεί όλους του περιορισμούς και επιφέρει στροφή της ροής ίση με $\Delta\alpha = 30.2^\circ$.

3.2 Εφαρμογή: Σχεδιασμός 2Δ πτερύγωσης συμπίεστή



Σχήμα 3.3: Σχεδιασμός 2Δ πτερύγωσης συμπίεστή: Η βέλτιστη αεροτομή η οποία υπολογίστηκε από τη μέθοδο KBD-MAEA. Η μέση γραμμή (πάνω) και οι κατανομές πάχους (κέντρο) για τις πλευρές υπερπίεσης και υποπίεσης, μαζί με τα πολύγωνα ελέγχου των πολωνύμων NURBS που τις παρήγαγαν. Η βέλτιστη αεροτομή, τοποθετημένη στην επιθυμητή γωνία κλίσης της πτερύγωσης (κάτω). Η αεροτομή ικανοποιεί όλους τους τεθέντες περιορισμούς.

3. Σχεδιασμός στη Βάση Αρχαιοθετημένης Γνώσης

Κεφάλαιο 4

ΕΑ και ΜΑΕΑ Υποβοηθούμενοι από Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τρόπους με τους οποίους μπορεί να μειωθεί σημαντικά ο χρόνος βελτιστοποίησης με χρήση ΕΑ ή παραλλαγών αυτών και, μάλιστα, υπερθετικά στη μείωση που επιφέρουν διάφοροι άλλοι ήδη γνωστοί τρόποι, όπως λ.χ. η προσεγγιστική προ-αξιολόγηση με μεταπρότυπα, κτλ.. Οι προτεινόμενοι τρόποι ενδείκνυνται για προβλήματα με μεγάλο αριθμό μεταβλητών σχεδιασμού και συνάρτηση κόστους Φ που είναι μη-διαχωρίσιμη (και ανισότροπη) ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού (21, 49, 50). Τα προβλήματα αυτά θα αναφέρονται ως «κακώς-τοποθετημένα» και προκαλούν μεγάλη καθυστέρηση στο ρυθμό σύγκλισης των ΕΑ ή των ΜΑΕΑ.

Τα «κακώς-τοποθετημένα» προβλήματα έχουν σχέση με τον τρόπο που οι μεταβλητές σχεδιασμού ενός προβλήματος συσχετίζονται με συνάρτηση κόστους Φ . Συνυφασμένες άμεσα με το πρόβλημα είναι οι έννοιες της ισότροπης ή μη-ισότροπης επίδρασης των μεταβολών τιμής των μεταβλητών σχεδιασμού στη μεταβολή τιμής της Φ και, κυρίως, του διαχωρίσιμου της. Η διαχείριση μιας μη-διαχωρίσιμης, μη-ισότροπης συνάρτησης-στόχου Φ κάνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης «κακώς-τοποθετημένο». Τα μεγάλης διάστασης (N'') «κακώς-τοποθετημένα» προβλήματα βελτιστοποίησης χαρακτηρίζονται από μεγάλο κόστος επίλυσης μέσω των ΕΑ αλλά, ακόμη, και των ΜΑΕΑ. Επειδή δε τα περισσότερα βιομηχανικά προβλήματα ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία, η επιθυμία για μείωση του κόστους επίλυσής τους είναι τεράστια. Οι έννοιες της ισοτροπίας και του διαχωρίσιμου, καθώς και η επίδρασή τους στους ΕΑ, αναλύονται στην επόμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου. Από μαθηματικής σκοπιάς, ο εντοπισμός του τρόπου συσχέτισης της Φ με τις μεταβλητές σχεδιασμού υλοποιείται με την Ανάλυση σε Κύριες Συνιστώσες (ΑσΚΣ, Principal Component Analysis ή PCA) (29). Το κόστος χρήσης της ΑσΚΣ για τους σκοπούς

4. ΕΑ και ΜΑΕΑ Υποβοηθούμενοι από Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών

του κεφαλαίου αυτού είναι το κόστος επίλυσης ιδιοπροβλημάτων μικρής διάστασης και κρίνεται, ως εκ τούτου, πάρα πολύ μικρό. Γίνεται, μάλιστα, αμελητέο όταν ο ΕΑ ή ο ΜΑΕΑ χρησιμοποιεί υψηλού κόστους λογισμικό αξιολόγησης των υποψήφιων λύσεων, όπως λ.χ. κώδικες ΥΡΔ.

Το κεφάλαιο αυτό προτείνει και πιστοποιεί, ως προς την αποδοτικότητα τους, δύο τρόπους εκμετάλλευσης των συσχετίσεων των μεταβλητών σχεδιασμού (ως προς τη Φ) που εντοπίζει η ΑσκΣ ή PCA. Ο πρώτος τρόπος σχετίζεται με την τροποποίηση των εξελικτικών τελεστών και θα αναφέρεται ως ΕΑ(PCA) ή ΜΑΕΑ(PCA) (44). Ο δεύτερος τρόπος σχετίζεται με τη χρήση μεταπροτύπων στο ΜΑΕΑ. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί την πληροφορία που παρέχει η ΑσκΣ κατά την ΠΠΑ των υποψήφιων λύσεων με μεταπρότυπα, ώστε τα τελευταία να εκπαιδεύονται με μικρό αριθμό σημαντικών εισόδων. Η μείωση αυτή του πλήθους εισόδων των μεταπροτύπων αυξάνει την αξιοπιστία τους, επιτρέπει τη χρήση τους νωρίτερα στο ΜΑΕΑ και επιφέρει υπολογιστικό κέρδος. Ο δεύτερος αυτός τρόπος θα αναφέρεται ως M(PCA)ΑΕΑ. Στο ακρωνύμιο αυτό, ο προσδιορισμός PCA τοποθετείται μετά το M (M=metamodel, μεταπρότυπο) για να φανεί ακριβώς το που χρησιμοποιείται. Προφανώς, οι δύο τρόποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά, σε μια νέα μέθοδο που θα αποκαλείται M(PCA)ΑΕΑ(PCA).

Στο δεύτερο τμήμα του κεφαλαίου αυτού, οι προτεινόμενες τεχνικές πιστοποιούνται σε προβλήματα ελαχιστοποίησης κακώς-τοποθετημένων μαθηματικών συναρτήσεων. Στη συνέχεια, εκτίμηση του αναμενόμενου κέρδους γίνεται και σε ένα πρόβλημα σχεδιασμού-βελτιστοποίησης της μορφής της αεροτομής μιας 2Δ πτερύγωσης συμπίεστη. Βιομηχανικού ενδιαφέροντος εφαρμογές των προτεινόμενων μεθόδων παρουσιάζονται σε επόμενα κεφάλαια.

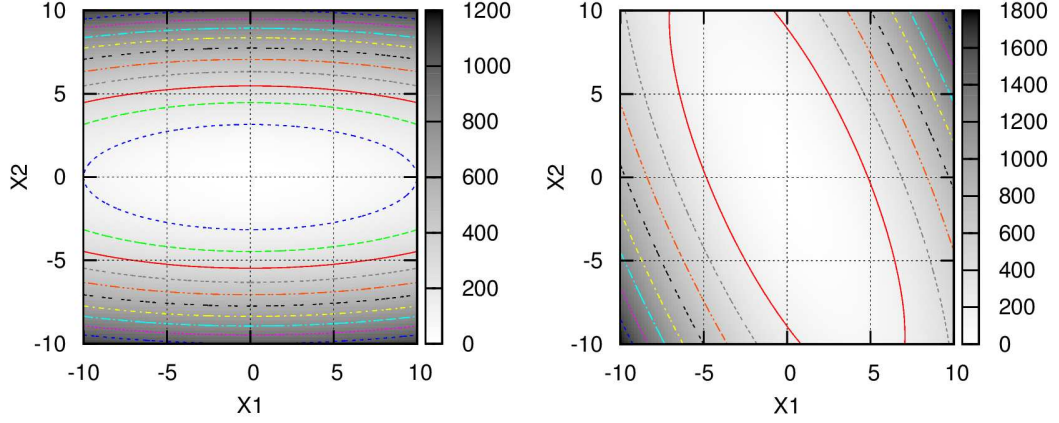
4.1 Δυσκολίες λόγω Ιδιαιτερότητας της Συνάρτησης Κόστους

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης αναφέρεται ως «κακώς τοποθετημένο» αν παρουσιάζει συνδυασμό δύο ιδιαιτεροτήτων της συνάρτησης-κόστους Φ (σχήμα 4.1): α) τη μη-ισότροπη συνεισφορά των μεταβλητών σχεδιασμού στη συνάρτηση κόστους και β) το μη-διαχωρίσιμο της Φ .

Μη-ισότροπη συνεισφορά των μεταβλητών σχεδιασμού στη συνάρτηση-κόστους υπάρχει όταν ισόποσες μεταβολές των μεταβλητών σχεδιασμού δεν επιφέρουν ισόποσες μεταβολές στην τιμή της Φ . Μια συνάρτηση κόστους Φ ονομάζεται διαχωρίσιμη ως προς τη μεταβλητή σχεδιασμού x_i αν η βέλτιστη τιμή του x_i είναι ανεξάρτητη των τιμών των υπολοίπων μεταβλητών σχεδιασμού. Η Φ ονομάζεται διαχωρίσιμη αν είναι διαχωρίσιμη ως προς όλες τις μεταβλητές σχεδιασμού.

Η επίδραση των παραπάνω χαρακτηριστικών στη συνάρτηση-στόχου f σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, όταν αυτό επιλύεται με ΕΑ, διερευνάται μέσω δύο προ-

4.1 Δυσκολίες λόγω Ιδιαιτερότητας της Συνάρτησης Κόστους



Σχήμα 4.1: Πρόβλημα βελτιστοποίησης με μη-ισότροπη συνεισφορά των μεταβλητών σχεδιασμού στην f (αριστερά). Πρόκειται για ισούψείς της f της σχέσης 4.1 για $N=2$. Η μεταβλητή x_2 συνεισφέρει σε μεγαλύτερο βαθμό στην f από ότι η x_1 . Από την άλλη πλευρά, η f είναι διαχωρίσιμη, άρα το πρόβλημα, ουσιαστικά δεν είναι «κακώς τοποθετημένο». Πρόβλημα βελτιστοποίησης με μη-ισότροπη συνεισφορά των μεταβλητών σχεδιασμού και μη-διαχωρίσιμες μεταβλητές σχεδιασμού ως προς την f (δεξιά). Πρόκειται για ισούψείς της f της σχέσης 4.2 για $N=2$. Η βέλτιστη τιμή της x_1 εξαρτάται πλέον από τη x_2 και αντιστρόφως. Άρα, το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι πλέον «κακώς τοποθετημένο», κάτι που θα φανεί ιδιαίτερα λύνοντας το για μεγάλες τιμές του N .

βλημάτων μαθηματικής βελτιστοποίησης επιλεγμένων ώστε να εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία. Σκοπός της διερεύνησης είναι ναδειχθεί ότι, αν το ίδιο πρόβλημα βελτιστοποίησης επαναδιατυπωθεί ως προς νέες μεταβλητές σχεδιασμού, ίδιου πλήθους, ως προς τις οποίες η υπόψη συνάρτηση κόστους είναι πλέον διαχωρίσιμη, ο ΕΑ εντοπίζει τη βέλτιστη λύση σε πολύ μικρότερο αριθμό αξιολογήσεων.

Το πρώτο πρόβλημα αφορά ελαχιστοποίηση ενός πολυδιάστατου ελλειψοειδούς (η 2Δ μορφή του παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1). Η διαχωρίσιμη μορφή του περιγράφεται από τη σχέση

$$\Phi = f(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N a^{\frac{i-1}{N-1}} x_i^2 \quad (4.1)$$

όπου a είναι, πρακτικά, ο αριθμός κατάστασης της συνάρτησης. Μεγάλες τιμές της ποσότητας a ($a \gg 1$) ενισχύουν τη μη-ισότροπη συνεισφορά των μεταβλητών σχεδιασμού στην f .

Εναλλακτικά, μια μη-διαχωρίσιμη μορφή του ίδιου προβλήματος μπορεί να διατυ-

4. ΕΑ και ΜΑΕΑ Υποβοηθούμενοι από Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών

πωθεί ως

$$\Phi = f(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N a^{\frac{i-1}{N-1}} y_i^2 \quad (4.2)$$

όπου $\vec{y} = B\vec{x}$ και B ένα $(N \times N)$ μητρώο στροφής. Η σύγκριση των σχέσεων 4.1 και 4.2 φαίνεται εποπτικά, για $N=2$, στο σχήμα 4.1. Ουσιαστικά, οι σχέσεις 4.1 και 4.2 αναφέρονται στο ίδιο πρόβλημα ελαχιστοποίησης, με τη μορφή 4.1 να πλεονεκτεί της 4.2 όταν η επίλυση γίνεται με ΕΑ ή ΜΑΕΑ.

Η δεύτερη περίπτωση μαθηματικής βελτιστοποίησης αφορά στην ελαχιστοποίηση της πολυτροπικής (με πολλά τοπικά ακρότατα) συνάρτησης

$$\Phi = f(\vec{x}) = 10N + \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2 - 10N \cos\left(\pi \sum_{i=1}^N x_i\right) \quad (4.3)$$

Η συνάρτηση 4.3 αποτελεί τη μη-διαχωρίσιμη εκδοχή του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η αντίστοιχη διαχωρίσιμη εκδοχή υπάρχει και προκύπτει, όμοια με την περίπτωση του ελλειψοειδούς, αν το \vec{x} αντικατασταθεί από το \vec{y} όπου $\vec{y} = B\vec{x}$ και B κατάλληλο μητρώο στροφής. Η συνάρτηση 4.3, έχοντας, στην πραγματικότητα, μόνο μια σημαντική κατεύθυνση στο χώρο σχεδιασμού ($\sum_{i=1}^N x_i$), ανήκει στην κατηγορία των συναρτήσεων με εξαιρετικά μη-ισότροπη συνεισφορά των μεταβλητών σχεδιασμού στην f (ως εάν $a = \infty$ στο προηγούμενο παράδειγμα).

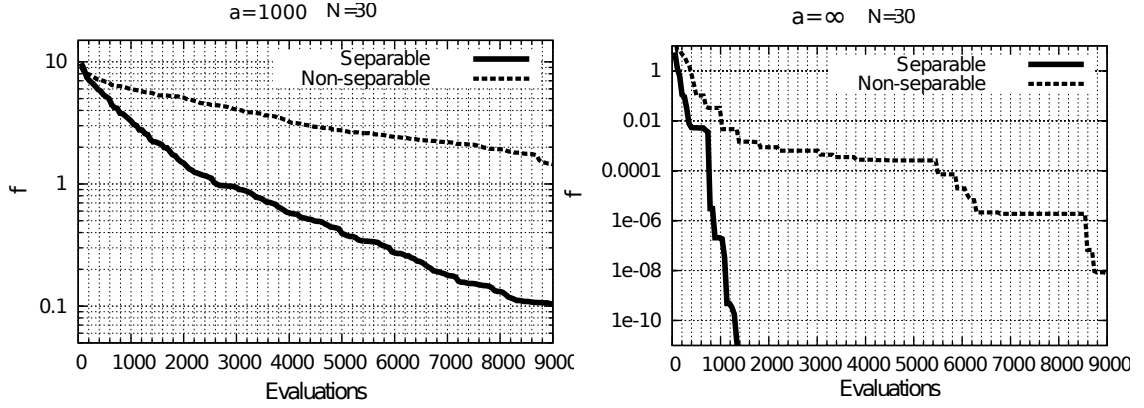
Συγκριτικές πορείες σύγκλισης μεταξύ διαχωρίσιμης και μη-διαχωρίσιμης εκδοχής του 30Δ ($N=30$) ελλειψοειδούς και της συνάρτησης 4.3 παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2. Οι πορείες σύγκλισης απεικονίζουν μέσες τιμές υπολογισμένες για 10 διαφορετικά τρεξίματα ΕΑ, με διαφορετική αρχικοποίηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Παρατηρείται ότι, και στις δύο περιπτώσεις η διαχωρίσιμη εκδοχή των προβλημάτων υπερτερεί σημαντικά σε ταχύτητα της μη-διαχωρίσιμης εκδοχής αυτών. Το κέρδος είναι σημαντικά μεγαλύτερο στην περίπτωση όπου $a = \infty$.

4.2 Η Προτεινόμενη ΑσΚΣ

Η προτεινόμενη μέθοδος κάνει χρήση της ΑσΚΣ για να υπολογίσει χρήσιμα τοπολογικά χαρακτηριστικά του συνόλου των επιλέκτων τα οποία και θεωρούνται αντιπροσωπευτικά των συσχετίσεων της f ως προς τις μεταβλητές σχεδιασμού. Πιο αναλυτικά, αφού το σύνολο των επιλέκτων μετατραπεί σε ένα τυποποιημένο σύνολο δεδομένων X , (7), δημιουργείται ο πίνακας συνδιακύμανσης $P_{N \times N}$ από τη σχέση

$$P_{N \times N} = \frac{1}{e} X X^T \quad (4.4)$$

4.3 Εξελικτικοί Τελεστές Υποβοηθούμενοι από ΑσΚΣ



Σχήμα 4.2: Πορείες σύγκλισης ΕΑ για το 30Δ ελλειψοειδές με αριθμό κατάστασης (με $a = 1000$) (αριστερά) και για την 30Δ συνάρτηση της σχέσης 4.3 (ως εάν $a = \infty$ στο προηγούμενο παράδειγμα) (δεξιά). Κάθε πρόβλημα λύνεται 10 φορές στη διαχωρίσιμη και άλλες 10 στη μη-διαχωρίσιμη εκδοχή του και σχεδιάζεται η μέση πορεία σύγκλισης κάθε εκδοχής.

όπου e το πλήθος των επιλέκτων P_e^g και X ο πίνακας που έχει ως γραμμές τα διανύσματα σχεδιασμού που συνθέτουν το P_e^g σε μορφή τυποποιημένου συνόλου δεδομένων.

Κάνοντας χρήση του φασματικού θεωρήματος αποσύνθεσης (spectral decomposition theorem), (7, 14), ο $P_{N \times N}$ μπορεί να γραφεί ως

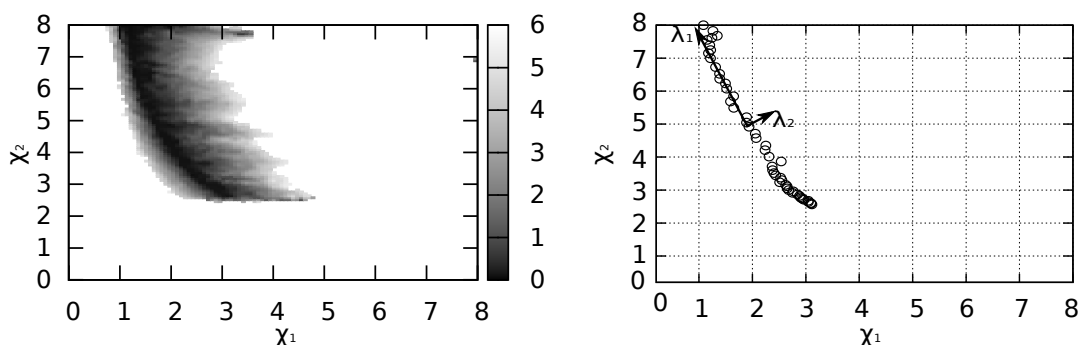
$$P_{N \times N} = U \Lambda U^T \quad (4.5)$$

όπου $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_N)$ το διαγώνιο μητρώο των ιδιοτιμών και U το $N \times N$ μητρώο των ιδιοδιανυσμάτων. Τα υπολογισθέντα ιδιοδιανύσματα (σχήμα 4.3) είναι οι κατευθύνσεις στο χώρο σχεδιασμού ως προς τις οποίες η f είναι, κατά το δυνατό, διαχωρίσιμη. Αν ο ΕΑ χειριζόταν αγνώστους αναδιατυπωμένους σε αυτές τις κατευθύνσεις, το πρόβλημα βελτιστοποίησης θα μετατρεπόταν σε «λιγότερο μη-διαχωρίσιμο» και, άρα, θα επιλυόταν με μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Αυτήν την ιδέα υλοποιεί η προτεινόμενη μέθοδος.

4.3 Εξελικτικοί Τελεστές Υποβοηθούμενοι από ΑσΚΣ

Με στόχο την επαναδιατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, χρησιμοποιώντας την πληροφορία που έδωσε ΑσΚΣ για την υπόψη f , η παρούσα διατριβή προτείνει την εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης (μετάλλαξης και διασταύρωσης), στο ευθυγραμμισμένο με τις νέες μεταβλητές σχεδιασμού που ανέδειξε η ΑσΚΣ.

4. ΕΑ και ΜΑΕΑ Υποβοηθούμενοι από Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών



Σχήμα 4.3: Κατανομή της f (ή της βαθμωτής Φ από λ.χ. τη διαδικασία SPEA2, για κάποια γενιά του ΕΑ, σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης) στο χώρο σχεδιασμού (αριστερά). Το σύνολο των επίλεκτων P_e^g , για τη δεδομένη γενιά, και οι νέες κατευθύνσεις, στον χώρο σχεδιασμού, λ_1 και λ_2 , που ανέδειξε η ΑσΚΣ (αριστερά).

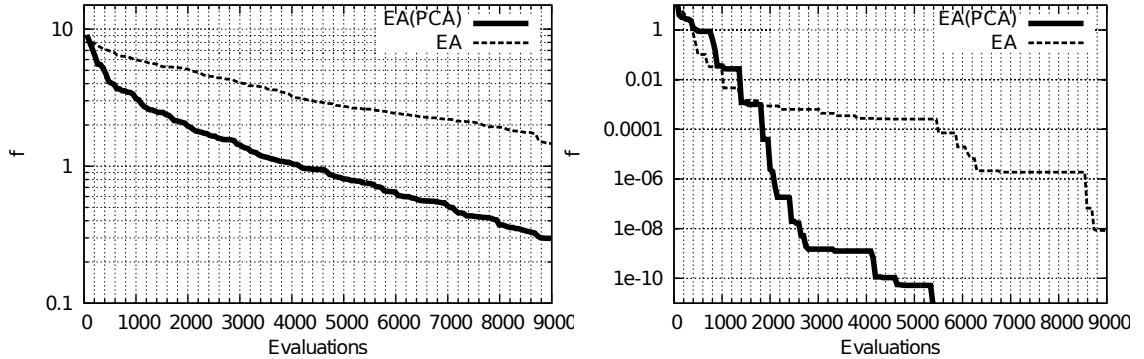
Με αυτήν την τακτική, η εξέλιξη λαμβάνει χώρα στο μετασχηματισμένο και κατά το δυνατό διαχωρίσιμο πρόβλημα βελτιστοποίησης, έχοντας σκοπό να ανακτήσει το (κατά το δυνατό) μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας της απόδοσης του ΕΑ (σχήμα 4.2), που προκαλεί το μη-διαχωρισμό της f . Πληροφορίες σχετικές με τις ΣΜΣ προσδιορίζονται μέσω της ΑσΚΣ, η οποία επαναλαμβάνεται κάθε φορά που ένα νέο άτομο προστίθεται στο σύνολο των επιλέκτων. Η αξιοπιστία των υπολογιζόμενων ΣΜΣ ενισχύεται όσο το σύνολο των επιλέκτων προσεγγίζει το πραγματικό μέτωπο Pareto.

4.3.1 Πιστοποίηση εξελικτικών τελεστών υποβοηθούμενων από ΑσΚΣ

Το κέρδος από τη χρήση των εξελικτικών τελεστών στις νέες μεταβλητές σχεδιασμού που ανέδειξε η ΑσΚΣ ποσοτικοποιείται στα προβλήματα μαθηματικής ελαχιστοποίησης του 30Δ ελλειψοειδούς (σχέση 4.1) και τις 30Δ πολυτροπικής συνάρτησης (σχέση 4.3).

Οι πορείες σύγκλισης των ΕΑ και ΕΑ(PCA) για τις δύο αυτές συναρτήσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 4.4. Οι καμπύλες αποτελούν, και πάλι, τις μέσες τιμές των πορειών σύγκλισης που υπολογίστηκαν τρέχοντας το ίδιο πρόβλημα 10 φορές, κάθε φορά με διαφορετική αρχικοποίηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Παρατηρείται ότι, και στα δύο προβλήματα, η χρήση των υποβοηθούμενων από την ΑσΚΣ τελεστών εξέλιξης υπερτερεί σημαντικά σε ταχύτητα και ανακτά ένα σημαντικό μέρος της μειωμένης απόδοσης των ΕΑ όταν αυτοί χρησιμοποιούνται για να λύσουν «κακώς τοποθετημένα» προβλήματα βελτιστοποίησης.

4.4 Μεταπρότυπα Υποβοηθούμενα από ΑσΚΣ



Σχήμα 4.4: Πορείες σύγκλισης για το 30Δ ελλειψοειδές με αριθμό κατάστασης ($a=1000$) (αριστερά) και την 30Δ συνάρτηση 4.3 (δεξιά). Η έντονη γραμμή παρουσιάζει την κατά πολύ βελτιωμένη σύγκλιση του EA στον οποίο οι εξελικτικοί τελεστές εφαρμόστηκαν στις εντοπιζόμενες από την ΑσΚΣ διαχωρίσιμες μεταβλητές σχεδιασμού.

4.4 Μεταπρότυπα Υποβοηθούμενα από ΑσΚΣ

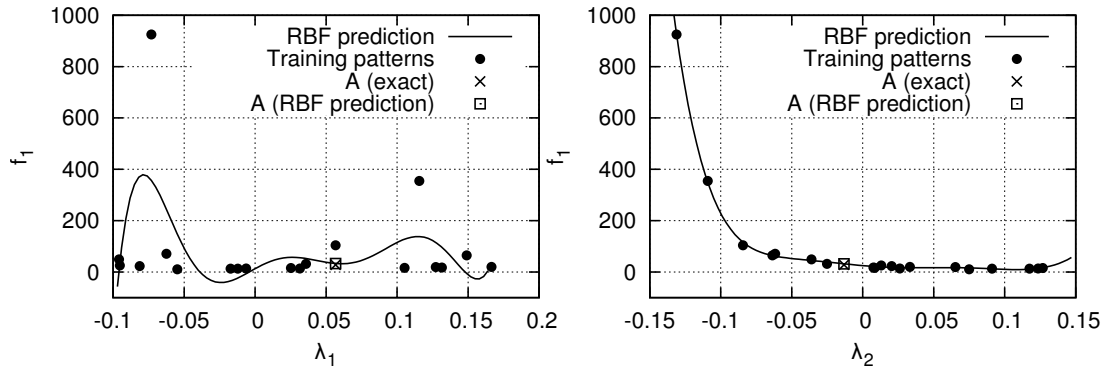
Η χρήση της ΑσΚΣ κατά τη διάρκεια εφαρμογής των τελεστών εξέλιξης δεν είναι η μόνη τεχνική που αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτική. Στην παρούσα διατριβή, προτείνεται επιπροσθέτως η χρήση των υπολογισθαισών, κατά την ΑσΚΣ, ιδιοτιμών ως μετρικών σημαντικότητας των κατευθύνσεων στο χώρο σχεδιασμού. Με τον τρόπο αυτό, η εκπαίδευση των μεταπρότυπων ενός ΜΑΕΑ πραγματοποιείται σε χώρο με αισθητά μειωμένη διάσταση. Τα μεταπρότυπα εκπαιδεύονται με μειωμένο αριθμό εισόδων, κρατώντας και χρησιμοποιώντας μόνο τις σημαντικότερες κατευθύνσεις στο χώρο σχεδιασμού που ανέδειξε η ΑσΚΣ και αποκόπτοντας τις λιγότερο σημαντικές. Η σημαντικότητα ορίζεται ως αντιστρόφως ανάλογη της ιδιοτιμής κάθε κατεύθυνσης στο χώρο σχεδιασμού.

Είναι εμφανές το πλεονέκτημα που επιφέρει η εκπαίδευση ενός μεταπρότυπου μόνο με τη συνιστώσα λ_2 (σχήμα 4.5 και 4.6), μιας και η κατά λ_1 συνιστώσα εισάγει ανεπιθύμητο θόρυβο και κάνει λιγότερο αξιόπιστη τη πρόβλεψη τόσο για την f_1 όσο και για την f_2 .

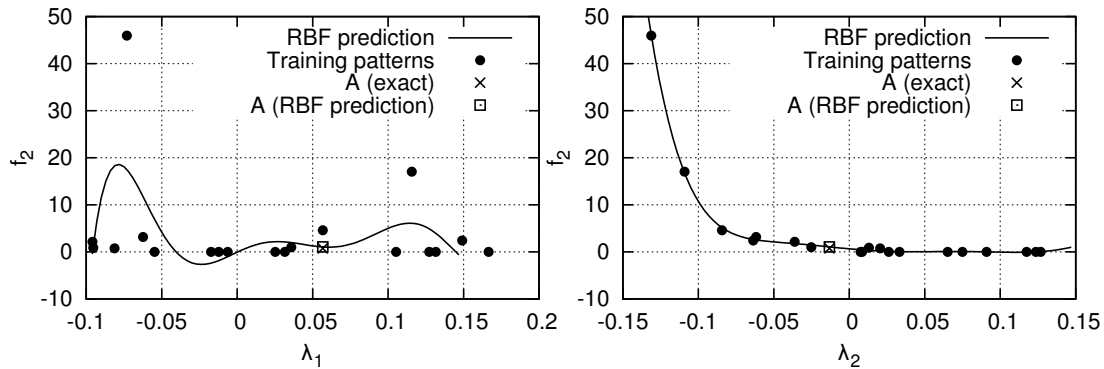
4.4.1 Πιστοποίηση του $M(PCA)AEA(PCA)$

Η συνδυασμένη χρήση της ΑσΚΣ για να τροποποιήσει τους τελεστές εξέλιξης αλλά και να βελτιώσει την αξιοπιστία των μεταπρότυπων, δηλαδή η τεχνική που συμβολίζεται ως $M(PCA)AEA(PCA)$, πιστοποιείται στα προβλήματα ελαχιστοποίησης του 30Δ ελλειψοειδούς (σχέση 4.1) και της 30Δ πολυτροπικής συνάρτησης (σχέση 4.3).

4. ΕΑ και ΜΑΕΑ Υποβοηθούμενοι από Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών

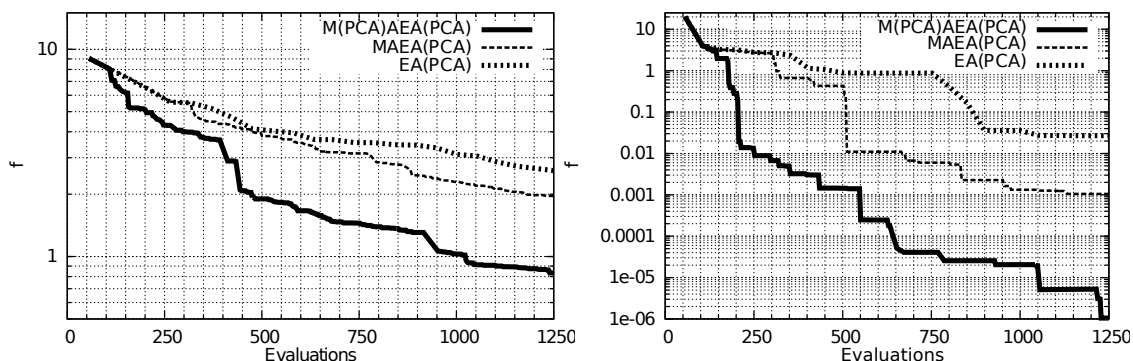


Σχήμα 4.5: Εκτιμήσεις της τιμής της f_1 αν οι λ_1 (αριστερά) και λ_2 (δεξιά) χρησιμοποιηθούν, ξεχωριστά, ως είσοδοι του δικτύου RBF.



Σχήμα 4.6: Εκτιμήσεις της τιμής της f_2 αν οι λ_1 (αριστερά) και λ_2 (δεξιά) χρησιμοποιηθούν, ξεχωριστά, ως είσοδοι του δικτύου RBF.

4.5 Εφαρμογή: Σχεδιασμός 2Δ Πτερύγωσης Συμπιεστή



Σχήμα 4.7: Μέσες καμπύλες σύγκλισης παραλλαγών των EA ή MAEA, που χρησιμοποιούν ΑσκΣ, για το 30Δ ελλειψοειδές με αριθμό κατάστασης $a = 1000$ (αριστερά), και για την 30Δ συνάρτηση της σχέσης 4.3 (δεξιά).

Οι πορείες σύγκλισης των EA(PCA), MAEA(PCA) και M(PCA)AEA(PCA) για τα δύο αυτά προβλήματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.7. Εκφράζουν και πάλι 10 τρεξίματα βελτιστοποίησης με διαφορετική αρχικοποίηση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών. Παρατηρείται ότι η επιπρόσθετη χρήση υποβοηθούμενων από ΑσκΣ μεταπροτύπων επιφέρει επιπλέον μείωση του υπολογιστικού κόστους και στις δύο περιπτώσεις.

4.5 Εφαρμογή: Σχεδιασμός 2Δ Πτερύγωσης Συμπιεστή

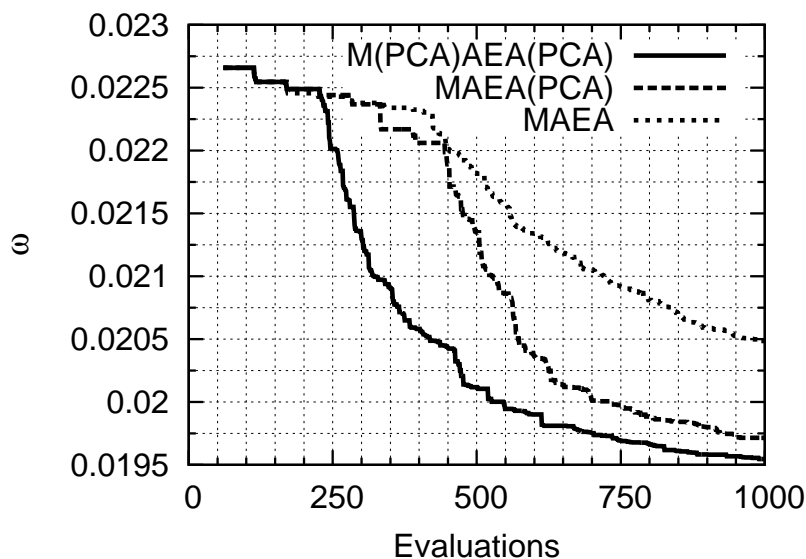
Οι προτεινόμενες σε αυτό το κεφάλαιο μέθοδοι πιστοποιούνται, επίσης, στο σχεδιασμό-βελτιστοποίηση της αεροτομής μιας 2Δ πτερύγωσης συμπιεστή. Η πτερύγωση λειτουργεί σε $M_1 = 0.54$, $a_1 = 44^\circ$ και $Re = 4 \times 10^5$ και στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συντελεστή των απωλειών ολικής πίεσης (ω), σχέση 3.5, υπό τους περιορισμούς ελάχιστου πάχους και ελάχιστης στροφής της ροής της ενότητας 3.2. Χρησιμοποιείται το ίδιο λογισμικό αξιολόγησης. Η παραμετροποίηση της αεροτομής ορίζει συνολικά 27 μεταβλητές σχεδιασμού.

Πραγματοποιήθηκαν δύο διαδικασίες βελτιστοποίησης, η πρώτη με τον προϋπάρχοντα MAEA και η δεύτερη κάνοντας συνδυασμένη χρήση των δύο μεθόδων που προτάθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, δηλαδή τη μέθοδο M(PCA)AEA(PCA).

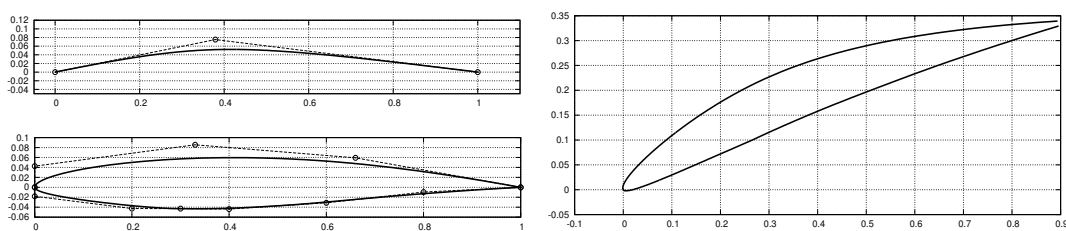
Οι πορείες σύγκλισης για τις δύο αυτές διαδικασίες παρουσιάζονται στο σχήμα 4.8, όπου είναι εμφανές το κέρδος που προκύπτει λόγω τόσο της ταχύτερης έναρξης της διαδικασίας ΠΠΑ όσο και της αποδοτικότερης εξέλιξης λόγω των προσαρμοσμένων τελεστών εξέλιξης. Περισσότερες πληροφορίες για τη ρύθμιση των παραμέτρων υπάρχουν στο πλήρες κείμενο της διατριβής.

4. ΕΑ και ΜΑΕΑ Υποβοηθούμενοι από Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών

Η βέλτιστη αεροτομή, όπως αυτή προέκυψε από το συνδυασμό των προτεινόμενων μεθόδων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9 και έχει απώλειες $\omega = 0.01803$ και στροφή της ροής $\Delta\alpha = 30^\circ$ ενώ, παράλληλα, ικανοποιεί και όλους τους γεωμετρικούς περιορισμούς.



Σχήμα 4.8: Σχεδιασμός 2Δ πτερύγωσης συμπίεστη: Μέσες πορείες σύγκλισης από 10 τρεξίματα των MAEA, MAEA(PCA) και M(PCA)AEA(PCA). Ως κριτήριο τερματισμού τέθηκαν οι 1000 κλήσεις του λογισμικού ΥΡΔ.



Σχήμα 4.9: Σχεδιασμός 2Δ πτερύγωσης συμπίεστη: Η βέλτιστη αεροτομή, η οποία σχεδιάστηκε από το M(PCA)AEA(PCA). Αριστερά: Η μέση γραμμή και οι κατανομές πάχους για τις πλευρές υπερπίεσης και υποπίεσης, μαζί με τα πολύγωνα ελέγχου των πολυνύμων NURBS που τις παράγουν. Δεξιά: Η βέλτιστη αεροτομή, τοποθετημένη στην επιθυμητή γωνία κλίσης της πτερύγωσης. Η αεροτομή ικανοποιεί όλους τους τεθέντες περιορισμούς.

Κεφάλαιο 5

Βελτιστοποίηση Υδροδυναμικών Στροβιλομηχανών

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει το κέρδος, σε μείωση υπολογιστικού κόστους, που επιτεύχθηκε από τη χρήση των προτεινόμενων σε αυτήν τη διατριβή μεθόδων σε προβλήματα βιομηχανικής κλίμακας και, ειδικότερα, στο σχεδιασμό υδροδυναμικών στροβιλομηχανών. Αναλυτικά θα παρουσιασθούν α) η χρήση KBD κατά το σχεδιασμό-βελτιστοποίηση ενός υδροστροβίλου τύπου Francis και β) η χρήση εξελικτικών τελεστών υποβοηθούμενων από ΑσΚΣ, δηλαδή της μεθόδου που συμβολίζεται με MAEA(PCA) κατά το σχεδιασμό-βελτιστοποίηση ενός υδροστροβίλου τύπου Hydromatrix®.

Η διαδικασία παραμετροποίησης και αξιολόγησης των υποψηφίων λύσεων (μέσω της αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων Euler) είναι όμοια και για τους δύο τύπους στροβιλομηχανών και παρουσιάζεται με λεπτομέρεια στο πλήρες κείμενο της διατριβής.

Όπως θα φανεί στη συνέχεια, είναι επιθυμητό η βελτιστοποίηση να επιδιώξει την ελαχιστοποίηση αρκετών διαφορετικών συναρτήσεων που εκφράζουν την ποιότητα των σχεδιαζόμενων στροβιλομηχανών ή των συνιστωσών τους και, μάλιστα, σε περισσότερα του ενός σημεία λειτουργίας. Παρότι υπάρχει η δυνατότητα το χρησιμοποιούμενο λογισμικό βελτιστοποίησης (EA ή MAEA) να αναζητήσει μέτωπα Pareto στον πολυδιάστατο χώρο, εν τούτοις, για πρακτικούς λόγους θα χρησιμοποιηθούν ως συναρτήσεις κόστους κατάλληλοι συγκερασμοί των προαναφερθεισών ποσοτήτων στα διάφορα σημεία λειτουργίας. Έτσι, οι ποσότητες που μετρούν ποιότητα, ως προς διάφορα χαρακτηριστικά, θα αναφέρονται ως «μετρικές ποιότητας» (quality metrics) και δεσμεύεται η χρήση του όρου «συνάρτηση κόστους» για τις συναρτήσεις που ελαχιστοποιούνται από τον EA ή τον MAEA ή κάθε παραλλαγή τους. Οι τέσσερις μετρικές ποιότητας που χρησιμοποιούνται για να ποσοτικοποιήσουν την ποιότητα κάθε υποψήφιας λύσης είναι:

5. Βελτιστοποίηση Υδροδυναμικών Στροβιλομηχανών

- σ : Μετρική σπηλαίωσης η οποία εκφράζει την «απόσταση» από την κατάσταση εμφάνισης του φαινομένου της σπηλαίωσης.
- M_1 : Μετρική καλής συνεργασίας με τον αγωγό απαγωγής, η οποία εκφράζει την απόκλιση της κατανομής της περιφερειακής C_u και μεσημβρινής C_m συνιστώσας της ταχύτητας στην είσοδο του αγωγού απαγωγής από κατανομές-στόχους που θέτει ο σχεδιαστής. Επιδιώκεται, προφανώς, η ελαχιστοποίηση των παραπάνω αποκλίσεων.
- M_2 : Μετρική ομοιόμορφης φόρτισης του πτερυγίου, μέσω της οποίας επιδιώκεται η, κατά το δυνατό, ομοιομορφία της φόρτισης του πτερυγίου κατά την κατεύθυνση της χορδής.
- M_3 : Μετρική επιφάνειας άντλησης. Στην περίπτωση μη-ρυθμιζόμενων υδροδυναμικών μηχανών, όπως ο Hydromatrix®, δημιουργούνται περιοχές του πτερυγίου της κινητής περύγωσης όπου η πλευρά υπερπίεσης έχει χαμηλότερη πίεση από την πλευρά υποπίεσης. Το φαινόμενο εμφανίζεται συνήθως κατά τη λειτουργία σε μερικό φορτίο και είναι επιθυμητό η έκταση του να ελαχιστοποιηθεί.

5.1 Βελτιστοποίηση Υδροστροβίλου *Francis*

Η ενότητα αυτή αναφέρεται στο σχεδιασμό-βελτιστοποίηση του δρομέα ενός υδροστροβίλου *Francis*, κάνοντας χρήση της τεχνικής KBD. Ο σχεδιασμός συμπεριλαμβάνει, για λόγους στιβαρότητας κατά τη λειτουργία, τρία σημεία λειτουργίας: τα σημεία μερικού (ΜΦ) και πλήρους φορτίου (ΠΦ) και το σημείο μέγιστης απόδοσης (ΜΑ). Στο πρόβλημα εμπλέκονται δύο συναρτήσεις-στόχοι ανά σημείο λειτουργίας, οριζόμενες μέσω των μετρικών M_1 και M_2 , ως εξής

$$f_1^i = M_1^i \quad \& \quad f_2^i = M_2^i \quad (5.1)$$

όπου ο άνω δείκτης $i = 1, 2, 3$ χαρακτηρίζει το σημείο λειτουργίας.

Οι προαναφερθέντες $2 \times 3 = 6$ συναρτήσεις-στόχοι ομαδοποιούνται σε 2 συναρτήσεις κόστους με τη σχέση

$$f_1 = \sum_{i=1}^3 w_i f_1^i \quad \& \quad f_2 = \sum_{i=1}^3 w_i f_2^i \quad (5.2)$$

όπου w_i καθοριζόμενος συντελεστής βάρους ανά σημείο λειτουργίας (πίνακας 5.1).

5.1 Βελτιστοποίηση Υδροστροβίλου *Francis*

Σημείο Λειτουργίας	Βάρος (w_i)
Μέγιστης Απόδοσης (ΜΑ), $i = 1$	1.0
Μερικού Φορτίου (ΜΦ), $i = 2$	0.3
Πλήρους Φορτίου (ΠΦ), $i = 3$	0.3

Πίνακας 5.1: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Francis*: Συντελεστές Βαρύτητας ανά σημείο λειτουργίας.

Ο υδροστροβίλος *Francis* έχει ρυθμιζόμενα οδηγία περίγυα άρα η μετρική της επιφάνειας άντλησης (M_3) δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί. Έτσι όπως διατυπώθηκε το πρόβλημα, η μετρική που αφορά στη σπηλαίωση (σ) αλλά και το επιθυμητό υδραυλικό ύψος (H) χρησιμοποιήθηκαν ως περιορισμοί (πίνακας 5.2).

Σημείο Λειτουργίας	$\sigma_i^{Hist} < \sigma$	Υδραυλικό ύψος
ΜΑ	$\sigma_i^{Hist} < 0.2$	$ \Delta H < 1.5\%$
ΜΦ	$\sigma_i^{Hist} < 0.2$	$ \Delta H < 5\%$
ΠΦ	$\sigma_i^{Hist} < 0.2$	$ \Delta H < 5\%$

Πίνακας 5.2: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Francis*: Τεθέντες περιορισμοί, σχετικοί με τη σπηλαίωση (στη μορφή της μετρικής σ , ορισμός του σ_i^{Hist} υπάρχει στο πλήρες κείμενο της διατριβής) και το υδραυλικό ύψος H , στα τρία σημεία λειτουργίας. Η ποσότητα $|\Delta H|$ εκφράζει την απόλυτη τιμή της διαφοράς του ύψους H από την επιθυμητή τιμή αυτού στο κάθε σημείο λειτουργίας. Με τις χρησιμοποιούμενες οριακές συνθήκες, η ανάλυση της ροής στο δρομέα με λογισμικό ΥΡΔ έχει ως εξαγόμενο το υδραυλικό ύψος H το οποίο, σε κάθε σημείο λειτουργίας, οφείλει να έχει δεδομένη τιμή, με επιθυμητή ανοχή $|\Delta H|$.

Η γεωμετρία του προς βελτιστοποίηση δρομέα παραμετροποιείται με 336 μεταβλητές σχεδιασμού, όπως αυτές παρουσιάζονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο του πλήρους κειμένου της διατριβής.

5.1.1 Αρχιεοθετημένοι Σχεδιασμοί Βάσης

Για την υποστήριξη της διαδικασίας σχεδιασμού-βελτιστοποίησης με τη μέθοδο *KBD*, εντοπίστηκαν τρεις ($m = 3$) αρχιεοθετημένοι σχεδιασμοί, οι οποίοι σχεδιάστηκαν στο παρελθόν για «κοντινά», σε σχέση με το επιθυμητό, σημεία λειτουργίας. Αυτοί οι σχεδιασμοί χρησιμοποιούνται ως σχεδιασμοί βάσης κατά την εφαρμογή της μεθόδου *KBD*. Οι επιδόσεις των σχεδιασμών βάσης στα επιθυμητά σημεία λειτουργίας παρουσιάζονται στον πίνακα 5.3.

5. Βελτιστοποίηση Υδροδυναμικών Στροβιλομηχανών

Σχεδιασμός Βάσης	ΣΛ	M_1	M_2	σ_i^{Hist}	$ \Delta H $
B1	ΜΑ	0.472	0.538	$0.21 > 0.2$ *	$5\% > 1.5\%$ *
B1	ΜΦ	0.552	0.824	$0.23 > 0.2$ *	$3.6\% < 5\%$
B1	ΠΦ	0.408	0.594	$0.2 = 0.2$	$5.7\% > 5\%$ *
B2	ΜΑ	0.563	0.922	$0.22 > 0.2$ *	$3.8\% > 1.5\%$ *
B2	ΜΦ	0.534	0.888	$0.24 > 0.2$ *	$2.6\% < 5\%$
B2	ΠΦ	0.522	1.178	$0.22 > 0.2$ *	$4.8\% < 5\%$
B3	ΜΑ	0.402	0.663	$0.19 < 0.2$	$6.8\% > 1.5\%$ *
B3	ΜΦ	0.515	0.808	$0.21 > 0.2$ *	$6.9\% > 5\%$ *
B3	ΠΦ	0.257	0.896	$0.18 < 0.2$	$7.1\% > 5\%$ *

Πίνακας 5.3: Βελτιστοποίηση Υδροστροβίλου *Francis*: Οι μετρικές ποιότητας (M_1 και M_2) που σχηματίζουν τους στόχους και οι περιορισμοί (σ και $|\Delta H|$) για τους σχεδιασμούς βάσης ($B1$, $B2$ και $B3$) για τα επιθυμητά σημεία λειτουργίας. Ο αστερίσκος (*) στους περιορισμούς υποδηλώνει ότι ο υπόψη σχεδιασμός βάσης παραβιάζει τον αντίστοιχο περιορισμό.

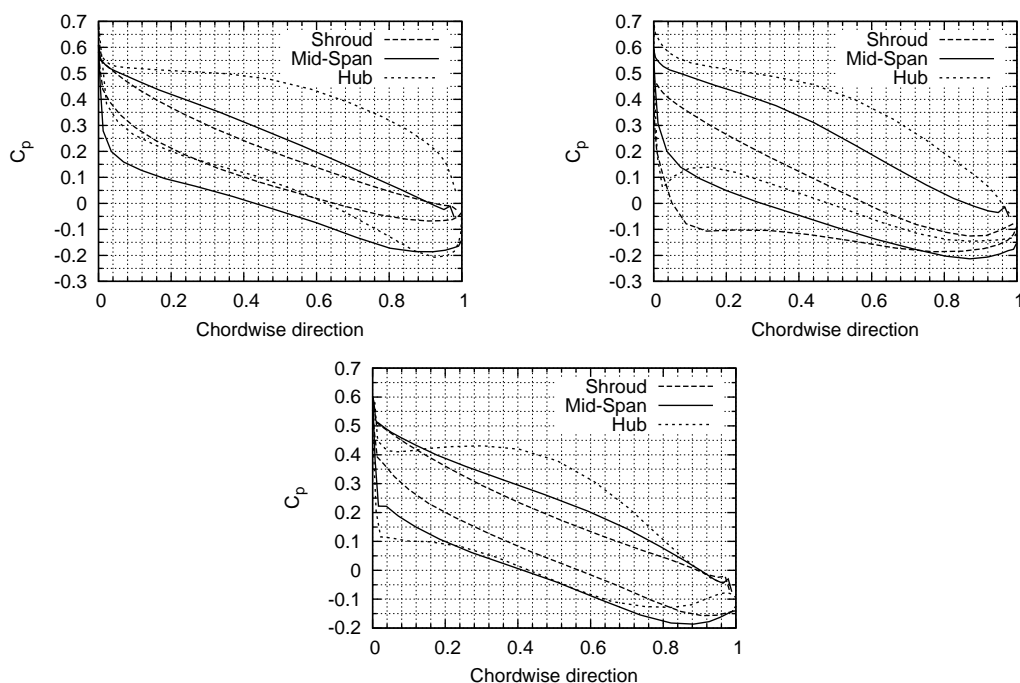
Η ποιότητα των σχεδιασμών βάσης, όταν αυτοί χρησιμοποιηθούν στα επιθυμητά σημεία, είναι αρκετά κακή όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3. Αυτό γίνεται ακόμη πιο εμφανές από τα σχήματα 5.1, όπου φαίνεται η ανομοιομορφία φόρτισης των πτερυγίων του δρομέα, και 5.2, όπου φαίνεται η μεγάλη απόκλιση από τις κατανομές-στόχους της περιφερειακής και μεσημβρινής ταχύτητας στην έξοδο, άρα και η κακή συνεργασία που θα είχαν με τον αγωγό απαγωγής.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου *KBD*, οι μεταβλητές σχεδιασμού ομαδοποιούνται σε 6 ομάδες και, μαζί με τη μεταβλητή προεκβολής Ψ , δημιουργούν τις 19 ($= 3 \times 6 + 1$) μεταβλητές βελτιστοποίησης. Η λεπτομερής ομαδοποίηση περιγράφεται στο πλήρες κείμενο της διατριβής. Είναι, εκ των πραγμάτων, συγκριτικά πλεονεκτικότερη η χρήση ΕΑ (ή ΜΑΕΑ) για την αναζήτηση του βέλτιστου συνόλου των 19, αντί των 336 (της κανονικής παραμετροποίησης), μεταβλητών.

5.1.2 Αποτελέσματα - Συγκρίσεις

Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση ενός ΕΑ και ενός ΜΑΕΑ(*KBD*). Ο ρυθμός σύγκλισης των συναρτήσεων κόστους, σε κάθε περίπτωση παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3, όπου σχεδιάζεται ο δείκτης υπερόγκου (hypervolume indicator, (52)). Στο συμβατικό ΕΑ ήταν ιδιαίτερα αναποτελεσματική η χρήση μεταπροτύπων με αποδοτικό τρόπο λόγω του μεγάλου αριθμού μεταβλητών σχεδιασμού (336), όπως άλλωστε παρατηρήθηκε και κατά την εφαρμογή της ενότητας 3.2. Αντίθετα, κάνοντας χρήση της μεθόδου *KBD* γίνεται ξανά δυνατή η χρήση μετα-

5.1 Βελτιστοποίηση Υδροστροβίλου *Francis*



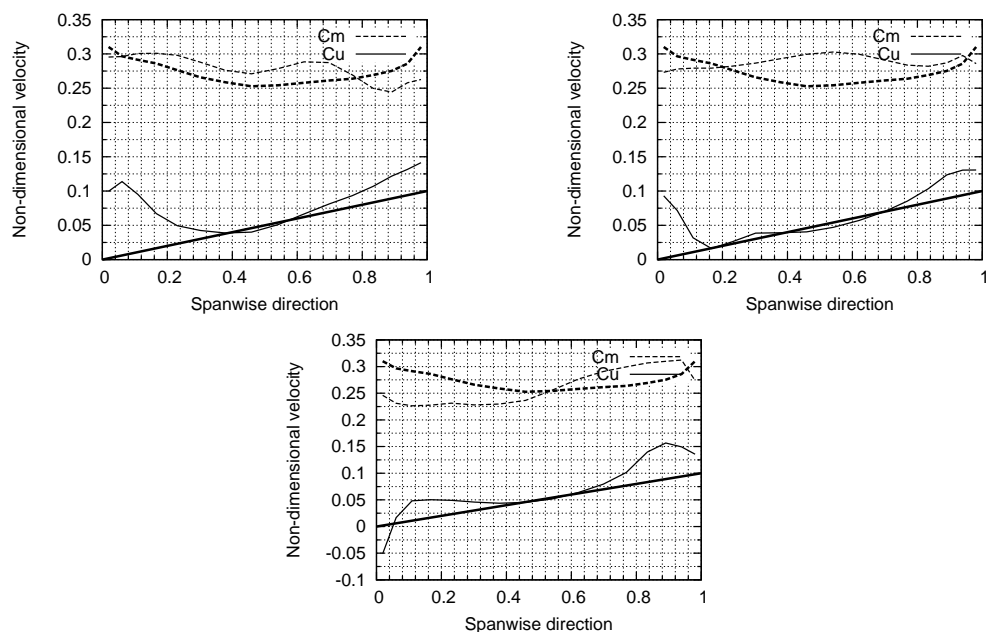
Σχήμα 5.1: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Francis*: Κατανομές του συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος της χορδής για τρεις χαρακτηριστικές καθ' ύψος θέσεις στο πλήμνη, (hub), μέσο ύψος (mid-span) και στεφάνη (shroud) για τους σχεδιασμούς βάσης, B1 (πάνω-αριστερά), B2 (πάνω-δεξιά) και B3 (κάτω).

προτύπων μέσω της τεχνικής ΠΠΑ, η οποία ξεκινά όταν στη βάση δεδομένων του MAEA αποθηκευθούν 150 (μη-τιμωρημένα με «ποινή θανάτου») άτομα. Η ρύθμιση των παραμέτρων των δύο EA παρουσιάζεται στο πλήρες κείμενο της διατριβής. Και στις δύο διαδικασίες βελτιστοποίησης, οι 3 σχεδιασμοί βάσης επιβάλλονται ως μέλη του πληθυσμού της πρώτης γενιάς του EA.

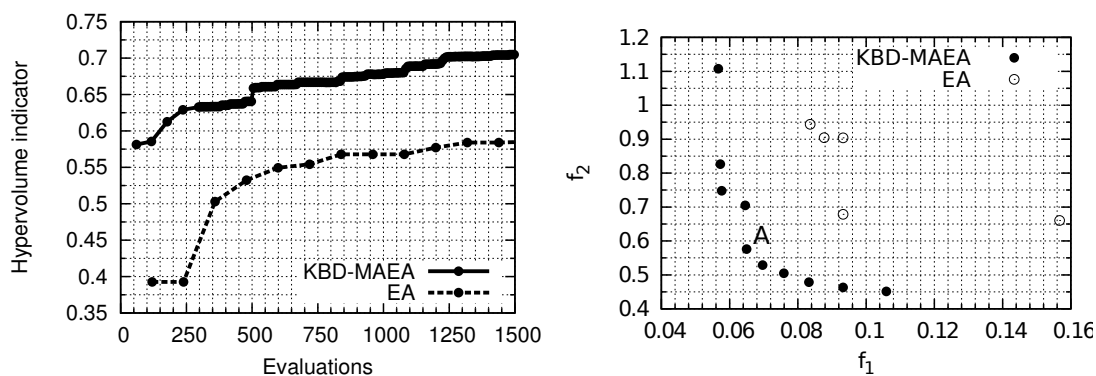
Είναι εμφανές (σχήμα 5.3, αριστερά) ότι η προτεινόμενη μέθοδος, MAEA(KBD): α) εκκινεί από υψηλότερη τιμή του δείκτη υπερόγκου κάτι που υποδηλώνει ότι ο τρόπος καθορισμού σημαντικότητας στις περιοχές του χώρου σχεδιασμού είναι πολύ κοντά στη φυσική του προβλήματος και β) συνεχίζει με συνεχώς καλύτερες τιμές για όλη τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Η ανωτερότητα της μεθόδου KBD γίνεται ακόμη περισσότερο εμφανής παρατηρώντας τα τελικά μέτωπα των μη-κυριαρχούμενων λύσεων τα οποία αντιστοιχούν στο ίδιο υπολογιστικό κόστος (1500 αξιολογήσεις) (σχήμα 5.3, δεξιά). Τέλος, από το μέτωπο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων που προέκυψε από το MAEA(KBD), επιλέγεται το άτομο A το οποίο και αναλύεται περαιτέρω στη συνέχεια (σχήμα 5.4).

Οι κατανομές του συντελεστή πίεσης C_p σχεδιασμένες στις επιφάνειες του δρομέα του σχεδιασμού A, στα τρία σημεία λειτουργίας, παρουσιάζονται στο σχήμα

5. Βελτιστοποίηση Υδροδυναμικών Στροβιλομηχανών



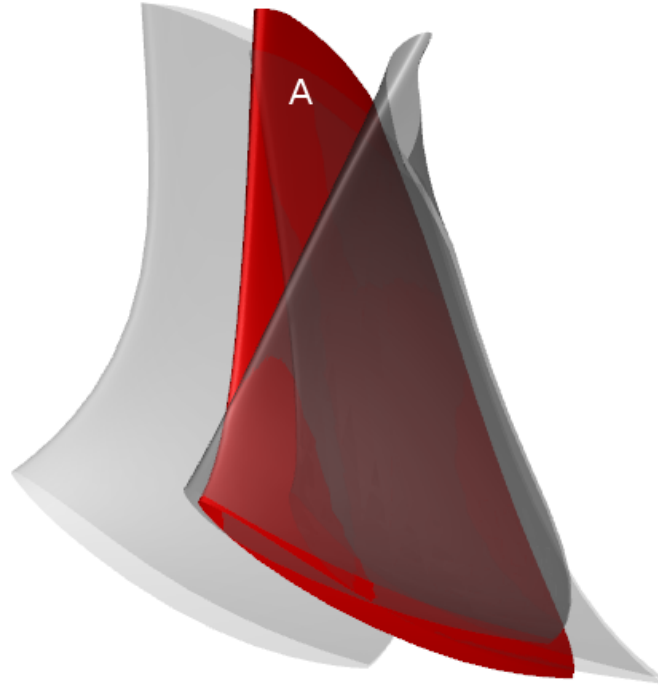
Σχήμα 5.2: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Francis*: Κατανομές περιφερειακής (C_u) και μεσημβρινής (C_m) συνιστώσας της ταχύτητας εξόδου για τους σχεδιασμούς βάσης, B1 (πάνω-αριστερά), B2 (πάνω-δεξιά) και B3 (κάτω) σε αντιπαραβολή με τις αντίστοιχες κατανομές-στόχους που καθορίστηκαν από το σχεδιαστή.



Σχήμα 5.3: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Francis*: Σύγκριση πορείας του δείκτη υπερόγκου για τη δικριτηριακή βελτιστοποίηση με EA και MAEA(KBD) (αριστερά). Μέτωπα μη-κυριαρχούμενων λύσεων (για $M=2$) για τους EA και MAEA(KBD) που υπολογίστηκαν έχοντας ως κριτήριο τερματισμού τις 1500 αξιολογήσεις με το λογισμικό ΥΡΔ (δεξιά).

5.5. Επιπλέον, για το σημείο MA, παρουσιάζονται και αναλυτικά οι κατανομές C_p (σχήμα 5.6, αριστερά) σχεδιασμένες στο πλήρη, (hub), στο μέσο ύψος (mid-span) και στην στεφάνη (shroud) της πτερύγωσης. Είναι εμφανής η ποιότητα του σχεδια-

5.1 Βελτιστοποίηση Υδροστροβίλου *Francis*



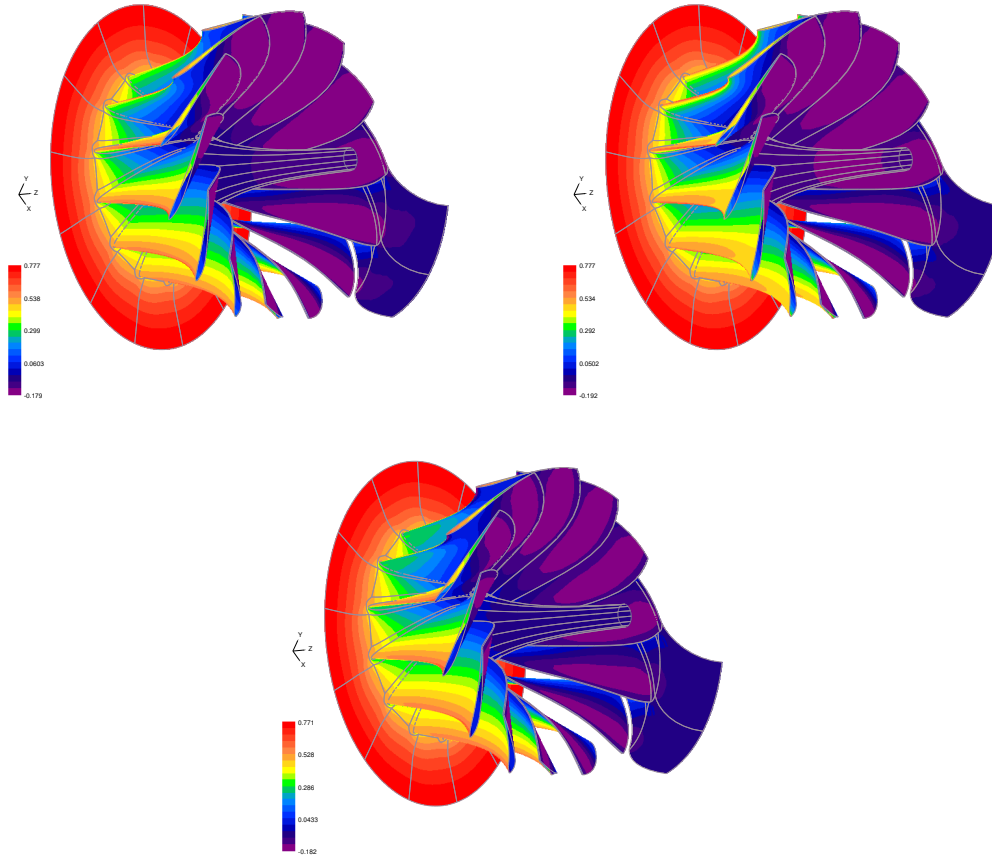
Σχήμα 5.4: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Francis*: Το πτερύγιο του δρομέα του επιλεγμένου σχεδιασμού A και οι τρεις σχεδιασμοί βάσης που χρησιμοποιήθηκαν.

Σχεδιασμός	ΣΛ	M_1	M_2	σ_i^{Hist}	$ \Delta H $
A	ΜΑ	0.001	0.302	$0.18 < 0.2$	$1.1\% < 1.5\%$
A	ΜΦ	0.086	0.409	$0.19 < 0.2$	$1.5\% < 5\%$
A	ΠΦ	0.092	0.504	$0.18 < 0.2$	$4.1\% < 5\%$

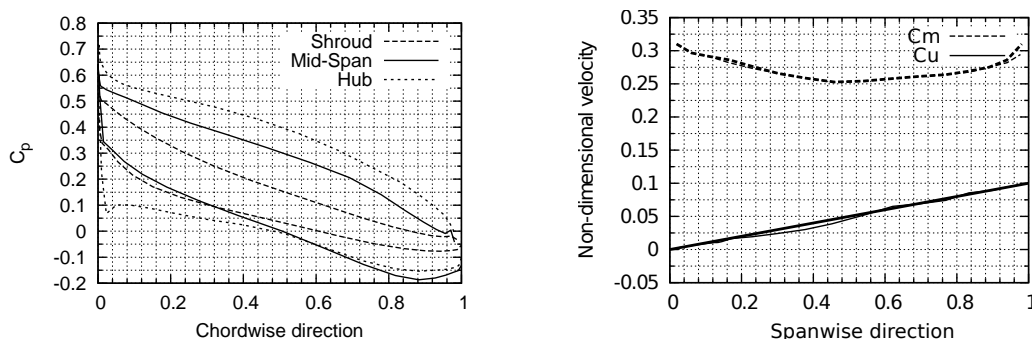
Πίνακας 5.4: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Francis*: Οι μετρικές ποιότητας (M_1 και M_2) που σχηματίζουν τους στόχους και οι περιορισμοί (σ και $|\Delta H|$) για το σχεδιασμό A για τα τρία υπόψη σημεία λειτουργίας (ΜΑ, ΜΦ και ΠΦ). Ο σχεδιασμός A ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς.

σμού τόσο όσον αφορά στην ισοκατανεμημένη φόρτιση όσο και στην ασφάλεια από σπηλαιώση. Ακόμη, παρουσιάζονται κατανομές C_u και C_m στην έξοδο (σχήμα 5.6, δεξιά) μαζί με τις κατανομές-στόχους.

5. Βελτιστοποίηση Υδροδυναμικών Στροβιλομηχανών



Σχήμα 5.5: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Francis*: Κατανομές C_p στο δρομέα του σχεδιασμού A στα τρία σημεία λειτουργίας: MA (πάνω-αριστερά), ΜΦ (πάνω-δεξιά) και ΠΦ (κάτω).



Σχήμα 5.6: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Francis*: Κατανομές C_p για το δρομέα του σχεδιασμού A στο σημείο MA (αριστερά). Κατανομές των συνιστωσών της ταχύτητας εξόδου C_u και C_m για το σχεδιασμό A στο σημείο MA (δεξιά).

5.2 Βελτιστοποίηση Υδροστροβίλου *Hydromatrix®*

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει το σχεδιασμό-βελτιστοποίηση ενός υδροστροβίλου *Hydromatrix®* κάνοντας χρήση ΕΑ με τους υποβοηθούμενους από ΑσκΣ εξελικτικούς τελεστές, δηλαδή της μεθόδου που αναφέρεται ως ΜΑΕΑ(PCA). Ο σχεδιασμός γίνεται σε τρία σημεία λειτουργίας: το σημείο μέγιστης απόδοσης (ΜΑ) και τα σημεία πλήρους (ΠΦ) και μερικού (ΜΦ) φορτίου. Ο συνδυασμός των μετρικών ποιότητας σε δύο στόχους ανά σημείο λειτουργίας γίνεται με άθροισμα μέσω συντελεστών βαρύτητας (πίνακας 5.5), ως

$$f_1^i = \alpha^i M_1^i \quad , \quad f_2^i = \beta^i M_2^i + \gamma^i \sigma_i^{Hist} + \delta^i M_3^i \quad (5.3)$$

όπου ο άνω δείκτης $i = 1, 2, 3$ αναφέρεται στο σημείο λειτουργίας.

	ΜΑ, $i=1$	ΜΦ, $i=2$	ΠΦ, $i=3$	Στόχος
$\alpha (M_1)$	1.0	0.0	0.0	f_1
$\beta (M_2)$	0.2	0.0	0.0	f_2
$\gamma (\sigma_i^{Hist})$	1.0	1.0	1.0	f_2
$\delta (M_3)$	0.0	100.0	100.0	f_2

Πίνακας 5.5: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Hydromatrix®*: Συντελεστές βαρύτητας κατά την ομαδοποίηση των μετρικών σε δύο στόχους ανά σημείο λειτουργίας.

Ο συνδυασμός των συναρτήσεων-στόχων f_1^i και f_2^i για όλα τα σημεία λειτουργίας σε δύο, τελικά, συναρτήσεις-κόστους ($M=2$) γίνεται μέσω των συντελεστών βαρύτητας w_i του πίνακα 5.6 ως

$$f_1 = \sum_{i=1}^3 w_i f_1^i \quad , \quad f_2 = \sum_{i=1}^3 w_i f_2^i \quad (5.4)$$

Σημείο λειτουργίας	w_i
Μέγιστης Απόδοσης (ΜΑ), $i=1$	1.0
Μερικού Φορτίου (ΜΦ), $i=2$	0.1
Πλήρους Φορτίου (ΠΦ), $i=3$	0.1

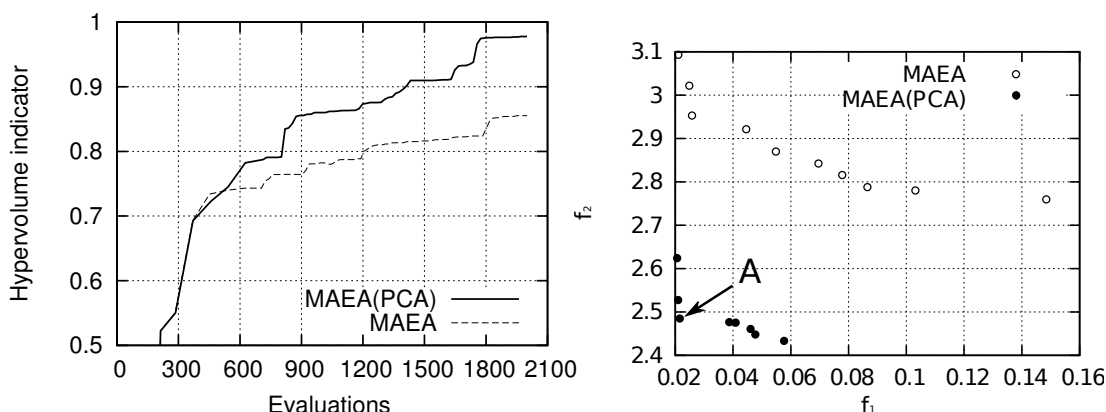
Πίνακας 5.6: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Hydromatrix®*: Συντελεστές βαρύτητας w_i ανά σημείο λειτουργίας.

5. Βελτιστοποίηση Υδροδυναμικών Στροβιλομηχανών

Στο παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης η μετρική που αφορά στη σπηλαίωση αναβαθμίζεται από περιορισμό σε μια από τις συνιστώσες της f_2 . Επίσης, ο περιορισμός που αφορά στη λειτουργία στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας δεν υφίσταται για το σημείο MA αφού, για κάθε υποψήφια λύση, πραγματοποιείται μια δεύτερη εσωτερική διαδικασία βελτιστοποίησης η οποία ρυθμίζει τη γωνία μετάλλου στην έξοδο της σταθερής πτερύγωσης ούτως ώστε ο σχεδιασμός να λειτουργεί στο επιθυμητό σημείο. Παρόλα αυτά, παραμένει απαραίτητη η χρήση του σχετικού περιορισμού που αφορά στη λειτουργία στα υπόλοιπα δύο σημεία λειτουργίας. Συγκεκριμένα, ο περιορισμός αυτός αφορά στην επιθυμητή παροχή όγκου, επιτρέποντας ποσοστιαία απόκλιση της παροχής όγκου ρευστού $|\Delta Q| < 5\%$, κατ' αντιστοιχία με τους περιορισμούς $|\Delta H|$ της προηγούμενης ενότητας. Σημειώνεται ότι η ανάλυση της ροής στο δρομέα με λογισμικό ΥΡΔ έχει, σύμφωνα με τις επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες, ως δεδομένο το ύψος H και ως εξαγόμενο την παροχή Q .

5.2.1 Αποτελέσματα - Συγκρίσεις

Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση ενός MAEA και ενός MAEA(PCA). Οι πορείες σύγκλισης των δύο παρουσιάζονται στο σχήμα 5.7 χρησιμοποιώντας το δείκτη υπερόγκου, (52), ως κριτήριο σύγκρισης. Η ακριβής ρύθμιση των παραμέτρων των δύο δικριτηριακών MAEA που δοκιμάστηκαν παρουσιάζεται στο πλήρες κείμενο της διατριβής.



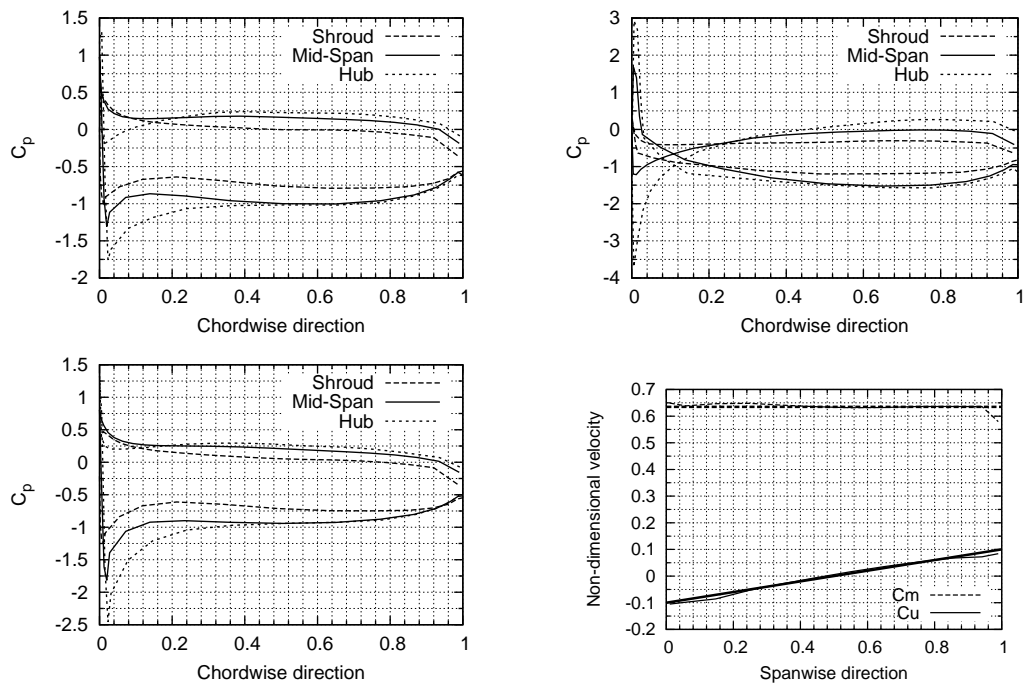
Σχήμα 5.7: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Hydromatrix*®: Σύγκριση της πορείας του δείκτη υπερόγκου για τους δικριτηριακούς MAEA και MAEA(PCA) (αριστερά). Μέτωπα μη-κυριαρχούμενων λύσεων για τις δύο μεθόδους που δοκιμάστηκαν επιβάλλοντας τερματισμό τους στις 2000 αξιολογήσεις με το λογισμικό ΥΡΔ (δεξιά).

Το κέρδος από τη χρήση των προτεινόμενων τελεστών εξέλιξης υποβοηθούμενων από την ΑσκΣ παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7. Επίσης, παρουσιάζονται τα μέτωπα των μη-κυριαρχούμενων λύσεων που υπολογίστηκαν από τις δύο μεθόδους για το

5.2 Βελτιστοποίηση Υδροστροβίλου *Hydromatrix*®

ίδιο υπολογιστικό κόστος (2000 αξιολογήσεις με το λογισμικό ΥΡΔ). Τέλος, από τα μέλη του μετώπου Pareto επιλέγεται ο σχεδιασμός Α και αναλύεται λεπτομερώς.

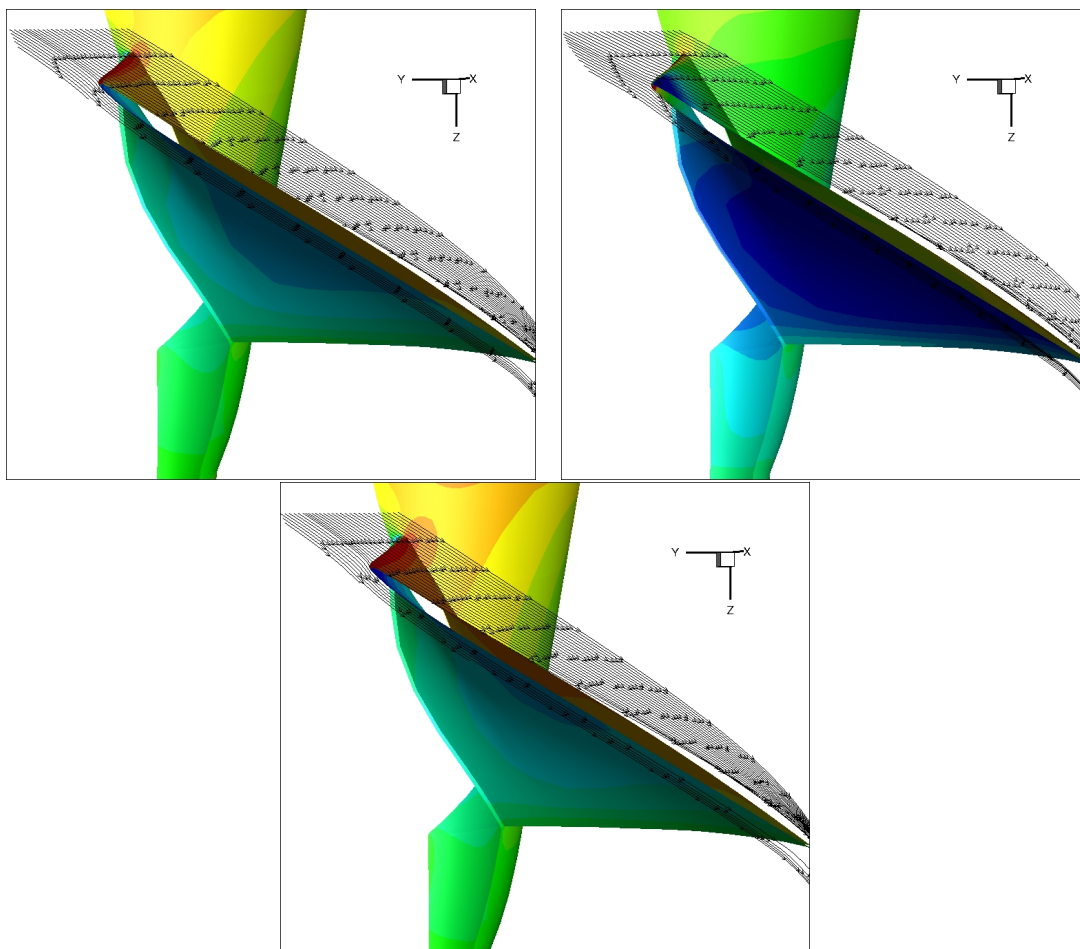
Η ποιότητα του σχεδιασμού Α, όσον αφορά στην ποιότητα της φόρτισης και στη συνεργασιμότητα με τον αγωγό απαγωγής, παρουσιάζεται στο σχήμα 5.8 όπου απεικονίζονται τόσο οι κατανομές C_p για τα τρία σημεία λειτουργίας που ενδιαφέρουν όσο και οι κατανομές των ταχυτήτων εξόδου C_u και C_m . Στο ίδιο σχήμα εμπεριέχεται και πληροφορία για τη σπηλαίωση (λαμβάνεται από την ελάχιστη τιμή του C_p για κάθε σημείο λειτουργίας) όπως, επίσης, και για την επιφάνεια άντλησης (διασταυρούμενες κατανομές C_p στο σημείο ΜΦ).



Σχήμα 5.8: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Hydromatrix*®: Κατανομές συντελεστή πίεσης (C_p) κατά μήκος της χορδής για το σχεδιασμό Α στα τρία σημεία λειτουργίας, ΜΑ (πάνω-αριστερά), ΜΦ (πάνω-δεξιά) και ΠΦ (κάτω-αριστερά). Κατανομές C_u και C_m για το σημείο ΜΑ, στην έξοδο του δρομέα, μαζί με τις χρησιμοποιηθείσες κατανομές-στόχους (κάτω-δεξιά).

Η εμφάνιση επιφάνειας άντλησης γίνεται καλύτερα αντιληπτή στο σχήμα 5.9. Οι γραμμές ροής κοντά στο κέλυφος στεφάνης (shroud) του δρομέα για το σημείο ΜΦ υποδηλώνουν ότι η ροή «συναντά» το πτερύγιο του δρομέα στην πλευρά υποπίεσης δημιουργώντας έτσι μία περιοχή υψηλότερων πιέσεων από τις αντίστοιχες στην πλευρά υπερπίεσης. Αυτή η ανεπιθύμητη συμπεριφορά δεν μπορεί να αποφευχθεί εντελώς λόγω της φύσης του συγκεκριμένου τύπου υδροστροβίλου αλλά η διαδικασία βελτιστοποίησης επιτυγχάνει τον περιορισμό της.

5. Βελτιστοποίηση Υδροδυναμικών Στροβιλομηχανών

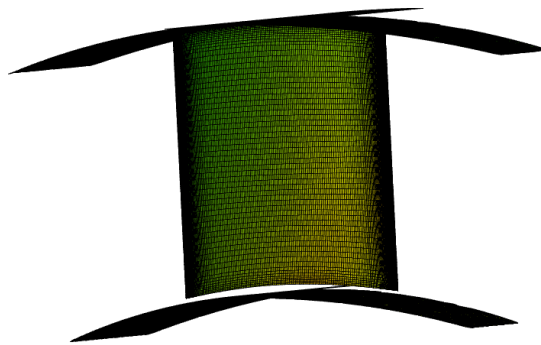


Σχήμα 5.9: Βελτιστοποίηση υδροστροβίλου *Hydromatrix®*: Ισοβαρείς επί της επιφάνειας του πτερυγίου και γραμμές ροής στην περιοχή του κελύφους στεφάνης (shroud) για το σχεδιασμό A, μέλους του υπολογισθέντος μετώπου Pareto, στα τρία μελετούμενα σημεία λειτουργίας, ΜΑ (πάνω-αριστερά), ΜΦ (πάνω-δεξιά) και ΠΦ (κάτω).

Κεφάλαιο 6

Βελτιστοποίηση Περιφερειακής Πτερύγωσης Συμπιεστή

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η βελτιστοποίηση της περιφερειακής πτερύγωσης συμπιεστή που βρίσκεται εγκατεστημένη στο ΕΘΣ/ΕΜΠ. Η πτερύγωση σχεδιάστηκε από τη SNECMA και έχει, στο παρελθόν, χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της ροής σε πτερυγώσεις με ακτινικό διάκενο (σχήμα 6.1) για υψηλούς αριθμούς Mach ¹. Παρουσίαση της διάταξης υπάρχει στο πλήρες κείμενο της διατριβής.



Σχήμα 6.1: Βελτιστοποίηση περιφερειακής πτερύγωσης συμπιεστή: Τα πτερύγια στηρίζονται στο εξωτερικό κέλυφος (shroud) ενώ το ακτινικό διάκενο δημιουργείται στην «επαφή» με το εσωτερικό κέλυφος (hub). Ο λόγος ακτίνων των δύο κελυφών είναι $R_{hub}/R_{shroud} = 0.75$.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης του σχήματος της (σταθερής κατά την ακτινική κατεύθυνση) αεροτομής του πτερυγίου αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης με περιορισμούς ελάχιστου πάχους σε τρεις θέσεις της αερο-

¹ European project «Advanced Civil Core Compressor Aerodynamics», AER2-CT92-0039, 1/1/1993-30/9/1996.

6. Βελτιστοποίηση Περιφερειακής Πτερύγωσης Συμπιεστή

τομής, στο 30%, 60% και 90% της χορδής. Το ελάχιστο αποδεκτό πάχος σε κάθε θέση καθορίζεται στο 90% του αντίστοιχου πάχους του υπάρχοντος σχεδιασμού. Επιπλέον, επιβάλλεται περιορισμός ως προς τη μέση γωνία εξόδου ροής ($\alpha_2 < 53^\circ$). Η μελέτη έγινε για ακτινικό διάκενο ίσο με το 2% του μήκους της χορδής.

Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε έχοντας ως μοναδική προς ελαχιστοποίηση συνάρτηση κόστους το μέσο συντελεστή απωλειών ολικής πίεσης PLC_{av} . Η ποσότητα PLC_{av} ορίζεται ως η μέση τιμή των τιμών του αντίστοιχου συντελεστή $PLC(r)$ σε κάθε ακτίνα (r) ανάμεσα στα δύο κελύφη. Η τελευταία δίνεται από τη σχέση

$$PLC(r) = \frac{p_{t,inl} - p_t(r)}{p_{t,inl} - p_{inl}} \quad (6.1)$$

Στο εν λόγω πρόβλημα σχεδιασμού, μιας και η αεροτομή του πτερυγίου διατηρείται σταθερή σε όλες τις ακτινικές θέσεις, απαιτείται αποκλειστικά η παραμετροποίηση μιας 2Δ αεροτομής. Αυτή γίνεται με χρήση πολυνύμων *NURBS*. Για κάθε πλευρά της αεροτομής υπάρχουν 5 ελεύθερα σημεία ελέγχου (10 μεταβλητές σχεδιασμού). Συνολικά, οι άγνωστοι του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι $N = 20$. Αυτά αντιστοιχούν σε 5 σημεία ελέγχου με 2 ελεύθερες συνιστώσες για κάθε πλευρά της αεροτομής.

Οι συνθήκες που επιβλήθηκαν στον επιλύτη των εξισώσεων της ροής είναι: (α) για την είσοδο, η περιφερειακή και ακτινική κατανομή της ολικής πίεσης και ολικής θερμοκρασίας και των γωνιών της ροής αλλά και η ένταση της τύρβης (1.5%) και (β) για την έξοδο, η τιμή της στατικής πίεσης στην ακτίνα ποδός. Μέσω της εξίσωσης ακτινικής ισορροπίας, υπολογίζεται επαναληπτικά η ακτινική κατανομή της στατικής πίεσης σε όλη τη διατομή εξόδου.

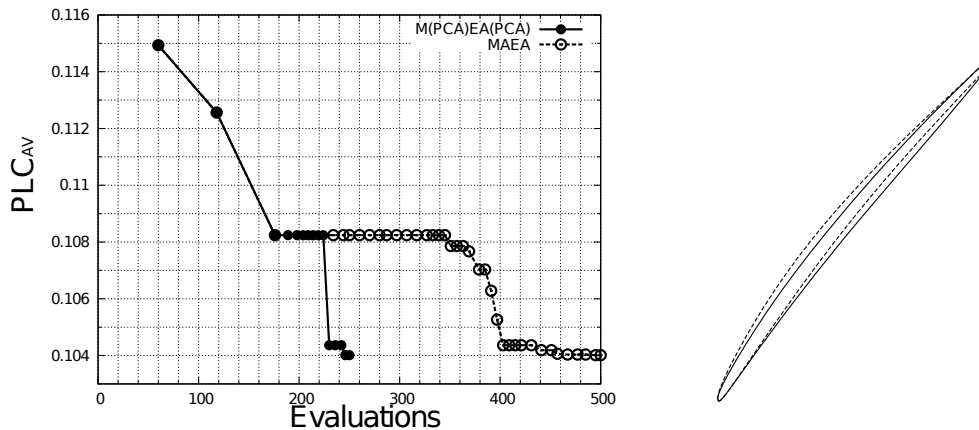
Με οικείο λογισμικό, σε κάθε υποψήφια λύση δημιουργείται ένα μη-δομημένο υβριδικό πλέγμα, της τάξης των 600000 κόμβων. Η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης γίνεται από επιλύτη των εξισώσεων Navier-Stokes, με μοντέλο τύρβης αυτό των Spalart-Allmaras και συναρτήσεις τοίχου.

6.1 Αποτελέσματα - Συγκρίσεις

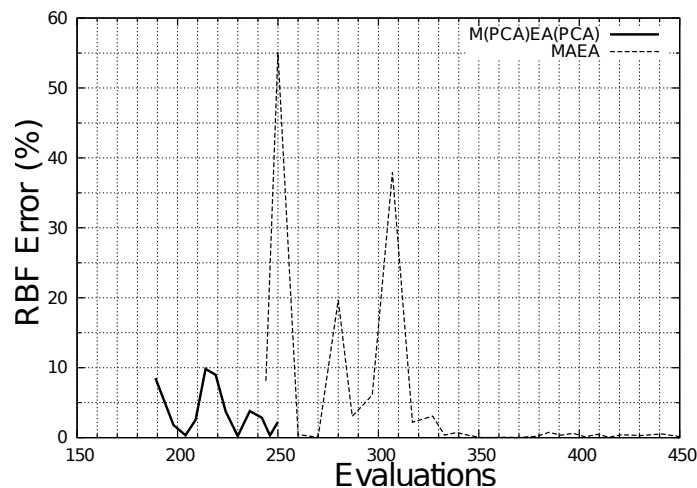
Πραγματοποιήθηκαν δύο τρεξίματα βελτιστοποίησης χάριν σύγκρισης. Η μια χρησιμοποιώντας τον προϋπάρχοντα MAEA και η δεύτερη τον προτεινόμενο M(PCA)-AEA(PCA). Κατά την εφαρμογή του προϋπάρχοντος MAEA, η φάση της ΠΠΑ ξεκινά όταν στη βάση δεδομένων του MAEA υπάρχουν περισσότερα από 220 ήδη αξιολογηθέντα άτομα. Αντίθετα, όταν χρησιμοποιείται ο M(PCA)AEA(PCA), λόγω της χρήσης της ΑσΚΣ κατά την εκπαίδευση των μεταπροτύπων (μείωση των εισόδων του μεταπροτύπου από 20 σε 10), η φάση ΠΠΑ ξεκινά νωρίτερα, όταν στη βάση δεδομένων υπάρχουν μόνο 150 άτομα. Οι πορείες σύγκλισης των δύο μεθόδων συγκρίνονται στο σχήμα 6.2. Παρατηρείται ότι, κάνοντας χρήση του M(PCA)AEA(PCA),

6.1 Αποτελέσματα - Συγκρίσεις

εντοπίζεται ο βέλτιστος σχεδιασμός σε περίπου 250 αξιολογήσεις ενώ με τον προϋπάρχοντα MAEA χρειάζονται περίπου 450. Η επίδραση της χρήσης της ΑσΚΣ κατά την εκπαίδευση των μεταπροτύπων στην ποιότητα των προβλέψεων τους γίνεται εμφανής στο σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.2: Βελτιστοποίηση περιφερειακής πτερύγωσης συμπίεστή: Αριστερά: Πορείες σύγκλισης για τον MAEA και τον προτεινόμενο M(PCA)AEA(PCA). Δεξιά: Η βέλτιστη αεροτομή, που προέκυψε από τον M(PCA)AEA(PCA) (συνεχής γραμμή) και η υπάρχουσα αεροτομή της πειραματικής εγκατάστασης στο ΕΘΣ/ΕΜΠ (διακεκομμένη γραμμή).



Σχήμα 6.3: Βελτιστοποίηση περιφερειακής πτερύγωσης συμπίεστή: Σύγκριση λάθους πρόβλεψης του μεταπροτύπου (δίκτυα RBF) κατά την πορεία της εξέλιξης.

6. Βελτιστοποίηση Περιφερειακής Πτερύγωσης Συμπιεστή

Η βέλτιστη αεροτομή (σχήμα 6.2), όπως αυτή εντοπίστηκε από τον M(PCA)AEA(PCA) έχει μέσες απώλειες πίεσης $PLC_{av} = 0.104$, μέση γωνία εξόδου $\alpha_2 = 52.6^\circ$ και ικανοποιεί όλους τους τεθέντες περιορισμούς πάχους.

Κεφάλαιο 7

Σύνοψη - Συμπεράσματα - Παρόν & Μέλλον

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής ήταν να εμπλουτίσει και να επεκτείνει υπάρχουσες μεθόδους (και λογισμικό) βελτιστοποίησης βασισμένο στους ΕΑ που έχει αναπτυχθεί στη ΜΠΥΡ&Β/ΕΘΣ του ΕΜΠ κατά την τελευταία δεκαετία. Κύριος στόχος της ήταν να επιτευχθεί ικανοποιητική μείωση του χρόνου αναμονής του σχεδιαστή κατά την επίλυση βιομηχανικών εφαρμογών μεγάλης κλίμακας. Οι προτεινόμενες μέθοδοι και το προγραμματισθέν λογισμικό χρησιμοποιήθηκαν σε αρκετές εφαρμογές σχεδιασμού-βελτιστοποίησης στις στροβιλομηχανές, θερμικές και υδροδυναμικές. Αρκετές πιστοποιήσεις και αξιολογήσεις μεθόδων έγιναν σε γρήγορα προβλήματα ελαχιστοποίησης μαθηματικών συναρτήσεων ή σε 2Δ εφαρμογές βελτιστοποίησης στις θερμικές στροβιλομηχανές. Όμως, οι κύριες εφαρμογές έγιναν σε προβλήματα βιομηχανικού ενδιαφέροντος, στην ευρύτερη περιοχή των στροβιλομηχανών.

Ως προς τα στοιχεία πρωτοτυπίας της διατριβής, σχετικά με την ανάπτυξη νέων μεθόδων και τον προγραμματισμό νέου λογισμικού, η συνεισφορά της διατριβής έγκειται στα παρακάτω :

- α) στη δημιουργία μεθόδου σχεδιασμού στη βάση αρχειοθετημένης γνώσης (Knowledge-Based Design ή KBD).
- β) στην ανάπτυξη και χρήση εξελικτικών τελεστών υποβοηθούμενων από ΑσΚΣ κατά τη βελτιστοποίηση μέσω ΕΑ και
- γ) στην ανάπτυξη και χρήση υποβοηθούμενων από ΑσΚΣ μεταπροτύπων κατά τη βελτιστοποίηση μέσω ΜΑΕΑ, δηλαδή ΕΑ που χρησιμοποιούν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ως τοπικά μεταπρότυπα.

Κάνοντας χρήση των προτεινόμενων στη διατριβή μεθόδων επιτυγχάνεται α) η βέλτιστη εκμετάλλευση διαθέσιμων παλαιότερων επιτυχημένων σχεδιασμών, οδη-

7. Σύνοψη - Συμπεράσματα - Παρόν & Μέλλον

γώντας σε αναδιατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης με πολύ λιγότερες μεταβλητές και, άρα, σημαντική μείωση του χρόνου επίλυσης των προβλημάτων μέσω ΕΑ ή ΜΑΕΑ. β) Η διατήρηση των πλεονεκτημάτων των προϋπαρχουσών μεθόδων επιτάχυνσης των ΕΑ (κυρίως της, βασισμένης στα μεταπρότυπα, προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης του πληθυσμού κάθε γενιάς) σε προβλήματα μεγάλης διάστασης (50-500 μεταβλητές σχεδιασμού), και γ) η περαιτέρω επιτάχυνση των ΕΑ από την αυτόματη και συνεχώς ανανεούμενη αναδιατύπωση και επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης σε νέα μορφή με, κατά το δυνατό, διαχωρίσιμη συνάρτηση κόστους. Κατέστη έτσι δυνατή η χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης βασιζόμενες στους ΕΑ σε προβλήματα βιομηχανικής κλίμακας (προβλήματα, δηλαδή, με μεγάλη διάσταση και δύσκολες μη-διαχωρίσιμες συναρτήσεις-στόχους), επιστρέφοντας σχεδιασμούς υψηλής ποιότητας σε μειωμένο χρόνο σχεδιασμού. Ενδεικτικά, κατά το σχεδιασμό υδροστροβίλου επιτεύχθηκε μείωση του συνολικού χρόνου σχεδιασμού (όχι μόνο της διαδικασίας βελτιστοποίησης) άνω του 50%, από 120 ως 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 του σε ακόμη μικρότερα ύψη, $H=2-5m$, και παροχές μικρότερες των $60m^3/s$.

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται, ήδη, στη βιομηχανία και συγκεκριμένα σε μια από της μεγαλύτερες εταιρίες στον τομέα των υδροηλεκτρικών έργων, την Andritz-Hydro. Στην εταιρεία αυτή, γίνεται χρήση του λογισμικού, σε τακτική φάση, στο σχεδιασμό δρομέων υδροδυναμικών μηχανών τύπου α) Francis, β) Kaplan, γ) Bulb, δ) Pump και ε) Pump-Turbine αλλά και στατικών μερών υδροδυναμικών μηχανών όπως αγωγών απαγωγής και προσαγωγής. Αυτή τη στιγμή, υπάρχει ικανός αριθμός εγκατεστημένων ή προς εγκατάσταση σχεδιασμών ανά τον κόσμο που πραγματοποιήθηκαν κάνοντας χρήση των μεθόδων και του λογισμικού της παρούσας διατριβής.

7.1 Μελλοντική Έρευνα

Ακολουθούν προτάσεις για μελλοντική έρευνα, που μπορούν να αποτελέσουν φυσική συνέχεια της διατριβής αυτής:

- Διερεύνηση της πιθανότητας ύπαρξης και εκμετάλλευσης μη-γραμμικών συσχετίσεων των μεταβλητών σχεδιασμού (σε σχέση με τη συνάρτηση-στόχο του προβλήματος), σε «κακώς-τοποθετημένα» προβλήματα βελτιστοποίησης.
- Χρήση κατανεμημένου ΕΑ, βασισμένου στον επιμερισμό του συνόλου των επιλέκτων με τρόπο ώστε ο κάθε δήμος (ή υποπληθυσμός, στην ορολογία των ΕΑ) να αναλαμβάνει μία περιοχή του μετώπου Pareto και να διαμορφώνει το δικό του διαχωρίσιμο πρόβλημα, βασισμένος στους «δικούς του» επιλέκτους.

- Διερεύνηση τρόπων αντιμετώπισης προβλημάτων βελτιστοποίησης με μεγάλη θνησιμότητα μέσω της χρήσης διαφορετικού τύπου εξελικτικών τελεστών κατά τα πρώτα στάδια της εξέλιξης. Αυτό θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο σε δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης με πολλούς αυστηρούς περιορισμούς, όπου η θνησιμότητα των αναδυομένων λύσεων οφείλεται, ακριβώς, στη μη-ικανοποίηση των περιορισμών.
- Υβριδισμός ΕΑ με αιτιοκρατικές μεθόδους σε βιομηχανικά προβλήματα, εφαρμόζοντας μεθόδους πολυεπίπεδης βελτιστοποίησης. Αυτό απαιτεί τη χρήση συζυγών τεχνικών (adjoint methods, για τον υπολογισμό το παραγώγων των μετρικών ποιότητας ή συνδυασμών αυτών) και αναπτύσσοντας τρόπους μορφοποίησης πλέγματος (mesh morphing) σύμφωνα με τις υπολογισθείσες παραγώγους. Αντίστοιχος υβριδισμός έχει πραγματοποιηθεί σε άλλα προβλήματα σε παλαιότερες διατριβές στη ΜΠΤΡ&Β/ΕΘΣ του ΕΜΠ.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει, επίσης, η χρήση ΕΑ με μεταβαλλόμενο μέγεθος γενιάς ούτως ώστε να κρατούνται σταθερά μεγέθη όπως η πολυμορφικότητα (αποφυγή πρόωρης ή λανθασμένης σύγκλισης του ΕΑ) ή το υπολογιστικό κόστος ανά γενιά (όταν λ.χ. ένα άτομο της παρούσας γενιάς υπάρχει ήδη στη βάση δεδομένων τότε να δίνεται η δυνατότητα στον ΕΑ να υπολογίζει κάποιο άλλο στη θέση του) κλπ.

7.2 Δημοσιεύσεις από τη διατριβή

Παρατίθενται οι δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και οι παρουσιάσεις σε επιστημονικά συνέδρια που πραγματοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της διατριβής.

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.

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.

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. International Journal of Mathematical Modelling and

7. Σύνοψη - Συμπεράσματα - Παρόν & Μέλλον

Numerical Optimization, SI: Simulation-Based Optimization Techniques for Computationally Expensive Engineering Design Problems, 3(2):45–63, 2012.

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.

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.

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.

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, Brazil, October 27-31, 2008.

Βιβλιογραφία

- [1] J.S. Anagnostopoulos and D. E. Papantonis. Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant. *Energy Conversion and Management*, 48:2663–2670, 2007.
- [2] J.S. Anagnostopoulos and D.E. Papantonis. Flow Modeling and Runner Design Optimization in Turgo Water Turbines. *International Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 4(3):136–141, 2007.
- [3] J.S. Anagnostopoulos and D.E. Papantonis. Pumping station design for a pumped-storage wind-hydro power plant. *Energy Conversion and Management*, 48:3009–3017, 2007.
- [4] V.G. Asouti. Μέθοδοι αεροδυναμικής ανάλυσης και σχεδιασμού για ροές υψηλών και χαμηλών ταχυτήτων, σε πολυεπεξεργαστικό περιβάλλον. PhD thesis, National Technical University of Athens, 2009.
- [5] V.G. Asouti and K.C. Giannakoglou. Aerodynamic optimization using a parallel asynchronous evolutionary algorithm controlled by strongly interacting demes. *Engineering Optimization*, 41(3):241–257, 2009.
- [6] V.G. Asouti, I.C. Kambolis, and K.C. Giannakoglou. A Grid-Enabled Asynchronous Metamodel-Assisted Evolutionary Algorithm for Aerodynamic Optimization. *Genetic Programming and Evolvable Machines (SI:Parallel and Distributed Evolutionary Algorithms, Part One)*, 10(3):373–389, 2009.
- [7] S. Axler. *Linear Algebra Done Right*. Springer Verlag, 1997.
- [8] G.E.P. Box. Evolutionary Operation: A method for increasing industrial productivity. *Applied Statistics*, 6(2):81–101, June 1957.
- [9] H.J. Bremermann. *Optimization through evolution and recombination*. Spartan Books, 1962.
- [10] C. Darwin. *On the origin of species by means of natural selection*. Murray, London, 1859.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [11] K. Deb. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 186(2-4):311–338, 2000.
- [12] M. Drela and M.B. Giles. Viscous-inviscid analysis of transonic and low Reynolds number airfoils. *AIAA Journal*, 25(10):1347–1355, 1987.
- [13] M. Emmerich, K.C. Giannakoglou, and B. Naujoks. Single- and multi-objective evolutionary optimization assisted by Gaussian random field meta-models. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 10(4):421–439, 2006.
- [14] I.K. Fodor. A survey of dimension reduction techniques. Technical report, Center for Applied Scientific Computing, Lawrence Livermore National Laboratory, 2002.
- [15] L. J. Fogel. Autonomous automata. *Industrial Research Magazine*, 4(2):14–19, 1962.
- [16] R.M. Friedberg. A learning machine: Part I. *IBM J. Research and Development*, 2(1):2–13, January 1958.
- [17] R.M. Friedberg, B. Dunham, and J.H. North. A learning machine: Part II. *IBM J. Research and Development*, 3(3):282–287, July 1959.
- [18] C. A. Georgopoulou. *Τεχνικές Βελτιστοποίησης για τον προγραμματισμό λειτουργίας Αεριο/Ατμοστροβιλικών μονάδων και το σχεδιασμό συνιστωσών τους*. PhD thesis, National Technical University of Athens, 2009.
- [19] C.A. Georgopoulou and K.C. Giannakoglou. A multi-objective metamodel-assisted memetic algorithm with strength-based local refinement. *Engineering Optimization*, 41(10):909–923, 2009.
- [20] C.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. In *24th IAHR, Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Foz do Iguassu, October 2008.
- [21] T. Ghisu, T. Parks, D. Jaeggi, J. Jarrett, and P. Clarkson. The benefits of adaptive parametrization in multi-objective tabu search optimization. *Engineering Optimization*, 42(12):959–981, 2010.

- [22] K.C. Giannakoglou. Design of optimal aerodynamic shapes using stochastic optimization methods and computational intelligence. *Progress in Aerospace Sciences*, 38(1):43–76, 2002.
- [23] K.C. Giannakoglou. The EASY (Evolutionary Algorithms SYstem) software, <http://velos0.ltt.mech.ntua.gr/EASY>, 2008.
- [24] K.C. Giannakoglou, A.P. Giotis, and M.K. Karakasis. Low-cost genetic optimization based on inexact pre-evaluations and the sensitivity analysis of design parameters. *Inverse Problems in Engineering*, 9:389–412, 2001.
- [25] A.P. Giotis. *Χρήση Εξελικτικών τεχνικών, υπολογιστικής ευφυΐας και μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής στη βελτιστοποίηση - αντίστροφη σχεδίαση πτερυγώσεων στροβιλομηχανών, μέσω παράλληλης επεξεργασίας*. PhD thesis, National Technical University of Athens, 2003.
- [26] D.E. Goldberg. *Genetic Algorithms in search, optimization & machine learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [27] P. Grafenberger, E. Parkinson, C.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. In *24th IAHR, Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Foz do Iguassu, October 2008.
- [28] P. Grafenberger, E. Parkinson, C.A. Georgopoulou, S.A. Kyriacou, and K.C. Giannakoglou. Optimization of hydraulic machinery by exploiting previous successful designs. In *25th IAHR, Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Timisoara, September 2010.
- [29] S. Haykin. *Neural networks: A comprehensive foundation*. Pearson Education, 2001.
- [30] J.H. Holland. Outline for a logical theory of adaptive systems. *J. ACM*, 9(3):297–314, July 1962.
- [31] I.T. Jolliffe. In *Principal Component Analysis, Springer Series in Statistics*, 2nd ed. Springer, N.Y., 2002.
- [32] I. C. Kampolis. *Πολυεπίπεδοι, Πολυεπεξεργαστικοί Αλγόριθμοι Αεροδυναμικής Βελτιστοποίησης στις Στροβιλομηχανές*. PhD thesis, National Technical University of Athens, 2009.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΊΑ

- [33] I.C. Kampolis and K.C. Giannakoglou. Distributed evolutionary algorithms with hierarchical evaluation. *Engineering Optimization*, 41(11):1037–1049, 2009.
- [34] I.C. Kampolis, D.I. Papadimitriou, and K.C. Giannakoglou. Evolutionary optimization using a new radial basis function network and the adjoint formulation. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 14(4):397–410, 2006.
- [35] I.C. Kampolis, A.S. Zymaris, V.G. Asouti, and K.C. Giannakoglou. Multilevel optimization strategies based on metamodel-assisted evolutionary algorithms, for computationally expensive problems. In *2007 Congress on Evolutionary Computation – CEC ’07*, Singapore, September 2007.
- [36] M.K. Karakasis. *Ιεραρχικοί, κατανεμημένοι εξελικτικοί αλγόριθμοι και υπολογιστική ευφυΐα στη σχεδίαση βέλτιστων αεροδυναμικών μορφών, σε περιβάλλον πολυεπεξεργασίας*. PhD thesis, National Technical University of Athens, 2006.
- [37] M.K. Karakasis and K.C. Giannakoglou. On the use of metamodel-assisted, multi-objective evolutionary algorithms. *Engineering Optimization*, 38(8):941–957, 2006.
- [38] M.K. Karakasis, A.P. Giotis, and K.C. Giannakoglou. Inexact information aided, low-cost, distributed genetic algorithms for aerodynamic shape optimization. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 43(10-11):1149–1166, 2003.
- [39] M.K. Karakasis, D.G. Koubogiannis, and K.C. Giannakoglou. Hierarchical distributed evolutionary algorithms in shape optimization. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 53(3):455–469, 2007.
- [40] M. Kiemele, S. Schmidt, and R. Berdine. *Basic Statistics, tools for continuous improvement*. Air Academy Press & Associates, Colorado Springs, 1996.
- [41] J. Kolodner. Improving human decision making through case-based decision aiding. *AI Magazine*, 12(2):52–68, 1991.
- [42] E.A. Kontoleonos. *Συμβολή στο σχεδιασμό θερμο-ρευστοδυναμικών διατάξεων με χρήση αιτιοκρατικών και εξελικτικών μεθόδων βελτιστοποίησης*. PhD thesis, National Technical University of Athens, 2012.
- [43] E.A. Kontoleonos, V.G. Asouti, and K.C. Giannakoglou. An asynchronous metamodel-assisted memetic algorithm for CFD-based shape optimization. *Engineering Optimization*, 44(2):157–173, 2011.

- [44] 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. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimization (SI:Simulation-Based Optimization Techniques for Computationally Expensive Engineering Design Problems)*, 3(2):45–63, 2012.
- [45] P.I.K. Liakopoulos. *Γένεση μη-δομημένων πλεγμάτων και διαχείρισή τους σε μεθόδους ανάλυσης και βελτιστοποίησης συνιστωσών στροβιλομηχανών και εφαρμογές, αξιοποιώντας τεχνολογίες πλέγματος (Grid Computing)*. PhD thesis, National Technical University of Athens, 2008.
- [46] A.K. Morales and C.V. Quezada. A universal eclectic genetic algorithm for constrained optimization. In *6th European Congress on Intelligent Techniques & Soft Computing, EUFIT'98*, pages 518–522. Verlag Mainz, 1998.
- [47] I. Rechenberg. Cybernetic solution path of an experimental problem. Royal Aircraft Establishment, Library Translation No. 1122, Farnborough, 1965.
- [48] C. Riesbeck and R. Schank. In *Inside Case-Based Reasoning*. Lawrence Erlbaum Associates, Cambridge, MA, 1989.
- [49] R. Roy and A. Tiwari. Generalised regression GA for handling inseparable function integration: Algorithm and application. *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VII, Lecture Notes in Computer Science*, 2439:452–461, 2002.
- [50] R. Salomon. Re-evaluating genetic algorithm performance under coordinate rotation of benchmark functions. a survey of some theoretical and practical aspects of genetic algorithms. *BioSystems*, 39:263–278, 1996.
- [51] S. Slade. Case-based reasoning: A research paradigm. *AI Magazine*, 12(1):42–55, 1991.
- [52] E. Zitzler, D. Brockhoff, and L. Thiele. The hypervolume indicator revisited: On the design of Pareto-compliant indicators via weighted integration. In *Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization – EMO*, 2007.
- [53] E. Zitzler, M. Laumans, and L. Thiele. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. Technical Report 103, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Computer Engineering and Communication Networks Lab. (TIK), Zurich, Switzerland, 2001.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [54] E. Zitzler, M. Laumans, and L. Thiele. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization. In *EURO-GEN 2001, Evolutionary Methods for Design, Optimisation and Control with Applications to Industrial Problems*, Barcelona, 2002. CIMNE.