



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ
ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ
ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Εφαρμογές Ασύγχρονων Εξελικτικών και Μιμητικών
Αλγορίθμων στη Μηχανική των Ρευστών – Στροβιλομηχανές

Διπλωματική Εργασία:

Ίριδα Α. Σκουτεροπούλου

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ. Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ
ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ
ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Εφαρμογές Ασύγχρονων Εξελικτικών και Μιμητικών Αλγορίθμων στη Μηχανική
των Ρευστών – Στροβιλομηχανές
της Ίριδας Α.Σκουτεροπούλου

Επιβλέπων: Κυριάκος Χ.Γιαννάκογλου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξελίσσει και εφαρμόζει μια μέθοδο βελτιστοποίησης για μονοκριτηριακά και πολυκριτηριακά προβλήματα, η οποία βασίζεται σε έναν πλήρως Ασύγχρονο δομημένο Εξελικτικό Αλγόριθμο (ΑΕΑ) καθώς και στον υβριδισμό του με μια αιτιοκρατική μέθοδο τοπικής βελτίωσης (Local Search), δημιουργώντας Μιμητικό Αλγόριθμο (ΑΜΑ). Στους ασύγχρονους ΕΑ, η απουσία της έννοιας της γενιάς καταργεί τυχόν προβλήματα που σχετίζονται με το συγχρονισμό των χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μέγιστη δυνατή απόδοση κατά την παράλληλη επεξεργασία. Ακόμα, παρατηρείται σημαντική βελτίωση της επίδοσης του ΑΕΑ, όταν συνδυάζεται με μια μέθοδο τοπικής βελτίωσης.

Στη μέθοδο βελτιστοποίησης που προτείνεται εδώ, ο πληθυσμός του ΑΕΑ ή του ΑΜΑ είναι τοποθετημένος στους κόμβους ενός 2Δ δομημένου πλέγματος, το οποίο είναι χωρισμένο σε δήμους που αλληλεπιδρούν ισχυρά μεταξύ τους. Η επιλογή του νέου ατόμου που πρόκειται να σταλεί για αξιολόγηση στον πρώτο διαθέσιμο επεξεργαστή, γίνεται έπειτα από μια σειρά ενδο- και δια-δημοτικών διαδικασιών, οι οποίες βασίζονται στις τιμές δύο προτεραιοτήτων, της προτεραιότητας λόγω τιμής της συνάρτησης κόστους και της προτεραιότητας λόγω ηλικίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παραμετρική μελέτη πάνω σε απλά μαθηματικά προβλήματα του 3ου κεφαλαίου, σχετικά με τις διαστάσεις πλέγματος βάσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών, αποδεικνύουν ότι ο τρόπος που διαμορφώνονται οι δύο αυτές προτεραιότητες επηρεάζει σημαντικά το μηχανισμό του αλγορίθμου και κατά συνέπεια, την ποιότητα των λύσεων που προκύπτουν για έναν προκαθορισμένο αριθμό αξιολογήσεων. Η μέθοδος τοπικής βελτίωσης που χρησιμοποιείται για τον ΑΜΑ είναι αυτή της απότομης καθόδου, η οποία αποτελεί μία από τις μεθόδους που βασίζονται στις πρώτες

παραγώγους των συναρτήσεων στόχων του προβλήματος. Για την απαιτητική υπολογιστικά ρευστομηχανική εφαρμογή του 5ου κεφαλαίου, δηλαδή το σχεδιασμό σωλήνων εναλλάκτη θερμότητας, ο υπολογισμός των παραγώγων των συναρτήσεων στόχων έγινε με χρήση των συνεχών συζυγών μεθόδων. Έτσι, το κόστος υπολογισμού των παραγώγων σχεδόν εξισώθηκε με το υπολογιστικό κόστος αξιολόγησης ενός ατόμου. Η τοπική βελτίωση εφαρμόζεται μόνο στα άτομα του πληθυσμού που αποτελούν τις τρέχουσες καλύτερες λύσεις, σύμφωνα με το μηχανισμό εκμάθησης κατά Lamarck. Μετά την ανανέωση τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού κάθε ατόμου που στάλθηκε για τοπική βελτίωση, με τη μέθοδο της απότομης καθόδου, η νέα λύση που προκύπτει επαναξιολογείται.

Η προτεινόμενη μέθοδος δοκιμάζεται αρχικά σε απλά μαθηματικά προβλήματα ενός και δύο στόχων, στα οποία διεξάγεται παραμετρική μελέτη που αφορά την αλληλοεξάρτηση των διαστάσεων του πλέγματος βάσης του αλγορίθμου και του αριθμού των χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών. Επίσης εφαρμόζεται σε δύο μηχανολογικά προβλήματα, στα οποία χρησιμοποιείται απαιτητικό υπολογιστικά λογισμικό Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (ΥΡΔ). Στο πρώτο από αυτά, που αφορά στο σχεδιασμό βέλτιστης μορφής πτερυγίων δρομέα μοντέλου υδροστροβίλου αξονικής ροής για λειτουργία σε πλέγμα υδροστροβίλων (**matrix**), ο συνολικός χρόνος αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης παρουσίαζε μεγάλες διακυμάνσεις, γεγονός που καθιστούσε τη χρήση του ΑΕΑ την πιο κατάλληλη επιλογή για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Στη δεύτερη εφαρμογή, η οποία αφορούσε στο σχεδιασμό βέλτιστης μορφής και τοποθέτησης δέσμης σωλήνων εναλλάκτη θερμότητας εγκάρσιας και αναμίξιμης ροής, χρησιμοποιήθηκαν και ο ΑΕΑ και ο ΑΜΑ, προκειμένου να γίνει σύγκριση της ποιότητας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για τον κάθε αλγόριθμο, για ίδιες παραμέτρους των δύο αλγορίθμων, καθώς και ίδιο αριθμό χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών.

Η εφαρμογή του ΑΕΑ στο πεδίο των στροβιλομηχανών, δηλαδή στο σχεδιασμό πτερυγίων δρομέα υδροστροβίλου τύπου (**matrix**) που παρουσιάζεται στο 4ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής, ήταν εφικτή χάρη στην τρέχουσα συνεργασία που έχει η ερευνητική ομάδα της Μονάδας Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και Βελτιστοποίησης του ΕΘΣ/ΕΜΠ με την εταιρεία ANDRITZ HYDRO (Linz, Austria), η οποία παρείχε τις γνώσεις όσον αφορά στο σχεδιασμό υδροστροβίλων, καθώς και κατάλληλο λογισμικό Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής για την υλοποίηση αυτής της εφαρμογής.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF FLUIDS
LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINES
PARALLEL CFD & OPTIMIZATION UNIT

Applications of Asynchronous Evolutionary and Memetic Algorithms in Fluid Mechanics – Turbomachinery

Irida A. Skouteropoulou

Advisor: Kyriakos C. Giannakoglou, Professor NTUA

Athens, October 2010

Abstract

This diploma thesis proposes and assesses an optimization method for single- and multi-objective problems based on a fully Asynchronous structured Evolutionary Algorithm (AEA) and its hybridization with a deterministic method of local search, the so-called Asynchronous Memetic Algorithm (AMA). In AEA, the lack of generations removes synchronization problems during the evolution and allows maximum parallel efficiency to be achieved. Moreover, when combined with a local search method, AEA's performance can significantly be enhanced.

In the proposed method, the population of AEA or AMA lies on the nodes of a 2D structured supported mesh and is divided into overlapping demes, which interact strongly with each other. The selection of the new individual to undergo evaluation on the currently idle processor is determined through inter- and intra-deme processes, which are based on two priority metrics related to the agents' cost and age. From the results of a parametric study on the mesh size in relation to the number of processors being used, which is performed on mathematical benchmarks in the third chapter of this thesis, it is proved that these two priorities have a great impact upon the algorithm's mechanism and, as a result, the quality of solutions obtained within a predefined number of evaluations. In AMA, the local search method being used is that of steepest descent, a gradient-based method which requires the computation of the first derivative of the objective function(s) with respect to design variables. For the computationally demanding fluid mechanics problem in the fifth chapter of this thesis, the design of a tube heat exchanger, the continuous adjoint method was used for the computation of the gradient of the objective functions. Thus, the gradient's computation cost was about that of one individual's evaluation. Local refinement is applied to the most promising individuals according to the Lamarckian learning rules. After updating one's individual vector of design variables, using the steepest descent method, the updated solution is sent for re-evaluation.

The proposed method is demonstrated firstly on single- and multi-objective mathematical benchmarks, on which a parametric study concerning the mesh size in relation to the number of processors being used was conducted, and on two engineering applications with demanding CFD computation. In the first of them, the design of a runner's blades of a hydroturbine, destined to be placed in a matrix, each individual's evaluation time varied, a fact which made the use of AEA an excellent choice for this particular problem. In the second application, the design of a tube heat exchanger, both AEA and AMA were used in order to compare the quality of results obtained for the same algorithm's parameters and the same number of evaluations.

The demonstration of the proposed AEA in the turbomachinery field, namely the design of a matrix hydroturbine runner shown in the 4th chapter, has been made possible thanks to the running co-operation between our NTUA research group and the ANDRITZ HYDRO Company (Linz, Austria) which provided the design know-how and the CFD evaluation software for this application.

Ευχαριστίες...

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην αποπεράτωσή της με περισσότερο ή λιγότερο άμεσο ή έμμεσο τρόπο.

Αρχικά, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Κ.Χ. Γιαννάκογλου που μου έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί του και να εμπλουτίσω τις γνώσεις μου πάνω στο αντικείμενο της βελτιστοποίησης που ανέκαθεν παρουσίαζε - και παρουσιάζει - για μένα μεγάλο ενδιαφέρον. Η πόρτα του ήταν πάντα ανοικτή για οποιαδήποτε απορία, βοήθεια ή ακόμα και συζήτηση. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την διδάκτορα Βαρβάρα Ασούτη, χωρίς την καθοδήγηση της οποίας, η ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής θα ήταν πολύ πιο δύσκολη. Οι συμβουλές της σε θέματα βελτιστοποίησης και όχι μόνο, υπήρξαν καθοριστικής σημασίας, ειδικά στα πρώτα στάδια αυτής της δουλειάς. Επιπλέον ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες Ευγενία Κοντολέοντος και Στέλιο Κυριάκου για τη συμβολή τους στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και όλη την ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών για την προθυμία βοήθειας σε οποιαδήποτε απορία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξή της όλα τα χρόνια της φοιτητικής μου πορείας, και ιδιαίτερα τον πατέρα μου, ο οποίος με προσωπικές του θυσίες, μου επέτρεψε να πραγματοποιήσω τις σπουδές που ήθελα.

Σκουτεροπούλου Ίριδα

Οκτώβριος 2010

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
2	Ασύγχρονοι Μιμητικοί Αλγόριθμοι	7
2.1	Εισαγωγή στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους	7
2.2	Περιγραφή Εξελικτικού Αλγορίθμου	8
2.3	Από τους Σύγχρονους στους Ασύγχρονους Εξελικτικούς Αλγορίθμους	9
2.3.1	Ορισμός Προβλήματος Βελτιστοποίησης	10
2.3.2	Διαχείριση Περιορισμών	11
2.3.3	Προβλήματα Βελτιστοποίησης Πολλών Στόχων - Μέτωπο των κατά Pareto Βέλτιστων Λύσεων	13
2.3.4	Αλγόριθμος SPEA 2	15
2.4	Ασύγχρονος Εξελικτικός Αλγόριθμος	16
2.4.1	Τοπολογία Πλέγματος Βάσης	16
2.4.2	Περιγραφή Αλγορίθμου ΑΕΑ	18
2.5	Από τους Ασύγχρονους Δομημένους Εξελικτικούς στους Ασύγχρονους Μιμητικούς Αλγόριθμους	22
2.5.1	Μηχανισμός Εκμάθησης κατά Lamarck και κατά Baldwin	24
2.5.2	Περιγραφή Αλγορίθμου ΑΕΑ με Τοπική Βελτίωση (AMA)	25
2.5.3	Τοπική Βελτίωση με Μέθοδο Απότομης Καθόδου	28
2.5.4	Υπολογισμός Παραγώγου Συνάρτησης Στόχου για Χρησιμοποίηση σε Τοπική Βελτίωση	30
3	Πιστοποίηση - Παραμετρική Διερεύνηση	37
3.1	Γενική Περιγραφή	37
3.2	Πιστοποίηση ΑΕΑ/AMA	38
3.2.1	Μαθηματική Συνάρτηση Σφαίρας	38
3.2.2	Παράμετροι ΑΕΑ/AMA	40
3.2.3	Αποτελέσματα - Σύγκριση ΑΕΑ και AMA	41
3.3	Παραμετρική Διερεύνηση ΑΕΑ/AMA	43

3.3.1	Μαθηματική Συνάρτηση Rastrigin	43
3.3.2	Παράμετροι ΑΕΑ/ΑΜΑ	46
3.3.3	Αποτελέσματα Παραμετρικής Μελέτης	47
3.4	Έλεγχος Συμπερασμάτων για Μαθηματικό Πρόβλημα Ελαχιστοποίησης Δύο Στόχων Χωρίς Περιορισμούς	54
3.4.1	Μαθηματικό Πρόβλημα ZDT3	54
3.4.2	Παράμετροι ΑΕΑ/ΑΜΑ	56
3.4.3	Αποτελέσματα για ΑΕΑ και ΑΜΑ	57
4	Σχεδιασμός Βέλτιστης Μορφής Δρομέα Μοντέλου Υδροστροβίλου	61
4.1	Σύντομη Περιγραφή	61
4.2	Λειτουργία Υδροστροβίλων – Υδροηλεκτρικά Έργα	62
4.3	Γενικά περί Υδροστροβίλων τύπου Matrix	63
4.4	Περιγραφή Υπολογισμού των τριών Σημείων Λειτουργίας Υδροστροβίλου Matrix	69
4.5	Περιγραφή της Μεθόδου Σχεδιασμού Γεωμετρίας του Δρομέα Μοντέλου Υδροστροβίλου	75
4.5.1	Χαρακτηριστικά Επιλυόμενης Ροής	75
4.5.2	Πρακτικά Θέματα Μορφοποίησης Πτερυγίων Δρομέα	78
4.6	Επιθυμητά Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού – Ορισμός Στόχων Βελτιστοποίησης και Περιορισμών	82
4.6.1	Βασικά Σχεδιαστικά Χαρακτηριστικά Υδροστροβίλου – Περαιτέρω Εξηγήσεις	85
4.7	Παραμετροποίηση Πτερυγίων Δρομέα - Μεταβλητές Σχεδιασμού	88
4.8	Βελτιστοποίηση - Καθορισμός Παραμέτρων ΑΕΑ/ΕΑ	92
4.9	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης - Συζήτηση	94
4.9.1	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης ΑΕΑ Με Αρχικοποίηση Από Γνωστή Λύση	94
4.9.2	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης ΑΕΑ/ΕΑ Χωρίς Αρχικοποίηση από Γνωστή Λύση	111
4.9.3	Επιπλέον Σχόλια Σχετικά με την Επιλογή του ΑΕΑ ως Λογισμικού Βελτιστοποίησης στην Παρούσα Εφαρμογή.	112
5	Σχεδιασμός Βέλτιστης Μορφής και Τοποθέτησης Δέσμης Σωλήνων Εναλλάκτη	117
5.1	Σύντομη Περιγραφή	117
5.2	Γενικά περί Εναλλακτών Θερμότητας	118
5.3	Περιγραφή Προβλήματος και Μεθόδου Σχεδιασμού Δέσμης Σωλήνων Εναλλάκτη	120

5.3.1	Περιγραφή Προβλήματος	120
5.3.2	Επίλυση Πεδίου Ροής - Γένεση Πλέγματος	122
5.3.3	Διαδικασία Εύρεσης Γεωμετρίας και Τοποθέτησης Σωλήνων.	123
5.3.4	Ευθύ και Συζυγές Πρόβλημα	125
5.4	Ορισμός Στόχων Βελτιστοποίησης	127
5.5	Παραμετροποίηση Γεωμετρίας Σωλήνων Εναλλάκτη - Μεταβλητές Σχεδιασμού	129
5.6	Βελτιστοποίηση - Καθορισμός Παραμέτρων ΑΕΑ/ΑΜΑ	132
5.7	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης - Συζήτηση	133
6	Ανακεφαλαίωση - Σχόλια - Συμπεράσματα	141

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχόμενη αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, καθώς και η ανάπτυξη μεθόδων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (ΥΡΔ, Computational Fluid Dynamics/CFD) με γνώμονα τη μείωση του υπολογιστικού κόστους σε προβλήματα ρευστοδυναμικής, έχουν υπαγορεύσει νέες τάσεις στο πεδίο της βελτιστοποίησης στην αερο – υδροδυναμική. Οι νέες αυτές τάσεις, συνοψίζονται σε μια φράση: εύρεση πραγματικά (καθολικά) βέλτιστων λύσεων, με αποδεκτό υπολογιστικό κόστος, στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Τόσο η προσπάθεια ελαχιστοποίησης του χρόνου ολοκλήρωσης του συνόλου των αξιολογήσεων ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, όσο και η προσπάθεια βελτίωσης της αναζήτησης βέλτιστων λύσεων οδήγησαν στη δημιουργία και εξέλιξη των Ασύγχρονων Εξελικτικών Αλγόριθμων (ΑΕΑ), και κατ' επέκταση των Ασύγχρονων Μιμητικών Αλγόριθμων (ΑΜΑ), που αποτελούν υβριδισμό των ΑΕΑ με μια αιτιοκρατική μέθοδο τοπικής βελτίωσης των υποψήφιων λύσεων.

Οι Ασύγχρονοι ΕΑ ([17, 25, 30]) ανήκουν στους αιτιοκρατικούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης και αποτελούν εξέλιξη των Σύγχρονων ΕΑ. Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (ΕΑ), [52, 7, 23, 20, 44, 16], είναι πληθυσμιακές μέθοδοι που αναζητούν την εύρεση βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος, χρησιμοποιώντας τεχνικές εμπνευσμένες από τις αρχές εξέλιξης των ειδών (Darwin),[5], όπως η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Το βασικό πλεονέκτημα των ΕΑ είναι η προσαρμοστικότητά τους σε οποιοδήποτε πρόβλημα σχεδιασμού, αρκεί να υπάρχει συμβατό λογισμικό ΥΡΔ που να μπορεί να επικοινωνεί με τον ΕΑ, καθώς και η εύρεση της βέλτιστης λύσης (ή των βέλτιστων λύσεων) σε κάθε περίπτωση, αρκεί ο αλγόριθμος να εκτελέσει μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων. Η τελευταία αυτή απαίτηση αυξάνει κατά πολύ το υπολογιστικό κόστος, καθώς μια αξιολόγηση ταυτίζεται με την επίλυση των ροϊκών εξισώσεων, καθιστώντας πολλές φορές ασύμφορη έως και απαγορευτική τη χρήση των ΕΑ στην κλασική τους μορφή. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με την παραλληλοποίηση των ΕΑ και την ένταξή τους σε πολυεπεξεργαστικά περιβάλλοντα ([11, 26]). Ωστόσο, παρά τη μείωση του συνολικού απαιτούμενου χρόνου για την ολοκλήρωση των αξιολογήσεων, οι σύγχρονοι Παράλληλοι

ΕΑ δεν μπορούν να επιτύχουν μέγιστη εκμετάλλευση της συνολικής διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος που υπάρχει, καθότι ως πληθυσμιακές μέθοδοι ανίχνευσης βασίζονται στην αξιολόγηση ενός συγκεκριμένου αριθμού ατόμων σε κάθε γενιά. Ο αλγόριθμος προχωρά στην αξιολόγηση της επόμενης γενιάς, μόνο αφού ολοκληρωθεί και η αξιολόγηση του τελευταίου ατόμου της προηγούμενης γενιάς. Αυτό σημαίνει, ότι αν σε ένα πολύπλοκο υπολογιστικά πρόβλημα (όπως τα προβλήματα αερο – υδροδυναμικού σχεδιασμού) η αξιολόγηση έστω και μιας μόνο υποψήφιας λύσης καθυστερήσει σε έναν - ενδεχομένως και πιο αργό, λόγω π.χ. παλαιότητας - επεξεργαστή, τότε ταυτόχρονα επιβραδύνεται ολόκληρη η διαδικασία βελτιστοποίησης, αφού προκύπτει η ανάγκη συγχρονισμού των επεξεργαστών στο τέλος κάθε γενιάς. Την ολοκληρωτική κατάργηση της ανάγκης συγχρονισμού των επεξεργαστών και της έννοιας της γενιάς, καθώς και τον ολοκληρωτικό βαθμό εκμετάλλευσης ολόκληρης της υπολογιστικής ισχύος που είναι διαθέσιμη κάθε χρονική στιγμή, έρχονται να επιτύχουν οι Ασύγχρονοι ΕΑ, οι οποίοι για αυτό το λόγο αποτελούν ιδανική επιλογή για απαιτητικά από άποψη υπολογισμών προβλήματα, ειδικά όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός διαθέσιμων επεξεργαστών.

Στην παρούσα διπλωματική, ο Ασύγχρονος Εξελικτικός Αλγόριθμος (ΑΕΑ) που χρησιμοποιείται σε όλες τις εφαρμογές, αναπτύχθηκε και προγραμματίστηκε εξ ολοκλήρου στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ ([46, 39]). Πρόκειται για δομημένο ΑΕΑ, καθότι ο πληθυσμός τοποθετείται στους κόμβους 2Δ δομημένου πλέγματος, το οποίο παρουσιάζει περιοδικότητα κατά μήκος των απέναντι πλευρών του. Οι διαστάσεις του πλέγματος καθορίζονται από το χρήστη, σύμφωνα με κριτήρια πολυπλοκότητας του προβλήματος και διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος. Το πλέγμα είναι χωρισμένο σε αλληλοκαλυπτόμενους δήμους που παρουσιάζουν ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Οι εξελικτικές διαδικασίες εφαρμόζονται σε κάθε άτομο του πληθυσμού μεμονωμένα, με τη διασταύρωση για το σχηματισμό ενός νέου ατόμου να προκύπτει από δύο ή περισσότερα άλλα άτομα του πληθυσμού, ενώ η αξιολόγηση του κάθε ατόμου λαμβάνει χώρα ξεχωριστά και ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες. Συνεπώς, ακόμα και αν η αξιολόγηση ενός ατόμου καθυστερήσει, οι επόμενες αξιολογήσεις των ατόμων του υπόλοιπου πληθυσμού θα πραγματοποιηθούν κανονικά σε όσους επεξεργαστές είναι διαθέσιμοι, έχοντας μόλις ολοκληρώσει μια προηγούμενη επανάληψη. Η επιλογή του νέου ατόμου που θα σταλεί για αξιολόγηση, πραγματοποιείται έπειτα από μια σειρά ενδο- και δια-δημοτικών διαδικασιών, οι οποίες βασίζονται στον τρόπο διαμόρφωσης των τιμών δύο προτεραιοτήτων, της προτεραιότητας λόγω τιμής της συνάρτησης κόστους και της προτεραιότητας λόγω ηλικίας.

Οι Ασύγχρονοι Μιμητικοί Αλγόριθμοι (ΑΜΑ) κατατάσσονται στις υβριδικές μεθόδους βελτιστοποίησης που εξελίχθηκαν και εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια, καθώς βελτιώνουν σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά του αρχικού ΑΕΑ, για το ίδιο υπολογιστικό κόστος. Οι ΜΑ γενικά ([31, 28, 27, 42, 54]), συνδυάζουν χαρακτηριστικά αλγορίθμων που χειρίζονται πληθυσμούς λύσεων (όπως οι ΕΑ) και ευρετικών μεθόδων (όπως οι μέθοδοι τοπικής

βελτίωσης), ώστε η αναζήτηση βέλτιστης λύσης να γίνεται περισσότερο αποτελεσματικά. Η ονομασία ‘Μιμητικός’ προήλθε από την λέξη ‘μίμος’ και χρησιμοποιήθηκε να περιγράψει τη συνεργασία ενός αλγορίθμου που χειρίζεται πληθυσμούς λύσεων και μιας μεθόδου τοπικής βελτίωσης (Local Search) κάθε υποψήφιας λύσης, η οποία επί της ουσίας εκτελεί μία τοπική εκλέπτυνση της λύσης, ώστε να επιτυγχάνεται βελτίωση της τιμής της αντίστοιχης συνάρτησης στόχου (Fitness value). Δηλαδή, ο MA καταφέρνει να προσαρμόζεται εύκολα σε κάθε νέο πρόβλημα, λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.

Όσον αφορά στον Ασύγχρονο Μιμητικό Αλγόριθμο (AMA) που χρησιμοποιείται εδώ, όπως και ο ΑΕΑ, αναπτύχθηκε και προγραμματίστηκε επίσης στο ΕΘΣ/ΕΜΠ. Αποτελεί συνδυασμό του ΑΕΑ που περιγράφηκε παραπάνω και μιας μεθόδου τοπικής βελτίωσης. Η τοπική βελτίωση εφαρμόζεται μόνο στα άτομα του πληθυσμού που αποτελούν τις τρέχουσες βέλτιστες λύσεις, σύμφωνα με το μηχανισμό εκμάθησης κατά Lamarck, [43, 8]. Συγκεκριμένα, όταν ένα άτομο επιστρέφει από αξιολόγηση και αποτελεί βέλτιστη λύση, τότε στέλνεται αυτόματα για τοπική βελτίωση, πράγμα που συνεπάγεται την απασχόληση του επεξεργαστή που εκτέλεσε την αρχική αξιολόγηση για λίγο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αφού γίνει εκλέπτυνση της βέλτιστης λύσης μετά την τοπική βελτίωση, αφού δηλαδή υπολογιστεί η παράγωγος των συναρτήσεων στόχων ως προς όλες τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος και ανανεωθεί το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού του ατόμου που στάλθηκε για τοπική βελτίωση με τη μέθοδο της απότομης καθόδου, η νέα λύση που προκύπτει στέλνεται για επαναξιολόγηση.

Στην προκειμένη περίπτωση, όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος τοπικής βελτίωσης που χρησιμοποιείται, είναι αυτή της απότομης καθόδου (steepest descent method). Όντας αιτιοκρατική μέθοδος βελτιστοποίησης, η μέθοδος της καθόδου βασίζεται στον υπολογισμό της κλίσης των εκάστοτε συναρτήσεων στόχων (δεδομένου ότι είναι εφικτός). Επομένως, για να πραγματοποιηθεί χρήση του AMA σε ένα αερο – υδροδυναμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων, πρέπει να υπάρχει κατάλληλο λογισμικό ‘φτηνού’ και γρήγορου υπολογισμού των παραγώγων των συναρτήσεων στόχων. Η πλέον συνηθισμένη μέθοδος υπολογισμού κλίσης μιας συνάρτησης είναι αυτή των πεπερασμένων διαφορών, αλλά λόγω του αυξημένου υπολογιστικού κόστους της, κρίνεται ασύμφορη για αερο – υδροδυναμικά προβλήματα. Στην παρούσα διπλωματική, όπου εφαρμόζεται ο AMA και δεν είναι δυνατή η εύρεση αναλυτικής έκφρασης της πρώτης παραγώγου των συναρτήσεων στόχων, ο υπολογισμός των παραγώγων γίνεται με χρήση της συνεχούς συζυγούς μεθόδου (adjoint methods), [49, 3, 2, 14, 9, 10], η οποία είναι πολύ αποδοτική και μειώνει σημαντικά το κόστος υπολογισμού των παραγώγων, ειδικά για προβλήματα που διέπονται από μερικές διαφορικές εξισώσεις όπως είναι οι εξισώσεις ροής (εξισώσεις Euler ή Navier - Stokes), αρκεί να μπορεί να γίνει μαθηματική διατύπωση και προγραμματισμός της συζυγούς μεθόδου (κάτι που δυστυχώς απαιτείται για κάθε διαφορετικό πρόβλημα όπου είναι επιθυμητή η χρήση της). Σε περίπτωση

που υπάρχει το ανάλογο λογισμικό, το κόστος υπολογισμού των παραγώγων σχεδόν εξισώνεται με το υπολογιστικό κόστος αξιολόγησης ενός ατόμου από το λογισμικό ΥΡΔ. Το κόστος δε αυτό είναι ανεξάρτητο του πλήθους των προς υπολογισμό παραγώγων.

Η απόφαση για το ποια μέθοδος βελτιστοποίησης θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση, είναι κάτι που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως αν υπάρχει διαθέσιμο λογισμικό, αντίστοιχη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς, και άλλα. Ένας όμως από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες, είναι η ίδια η φύση του εκάστοτε προβλήματος βελτιστοποίησης, καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που αυτό παρουσιάζει κατά την επίλυσή του. Είναι γεγονός πως δεν υπάρχει μια μοναδική μέθοδος βελτιστοποίησης που να χαρακτηρίζεται ως κατάλληλότερη για όλα τα προβλήματα μιας συγκεκριμένης κατηγορίας (όπως τα προβλήματα αερο – υδροδυναμικού σχεδιασμού). Για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα ωστόσο, υπάρχει πλέον - ειδικά στο βαθμό που έχουν εξελιχτεί σήμερα τα πράγματα - μια μέθοδος βελτιστοποίησης που κρίνεται ως η πιο κατάλληλη επιλογή, για τη δεδομένη περίπτωση. Είναι ‘δουλειά’ του μηχανικού-σχεδιαστή να εξετάσει τις παραμέτρους του προβλήματος και να κρίνει κάθε φορά ποια μέθοδο βελτιστοποίησης είναι προτιμότερο να χρησιμοποιήσει, ώστε να επιτύχει για τη δεδομένη υπολογιστική ισχύ που έχει στη διάθεσή του, τα βέλτιστα αποτελέσματα, στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Με βάση τις σκέψεις τις προηγούμενης παραγράφου, τα προβλήματα που επιλέχθηκαν για την πιστοποίηση του AEA και του AMA στην παρούσα διπλωματική, ήταν τα πλέον κατάλληλα για την εφαρμογή των δύο αυτών αλγορίθμων. Συγκεκριμένα:

- Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε πιστοποίηση του AEA και του AMA σε απλά μαθηματικά προβλήματα ενός και δύο στόχων χωρίς περιορισμούς (συνάρτηση της σφαίρας, συνάρτηση **Rastrigin** και το μαθηματικό πρόβλημα δύο στόχων **ZDT3**), προκειμένου να διαπιστωθεί αν και κατά πόσο ο AMA βελτιώνει τη συμπεριφορά του AEA για ίδιες παραμέτρους και κοινό μέγιστο όριο αξιολογήσεων. Επίσης, διεξήχθη για τον AEA και τον AMA παραμετρική μελέτη σχετικά με τις διαστάσεις πλέγματος βάσης του αλγορίθμου σε σχέση με τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών όπου λάμβαναν χώρα οι παράλληλες αξιολογήσεις. Ο σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να αποδείξει ή όχι την ύπαρξη (και κατ’επέκταση το βαθμό) εξάρτησης των δύο αυτών παραμέτρων, καθώς και να ‘εντοπίσει’ το συνδυασμό που εξασφάλιζε βέλτιστα αποτελέσματα σε ανεκτό χρόνο.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο, ο AEA εφαρμοζόταν σε ένα μηχανολογικό πρόβλημα υδροδυναμικής φύσης, που αφορούσε στο σχεδιασμό βέλτιστης μορφής πτερυγίων δρομέα μοντέλου υδροστροβίλου αξονικής ροής για λειτουργία σε πλέγμα υδροστροβίλων. Το πρόβλημα ήταν δύο στόχων, με περιορισμούς. Το λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης επίλυε τις εξισώσεις **Euler**. Το πρόβλημα αυτό παρουσίαζε μια πολύ ενδιαφέρουσα ιδιαι-

τερότητα, που καθιστούσε τον υπολογισμό του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης των αξιολογήσεων αδύνατο: εξαιτίας μιας εσωτερικής επαναληπτικής διαδικασίας για την εύρεση των τιμών δύο γωνιών των πτερυγίων που δεν αποτελούσαν κομμάτι της βελτιστοποίησης, ο συνολικός χρόνος αξιολόγησης μιας υποψήφιας λύσης παρουσίαζε πολύ έντονες διακυμάνσεις (από 20 μέχρι 270 min). Ως εκ τούτου, η χρήση του ΑΕΑ για το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτέλεσε εξαιρετική επιλογή, καθώς η καθυστέρηση αξιολόγησης μιας υποψήφιας λύσης - γεωμετρίας, δεν επηρέαζε τις υπόλοιπες. Ακόμα, για το συγκεκριμένο πρόβλημα πραγματοποιήθηκε σύγκριση του ΑΕΑ με έναν Παράλληλο ΕΑ ως προς την ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων, για ίδιο αριθμό αξιολογήσεων.

- Τέλος, το θερμο-αεροδυναμικό πρόβλημα του πέμπτου κεφάλαιου αφορούσε στο σχεδιασμό βέλτιστης μορφής και τοποθέτησης δέσμης σωλήνων εναλλάκτη θερμότητας εγκάρσιας και αναμίξιμης ροής. Το πρόβλημα ήταν δύο στόχων, χωρίς περιορισμούς, ενώ το λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης επίλυε τις εξισώσεις Navier - Stokes. Για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων χρησιμοποιήθηκε και ο ΑΕΑ και ο ΑΜΑ, καθώς υπήρχε διαθέσιμο λογισμικό υπολογισμού της παραγωγής των συναρτήσεων στόχων του προβλήματος, με τη μέθοδο των συνεχών συζυγών μεθόδων (γεγονός που μείωσε σε μεγάλο βαθμό το κόστος υπολογισμού της, προσφέροντας έτσι πλεονέκτημα του ΑΜΑ έναντι του ΑΕΑ). Για τους δύο αλγόριθμους, πραγματοποιήθηκε σύγκριση ως προς την ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 2

Ασύγχρονοι Μιμητικοί Αλγόριθμοι

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στην πλειοψηφία των εφαρμογών της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά γίνεται μια σύντομη αναφορά στους Σύγχρονους Εξελικτικούς Αλγόριθμους (ΕΑ), ενώ στη συνέχεια περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των Ασύγχρονων Εξελικτικών Αλγόριθμων (ΑΕΑ). Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη μετάβαση από τους ΑΕΑ στους Ασύγχρονους Μιμητικούς Αλγόριθμους (ΑΜΑ).

2.1 Εισαγωγή στους Εξελικτικούς Αλγορίθμους

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (ΕΑ) αποτελούν υπολογιστικές μεθόδους που αναζητούν την εύρεση βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος, χρησιμοποιώντας τεχνικές εμπνευσμένες από τις αρχές εξέλιξης των ειδών, όπως διατυπώθηκαν για πρώτη φορά από τον **Charles Robert Darwin** το 1859, [5]. Παρότι αναπτύχθηκαν κυρίως κατά τη δεκαετία του 1990 λόγω εξάπλωσης της τεχνολογίας των υπολογιστικών συστημάτων μεγάλης ισχύος, η χρήση τους ως μέθοδος βελτιστοποίησης είχε προταθεί ήδη από το 1960, από τον **John Henry Holland**, [16].

Σύμφωνα με τη δαρβινική θεωρία, στη φύση ο αγώνας για επιβίωση - κυρίως μεταξύ των ατόμων του ίδιου είδους - είναι αυτός που διαμορφώνει τους κανόνες φυσικής επιλογής του καλύτερου γενετικά ατόμου. Τα πιο επιτυχημένα άτομα έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες επιβίωσης στο απαιτητικό περιβάλλον όπου ζουν, συνεπώς είναι ταυτόχρονα πιθανότερο να αναπαράχθουν και να αποκτήσουν απογόνους με εξίσου καλά, αν όχι καλύτερα χαρακτηριστικά από αυτά των γονέων. Κατ' ανάλογο τρόπο, οι ΕΑ χειρίζονται πληθυσμούς υποψήφιων ατόμων (λύσεων) που εξελίσσονται συγχρόνως σε κάθε γενιά και όχι μεμονωμένα άτομα (**population-based methods**). Τα καλύτερα άτομα κάθε γενιάς επιλέγονται - βάσει της τιμής της αντίστοιχης συνάρτησης στόχου - να συμμετάσχουν στις εξελικτικές διαδικασίες (επιλογή γονέων, διαστα-

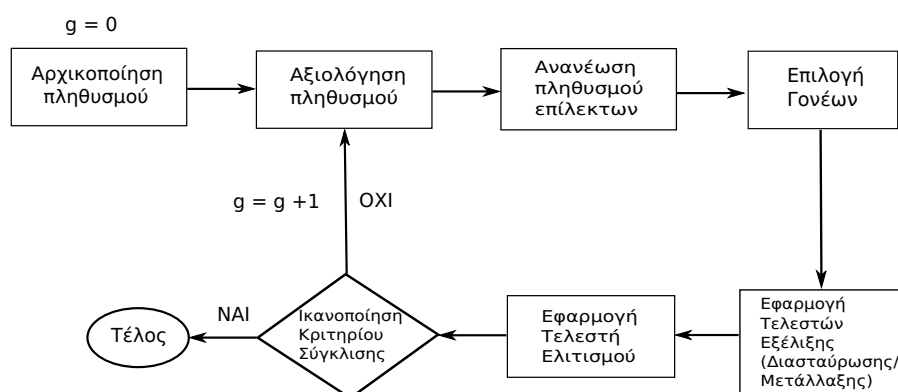
ύρωση, μετάλλαξη) που θα οδηγήσουν στη δημιουργία των απογόνων της επόμενης γενιάς. Ωστόσο, παρέχεται η δυνατότητα (μέσω πιθανοτικής επιλογής) και στα χειρότερα μέλη του πληθυσμού μιας γενιάς να επιβιώσουν. Λόγω ύπαρξης αυτής της στοχαστικότητας που υπεισέρχεται στον αλγόριθμο, οι ΕΑ κατατάσσονται στις στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης, συνεπώς βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι δεν εγκλωβίζονται εύκολα σε τοπικά ακρότατα. Μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης, αρκεί να υπάρχει κατάλληλο λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης. Μοναδικό τους μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι για να συγκλίνει ο αλγόριθμος στη βέλτιστη λύση, απαιτείται μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων. Γίνεται έτσι αντιληπτό, ότι αν το λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης που χρησιμοποιείται είναι χρονοβόρο, τότε ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία μπορεί να γίνει ασύμφορα μεγάλος.

2.2 Περιγραφή Εξελικτικού Αλγορίθμου

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, κυρίαρχο χαρακτηριστικό των ΕΑ είναι ότι χειρίζονται πληθυσμούς υποψήφιας λύσεων, τις οποίες αξιολογούν ανά γενιά ([52, 7, 23, 20, 44]). Είτε πρόκειται για πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός στόχου, είτε για πρόβλημα πολλών στόχων, ισχύουν τα εξής: Σε κάθε γενιά g του ΕΑ συνυπάρχουν τρία σύνολα ατόμων: το σύνολο των γονέων (έστω μ σε αριθμό), το σύνολο των απογόνων (με λ μέλη) και το σύνολο των επίλεκτων ατόμων (**elite**) του πληθυσμού (με έστω e μέλη). Το σύνολο των ατόμων της **elite** αποθηκεύει τα καλύτερα άτομα που έχουν προκύψει από τις εξελικτικές διαδικασίες, μέχρι την τρέχουσα γενιά. Περιληπτικά, τα στάδια ενός ΕΑ έχουν ως εξής: Αρχικά επιλέγονται ορισμένες βασικές παράμετροι, όπως το μέγεθος των πληθυσμών γονέων μ και απογόνων λ και γίνεται τυχαία αρχικοποίηση ($g = 0$) όλων των ατόμων του πληθυσμού με τη βοήθεια μιας γεννήτριας τυχαίων αριθμών (**RNG**). Στη συνέχεια, αξιολογούνται τα λ άτομα του συνόλου των απογόνων. Αφού αξιολογηθούν όλα τα άτομα της τρέχουσας γενιάς, ανανεώνεται το σύνολο των επίλεκτων ατόμων e , με κριτήριο την τιμή της αντίστοιχης συνάρτησης στόχου. Έπειτα, εφαρμόζεται ο τελεστής επιλογής μ γονέων. Οι μ γονείς της επόμενης γενιάς $g + 1$ επιλέγονται από τους λ απογόνους της τρέχουσας γενιάς g . Ακολουθεί η εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης (διασταύρωσης/μετάλλαξης) στα μ άτομα που επιλέχθηκαν να αποτελέσουν τους γονείς της επόμενης γενιάς. Επόμενο στάδιο, είναι η εφαρμογή του τελεστή ελιτισμού, με τον οποίο αντικαθιστούνται άτομα του συνόλου των λ απογόνων από επίλεκτα άτομα που ανήκουν στην **elite**. Με την τεχνική αυτή του ελιτισμού, επιτυγχάνεται η επόμενη γενιά να μη δώσει βέλτιστη λύση χειρότερη από αυτήν της προηγούμενης γενιάς. Σε αυτό το σημείο, ο αλγόριθμος ελέγχει αν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης που έχει τεθεί για το συγκεκριμένο πρόβλημα που βελτιστοποιείται (μπορεί να αφορά είτε ένα μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, είτε μια επιθυμητή τιμή της συνάρτησης ή των συναρτήσεων στόχου). Αν το κριτήριο σύγκλισης

ικανοποιείται, η διαδικασία τερματίζει, έχοντας αποθηκεύσει το σύνολο των μέχρι τότε βέλτιστων λύσεων. Διαφορετικά, τα μ άτομα που είχαν δημιουργηθεί στο ακριβώς προηγούμενο στάδιο στέλνονται για αξιολόγηση και έτσι αρχίζει η δημιουργία μιας νέας γενιάς.

Τα στάδια ενός Εξελικτικού Αλγορίθμου που περιγράφηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται συνοπτικά στο σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.1: Στάδια Εξελικτικού Αλγορίθμου. Η διαδικασία τερματίζει όταν ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης που έχει οριστεί, διαφορετικά δημιουργείται η επόμενη γενιά ατόμων.

2.3 Από τους Σύγχρονους στους Ασύγχρονους Εξελικτικούς Αλγορίθμους

Οι Ασύγχρονοι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (ΑΕΑ) αποτελούν κατηγορία των Εξελικτικών Αλγορίθμων (ΕΑ) και συνεπώς εμπεριέχουν όλη τη φιλοσοφία τους, παρουσιάζοντας όμως μια θεμελιώδη διαφορά: στους ασύγχρονους ΕΑ δεν υφίσταται η έννοια της γενιάς. Για να γίνει αντιληπτό το γιατί το χαρακτηριστικό αυτό των ΑΕΑ τους δίνει σημαντικό προβάδισμα έναντι των σύγχρονων ΕΑ, πρέπει να προηγηθεί μια σύντομη περιγραφή των δεύτερων.

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι, όπως περιγράφηκε και προηγούμενα, χειρίζονται πληθυσμούς υποψήφιας λύσεων, με τη διαρκή, αλλά συγχρονισμένη εναλλαγή γονέων και απογόνων ([17, 25, 30]). Επαναλαμβάνεται εδώ, πολύ συνοπτικά, μια απλή περιγραφή της λογικής που ακολουθεί ο αλγόριθμος: έπειτα από g γενιές που έχουν αξιολογηθεί από τον αλγόριθμο, από την 'υπάρχουσα' γενιά μ γονέων που έχουν επιλεγεί θα προκύψουν λ απόγονοι (στη $g + 1$ γενιά), αφού εφαρμοστούν οι εξελικτικές διαδικασίες (διασταύρωση, μετάλλαξη, αξιολόγηση) σε όλα τα άτομα του πληθυσμού. Αν η διαδικασία αυτή εκτελεστεί σειριακά, ο υπολογιστικός χρόνος ολοκλήρωσής της ενδέχεται να γίνει ασύμφορα μεγάλος - ιδιαίτερα αν το λογι-

σμικό αξιολόγησης είναι χρονοβόρο (π.χ. αν ο επιλύτης ροής γύρω από μια αεροτομή σε πρόβλημα αεροδυναμικής χρησιμοποιεί τις εξισώσεις Navier Stokes) με αποτέλεσμα το υπολογιστικό κόστος κάθε αξιολόγησης ενός ατόμου να είναι σημαντικό - δεδομένου ότι, ως στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης, ο ΕΑ τελικά θα συγκλίνει στη βέλτιστη λύση (ή στις βέλτιστες λύσεις του μετώπου Pareto), αλλά έπειτα από μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Αν η διαδικασία εκτελεστεί παράλληλα - επομένως πρόκειται για Παράλληλο ΕΑ, [11, 26, 51] - σε περισσότερους από έναν επεξεργαστές, τότε επιτυγχάνεται μεν σημαντική εξοικονόμηση του χρόνου ολοκλήρωσης των αξιολογήσεων (wall clock time), αλλά όχι βελτιστοποίησή του, καθότι κατά τη διάρκεια αξιολόγησης μιας γενιάς δημιουργείται η ανάγκη συγχρονισμού των χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών. Το γεγονός αυτό οφείλεται πάλι στο βασικό γνώρισμα των σύγχρονων ΕΑ (και των ΠΕΑ κατ' επέκταση) που είναι ότι χειρίζονται πληθυσμούς ατόμων: Αν, για παράδειγμα, καθυστερήσει να επιστρέψει (έστω και) ένα άτομο από την αξιολόγηση, τότε δεν μπορεί να ξεκινήσει η αξιολόγηση της επόμενης γενιάς, με αποτέλεσμα κάποιοι επεξεργαστές (ή και όλοι εκτός από αυτόν που εκτελεί την 'τελευταία' αξιολόγηση) να παραμένουν αδρανείς, μέχρι να ολοκληρωθεί η αξιολόγηση όλων των ατόμων της 'τρέχουσας' γενιάς. Ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί αριθμός επεξεργαστών ίδιος με τον αριθμό των ατόμων προς αξιολόγηση, πάλι δεν μπορεί να εξασφαλιστεί ότι θα επιτυγχάνεται 100 % εκμετάλλευση όλων των επεξεργαστών καθόλη τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Τον ολοκληρωτικό αυτό βαθμό εκμετάλλευσης ολόκληρης της υπολογιστικής ισχύος που είναι διαθέσιμη κάθε χρονική στιγμή, έρχονται να επιτύχουν οι Ασύγχρονοι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι στους οποίους καταργείται η έννοια της γενιάς. Οι εξελικτικές διαδικασίες εφαρμόζονται σε κάθε άτομο του πληθυσμού μεμονωμένα, με τη διασταύρωση για το σχηματισμό ενός νέου ατόμου να προκύπτει από δύο ή περισσότερα (ανάλογα με τις επιλογές του μηχανικού-προγραμματιστή) άλλα άτομα του πληθυσμού. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφεται και η ανάγκη συγχρονισμού των χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών, αφού ακόμα και αν η αξιολόγηση ενός ατόμου καθυστερήσει, αυτό δεν επηρεάζει τις επόμενες αξιολογήσεις των ατόμων του υπόλοιπου πληθυσμού, οι οποίες πραγματοποιούνται κανονικά σε όσους επεξεργαστές είναι διαθέσιμοι, έχοντας μόλις ολοκληρώσει μια προηγούμενη αξιολόγηση.

2.3.1 Ορισμός Προβλήματος Βελτιστοποίησης

Έστω πρόβλημα βελτιστοποίησης M στόχων όπου επιδιώκεται η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της διανυσματικής συνάρτησης κόστους $\vec{F}(\vec{b})$ της μορφής

$$\min \vec{F}(\vec{b}) = \min \{F_1(\vec{b}), \dots, F_M(\vec{b})\} \quad (2.1)$$

όπου \vec{b} είναι το διάνυσμα των N μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος, δηλαδή $\vec{b} \in \mathcal{R}^N$.

Η κάθε μεταβλητή σχεδιασμού οριοθετείται από μία ανώτερη και μια κατώτερη επιτρεπόμενη τιμή, b_i^U και b_i^L αντίστοιχα, με $i = 1, N$.

Έστω ακόμα, ότι πρέπει να ικανοποιούνται M_1 περιορισμοί ανισό-ισότητας

$$c_j(\vec{b}) \leq c_j^{thres}, \quad j = 1, M_1 \quad (2.2)$$

όπου c_j είναι οι M_1 συναρτήσεις περιορισμών.

2.3.2 Διαχείριση Περιορισμών

Αν το πρόβλημα βελτιστοποίησης υπόκειται σε περιορισμούς (υπό τη μορφή που παρουσιάστηκαν παραπάνω), ο ίδιος ο αλγόριθμος καλείται να εξασφαλίσει ότι μετά το τέλος κάθε αξιολόγησης ενός ατόμου ικανοποιούνται οι εκάστοτε M_1 περιορισμοί $c_j(\vec{b})$, $j = 1, M_1$ που έχουν οριστεί από το χρήστη. Οι περιορισμοί ενσωματώνονται στη συνάρτηση κόστους με τη βοήθεια συναρτήσεων ποινής $Penalty(j)$, οι οποίες προσαυξάνουν κατάλληλα κάθε συνιστώσα της συνάρτησης κόστους $\vec{F}(\vec{b})$, [7, 37]. Για τη συνάρτηση κόστους που έχει λάβει ποινή, χρησιμοποιείται ο συμβολισμός $\vec{F}_p(\vec{b})$. Δηλαδή

$$\vec{F}_p(\vec{b}) = \vec{F}(\vec{b}) + \varpi Penalty(j) \quad (2.3)$$

όπου ϖ ένας συντελεστής που ορίζει το βαθμό που επηρεάζουν οι περιορισμοί την τιμή της συνάρτησης κόστους. Η τιμή του μπορεί να τροποποιηθεί από το χρήστη, ανάλογα με το πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Σε μαθηματική γραφή, οι όροι της συνάρτησης ποινής $Penalty(j)$ όπου $j = 1, M_1$, διαμορφώνονται ως εξής:

$$Penalty_j = \begin{cases} 0 & \text{αν } c_j(\vec{b}) \leq c_j^{thres} \\ \exp(w_{pj} \frac{c_j - c_j^{thres}}{c_j^{dp} - c_j}) & \text{αν } c_j^{thres} \leq c_j(\vec{b}) \leq c_j^{dp} \\ \infty & \text{αν } c_j(\vec{b}) \geq c_j^{dp} \end{cases} \quad (2.4)$$

Αν η υποψήφια λύση \vec{b} ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς, τότε η συνάρτηση ποινής λαμβάνει την τιμή 0, επομένως η τιμή της συνάρτησης κόστους $\vec{F}(\vec{b})$ παραμένει ανεπηρέαστη και η διαδικασία συνεχίζεται κανονικά. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή μία από τις υποψήφιες λύσεις παραβιάζει έστω και έναν από τους τεθέντες περιορισμούς, επιβάλλεται μια ποινή (**Death Penalty**) στην τιμή της συνάρτησης κόστους που σχετίζεται με τη λύση αυτή.

Σε ορισμένες περιπτώσεις προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι χρήσιμος ο ορισμός ενός περιορισμένου διαστήματος στο χώρο των λύσεων, στο οποίο επιτρέπεται η ύπαρξη υποψήφιας λύσεων που παραβιάζουν σε μικρό βαθμό τους τεθέντες περιορισμούς. Η λογική αυτή βασίζεται στο ότι, κατά τις αρχικές αξιολογήσεις που θα εκτελέσει ο αλγόριθμος ενδέχεται να υπάρχουν λύσεις που παραβιάζουν μεν κάποιους περιορισμούς, αλλά έχουν πιθανότητες να εξελιχθούν μελλοντικά σε ‘καλές’ υποψήφιες λύσεις. Η στρατηγική αυτή ‘χαλάρωσης’ των ορίων των περιορισμών δεν συναντάνται σπάνια, καθότι κατ’ αυτό τον τρόπο ‘επιτρέπεται’ στη μέθοδο βελτιστοποίησης να προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση και από την περιοχή των μη-αποδεκτών λύσεων, απ’ όπου η σύγκλιση μπορεί να είναι ταχύτερη σε σχέση με την περιοχή των αποδεκτών λύσεων.

Για να γίνει εκμετάλλευση αυτής της δυνατότητας που παρέχει ο αλγόριθμος, ο χρήστης πρέπει να εισάγει για κάθε περιορισμό μια τιμή c_j^{dp} , η οποία να είναι μεγαλύτερη (ή ίση) της τιμής c_j^{thres} της συνάρτησης περιορισμών του προβλήματος (το πόσο θα διαφέρει η τιμή της c_j^{dp} από την τιμή της c_j^{thres} υπόκειται αποκλειστικά στη δικαιοδοσία του χρήστη). Έτσι, αν μια υποψήφια λύση που επιστρέφει από αξιολόγηση έχει τιμή c_j , όπου $c_j^{thres} \leq c_j \leq c_j^{dp}$, τότε της επιτρέπεται να επιβιώσει, δηλαδή δεν επιβάλλεται ποινή απειρισμού των συνιστωσών της $\vec{F}(\vec{b})$ που της αντιστοιχεί. Ωστόσο, η συνάρτηση κόστους λαμβάνει μια εκθετική ποινή, η τιμή της οποίας καθορίζεται επίσης από το χρήστη. Ο καθορισμός της γίνεται μέσω ενός συντελεστή ποινής w_{pj} ο οποίος λαμβάνει μη – αρνητικές πραγματικές τιμές. Ο όρος εκθετικής ποινής ορίζεται από τον τύπο

$$Penalty_j = \exp(w_{pj} \frac{c_j - c_j^{thres}}{c_j^{dp} - c_j}) \quad (2.5)$$

Αν τέλος, μια υποψήφια λύση επιστρέψει από αξιολόγηση με τιμή c_j που είναι μεγαλύτερη της τιμής c_j^{dp} , τότε η συνάρτηση ποινής λαμβάνει μια πολύ μεγάλη τιμή, δηλαδή πρακτικά απειρίζεται. Σε αυτήν την περίπτωση, απειρίζεται και η τιμή της αντίστοιχης συνάρτησης κόστους, με αποτέλεσμα η ‘τιμωρημένη’ λύση να αποκλείεται από υποψήφια βέλτιστη λύση (αν πρόκειται για πρόβλημα ενός στόχου) ή από την είσοδό της στο μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων (αν το πρόβλημα είναι πολλών στόχων).

Συχνά οι περιορισμοί ενός προβλήματος βελτιστοποίησης δεν βρίσκονται στη μορφή που περιγράφηκε προηγούμενα. Σε αυτήν την περίπτωση, μπορεί να γίνει κατάλληλος μετασχηματισμός τους, έτσι ώστε να είναι εφικτή η εισαγωγή τους στον αλγόριθμο.

Αν οι περιορισμοί έχουν τη μορφή $c_j(\vec{b}) \geq c_j^{thres}$, θα πρέπει να μετασχηματιστούν ως εξής

$$-c_j(\vec{b}) \leq -c_j^{thres} \quad (2.6)$$

Αν οι περιορισμοί είναι σε μορφή ισότητας $c_j(\vec{b}) = c_j^{desir}$, δηλαδή αν πρέπει να λάβουν μια συγκεκριμένη επιθυμητή τιμή, τότε είναι απαραίτητη η μετατροπή τους σε ανισοτική μορφή

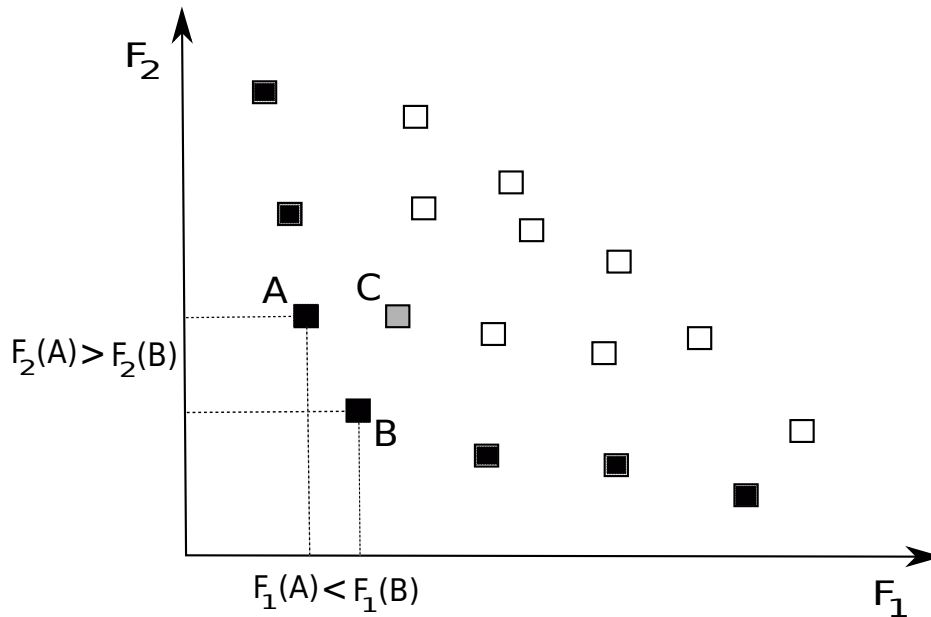
$$|c_j(\vec{b}) - c_j^{desir}| < \varepsilon \quad (2.7)$$

όπου ε μία πολύ μικρή (σχεδόν μηδενική) θετική ποσότητα, την τιμή της οποίας μπορεί να καθορίσει ο χρήστης.

2.3.3 Προβλήματα Βελτιστοποίησης Πολλών Στόχων - Μέτωπο των κατά **Pareto** Βέλτιστων Λύσεων

Για πρόβλημα βελτιστοποίησης M στόχων, όπου $M > 1$, ορίζονται και οι αντίστοιχες M συναρτήσεις κόστους $F_m(\vec{b})$, $\vec{b} \in \mathfrak{X}_N$ προς ελαχιστοποίηση. Επειδή στην περίπτωση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης δεν αναζητείται μοναδική βέλτιστη λύση, αλλά σύνολο υποψήφιων βέλτιστων λύσεων, δημιουργείται η δυσκολία ιεράρχησής τους στον πολυδιάστατο χώρο των συναρτήσεων στόχων. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, εισάγεται η έννοια του μετώπου των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, [41].

Η ιεράρχιση των υποψήφιων λύσεων του μετώπου γίνεται βάση κριτηρίων κυριαρχίας, [18, 22], σύμφωνα με τα οποία η λύση $\vec{b}_1 \in \Omega$, όπου $\Omega \subset \mathfrak{X}_N$ το σύνολο των αποδεκτών λύσεων, κυριαρχεί της λύσης $\vec{b}_2 \in \Omega$ (συμβολικά $\vec{b}_1 < \vec{b}_2$) όταν και μόνο όταν ισχύει ότι $F_m(\vec{b}_1) \leq F_m(\vec{b}_2)$ για όλους τους στόχους $m = 1, M$ και συγχρόνως, για τουλάχιστον ένα στόχο k από αυτούς η προηγούμενη σχέση ισχύει σε ανισοτική μορφή $F_k(\vec{b}_1) < F_k(\vec{b}_2)$. Έτσι, ως μέτωπο Pareto σε ένα σύνολο διαθέσιμων λύσεων ενός προβλήματος, ορίζεται το υποσύνολο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων. Πρέπει να αναφερθεί ότι δύο λύσεις του μετώπου Pareto είναι αδύνατο να συγκριθούν μεταξύ τους, καθότι σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο στόχων για παράδειγμα, αναμένεται μια λύση να υπερτερεί ως προς τον ένα στόχο και να υστερεί ως προς κάποιον άλλο, σε σύγκριση με μία άλλη λύση που συμπεριφέρεται αντιστρόφως (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Τα μέλη του πληθυσμού που ανήκουν στο μέτωπο Pareto σημειώνονται με μαύρο χρώμα. Η λύση C δεν ανήκει στο μέτωπο Pareto, καθώς κυριαρχείται από τις λύσεις A και B . Οι λύσεις A , B ανήκουν στο μέτωπο, αλλά η A υπερτερεί σε σχέση με τη B ως προς το στόχο F_2 , ενώ υστερεί ως προς το στόχο F_1 .

Η λογική των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την ιεράρχηση των λύσεων του μετώπου, βασίζεται στον υπολογισμό μιας ενιαίας βαθμωτής τιμής της συνάρτησης κόστους (Utility Function) που λαμβάνουν όλα τα μέλη του πληθυσμού. Δύο χαρακτηριστικές μέθοδοι ιεράρχησης λύσεων είναι η NSGA και η SPEA 2. Αυτή που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική είναι η μέθοδος SPEA 2, καθώς μια λύση ιεραρχείται ανάλογα με κριτήρια κυριαρχίας της ως προς το σύνολο όλων των υπόλοιπων λύσεων του πληθυσμού και όχι ανά υποσύνολα λύσεων, όπως συμβαίνει με τη μέθοδο NSGA. Ωστόσο, πριν την περιγραφή της SPEA 2 που γίνεται σε ξεχωριστή υποενότητα, ακολουθεί εδώ μια σύντομη αναφορά στη μέθοδο NSGA, για λόγους πληρότητας.

Ο αλγόριθμος NSGA (Nondominated Sorting Genetic Algorithm), [19], ιεραρχεί τις υποψήφιες λύσεις σε προβλήματα πολλών στόχων ως εξής: Αρχικά, εντοπίζονται όλες οι λύσεις που ανήκουν στο 'πρώτο μέτωπο' (Front 1), δηλαδή εκείνες οι λύσεις που δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη. Προκειμένου να εντοπιστούν τα άτομα που ανήκουν στο 'επόμενο μέτωπο', ο αλγόριθμος 'αγνοεί' προσωρινά τα άτομα που κατατάχθηκαν στο ακριβώς προηγούμενο μέτωπο. Έτσι, το νέο σύνολο των λύσεων που δεν κυριαρχούνται από καμία άλλη θα είναι το 'δεύτερο μέτωπο'. Κάθε λύση λαμβάνει μια τιμή, έστω P_i , ανάλογα με το επιμέρους μέτωπο στο

οποίο ανήκει. Εκτιμάται ακόμα η πυκνότητα των λύσεων κάθε επιμέρους μετώπου, δηλαδή το πόσο απέχει μία λύση ενός επιμέρους μετώπου από τις υπόλοιπες λύσεις που ανήκουν στο ίδιο μέτωπο, σε σχέση με ένα δεδομένο μέγεθος απόστασης. Το μέγεθος αυτό, έστω σ , ορίζεται κατά βούληση του χρήστη και αντιπροσωπεύει μια ακτίνα στο χώρο των στόχων. Κέντρο του νοητού κύκλου που ορίζεται από την ακτίνα σ , αποτελεί κάθε φορά η λύση ως προς την οποία θα συγκριθούν - βάσει ενός κριτηρίου που βασίζεται στις αποστάσεις - οι υπόλοιπες λύσεις του ίδιου επιμέρους μετώπου. Κάθε λύση λαμβάνει μια δεύτερη τιμή, έστω Sh_i ανάλογα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το κριτήριο της απόστασης. Η ενιαία τιμή κόστους Φ_i των ατόμων του πληθυσμού είναι το γινόμενο των δύο παραγόντων P_i και Sh_i .

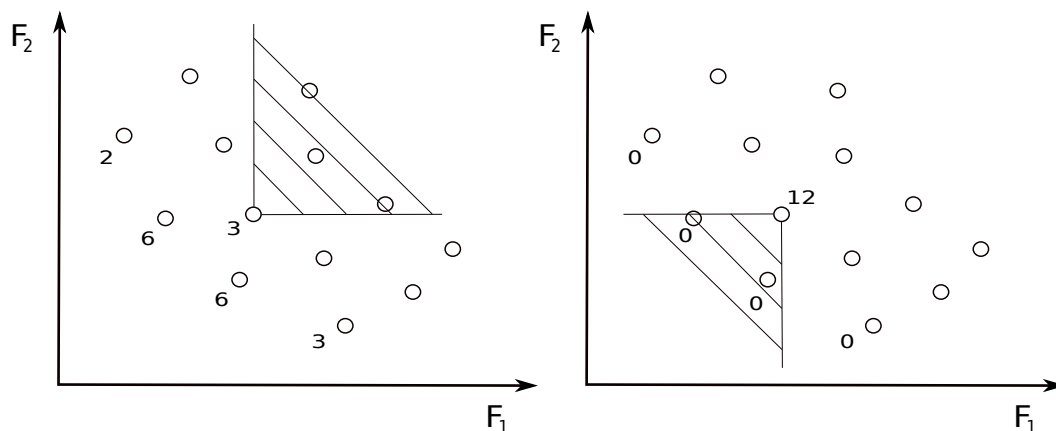
2.3.4 Αλγόριθμος **SPEA 2**

Ο αλγόριθμος **SPEA 2** (Strength Pareto Evolutionary Algorithm), [13], χρησιμοποιείται σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλών στόχων και επί της ουσίας αποτελεί μια μέθοδο βαθμονόμησης των ατόμων του πληθυσμού - συμπεριλαμβανομένου και του πληθυσμού των επιλέκτων (elite) - βάσει της οποίας γίνεται η επιλογή των μη-κυριαρχούμενων μελών του μετώπου Pareto. Στόχος της μεθόδου είναι ο υπολογισμός μιας ενιαίας τιμής κόστους για τα άτομα του πληθυσμού, βασιζόμενη σε κριτήρια κυριαρχίας και απόστασης μεταξύ των ατόμων στο χώρο των λύσεων. Η πρόσδοση κατάλληλης τιμής Φ_i στα άτομα του πληθυσμού γίνεται μέσω της ακόλουθης διαδικασίας:

Αρχικά, για κάθε άτομο i του πληθυσμού ορίζεται μια τιμή δυναμικότητας (Strength) Str_i , ανάλογα με τον αριθμό των υπόλοιπων ατόμων στα οποία έχει κυριαρχήσει (σχήμα 2.3, αριστερά). Σε δεύτερο χρόνο, αποδίδεται σε κάθε άτομο του πληθυσμού μια πρώτη τιμή κόστους - δηλαδή ο παράγοντας R_i - που προκύπτει από το άθροισμα όλων των τιμών δυναμικότητας Str_i των ατόμων που κυριαρχούν σε αυτό (σχήμα 2.3, δεξιά).

Στη συνέχεια, υπολογίζεται πάλι για κάθε άτομο ο παράγοντας D_i που εκφράζει την πυκνότητα της περιοχής γύρω από το άτομο i : γίνεται υπολογισμός της απόστασης κάθε ατόμου από τα υπόλοιπα στο χώρο των στόχων. Ακολουθεί κατάταξη των αποστάσεων σε αύξουσα σειρά και λαμβάνεται η k -ιστή, όπου το k ισούται με την τετραγωνική ρίζα του συνολικού πληθυσμού.

Τέλος, η ενιαία τιμή κόστους Φ_i των ατόμων του πληθυσμού προκύπτει ως άθροισμα των τιμών των δύο παραγόντων R_i και D_i . Σε προβλήματα ελαχιστοποίησης για παράδειγμα, υπερτερούν τα άτομα που έχουν τη μικρότερη τιμή Φ_i .



Σχήμα 2.3: Απεικόνιση του συνόλου των λύσεων στο χώρο των στόχων. Απόδοση σε κάθε λύση τιμής δυναμικότητας Str_i (αριστερά) και του παράγοντα R_i (δεξιά).

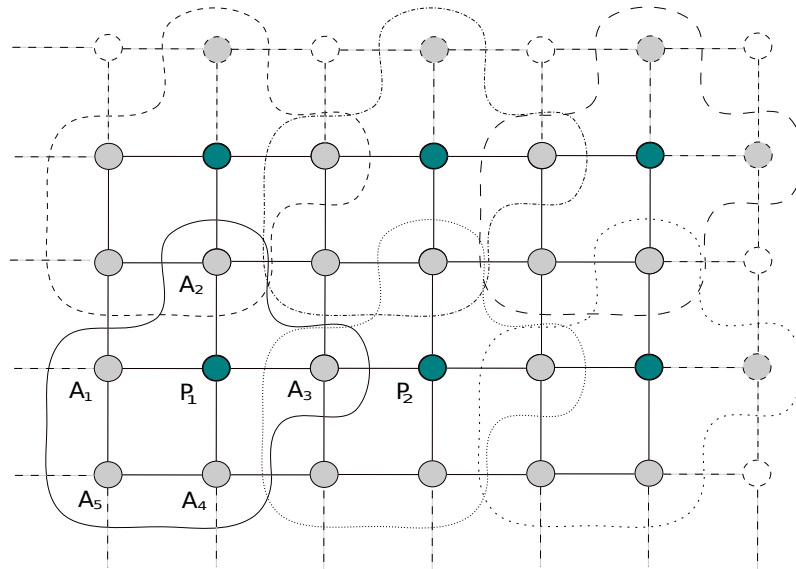
2.4 Ασύγχρονος Εξελικτικός Αλγόριθμος

Ο Ασύγχρονος Εξελικτικός Αλγόριθμος (ΑΕΑ) που αναπτύχθηκε στο ΕΘΣ/ΕΜΠ ([39, 38, 46]) και χρησιμοποιείται στις εφαρμογές της παρούσας διπλωματικής, φέρει όλα τα χαρακτηριστικά των ΕΑ που περιγράφηκαν παραπάνω, καθώς και τη δυνατότητα πλήρους εκμετάλλευσης όλης της εκάστοτε διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος, αφού μετά την ολοκλήρωση της αξιολόγησης ενός ατόμου, ο επεξεργαστής είναι διαθέσιμος για να διαχειριστεί την επόμενη προς αξιολόγηση υποψήφια λύση. Πρόκειται για δομημένο αλγόριθμο, καθότι ο πληθυσμός διατάσσεται σε 2Δ δομημένο πλέγμα, βάσει συγκεκριμένης τοπολογίας που θα περιγραφεί στη συνέχεια, και η οποία καθορίζει τον τρόπο πραγματοποίησης των διάφορων εξελικτικών διεργασιών μεταξύ των υποψήφιων λύσεων - μελών του πληθυσμού που βρίσκονται σε γειτονικούς κόμβους του πλέγματος.

2.4.1 Τοπολογία Πλέγματος Βάσης

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο πληθυσμός του ΑΕΑ που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική ([39, 38, 46]), τοποθετείται στους κόμβους 2Δ δομημένου πλέγματος, διαστάσεων $n_1 \times n_2$, το οποίο παρουσιάζει περιοδικότητα κατά μήκος των απέναντι πλευρών του. Για το λόγο αυτό, τα n_1 και n_2 είναι ζυγοί αριθμοί. Οι διαστάσεις του πλέγματος καθορίζονται από το χρήστη, σύμφωνα με κριτήρια πολυπλοκότητας του προβλήματος και διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος. Το πλέγμα διαμερίζεται σε δήμους (demes), καθένας από τους οποίους αποτελείται από έξι κόμβους (σχήμα 2.4). Ο κεντρικός κόμβος αποτελεί τον πόλο (pole) του δήμου, ενώ οι υπόλοιποι πέντε κόμβοι ονομάζονται πράκτορες (agents) και αποτελούν τα άτομα προς αξιολόγηση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4, κάθε δήμος (που θα συμβολίζεται

ως D_p) μοιράζεται τους τέσσερις από τους πέντε πράκτορες του με τέσσερις γειτονικούς του δήμους, ενώ διαθέτει έναν μόνο πράκτορα που ανήκει αποκλειστικά σε αυτόν. Βάσει αυτής της τοπολογίας γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη ισχυρής αλληλεπίδρασης μεταξύ των δήμων του πλέγματος, γεγονός που συμβάλλει στην ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου. Σε ένα πλέγμα διαστάσεων $N_{mesh} = n_1 \times n_2$, ο αριθμός των πόλων (που ταυτίζεται με τον αριθμό των δήμων του πλέγματος) θα ισούται με $N_{poles} = N_{mesh}/4$, ενώ ο αριθμός των πρακτόρων θα είναι $N_{agents} = 3N_{mesh}/4$. Ακόμα, προκειμένου να γίνεται εκμετάλλευση όλης της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος, πρέπει να ισχύει ότι $N_{agents} \geq N_{CPU}$, με N_{CPU} τον αριθμό των διαθέσιμων επεξεργαστών. Από τους έξι κόμβους του κάθε δήμου, μόνο οι πράκτορες αποτελούν τα πέντε άτομα - υποψήφιας λύσεις που θα αξιολογούνται κάθε φορά. Οι πόλοι αποτελούν κατά έναν τρόπο την ταυτότητα των δήμων, καθώς εκεί αποθηκεύεται η τιμή του εκάστοτε βέλτιστου ατόμου που ανήκει στο συγκεκριμένο δήμο, η οποία ανανεώνεται συνεχώς από τις τιμές των πρακτόρων που επιστρέφουν από τις αξιολογήσεις. Επίσης, συμμετέχουν στις ενδο- και δια-δημοτικές διεργασίες που αναδεικνύουν την επόμενη υποψήφια λύση (δηλαδή τον επόμενο πράκτορα) ενός δήμου που θα σταλεί για αξιολόγηση, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια.



Σχήμα 2.4: Τοπολογία πλέγματος διαστάσεων 4×6 , όπου παρουσιάζεται η διάταξη 6 δήμων, με τους μαύρους κύκλους να αποτελούν τους πόλους. Για το δήμο του πόλου P_1 , ο πράκτορας A_3 ανήκει στους δήμους P_1 και P_2 , ενώ ο A_5 ανήκει αποκλειστικά στον P_1 . Η περιοδικότητα του πλέγματος συμβολίζεται με διακεκομμένες ευθείες γραμμές.

2.4.2 Περιγραφή Αλγορίθμου ΑΕΑ

Ο αλγόριθμος ΑΕΑ αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια, [46]:

1. Έναρξη Αλγορίθμου

Αρχικά επιλέγονται τυχαία τόσα άτομα του πληθυσμού (πράκτορες), όσος είναι και ο αριθμός των διαθέσιμων επεξεργαστών, και αποστέλλονται για αξιολόγηση. Στην περίπτωση που ισχύει ότι $N_{agents} > N_{CPU}$, κάποιοι πράκτορες παραμένουν προσωρινά ανενεργοί. Έχει προηγηθεί η αρχικοποίηση όλων των ατόμων του πληθυσμού από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών RNG (Random Number Generator).

2. Επιστροφή Πράκτορα από Αξιολόγηση

Μόλις ο πράκτορας αξιολογηθεί και επιστρέψει στο δήμο (ή στους δήμους) όπου ανήκει, ελέγχεται αν αποτελεί το νέο καλύτερο άτομο του δήμου ή/και αν θα μπει στο μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων.

3. Απόφαση Αντικατάστασης Πόλου

Όταν ολοκληρωθεί η αξιολόγηση ενός πράκτορα \vec{b}_{agent} , πρέπει να αποφασιστεί αν αυτός θα αντικαταστήσει ή όχι τον πόλο (αν πρόκειται για το μοναδικό πράκτορα που ανήκει αποκλειστικά σε έναν δήμο) ή τους πόλους των δήμων στους οποίους ανήκει. Στους πόλους είναι αποθηκευμένη η τιμή του βέλτιστου - μέχρι εκείνη τη δεδομένη στιγμή - ατόμου του δήμου, \vec{b}_{pole} . Η απόφαση αντικατάστασης ή όχι του πόλου από τον πράκτορα που μόλις επέστρεψε λαμβάνεται μετά την εκτέλεση μιας ενδο-δημοτικής διαδικασίας, που βασίζεται στη σύγκριση των τιμών \vec{b}_{agent} και \vec{b}_{pole} . Αν πρόκειται για πρόβλημα ενός στόχου, τότε η διαδικασία σύγκρισης είναι απλή: αν ισχύει για την τιμή της συνάρτησης στόχου ότι $F(\vec{b}_{agent}) < F(\vec{b}_{pole})$ τότε ο πράκτορας \vec{b}_{agent} αντικαθιστά την τιμή του πόλου. Διαφορετικά, αν ισχύει ότι $F(\vec{b}_{agent}) \geq F(\vec{b}_{pole})$, τότε δεν λαμβάνει χώρα καμία αντικατάσταση και ο πόλος διατηρεί την αποθηκευμένη τιμή του. Αν το πρόβλημα είναι πολλών στόχων, τότε η σύγκριση γίνεται με κριτήρια κυριαρχίας: ο πράκτορας αντικαθιστά τον πόλο αν κυριαρχεί σε αυτόν, δηλαδή αν ισχύει $\vec{b}_{agent} > \vec{b}_{pole}$, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ο πόλος παραμένει ο ίδιος. Αυτή η περίπτωση ωστόσο, αφορά κριτήρια απόλυτης κυριαρχίας. Αν αυτά δεν ισχύουν, τότε στη σύγκριση υπεισέρχονται επιπλέον κριτήρια που εμπεριέχουν ένα βαθμό στοχαστικότητας και σχετίζονται με το κατά πόσο ο πράκτορας ή/και ο πόλος ανήκουν στο σύνολο P_α του μετώπου Pareto. Έτσι, ο πράκτορας \vec{b}_{agent} αντικαθιστά τον πόλο \vec{b}_{pole} , αν ο πρώτος ανήκει στο Pareto, ενώ ο δεύτερος όχι, δηλαδή αν $\vec{b}_{agent} \in P_\alpha$ και $\vec{b}_{pole} \notin P_\alpha$. Στην περίπτωση που πράκτορας και πόλος ανήκουν ή δεν ανήκουν και οι δύο στο μέτωπο Pareto, δηλαδή αν ισχύει ότι $\vec{b}_{agent} \in P_\alpha$ και $\vec{b}_{pole} \in P_\alpha$ ή

$\vec{b}_{agent} \notin P_\alpha$ και $\vec{b}_{pole} \notin P_\alpha$, τότε υπάρχει 50 % πιθανότητα να γίνει η αντικατάσταση του πόλου από τον πράκτορα. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις, ο πόλος παραμένει ίδιος.

4. Επιλογή Πράκτορα για τη Δημιουργία Απογόνου

Ο επόμενος πράκτορας που θα σταλεί για αξιολόγηση στον πρώτο επεξεργαστή που θα είναι διαθέσιμος, επιλέγεται βάσει μιας δια-δημοτικής διαδικασίας από το δήμο (δηλαδή τον πόλο) που έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα. Στον κάθε πόλο αποδίδεται μια τιμή προτεραιότητας Pr_p που αποτελεί το γινόμενο δύο επιμέρους παραγόντων: της προτεραιότητας λόγω ηλικίας Pr_p^{age} και της προτεραιότητας λόγω τιμής της συνάρτησης κόστους Pr_p^{cost} . Δηλαδή

$$Pr_p = Pr_p^{age} Pr_p^{cost} \quad (2.8)$$

Όσον αφορά στην προτεραιότητα λόγω ηλικίας, ο καθορισμός της γίνεται ως εξής: Για κάθε πράκτορα k ορίζεται μια ηλικία A_k ως η διαφορά της τελευταίας αξιολόγησης του συγκεκριμένου πράκτορα από τον αριθμό της τρέχουσας αξιολόγησης. Έτσι, η ηλικία του πόλου ενός δήμου D_p υπολογίζεται ως μέση τιμή των ηλικιών των πέντε πρακτόρων που ανήκουν σε αυτό το δήμο, δηλαδή

$$\bar{A}_p = \frac{1}{5} \sum_{k \in D_p} A_k \quad (2.9)$$

Η προτεραιότητα λόγω ηλικίας κάθε πόλου ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ηλικίας του πόλου προς τη μέγιστη μέση ηλικία μεταξύ όλων των πόλων:

$$Pr_p^{age} = \frac{\bar{A}_p}{\max(\bar{A}_1, \dots, \bar{A}_{N_{poles}})} \quad (2.10)$$

Η προτεραιότητα λόγω τιμής της συνάρτησης κόστους υπολογίζεται βάσει κριτηρίων ισχύος και κυριαρχίας, ανάλογα με αυτά που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο SPEA και βασίζονται στην απόδοση σε κάθε πόλο μιας τελικής συνάρτησης κόστους Φ_p . Αρχικά αποδίδεται μια τιμή ισχύος Str_p σε κάθε πόλο, που ισούται με τον αριθμό των υπόλοιπων πόλων στους οποίους κυριαρχεί. Στη συνέχεια, ο κάθε πόλος p λαμβάνει μια πρώτη τιμή κόστους R_p που αποτελεί το άθροισμα των τιμών ισχύος των πόλων p' από τους οποίους κυριαρχείται:

$$R_p = \sum_{p' > p} Str_{p'} \quad (2.11)$$

Επιπλέον, υπολογίζεται στο χώρο των συναρτήσεων στόχων η απόσταση κάθε πόλου p από τους υπόλοιπους πόλους. Ακολουθεί η κατάταξη των αποστάσεων σε αύξουσα σειρά και επιλέγεται η k -οστή, έστω d_p . Η τιμή της πυκνότητας της περιοχής κοντά σε κάθε πόλο ορίζεται ως

$$D_p = \frac{1}{d_p + 2} \quad (2.12)$$

Έτσι, η προτεραιότητα λόγω τιμής της συνάρτησης κόστους υπολογίζεται από τη σχέση

$$Pr_p^{cost} = \frac{\Phi_p}{\Phi_{max} - \Phi_{min}} \quad (2.13)$$

όπου $\Phi_p = D_p + R_p$, $\Phi_{max} = \max\{\Phi_1, \dots, \Phi_{N_{poles}}\}$ και $\Phi_{min} = \min\{\Phi_1, \dots, \Phi_{N_{poles}}\}$.

Τελικά, ο πράκτορας για τη δημιουργία απογόνου επιλέγεται από το δήμο με τη μεγαλύτερη τιμή προτεραιότητας Pr_p και είναι αυτός με τη μεγαλύτερη ηλικία από τους πέντε, δηλαδή αυτός που δεν έχει σταλεί για αξιολόγηση αφού έχουν παρέλθει αρκετές επαναλήψεις, υπό την προϋπόθεση ότι δεν αξιολογείται ήδη τη στιγμή που λαμβάνει χώρα η συγκεκριμένη διεργασία.

5. Τελεστές Εξέλιξης

- Διασταύρωση

Ο τρόπος διασταύρωσης (**Recombination**) παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με αυτόν που χρησιμοποιείται στη μέθοδο της Διαφορικής Εξέλιξης (**Differential Evolution**, [35]). Η διασταύρωση αποτελεί διαδικασία που εφαρμόζεται στο εσωτερικό του δήμου που έχει επιλεγεί βάσει προτεραιότητας. Συγκεκριμένα, ο σχηματισμός του νέου ατόμου (απογόνου) προς αξιολόγηση \vec{b}_k , προκύπτει από την άθροιση της τιμής του πόλου και της διαφοράς δύο πρακτόρων του δήμου (έστω k_1, k_2), πολλαπλασιασμένης με έναν συντελεστή w , ο οποίος λαμβάνει μια τυχαία τιμή εντός του διαστήματος $[0, 1]$. Δηλαδή:

$$\vec{b}_k = \vec{b}_{pole} + w(\vec{b}_{k_1} - \vec{b}_{k_2}) \quad (2.14)$$

όπου $k_1, k_2 \in D_p$, $k_1 \neq k_2$ και $w \in [0, 1]$.

- Μετάλλαξη

Όσον αφορά στη μετάλλαξη (**Mutation**), ο αντίστοιχος τελεστής καθορίζεται από την πραγματική κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται για τις μεταβλητές σχεδιασμού και έχει πιθανότητα να εφαρμοστεί, η οποία εξαρτάται από τον αριθμό της

τρέχουσας αξιολόγησης. Η τιμή του πράκτορα για κάθε μεταβλητή σχεδιασμού b_{k_i} , αδιαστατοποιείται βάσει του άνω και κάτω ορίου της $[b_i^L, b_i^U]$ και υπόκειται σε μετάλλαξη. Η αδιαστατοποίηση γίνεται σύμφωνα με τη σχέση $\hat{b}_{k_i} = (b_{k_i} - b_i^L)/(b_i^U - b_i^L)$, ενώ η μετάλλαξη ακολουθεί το σχήμα

$$\hat{b}_{k_i} = \hat{b}_{k_i}(1 + w_m) \quad , \quad w_m < 0.5 \quad (2.15)$$

$$\hat{b}_{k_i} = \hat{b}_{k_i}(1 - w_m) \quad , \quad w_m \geq 0.5 \quad (2.16)$$

όπου w_m μια τυχαία τιμή στο διάστημα $[0, 1]$.

Μετά τη μετάλλαξη, η τιμή του πράκτορα επανέρχεται στη διαστατή τιμή της ύστερα από εφαρμογή της σχέσης $b_{k_i} = b_i^L + \hat{b}_{k_i}(b_i^U - b_i^L)$.

Υπάρχει ωστόσο το ενδεχόμενο, μετά την εφαρμογή των τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης, η τιμή που θα προκύψει b_{k_i} για κάποια μεταβλητή (ή μεταβλητές) σχεδιασμού να μην βρίσκεται εντός των ορίων του διαστήματος $[b_i^L, b_i^U]$ που έχει ορίσει ο χρήστης. Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή που προέκυψε υφίσταται διόρθωση όσες φορές χρειάζεται, μέχρι να βρεθεί πάλι εντός των επιθυμητών ορίων. Το σχήμα διόρθωσης είναι

$$b_{k_i} = b_i^L + |b_{k_i} - b_i^L| \quad , \quad b_{k_i} < b_i^L \quad (2.17)$$

$$b_{k_i} = b_i^U + |b_{k_i} - b_i^U| \quad , \quad b_{k_i} > b_i^U \quad (2.18)$$

6. Αποστολή - Αξιολόγηση Νέου Πράκτορα

Ο νέος πράκτορας που επιλέχθηκε και δημιουργήθηκε στα δύο προηγούμενα στάδια του αλγορίθμου στέλνεται για αξιολόγηση στον πρώτο επεξεργαστή που θα είναι διαθέσιμος.

7. Έλεγχος Σύγκλισης Αλγορίθμου

Ελέγχεται αν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης που έχει οριστεί (είτε πρόκειται για μέγιστο αριθμό επαναλήψεων, είτε για μια επιθυμητή τιμή της συνάρτησης στόχου). Αν δεν ικανοποιείται, τότε γίνεται επιστροφή στο στάδιο 2, διαφορετικά ο αλγόριθμος τερματίζει.

2.5 Από τους Ασύγχρονους Δομημένους Εξελικτικούς στους Ασύγχρονους Μιμητικούς Αλγόριθμους

Οι Ασύγχρονοι Μιμητικοί Αλγόριθμοι (AMA) κατατάσσονται στις υβριδικές μεθόδους βελτιστοποίησης που εξελίχθηκαν και εφαρμόζονται τα τελευταία χρόνια. Συνδυάζουν χαρακτηριστικά αλγορίθμων που χειρίζονται πληθυσμούς λύσεων (όπως οι ΑΕΑ) και ευρετικών μεθόδων (όπως οι μέθοδοι τοπικής βελτίωσης), ώστε η αναζήτηση βέλτιστης λύσης να γίνεται περισσότερο αποτελεσματικά. Συνεπώς, οι AMA διατηρούν όλα τα χαρακτηριστικά των ΑΕΑ που περιγράφηκαν προηγουμένως, ενώ παράλληλα βελτιώνουν τη συμπεριφορά του αρχικού αλγορίθμου (ΑΕΑ) εισάγοντας στη μέθοδο αναζήτησης κάποια πληροφορία (υπό τη μορφή της παραγώγου της συνάρτησης στόχου για παράδειγμα) που αφορά αποκλειστικά το πρόβλημα προς βελτιστοποίηση.

Ο πρώτος που χρησιμοποίησε τον όρο ‘meme’ - στα ελληνικά αποδίδεται ως ‘μίμος’ - κατ’ αναλογία προς τον αγγλικό όρο ‘gene’ που σημαίνει ‘γονίδιο’, ήταν ο κοινωνιοβιολόγος Richard Dawkins το 1976, [33]. Το γονίδιο αποτελεί τη βασική μονάδα γενετικής πληροφορίας, ενώ ο μίμος ορίζεται ως ‘μονάδα μίμησης’. Σύμφωνα με τις απόψεις του Dawkins, η εξέλιξη ενός ατόμου δε στηρίζεται αποκλειστικά στη μεταβίβαση γενετικών χαρακτηριστικών μέσω γονιδίων, αλλά ακολουθεί μια αρκετά πιο πολύπλοκη διαδικασία που εκτός της γενετικής προδιάθεσης, εμπλέκει και το εκάστοτε περιβάλλον στο οποίο ζει και αναπτύσσεται το άτομο αυτό, μαζί με άλλα άτομα του ίδιου είδους. Οι μίμοι δεν κληρονομούνται μέσω εξελικτικών διαδικασιών όπως διασταύρωση ή/και μετάλλαξη, αλλά μέσω της επικοινωνίας των ατόμων μεταξύ τους, και ορίζουν τάσεις και συμπεριφορές. Τα άτομα ενός είδους παρατηρούν από την πρώτη στιγμή της γέννησής τους τον τρόπο συμπεριφοράς των υπόλοιπων ατόμων του είδους τους και δεν αργούν να μιμηθούν τις συμπεριφορές αυτές, συνειδητά αλλά και ασυνειδητά, προκειμένου να ενταχθούν όσο το δυνατόν καλύτερα στο περιβάλλον στο οποίο ζουν και αναπτύσσονται.

Εμπνευσμένος τόσο από τη θεωρία εξέλιξης των ειδών του Δαρβίνου, όσο και από τις απόψεις του Dawkins περί απόκτησης χαρακτηριστικών μέσω μίμησης, ο Moscato χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το 1989 την ονομασία Μιμητικός Αλγόριθμος (MA), ([31, 28, 27, 42]), για να περιγράψει τη συνεργασία ενός γενετικού αλγορίθμου που χειρίζεται πληθυσμούς λύσεων (population-based genetic algorithms) και μιας μεθόδου εκμάθησης κάθε υποψήφιας λύσης, η οποία επί της ουσίας εκτελεί μία τοπική εκλέπτυνση της λύσης (Local Search), ώστε να επιτυγχάνεται βελτίωση της τιμής της αντίστοιχης συνάρτησης στόχου. Κατ’ αυτό τον τρόπο βελτιώνεται η συμπεριφορά του αρχικού αλγορίθμου. Ο μεταφορικός αυτός παραλληλισμός έγινε προκειμένου να περιγραφεί η νέα μέθοδος που κατάφερε να προσαρμόζεται εύκολα σε κάθε νέο πρόβλημα, λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, οι Ασύγχρονοι Μιμητικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μεθόδους τοπικής βελτίωσης (LS) των ατόμων του πληθυσμού, [42]. Οι μέθοδοι αυτοί εφαρμόζονται στο στάδιο του αλγορίθμου, όπου ένα άτομο του πληθυσμού έχει επιστρέψει μόλις από αξιολόγηση και δεν έχει ακόμα συμμετάσχει στις δια-δημοτικές διαδικασίες επιλογής νέου πράκτορα από τον οποίο θα δημιουργηθεί ο απόγονος. Παράμετροι όπως το πόσο συχνά, σε ποιά άτομα του πληθυσμού και πόσες φορές στη σειρά πρέπει να εφαρμόζεται η μέθοδος (LS), εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα προς βελτιστοποίηση. Στον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική, η τοπική βελτίωση εφαρμόζεται μόνο στα άτομα του πληθυσμού που επιλέγονται να γίνουν μέλη του πληθυσμού των επίλεκτων (elite), δηλαδή στις καλύτερες μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή λύσεις. Συγκεκριμένα, όταν ένα άτομο - έστω \vec{b}_{new} - επιστρέψει από αξιολόγηση, γίνεται έλεγχος αν πρόκειται για την καλύτερη λύση μέχρι τώρα (πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός στόχου) ή αν θα μπει στο μέτωπο Pareto (πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλών στόχων). Αν το νέο άτομο \vec{b}_{new} αποτελεί βέλτιστη λύση, τότε στέλνεται αυτόματα για LS, πράγμα που σημαίνει ότι ο επεξεργαστής όπου εκτέλεσε την αξιολόγηση θα παραμείνει απασχολημένος για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αφού γίνει εκλέπτυνση της βέλτιστης λύσης μετά την τοπική βελτίωση, το νέο άτομο που προκύπτει - έστω \vec{b}_{LS} - στέλνεται και πάλι για αξιολόγηση, ενώ όλα τα υπόλοιπα στάδια του αλγορίθμου παραμένουν ως είχαν.

Σχετικά με τη μέθοδο LS που χρησιμοποιείται, αξίζει να αναφερθεί κάτι που αφορά τον αριθμό των τοπικών βελτιώσεων που εφαρμόζονται στη σειρά στο ίδιο άτομο του πληθυσμού. Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα - ιδιαίτερα σε σχετικά απλά προβλήματα βελτιστοποίησης όπου ο υπολογιστικός χρόνος, τόσο της εκάστοτε αξιολόγησης, όσο και της εύρεσης της παραγώγου της συνάρτησης στόχου, είναι μικρός - όταν επιστρέψει μια λύση από αξιολόγηση, αφού έχει προηγηθεί η αποστολή της για LS, να αναδειχθεί και πάλι ως βέλτιστη και να σταλεί δεύτερη συνεχόμενη φορά για LS. Αυτό μπορεί να συμβεί περισσότερες από δύο φορές στη σειρά, ανάλογα βέβαια και με το βαθμό πολυπλοκότητας του προβλήματος. Συγκεκριμένα, στο μαθηματικό πρόβλημα ενός στόχου ελαχιστοποίησης της συνάρτησης Rastrigin που μελετήθηκε και παρουσιάζεται παρακάτω, παρατηρήθηκαν μέχρι και 10 συνεχόμενες τοπικές βελτιώσεις του ίδιου ατόμου. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει η δυνατότητα ορισμού ενός ανώτατου ορίου n αριθμού συνεχόμενων τοπικών βελτιώσεων για το ίδιο άτομο, με το ενδεχόμενο ρίσκο να μειωθεί έτσι η ταχύτητα σύγκλισης του αλγορίθμου. Με άλλα λόγια, η επιλογή απαγόρευσης συνεχόμενων τοπικών βελτιώσεων δεν εξασφαλίζει πάντα καλύτερη συμπεριφορά αλγορίθμου σε κάθε πρόβλημα. Ωστόσο σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν εδώ, δεν ορίστηκε κάποιο τέτοιο όριο.

2.5.1 Μηχανισμός Εκμάθησης κατά **Lamarck** και κατά **Baldwin**

Όπως αναφέρθηκε, η μέθοδος τοπικής βελτίωσης αποτελεί μια μέθοδο εκμάθησης κάθε υποψήφιας λύσης. Υπάρχουν δύο συνήθεις μηχανισμοί εκμάθησης: ο μηχανισμός κατά Lamarck (Lamarckian Mechanism, [43, 21]) και ο μηχανισμός κατά Baldwin (Baldwinian Mechanism, [21]). Και οι δύο μηχανισμοί είναι εμπνευσμένοι από εξελικτικές θεωρίες που σχετίζονται με χαρακτηριστικά που αποκτούν τα άτομα κατά τη διάρκεια εκμάθησής τους από το περιβάλλον όπου ζουν.

Ο πρώτος είναι εμπνευσμένος από τη θεωρία του βιολόγου Jean-Baptiste Lamarck, σύμφωνα με την οποία, τα χαρακτηριστικά που αποκτά ένα άτομο κατά τη διάρκεια της ζωής του προκειμένου να προσαρμοστεί ή/και να επιβιώσει στο περιβάλλον όπου ζει και αναπτύσσεται, κληρονομούνται μέσω εξελικτικών διαδικασιών (διασταύρωση/μετάλλαξη) στην αμέσως επόμενη γενιά απογόνων του. Κατ' αυτό τον τρόπο, όλα τα επίκτητα χαρακτηριστικά των γονέων μεταφέρονται γονιδιακά στις επόμενες γενιές, με αποτέλεσμα την εξέλιξη των ειδών.

Ο ψυχολόγος James Mark Baldwin από την άλλη μεριά διαφοροποιήθηκε από την εξελικτική θεωρία του Lamarck. Χωρίς να αμφισβητεί το γεγονός ότι το περιβάλλον όπου ζουν τα άτομα ενός πληθυσμού, επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την διαμόρφωση ορισμένων χαρακτηριστικών τους, υποστήριξε ότι τα επίκτητα χαρακτηριστικά που αποκτούν τα άτομα όσο ζουν, δεν τροποποιούν τον γενότυπό τους ώστε να μπορούν να μεταβιβάσουν γονιδιακά στους απογόνους τους, παρά μόνο συμβάλλουν στην επιβίωσή τους: τα άτομα με μεγαλύτερη ικανότητα εκμάθησης, θα προσαρμοστούν ευκολότερα και γρηγορότερα στο περιβάλλον τους. Έτσι, αποκτούν μεγαλύτερες πιθανότητες να ζήσουν περισσότερο και κατ' επέκταση να αποκτήσουν απογόνους με ανάλογες ικανότητες εκμάθησης. Έτσι, ένα είδος πληθυσμού όπου κυριαρχεί αυτό το φαινόμενο, επιβιώνει, εξελίσσεται και πολλαπλασιάζεται γρηγορότερα από ένα άλλο.

Το ανάλογο των δύο θεωριών στον τομέα των AMA σχετίζεται με το αν τροποποιείται ή όχι η λύση - έστω \vec{b}_{re} - ενός ατόμου που επιστρέφει από LS και επαναξιολόγηση και αποτελεί το αντίστοιχο του γενότυπου ή μόνο η τιμή της συνάρτησης στόχου $\vec{F}(\vec{b}_{re})$ που αντιστοιχεί στο φαινότυπο. Συγκεκριμένα στο μηχανισμό κατά Lamarck, όταν ένα άτομο του πληθυσμού επιστρέφει έπειτα από τοπική βελτίωση με νέο διάνυσμα μεταβλητών σχεδιασμού \vec{b}_{re} και επαναξιολόγηση με νέα τιμή αντίστοιχης συνάρτησης στόχου $\vec{F}(\vec{b}_{re})$, τότε ο αλγόριθμος αποθηκεύει και τα δύο αυτά διανύσματα, ανεξάρτητα από το αν η λύση που επέστρεψε έχει καλύτερη τιμή ή όχι από την αρχική βέλτιστη λύση \vec{b}_{new} που επιλέχθηκε να σταλεί για τοπική βελτίωση. Εξάλλου, ακόμα και στην περίπτωση που ισχύει ότι $\vec{F}(\vec{b}_{re}) > \vec{F}(\vec{b}_{new})$, η αρχική λύση \vec{b}_{new} δεν 'χάνεται' καθώς έχει ήδη αποθηκευτεί ως βέλτιστη λύση και έχει - αν πρόκειται για πρόβλημα πολλών στόχων - συμμετάσχει στη διαμόρφωση του μετώπου Pareto. Στο μηχαν-

νισμό κατά Baldwin αντίστοιχα, ανανεώνεται μόνο η τιμή της συνάρτησης στόχου $F(\vec{b}_{re})$ της λύσης που επιστρέφει από LS και επαναξιολόγηση, ενώ το διάνυσμα \vec{b}_{new} που στάλθηκε αρχικά για τοπική βελτίωση παραμένει αμετάβλητο. Δηλαδή, συμβαίνει τροποποίηση του φαινότυπου ενός ατόμου προς απόκτηση καλύτερων χαρακτηριστικών, χωρίς ταυτόχρονη μεταβολή του ‘γενότυπου’ της λύσης.

Τα παραπάνω μπορούν να περιγραφούν συνοπτικά ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Lamarckian Mechanism} &\longrightarrow \text{overwrite } \vec{b}, F(\vec{b}) \\ \text{Baldwinian Mechanism} &\longrightarrow \text{overwrite } F(\vec{b}) \end{aligned}$$

Στο κώδικα της παρούσας διπλωματικής, χρησιμοποιήθηκε ο μηχανισμός κατά Lamarck. Στο σημείο αυτό αξίζει να διευκρινιστεί κάτι που ίσως έγινε εμφανές από τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως: Παρότι μέχρι τώρα χρησιμοποιήθηκαν οι όροι ‘εκλέπτυνση’ και ‘τοπική βελτίωση’ της λύσης, δεν σημαίνει ότι μια λύση \vec{b}_{re} που επιστρέφει από LS και επαναξιολόγηση, επιστρέφει πάντοτε καλύτερη τιμή συνάρτησης στόχου από την αρχική λύση \vec{b}_{new} . Στη περίπτωση που η λύση \vec{b}_{re} έχει χειρότερη τιμή από τη \vec{b}_{new} , μπορεί είτε να αγνοηθεί και στο δήμε να επιστρέψει η αρχική τιμή της \vec{b}_{new} (παρότι θα έχει ήδη χαθεί χρόνος για την εκτέλεση του LS και της δεύτερης αξιολόγησης), είτε να ληφθεί υπόψη (όπως και τελικά συμβαίνει εδώ) και να επιστρέψει η \vec{b}_{re} , με τη λογική ότι μια ‘χειρότερη’ λύση αυξάνει την ποικιλομορφία του πληθυσμού. Επιπλέον, ακόμα και αν η λύση \vec{b}_{re} επιστρέψει από LS με καλύτερη τιμή από την αρχική λύση \vec{b}_{new} (το οποίο και συμβαίνει τις περισσότερες φορές), υπάρχει περίπτωση η \vec{b}_{re} να μην είναι και πάλι η τρέχουσα βέλτιστη λύση, καθότι στο μεταξύ έχουν επιστρέψει και άλλα άτομα από αξιολογήσεις, επομένως υπάρχει μεγάλη πιθανότητα κάποιο από αυτά να διαθέτει καλύτερη τιμή συνάρτησης στόχου.

2.5.2 Περιγραφή Αλγορίθμου ΑΕΑ με Τοπική Βελτίωση (AMA)

Αν ενεργοποιηθεί η δυνατότητα εκτέλεσης LS, τροποποιούνται τα στάδια 2, 3 και 7 του ΑΕΑ που περιγράφηκαν παραπάνω. Η διαμόρφωσή τους γίνεται ως εξής:

2. Επιστροφή Πράκτορα

- από Αξιολόγηση
Ισχύει ότι και προηγουμένως.
- από Τοπική Βελτίωση
Αν ο πράκτορας έχει επιλεγεί να σταλεί για τοπική βελτίωση στο στάδιο 3 του αλγορίθμου, τότε υπολογίζεται η παράγωγος της συνάρτησης στόχου, ανανεώνεται

η τιμή του διανύσματος \vec{b} και η 'ανανεωμένη' λύση στέλνεται ξανά για αξιολόγηση (στάδιο 6).

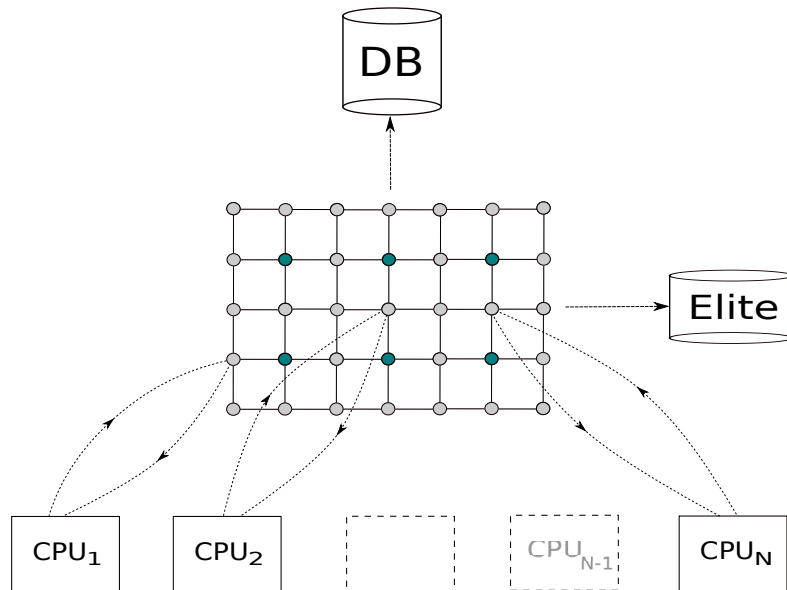
3. Απόφαση Αντικατάστασης Πόλου - Αποστολής για LS

Όταν ο νέος πράκτορας αποτελεί νέα βέλτιστη λύση του δήμου, τότε αντικαθιστά τον πόλο σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε πριν και ταυτόχρονα επιλέγεται να σταλεί για τοπική βελτίωση. Διαφορετικά, δε συμβαίνει αντικατάσταση πόλου (άρα ούτε και επιλογή για LS) και η διαδικασία συνεχίζει στο επόμενο στάδιο (στάδιο 4).

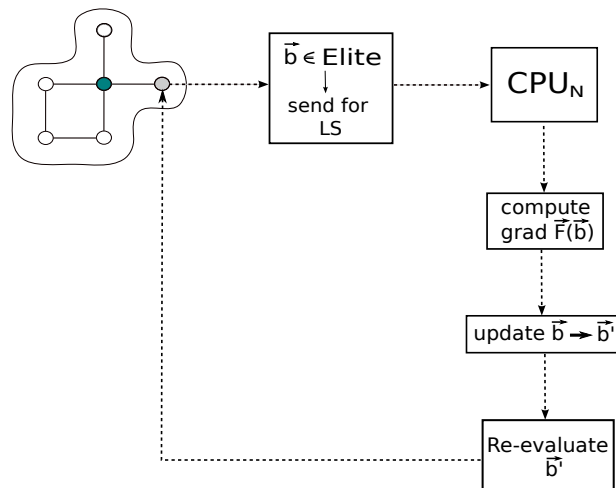
7. Έλεγχος Σύγκλισης του Αλγορίθμου

Το νέο στοιχείο που πρέπει να αναφερθεί εδώ είναι ότι, όταν το κριτήριο σύγκλισης έχει οριστεί να είναι ένας μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη όλες τις αξιολογήσεις που έλαβαν χώρα, συμπεριλαμβανόμενες και αυτές που έγιναν για το ίδιο άτομο μετά από τοπική βελτίωση, ώστε να 'χρεώνεται' στον υπολογιστικό χρόνο και το LS.

Στα σχήματα 2.5 και 2.6 που ακολουθούν παρουσιάζονται εποπτικά τα επίπεδα επικοινωνίας του Ασύγχρονου Μιμητικού Αλγόριθμου, βάσει των όσων περιγράφηκαν συνολικά στα προηγούμενα.



Σχήμα 2.5: Ο πράκτορας που επιλέγεται στέλνεται για αξιολόγηση σε όποιον από τους N επεξεργαστές είναι διαθέσιμος. Αφού αξιολογείται, επιστρέφει στο πλέγμα και αν αποτελεί βέλτιστη λύση αποθηκεύεται στην Elite. Οι τιμές όλων των λύσεων που προκύπτουν αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων (BD).



Σχήμα 2.6: Αν ο πράκτορας που επέστρεψε μόλις από αξιολόγηση αποτελεί βέλτιστη λύση, τότε στέλνεται για LS. Υπολογίζεται η παράγωγος $\vec{F}(\vec{b})$, ανανεώνεται το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδιασμού από \vec{b} σε \vec{b}' και η νέα λύση \vec{b}' αξιολογείται πάλι, για να επιστρέψει τελικά στο πλέγμα.

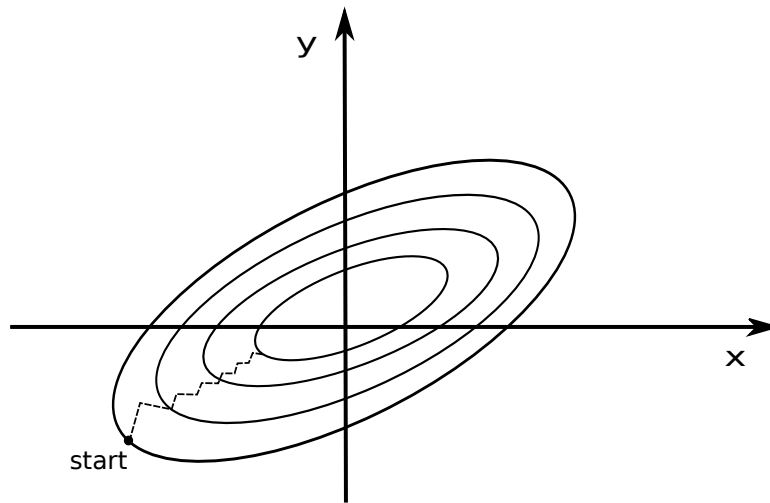
2.5.3 Τοπική Βελτίωση με Μέθοδο Απότομης Καθόδου

Χαρακτηριστικά Μεθόδου

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που μπορούν να πραγματοποιήσουν τοπική βελτίωση, ωστόσο στον ΑΜΑ της παρούσας διπλωματικής επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της απότομης καθόδου (**Steepest Descent Method**), [52].

Η μέθοδος της απότομης καθόδου κατατάσσεται στις μεθόδους ανίχνευσης κατά γραμμή και αποτελεί αιτιοκρατική μέθοδο βελτιστοποίησης, δηλαδή χρησιμοποιεί τη γενικευμένη έννοια της παραγώγου της συνάρτησης στόχου, την οποία καλείται να υπολογίσει ή να προσεγγίσει. Δηλαδή, χρειάζεται μια πληροφορία που σχετίζεται αποκλειστικά με το εκάστοτε πρόβλημα προς βελτιστοποίηση για να πραγματοποιήσει το επόμενο βήμα. Ως μέθοδος που βασίζεται στην κλίση της συνάρτησης στόχου (**gradient-based method**), βασική προϋπόθεση για τη χρησιμοποίησή της αποτελεί η δυνατότητα υπολογισμού της πρώτης παραγώγου της συνάρτησης στόχου $\nabla F(\vec{b})$.

Η μέθοδος της απότομης καθόδου αναζητά τη βέλτιστη λύση πραγματοποιώντας μια διαδρομή από διαδοχικά ‘βήματα’ στο χώρο των λύσεων, ξεκινώντας από μία αρχική τιμή και ακολουθώντας μια κατεύθυνση αναζήτησης (σχήμα 2.7). Λόγω ακριβώς του τρόπου με τον οποίο πραγματοποιεί την αναζήτηση, εξαιρετικά σημαντικό ρόλο για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου αποτελούν (i) το σημείο εκκίνησης \vec{b}^0 , (ii) το μήκος του βήματος η σε κάθε κλάδο της διαδρομής (και ενδεχομένως και σε κάθε επανάληψη αν το βήμα είναι μεταβλητό), (iii) η νέα κατεύθυνση έρευνας και (iv) η τάξη μεγέθους της παραγώγου της συνάρτησης στόχου $\nabla F(\vec{b})$. Το πρόβλημα καθορισμού των μεγεθών αυτών επιλύεται εύκολα αν είναι γνωστή η μορφή της συνάρτησης του προβλήματος βελτιστοποίησης, γεγονός που, δυστυχώς, στις περισσότερες περιπτώσεις δε συμβαίνει. Ο μηχανικός που θα χρησιμοποιήσει τη μέθοδο της απότομης καθόδου καλείται να χειριστεί κατάλληλα όλα τα παραπάνω, ανάλογα πάντα και με το εκάστοτε πρόβλημα βελτιστοποίησης, ώστε η αναζήτηση να πραγματοποιηθεί με τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Μια αιτιοκρατική μέθοδος όπως αυτή της απότομης καθόδου, μπορεί για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα (για το οποίο ο υπολογισμός της πρώτης παραγώγου δεν έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος) να συγκλίνει στη βέλτιστη λύση πιο γρήγορα απ’ ό,τι μια στοχαστική μέθοδος, που χρειάζεται μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, αλλά επειδή ακριβώς εξαρτάται από την αρχική λύση και το βήμα αναζήτησης, υφίσταται ο κίνδυνος να ‘παγιδευτεί’ ο αλγόριθμος σε τοπικό ακρότατο και να μην μπορέσει να εντοπίσει το ολικό ακρότατο.



Σχήμα 2.7: Τρόπος σύγκλισης της μεθόδου της απότομης καθόδου με μεταβλητό βήμα για συνάρτηση στο 2Δ χώρο που σχηματίζει κοντινές ‘κοιλιάδες’ που απεικονίζονται με ελλείψεις. Η μέθοδος εκκινεί από ένα αρχικό σημείο, ακολουθώντας μια κατεύθυνση ανίχνευσης. Σε κάθε επανάληψη το βήμα γίνεται ολοένα και μικρότερο, καθώς προσεγγίζεται το ελάχιστο της συνάρτησης.

Στον AMA ωστόσο, επειδή ακριβώς η μέθοδος της απότομης καθόδου πραγματοποιεί τοπική βελτίωση μιας βέλτιστης λύσης, κάθε φορά πραγματοποιείται μόνο ένα βήμα στο χώρο των λύσεων. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις η λύση που θα επιστρέψει από την απότομη κάθοδο να είναι λίγο χειρότερη από την αρχική (με βάση την αξιολόγηση που ακολουθεί το LS), εξαιτίας, για παράδειγμα, ακατάλληλης τιμής του βήματος η ή επειδή στο μεσοδιάστημα θα έχουν επιστρέψει από αξιολογήσεις και άλλες λύσεις, με καλύτερες τιμές.

Βασικές Αρχές Μεθόδου

Η βασική λογική που ακολουθεί η μέθοδος της απότομης καθόδου (όπως και κάθε άλλη μέθοδος ανίχνευσης κατά γραμμή) είναι η δημιουργία της επόμενης προσέγγισης της νέας λύσης \vec{b}_i^{n+1} από την τρέχουσα λύση \vec{b}_i^n (η οποία στην περίπτωση που η απότομη κάθοδος χρησιμοποιείται για τοπική βελτίωση πρόκειται για τη βέλτιστη λύση) και από μια κατεύθυνση ανίχνευσης \vec{p}^n . Στην προκειμένη, ως κατεύθυνση ανίχνευσης επιλέγεται το αντίθετο του τοπικού διανύσματος κλίσης της συνάρτησης στόχου, δηλαδή $\vec{p}^n = -\nabla \vec{F}(\vec{b}_i^n)$. Έτσι, το σχήμα αναζήτησης είναι

$$\vec{b}_i^{n+1} = \vec{b}_i^n - \eta^n \nabla \vec{F}(\vec{b}_i^n) \quad (2.19)$$

όπου n είναι ο αριθμός της επανάληψης η^n είναι μια βαθμωτή ποσότητα (κατάλληλης τάξης μεγέθους) που ρυθμίζει το μήκος βήματος κατά την κατεύθυνση $-\nabla F(\vec{b}^n)$ και την επανάληψη n .

Το ζητούμενο διατυπώνεται μαθηματικά ως

$$\min F(\vec{b}_i^n - \eta^n \nabla F(\vec{b}_i^n)) \quad , \quad \eta^n > 0 \quad (2.20)$$

2.5.4 Υπολογισμός Παραγώγου Συνάρτησης Στόχου για Χρησιμοποίηση σε Τοπική Βελτίωση

Όπως εξηγήθηκε ήδη, για να εφαρμοστεί μία μέθοδος τοπικής βελτίωσης - όπως αυτή της απότομης καθόδου που περιγράφηκε παραπάνω - απαιτείται ο υπολογισμός της πρώτης παραγώγου της συνάρτησης στόχου $\nabla F(\vec{b})$ για κάθε μία από τις N μεταβλητές σχεδιασμού του διανύσματος \vec{b} , του εκάστοτε προβλήματος βελτιστοποίησης, απαίτηση που αποτελεί και το βασικό μειονέκτημα όλων των μεθόδων που βασίζονται στην κλίση της συνάρτησης στόχου. Ένα δεύτερο μειονέκτημα των μεθόδων αυτών αφορά στο κόστος υπολογισμού της παραγώγου της συνάρτησης στόχου του προβλήματος βελτιστοποίησης, το οποίο μπορεί να γίνει ασύμφορα μεγάλο σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα σε αερο - υδροδυναμικά προβλήματα όπου επιλύονται πολύπλοκα ροϊκά μοντέλα. Στην περίπτωση προβλημάτων βελτιστοποίησης από το χώρο της αερο - υδροδυναμικής, το κόστος υπολογισμού των παραγώγων της συνάρτησης στόχο μπορεί να μειωθεί δραματικά - όπως θα φανεί στα ακόλουθα - με τη χρήση των συζυγών μεθόδων (Adjoint Methods).

Στην παρούσα διπλωματική, ο υπολογισμός της παραγώγου της συνάρτησης στόχου για να χρησιμοποιηθεί στη μέθοδο τοπικής βελτίωσης (με τη μέθοδο της απότομης καθόδου) έγινε σε δύο περιπτώσεις: (i) στην παραμετρική μελέτη που διεξάχθηκε πάνω σε μαθηματικές συναρτήσεις και (ii) στη δεύτερη - κατά σειρά παρουσίασης - εφαρμογή από το χώρο της μηχανολογίας που αφορούσε το σχεδιασμό δέσμης σωλήνων εναλλάκτη θερμότητας εγκάρσιας ροής. Στην πρώτη περίπτωση, ο υπολογισμός των παραγώγων των συναρτήσεων στόχου ήταν απλός, αφού ήταν δυνατή η εύρεση αναλυτικού τύπου - δεδομένου ότι ικανοποιούνταν τα κριτήρια συνέχειας τόσο των μαθηματικών συναρτήσεων που χρησιμοποιήθηκαν, όσο και των πρώτων παραγώγων τους. Η δεύτερη περίπτωση ωστόσο, ήταν πολύ περισσότερο απαιτητική υπολογιστικά, αφού η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης (δηλαδή ο υπολογισμός της $F(\vec{b})$) γινόταν με λογισμικό Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD), το οποίο επίλυε κάθε φορά τις εξισώσεις Navier - Stokes σε κάθε κόμβο του πλέγματος που είχε δημιουργηθεί γύρω από τις μορφές των σωλήνων, που αποτελούσαν και το αντικείμενο της βελτιστοποίησης. Η

ακριβής περιγραφή της εφαρμογής γίνεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο, ωστόσο στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι οι N μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος ήταν οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου των καμπυλών **Bezier**, με τη βοήθεια των οποίων γινόταν η παραμετροποίηση της γεωμετρίας των σωλήνων. Γίνεται έτσι αντιληπτό το μέγεθος του υπολογιστικού κόστους που απαιτείται για τον υπολογισμό της παραγώγου $\nabla \vec{F}(\vec{b})$ για καθεμιά από τις N μεταβλητές σχεδιασμού του διανύσματος \vec{b} . Για το λόγο αυτό, για τον υπολογισμό των παραγώγων της συνάρτησης στόχου του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η συνεχής συζυγής μέθοδος (**continuous adjoint method**, [52, 49, 45, 3, 9]).

Παρακάτω ακολουθεί μια γενική περιγραφή και παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών της συζυγούς μεθόδου, ενώ διατυπώνονται επίσης οι βασικές εξισώσεις, καθότι στο πλαίσιο της δεύτερης εφαρμογής γίνεται απλά χρήση και όχι διατύπωση ή προγραμματισμός συζυγών εξισώσεων.

Συζυγής Μέθοδος

Γενική Περιγραφή - Υπολογιστικό Κέρδος

Οι συζυγείς μέθοδοι εφαρμόζονται σε προβλήματα βελτιστοποίησης στην αερο – υδροδυναμική και αποτελούν εργαλεία υπολογισμού της κλίσης της συνάρτησης στόχου, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι ικανοποιούνται οι βασικές εξισώσεις ροής του προβλήματος (**Euler** ή **Navier - Stokes**). Σε τέτοιου είδους προβλήματα, το αντικείμενο της βελτιστοποίησης είναι συνήθως οι γεωμετρικές διάφορων αερο – υδροδυναμικών μορφών εντός πεδίων ροής βάσει ενός κριτηρίου, οι οποίες παραμετροποιούνται με τη βοήθεια, για παράδειγμα, καμπυλών **Bezier**. Συγκριτικά με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης η παραμετροποίηση των αερο – υδροδυναμικών μορφών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, διότι συμμετέχει στη μαθηματική διατύπωση και την επίλυση κατ' επέκταση των εξισώσεων του προβλήματος (τόσο για το ευθύ πρόβλημα, όσο και για το συζυγές). Μεταβλητές σχεδιασμού αποτελούν κατά κύριο λόγο οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου των καμπυλών που παραμετροποιούν την αερο – υδροδυναμική μορφή.

Για να γίνει κατανοητός ο λόγος που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η συζυγής μέθοδος για τον υπολογισμό της παραγώγου της συνάρτησης στόχου σε τέτοιου είδους προβλήματα, παρά το γεγονός ότι απαιτείται προεργασία σε μαθηματικές διατυπώσεις και προγραμματισμό - ειδικά αν χρειαστεί να αλλάξει (1) το πεδίο ροής, (2) ο στόχος ή/και (3) η παραμετροποίηση του προβλήματος - αρκεί να γίνει η ακόλουθη σύγκριση σχετικά με το υπολογιστικό κόστος των παραγώγων της συνάρτησης στόχου με συνήθεις μεθόδους, όπως οι πεπερασμένες διαφορές ([52]):

Έστω $\vec{F}(\vec{b})$ η διανυσματική συνάρτηση κόστους M στόχων ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, με \vec{b} το διάνυσμα των N μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος ($\vec{b} \in \mathfrak{R}^N$). Για την τρέχουσα λύση \vec{b}^n της n -οστής επανάληψης που εκτελεί ο αλγόριθμος, πρέπει να υπολογιστούν οι μερικές παράγωγοι της συνάρτησης ως προς κάθε μια από τις N μεταβλητές σχεδιασμού:

$$\frac{\partial \vec{F}}{\partial \vec{b}}(\vec{b}^n) = \left(\frac{\partial \vec{F}}{\partial b_1}, \dots, \frac{\partial \vec{F}}{\partial b_N} \right) \quad (2.21)$$

υπό την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι εξισώσεις ροής.

Σε μια μέθοδο αερο – υδροδυναμικής βελτιστοποίησης, όσον αφορά το κόστος υπολογισμού, χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης το υπολογιστικό κόστος μιας αξιολόγησης μιας υποψήφιας λύσης \vec{b} , δηλαδή της κλήσης του λογισμικού *CFD* που υπολογίζει τη συνάρτηση στόχου $\vec{F}(\vec{b})$. Το πεδίο ροής γύρω από την αερο – υδροδυναμική μορφή μοντελοποιείται χωρικά με πλέγματα (δομημένα ή μη) και η επίλυση των ροϊκών εξισώσεων γίνεται για κάθε κόμβο του πλέγματος, όπου αποθηκεύονται οι τιμές των μεγεθών του πεδίου. Αν γινόταν προσέγγιση της μερικής παραγωγού της συνάρτησης στόχου ως προς τη i -οστή μεταβλητή σχεδιασμού b_i μέσω ενός απλού σχήματος, όπως των πρόσω πεπερασμένων διαφορών ακρίβειας πρώτης τάξης για παράδειγμα, ο τύπος υπολογισμού της θα ήταν:

$$\frac{\partial \vec{F}}{\partial b_i} = \frac{\vec{F}(b_1, \dots, b_i + \epsilon, \dots, b_N) - \vec{F}(b_1, \dots, b_i, \dots, b_N)}{\epsilon} \quad (2.22)$$

όπου ϵ μια σταθερά πολύ μικρής τιμής, την οποία καθορίζει ο χρήστης, μετά ενδεχομένως από σειρά δοκιμών, ώστε το αποτέλεσμα να γίνει ανεξάρτητο του ϵ .

Η παραπάνω εξίσωση θα έπρεπε να εφαρμοστεί N φορές (όσες και οι μεταβλητές σχεδιασμού) στην τρέχουσα λύση \vec{b}^n και αν ληφθεί υπόψη και ότι καλείται ακόμα μία φορά η συνάρτηση, ώστε να υπολογιστεί η $\vec{F}(\vec{b}^n)$, το υπολογιστικό κόστος ανά επανάληψη της μεθόδου βελτιστοποίησης θα ήταν $N + 1$ αξιολογήσεις της $\vec{F}(\vec{b})$. Για ένα σχήμα που εξασφαλίζει μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων, όπως οι κεντρικές πεπερασμένες διαφορές δεύτερης τάξης, με μαθηματικό τύπο:

$$\frac{\partial \vec{F}}{\partial b_i} = \frac{\vec{F}(b_1, \dots, b_i + \epsilon, \dots, b_N) - \vec{F}(b_1, \dots, b_i - \epsilon, \dots, b_N)}{2\epsilon} \quad (2.23)$$

θα χρειάζονταν συνολικά $2N$ υπολογισμοί της συνάρτησης στόχου. Αν αναλογιστεί κανείς ότι σε ορισμένα προβλήματα, τα ροϊκά φαινόμενα παρουσιάζουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα ή ότι με αύξηση του αριθμού των σημείων ελέγχου μπορεί να γίνει υπολογισμός πιο πολύπλοκων αερο – υδροδυναμικών μορφών, τότε το κόστος υπολογισμού των παραγώγων της συνάρτησης στόχου με τις συνήθεις μεθόδους γίνεται ασύμφορα μεγάλο.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της συζυγούς μεθόδου είναι ότι το υπολογιστικό κόστος ανά επανάληψη είναι ανεξάρτητο του αριθμού N των μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος, καθώς απαιτούνται μόνο 2 συνολικά κλήσεις της συνάρτησης στόχου (μια επίλυση της εξίσωσης ροής και μια της συζυγούς εξίσωσης), δεδομένου ότι το κόστος υπολογισμού των παραγώγων της συνάρτησης στόχου ως προς τις N μεταβλητές σχεδιασμού είναι περίπου ίσο με το κόστος επίλυσης των εξισώσεων ροής.

Γενική Διατύπωση Συζυγών Εξισώσεων

Έστω διανυσματική συνάρτηση κόστους M στόχων ενός αερο – υδροδυναμικού προβλήματος βελτιστοποίησης

$$\vec{F} = \vec{F}(\vec{U}(\vec{b}), \vec{b}) \quad (2.24)$$

όπου \vec{b} είναι το διάνυσμα των N μεταβλητών σχεδιασμού που παραμετροποιούν τη γεωμετρία της αερο – υδροδυναμικής μορφής που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί και $\vec{U}(\vec{b})$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών ροής που εξαρτάται άμεσα από τη γεωμετρία της μορφής (κάθε αλλαγή τιμής των μεταβλητών σχεδιασμού \vec{b} διαμορφώνει διαφορετικό πεδίο ροής \vec{U} γύρω από την αερο – υδροδυναμική μορφή και υπολογίζεται νέα τιμή της συνάρτησης στόχου έπειτα από επεξεργασία των στοιχείων του πεδίου).

Μία αλλαγή του διανύσματος \vec{b} έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή $\delta\vec{F}$ [52] της συνάρτησης στόχου, που ισούται με

$$\delta\vec{F} = \frac{\partial\vec{F}}{\partial\vec{U}}\delta\vec{U} + \frac{\partial\vec{F}}{\partial\vec{b}}\delta\vec{b} \quad (2.25)$$

Ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος της πάνω εξίσωσης εκφράζει τη μεταβολή που οφείλεται στην αλλαγή του πεδίου ροής που προκαλεί η αλλαγή της γεωμετρίας της αερο – υδροδυναμικής μορφής, ενώ ο δεύτερος όρος εκφράζει την άμεση επίδραση της αλλαγής της γεωμετρίας στην τιμή της συνάρτησης στόχου. Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης ισοδυναμεί με την εύρεση εκείνου του διανύσματος \vec{b} για το οποίο ισχύει $\delta\vec{F} = \vec{0}$, δεδομένου ότι το πρόβλημα

δεν υπόκειται σε περιορισμούς.

Οι εξισώσεις ροής εντός του υπολογιστικού χωρίου Ω που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πεδίου ροής γύρω από την αερο – υδροδυναμική μορφή, συμβολίζονται με τον τελεστή ροής \vec{R} και γράφονται στη μορφή

$$\vec{R} = \vec{R}(\vec{U}, \vec{b}) = 0 \quad (2.26)$$

Βασική προϋπόθεση της μεθόδου είναι, για οποιαδήποτε διακύμανση των μεταβλητών σχεδιασμού $\delta\vec{b}$, δηλαδή για οποιαδήποτε διακύμανση της γεωμετρίας της αερο – υδροδυναμικής μορφής (η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του πεδίου ροής γύρω από αυτήν), να ικανοποιούνται πάντα οι εξισώσεις ροής. Πρέπει δηλαδή να ισχύει

$$\delta\vec{R} = 0 \quad (2.27)$$

Σε αυτό το σημείο, εισάγεται το διάνυσμα των συζυγών μεταβλητών $\vec{\Psi}^T$ (ή αλλιώς διάνυσμα πολλαπλασιαστών Lagrange), το οποίο πολλαπλασιάζεται με τη μεταβολή των εξισώσεων ροής (εξίσωση 2.27). Ολοκληρώνοντας στο υπολογιστικό χωρίο Ω προκύπτει

$$\int_{\Omega} \vec{\Psi}^T \delta\vec{R} d\Omega = 0 \quad (2.28)$$

Το ολοκλήρωμα της εξίσωσης 2.28 αφαιρείται (ή προστίθεται, αφού έτσι κι αλλιώς η τιμή του είναι μηδέν) από τη μεταβολή $\delta\vec{F}$ της συνάρτησης στόχου, οπότε και δημιουργείται η λεγόμενη επαυξημένη συνάρτηση στόχος, της οποίας η μεταβολή - για τη συνεχή συζυγή μέθοδο - είναι

$$\delta F_{aug}^{\vec{}} = \delta\vec{F} - \int_{\Omega} \vec{\Psi}^T \delta\vec{R} d\Omega \quad (2.29)$$

Επειδή το ολοκλήρωμα της εξίσωσης 2.29 είναι μηδενικό, η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης στόχου \vec{F} που αποτελεί το ζητούμενο του προβλήματος, ισοδυναμεί με την ελαχιστοποίηση της επαυξημένης $F_{aug}^{\vec{}}$. Η ιδέα της συζυγούς μεθόδου είναι να βρεθεί (έπειτα από αριθμητική επίλυση των συζυγών εξισώσεων) το διάνυσμα των συζυγών μεταβλητών $\vec{\Psi}^T$ εκείνο, που θα έχει ως αποτέλεσμα η μεταβολή της συνάρτησης στόχου να εξαρτάται μόνο από τη μεταβολή του διανύσματος των μεταβλητών σχεδιασμού $\delta\vec{b}$ και όχι από τις επαγόμενες μεταβολές $\delta\vec{U}(\vec{b})$ των ροϊκών μεγεθών.

Περιγραφή Συνολικού Αλγορίθμου Επίλυσης Συζυγούς Προβλήματος

Τα στάδια του συνολικού αλγορίθμου επίλυσης του συζυγούς προβλήματος, σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν παραπάνω, είναι:

1. Τυχαία απόδοση τιμών στις N μεταβλητές σχεδιασμού της αρχικής λύσης \vec{b}^n , με $n = 0$, όπου ο άνω δείκτης n είναι ο μετρητής κύκλων (ως κύκλος ορίζεται η επίλυση ενός ευθέος και ενός συζυγούς προβλήματος).
2. Χάραξη περιγράμματος της αερο – υδροδυναμικής μορφής για το τρέχον διάνυσμα τιμών \vec{b}^n , με τη βοήθεια του εκάστοτε μοντέλου παραμετροποίησης (στην παρούσα διπλωματική, τα πολυώνυμα **Bezier**).
3. Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος γύρω από τη γεωμετρία που κατασκευάστηκε και επίλυση του ευθέος προβλήματος, δηλαδή αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ροής σε κάθε κόμβο του πλέγματος, για τις δεδομένες συνθήκες ροής του προβλήματος. Στο τέλος του σταδίου αυτού, έχει προσδιοριστεί πλήρως το ροϊκό πεδίο που διαμορφώνεται γύρω από τη γεωμετρία που αντιστοιχεί στην τρέχουσα λύση \vec{b}^n .
4. Επίλυση των συζυγών εξισώσεων στο ίδιο υπολογιστικό πλέγμα, χρησιμοποιώντας το πεδίο ροής που υπολογίστηκε στο προηγούμενο στάδιο, και εύρεση των συζυγών μεταβλητών $\vec{\Psi}^n$.
5. Τροποποίηση των τιμών του διανύσματος \vec{b}^n , βάσει των παραγώγων που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα.
6. Έλεγχος ικανοποίησης του κριτηρίου σύγκλισης που έχει τεθεί. Αν αυτό ικανοποιείται η διαδικασία τερματίζει, διαφορετικά, τίθεται $n \leftarrow n + 1$ και γίνεται επιστροφή στο στάδιο 2 του αλγορίθμου.

Κεφάλαιο 3

Πιστοποίηση - Παραμετρική Διερεύνηση Διαστάσεων Πλέγματος Βάσης Συναρτήσεων Διαφορετικού Αριθμού Επεξεργαστών για ΑΕΑ και ΑΜΑ

3.1 Γενική Περιγραφή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται απλές εφαρμογές για την πιστοποίηση του Ασύγχρονου Εξελικτικού Αγορίθμου (ΑΕΑ) και του Ασύγχρονου Μιμητικού Αλγορίθμου (ΑΜΑ) που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική. Παρουσιάζονται, επίσης, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διεξαγωγή παραμετρικής διερεύνησης για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ. Η μελέτη αφορούσε δύο παραμέτρους των αλγορίθμων που έπρεπε καταρχήν να διερευνηθούν: (i) τις διαστάσεις πλέγματος βάσης και (ii) τον αριθμό των πυρήνων επεξεργαστών που χρησιμοποιούνταν κάθε φορά (δηλαδή των παράλληλων αξιολογήσεων που λάμβαναν χώρα).

Η παραμετρική διερεύνηση έγινε με στόχο να αποδειχτεί αν υπάρχει ή όχι αλληλεξάρτηση των δύο αυτών παραμέτρων και να βρεθεί ποιοι συνδυασμοί παραμέτρων οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα, ή αν τελικά η αλληλεξάρτηση αυτή υφίσταται.

Για τις ανάγκες της πιστοποίησης και παραμετρικής μελέτης, όλες οι εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούσαν προβλήματα ελαχιστοποίησης μαθηματικών συναρτήσεων (προβλήματα ελαχιστοποίησης ενός ή δύο συναρτήσεων στόχων, χωρίς περιορισμούς) με γνωστή λύση, τα οποία, λόγω μικρού υπολογιστικού κόστους, μπορούν να επαναληφθούν πολλές φορές και για σχετικά μεγάλο πλήθος επαναλήψεων, ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να αντι-

προσωπεύουν όσο το δυνατόν καλύτερα τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις του αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, για την πιστοποίηση του AEA και του AMA επιλέχθηκε η μαθηματική συνάρτηση της σφαίρας (μαθηματικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης ενός στόχου χωρίς περιορισμούς), η οποία έχει απλή μορφή που επιτρέπει πολύ γρήγορη εύρεση του ελαχίστου της συνάρτησης. Η παραμετρική διερεύνηση έγινε για τη συνάρτηση **Rastrigin** (μαθηματικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης ενός στόχου χωρίς περιορισμούς). Σε τελευταίο στάδιο, μελετήθηκε η συμπεριφορά του AEA και του AMA για το μαθηματικό πρόβλημα **ZDT3** (πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων χωρίς περιορισμούς), προκειμένου να ελεγχθούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν και για πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο στόχων.

Προκειμένου να αυξηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του AEA και του AMA, για κάθε μαθηματικό πρόβλημα ο εκάστοτε αλγόριθμος εκτελέστηκε τριάντα φορές (30 runs). Σε κάθε εκτέλεση γινόταν χρήση διαφορετικής έναρξης της γεννήτριας ψευδο-τυχαίων αριθμών (RNG). Σε αντίθεση με τους Σύγχρονους Εξελικτικούς Αλγόριθμους, η ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών οδηγεί σε διαφορετική σύγκλιση κάθε φορά που εκτελείται ο Ασύγχρονος Εξελικτικός ή Μιμητικός Αλγόριθμος, εξαιτίας ακριβώς της ασύγχρονης λειτουργίας τους, καθώς και πιθανών αλλαγών του φορτίου του επεξεργαστή (CPU load) κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαδικασίας. Κάθε φορά υπολογίζονταν ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις τριάντα εκτελέσεις, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός των συγκριτικών διαγραμμάτων που απεικόνιζαν την πορεία σύγκλισης του AEA και του AMA.

Αναφέρεται ακόμα για τον AMA, ότι η τοπική βελτίωση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της απότομης καθόδου, ενώ ο υπολογισμός των παραγώγων των συναρτήσεων στόχων ήταν απλός, αφού επρόκειτο για μαθηματικές συναρτήσεις με δυνατότητα εύρεσης αναλυτικού τύπου πρώτης παραγώγου (δεδομένου ότι ικανοποιούνταν τα κριτήρια συνέχειας).

3.2 Πιστοποίηση AEA/AMA για Μαθηματικό Πρόβλημα Ελαχιστοποίησης Ενός Στόχου Χωρίς Περιορισμούς

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της συνάρτησης της σφαίρας, προκειμένου να γίνει σύγκριση της συμπεριφοράς του AEA σε σχέση με αυτή του AMA, για την περίπτωση μαθηματικής συνάρτησης απλής μορφής.

3.2.1 Μαθηματική Συνάρτηση Σφαίρας

Όπως αναφέρθηκε, για την πιστοποίηση του AEA και του AMA επιλέχθηκε να μελετηθεί ένα απλό μαθηματικό πρόβλημα ενός στόχου (single-objective optimization - SOO) ελαχιστοποίη-

σης της τιμής μιας συνάρτησης κόστους, χωρίς περιορισμούς. Η συνάρτηση κόστους ήταν η συνάρτηση της σφαίρας, [32].

Τα βασικά κριτήρια που καθόρισαν την επιλογή της μαθηματικής συνάρτησης της σφαίρας ήταν δύο: ο πολύ μικρός υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την πραγματοποίηση μιας αξιολόγησης της συνάρτησης και για τον υπολογισμό της παραγώγου της (αν πρόκειται για τον AMA) και η μορφή της στο χώρο των τριών διαστάσεων.

Όσον αφορά στον υπολογιστικό χρόνο, η επιλογή έγινε με τη λογική ότι, ένα πιο σύνθετο πρόβλημα μεγαλύτερου υπολογιστικού κόστους, θα ήταν αρκετά πιο χρονοβόρο και δεν θα εξυπηρετούσε καλύτερα το σκοπό της συγκεκριμένης μελέτης. Αντιθέτως η συνάρτηση της σφαίρας, επιτρέπει (i) εκτενή μελέτη εξαιτίας του σχεδόν μηδαμινού υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για να ολοκληρωθεί μια αξιολόγηση (και να υπολογιστεί η τιμή της παραγώγου της συνάρτησης στόχου για τον AMA) και (ii) πραγματοποίηση ικανού πλήθους επαναλήψεων, ώστε να επιτευχθεί μια πολύ ικανοποιητική σύγκλιση.

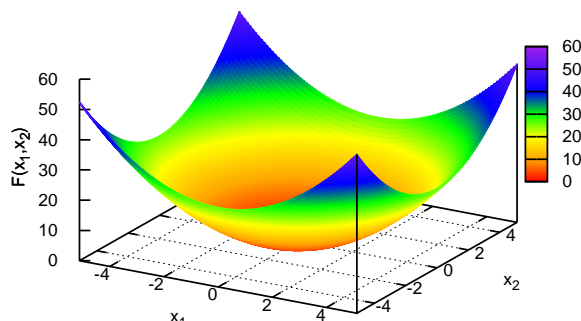
Η συνάρτηση της σφαίρας επιλέχτηκε επίσης λόγω της απλής μορφής της, η οποία παρουσιάζεται για 2 μεταβλητές σχεδιασμού στο σχήμα 3.1. Εκεί φαίνεται ότι η συνάρτηση είναι συνεχής, κυρτή και μονοκόρυφη, δηλαδή παρουσιάζει ένα μοναδικό ακρότατο, που είναι και το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης. Γι' αυτό το λόγο, μπορεί να γίνει προσέγγιση της βέλτιστης λύσης εύκολα και για σχετικά μικρό πλήθος αξιολογήσεων.

Ο μαθηματικός τύπος της συνάρτησης σφαίρας είναι

$$F_{Sph}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^N x_i^2, \quad i = 1, N \quad (3.1)$$

με $N = 20$ μεταβλητές σχεδιασμού και $x_i \in [-5.12, 5.12]$ (το διάστημα αναζήτησης ολικού ελαχίστου της συνάρτησης).

Η συνάρτηση παρουσιάζει ελάχιστη τιμή $F_{Sph}(\vec{x}) = 0$ για $x_i = 0$, $i = 1, 20$.



Σχήμα 3.1: Γραφική 3Δ απεικόνιση της συνάρτησης σφαίρας για 2 μεταβλητές σχεδιασμού x_1 , x_2 , στο διάστημα $[-5.12, 5.12]$. Το μοναδικό ακρότατο είναι το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης, με τιμή $F(x_1, x_2) = 0$, στο σημείο $x_1 = 0$, $x_2 = 0$.

3.2.2 Παράμετροι ΑΕΑ/ΑΜΑ

Όπως αναφέρθηκε, στο στάδιο αυτό της μελέτης, σκοπός είναι η πιστοποίηση του ΑΕΑ και του ΑΜΑ, δηλαδή η σύγκριση της πορείας σύγκλισης του πρώτου σε σχέση με αυτή του δεύτερου, για ίδιο αριθμό επεξεργαστών και διαστάσεων πλέγματος βάσης (δηλαδή αριθμού απόμων προς αξιολόγηση). Η αλληλεξάρτηση των δύο αυτών παραμέτρων εξετάζεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο, ωστόσο προκειμένου να υπάρξει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τη συμπεριφορά των δύο αλγορίθμων, μελετήθηκαν πλέγματα βάσης δύο διαφορετικών διαστάσεων: πλέγμα 6×6 (συνολικά 27 πράκτορες αξιολόγησης και 9 πόλοι) και πλέγμα 10×10 (συνολικά 75 πράκτορες αξιολόγησης και 25 πόλοι). Για το πλέγμα βάσης 6×6 χρησιμοποιήθηκαν 7 ίδιοι επεξεργαστές, ενώ για το πλέγμα 10×10 έγινε χρήση 10 ίδιων επεξεργαστών.

Το κριτήριο σύγκλισης και για τους δύο αλγόριθμους (ΑΕΑ/ΑΜΑ) ήταν ένα ανώτατο όριο αξιολογήσεων, που ορίστηκε να είναι οι 6000 αξιολογήσεις, παρόλο που - όπως θα φανεί παρακάτω - ο ΑΜΑ προσέγγιζε τη βέλτιστη λύση μετά την εκτέλεση πολύ μικρότερου αριθμού αξιολογήσεων.

Η βελτιστοποίηση επαναλαμβάνεται 30 φορές (30 εκτελέσεις για τον ΑΕΑ και 30 για τον ΑΜΑ), με την κάθε εκτέλεση να γίνεται για διαφορετική γεννήτρια τυχαίων αριθμών, δηλαδή για διαφορετική αρχικοποίηση πληθυσμού. Για κάθε αλγόριθμο, υπολογίζεται ο μέσος όρος των 30 εκτελέσεων και παρουσιάζεται σε διάγραμμα η μέση σύγκλιση. Αυτό γίνεται προκειμένου να προκύψουν όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα και συμπεράσματα από τη σύγκριση των δύο αλγορίθμων, δεδομένου ότι από στατιστικής άποψης, από μέγεθος δείγμα-

τος ίσο με 30, μπορεί να γίνει ασφαλή γενίκευση των συμπερασμάτων που προκύπτουν και για τον υπόλοιπο πληθυσμό.

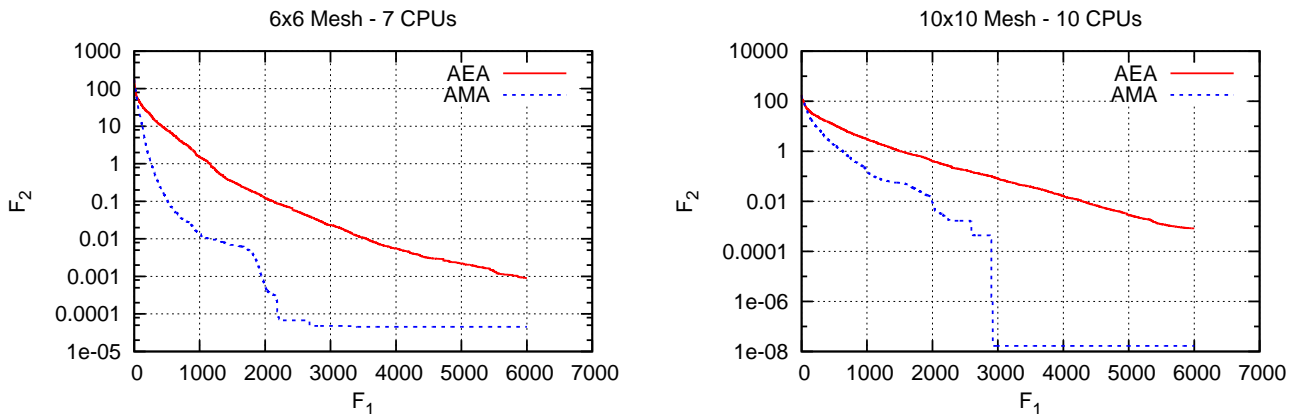
Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ και περιγράφηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται συνολικά στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Παράμετροι ΑΕΑ και ΑΜΑ για τη Συνάρτηση της Σφαίρας

Πλέγμα Βάσης	Άτομα προς Αξιολόγηση	Αριθμός Επεξεργαστών
6 × 6	27	7
10 × 10	75	10
Κοινός Μέγιστος Αριθμός Αξιολογήσεων		6000

3.2.3 Αποτελέσματα - Σύγκριση ΑΕΑ και ΑΜΑ

Η μέση σύγκλιση από τις συνολικά 30 βελτιστοποιήσεις που έλαβαν χώρα, για πλέγμα διαστάσεων βάσης 6 × 6 και 7 ίδιους επεξεργαστές και για πλέγμα βάσης 10 × 10 και 10 ίδιους επεξεργαστές, για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Ελαχιστοποίηση συνάρτησης σφαίρας. Σύγκριση πορείας μέσης σύγκλισης ΑΕΑ με ΑΜΑ για πλέγμα βάσης 6 × 6 και 7 επεξεργαστές (αριστερά) και πλέγμα βάσης 10 × 10 και 10 επεξεργαστές (δεξιά).

Ακολουθούν οι πίνακες 3.2 και 3.3 όπου παρουσιάζονται για τις 30 εκτελέσεις, τα στατιστικά στοιχεία για την επίδοση του ΑΕΑ και του ΑΜΑ, για τα πλέγματα βάσης 6 × 6 και 10 × 10 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2: Στατιστικά μεγέθη επίδοσης του ΑΕΑ και του ΑΜΑ για τις 30 εκτελέσεις για πλέγμα βάσης 6×6 , 7 επεξεργαστές και 6000 αξιολογήσεις.

Αλγόριθμος	Μέση τιμή	Καλύτερη Τιμή	Χειρότερη Τιμή	Τυπική Απόκλιση
ΑΕΑ	$9.07 \cdot 10^{-4}$	$3.89 \cdot 10^{-5}$	$3.64 \cdot 10^{-3}$	$9.64 \cdot 10^{-4}$
ΑΜΑ	$4.53 \cdot 10^{-5}$	10^{-8}	$7.9 \cdot 10^{-4}$	$1.75 \cdot 10^{-4}$

Πίνακας 3.3: Στατιστικά μεγέθη επίδοσης του ΑΕΑ και του ΑΜΑ για τις 30 εκτελέσεις για πλέγμα βάσης 10×10 , 10 επεξεργαστές και 6000 αξιολογήσεις.

Αλγόριθμος	Μέση τιμή	Καλύτερη Τιμή	Χειρότερη Τιμή	Τυπική Απόκλιση
ΑΕΑ	$8.27 \cdot 10^{-4}$	$1.68 \cdot 10^{-4}$	$3.24 \cdot 10^{-3}$	$7.09 \cdot 10^{-4}$
ΑΜΑ	$1.67 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}	$1.6 \cdot 10^{-7}$	$2.74 \cdot 10^{-8}$

Όπως παρατηρείται τόσο από τα διαγράμματα του σχήματος 3.2, όσο και από τις τιμές των στατιστικών μεγεθών των πινάκων 3.2 και 3.3, ο ΑΜΑ παρουσιάζει πολύ καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τον ΑΕΑ για κοινές παραμέτρους και μάλιστα, προσεγγίζει τη βέλτιστη λύση πολύ πριν την ολοκλήρωση του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων που έχει οριστεί εδώ.

Αναλυτικότερα: τόσο για την περίπτωση του πλέγματος βάσης διαστάσεων 6×6 και των 7 επεξεργαστών, όσο και για αυτήν του πλέγματος διαστάσεων 10×10 και των 10 επεξεργαστών, η συνολική πορεία μέσης σύγκλισης του ΑΜΑ είναι αισθητά καλύτερα από αυτή του ΑΕΑ, πράγμα που φαίνεται από την πολύ πιο απότομη κλίση της καμπύλης του ΑΜΑ. Επιπλέον και οι δύο αλγόριθμοι έχουν καταφέρει να προσεγγίσουν το ελάχιστο της συνάρτησης με ικανοποιητική ακρίβεια, με τον ΑΜΑ να πετυχαίνει μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων (όπως φαίνεται από τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές του πίνακα 3.2 και 3.3). Ωστόσο, μια πολύ σημαντική παρατήρηση είναι ότι ο ΑΜΑ έχει πρακτικά μηδενίσει την τιμή της συνάρτησης σφαίρας (αποτελέσματα της τάξης του 10^{-5} με 10^{-8}), ήδη λίγο πριν την ολοκλήρωση των 3000 αξιολογήσεων, τη στιγμή που για τον ίδιο αριθμό αξιολογήσεων, ο ΑΕΑ έχει προσεγγίσει μια λύση αρκετά μικρότερης ακρίβειας από τη βέλτιστη. Ακόμα και στο τέλος των 6000 αξιολογήσεων, ο ΑΕΑ δεν πετυχαίνει την ακρίβεια αποτελεσμάτων που δίνει ο ΑΜΑ (κάτι που τελικά θα συνέβαινε, αν ο ΑΕΑ αφηνόταν να εκτελέσει μεγαλύτερο αριθμό αξιολογήσεων από τις 6000).

Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν επομένως, ότι ο ΑΜΑ παρουσιάζει γενικά καλύτερη συμπεριφορά από τον ΑΕΑ. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις προβλημάτων βελτιστοποίησης,

όπου η υπεροχή του ΑΜΑ σε σχέση με τον ΑΕΑ δεν παύει μεν να υφίσταται, αλλά δεν είναι τόσο εμφανής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η απλή μορφή της μαθηματικής συνάρτησης της σφαίρας (που επιλέχτηκε σκόπιμα για αυτό το σκοπό), με ένα μοναδικό ολικό ελάχιστο, επέτρεψε την κατά πολύ ταχύτερη - σε σχέση με τον ΑΕΑ - σύγκλιση του ΑΜΑ. Όπως θα φανεί και στην ενότητα που ακολουθεί, η οποία πραγματεύεται τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης που έγιναν για τη συνάρτηση **Rastrigin**, εκεί η διαφορά μεταξύ ΑΕΑ και ΑΜΑ είναι υπαρκτή, αλλά λιγότερο έντονη, λόγω της πολυπλοκότητας της συνάρτησης **Rastrigin**, η οποία είναι πολυμορφική και παρουσιάζει μεγάλο αριθμό από τοπικά ελάχιστα και μέγιστα στο χώρο. Εξαιτίας του της πολυμορφίας αυτής, η περιοχή που υποδεικνύεται κάθε φορά στον αλγόριθμο από τις αξιολογήσεις που έχουν προηγηθεί, ως η πιθανή περιοχή ολικού ελαχίστου, στην γειτονιά της οποίας πραγματοποιείται η τοπική βελτίωση, τις περισσότερες φορές πρόκειται για περιοχή τοπικού ελαχίστου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος να 'σπαταλά' τοπικές βελτιώσεις για να 'ψάχνει' τη βέλτιστη λύση σε λάθος ακρότατα, μέχρι να εντοπίσει πράγματι την περιοχή όπου βρίσκεται το ολικό ελάχιστο, τη στιγμή που για τη συνάρτηση της σφαίρας, όποια τοπική βελτίωση πραγματοποιείται οδεύει πάντοτε προς το μοναδικό ακρότατο που είναι και το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης.

3.3 Παραμετρική Διερεύνηση ΑΕΑ/ΑΜΑ για Μαθηματικό Πρόβλημα Ελαχιστοποίησης Ενός Στόχου Χωρίς Περιορισμούς

Όπως αναφέρθηκε και στη Γενική Περιγραφή του κεφαλαίου, η παραμετρική μελέτη που διεξάχθηκε για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ, αφορούσε δύο παραμέτρους των αλγορίθμων, τις οποίες ο χρήστης μπορεί κάθε φορά να καθορίσει κατά βούληση: τις διαστάσεις του πλέγματος βάσης (δηλαδή τον αριθμό των ατόμων προς αξιολόγηση) και τον αριθμό των επεξεργαστών που θα χρησιμοποιηθούν (δηλαδή των παράλληλων αξιολογήσεων που θα λάβουν χώρα). Σκοπός της διερεύνησης ήταν να αποδειχτεί αν υπάρχει ή όχι αλληλεξάρτηση των δύο παραμέτρων και να βρεθεί ποιοι συνδυασμοί παραμέτρων οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα, αν τελικά η αλληλεξάρτηση αυτή υφίσταται.

3.3.1 Μαθηματική Συνάρτηση **Rastrigin**

Για τη διεξαγωγή της παραμετρικής μελέτης επιλέχθηκε η ελαχιστοποίηση της μαθηματικής συνάρτησης **Rastrigin**, [32], που αποτελεί μαθηματικό πρόβλημα ενός στόχου, χωρίς περιορισμούς.

Και σε αυτή την περίπτωση, η επιλογή της μαθηματικής συνάρτησης **Rastrigin** επιτρέπει την πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού αξιολογήσεων, αφού ο υπολογιστικός χρόνος ολοκλήρωσης

της κάθε αξιολόγησης, δηλαδή εύρεσης της τιμής της συνάρτησης στόχου, καθώς και ο χρόνος υπολογισμού της παραγώγου της συνάρτησης (στην περίπτωση του AMA) είναι ελάχιστος.

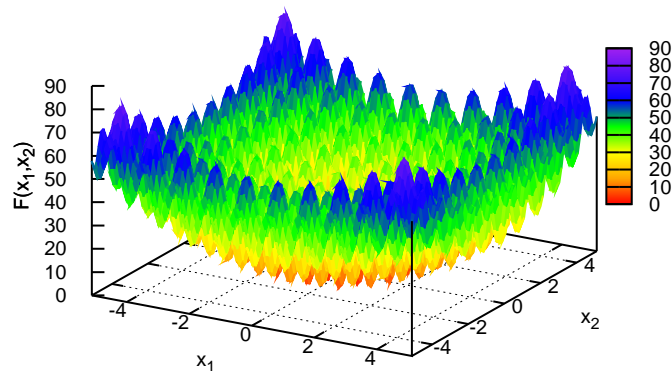
Παρότι όμως ο μαθηματικός τύπος της συνάρτησης **Rastrigin** (και της παραγώγου της) δεν είναι υπολογιστικά πολύπλοκος (όπως ίσχυε και για τη συνάρτηση της σφαίρας), η εύρεση του ολικού ελαχίστου της συνάρτησης - τόσο για τον AEA, όσο και για τον AMA - απαιτεί πολύ μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων απ' ότι η συνάρτηση της σφαίρας, καθότι η μορφή της συνάρτησης **Rastrigin** παρουσιάζει μεγάλο αριθμό τοπικών ακρότατων στο χώρο. Στο σχήμα 3.3, όπου παρουσιάζεται η μορφή της συνάρτησης **Rastrigin**, έτσι όπως διαμορφώνεται για 2 μεταβλητές σχεδιασμού στο διάστημα $[-5.12, 5.12]$, φαίνεται η πολυμορφία της. Γίνεται κατανοητό, ότι ο μεγάλος αριθμός από τοπικά ελάχιστα και μέγιστα που διαθέτει, καθιστούν την εύρεση του μοναδικού ολικού ελαχίστου της συνάρτησης αρκετά πιο δύσκολη διαδικασία.

Ο μαθηματικός τύπος της συνάρτησης **Rastrigin** είναι

$$F_{Ras}(\vec{x}) = 10n + \sum_{i=1}^N (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)) \quad , \quad i = 1, N \quad (3.2)$$

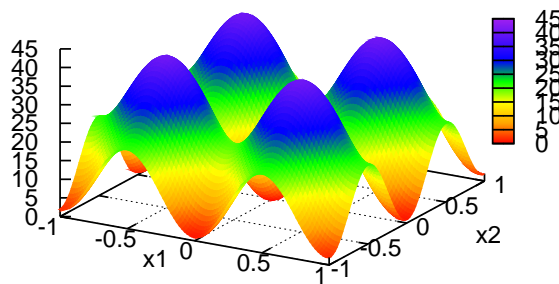
με $N = 20$ μεταβλητές σχεδιασμού και $x_i \in [-5.12, 5.12]$ (το διάστημα αναζήτησης ολικού ελαχίστου της συνάρτησης).

Η συνάρτηση παρουσιάζει ελάχιστη τιμή $F_{Ras}(\vec{x}) = 0$ για $x_i = 0$, $i = 1, 20$.

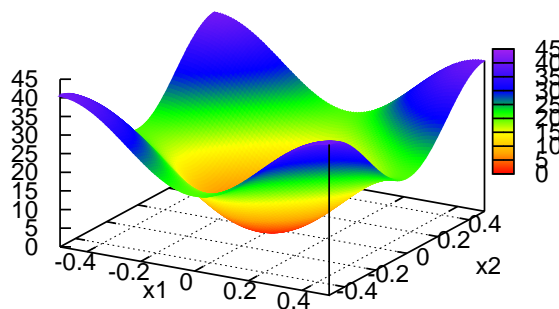


Σχήμα 3.3: Γραφική 3Δ απεικόνιση της συνάρτησης **Rastrigin** για 2 μεταβλητές σχεδιασμού x_1, x_2 , στο διάστημα $[-5.12, 5.12]$. Η συνάρτηση παρουσιάζει ολικό ελάχιστο, το $F(x_1, x_2) = 0$, στο σημείο $x_1 = 0$, $x_2 = 0$.

Προκειμένου να γίνει πιο ξεκάθαρη απεικόνιση της περιοχής όπου εντοπίζεται το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης Rastrigin, παρουσιάζονται - πάλι για 2 μεταβλητές σχεδιασμού - δύο ακόμα σχήματα: το πρώτο για το διάστημα $[-1, 1]$ (σχήμα 3.4) και το δεύτερο για το διάστημα $[-0.45, 0.45]$ (σχήμα 3.5). Στο σχήμα 3.5 φαίνεται καθαρά πλέον το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης.



Σχήμα 3.4: Γραφική 3Δ απεικόνιση της συνάρτησης Rastrigin για 2 μεταβλητές σχεδιασμού x_1, x_2 , στο διάστημα $[-1, 1]$, όπου διακρίνεται πιο ξεκάθαρα η περιοχή ολικού ελαχίστου $F(x_1, x_2) = 0$, για $x_1 = 0, x_2 = 0$.



Σχήμα 3.5: Γραφική 3Δ απεικόνιση της συνάρτησης Rastrigin για 2 μεταβλητές σχεδιασμού x_1, x_2 , στο διάστημα $[-0.45, 0.45]$, όπου φαίνεται πλέον το ολικό ελάχιστο $F(x_1, x_2) = 0$, για $x_1 = 0, x_2 = 0$.

3.3.2 Παράμετροι ΑΕΑ/ΑΜΑ

Η επιλογή παραμέτρων ήταν κοινή για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ, προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για τους δύο αλγόριθμους.

Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν πλέγματα βάσης τριών διαφορετικών διαστάσεων: πλέγμα βάσης 6×6 (με 27 άτομα προς αξιολόγηση και 9 πόλους), πλέγμα βάσης 8×8 (με 48 άτομα προς αξιολόγηση και 16 πόλους) και πλέγμα βάσης 10×10 (με 75 άτομα προς αξιολόγηση και 25 πόλους). Δεν έγινε μελέτη πλέγματος μεγαλύτερων διαστάσεων, καθότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορούν να γενικευτούν και για περιπτώσεις μεγαλύτερων πλεγμάτων.

Ο αριθμός επεξεργαστών που επιλέχθηκε για κάθε πλέγμα διαφορετικών διαστάσεων, έγινε με κριτήριο τον αριθμό των ατόμων προς αξιολόγηση (agents) που περιείχε το κάθε πλέγμα βάσης. Αν το πλέγμα για παράδειγμα, περιέχει n άτομα προς αξιολόγηση, τότε ο μέγιστος αριθμός επεξεργαστών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι n , ενώ ο ελάχιστος δύο, καθότι πρόκειται για παράλληλη επεξεργασία. Αναζητώντας μια χρυσή τομή μεταξύ των δύο αυτών μεγεθών, επιλέχθηκαν - για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ - οι συνδυασμοί που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4.

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα, εξαιτίας της πολυμορφίας της συγκεκριμένης συνάρτησης απαιτείται μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων προκειμένου να γίνει προσέγγιση της βέλτιστης λύσης με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια και να σχηματιστεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την πορεία σύγκλισης των δύο αλγορίθμων, κάτι που είναι εφικτό λόγω του ελάχιστου υπολογιστικού κόστους της τιμής της συνάρτησης στόχου και της πρώτης παραγώγου της. Έτσι, το κριτήριο σύγκλισης για την παραμετρική μελέτη του ΑΕΑ και του ΑΜΑ ήταν οι 30000 αξιολογήσεις, αριθμός που αν και μεγάλος, είναι συνηθισμένος για τη συγκεκριμένη συνάρτηση ([32]). Αναφέρεται ότι σε αρκετές περιπτώσεις, η βέλτιστη λύση του προβλήματος είχε προσεγγιστεί σε ικανοποιητικό βαθμό αρκετά νωρίτερα.

Και πάλι για τον κάθε αλγόριθμο, πραγματοποιήθηκαν 30 εκτελέσεις για κάθε διαφορετικό συνδυασμό διαστάσεων πλέγματος βάσης και αριθμό επεξεργαστών, για 30 διαφορετικές γεννήτριες ψευδο-τυχαίων αριθμών (RNG). Κατά τα προηγούμενα, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις 30 εκτελέσεις, ώστε να πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός των συγκριτικών διαγραμμάτων που απεικονίζουν την πορεία σύγκλισης του ΑΕΑ και του ΑΜΑ για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 3.4: Παράμετροι ΑΕΑ και ΑΜΑ για τη Συνάρτηση Rastrigin

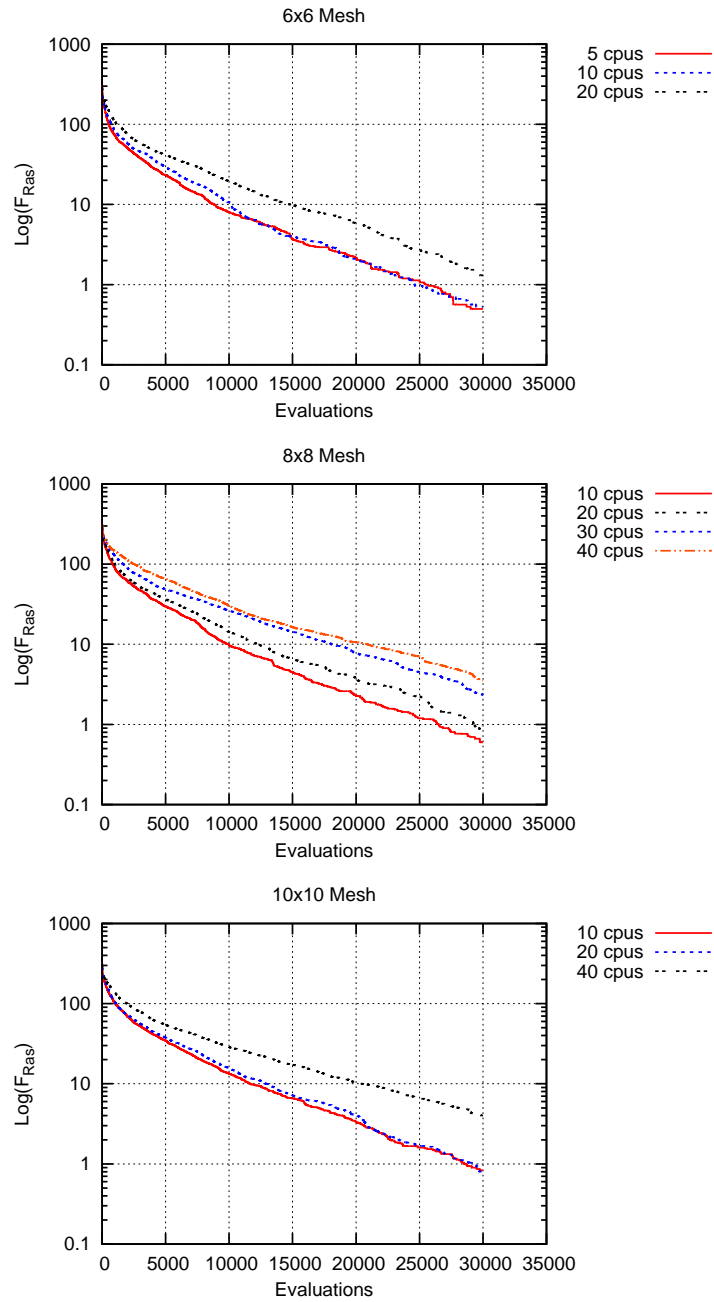
Πλέγμα Βάσης	Άτομα προς Αξιολόγηση	Αριθμός Επεξεργαστών			
		5	10	20	30
6 × 6	27	5	10	20	
8 × 8	48	10	20	30	40
10 × 10	75	10	20	40	
Κοινός Μέγιστος Αριθμός Αξιολογήσεων		30000			

3.3.3 Αποτελέσματα Παραμετρικής Μελέτης

Αποτελέσματα ΑΕΑ

Στο σχήμα 3.6 που ακολουθεί παρουσιάζεται η πορεία της μέσης σύγκλισης 30 βελτιστοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν για τον ΑΕΑ, για πλέγματα διαστάσεων βάσης 6 × 6, 8 × 8 και 10 × 10 αντίστοιχα.

Τα στατιστικά μεγέθη για την επίδοση του ΑΕΑ, για τους διαφορετικούς συνδυασμούς διαστάσεων πλεγμάτων βάσης και αριθμού επεξεργαστών, παρουσιάζονται - για λόγους καλύτερης εποπτείας - μαζί με αυτά του ΑΜΑ, στους πίνακες 3.5 έως 3.7 που βρίσκονται παρακάτω.



Σχήμα 3.6: Ελαχιστοποίηση συνάρτησης Rastrigin. Πορεία μέσης σύγκλισης ΑΕΑ για πλέγμα βάσης 6×6 και χρήση 5, 10 και 20 επεξεργαστών (πάνω), 8×8 και χρήση 10, 20, 30 και 40 επεξεργαστών (κέντρο) και 10×10 και χρήση 10, 20 και 40 επεξεργαστών (κάτω).

Σχετικά με τη συνολική εικόνα των διαγράμματα που προέκυψαν, μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες γενικές παρατηρήσεις:

Καταρχήν τα διαγράμματα επιβεβαιώνουν την ύπαρξη εξάρτησης των δύο παραμέτρων (διαστάσεων πλέγματος βάσης του αλγορίθμου και αριθμού χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών) που ήταν και το αρχικό ζητούμενο της παρούσας μελέτης, ενώ παρατηρείται ότι η εξάρτηση αυτή γίνεται εντονότερη όσο αυξάνονται οι διαστάσεις του πλέγματος.

Η - εκ πρώτης όψεως λογική - υπόθεση ότι αν για δεδομένες διαστάσεις πλέγματος, χρησιμοποιηθεί μεγάλος αριθμός επεξεργαστών θα προκύψουν καλύτερα αποτελέσματα σε λιγότερο χρόνο, αποδεικνύεται λανθασμένη. Ο αλγόριθμος ολοκληρώνει μεν γρηγορότερα το συνολικό αριθμό αξιολογήσεων που έχει ορίσει ο χρήστης, αλλά όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, δεν καταφέρνει να προσεγγίσει το ελάχιστο της συνάρτησης με καλή ακρίβεια. Για παράδειγμα, για αριθμό επεξεργαστών 40, παρατηρείται στα διαγράμματα για διαστάσεις πλεγμάτων βάσης 8×8 και 10×10 , ότι ο ΑΕΑ δεν καταφέρνει να προσεγγίσει το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης με την ακρίβεια που επιτυγχάνεται για 10 επεξεργαστές, ακόμα και έπειτα από τις 30000 αξιολογήσεις (αριθμός που γενικά θεωρείται αρκετά μεγάλος για βελτιστοποίηση μαθηματικού προβλήματος). Μάλιστα, αν το κριτήριο σύγκλισης δεν ήταν ένας μέγιστος αριθμός αξιολογήσεων, αλλά η προσέγγιση της βέλτιστης λύσης με μια επιθυμητή ακρίβεια, τότε το επιχείρημα του συντομότερου συνολικού χρόνου εκτέλεσης των αξιολογήσεων ανατρέπεται, καθότι ο αλγόριθμος θα πρέπει τελικά να εκτελέσει περισσότερες αξιολογήσεις από ότι αν θα είχε χρησιμοποιηθεί μικρότερος αριθμός επεξεργαστών.

Ο λόγος που για πλέγμα συγκεκριμένων διαστάσεων βάσης, η πορεία σύγκλισης του ΑΕΑ είναι χειρότερη για μεγάλους αριθμούς επεξεργαστών, μπορεί να αιτιολογηθεί από τον ίδιο τον μηχανισμό λειτουργίας του πλέγματος και συγκεκριμένα, από τον τρόπο που καθορίζεται η επιλογή του επόμενου ατόμου (agent) που θα σταλεί προς αξιολόγηση, βάσει δηλαδή προτεραιότητας κόστους (cost priority) και ηλικίας (age priority). Από ότι φαίνεται, τα δύο αυτά μεγέθη διαμορφώνονται καλύτερα όταν η αξιολόγηση των ατόμων γίνεται πιο σταδιακά (δηλαδή όταν αξιολογείται μικρότερος αριθμός ατόμων τη φορά), με αποτέλεσμα ο ΑΕΑ να παρουσιάζει πολύ καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά στην σύγκλιση.

Ωστόσο, ούτε η υιοθέτηση της αντίθετης προσέγγισης, δηλαδή ότι ο μικρότερος αριθμός χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών οδηγεί πάντα σε καλύτερη σύγκλιση φαίνεται να είναι σωστή, καθότι παρατηρείται ότι για πλέγμα βάσης 6×6 και 10×10 οι πορείες σύγκλισης του ΑΕΑ για 5 και 10 επεξεργαστές και για 10 και 20 επεξεργαστές αντίστοιχα είναι σχεδόν ίδιες. Για μικρούς αριθμούς χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών επομένως, κριτήριο για την επιλογή του συνδυασμού των δύο παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν δεν αποτελεί πλέον η επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αλλά δύο άλλοι παράγοντες: η εκάστοτε διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς και ο επιθυμητός χρόνος ολοκλήρωσης των αξιολογήσεων. Ο τρόπος διαμόρφωσης των δύο αυτών παραγόντων δεν μπορεί σαφώς να είναι γνωστός για την κάθε περίπτωση. Ιδιαίτερα

ο συνολικός χρόνος αξιολόγησης εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα βελτιστοποίησης αλλά και από το μέγιστο αριθμό αξιολογήσεων που θα ορίσει ο χρήστης.

Ωστόσο, αν δεν ληφθεί υπόψη ο παράγοντας του χρόνου που δεν μπορεί να είναι γνωστός εκ των προτέρων για κάθε περίπτωση, μπορεί να διατυπωθεί για τον ΑΕΑ ο ακόλουθος εμπειρικός κανόνας, βάσει των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την παραμετρική μελέτη:

Για τον Ασύγχρονο Δομημένο Εξελικτικό Αλγόριθμο, για πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός στόχου και συγκεκριμένες διαστάσεις πλέγματος βάσης (δηλαδή πλήθος ατόμων προς αξιολόγηση), υπάρχει ένας μέγιστος δυνατός αριθμός επεξεργασιών που οδηγεί σε αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Συγκεκριμένα, συνιστάται εμπειρικά να ισχύει:

$$\frac{N_{AGENTS}}{N_{CPUs}} \approx 5$$

Αποτελέσματα AMA

Αντίστοιχα με τον ΑΕΑ, στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η πορεία της μέσης σύγκλισης 30 βελτιστοποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν για τον AMA, για πλέγματα διαστάσεων βάσης 6×6 , 8×8 και 10×10 αντίστοιχα, ενώ στους πίνακες 3.5 έως 3.7 παρουσιάζονται για τους διαφορετικούς συνδυασμούς διαστάσεων πλεγμάτων βάσης και αριθμού επεξεργασιών, τα στατιστικά μεγέθη για την επίδοση του AMA, μαζί με αυτά του ΑΕΑ.

Πίνακας 3.5: Στατιστικά μεγέθη επίδοσης ΑΕΑ και AMA για τις 30 εκτελέσεις για πλέγμα βάσης 6×6 και 30000 αξιολογήσεις.

6 × 6 Mesh						
CPUs	5		10		20	
	AEA	AMA	AEA	AMA	AEA	AMA
LS_{mean}	-	2263.8	-	1757.7	-	1206.5
F_{mean}	0.498	0.399	0.531	0.332	1.306	1.139
F_{min}	$9 \cdot 10^{-7}$	10^{-8}	$2.4 \cdot 10^{-6}$	10^{-8}	$5.2 \cdot 10^{-5}$	$6.2 \cdot 10^{-5}$
F_{max}	3.980	1.990	0.995	0.995	2.985	2.985
$Stdv$	0.857	0.562	0.505	0.477	0.906	0.711

όπου

$CPUs$: Αριθμός Επεξεργαστών

LS_{mean} : Μέσος Όρος του Αριθμού Τοπικών Βελτιώσεων (LS)

F_{mean} : Μέση Τιμή

F_{min} : Καλύτερη Τιμή

F_{max} : Χειρότερη Τιμή

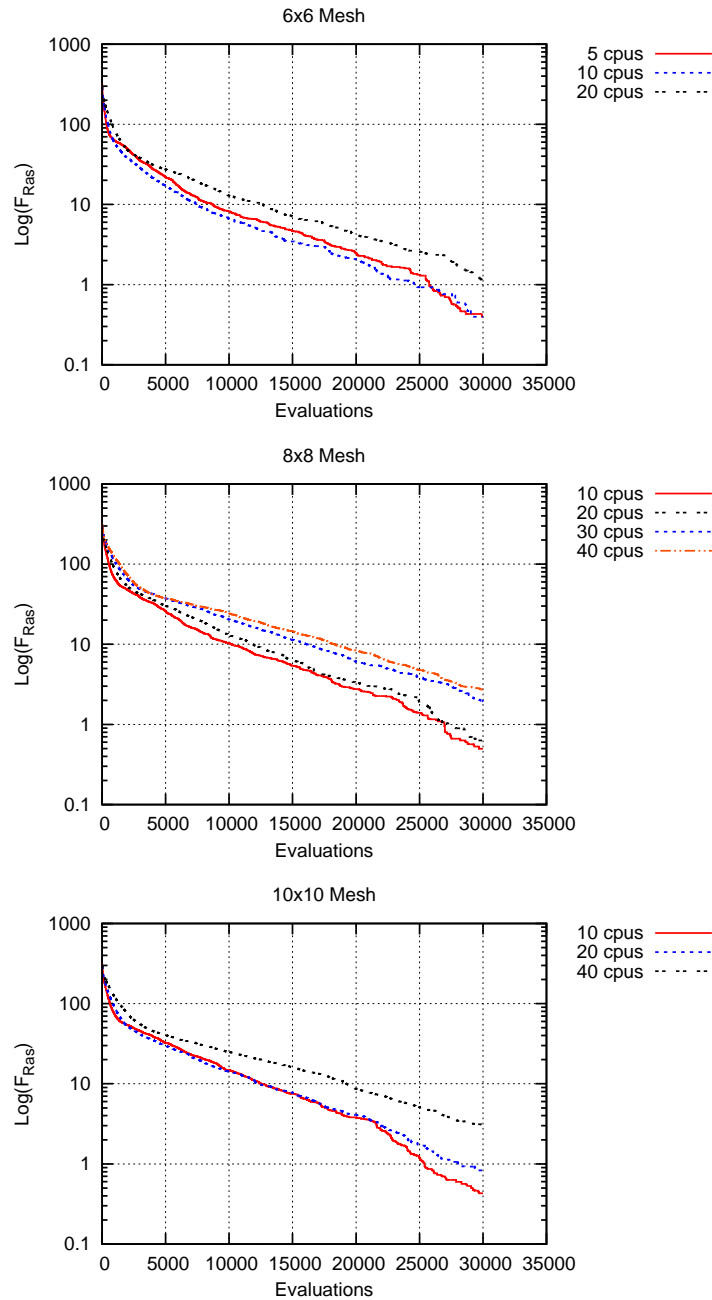
$Stdv$: Τυπική Απόκλιση

Πίνακας 3.6: Στατιστικά μεγέθη επίδοσης ΑΕΑ και ΑΜΑ για τις 30 εκτελέσεις για πλέγμα βάσης 8×8 και 30000 αξιολογήσεις.

8 × 8 Mesh								
CPUs	10		20		30		40	
	AEA	AMA	AEA	AMA	AEA	AMA	AEA	AMA
LS_{mean}	-	1459.3	-	1171.4	-	853.1	-	610.8
F_{mean}	0.598	0.497	0.801	0.630	2.344	1.937	3.547	2.733
F_{min}	$5.9 \cdot 10^{-6}$	10^{-8}	$8.7 \cdot 10^{-5}$	10^{-8}	$6.2 \cdot 10^{-3}$	$5.1 \cdot 10^{-4}$	$9.1 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-5}$
F_{max}	1.990	1.990	1.990	1.990	4.231	3.980	6.192	5.971
$Stdv$	0.561	0.679	0.661	0.553	1.289	0.944	1.614	1.359

Πίνακας 3.7: Στατιστικά μεγέθη επίδοσης ΑΕΑ και ΑΜΑ για τις 30 εκτελέσεις για πλέγμα βάσης 10×10 και 30000 αξιολογήσεις

10 × 10 Mesh						
CPUs	10		20		40	
	AEA	AMA	AEA	AMA	AEA	AMA
LS_{mean}	-	1453	-	1040	-	636.7
F_{mean}	0.831	0.431	0.800	0.830	4.020	3.035
F_{min}	$2.7 \cdot 10^{-5}$	10^{-8}	$1.4 \cdot 10^{-4}$	10^{-8}	0.998	0.995
F_{max}	1.993	1.990	2.985	2.985	7.000	5.970
$Stdv$	0.742	0.623	0.881	0.695	1.679	1.229



Σχήμα 3.7: Ελαχιστοποίηση συνάρτησης Rastrigin. Πορεία μέσης σύγκλισης AMA για πλέγμα βάσης 6×6 και χρήση 5, 10 και 20 επεξεργαστών (πάνω), 8×8 και χρήση 10, 20, 30 και 40 επεξεργαστών (κέντρο) και 10×10 και χρήση 10, 20 και 40 επεξεργαστών (κάτω).

Από τα διαγράμματα του σχήματος 3.7 είναι εμφανές ότι και για τον AMA, υφίσταται η εξάρτηση διαστάσεων πλέγματος βάσης και αριθμού επεξεργαστών. Και πάλι η εξάρτηση των δύο παραμέτρων γίνεται περισσότερο εμφανής, όσο αυξάνονται οι διαστάσεις του πλέγματος.

Τα συμπεράσματα που αφορούν στους μεγάλους αριθμούς επεξεργαστών είναι τα ίδια με αυτά που διατυπώθηκαν για τον ΑΕΑ: για κάθε πλέγμα παρατηρείται και πάλι χειρότερη πορεία μέσης σύγκλισης για περισσότερους επεξεργαστές. Για τον ΑΜΑ όμως, μπορεί να γίνει μια επιπλέον παρατήρηση που αφορά το συνολικό αριθμό τοπικών βελτιώσεων που πραγματοποιήθηκαν επιτυχώς κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου. Στους πίνακες 3.5 με 3.7 έχει υπολογιστεί για κάθε συνδυασμό διαστάσεων πλέγματος βάσης και αριθμού επεξεργαστών ο μέσος όρος (των 30 βελτιστοποιήσεων) των ατόμων που πραγματοποίησαν επιτυχώς τοπική βελτίωση (στους πίνακες συμβολίζεται με LS_{mean}). Παρατηρείται ότι, όσο αυξάνεται ο αριθμός των επεξεργαστών, τόσο μειώνεται ο αριθμός των τοπικών βελτιώσεων που λαμβάνουν χώρα, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τη σύγκλιση του αλγορίθμου, καθότι η τοπική βελτίωση παίζει το ρόλο 'καταλύτη', επιταχύνοντας την εύρεση της βέλτιστης λύσης.

Το αίτιο αυτού του φαινομένου, που συναντάται σε όλους τους συνδυασμούς παραμέτρων που δοκιμάστηκαν για τον ΑΜΑ, είναι το εξής: Όταν ο αριθμός επεξεργαστών πλησιάζει τον αριθμό των ατόμων προς αξιολόγηση του πλέγματος, τότε - όπως συνέβαινε και στον ΑΕΑ - κάθε χρονική στιγμή, το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού του πλέγματος αξιολογείται σε κάποιον επεξεργαστή. Αυτό καταργεί επί της ουσίας τη λειτουργία των προτεραιοτήτων κόστους (*cost priority*) και ηλικίας (*age priority*), στις οποίες και στηρίζεται η λογική του αλγορίθμου, καθότι αφορούν στον τρόπο επιλογής του επόμενου ατόμου που θα σταλεί για αξιολόγηση. Επειδή το πρόβλημα βελτιστοποίησης που μελετάται πρόκειται για μαθηματική συνάρτηση με σχεδόν μηδαμινό κόστος υπολογισμού της τιμής και της πρώτης παραγώγου της, μεγάλος αριθμός ατόμων που στέλνονται για αξιολόγηση, συνεπάγεται και εξίσου μεγάλο αριθμό ατόμων που επιστρέφουν στο πλέγμα κάθε χρονική στιγμή, αφού έχουν αξιολογηθεί. Η διαδικασία της τοπικής βελτίωσης σε αυτή την περίπτωση, λειτουργεί με έναν ετεροχρονισμό: αφού το άτομο επιστρέψει από αξιολόγηση, πρέπει να γίνει έλεγχος αν είναι η μέχρι τώρα βέλτιστη λύση (για πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός στόχου, όπως η συνάρτηση *Rastrigin*). Αν έχει την καλύτερη - μέχρι εκείνη τη στιγμή - τιμή, τότε στέλνεται για τοπική βελτίωση και στη συνέχεια επαναξιολογείται. Όλη αυτή η διαδικασία απαιτεί κάποιο χρόνο, ακόμα κι αν πρόκειται για κλάσματα του δευτερολέπτου. Για μια μαθηματική συνάρτηση, που οι αξιολογήσεις ολοκληρώνονται σε μηδαμινό χρόνο και για μεγάλους αριθμούς ατόμων που επιστρέφουν κάθε στιγμή στο πλέγμα, η διαδικασία της τοπικής βελτίωσης δεν 'προλαβαίνει' να λειτουργήσει, καθότι οι αξιολογήσεις προχωρούν πολύ πιο γρήγορα από τις τοπικές βελτιώσεις. Με το που θα βρεθεί μια τρέχουσα βέλτιστη λύση που στέλνεται για τοπική βελτίωση και μέχρι να επιστρέψει από την επαναξιολόγησή της, στο μεταξύ έχει επιστρέψει στο πλέγμα μεγάλος αριθμός λύσεων με - ενδεχομένως σημαντικά - καλύτερη τιμή από αυτή που θα έχει η λύση που επέστρεψε από τοπική βελτίωση και επαναξιολόγηση.

Όσον αφορά στους μικρούς αριθμούς επεξεργαστών, παρατηρείται μια μικρή διαφοροποίηση από τον ΑΕΑ. Όπως αναφέρθηκε, για πλέγμα βάσης 6×6 και 10×10 , οι πορείες μέσης σύγκλισης του ΑΕΑ για 5 και 10 επεξεργαστές και για 10 και 20 επεξεργαστές αντίστοιχα δεν παρουσίαζαν διαφορές. Για πλέγμα βάσης διαστάσεων 10×10 ωστόσο, η σύγκλιση του ΑΜΑ για 10 επεξεργαστές γίνεται λίγο καλύτερη στις τελευταίες 7000 αξιολογήσεις, απ' ότι για 20 επεξεργαστές.

Επομένως, για τον ΑΜΑ μπορεί να διατυπωθεί ο ίδιος εμπειρικός κανόνας που διατυπώθηκε και για τον ΑΕΑ, υπό τις ίδιες προϋποθέσεις:

Για τον Ασύγχρονο Μιμητικό Αλγόριθμο, για πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός στόχου και συγκεκριμένες διαστάσεις πλέγματος βάσης (δηλαδή πλήθος ατόμων προς αξιολόγηση), υπάρχει ένας μέγιστος δυνατός αριθμός επεξεργαστών που οδηγεί σε αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Συγκεκριμένα, συνιστάται εμπειρικά να ισχύει:

$$\frac{N_{AGENTS}}{N_{CPUs}} \approx 5$$

3.4 Έλεγχος Συμπερασμάτων για Μαθηματικό Πρόβλημα Ελαχιστοποίησης Δύο Στόχων Χωρίς Περιορισμούς

Προκειμένου να ελεγχθεί η ισχύς των συμπερασμάτων που έχουν προκύψει μέχρι τώρα και για πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων, έγινε μελέτη της συμπεριφοράς του ΑΕΑ και του ΑΜΑ, για 4 διαφορετικούς συνδυασμούς διαστάσεων πλεγμάτων βάσης και αριθμού επεξεργαστών, πάνω στο μαθηματικό πρόβλημα ZDT3, [12]. Επιπλέον ελέγχεται η ικανότητα των αλγορίθμων για εύρεση ενός ασυνεχούς μετώπου, όπως αυτό που προκύπτει από την αναλυτική λύση του προβλήματος ZDT3.

3.4.1 Μαθηματικό Πρόβλημα ZDT3

Η δύο συναρτήσεις στόχοι F_1 και F_2 προς ελαχιστοποίηση για το μαθηματικό πρόβλημα ZDT3 είναι

$$F_1(\vec{x}) = x_1, \quad F_2(\vec{x}) = G(x_2, \dots, x_N)H(F_1(x_1), G(x_2, \dots, x_N)) \quad (3.3)$$

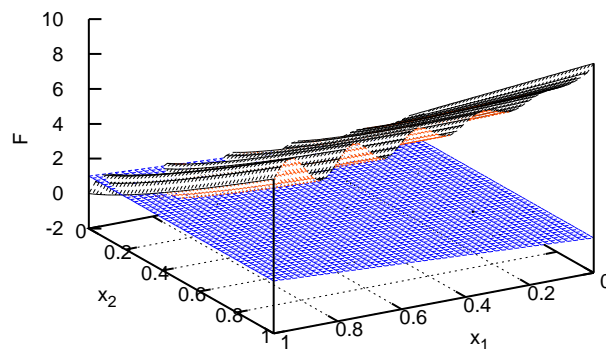
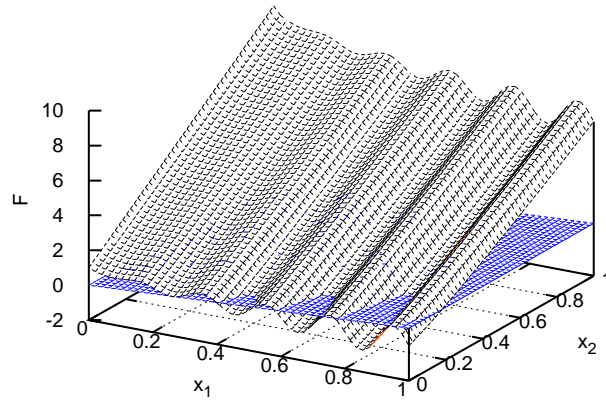
όπου

$$G(x_2, \dots, x_N) = 1 + \frac{9}{N-1} \sum_{i=2}^N x_i, \quad H(F_1, G) = 1 - \sqrt{\frac{F_1}{G}} - \frac{F_1}{G} \sin(10\pi F_1) \quad (3.4)$$

με $N = 30$ μεταβλητές σχεδιασμού και $x_i \in [0, 1]$.

Το μέτωπο Pareto προκύπτει αναλυτικά για $G(\vec{x}) = 1$ και παρουσιάζει ασυνέχεια στο χώρο των λύσεων.

Στο σχήμα 3.8 απεικονίζεται η 3Δ μορφή των δύο συναρτήσεων στόχων F_1 και F_2 του προβλήματος ZDT3 από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες, για 2 μεταβλητές σχεδιασμού x_1, x_2 εντός του διαστήματος $[0, 1]$. Στο πρώτο σχήμα φαίνεται το σχηματιζόμενο ασυνεχές μέτωπο Pareto που βρίσκεται κάτω από την τομή των δύο συναρτήσεων.



Σχήμα 3.8: Γραφική 3Δ απεικόνιση από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες, των δύο συναρτήσεων στόχων F_1 και F_2 του προβλήματος ZDT3 για 2 μεταβλητές σχεδιασμού x_1, x_2 , στο διάστημα $[0, 1]$.

3.4.2 Παράμετροι ΑΕΑ/ΑΜΑ

Όπως και στα προηγούμενα, η επιλογή παραμέτρων ήταν κοινή για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Αυτή τη φορά μελετήθηκαν λιγότεροι συνδυασμοί διαστάσεων πλέγματων βάσης και αριθμού επεξεργαστών. Συγκεκριμένα οι διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων ήταν: πλέγμα βάσης 6×8 (με 36 άτομα προς αξιολόγηση και 12 πόλους) για 5 και 14 επεξεργαστές και πλέγμα βάσης 8×8 (με 48 άτομα προς αξιολόγηση και 16 πόλους) για 8 και 14 επεξεργαστές.

Αναφέρεται ότι, παρότι στις προηγούμενες περιπτώσεις οι διαστάσεις πλεγμάτων βάσεις που επιλέχθηκαν έτυχε να είναι τετράγωνα, εδώ επιλέγεται πλέγμα ορθογώνιου παραλληλογράμμου (διαστάσεων 6×8), καθότι η μοναδική απαίτηση που υπάρχει, είναι οι διαστάσεις του πλέγματος να είναι ζυγοί αριθμοί, προκειμένου να διατηρηθεί η περιοδικότητά του.

Ως κριτήριο σύγκλισης και για τους δύο αλγόριθμους ορίστηκαν οι 8000 αξιολογήσεις, ενώ και πάλι πραγματοποιήθηκαν 30 βελτιστοποιήσεις για κάθε διαφορετικό συνδυασμό διαστάσεων πλέγματος βάσης και αριθμό επεξεργαστών, για 30 διαφορετικές γεννήτριες ψευδο-τυχαίων αριθμών (RNG). Για καθεμία από τις 30 βελτιστοποιήσεις έγινε υπολογισμός του δείκτη υπερόγκου, ώστε τελικά να σχεδιαστεί το διάγραμμα των μέσων τιμών του δείκτη υπερόγκου, συναρτήσει του αριθμού των αξιολογήσεων. Ο δείκτης υπερόγκου, [40], είναι ένα βαθμωτό μέγεθος, ενδεικτικό της ποιότητας του μετώπου των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων που προκύπτει. Ο δείκτης υπερόγκου μετρά τον χώρο στον οποίο κυριαρχεί το μέτωπο, ως προς ένα σημείο αναφοράς. Τόσο τα όρια του χώρου, όσο και το σημείο αναφοράς, είναι μεγέθη που ορίζονται από το χρήστη. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει ο δείκτης υπερόγκου, τόσο καλύτερα έχει προσεγγιστεί το βέλτιστο μέτωπο. Επομένως, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των αξιολογήσεων, αναμένεται η καμπύλη του δείκτη υπερόγκου να αυξάνεται επίσης, και τελικά να σταθεροποιείται σε μία τιμή, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος έχει καταφέρει να προσεγγίσει σε ικανοποιητικό βαθμό το βέλτιστο μέτωπο.

Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ και περιγράφηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται συνολικά στον πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8: Παράμετροι ΑΕΑ και ΑΜΑ για το Μαθηματικό Πρόβλημα ZDT3

Πλέγμα Βάσης	Άτομα προς Αξιολόγηση	Αριθμός Επεξεργαστών	
6×8	36	5	14
8×8	48	8	14
Κοινός Μέγιστος Αριθμός Αξιολογήσεων		8000	

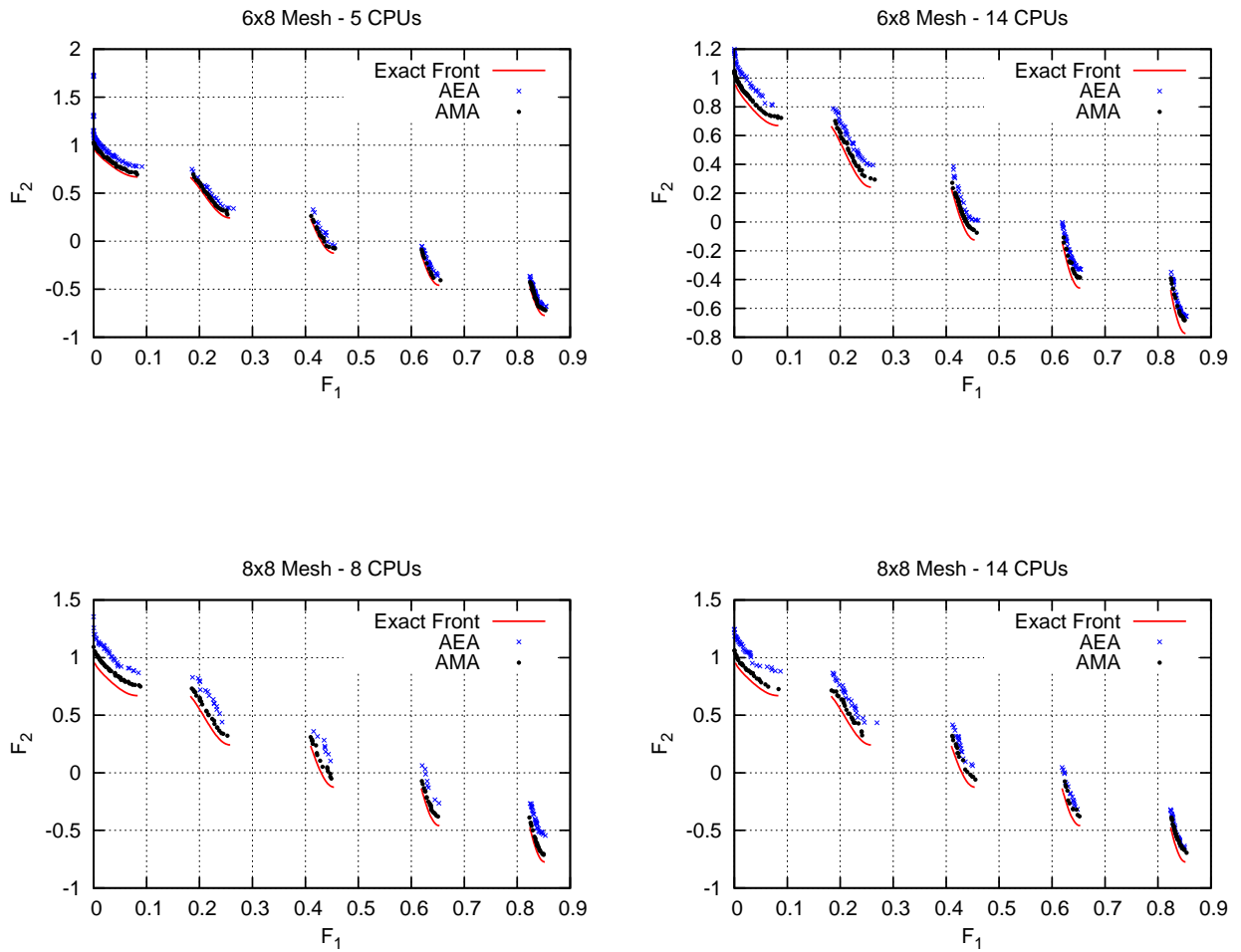
3.4.3 Αποτελέσματα για ΑΕΑ και ΑΜΑ

Η πορεία των μετώπων των μη - κυριαρχούμενων λύσεων κατά τη διάρκεια κάποιων από τις 30 βελτιστοποιήσεις που έλαβαν χώρα για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ, για κάθε συνδυασμό παραμέτρων που δοκιμάστηκε, παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9. Προκειμένου να φανεί πόσο καλά καταφέρνει κάθε αλγόριθμος να προσεγγίσει το αναλυτικό μέτωπο, αυτό έχει σχεδιαστεί σε κάθε διάγραμμα με συνεχή γραμμή.

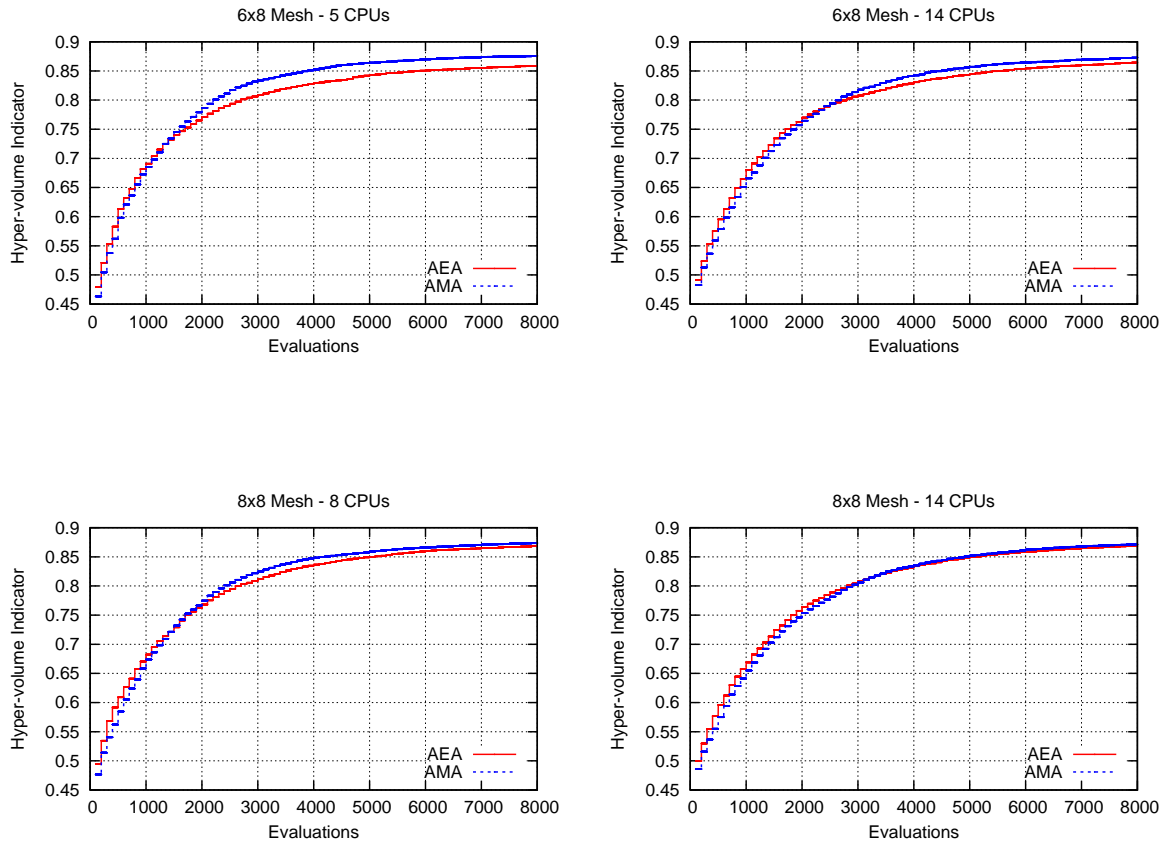
Ακολουθεί το σχήμα 3.10 όπου παρουσιάζονται πάλι για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ, για όλους τους συνδυασμούς παραμέτρων, τα διαγράμματα των μέσων τιμών των δεικτών υπερόγκου, συναρτήσει του αριθμού των αξιολογήσεων. Τα όρια για τους δύο στόχους που ορίστηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη υπερόγκου αναγράφονται στον πίνακα 3.9

Πίνακας 3.9: Όρια χωρίου υπολογισμού του δείκτη υπερόγκου για το πρόβλημα ZDT3.

Στόχος	<i>min</i>	<i>max</i>
F_1	0	1.1
F_2	-1	7



Σχήμα 3.9: Πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων ZDT3. Πορεία μετώπου των μη - κυριαρχούμενων λύσεων κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης για τον AEA και τον AMA, για πλέγμα βάσης 6×8 σε 5 και 14 επεξεργαστές και για πλέγμα 8×8 σε 8 και 14 επεξεργαστές. Το αναλυτικό μέτωπο (exact front) έχει σχεδιαστεί με συνεχή γραμμή.



Σχήμα 3.10: Πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων ZDT3. Πορεία μέσης σύγκλισης του AEA και του AMA με χρήση του δείκτη υπερόγκου, για πλέγμα βάσης 6×8 σε 5 και 14 επεξεργαστές και για πλέγμα 8×8 σε 8 και 14 επεξεργαστές.

Αρχικά, τόσο από τα προκύπτοντα μέτωπα μη - κυριαρχούμενων λύσεων του σχήματος 3.9, για όλες τις περιπτώσεις διαφορετικών συνδυασμών παραμέτρων ο AMA έχει καταφέρει να προσεγγίσει καλύτερα το αναλυτικό μέτωπο απ' ό τι ο ΑΕΑ. Από τα διαγράμματα του δείκτη υπερόγκου, η αυτή διαφορά AMA και ΑΕΑ ως προς τη συνολική πορεία σύγκλισης κατά την πορεία της βελτιστοποίησης, είναι εντονότερη για την περίπτωση του πλέγματος 6×8 και 5 επεξεργαστών, ενώ για το πλέγμα βάσης 8×8 και για 14 επεξεργαστές, φαίνεται ότι οι δύο αλγόριθμοι είναι σχεδόν ισοδύναμοι.

Επιπλέον, και για το πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων ZDT3 φαίνεται να εξακολουθεί να ισχύει το συμπέρασμα, τόσο για τον ΑΕΑ όσο και για τον AMA, ότι αν για πλέγμα βάσης δεδομένων διαστάσεων χρησιμοποιηθεί αρκετά μικρότερος αριθμός επεξεργαστών από τον αριθμό των ατόμων προς αξιολόγηση του πλέγματος, τότε τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πολύ καλύτερης ακρίβειας, απ' ό τι αν θα είχαν χρησιμοποιηθεί περισσότεροι επεξεργαστές (ο λόγος που συμβαίνει αυτό, αιτιολογήθηκε στα προηγούμενα). Όπως παρατηρείται και από τα σχήματα 3.9 και 3.10, και οι δύο αλγόριθμοι παρουσιάζουν την καλύτερη επίδοση για το πλέγμα βάσης διαστάσεων 6×8 και για 5 επεξεργαστές, ενώ την χειρότερη για το πλέγμα 8×8 και για 14 επεξεργαστές.

Κεφάλαιο 4

Σχεδιασμός Βέλτιστης Μορφής 3Δ Δρομέα Μοντέλου Υδροστροβίλου Αξονικής Ροής Για Λειτουργία Σε Πλέγμα Υδροστροβίλων (**Matrix**)

4.1 Σύντομη Περιγραφή

Η πρώτη εφαρμογή από την περιοχή της μηχανολογίας αφορά στο σχεδιασμό 3Δ δρομέα μοντέλου υδροστροβίλου αξονικής ροής, με σταθερή κλίση μη – περιστρεφόμενων πτερυγίων και πτερυγίων δρομέα, η οποία διαμορφώνεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων, με περιορισμούς. Εστιάζεται στην εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας των πτερυγίων του δρομέα υδροστροβίλου, για γνωστές και προκαθορισμένες συνθήκες σε τρία διαφορετικά σημεία λειτουργίας, βάσει μιας διαδικασίας που θα αναλυθεί λεπτομερώς παρακάτω. Ο δρομέας θα περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω , ενώ η μορφή και οι διαστάσεις του εξωτερικού κελύφους (στεφάνης) της μηχανής είναι καθορισμένες. Η γεωμετρία των σταθερών πτερυγίων (οδηγά πτερύγια) και του εσωτερικού κελύφους (πλήμνης) είναι μόνο κατά ένα μέρος μεταβλητή, αλλά δεν αποτελεί ξεχωριστό κομμάτι του παρόντος σχεδιασμού, καθότι - όπως εξηγείται παρακάτω - διαμορφώνεται έμμεσα από τη γεωμετρία των πτερυγίων του δρομέα.

Ο υδροστροβίλος σχεδιάζεται έτσι, ώστε να τοποθετηθεί σε έναν αριθμό ίδιων αντιγράφων του (πλέγμα υδροστροβίλων) σε κάποια ήδη υπάρχουσα κατασκευή (όπως φράγματα ή/και έργα άρδευσης/ύδρευσης). Η διάταξη αυτή σε πλέγμα (**matrix**, [1, 24]) επιλέγεται - όπως θα φανεί και παρακάτω - με σκοπό να επιτευχθεί βέλτιστη απόδοση και αυξημένη ευελιξία σε διαφορετικές συνθήκες κατά τη λειτουργία του υδροηλεκτρικού έργου.

Η ανάλυση γίνεται για ασυμπίεστο, μη-συνεκτικό ρευστό και το λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης (επιλύτης του πεδίου ροής) που χρησιμοποιείται είναι αυτό που επιλύει τις 3Δ εξισώσεις Euler.

Ας επισημάνουμε εξ αρχής, ότι η εργασία αυτή δεν σκοπεύει να εστιάσει αναγκαστικά σε σχεδιασμό υδροστροβίλων. Αντικείμενο της εργασίας είναι οι Ασύγχρονοι ΕΑ και ο σχεδιασμός υδροστροβίλων αποτελεί απλά μια περίπτωση δοκιμής των προτεινόμενων ΕΑ σε πρόβλημα βιομηχανικού ενδιαφέροντος που ακολουθεί τις διαδικασίες σχεδιασμού μεγάλης σχετικής ευρωπαϊκής βιομηχανίας. Συγκεκριμένα, η πραγματοποίηση της παρούσας εφαρμογής ήταν εφικτή χάρη στην τρέχουσα συνεργασία της ερευνητικής ομάδας της Μονάδας Παράλληλης Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής και Βελτιστοποίησης του ΕΘΣ/ΕΜΠ με την εταιρεία AN-DRITZ HYDRO (Linz, Austria). Αναφέρεται επίσης, ότι η εφαρμογή του ΑΕΑ στο συγκεκριμένο πρόβλημα στροβιλομηχανής που παρουσιάζεται εδώ, δεν αποτελεί περίπτωση τρέχοντος ερευνητικού έργου, απλά χρησιμοποιείται λογισμικό και τεχνογνωσία που αποκτήθηκε από τη συνεργασία.

4.2 Λειτουργία Υδροστροβίλων – Υδροηλεκτρικά Έργα

Οι υδροστρόβιλοι είναι μηχανές μέσω των οποίων γίνεται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του διακινούμενου υγρού σε μηχανική, δηλαδή σε κινητήρια ροπή στην στρεφόμενη άτρακτο του δρομέα, [47, 48]. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, το διακινούμενο υγρό είναι το φυσικό νερό της επιφανειακής απορροής ενός υδατορρεύματος και διαθέτει δυνητική ενέργεια που ποσοτικοποιείται από το επίπεδο της στάθμης του z ως προς τη στάθμη της θάλασσας. Η ενέργεια αυτή είναι ανανεώσιμη, καθότι η επιφανειακή απορροή προέρχεται από τον υδρολογικό κύκλο και ακολουθεί μια διαρκή φυσική ροή (υπό την επίδραση βαρυτικών δυνάμεων) προς χαμηλότερες στάθμες, μέχρι τη στάθμη της θάλασσας. Αν το νερό μιας φυσικής ροής συλλεγεί σε μια υψηλότερη στάθμη z_E και στη συνέχεια οδηγηθεί σε μία χαμηλότερη z_A , αφού διέλθει μέσω ενός υδροστροβίλου, καθίσταται δυνατή η μετατροπή της ανά μονάδα μάζας ενέργειας $g(z_E - z_A)$ της διερχόμενης παροχής σε μηχανική ενέργεια, αφού αφαιρεθούν οι πάσης φύσεως απώλειες (g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας). Ωστόσο, η μηχανική ενέργεια που παράγεται με αυτόν τον τρόπο στη στρεφόμενη άτρακτο του υδροστροβίλου δεν μπορεί να μεταφερθεί ικανοποιητικά στον τόπο κατανάλωσής της και γι' αυτό γίνεται επί τόπου μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω γεννήτριας που είναι κατ' ευθείαν συζευγμένη με την άτρακτο του υδροστροβίλου. Το σύνολο των έργων και εξοπλισμού μέσω των οποίων μετατρέπεται η υδραυλική ενέργεια σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική, ονομάζεται υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ), [47].

Η διάκριση των ΥΗΕ ([47]) μπορεί να γίνει είτε ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ N (σε 'μικρά' όταν $N < 10MW$ - χωρίς η τιμή αυτή να αποτελεί ένα αυστηρό όριο - και 'μεγάλα' για μεγαλύτερες τιμές ισχύος), είτε ανάλογα με το ύψος της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H (η τιμή της οποίας εκφράζει την ανά μονάδα μάζας υδραυλική ενέργεια του νερού: σε μικρού ύψους όταν $H < 20m$, σε μέσου ύψους όταν $20 < H < 150m$ και σε μεγάλου ύψους όταν $H > 150m$).

4.3 Γενικά περί Υδροστροβίλων τύπου **Matrix**

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι μονάδες υδροστροβίλων τύπου **matrix** κατασκευάζονται με σκοπό να λειτουργήσουν συνδυασμένα σε πλέγμα. Γι' αυτό το λόγο, στα επόμενα είναι σκόπιμο να αποσαφηνίζεται κάθε φορά, πότε τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν στον έναν υδροστροβίλο μεμονωμένα, και πότε αφορούν στο πλέγμα των υδροστροβίλων, δηλαδή την εκάστοτε υδροηλεκτρική εγκατάσταση στο σύνολό της.

Ένας δεύτερος διαχωρισμός που κρίνεται σκόπιμο να γίνει στο σημείο αυτό, είναι ο εξής: τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που ακολουθούν, αφορούν γενικά τους υδροστροβίλους τύπου **matrix** που τοποθετούνται για λειτουργία στην υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Ωστόσο - όπως θα φανεί και παρακάτω - στην παρούσα εφαρμογή, η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται για το γεωμετρικά όμοιο μοντέλο του υδροστροβίλου **matrix** πραγματικών διαστάσεων, ο οποίος θα αποτελέσει τελικά τμήμα του πλέγματος. Η εύρεση των διαστάσεων και το εύρος λειτουργίας του μοντέλου, προκύπτει από απλή εφαρμογή των νόμων ομοιότητας στον πρωτότυπο υδροστροβίλο.

Όσον αφορά επομένως το σύνολο των μικρών υδροστροβίλων που συνθέτουν το πλέγμα - **matrix**, οι τιμές της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H της εγκατάστασης μπορούν να κυμαίνονται από 3 m μέχρι 30 m , ενώ η συνολικά διερχόμενη ογκομετρική παροχή Q συνιστάται να ξεπερνά τα 100 m^3/sec , [24], (η τιμή αυτή έχει προκύψει από οικονομικές μελέτες που έγιναν με σκοπό να κριθεί πότε η επένδυση γίνεται περισσότερο συμφέρουσα από οικονομικής άποψης, χωρίς να αποκλείεται η τοποθέτηση λιγότερων μονάδων υδροστροβίλων **matrix** για μικρότερες τιμές συνολικής ογκομετρικής παροχής). Το ελάχιστο βάθος τοποθέτησης h_{sub} των υδροστροβίλων είναι 1,5 m κάτω από την στάθμη του νερού κατάντι του φράγματος, [24], (ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα σπηλαίωσης), ενώ η ισχύς κάθε μονάδας υδροστροβίλου - γεννήτριας είναι από 200 kW μέχρι 700 kW . Η τιμή της εξωτερικής διαμέτρου του δρομέα ποικίλει ανάλογα με την εγκατάσταση, ωστόσο συνήθως κυμαίνεται γύρω στα 1,5 m . Το σύνολο των λειτουργικών χαρακτηριστικών που οριοθετούν το εύρος λειτουργίας των υδροστροβίλων τύπου **matrix** γενικά που μόλις αναφέρθηκαν, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1.

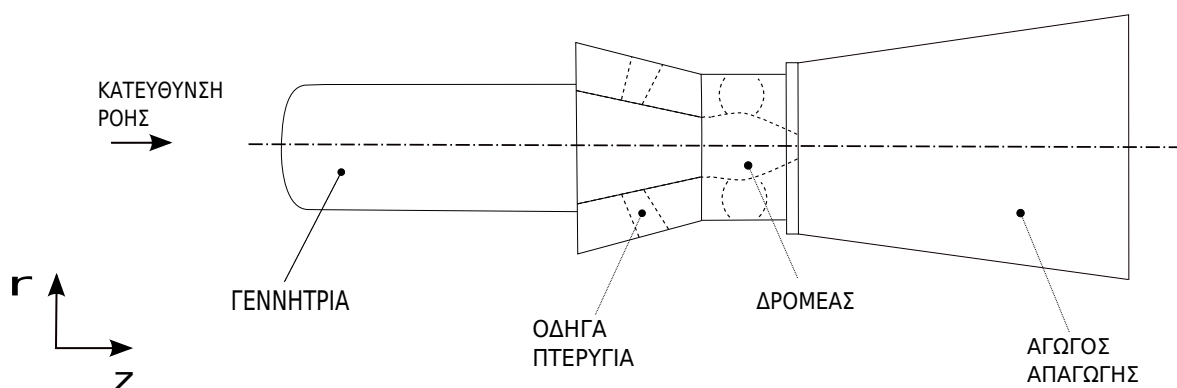
Πίνακας 4.1: Εύρος λειτουργίας που αφορά συνολικά το πλέγμα υδροστροβίλων τύπου **Matrix**

H [m]	Q [m^3/sec]	h_{sub} [m]
3 – 30	> 100	> 1.5

Η τοποθέτηση των μονάδων υδροστροβίλων **matrix** μπορεί να γίνει και μεμονωμένα, αν και ο σχεδιασμός των εν λόγω υδροστροβίλων γίνεται, όπως αναφέρθηκε, έτσι ώστε να τοποθετούνται σε πλέγμα πολλοί υδροστροβίλοι ίδιων κατασκευαστικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών, σε εξόδους διαφυγής του νερού σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές. Η τοποθέτησή τους σε πλέγμα επιτρέπει τη συνδυασμένη δράση τους, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση της εγκατάστασης σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, για λόγους που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

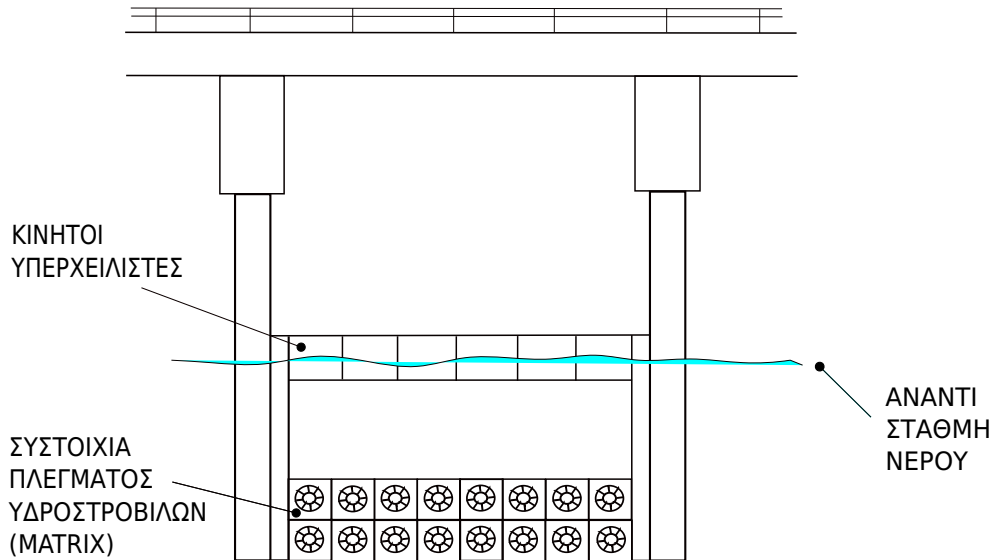
Όσον αφορά στην κατασκευή των υδροστροβίλων **matrix**, βασικός στόχος είναι αυτή να παραμείνει όσο το δυνατόν πιο απλή και απαλλαγμένη από πολλούς αυτοματισμούς που συνοδεύονται από σημαντική αύξηση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης (όπως για παράδειγμα η ύπαρξη ρυθμιστικών πτερυγίων). Η έλλειψη πολυπλοκότητας της κατασκευής, την καθιστά - όπως θα φανεί και παρακάτω - μια ευέλικτη, αποδοτική και ιδιαίτερα οικονομική λύση, ειδικά σε περιπτώσεις που ο υδροηλεκτρικός σταθμός μπορεί να ενσωματωθεί σε ήδη υπάρχουσες διευθετήσεις, όπως φράγματα και έργα υδροληψίας και να αποτελέσει ενιαίο συγκρότημα με αυτά.

Ο υδροστροβίλος **matrix** είναι ολικής προσβολής, γιατί η ροή μέσω του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης του υγρού. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1, είναι αξονικής ροής και συγκεκριμένα βολβοειδής: ανάντι του δρομέα του υδροστροβίλου διαμορφώνεται αξονοσυμμετρικός βολβός, ο οποίος περιρρέεται από το ρευστό. Στο εσωτερικό τμήμα του βολβού τοποθετείται η γεννήτρια, της οποίας ο άξονας συνδέεται απευθείας με τον άξονα του δρομέα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι στροφές του δρομέα καθορίζονται από τη γεννήτρια, η οποία λειτουργεί σε συγκεκριμένη συχνότητα ρεύματος (Hz) που διαμορφώνεται από το δίκτυο με το οποίο συνδέεται. Ως αποτέλεσμα, δεν απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός για τη ρύθμιση των στροφών, που θα καταλάμβανε επιπλέον χώρο και θα επιβάρυνε οικονομικά περισσότερο την εγκατάσταση.

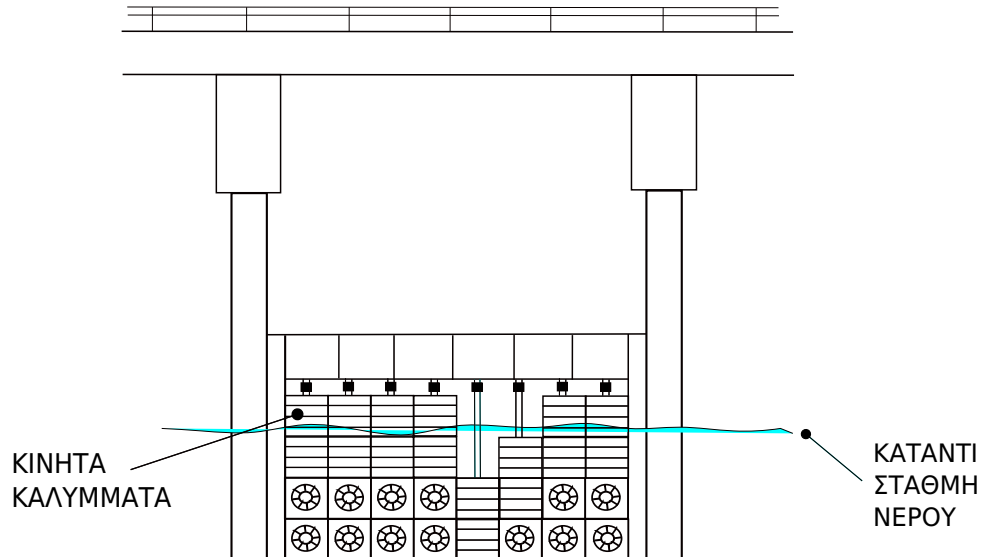


Σχήμα 4.1: Απεικόνιση των βασικότερων τμημάτων μονάδας υδροστροβίλου - γεννήτριας για τοποθέτηση σε πλέγμα, καθώς και του τμήματος εξόδου (αγωγός απαγωγής).

Η στεφάνη των σταθερών πτερυγίων διατάσσεται κωνικά ανάντι του δρομέα. Ο ρόλος των σταθερών πτερυγίων είναι να μεταβάλουν την κλίση της ταχύτητας του υγρού στη διατομή εξόδου τους, έτσι ώστε να διαμορφώνονται οι επιθυμητές συνθήκες ροής στην είσοδο του δρομέα. Εκτός όμως από τη γωνία εισόδου της ταχύτητας, η θέση των σταθερών πτερυγίων διαμορφώνει και τη διερχόμενη παροχή (και άρα την ισχύ εξόδου του υδροστροβίλου) για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και σταθερή διαθέσιμη υδραυλική πτώση, επομένως αποτελεί όργανο ρύθμισης του σημείου λειτουργίας του υδροστροβίλου. Τα σταθερά πτερύγια ενός υδροστροβίλου μπορεί να έχουν δυνατότητα μεταβολής της κλίσης τους (οπότε ονομάζονται ρυθμιστικά πτερύγια) ή όχι (οπότε ονομάζονται οδηγά πτερύγια). Στο πλαίσιο μείωσης του αριθμού αυτοματισμών της κατασκευής που αναφέρθηκε παραπάνω, τα σταθερά πτερύγια του υδροστροβίλου *matrix* δε διαθέτουν μεταβλητή κλίση (επομένως πρόκειται για οδηγά πτερύγια), κατασκευαστική επιλογή που συμφέρει σημαντικά από οικονομικής άποψης, αλλά το μειονέκτημά της εντοπίζεται στον περιορισμό του δυνατού εύρους λειτουργίας του ενός υδροστροβίλου, εφόσον δεν υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής του διακένου μεταξύ των πτερυγίων και άρα ρύθμισης της παροχής του υγρού. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την τοποθέτηση πολλών μονάδων σε πλέγμα (*matrix*) - όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 - με τον εξής τρόπο: η χρήση πολλών υδροστροβίλων παράλληλα, επιτρέπει τη ρύθμιση της συνολικά διερχόμενης παροχής, αλλά και μόνο ενεργοποιώντας ή διακόπτοντας τη λειτουργία κάποιων υδροστροβίλων. Η ενεργοποίηση ή διακοπή της λειτουργίας των μονάδων πραγματοποιείται με το ανέβασμα ή κατέβασμα αντίστοιχα ενός καλύμματος, που βρίσκεται στο πίσω μέρος της εγκατάστασης και απελευθερώνει ή φράσσει τη διέλευση του υγρού από την εκάστοτε μονάδα (σχήμα 4.3). Έτσι, ελέγχεται με απλό, γρήγορο και οικονομικό τρόπο το εύρος λειτουργίας της εγκατάστασης.



Σχήμα 4.2: Παράδειγμα τοποθέτησης μονάδων υδροτροβίλων - γεννήτριας σε πλέγμα (Matrix), σε υπάρχουσα κατασκευή φράγματος.



Σχήμα 4.3: Τρόπος ρύθμισης της συνολικά διερχόμενης παροχής της εγκατάστασης, μέσω των κινητών καλυμμάτων στο πίσω μέρος της κατασκευής.

Όσον αφορά στο δεύτερο περιορισμό που προκύπτει από τη σταθερή κλίση των οδηγών πτερυγίων και σχετίζεται με την αδυναμία μεταβολής της κλίσης της απόλυτης ταχύτητας του υγρού στην είσοδο του δρομέα (έξοδος οδηγών πτερυγίων), αυτός αντιμετωπίζεται με καλό σχεδιασμό της γεωμετρίας της στεφάνης και συγκεκριμένα της κλίσης α των πτερυγίων στην ακμή εκφυγής, ώστε ο υδροστρόβιλος να λειτουργεί με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης στο προκαθορισμένο εύρος λειτουργίας που έχει οριστεί για την εκάστοτε εγκατάσταση (αυτός είναι ακριβώς και ο λόγος που η γεωμετρία των σταθερών πτερυγίων είναι μεταβλητή κατά ένα μέρος μόνο - από τη μέση των πτερυγίων μέχρι την ακμή εκφυγής - και παρότι δεν αποτελεί αντικείμενο της βελτιστοποίησης, μεταβάλλεται παράλληλα με τη γεωμετρία των πτερυγίων του δρομέα, ώστε ο υδροστρόβιλος που θα διαμορφωθεί τελικά να λειτουργεί εντός των επιθυμητών ορίων).

Μετά τα οδηγία πτερύγια ακολουθεί ο δρομέας (**Runner**), δηλαδή το περιστρεφόμενο τμήμα της μηχανής όπου γίνεται η μετατροπή της ενέργειας του νερού σε μηχανική. Τα πτερύγια του δρομέα του υδροστροβίλου **matrix** είναι πακτωμένα μόνο στην πλήμνη, ενώ η ύπαρξη στεφάνης δεν υφίσταται, σχεδιαστικό χαρακτηριστικό που δε συναντάνται συχνά στους άλλους τύπους υδροστροβίλων (συνηθίζεται τα πτερύγια να είναι πακτωμένα και στη στεφάνη) και έχει υιοθετηθεί για οικονομικούς λόγους κυρίως. Επειδή ο υδροστρόβιλος **matrix** είναι αξονικής ροής και προορίζεται για λειτουργία σε μικρές τιμές διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης H , οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα πτερύγια του δρομέα δεν είναι πολύ μεγάλες και για αυτό το λόγο, προκειμένου να μειωθούν οι υδραυλικές απώλειες τριβής, οι επιφάνειες των πτερυγίων περιορίζονται στο ελάχιστο δυνατό. Ωστόσο, αν η αποφυγή των απωλειών τριβής υπαγορεύει μικρές επιφάνειες πτερυγίων, υπάρχει και μια δεύτερη σχεδιαστική απαίτηση, η οποία σχετίζεται με την αποφυγή φαινομένων σπηλαίωσης και έρχεται να συγκρουστεί με την πρώτη: ο κίνδυνος ανάπτυξης σπηλαίωσης μειώνεται, όσο αυξάνεται η επιφάνεια των πτερυγίων, καθότι για μεγαλύτερες επιφάνειες η διαφορά πίεσης που προκύπτει από τις κατανομές πιέσεων στην πλευρά υπερπίεσης και υποπίεσης των πτερυγίων του δρομέα είναι μικρότερη (είναι γνωστό ότι η σπηλαίωση εξαρτάται από την οριακή τιμή της μέσης ελάχιστης στατικής πίεσης του υγρού, κάτω από την οποία ξεκινά η εμφάνιση του φαινομένου σπηλαίωσης). Όσον αφορά τον αριθμό πτερυγίων z_b του δρομέα των υδροστροβίλων **matrix**, ένας τυπικός αριθμός που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εφαρμογή είναι

$$z_b = 4$$

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν για το συγκεκριμένο πλήθος πτερυγίων δεν αλλάζουν για διαφορετική τιμή z_b .

Τα πτερύγια του δρομέα του υδροστροβίλου **matrix** σχεδιάζονται επίσης με σταθερή κλίση, γεγονός που - όπως ακριβώς και στην περίπτωση των οδηγών πτερυγίων - μειώνει την πολυ-

πλοκότητα και το κόστος της μηχανής, αλλά αφαιρεί επίσης από τον υδροστρόβιλο το πλεονέκτημα λειτουργίας με καλό βαθμό απόδοσης σε εκτεταμένο εύρος λειτουργίας. Ο τρόπος αντιμετώπισης του μειονεκτήματος αυτού είναι ο ίδιος με αυτόν που αναφέρθηκε και παραπάνω (τοποθέτηση μονάδων σε πλέγμα), ενώ η τελική διαμόρφωση καλής γεωμετρίας των πτερυγίων του δρομέα - που αποτελεί και το αντικείμενο της βελτιστοποίησης - εξασφαλίζει τη λειτουργία με αρκετά καλό βαθμό απόδοσης στο επιθυμητό εύρος τιμών υδραυλικής πτώσης, ογκομετρικής παροχής και στροφών (H, Q, n) που έχει καθοριστεί.

Τέλος, μετά το δρομέα βρίσκεται ο αγωγός απαγωγής (Draft Tube) ή αλλιώς διαχύτης, που είναι ευθύγραμμος, κωνικός και κυκλικής διατομής μέχρι την έξοδό του. Ο αγωγός απαγωγής παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία και το βαθμό απόδοσης του υδροστροβίλου: όπως είναι λογικό, στην περιοχή της διατομής εξόδου του δρομέα αναπτύσσονται μεγάλες τιμές μέσης ταχύτητας της ροής (της τάξεως των 6 - 10 m/sec). Η ενέργεια αυτή διαφεύγει αναξιοποίητη αν δεν μεσολαβήσει ο αγωγός απαγωγής, ο οποίος μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ρευστού σε ωφέλιμη στατική πίεση, ενώ παράλληλα το επιβραδύνει, ώστε τελικά η ταχύτητα εξόδου του από τη μηχανή να γίνει της τάξεως των 1 - 2,5 m/sec . Επί της ουσίας δηλαδή, ο αγωγός απαγωγής πραγματοποιεί ανάκτηση πίεσης, μειώνοντας την ταχύτητα του υγρού. Πρέπει να αναφερθεί ότι ούτε ο αγωγός απαγωγής αποτελεί τμήμα του παρόντος σχεδιασμού, ωστόσο η παρουσία του δικαιολογεί την τιμή που λαμβάνουν ορισμένα μεγέθη στην έξοδο του δρομέα, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

4.4 Περιγραφή Υπολογισμού των τριών Σημείων Λειτουργίας Υδροστροβίλου **Matrix**

Παραπάνω αναφέρθηκε ότι η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας πτερυγίων του δρομέα μοντέλου υδροστροβίλου θα γίνει για τρία διαφορετικά σημεία λειτουργίας (H, Q, n) (που αφορούν στον ένα υδροστροβίλο **matrix**) - όπου H η διαθέσιμη υδραυλική πτώση, Q η ογκομετρική παροχή και n οι στροφές - τα οποία είναι προκαθορισμένα και οριοθετούν μια δυνατή περιοχή λειτουργίας του. Η περιοχή αυτή ορίζεται (όπως θα φανεί παρακάτω) σε τελικό στάδιο βάσει ενός διαγράμματος. Τα τρία αυτά σημεία είναι

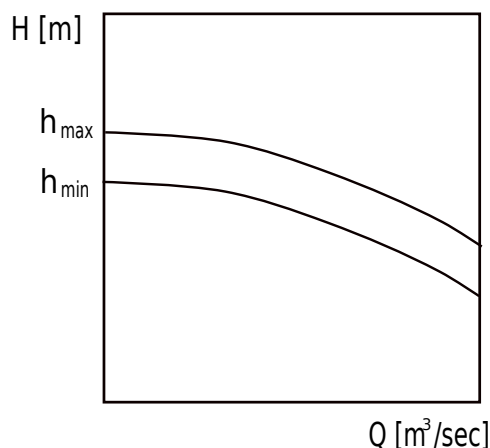
- το κανονικό σημείο λειτουργίας – ΚΣΛ (που εδώ θα αναφέρεται και ως **Peak Point**),
- το σημείο μερικού φορτίου (**Part Load**) και
- το σημείο πλήρους φορτίου (**Full Load**).

Η εξέταση της λειτουργίας του υδροστροβίλου **matrix** στα παραπάνω τρία σημεία επιλέγεται σκόπιμα: το ΚΣΛ είναι το σημείο όπου ο υδροστροβίλος λειτουργεί με το μέγιστο βαθμό απόδοσης, ενώ τα δύο άλλα είναι αυτά που κινδυνεύουν περισσότερο από εμφάνιση φαινομένων σπηλαιώσης (το σημείο μερικού φορτίου στην πλευρά υπερπίεσης και το σημείο πλήρους φορτίου στην πλευρά υποπίεσης) που οδηγούν ενδεχομένως σε ασταθή λειτουργία του υδροστροβίλου. Συνεπώς, αν ο υδροστροβίλος σχεδιαστεί έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία του στο εύρος που οριοθετείται από τα δύο οριακά σημεία αυξημένης επικινδυνότητας, τότε εκτιμάται ότι θα λειτουργεί με ασφάλεια και σε όλα τα υπόλοιπα δυνατά σημεία λειτουργίας.

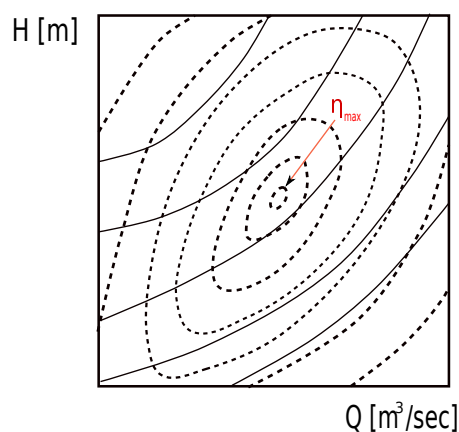
Τα τρία σημεία λειτουργίας είναι προκαθορισμένα για τον υδροστροβίλο **matrix** πραγματικών διαστάσεων (παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2) και έχουν οριστεί βάσει ενός διαγράμματος, που αποτελεί σύνθεση δύο επιμέρους διαγραμμάτων, ένα χαρακτηριστικό της εκάστοτε εγκατάστασης και ένα χαρακτηριστικό του εκάστοτε υδροστροβίλου. Συγκεκριμένα, κάθε υδροστροβίλος σχεδιάζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ασφαλής λειτουργία του σε ένα επιτρεπόμενο εύρος λειτουργίας, ανάλογα με τις ενεργειακές απαιτήσεις του ΥΗΕ και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της τοποθεσίας όπου πρόκειται να γίνει η εγκατάσταση. Το δυνατό αυτό εύρος ορίζεται από το συνδυασμό δύο διαγραμμάτων:

- του διαγράμματος της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης h συναρτήσει της διακινούμενης ογκομετρικής παροχής Q που αφορά στην υδραυλική εγκατάσταση (σχήμα 4.4) και
- του διαγράμματος των χαρακτηριστικών καμπυλών λειτουργίας (H, Q) για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του υδροστροβίλου (σχήμα 4.5).

Από τη σύνθεση των δύο αυτών διαγραμμάτων (σχήμα 4.6), καθορίζεται εν τέλει το δυνατό εύρος λειτουργίας του υδροστροβίλου (αν και στην περίπτωση των υδροστροβίλων τύπου **matrix** απουσιάζουν οι καμπύλες διαφορετικού ανοίγματος πτερυγίων του διαγράμματος 4.5, καθότι όπως αναφέρθηκε, δεν υπάρχουν ρυθμιστικά πτερύγια).



Σχήμα 4.4: Γενικό ποιοτικό διάγραμμα (H, Q) όπου απεικονίζεται το εύρος της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης h της εκάστοτε εγκατάστασης. Οι οριακές τιμές h_{min} και h_{max} προκύπτουν από υδρολογικές μελέτες, που έχουν γίνει για τη συγκεκριμένη τοποθεσία όπου βρίσκεται η εγκατάσταση, [47].



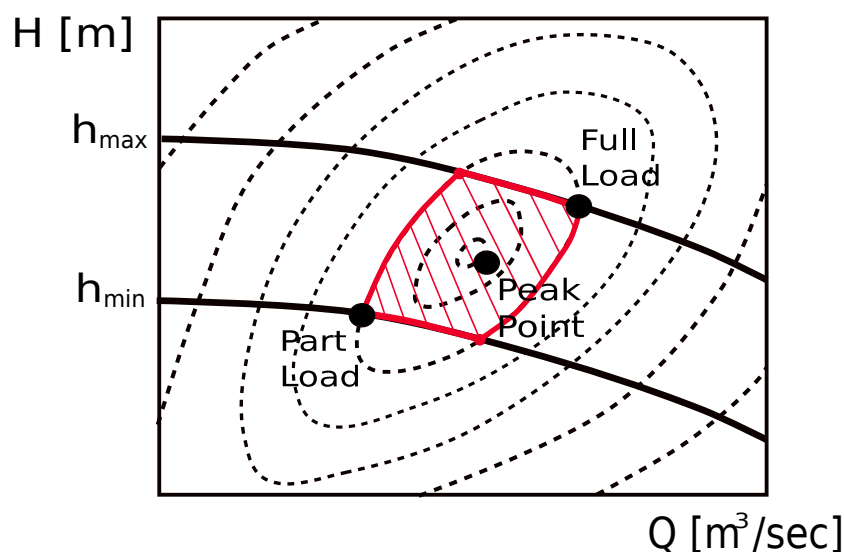
Σχήμα 4.5: Γενικό ποιοτικό διάγραμμα χαρακτηριστικών καμπύλων λειτουργίας υδροστροβίλου, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής ω . Οι ισοσταθμικές καμπύλες σχεδιάζονται με διακεκομμένες γραμμές και οι καμπύλες διαφορετικού ανοίγματος σταθερών πτερυγίων με λεπτές συνεχείς γραμμές. Σημειώνεται η ισοσταθμική καμπύλη που αντιστοιχεί στο μέγιστο βαθμό απόδοσης η_{max} , [47].

Όσον αφορά στο πρώτο διάγραμμα (σχήμα 4.4), αυτό προκύπτει από την ανάλυση υδρολογικών δεδομένων σε βάθος χρόνου για την περιοχή όπου πρόκειται να τοποθετηθεί το ΥΗΕ. Έτσι, προκύπτει ένα εύρος δυνατών τιμών για τη διαθέσιμη υδραυλική πτώση h της εγκατάστασης (συναρτήσει της διαθέσιμης ογκομετρικής παροχής Q), που οριοθετείται από μία ελάχιστη $h_{min}(Q)$ και μία μέγιστη $h_{max}(Q)$ τιμή.

Το διάγραμμα των χαρακτηριστικών του υδροστροβίλου (σχήμα 4.5), απεικονίζει τις καμπύλες ίδιου βαθμού απόδοσης (έχουν σχεδιαστεί με διακεκομμένες γραμμές), συναρτήσει των σημείων λειτουργίας (H, Q) και του ανοίγματος των οδηγών πτερυγίων (οι καμπύλες που έχουν σχεδιαστεί με λεπτές συνεχείς γραμμές), για σταθερή ταχύτητα περιστροφής ω . Δηλαδή σε κάθε σημείο του χαρακτηριστικού διαγράμματος (H, Q) του υδροστροβίλου αντιστοιχεί μια τιμή της παροχής, του υδραυλικού ύψους και του βαθμού απόδοσης (άρα και της παραγόμενης μηχανικής ισχύος).

Αν τα δύο διαγράμματα των Σχημάτων 4.4 και 4.5 (εγκατάστασης και χαρακτηριστικών υδροστροβίλου αντίστοιχα) συνδυαστούν, τότε προκύπτει το διάγραμμα του σχήματος 4.6, όπου φαίνεται ότι τα μόνα δυνατά σημεία λειτουργίας, είναι αυτά εντός του εύρους τιμών της διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης h της εγκατάστασης. Από το συνδυασμένο διάγραμμα γίνεται φανερό, ότι για μια δεδομένη τιμή βαθμού απόδοσης (επιλέγεται από τον κατασκευαστή), η λειτουργία ενός συγκεκριμένου υδροστροβίλου σε συγκεκριμένη εγκατάσταση (δεδομένο εύρος τιμών h) μπορεί να πραγματοποιηθεί εντός μιας περιοχής του διαγράμματος (γραμμοσκιασμένη επιφάνεια). Η επιθυμητή αυτή περιοχή λειτουργίας οριοθετείται από τα σημεία τομής των καμπυλών μέγιστης και ελάχιστης διαθέσιμης υδραυλικής πτώσης h της εγκατάστασης και από την ισοσταθμική του ελάχιστου επιθυμητού βαθμού απόδοσης, με τον οποίο θα δουλεύει ο υδροστροβίλος.

Έτσι, δημιουργούνται τα τρία κρίσιμα σημεία λειτουργίας του υδροστροβίλου, στα οποία και πρέπει να εξεταστεί η συμπεριφορά του κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης: το σημείο μερικού φορτίου (**Part Load**) που αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή παροχής Q_{min} , το σημείο πλήρους φορτίου (**Full Load**) που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή παροχής Q_{max} και το κανονικό σημείο λειτουργίας (**Peak Point**), το οποίο ορίζεται στη γειτονιά του σημείου μέγιστου βαθμού απόδοσης.



Σχήμα 4.6: Σύνθεση διαγράμματος χαρακτηριστικών καμπύλων λειτουργίας υδροστροβίλου και διαγράμματος εγκατάστασης, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής ω . Στο διάγραμμα έχει γραμμοσκιαστεί η επιθυμητή περιοχή λειτουργίας του υδροστροβίλου, καθώς και τα 3 κρίσιμα σημεία λειτουργίας που προκύπτουν. Οι καμπύλες διαφορετικού ανοίγματος σταθερών πτερυγίων δεν υπάρχουν, καθώς πρόκειται για υδροστροβίλο matrix χωρίς ρυθμιστικά πτερύγια.

Για τον υδροστροβίλο πραγματικών διαστάσεων της παρούσας εφαρμογής, εκτός από τα τρία σημεία λειτουργίας είναι επίσης γνωστά ακόμα δύο μεγέθη:

- η ταχύτητα περιστροφής $\omega = 300 \text{ rad/sec}$ και
- η εξωτερική διάμετρος του δρομέα $D = 1,32 \text{ m}$.

Ωστόσο, εδώ η βελτιστοποίηση δεν εφαρμόζεται στη γεωμετρία του κανονικού υδροστροβίλου, αλλά στο γεωμετρικά όμοιο μοντέλο του υδροστροβίλου πραγματικών διαστάσεων, του οποίου η απόδοση πρόκειται να δοκιμαστεί εργαστηριακά, πριν ληφθεί η απόφαση για μαζική κατασκευή. Για το αντίστοιχο μοντέλο υδροστροβίλου είναι γνωστά:

- η υδραυλική πτώση $H_{mod} = 7 \text{ m}$ (η τιμή της οποίας είναι σταθερή σε όλα τα σημεία λειτουργίας) και
- η εξωτερική διάμετρος δρομέα $D_{mod} = 0,34 \text{ m}$.

Η κατασκευή του μοντέλου γίνεται σύμφωνα με τους νόμους ομοιότητας, ενώ οι παροχές (Q_{mod}) και οι στροφές n_{mod} των αντίστοιχων σημείων λειτουργίας του μοντέλου, υπολογίζονται μέσω των αδιάστατων παραμέτρων λειτουργίας του υδροστροβίλου. Οι αδιάστατες παράμετροι λειτουργίας (αδιάστατες στροφές και αδιάστατη παροχή) χαρακτηρίζονται με τον δείκτη 11 και δίνονται από τους τύπους, [47, 48]:

$$n_{11} = n \frac{D}{\sqrt{H}} \quad , \quad Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \quad (4.1)$$

όπου τα μεγέθη n , D και H μπορούν να αναφέρονται είτε στον υδροστρόβιλο **matrix** πραγματικών διαστάσεων (που τελικά κατασκευάζεται και τοποθετείται για λειτουργία στο πλέγμα της εγκατάστασης), είτε στο αντίστοιχο γεωμετρικό μοντέλο του πραγματικού υδροστροβίλου (το οποίο αποτελεί το αντικείμενο βελτιστοποίησης στην παρούσα εργασία).

Η αναγωγή από τα μεγέθη που είναι γνωστά για τον υδροστρόβιλο πραγματικών διαστάσεων (για κάθε ένα από τα 3 σημεία λειτουργίας), στα μεγέθη του μοντέλου ακολουθεί την εξής πορεία:

$$(H, Q, n, D)_{real} \rightarrow Q_{11}, n_{11} \rightarrow (H_{mod} = 7 \text{ m}, Q_{mod}, n_{mod}, D_{mod} = 0,34 \text{ m})$$

Περιγραφικά: Με δεδομένη τη διάμετρο δρομέα D και τα 3 σημεία λειτουργίας (H, Q, n) , τα μεγέθη του υδροστροβίλου **matrix** πραγματικών διαστάσεων (συμβολίζονται με το δείκτη *real* στην παραπάνω σχέση) ανάγονται αρχικά για καθένα από τα τρία σημεία λειτουργίας στα μεγέθη (Q_{11}, n_{11}) . Από τα ανηγμένα μεγέθη (Q_{11}, n_{11}) , για γνωστή διάμετρο D_{mod} και υδραυλική πτώση H_{mod} του μοντέλου, υπολογίζεται τελικά (με χρήση των ίδιων σχέσεων 4.1) το μέγεθος της επιθυμητής παροχής Q_{mod} και στροφών n_{mod} του μοντέλου.

Τα μεγέθη που βελτιστοποιούνται είναι - όπως ήδη αναφέρθηκε - αυτά του μοντέλου υδροστροβίλου. Μετά τη βελτιστοποίηση, η αναγωγή από τα μεγέθη του μοντέλου στα μεγέθη του πραγματικού υδροστροβίλου ακολουθεί την ίδια, αλλά αντίστροφη διαδικασία από αυτή που περιγράφηκε παραπάνω.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι τιμές των μεγεθών που περιγράφηκαν παραπάνω.

Πίνακας 4.2: Σημεία Λειτουργίας Υδροστροβίλου Matrix Πραγματικών Διαστάσεων

	$H [m]$	$Q [m^3/sec]$	$n [rpm]$
<i>Part Load</i>	3.9	9.9	300
<i>Peak Point</i>	7.36	11.4	300
<i>Full Load</i>	9.8	12.1	300

Πίνακας 4.3: Ανηγγμένα Μεγέθη Υδροστροβίλου Matrix Πραγματικών Διαστάσεων και του Αντίστοιχου Μοντέλου του

	Q_{11}	n_{11}
<i>Part Load</i>	2.88	200.5
<i>Peak Point</i>	2.42	145.9
<i>Full Load</i>	2.19	126.2

Πίνακας 4.4: Σημεία Λειτουργίας Αντίστοιχου Μοντέλου Υδροστροβίλου Matrix (Προ Βελτιστοποίησης)

	$H_{mod} [m]$	$Q_{mod} [m^3/sec]$	$n_{mod} [rpm]$
<i>Part Load</i>	7	0.88	1559.6
<i>Peak Point</i>	7	0.74	1135.2
<i>Full Load</i>	7	0.67	981.3

4.5 Περιγραφή της Μεθόδου Σχεδιασμού Γεωμετρίας του Δρομέα Μοντέλου Υδροστροβίλου

Πριν γίνει η παρουσίαση των επιθυμητών χαρακτηριστών που επιδιώκεται να διαθέτει το μοντέλο υδροστροβίλου *matrix* (και κατ' επέκταση ο υδροστρόβιλος πραγματικών διαστάσεων), τα οποία αποτελούν και τους στόχους της παρούσας βελτιστοποίησης, είναι σκόπιμο να προηγηθεί μια περιγραφή των χαρακτηριστικών της επιλυόμενης ροής και του τρόπου με τον οποίο λαμβάνει χώρα η διαδικασία εύρεσης βέλτιστης γεωμετρίας για τα πτερύγια του δρομέα και να γίνει κατανοητό το πως συνδέεται το λογισμικό αξιολόγησης (επιλύτης της ροής), με το λογισμικό που διαμορφώνει τη γεωμετρία των πτερυγίων και με το λογισμικό βελτιστοποίησης.

4.5.1 Χαρακτηριστικά Επιλυόμενης Ροής

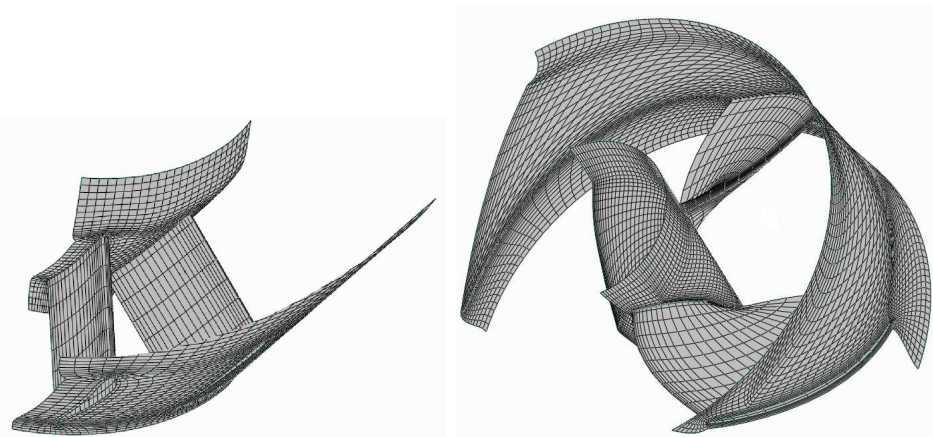
Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, η ανάλυση γίνεται για ασυμπίεστο, μη-συνεκτικό ρευστό και το λογισμικό αξιολόγησης επιλύει τις εξισώσεις Euler για 3D πεδίο ροής, αφού δεχθεί τα απαραίτητα ροϊκά δεδομένα ως είσοδο (σχήμα 4.9). Συγκεκριμένα, οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται από τον επιλύτη ροής είναι: η διαφορά ολικής πίεσης εξόδου και εισόδου του δρομέα $p_{t_{out}} - p_{t_{in}}$ (που προκύπτουν από την υδραυλική πτώση H_{mod} - η τιμή της οποίας είναι γνωστή - και από μια πίεση αναφοράς), η κατεύθυνση της ταχύτητας (γωνίες ροής) στη διατομή εισόδου του πεδίου ροής και οι στροφές n_{mod} με τις οποίες περιστρέφεται ο υδροστρόβιλος (όλα τα μεγέθη αφορούν το μοντέλο). Μεσολαβεί η γένεση πλέγματος και οι εξισώσεις ροής επιλύονται επαναληπτικά. Μετά την επίλυση των εξισώσεων, το λογισμικό αξιολόγησης επιστρέφει ως έξοδο τα πεδία ταχυτήτων και πιέσεων σε όλο το πεδίο ροής, καθώς και την τιμή της παροχής Q_{mod} .

Γένεση Πλέγματος

Σύμφωνα με τις μεθόδους της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής είναι γνωστό ότι προκειμένου να επιλυθούν αριθμητικά οι εξισώσεις ροής για σώμα συγκεκριμένης γεωμετρίας που βρίσκεται εντός πεδίου ροής, είναι απαραίτητη η γένεση πλέγματος γύρω από το σώμα αυτό. Το πλέγμα που κατασκευάζεται διαμορφώνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε προσομοίωσης της ροής: μπορεί να είναι είτε δομημένο, είτε μη - δομημένο, μεταβλητής πυκνωσης και πλήθους κόμβων σε κάθε σημείο του, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε θέση. Συγκεκριμένα, γύρω από το στερεό όριο του σώματος εντός του επιλυόμενου πεδίου ροής, η πυκνωση του πλέγματος είναι πάντοτε πιο έντονη, καθώς σε εκείνο το σημείο εμφανίζονται εντονότερες διακυμάνσεις των μεγεθών του πεδίου. Όσο απομακρύνεται κανείς από το σώμα αντίστοιχα, η πυκνωση του πλέγματος γίνεται ολοένα και πιο αραιή, αφού και η ροή δεν μεταβάλλεται πλέον έντονα. Η πυκνωση του πλέγματος συναντάται επίσης σε σημεία

του σώματος που η γεωμετρία αλλάζει 'απότομα', όπως για παράδειγμα σε γωνίες, όπου οι αριθμητικοί υπολογισμοί πρέπει να γίνουν με αυξημένη ακρίβεια.

Στην παρούσα περίπτωση, η γένεση πλέγματος γίνεται για τα οδηγά πτερύγια και τα πτερύγια του δρομέα του υδροστροβίλου. Το πλέγμα που δημιουργείται είναι δομημένο. Τμήματα των επιφανειακών πλεγμάτων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.7 για τα οδηγά πτερύγια και για τα πτερύγια του δρομέα.

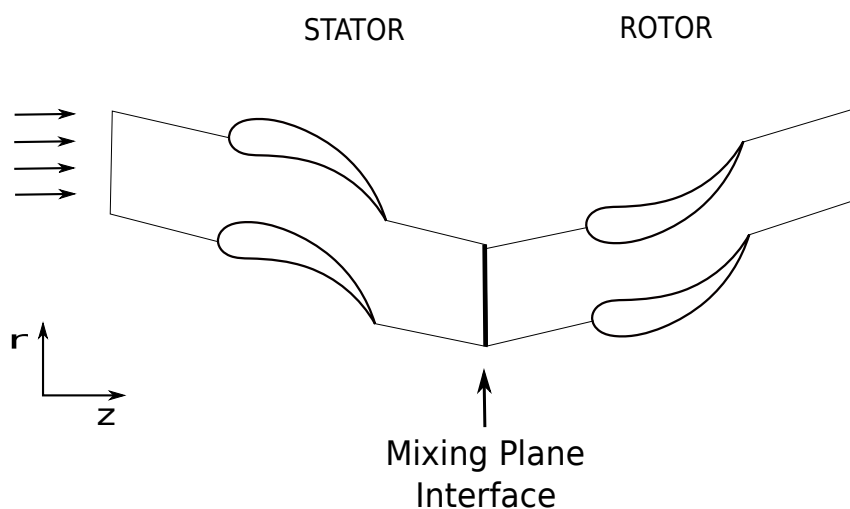


Σχήμα 4.7: Τμήματα επιφανειακού πλέγματος για τα οδηγά πτερύγια (αριστερά) και για τα πτερύγια του δρομέα (δεξιά) υδροστροβίλου Matrix.

Ταυτόχρονη Ανάλυση των Συνιστωσών μιας Βαθμίδας

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που αφορά τον υδροστρόβιλο matrix, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν πιο ομαλή μετάβαση από τις συνθήκες ροής που επικρατούν στην έξοδο της σταθερής πτερύγωσης του υδροστροβίλου σε αυτές που επικρατούν στην είσοδο του δρομέα (Stator – Rotor Interaction), είναι αυτή των επιπέδων ανάμιξης (Mixing Plane).

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται μια βαθμίδα υδροστροβίλου αξονικής ροής (όπως ο τύπου matrix), όπου γύρω από το ακίνητο πτερύγιο και το πτερύγιο του δρομέα επικρατούν συγκεκριμένες συνθήκες ροής. Το κρίσιμο σημείο βρίσκεται εκεί όπου ενώνονται τα δύο χωρία, δηλαδή στην κοινή τους διεπιφάνεια (Mixing Plane Interface) όπου και πρέπει να γίνει η μετάβαση της πληροφορίας των συνθηκών ροής στην έξοδο του ακίνητου πτερυγίου, στην είσοδο του δρομέα. Η μετάβαση αυτή γίνεται κατά την επαναληπτική επίλυση της ροής, όπου για κάθε χωρίο κατασκευάζεται διαφορετικό πλέγμα, χωρίς να πρέπει απαραίτητα ο αριθμός κόμβων στην έξοδο του ακίνητου πτερυγίου να είναι ίσος με τον αριθμό των κόμβων στην είσοδο του δρομέα.

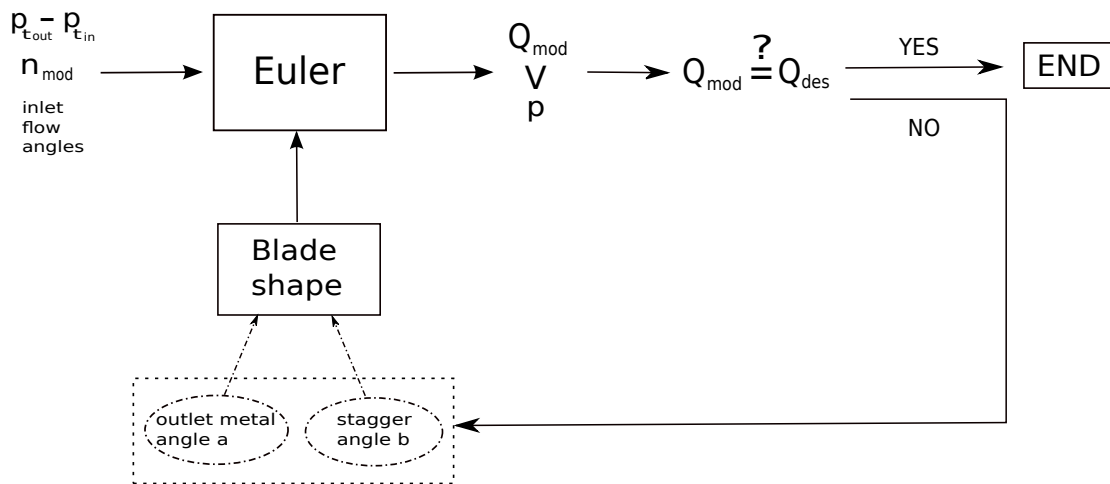


Σχήμα 4.8: Αλληλεπίδραση ακίνητων πτερυγίων και πτερυγίων δρομέα υδροστροβίλου αξονική ροής (Stator – Rotor Interaction), όπου φαίνεται με πιο έντονο χρώμα η κοινή διεπιφάνεια των δύο χωρίων όπου εφαρμόζεται η μέθοδος των επιπέδων μίξεως.

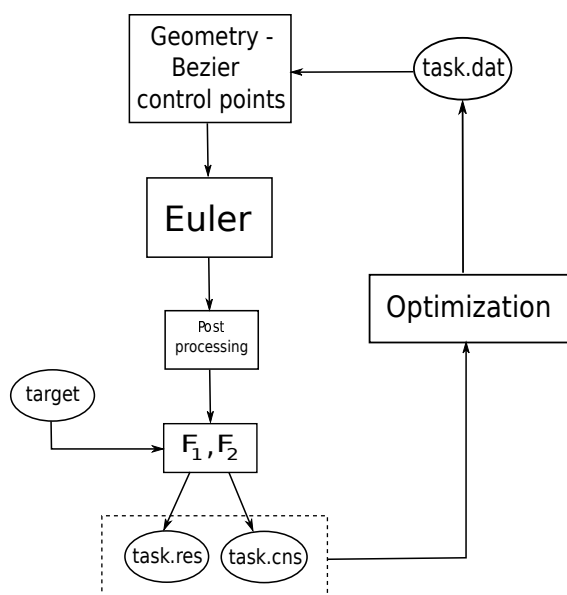
Η λογική της μεθόδου είναι ότι κάθε χωρίο επιλύεται ως πρόβλημα σταθερών συνθηκών, συνεπώς απαιτείται μόνο ένα ελάχιστο χωρίο ροής που καθορίζουν δύο συχεχόμενα πτερύγια (ίσου πλάτους με το βήμα της πτερύγωσης). Τα ροϊκά δεδομένα του κοινού συνόρου των δύο χωρίων υπολογίζονται ως μέσα μεγέθη των δεδομένων στα όρια εξόδου του ακίνητου πτερυγίου και εισόδου του δρομέα. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται περιφερειακά για όλες τις πτερυγώσεις, έτσι ώστε να υπολογίζονται κατανομές πιέσεων και ταχυτήτων για καθένα από τα διαφορετικά χωρία. Οι κατανομές που υπολογίζονται κάθε φορά, ανανεώνουν τις προηγούμενες τιμές των ροϊκών δεδομένων στα σύνορα των δύο χωρίων – πτερυγώσεων και γίνεται εκ νέου ο υπολογισμός των μέσων μεγεθών, έως ότου επιτευχθούν ομοιόμορφες συνθήκες ροής στη κοινή διεπιφάνεια.

4.5.2 Πρακτικά Θέματα Μορφοποίησης Πτερυγίων Δρομέα

Η διαδικασία εύρεσης γεωμετρίας των πτερυγίων του δρομέα υδροστροβίλου μπορεί για λόγους ευκολότερης κατανόησης να χωριστεί σε δύο ‘επιμέρους’ διαδικασίες, μία εσωτερική (σχήμα 4.9) που αφορά μόνο ένα μέρος της γεωμετρίας των πτερυγίων (συγκεκριμένα δύο γωνίες τις a και b που σχετίζονται με την τοποθέτηση των πτερυγίων όπως θα δούμε παρακάτω), η οποία μεταβάλλεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας και μια εξωτερική (σχήμα 4.10), που είναι το λογισμικό βελτιστοποίησης και αφορά στο τμήμα της γεωμετρίας των πτερυγίων που ελέγχεται από τα σημεία **Bezier**, οι συνιστώσες των οποίων αποτελούν τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος βελτιστοποίησης.



Σχήμα 4.9: Εποπτικό διάγραμμα εσωτερικής επαναληπτικής διαδικασίας για κάθε υποψία λύση. Αν τα κριτήρια σύγκλισης για τη γεωμετρία των γωνιών a και b των πτερυγίων του υδροστροβίλου ικανοποιούνται, η διαδικασία τερματίζει. Διαφορετικά, μεταβάλλονται λίγο οι τιμές των 2 γωνιών a και b των πτερυγίων και επιλύονται εκ νέου οι εξισώσεις ροής.



Σχήμα 4.10: Εποπτικό διάγραμμα εξωτερικής διαδικασίας, όπου φαίνεται σε ποιο σημείο συνδέεται το τμήμα της εσωτερικής διαδικασίας με το λογισμικό βελτιστοποίησης.

Προκειμένου να γίνει αντιληπτός ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνει χώρα η αξιολόγηση μιας υποψήφιας λύσης, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί αρχικά η συνολική αλληλουχία βημάτων που εκτελεί ο αλγόριθμος (το κάθε βήμα επεξηγείται λεπτομερώς παρακάτω). Συνοπτικά, η συνολική διαδικασία έχει ως εξής:

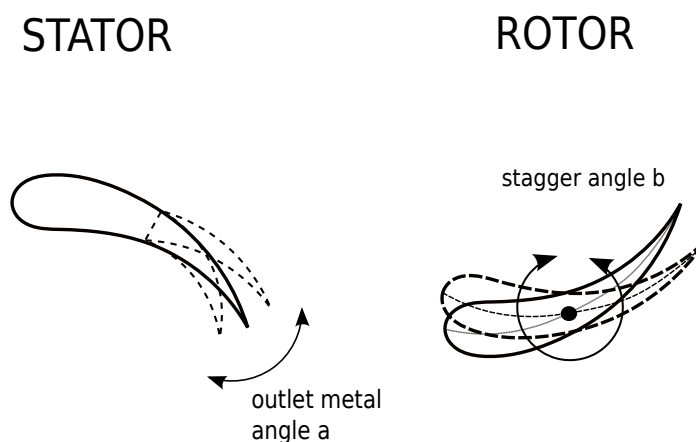
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, το λογισμικό βελτιστοποίησης στέλνει για αξιολόγηση ένα n αριθμό ατόμων. Το κάθε άτομο αποτελεί μια υποψήφια λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης, δηλαδή μια υποψήφια γεωμετρία πτερυγίων δρομέα (και ταυτόχρονα οδηγών πτερυγίων) του μοντέλου υδροστροβίλου *matrix*. Η κάθε γεωμετρία με τη σειρά της, αποτελείται από κάποιον αριθμό (παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο) σημείων ελέγχου καμπυλών *Bezier* και από δύο γωνίες: τη γωνία μετάλλου στην έξοδο των σταθερών πτερυγίων a (*outlet metal angle*) και τη γωνία σφήνωσης b (*stagger angle*) των πτερυγίων του δρομέα. Η γένεση πλέγματος, στους κόμβους του οποίου επιλύονται οι εξισώσεις *Euler* για το ΚΣΛ, γίνεται για μια συγκεκριμένη γεωμετρία (δηλαδή, για δεδομένες συνιστώσες σημείων *Bezier* και δεδομένες τιμές των γωνιών a και b). Μετά την πρώτη επίλυση των ροϊκών εξισώσεων, προκύπτει (μεταξύ των υπόλοιπων δεδομένων για το πεδίο ροής) μια τιμή για την παροχή Q_{mod} στο ΚΣΛ. Στο σημείο αυτό, ελέγχεται αν η τιμή αυτή διαφέρει περισσότερο από $\pm 10\%$ (ποσοστό που αποφασίζει ο χρήστης) από την επιθυμητή τιμή για την παροχή στο ΚΣΛ (που είναι ήδη γνωστή - βλ. πίνακα 4.4). Αν η τιμή της παροχής που προέκυψε δεν βρίσκεται εντός του επιθυμητού ορίου, τότε μεταβάλλεται ελαφρώς η τιμή των γωνιών a και b και γίνεται εκ νέου γένεση πλέγματος

και επίλυση των εξισώσεων Euler που προκύπτουν για τη νέα γεωμετρία. Αν η τιμή της Q_{mod} βρίσκεται εντός του επιθυμητού ορίου, τότε για τη συγκεκριμένη γεωμετρία (υποψήφια λύση), επιλύονται ακόμα δύο φορές οι εξισώσεις ροής, για τα άλλα δύο σημεία λειτουργίας, μερικού και πλήρους φορτίου. Αν οι τιμές των παροχών που προκύπτουν για τα αυτά τα δύο σημεία λειτουργίας, δεν διαφέρουν και πάλι περισσότερο από $\pm 10\%$ από τις αντίστοιχες επιθυμητές τιμές του πίνακα 4.4 (ό,τι δηλαδή ισχύει και για την παροχή στο ΚΣΛ), τότε εξασφαλίζεται ότι για τη συγκεκριμένη γεωμετρία ο υδροστροβίλος βρίσκεται εντός του επιθυμητού εύρους λειτουργίας που οριοθετείται από τα σημεία μερικού και πλήρους φορτίου, επομένως η λύση που βρέθηκε θεωρείται βελτιστοποιημένη. Διαφορετικά, αν έστω και για ένα από τα δύο άλλα σημεία λειτουργίας η τιμή της παροχής δεν είναι η επιθυμητή, τότε η υποψία λύση λαμβάνει ποινή (penalty) και δεν συμμετέχει στις διαδικασίες επιλογής των λύσεων που θα αποτελέσουν το μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, δηλαδή θεωρείται 'μη - αποδεκτή' λύση του προβλήματος.

Αναλυτικά, οι 'επιμέρους' διαδικασίες έχουν ως εξής:

Κατά την εσωτερική διαδικασία (σχήμα 4.9), μεταβάλλεται μόνο ένα μέρος της γεωμετρίας των πτερυγίων του υδροστροβίλου, που δεν αποτελεί τμήμα της βελτιστοποίησης και αφορά τις δύο γωνίες a και b . Υπενθυμίζεται ότι η γωνία a είναι η γωνία μετάλλου στην έξοδο των σταθερών πτερυγίων και η b είναι η γωνία σφήνωσης των πτερυγίων του δρομέα.

Ο τρόπος που μεταβάλλονται αυτές οι γωνίες παρουσιάζεται στο σχήμα 4.11, όπου είναι εμφανές ό,τι αναφέρθηκε και αρχικά για το σχεδιασμό των πτερυγίων του δρομέα: η γεωμετρία της σταθερής πτερύγωσης είναι μόνο κατά ένα μέρος μεταβλητή και συγκεκριμένα από τη μέση των πτερυγίων μέχρι την ακμή εκφυγής, ενώ η γεωμετρία των πτερυγίων του δρομέα διαμορφώνεται εξ ολοκλήρου από τη συνολική διαδικασία. Επαναλαμβάνεται ότι, παρότι στην παρούσα εφαρμογή δεν σχεδιάζεται η γεωμετρία των οδηγών πτερυγίων, οι γωνίες a και b μεταβάλλονται παράλληλα, καθώς δεν θα είχε νόημα μόνο η ανεξάρτητη μεταβολή της γεωμετρίας του δρομέα, για τους λόγους που αναφέρθηκαν και νωρίτερα. Ωστόσο, στο τέλος της βελτιστοποίησης θα είναι, μεταξύ άλλων, γνωστή πλέον η τιμή της γωνίας μετάλλου a στην έξοδο των σταθερών πτερυγίων.



Σχήμα 4.11: Τρόπος μεταβολής των γωνιών εξόδου των οδηγών πτερυγίων a και σφήνωσης των πτερυγίων του δρομέα b . Η γωνία a διαμορφώνει έμμεσα τη γεωμετρία του δρομέα, καθώς καθορίζει τις συνθήκες ροής στη διατομή εισόδου των πτερυγίων του δρομέα.

Όπως περιγράφηκε και στη συνολική διαδικασία, για κάθε διαφορετική γεωμετρία γωνιών a , b γίνεται γένεση πλέγματος και επιλύονται οι εξισώσεις Euler από το λογισμικό αξιολόγησης (αφού έχει λάβει πρώτα ως είσοδο τα δεδομένα ροής που χρειάζεται) και ελέγχεται αν η διαδικασία συγκλίνει στην επιθυμητή τιμή παροχής Q_{mod} (που συμβολίζεται με Q_{des}) για το μοντέλο υδροστροβίλου στο ΚΣΛ (υπενθυμίζεται ότι η επιθυμητή τιμή της Q_{mod} είναι ήδη γνωστή από την εφαρμογή των σχέσεων 4.1 - βλ. και πίνακα 4.4). Αν δεν συγκλίνει, οι τιμές των γωνιών μεταβάλλονται κατά κάποιες μοίρες και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Διαφορετικά, αν ισχύει ότι $Q_{mod} \cong Q_{des}$, τότε η επαναληπτική διαδικασία τερματίζει.

Εδώ αξίζει να αναφερθεί, ότι ο λόγος που οι γωνίες a , b δεν αποτελούν αγνώστους του λογισμικού βελτιστοποίησης, είναι ότι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του σημείου λειτουργίας του υδροστροβίλου. Εικάζεται ότι, αν ελέγχονταν από το λογισμικό βελτιστοποίησης, θα ήταν δυσκολότερο να επιτευχθούν σχετικά γρήγορα οι επιθυμητές τιμές τους, με αποτέλεσμα η συνολική διαδικασία αξιολόγησης μιας λύσης να γινόταν πολύ πιο χρονοβόρα.

Η διαδικασία μεταβολής της τιμής των γωνιών a , b μπορεί να επαναληφθεί m φορές (όριο που ορίζει κατά βούληση ο χρήστης) μέχρι να προκύψει η επιθυμητή τιμή της παροχής του ΚΣΛ. Το αν και πόσο γρήγορα θα συμβεί αυτό, εξαρτάται από το πόσο κοντά στην επιθυμητή λύση είναι οι αρχικές τιμές των γωνιών a και b από τις οποίες εκκινεί η εσωτερική επαναληπτική διαδικασία. Στην εφαρμογή που εξετάζεται εδώ, ως ανώτατο όριο έχουν οριστεί οι 25 εσωτερικές επαναλήψεις. Δηλαδή - στη χειρότερη περίπτωση - μπορεί να χρειαστεί να επιλυθούν οι εξισώσεις Euler μέχρι και 25 φορές, κάτι που όμως δε συμβαίνει συχνά. Γίνεται επομένως

αντιληπτό, ότι ο αριθμός επαναλήψεων που θα χρειαστεί να εκτελέσει η εσωτερική διαδικασία, μέχρι να προκύψει η επιθυμητή τιμή της Q_{mod} στο ΚΣΛ, επηρεάζουν άμεσα το χρόνο που χρειάζεται προκειμένου να ολοκληρώσει μια αξιολόγηση η κάθε υποψήφια λύση. Βάσει των όσων αναφέρθηκαν, η κάθε γεωμετρία (υποψία λύση) κοστίζει υπολογιστικά:

$$\{k \text{ Bezier points} + m \times \text{Euler equations (a, b angles)}\}_{peak \text{ point}} + 2 \times \text{Euler equations (} Q_{part \text{ load}}, Q_{full \text{ load}} \text{)}, \quad m = 1, 25$$

Όπως θα φανεί παρακάτω, ακριβώς αυτή η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη εφαρμογή, ως προς το συνολικό χρόνο αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης - ο οποίος δεν είναι σταθερός - καθιστά τη χρήση του ΑΕΑ ως λογισμικό βελτιστοποίησης μια πολύ καλή επιλογή, καθότι αν η αξιολόγηση ενός ατόμου πάρει περισσότερο χρόνο, αυτό δεν θα καθυστερήσει σε μεγάλο βαθμό τη συνολική διαδικασία σύγκλισης, καθώς οι αξιολογήσεις των υπόλοιπων ατόμων θα συνεχίσουν να γίνονται ανεξάρτητα, σε όσους επεξεργαστές είναι διαθέσιμοι κάθε στιγμή.

Κατά την εξωτερική διαδικασία (σχήμα 4.10), που πρόκειται για το λογισμικό βελτιστοποίησης, μεταβάλλεται η γεωμετρία των πτερυγίων του δρομέα που ελέγχεται από ένα πλήθος σημείων ελέγχου καμπυλών **Bezier**. Οι συνιστώσες των σημείων ελέγχου αποτελούν τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η εσωτερική και η εξωτερική διαδικασία 'επικοινωνούν' μέσω των ροϊκών δεδομένων που προκύπτουν ως έξοδο του επιλύτη ροής και σχετίζονται με τις γωνίες ροής a και b . Συγκεκριμένα, η γωνία a διαμορφώνει, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και διαθέσιμη υδραυλική πτώση, την παροχή Q (άρα την ισχύ εξόδου) του υδροστροβίλου, ενώ η γωνία b σχετίζεται με τη συστροφή του υγρού (**swirl**) στην έξοδο του δρομέα. Όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά στην ενότητα του κεφαλαίου που ακολουθεί, τα δύο αυτά μεγέθη αποτελούν στόχους του προβλήματος βελτιστοποίησης, επομένως οι γωνίες a και b πρέπει να ρυθμιστούν έτσι, ώστε να προκύψουν οι επιθυμητές τιμές για την παροχή και τη συστροφή.

4.6 Επιθυμητά Χαρακτηριστικά Σχεδιασμού – Ορισμός Στόχων Βελτιστοποίησης και Περιορισμών

Η αναζήτηση βέλτιστης γεωμετρίας πτερυγίων υδροστροβίλου αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα αρκετών (ανάλογα με τη διατύπωση του προβλήματος) και μάλιστα αντικρουόμενων στόχων, το οποίο ωστόσο μπορεί να απλοποιηθεί σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων και να γίνει η παρουσίαση των λύσεων σε μέτωπο **Pareto**. Το πρόβλημα υπόκειται ακόμα σε περιορισμούς, οι οποίοι περιγράφονται στα επόμενα. Η επιλογή των στόχων της συνάρτησης κόστους

υπαγορεύτηκε από τα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά που διέπουν τη λειτουργία ενός υδροστροβίλου και παρουσιάζονται αναλυτικά στην υποενότητα που ακολουθεί.

Ως πρώτος στόχος του ΑΕΑ ορίζεται η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος $F_{OP_{1j}}$ (όπου **OP** = **Operating Point**) τριών ποσοτήτων, οι οποίες έχουν πολλαπλασιαστεί με συντελεστές βαρύτητας w_i (όπου $i = 1, 3$) οι τιμές των οποίων ορίζονται εμπειρικά από τον κατασκευαστή του υδροστροβίλου. Τα τρία μεγέθη είναι: η τυπική απόκλιση της διαφοράς των συντελεστών κατανομής πίεσης κατά μήκος του πτερυγίου $StdDev(\Delta C_p)$ και οι κατανομές των συνιστωσών των ταχυτήτων στην έξοδο του δρομέα \vec{c}_m (που αντιπροσωπεύει την παροχή) και \vec{c}_u (που αντιπροσωπεύει τη συστροφή):

$$F_{OP_{1j}} = w_1 F_{1StdDev(\Delta C_p)} + w_2 F_{2flow\ rate} + w_3 F_{3swirl} \quad (min) \quad (4.2)$$

Ανάλογα με τις τιμές των w_1 , w_2 και w_3 προκαθορίζεται η ιεράρχιση των επιμέρους στόχων στο μέτωπο. Εδώ, οι τιμές των τριών συντελεστών αποφασίστηκε να είναι

w_1	w_2	w_3
0.1	10	1

Ως δεύτερος στόχος του ΑΕΑ ορίζεται η ελαχιστοποίηση της παραμέτρου σπηλαίωσης σ του υδροστροβίλου, άρα

$$F_{OP_{2j}} = \sigma \quad (min) \quad (4.3)$$

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη σταθερότητα κατά τη λειτουργία του υδροστροβίλου, ο δρομέας σχεδιάζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοσή του σε τρία διαφορετικά σημεία λειτουργίας: στο ΚΣΛ (**peak point**), στο σημείο μερικού φορτίου (**part load**) και στο σημείο πλήρους φορτίου (**full load**). Η διαμόρφωση σε πρόβλημα δύο στόχων για τα τρία σημεία λειτουργίας γίνεται βάσει της ακόλουθης λογικής: Για κάθε σημείο λειτουργίας ξεχωριστά, υπολογίζεται η τιμή που λαμβάνει η συνάρτηση F_{OP_j} για τον κάθε στόχο, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Στο τέλος, ορίζεται μια ‘συνολική’ συνάρτηση στόχου F_i (όπου $i = 1, 2$), η τιμή της οποίας διαμορφώνεται από το άθροισμα των επιμέρους τιμών των F_{OP_j} για τα τρία σημεία λειτουργίας, οι οποίες έχουν πολλαπλασιαστεί με συντελεστές βαρύτητας w_{OP_j} . Δηλαδή:

$$F_i = \sum_{j=1}^3 w_{OP_j} F_{OP_j} \quad , \quad i = 1, 2 \quad (4.4)$$

Οι τιμές των συντελεστών w_{OP_j} καθορίζονται - όπως και αυτές των w_i - από τον κατασκευαστή του υδροστροβίλου κατά τέτοιον τρόπο, ώστε τη μεγαλύτερη βαρύτητα από τα τρία σημεία λειτουργίας να έχει το ΚΣΛ. Έτσι, εδώ:

$w_{peak\ point}$	$w_{full\ load}$	$w_{part\ load}$
1	0.1	0.1

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διέπεται επίσης από συνολικά δύο περιορισμούς (constraints). Θεματικά θα ταίριαζε ενδεχομένως περισσότερο, οι περιορισμοί να αναφέρονται μαζί με τις μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος, αλλά επειδή οι δεύτερες αποτελούν ξεχωριστή ενότητα, παρουσιάζονται εδώ.

Οι δύο περιορισμοί αφορούν το επιτρεπόμενο εύρος διακύμανσης των τιμών Q_{mod} για τα δύο σημεία λειτουργίας - εκτός του ΚΣΛ - που εξετάζονται, δηλαδή το σημείο μερικού και πλήρους φορτίου. Η ικανοποίηση των περιορισμών εξασφαλίζει ότι το μοντέλο υδροστροβίλου matrix βελτιστοποιημένης γεωμετρίας που προκύπτει μετά την επίλυση των εξισώσεων ροής, βρίσκεται εντός του επιθυμητού εύρους λειτουργίας.

Σε προηγούμενο κεφάλαιο έχει γίνει ήδη μια σύντομη περιγραφή του τρόπου ελέγχου των τιμών των παροχών που προκύπτουν, αλλά εδώ θα προστεθούν ορισμένες λεπτομέρειες. Αρχικά, όσον αφορά στην παροχή Q_{mod} στο ΚΣΛ, η τιμή της υπόκειται - όπως περιγράφηκε - σε έλεγχο μετά την ολοκλήρωση της κάθε επανάληψης (επίλυσης των εξισώσεων ροής) κατά την εσωτερική διαδικασία (όπου μεταβάλλονται οι τιμές των γωνιών a , b) και όχι από το λογισμικό βελτιστοποίησης. Ο λόγος για τον οποίο η τιμή της παροχής στο ΚΣΛ εξετάζεται ξεχωριστά, είναι ότι το μέγεθος αυτό είναι ενδεικτικό της λειτουργίας και των χαρακτηριστικών ενός υδροστροβίλου, γι' αυτό και είναι πρώτιστης σημασίας για τον κατασκευαστή.

Οι τιμές των παροχών για τα σημεία λειτουργίας μερικού και πλήρους φορτίου ελέγχονται από το λογισμικό βελτιστοποίησης, υπό τη μορφή περιορισμών του προβλήματος. Έστω ότι και για τα δύο αυτά σημεία λειτουργίας, χρησιμοποιείται ο ενιαίος συμβολισμός Q_{mod} για την τιμή της παροχής που προκύπτει από την επίλυση των εξισώσεων Euler (αφού έχει βρεθεί η κατάλληλη τιμή για την παροχή στο ΚΣΛ). Αν για μια υποψήφια λύση, η τιμή της παροχής Q_{mod} δε διαφέρει - για κανένα από τα δύο σημεία λειτουργίας - περισσότερο από $\pm 10\%$ από την αντίστοιχη τιμή που αναγράφεται στον πίνακα 4.4, τότε το μοντέλο υδροστροβίλου βελτιστοποιημένης γεωμετρίας βρίσκεται στην περιοχή επιθυμητής λειτουργίας. Αν για κάποιες λύσεις η τιμή της Q_{mod} διαφέρει περισσότερο από $\pm 10\%$ και λιγότερο από $\pm 30\%$ από την επιθυμητή, τότε επιβάλλεται μια εκθετική ποινή στη συνάρτηση κόστους που τους αντιστοιχεί. Αν υπάρχει λύση της οποίας η τιμή διαφέρει περισσότερο από $\pm 30\%$ από την επιθυμητή, τότε η τιμή της αντίστοιχης συνάρτησης κόστους απειρίζεται σκόπιμα. Η είσοδος στο μέτωπο των μη - κυριαρχούμενων λύσεων αποκλείεται σε όλες τις λύσεις, στις οποίες έχει αποδοθεί έστω και η παραμικρή ποινή.

Οι συνολικά δύο περιορισμοί για τα σημεία μερικού και πλήρους παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5: Περιορισμοί Προβλήματος Βελτιστοποίησης

	Exponential Penalty	Death Penalty
Part Load	$\pm 0.1Q_{des} < Q_{mod} \leq \pm 0.3Q_{des}$	$Q_{mod} > \pm 0.3Q_{des}$
Full Load	$\pm 0.1Q_{des} < Q_{mod} \leq \pm 0.3Q_{des}$	$Q_{mod} > \pm 0.3Q_{des}$

4.6.1 Βασικά Σχεδιαστικά Χαρακτηριστικά Υδροστροβίλου – Περαιτέρω Εξηγήσεις

Κριτήριο της ποιότητας σχεδιασμού των πτερυγίων ενός δρομέα αποτελούν δύο βασικά μεγέθη: ο συντελεστής πίεσης C_p (Pressure Coefficient) και η κατανομή της απόλυτης ταχύτητας του ρευστού στην διατομή έξοδου του δρομέα c_2 .

Ο συντελεστής πίεσης C_p , υπολογίζεται σε κάθε θέση πάνω στο πτερύγιο από τον τύπο ([6])

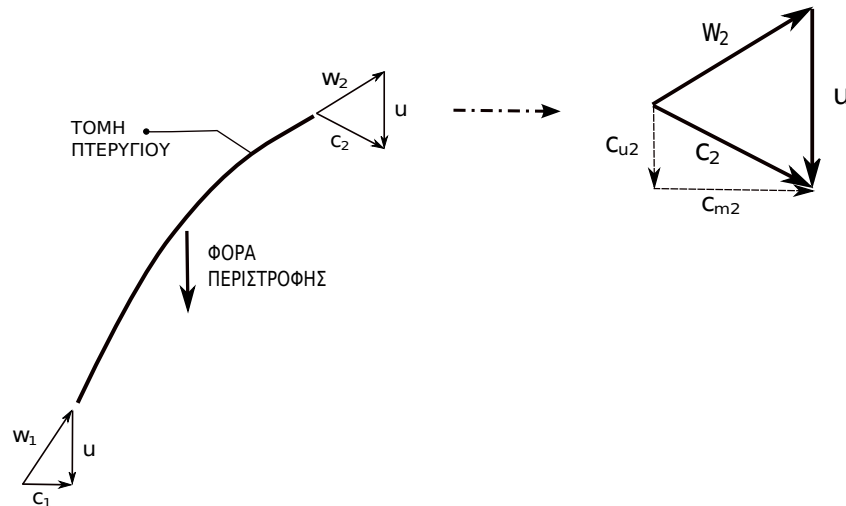
$$C_p = \frac{P - P_{ref}}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} \quad (4.5)$$

όπου P είναι η πίεση σε συγκεκριμένη θέση του πτερυγίου, η τιμή της οποίας μεταβάλλεται κατά μήκος της χορδής του και καθ' ύψος του πτερυγίου, P_{ref} η πίεση αναφοράς, ρ η σταθερή πυκνότητα του υγρού και U_{ref} η ταχύτητα αναφοράς, δηλαδή η ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής.

Η κατανομή του συντελεστή πίεσης ορίζεται για την πλευρά υποπίεσης και υπερπίεσης του πτερυγίου ως $C_{p_s}(t, m)$ και $C_{p_p}(t, m)$ αντίστοιχα (όπου t η εκάστοτε θέση κατά μήκος της χορδής του πτερυγίου και m η εκάστοτε θέση καθ' ύψος του πτερυγίου). Βασική επιδίωξη κατά το σχεδιασμό είναι η τιμή της διαφοράς των συντελεστών πίεσης των δύο πλευρών $\Delta C_p(t, m) = C_{p_p}(t, m) - C_{p_s}(t, m)$ να μεταβάλλεται στο ελάχιστο κατά μήκος της χορδής και καθ' ύψος του πτερυγίου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν ελεγχόμενη κατανομή πίεσης (καταπόνηση από φορτία) στις δύο πλευρές του. Επομένως, ένας από τους στόχους του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση της τυπικής απόκλισης (Standard Deviation) της διαφοράς $\Delta C_p(t, m)$ (η οποία είναι βαθμωτό μέγεθος σε αντίθεση με τον συντελεστή $C_p(t, m)$ που υπολογίζεται για κατανομή πίεσης). Δηλαδή

$$\min \{StdDev(\Delta C_p(t, m))\}_{spanchord} \quad (4.6)$$

Η απόλυτη ταχύτητα στην έξοδο του δρομέα \vec{c}_2 αναλύεται σε μεσημβρινή \vec{c}_m και περιφερειακή συνιστώσα \vec{c}_u , οι οποίες σχετίζονται με την παροχή Q (flow rate) και τη συστροφή (swirl) του διερχόμενου ρευστού αντίστοιχα (σχήμα 4.12). Υπάρχει και μια τρίτη συνιστώσα της ταχύτητας \vec{c}_2 , η ακτινική συνιστώσα \vec{c}_r , η οποία όμως - δεδομένου ότι ο υδροστρόβιλος matrix είναι αξονικής ροής - έχει πολύ μικρή τιμή και γι' αυτό το λόγο δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς. Οι τιμές και των δύο εξαρτώνται άμεσα από τα σημεία λειτουργίας του υδροστροβίλου (H, Q, n) , τα οποία όπως αναφέρθηκε, είναι καθορισμένα για την παρούσα εφαρμογή, επομένως η αναμενόμενη μορφή των κατανομών τους είναι ήδη γνωστή. Επομένως, ένας ακόμα στόχος του προβλήματος αποτελεί ο καθορισμός επιθυμητών τιμών των δύο αυτών μεγεθών, για τα τρία σημεία λειτουργίας.



Σχήμα 4.12: Τρίγωνα ταχυτήτων στην είσοδο και έξοδο πτερυγίου δρομέα υδροστροβίλου αξονικής ροής. Το τρίγωνο ταχυτήτων εξόδου παρουσιάζεται και σε μεγέθυνση, όπου φαίνονται η μεσημβρινή \vec{c}_m και περιφερειακή συνιστώσα \vec{c}_u της απόλυτης ταχύτητας εξόδου \vec{c}_2 .

Συγκεκριμένα, οι επιθυμητές συνθήκες στη διατομή εξόδου του δρομέα είναι σταθερή κατανομή της συνιστώσας \vec{c}_m (η μορφή της αναμένεται να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα μια ευθεία γραμμή) και μια μικρή συστροφή (που συνεπάγεται ότι η αναμενόμενη κατανομή της \vec{c}_u πρέπει να προσεγγίζει μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση, με πολύ μικρό εύρος τιμών στον άξονα των y).

Όπως αναφέρθηκε, η μεσημβρινή συνιστώσα \vec{c}_m της απόλυτης ταχύτητας σχετίζεται με το μέγεθος της παροχής. Επομένως, η σχεδιαστική απαίτηση για σταθερή κατανομή της συνιστώσας \vec{c}_m στη διατομή εξόδου του δρομέα, ταυτίζεται με την απαίτηση η παροχή να εξέρχεται ομοιόμορφα από το δρομέα, ώστε να επικρατούν συγκεκριμένες συνθήκες στην είσοδο του

επόμενου τμήματος του υδροστροβίλου, δηλαδή του αγωγού απαγωγής.

Όσον αφορά στην τιμή της συστροφής στην έξοδο, αξίζει να παρατηρηθεί το εξής: Το σύνηθες κατά το σχεδιασμό υδροστροβίλων είναι η συστροφή στην έξοδο του υδροστροβίλου να είναι σχεδόν μηδενική στην περιοχή του ΚΣΛ, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες κινητικής ενέργειας. Πρέπει να τονιστεί ωστόσο, ότι αυτός ο σχεδιασμός αφορά στην έξοδο του ρευστού από τον αγωγό απαγωγής του ρευστού. Ο ρόλος του αγωγού απαγωγής είναι να μετατρέπει τις απώλειες κινητικής ενέργειας σε ωφέλιμη στατική πίεση. Αναφέρθηκε και αρχικά, ότι ο αγωγός απαγωγής δεν αποτελεί τμήμα του παρόντος σχεδιασμού, όμως η ύπαρξή του μετά την έξοδο του δρομέα επηρεάζει τη συνθήκη για την τιμή της συστροφής που θα προκύψει από τη βελτιστοποίηση: μια μικρή αύξηση της συστροφής κατά την έξοδο του υγρού είναι όχι μόνο επιθυμητή, αλλά και απαραίτητη, καθώς οι απώλειες κινητικής ενέργειας μετά το δρομέα μπορούν να γίνουν εκμεταλλεύσιμες από το επόμενο τμήμα του υδροστροβίλου που είναι ο αγωγός απαγωγής.

Ένα ακόμα καθοριστικό μέγεθος για το σχεδιασμό ενός πτερυγίου αποτελεί η παράμετρος σπηλαιώσης σ . Ορίζεται παρόμοια με τον συντελεστή πίεσης, από τον τύπο ([6])

$$\sigma = \frac{P_{ref} - P_M}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2} \quad (4.7)$$

όπου P_M είναι η οριακή εκείνη τιμή της μέσης ελάχιστης στατικής πίεσης του υγρού, κάτω από την οποία ξεκινά η εμφάνιση του φαινομένου σπηλαιώσης (δηλαδή η έναρξη ατμοποίησης του υγρού) και εξαρτάται από το ύψος τοποθέτησης του κάθε υδροστροβίλου του πλέγματος, ως προς την κατάντι στάθμη της εγκατάστασης.

Από τον ορισμό του συντελεστή πίεσης C_p και της παραμέτρου σπηλαιώσης σ προκύπτει ότι

$$\sigma = -C_{pmin} \quad (4.8)$$

όπου η τιμή του $-C_{pmin}$ είναι θετικός αριθμός.

Δηλαδή, σε ένα συγκεκριμένο ύψος του πτερυγίου, το σημείο κατά μήκος της χορδής του όπου ξεκινά να παρατηρείται οριακά το φαινόμενο της σπηλαιώσης, ανήκει στην πλευρά υποπίεσης και αντιστοιχεί στο σημείο με το μικρότερο συντελεστή πίεσης C_{pmin} . Για ακόμα μικρότερες τιμές του C_p , (δηλαδή για $\sigma > -C_{pmin}$) η σπηλαιώση συμβαίνει συστηματικά, ενώ όσο μεγαλύτερη τιμή για το C_p επιλέγεται, τόσο περισσότερο ασφαλές είναι το πτερύγιο από την ανάπτυξη του φαινομένου. Στην πράξη - αφού σχεδιαστούν όλες οι κατανομές κατά μήκος της χορδής σε όλα τα ύψη του πτερυγίου από την πλήμνη μέχρι τη στεφάνη - σχεδόν

ποτέ δεν επιλέγεται για την παράμετρο σπηλαίωσης η οριακή τιμή $-C_{pmin}$, αλλά μια μικρότερη τιμή ($\sigma < -C_{pmin}$), έτσι ώστε να υπάρχει ένα περιθώριο ασφαλείας που να εξασφαλίζει ότι ολόκληρο το πτερύγιο δεν κινδυνεύει από σπηλαίωση.

Οι πλέον επικίνδυνες περιοχές ανάπτυξης του φαινομένου σπηλαίωσης στο δρομέα ενός υδροστροβίλου είναι αυτές, όπου η μέση στατική πίεση είναι χαμηλή, ενώ ταυτόχρονα η ταχύτητα ροής λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές. Οι περιοχές αυτές χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά το σχεδιασμό, καθώς συστηματική ανάπτυξη του φαινομένου οδηγεί στην ανάπτυξη έντονων χροστικών υπερπίεσεων που καταπονούν το υλικό της περιρρεώμενης επιφάνειας και τελικά οδηγούν σε αστοχία του πτερυγίου. Επομένως, ένας επιπλέον στόχος του προβλήματος αποτελεί η ελαχιστοποίηση της τιμής της παραμέτρου σπηλαίωσης.

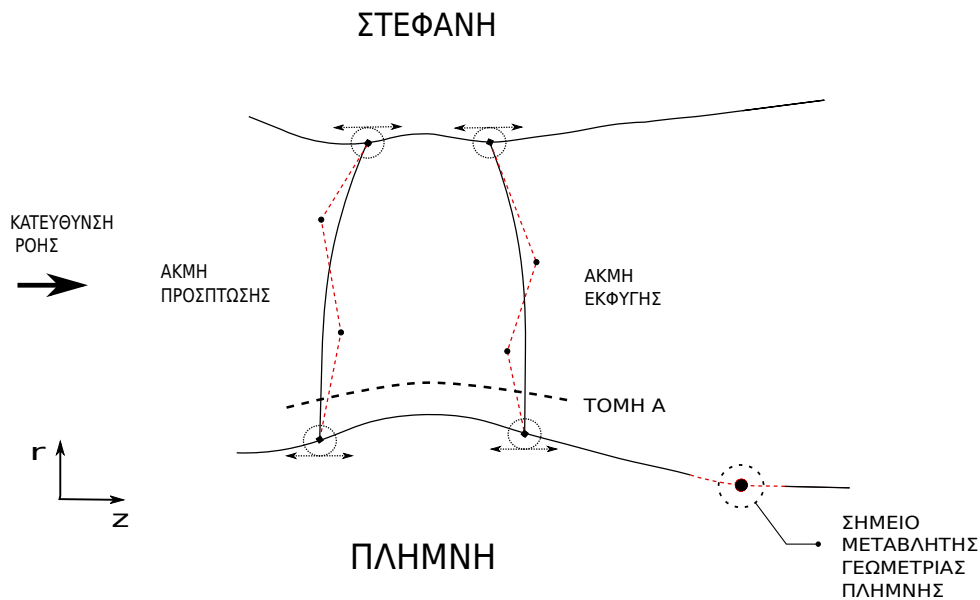
4.7 Παραμετροποίηση Πτερυγίων Δρομέα - Μεταβλητές Σχεδιασμού

Όπως συνηθίζεται στην πλειοψηφία των αλγορίθμων βελτιστοποίησης που αφορούν το σχεδιασμό αερο - υδροδυναμικών μορφών, η παραμετροποίηση του σχήματος των πτερυγίων του δρομέα του μοντέλου υδροστροβίλου **matrix** πραγματοποιείται με καμπύλες **Bezier**, που αποτελούνται συνολικά από 42 σημεία ελέγχου (**control points**). Τα 42 σημεία ελέγχου των καμπυλών **Bezier** που ορίζουν την μορφή του πτερυγίου του δρομέα, αποτελούν και τις μεταβλητές σχεδιασμού (**design variables**) του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, η μορφή του εξωτερικού κελύφους (στεφάνη) του υδροστροβίλου **matrix** είναι καθορισμένη από τον κατασκευαστή και δεν αποτελεί ζητούμενο της βελτιστοποίησης. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης δεν επεμβαίνει επίσης στη γεωμετρία των σταθερών πτερυγίων, καθώς το μόνο τμήμα της που μεταβάλλεται είναι η γωνία εξόδου a της ροής. Οι δύο γεωμετρίες που διαμορφώνονται από το λογισμικό βελτιστοποίησης αφορούν ένα τμήμα του εσωτερικού κελύφους (πλήμνη) πριν την έξοδο του υδροστροβίλου και όλη τη μορφή των πτερυγίων του δρομέα - με εξαίρεση τη γωνία σφήνωσης b που δεν συμμετέχει στη βελτιστοποίηση και την εξωτερική διάμετρο του δρομέα που έχει καθοριστεί από τον κατασκευαστή ($D_{mod} = 0,34\text{ m}$).

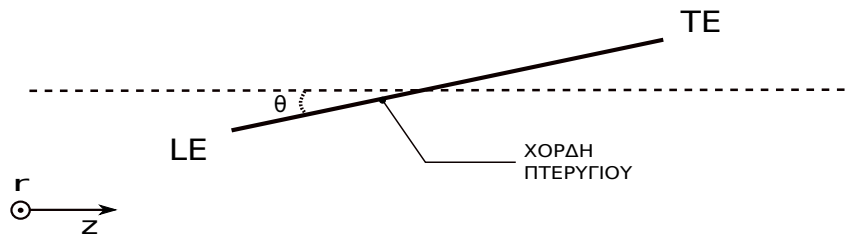
Η παραμετροποίηση της γεωμετρίας των πτερυγίων του δρομέα ακολουθεί την εξής λογική: Αρχικά 'χτίζεται' η μέση επιφάνεια του πτερυγίου στο χώρο (ορίζεται η κλίση, η κυρτότητα, η στρεβλότητα και το πλάτος του πτερυγίου) και στη συνέχεια, τοποθετείται καθ' ύψος της μέσης επιφάνειας ένας αριθμός αεροτομών, σύμφωνα με μία κατανομή πάχους, έτσι ώστε το πτερύγιο να αποκτήσει το αναμενόμενο πάχος.

Αναλυτικότερα: η μέση επιφάνεια ορίζεται από 8 σημεία ελέγχου που μετακινούν τις καμπύλες **Bezier** κατά μήκος του άξονα των z και από συνολικά 24 σημεία ελέγχου που αφορούν τρεις γωνίες, τις θ , β και ζ (σχήματα 4.14 και 4.15), [4, 29, 36]. Ο τρόπος με τον οποίο τα 8 σημεία ορίζουν τις καμπύλες κατά τον άξονα z παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13. Όπως φαίνεται, 4 σημεία ορίζουν την καμπύλη της ακμής πρόσπτωσης (**LE**) και άλλα 4 ορίζουν την καμπύλη της ακμής εκφυγής (**TE**). Τα 4 ακραία σημεία ελέγχου μπορούν να ολισθαίνουν πάνω στην επιφάνεια της πλήμνης και της στεφάνης, έτσι ώστε να ρυθμίζεται το πλάτος του πτερυγίου. Τα 8 αυτά σημεία σχηματίζουν τη μέση επιφάνεια του πτερυγίου στον 2Δ χώρο.



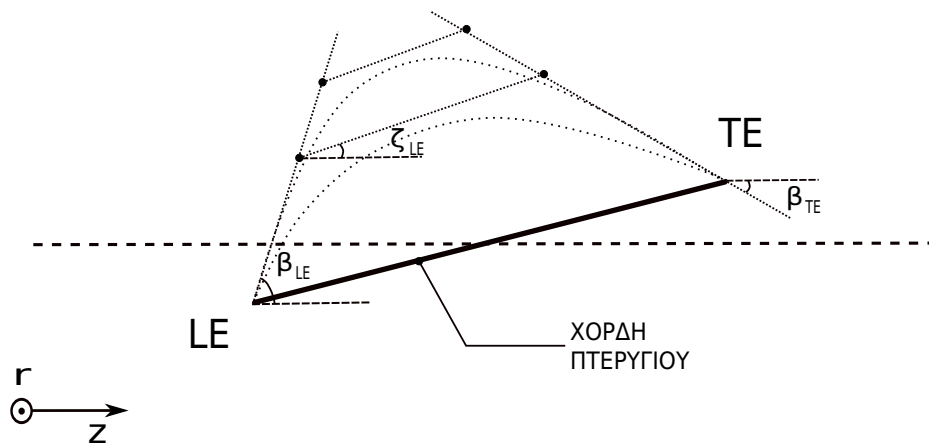
Σχήμα 4.13: Απεικόνιση καμπυλών **Bezier** που ορίζουν τα 8 σημεία ελέγχου που είναι ελεύθερα να μετακινούνται κατά μήκος του άξονα z . Όπως φαίνεται, 4 σημεία ορίζουν την ακμή πρόσπτωσης και 4 την ακμή εκφυγής. Στο σχήμα έχει σημειωθεί και το μοναδικό τμήμα της πλήμνης που έχει μεταβλητή γεωμετρία.

Η τοποθέτηση της μέσης επιφάνειας στο χώρο των 3 διαστάσεων γίνεται από 2 καμπύλες **Bezier** (μία για την ακμή πρόσπτωσης και μία για την ακμή εκφυγής) που αποτελούνται από 4 σημεία ελέγχου η καθεμία και ορίζουν την κατανομή της γωνίας θ την δύο ακμών από την πλήμνη ως τη στεφάνη. Δηλαδή, η γωνία θ ρυθμίζει την κλίση του πτερυγίου ως προς τον άξονα z (σχήμα 4.14), [4, 29, 36].



Σχήμα 4.14: Τομή Α πτερυγίου (από σχήμα 4.13), όπου φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο η γωνία θ διαμορφώνει την τοποθέτησή του στο 3Δ χώρο.

Σειρά έχει η διαμόρφωση της κυρτότητας, η οποία ελέγχεται από συνολικά 4 καμπύλες **Bezier** (δύο για την ακμή πρόσπτωσης και δύο για την ακμή εκφυγής) που αποτελούνται από 4 σημεία ελέγχου η καθεμία και ορίζουν τις κατανομές των γωνιών β και ζ αντίστοιχα, από την πλήμνη ως τη στεφάνη. Σε κάθε ακμή του πτερυγίου η κατανομή της γωνίας β ορίζει τους φορείς δύο ευθειών. Πάνω στις ευθείες αυτές τοποθετούνται στη συνέχεια, βάσει της κατανομής της γωνίας ζ , τα σημεία που ελέγχουν την επίδραση της γωνίας β καθ' ύψος του πτερυγίου (όσο πιο μακριά τοποθετηθούν τα σημεία αυτά, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η επίδραση), με αποτέλεσμα να διαμορφώνεται η τελική καμπυλότητα της μέσης επιφάνειας (σχήμα 4.15), [36].



Σχήμα 4.15: Τομή Α πτερυγίου (από σχήμα 4.13), όπου φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο οι γωνίες β και ζ διαμορφώνουν την κυρτότητα της μέσης επιφάνειας του πτερυγίου.

Σε τελικό στάδιο υπερτίθεται το πάχος του πτερυγίου όπως προκύπτει από την υπέρθεση πολλαπλών **profile** αεροτομών, εντός του διαστήματος που οριοθετείται από το άνω και κάτω κέλυφος του δρομέα, σύμφωνα με δύο κατανομές ημίπάχους κατά την ακτινική διεύθυνση. Η κατανομή πάχους ορίζεται ξεχωριστά για την πλευρά υποπίεσης και υποπίεσης και ελέγχεται από 4 σημεία ελέγχου στην κάθε πλευρά, [36].

Εκτός από τη γεωμετρία των πτερυγίων του δρομέα, ελεύθερη μεταβλητή κατά τη βελτιστοποίηση αποτελεί και ένα εσωτερικό σημείο της πλήμνης που καθορίζει το σχήμα του κώνου εξόδου του δρομέα. Το τμήμα αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13 και διαμορφώνεται από 2 συνολικά σημεία ελέγχου, από τα οποία το ένα μετακινείται κατά τον άξονα x και το άλλο κατά τον άξονα y .

Τα συνολικά 42 σημεία ελέγχου (μεταβλητές σχεδιασμού) που περιγράφηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Μεταβλητές Σχεδιασμού Προβλήματος Βελτιστοποίησης

z		ϑ		ζ		β		<i>thickness</i>		<i>Hub</i>	
<i>LE</i>	<i>TE</i>	<i>LE</i>	<i>TE</i>	<i>LE</i>	<i>TE</i>	<i>LE</i>	<i>TE</i>	<i>PresSide</i>	<i>SuctSide</i>	x	y
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1
<i>Total 42</i>											

όπου

LE : Ακμή Πρόσπτωσης (Leading Edge)

TE : Ακμή Εκφυγής (Trailing Edge)

PresSide : Πλευρά Υπερπίεσης (Pressure Side)

SuctSide : Πλευρά Υποπίεσης (Suction Side)

Hub : Πλήμνη Δρομέα Υδροστροβίλου *matrix*

4.8 Βελτιστοποίηση - Καθορισμός Παραμέτρων ΑΕΑ/ΕΑ

Η βελτιστοποίηση για τον Ασύγχρονο Εξελικτικό Αλγόριθμο (ΑΕΑ) πραγματοποιήθηκε σε 14 ίδιους επεξεργαστές, για διαστάσεις πλέγματος βάσης 8×8 , δηλαδή για συνολικά 48 άτομα (agents) προς αξιολόγηση. Ως ανώτατο όριο αξιολογήσεων ορίστηκαν οι 1500, καθότι πρόκειται για μηχανολογική εφαρμογή, που είναι σημαντικά χρονοβόρα.

Κατά την πρώτη εκτέλεση του ΑΕΑ, ο σχεδιασμός των πτερυγίων του δρομέα δεν ξεκίνησε από μηδενική βάση, αλλά βασίστηκε σε μια γνωστή γεωμετρία από προηγούμενους παρόμοιους σχεδιασμούς. Υπήρξε δηλαδή μια αρχικοποίηση του πληθυσμού, εισάγοντας σε αυτόν από την αρχή μια 'δοκιμασμένη' λύση, η οποία και στελνόταν αμέσως για αξιολόγηση στον 1ο από τους 14 διαθέσιμους επεξεργαστές κατά την έναρξη του αλγορίθμου. Τα υπόλοιπα 13 άτομα που απέμεναν να σταλούν για αξιολόγηση στους υπόλοιπους 13 διαθέσιμους επεξεργαστές, αρχικοποιούνταν με τυχαίο τρόπο, εντός ενός περιορισμένου σχετικά εύρους τιμών, τα όρια του οποίου κυμαίνονταν σχετικά κοντά στη 'δοκιμασμένη' λύση. Η αρχικοποίηση αυτή γινόταν μόνο για τις 14 πρώτες αξιολογήσεις που λάμβαναν χώρα (για τα 14 πρώτα άτομα που στέλνονταν για αξιολόγηση). Σκοπός της αρχικοποίησης αυτής, ήταν να συγκλίνει ο αλγόριθμος πιο γρήγορα σε υποψήφιες λύσεις που ικανοποιούσαν τους τεθέντες περιορισμούς του προβλήματος και συνεπώς, συμμετείχαν σχεδόν αμέσως μετά τις πρώτες επαναλήψεις στις διαδικασίες για την είσοδό τους στο μέτωπο των μη – κυριαρχούμενων λύσεων.

Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τον ΑΕΑ με αρχικοποίηση από γνωστή γεωμετρία (λύση), παρουσιάζονται συνολικά στον πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7: Παράμετροι ΑΕΑ (Με αρχικοποίηση πληθυσμού από γνωστή λύση)

Πλέγμα Βάσης	8 × 8
Άτομα προς Αξιολόγηση	48
Αριθμός Επεξεργαστών	14
Μέγιστος Αριθμός Αξιολογήσεων	1500

Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων (τόσο σύγκλισης όσο και συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης της διαδικασίας) του ΑΕΑ με τα αποτελέσματα που θα έδινε ένας Σύγχρονος Εξελικτικός Αλγόριθμος (ΕΑ) για ανάλογες παραμέτρους πληθυσμού, ίδιο πλήθος επεξεργαστών και ίδιους περιορισμούς, έγιναν ακόμα δύο εκτελέσεις, χωρίς να πραγματοποιηθεί αυτή τη φορά αρχικοποίηση του πληθυσμού βάσει κάποιας προηγούμενης γεωμετρίας υδροστροβίλου. Η μια εκτέλεση έγινε για τον ΑΕΑ και η άλλη για τον ΕΑ.

Αυτή τη φορά, η βελτιστοποίηση έγινε σε 7 ίδιους επεξεργαστές και για τους δύο αλγόριθμους, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι του ΑΕΑ παρέμειναν όπως είχαν και προηγούμενα. Για τον ΕΑ ορίστηκε πληθυσμός γονέων ίσος με 60 άτομα και πληθυσμός απογόνων ίσος με 20. Ο μέγιστος αριθμός αξιολογήσεων που ορίστηκε ήταν και πάλι οι 1500, ενώ οι περιορισμοί και για τους δύο αλγόριθμους, ήταν αυτοί του αρχικού ΑΕΑ (έχει γίνει περιγραφή τους σε προηγούμενο κεφάλαιο).

Οι παράμετροι που ορίστηκαν για αυτή την περίπτωση για τον ΑΕΑ και τον ΕΑ, παρουσιάζονται στους πίνακες 4.8 και 4.9 αντίστοιχα.

Πίνακας 4.8: Παράμετροι ΑΕΑ (Χωρίς αρχικοποίηση πληθυσμού από γνωστή λύση)

Πλέγμα Βάσης	8 × 8
Άτομα προς Αξιολόγηση	48
Αριθμός Επεξεργαστών	7
Μέγιστος Αριθμός Αξιολογήσεων	1500

Πίνακας 4.9: Παράμετροι ΕΑ (Χωρίς αρχικοποίηση πληθυσμού από γνωστή λύση)

Πλήθος Γονέων	60
Πλήθος Απογόνων	20
Αριθμός Επεξεργαστών	7
Μέγιστος Αριθμός Αξιολογήσεων	1500

4.9 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης - Συζήτηση

4.9.1 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης ΑΕΑ Με Αρχικοποίηση Από Γνωστή Λύση

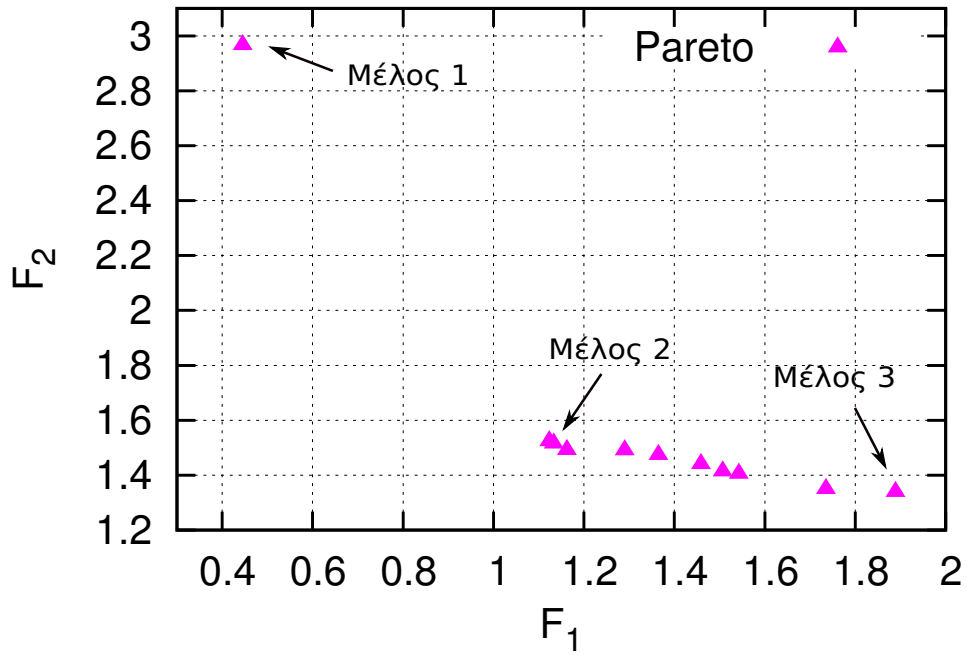
Μέτωπο Μη – Κυριαρχούμενων Λύσεων και Παρουσίαση Διαγραμμάτων - Γεωμετριών για 3 Μέλη του Μετώπου

Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, αφού βρεθούν οι επιμέρους τιμές των δύο συναρτήσεων στόχου για κάθε ένα από τα τρία γνωστά σημεία λειτουργίας, γίνεται η σύνθεσή τους σε δύο ‘συνολικές’ συναρτήσεις F_1 και F_2 . Το προκύπτον μέτωπο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων είναι αυτό του σχήματος 4.16, με άξονες τις δύο τελικές συναρτήσεις στόχους. Αποτελείται από πληθυσμό 11 κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, καθεμία από τις οποίες υπερτερεί ως προς τον ένα στόχο και υστερεί ως προς τον άλλο. Όλες οι λύσεις του μετώπου είναι αποδεκτές ως προς τους περιορισμούς που τέθηκαν, καθώς απαγορεύεται η είσοδος στο μέτωπο ενός ατόμου, που παραβιάζει έστω και έναν από τους περιορισμούς του προβλήματος.

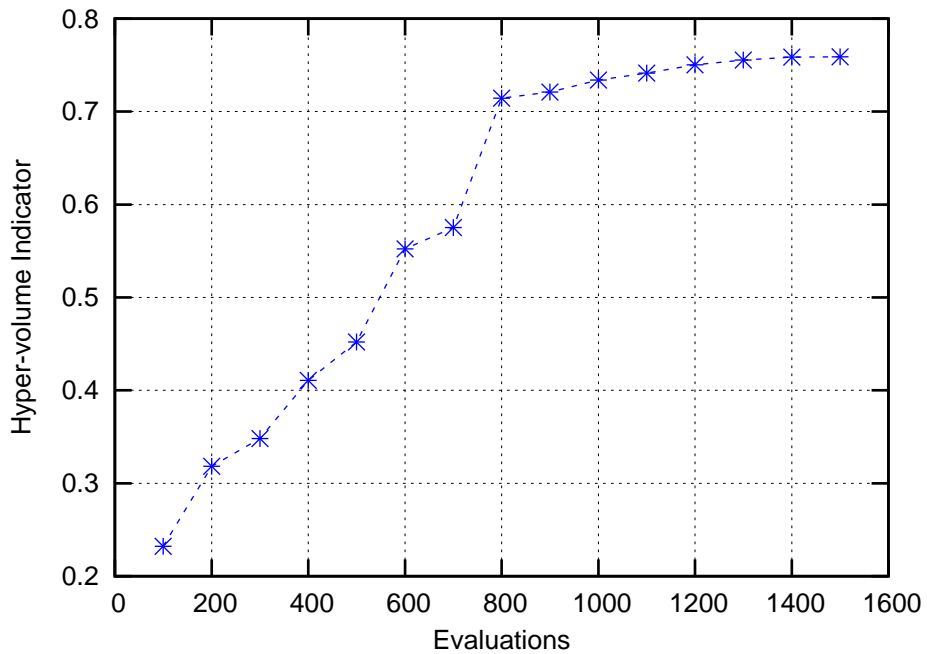
Ακόμα, στο γράφημα του σχήματος 4.17 παρουσιάζεται η πορεία σύγκλισης του ΑΕΑ ως προς τον αριθμό των αξιολογήσεων που έγιναν, με χρήση του δείκτη υπερόγκου (Hyper-volume Indicator). Παρατηρείται ότι, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των αξιολογήσεων, η καμπύλη του δείκτη υπερόγκου αυξάνεται και τελικά τείνει να σταθεροποιηθεί σε μία τιμή, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος έχει καταφέρει να προσεγγίσει σε ικανοποιητικό βαθμό το βέλτιστο μέτωπο. Τα όρια για τους δύο στόχους που ορίστηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη υπερόγκου αναγράφονται στον πίνακα 4.10.

Πίνακας 4.10: Όρια χωρίου υπολογισμού του δείκτη υπερόγκου.

Στόχος	min	max
F_1	0	4.5
F_2	1	5



Σχήμα 4.16: Μέτωπο μη-κυριαρχούμενων λύσεων για πλέγμα βάσης ΑΕΑ 8 × 8.



Σχήμα 4.17: Πορεία σύγκλισης του ΑΕΑ με χρήση του δείκτη υπερόγκου.

Από τα 11 μέλη του μετώπου των μη – κυριαρχούμενων λύσεων επιλέγονται ενδεικτικά 3 προκειμένου να ‘συγκριθούν’ μεταξύ τους, ως προς τις τιμές των μεγεθών (H, Q, n) και σ (παράμετρος σπηλαίωσης) για τα τρία σημεία λειτουργίας, το βαθμό προσέγγισης των στόχων και τη γεωμετρία του δρομέα που προκύπτει. Η επιλογή θα μπορούσε να αφορά 3 οποιαδήποτε μέλη του μετώπου, ωστόσο μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν αυτά που οριοθετούν το χώρο λύσεων του μετώπου, δηλαδή τα μέλη 1 και 3 (πάνω αριστερά και κάτω δεξιά αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16), δεδομένου ότι το ένα υπερτερεί αρκετά σε σχέση με το άλλο μέλος ως προς τον ένα στόχο και ταυτόχρονα υστερεί αρκετά ως προς τον άλλο, και αντίστροφα. Επιλέγεται επίσης και ένα από τα μέλη που βρίσκεται περίπου στο ‘μέσο’ του μετώπου, το μέλος 2.

Για καθένα από τα 3 μέλη που επιλέχθηκαν, παρουσιάζονται αρχικά σε πίνακες οι τιμές των μεγεθών (H, Q, n) και σ , έτσι όπως προκύπτουν μετά τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας για κάθε ένα από τα τρία $\Sigma\Lambda$ που εξετάστηκαν (πίνακες 4.11 έως 4.13).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται για κάθε λύση και κάθε $\Sigma\Lambda$, τα διαγράμματα των κατανομών των ταχυτήτων στην έξοδο του δρομέα c_m (αντιπροσωπευτική της παροχής) και c_u (αντιπροσωπευτική της συστροφής) κατά μήκος του πτερυγίου για τα τρία σημεία λειτουργίας του μοντέλου υδροστροβίλου (σχήματα 4.18 έως 4.20), όπου φαίνεται ο βαθμός προσέγγισης των στόχων από την κάθε λύση. Οι επιθυμητές κατανομές απεικονίζονται με διακεκομμένη γραμμή.

Ακολουθούν οι κατανομές πίεσης του συντελεστή C_p (σχήματα 4.21 έως 4.23) κατά μήκος και καθ’ ύψος των δύο πλευρών του πτερυγίου του δρομέα (πάλι και για τα τρία $\Sigma\Lambda$). Η επιθυμητή σταθερότητα του φορτίου πίεσης, που ήταν και το ζητούμενο, έχει επιτευχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό.

Τέλος, παρουσιάζεται για κάθε λύση η 3Δ μορφή ενός πτερυγίου από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες (σχήμα 4.24), αλλά και ολόκληρου του δρομέα βελτιστοποιημένης γεωμετρίας του μοντέλου υδροστροβίλου *matrix* (σχήμα 4.25).

Πίνακας 4.11: Μέλος 1 του μετώπου Pareto - Σημεία Λειτουργίας και Παράμετροι Σπηλαιώσης Αντίστοιχου Μοντέλου Υδροστροβίλου

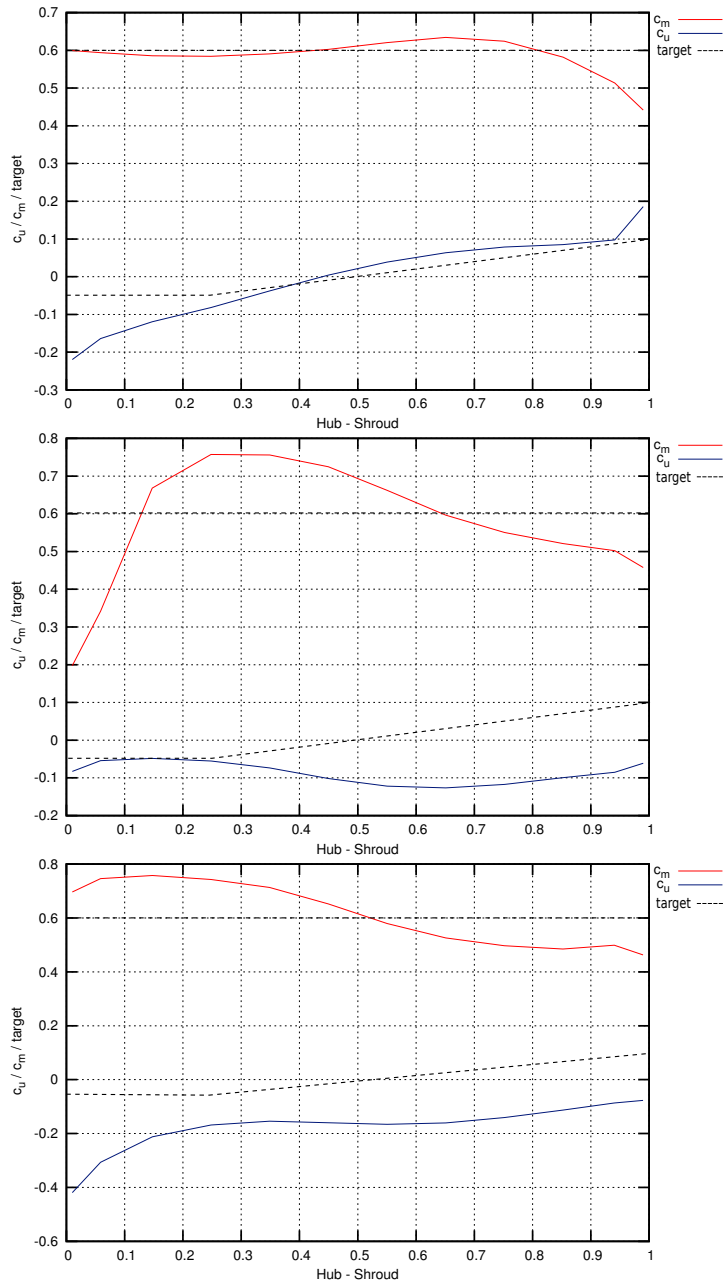
	H_{mod} [m]	Q_{mod} [m^3/sec]	n_{mod} [rpm]	σ
<i>Part Load</i>	7	0.95	1559.6	1.67
<i>Peak Point</i>	7	0.79	1135.2	2.56
<i>Full Load</i>	7	0.73	981.3	2.43

Πίνακας 4.12: Μέλος 2 του μετώπου Pareto - Σημεία Λειτουργίας και Παράμετροι Σπηλαιώσης Αντίστοιχου Μοντέλου Υδροστροβίλου

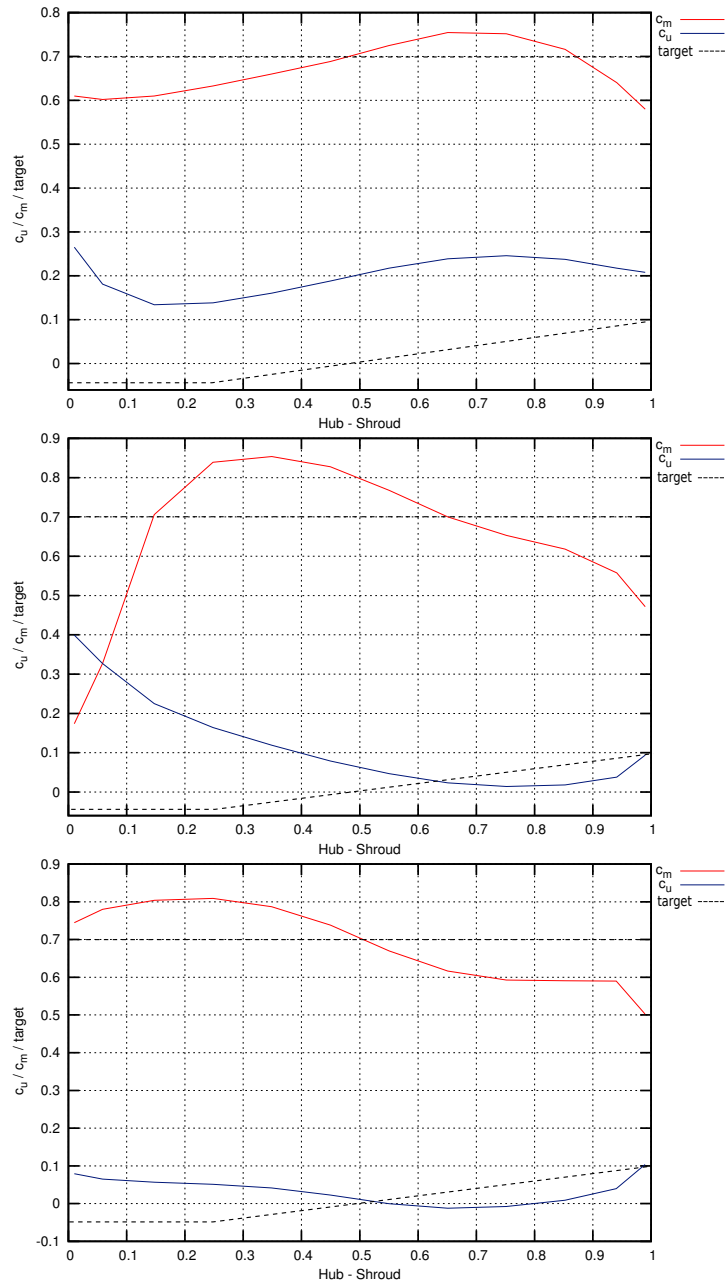
	H_{mod} [m]	Q_{mod} [m^3/sec]	n_{mod} [rpm]	σ
<i>Part Load</i>	7	0.90	1559.6	2.56
<i>Peak Point</i>	7	0.77	1135.2	1.08
<i>Full Load</i>	7	0.72	981.3	1.76

Πίνακας 4.13: Μέλος 3 του μετώπου Pareto - Σημεία Λειτουργίας και Παράμετροι Σπηλαιώσης Αντίστοιχου Μοντέλου Υδροστροβίλου

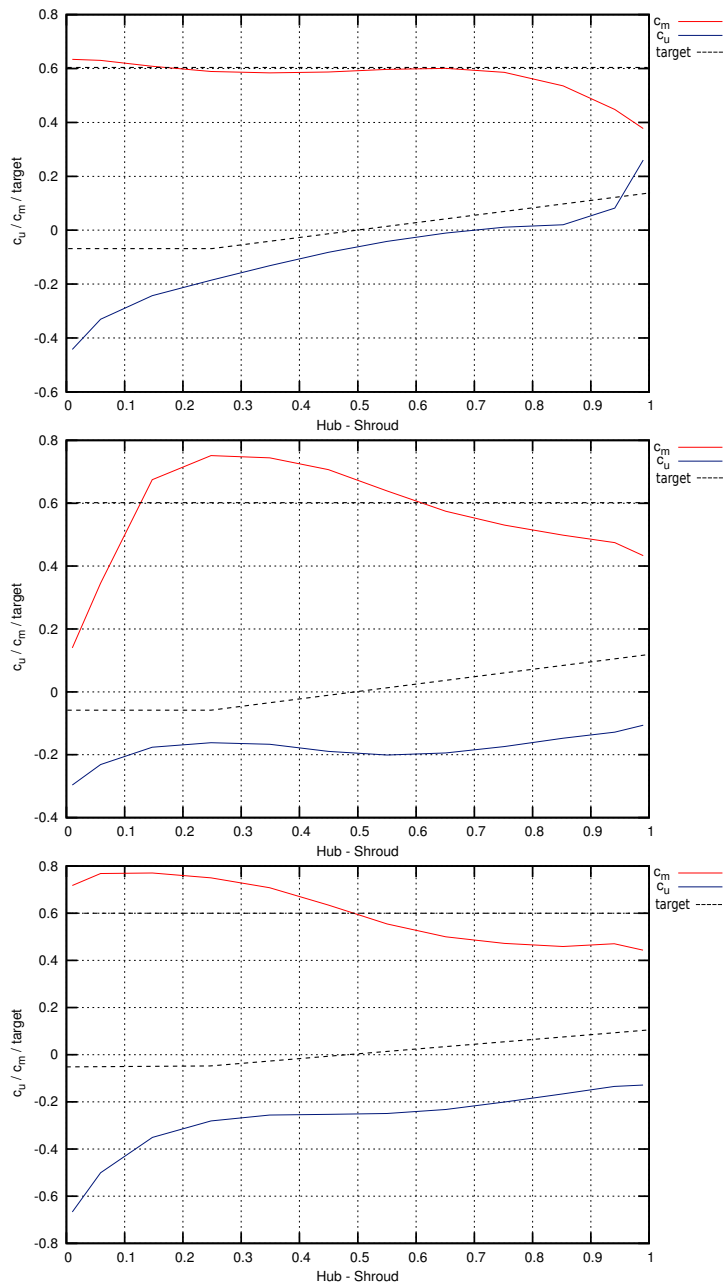
	H_{mod} [m]	Q_{mod} [m^3/sec]	n_{mod} [rpm]	σ
<i>Part Load</i>	7	0.88	1559.6	2.04
<i>Peak Point</i>	7	0.75	1135.2	0.97
<i>Full Load</i>	7	0.69	981.3	1.66



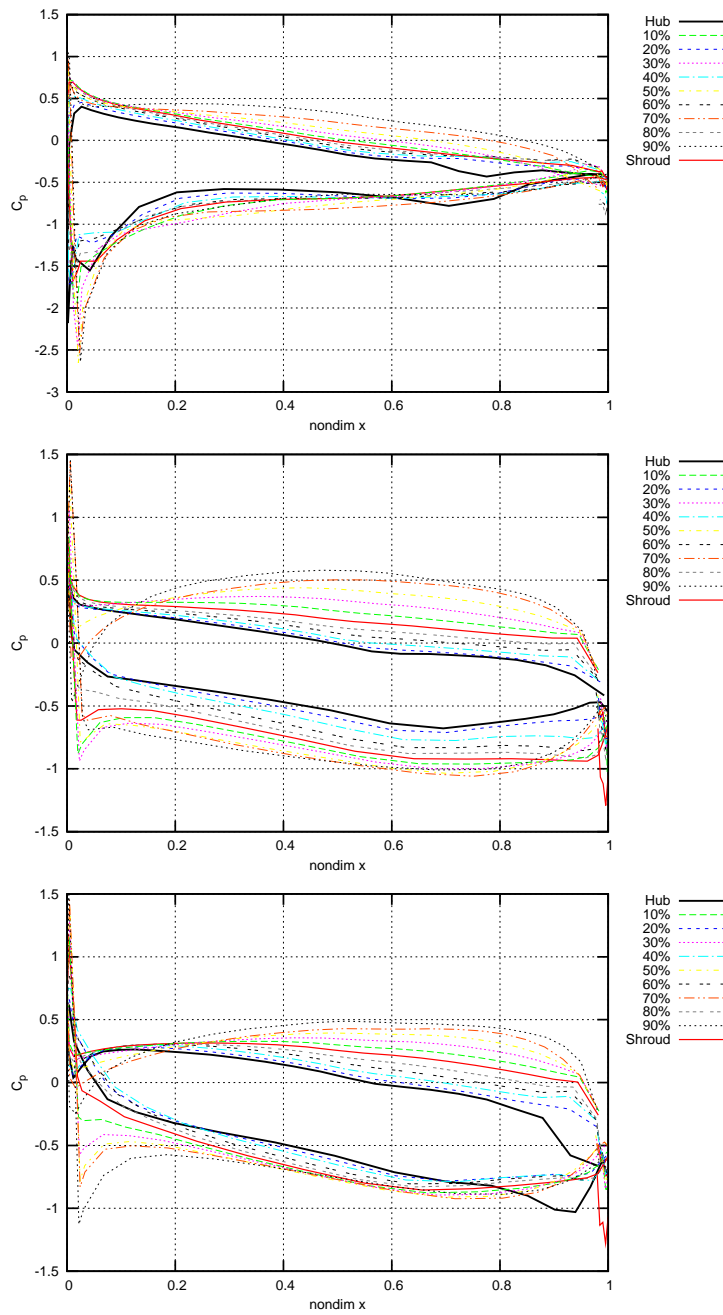
Σχήμα 4.18: Κατανομές c_m (η πάνω καμπύλη στα διαγράμματα) και c_u (παράμετροι του στόχου F_2) για το ΚΣΛ (Peak Point), για το μέλος 1 (πάνω), 2 (κέντρο) και 3 (κάτω) του μετώπου.



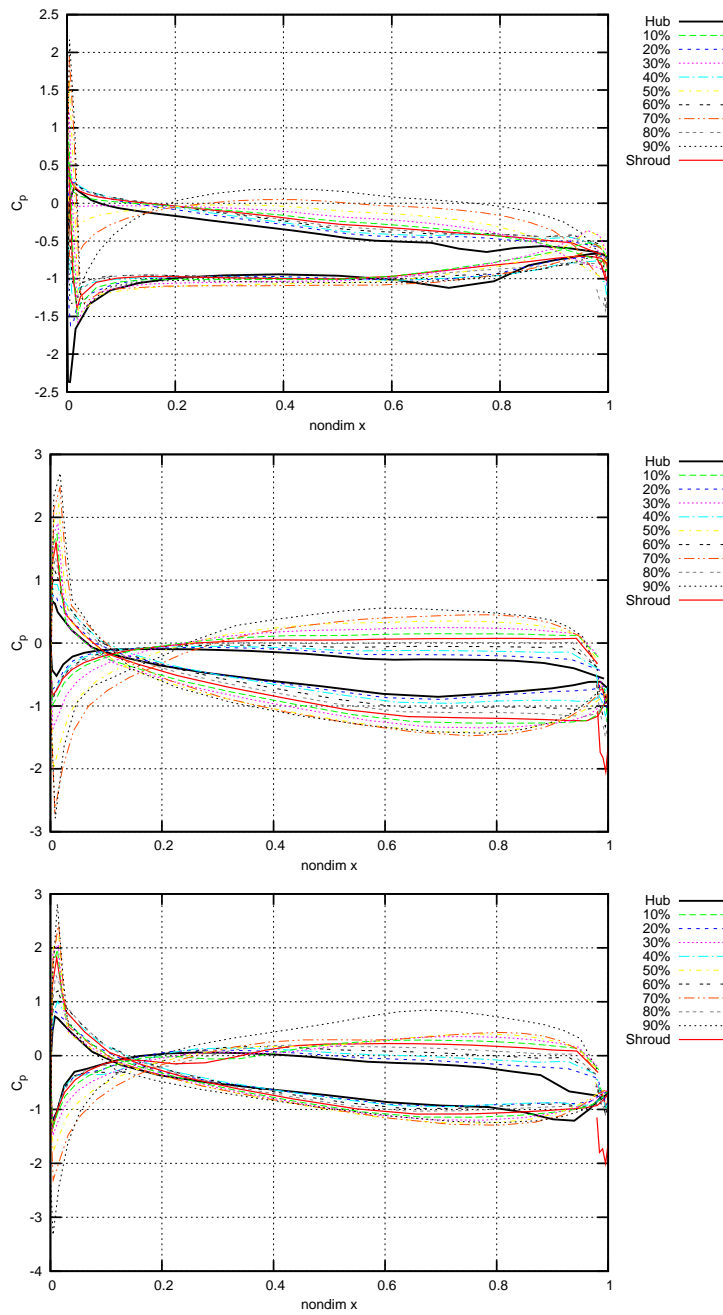
Σχήμα 4.19: Κατανομές c_m (η πάνω καμπύλη στα σχήματα) και c_u (παράμετροι του στόχου F_2) για λειτουργία σε μερικό φορτίο (Part Load), για το μέλος 1 (πάνω), 2 (κέντρο) και 3 (κάτω) του μετώπου.



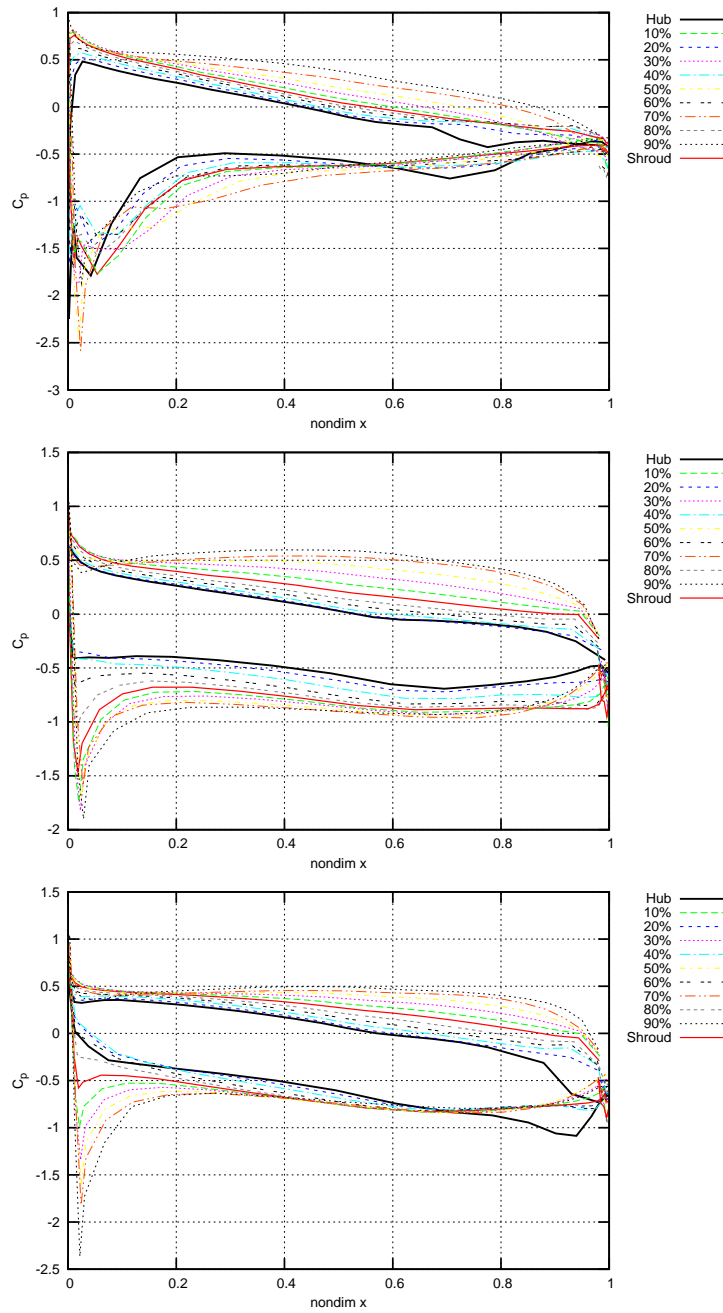
Σχήμα 4.20: Κατανομές c_m (η πάνω καμπύλη στα σχήματα) και c_u (παράμετροι του στόχου F_2) για λειτουργία σε πλήρες φορτίο (Full Load), για το μέλος 1 (πάνω), 2 (κέντρο) και 3 (κάτω) του μετώπου.



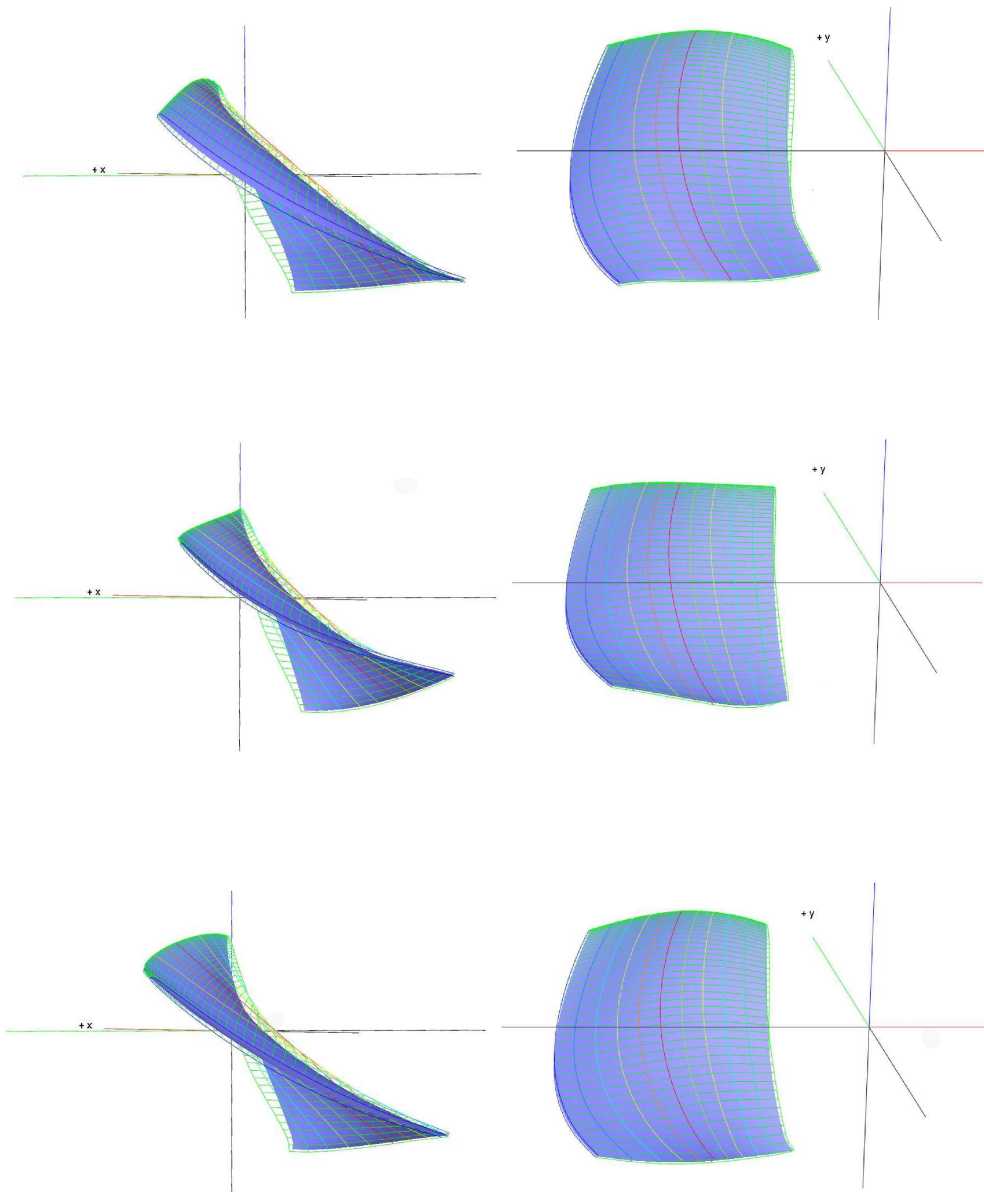
Σχήμα 4.21: Κατανομές του συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος του περυγίου του δρομέα για τις πλευρές υποπίεσης και υπερπίεσης για το μέλος 1 (πάνω), 2 (κέντρο) και 3 (κάτω) του μετώπου - λειτουργία σε ΚΣΛ (Peak Point).



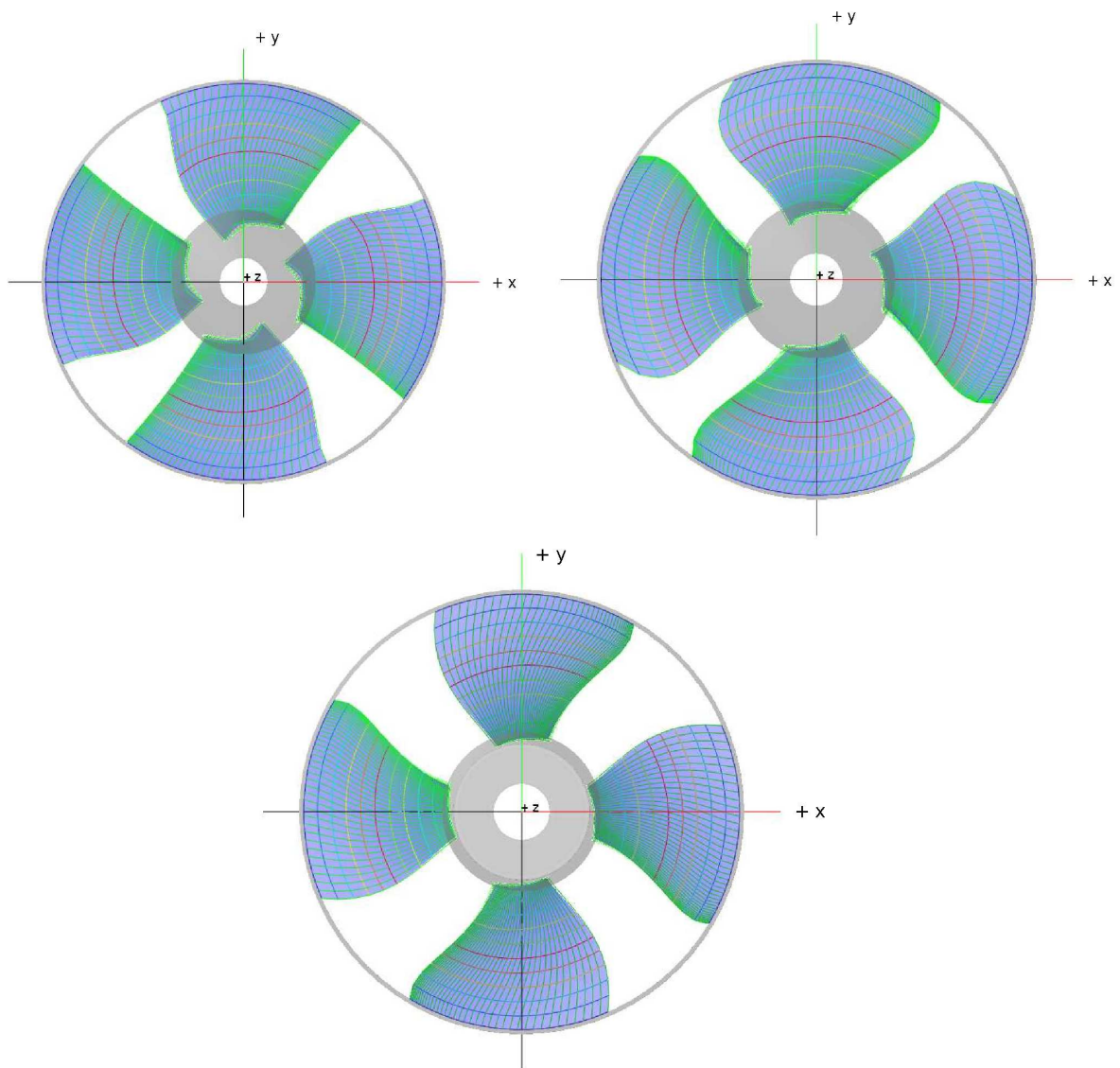
Σχήμα 4.22: Κατανομές του συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος του περυγίου του δρομέα για τις πλευρές υποπίεσης και υπερπίεσης για το μέλος 1 (πάνω), 2 (κέντρο) και 3 (κάτω) του μετώπου - λειτουργία σε μερικό φορτίο (Part Load).



Σχήμα 4.23: Κατανομές του συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος του πτερυγίου του δρομέα για τις πλευρές υποπίεσης και υπερπίεσης για το μέλος 1 (πάνω), 2 (κέντρο) και 3 (κάτω) του μετώπου - λειτουργία σε πλήρες φορτίο (Full Load).



Σχήμα 4.24: 3Δ μορφή πτερυγίου δρομέα υδροστροβίλου (από 2 διαφορετικές οπτικές γωνίες) βάσει της γεωμετρίας που προκύπτει για τις λύσεις του μετώπου Pareto 1 (πάνω), 2 (κέντρο) και 3 (κάτω).



Σχήμα 4.25: 3Δ μορφή δρομέα υδροστροβίλου, εξωτερικής διαμέτρου $D = 0,34 \text{ m}$, βάσει της γεωμετρίας που προκύπτει για τις λύσεις του μετώπου Pareto 1 (πάνω αριστερά), 2 (κάτω) και 3 (πάνω δεξιά).

Σχόλια Σχετικά με τα Διαγράμματα των Κατανομών και τις Γεωμετρικές Δρομέων

Σχετικά με τα διαγράμματα των κατανομών των ταχυτήτων c_m και c_u στην έξοδο του δρομέα και των κατανομών πίεσης του συντελεστή C_p κατά μήκος των πλευρών του πτερυγίου του δρομέα που προκύπτουν, μπορούν γενικά να παρατηρηθούν τα εξής:

Ο στόχος για τις κατανομές των συνιστωσών c_m και c_u , είναι το εμβαδόν της επιφάνειας που οριοθετείται από τις καμπύλες που προκύπτουν για τις δύο ταχύτητες και από τις αντίστοιχες επιθυμητές κατανομές (που απεικονίζονται με διακεκομμένη γραμμή) να είναι το ελάχιστο δυνατό και για τα τρία ΣΛ.

Αντίστοιχα, η επιθυμητή μορφή για τις κατανομές του συντελεστή πίεσης C_p (που σχετίζεται όπως περιγράφηκε άμεσα με την παράμετρο σπηλαίωσης σ) για τα τρία ΣΛ, είναι να μην παρουσιάζουν απότομες διακυμάνσεις κατά μήκος και καθ' ύψος των πλευρών του πτερυγίου, προκειμένου να επιτευχθεί σταθερότητα του φορτίου πίεσης. Επιπλέον, επιδιώκεται οι τιμές των C_p να κυμαίνονται σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο και λιγότερο αρνητικό (για την πλευρά υποπίεσης) εύρος τιμών (στον άξονα των y), ώστε ο δρομέας του υδροστροβίλου matrix να παράγει περισσότερο έργο και να κινδυνεύει λιγότερο από ανάπτυξη φαινομένων σπηλαίωσης αντίστοιχα. Ακόμα, σε κάθε θέση κατά μήκος των πλευρών του πτερυγίου, πρέπει οι τιμές του συντελεστή πίεσης C_p για την πλευρά υπερπίεσης να είναι πάντα μεγαλύτερες από τις τιμές για την πλευρά υποπίεσης, ώστε το έργο που παράγει ο υδροστροβίλος να έχει θετική τιμή. Στο τμήμα του πτερυγίου που δε συμβαίνει αυτό (συνήθως κοντά στην ακμή πρόπτωσης), παρατηρείται ένα χαρακτηριστικό 'σταύρωμα' των κατανομών των C_p , όπως φαίνεται στα διαγράμματα του σχήματος 4.22 (λειτουργία σε μερικό φορτίο) για τα μέλη 2 και 3. Το 'σταύρωμα' αυτό επηρεάζει την καλή λειτουργία του υδροστροβίλου, καθότι στην περιοχή αυτή του πτερυγίου ο υδροστροβίλος πρακτικά λειτουργεί ως αντλία.

Αρχικά και τα τρία μέλη του μετώπου που επιλέχτηκαν, παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά (καλύτερες κατανομές) για το ΚΣΛ, κάτι που αποτελούσε βασική επιδίωξη κατά το σχεδιασμό του υδροστροβίλου: οι κατανομές των ταχυτήτων προσεγγίζουν περισσότερο τις επιθυμητές, ενώ ο συντελεστής πίεσης C_p κυμαίνεται σε μεγαλύτερο και λιγότερο αρνητικό εύρος τιμών στον άξονα των y . Ακόμα, παρατηρείται ότι για το μέλος 1 του μετώπου (το καλύτερο ως προς το στόχο F_1 και το χειρότερο ως προς το στόχο F_2) οι κατανομές των ταχυτήτων προσεγγίζουν περισσότερο τις επιθυμητές μορφές απ' ό,τι οι κατανομές των συντελεστών πίεσης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για το μέλος 3 (το χειρότερο ως προς το στόχο F_1 και το καλύτερο ως προς το στόχο F_2), όπως και ήταν αναμενόμενο από τη θέση τους στο μέτωπο των μη – κυριαρχούμενων λύσεων.

Τέλος, όσον αφορά στη βελτιστοποιημένη μορφή του δρομέα του μοντέλου υδροστροβίλου **matrix** που προκύπτει για καθένα από τα τρία μέλη του μετώπου (σχήματα 4.24 - 4.25), παρατηρείται ότι για το μέλος 3 - για τη λύση του μετώπου που παρουσιάζει τα καλύτερα χαρακτηριστικά ως προς το στόχο F_2 , δηλαδή την τιμή της παραμέτρου σπηλαίωσης σ - τα πτερύγια του δρομέα διαθέτουν μεγαλύτερη επιφάνεια. Το σχεδιαστικό αυτό χαρακτηριστικό έρχεται σε απόλυτη συμφωνία με τα όσα αναφέρθηκαν στη θεωρία σχετικά με την εμφάνιση του φαινομένου της σπηλαίωσης. Υπενθυμίζεται εδώ ότι: ο κίνδυνος ανάπτυξης σπηλαίωσης μειώνεται, όσο αυξάνεται η επιφάνεια των πτερυγίων, καθότι για μεγαλύτερες επιφάνειες η διαφορά πίεσης που προκύπτει από τις κατανομές πιέσεων στην πλευρά υπερπίεσης και υποπίεσης των πτερυγίων του δρομέα είναι μικρότερη (ενώ ταυτόχρονα η δύναμη που ασκείται στο πτερύγιο παραμένει σταθερή, αφού $F = A \times \Delta p$, όπου A η επιφάνεια του πτερυγίου και Δp η διαφορά πίεσης των 2 πλευρών του).

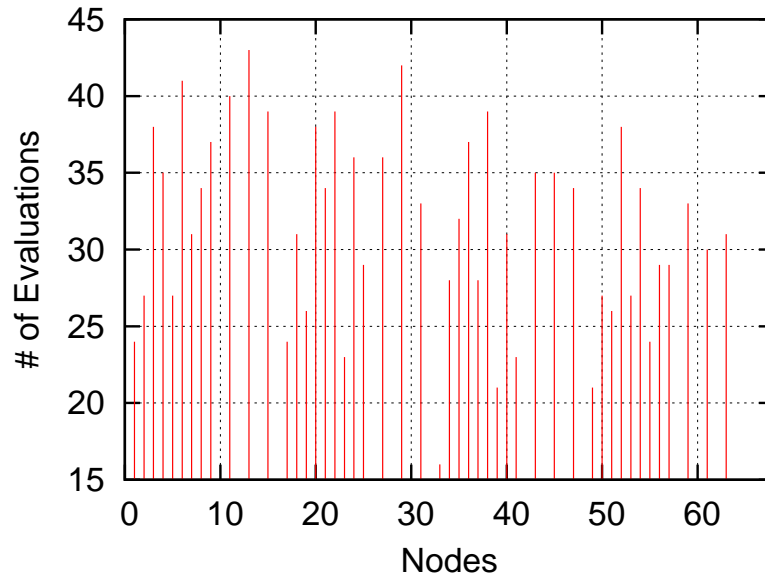
Στατιστικά Στοιχεία ΑΕΑ

Στο σημείο αυτό γίνεται παρουσίαση ορισμένων στατιστικών στοιχείων που αφορούν την πορεία του ΑΕΑ κατά τις επαναλήψεις που έγιναν.

Συγκεκριμένα, στο σχήμα 4.26 παρουσιάζεται πόσες φορές αξιολογήθηκε ο κάθε ένας από τους συνολικά 48 πράκτορες (κόμβους του πλέγματος), ενώ το σχήμα 4.27 δείχνει τον αριθμό που δόθηκε προτεραιότητα σε καθένα από τους 16 δήμους του πλέγματος βάσης.

Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα, δόθηκε περισσότερες φορές προτεραιότητα στο δήμο 2, ενώ ακολουθούν κατά σειρά οι δήμοι 4,5,1, 10, 11 και 3. Η παρατήρηση αυτή έρχεται να επιβεβαιωθεί και από το πρώτο διάγραμμα, όπου φαίνεται ότι περισσότερες αξιολογήσεις πραγματοποίησαν τα άτομα που ανήκουν στους παραπάνω δήμους. Τα άτομα που αξιολογήθηκαν τις περισσότερες φορές, καθώς και οι αντίστοιχοι δήμοι απ' όπου προέρχονται, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.14.

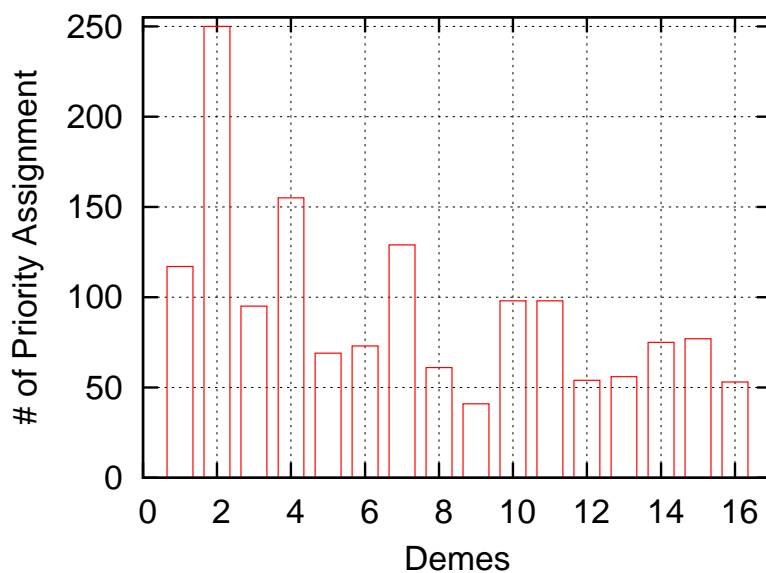
Ακόμα, στον πίνακα 4.15 αναγράφονται οι δήμοι όπου ανήκουν τα συνολικά 11 άτομα που αποτελούν τις κατά Pareto βέλτιστες λύσεις (πρόκειται για το μέτωπο του σχήματος 4.16). Παρατηρείται και πάλι ότι στην πλειοψηφία τους, πρόκειται για τους δήμους με την υψηλότερη προτεραιότητα κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της διαδικασίας.



Σχήμα 4.26: Διάγραμμα όπου παρουσιάζεται ο αριθμός των αξιολογήσεων για καθένα από τους 48 πράκτορες (κόμβους πλέγματος). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανομοιομορφία που παρατηρείται.

Πίνακας 4.14: Άτομα που Αξιολογήθηκαν Περισσότερες Φορές

Άτομο	Αντίστοιχος Δήμος
3	2
6	3
9	1
11	2
13	2
15	4
20	2
22	3
36	10
38	11
52	10



Σχήμα 4.27: Διάγραμμα όπου παρουσιάζονται συνολικά οι φορές που δόθηκε προτεραιότητα σε καθένα από τους 16 δήμους του πλέγματος.

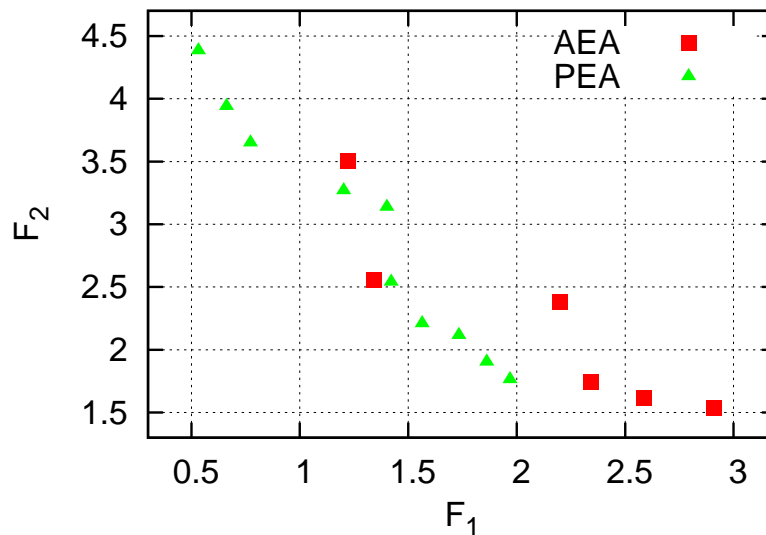
Πίνακας 4.15: Δήμοι των Κατά Pareto Βέλτιστων Λύσεων

Μέλος Pareto	Αντίστοιχος Δήμος
1	1
2	11
3	3
4	14
5	10
6	4
7	4
8	14
9	10
10	5
11	6

4.9.2 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης ΑΕΑ/ΕΑ Χωρίς Αρχικοποίηση από Γνωστή Λύση

Όπως αναφέρθηκε, προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εκτέλεση του ΑΕΑ με τα αποτελέσματα που δίνει ένας παράλληλος σύγχρονος Εξελικτικός Αλγόριθμος (ΕΑ) για ανάλογες παραμέτρους πληθυσμού, ίδιο πλήθος επεξεργαστών (βλ. πίνακες 4.8 και 4.9) και ίδιους περιορισμούς, εκτελέστηκαν ακόμα από 1500 αξιολογήσεις για τον κάθε αλγόριθμο ξεχωριστά, χωρίς να υπάρξει αυτή τη φορά αρχικοποίηση των πληθυσμών από κάποια λύση που βασιζόταν σε ήδη γνωστή γεωμετρία υδροστροβίλου.

Τα δύο μέτωπα των μη-κυριαρχούμενων λύσεων που προκύπτουν για τους δύο αλγόριθμους παρουσιάζονται μαζί - για λόγους καλύτερης σύγκρισης - στο σχήμα 4.28, με άξονες τις δύο τελικές συναρτήσεις στόχους F_1 και F_2 (κατά τα προηγούμενα). Ο ΑΕΑ αποτελείται από πληθυσμό 6 κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, ενώ ο ΕΑ από πληθυσμό 10 κατά Pareto βέλτιστων λύσεων. Και σε αυτή την περίπτωση είναι εξασφαλισμένο, ότι όλα τα μέλη των δύο μετώπων σέβονται τους τιθέντες περιορισμούς του προβλήματος.



Σχήμα 4.28: Μέτωπα μη-κυριαρχούμενων λύσεων για ΑΕΑ και ΕΑ, χωρίς αρχικοποίηση πληθυσμού από γνωστή λύση.

Αυτό που παρατηρείται αρχικά από τη σύγκριση των μετώπων που προκύπτουν είναι ότι οι δύο αλγόριθμοι μπορούν να χαρακτηριστούν ισοδύναμοι όσον αφορά στην ποιότητα αποτελεσμάτων που δίνουν στο τέλος των 1500 αξιολογήσεων, καθώς κανένα μέλος του ενός μετώπου

δεν κυριαρχεί σε όλα τα μέλη του άλλου.

Μια δεύτερη παρατήρηση που θα μπορούσε να γίνει, είναι ότι το μέτωπο που αντιστοιχεί στον ΑΕΑ 'απλώνεται' στην κάτω δεξιά πλευρά του χώρου των λύσεων, ενώ αντίστοιχα το μέτωπο του ΕΑ 'καταλαμβάνει' την πάνω αριστερή πλευρά του χώρου. Συνεπώς, ο ΑΕΑ δίνει καλύτερες λύσεις ως προς τον στόχο F_2 , ενώ ο ΕΑ ως προς τον στόχο F_1 . Έτσι, διατηρείται κατά κάποιο τρόπο μια 'ισορροπία' μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους δύο αλγόριθμους (Ασύγχρονο και Σύγχρονο), γεγονός που αποδεικνύει ότι, μία μέθοδος βελτιστοποίησης μπορεί να χαρακτηριστεί περισσότερο συμφέρουσα από μία άλλη - μεταξύ άλλων - και με γνώμονα την ποιότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Στην εφαρμογή που εξετάζεται εδώ για παράδειγμα, αν έπειτα από μελέτη μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης προέκυπτε η ανάγκη για κατασκευή ενός υδροστροβίλου **matrix** με όσο το δυνατόν καλύτερα χαρακτηριστικά ως προς το στόχο F_2 , τότε θα συνέφερε το μηχανικό - σχεδιαστή να χρησιμοποιήσει τον ΑΕΑ για να βελτιστοποιήσει τη μορφή του δρομέα υδροστροβίλου, ενώ αντίστοιχα, αν ενδιέφερε η κατασκευή υδροστροβίλου **matrix** με καλύτερη συμπεριφορά ως προς το στόχο F_1 , θα ήταν προτιμότερη η χρήση του ΕΑ.

4.9.3 Επιπλέον Σχόλια Σχετικά με την Επιλογή του ΑΕΑ ως Λογισμικού Βελτιστοποίησης στην Παρούσα Εφαρμογή.

Η επιλογή που καλείται να κάνει κάθε φορά ο μηχανικός - σχεδιαστής σχετικά με το αν θα χρησιμοποιήσει ένα λογισμικό βελτιστοποίησης για ένα δεδομένο πρόβλημα βελτιστοποίησης, επαφίεται στην κρίση του και εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων. Μερικοί από τους παράγοντες αυτούς είναι για παράδειγμα η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς, ο χρόνος που έχει στη διάθεσή του για να παραδώσει τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, η επιθυμητή ποιότητα των αποτελεσμάτων καθώς και τα εκάστοτε χαρακτηριστικά του προβλήματος βελτιστοποίησης με το οποίο πρόκειται να ασχοληθεί. Ο τελευταίος αυτός παράγοντας αποτελεί και το λόγο που η επιλογή του ΑΕΑ ως λογισμικού βελτιστοποίησης για την παρούσα εφαρμογή μπορεί να χαρακτηριστεί καταλληλότερη (όχι όμως καλύτερη) από την επιλογή του ΕΑ.

Όπως φάνηκε από τη σύγκριση των δύο μετώπων Pareto που έγινε παραπάνω, για μέγιστο αριθμό επαναλήψεων τις 1500, ο ΑΕΑ και ο ΕΑ έδιναν μεν διαφορετικά, αλλά ισοδύναμα - από άποψη κυριαρχίας στο μέτωπο - αποτελέσματα. Ωστόσο από τη σύγκριση αυτή απουσίαζε μία πολύ σημαντική παράμετρος: η παράθεση του χρόνου που χρειάστηκε για την ολοκλήρωση του συνόλου των αξιολογήσεων για τον ΑΕΑ και τον ΕΑ. Ειδικά όμως για τη συγκεκριμένη εφαρμογή που εξετάστηκε εδώ, η σύγκριση των δύο μεθόδων βελτιστοποίησης από άποψη συνολικού χρόνου, δεν θα μπορούσε να οδηγήσει σε αξιόπιστα αποτελέσματα σχετικά με το ποια

υπερτερεί, καθότι το πρόβλημα βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του δρομέα υδροστροβίλου *matrix* παρουσίαζε την ιδιαιτερότητα, για την οποία έχει γίνει λόγος και στα προηγούμενα: εξαιτίας της ύπαρξης της εσωτερικής επαναληπτικής διαδικασίας (όπου ο αλγόριθμος εκτελεί δοκιμές μέχρι να προκύψουν οι κατάλληλες τιμές για τις γωνίες *a* και *b* που αφορούν τη γεωμετρία των οδηγών πτερυγίων και των πτερυγίων του δρομέα αντίστοιχα), ο χρόνος αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης δεν είναι σταθερός.

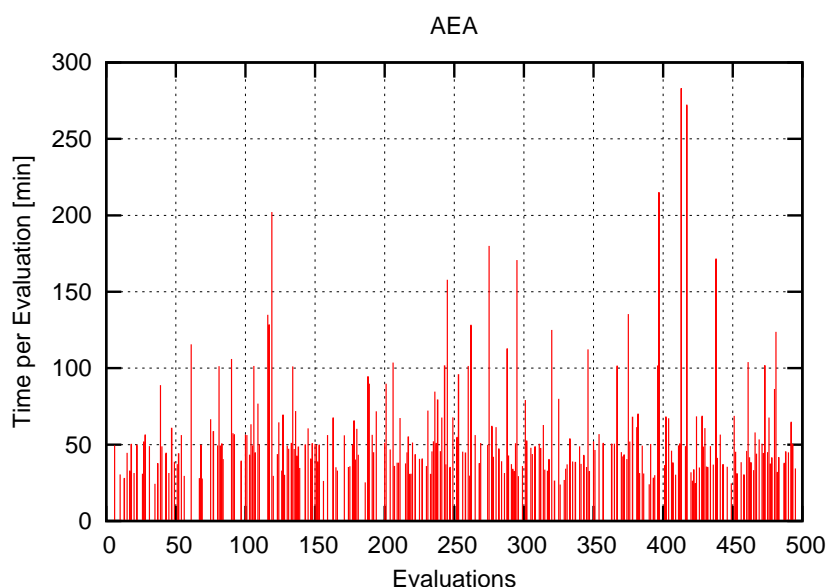
Υπενθυμίζεται εδώ, ότι η κάθε γεωμετρία (υποψία λύση) κοστίζει υπολογιστικά:

$$\{k \text{ Bezier points} + m \times \text{Euler equations (a, b angles)}\}_{\text{peak point}} + 2 \times \text{Euler equations (} Q_{\text{part load}}, Q_{\text{full load}} \text{)}, \quad m = 1, 25$$

Δηλαδή, κάθε μεταβολή της τιμής των γωνιών *a*, *b* οδηγεί στη δημιουργία διαφορετικού πλέγματος, στους κόμβους του οποίου λύνονται εκ νέου οι εξισώσεις Euler. Μία επίλυση των εξισώσεων ροής σε έναν πύρνα επεξεργαστή 2.00 GHz διαρκεί κατά μέσο όρο 8 με 10 min, ενώ η δημιουργία των καμπυλών Bezier απαιτεί αμεληταίο χρόνο σε σχέση με αυτόν για την επίλυση του πεδίου ροής. Επομένως, ο συνολικός χρόνος αξιολόγησης μια υποψίας γεωμετρίας διαμορφώνεται αποκλειστικά από τον αριθμό *m* των επαναλήψεων (με ανώτατο όριο τις 25) που θα εκτελεστούν μέχρι να προκύψει η επιθυμητή τιμή της παροχής Q_{mod} του ΚΣΛ. Αν η εσωτερική επαναληπτική διαδικασία εκκινήσει από τιμές για τις γωνίες *a*, *b* που τυχαίνει να μην απέχουν πολύ από αυτές που θα δώσουν την επιθυμητή παροχή, τότε η διαδικασία ολοκληρώνεται συνήθως μετά από 4 με 5 επαναλήψεις. Αν για τη δεδομένη γεωμετρία γωνιών *a*, *b* που βρέθηκε από τις δοκιμές της εσωτερικής διαδικασίας δεν υπάρξει πρόβλημα και κατά την επίλυση των εξισώσεων ροής για τα άλλα δύο σημεία ΣΛ (μερικού και πλήρους φορτίου) και οι τιμές για τις παροχές που τους αντιστοιχούν προκύψουν εντός των επιθυμητών ορίων, τότε ο συνολικός χρόνος αξιολόγησης μιας υποψήφιας λύσης κυμαίνεται γύρω στα 50 min (κάτι που ισχύει για την πλειοψηφία των ατόμων που αξιολογούνται). Αν χρειαστεί όμως να εκτελεστούν περισσότερες επαναλήψεις, τότε ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος αξιολόγησης μιας υποψήφιας λύσης μπορεί να αυξηθεί κατά πολύ. Για παράδειγμα, αν για ένα άτομο ο αλγόριθμος χρειαστεί να εκτελέσει 15 επαναλήψεις μέχρι να βρεθούν οι κατάλληλες τιμές των γωνιών *a*, *b*, τότε ο συνολικός χρόνος αξιολόγησης εκτοξεύεται στα 170 min περίπου, ενώ αν εκτελεστεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που έχει οριστεί, δηλαδή οι 25, η ολοκλήρωση μιας αξιολόγησης διαρκεί γύρω στα 270 min!

Οι παραπάνω χρονικές εκτιμήσεις επιβεβαιώνονται και από το σχήμα 4.29, όπου παρουσιάζεται για τον ΑΕΑ ο υπολογιστικός χρόνος (σε min) που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης, για τις πρώτες 500 αξιολογήσεις που έλαβαν χώρα (τα

δεδομένα αφορούν την περίπτωση όπου δεν έγινε αρχικοποίηση του πληθυσμού του ΑΕΑ από γνωστή λύση). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, ο συνολικός χρόνος αξιολόγησης για την πλειοψηφία των ατόμων δεν ξεπέρασε κατά πολύ τα 50 *min*, ενώ μικρότερος αριθμός ατόμων χρειάστηκε γύρω στα 100 *min*. Υπάρχουν όμως και 8 άτομα (υποψήφιας λύσεις) τα οποία ξεπέρασαν τα 150 *min* μέχρι να ολοκληρωθεί το σύνολο των αξιολογήσεων που χρειάστηκαν, ενώ για ένα άτομο ο χρόνος έχει φτάσει τα 270 *min* περίπου, πράγμα που σημαίνει ότι για το άτομο αυτό χρειάστηκε να γίνουν και οι 25 επαναλήψεις της εσωτερικής διαδικασίας, μέχρι να προκύψει η κατάλληλη γεωμετρία γωνιών.



Σχήμα 4.29: Χρόνος ολοκλήρωσης αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης για τον ΑΕΑ (χωρίς αρχικοποίηση πληθυσμού από γνωστή λύση), για τις πρώτες 500 αξιολογήσεις που έλαβαν χώρα.

Δεδομένης της ιδιαιτερότητας αυτής που παρουσιάζει η συγκεκριμένη εφαρμογή, ως προς το συνολικό χρόνο αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης, ο οποίος παρουσιάζει πολύ μεγάλες διακυμάνσεις, γίνεται αντιληπτό γιατί η χρήση του ΑΕΑ ως λογισμικό βελτιστοποίησης, τόσο στην προκειμένη περίπτωση όσο και σε παρόμοια προβλήματα, κρίνεται καταλληλότερη απ' ό,τι η χρήση του παράλληλου Σύγχρονου ΕΑ: εξαιτίας της ασύγχρονης φύσης του, ο ΑΕΑ δεν περιμένει να ολοκληρωθούν οι αξιολογήσεις όλων των ατόμων μιας γενιάς - όπως συμβαίνει στον ΕΑ - προκειμένου να προχωρήσει στην επόμενη γενιά, αλλά στέλνει ξεχωριστά και ανεξάρτητα κάθε άτομο για αξιολόγηση σε όποιον επεξεργαστή είναι διαθέσιμος εκείνη τη στιγμή. Έτσι, αν η αξιολόγηση ενός ατόμου διαρκέσει περισσότερο χρόνο, στον ΑΕΑ τα υπόλοιπα άτομα του

πλέγματος θα συνεχίσουν να στέλνονται για αξιολόγηση και η σύγκλιση του αλγορίθμου θα συνεχιστεί. Στο Σύγχρονο ΕΑ όμως, η χρονική καθυστέρηση έστω και ενός μόνο ατόμου της τρέχουσας γενιάς, μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό το χρόνο της συνολικής διαδικασίας σύγκλισης του αλγορίθμου, καθώς τα υπόλοιπα άτομα της γενιάς που έχουν ολοκληρώσει τις αξιολογήσεις, είναι 'υποχρεωμένα' να περιμένουν το άτομο που καθυστερεί. Ως αποτέλεσμα, μπορεί για αρκετό διάστημα να μένει αδρανές ένα μέρος της συνολικής υπολογιστικής ισχύος που είναι διαθέσιμη, τη στιγμή που ο ΑΕΑ την εκμεταλλεύεται ολόκληρη κάθε χρονική στιγμή.

Κεφάλαιο 5

Σχεδιασμός Βέλτιστης Μορφής και Τοποθέτησης Δέσμης Σωλήνων Εναλλάκτη Θερμότητας Εγκάρσιας και Αναμίξιμης Ροής

5.1 Σύντομη Περιγραφή

Η δεύτερη εφαρμογή από την περιοχή της μηχανολογίας αφορά στο σχεδιασμό 2Δ μορφής δέσμης σωλήνων εναλλάκτη θερμότητας εγκάρσιας και αναμίξιμης ροής ([50, 34]), καθώς και στην εύρεση της σχετικής μεταξύ των σωλήνων θέσης, ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη απόδοση κατά τη μεταφορά θερμότητας, με τις λιγότερες δυνατές απώλειες ολικής πίεσης. Πρόκειται επομένως, για πρόβλημα δύο στόχων, χωρίς περιορισμούς. Οι σωλήνες έχουν σχήμα μικρών αεροτομών και στο εσωτερικό τους ρέει ρευστό υψηλής θερμοκρασίας, της οποίας η τιμή θεωρείται σταθερή και ομοιόμορφη στην επιφάνειά τους. Αναφέρεται επίσης, ότι όλοι οι σωλήνες του εναλλάκτη διαθέτουν ίδιο σχήμα, προκειμένου να είναι δυνατή η μαζική κατασκευή τους. Η ροή στο εσωτερικό των σωλήνων δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας μελέτης, ενώ η ροή του ρευστού χαμηλότερης θερμοκρασίας που περιρρέει εξωτερικά τους σωλήνες θεωρείται στρωτή, χαμηλού αριθμού **Reynolds**.

Επειδή, για το συγκεκριμένο τύπο εναλλάκτη που μελετάται, οι σωλήνες τοποθετούνται περιοδικά κατά τον κατακόρυφο άξονα, ανά ομάδες των τεσσάρων, η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε για 4 μόνο σωλήνες.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, ισχύουν για όλους τους σωλήνες που τελικά θα τοποθετη-

θούν, ανάλογα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις του εναλλάκτη που θα κατασκευαστεί για την εκάστοτε βιομηχανική ή ενεργειακή εφαρμογή (διαστάσεις, επιφάνεια θερμοεναλλαγής, βαθμός απόδοσης).

Η ανάλυση γίνεται για ασυμπίεστο, συνεκτικό ρευστό, επομένως το λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης (επιλύτης του πεδίου ροής) που χρησιμοποιείται, επιλύει τις 2Δ εξισώσεις Navier - Stokes. Το πρόβλημα επιλύεται για τις δύο διαστάσεις (x και y κατευθύνσεις), ωστόσο τα αποτελέσματα που προκύπτουν προσεγγίζουν με πολύ καλή ακρίβεια τα αντίστοιχα για το 3Δ πρόβλημα, καθώς το μήκος των σωλήνων κατά το διαμήκη άξονα είναι πολύ μεγαλύτερο σε σύγκριση με το πλάτος τους.

Ως λογισμικό βελτιστοποίησης, εκτός από τον Ασύγχρονο δομημένο ΕΑ (ΑΕΑ) που είδαμε στην προηγούμενη εφαρμογή, χρησιμοποιείται και ο Ασύγχρονος Μιμητικός Αλγόριθμος (ΑΜΑ), καθώς για το αερο-θερμοδυναμικό πρόβλημα που μελετάται, ήταν δυνατός ο υπολογισμός των παραγώγων των συναρτήσεων στόχων, ο οποίος πραγματοποιήθηκε με χρήση συζυγών μεθόδων (adjoint methods). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η συνεχής συζυγής μέθοδος (βλ. Κεφάλαιο 2). Ως αποτέλεσμα, το κόστος υπολογισμού των παραγώγων των συναρτήσεων στόχου μειώθηκε κατά πολύ.

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί και εδώ, ότι αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι οι ΑΕΑ και ο υβριδισμός τους με αιτιοκρατικές μεθόδους (οπότε και γίνεται λόγος για ΑΜΑ), και όχι ο σχεδιασμός εναλλάκτη θερμότητας, που αποτελεί μια περίπτωση δοκιμής των προτεινόμενων αλγορίθμων σε πρόβλημα βιομηχανικού και ενεργειακού ενδιαφέροντος.

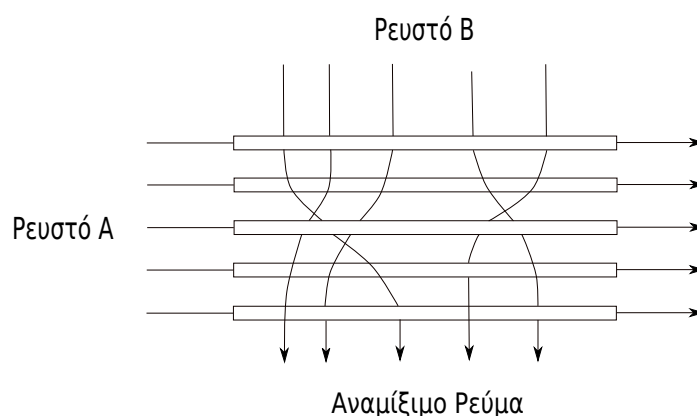
5.2 Γενικά περί Εναλλακτών Θερμότητας

Εναλλάκτης θερμότητας (heat exchanger) ονομάζεται η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της θερμικής ενέργειας μεταξύ δύο ρευστών διαφορετικής θερμοκρασίας, [53]. Οι εναλλάκτες συναντώνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται η μετάδοση θερμότητας μεταξύ δυο ρευστών, όπως σε συστήματα θέρμανσης, ψύξης και κλιματισμού, σε κύκλους παραγωγής ισχύος, σε συσκευές ανάκτησης θερμότητας, σε χημικές διεργασίες και αλλού.

Υπάρχουν πολλοί τύποι εναλλακτών, ανάλογα με τον τρόπο που γίνεται η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας, το είδος της ροής των ρευστών, καθώς και τα ιδιαίτερα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους. Ανάλογα με τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας, μπορούν να διακριθούν σε άμεσης και έμμεσης επαφής, [53]. Στους άμεσης επαφής εναλλάκτες, που συναντώνται πολύ σπάνια, δύο διαφορετικής φάσης ρευστά έρχονται σε άμεση επαφή, ανταλλάσσουν θερ-

μότητα και διαχωρίζονται πάλι. Στους έμμεσης επαφής, που είναι και οι πλέον διαδεδομένοι, τα δύο ρευστά κυκλοφορούν χωριστά και η θερμότητα μεταφέρεται μέσω μιας διαχωριστικής επιφάνειας, μέσω συναγωγής και αγωγής. Όσον αφορά στην κατεύθυνση της ροής των δύο ρευστών, αυτή μπορεί να είναι παράλληλη ή εγκάρσια. Στην παρούσα εφαρμογή, ο τύπος εναλλάκτη που μελετάται ανήκει στην κατηγορία εναλλακτών εγκάρσιας ροής (Cross-flow heat exchangers), οι οποίοι αποκαλούνται και εναλλάκτες σταυροροής. Στους εναλλάκτες αυτής της κατηγορίας, τα δύο ρευστά κινούνται με κατευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.

Στους εναλλάκτες εγκάρσιας ροής, η μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δύο ρευστών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με ανάμιξή τους, είτε όχι, με τη χρήση ή μη πτερυγίων, [53]. Αν ο εναλλάκτης έχει πτερύγια, τότε δεν πραγματοποιείται ανάμιξη, καθώς ο ρόλος τους είναι να εμποδίζουν την κίνηση του ρευστού εκτός των σωλήνων κατά την διεύθυνση που είναι κάθετη στην διεύθυνση της κύριας ροής, που είναι η ροή του ρευστού εντός των σωλήνων (ρευστό Α στο σχήμα 5.1). Αν δεν υπάρχουν πτερύγια, τότε το ρευστό χαμηλής θερμοκρασίας (ρευστό Β στο σχήμα 5.1) μπορεί να κινηθεί ελεύθερα καθώς διαρρέει τον εναλλάκτη, επομένως πρόκειται για εναλλάκτη αναμιξιμής ροής, όπως αυτός που μελετάται εδώ.



Σχήμα 5.1: Διάταξη εναλλάκτη θερμότητας εγκάρσιας και αναμιξιμής ροής.

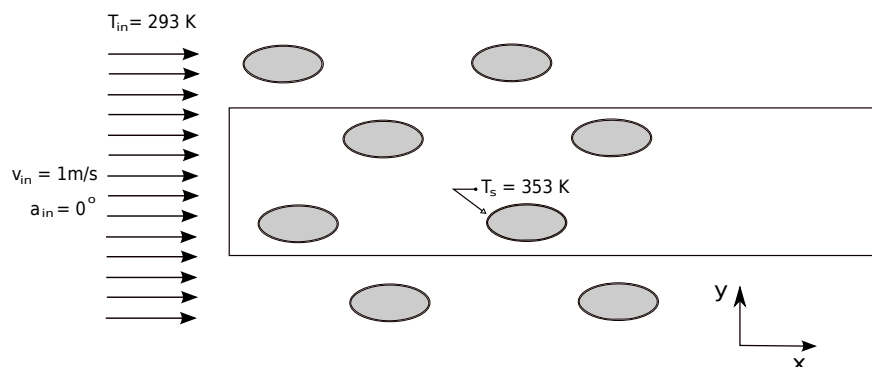
Αναφέρεται ακόμα, ότι ο σχεδιασμός ενός εναλλάκτη θερμότητας περιλαμβάνει τρία στάδια: το θερμικό, το μηχανολογικό και το κατασκευαστικό. Κατά το θερμικό σχεδιασμό επιλέγεται ο τύπος του εναλλάκτη και γίνεται εκτίμηση του μεγέθους της επιφάνειας συναλλαγής θερμότητας, ενώ κατά το μηχανολογικό σχεδιασμό υπολογίζονται η πτώση πίεσης (απώλειες) του εναλλάκτη, οι διαβρωτικές ιδιότητες των ρευστών και οι θερμικές τάσεις. Τέλος, ο κατασκευαστικός σχεδιασμός στοχεύει στην ικανοποίηση των εκάστοτε σχεδιαστικών απαιτήσεων που αφορούν την απόδοση του εναλλάκτη, με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

5.3 Περιγραφή Προβλήματος και Μεθόδου Σχεδιασμού Δέσμης Σωλήνων Εναλλάκτη

Στην ενότητα αυτή, γίνεται περιγραφή του προβλήματος βελτιστοποίησης, των χαρακτηριστικών της επιλυόμενης ροής και του τρόπου υπολογισμού του πεδίου ροής που πραγματοποιείται από το λογισμικό Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής, τόσο για ευθύ, όσο και για το συζυγές πρόβλημα. Παρουσιάζεται ακόμα η πορεία της συνολικής διαδικασίας που εκτελείται, τόσο για τον ΑΕΑ όσο και για τον ΑΜΑ (όταν υπολογίζονται οι παράγωγοι των συναρτήσεων στόχων, για να χρησιμοποιηθούν από την μέθοδο τοικής βελτίωσης) Επίσης για λόγους πληρότητας, γίνεται μια πολύ συνοπτική περιγραφή των συζυγών εξισώσεων, καθώς και στην παρούσα διπλωματική γίνεται απλά χρήση ήδη υπάρχοντος σχετικού λογισμικού, που έχει αναπτυχθεί και προγραμματιστεί στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ, στη Διδακτορική Διατριβή της Ευγενίας Κοντολέοντος, [50].

5.3.1 Περιγραφή Προβλήματος

Όπως αναφέρθηκε και στη Γενική Περιγραφή του κεφαλαίου, οι σωλήνες του συγκεκριμένου εναλλάκτη εγκάρσιας και αναμίξιμης ροής που μελετάται εδώ, τοποθετούνται περιοδικά κατά τον κατακόρυφο άξονα, ανά ομάδες των τεσσάρων. Επίσης, το σχήμα όλων των σωλήνων είναι πανομοιότυπο για ευκολότερη κατασκευή. Γι' αυτό η βελτιστοποίηση παραγματοποιήθηκε μόνο για 4 σωλήνες, αφού τα αποτελέσματα ισχύουν και για τους υπόλοιπους σωλήνες που τελικά θα τοποθετηθούν στον εναλλάκτη. Οι 4 σωλήνες βρίσκονται ανά ζεύγη σε σειρά, με το κάθε ζεύγος να είναι σε διαφορετικό επίπεδο ύψους. Η περιοδικότητα που παρουσιάζει ο τρόπος τοποθέτησης των σωλήνων, καθώς και η θέση των 4 σωλήνων, απεικονίζονται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Σχηματική 2Δ αναπαράσταση των σωλήνων του εναλλάκτη που μελετάται. Στο σχήμα φαίνεται η περιοδικότητα που παρουσιάζει ο τρόπος τοποθέτησης των σωλήνων. Το ορθογώνιο παραλληλόγραμμο που εσωκλείει τους 4 σωλήνες είναι το υπολογιστικό χωρίο για το οποίο επιλύονται οι εξισώσεις ροής.

Όπως συμβαίνει σε όλους σχεδόν τους εναλλάκτες θερμότητας, η θερμοκρασία του ρευστού υψηλότερης θερμοκρασίας που ρέει στο εσωτερικό των σωλήνων, ελέγχεται συνεχώς. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, για τους υπολογισμούς που λαμβάνουν χώρα δεν ενδιαφέρει η ροή στο εσωτερικό των σωλήνων, αλλά μόνο η θερμοκρασία που επικρατεί στην επιφάνειά τους, η οποία θεωρείται ομοιόμορφη και διατηρείται σταθερή, ίση με $T_s = 353 \text{ K}$. Όσον αφορά στο ρευστό χαμηλότερης θερμοκρασίας που περιρρέει τους σωλήνες, αυτό εισέρχεται στο υπολογιστικό χωρίο ροής (το παραλληλόγραμμο που εσωκλείει τους 4 σωλήνες στο σχήμα 5.2) με θερμοκρασία εισόδου $T_{in} = 293 \text{ K}$, ταχύτητα εισόδου $v_{in} = 1 \text{ m/sec}$ και ρέει εντός του εναλλάκτη με αριθμό Reynolds $Re = 140$. Όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά παρακάτω, οι διαστάσεις (ύψος και μήκος) του υπολογιστικού χωρίου δεν ήταν σταθερές, αλλά διαμορφώνονταν ανάλογα με τις σχετικές αποστάσεις των σωλήνων, που ήταν αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Ωστόσο, το όριο εξόδου του πεδίου ροής έχει επιμηκυνθεί αρκετά κατά την κατεύθυνση x από το σημείο που τελειώνει το μήκος του τελευταίου σωλήνα (δηλαδή από την ακμή εκφυγής της τελευταίας αεροτομής), προκειμένου ο ομόρρους της ροής να μην επηρεάσει τα αποτελέσματα από την επίλυση του πεδίου. Αναφέρεται ότι ο ομόρρους είναι η στροβιλή περιοχή που δημιουργείται κατάντι της ροής της αεροτομής, όταν αυτή βρίσκεται σε μη μόνιμες συνθήκες ροής. Ο ομόρρους εμφανίζεται διότι, κάθε χρονική στιγμή αποβάλλεται τόση στροβιλότητα από μια αεροτομή, όση είναι η μεταβολή της κυκλοφορίας γύρω από αυτή.

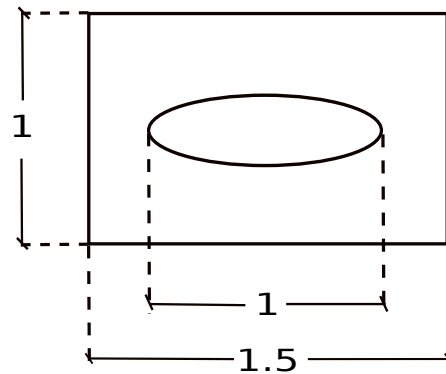
5.3.2 Επίλυση Πεδίου Ροής - Γένεση Πλέγματος

Αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, η ανάλυση γίνεται για ασυμπίεστο, συνεκτικό ρευστό και στρωτή ροή. Το λογισμικό αξιολόγησης επιλύει τις 2Δ εξισώσεις Navier - Stokes για 2Δ πεδίο ροής, για το υπολογιστικό χωρίο του σχήματος 5.2, αφού δεχθεί ορισμένα ροϊκά δεδομένα ως είσοδο. Συγκεκριμένα, οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται από τον επιλύτη ροής είναι: η κατανομή θερμοκρασίας εισόδου T_{in} (σταθερή και ίση με 293 K) του περιρρέοντος ρευστού, οι κατανομές των δύο συνιστωσών (κατά τον άξονα x και y) της ταχύτητας εισόδου του $v_{in} = 1 \text{ m/sec}$, καθώς και η γωνία εισόδου της ροής (δηλαδή η κατεύθυνση της ταχύτητας στη διατομή εισόδου του πεδίου ροής) που είναι μηδενική (inlet flow angle $a_{in} = 0^\circ$). Ακόμα, όπως ισχύει για ασυμπίεστη ροή, δίνεται μία αυθαίρετη τιμή για τη στατική πίεση στην έξοδο του πεδίου. Η τιμή που δόθηκε εδώ ήταν $p = 0$. Μεσολαβεί η γένεση πλέγματος και οι εξισώσεις ροής επιλύονται για κάθε κόμβο ξεχωριστά. Μετά την επίλυση των εξισώσεων, το λογισμικό αξιολόγησης επιστρέφει ως έξοδο τα πεδία ταχυτήτων και πιέσεων σε όλο το πεδίο ροής.

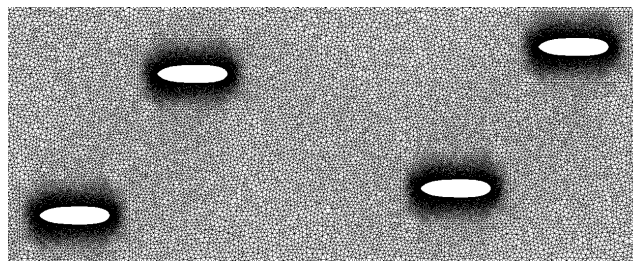
Για την αριθμητική επίλυση των ροϊκών εξισώσεων με μεθόδους Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, για σώμα συγκεκριμένης γεωμετρίας που βρίσκεται εντός πεδίου ροής, είναι απαραίτητη η γένεση πλέγματος γύρω από το σώμα αυτό, ώστε να επιλυθούν οι εξισώσεις Navier - Stokes σε κάθε κόμβο του πλέγματος.

Για το πρόβλημα που μελετάται εδώ, η γένεση πλέγματος έγινε αρχικά γύρω από κάθε 2Δ γεωμετρία σωλήνα ξεχωριστά (δηλαδή γύρω από κάθε μεμονωμένη μικρή αεροτομή), εντός ενός μικρότερου υπολογιστικού χωρίου - επίσης σχήματος ορθογώνιου παραλληλογράμμου - που περικλείει κάθε σωλήνα, και στη συνέχεια για όλο το υπολογιστικό χωρίο. Η ένωση των δύο επιμέρους πλεγμάτων πραγματοποιήθηκε σε δεύτερο χρόνο από το αντίστοιχο λογισμικό. Ο λόγος που έγινε αυτό, είναι ότι γύρω από το στερεό όριο των σωλήνων - αεροτομών, το πλέγμα έπρεπε να είναι πιο πυκνό, καθώς πρόκειται για το σημείο που εμφανίζονται εντονότερες διακυμάνσεις των μεγεθών του πεδίου. Στο χώρο πιο μακριά από τους σωλήνες, η πυκνωση του πλέγματος γινόταν ολόένα και πιο αραιή, αφού οι μεταβολές της ροής ήταν λιγότερο έντονες.

Στο σχήμα 5.3 φαίνονται οι διαστάσεις του υπολογιστικού πεδίου γύρω από έναν σωλήνα (σημειώνεται ότι οι τιμές των μηκών κατά τους άξονες x και y του σχήματος είναι αδιαστατοποιημένες), ενώ στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται το συνολικό πλέγμα που δημιουργείται, το οποίο είναι μη - δομημένο και αποτελείται κατά μέσο όρο από περίπου 170000 τριγωνικά στοιχεία και 80000 κόμβους.



Σχήμα 5.3: Διαστάσεις σωλήνα (αεροτομής) και υπολογιστικού χωρίου γύρω απ' αυτόν. Τα μεγέθη μήκους είναι αδιαστατοποιημένα.



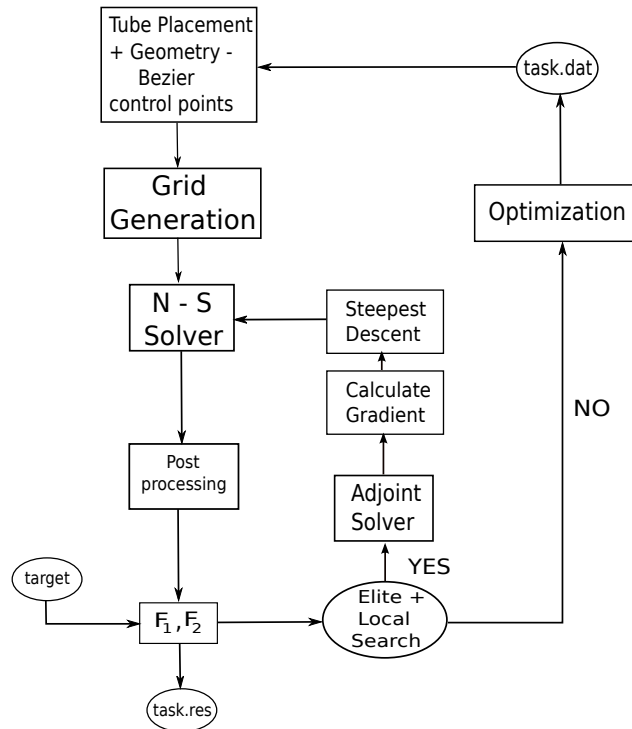
Σχήμα 5.4: Απεικόνιση πλέγματος, έτσι όπως διαμορφώνεται για ολόκληρο το υπολογιστικό χωρίο. Το πλέγμα είναι μη - δομημένο και απαρτίζεται από τριγωνικά στοιχεία.

5.3.3 Διαδικασία Εύρεσης Γεωμετρίας και Τοποθέτησης Σωλήνων.

Τα λογισμικά βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στην προκειμένη εφαρμογή, είναι ο ΑΕΑ και ο ΑΜΑ, καθότι ήταν δυνατός ο υπολογισμός των παραγώγων των συναρτήσεων στόχων του προβλήματος. Ο ΑΜΑ αποτελεί υβριδισμό του ΑΕΑ με μια μέθοδο τοπικής βελτίωσης (Local Search), η οποία εφαρμόζεται στα άτομα που έχουν ανήκουν στο μέτωπο των μη - κυριαρχούμενων λύσεων (δηλαδή, μόνο στις καλύτερες - μέχρι στιγμής - λύσεις). Η μέθοδος τοπικής βελτίωσης που χρησιμοποιείται εδώ, είναι αυτή της απότομης καθόδου, η οποία απαιτεί τον υπολογισμό των πρώτων παραγώγων των συναρτήσεων στόχων του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στην προκειμένη περίπτωση, ο υπολογισμός των παραγώγων πραγματοποιήθηκε με χρήση συνεχών συζυγών μεθόδων, γεγονός που μείωσε κατά πολύ το απαιτούμενο υπολογιστικό κόστος ανά επανάληψη.

Τα συνολικά στάδια που πραγματοποιεί ο αλγόριθμος σε κάθε επανάληψη που πραγματοποιεί, τόσο για τον ΑΕΑ, όσο και για τον ΑΜΑ (αν εφαρμόζεται δηλαδή τοπική βελτίωση), παρου-

σιάζονται στο διάγραμμα του σχήματος 5.5.



Σχήμα 5.5: Πορεία AEA ή AMA - ανάλογα με το αν πραγματοποιείται τοπική βελτίωση (LS) ή όχι - για κάθε επανάληψη. Αν πραγματοποιείται τοπική βελτίωση (AMA), τότε πρέπει να γίνει υπολογισμός των παραγώγων των συναρτήσεων στόχων.

Συνοπτικά, τα στάδια του σχήματος 5.5 έχουν ως εξής:

Οι N μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος αφορούν αφενός στη γεωμετρία των σωλήνων του εναλλάκτη, που παραμετροποιείται με πολώνυμα **Bezier-Bernstein**, και αφετέρου στη σχετική θέση των σωλήνων μεταξύ τους, ως προς 3 αποστάσεις, αναλυτική παρουσίαση των οποίων θα γίνει στη σχετική ενότητα. Για την τρέχουσα τιμή των N μεταβλητών σχεδιασμού πραγματοποιείται τοποθέτηση στο χώρο και χάραξη περιγράμματος της αεροδυναμικής μορφής των σωλήνων. Στη συνέχεια, ακολουθεί η δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος γύρω από τη γεωμετρία που κατασκευάστηκε και η επίλυση του ευθέως προβλήματος, δηλαδή αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier - Stokes σε κάθε κόμβο του πλέγματος, για τις δεδομένες συνθήκες ροής του προβλήματος. Αν πρόκειται για τον AEA, τότε μετά τον πλήρη προσδιορισμό των μεγεθών του πεδίου ροής, ακολουθεί μια μετέπειτα επεξεργασία των ροϊκών δεδομένων ώστε να προκύψουν οι τιμές των δύο συναρτήσεων στόχων F_1 και F_2 του προβλήματος και η τρέχουσα επανάληψη ολοκληρώνεται (στη συνέχεια, για τη νέα επανάληψη, λαμβάνουν χώρα

οι ενδο- και διαδημοτικές διαδικασίες επιλογής νέου ατόμου προς αξιολόγηση). Αν πρόκειται για τον AMA και η λύση που προέκυψε μπήκε στο τρέχον μέτωπο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων, τότε πραγματοποιείται επίλυση συζυγών εξισώσεων στο ίδιο υπολογιστικό πλέγμα, χρησιμοποιώντας το πεδίο ροής που υπολογίστηκε στο προηγούμενο στάδιο, και εύρεση της παραγωγής των συναρτήσεων στόχων. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ανανέωση του διανύσματος των επίλεκτων ατόμων με τη μέθοδο της απότομης καθόδου και η λύση που προκύπτει έπειτα από την τοπική βελτίωση, στέλνεται για επαναξιολόγηση (επίλυση του ευθέως προβλήματος). Η διαδικασία τερματίζει όταν ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης που έχει τεθεί, το οποίο στη δεδομένη περίπτωση είναι ένας μέγιστος αριθμός αξιολογήσεων.

Όπως έχει αναφερθεί και αλλού, το μεγάλο πλεονέκτημα της συζυγούς μεθόδου είναι ότι το υπολογιστικό κόστος ανά επανάληψη είναι ανεξάρτητο του αριθμού N των μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος, καθώς απαιτείται χρόνος όσο περίπου 2 συνολικά κλήσεις της συνάρτησης στόχου (μια επίλυση της εξίσωσης ροής και μια της συζυγούς εξίσωσης), δεδομένου ότι το κόστος υπολογισμού των παραγώγων της συνάρτησης στόχου ως προς τις N μεταβλητές σχεδιασμού είναι περίπου ίσο με το κόστος επίλυσης των εξισώσεων ροής. Σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν παραπάνω, στην περίπτωση που εφαρμόζεται η τοπική βελτίωση, το κόστος ανά επανάληψη κάθε υποψήφιας λύσης είναι:

$$k \text{ Bezier points} + (1 \text{ Navier Stokes equation})_{\text{exact eval}} + 1 \text{ Adjoint equation} + (1 \text{ Navier Stokes equation})_{\text{re-eval}} = k \text{ Bezier points} + 3 \text{ Navier Stokes equations}$$

5.3.4 Ευθύ και Συζυγές Πρόβλημα

Στα επόμενα ακολουθεί μια πολύ συνοπτική περιγραφή των εξισώσεων μέσης ροής και των συζυγών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του ευθέως και του συζυγούς προβλήματος αντίστοιχα, [50].

- Εξισώσεις Μέσης Ροής

Οι εξισώσεις Navier - Stokes του πεδίου ροής για ασυμπίεστα ρευστά, χρησιμοποιώντας το διάνυσμα του υπολοίπου, γράφονται

$$R_{\vec{U}} = 0 \tag{5.1}$$

όπου $\vec{U} = [p, u_i]^T$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης της μέσης ροής, με p την στατική πίεση και u_i , $i = 1, 2$ τις συνιστώσες της ταχύτητας κατά x και y . Επομένως, οι δύο εξισώσεις που προκύπτουν είναι

$$R_p = \beta^2 \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \quad (5.2)$$

$$R_{v_i} = v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

όπου β είναι ο τεχνητός συντελεστής συμπιεστότητας, ρ είναι η σταθερή πυκνότητα, x_i , $i = 1, 2$ οι καρτεσιανές συντεταγμένες και ν η συνεκτικότητα του ρευστού που περιρρέει εξωτερικά τους σωλήνες. Υπενθυμίζεται εδώ, ότι πρόκειται για στρωτή ροή, ασυμπίεστου ρευστού, χαμηλού αριθμού Reynolds ($Re = 140$).

Για την επίλυση του ευθέως προβλήματος, χρειάζεται ακόμα η ενεργειακή εξίσωση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας

$$R_T = \frac{\partial(u_i T)}{\partial x_i} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} = 0 \quad (5.3)$$

όπου

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

είναι η θερμοκρασιακή αγωγιμότητα (με k να είναι η ειδική θερμική αγωγιμότητα και c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα υπό σταθερή πίεση). Η εξίσωση 5.3 επιλύεται ξεχωριστά, αφού πρώτα επιλυθούν επαναληπτικά οι υπόλοιπες εξισώσεις κατάστασης.

- Συζυγείς Εξισώσεις

Για τη συνεχή συζυγή μέθοδο που χρησιμοποιείται εδώ, η επαυξημένη συνάρτηση στόχος F_{aug} ορίζεται ως το άθροισμα της συνάρτησης στόχου F του προβλήματος και του ολοκληρώματος στο υπολογιστικό χωρίο Ω των εξισώσεων κατάστασης ($\vec{R}_{\vec{v}, T} = 0$) πολλαπλασιασμένων με το διάνυσμα των συζυγών μεταβλητών \vec{V} . Δηλαδή

$$F_{aug} = F + \int_{\Omega} \vec{V} R_{\vec{v}, T} d\Omega \quad (5.4)$$

Η μεταβολή της επαυξημένης συνάρτησης στόχου ως προς τη μεταβολή του διανύσματος \vec{b} των N μεταβλητών σχεδιασμού του προβλήματος, ο υπολογισμός της οποίας είναι και το ζητούμενο, είναι

$$\frac{\delta F_{aug}}{\delta \vec{b}} = \frac{\delta F}{\delta \vec{b}} + \int_{\Omega} q \frac{\delta R_p}{\delta \vec{b}} d\Omega + \int_{\Omega} u_i \frac{\delta R_{v_i}}{\delta \vec{b}} d\Omega + \int_{\Omega} T_\alpha \frac{\delta T}{\delta \vec{b}} d\Omega \quad (5.5)$$

όπου q, u_i, T_α είναι η συζυγείς μεταβλητές, κατ' αντιστοιχία με της μεταβλητές του ευθέος προβλήματος p, v_i, T , [45, 50].

Οι αντίστοιχες συζυγείς εξισώσεις που προκύπτουν για τη μέση ροή δεν θα αναφερθούν εδώ, ωστόσο λεπτομερής ανάλυσή τους γίνεται στα [50], [3].

5.4 Ορισμός Στόχων Βελτιστοποίησης

Η βασική απαίτηση κατά το σχεδιασμό οποιουδήποτε εναλλάκτη θερμότητας, ανεξάρτητα με τον τύπο του, τις διαστάσεις ή την εφαρμογή για την οποία προορίζεται, είναι να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμότητας ΔT , με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες ολικής πίεσης ΔP_t .

Για το πρόβλημα που μελετάται εδώ, γίνεται αναζήτηση της βέλτιστης τοποθέτησης και γεωμετρίας των 4 σωλήνων, ώστε να ικανοποιούνται όσο το δυνατόν καλύτερα οι δύο παραπάνω απαιτήσεις, που αποτελούν και τους στόχους του προβλήματος βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, ο πρώτος στόχος που αντιστοιχεί στη μεγιστοποίηση της μεταφοράς θερμότητας κατά την είσοδο και την έξοδο του ρευστού στο χωρίο, είναι η ελαχιστοποίηση του μεγέθους:

$$F_1 = - \int_{S_{I,0}} T dS \quad (5.6)$$

Ως δεύτερος στόχος, που αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών ολικής πίεσης κατά τη διέλευση του εξωτερικού ρευστού από την είσοδο προς την έξοδο του χωρίου, ορίζεται η ελαχιστοποίηση του μεγέθους:

$$F_2 = - \int_{S_{I,0}} \frac{1}{\rho} \left(p + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) v_i n_i dS \quad (5.7)$$

Γίνεται αντιληπτό ότι η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελεί συγχερασμό δύο αντικρουόμενων μεταξύ τους στόχων: αν η επιφάνεια των σωλήνων αυξηθεί (μεγαλύτερο σχήμα σωλήνων), τότε μεταφέρεται μεν περισσότερη θερμότητα στο ρευστό που περιρρέει τους σωλήνες, αλλά ταυτόχρονα αυξάνονται οι απώλειες ολικής πίεσης, οπότε ο εναλλάκτης υστερεί σε απόδοση. Το αντίθετο ακριβώς ισχύει για μικρότερο σχήμα σωλήνων. Γι' αυτό το λόγο, παρουσιάζει ενδιαφέρον να εξεταστεί αν και πως η τοποθέτηση των σωλήνων (που προκύπτει από τη βελτιστοποίηση) επηρεάζει τελικά το σχήμα τους, καθώς και τι τιμές προκύπτουν για τους στόχους F_1 και F_2 . Ακόμα, αναφέρεται ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν υπόκειται σε κανέναν περιορισμό.

Όταν ένα άτομο αποτελεί τρέχουσα βέλτιστη λύση, οπότε και στέλνεται για τοπική βελτίωση, πρέπει να υπολογιστεί η παράγωγος των 2 παραπάνω συναρτήσεων στόχων. Κάθε φορά που πρέπει να γίνει αυτό, πραγματοποιείται η σύνθεση των δύο συναρτήσεων στόχων F_1, F_2 σε μία ενιαία συνάρτηση F_{tot} , της οποίας και υπολογίζεται η παράγωγος. Η σύνθεση πραγματοποιείται βάσει του σχήματος

$$F_{tot} = \sum_{i=1}^2 \omega_i F_i \quad (5.8)$$

όπου ω_i είναι δύο συντελεστές βαρύτητας, οι οποίοι υπολογίζονται ξεχωριστά για το κάθε άτομο που στέλνεται για τοπική βελτίωση, ανάλογα με τη θέση του (δηλαδή την κυριαρχία του) στο τρέχον μέτωπο των μη – κυριαρχούμενων λύσεων. Συγκεκριμένα, όταν ένα άτομο εισέρχεται στο μέτωπο, του αποδίδεται μια βαθμωτή τιμή $\varphi = \varphi(F_1, F_2, \dots, FM)$, σύμφωνα με τον αλγόριθμο SPEA 2, [13]. Η παράγωγος που πρέπει να υπολογιστεί, ώστε να χρησιμοποιηθεί από την μέθοδο της απότομης καθόδου, είναι η

$$\nabla\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial\vec{b}}$$

Βάσει της μεθόδου που προτείνεται στο [15], η τιμή της παραγώγου $\nabla\varphi$, υπολογίζεται βάσει του κανόνα της αλυσίδας

$$\nabla\varphi = \sum_{i=1}^M \frac{\partial\varphi}{\partial F_i} \frac{\partial F_i}{\partial\vec{b}} = \sum_{i=1}^M \omega_i \frac{\partial F_i}{\partial\vec{b}} \quad (5.9)$$

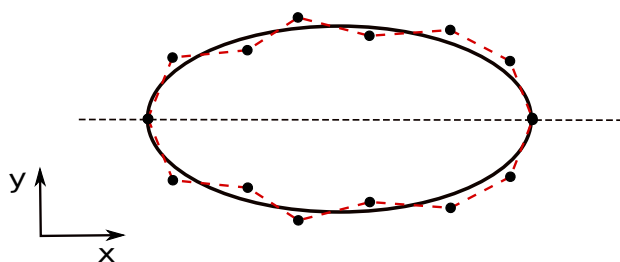
όπου γίνεται η υπόθεση ότι $\omega_i = \frac{\partial\varphi}{\partial F_i}$. Η παράγωγος $\frac{\partial F_i}{\partial\vec{b}}$ υπολογίζεται από τη συνεχή συζυγή μέθοδο.

5.5 Παραμετροποίηση Γεωμετρίας Σωλήνων Εναλλάκτη - Μεταβλητές Σχεδιασμού

Η μεταβλητές σχεδιασμού του αερο-θερμοδυναμικού προβλήματος, αφορούν σε δύο πράγματα:

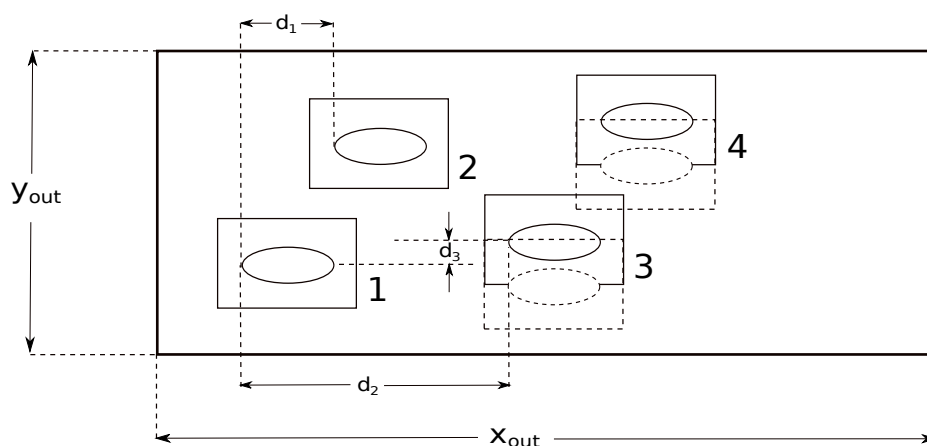
1. στη γεωμετρία των 4 σωλήνων που μελετώνται και
2. στη θέση των σωλήνων εντός του υπολογιστικού χωρίου.

Το σχήμα των σωλήνων παραμετροποιείται με πολυώνυμα **Bezier-Bernstein**. Όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα, οι 4 σωλήνες είναι ίδιου σχήματος, ενώ ο κάθε σωλήνας είναι συμμετρικός ως προς τον οριζόντιο άξονα (άξονα των x). Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6, κάθε σωλήνας παραμετροποιείται από συνολικά 16 σημεία ελέγχου (**control points**) καμπυλών **Bezier-Bernstein**: 8 για την πάνω πλευρά και 8 (συμμετρικά ως προς x) για την κάτω. Από τα 8 αυτά σημεία ελέγχου για την κάθε πλευρά, μόνο τα 6 είναι ελεύθερα να μετακινούνται και ως προς τις δύο κατευθύνσεις x και y . Τα δύο σημεία ελέγχου που μένουν ακίνητα, είναι αυτά στην αρχή και στο τέλος των σωλήνων, δηλαδή αυτά που καθορίζουν το μήκος της διαμέτρου των σωλήνων κατά x , το οποίο και δεν μεταβάλλεται κατά τη βελτιστοποίηση. Έτσι, και για τους 4 σωλήνες προκύπτουν συνολικά $6 \times 4 = 24$ σημεία ελέγχου. Επειδή όμως, οι 4 σωλήνες είναι πανομοιότυποι και επειδή το σχήμα τους εμφανίζει συμμετρία ως προς τον άξονα x , από τα 24 σημεία ελέγχου 'χρεώνονται' κατά τη βελτιστοποίηση μόνο τα 6 σημεία της πάνω πλευράς του ενός σωλήνα που είναι ελεύθερα να κινούνται κατά x και y (επομένως $6 \times 2 = 12$ μεταβλητές σχεδιασμού).



Σχήμα 5.6: Απεικόνιση των καμπυλών Bezier-Bernstein που ορίζουν τα 8 σημεία ελέγχου της πάνω πλευράς και τα 8 συμμετρικά τους (ως προς τον άξονα x) που ορίζουν την κάτω πλευρά των σωλήνων. Το πρώτο και το τελευταίο σημείο ελέγχου κάθε πλευράς είναι σταθερό, ώστε το μήκος των σωλήνων να μην μεταβάλλεται κατά x , ενώ τα υπόλοιπα 4 σημεία κάθε πλευράς είναι ελεύθερα να μετακινούνται ως προς x και y .

Η σχετική θέση των σωλήνων μεταξύ τους καθορίζεται από 3 αποστάσεις d_1 , d_2 και d_3 , οι οποίες σημειώνονται στο σχήμα 5.7 και αποτελούν ακόμα 3 μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος. Στο σχήμα, οι σωλήνες έχουν αριθμηθεί για διευκόλυνση. Όλες οι αποστάσεις μετρώνται από την αρχή των σωλήνων (ακμή πρόσπτωσης των αεροτομών). Όπως φαίνεται, οι αποστάσεις d_1 και d_2 διαμορφώνουν την τοποθέτηση των σωλήνων ανά δύο κατά τον οριζόντιο άξονα, ενώ η απόσταση d_3 ορίζει την απόστασή τους κατά τον κατακόρυφο άξονα. Συγκεκριμένα, η απόσταση d_1 ορίζει πόσο θα απέχει ο σωλήνας 1 από το σωλήνα 2 και ο σωλήνας 3 από το σωλήνα 4, ενώ η d_2 ορίζει πόσο θα απέχει ο σωλήνας 1 από τον 3 και ο 2 από τον 4. Η απόσταση d_3 ορίζει τη θέση του οριζόντιου άξονα συμμετρίας των σωλήνων 3 και 4 κατά y (οι οποίοι είναι και οι μόνοι που μπορούν να μετακινηθούν κατά την κατακόρυφη διεύθυνση) ως προς τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας των σωλήνων 1 και 2 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.7: Ορισμός των αποστάσεων d_1 , d_2 και d_3 .

Στο σχήμα 5.7 σημειώνονται ακόμα οι διαστάσεις του υπολογιστικού χωρίου που περικλείει τους 4 σωλήνες, x_{out} και y_{out} . Οι διαστάσεις αυτές δεν αποτελούν αντικείμενο της βελτιστοποίησης και όπως αναφέρθηκε παραπάνω, παραμένουν σταθερές. Αναφέρεται επίσης και πάλι, ότι το όριο εξόδου του πεδίου ροής έχει επιμηκυνθεί αρκετά κατά την κατεύθυνση x από το τέλος του τελευταίου σωλήνα, ώστε να αποφευχθεί η επίδραση του ομόρρου της ροής στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επίλυση του πεδίου. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι τα όρια των μικρότερων υπολογιστικών χωρίων που περιβάλλουν τους σωλήνες απέχουν ασφαλή απόσταση, τόσο μεταξύ τους, όσο και από τα όρια του μεγάλου υπολογιστικού χωρίου. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή την απαίτηση, τα όρια που διαμορφώνονται για τις 3 μεταβλητές σχεδιασμού που αφορούν τις (αδιάστατες ως προς τη χορδή των σωλήνων) αποστάσεις d_1 , d_2 , d_3 , παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Ακολουθεί ο πίνακας 5.2 όπου παρουσιάζονται οι συνολικά 15 μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος.

Πίνακας 5.1: Άνω και κάτω όριο των αδιάστατων (ως προς τη χορδή των σωλήνων) μεταβλητών σχεδιασμού d_1 , d_2 και d_3 .

d	d_{min}	d_{max}
d_1	1.5	3.5
d_2	2	6
d_3	- 0.4	0.4

Πίνακας 5.2: Μεταβλητές Σχεδιασμού Προβλήματος Βελτιστοποίησης

d			$(x, y)_{Bezier}$			
d_1	d_2	d_3	<i>airfoil 1</i>	<i>airfoil 2</i>	<i>airfoil 3</i>	<i>airfoil 4</i>
1	1	1	12	12	12	12
3			12 (μόνο για την πάνω πλευρά ενός σωλήνα)			
<i>Total 15</i>						

5.6 Βελτιστοποίηση - Καθορισμός Παραμέτρων ΑΕΑ/ΑΜΑ

Η βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε, τόσο με τον ΑΕΑ, όσο και με τον ΑΜΑ έγινε σε 32 ίδιους επεξεργαστές των 2.00 GHz. Επιλέχθηκαν διαστάσεις πλέγματος βάσης 10×10 , δηλαδή το πλέγμα περιείχε συνολικά 75 άτομα (agents) προς αξιολόγηση. Ως ανώτατο όριο αξιολογήσεων ορίστηκαν οι 300, καθώς η αξιολόγηση κάθε λύσης (επίλυση των εξισώσεων Navier - Stokes σε κάθε κόμβο του πλέγματος που είχε διαμορφωθεί) έχει σημαντικό υπολογιστικό κόστος. Σε αντίθεση ωστόσο με την προηγούμενη εφαρμογή που εξετάστηκε και αφορούσε την εύρεση βέλτιστης γεωμετρίας υδροστροβίλου τύπου matrix, η οποία παρουσίαζε την ιδιομορφία σχετικά με το χρόνο αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης, που είχε μεγάλες διακυμάνσεις, εδώ ο χρόνος αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης (καθώς και ο χρόνος υπολογισμού των παραγώγων των συναρτήσεων στόχων όταν χρειάζεται) είναι σχεδόν σταθερός (ή, τουλάχιστον, δεν αναμένονται μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ διαφορετικών υποψήφιων λύσεων) και περίπου ίσος με 60 min.

Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ, καθώς και ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών, διατηρήθηκαν σταθερά, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για τους δύο αλγόριθμους.

Οι παράμετροι που ορίστηκαν για τον ΑΕΑ και τον ΑΜΑ και περιγράφηκαν παραπάνω, παρουσιάζονται συνολικά στον πίνακα 5.3.

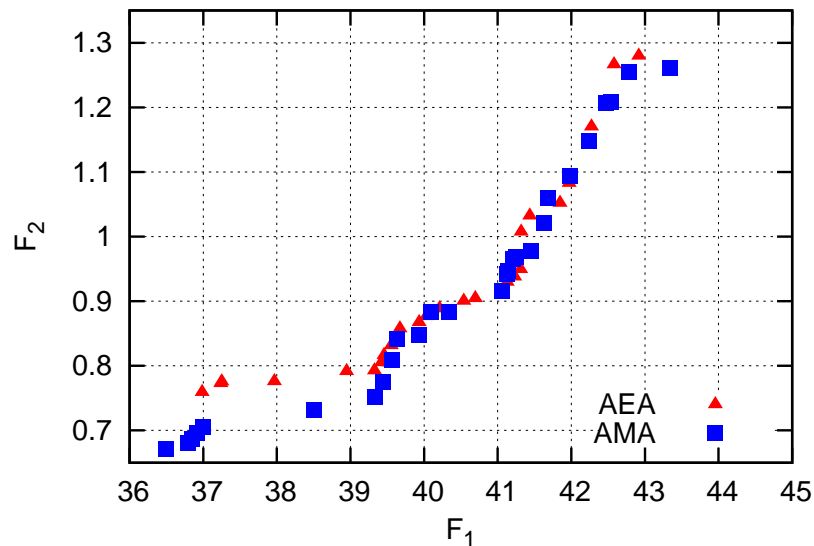
Πίνακας 5.3: Παράμετροι ΑΕΑ / ΑΜΑ

Πλέγμα Βάσης	10 × 10
Άτομα προς Αξιολόγηση	75
Αριθμός Επεξεργαστών	32
Μέγιστος Αριθμός Αξιολογήσεων	300

5.7 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης - Συζήτηση

Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα, βασική επιδίωξη του συγκεκριμένου προβλήματος βελτιστοποίησης ήταν η μεγιστοποίηση της μεταφορά θερμότητας ΔT , με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των απωλειών ολικής πίεσης ΔP_t του εναλλάκτη. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε αρχικά για τον AEA και στη συνέχεια για τον AMA, διατηρώντας σταθερές τις παραμέτρους του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκαν (πληθυσμός πλέγματος, αριθμός επεξεργαστών), καθώς και το μέγιστο όριο αξιολογήσεων, που ήταν οι 300.

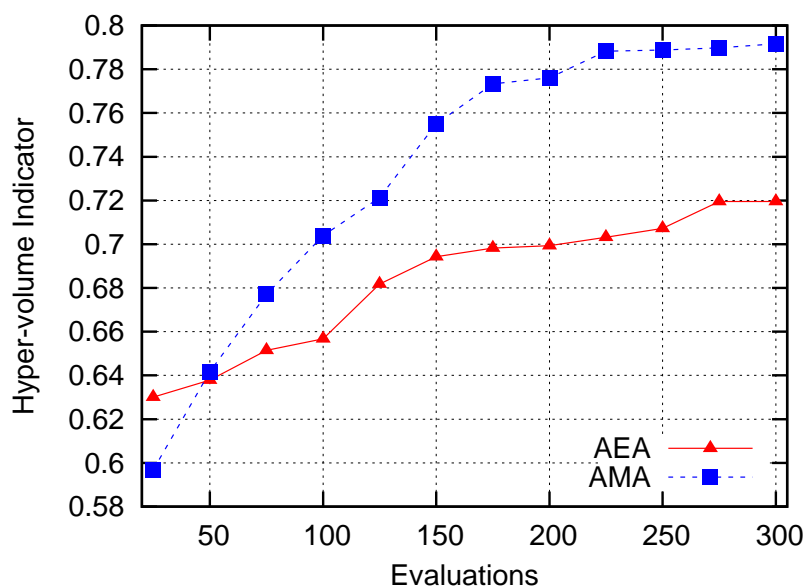
Τα μέτωπα των μη-κυριαρχούμενων λύσεων που προκύπτουν για τον AEA και τον AMA παρουσιάζονται - για λόγους καλύτερης σύγκρισης - στο σχήμα 5.8, με άξονες τις δύο συναρτήσεις στόχους F_1 και F_2 . Το μέτωπο του AEA αποτελείται από πληθυσμό 25 κατά Pareto βέλτιστων λύσεων, ενώ το μέτωπο του AMA αποτελείται από 29 κατά Pareto βέλτιστες λύσεις, καθεμιά από τις οποίες υπερτερεί ως προς τον ένα στόχο και υστερεί ως προς τον άλλο.



Σχήμα 5.8: Μέτωπα μη-κυριαρχούμενων λύσεων που προκύπτουν για τους δυο αλγόριθμους που δοκιμάζονται (AEA και AMA), για διαστάσεις πλεγμάτων βάσης 10×10 , 32 επεξεργαστές και κόστος 300 αξιολογήσεων. Για το πρόβλημα ίσχυε $F_1 = \max$ και $F_2 = \min$.

Ακολουθεί το σχήμα 5.9 όπου παρουσιάζονται οι πορείες σύγκλισης του AEA και του AMA ως προς τον αριθμό των αξιολογήσεων που έγιναν, με χρήση του δείκτη υπερόγκου. Όπως

φαίνεται από τα δύο γραφήματα, η πορεία του AMA είναι πολύ καλύτερη από αυτή του AEA για τον ίδιο αριθμό αξιολογήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί κάθε φορά. Τα όρια για τους δύο στόχους που ορίστηκαν για τον υπολογισμό του δείκτη υπερόγκου είναι κοινά για τους δύο αλγόριθμους και αναγράφονται στον πίνακα 5.4.



Σχήμα 5.9: Πορεία σύγκλισης AEA και AMA με χρήση του δείκτη υπερόγκου.

Πίνακας 5.4: Όρια χωρίου υπολογισμού του δείκτη υπερόγκου για AEA και AMA.

Στόχος	<i>min</i>	<i>max</i>
F_1	30	46
F_2	0.6	2

Στον πίνακα 5.5, όπου παρουσιάζονται ορισμένα στατιστικά στοιχεία που αφορούν τη μέθοδο τοπικής βελτίωσης που εφαρμόστηκε για τον AMA.

Πίνακας 5.5: Στατιστικά στοιχεία σχετικά με την τοπική βελτίωση LS.

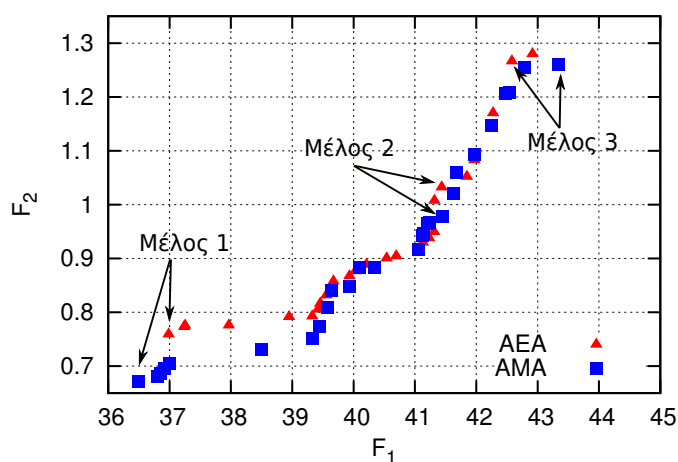
Αριθμός Αξιολογήσεων	300	
Άτομα που στάλθηκαν για τοπική βελτίωση LS	70	23.3 %
Αριθμός Μελών τελικού μετώπου	29	
Αριθμός Μελών τελικού μετώπου από τοπική βελτίωση	12	41.4 %

Όπως προκύπτει από το σχήμα 5.8, τα δύο μέτωπα των μη – κυριαρχούμενων λύσεων παρουσιάζουν πολύ ικανοποιητική εικόνα όσον αφορά στο βαθμό προσέγγισης των στόχων. Για τις ίδιες παραμέτρους και το ίδιο κόστος αξιολογήσεων, το προκύπτον μέτωπο μη-κυριαρχούντων λύσεων για τον AMA φαίνεται να είναι ελάχιστα καλύτερο απ' ότι αυτό για τον ΑΕΑ. Η μεγάλη διαφορά των δύο αλγορίθμων γίνεται εμφανής στα διαγράμματα του δείκτη υπερόγκου (σχήμα 5.9), όπου και φαίνεται ξεκάθαρα η υπεροχή του AMA. Παρότι δεν υπάρχει μέλος του μετώπου του AMA που να κυριαρχεί σε όλα τα άτομα του μετώπου του ΑΕΑ, οι κατά Pareto βέλτιστες λύσεις του AMA καλύπτουν όλο το εύρος των λύσεων που έχει εντοπίσει ο ΑΕΑ για τον στόχο F_1 , και μάλιστα μετατοπίζοντας το μέτωπο ελαφρώς προς τα κάτω, δηλαδή για λίγο καλύτερες τιμές του στόχου F_2 . Επιπλέον, τα όρια του μετώπου του AMA 'απλώνονται' περισσότερο στο χώρο των λύσεων, εντοπίζοντας περισσότερες λύσεις που είναι υπερτερούν σε σημαντικό βαθμό ως προς τον ένα στόχο και υστερούν αντίστοιχα κατά πολύ ως προς τον άλλο. Έτσι, το μέτωπο του AMA παρουσιάζει μεγαλύτερη ποικιλία λύσεων, σε σχέση με το μέτωπο του ΑΕΑ.

Ακόμα, όπως φαίνεται και από τα στατιστικά στοιχεία που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5, από τις 300 αξιολογήσεις που έλαβαν χώρα για τον AMA, 70 αντιστοιχούσαν σε τοπικές βελτιώσεις. Δηλαδή, πραγματοποιήθηκαν 160 ακριβείς αξιολογήσεις, 70 υπολογισμοί των παραγώγων των συναρτήσεων στόχων (με τη συζυγή μέθοδο) και 70 επαναξιολογήσεις των ατόμων των οποίων το διάλυμα των μεταβλητών σχεδιασμού ανανεώθηκε με τη μέθοδο της απότομης καθόδου. Επιπλέον, από τα συνολικά 29 μέλη του τελικού μετώπου του AMA, τα 12, δηλαδή το 41.4 % των μη-κυριαρχούμενων λύσεων, προέκυψαν από τοπικές βελτιώσεις. Επομένως, γίνεται αντιληπτό πόσο πολύ συνεισφέρει η εφαρμογή μιας μεθόδου τοπικής βελτίωσης (δεδομένου ότι το κόστος υπολογισμού των παραγώγων είναι ανεκτό) στη βελτίωση της συμπεριφοράς του ΑΕΑ.

Από το κάθε μέτωπο των μη-κυριαρχούμενων λύσεων που προκύπτουν για τον ΑΕΑ και τον AMA επιλέγονται 3 μέλη, προκειμένου να συγκριθούν μεταξύ τους, τόσο ως προς τις τιμές των στόχων F_1 , F_2 και των αποστάσεων d_1 , d_2 και d_3 , όσο και ως προς τη μορφή των σωλήνων που προκύπτουν κάθε φορά. Προκειμένου να υπάρχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του συνόλου των λύσεων που υπάρχουν στα δύο μέτωπα, τα 3 μέλη που επιλέγονται αντιστοιχούν

στη χειρότερη λύση ως προς το στόχο F_1 και ταυτόχρονα καλύτερη ως προς το στόχο F_2 , σε μια λύση που βρίσκεται σχεδόν στο μέσο του μετώπου και στην χειρότερη λύση ως προς το στόχο F_2 και ταυτόχρονα καλύτερη ως προς το στόχο F_1 . Οι λύσεις αυτές, ονομάζονται μέλος 1, μέλος 2 και μέλος 3 αντίστοιχα, τόσο για το μέτωπο του ΑΕΑ, όσο και για του ΑΜΑ. Για καλύτερη εποπτεία, στο σχήμα 5.10 παρουσιάζεται και πάλι το σχήμα των δύο μετώπων, όπου έχουν σημειωθεί οι λύσεις που επιλέγονται.



Σχήμα 5.10: Μέτωπα μη-κυριαρχούμενων λύσεων που προκύπτουν για τους δυο αλγόριθμους που δοκιμάζονται (ΑΕΑ και ΑΜΑ), όπου σημειώνονται τα μέλη που έχουν επιλεγεί για σύγκριση αποτελεσμάτων.

Στους πίνακες 5.6 και 5.7 που ακολουθούν, παρουσιάζονται για κάθε ένα από τα 3 μέλη του μετώπου του ΑΕΑ και του μετώπου του ΑΜΑ, οι τιμές των στόχων F_1 , F_2 και οι τιμές που των μεταβλητών σχεδιασμού d_1 , d_2 και d_3 που διαμορφώνουν τη σχετική θέση των σωλήνων στο χώρο και μεταξύ τους.

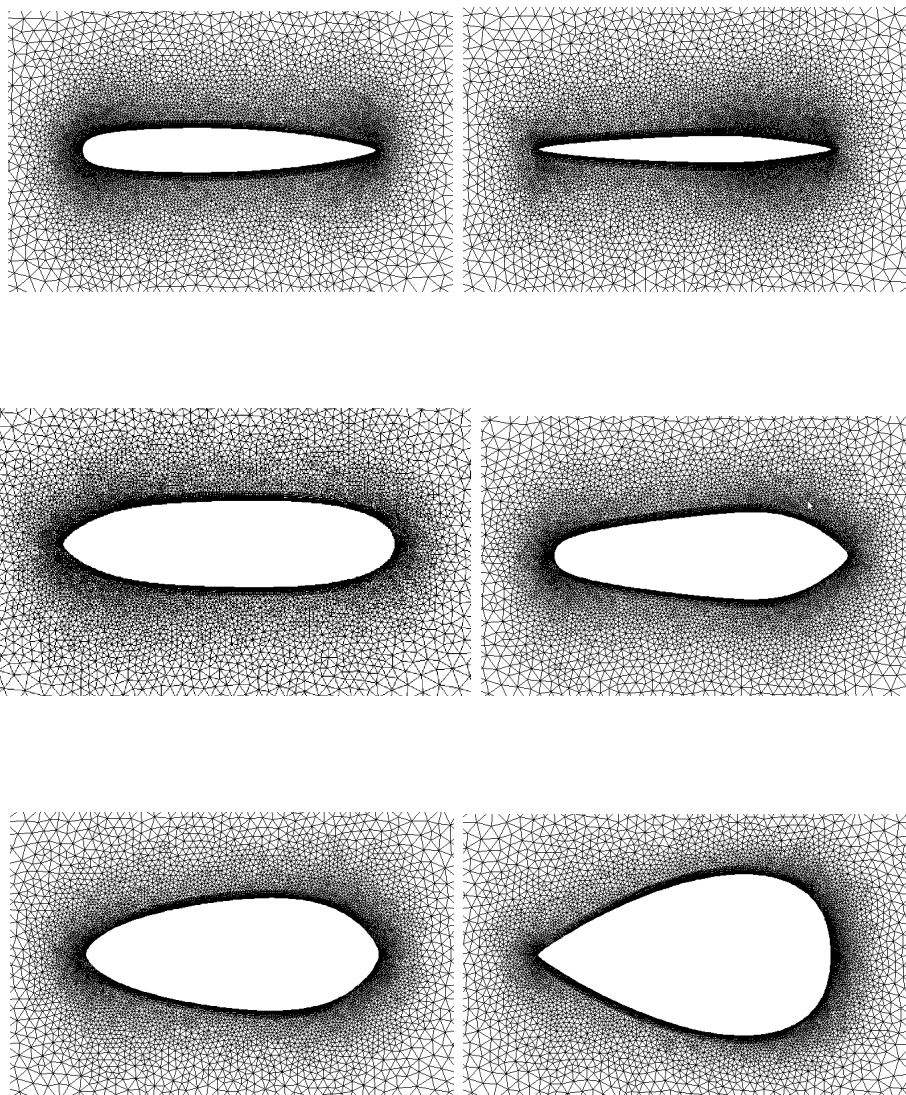
Παρακάτω παρουσιάζεται - πάλι για τα συνολικά 6 μέλη των δύο μετώπων - πως διαμορφώνεται για την κάθε λύση η μορφή του κάθε σωλήνα (σχήμα 5.11), καθώς και η τελική τους τοποθέτηση (σχήμα 5.12). Για καλύτερη σύγκριση, κάθε εικόνα που βρίσκεται στα αριστερά της σελίδας απεικονίζει με τη σειρά (από πάνω προς τα κάτω) τα μέλη 1,2 και 3 του μετώπου του ΑΕΑ, ενώ στα δεξιά της σελίδας, ακριβώς δίπλα από τις εικόνες για τα μέλη του μετώπου του ΑΕΑ, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μέλη του μετώπου του ΑΜΑ.

Πίνακας 5.6: Τιμές των στόχων F_1 , F_2 για τα 3 μέλη του κάθε μετώπου.

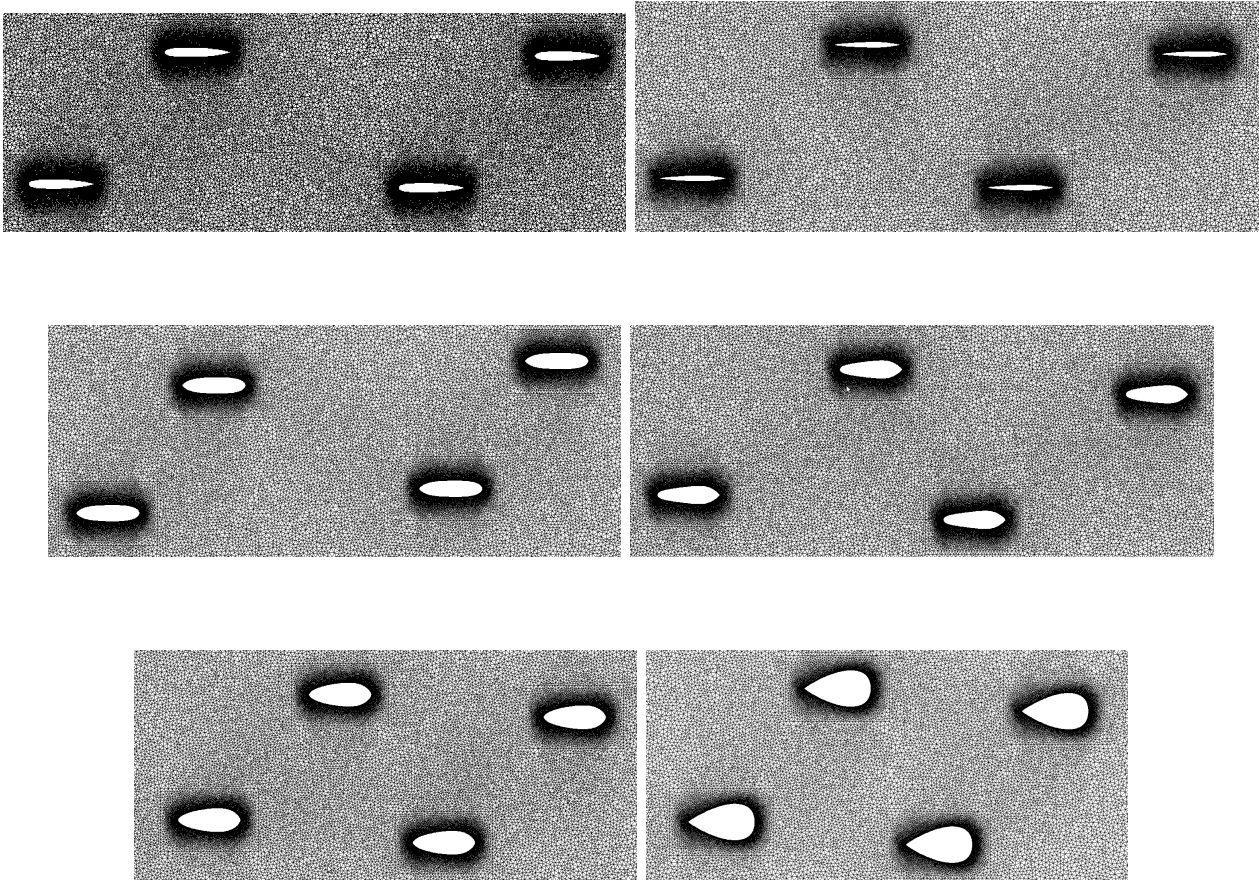
	AEA		AMA	
	F_1	F_2	F_1	F_2
Μέλος 1	36.98	0.759	36.49	0.672
Μέλος 2	41.44	1.032	41.45	0.977
Μέλος 3	42.58	1.266	43.34	1.261

Πίνακας 5.7: Τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού d_1 , d_2 και d_3 για τα 3 μέλη του κάθε μετώπου.

	AEA			AMA		
	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
Μέλος 1	2.066	5.617	-0.056	2.607	4.904	-0.139
Μέλος 2	1.668	5.394	0.382	1.553	4.657	-0.398
Μέλος 3	1.772	3.668	-0.361	1.585	3.033	-0.397



Σχήμα 5.11: Παρουσίαση της μορφής της διατομής των πανομοιότυπων σωλήνων του εναλλάκτη, έτσι όπως διαμορφώνεται για κάθε ένα από τα 3 μέλη του κάθε μετώπου. Αριστερά απεικονίζονται κατά σειρά τα μέλη 1,2 και 3 του μετώπου του ΑΕΑ, δεξιά βρίσκονται κατ'αντιστοιχία τα μέλη του μετώπου του ΑΜΑ.



Σχήμα 5.12: Παρουσίαση της τελικής τοποθέτησης των 4 σωλήνων του εναλλάκτη, έτσι όπως διαμορφώνεται για κάθε ένα από τα 3 μέλη του κάθε μετώπου. Αριστερά απεικονίζονται κατά σειρά τα μέλη 1,2 και 3 του μετώπου του ΑΕΑ, δεξιά βρίσκονται κατ' αντιστοιχία τα μέλη του μετώπου του ΑΜΑ.

Αρχικά, όσον αφορά στη μορφή των σωλήνων που απεικονίζεται για κάθε ένα από τα 3 μέλη των δύο μετώπων στο σχήμα 5.11, παρατηρείται το αναμενόμενο αποτέλεσμα: όσο καλύτερη μεταφορά θερμότητας επιτυγχάνεται εντός του εναλλάκτη (δηλαδή για καλύτερες τιμές του στόχου F_1 - ταυτόχρονα χειρότερες για το στόχο F_2), τόσο αυξάνεται το μήκος των σωλήνων κατά την κάθετη διεύθυνση (άξονας των y). Με άλλα λόγια, αυξάνεται το εμβαδό της διατομής των σωλήνων, με αποτέλεσμα αυξάνεται η διερχόμενη παροχή του θερμού ρεύματος και να επιτυγχάνεται κατ' αυτό τον τρόπο αύξηση της τιμής του μεγέθους ΔT . Η διαφορά στο σχήμα των σωλήνων είναι ιδιαίτερα έντονη για το μέλος 1 και το μέλος 3 του μετώπου του AMA, τα οποία παρουσιάζουν διαφορά περίπου 8 θερμοκρασιακών μονάδων, όσον αφορά στην τιμή του στόχου F_1 .

Από το σχήμα 5.12, καθώς και από τα δεδομένα του πίνακα 5.7, όσον αφορά στον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνονται οι αποστάσεις d_1 , d_2 και d_3 μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις: Τα 3 μέλη του μετώπου του AMA, τα οποία γενικά παρουσιάζουν καλύτερες τιμές ως προς το στόχο F_2 (δηλαδή μειωμένες απώλειες ολικής πίεσης ΔP_t), είναι τοποθετημένα σε μεγαλύτερη (κατά απόλυτη τιμή) απόσταση κατά y (προκύπτουν δηλαδή μεγαλύτερες τιμές για τη μεταβλητή σχεδιασμού d_3) και πιο κάτω απ' ότι τα 3 μέλη του μετώπου του AEA. Η αύξηση επομένως, της απόστασης d_3 προς τα κάτω, σε συνδυασμό με την αύξηση του εμβαδού της διατομής των σωλήνων φαίνεται να επιδρά θετικά στις απώλειες ολικής πίεσης. Η απόσταση κατά τον οριζόντιο άξονα d_2 μειώνεται για όλα τα μέλη του AEA και του AMA, ενώ η d_1 μειώνεται για τις λύσεις που βρίσκονται στο μέσο του μετώπου, για να αυξηθεί και πάλι λίγο στη συνέχεια. Ο στόχος F_2 φαίνεται δηλαδή να ευνοείται για μείωση της d_2 .

Ίσως η σύγκριση που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον και δίνει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για το πως οι 3 αποστάσεις επηρεάζουν τους στόχους, είναι αυτή μεταξύ των μελών 2 του μετώπου του AEA και του AMA, καθότι οι δύο αυτές λύσεις έχουν σχεδόν την ίδια τιμή για τον στόχο F_1 . Παρατηρείται λοιπόν, ότι για μικρότερες τιμές των 3 αποστάσεων d_1 , d_2 και d_3 , καθώς και για μικρότερο εμβαδό διατομής σωλήνων (από σχήμα 5.10), προκύπτει ότι επιτυγχάνεται ίδια μεταφορά θερμότητας, με λιγότερες απώλειες. Αυτός επομένως, μπορεί να χαρακτηριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός.

Κεφάλαιο 6

Ανακεφαλαίωση - Σχόλια - Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται και πιστοποιείται μια μέθοδος βελτιστοποίησης για μονοκριτηριακά και πολυκριτηριακά προβλήματα, η οποία βασίζεται σε έναν πλήρως Ασύγχρονο Εξελικτικό Αλγόριθμο (ΑΕΑ), καθώς και στον συνδυασμό του με μια αιτιοκρατική μέθοδο τοπικής βελτίωσης (LS) που έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της συμπεριφοράς του. Στην περίπτωση που πραγματοποιείται τοπική βελτίωση, ο υβριδικός ΑΕΑ αποκαλείται πλέον Ασύγχρονος Μιμητικός Αλγόριθμος (ΑΜΑ).

Οι ΑΕΑ αποτελούν ένα διαρκώς εξελισσόμενο πεδίο στον τομέα της βελτιστοποίησης, καθώς το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι με τη χρήση τους επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος, ενώ καταργείται η ανάγκη συγχρονισμού των επεξεργασιών, όπως συμβαίνει για τους Σύγχρονους ΕΑ. Αυτή τους η ιδιότητα τους καθιστά κατάλληλους για την επίλυση απαιτητικών υπολογιστικά προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως αυτά που αφορούν το σχεδιασμό αεροδυναμικών μορφών, όπου χρησιμοποιείται λογισμικό Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Επιπλέον, ο ΑΜΑ - υβριδισμός του ΑΕΑ με μια μέθοδο τοπικής βελτίωσης, όπως αυτή της απότομης καθόδου που χρησιμοποιείται εδώ - μπορεί να βελτιώσει σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα των αποτελεσμάτων ενός ΑΕΑ, δεδομένου ότι για το πρόβλημα που εξετάζεται είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραγώγων των συναρτήσεων στόχων με μια μέθοδο, που είναι αποτελεσματική και δεν κοστίζει πολύ υπολογιστικά. Μια τέτοια μέθοδος - η οποία και χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική - είναι αυτή της συζυγούς μεθόδου, η οποία υπολογίζει την παράγωγο των συναρτήσεων στόχων με υπολογιστικό κόστος σχεδόν όσο και μια αξιολόγηση μιας υποψήφιας λύσης.

Για τον ΑΕΑ που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο πληθυσμός είναι τοποθετημένος στους κόμβους ενός 2Δ δομημένου πλέγματος, το οποίο είναι χωρισμένο σε δήμους

που αλληλεπιδρούν ισχυρά μεταξύ τους. Η επιλογή του νέου άτομου που πρόκειται να σταλεί για αξιολόγηση στον πρώτο διαθέσιμο επεξεργαστή, γίνεται έπειτα από μια σειρά ενδο- και δια-δημοτικών διαδικασιών, οι οποίες βασίζονται στις τιμές δύο προτεραιοτήτων, της προτεραιότητας λόγω τιμής της συνάρτησης κόστους και της προτεραιότητας λόγω ηλικίας.

Ακόμα, όσον αφορά στον AMA, η τοπική βελτίωση εφαρμόζεται μόνο στα άτομα του πληθυσμού που αποτελούν τις τρέχουσες βέλτιστες λύσεις, σύμφωνα με το μηχανισμό εκμάθησης κατά Lamarck. Μετά την ανανέωση του διανύσματος των μεταβλητών σχεδιασμού του ατόμου που στάλθηκε για τοπική βελτίωση, με τη μέθοδο της απότομης καθόδου, η νέα λύση που προκύπτει στέλνεται και πάλι για αξιολόγηση.

Οι δύο αλγόριθμοι (ΑΕΑ και AMA) δοκιμάστηκαν αρχικά σε απλά μαθηματικά προβλήματα ενός και δύο στόχων χωρίς περιορισμούς, τα οποία ήταν η συνάρτηση της σφαίρας, η συνάρτηση Rastrigin και το μαθηματικό πρόβλημα δύο στόχων ZDT3. Στόχος ήταν να διαπιστωθεί αν και κατά πόσο ο AMA βελτίωνε τη συμπεριφορά του ΑΕΑ για ίδιες παραμέτρους και κοινό μέγιστο όριο αξιολογήσεων. Ακόμα, για τη συνάρτηση Rastrigin διεξήχθη για τον ΑΕΑ και τον AMA παραμετρική μελέτη που αφορούσε στις διαστάσεις πλέγματος βάσης του αλγορίθμου σε σχέση με τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών όπου λάμβαναν χώρα οι παράλληλες αξιολογήσεις. Σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να αποδειχτεί ή όχι η ύπαρξη και ο βαθμός εξάρτησης των δύο αυτών παραμέτρων, καθώς και να βρεθεί ο συνδυασμός εκείνος που εξασφάλιζε βέλτιστα αποτελέσματα σε ανεκτό χρόνο.

Επίσης, ο ΑΕΑ εφαρμόστηκε σε δύο μηχανολογικά προβλήματα αεροδυναμικού σχεδιασμού, όπου χρησιμοποιούνταν απαιτητικό υπολογιστικά λογισμικό Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Στο πρώτο από αυτά, που αφορά στο σχεδιασμό βέλτιστης μορφής πτερυγίων δρομέα μοντέλου υδροστροβίλου αξονικής ροής για λειτουργία σε πλέγμα υδροστροβίλων, ο συνολικός χρόνος αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης παρουσίαζε μεγάλες διακυμάνσεις, γεγονός που καθιστούσε τη χρήση του ΑΕΑ ιδανική επιλογή για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Στη δεύτερη εφαρμογή, η οποία αφορούσε στο σχεδιασμό βέλτιστης μορφής και τοποθέτησης δέσμης σωλήνων εναλλάκτη θερμότητας εγκάρσιας και αναμίξιμης ροής, χρησιμοποιήθηκαν και ο ΑΕΑ και ο AMA, προκειμένου να γίνει σύγκριση της ποιότητας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για τον κάθε αλγόριθμο, για ίδιες παραμέτρους των δύο αλγορίθμων, καθώς και ίδιο αριθμό χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών.

Συνοπτικά, τα συμπεράσματα και τα αποτελέσματα που πρέκυψαν από τις δοκιμές που έγιναν, είναι τα εξής:

- Όσον αφορά στην πιστοποίηση του AEA και του AMA που εφαρμόστηκε σε μαθηματικά προβλήματα, ο AMA για τις ίδιες παραμέτρους με τον AEA (διαστάσεις πλέγματος βάσης και αριθμό χρησιμοποιούμενων επεξεργαστών) και για τον ίδιο αριθμό επαναλήψεων παρουσίαζε σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά από τον AEA. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της συνάρτησης της σφαίρας, ο AMA πετύχαινε την εύρεση του ολικού ακρότατου με πολύ καλύτερη ακρίβεια από τον AEA και για τις μισές σχεδόν από τις 6000 αξιολογήσεις που είχαν οριστεί ως ανώτατο όριο. Στο μαθηματικό πρόβλημα ZDT3 - που ήταν πρόβλημα δύο στόχων - και πάλι ο AMA κατάφερε να προσεγγίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια από τον AEA το ασυνεχές στο χώρο των λύσεων μέτωπο Pareto μετά την ολοκλήρωση των 8000 αξιολογήσεων που είχαν οριστεί. Για τη συνάρτηση Rastrigin, και πάλι η σύγκλιση του AMA ήταν καλύτερη από την αντίστοιχη του AEA, ωστόσο η διαφορά τους δεν ήταν τόσο αισθητή όπως στις άλλες δύο περιπτώσεις, λόγω της πολυπλοκότητας της μορφής της συνάρτησης Rastrigin στον 3Δ χώρο, η οποία παρουσίαζε ένα πολύ μεγάλο πλήθος τοπικών ακροτάτων, καθιστώντας την διαδικασία εύρεσης του ολικού ελαχίστου της μια πολύ δύσκολη διαδικασία. Γι' αυτό το λόγο εξάλλου, το όριο των αξιολογήσεων της συνάρτησης Rastrigin ήταν οι 30000.
- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παραμετρική μελέτη που έγινε για διαφορετικούς συνδυασμούς διαστάσεων πλέγματος βάσης και αριθμό επεξεργαστών, τόσο για τον AEA, όσο και για τον AMA, επιβεβαιώνουν την ύπαρξη εξάρτησης των δύο αυτών παραμέτρων που ήταν και ο σκοπός της μελέτης. Παρατηρήθηκε ακόμα ότι η εξάρτηση αυτή γίνεται εντονότερη όσο αυξάνονται οι διαστάσεις του πλέγματος. Το συμπέρασμα που προέκυψε κατά την αναζήτηση βέλτιστου συνδυασμού των δύο παραμέτρων είναι ιδιαίτερα σημαντικό για το συγκεκριμένο AEA (και AMA) που χρησιμοποιήθηκε, καθώς αποδεικνύεται και για τους δύο αλγόριθμους, για συγκεκριμένες διαστάσεις πλέγματος βάσης (δηλαδή πλήθος ατόμων προς αξιολόγηση), υπάρχει ένας μέγιστος δυνατός αριθμός επεξεργαστών που οδηγεί σε αποτελέσματα μεγαλύτερης ακρίβειας. Συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι παρουσιάζουν καλύτερη πορεία σύγκλισης, όταν ισχύει ο εμπειρικός κανόνας:

$$\frac{N_{AGENTS}}{N_{CPUs}} \approx 5$$

Ο λόγος που για πλέγμα συγκεκριμένων διαστάσεων βάσης, η πορεία σύγκλισης του AEA και του AMA ήταν χειρότερη για μεγάλους αριθμούς επεξεργαστών, οφείλεται στον ίδιο το μηχανισμό λειτουργίας του πλέγματος και συγκεκριμένα, στον τρόπο που

καθορίζεται η επιλογή του επόμενου ατόμου που θα σταλεί προς αξιολόγηση, βάσει δηλαδή προτεραιότητας κόστους (cost priority) και ηλικίας (age priority). Αποδείχτηκε ότι τα δύο αυτά μεγέθη διαμορφώνονται καλύτερα όταν η αξιολόγηση των ατόμων γίνεται πιο σταδιακά (δηλαδή όταν αξιολογείται μικρότερος αριθμός ατόμων τη φορά).

Μία ακόμα σημαντική παρατήρηση που έγινε όσον αφορά στον AMA, ήταν ότι για μεγαλύτερους αριθμούς επεξεργαστών, μειώνεται ο αριθμός τοπικών βελτιώσεων που πραγματοποιούνται, με αποτέλεσμα να χειροτερεύει η σύγκλιση του αλγορίθμου. Το γεγονός αυτό συνέβαινε γιατί για ένα απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπως αυτό μιας μαθηματικής συνάρτησης, οι αξιολογήσεις των ατόμων πραγματοποιούνται σε 'κλάσματα του δευτερολέπτου'. Η διαδικασία της τοπικής βελτίωσης σε αυτή την περίπτωση, λειτουργούσε με έναν ετεροχρονισμό σε σχέση με την ταχύτητα που λάμβαναν χώρα οι αξιολογήσεις του ΑΕΑ, με αποτέλεσμα για μεγάλους αριθμούς ατόμων που επιστρέφουν κάθε στιγμή στο πλέγμα (μεγάλο αριθμό επεξεργαστών), η διαδικασία της τοπικής βελτίωσης να μην 'προλαβαίνει' να λειτουργήσει έτσι όπως θα έπρεπε.

- Το πρώτο μηχανολογικό πρόβλημα στο οποίο εφαρμόστηκε ο ΑΕΑ, αφορούσε στο σχεδιασμό βέλτιστης μορφής πτερυγίων δρομέα μοντέλου υδροστροβίλου αξονικής ροής για λειτουργία σε πλέγμα υδροστροβίλων. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα πραγματοποιήθηκε σύγκριση του μετώπου των μη – κυριαρχούμενων λύσεων του ΑΕΑ με το μετώπο των μη – κυριαρχούμενων λύσεων που προκύπτει για έναν ΕΑ, για ίδιες περίπου παραμέτρους πληθυσμού, αριθμό επεξεργαστών και για ανώτατο όριο αξιολογήσεων τις 1500. Από τη σύγκριση των μετώπων προέκυψε ότι οι δύο αλγόριθμοι ήταν μη – συγκρίσιμοι, καθώς κανένα από τα μέλη του μετώπου του ενός αλγορίθμου, δεν κυριαρχούσε σε όλα τα μέλη του μετώπου του άλλου. Ωστόσο, τα δύο μέτωπα καταλάμβαναν διαφορετικές περιοχές στο χώρο των λύσεων. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή προτείνεται η χρήση του ΑΕΑ λόγω της ασύγχρονης φύσης του, καθώς η εφαρμογή παρουσίαζε την εξής ιδιαιτερότητα: εξαιτίας μιας εσωτερικής επαναληπτικής διαδικασίας για την εύρεση των τιμών δύο γωνιών των πτερυγίων που δεν αποτελούσαν κομμάτι της βελτιστοποίησης, ο συνολικός χρόνος αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης, όχι μόνο δεν ήταν σταθερός, αλλά παρουσίαζε πολύ μεγάλες διακυμάνσεις. Συγκεκριμένα, ο ελάχιστος χρόνος ολοκλήρωσης μιας αξιολόγησης που παρατηρήθηκε ήταν περίπου 20 min, ενώ ο μέγιστος ήταν περίπου 270 min. Ως εκ τούτου, η χρήση του ΑΕΑ για το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτέλεσε εξαιρετική επιλογή, καθώς η καθυστέρηση αξιολόγησης μιας υποψήφιας λύσης - γεωμετρίας, δεν επηρέαζε τις υπόλοιπες.
- Τέλος, το δεύτερο θερμο-αεροδυναμικό πρόβλημα αφορούσε στο σχεδιασμό βέλτιστης μορφής και τοποθέτησης δέσμης σωλήνων εναλλάκτη θερμότητας εγκάρσιας και αναμίξιμης ροής. Για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων χρησιμοποιήθηκε και ο ΑΕΑ

και ο AMA, καθότι υπήρχε διαθέσιμο λογισμικό υπολογισμού της παραγωγής των συναρτήσεων στόχων του προβλήματος, με τη μέθοδο των συνεχών συζυγών μεθόδων, γεγονός που κατέστησε τον AMA μια ιδιαίτερα ανταγωνιστική εναλλακτική του ΑΕΑ. Μετά την ολοκλήρωση 300 συνολικά αξιολογήσεων, το μέτωπο που προέκυπτε για τον AMA ήταν καλύτερο σε σχέση με αυτό του ΑΕΑ, ενώ από το διάγραμμα του δείκτη υπερόγκου φάνηκε ξεκάθαρα η υπεροχή του AMA ως προς τον ΑΕΑ. Ακόμα, το μέτωπο των μη – κυριαρχούμενων λύσεων του AMA απλωνόταν περισσότερο στο χώρο των λύσεων απ' ό,τι το μέτωπο του ΑΕΑ, συμπεριλαμβάνοντας έτσι λύσεις με πολύ καλές τιμές για τον ένα ή για τον άλλο στόχο. Όλα τα παραπάνω ωθούν στο συμπέρασμα, ότι ο AMA αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για το μηχανικό που ασχολείται με το σχεδιασμό μορφών στις περιοχές της αερο – υδρο – θερμοδυναμικής, αρκεί να έχει στη διάθεσή του ένα πολυεπεξεργαστικό σύστημα και μια 'γρήγορη' μέθοδο υπολογισμού των παραγώγων των συναρτήσεων στόχων (όπως η συζυγής μέθοδος).

Το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την παρατήρηση ότι, τόσο ο ΑΕΑ όσο και ο AMA που χρησιμοποιήθηκαν εδώ, μπορούν να 'εμπλουτιστούν' με την χρήση μεταπροτύπων (οπότε και μετονομάζονται σε ΑΜΕΑ και ΑΜΑΜΑ αντίστοιχα), όπως και έχει πραγματοποιηθεί στο [38], ωστόσο αυτό θα μπορούσε να αποτελεί κομμάτι μιας επόμενης διπλωματικής εργασίας, ως συνέχεια της παρούσας.

Βιβλιογραφία

- [1] A.Bihlmayer, M.Koleber: *Hydromatrix – the 21st century solution for low head hydropower*. VA TECH HYDRO USA Corporation.
- [2] A.Jameson: *Optimum aerodynamic design using cfd and control theory*. AIAA Paper 95 – 1729, 12th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, San Diego, CA, June 1995.
- [3] A.S.Zymaris, D.I.Papadimitriou, K.C.Giannakoglou, and C.Othmer: *Continuous adjoint approach to the spalart-allmaras turbulence model for incompressible flows*. Computers & Fluids, 38(8):1528–1538, 2009.
- [4] 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*.
- [5] C.Darwin: *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favored races in ths struggle for life*. John Murray,London,UK, 1859.
- [6] C.E.Brennen: *Cavitation and bubble dynamics*. Oxford University Press, 1995.
- [7] D.E.Goldberg: *Genetic algorithms in search, optimization & machine learning*. Addison – Wesley, 1989.
- [8] D.Federici: *Combining genes and memes to speed up evolution*. In Proceedings of the 2003 Congress on Evolutionary Computation, CEC ‘03, Canberra, Australia, 2003. IEEE Press.
- [9] D.I.Papadimitriou and K.C.Giannakoglou: *Total pressure loss minimization in turbomachinery cascades using a new continuous adjoint formulation*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 221(6):865–872, 2007.
- [10] D.I.Papadimitriou and K.C.Giannakoglou: *Direct, adjoint and mixed approaches for the computation of Hessian in airfoil design problems*. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 56(10):1929–1943, 2008.
- [11] E.Alba and M.Tomassini: *Parallelism and evolutionary algorithms*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 2002; 6(5):443-462.

- [12] E.Zitzler, K.Ded, and L.Thiele: *Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results*. Evolutionary Computation, volume 8, pages 173 – 195, 2000.
- [13] E.Zitzler, M.Laumanns, and L.Thiele: *SPEA 2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm*. Technical Report 103, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 2001.
- [14] 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.
- [15] I.C.Kampolis and K.C.Giannakoglou: *A multilevel approach to single- and multiobjective aerodynamic optimization*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 197(33-40):2963–2975, 2008.
- [16] J.H.Holland: *Adaption in natural and artificial systems*. 1975. University of Michigan Press. Second Edition, 1992.
- [17] J.W.Baugh and S.V.Kumar: *Asynchronous genetic algorithms for heterogeneous networks using coarse – grained data flow*. Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO 2003, Chicago, IL, July 2003.
- [18] K.Deb: *Multi – objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons, New York, USA.
- [19] K.Deb, A.Pratap, S.Agarwal, and T.A.Meyarivan: *Fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computing, pages 182 – 197, 2002.
- [20] K.DeJong: *Analysis of the behaviour of a class of genetic adaptive systems*. Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, 1975.
- [21] K.Ku and M.Mark: *Exploring the effects of lamarckian and baldwinian learning in evolving recurrent neural networks*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Indianapolis, USA, April 1997.
- [22] K.Miettinen: *Nonlinear multiobjective optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
- [23] L.Davis: *Handbook of genetic algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [24] <http://www.andritz.com/ANONID653875632C627563/hydro/hhydro-media-new>.
- [25] M.Giacobini, E.Alba, and M.Tomassini: *Selection intensity in asynchronous cellular evolutionary algorithms*. GECCO 2003, LNCS 2723, pp. 955 – 966, 2003.

- [26] M.Nowostawski and R.Poli Parallel genetic algorithm taxonomy.: *Third international conference on knowledge-based intelligent information engineering systemskes 1999*. Adelaide, South Australia, August - September 1999.
- [27] M.W.S.Land: *Evolutionary algorithms with local search for combinatorial optimization*. Ph.D Dissertation, University of California, San Diego, 1998.
- [28] N.Krasnogor: *Studies on the theory and design space of memetic algorithms*. Ph.D. Dissertation, University of the West of England, Bristol, 2002.
- [29] 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*.
- [30] P.Liu, F.Lau, M.J.Lewis, and C.Wang: *A new asynchronous parallel evolutionary algorithm for function optimization*. Parallel Problem Solving from Nature, PPSN VII, Granada, Spain, September 2002.
- [31] P.Moscato: *Memetic algorithms: a short introduction*. McGraw – Hill Company, 1999.
- [32] Q.H.Nguyen, Y.S.Ong, M.H.Lim, and N.Krasnogor: *Adaptive cellular memetic algorithms*. Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [33] R.Dawkins: *The selfish gene*. Oxford University Press, Oxford, 1976.
- [34] R.Hilbert, G.Janiga, R.Baron, and D.Thevenin: *Multi-objective shape optimization of a heat exchanger using parallel genetic algorithms*. International Journal of Heat and Mass Transfer 49 (2006) 2567–2577.
- [35] R.Storn and K.Price: *Differential evolution – a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces*. Technical Report TR – 95 – 012, ICSI, 1995, ftp.icsi.berkeley.edu.
- [36] S.A.Kyriacou, S.Weissenberger, P.Grafenberger, and K.C.Giannakoglou: *Optimization of hydraulic machinery by exploiting previous successful designs*.
- [37] Schoenauer, Z.Michalewicz: *Evolutionary algorithms for constrained parameter optimization problems*. Evolutionary Computation Mechanics 1996; 4:1 – 32.
- [38] V.G.Asouti, I.C.Kampolis, 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.

- [39] 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.
- [40] V.Huang, A.Qin, and K.Ded: *Problem definitions for performance assessment on multi – objective optimization algorithms*. Technical Report, CEC 2007, Special Session on Constrained Real – Parameter Optimization, Singapore, 2007.
- [41] V.Pareto: *Cour’s d’ economie politique professé á l’ univervité de lausanne*. Lausanne, François – Rouge, 1896 – 1897.
- [42] W.E.Hart: *Adaptive global optimization with local search*. Ph.D Dissertation, University of California, San Diego, 1994.
- [43] Y.S.Ong and A.J.Keane: *Meta – lamarckian learning in memetic algorithms*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, volume 8, pages 99 – 110, 2004.
- [44] Z.Michalewicz: *Genetic algorithms + data structures = evolution programs. artificial intelligence*. Berlin, Springer, 1992.
- [45] Α.Ζυμάρης: Συμβολή στη σχεδίαση πτερυγώσεων αξονικών και ακτινικών συμπιεστών μέσω συζυγών τεχνικών. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών.
- [46] Β.Ασούτη: Μέθοδοι αεροδυναμικής ανάλυσης και σχεδιασμού για ροές υψηλών και χαμηλών ταχυτήτων, σε πολυεπεξεργαστικό περιβάλλον. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, 2009.
- [47] Δ.Ε.Παπαντώνης: Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2008.
- [48] Δ.Ε.Παπαντώνης: Υδροδυναμικές Μηχανές Αντλίες - Υδροστροβίλοι, Εκδόσεις Συμεών, Έκδοση 2η.
- [49] Δ.Παπαδημητρίου: Δ. Συζυγείς διατυπώσεις για την ανάλυση – σχεδίαση πτερυγώσεων στροβιλομηχανών και τη βέλτιστη προσαρμογή πλέγματος με *a posteriori* εκτίμηση σφάλματος. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, 2006.
- [50] Ε.Κοντολέοντος: Ανάλυση και βελτιστοποίηση σύνθετων ρευστομηχανικών διατάξεων με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και εξελικτικών αλγορίθμων. Διδακτορική Διατριβή υπό Εξέλιξη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών.

-
- [51] Ι.Καμπόλης: Πολυεπίπεδοι, πολυεπεξεργαστικοί αλγόριθμοι αεροδυναμικής βελτιστοποίησης στις στροβιλομηχανές. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών.
- [52] Κ.Χ.Γιαννάκογλου: Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική, ΕΜΠ, 2005.
- [53] Ξ.Κακάτσιος: Αρχές Μεταφοράς Θερμότητας και Μάζης, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2006.
- [54] Χ.Γεωργοπούλου: Τεχνικές Βελτιστοποίησης για τον προγραμματισμό λειτουργίας αεριο/ατμοστροβιλικών μονάδων και το σχεδιασμό συνιστωσών τους. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, 2009.