



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Ιεραρχικός Ασύγχρονος Δομημένος

Εξελικτικός Αλγόριθμος.

Εφαρμογές στις Στροβιλομηχανές.

Διπλωματική Εργασία

Τέτας Θεοδώρου

Επιβλέπων: Κ. Χ. Γιαννάκογλου

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Ιούλιος 2008

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα Καθηγητή μου Κυριάκο Χ. Γιαννάκογλου, για την υπομονή που επέδειξε στη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας, από την αρχική σύλληψη της ιδέας μέχρι και τα τελικά στάδια ολοκλήρωσής της, για την πρόθυμη ανταπόκρισή του σε όλα τα ερωτήματά μου και κυρίως για τις θεμελιώδεις γνώσεις που μου μετέδωσε όλο αυτό το διάστημα.

Η εργασία αυτή δε θα ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί χωρίς την συμπαράσταση του Καθηγητή μου αλλά και την πολύτιμη βοήθεια των μελών του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΕΘΣ) του ΕΜΠ, καθώς ήταν πάντα πρόθυμοι και διαθέσιμοι να με βοηθήσουν σε ότι χρειαζόμουν, δημιουργώντας ένα άριστο περιβάλλον συνεργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος την υποψήφια διδάκτορα Βέρα Ασούτη για την υπερπολύτιμη βοήθειά της και τις διευκρινήσεις της σχετικά με το λογισμικό του Ασύγχρονου Δομημένου Εξελικτικού Αλγορίθμου (ΑΔΕΑ) που μου παρείχε το ΕΘΣ, από τον οποίο προέκυψε ο Ιεραρχικός Ασύγχρονος Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος (ΙΑΔΕΑ).

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, καθώς και τους κοντινούς μου ανθρώπους για την αμέριστη υποστήριξη και τη συμπαράστασή τους. Ο καθένας με τον τρόπο του και από τη δική του θέση συνέβαλλε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας από τα αρχικά στάδια μέχρι και την ολοκλήρωσή της.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Ιεραρχικός Ασύγχρονος Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος.
Εφαρμογές στις Στροβιλομηχανές.

Διπλωματική Εργασία Τέταρτος Ε. Θεοδώρου

Επιβλέπων: Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
Αθήνα, Ιούλιος 2008

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου βελτιστοποίησης, βασισμένη στους εξελικτικούς αλγορίθμους που επιπλέον προσαρμόζονται και χρησιμοποιούν βέλτιστα το πολυεπεξεργαστικό σύστημα του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΕΘΣ) του ΕΜΠ. Η αναπτυσσόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης είναι γενικής χρήσης αν και εδώ, προφανώς, εστιάζει κυρίως σε προβλήματα βελτιστοποίησης αεροτομών πτερυγίων στροβιλομηχανών. Στο πλαίσιο αυτό, η εργασία αυτή επεκτείνει και εμπλουτίζει προηγηθείσα διπλωματική εργασία με αντικείμενο το λεγόμενο Ασύγχρονο Δομημένο Εξελικτικό Αλγόριθμο (ΑΔΕΑ), όπου η έννοια «δομημένος» αφορά την εξέλιξη των λύσεων που υλοποιείται επί δομημένου πλέγματος. Συγκεκριμένα, εδώ, εμπλουτίζεται ο ΑΔΕΑ με τη δυνατότητα να πραγματοποιεί ιεραρχική βελτιστοποίηση. Κατ' αυτή, άλλοι από τους κόμβους υποστήριξης της εξέλιξης χρησιμοποιούν λογισμικό αξιολόγησης χαμηλού κόστους και, συνεπώς, πρόβλεψης χαμηλής πιστότητας, ενώ άλλοι (ευλόγως λιγότεροι σε πλήθος) αξιολογούνται με ακριβές και μεγάλο υπολογιστικό κόστους λογισμικό. Το κέρδος από τη διαδικασία αυτή έγκειται στην ανίχνευση του χώρου σχεδιασμού με οικονομικό τρόπο και περιορίζοντας επιλεκτικά τον αριθμό αξιολογήσεων με το «ακριβό» λογισμικό. Το γεγονός αυτό επιφέρει σημαντική μείωση του χρόνου εύρεσης της βέλτιστης λύσης. Ο αλγόριθμος υλοποιείται στο πολυεπεξεργαστικό σύστημα του ΕΘΣ με πρωτόκολλο επικοινωνίας το PVM και, στη λογική του ΑΔΕΑ, εξασφαλίζεται η συνεχής απασχόληση όλων των επεξεργαστών καταργώντας την έννοια της γενιάς. Για την πιστοποίηση του Ιεραρχικού ΑΔΕΑ εξετάζονται προβλήματα σχεδιασμού βέλτιστων πτερυγώσεων συμπίεστη ως προς έναν ή περισσότερους στόχους.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING
FLUIDS SECTION
LABORATORY OF THERMAL TURBOMACHINES

***Hierarchical Asynchronous Evolutionary Algorithm with Structured Topology for
Turbomachinery Applications.***

Diploma Thesis

Teta E. Theodorou

Supervisor: K.C. Giannakoglou, Associate Professor of NTUA

Athens, July 2008

The present diploma thesis focuses on the development of a new optimization method based on Evolutionary Algorithms, adapted also to optimally use the multiprocessor system of the Laboratory of Thermal Turbomachines of NTUA. The developed optimization method and tool is generic but, in this diploma thesis, is mainly to solve turbomachinery shape optimization problems. Herein, a recently integrated diploma thesis, which proposed the Asynchronous Evolutionary Algorithm with structured topology, is extended and enriched. The previously existing algorithm is, therefore, enriched with capabilities of carrying out hierarchical optimization. In specific, some of the candidate solutions are evaluated by a software of low cost and low quality (low level evaluation), and some others by a computationally demanding, high fidelity software (high level evaluation). Whether the evaluation of a candidate solution is based on the high or low level tool is determined by its location on the structured topology. The gain from this process lies on the exploration of the space of candidate solutions at low CPU cost and the limited number evaluations on the “expensive” software. Both lead to a noticeable reduction of the design cycle CPU cost. The new algorithm was programmed to run on a multiprocessor system using the PVM communication protocol. Due to the asynchronous character of the new algorithm, there are no idle processors during the evolution and we practically get rid of the notion of generations. For the Hierarchical Asynchronous Evolutionary Algorithm with structured topology to be assessed, designs of optimal compressor blade airfoils, with one or more objectives are examined and presented.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	11
1.1	Δομή της εργασίας.....	13
2	Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι ως Εργαλείο Βελτιστοποίησης.....	15
2.1	Χαρακτηριστικά του ΕΑ.....	17
2.2	Περιγραφή Γενικευμένου ΕΑ.....	19
2.3	Κωδικοποίηση Ελεύθερων Μεταβλητών	24
2.3.1	Δυναδική Κωδικοποίηση.....	25
2.3.2	Πραγματική Κωδικοποίηση.....	26
2.4	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι σε Προβλήματα Πολλών Στόχων.....	27
2.4.1	Μέτωπα Pareto	27
2.4.2	Ο Αλγόριθμος SPEA2.....	30
3	Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος.....	33
3.1	Περιγραφή του ΔΕΑ.....	34
4	Δομημένος ΕΑ και Παράλληλη Επεξεργασία.....	42
4.1	Παραλληλοποίηση του ΔΕΑ.....	43
4.1.1	Βιβλιοθήκη Κατανεμημένης Εργασίας PVM.....	45
4.1.2	Σύγχρονος ΔΕΑ	46
4.1.3	Ασύγχρονος ΔΕΑ	49
5	Ιεραρχικός Ασύγχρονος Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος	54
5.1	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι με χρήση Μεταπροτύπων.....	55
5.2	Περιγραφή του Ιεραρχικού ΑΔΕΑ.....	58
5.2.1	Κατανομή των Υποψήφιων Λύσεων σε δύο Επίπεδα	62
5.2.2	Πλέγμα Γονέων-Τελεστής Επιλογής Γονέων T_{μ}	65
5.2.3	Τελεστές Διασταύρωσης και Μετάλλαξης	66

5.2.4	Ιεραρχικός ΑΔΕΑ σε Προβλήματα Πολλών Στόχων	67
5.3	Ιεραρχικός ΑΔΕΑ και Παράλληλη Επεξεργασία	68
5.4	Επικοινωνία Υψηλού και Χαμηλού Επιπέδου	71
6	Εφαρμογή της μεθόδου-Πιστοποίηση	74
6.1	Βέλτιστος Σχεδιασμός Αεροτομής Πτερυγίου Συμπιεστή	75
6.1.1	Πρόβλημα Βελτιστοποίησης Ενός Στόχου	76
6.1.1.1	Ιεραρχική Αξιολόγηση.....	76
6.1.1.2	Ιεραρχική Παραμετροποίηση	98
6.1.2	Πρόβλημα Βελτιστοποίησης Δύο Στόχων	116
7	Ανακεφαλαίωση-Συμπεράσματα.....	123
8	Βιβλιογραφία.....	129

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΕΘΣ) του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου υπάρχει η δυνατότητα σχεδιασμού αεροδυναμικών σωμάτων και συνιστωσών στροβιλομηχανών με βέλτιστη συμπεριφορά. Για τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται λογισμικό που έχει αναπτυχθεί από τα μέλη του ΕΘΣ, το οποίο βασίζεται σε προχωρημένες μεθόδους σχεδιασμού, αλγορίθμους βελτιστοποίησης (εδώ, βασισμένους σε Εξελικτικούς Αλγορίθμους, ΕΑ) και μεθόδους Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (ΥΔΡ) για την επίλυση της ροής γύρω από τέτοιου είδους σώματα. Με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου, που συνήθως είναι μεγάλος σε αυτού του είδους τις εφαρμογές, χρησιμοποιείται ένα πολυεπεξεργαστικό σύστημα στο οποίο παραλληλοποιείται το λογισμικό βελτιστοποίησης ή/και το λογισμικό αξιολόγησης με τις βιβλιοθήκες υποστήριξης κατανεμημένης εργασίας PVM (Parallel Virtual Machine) και MPI (Message Passing Interface). Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη και η αξιολόγηση ενός νέου αλγορίθμου βελτιστοποίησης, του λεγόμενου Ιεραρχικού Ασύγχρονου Δομημένου ΕΑ που αποτελεί επέκταση μιας

παραλλαγής του κλασικού ΕΑ και, συγκεκριμένα, του λεγόμενου Ασύγχρονου Δομημένου ΕΑ (ΑΔΕΑ) που διαθέτει το ΕΘΣ.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται ο αλγόριθμος αυτός ο οποίος αξιολογείται μέσα από μια σειρά δοκιμών σε προβλήματα σχεδιασμού βέλτιστης αεροτομής ενός ή δύο στόχων. Ο νέος αλγόριθμος προέκυψε από τον ήδη υπάρχοντα ΑΔΕΑ, κατατάσσοντας τα μέλη του πληθυσμού υποψήφιων λύσεων σε δύο επίπεδα, το χαμηλό και το υψηλό. Η βασική ιδέα είναι ότι τα μέλη του υψηλού επιπέδου αξιολογούνται με λογισμικό υψηλής (αποδεκτής) ακρίβειας, ενώ τα μέλη του πληθυσμού που ανήκουν στο χαμηλό επίπεδο αξιολογούνται με ένα λογισμικό μικρότερης ακρίβειας και συνεπώς, μικρότερου υπολογιστικού κόστους.

Η λογική του Δομημένου Εξελικτικού Αλγορίθμου (ΔΕΑ) πηγάζει από τους Κατανεμημένους Εξελικτικούς Αλγόριθμους (ΚΕΑ)¹ [1,2,3]. Σε αυτού του είδους τους εξελικτικούς αλγορίθμους, στον πληθυσμό των υποψήφιων λύσεων επιβάλλεται ορισμένη τοπολογία. Πιο συγκεκριμένα, ο πληθυσμός διατάσσεται στους κόμβους ενός διδιάστατου πλέγματος και με αυτόν τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα ελεγχόμενης διασταύρωσης των ατόμων του πληθυσμού. Η βασική διαφοροποίηση που εισάγεται με την ανάπτυξη του ΔΕΑ είναι ότι ενώ στους ΚΕΑ ένας κόμβος του πλέγματος αντιστοιχεί σε έναν υποπληθυσμό, στον ΔΕΑ κάθε κόμβος του πλέγματος ισοδυναμεί με ένα άτομο του πληθυσμού. Όταν ο αλγόριθμος είναι επιπλέον ιεραρχικός, και συγκεκριμένα δύο επιπέδων, προκαθορισμένοι κόμβοι – άτομα του πληθυσμού – ανήκουν στο υψηλό επίπεδο ή στο χαμηλό επίπεδο. Κάθε φορά πριν πραγματοποιηθούν οι εξελικτικές διαδικασίες του ΕΑ, επιλέγεται ένας μικρός αριθμός ατόμων χαμηλού επιπέδου που αξιολογούνται ξανά με τον ακριβή τρόπο, τον τρόπο αξιολόγησης του υψηλού επιπέδου.

Οι περισσότερες υποσχόμενες υποψήφιες λύσεις από κάθε γειτονιά του πλέγματος αποτελούν τους γονείς, το σύνολο των οποίων δημιουργεί τους νέους απογόνους. Οι γονείς διασταυρώνονται με καθορισμένο τρόπο και όχι εντελώς τυχαίο όπως στους κλασικούς ΕΑ. Ωστόσο, επιτρέπεται και ένα, μικρό συνήθως, ποσοστό εντελώς τυχαίας διασταύρωσης των γονέων καθώς και ένα ποσοστό μετάλλαξης των απογόνων. Με τον τρόπο αυτό, προσομοιώνονται οι αναπαραγωγικές συνήθειες των ειδών που συναντάμε στην πραγματικότητα και μειώνεται ο κίνδυνος εγκλωβισμού

¹ Distributed Evolutionary Algorithms (DEA)

της λύσης σε τοπικό ελάχιστο. Οι απόγονοι τοποθετούνται σε συγκεκριμένους κόμβους πάνω στο πλέγμα και συνεχίζεται η παραπάνω διαδικασία.

Βασική επιδίωξη της παρούσας εργασίας ήταν να βρεθεί ο τρόπος κατανομής των ατόμων του πληθυσμού των υποψήφιων λύσεων στο υψηλό και στο χαμηλό επίπεδο, το ποσοστό αυτών που αξιολογείται ακριβώς σε σχέση με το συνολικό μέγεθος του πληθυσμού καθώς και ο τρόπος επικοινωνίας των δύο επιπέδων που αποτυπώνεται στον αριθμό των ατόμων που επαναξιολογούνται, σε ποιο ακριβώς σημείο του αλγορίθμου θα γίνει αυτό αλλά και η ανάμειξη των δύο επιπέδων κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης των εξελικτικών διεργασιών. Κριτήριο για την εύρεση αυτή αποτέλεσε η καλύτερη συμπεριφορά σύγκλισης του αλγορίθμου σε σύγκριση με τον ήδη υπάρχοντα ΑΔΕΑ του ΕΘΣ. Η ανάπτυξη του Ιεραρχικού ΑΔΕΑ (ΙΑΔΕΑ) έχει σκοπό τη μείωση του χρόνου αναμονής του μηχανικού για ένα σχεδιασμό σε ένα πολυπεξεργαστικό σύστημα.

1.1 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται τα γενικά χαρακτηριστικά των εξελικτικών αλγορίθμων και παρατίθεται η θεωρία της διαδικασίας της εξέλιξης, όπως χρησιμοποιείται στον ΕΑ. Επιπλέον, περιγράφεται ο γενικευμένος ΕΑ καθώς και η θεωρία του μετώπου Pareto που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία προβλημάτων βελτιστοποίησης πολλών στόχων.

Το Κεφάλαιο 3 ασχολείται με τον ΔΕΑ, που έχει αναπτυχθεί σε προηγούμενα διπλωματική εργασία και που χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την ανάπτυξη του νέου αλγορίθμου. Περιγράφονται οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού και οι τελεστές εξέλιξης που εφαρμόζονται.

Στο Κεφάλαιο 4 εξηγείται η ανάγκη της χρήσης παράλληλης επεξεργασίας στους ΕΑ και πως αυτοί προσαρμόζονται ώστε να την υποστηρίζουν. Περιγράφονται τα γενικά χαρακτηριστικά της βιβλιοθήκης κατανεμημένης εργασίας PVM καθώς και οι παραλλαγές που έχουν προκύψει από την παραλληλοποίηση του ΔΕΑ στο ΕΘΣ.

Το Κεφάλαιο 5 περιλαμβάνει εκτενή περιγραφή του ΙΑΔΕΑ. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά του και οι βασικές διαδικασίες που λαμβάνουν μέρος κατά την εφαρμογή του. Επιπλέον, περιγράφεται η εφαρμογή του με τη βοήθεια παράλληλης επεξεργασίας αλλά και η εφαρμογή του σε προβλήματα περισσότερων από έναν στόχων.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του νέου αλγορίθμου σε προβλήματα σχεδιασμού βέλτιστης αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή ενός και δύο στόχων εφαρμόζοντας ιεραρχική αξιολόγηση αλλά και ιεραρχική παραμετροποίηση σε σύγκριση με την εφαρμογή του ΑΔΕΑ στα ίδια προβλήματα. Διερευνάται, με αυτόν τον τρόπο, η ικανότητα του αλγορίθμου να φτάνει τη βέλτιστη λύση με συγκεκριμένο υπολογιστικό κόστος.

Το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει την ανακεφαλαίωση και την εποπτική παρουσίαση της παρούσας εργασίας και, στη συνέχεια, συνοψίζει τα συμπεράσματα που συνάχθηκαν κατά την εκπόνηση της εργασίας, αλλά και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 8 παραθέτεται η χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία.

2 ΟΙ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Με τον όρο Βελτιστοποίηση ορίζεται η διαδικασία μεταβολής των τιμών των παραμέτρων ενός προβλήματος με σκοπό να εντοπιστούν οι τιμές εκείνες οι οποίες ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν μια ή περισσότερες κατάλληλα ορισμένες αντικειμενικές συναρτήσεις, γνωστές και ως συναρτήσεις κόστους ή καταλληλότητας. Η βασικότερη διάκριση στα είδη των μεθόδων βελτιστοποίησης που συναντάται στη βιβλιογραφία είναι η διάκριση σε αιτιοκρατικές² και στοχαστικές³ μεθόδους.

Μια αιτιοκρατική μέθοδος καλείται να υπολογίσει ή να προσεγγίσει τιμές της παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό σημαίνει, πρακτικά, ότι δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια σε κάποιο άλλο πρόβλημα καθώς αλλάζει η αντικειμενική συνάρτηση και απαιτούνται εκτεταμένες επεμβάσεις στο λογισμικό

² Deterministic Methods

³ Stochastic Methods

βελτιστοποίησης. Το γεγονός αυτό στοιχίζει στο μηχανικό-προγραμματιστή σε χρόνο προγραμματισμού της μεθόδου. Ο ρυθμός σύγκλισης των μεθόδων αυτών είναι σχετικά γρήγορος, όμως δημιουργείται ο κίνδυνος εγκλωβισμού της λύσης σε κάποιο τοπικό βέλτιστο και όχι το καθολικό, ανάλογα με το σημείο εκκίνησης. Για το λόγο αυτό, η αλγοριθμική επανεκκίνηση της μεθόδου χρησιμοποιώντας διαφορετική αφετηρία στο χώρο των λύσεων χρησιμοποιείται ως επαλήθευση του εντοπισμού του καθολικού βέλτιστου.

Από την άλλη πλευρά, οι στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιούν στοιχεία τυχαίας ή ακόμα και οργανωμένα τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Οι μέθοδοι αυτές έχουν συνήθως πιο αργό ρυθμό σύγκλισης αλλά το γεγονός αυτό αντισταθμίζεται με το ότι μπορούν να εντοπίσουν το καθολικό ακρότατο ανεξάρτητα από τη λύση ή τις λύσεις με τις οποίες αρχικοποιούνται. Επιπλέον, ένα από τα χαρακτηριστικά τους, που αποτελεί και βασικό τους πλεονέκτημα, είναι η γενικότητα τους, καθώς έχουν τη δυνατότητα να προσαρμοστούν εύκολα για να λυθεί ένα διαφορετικό πρόβλημα.

Ένας από τους κυριότερους εκπροσώπους των στοχαστικών μεθόδων είναι οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (EA)⁴. Οι EA παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς δεν έχουν μαθηματικό υπόβαθρο και προσαρμόζονται εύκολα σε κάθε νέο πρόβλημα αρκεί να υπάρχει προγραμματισμένο λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης. Επιπλέον, ως στοχαστικές μέθοδοι, δεν εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Φυσικά, υιοθετούν και τα μειονεκτήματα των στοχαστικών μεθόδων καθώς ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης απαιτεί συνήθως μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων γεγονός που είναι εμφανές όταν η αξιολόγηση γίνεται με χρονοβόρο λογισμικό (λ.χ. ανάλυση μιας υποψήφιας αεροτομής με κώδικες επίλυσης των εξισώσεων ροής).

Βασικό χαρακτηριστικό των EA είναι ότι χειρίζονται πληθυσμούς υποψήφιων λύσεων⁵ και όχι μια μεμονωμένη λύση σε κάθε επανάληψη, όπως άλλες στοχαστικές μέθοδοι. Παρ' όλο που οι EA αναπτύχθηκαν αρχικά για την επίλυση προβλημάτων ενός στόχου, με κατάλληλες μετατροπές μπορούν εύκολα να αντιμετωπίσουν και προβλήματα πολλών στόχων καθώς χειρίζονται πληθυσμούς ατόμων και δίνουν σύνολα λύσεων. Οι EA είναι υπολογιστικά μοντέλα τα οποία, με χρήση αντίστοιχης

⁴ Evolutionary Algorithms (EA)

⁵ Population-based Methods

με τη φύση διαδικασίας προσαρμογής στο περιβάλλον, επιλύουν προβλήματα. Προσομοιώνουν μερικώς και με απλουστευμένο τρόπο την εξέλιξη των φυσικών πληθυσμών [4], οι οποίοι διατυπώθηκαν αρχικά από Δαρβίνο περίπου το 1960. Σύμφωνα με τη θεωρία του Δαρβίνου, τα άτομα ενός πληθυσμού συναγωνίζονται για την απόκτηση πόρων και για την προσέλευση συντρόφου. Τα επιτυχημένα άτομα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγηθούν σε αναπαραγωγή και να μεταδώσουν τα χαρακτηριστικά τους σε μεγαλύτερο αριθμό απογόνων με την πάροδο των γενεών. Ο συνδυασμός καλών χαρακτηριστικών από διαφορετικούς επιτυχημένους γονείς ενδεχομένως θα παράγει απογόνους με χαρακτηριστικά καλύτερα από αυτά των γονέων. Με τον τρόπο αυτόν, οι φυσικοί πληθυσμοί εξελίσσονται και προσαρμόζονται στο εκάστοτε περιβάλλον.

Στους ΕΑ κάθε άτομο του πληθυσμού διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα με την αντιστοίχιση ενός μοναδικού συνόλου τιμών των παραμέτρων του προβλήματος. Σε κάθε άτομο αντιστοιχίζεται μια τιμή κόστους ή καταλληλότητας και σύμφωνα με αυτή καθορίζεται η πιθανότητα του συγκεκριμένου ατόμου για επιβίωση και αναπαραγωγή. Με τον όρο αναπαραγωγή εννοούμε την αλγοριθμική διαδικασία με την οποία δημιουργείται μια νέα υποψήφια λύση από μια ή περισσότερες υπάρχουσες. Η αναπαραγωγή αλλά και οι υπόλοιπες διαδικασίες μίμησης της φυσικής προσαρμογής των οργανισμών στο περιβάλλον (επιλογή γονέων, μετάλλαξη, ελιτισμός), υλοποιείται με τη χρήση του κατάλληλου αλγοριθμικού τελεστή.

2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΕΑ

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές του ΕΑ, όπου σε κάθε μια από αυτές θεωρούνται διαφορετικά στοιχεία του αλγορίθμου ως καθοριστικά για την επιτυχή εξέλιξη. Η αυστηρή ταξινόμηση των ΕΑ στερείται νοήματος καθώς οι σύγχρονοι ΕΑ αλληλοδανείζονται στοιχεία όπως ο τρόπος κωδικοποίησης ή/και οι εξελικτικοί τελεστές. Οι κατηγορίες οι οποίες είναι περισσότερο διαδεδομένες είναι οι Γενετικοί

Αλγόριθμοι (ΓΑ)⁶ [5,6], οι Εξελικτικές Στρατηγικές (ΕΣ)⁷ [7,8,9], ο Γενετικός Προγραμματισμός (ΓΠ)⁸ [10,11] και ο Εξελικτικός Προγραμματισμός (ΕΠ)⁹ [12].

Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ώστε να χαρακτηριστεί εξελικτικός είναι τα εξής:

- ✓ Να χρησιμοποιεί πληθυσμούς υποψήφιων λύσεων τα οποία εξελίσσονται συγχρόνως, αντί μεμονωμένων ατόμων.
- ✓ Η εξέλιξη του πληθυσμού από γενιά σε γενιά να καθορίζεται από την τιμή καταλληλότητας (μεγιστοποίηση) ή τιμή κόστους (ελαχιστοποίηση), με βάση την κατάλληλα ορισμένη αντικειμενική συνάρτηση.
- ✓ Να λαμβάνει χώρα δυναμική διαδοχή πληθυσμών, με τη δημιουργία νέων ατόμων και εξαφάνιση άλλων με βάση την τιμή κόστους ή καταλληλότητας.
- ✓ Κατά την εξέλιξη από γενιά σε γενιά, να υπάρχει κληρονομικότητα χαρακτηριστικών από τους γονείς στους απογόνους, αλλά και στοχαστική εμφάνιση νέων χαρακτηριστικών.

Οι ΕΑ δεν θέτουν περιορισμούς στην αντικειμενική συνάρτηση και δεν είναι απαραίτητο να υφίσταται τιμή της για κάθε υποψήφια λύση. Αδυναμία πρόσδοσης τιμής στην αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να συμβεί όταν για παράδειγμα, σε αεροδυναμικές εφαρμογές, δεν συγκλίνει ο επιλύτης της ροής. Τέτοιες περιπτώσεις επιτρέπονται από τον αλγόριθμο, αρκεί να μην συμβαίνουν σε ολόκληρο τον τρέχοντα πληθυσμό υποψήφιων λύσεων. Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, ο οργανωμένα τυχαίος τρόπος σάρωσης του χώρου των λύσεων συμβάλλει στην αποφυγή εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστα, δεν εγγυάται, ωστόσο, την ανεύρεση του καθολικού ακρότατου. Η πιθανότητα εντοπισμού του καθολικού αυτού ακρότατου αυξάνει καθώς αυξάνει ο αριθμός των αξιολογήσεων των υποψήφιων λύσεων, δηλαδή με την αύξηση του υπολογιστικού χρόνου.

Σημαντικό χαρακτηριστικό των ΕΑ είναι η ευκολία με την οποία μπορούν να παραλληλοποιηθούν και να εφαρμοστούν με τη βοήθεια ενός πολυεπεξεργαστικού συστήματος. Η δυνατότητα αυτή παραλληλοποίησης τέτοιων αλγορίθμων είναι

⁶ Genetic Algorithms (GA)

⁷ Evolutionary Strategies (ES)

⁸ Genetic Programming (GP)

⁹ Evolutionary Programming (EP)

εγγενής, καθώς κάθε μέλος του πληθυσμού μπορεί να αξιολογείται ανεξάρτητα από τα άλλα σε έναν παράλληλο υπολογιστή ή σε ένα δίκτυο. Έτσι, μειώνεται ο χρόνος αναμονής του μηχανικού και αντισταθμίζεται, εν μέρει, το γεγονός ότι ο ρυθμός σύγκλισης είναι λιγότερο γρήγορος απ' ό,τι στις αιτιοκρατικές μεθόδους. Η παραλληλοποίηση μιας μεθόδου είναι πολύ χρήσιμη και έχει πραγματοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟΥ ΕΑ

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται ένας Γενικευμένος Εξελικτικός Αλγόριθμος. Τον διέπουν μεικτά χαρακτηριστικά που έχουν ληφθεί από διάφορες κατηγορίες των ΕΑ και αποτελεί τη βάση για το λογισμικό που αναπτύχθηκε εδώ. Κατά τη βασική διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης λύσης, ένας πληθυσμός μ υποψήφιων λύσεων (γονείς) εξελίσσεται στον πληθυσμό των λ απογόνων. Αυτοί οι απόγονοι είναι οι νέες λύσεις που προκύπτουν από τους μ γονείς, έχοντας, ενδεχομένως, καλύτερα χαρακτηριστικά. Από τους λ απογόνους, με κριτήριο την καταλληλότητα τους, επιλέγονται οι μ γονείς της επόμενης γενιάς. Αυτό συνεχίζεται, γενιά με γενιά, μέχρι την ικανοποίηση ενός κριτηρίου σύγκλισης, το οποίο μπορεί να είναι:

- ✓ Η μη εύρεση καινούριας λύσης για δεδομένο αριθμό αξιολογήσεων ή γενεών.
- ✓ Η ομογενοποίηση του πληθυσμού.
- ✓ Η εξάντληση του υπολογιστικού χρόνου, του μέγιστου αριθμού αξιολογήσεων ή του μέγιστου αριθμού γενεών που επέτρεπε ο χρήστης
- ✓ Επίτευξη της επιθυμητής τιμής καταλληλότητας/κόστους.

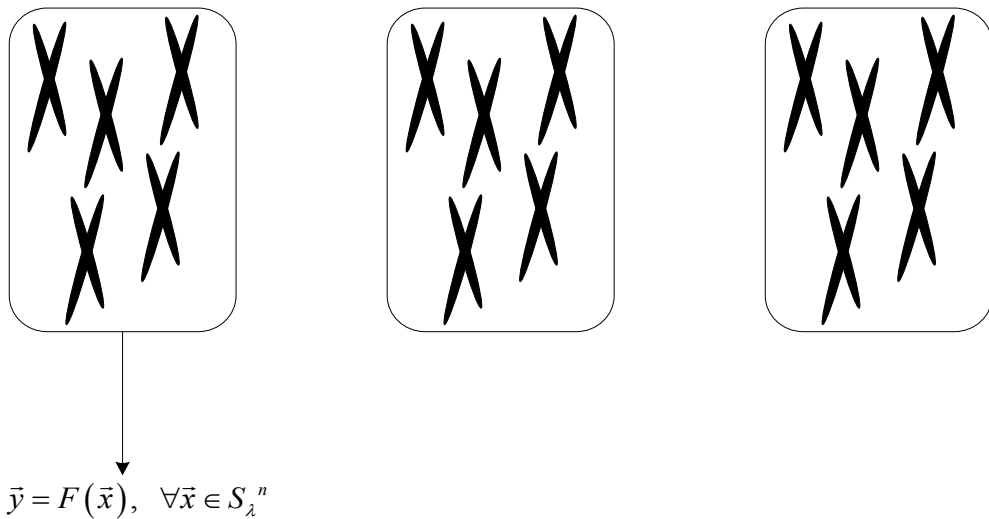
Σε κάθε γενιά n του αλγορίθμου θεωρούνται ότι υπάρχουν τρία διακριτά σύνολα ατόμων, το σύνολο των γονέων, S_{μ}^n , μεγέθους μ , των απογόνων, S_{λ}^n , μεγέθους λ και των επίλεκτων ή ελίτ ατόμων, S_e^n , από το οποίο θα προκύψει η λύση μετά τον τερματισμό του αλγορίθμου. Αρχικά επιλέγονται οι βασικές παράμετροι της μεθόδου, δηλαδή το μέγεθος του πληθυσμού των απογόνων καθώς και των γονέων, λ και μ , και τίθεται $n=0$ αρχικοποιώντας τον αριθμό των γενεών. Κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου, τα σύνολα S_{μ}^n και S_e^n είναι κενά ενώ δημιουργούνται λ τυχαία άτομα,

τα οποία αποτελούν το σύνολο των απογόνων της μηδενικής γενιάς, S_λ^0 . Στη συνέχεια ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- i. Αξιολογούνται τα λ άτομα του συνόλου S_λ^n με το εκάστοτε λογισμικό αξιολόγησης (Σχήμα 2.2.1).

$$\bar{y} = F(\bar{x}), \quad \forall \bar{x} \in S_\lambda^n$$

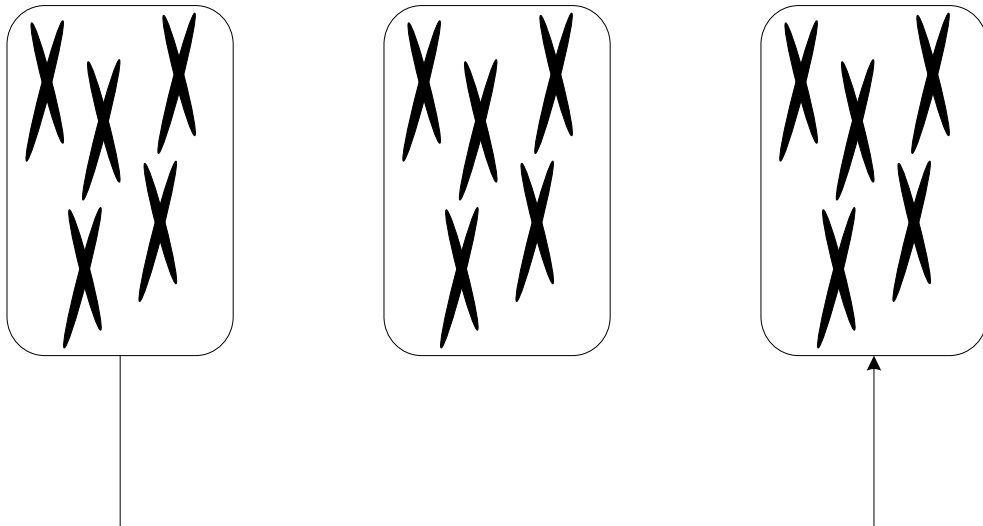
Στην παραπάνω εξίσωση το διάνυσμα $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ απεικονίζει το διάνυσμα των μεταβλητών βελτιστοποίησης, το $\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_K)$ είναι το διάνυσμα τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης και το $F(\bar{x}): \mathbb{R}^M \rightarrow \mathbb{R}^K$ περιγράφει τη διαδικασία αξιολόγησης.



2.2.1 Αξιολόγηση του συνόλου των απογόνων

- ii. Εφαρμόζεται ο τελεστής ελιτισμού, T_e , ο οποίος ανανεώνει το σύνολο των επίλεκτων με νέα άτομα από το σύνολο των απογόνων και διαγράφει όσα δεν ανήκουν πια σε αυτό (Σχήμα 2.2.2):

$$S_{e^*}^{n+1} = T_e(S_\lambda^n, S_e^n)$$

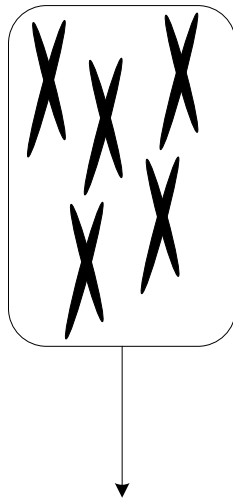


2.2.2 Εφαρμογή του τελεστή Ελιτισμού T_e

Σε αυτό το σημείο εφαρμόζεται προαιρετικά ο τελεστής αραιώσης, T_t , ο οποίος περιορίζει τον αριθμό των ατόμων του $S_{e^*}^{n+1}$ σε περίπτωση που ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο, από το χρήστη, όριο e_{max} (Σχήμα 2.2.3).

S_{λ}^n

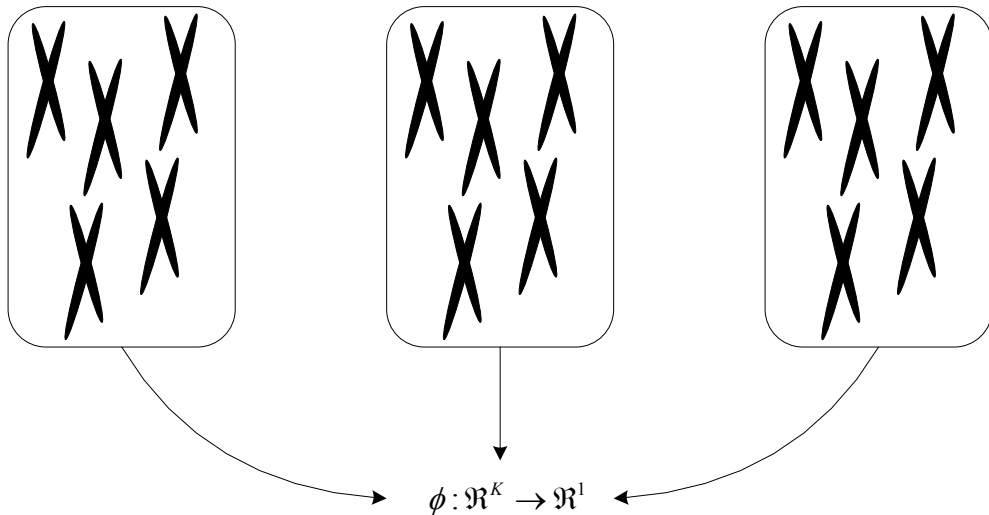
$$S_e^{n+1} = \begin{cases} S_{e^*}^{n+1}, e^* \leq e_{max} \\ T_t(S_{e^*}^{n+1}), e^* > e_{max} \end{cases}$$



2.2.3 Εφαρμογή του τελεστή αραιώσης T_t

iii. Πραγματοποιείται υπολογισμός της τιμής καταλληλότητας ή της τιμής κόστους για κάθε ένα από τα άτομα των τριών συνόλων χρησιμοποιώντας τις τιμές των K αντικειμενικών συναρτήσεων. Σε προβλήματα ενός στόχου ($K=1$), η τιμή καταλληλότητας ταυτίζεται συνήθως με την τιμή της μοναδικής αντικειμενικής συνάρτησης. Στις περιπτώσεις προβλημάτων πολλαπλών στόχων, σε κάθε άτομο αντιστοιχίζεται μια τιμή καταλληλότητας μέσω κατάλληλης μεθόδου, η οποία θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα (Σχήμα 2.2.4).

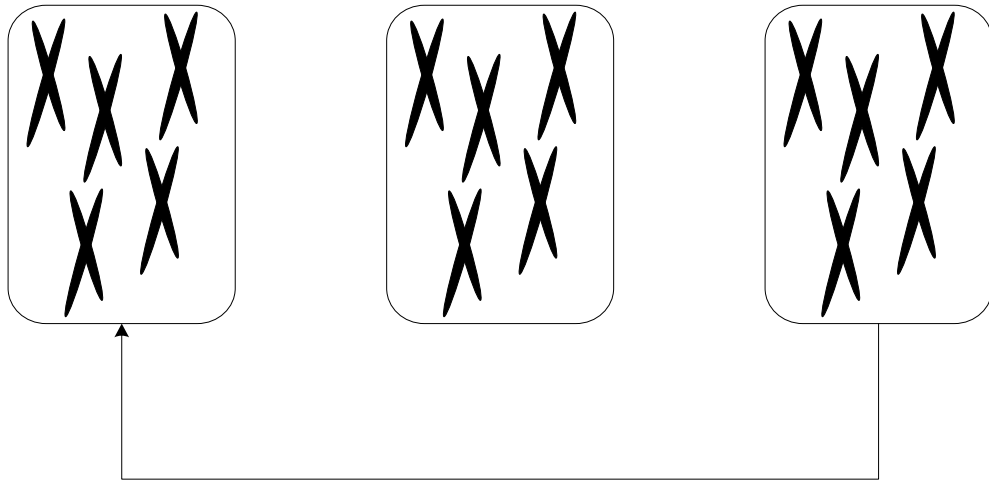
$$\phi(\bar{y}) = \phi(F(\bar{x})), \phi: \mathfrak{R}^K \rightarrow \mathfrak{R}^1, \forall \bar{x} \in (S_\lambda^n \cup S_\mu^n \cup S_e^n)$$



2.2.4 Υπολογισμός τιμής καταλληλότητας/κόστους

iv. Εφαρμόζεται ο τελεστής ελιτισμού, T_{e2} , για να μεταφερθούν τα άτομα από το ανανεωμένο σύνολο των επίλεκτων, S_e^{n+1} , στο σύνολο των απογόνων, S_λ^n . Τα νέα άτομα αντικαθιστούν συνήθως τα χειρότερα από το σύνολο των απογόνων ή κάποια τυχαία έτσι ώστε να μείνει σταθερό το μέγεθος του πληθυσμού των απογόνων (Σχήμα 2.2.5).

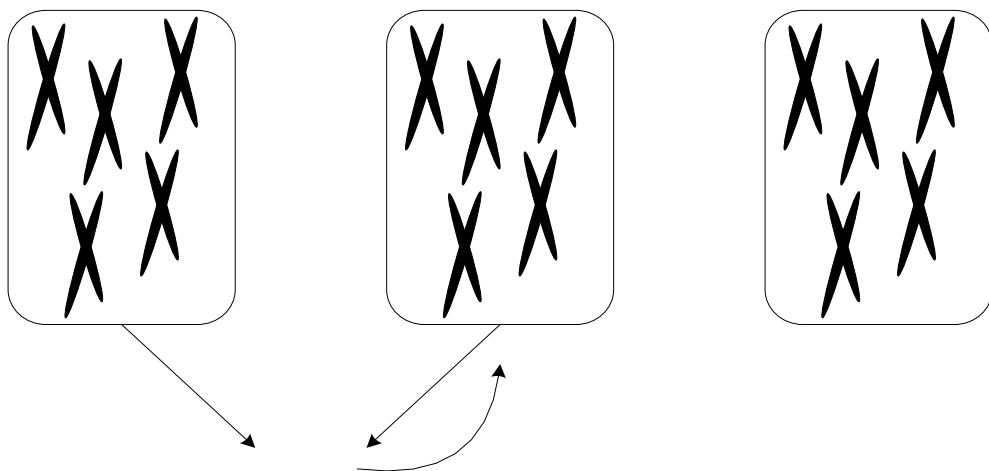
$$S_\lambda^n = T_{e2}(S_\lambda^n \cup S_e^{n+1})$$



2.2.5 Εφαρμογή του τελεστή ελιτισμού T_{e2}

- v. Εφαρμόζεται ο τελεστής επιλογής γονέων, $S_{\mu}^n \leftarrow S_{\mu}^{n+1}$, ο οποίος ανανεώνει το σύνολο των γονέων, από το σύνολο των απογόνων S_{λ}^n σε αυτό το σημείο γίνεται έλεγχος του μέγιστου αριθμού γενεών k που μπορεί να ζήσει ένα άτομο ώστε να διαγραφούν εκείνα που τον έχουν υπερβεί. Ο τελεστής επιλογής γονέων δίνει ευκαιρίες αναπαραγωγής και σε τυχαία επιλεγόμενα άτομα από το σύνολο των απογόνων και των επίλεκτων, με μικρή ωστόσο πιθανότητα (Σχήμα 2.2 β).

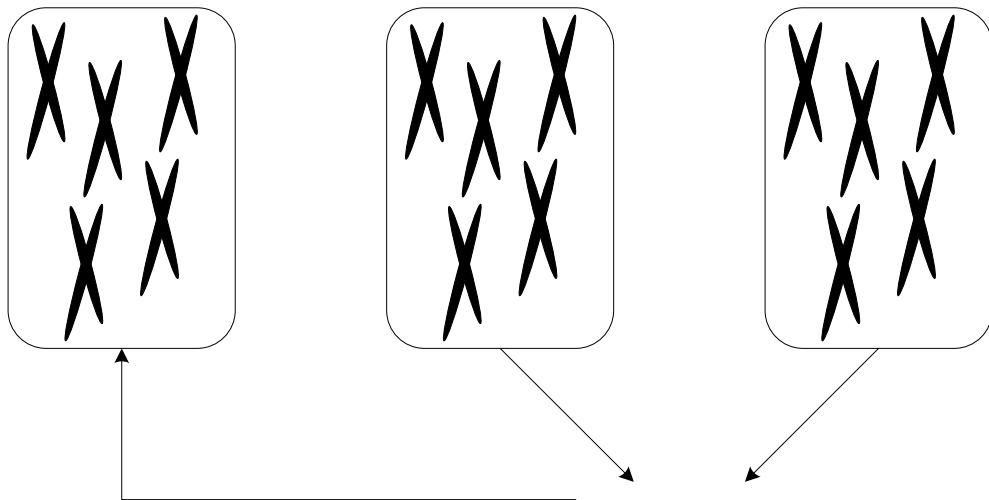
$$S_{\mu}^{n+1} = T_{\mu}(S_{\mu}^n \cup S_{\lambda}^n)$$



2.2.6 Εφαρμογή του τελεστή επιλογής γονέων T_{μ}

- vi. Πραγματοποιείται η αναπαραγωγή κατά την οποία δημιουργείται το σύνολο των απογόνων της επόμενης γενιάς $S_\lambda^n \leftarrow S_\lambda^{n+1}$. Για τη δημιουργία καθενός από τους λ απογόνους, χρησιμοποιούνται ρ γονείς από το σύνολο των γονέων ή αυτό των επίλεκτων και εφαρμόζεται ο τελεστής διασταύρωσης, T_r . Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο τελεστής μετάλλαξης, T_m , και έπειτα το νέο άτομο τοποθετείται στο ανανεωμένο σύνολο των απογόνων S_λ^{n+1} (Σχήμα 2.2.7).

$$S_\lambda^{n+1} = T_m \left(T_r \left(S_\mu^{n+1} \cup S_e^{n+1} \right) \right)$$



2.2.7 Κύκλος Αναπαραγωγής

- vii. Αυξάνεται ο δείκτης των γενεών $n \leftarrow n+1$ και ελέγχεται η ικανοποίηση των κριτηρίων σύγκλισης. Εάν ικανοποιείται έστω και ένα από τα κριτήρια που αναφέρθηκαν νωρίτερα, τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται, διαφορετικά σχηματίζεται μια νέα γενιά.

2.3 ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται οι τρόποι με τους οποίους αναπαριστώνται οι μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης (ελεύθερες μεταβλητές ή μεταβλητές

σχεδιασμού). Οι περισσότεροι διαδεδομένοι, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τρόποι αναπαράστασης των μεταβλητών σχεδιασμού είναι η δυαδική και η πραγματική κωδικοποίηση.

2.3.1 ΔΥΑΔΙΚΗ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

Η δυαδική κωδικοποίηση συναντάται στους κλασικούς Γενετικούς Αλγορίθμους (ΓΑ) και αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτών. Έστω ότι $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_N)$ είναι το διάνυσμα των ελεύθερων μεταβλητών. Κατά τη διαδικασία της κωδικοποίησης αυτής, απαιτείται ο καθορισμός ενός κατώτατου ορίου, U_m , και ενός ανώτατου ορίου, L_m , για κάθε συνιστώσα x_m του διανύσματος \vec{x} , η οποία αντιστοιχίζεται σε ένα πλήθος δυαδικών ψηφίων b_m . Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερο είναι το b_m , τόσο περισσότερες τιμές μπορεί να πάρει η μεταβλητή και επομένως το μέγεθός του καθορίζει την ακρίβεια διακριτοποίησης της μεταβλητής x_m . Έτσι, η διακριτική ικανότητα της κάθε μεταβλητής x_m , είναι:

$$R = \frac{U_m - L_m}{2^{b_m} - 1}$$

Η συνένωση των δυαδικών ψηφίων όλων των μεταβλητών δημιουργεί την ενιαία δυαδική συστοιχία, η οποία σύμφωνα με την ορολογία των ΓΑ αποτελεί το χρωμόσωμα ενός ατόμου. Για παράδειγμα, αν $N = 3$ και $b_1 = 5$, $b_2 = 7$, $b_3 = 6$, ένα χρωμόσωμα θα μπορούσε να είναι το:

$$\underbrace{101101010101100010}_{x_1} \underbrace{}_{x_2} \underbrace{}_{x_3}$$

Η τιμή της μεταβλητής x_m δίνεται από τη σχέση:

$$x_m = L_m + \frac{U_m - L_m}{2^{b_m} - 1} \cdot \sum_{i=1}^{b_m} (2^{i-1} \cdot d_{m,i})$$

όπου με $d_{m,i}$ συμβολίζεται το $i = 1, 2, \dots, b_m$ ψηφίο της μεταβλητής x_m .

Στη δυαδική κωδικοποίηση υπάρχει ο κίνδυνος η αναπαράσταση μιας τιμής εκ των ελεύθερων μεταβλητών να διαφέρει σημαντικά σε σχέση με την αναπαράσταση της αμέσως επόμενης τιμής. Σε περίπτωση που η βέλτιστη λύση μιας μεταβλητής βρίσκεται μεταξύ δύο τέτοιων τιμών, τότε ενδεχομένως να μειωθεί σημαντικά ο ρυθμός σύγκλισης κατά τα τελικά στάδια του αλγορίθμου. Για αποφυγή τέτοιου είδους προβλημάτων, χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Gray [6], ο οποίος εξασφαλίζει ότι δύο συνεχόμενες αναπαραστάσεις μιας μεταβλητής διαφέρουν κατά ένα δυαδικό ψηφίο.

2.3.2 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ

Η πραγματική κωδικοποίηση χαρακτηρίζει κυρίως τις Εξελικτικές Στρατηγικές (ΕΣ). Στη περίπτωση αυτή, η διαχείριση των μεταβλητών γίνεται απευθείας από το διάνυμα των μεταβλητών βελτιστοποίησης με χρήση παραμέτρων εξέλιξης, σε αντίθεση με τη δυαδική κωδικοποίηση. Οι τελεστές εξέλιξης είναι διαφορετικοί από αυτούς που χρησιμοποιούνται στη δυαδική κωδικοποίηση. Επιπλέον, τα όρια των μεταβλητών U_m και L_m χρησιμοποιούνται μόνο κατά τη δημιουργία του αρχικού συνόλου απογόνων και στη συνέχεια μπορούν να μεταβληθούν εκτός και αν περιορίζονται από τους τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης.

Στην κωδικοποίηση με χρήση παραμέτρων εξέλιξης, στο διάνυμα κάθε ατόμου περιλαμβάνει, εκτός από τις μεταβλητές σχεδιασμού, και ένα σύνολο τιμών, τις παραμέτρους εξέλιξης, ισάριθμες με τις μεταβλητές σχεδιασμού:

$$(x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_N, \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m, \dots, \pi_N)$$

Αυτές προσαρμόζονται δυναμικά και επηρεάζουν τον τρόπο λειτουργίας των τελεστών διασταύρωσης και μετάλλαξης σε κάθε υποψήφια λύση [13]. Συνήθως οι παράμετροι εξέλιξης ορίζονται ως τυπικές αποκλίσεις των μεταβλητών σχεδιασμού και λαμβάνονται υπόψη κατά την εφαρμογή του τελεστή μετάλλαξης.

Αναφέρεται ότι στη βιβλιογραφία επικρατούν αντικρουόμενες απόψεις ως προς την υπεροχή κάποιας κωδικοποίησης έναντι των υπολοίπων. Σε κάποιες

βιβλιογραφίες [5], προτείνεται η δυαδική κωδικοποίηση καθώς διαθέτει το μεγαλύτερο αριθμό σχημάτων ανά γράμμα (επιλογή μικρότερης δυνατής αλφαβήτου). Σε κάποιες άλλες [6,14], θεωρείται ότι η πραγματική κωδικοποίηση υπερτερεί διότι αποτελεί φυσική αναπαράσταση των μεταβλητών βελτιστοποίησης. Το θέμα της σύγκρισης είναι ακόμα ανοικτό αν και δεν φαίνεται να παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη σύγχρονη βιβλιογραφία.

Σημειώνουμε ότι στον Ιεραρχικό ΑΔΕΑ που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται αποκλειστικά η δυαδική κωδικοποίηση. Ωστόσο, συνοπτικά αναφέρθηκε, για λόγους πληρότητας, και η πραγματική κωδικοποίηση.

2.4 ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΩΝ ΣΤΟΧΩΝ

Όπως έχει αναφερθεί στην αρχή του κεφαλαίου, οι ΕΑ αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης και με περισσότερους από έναν στόχους, οι οποίοι συνήθως είναι αντικρουόμενοι, καθώς διαχειρίζονται ταυτόχρονα πλήθος υποψήφιων λύσεων και όχι μεμονωμένα άτομα. Στη συνέχεια αναφέρεται η βασική αρχή με βάση την οποία μπορεί εύκολα να μετασχηματισθεί ο ΕΑ που λειτουργεί με ένα στόχο ($\min \vec{F}(\vec{x}), \vec{F} : \mathcal{R}^N \rightarrow \mathcal{R}^1$), ώστε να επιλύει και προβλήματα M στόχων ($\min \vec{F}(\vec{x}), \vec{F} : \mathcal{R}^N \rightarrow \mathcal{R}^M$).

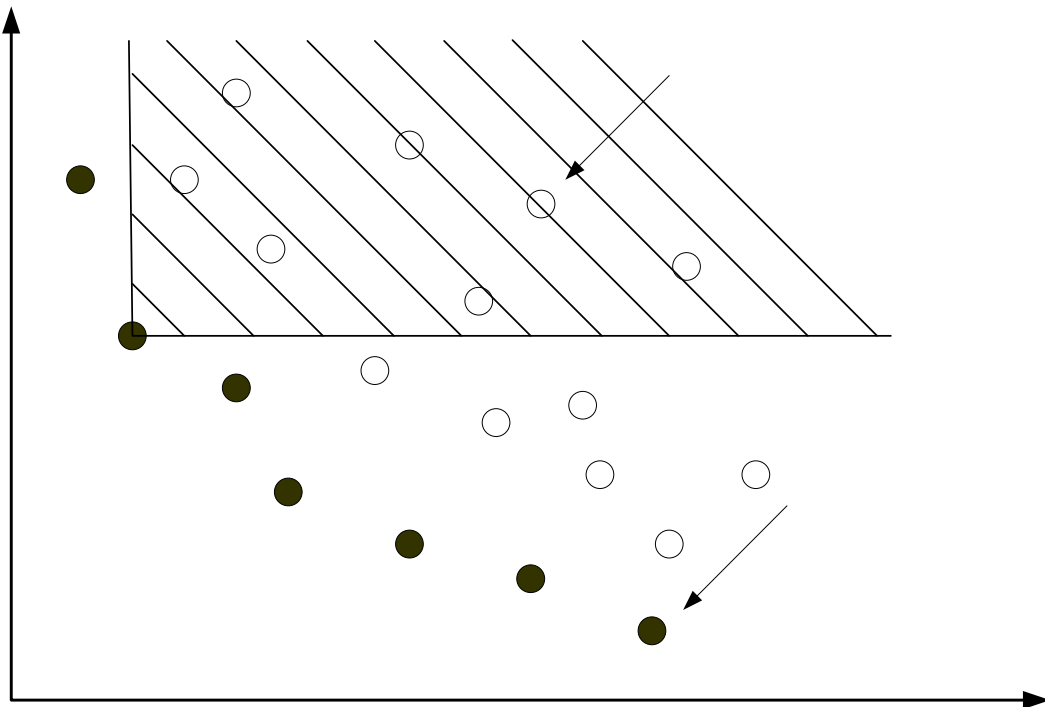
2.4.1 ΜΕΤΩΠΙΑ PARETO

Την βασική ιδέα για την προσαρμογή του αλγορίθμου αποτελεί η έννοια της κυριαρχίας κατά Pareto και η συναφής έννοια του μετώπου Pareto. Θα αναφερθούν παρακάτω ο ορισμός της κυριαρχίας κατά Pareto και της βέλτιστης κατά Pareto λύσης. Έστω ότι $\vec{F}(\vec{x}) = (\vec{F}_1(\vec{x}), \vec{F}_2(\vec{x}), \dots, \vec{F}_m(\vec{x}), \dots, \vec{F}_M(\vec{x}))$ είναι το διάνυσμα των M στόχων τότε:

Η λύση $\vec{x} \in \Omega$ ($\Omega \subset \mathbb{R}^N$) *κυριαρχεί* της λύσης $\vec{y} \in \Omega$, και αυτό θα συμβολίζεται με $\vec{x} \prec \vec{y}$, όταν και μόνο όταν ισχύει ότι $F_m(\vec{x}) \leq F_m(\vec{y})$ για όλους τους στόχους ($m = 1, \dots, M$) και συγχρόνως, υπάρχει ένας τουλάχιστον στόχος k από αυτούς για τον οποίο η τελευταία σχέση ισχύει ως ανισότητα μόνο ($F_k(\vec{x}) < F_k(\vec{y})$).

Το διάνυσμα $\vec{x} \in \Omega$ ($\Omega \subset \mathbb{R}^N$) αποτελεί *κατά Pareto βέλτιστη λύση* του προβλήματος ελαχιστοποίησης της $\vec{F} : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^M$ αν και μόνο αν δεν υπάρχει άλλη λύση $\vec{y} \in \Omega$ η οποία να κυριαρχεί της \vec{x} .

Το σύνολο των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων ορίζεται ως μέτωπο των κατά Pareto βέλτιστων λύσεων ή απλά μέτωπο Pareto¹⁰. Σχηματικά οι παραπάνω ορισμοί φαίνονται παρακάτω για πρόβλημα ελαχιστοποίησης δύο στόχων:



2.4.1 Μέτωπο Pareto σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης 2 στόχων

¹⁰ Optimal Pareto Front or Pareto Front

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται και ένας εποπτικός τρόπος εντοπισμού των ατόμων που κυριαρχούνται από μία λύση, και άρα δεν ανήκουν στο μέτωπο Pareto. Ορίζεται ένα βοηθητικό σύστημα συντεταγμένων, παράλληλα με το κύριο σύστημα, με αρχή μία λύση. Όσα άτομα βρίσκονται στο πρώτο τεταρτημόριο του βοηθητικού συστήματος κυριαρχούνται από τη λύση αυτή.

Δύο μέλη λύσεις ενός μετώπου Pareto δεν είναι δυνατό να συγκριθούν μεταξύ τους. Γενικά, σε ένα πρόβλημα δύο στόχων αναμένεται η μια λύση να υπερτερεί ως προς τον ένα στόχο και να υστερεί ως προς τον άλλο, συγκριτικά με την άλλη που συμπεριφέρεται αντιστρόφως. Γι' αυτό το λόγο, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που στηρίζονται στην ιδέα του μετώπου Pareto δεν υπολογίζουν τελικά μια λύση αλλά πολλαπλές λύσεις που σχηματίζουν ένα μέτωπο Pareto. Οι λύσεις αυτές, προφανώς, δεν κυριαρχούνται από καμία «γνωστή» λύση και ονομάζονται μη-κυριαρχούμενες λύσεις (nondominated solutions). Μια από τις βέλτιστες κατά Pareto λύσεις θα επιλεγεί ως βέλτιστη ανάλογα με τις απαιτήσεις του μηχανικού αλλά και τη φύση του προβλήματος.

Για να αποδοθεί, λοιπόν, τιμή καταλληλότητας σε κάθε υποψήφια λύση, διαδικασία που ακολουθείται και στα μονοπαραμετρικά προβλήματα, σχηματίζεται το μέτωπο Pareto, με βάση τους παραπάνω ορισμούς, και αποδίδεται μια κοινή βαθμολογία σε όλα τα άτομα που ανήκουν σε αυτό. Στη συνέχεια, διαγράφεται το μέτωπο αυτό και σχηματίζεται το αμέσως επόμενο, στα άτομα του οποίου αποδίδεται επίσης κοινή βαθμολογία και ίση με τον αριθμό των μετώπων που έχουν διαγραφεί. Κατά συνέπεια, αποδίδεται τιμή καταλληλότητας σε όλα τα μέλη του πληθυσμού, η οποία είναι κοινή για τα άτομα που ανήκουν στο ίδιο μέτωπο Pareto. Αυτή η απλή μέθοδος απόδοσης τιμής καταλληλότητας είναι γνωστή ως κατάταξη κατά μέτωπα¹¹. Υπάρχει δυνατότητα να αποδοθεί διαφορετική βαθμολογία στα άτομα του ίδιου μετώπου αν ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως η απόσταση ενός ατόμου από τα εγγύτερά του, ή και να καθοριστεί η ποιότητα του μετώπου με βάση τη διασπορά των ατόμων που το απαρτίζουν ή/και το εύρος τιμών που καλύπτει στο χώρο των λύσεων. Ενδεικτικά αναφέρονται εδώ οι περισσότεροι γνωστές μέθοδοι NPGA, NSGA, NSGA II, SPEA, SPEA2, WDA, GDA από τις βιβλιογραφικές αναφορές [15,16,17,18].

¹¹ Front Ranking

Στα προβλήματα πολλών στόχων που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SPEA2¹² [18], η οποία και περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

2.4.2 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ SPEA2

Ο αλγόριθμος SPEA2 χρησιμοποιείται με σκοπό να αποφευχθεί η κατάσταση όπου κάποιες από τις υποψήφιες λύσεις κυριαρχούνται από περισσότερα από ένα άτομα που έχουν πανομοιότυπη τιμή καταλληλότητας. Έτσι, στον αλγόριθμο αυτό, κατά την απόδοση τιμής καταλληλότητας σε κάθε άτομο, λαμβάνονται υπόψη οι μη-κυριαρχούμενες αλλά και οι κυριαρχούμενες λύσεις του πληθυσμού. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε μέλος του μετώπου Pareto (\bar{P}_t), μεγέθους \bar{N} , αλλά σε όλα τα μέλη του πληθυσμού (P_t), μεγέθους N , αντιστοιχίζεται μια τιμή που αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ατόμων στα οποία κυριαρχεί η κάθε μια.

$$S(i) = |\{j | j \in (\bar{P}_t \cup P_t) \wedge i \succ j\}|$$

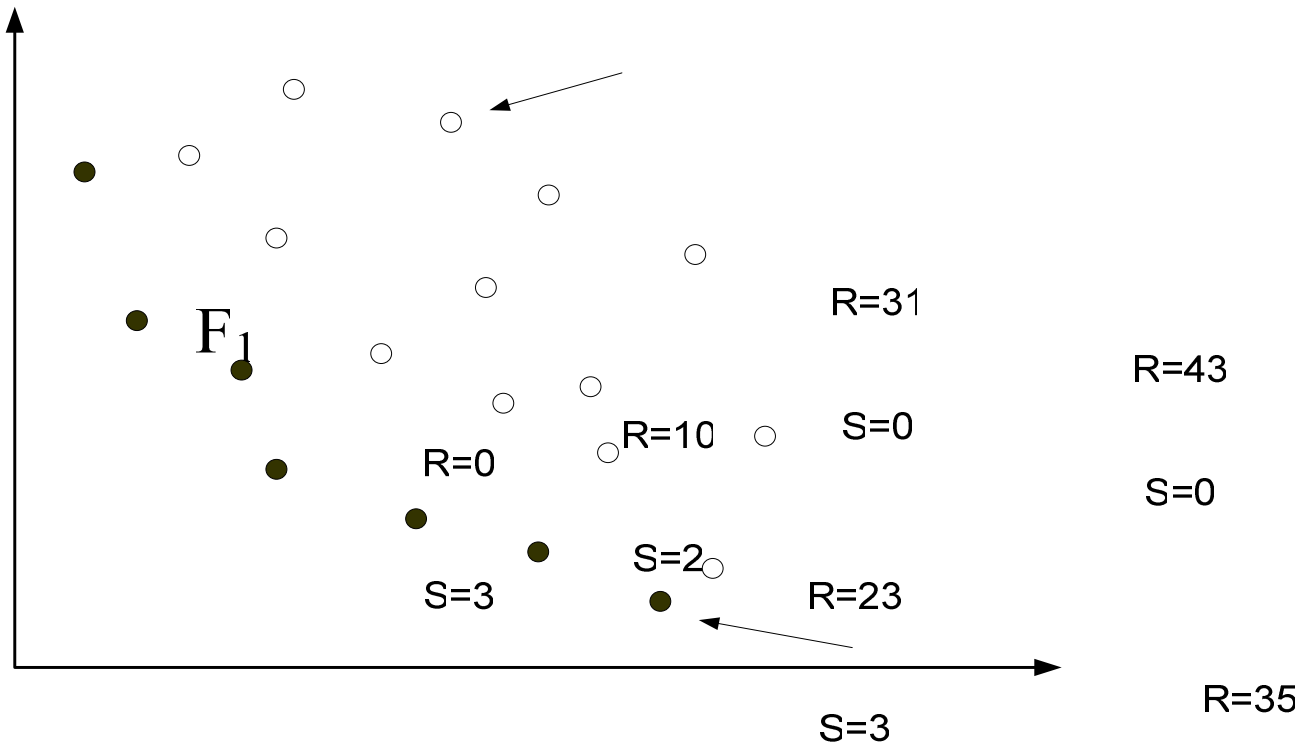
Αφού υπολογιστεί η τιμή του S για κάθε ένα άτομο, υπολογίζεται η τιμή R (raw fitness), πάλι για κάθε λύση και υπολογίζεται ως εξής:

$$R(i) = \sum_{j \in (\bar{P}_t \cup P_t), j \succ i} S(i)$$

Η τιμή αυτή καθορίζεται από τιμές του S των κυριαρχούμενων από αυτήν λύσεων που ανήκουν στο σύνολο $\bar{P}_t \cup P_t$. Εδώ βρίσκεται και η βασική διαφορά αυτού του αλγορίθμου με τον SPEA, στον οποίο στο σημείο αυτό λαμβάνονται υπόψη μόνο οι τιμές S των ατόμων του \bar{P}_t .

Ένα παράδειγμα απόδοσης των τιμών S και R με βάση τον αλγόριθμο SPEA2 σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης 2 στόχων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

¹² Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2



2.4.2 Τιμή των S και R όλων των ατόμων του πληθυσμού ενός προβλήματος 2 στόχων F_1 και F_2 σύμφωνα με τον αλγόριθμο SPEA2.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η τιμή $R(i) = 0$ αντιστοιχεί στα μη-κυριαρχούμενα άτομα του πληθυσμού και μια υψηλή τιμή του $R(i)$, αντιστοιχεί σε άτομο το οποίο κυριαρχείται από πολλά. Παρ' όλο που η τιμή R αποδίδει μια βαθμολογία αξιολόγησης στα άτομα του πληθυσμού, δημιουργείται ο κίνδυνος να αποτύχει όταν τα περισσότερα άτομα δεν κυριαρχούνται μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό, υπολογίζεται συμπληρωματικά μια ποσότητα D (density) για κάθε άτομο, που διακρίνει τα άτομα που έχουν ίσες τιμές R . Η πυκνότητα αυτή αποτελεί μια φθίνουσα συνάρτηση της απόστασης από το κοντινότερο άτομο. Πιο συγκεκριμένα, οι αποστάσεις όλων των ατόμων του συνόλου υπολογίζονται και τοποθετούνται σε μια λίστα και ταξινομούνται με αύξουσα σειρά. Η πυκνότητα που αντιστοιχεί σε κάθε άτομο υπολογίζεται ως εξής:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2}, \quad k = \sqrt{N + \bar{N}}$$

Για την ποσότητα αυτή ισχύει: $0 < D(i) < 1$. Η τιμή $D(i)$ προστίθεται η τιμή $R(i)$ και προκύπτει η τιμή καταλληλότητας $F(i)$ της κάθε λύσης:

$$F(i) = R(i) + D(i)$$

Οι μη-κυριαρχούμενες λύσεις των συνόλων \bar{P}_t και P_t τοποθετούνται στο \bar{P}_{t+1} . Αν το μέγεθος του συνόλου \bar{N} έχει μειωθεί, τότε συμπληρώνεται με τα καλύτερα, σύμφωνα με την τιμή καταλληλότητας, κυριαρχούμενα άτομα. Στην περίπτωση που τα μη-κυριαρχούμενα άτομα έχουν αυξηθεί τότε κάποια από αυτά για τα οποία $D(i) \leq D(j), \forall j \in \bar{P}_{t+1}$, αποκόπτονται σταδιακά μέχρι το πλήθος να φτάσει τον αριθμό \bar{N} .

3 ΔΟΜΗΜΕΝΟΣ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ υπάρχει ήδη, όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, ο Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος (ΔΕΑ)¹³, που αποτελεί παραλλαγή του κλασικού ΕΑ και βασίζεται στη λογική των Κατανεμημένων Εξελικτικών Αλγορίθμων (ΚΕΑ)¹⁴ [1,2,3]. Η δημιουργία αυτού του λογισμικού οφείλεται σε πρόσφατη διπλωματική εργασία. Μέσω του αλγορίθμου αυτού, υπάρχει η δυνατότητα για σειριακή αλλά και παράλληλη επεξεργασία. Για την πραγματοποίηση της παράλληλης επεξεργασίας, που είναι απαραίτητη σε πραγματικά προβλήματα όπως ο σχεδιασμός αεροδυναμικών σωμάτων με βέλτιστη συμπεριφορά, χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη υποστήριξης κατανεμημένης εργασίας PVM¹⁵ [21].

Στο ΕΘΣ έχουν αναπτυχθεί κάποιες παραλλαγές του ΔΕΑ ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης του πληθυσμού των υποψήφιων λύσεων στην παράλληλη επεξεργασία. Σύμφωνα με τη διάκριση αυτή, αναπτύχθηκε αρχικά ο Σύγχρονος ΔΕΑ

¹³ Grid Evolutionary Algorithm (GREA)

¹⁴ Distributed Evolutionary Algorithms (DEA)

¹⁵ Parallel Virtual Machine

(ΣΔΕΑ)¹⁶, στη συνέχεια ο Ημι-ασύγχρονος ΔΕΑ (ΗΑΔΕΑ) και αυτήν την περίοδο αναπτύσσεται ο Ασύγχρονος ΔΕΑ (ΑΔΕΑ)¹⁷. Η καινοτομία που υλοποιείται στους δύο Ασύγχρονους ΔΕΑ σε σχέση με τον ΣΔΕΑ είναι η κατάργηση της έννοια της γενιάς όπως αυτή είναι γνωστή από την θεωρία των κλασικών ΕΑ.

Ο Ιεραρχικός ΑΔΕΑ αποτελεί μια μετεξέλιξη του Δομημένου Εξελικτικού Αλγορίθμου (ΔΕΑ) και, συγκεκριμένα, ενός αλγορίθμου που «κανονικά» πρέπει να αποκαλείται Ημι-ασύγχρονος ΔΕΑ (με την έννοια ότι δεν είναι πλήρως ασύγχρονος ή, αλλιώς, ότι θα μπορούσε να είναι και «περισσότερο» ασύγχρονος). Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού, παρουσιάζεται οι βασικές αρχές του ΔΕΑ καθώς και οι τελεστές εξέλιξης που εφαρμόζονται κατά τη διάρκεια των εξελικτικών διαδικασιών του, ανεξάρτητα από το αν αυτός είναι ασύγχρονος ή σύγχρονος.

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΕΑ

Στους κλασικούς ΕΑ, πραγματοποιείται εντελώς τυχαία (χωρίς συγκεκριμένη δομή) διασταύρωση, με την έννοια ότι κάθε άτομο του πληθυσμού είναι ελεύθερο να διασταυρωθεί με οποιοδήποτε άλλο, ανεξάρτητα από το μέγεθος του πληθυσμού. Η στοχαστικότητα αυτή διέπει την εφαρμογή όλων των εξελικτικών τελεστών στους κλασικούς ΕΑ. Στην προσπάθεια να προσομοιωθούν περισσότερο ικανοποιητικά οι αναπαραγωγικές συνήθειες των ειδών στη φύση και να αποδοθεί κάποια δομή στην εφαρμογή των εξελικτικών τελεστών, δημιουργήθηκαν οι ΚΕΑ, στους οποίους βασίζεται και ο ΔΕΑ.

Κατά την ανάπτυξη του ΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η λογική του, γνωστού από τους ΚΕΑ, Κυτταρικού ή Κυψελωτού προτύπου¹⁸. Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, επιβάλλεται ορισμένη τοπολογία στον πληθυσμό των υποψήφιων λύσεων κάθε γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, τα μέλη του συνόλου των απογόνων, S_λ^n , τοποθετούνται στους κόμβους ενός διδιάστατου πλέγματος μεγέθους $\lambda_1 \times \lambda_2 (= \lambda)$. Το ίδιο συμβαίνει και για τα μέλη του συνόλου των γονέων της κάθε γενιάς, S_μ^n , τα οποία όμως

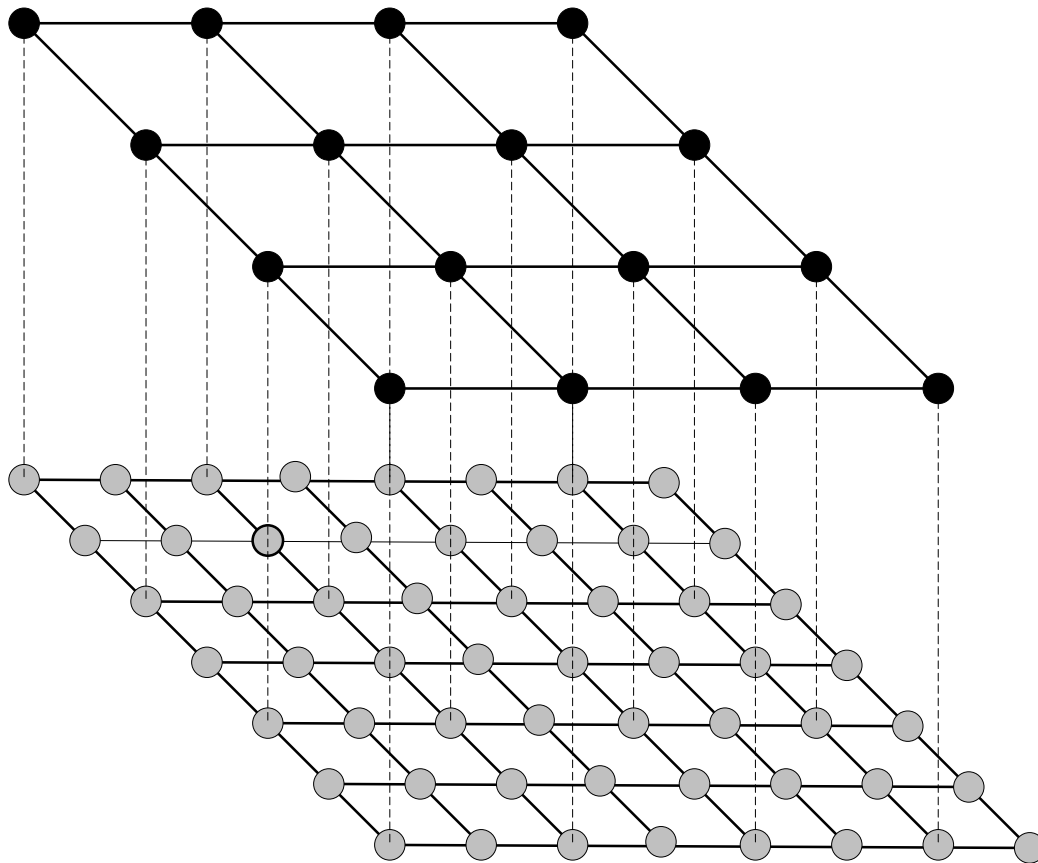
¹⁶ Synchronous GREA (SGREA)

¹⁷ Asynchronous GREA (SGREA)

¹⁸ Cellular Model

τοποθετούνται σε ένα πλέγμα, υποσύνολο του προηγούμενου, μεγέθους $\mu_1 \times \mu_2 (= \mu)$, για το οποίο ισχύουν $\mu_1 = \frac{\lambda_1}{2}$ και $\mu_2 = \frac{\lambda_2}{2}$. Κατά συνέπεια, για το μέγεθος του συνόλου των γονέων ισχύει $\mu = \frac{\lambda}{4}$.

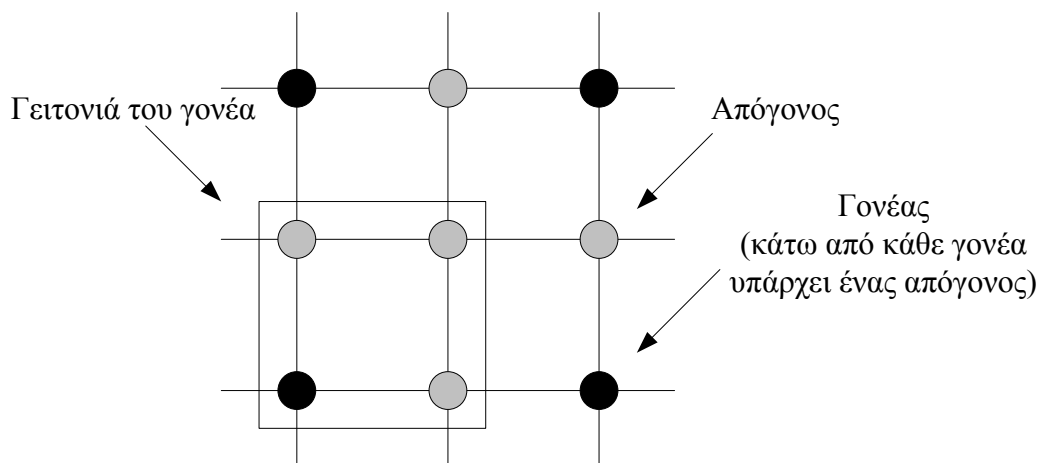
Το πλέγμα των γονέων υπέρκειται αυτού των απογόνων και επικοινωνεί με αυτό κατά την εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης. Οι τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι αυτοί επιλογής γονέων, διασταύρωσης και μετάλλαξης.



3.1.1 Πλέγμα γονέων (4x4) και απογόνων (8x8)

Τελεστής Επιλογής γονέων

Οι γονείς επιλέγονται, εφαρμόζοντας τον τελεστή επιλογής γονέων, από το σύνολο των απογόνων, ο καθένας από τη γειτονιά του. Κατά την επιλογή γονέα συγκρίνεται η τιμή κόστους ή καταλληλότητας των τεσσάρων απογόνων της γειτονιάς του. Το καλύτερο άτομο από αυτά που έχουν αξιολογηθεί μέχρι εκείνη τη στιγμή, αυτό τοποθετείται κατευθείαν στο πλέγμα των γονέων. Οι θέσεις των γονέων και των απογόνων είναι καθορισμένες πάνω στα αντίστοιχα πλέγματα όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 3.1.1).



3.1.2 Γειτονιά ενός γονέα

Τελεστής Διασταύρωσης

Στον ΔΕΑ που λειτουργεί στο ΕΘΣ, κάθε άτομο του πληθυσμού των γονέων μπορεί να διασταυρωθεί μόνο με άτομα της περιοχής του, εφαρμόζοντας τον τελεστή διασταύρωσης. Ο τελεστής αυτός πραγματοποιεί τέσσερα είδη διασταύρωσης [20] ανάλογα με το από ποιους γονείς θα προκύψει ο κάθε απόγονος και σε ποια θέση του πλέγματος θα τοποθετηθεί. Ωστόσο, επιτρέπεται και ένα μικρό συνήθως ποσοστό τυχαίας διασταύρωσης των ατόμων. Δεδομένου ότι στον ΔΕΑ χρησιμοποιείται η δυαδική κωδικοποίηση, κάθε απόγονος προκύπτει από τη διασταύρωση δύο γονέων, ενώ κάθε απόγονος παραμένει στη γειτονιά των γονέων του.

Αρχικά, επιλέγεται τυχαία ένα σημείο τομής στο χρωμόσωμα των δύο γονέων:

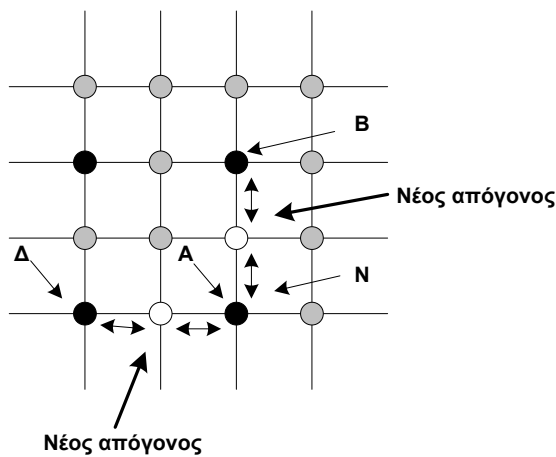
$$\begin{aligned} \bar{x}_1 &\rightarrow \underbrace{010100}_{A1} \parallel \underbrace{011100001111}_{B1} \\ \bar{x}_2 &\rightarrow \underbrace{0101011101001}_{A2} \parallel \underbrace{000111}_{B2} \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, ενώνεται το τμήμα $A1$ με το $A2$ και το $B1$ με το $B2$ και προκύπτουν δύο απόγονοι από τους οποίους επιλέγεται, με τυχαίο τρόπο, ο ένας και τοποθετείται στη στο πλέγμα των απογόνων.

Τα είδη διασταύρωσης που πραγματοποιούνται μέσω του αντίστοιχου τελεστή αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.

- **Διασταύρωση Τύπου Α**

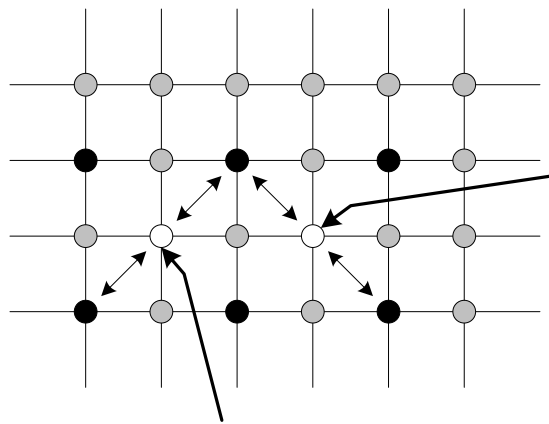
Από τη διασταύρωση αυτού του τύπου προκύπτουν οι απόγονοι των οποίων οι γονείς βρίσκονται αριστερά (Δυτικά) και δεξιά (Ανατολικά) -*Τύπου A1*- ή πάνω (Βόρεια) και κάτω (Νότια) -*Τύπου A2*- από τη θέση που πρόκειται να τοποθετηθούν.



3.1.3 Διασταυρώσεις Τύπου Α

▪ **Διασταύρωση Τύπου Β**

Σε αυτή την περίπτωση οι εμπλεκόμενοι γονείς είναι αυτοί που βρίσκονται σε διαγώνια θέση από εκεί που πρόκειται να τοποθετηθεί ο απόγονός τους. Οι δύο γονείς, επομένως, είναι είτε ο ΒορειοΑνατολικός και ο ΝοτιοΔυτικός, είτε ο ΒορειοΔυτικός και ο ΝοτιοΑνατολικός. Τα δύο ζεύγη ΒΑ-ΝΔ και ΒΔ-ΝΑ έχουν τις ίδιες πιθανότητες να επιλεγθούν και τελικά επιλέγεται το ένα από τα δύο με χρήση της γεννήτριας τυχαίων αριθμών.



3.1.4 Διασταύρωση Τύπου Β

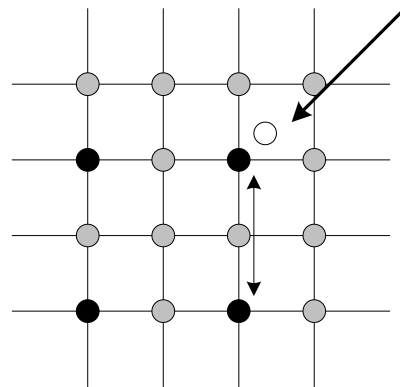
▪ **Διασταύρωση Τύπου Γ**

Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται οι απόγονοι οι οποίοι θα τοποθετηθούν στην ίδια κομβική θέση με κάποιο γονέα. Για κάθε τέτοιο απόγονο χρησιμοποιείται ο γονέας που βρίσκεται σε αυτή την κομβική θέση και ο προηγούμενος στο πλέγμα γονιός, οποίος καθορίζεται σύμφωνα σειριακό σύστημα αρίθμησης¹⁹ που θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο.

BA ΒΔ

¹⁹ Κεφάλαιο 4-Σχήμα 4.1.2

NA



3.1.5 Διασταύρωση Τύπου Γ

·
·
·

2

k

▪ Διασταύρωση Τύπου Δ

Αυτή η περίπτωση διασταύρωσης είναι ουσιαστικά η τυχαία διασταύρωση μεταξύ των γονέων του πλέγματος, δηλαδή η διασταύρωση που συναντάται και στον κλασικό ΕΑ. Ο απόγονος που σχηματίζεται μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε πάνω στο πλέγμα των απογόνων της νέας γενιάς. Η διασταύρωση αυτή συμβαίνει σε ένα μικρό ποσοστό, το οποίο καθορίζεται από το χρήστη.

k-1

Τελεστής Μετάλλαξης

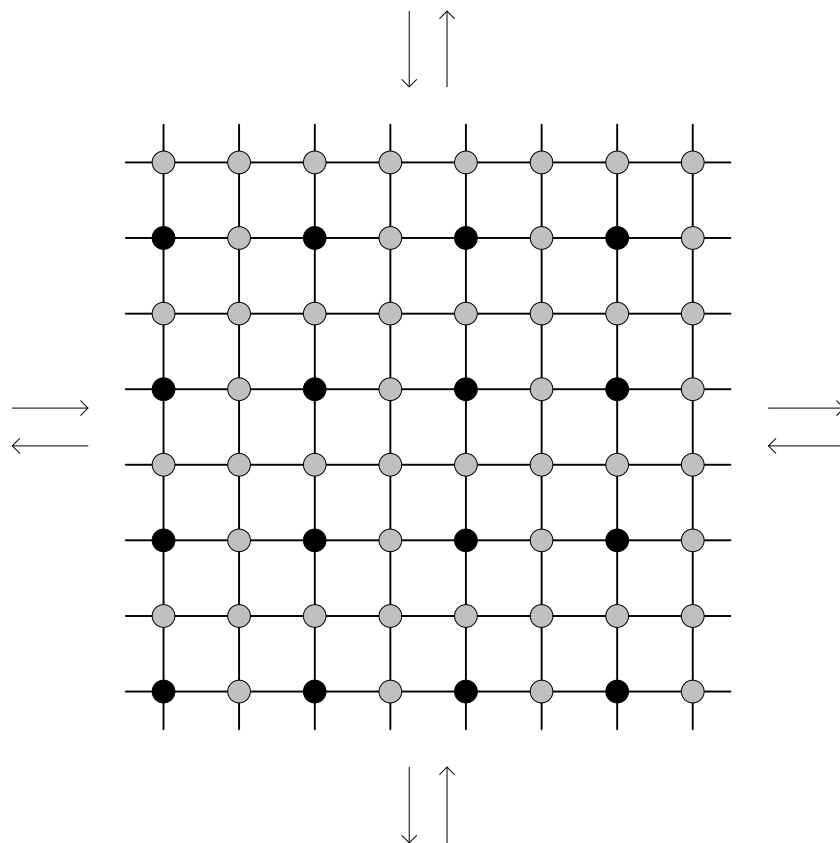
Στα άτομα που προέκυψαν με την εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης, εφαρμόζεται ο τελεστής μετάλλαξης. Αυτό συμβαίνει πριν τοποθετηθούν τα άτομα αυτά στο ανανεωμένο πλέγμα των απογόνων και, όπως και στην εφαρμογή του τελεστή γονέων, το καλύτερο, μέχρι εκείνη τη στιγμή, άτομο κρατείται αυτούσιο και μεταφέρεται χωρίς να μεταλλαχθεί στο νέο σύνολο των απογόνων. Η λειτουργία του τελεστή μετάλλαξης είναι η γνωστή από τον Γενικευμένο ΕΑ. Κατά την εφαρμογή του μεταβάλλεται αυθαίρετα ένα ψηφίο (bit) του χρωμοσώματος της υποψήφιας λύσης από $0 \rightarrow 1$ ή από $1 \rightarrow 0$. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι μέγιστη στις πρώτες γενιές, ώστε να σαρώνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του χώρου των λύσεων, ενώ στη διάρκεια της εξέλιξης του πληθυσμού μειώνεται σταδιακά με σκοπό

να επικεντρωθεί η αναζήτηση στο μέρος του χώρου απ' όπου θα προκύψει η βέλτιστη λύση.

Στον πλέον κατάλληλο απόγονο της προηγούμενης γενιάς, ο οποίος έχει επιλεγεί κατευθείαν ως γονιός της επόμενης, δεν εφαρμόζονται ούτε ο τελεστής διασταύρωσης αλλά ούτε και αυτός της μετάλλαξης. Το άτομο αυτό εντάσσεται κατευθείαν στο ανανεωμένο σύνολο των απογόνων (ελιτισμός).

Επαναληψιμότητα του Πλέγματος

Η εφαρμογή του τελεστή διασταύρωσης, αλλά και αυτού της επιλογής γονέων, είναι δυνατή και για τα μέλη των πληθυσμών που τοποθετούνται στα όρια του πλέγματος, λόγω της επαναληψιμότητας του πλέγματος και στις δύο κατευθύνσεις, δηλαδή υπάρχει επικοινωνία του κάθε ορίου με το απέναντί του.



3.1.6 Επαναληψιμότητα των ορίων του πλέγματος

Έτσι όπως είναι φτιαγμένο το πλέγμα του Δομημένου Εξελικτικού Αλγορίθμου και για να είναι δυνατή η επαναληψιμότητα του πλέγματος ο αρχικός πληθυσμός πρέπει να περιλαμβάνει άρτιο αριθμό ατόμων.

Η γενική δομή του αλγορίθμου αυτού είναι παρόμοια με αυτή του Γενικευμένου ΕΑ και έχει ως εξής:

- ✓ Επιλογή βασικών παραμέτρων της μεθόδου όπως το μέγεθος του πληθυσμού των απογόνων, άρα και των γονέων.

$$✓ \text{ Αρχικοποίηση: } \begin{cases} n = 0 \\ S_{\mu}^n = \otimes \\ S_e^n = \otimes \\ S_{\lambda}^n = S_{Random} \end{cases}$$

- ✓ Έλεγχος της ύπαρξης του ατόμου προς αξιολόγηση στη βάση δεδομένων των αξιολογήσεων όλων των προηγούμενων γενεών (Data Base)

$$✓ \text{ Εξέλιξη μιας γενιάς: } \begin{cases} \vec{y} = \vec{F}(\vec{x}), \forall \vec{x} \in S_{\lambda}^n \\ S_e^{n+1} = T_e(S_{\lambda}^n \cup S_{\mu}^n) \\ S_{\mu}^{n+1} = T_{\mu}(S_{\mu}^n \cup S_{\lambda}^n) \\ S_{\lambda}^{n+1} = T_m(T_r(S_{\mu}^{n+1} \cup S_e^{n+1})) \\ n \leftarrow n + 1 \end{cases}$$

- ✓ Έλεγχος σύγκλισης.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί εξηγείται η ανάγκη της παράλληλης επεξεργασίας και αναλύεται η εφαρμογή της στον ΔΕΑ, όπως αυτή υλοποιείται στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ.

4 ΔΟΜΗΜΕΝΟΣ ΕΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η παράλληλη και δομημένη φύση των ΕΑ κίνησε πολύ νωρίς το ενδιαφέρον των ερευνητών. Οι κύριες ιδέες σχετικά με την παραλληλοποίηση των ΕΑ τοποθετούνται χρονικά τη δεκαετία του 1960. Την περίοδο όμως αυτή η παράλληλη τεχνολογία βρισκόταν σε πρωτόγονο στάδιο. Ο τομέας αυτός θα έπρεπε να περιμένει μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980 οπότε και άρχισαν να εμφανίζονται κατάλληλες προϋποθέσεις για παράλληλες υλοποιήσεις.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η εκτέλεση του αναπαραγωγικού κύκλου των ΕΑ για σημαντικά προβλήματα με μεγάλο αριθμό παραμέτρων και υψηλού υπολογιστικού κόστους λογισμικό αξιολόγησης, αλλά και ο χειρισμός μεγάλου πληθυσμού από ένα τέτοιο αλγόριθμο, δημιουργεί μεγάλο συνολικό υπολογιστικό κόστος. Γενικά, η διαδικασία της αξιολόγησης κάθε ατόμου με σκοπό τον προσδιορισμό της ποιότητάς της ως λύση είναι συχνά η πιο δαπανηρή διεργασία που λαμβάνει μέρος στην εξελικτική διαδικασία. Κατά συνέπεια, μελετάται ένας μεγάλος

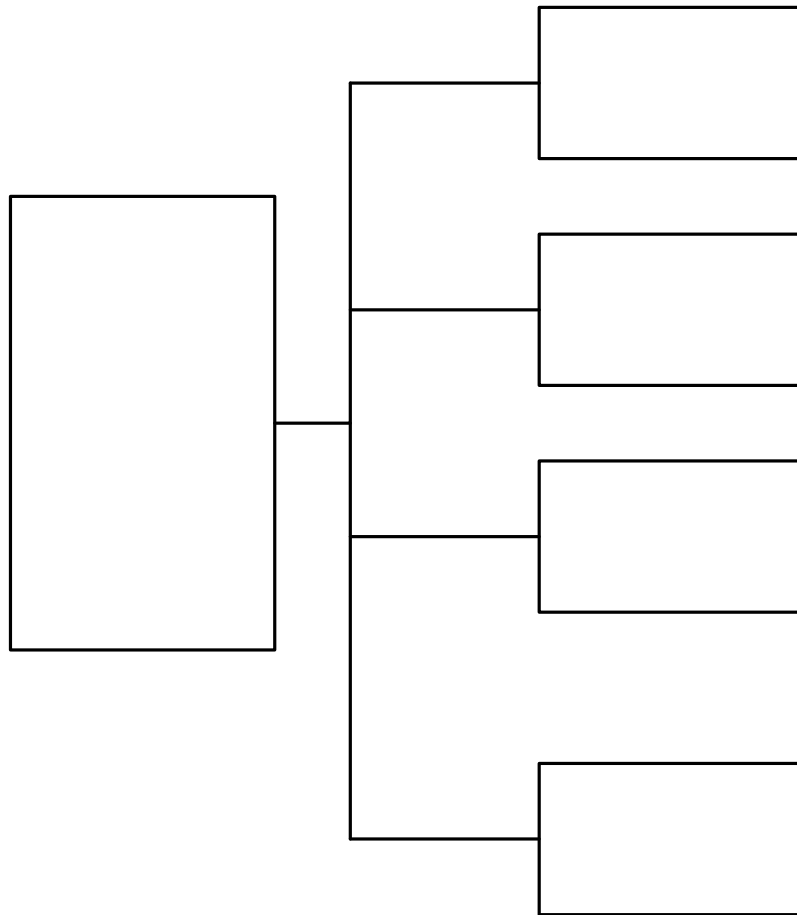
αριθμός παραλλαγών που εξελίσσουν τον ΕΑ ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη απόδοση στην εύρεση βέλτιστης λύσης, αλλά κυρίως στην εύρεση ικανοποιητικής λύσης με όσο το δυνατό μικρότερο υπολογιστικό κόστος, το οποίο μεταφράζεται και στην ελάττωση του χρόνου αναμονής του μηχανικού. Μια από τις κατευθύνσεις που μπορεί να πάρει η έρευνα αυτή συνίσταται στη χρησιμοποίηση παράλληλων μοντέλων στους ΕΑ.

Οι ΕΑ μπορούν σχετικά εύκολα να μετασχηματιστούν ώστε να λειτουργούν παράλληλα, μοιράζοντας τις διαδικασίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν ανεξάρτητα ή μια από την άλλη, όπως η αξιολόγηση κάθε υποψήφιας λύσης, σε μεγάλο αριθμό επεξεργαστών. Η χρήση παράλληλης επεξεργασίας μπορεί να οδηγήσει όχι μόνο σε έναν πιο γρήγορο αλγόριθμο αλλά, ενδεχομένως, και σε αλγόριθμο με μεγαλύτερη απόδοση ως προς την ικανότητα εύρεσης της βέλτιστης λύσης. Ωστόσο, μια πραγματικά ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι η χρήση κατανεμημένου πληθυσμού, δηλαδή η διανομή του χώρου των ατόμων, καθώς και οι ελεγχόμενες εξελικτικές διαδικασίες ευθύνονται για τέτοια πλεονεκτήματα. Αυτό σημαίνει ότι μη χρησιμοποιώντας κάποια μέθοδο κατανεμημένης εργασίας, ένας Κατανεμημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος θα δώσει καλύτερα αποτελέσματα από έναν κλασικό ΕΑ, πάλι σε σειριακή επεξεργασία.

4.1 ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΑ

Στους παραλληλοποιημένους ΔΕΑ, κάθε άτομο του πληθυσμού αξιολογείται σε διαφορετικό επεξεργαστή, ενώ χρησιμοποιείται κοινή βάση δεδομένων για ώστε να μην αξιολογηθεί η ίδια λύση δύο φορές. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι δύο παραλλαγές του ΔΕΑ που υλοποιούνται από το ΕΘΣ, ο Σύγχρονος ΔΕΑ (ΣΔΕΑ) και ο Ημι-ασύγχρονος ΔΕΑ (ΗΑΔΕΑ). Από αυτό το σημείο, και μέχρι το τέλος του κεφαλαίου, θα αναφέρεται ο Ημι-Ασύγχρονος ΔΕΑ ως Ασύγχρονος ΔΕΑ (ΑΔΕΑ) για να είναι πιο κατανοητή η έννοια του ασύγχρονου αλγορίθμου και οι βασικές διαφορές του με το σύγχρονο. Άλλωστε, αυτός ο αλγόριθμος αποτελούσε τον ΑΔΕΑ πριν αρχίσει να μελετάται από τα μέλη του ΕΘΣ ένας νέος αλγόριθμος που υλοποιεί πιο αυστηρά την έννοια του ασύγχρονου, η οποία θα αναλυθεί παρακάτω.

Το γενικότερο σχήμα παραλληλοποίησης είναι όμοιο και για τις δύο παραλλαγές που παρουσιάζονται και είναι αυτό που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



4.1.1 Λογικό διάγραμμα της παραλληλοποίησης του ΔΕΑ

Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό οι παραλληλοποιημένοι ΔΕΑ βασίζονται στη λογική συντονιστή-σκλάβου (master-slave). Η Κεντρική Διεργασία αναλαμβάνει τον έλεγχο της βασικής ροής του αλγορίθμου. **Κεντρική Διεργασία (Master Process)** στις Διεργασίες Εργάτες, οι οποίες διεκπεραιώνουν μόνο τις αξιολογήσεις των κτόμων του συνόλου των απογόνων. Το σύνολο των αξιολογήσεων που μπορούν να γίνουν ταυτόχρονα είναι $N+1$, και αυτό γιατί ο επεξεργαστής που επιφορτίζεται με την Κεντρική Διεργασία, επιφορτίζεται και με μια Διεργασία Εργάτη.

4.1.1 ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ PVM

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για αυτή την εργασία υποστηρίζει παραλληλία σε επίπεδο αξιολογήσεων με χρήση του πρωτοκόλλου PVM [21]. Το πρωτόκολλο PVM, όπως και άλλα πρωτόκολλα κατανεμημένης εργασίας (MPI [22]), συνθέτει μία εικονική παράλληλη μηχανή από όλους τους υπολογιστές που συμμετέχουν στο παράλληλο πρόγραμμα και σε κάθε έναν από αυτούς εκκινούν μια αυτόνομη διεργασία. Είναι ένα λογισμικό που υποστηρίζει την ανταλλαγή μηνυμάτων²⁰ και επιτρέπει την εκμετάλλευση ενός ετερογενούς δικτύου από παράλληλους και σειριακούς υπολογιστές ως ένα γενικό και εύχρηστο ταυτόχρονο υπολογιστικό σύστημα. Έτσι, επιτυγχάνεται η επικοινωνία και ο συντονισμός των διεργασιών.

Οι βασικότερες αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται το PVM παρουσιάζονται παρακάτω:

- ✓ **Επιλογή από το χρήστη των μηχανημάτων που θα συμμετέχουν στη διαδικασία:** Ένα πρόγραμμα, το οποίο είναι σχεδιασμένο για παράλληλη επεξεργασία με χρήση του πρωτοκόλλου PVM, μπορεί να εκτελεστεί σε μια ομάδα μηχανημάτων είτε αυτά είναι μονοεπεξεργαστικά συστήματα, είτε πολυεπεξεργαστικά. Οι επιλογή των συμμετεχόντων μηχανημάτων γίνεται από το χρήστη και η σύσταση της ομάδας μπορεί να μεταβληθεί ακόμα και κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του προγράμματος. Αυτή η ιδιότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περίπτωση βλάβης κάποιου επεξεργαστή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προγράμματος αφού υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης του μηχανήματος με άλλο εφεδρικό, χωρίς να χρειαστεί να διακοπεί η όλη διαδικασία.
- ✓ **Λειτουργία σε υπολογιστές διαφορετική αρχιτεκτονικής:** Οι εφαρμογές μπορούν να αντιμετωπίσουν το υπολογιστικό περιβάλλον ως μια ομάδα όμοιων υπολογιστικών στοιχείων ανεξαρτήτου αρχιτεκτονικής, καθώς το PVM αναλαμβάνει τη σωστή επικοινωνία μεταξύ μηχανημάτων διαφορετικών αρχιτεκτονικών. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει συμβάλει σημαντικά στην εξάπλωση του PVM και κυρίως στην επιστημονική κοινότητα.

²⁰ Message-Passing

- ✓ **Υπολογισμοί βασισμένοι σε διεργασίες:** Η υλοποίηση της κατανεμημένης επεξεργασίας μέσω του PVM γίνεται μέσω διεργασιών (processes, tasks), που συνήθως αντιστοιχούν σε μια διεργασία του UNIX. Στη πράξη πολλές διεργασίες μπορούν να εκτελούνται ταυτόχρονα από έναν επεξεργαστή.
- ✓ **Μοντέλο ανταλλαγής μηνυμάτων:** Οι διεργασίες που απαρτίζουν την εφαρμογή, έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους, μέσω του PVM, για την ανταλλαγή δεδομένων και τον έλεγχο της προόδου κάθε μιας χωρίς να τίθεται κάποιος περιορισμός στο μέγεθος των μηνυμάτων.

Όπως αναφέρθηκε, οι ΔΕΑ χρησιμοποιούν τη λογική συντονιστή-σκλάβου. Συντονιστής (Κεντρική Διεργασία) είναι η διεργασία του εξελικτικού αλγορίθμου, η οποία εκτελείται σε έναν από τους συμμετέχοντες υπολογιστές, ενώ σκλάβοι (Διεργασίες Εργάτες) είναι οι διεργασίες αξιολόγησης των μελών του πληθυσμού, οι οποίες εκτελούνται σε κάθε έναν από τους υπολογιστές του παράλληλου συστήματος. Στο συντονιστή απαιτείται επιπλέον η δημιουργία μιας λίστας στην οποία αποθηκεύεται η κατάσταση κάθε σκλάβου (εκτελεί αξιολόγηση ή είναι ελεύθερος). Τα βασικά μηνύματα που ανταλλάσσονται είναι ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού, ο αριθμός των στόχων, οι τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού και οι τιμές των στόχων. Εφόσον δεν υπάρχει περιορισμός σχετικά με το μέγεθος των ανταλλασσόμενης πληροφορίας, τα μηνύματα μπορούν να διαφοροποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες κάθε αλγορίθμου.

4.1.2 ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΔΕΑ

Ο Σύγχρονος ΔΕΑ δεν έχει μεγάλες αλλαγές από τον ΔΕΑ που παρουσιάστηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Η βασική δομή του αλγορίθμου είναι η ίδια, με τη μόνη διαφορά ότι οι αξιολογήσεις των μελών του συνόλου των απογόνων κάθε γενιάς, S_i^n , δεν πραγματοποιούνται από έναν επεξεργαστή, αλλά μοιράζονται σε όσους επεξεργαστές συμμετέχουν την εκάστοτε χρονική στιγμή στο υπολογιστικό σύστημα και αποτελούν τις Διεργασίες Εργάτες.

Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται, αρχικά, από το χρήστη οι επεξεργαστές του δικτύου που θα συμμετέχουν στη διαδικασία, εκκινώντας το PVM. Το μηχάνημα που θα επωμισθεί και την Κεντρική Διεργασία (Master) είναι καθορισμένο και είναι αυτό από το οποίο γίνεται η εκκίνηση του PVM. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται και η επιλογή, επίσης από το χρήστη, των βασικών παραμέτρων του αλγορίθμου. Τέτοιες παράμετροι είναι: το μέγεθος του πληθυσμού των απογόνων, και άρα και των γονέων²¹, τα άνω και κάτω όρια των ελεύθερων μεταβλητών και οι περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης (αν υπάρχουν). Καθορίζονται, επιπλέον, τα κριτήρια σύγκλισης του αλγορίθμου. Αναφέρθηκε στην περιγραφή του ΔΕΑ, ότι οι εξελικτικές διαδικασίες είναι ελεγχόμενες αλλά επιτρέπεται και κάποιο μικρό ποσοστό τυχαίων, όπως αυτές πραγματοποιούνται από τους κλασικούς ΕΑ. Οι πιθανότητες αυτές θα πρέπει να καθοριστούν και αυτές από την αρχή, πριν την έναρξη της επεξεργασίας.

Η πρώτη εργασία που πραγματοποιείται με την εκκίνηση του αλγορίθμου είναι η αρχικοποίηση του μετρητή των γενεών $n=0$ αλλά και των βασικών πληθυσμών S_{μ}^n, S_e^n και S_{λ}^n . Τα δύο πρώτα σύνολα θέτονται ως κενά και για το τρίτο, το σύνολο των απογόνων, εκκινείται μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών, η οποία δημιουργεί τυχαία τα άτομα του πληθυσμού, τα οποία τοποθετούνται τυχαία στο πλέγμα των απογόνων. Στο σημείο αυτό λαμβάνει χώρα ο έλεγχος στη βάση δεδομένων των αξιολογήσεων των προηγούμενων γενεών. Ο έλεγχος αυτός, βέβαια στερείται νοήματος όταν ο αλγόριθμος βρίσκεται στη μηδενική γενιά, αλλά ο ρόλος του είναι πολύ σημαντικός για όλες τις υπόλοιπες γενιές, καθώς με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο κίνδυνος επαναξιολόγησης ενός ατόμου.

Το επόμενο βήμα είναι η αξιολόγηση των απογόνων. Ο επεξεργαστής-συντονιστής στέλνει σε όλους τους επεξεργαστές-εργάτες, αλλά και στον ίδιο, τα δεδομένα ισάριθμων ατόμων και εκκινεί σε αυτούς το λογισμικό αξιολόγησης του προβλήματος βελτιστοποίησης που εξετάζεται. Όταν έχει ανταπόκριση από *όλους* τους εργάτες ότι η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί, και λάβει από αυτούς την τιμή κόστους *όλων* των ατόμων, εκτελεί την ίδια διαδικασία για τα επόμενα άτομα του πληθυσμού μέχρι να ολοκληρωθεί η αξιολόγηση όλων των ατόμων του πληθυσμού των απογόνων.

²¹ Υπενθυμίζεται ο τρόπος ορισμού του πληθυσμού στον ΔΕΑ: ο αριθμός των απογόνων ισούται με το πολλαπλάσιο των διαστάσεων του πλέγματος των απογόνων. Οι διαστάσεις του πλέγματος των γονέων προκύπτουν με υποδιπλασιασμό των διαστάσεων του πλέγματος των απογόνων.

Ακολουθούν οι εξελικτικές διαδικασίες, έτσι όπως αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και σχηματίζεται ο νέος πληθυσμός, S_λ^{n+1} . Σημειώνεται ότι οι εξελικτικές διαδικασίες ελέγχονται από τον επεξεργαστή-συντονιστή.

Ο μετρητής των γενεών αυξάνεται κατά ένα πραγματοποιείται έλεγχος σύγκλισης και τερματίζεται ή όχι ο αλγόριθμος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο από τα κριτήρια σύγκλισης που αναφέρθηκαν για τον κλασικό ΕΑ²² στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Σχηματικά ο αλγόριθμος παρουσιάζεται παρακάτω:

- ✓ Επιλογή των βασικών παραμέτρων της μεθόδου.

- ✓ Αρχικοποίηση:
$$\begin{cases} n = 0 \\ S_\mu^n = \otimes \\ S_e^n = \otimes \\ S_\lambda^n = S_{Random} \end{cases}, \text{ όπου με } \otimes \text{ εννοούμε το κενό σύνολο.}$$

- ✓ Έλεγχος της ύπαρξης του ατόμου προς αξιολόγηση στη βάση δεδομένων αξιολογήσεων όλων των προηγούμενων γενεών (Data Base)

- ✓ Εξέλιξη μιας γενιάς:

- Αξιολόγηση: $\vec{y} = \vec{F}(\vec{x}), \forall \vec{x} \in S_\lambda^n \rightarrow \begin{cases} CPU_1 (Master) \\ CPU_2 (Slave) \\ \dots \\ CPU_N (Slave) \end{cases}$

- Λοιποί Τελεστές Εξέλιξης:
$$\left. \begin{cases} S_e^{n+1} = T_e(S_\lambda^n \cup S_\mu^n) \\ S_\mu^{n+1} = T_\mu(S_\mu^n \cup S_\lambda^n) \\ S_\lambda^{n+1} = T_m(T_r(S_\mu^{n+1} \cup S_e^{n+1})) \\ n \leftarrow n+1 \end{cases} \right\} \rightarrow Master$$

²² Υπενθυμίζονται τα κριτήρια σύγκλισης που χρησιμοποιούνται: η υπέρβαση του μεγίστου αριθμού αξιολογήσεων, η υπέρβαση του μεγίστου αριθμού γενεών, η υπέρβαση του μεγίστου αριθμού γενεών χωρίς ανανέωση του συνόλου των επίλεκτων και φυσικά η επίτευξη της επιθυμητής τιμής κόστους.

- ✓ Έλεγχος σύγκλισης.

Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι ο ΣΔΕΑ με τη χρήση ενός μόνο επεξεργαστή ταυτίζεται ουσιαστικά με τον ΔΕΑ που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

4.1.3 ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΔΕΑ

Ο Ασύγχρονος ΔΕΑ ξεφεύγει από τη λογική του ΔΕΑ όπως τη γνωρίσαμε μέχρι τώρα, καθώς καταργεί την έννοια της γενιάς όπως αυτή είναι γνωστή σε όλους τους ΕΑ. Όπως αναφέρθηκε, στόχος της εισαγωγής της παράλληλης επεξεργασίας στους ΕΑ είναι η κατανομή των αξιολογήσεων των ατόμων του πληθυσμού των απογόνων, που ουσιαστικά γίνονται ανεξάρτητα η μια από την άλλη, σε περισσότερους από έναν επεξεργαστές. Το υπολογιστικό κόστος δεν αλλάζει απαραίτητα, όμως μειώνεται ο πραγματικός χρόνος της επεξεργασίας. Ο ασύγχρονος αυτός αλγόριθμος είναι αποτέλεσμα της προσπάθειας μείωσης του χρόνου αναμονής του μηχανικού ακόμα περισσότερο, μέσω της μείωσης του χρόνου που επεξεργαστές παραμένουν αδρανείς (αναμένοντας άλλους να τελειώσουν τις δικές τους αξιολογήσεις – ενόψει της συμπλήρωσης μιας γενιάς, που εδώ λειτουργεί αναγκαστικά ως φάση συγχρονισμού).

Στον Σύγχρονο ΔΕΑ, από τη στιγμή που ο επεξεργαστής-συντονιστής λαμβάνει ανταπόκριση από τον πρώτο επεξεργαστή-εργάτη, μέχρι τη στιγμή που αναθέτει νέα διεργασία και στον τελευταίο, δημιουργείται για κάθε έναν από τους εργάτες «νεκρός» χρόνος, δηλαδή χρόνος αναμονής. Σε αυτόν τον χρόνο, ο επεξεργαστής απλά «περιμένει» για να ξεκινήσει μια νέα διεργασία. Με τον ΑΔΕΑ αυτός ο χρόνος αξιοποιείται, όπως θα περιγραφεί παρακάτω. Ένα επιπλέον στοιχείο που εισάγεται στον αλγόριθμο αυτό, είναι το γεγονός ότι δε χρειάζεται να έχουν ολοκληρωθεί οι αξιολογήσεις όλων των ατόμων του πληθυσμού των απογόνων για να πραγματοποιηθούν οι εξελικτικές διαδικασίες. Το γεγονός αυτό ευθύνεται για την κατάργηση της έννοιας της γενιάς.

Ο συμβολισμός που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της αναλυτικής περιγραφής του ΑΔΕΑ φαίνεται παρακάτω [20]:

$S_\lambda \rightarrow$ Σύνολο απογόνων.

$S_\mu \rightarrow$ Σύνολο γονέων.

$S_e \rightarrow$ Σύνολο επίλεκτων ατόμων.

$num_members \rightarrow$ Αριθμός ατόμων του συνόλου S_λ .

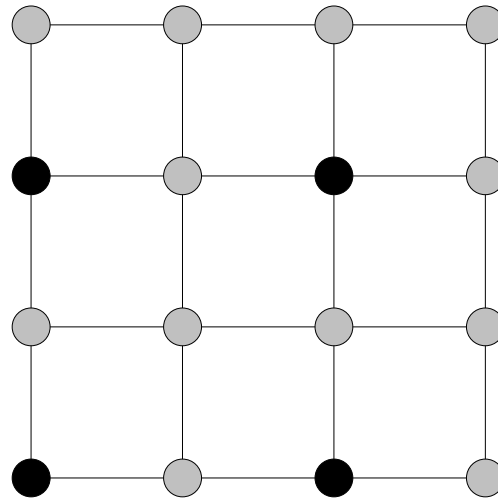
$num_CPUs \rightarrow$ Αριθμός διαθέσιμων επεξεργαστών.

$num_eval \rightarrow$ Αριθμός εκτελεσμένων αξιολογήσεων.

$num_prior \rightarrow$ Αριθμός προτεραιότητας στα αξιολογημένα άτομα.

Αρχικά, επιλέγονται, από το χρήστη, πόσοι και ποιοι επεξεργαστές του δικτύου θα συμμετέχουν στην διαδικασία και καθορίζονται οι βασικές παράμετροι του αλγορίθμου, όπως ακριβώς αναφέρθηκαν για τον ΣΔΕΑ.

Με την έναρξη του αλγορίθμου, η αρχικοποίηση πραγματοποιείται όπως και στον ΣΔΕΑ, με τη διαφορά ότι εδώ μηδενίζεται και ο μετρητής των εκτελεσμένων αξιολογήσεων num_eval , αντί του μετρητή γενεών n . Δημιουργείται μια λίστα αναμονής, η οποία καθορίζεται από τον αριθμό προτεραιότητας κάθε ατόμου και περιλαμβάνει όλα τα άτομα του πληθυσμού. Οι αριθμοί προτεραιότητάς num_prior δίνονται στα άτομα σύμφωνα με το σειριακό σύστημα αρίθμησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.2. Η αποστολή μελών προς αξιολόγηση ξεκινάει από το πρώτο μέλος της λίστας και συνεχίζει από εκεί, αφού πρώτα έχει γίνει έλεγχος της βάσης δεδομένων, για το αν το συγκεκριμένο άτομο έχει αξιολογηθεί ξανά. Στέλνονται, αρχικά, τόσα άτομα για αξιολόγηση, όσοι και οι διαθέσιμοι επεξεργαστές num_CPUs , συμπεριλαμβανομένου και του επεξεργαστή-συντονιστή.



4

8

3

7

4.1.2 Σειριακό σύστημα αρίθμησης σε πλέγμα 4x4

Όταν ολοκληρωθεί η αξιολόγηση κάποιου ατόμου και αυτό επιστρέψει στον έλεγχο της Κεντρικής Διεργασίας (προφανώς όποιου ατόμου η αξιολόγηση ολοκληρωθεί συντομότερα), αυξάνεται κατά ένα ο αριθμός 2 εκτελεσμένων αξιολογήσεων και προσδίδεται νέος αριθμός προτεραιότητας στο συγκεκριμένο άτομο ίσος με τον αριθμό των μελών του συνόλου των απογόνων προσαυξημένο με τον αριθμό των εκτελεσμένων αξιολογήσεων. Με άλλα λόγια, το άτομο τοποθετείται στο τέλος της λίστας αξιολόγησης.

6

Σε αυτή τη φάση πραγματοποιείται έλεγχος των κριτηρίων 1 συγκλισης. Δεν είναι απαραίτητο, όπως αναφέρθηκε, να αξιολογηθούν όλα τα άτομα του S_i για να πραγματοποιηθούν οι εξελικτικές διαδικασίες. Αρκεί να έχει καθοριστεί από την αρχή ο αριθμός των αξιολογήσεων που πρέπει να έχουν ολοκληρωθεί πριν να εφαρμοσθούν οι εξελικτικοί τελεστές. Αν ο αλγόριθμος βρίσκεται σε αυτό το σημείο σταματούν να αποστέλλονται άτομα για αξιολόγηση και ανανεώνεται ο πληθυσμός των απογόνων με τον τρόπο που αναφέρθηκε και στον ΣΔΕΑ. Σε αντίθετη περίπτωση, το επόμενο άτομο στη λίστα αξιολόγησης αποστέλλεται στον επεξεργαστή από όπου μόλις επέστρεψε το προηγούμενο άτομο. Αυτό προϋποθέτει ότι το άτομο που πρόκειται να αξιολογηθεί δεν υπάρχει ήδη στη βάση δεδομένων προηγούμενων αξιολογήσεων. Αν όντως υπάρχει, τότε στέλνεται για αξιολόγηση το επόμενο άτομο στη λίστα προτεραιότητας.

5

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο από τα κριτήρια σύγκλισης.

Ακολουθεί το λογικό σχεδιάγραμμα του ΑΔΕΑ:

- ✓ Επιλογή βασικών παραμέτρων της μεθόδου.

- ✓ Αρχικοποίηση:
$$\begin{cases} num_eval = 0 \\ S_\mu = \otimes \\ S_e = \otimes \\ S_\lambda = S_{Random} \end{cases}, \text{ όπου με } \otimes \text{ εννοούμε το κενό σύνολο.}$$

- ✓ Έλεγχος της ύπαρξης του ατόμου προς αξιολόγηση στη βάση δεδομένων όλων των προηγούμενων αξιολογήσεων (Data Base).
- ✓ Αποστολή για αξιολόγηση τόσων ατόμων, όσοι είναι και οι διαθέσιμοι επεξεργαστές (num_CPUs):

$$\left. \begin{array}{l} \vec{y}_1 = \vec{F}(\vec{x}_1), \forall \vec{x} \in S_\lambda \rightarrow CPU_1 \\ \vec{y}_2 = \vec{F}(\vec{x}_2), \forall \vec{x} \in S_\lambda \rightarrow CPU_2 \\ \dots \\ \vec{y}_{num_CPUs} = \vec{F}(\vec{x}_{num_CPUs}), \forall \vec{x} \in S_\lambda \rightarrow CPU_{num_CPUs} \end{array} \right\} num_CPUs$$

- ✓ Ολοκλήρωση της αξιολόγησης ενός ατόμου \vec{x}_i και επιστροφή του στον έλεγχο της Κεντρικής Διεργασίας και τίθενται:

$$\begin{aligned} num_eval &\leftarrow num_eval + 1 \\ num_prior_{\vec{x}_i} &= num_members + num_eval \end{aligned}$$

- ✓ Έλεγχος σύγκλισης.
- ✓ Έλεγχος αριθμού αξιολογημένων ατόμων από την προηγούμενη ανανέωση του συνόλου των απογόνων και εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης, αν είναι απαραίτητο:

$$\begin{cases} S_e = T_e(S_\lambda \cup S_\mu) \\ S_\mu = T_\mu(S_\mu \cup S_\lambda) \\ S_\lambda = T_m(T_r(S_\mu \cup S_e)) \end{cases}$$

- ✓ Παραλαβή του επόμενου ατόμου του οποίου η αξιολόγηση ολοκληρώθηκε ΚΟΚ.

Σε αντίθεση με τον ΣΔΕΑ, ο ΑΔΕΑ, με χρήση ενός μόνο επεξεργαστή εξακολουθεί να είναι ασύγχρονος, με την έννοια ότι στη διαδικασία της εξέλιξης λαμβάνουν μέρος άτομα τα οποία δεν είναι απαραίτητο να έχουν αξιολογηθεί. Ωστόσο, η λίστα προτεραιότητας ταυτίζεται σε αυτήν την περίπτωση με τον αύξοντα αριθμό των μελών προς αξιολόγηση, καθώς όλα τα άτομα του πληθυσμού αξιολογούνται με τη σειρά.

5 ΙΕΡΑΡΧΙΚΟΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΔΟΜΗΜΕΝΟΣ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

Ο ΔΕΑ, όπως και όλοι οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι, έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζονται εύκολα σε διαφορετικά προβλήματα, για τα οποία υπάρχει προγραμματισμένο λογισμικό αξιολόγησης. Ωστόσο, η χρησιμοποίησή τους σε ορισμένα προβλήματα βελτιστοποίησης παραμένει απαγορευτικά ακριβή, όταν κάθε αξιολόγηση «χρεώνει» τη διαδικασία με μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Ένας τρόπος μείωσης του συνολικού υπολογιστικού κόστους είναι η προσεγγιστική αξιολόγηση κάποιου αριθμού υποψήφιων λύσεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του αριθμού των αξιολογήσεων μεγάλου υπολογιστικού κόστους.

Τη λογική αυτή ακολουθεί ο Ιεραρχικός ΑΔΕΑ που παρουσιάζεται εδώ, αλλά και μια σειρά εξελικτικών αλγορίθμων οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω.

5.1 ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΑΠΡΟΤΥΠΩΝ

Γνωστή μέθοδος για την αντιμετώπιση του προαναφερθέντος μειονεκτήματος των ΕΑ, είναι η χρήση ΕΑ υποστηριζόμενων από μοντέλα ή μεταπρότυπα²³ [24,25], τα οποία, ουσιαστικά, προβλέπουν την καταλληλότητα (τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης) των υποψήφιων λύσεων, χωρίς εκείνες να αξιολογηθούν ακριβώς. Με στόχο την πρόβλεψη, το μεταπρότυπο χρειάζεται να προπονηθεί για κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης, και επομένως απαιτείται ένα επαρκές πλήθος ήδη αξιολογημένων λύσεων πριν την έναρξη εφαρμογής του. Ο τύπος του μεταπρότυπου μαζί με σύνολο των ήδη αξιολογημένων λύσεων καθορίζουν τις δυνατότητες πρόβλεψης και το υπολογιστικό κόστος. Σε αυτή την περίπτωση το μεταπρότυπο εκπαιδεύεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της εξέλιξης και εκμεταλλεύεται τα πιο πρόσφατα συγκεντρωμένα δεδομένα.

Οι υποστηριζόμενοι από μεταπρότυπα ΕΑ, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Οι μέθοδοι πρώτης τάξης κάνουν χρήση ενός μεταπρότυπου, το οποίο εκπαιδεύεται εκ των προτέρων²⁴, πριν την διαδικασία της εξέλιξης. Οι ΕΑ που βασίζονται σε αυτού του είδους τα μεταπρότυπα καταλήγουν σε βέλτιστη λύση, η οποία πρέπει να διασταυρωθεί και, ανάλογα με το σφάλμα, το μεταπρότυπο μπορεί να ανανεωθεί και να αποτελέσει τη βάση ενός νέου κύκλου εύρεσης της λύσης κοκ. Από την άλλη πλευρά, οι αλγόριθμοι δεύτερης τάξης χρησιμοποιούν επιλεκτικά τα μεταπρότυπα²⁵ αλλά και το λογισμικό ακριβούς αξιολόγησης κατά τη διάρκεια της εξελικτικής διαδικασίας.

Η κυριότερη τεχνική, με την οποία υλοποιούνται τα παραπάνω και η οποία βρίσκει εφαρμογές σε προβλήματα βελτιστοποίησης ενός στόχου αλλά και πολλών στόχων, είναι η τεχνική της Προσεγγιστικής Προ-Αξιολόγησης²⁶ (ΠΠΑ). Εφαρμόζοντας τη μέθοδο αυτή, οι πρώτες γενιές (συνήθως 1η -3η) βασίζονται στην ακριβή αξιολόγηση με σκοπό τη συλλογή δεδομένων μέσω της οποίας θα εκπαιδευθεί το μεταπρότυπο. Σε κάθε επόμενη γενιά και για κάθε καινούρια υποψήφια λύση, ένα τοπικό μεταπρότυπο εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες πληροφορίες από

²³ Model or Metamodel

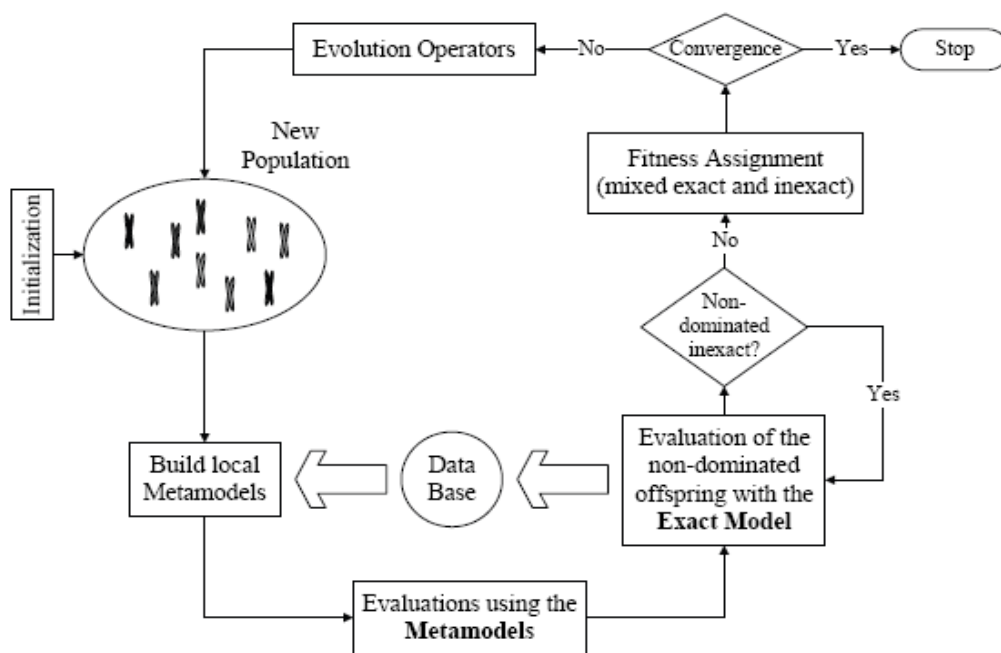
²⁴ Off-line trained Surrogate Metamodel

²⁵ On-line trained Surrogate Metamodels

²⁶ IPE: Inexact Pre-Evaluation

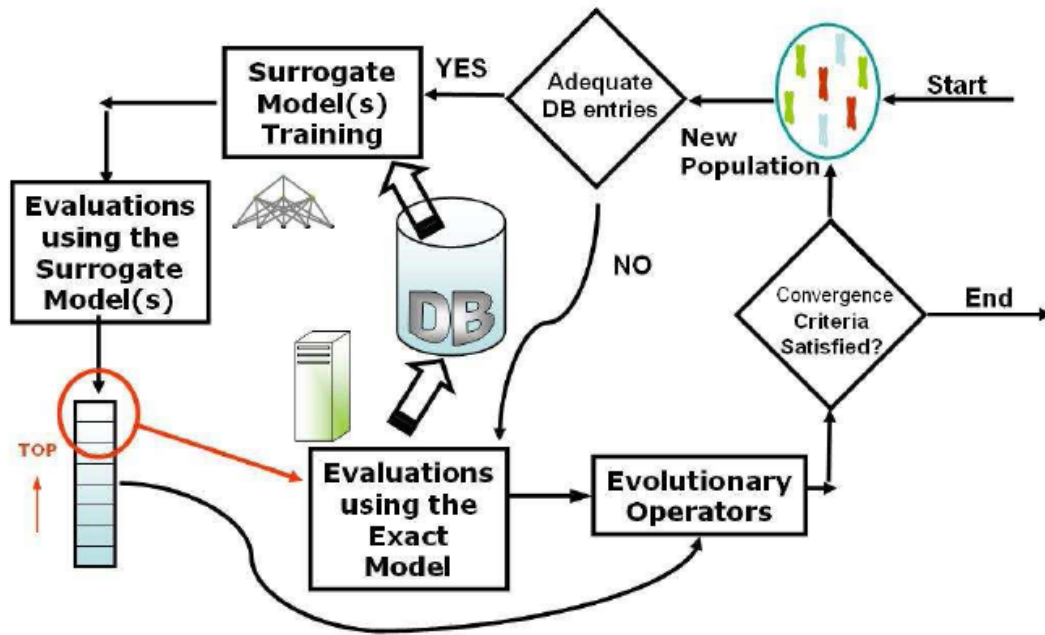
τη γειτονιά του. Έτσι, όλα τα μέλη του πληθυσμού αξιολογούνται προσεγγιστικά και μόνο οι περισσότερο υποσχόμενες λύσεις επαναξιολογούνται με χρήση του ακριβούς λογισμικού αξιολόγησης. Ακολουθούν τα σχεδιαγράμματα εφαρμογής του ΠΠΑ σε προβλήματα βελτιστοποίησης ενός (Σχήμα 5.1.2-5.1.3) και πολλών στόχων (Σχήμα 5.1.2).

Πολύ καλή απόδοση στα πλαίσια του ΠΠΑ έχει η χρήση των γνωστών, από τη βιβλιογραφία, Νευρωνικών Δικτύων Ακτινικών Συναρτήσεων Βάσης²⁷ (ΝΔΑΣΒ) [23,24], ως μεταπρότυπο. Στην παρούσα εργασία, οι μέθοδοι αυτοί αναφέρονται μόνο για λόγους πληρότητας και δε θα αναλυθεί περαιτέρω η εφαρμογή τέτοιων αλγορίθμων.

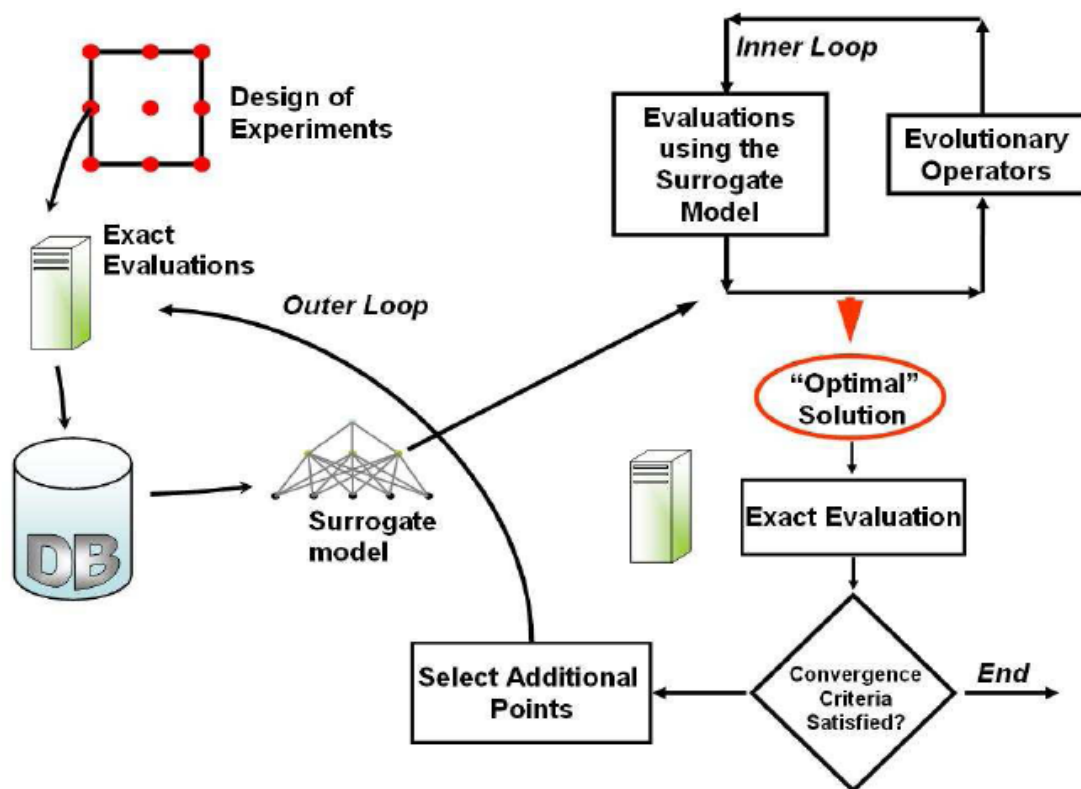


5.1.1 Εξελικτικός Αλγόριθμος με ΠΠΑ σε προβλήματα πολλών στόχων (On-line trained Surrogate Metamodel) [24]

²⁷ Radial-Basis Function Networks (RBFNs)



5.1.2 Εξελικτικός Αλγόριθμος με ΠΠΑ σε προβλήματα ενός στόχου (Off-line trained Surrogate Metamodel) [25]



5.1.3 Εξελικτικός Αλγόριθμος με ΠΠΑ σε προβλήματα ενός στόχου (Off-line trained Surrogate Metamodel) [25]

5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΙΕΡΑΡΧΙΚΟΥ ΑΔΕΑ

Ως βάση για το νέο αλγόριθμο χρησιμοποιήθηκε ο Ημι-ασύγχρονος ΔΕΑ που υπάρχει στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών και περιγράφηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο (αναφέρεται ως απλά ΑΔΕΑ για λόγους απλότητας). Από το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι η κλασική έννοια της γενιάς, δεν υπάρχει ούτε σε αυτό τον αλγόριθμο.

Ο Ιεραρχικός ΑΔΕΑ διατηρεί τις βασικές αρχές που διέπουν τον ΑΔΕΑ και ο χαρακτηρισμός του ως «Ιεραρχικός» περιγράφει τη βασική διαφοροποίησή του. Η βασική ιδέα που διέπει το νέο αλγόριθμο είναι η αξιολόγηση ενός αριθμού υποψήφιων λύσεων με μικρότερης ακρίβειας και παράλληλα μικρότερου υπολογιστικού κόστους λογισμικό. Στόχος της μεθόδου, λοιπόν, είναι η εύρεση βέλτιστης λύσης με μικρότερο αριθμό «ακριβών» αξιολογήσεων. Για το λόγο αυτό, κατανέμονται τα μέλη του πληθυσμού των απογόνων σε δύο επίπεδα, το υψηλό και το χαμηλό, με τρόπο που θα περιγραφεί στη συνέχεια. Τα μέλη του υψηλού επιπέδου αξιολογούνται ακριβώς, ενώ τα μέλη του χαμηλού επιπέδου αξιολογούνται προσεγγιστικά.

Η προσεγγιστική προ-αξιολόγηση υλοποιείται με χρήση προγραμματισμένου λογισμικού και δε βασίζεται σε εκπαιδευόμενο μεταπρότυπο, όπως στην κατηγορία εξελικτικών αλγορίθμων που αναφέρθηκε παραπάνω. Συνεπώς, οι προσεγγιστικές προ-αξιολογήσεις πραγματοποιούνται ήδη με την έναρξη του αλγορίθμου.

Για παράδειγμα, σε προβλήματα σχεδιασμού βέλτιστων αεροδυναμικών σωμάτων, η επίλυση της ροής γύρω από το σώμα συνήθως πραγματοποιείται με την χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes, που όμως επιβαρύνουν υπολογιστικά τον αλγόριθμο. Με το νέο αλγόριθμο, το λογισμικό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για τα άτομα του υψηλού επιπέδου και τα υπόλοιπα άτομα να αξιολογηθούν με χρήση της ολοκληρωματικής μεθόδου υπολογισμού του οριακού στρώματος [26], η οποία έχει πολύ μικρότερο υπολογιστικό κόστος.

Ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του αλγορίθμου είναι δίνεται παρακάτω:

$$S_\lambda \rightarrow \text{Σύνολο απογόνων.}$$

$S_{high} \subset S_\lambda \rightarrow$ Σύνολο των ατόμων του υψηλού επιπέδου

$S_{low} \subset S_\lambda \rightarrow$ Σύνολο των ατόμων του χαμηλού επιπέδου

$S_\mu \rightarrow$ Σύνολο γονέων.

$S_e \rightarrow$ Σύνολο επίλεκτων ατόμων.

$num_members \rightarrow$ Αριθμός ατόμων του συνόλου S_λ .

$num_eval \rightarrow$ Συνολικός αριθμός εκτελεσμένων αξιολογήσεων.

$num_eval_high \rightarrow$ Αριθμός εκτελεσμένων αξιολογήσεων υψηλού επιπέδου.

$num_eval_low \rightarrow$ αριθμός εκτελεσμένων αξιολογήσεων χαμηλού επιπέδου.

$num_prior \rightarrow$ Αριθμός προτεραιότητας στη λίστα αξιολόγησης.

Η γενική δομή του αλγορίθμου με τη χρήση ενός και μόνο επεξεργαστή (σειριακή επεξεργασία) για προβλήματα ενός στόχου έχει ως εξής:

- ✓ Επιλογή βασικών παραμέτρων της μεθόδου όπως το μέγεθος του πληθυσμού των απογόνων, άρα και των γονέων, και κάθε ποιον αριθμό αξιολογήσεων θα εκτελούνται οι εξελικτικές διαδικασίες.
- ✓ Κατανομή των λ κόμβων του πλέγματος στα δύο επίπεδα:

$$Level_i \rightarrow \begin{cases} High \\ Low \end{cases}, i = 1, 2, \dots, \lambda$$

- ✓ Αρχικοποίηση:
$$\begin{cases} num_eval = 0 \\ num_eval_high = 0 \\ num_eval_low = 0 \\ S_\mu = \otimes \\ S_e = \otimes \\ S_\lambda = S_{Random} \end{cases}$$

- ✓ Δημιουργία λίστας αξιολόγησης δίνοντας αριθμό προτεραιότητας στα άτομα του συνόλου των απογόνων²⁸.
- ✓ Έλεγχος της ύπαρξης του ατόμου προς αξιολόγηση στις βάσεις δεδομένων όλων των προηγούμενων αξιολογήσεων χαμηλού ή υψηλού επιπέδου, ανάλογα με το πώς πρόκειται να αξιολογηθεί. (Data Bases)
- ✓ Αξιολόγηση του ατόμου:
 - Αν $\vec{x}_i \in S_{high}$, τότε: $\vec{y}_i = \vec{F}_{High}(\vec{x}_i)$
 - Αν $\vec{x}_i \in S_{low}$, τότε: $\vec{y}_i = \vec{F}_{Low}(\vec{x}_i)$
- ✓ Συμπλήρωση της αντίστοιχης βάσης δεδομένων
- ✓ Τίθενται:
 - Αν $\vec{x}_i \in S_{high}$, τότε: $num_eval_high \leftarrow num_eval_high + 1$
 - Αν $\vec{x}_i \in S_{low}$, τότε: $num_eval_low \leftarrow num_eval_low + 1$
 - $num_eval \leftarrow num_eval + 1$
 - $num_prior_{\vec{x}_i} = num_members + num_eval$
- ✓ Έλεγχος σύγκλισης, μόνο αν το συγκεκριμένο άτομο έχει αξιολογηθεί ακριβώς.
- ✓ Έλεγχος αριθμού αξιολογημένων ατόμων από την προηγούμενη ανανέωση του συνόλου των απογόνων και εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης, αν αυτό είναι απαραίτητο. Πριν από την εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης, οι περισσότερες υποσχόμενες υποψήφιες λύσεις του χαμηλού επιπέδου επαναξιολογούνται σαν άτομα του υψηλού επιπέδου, ανεξάρτητα από τη σειρά προτεραιότητάς τους στη λίστα αξιολόγησης:

²⁸ Υπενθυμίζεται ότι οι αριθμοί προτεραιότητάς num_prior δίνονται στα άτομα σύμφωνα με το σειριακό σύστημα αρίθμησης (Κεφάλαιο 4-Σχήμα 4.1.2).

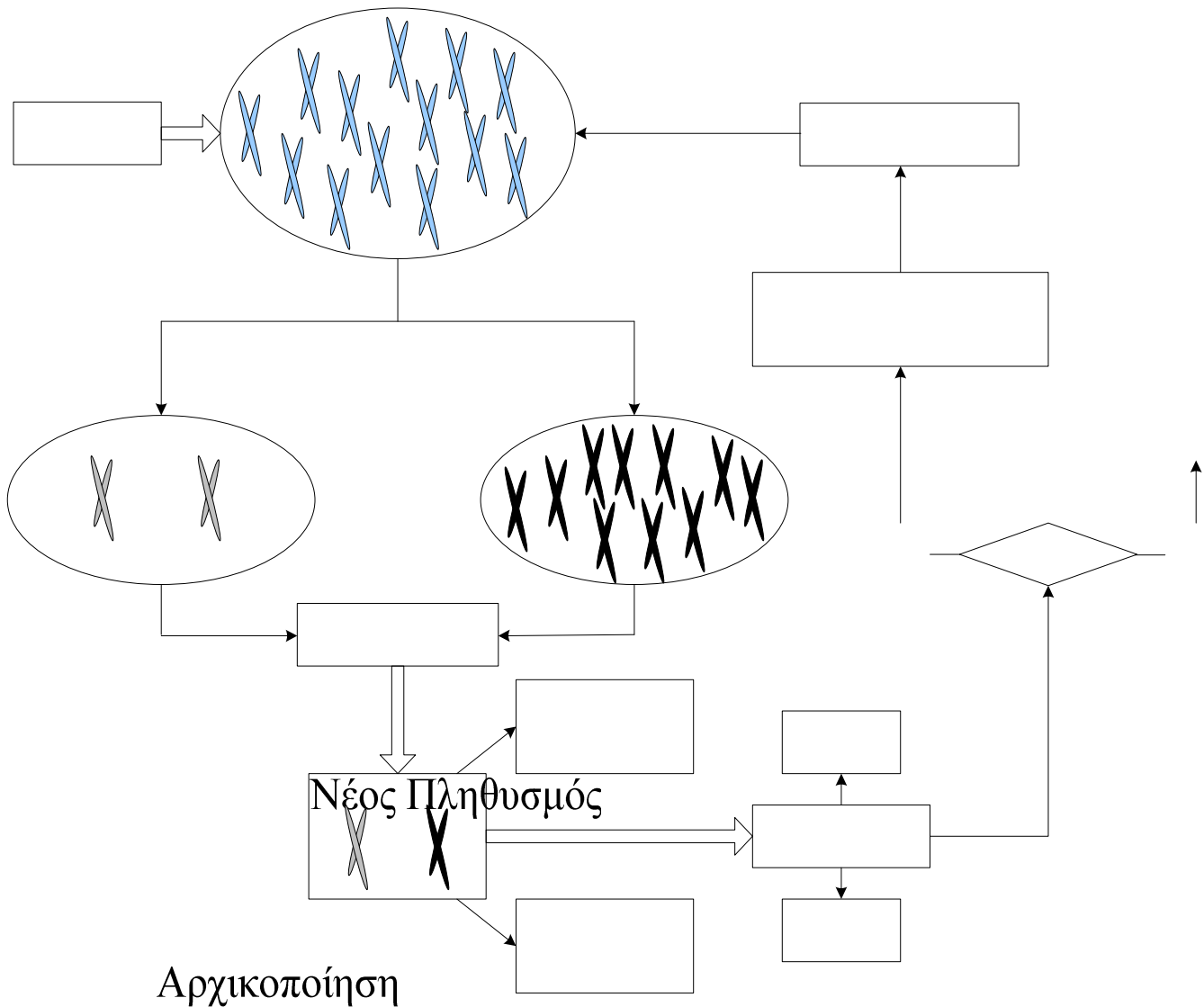
$$\vec{y}_i = \vec{F}_{High}(\vec{x}_i), \vec{x}_i \in S_{low}$$

- ✓ Συμπλήρωση της βάσης δεδομένων υψηλού επιπέδου και επαναφορά των ατόμων αυτών στο χαμηλό επίπεδο.

- ✓ Εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης:

$$\begin{cases} S_e = T_e(S_\lambda \cup S_\mu) \\ S_\mu = T_\mu(S_\mu \cup S_\lambda) \\ S_\lambda = T_m(T_r(S_\mu \cup S_e)) \end{cases}$$

- ✓ Αξιολόγηση του επόμενου ατόμου στη λίστα προτεραιότητας.



5.2.1 Ιεραρχικός Ασύγχρονος Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος

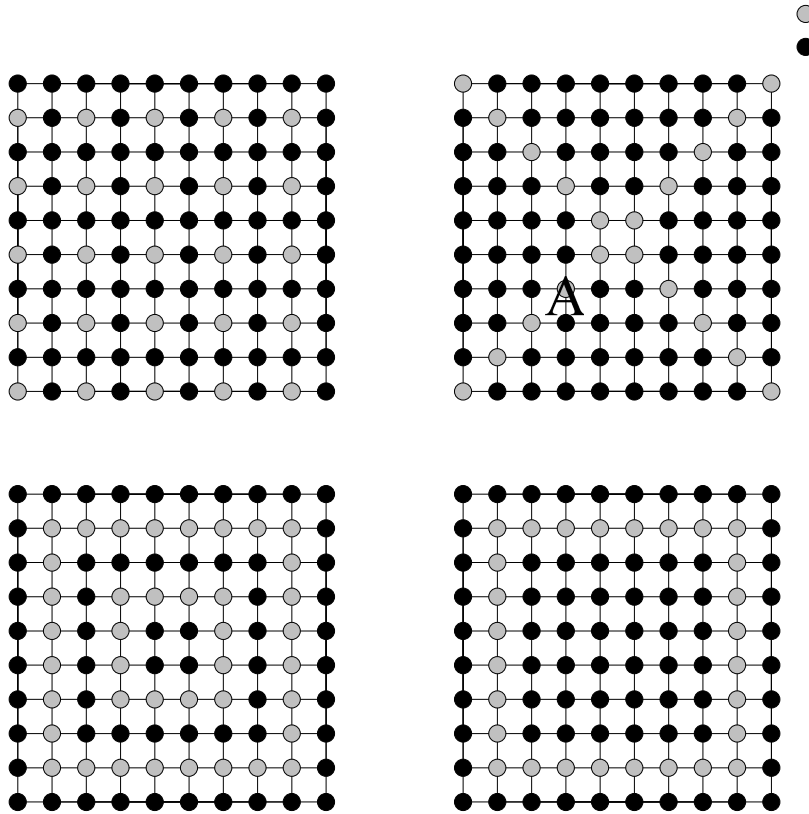
Στη συνέχεια περιγράφονται περισσότερο αναλυτικά τα πιο σημαντικά σημεία του αλγορίθμου, όπως η κατανομή των ατόμων του συνόλου των απογόνων σε δύο επίπεδα, η εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης καθώς και η παραλλαγή του αλγορίθμου κατά την εφαρμογή του σε προβλήματα βελτιστοποίησης δύο στόχων.

5.2.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΕΠΙΠΕΔΑ

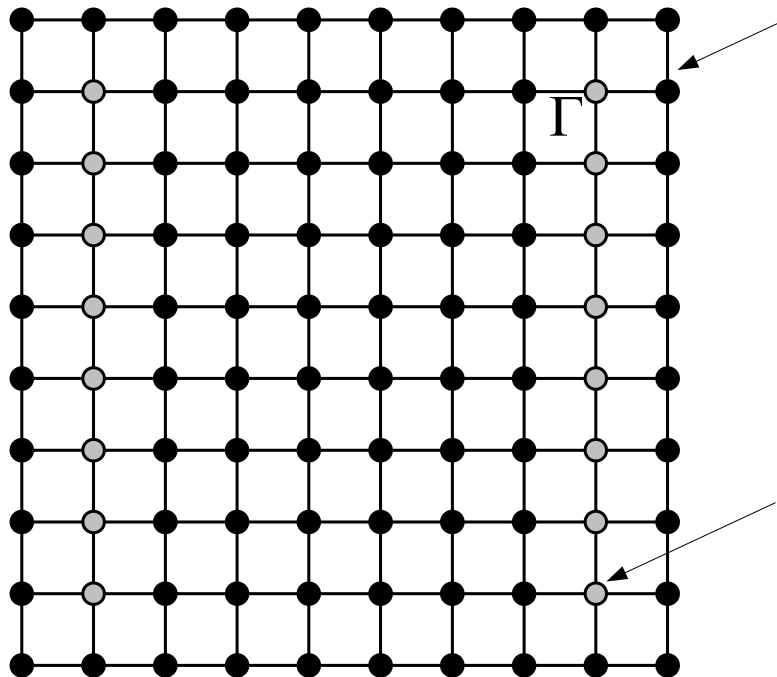
Στο πλήθος των υποψήφιων λύσεων επιβάλλεται ορισμένη τοπολογία. Συγκεκριμένα, μετά από κάθε ανανέωση του συνόλου των απογόνων, S_t , μέσω των εξελικτικών διεργασιών, τα μέλη του τοποθετούνται στους κόμβους ενός διδιάστατου πλέγματος μεγέθους $\lambda_1 \times \lambda_2 (= \lambda)$. Οι απόγονοι, ανάλογα με τη θέση τους στο πλέγμα αυτό, κατατάσσονται στα δύο επίπεδα, το υψηλό και το χαμηλό επίπεδο. Τα άτομα που έχουν τοποθετηθεί στο υψηλό επίπεδο αξιολογούνται ακριβώς, με το λογισμικό μεγάλης ακρίβειας και μεγάλου υπολογιστικού κόστους. Αντίθετα, τα άτομα του χαμηλού επιπέδου αξιολογούνται με το λογισμικό μικρότερης ακρίβειας.

Το πρώτο ερώτημα που τέθηκε ήταν με ποιο τρόπο θα επιλεγούν οι θέσεις στο πλέγμα των ατόμων υψηλού και χαμηλού επιπέδου. Έγινε δοκιμή σε διάφορους τύπους πλεγμάτων (Σχήμα 5.2.1). Δοκιμάστηκε, επιπλέον, η τυχαία επιβολή επιπέδου στα άτομα. Με κριτήριο το ρυθμό σύγκλισης του αλγορίθμου, η κατανομή που χρησιμοποιήθηκε στις εφαρμογές της μεθόδου φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 5.2.2.

Επιδιώκεται μικρό ποσοστό ατόμων, σε σχέση με το συνολικό πληθυσμό, να τοποθετούνται στο υψηλό επίπεδο, έτσι ώστε το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας να μειώνεται όσο το δυνατόν περισσότερο. Υπάρχει δυνατότητα καθορισμού του ποσοστού αυτού από το χρήστη πριν από την εκκίνηση του αλγορίθμου.



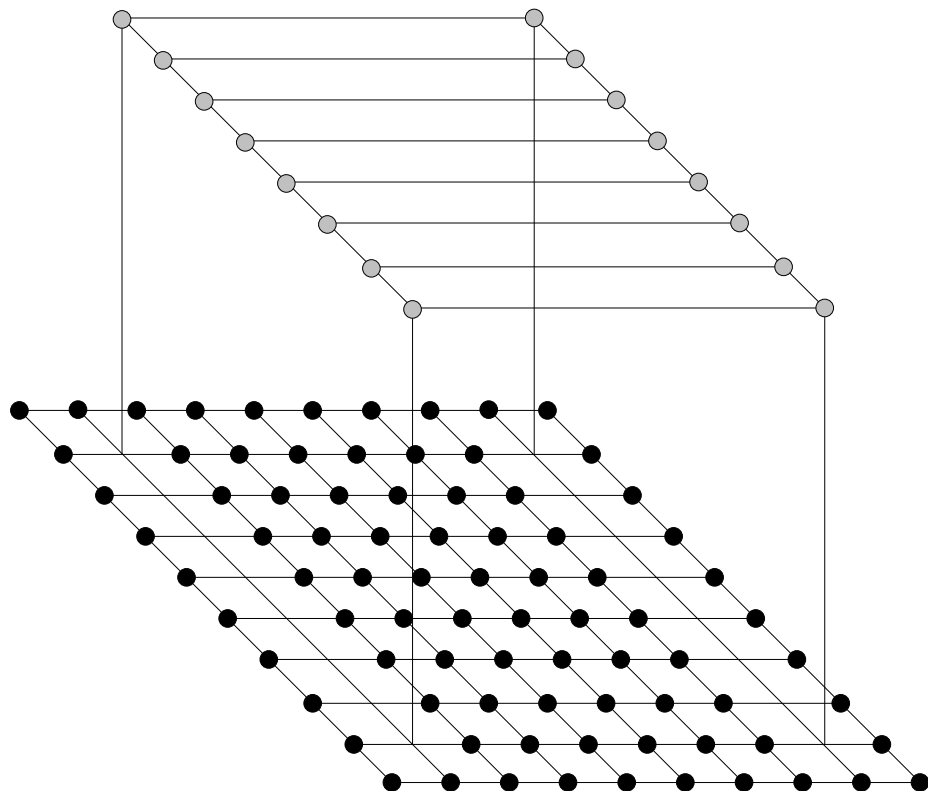
5.2.2 Δοκιμή κατανομών των υποψήφιων λύσεων σε δύο επίπεδα



5.2.3 Κατανομή των ατόμων στα δύο επίπεδα ανάλογα με τη θέση τους σε διδιάστατο πλέγμα μεγέθους $10 \times 10 (=100)$

Τα δύο επίπεδα είναι ανεξάρτητα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και επικοινωνούν σε συγκεκριμένες μόνο «στιγμές» στην πορεία του αλγορίθμου. Δημιουργούνται, λοιπόν, δύο ξεχωριστά αλλά και «συμπληρωματικά» μεταξύ τους πλέγματα (Σχήμα 5.5.3), τα οποία αποτελούν υποσύνολα του πλέγματος που φαίνεται στο σχήμα 5.2.2.

Η επικοινωνία των δύο επιπέδων συμβαίνει με δύο τρόπους, ο ένας από τους οποίους είναι η εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης, όπου το πλέγμα των απογόνων εμφανίζεται ως ενιαίο (Σχήμα 5.2.2), με στόχο την ανανέωσή του. Ο δεύτερος τρόπος είναι η επαναξιολόγηση των περισσότερο υποσχόμενων λύσεων του χαμηλού επιπέδου με το λογισμικό υψηλής ακρίβειας. Η επικοινωνία των δύο επιπέδων αξιολόγησης αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι του νέου αλγορίθμου και για το λόγο αυτό θα αναλυθεί περαιτέρω στη συνέχεια.



5.2.4 Πλέγμα υψηλού και χαμηλού επιπέδου

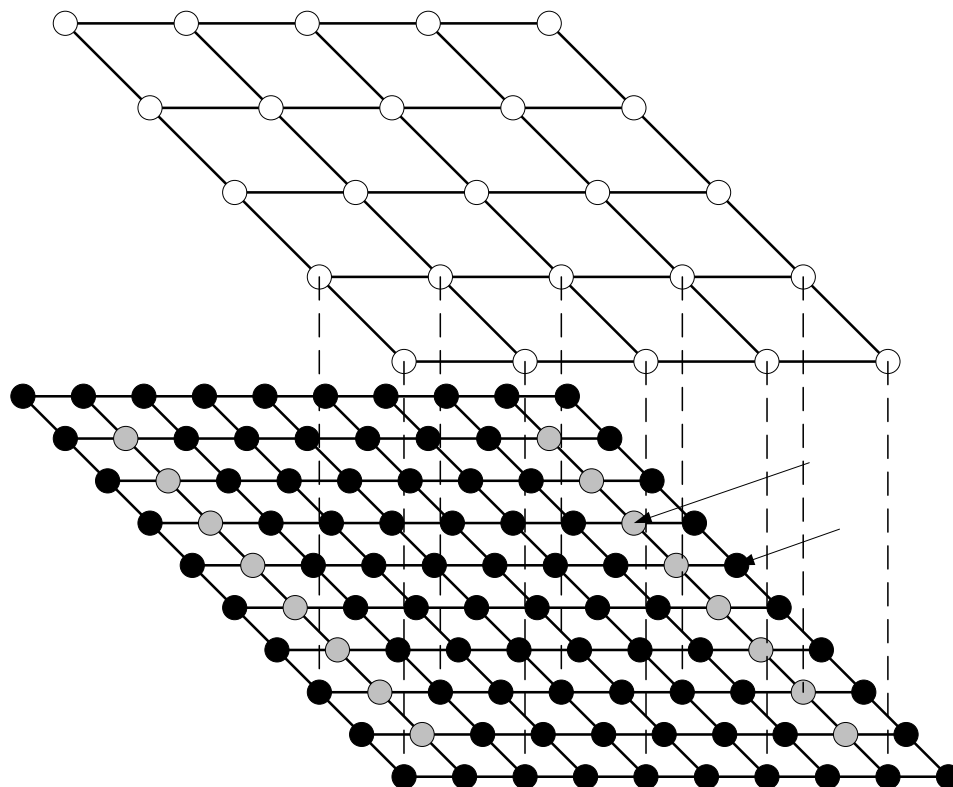
Υψηλό Επίπεδο

5.2.2 ΠΛΕΓΜΑ ΓΟΝΕΩΝ-ΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΓΟΝΕΩΝ T_M

Όπως ακριβώς και στον ΔΕΑ, το σύνολο των γονέων, S_μ , διατάσσεται επίσης σε ένα διδιάστατο πλέγμα, υποσύνολο του πλέγματος των απογόνων, μεγέθους $\mu_1 \times \mu_2 (= \mu)$, για το οποίο ισχύει: $\mu_1 = \lambda_1/2, \mu_2 = \lambda_2/2$. Στις εφαρμογές του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν τετράγωνα πλέγματα και με άρτιο αριθμό διαστάσεων, χωρίς ωστόσο αυτό να είναι απαραίτητο, επομένως ισχύουν τα παρακάτω:

$$\left[\begin{array}{l} \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_0 \\ \mu_1 = \mu_2 = \mu_0 \\ \mu_0 = \lambda_0/2 \end{array} \right]$$

Το πλέγμα των γονέων υπέρκειται αυτού των απογόνων και επικοινωνεί με αυτό κατά την εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης (Σχήμα 5.2.4).



5.2.5 Πλέγμα γονέων και απογόνων

Οι γονείς είναι άτομα που επιλέγονται από το σύνολο των απογόνων, ο καθένας από την γειτονιά του²⁹, και οι απόγονοι που προκύπτουν από τους γονείς παραμένουν γενικά στην γειτονιά των γονέων. Η επαναληψιμότητα³⁰ (περιοδικότητα) των πλεγμάτων ισχύει και εδώ, όπως και στον ΔΕΑ.

Ο τελεστής επιλογής γονέων καθορίζει ποια άτομα του συνόλου των απογόνων, θα συμμετάσχουν στο ανανεωμένο σύνολο των γονέων. Οι γονείς και οι απόγονοι τοποθετούνται σε καθορισμένες θέσεις πάνω στα αντίστοιχα πλέγματα. Η σχέση τους είναι επίσης καθορισμένη εφόσον κάθε νέος γονιός προκύπτει από τη σύγκριση της τιμής καταλληλότητας τεσσάρων ατόμων του προηγούμενου συνόλου των απογόνων, και συγκεκριμένα εκείνων των απογόνων που βρίσκονται στη άμεση γειτονιά του. Αν σε αυτή τη γειτονιά τύχει να «κατοικεί» το καλύτερο υψηλού επιπέδου άτομο από αυτά που έχουν αξιολογηθεί μέχρι αυτή τη στιγμή, τότε αυτό γίνεται σίγουρα γονέας για την επόμενη γενιά. Σε κάθε άλλη περίπτωση συγκρίνονται οι τιμές καταλληλότητας των ατόμων και σημειώνονται το άτομο με την καλύτερη και το άτομο με τη χειρότερη τιμή της γειτονιάς, ανεξαρτήτως επιπέδου. Έπειτα με Πιθανοτικό Διαγωνισμό³¹ επιλέγεται είτε το καλύτερο, είτε το χειρότερο άτομο για γονέας, με σαφές προβάδισμα στην πρώτη πιθανότητα.

5.2.3 ΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΑΞΗΣ

Ο νέος αλγόριθμος υιοθετεί τον τελεστή διασταύρωσης από τον Δομημένο Εξελικτικό Αλγόριθμο. Υπάρχουν, και εδώ, τα τέσσερα είδη διασταύρωσης, που περιγράφηκαν στο αντίστοιχο κεφάλαιο και τα οποία πραγματοποιούνται από τον αντίστοιχο τελεστή. Το ίδιο ισχύει και για τον τελεστή μετάλλαξης που εφαρμόζεται στους απογόνους, πριν εκείνοι να τοποθετηθούν στο πλέγμα. Με αυτόν τον τρόπο ανανεώνεται το σύνολο των απογόνων.

Το καλύτερο άτομο του προηγούμενου συνόλου απογόνων, το οποίο απαραίτητα έχει αξιολογηθεί ακριβώς, δεν τίθεται σε αυτή τη διαδικασία. Μεταφέρεται απευθείας στο ανανεωμένο σύνολο των απογόνων.

²⁹ Υπενθυμίζεται ότι ο ορισμός της γειτονιάς για κάθε γονέα βρίσκεται στο κεφάλαιο του Δομημένου Εξελικτικού Αλγόριθμου (Κεφάλαιο 3-Σχήμα 3.1.2).

³⁰ Κεφάλαιο 3-Σχήμα 3.1.3.

³¹ Probabilistic Tournament

5.2.4 ΙΕΡΑΡΧΙΚΟΣ ΑΔΕΑ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΛΛΩΝ ΣΤΟΧΩΝ

Ο νέος αλγόριθμος υποστηρίζει, επιπλέον, και προβλήματα βελτιστοποίησης περισσότερων του ενός στόχων. Η προσαρμογή του σε τέτοια προβλήματα βασίζεται στην έννοια του μετώπου Pareto, όπως αυτή είναι γνωστή από τους κλασικούς ΕΑ. Συγκεκριμένα, ο Ιεραρχικός ΑΔΕΑ διαχειρίζεται και δημιουργεί τα μέτωπα Pareto χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο SPEA2³².

Η λογική του Ιεραρχικού ΑΔΕΑ κατά την εφαρμογή του σε προβλήματα πολλών στόχων παρουσιάζεται σχηματικά παρακάτω:

- ✓ Επιλογή των βασικών παραμέτρων της μεθόδου. Εδώ καθορίζεται, επιπλέον, ο μέγιστος αριθμός ατόμων που θα επιλέγονται να ανήκουν στο μέτωπο Pareto.
- ✓ Κατανομή των λ κόμβων του πλέγματος στα δύο επίπεδα:

$$Level_i \rightarrow \begin{cases} High \\ Low \end{cases}, i = 1, 2, \dots, \lambda$$

- ✓ Αρχικοποίηση: $\begin{cases} num_eval = 0 \\ num_eval_high = 0 \\ num_eval_low = 0 \\ S_\mu = \otimes \\ S_e = \otimes \\ S_\lambda = S_{Random} \end{cases}$

- ✓ Δημιουργία λίστας αξιολόγησης.
- ✓ Έλεγχος της ύπαρξης του ατόμου στις βάσεις δεδομένων.
- ✓ Αξιολόγηση του ατόμου:

- Αν $\vec{x}_i \in S_{high}$, τότε: $\vec{y}_i = \vec{F}_{High}(\vec{x}_i)$

- Αν $\vec{x}_i \in S_{low}$, τότε: $\vec{y}_i = \vec{F}_{Low}(\vec{x}_i)$

³² Υποκεφάλαιο 2.4.2.

- ✓ Συμπλήρωση της βάσης δεδομένων υψηλού ή χαμηλού επιπέδου.
- ✓ Αύξηση των μετρητών num_eval_high ή num_eval_low και num_eval καθώς και πρόσδοση νέου αριθμού προτεραιότητας στο συγκεκριμένο άτομο.
- ✓ Έλεγχος αριθμού αξιολογημένων ατόμων από την προηγούμενη ανανέωση του συνόλου των απογόνων και εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης, αν αυτό είναι απαραίτητο. Πριν από την εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης, δημιουργείται μέτωπο Pareto από τις ήδη αξιολογημένες λύσεις του χαμηλού επιπέδου. Κάποιες τυχαία επιλεγόμενες λύσεις που ανήκουν στο μέτωπο αυτό, επαναξιολογούνται σαν μέλη του υψηλού επιπέδου.

$$\bar{y}_i = \bar{F}_{High}(\bar{x}_i), \bar{x}_i \in S_{low}$$

- ✓ Συμπλήρωση της βάσης δεδομένων υψηλού επιπέδου και επαναφορά των ατόμων αυτών στο χαμηλό επίπεδο.
- ✓ Εύρεση των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων του υψηλού επιπέδου.
- ✓ Έλεγχος κριτηρίων σύγκλισης.
- ✓ Εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης (ανανέωση του συνόλου των απογόνων).

$$\begin{cases} S_e = T_e(S_\lambda \cup S_\mu) \\ S_\mu = T_\mu(S_\mu \cup S_\lambda) \\ S_\lambda = T_m(T_r(S_\mu \cup S_e)) \end{cases}$$

- ✓ Αξιολόγηση του επόμενου ατόμου στη λίστα προτεραιότητας.

5.3 ΙΕΡΑΡΧΙΚΟΣ ΑΔΕΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Σε προηγούμενο κεφάλαιο εξηγήθηκε η ανάγκη παράλληλης επεξεργασίας. Όπως αναφέρθηκε, για την δημιουργία του Ιεραρχικού Ασύγχρονου Δομημένου Εξελικτικού Αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε ως βάση ο Ημι-ασύγχρονος ΔΕΑ του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών. Κατά συνέπεια, ο νέος αλγόριθμος αναπτύχθηκε, εξ αρχής, ώστε να μπορεί να υποστηρίξει την παράλληλη επεξεργασία.

Για την παραλληλοποίηση του χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη παράλληλης επεξεργασίας PVM [21], που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ο παράλληλος Ιεραρχικός ΑΔΕΑ είναι και αυτός ημι-ασύγχρονος αλγόριθμος, καθώς, όπως είδαμε, διατηρεί την έννοια της λίστας αξιολόγησης και καταργεί την κλασική έννοια της γενιάς.

Χρησιμοποιείται και εδώ η λογική συντονιστή-σκλάβου (Master-Slave). Η Κεντρική Διεργασία ελέγχει τη βασική ροή του αλγορίθμου και υλοποιεί τον επιμερισμό της εργασίας στις Διεργασίες Εργάτες. Οι διεργασίες αυτές επικοινωνούν μεταξύ τους, μέσω του PVM, με στόχο την ανταλλαγή δεδομένων.

Τα δεδομένα που στέλνει η Κεντρική Διεργασία είναι:

- Η θέση στο πλέγμα των απογόνων του ατόμου που αποστέλλεται προς αξιολόγηση.
- Το επίπεδο στο οποίο ανήκει, έτσι ώστε να καθορίζεται με ποιο τρόπο θα πραγματοποιηθεί η αξιολόγησή του.
- Ο αριθμός των μεταβλητών του προβλήματος και
- Η τιμή των μεταβλητών αυτών για το συγκεκριμένο άτομο.

Όταν η αξιολόγηση στην Διεργασία Εργάτη ολοκληρωθεί, ενημερώνεται η Κεντρική Διεργασία για:

- Το ποιο άτομο επιστρέφει στον έλεγχό της.
- Ποια είναι η τιμή κόστους/καταλληλότητάς του.
- Το αν έχει αξιολογηθεί με το λογισμικό υψηλού ή χαμηλού επιπέδου.

Η δομή του αλγορίθμου παρουσιάζει μικρές αλλαγές από τη δομή που παρουσιάστηκε νωρίτερα και δίνεται εδώ σχηματικά:

- ✓ Επιλογή των βασικών παραμέτρων της μεθόδου.
- ✓ Κατανομή των λ κόμβων του πλέγματος στα δύο επίπεδα:

$$Level_i \rightarrow \begin{cases} High \\ Low \end{cases}, i = 1, 2, \dots, \lambda$$

$$\checkmark \text{ Αρχικοποίηση: } \begin{cases} num_eval = 0 \\ num_eval_high = 0 \\ num_eval_low = 0 \\ S_\mu = \otimes \\ S_e = \otimes \\ S_\lambda = S_{Random} \end{cases}$$

- ✓ Δημιουργία λίστας αξιολόγησης.
- ✓ Έλεγχος της ύπαρξης του ατόμου στις βάσεις δεδομένων.
- ✓ Αποστολή για αξιολόγηση τόσων ατόμων, όσοι είναι και οι διαθέσιμοι επεξεργαστές (num_CPUs):

$$\left. \begin{array}{l} \bar{y}_1 = \vec{F}(\bar{x}_1), \forall \bar{x} \in S_\lambda \rightarrow CPU_1 \\ \bar{y}_2 = \vec{F}(\bar{x}_2), \forall \bar{x} \in S_\lambda \rightarrow CPU_2 \\ \dots \\ \bar{y}_{num_CPUs} = \vec{F}(\bar{x}_{num_CPUs}), \forall \bar{x} \in S_\lambda \rightarrow CPU_{num_CPUs} \end{array} \right\} num_CPUs$$

$$\text{Όπου } \vec{F}(\bar{x}_i) = \begin{cases} \vec{F}_{High}(\bar{x}_i), \bar{x}_i \in S_{high} \\ \vec{F}_{Low}(\bar{x}_i), \bar{x}_i \in S_{low} \end{cases}$$

- ✓ Ολοκλήρωση της αξιολόγησης ενός ατόμου \bar{x}_i και επιστροφή του στον έλεγχο της Κεντρικής Διεργασίας αύξηση των μετρητών αξιολογήσεων και πρόσδοση νέου αριθμού προτεραιότητας:

$$\begin{aligned} num_eval &\leftarrow num_eval + 1 \\ \left\{ \begin{array}{l} \text{Av } \bar{x}_i \in S_{high} \text{ τότε } num_eval_high \leftarrow num_eval + 1 \\ \text{Av } \bar{x}_i \in S_{low} \text{ τότε } num_eval_low \leftarrow num_eval + 1 \end{array} \right. \\ num_prior_{\bar{x}_i} &= num_members + num_eval \end{aligned}$$

- ✓ Συμπλήρωση της βάσης δεδομένων υψηλού ή χαμηλού επιπέδου.
- ✓ Έλεγχος Σύγκλισης (αν το πρόβλημα είναι ενός στόχου).
- ✓ Έλεγχος αριθμού αξιολογημένων ατόμων από την προηγούμενη ανανέωση του συνόλου των απογόνων και εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης, αν αυτό

είναι απαραίτητο. Πριν από την εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης, οι περισσότερες υποσχόμενες λύσεις του χαμηλού επιπέδου επαναξιολογούνται σαν μέλη του υψηλού επιπέδου. (Αν το πρόβλημα είναι πολλών στόχων, τότε οι λύσεις αυτές ανήκουν στο μέτωπο Pareto χαμηλού επιπέδου).

$$\vec{y}_i = \vec{F}_{High}(\vec{x}_i), \vec{x}_i \in S_{low}$$

- ✓ Συμπλήρωση της βάσης δεδομένων υψηλού επιπέδου και επαναφορά των ατόμων αυτών στο χαμηλό επίπεδο.
- ✓ Δημιουργία του μετώπου Pareto υψηλού επιπέδου και έλεγχος κριτηρίων σύγκλισης (αν το πρόβλημα είναι πολλών στόχων).
- ✓ Εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης..

$$\begin{cases} S_e = T_e(S_\lambda \cup S_\mu) \\ S_\mu = T_\mu(S_\mu \cup S_\lambda) \\ S_\lambda = T_m(T_r(S_\mu \cup S_e)) \end{cases}$$

- ✓ Αξιολόγηση του επόμενου ατόμου στη λίστα προτεραιότητας κοκ.

5.4 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΥΨΗΛΟΥ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ.

Για μια εξελικτική μέθοδο που χρησιμοποιεί την προσεγγιστική προ-αξιολόγηση για την ανίχνευση του χώρου των λύσεων με στόχο τη μείωση του υπολογιστικού κόστους της επεξεργασίας, η φάση της επικοινωνίας του συνόλου των προσεγγιστικά αξιολογούμενων λύσεων και του συνόλου των ακριβώς αξιολογούμενων λύσεων είναι πολύ σημαντική. Με τον όρο επικοινωνία περιγράφεται η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των δύο αυτών συνόλων. Μια τέτοια μέθοδος είναι και ο Ιεραρχικός ΑΔΕΑ που αναπτύσσεται εδώ και για το λόγο αυτό οι φάσεις επικοινωνίας, άμεσης και έμμεσης, των δύο επιπέδων αποτελεί σημαντικό κομμάτι.

Κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ, διακρίνονται δύο ξεχωριστές φάσεις επικοινωνίας των δύο επιπέδων, του χαμηλού και του υψηλού. Μετά την κάθε ανανέωση του συνόλου των απογόνων και πριν τη στιγμή της επόμενης, οι ακριβείς

και οι προσεγγιστικές αξιολογήσεις πραγματοποιούνται ξεχωριστά, δηλαδή δεν υπάρχει καμία επικοινωνία μεταξύ τους. Η λύση που κάθε φορά αξιολογείται (από έναν επεξεργαστή-σκλάβο) και επιστρέφει στον έλεγχο της Κεντρικής Διεργασίας συγκρίνεται ως προς την καταλληλότητα με την τρέχουσα καλύτερη λύση αν και μόνο αν έχει αξιολογηθεί με το ακριβές λογισμικό.

Πριν από την εφαρμογή των τελεστών εξέλιξης, οι περισσότερο υποσχόμενες λύσεις του χαμηλού επιπέδου στέλνονται στους επεξεργαστές-εργάτες έτσι ώστε να επαναξιολογηθούν με το λογισμικό υψηλής ακρίβειας. Αποστέλλεται ένα άτομο κάθε φορά στον επεξεργαστή που είναι εκείνη τη στιγμή διαθέσιμος. Η αξιολόγηση των ατόμων αυτών πραγματοποιείται ανεξάρτητα από την προτεραιότητά τους στη λίστα αξιολόγησης. Το σημείο αυτό αποτελεί και την πρώτη φάση επικοινωνίας μεταξύ των δύο επιπέδων. Η επικοινωνία αυτή είναι έμμεση καθώς τα δύο επίπεδα δεν ανταλλάσσουν πληροφορία (γενετικό υλικό) άμεσα. Μόλις ολοκληρωθεί η αποστολή ενός αριθμού (καθορισμένου από το χρήστη) τέτοιων ατόμων, και χωρίς απαραίτητα εκείνα να έχουν επιστρέψει στον έλεγχο της Κεντρικής Διεργασίας, πραγματοποιούνται οι εξελικτικές διεργασίες. Όλα τα άτομα που έχουν σταλεί για αξιολόγηση και δεν έχουν επιστρέψει ακόμα στον έλεγχο του επεξεργαστή-συντονιστή, ανεξάρτητα από το αν είναι χαμηλού ή υψηλού επιπέδου ή επαναξιολογούνται, δε συμμετέχουν εξελικτικές διεργασίες.

Η επικοινωνία που περιγράφηκε παραπάνω είναι έμμεση και μετατρέπεται σε άμεση, μόνο όταν τύχει το άτομο που επαναξιολογείται να είναι καλύτερο από την τρέχουσα βέλτιστη λύση. Τότε και μόνο κάποια πληροφορία από το χαμηλό επίπεδο μεταφέρεται, και μάλιστα ολοκληρωμένη (ολόκληρο άτομο και όχι μέρος του γενετικού του υλικού), στο υψηλό επίπεδο.

Κατά τη διάρκεια των εξελικτικών διεργασιών (εφαρμογή των τελεστών επιλογής γονέων, διασταύρωσης και μετάλλαξης) τα ήδη αξιολογημένα άτομα συμμετέχουν σε αυτές, ανεξάρτητα από το επίπεδο στο οποίο ανήκουν, με βάση την τιμή καταλληλότητας ή κόστους. Στην περίπτωση των ατόμων που έχουν ήδη επαναξιολογηθεί, λαμβάνεται υπόψη η τιμή κόστους ή καταλληλότητας σύμφωνα με τη δεύτερη αξιολόγησή τους, η οποία έχει πραγματοποιηθεί με το λογισμικό υψηλού υπολογιστικού κόστους και ακρίβειας. Εδώ τοποθετείται η δεύτερη φάση επικοινωνίας των δύο επιπέδων, η οποία επίσης χαρακτηρίζεται έμμεση, καθώς και

πάλι δεν υπάρχει μεταφορά ολοκληρωμένης πληροφορίας, παρά μόνο μέρους του γενετικού υλικού, από το ένα επίπεδο στο άλλο.

Σε προβλήματα περισσότερων από έναν στόχων, οι φάσεις επικοινωνίας των δύο επιπέδων είναι οι ίδιες και «συμβαίνουν» στα ίδια σημεία του αλγορίθμου. Ωστόσο, επειδή δεν είναι δυνατή η σύγκριση των μελών του μετώπου Pareto, για να μεταφερθεί άμεσα πληροφορία από το χαμηλό στο υψηλό επίπεδο θα πρέπει το άτομο που υφίσταται επαναξιολόγηση να κριθεί κατάλληλο και να αποτελέσει μέλος του μετώπου Pareto υψηλού επιπέδου.

Κατά την εφαρμογή, λοιπόν, του Ιεραρχικού ΑΔΕΑ η επικοινωνία (ανταλλαγή πληροφορίας) μεταξύ του χαμηλού και του υψηλού επιπέδου είναι έμμεση και μόνο στοχαστικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να μετατραπεί σε άμεση.

6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ-ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εφαρμογές του Ιεραρχικού Ασύγχρονου Δομημένου Εξελικτικού Αλγορίθμου (ΙΑΔΕΑ) σε προβλήματα βελτιστοποίησης με σκοπό την αξιολόγησή του. Η αξιολόγηση του αλγορίθμου συνίσταται στην ικανότητα επίτευξης βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης με συγκεκριμένο υπολογιστικό κόστος. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η μέθοδος στην περίπτωση σχεδιασμού βέλτιστης αεροτομής πτερυγίου συμπίεστη για δεδομένες συνθήκες ροής. Για λόγους σύγκρισης χρησιμοποιείται και ο Ασύγχρονος Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος (ΑΔΕΑ) του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών (ΕΘΣ) στα ίδια προβλήματα ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του Ιεραρχικού ΑΔΕΑ. Σημειώνεται ότι οι εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση παράλληλης επεξεργασίας και με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης υποστήριξης καταναμημένης εργασίας PVM. Με τον τρόπο αυτό, μειώθηκε η διάρκεια των δοκιμών και δόθηκε η δυνατότητα εκμετάλλευσης του ασύγχρονου χαρακτήρα του

αλγορίθμου. Το πολυεπεξεργαστικό σύστημα του ΕΘΣ που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 32 κόμβους (μηχανήματα) με συνολικά 80 πυρήνες (P4 και Xeon) και συνολικά 105 GB RAM.

6.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο περιγραφής του νέου αλγορίθμου, το υπολογιστικό κόστος του λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των υποψηφίων λύσεων του χαμηλού επιπέδου πρέπει να είναι μικρότερο από αυτό του λογισμικού υψηλού επιπέδου. Το γεγονός αυτό είναι απαραίτητο εφόσον στόχος της μεθόδου είναι η ελάττωση του συνολικού υπολογιστικού κόστους. Για παράδειγμα, αν η αξιολόγηση των υποψηφίων λύσεων του υψηλού επιπέδου πραγματοποιείται με χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes, εκείνες του χαμηλού θα μπορούσαν να αξιολογούνται με χρήση της ολοκληρωματικής μεθόδου υπολογισμού του αναπτυσσόμενου οριακού στρώματος [26], το υπολογιστικό κόστος της οποίας είναι αρκετά μικρότερο ανά αξιολόγηση.

Ωστόσο, στο πλαίσιο μιας διπλωματικής εργασίας είναι δύσκολο, από θέμα χρόνου, να πραγματοποιηθεί επεξεργασία με χρήση «ακριβού» λογισμικού. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία, ως λογισμικό υψηλού επιπέδου χρησιμοποιείται η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού του αναπτυσσόμενου οριακού στρώματος και ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου η ίδια μέθοδος, με την επιβολή ενός τεχνητού σφάλματος. Είναι προφανές ότι, με αυτόν τον τρόπο, δεν επιτυγχάνεται αισθητή μείωση του υπολογιστικού κόστους, προσεγγίζεται, όμως, η διαφορά ακρίβειας επίλυσης της ροής μεταξύ των εξισώσεων Navier-Stokes και της ολοκληρωματικής μεθόδου υπολογισμού οριακών στρωμάτων. Παρ' όλα αυτά, θεωρείται πως υπάρχει σχέση αναλογίας 3:1 ανάμεσα στο υπολογιστικό κόστος αξιολόγησης υψηλού επιπέδου και σε αυτό του χαμηλού επιπέδου. Η αναλογία αυτή προσεγγίζει τη σχέση υπολογιστικού κόστους της επίλυσης της ροής γύρω από ένα αεροδυναμικό σώμα με τη χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes και της ολοκληρωματικής μεθόδου οριακών στρωμάτων.

Με σκοπό την καλύτερη αξιολόγηση της μεθόδου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε προβλήματα σχεδιασμού βέλτιστης αεροτομής πτερυγίου συμπίεστή με ένα στόχο αλλά και δύο (αντικρουόμενους) στόχους.

6.1.1 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΟΣ ΣΤΟΧΟΥ

Στην πρώτη περίπτωση προβλήματος βελτιστοποίησης ενός στόχου, το οποίο εξετάστηκε εδώ, εφαρμόστηκε *ιεραρχική αξιολόγηση*. Οι αξιολογήσεις των ατόμων και των δύο επιπέδων, υψηλού και χαμηλού, πραγματοποιήθηκαν με χρήση της ολοκληρωματικής μεθόδου υπολογισμού οριακών στρωμάτων. Ωστόσο, κατά την εφαρμογή της μεθόδου στα άτομα χαμηλού επιπέδου επιλέχθηκε χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Με τον τρόπο αυτό, εισάγεται κάποιο τεχνητό σφάλμα στην πραγματική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την κάθε προσεγγιστικά αξιολογηθείσα υποψήφια λύση.

Στη δεύτερη περίπτωση σχεδιασμού βέλτιστης αεροτομής συμπίεστή εφαρμόστηκε *ιεραρχική παραμετροποίηση*. Στην περίπτωση αυτή, διαφοροποιείται η παραμετροποίηση των υποψήφια βέλτιστων αεροτομών χαμηλού επιπέδου από αυτή του υψηλού. Πιο συγκεκριμένα, κατά την αξιολόγηση των μελών του χαμηλού επιπέδου, χρησιμοποιείται μικρότερος αριθμός σημείων ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής από τον χρησιμοποιούμενο στο υψηλό επίπεδο. Εισάγεται, έτσι, και εδώ τεχνητό σφάλμα στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

6.1.1.1 ΙΕΡΑΡΧΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η δοκιμή του αλγορίθμου στο πρόβλημα σχεδιασμού βέλτιστης αεροτομής πτερυγίου συμπίεστή με μοναδικό στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών ολικής πίεσης όταν οι συνθήκες ροής είναι:

- Γωνία εισόδου της ροής: $\alpha_1 = 47^\circ$
- Γωνία κλίσης του πτερυγίου: $\gamma = 30^\circ$
- Αριθμός Mach στην είσοδο: $M_1 = 0.45$

- Αριθμός Reynolds βασισμένος στη χορδή: $Re_c = 841000$
- Λόγος διατομής εξόδου-εισόδου πτερύγωσης³³: $AVDR = 0.89$

Ο υπολογισμός του συντελεστή απωλειών ολικής πίεσης πραγματοποιείται, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως από την ολοκληρωματική μέθοδο υπολογισμού του οριακού στρώματος, η οποία κάνει χρήση ενός Euler επιλύτη για την εξωτερική ροή. Ο μαθηματικός τύπος που δίνει τον συντελεστή απωλειών ολικής πίεσης δίνεται παρακάτω:

$$\omega = \frac{P_{t1} - P_{t2}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot W_1^2}$$

Στον παραπάνω τύπο, W_1 είναι η σχετική ταχύτητα του ρευστού, ρ είναι η πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου και P_{t1} , P_{t2} είναι οι ολικές πιέσεις στην είσοδο και έξοδο του συμπιεστή.

Στο πρόβλημα αυτό έχουν τεθεί περιορισμοί στο πάχος της αεροτομής σε τρία σημεία κατά μήκος της χορδής. Συγκεκριμένα στο 30% της χορδής η ελάχιστη τιμή του πάχους είναι $0.08 \cdot C$, στο 60% είναι $0.07 \cdot C$ και στο 90% είναι ίση με $0.01 \cdot C$, όπου C είναι το μήκος της χορδής της αεροτομής. Αν μια υποψήφια λύση, δηλαδή μια αεροτομή, παραβεί τους περιορισμούς της επιβάλλεται εκθετικής μορφής ποινή, η οποία προστίθεται στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι αεροτομές οι οποίες παραβαίνουν το ελάχιστο δυνατό πάχος, που είναι ένας γενικό περιορισμός για όλο το μήκος της χορδής, απορρίπτονται από τον πληθυσμό ως ακατάλληλες, μέσω απειρισμού της τιμής κόστους τους.

Το περίγραμμα των πλευρών υποπίεσης και υπερπίεσης της αεροτομής παραμετροποιήθηκε χρησιμοποιώντας πολυώνυμα Bezier με $N=9$ σημεία ελέγχου σε κάθε μια από αυτές. Οι συντεταγμένες των σημείων Bezier αποτελούν τις παραμέτρους του προβλήματος. Ωστόσο, τις ελεύθερες παραμέτρους του προβλήματος αποτελούν οι συντεταγμένες (x, y) έξι εκ των εννέα σημείων κάθε

³³ Axial Velocity Density Ratio

πλευράς και μόνο η τεταγμένη ενός ακόμα σημείου Bezier, πάλι από κάθε πλευρά. Κατά συνέπεια οι ελεύθερες μεταβλητές είναι συνολικά $2 \times 12 + 2 \times 1 = 26$.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ολοκληρωματική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των υποψήφιων λύσεων και των δύο επιπέδων. Η διαφορά έγκειται στο ότι όταν το προς αξιολόγηση άτομο είναι χαμηλού επιπέδου, το λογισμικό αξιολόγησης τερματίζεται με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης, σε σχέση με αυτό που χρησιμοποιείται για το υψηλό επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο, εισάγεται ένα τεχνητό σφάλμα, με στόχο να προσεγγιστεί το σφάλμα αυτής της μεθόδου υπολογισμού σε σχέση με την ακριβή επίλυση της ροής γύρω από το αεροδυναμικό σώμα με τη χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes.

Πρακτικά, δεν υπάρχει διαφορά στο υπολογιστικό κόστος αξιολόγησης υψηλού και χαμηλού επιπέδου. Ωστόσο, θεωρείται πως η αναλογία τους είναι 3:1. Με σκοπό να τεθεί ένα ενιαίο κριτήριο αξιολόγησης της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης των δύο αλγορίθμων, στα διαγράμματα που θα ακολουθούν ο οριζόντιος άξονας παρουσιάζει τον συνολικό αριθμό αξιολογήσεων χαμηλού επιπέδου. Στον υπολογισμό αυτό, η κάθε αξιολόγηση υψηλού επιπέδου αντιστοιχεί σε τρεις αξιολογήσεις χαμηλού επιπέδου. Έτσι, αξιολογείται ο ΙΑΔΕΑ σε σχέση με τον ΑΔΕΑ του ΕΘΣ ως προς το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας. Επομένως:

- Στον Ασύγχρονο ΔΕΑ- Ένα μόνο επίπεδο αξιολόγησης (υψηλό):

$$N_{total_low} = k \cdot N_{high}, \quad k = 3$$

- Στον Ιεραρχικό Ασύγχρονο ΔΕΑ- Δύο επίπεδα αξιολόγησης (υψηλό/χαμηλό):

$$N_{total_low} = k \cdot N_{high} + N_{low}, \quad k = 3$$

Όπου,

N_{high} → Ο αριθμός αξιολογήσεων υψηλού επιπέδου.

N_{low} → Ο αριθμός αξιολογήσεων χαμηλού επιπέδου.

N_{total_low} → Ο συνολικός αριθμός αξιολογήσεων χαμηλού επιπέδου.

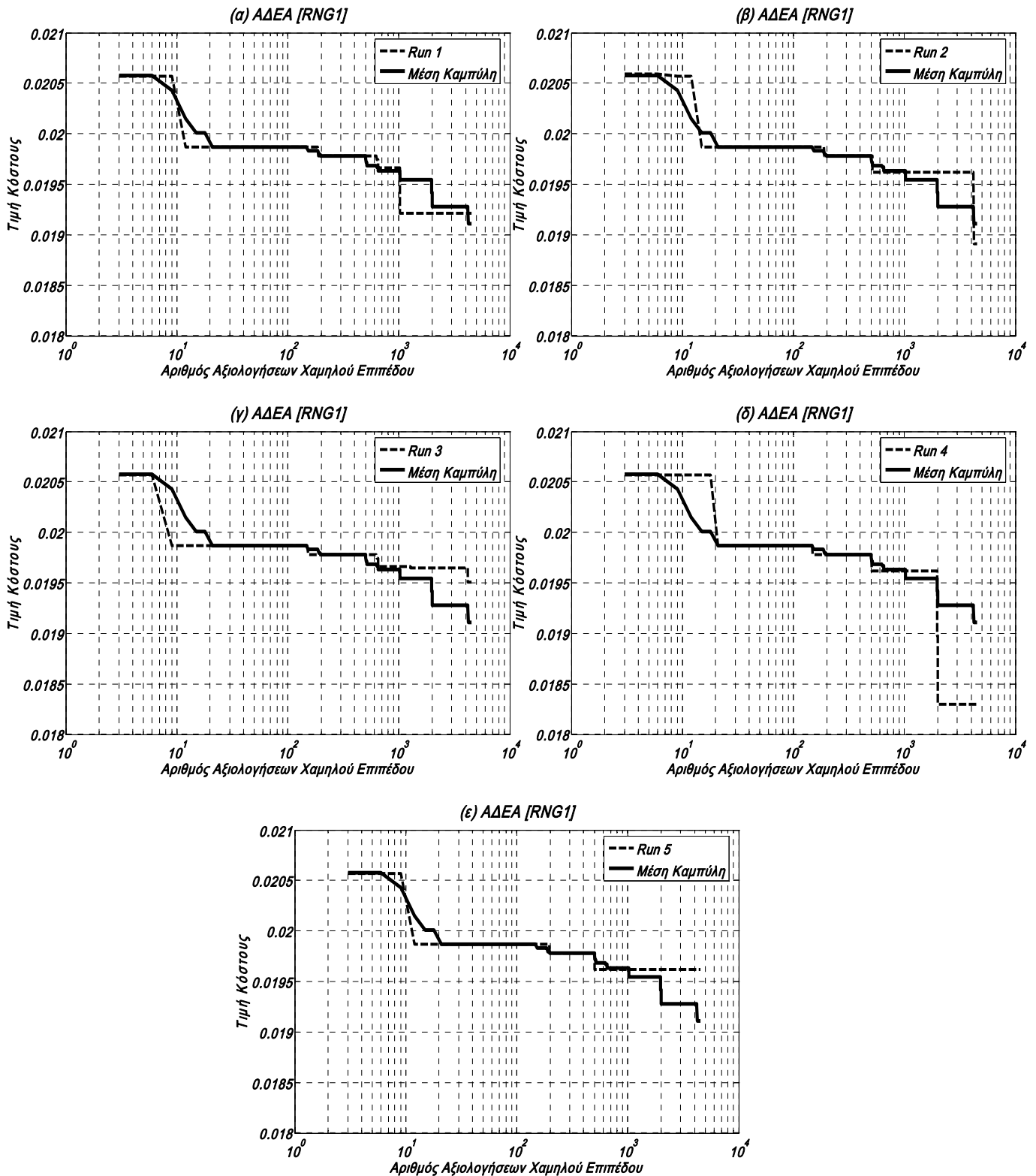
Για όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ο αριθμός επιτρεπόμενων αξιολογήσεων «μεταφρασμένος» σε *αξιολογήσεις χαμηλού επιπέδου* είναι κοντά στο 4500 και το πλέγμα των απογόνων έχει διαστάσεις 10×10 . Οι πληθυσμοί, επομένως, απογόνων και γονέων αντίστοιχα είναι: $S_\lambda = 100$ και $S_\mu = 50$. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι ο αριθμός 4500 αξιολογήσεων χαμηλού επιπέδου αντιστοιχεί σε 1500 αξιολογήσεις υψηλού επιπέδου (εφαρμογές ΑΔΕΑ), εφόσον η αναλογία σε υπολογιστικό κόστος μεταξύ των δύο είναι 3:1. Σημειώνεται ότι ο αριθμός 4500 αξιολογήσεων (χαμηλού επιπέδου) είναι υπέρμετρα μεγάλος για χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές, αλλά αποφασίστηκε να αφηθεί ο κώδικας να πραγματοποιήσει τόσες πολλές αξιολογήσεις ώστε να είναι σίγουρο ότι εντοπίστηκε το καθολικό ακρότατο.

Ο ΙΑΔΕΑ δοκιμάστηκε με τη βοήθεια παράλληλης επεξεργασίας και τη χρήση 10 επεξεργαστών του ΕΘΣ για 5 διαφορετικές γεννήτριες τυχαίων αριθμών (RNG³⁴). Όπως προαναφέρθηκε, ο ΑΔΕΑ αλλά και ο ΙΑΔΕΑ είναι ασύγχρονοι αλγόριθμοι, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι κάθε φορά με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών, θα ακολουθήσουν διαφορετική πορεία στην εύρεση λύσης. Το γεγονός αυτό εξηγείται καθώς η πορεία του αλγορίθμου εξαρτάται, εκτός από την αρχικοποίηση του συνόλου των απογόνων (γεννήτρια τυχαίων αριθμών), από παράγοντες όπως το ποιά Διεργασία Εργάτης θα λάβει προς αξιολόγηση ποιά λύση, πόσο γρήγορα θα την αξιολογήσει και θα την επιστρέψει στην Κεντρική Διεργασία και άρα πόσες και ποιές λύσεις θα έχουν αξιολογηθεί πριν την επόμενη ανανέωση του συνόλου των απογόνων. Για το λόγο αυτό, και για να μην βασιστεί η αξιολόγηση του νέου αλγορίθμου σε μια στοχαστική καλή πορεία της επεξεργασίας, πραγματοποιήθηκαν 5 επαναλήψεις για την κάθε γεννήτρια τυχαίων αριθμών, από τις οποίες προέκυψε μια μέση καμπύλη. Κατά συνέπεια, οι πηγές με βάση τις οποίες διαφοροποιείται η επεξεργασία του ίδιου προβλήματος, είναι η διαφορετική γεννήτρια τυχαίων αριθμών καθώς και η στοχαστική πορεία που μπορεί να υιοθετήσει η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης με την ίδια, όμως, γεννήτρια τυχαίων αριθμών.

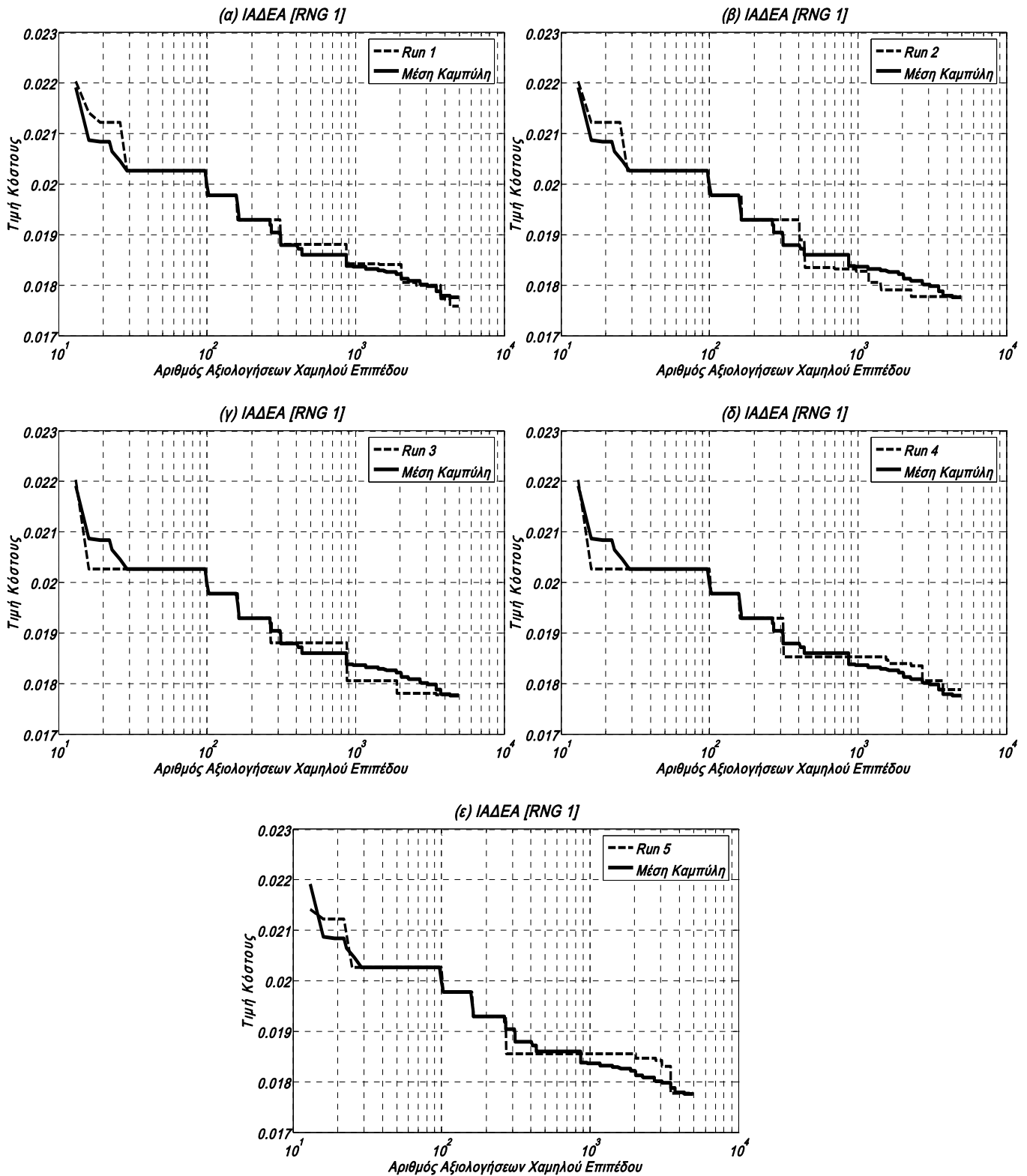
Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση της μέσης καμπύλης του ΑΔΕΑ και της αντίστοιχης του ΙΑΔΕΑ για την ίδια RNG. Αυτό σημαίνει, πρακτικά, ότι κάθε φορά οι δύο αλγόριθμοι ξεκινούν με τον ίδιο ακριβώς πληθυσμό απογόνων. Υπενθυμίζεται

³⁴ Random Number Generator

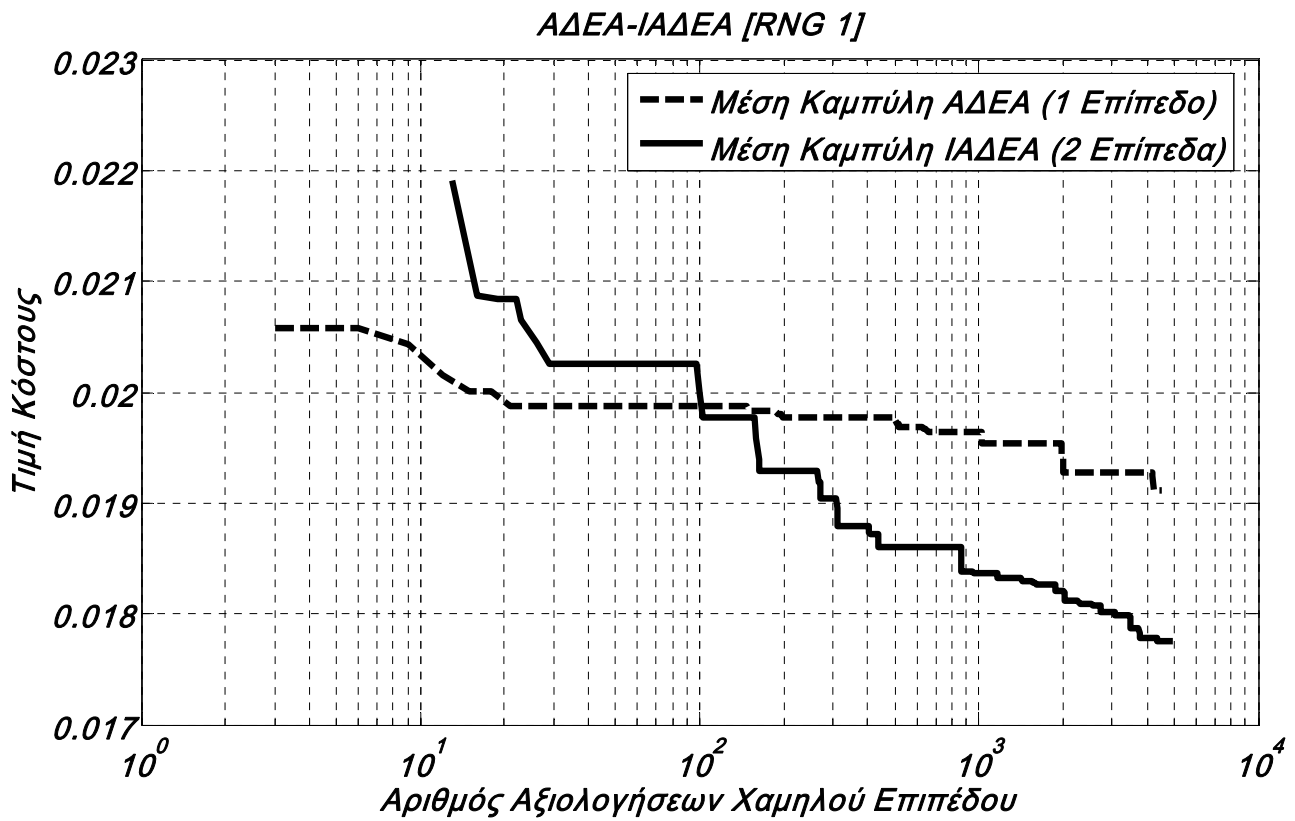
ότι ο αριθμός αξιολογήσεων που φαίνεται στον οριζόντιο άξονα των διαγραμμάτων, τα οποία αφορούν στην εφαρμογή του ΑΔΕΑ, αντιστοιχεί στο $1/3$ του αριθμού των πραγματικών («ακριβών») αξιολογήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Σε όλα τα παρακάτω διαγράμματα χρησιμοποιείται, για εποπτικούς λόγους, η λογαριθμική κλίμακα στον οριζόντιο άξονα όπου φαίνεται ο αριθμός αξιολογήσεων χαμηλού επιπέδου.



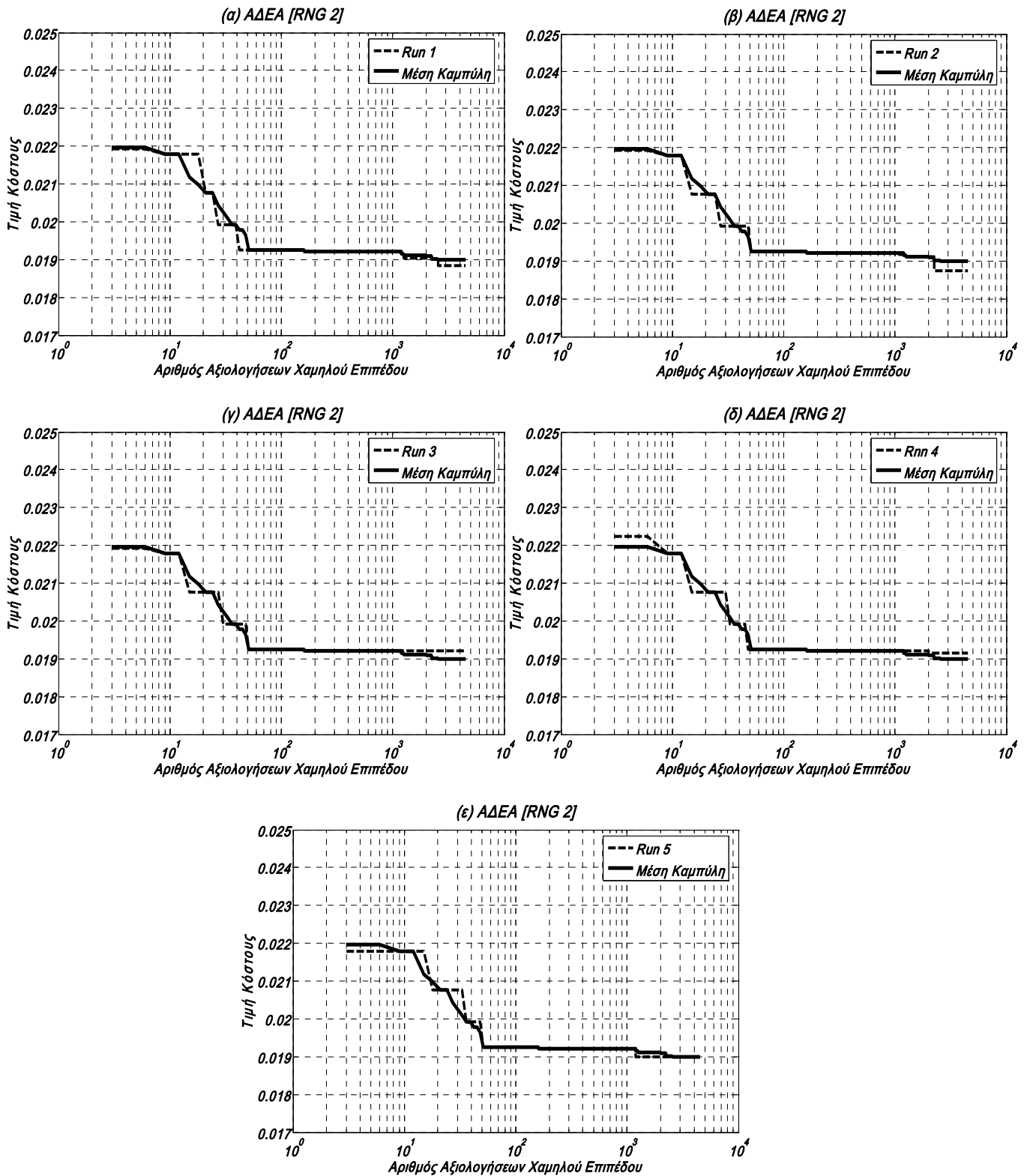
6.1.1 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής περυνγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ (1 επίπεδο αξιολόγησης-υψηλό) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 1). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο αριθμός των αξιολογήσεων υψηλού που πραγματοποιήθηκαν είναι το 1/3 αυτών που φαίνονται στον οριζόντιο άξονα.



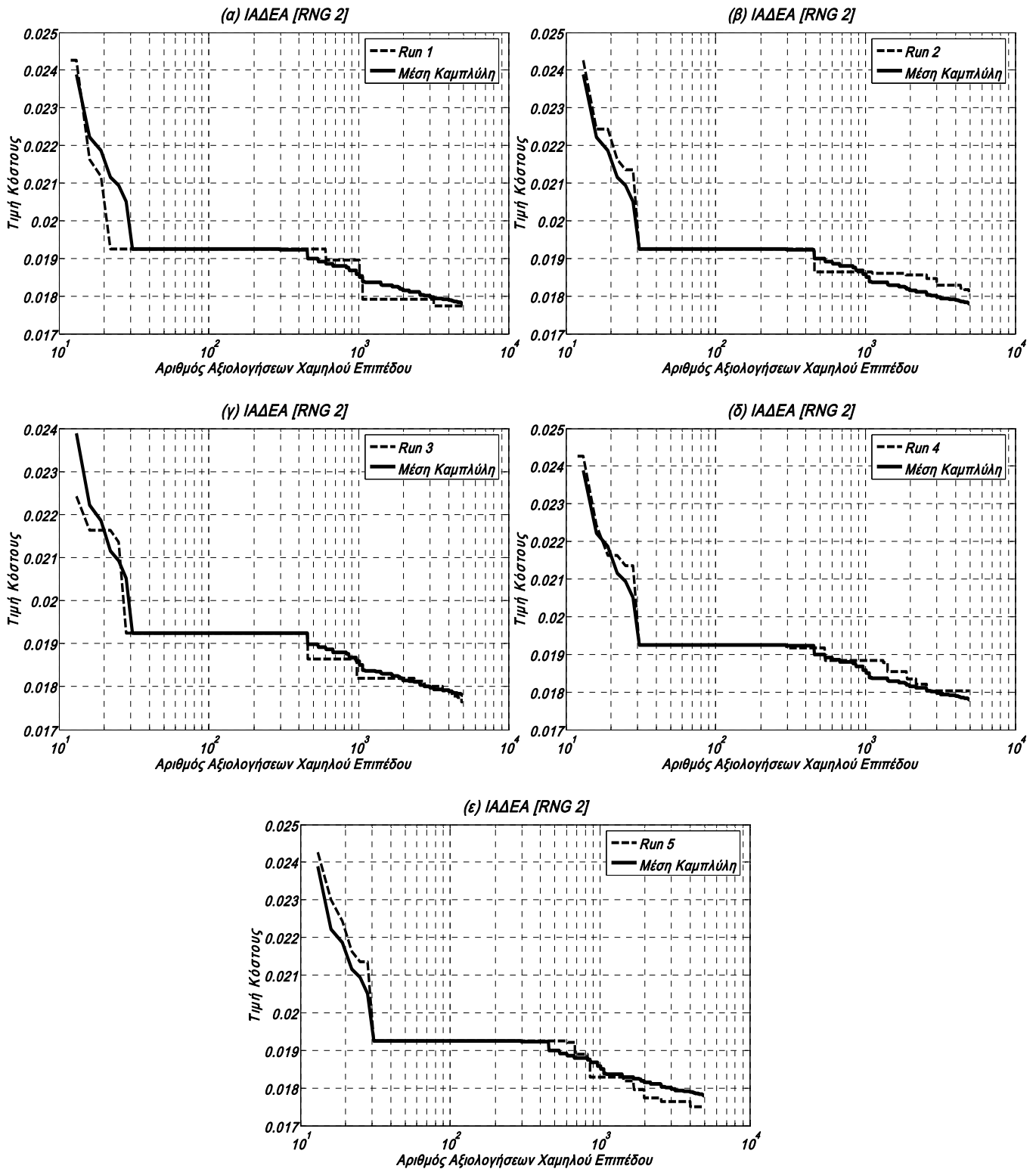
6.1.2 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής περυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΙΑΔΕΑ (2 επίπεδα αξιολόγησης) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 1). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.



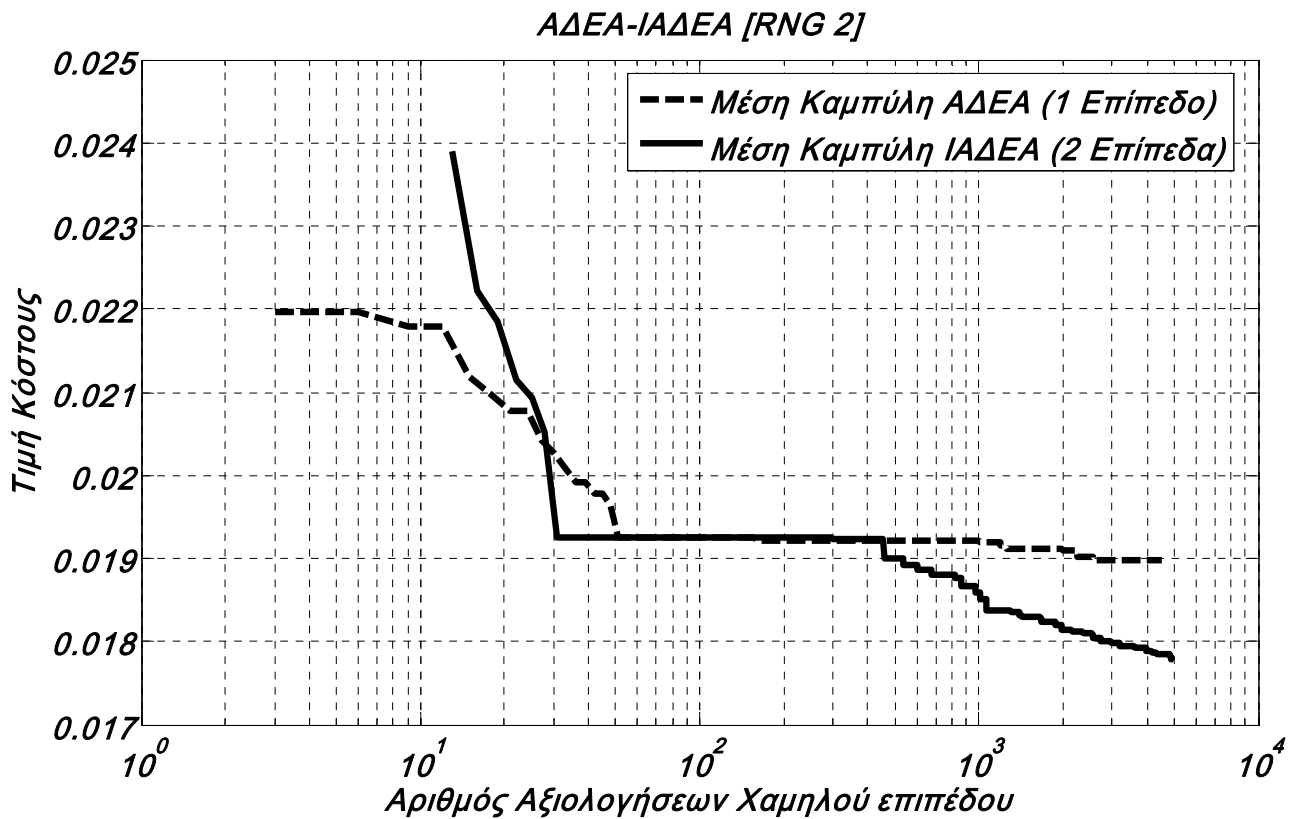
6.1.3 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ και τον ΙΑΔΕΑ με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 1). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Φαίνονται οι μέσες καμπύλες για κάθε αλγόριθμο-Σύγκριση της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης.



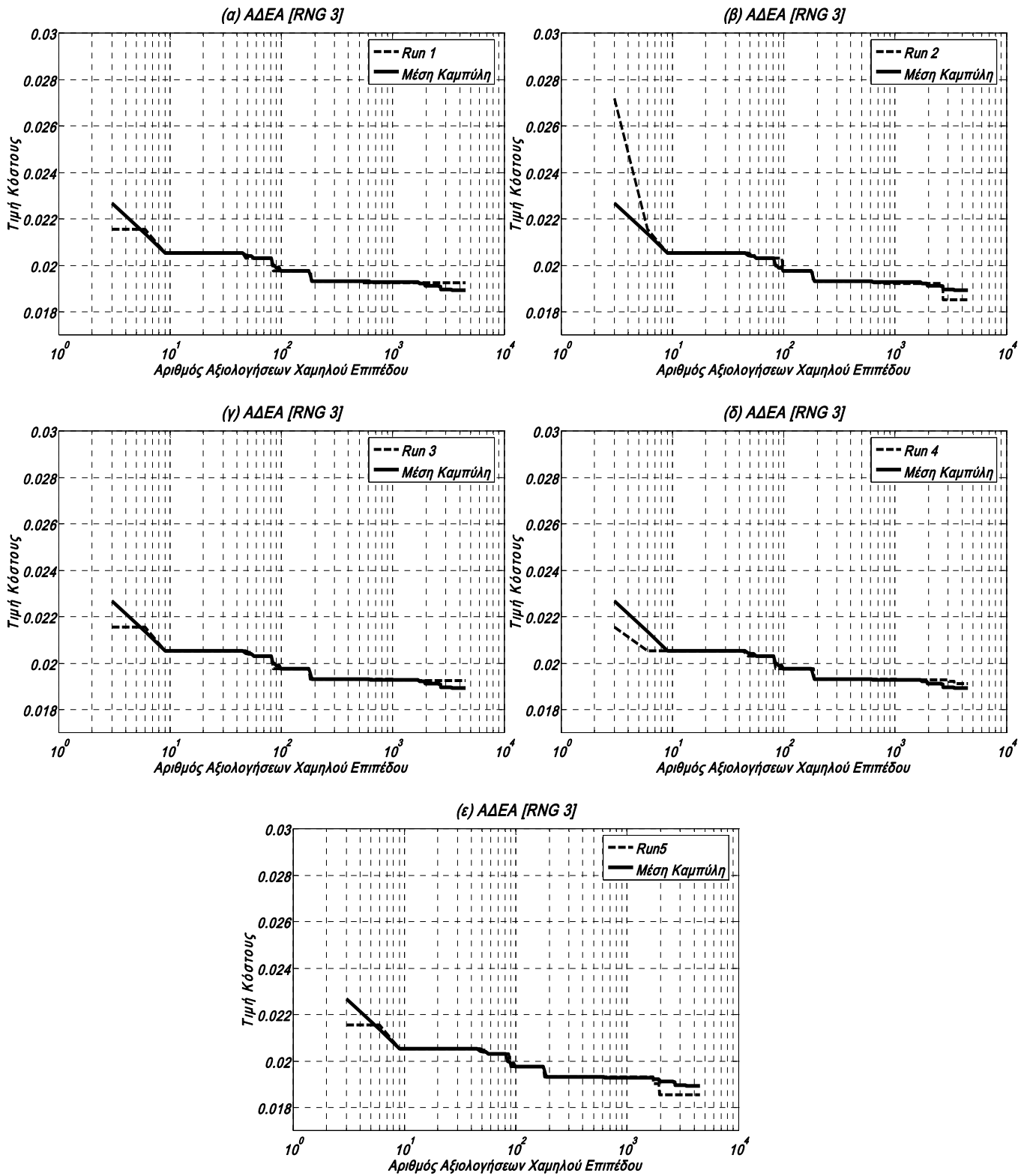
6.1.4 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής περυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ (1 επίπεδο αξιολόγησης-υψηλό) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 2). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο αριθμός των αξιολογήσεων που πραγματοποιήθηκαν είναι το 1/3 αυτών που φαίνονται στον οριζόντιο άξονα.



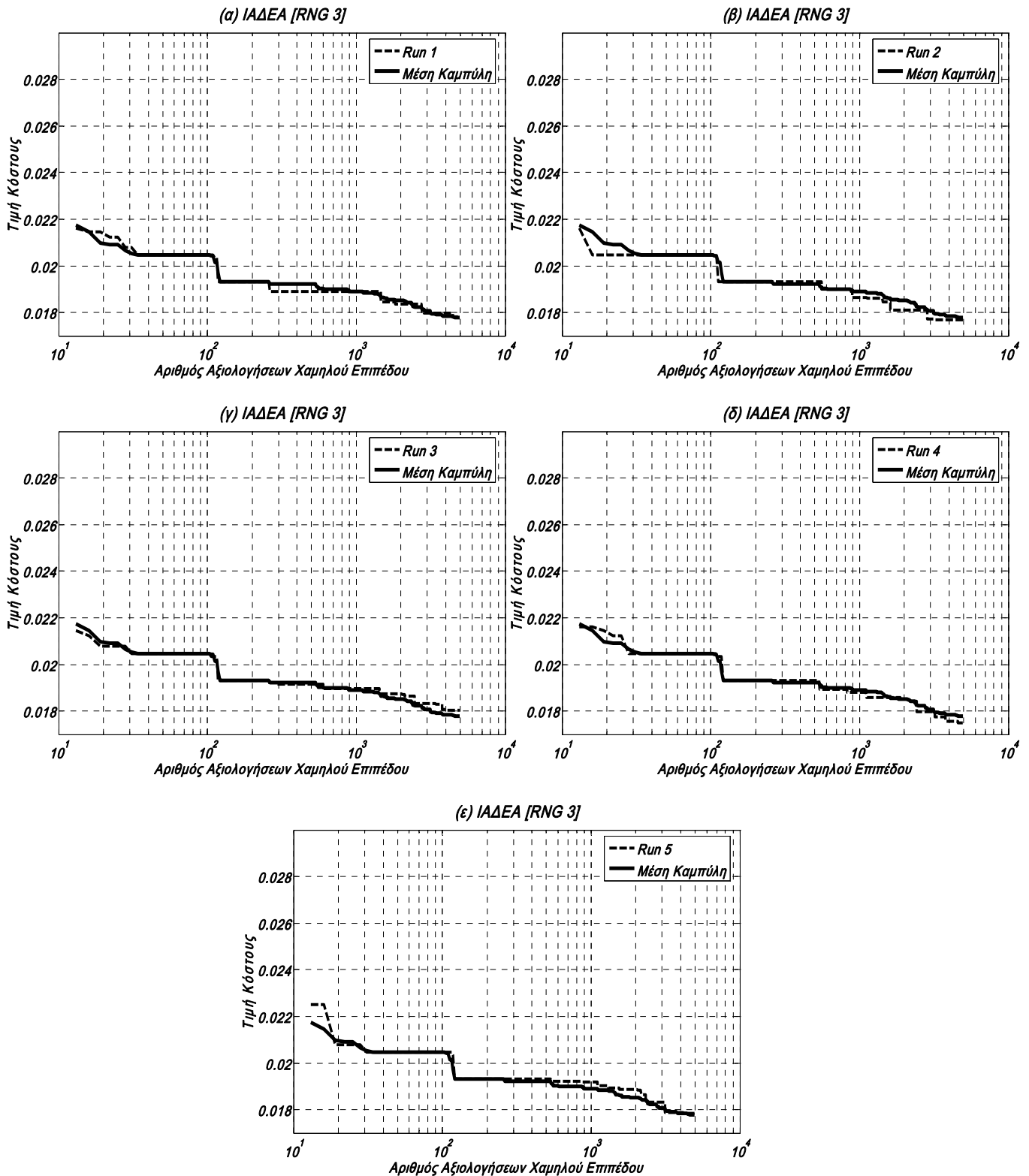
6.1.5 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής περυγίου συμπίεστή χρησιμοποιώντας τον ΙΑΔΕΑ (2 επίπεδα αξιολόγησης) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 2). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.



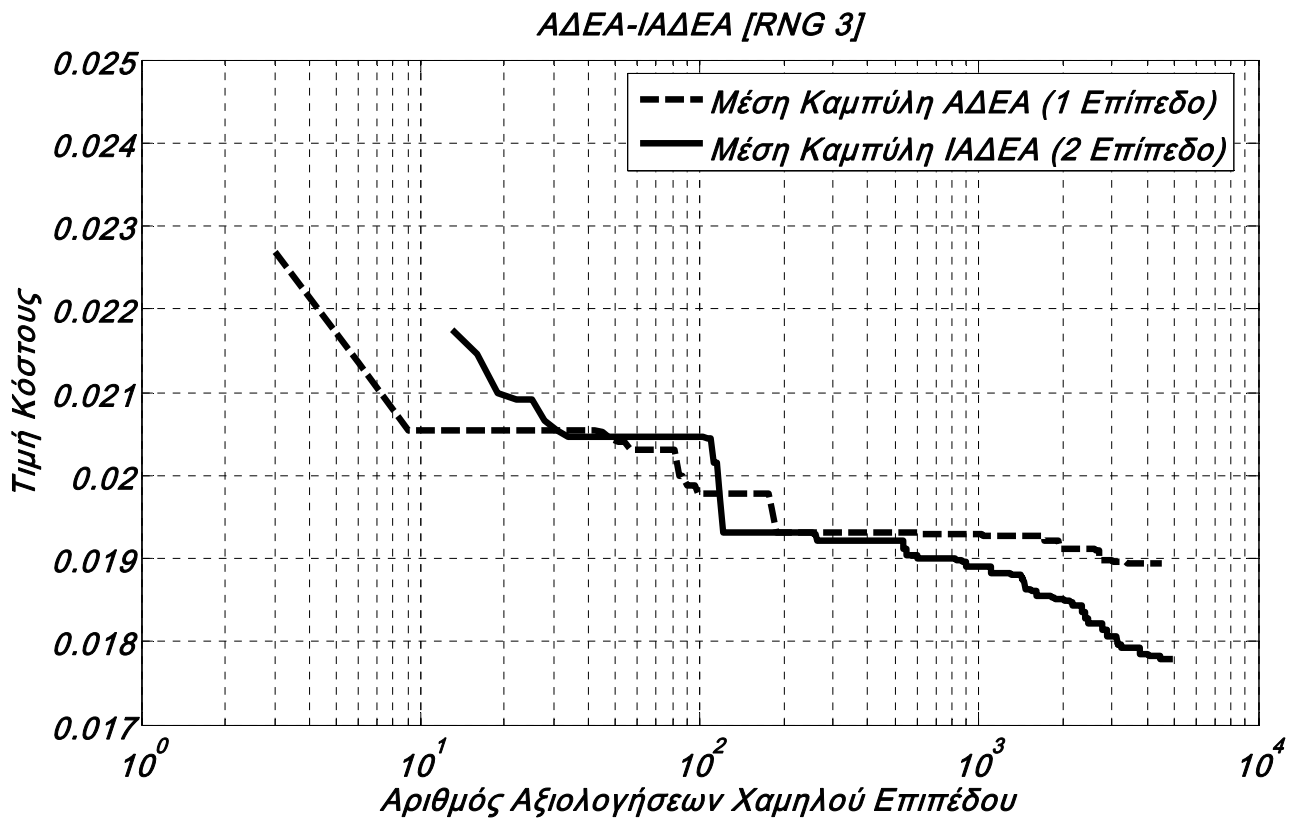
6.1.6 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ και τον ΙΑΔΕΑ με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 2). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Φαίνονται οι μέσες καμπύλες για κάθε αλγόριθμο-Σύγκριση της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης.



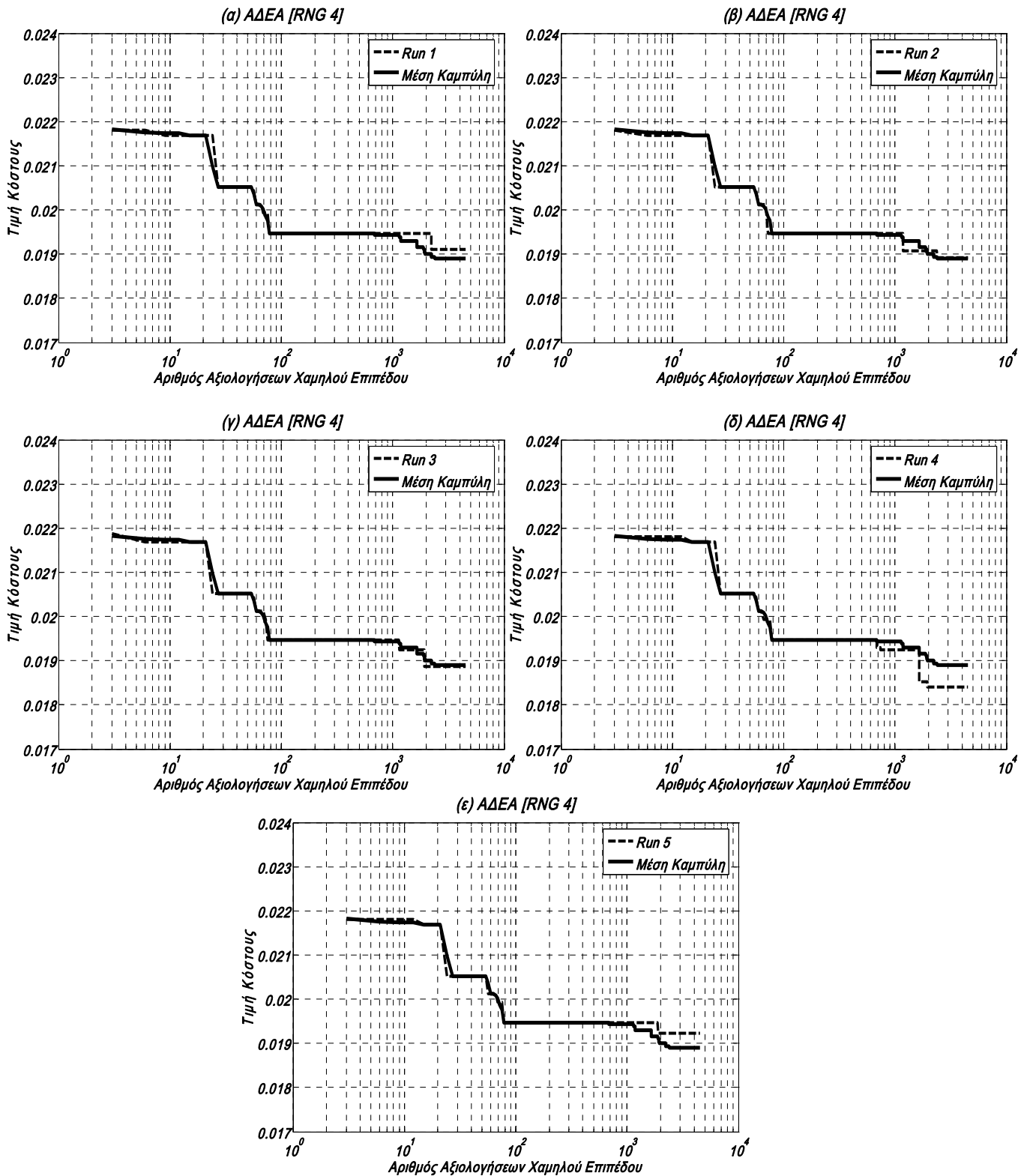
6.1.7 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής περυνγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ (1 επίπεδο αξιολόγησης-υψηλό) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 3). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο αριθμός των αξιολογήσεων που πραγματοποιήθηκαν είναι το 1/3 αυτών που φαίνονται στον οριζόντιο άξονα.



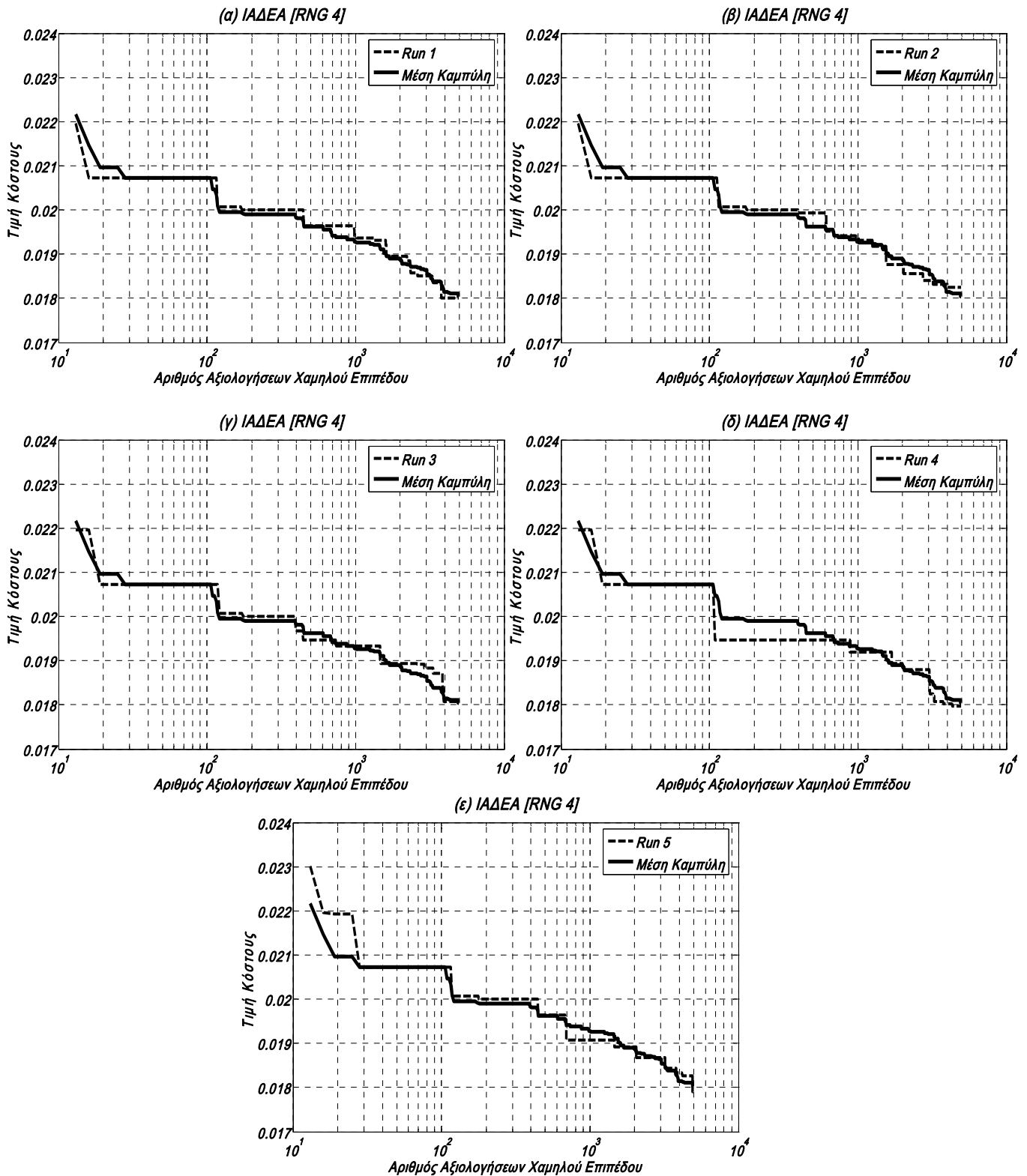
6.1.8 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής περυσίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΙΑΔΕΑ (2 επίπεδα αξιολόγησης) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 3). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.



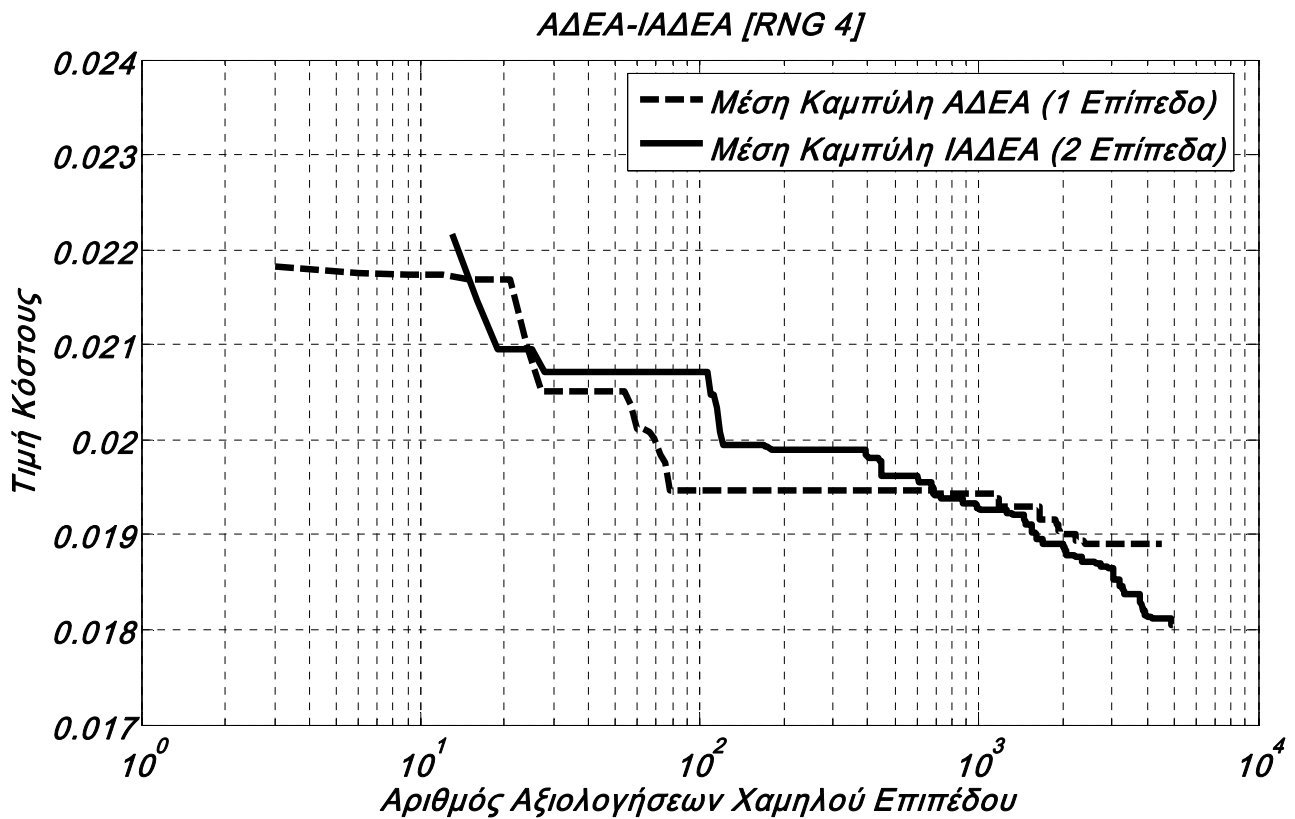
6.1.9 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ και τον ΙΑΔΕΑ με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 3). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Φαίνονται οι μέσες καμπύλες για κάθε αλγόριθμο-Σύγκριση της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης.



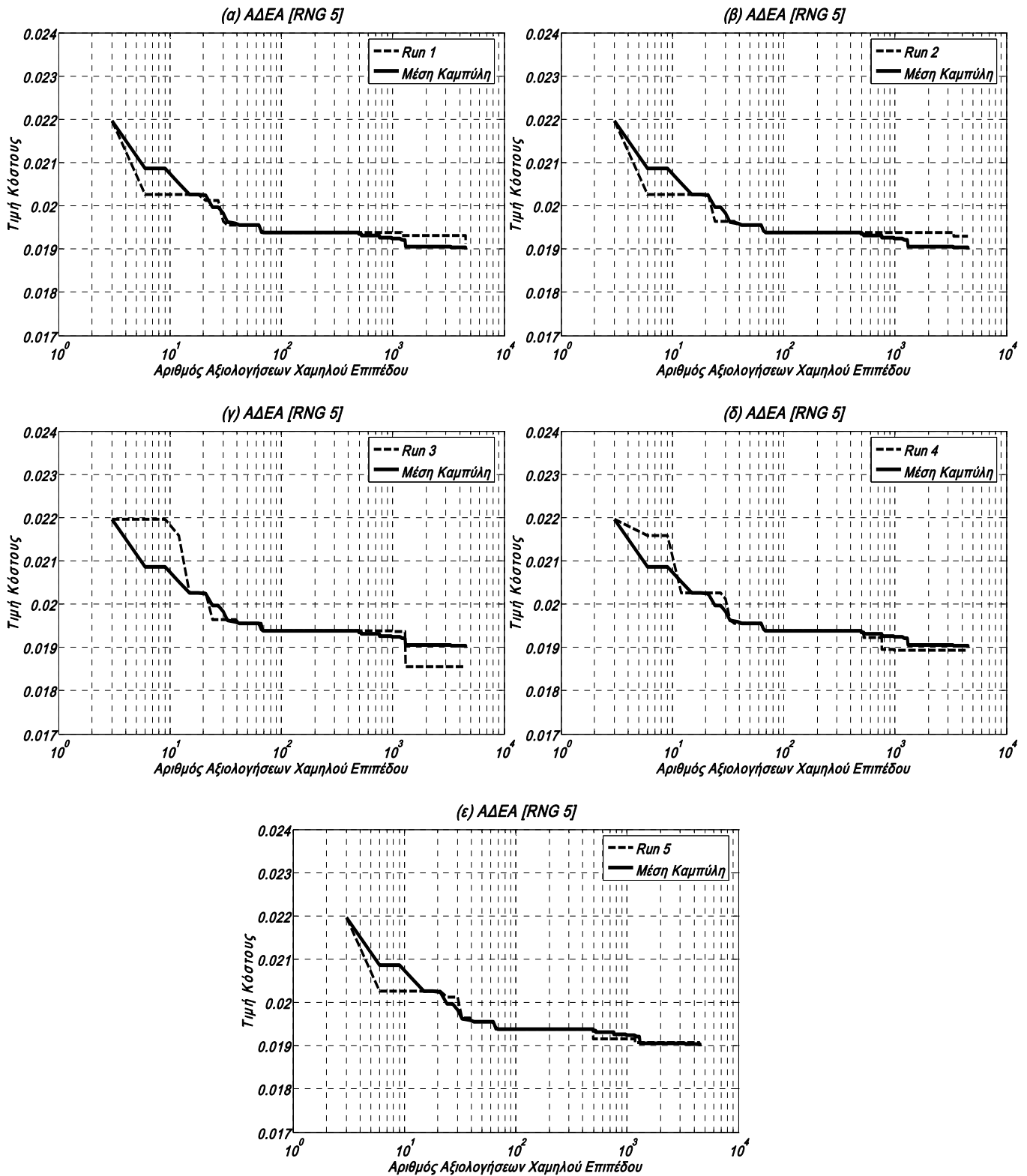
6.1.10 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ (1 επίπεδο αξιολόγησης-υψηλό) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 4). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο αριθμός των αξιολογήσεων που πραγματοποιήθηκαν είναι το 1/3 αυτών που φαίνονται στον οριζόντιο άξονα.



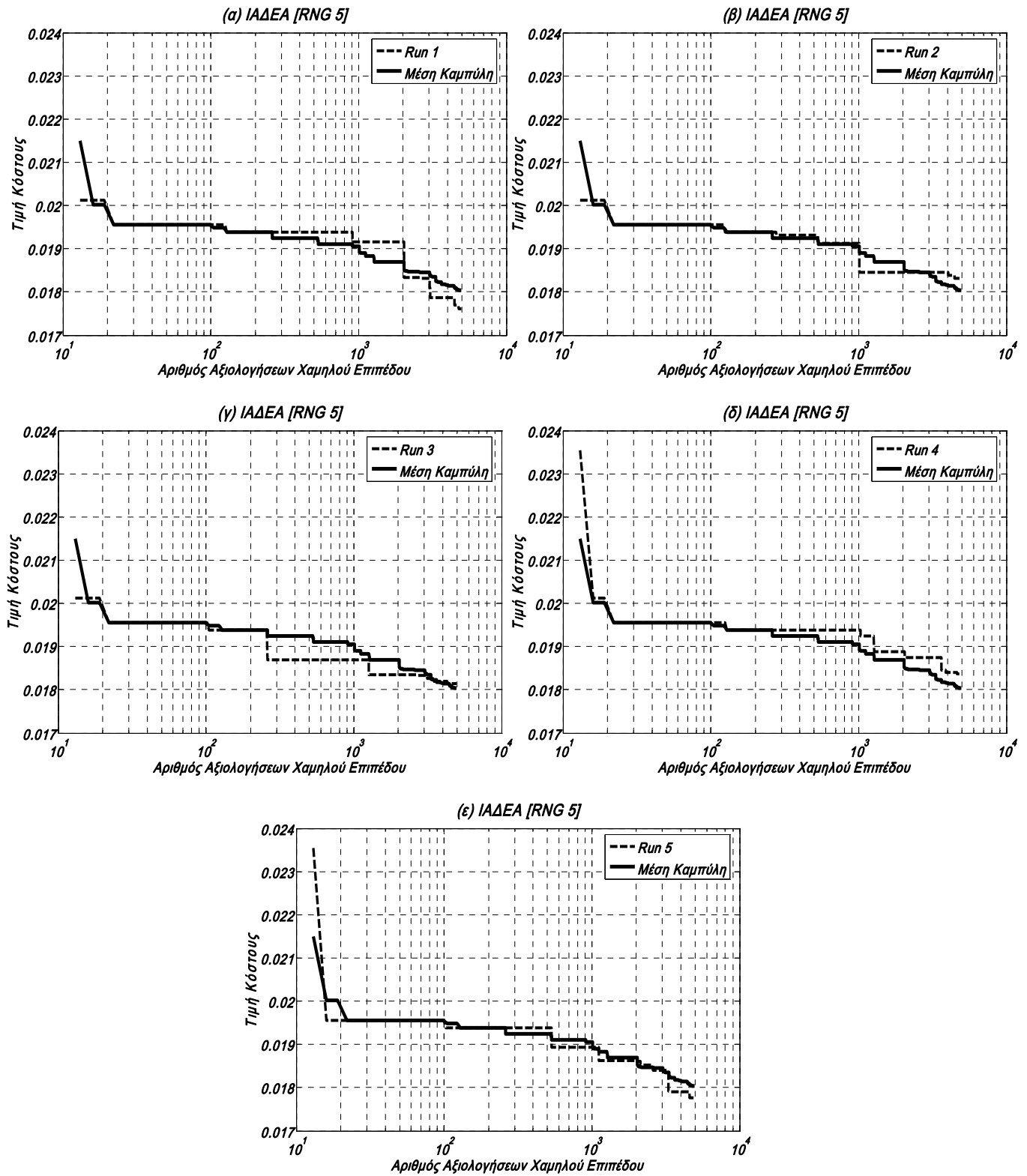
6.1.11 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΙΑΔΕΑ (2 επίπεδα αξιολόγησης) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 4). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.



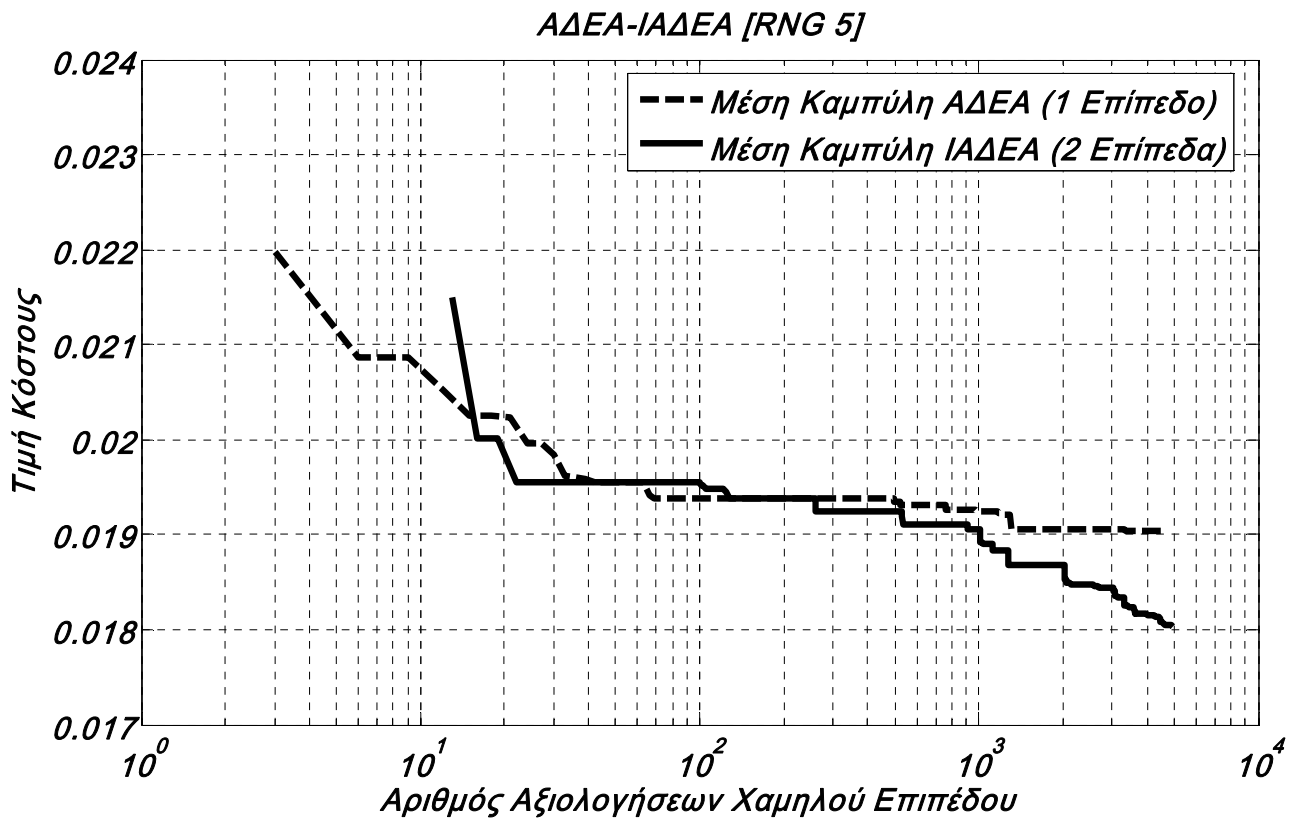
6.1.12 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ και τον ΙΑΔΕΑ με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 4). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Φαίνονται οι μέσες καμπύλες για κάθε αλγόριθμο-Σύγκριση της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης.



6.1.13 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ (1 επίπεδο αξιολόγησης-υψηλό) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 5). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο αριθμός των αξιολογήσεων που πραγματοποιήθηκαν είναι το 1/3 αυτών που φαίνονται στον οριζόντιο άξονα.



6.1.14 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον IADEA (2 επίπεδα αξιολόγησης) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 5). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.



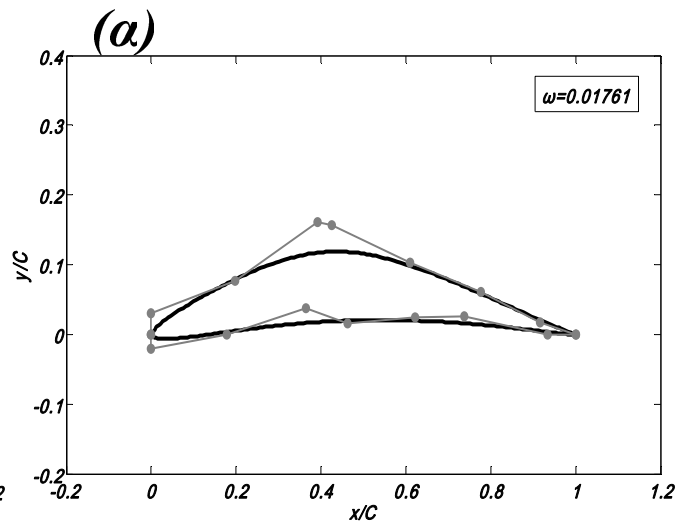
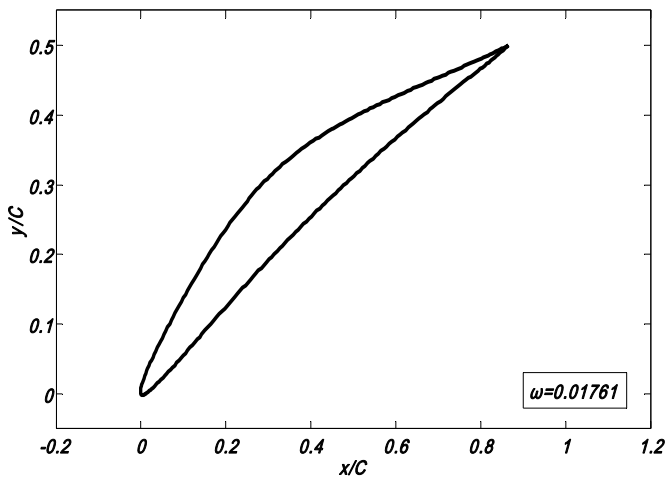
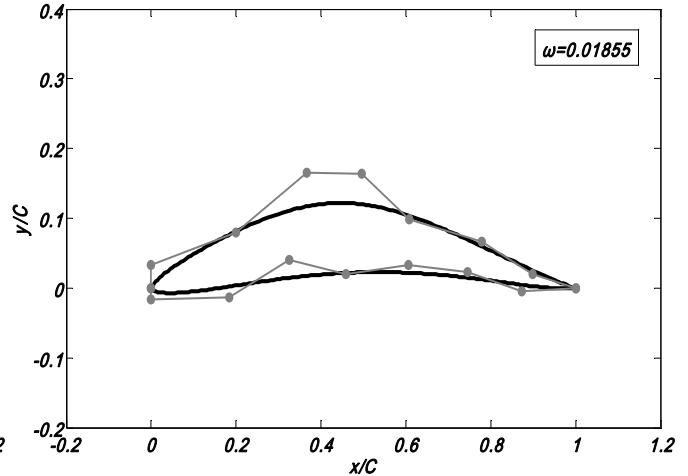
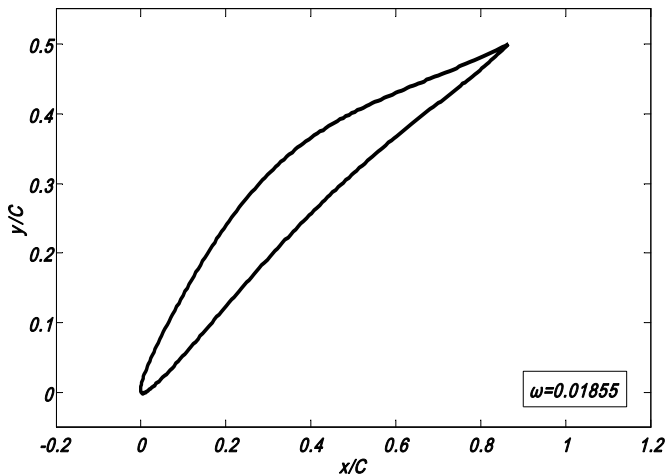
6.1.15 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ και τον ΙΑΔΕΑ με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 5). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. Φαίνονται οι μέσες καμπύλες για κάθε αλγόριθμο-Σύγκριση της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης.

Από τα παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι, με τη χρήση του Ιεραρχικού ΑΔΕΑ, με το ίδιο υπολογιστικό κόστος επιτυγχάνεται καλύτερη βέλτιστη λύση σε σχέση με αυτήν που έχει ευρεθεί με τη χρήση του ΑΔΕΑ. Υπενθυμίζεται ότι το υπολογιστικό κόστος που λαμβάνεται υπόψη εδώ είναι εικονικό. Στην πραγματικότητα η επεξεργασία με τη χρήση του ΙΑΔΕΑ διήρκησε περίπου 1,7 φορές περισσότερο από την επεξεργασία με τη χρήση του ΑΔΕΑ. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με τη χρήση παράλληλης επεξεργασίας με 10 επεξεργαστές ο χρόνος αναμονής του μηχανικού ήταν κατά μέσο όρο 18 και λιγότερο από 11 λεπτά αντίστοιχα.

Ακολουθούν τα περιγράμματα των βέλτιστων αεροτομών που προέκυψαν από τη χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ καθώς και η κατανομή του συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος της κάθε μιας.

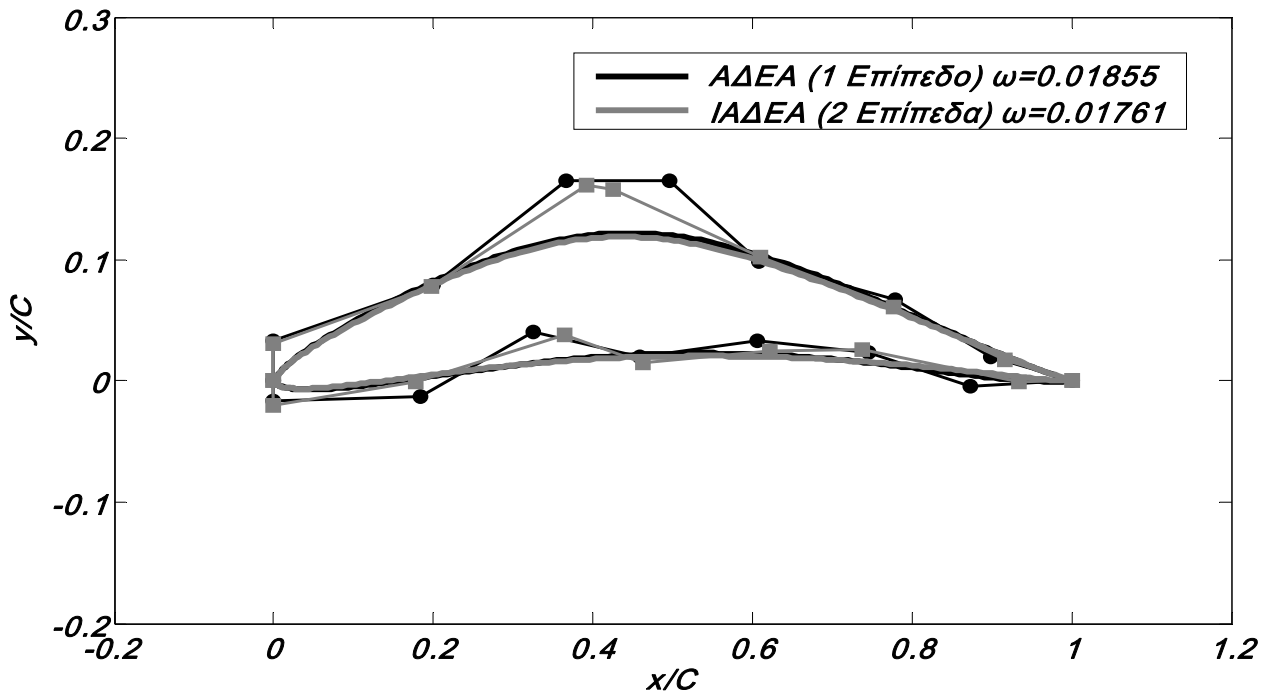
Ο συντελεστής πίεσης δίνεται από τον τύπο:

$$C_p = \frac{P_2 - P_1}{P_{t1} - P_1} = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2}$$

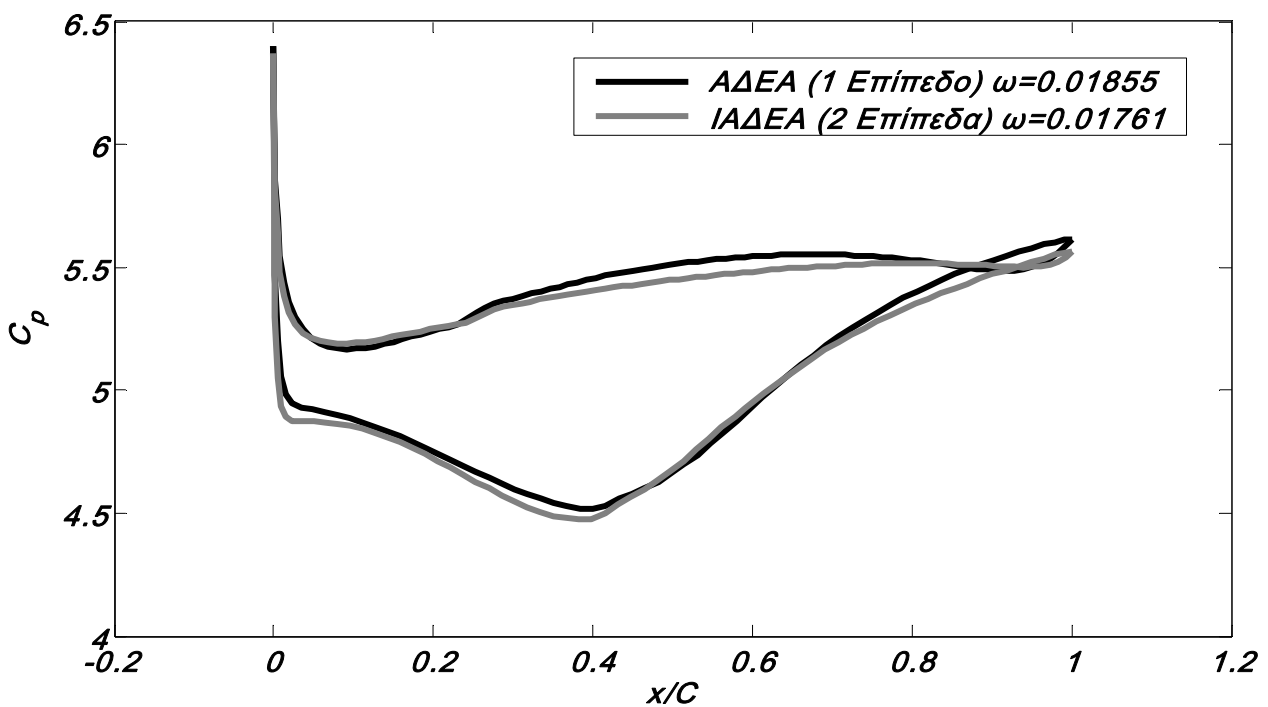


6.1.16 Περίγραμμα βέλτιστης αεροτομής που προέκυψε με τη χρήση του ΑΔΕΑ (RNG 5), (α) με την πραγματική γωνία κλίσης 30° και (β) με μηδενική γωνία κλίσης και τα σημεία Bezier. Περίγραμμα βέλτιστης αεροτομής που προέκυψε με τη χρήση του ΙΑΔΕΑ (RNG 5), (γ) με την πραγματική γωνία κλίσης 30° και (δ) με μηδενική γωνία κλίσης και τα σημεία Bezier. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης.

(γ)



6.1.17 Σύγκριση περιγραμμάτων βέλτιστων αεροτομών που προέκυψαν με τη χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ με μηδενική γωνία κλίσης και τα σημεία Bezier. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης.



6.1.18 Κατανομή του συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος της βέλτιστης αεροτομής που προέκυψαν με τη χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ και τα περιγράμματα των οποίων φαίνονται στο προηγούμενο σχήμα.

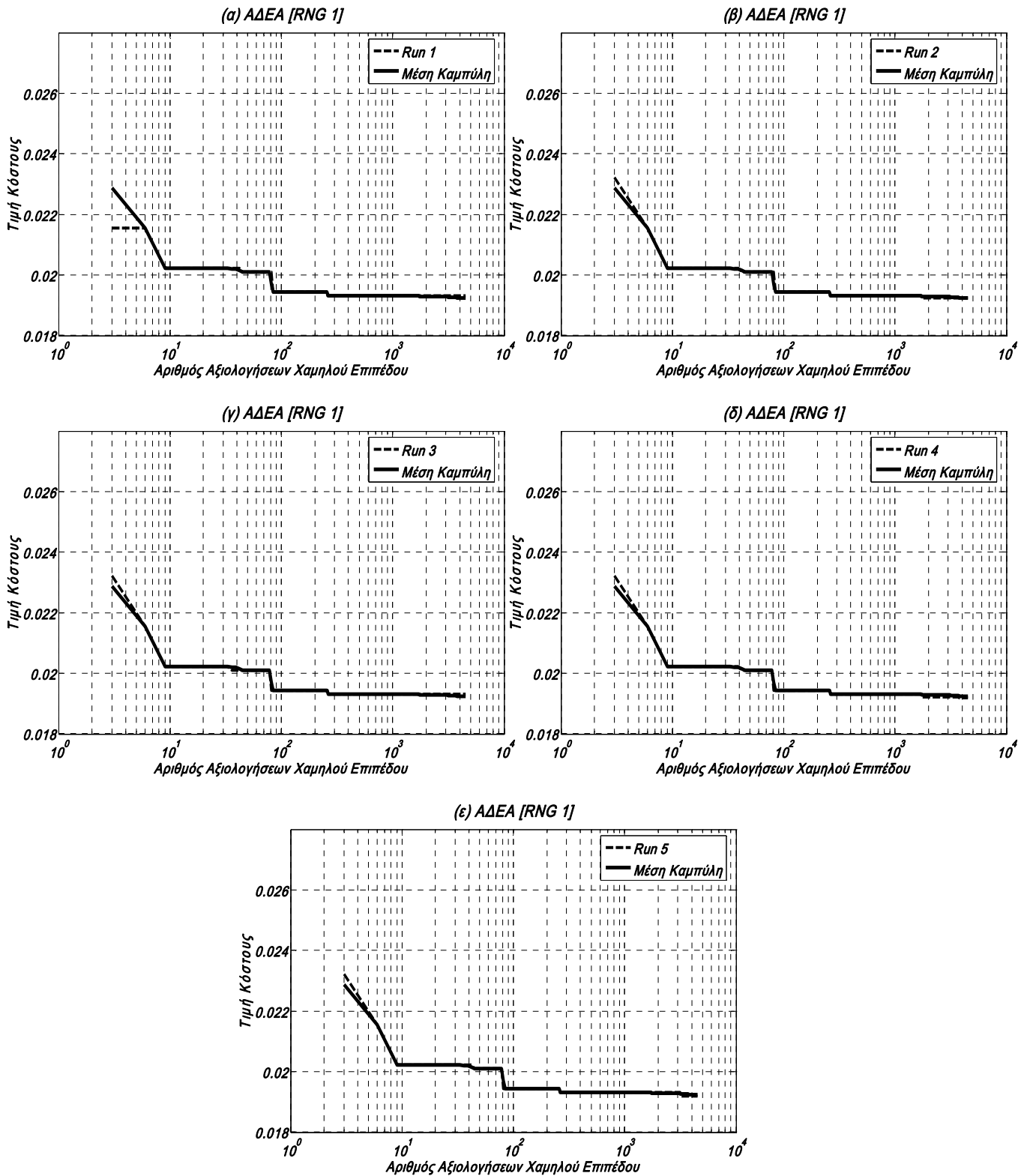
6.1.1.2 ΙΕΡΑΡΧΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται απαραίτητη, η χρήση ενός διαφορετικού λογισμικού αξιολόγησης, ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου, με ενδεχομένως μικρότερη ακρίβεια αξιολόγησης της λύσης. Με αυτόν τον τρόπο θα αξιολογηθεί περαιτέρω η ικανότητα εύρεσης βέλτιστης λύσης της νέας μεθόδου.

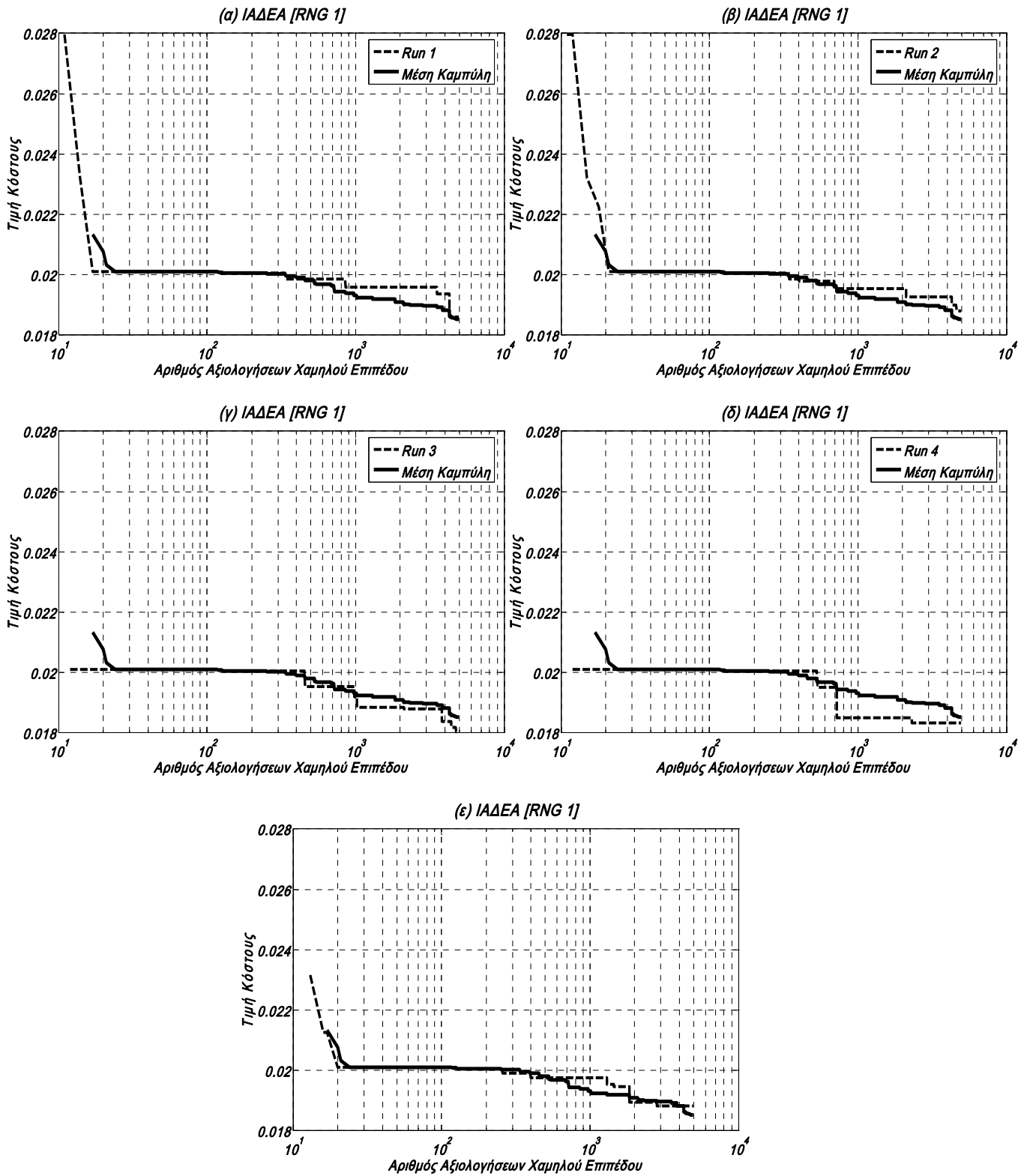
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η επεξεργασία μιας διαφοροποιημένης περίπτωσης βελτιστοποίησης της αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή, προσθέτοντας ένα σημείο Bezier στην παραμετροποίηση του περιγράμματος κάθε πλευράς, υποπίεσης και υπερπίεσης. Η παραμετροποίηση δηλαδή πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας πολυώνυμα Bezier με $N=(9+1)=10$ σημεία ελέγχου σε κάθε πλευρά. Οι συντεταγμένες των δύο σημείων Bezier που προστέθηκαν, αποτελούν επιπλέον ελεύθερες μεταβλητές για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Κατά συνέπεια οι ελεύθερες μεταβλητές αυξάνονται και είναι συνολικά: $2 \times 14 + 2 \times 1 = 30$.

Στις παρακάτω δοκιμές, το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των υποψήφιων λύσεων που τοποθετούνται στο χαμηλό επίπεδο είναι πάλι η ολοκληρωματική μέθοδος οριακών στρωμάτων. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή διαφοροποιείται η παραμετροποίηση της αεροτομής, καθώς μειώνεται τεχνητά ο αριθμός των σημείων Bezier που συμμετέχουν σε αυτή. Αφαιρούνται τρία σημεία Bezier από κάθε πλευρά της αεροτομής, των οποίων οι συντεταγμένες είναι ελεύθερες μεταβλητές, έτσι ώστε να εκείνες να μειώνονται από 30 σε $2 \times 8 + 2 \times 1 = 18$. Τα σημεία που αποφασίστηκε να αφαιρεθούν, επιλέχθηκαν έτσι ώστε να προσεγγίζεται όσο το δυνατόν καλύτερα η πραγματική αεροτομή. Ωστόσο, είναι προφανές ότι με λιγότερα σημεία Bezier κάθε υποψήφια λύση δεν αξιολογείται ακριβώς. Με τον τρόπο αυτό, εισάγεται το απαραίτητο τεχνητό σφάλμα, που χρειάζεται για την αξιολόγηση του νέου αλγορίθμου.

Πρακτικά, ούτε σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει διαφορά στον υπολογιστικό κόστος αξιολόγησης υψηλού και χαμηλού επιπέδου. Για το λόγο αυτό, θεωρείται, όπως και πριν, ότι η αναλογία τους είναι 3:1. Στα διαγράμματα που θα ακολουθούν ο οριζόντιος άξονας παρουσιάζει τον συνολικό αριθμό αξιολογήσεων χαμηλού επιπέδου, υπολογιζόμενος με τον τρόπο που αναφέρθηκε νωρίτερα, αντιστοιχίζοντας μια αξιολόγηση υψηλού επιπέδου σε τρεις αξιολογήσεις χαμηλού επιπέδου.

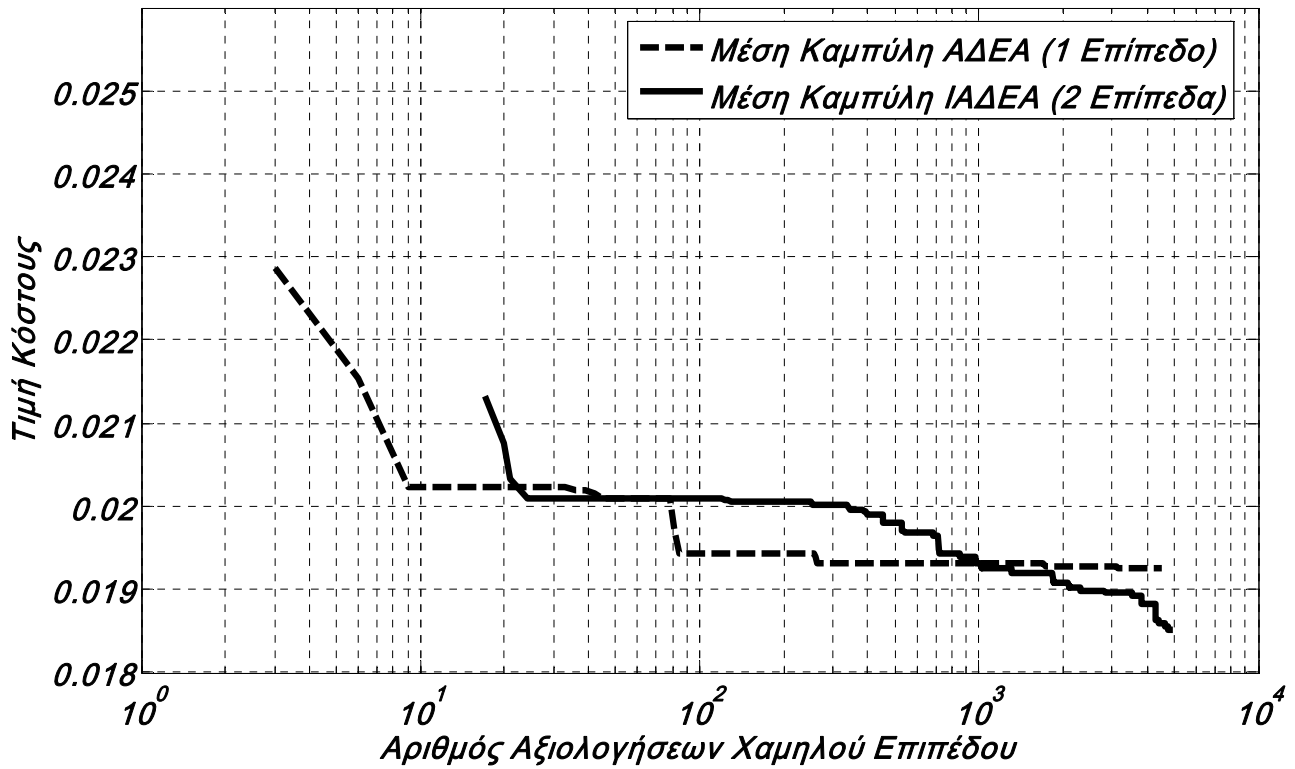


6.1.19 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ (1 επίπεδο αξιολόγησης-υψηλό) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 1). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 10 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο αριθμός των αξιολογήσεων υψηλού που πραγματοποιήθηκαν είναι το 1/3 αυτών που φαίνονται στον οριζόντιο άξονα.

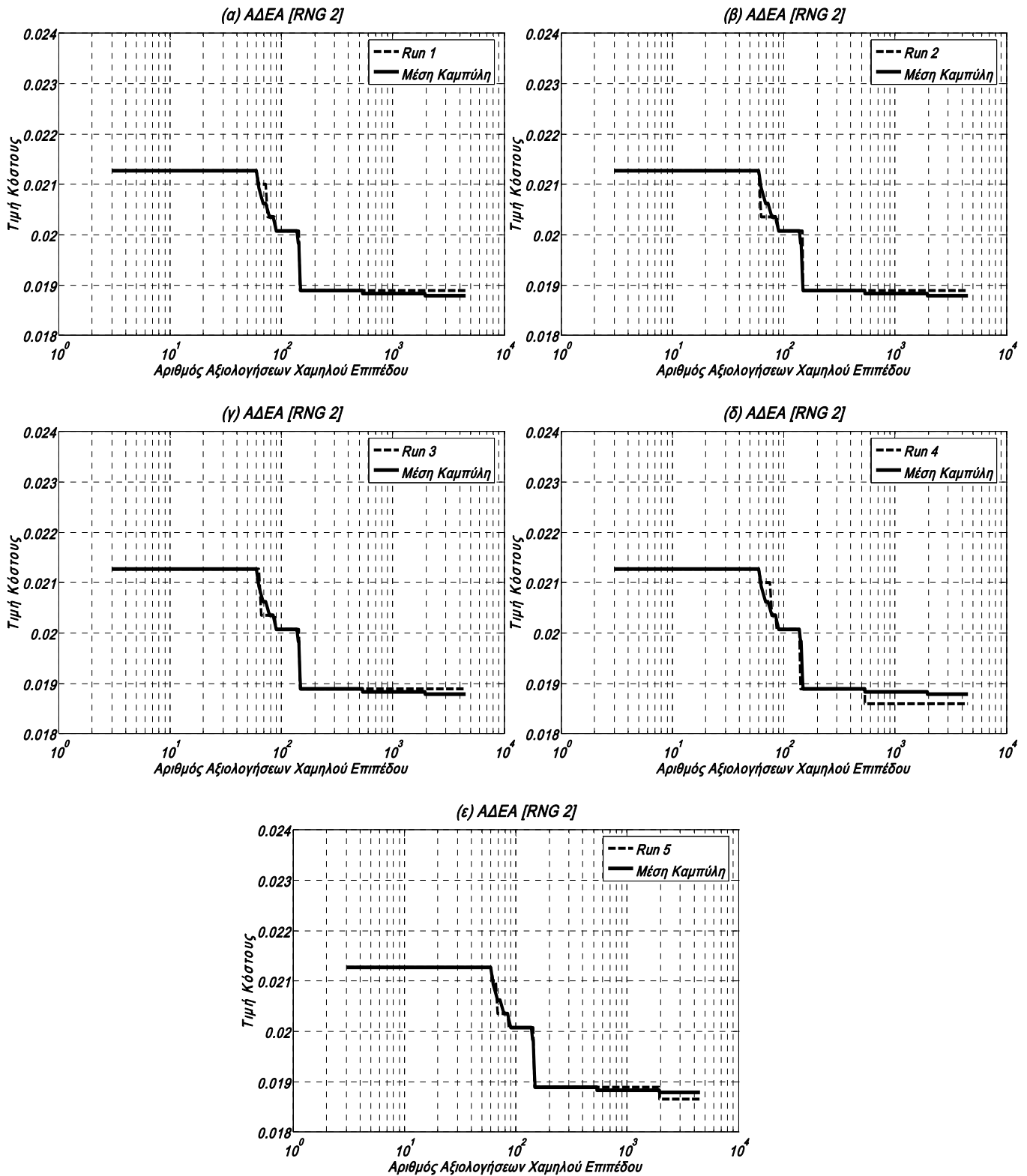


6.1.20 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΙΑΔΕΑ (2 επίπεδα αξιολόγησης) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 1). Η παραμετροποίηση στις υπονήφιες λύσεις υψηλού επιπέδου πραγματοποιείται με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής, ενώ σε εκείνες του χαμηλού με 7 σημεία σε κάθε πλευρά. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.

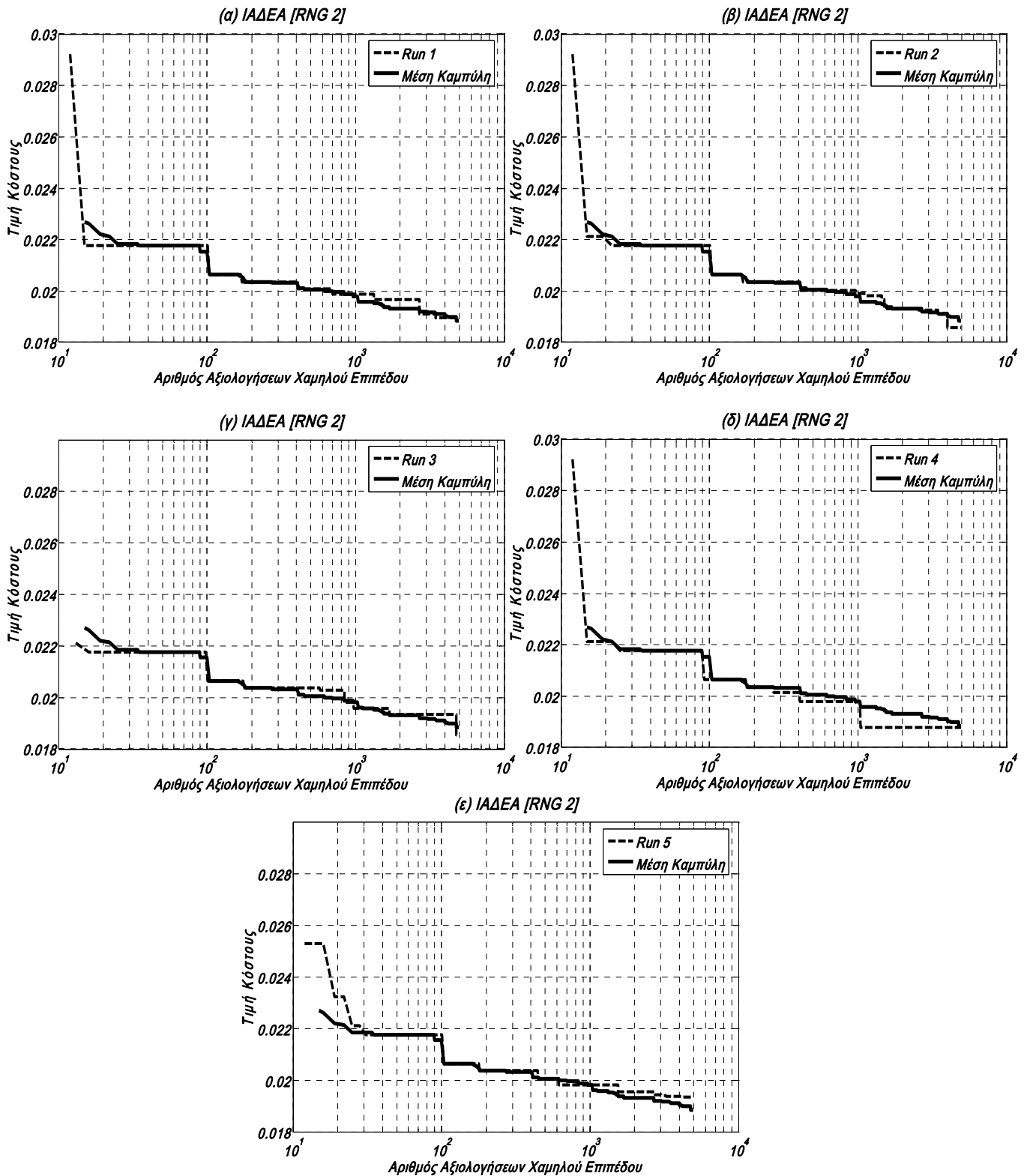
ΑΔΕΑ-ΙΑΔΕΑ [RNG 1]



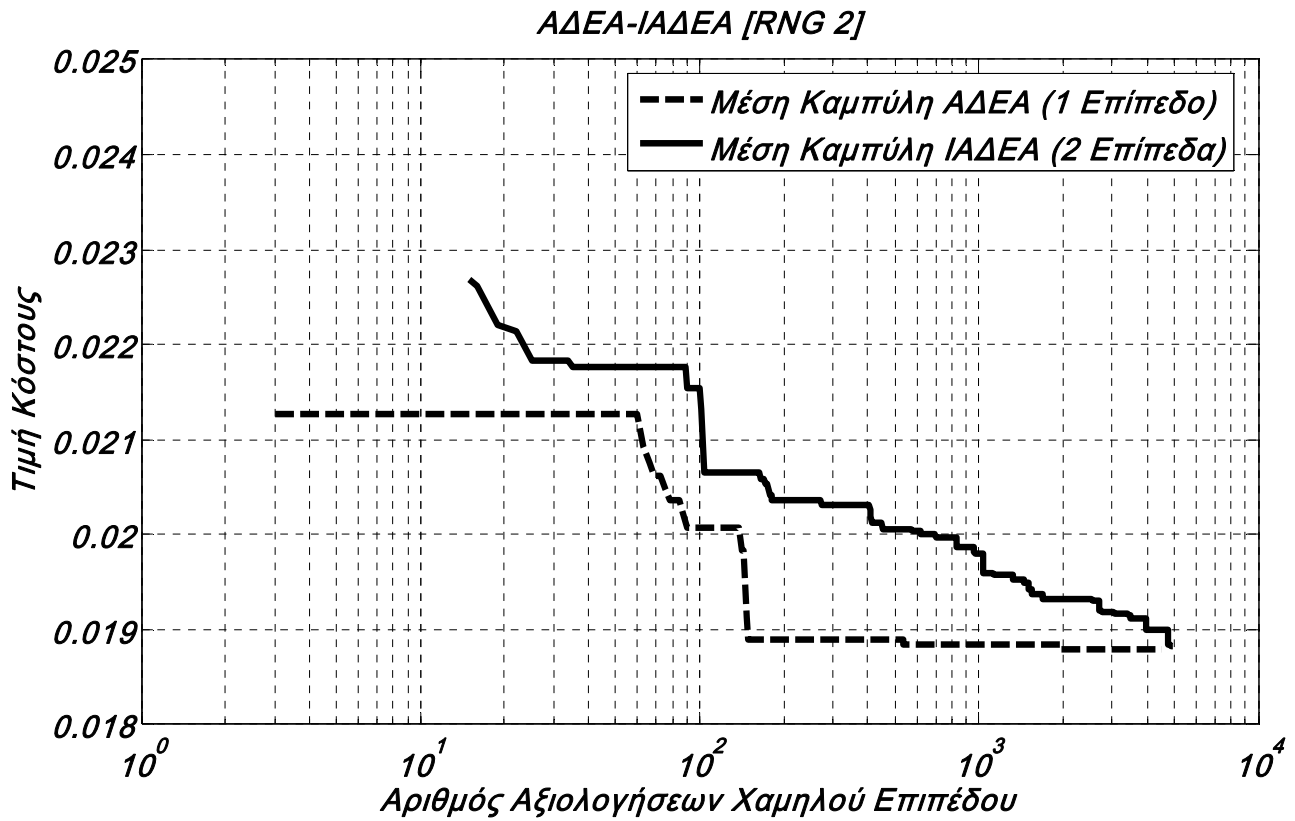
6.1.21 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή (παραμετροποίηση με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής) χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ και τον ΙΑΔΕΑ με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 1). Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιείται η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων, παραμετροποιώντας την αεροτομή με μικρότερο αριθμό σημείων Bezier. Φαίνονται οι μέσες καμπύλες για κάθε αλγόριθμο-Σύγκριση της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης.



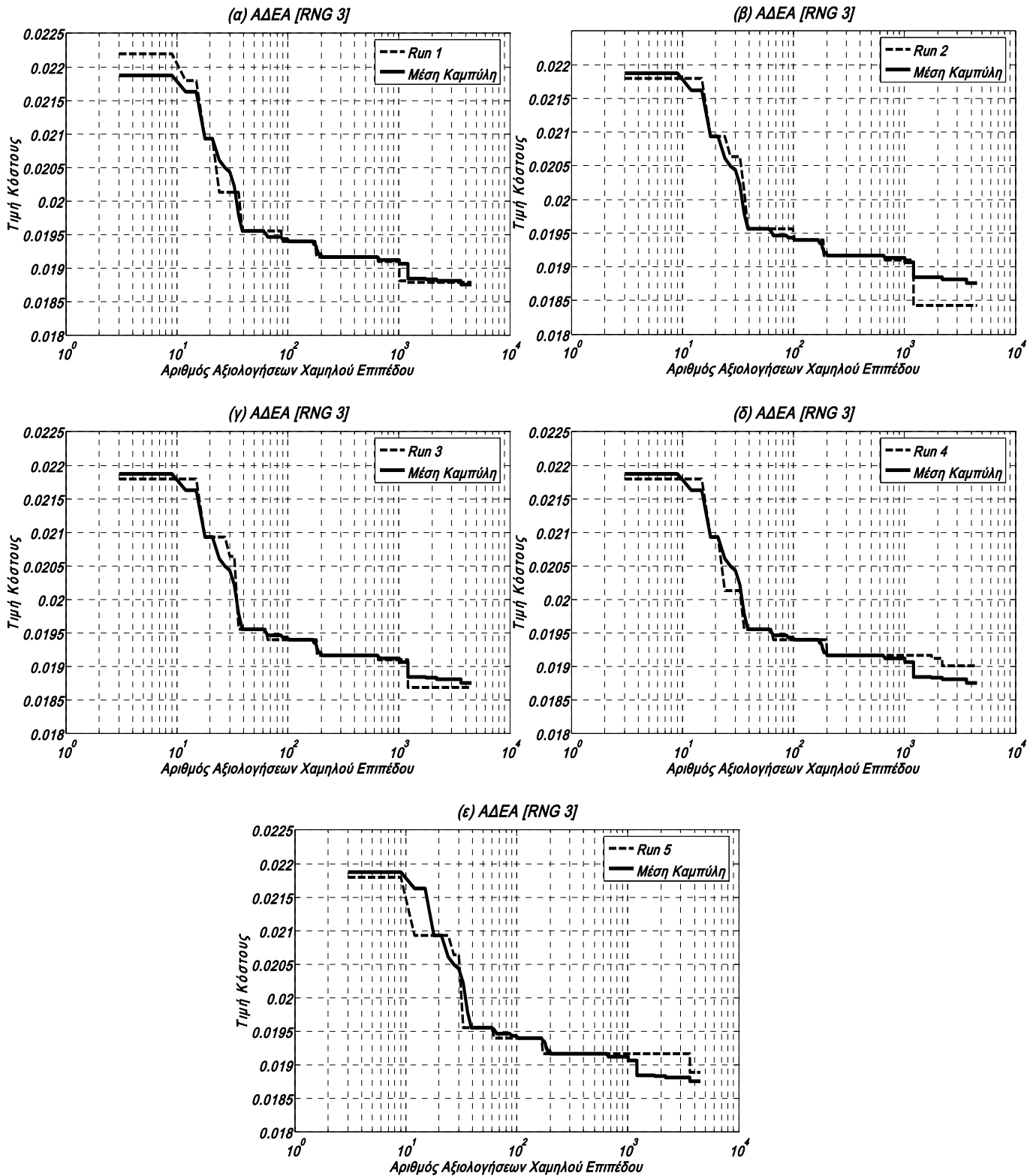
6.1.22 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ (1 επίπεδο αξιολόγησης-υψηλό) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 2). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 10 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο αριθμός των αξιολογήσεων υψηλού που πραγματοποιήθηκαν είναι το 1/3 αυτών που φαίνονται στον οριζόντιο άξονα.



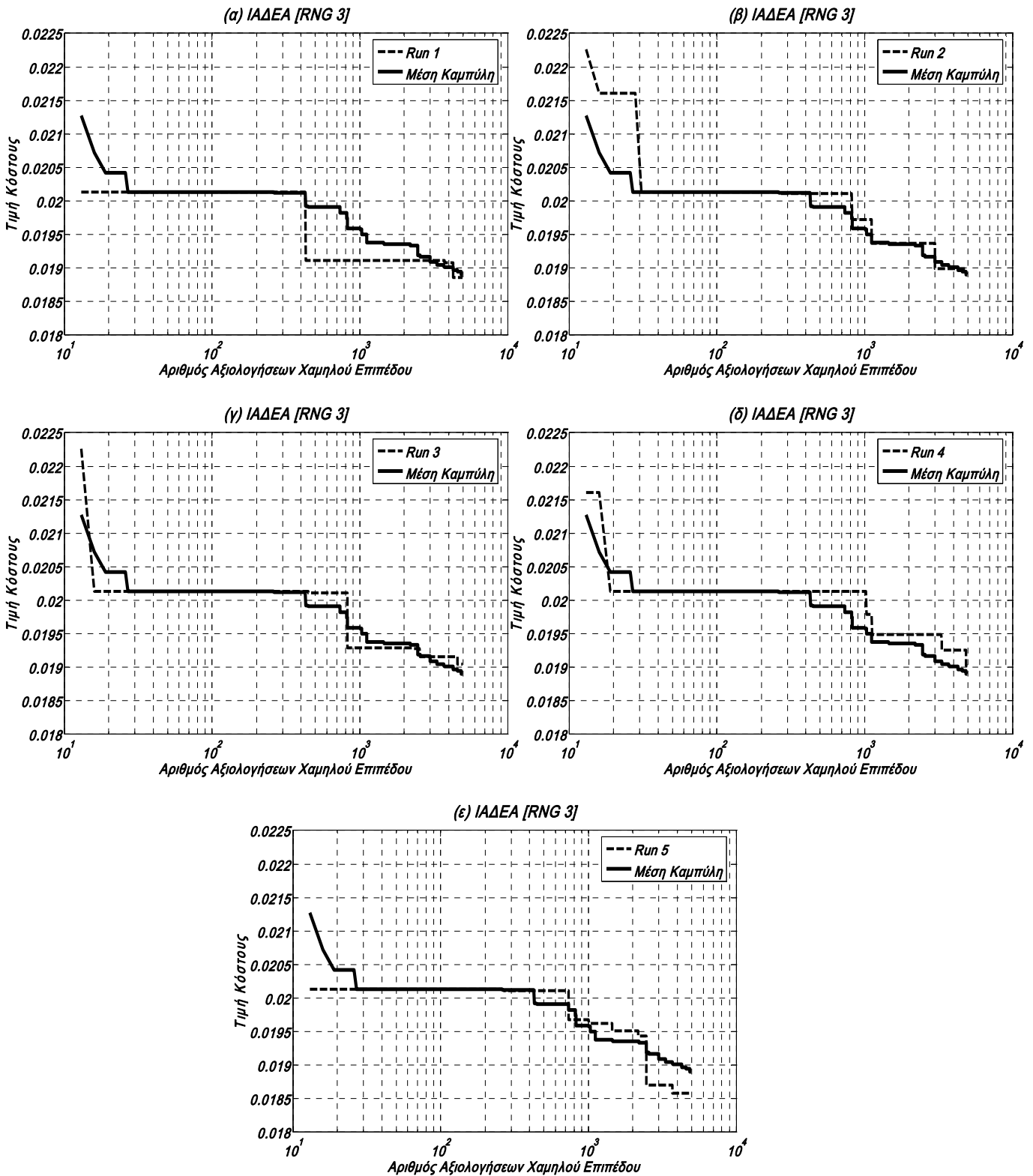
6.1.23 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΙΑΔΕΑ (2 επίπεδα αξιολόγησης) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 2). Η παραμετροποίηση στις υπονήφιες λύσεις υψηλού επιπέδου πραγματοποιείται με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής, ενώ σε εκείνες του χαμηλού με 7 σημεία σε κάθε πλευρά. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.



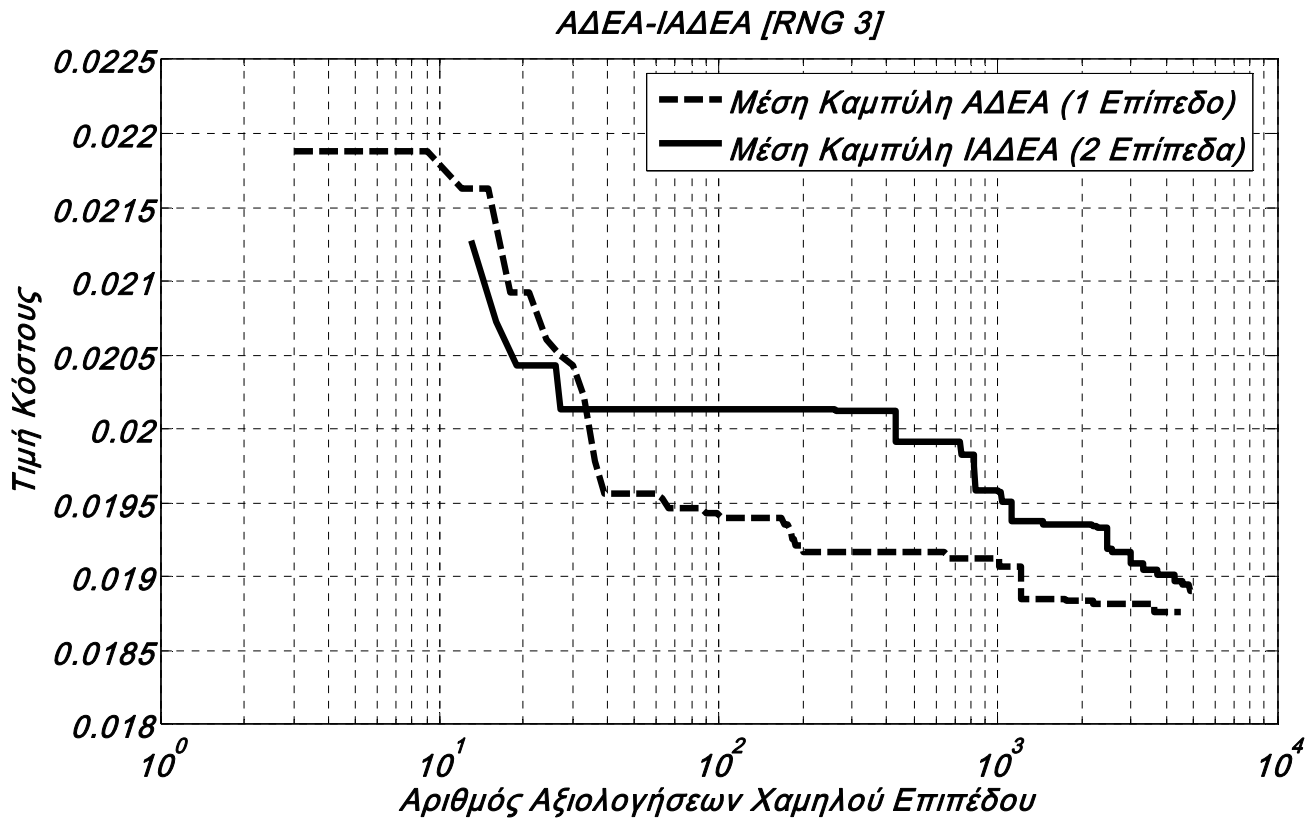
6.1.24 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή (παραμετροποίηση με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής) χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ και τον ΙΑΔΕΑ με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 2). Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιείται η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων, παραμετροποιώντας την αεροτομή με μικρότερο αριθμό σημείων Bezier. Φαίνονται οι μέσες καμπύλες για κάθε αλγόριθμο-Σύγκριση της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης.



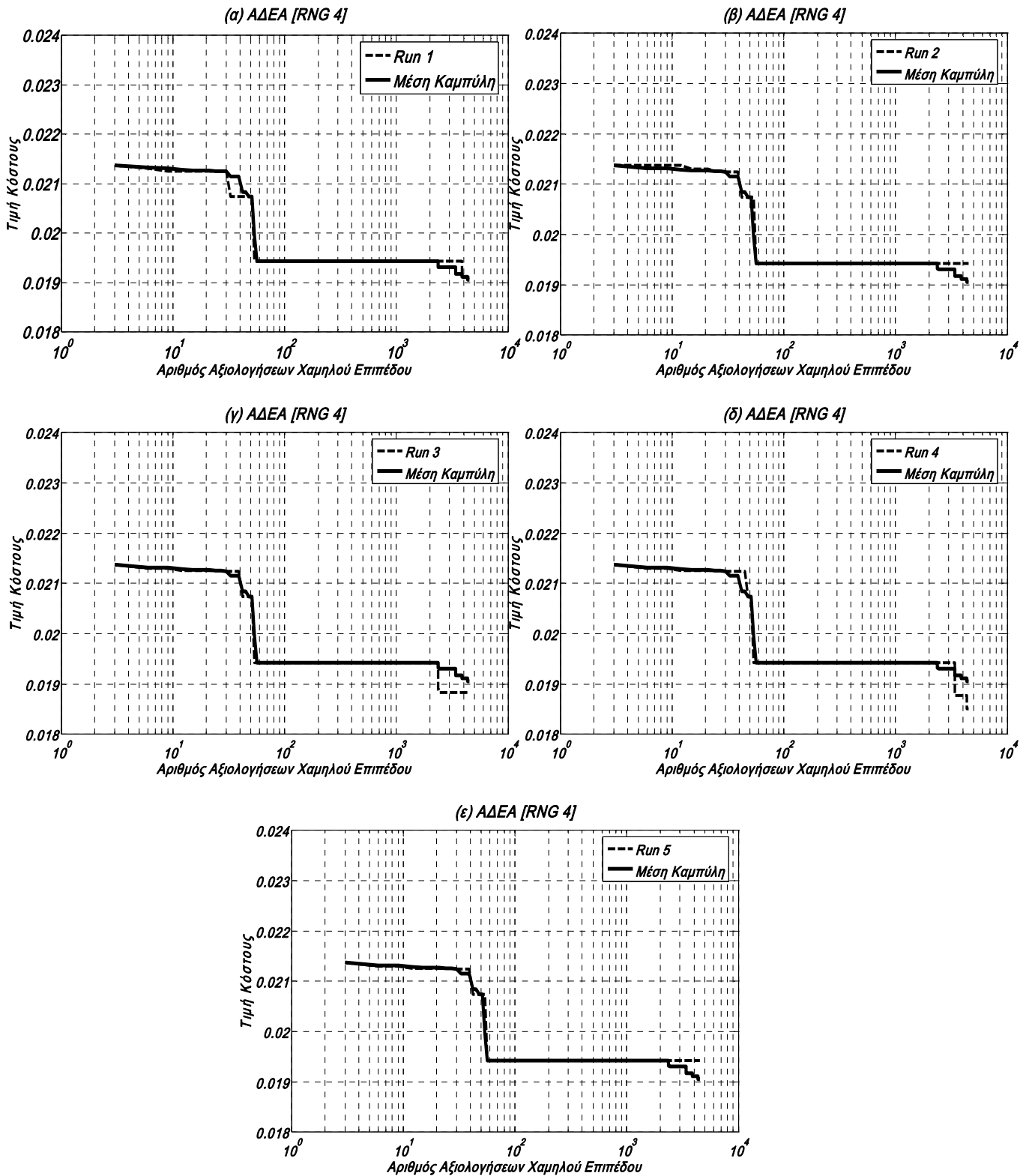
6.1.25 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ (1 επίπεδο αξιολόγησης-υψηλό) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 3). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 10 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο αριθμός των αξιολογήσεων υψηλού που πραγματοποιήθηκαν είναι το 1/3 αυτών που φαίνονται στον οριζόντιο άξονα.



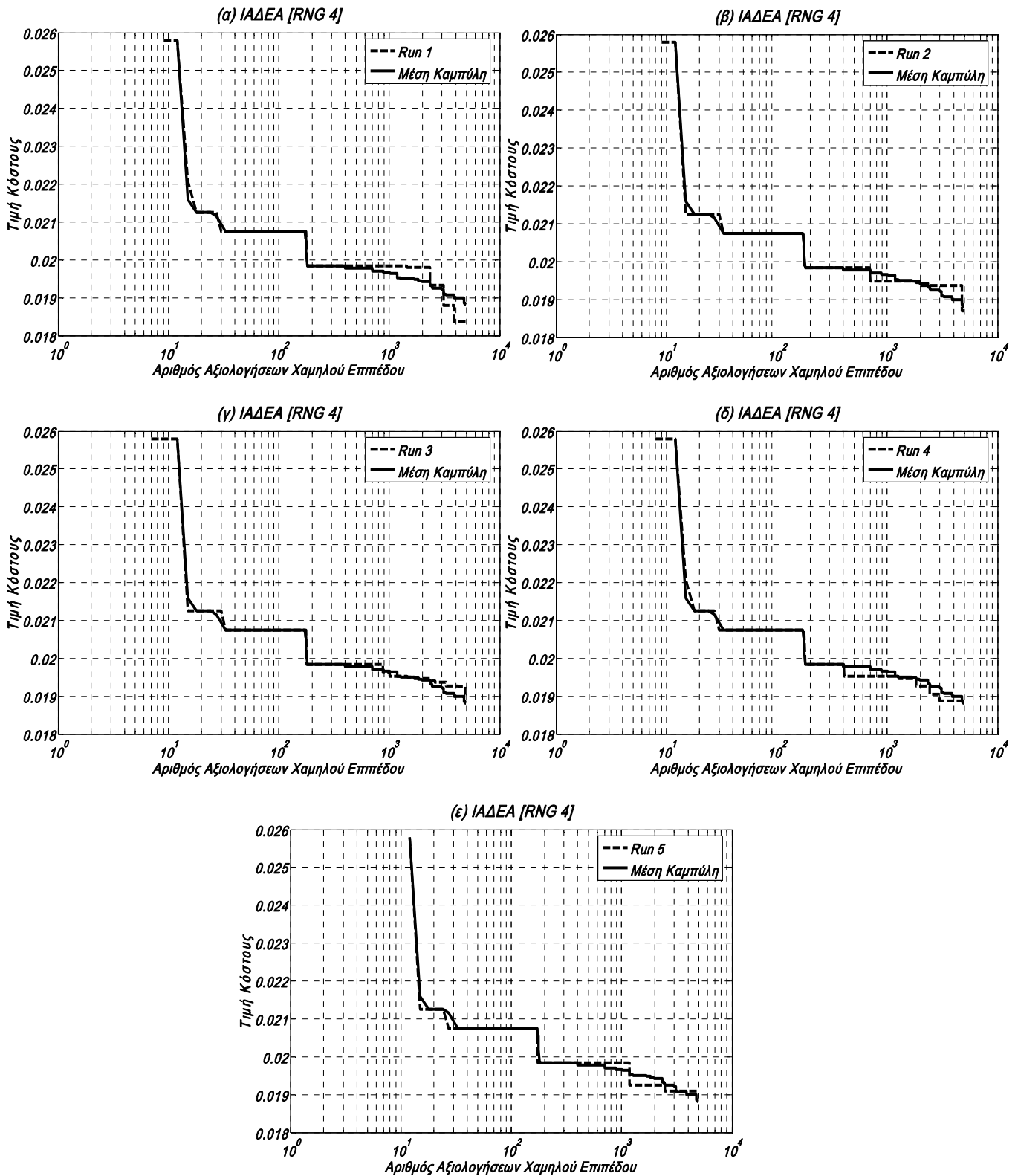
6.1.26 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΙΑΔΕΑ (2 επίπεδα αξιολόγησης) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 3). Η παραμετροποίηση στις υπονήφιες λύσεις υψηλού επιπέδου πραγματοποιείται με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής, ενώ σε εκείνες του χαμηλού με 7 σημεία σε κάθε πλευρά. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.



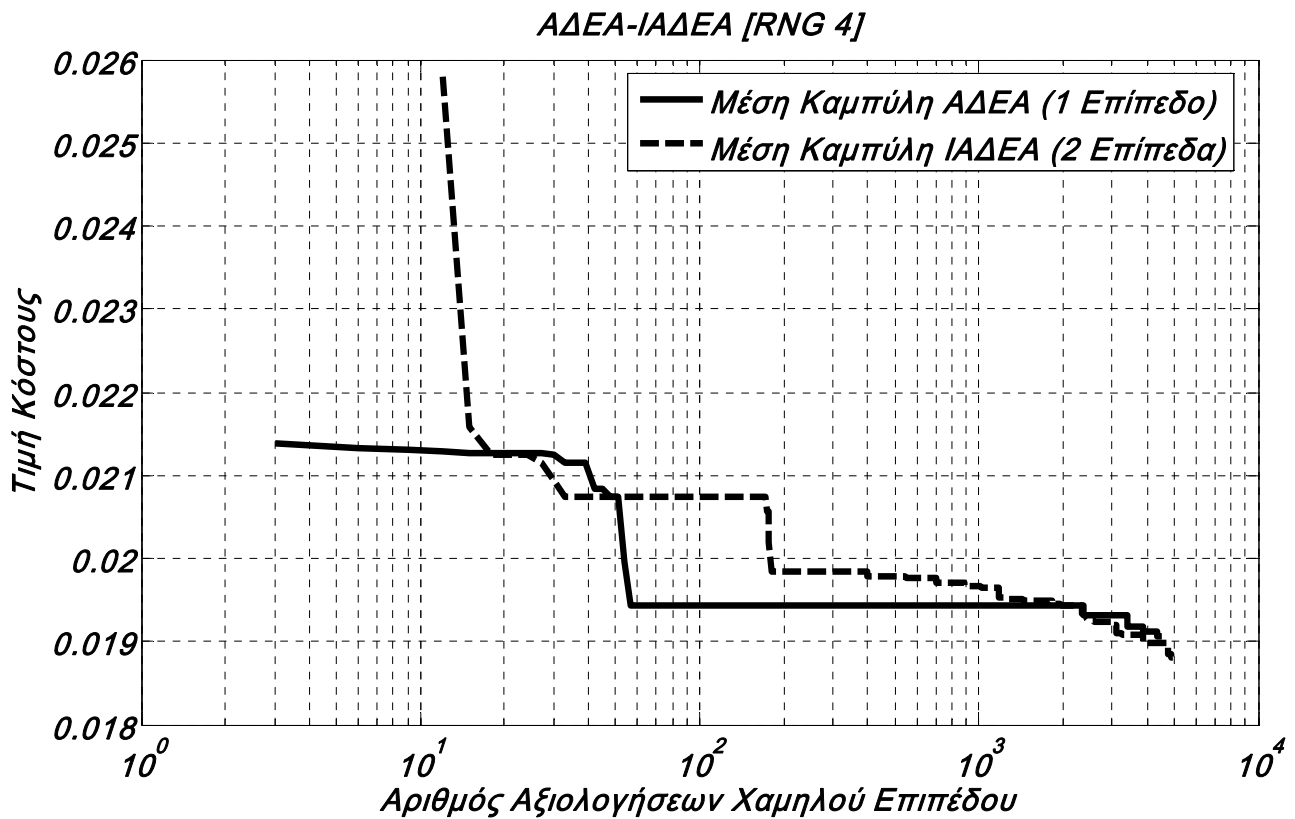
6.1.27 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπίεστη (παραμετροποίηση με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής) χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ και τον ΙΑΔΕΑ με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 3). Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιείται η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων, παραμετροποιώντας την αεροτομή με μικρότερο αριθμό σημείων Bezier. Φαίνονται οι μέσες καμπύλες για κάθε αλγόριθμο-Σύγκριση της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης.



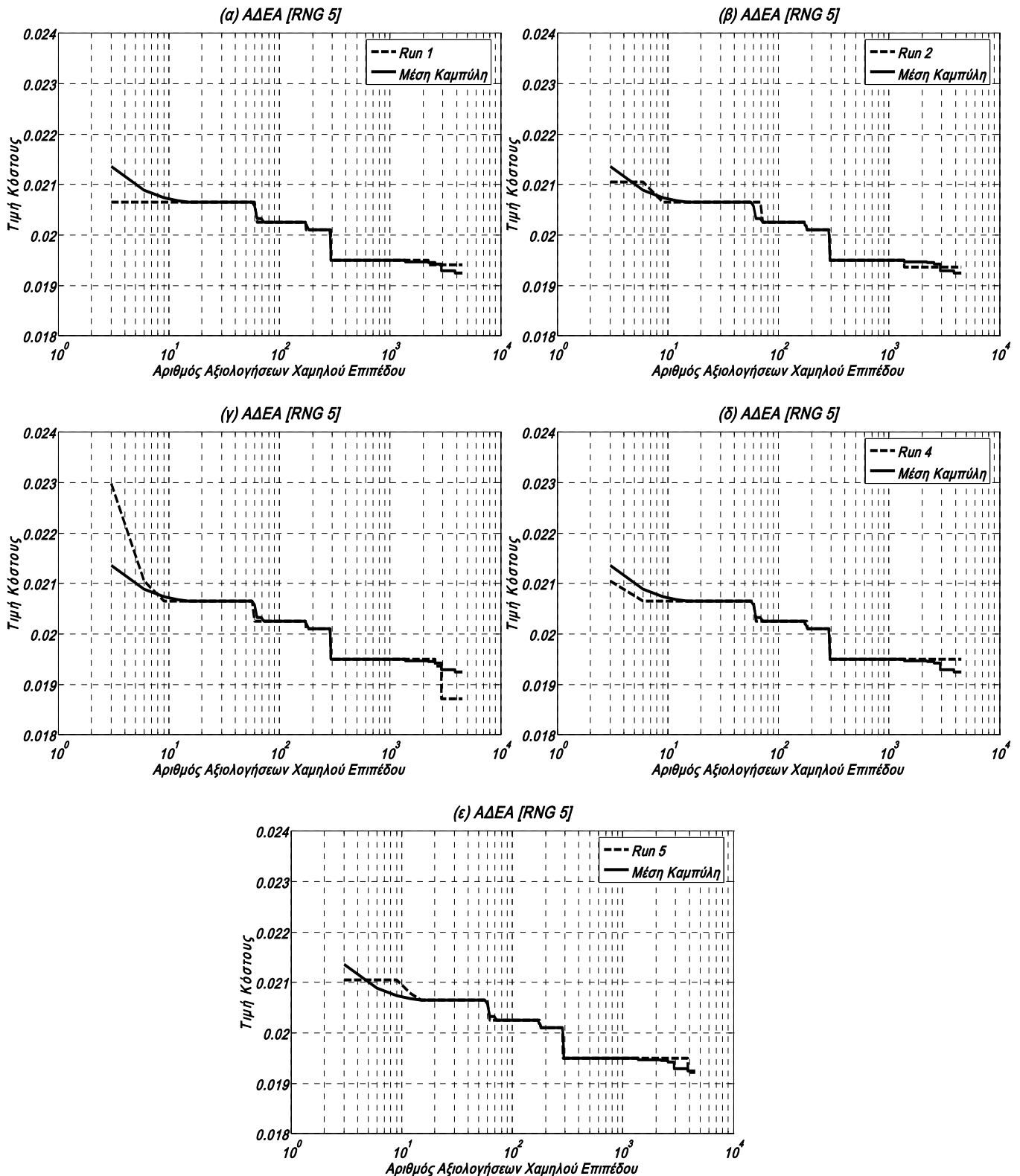
6.1.28 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ (1 επίπεδο αξιολόγησης-υψηλό) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 4). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 10 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο αριθμός των αξιολογήσεων υψηλού που πραγματοποιήθηκαν είναι το 1/3 αυτών που φαίνονται στον οριζόντιο άξονα.



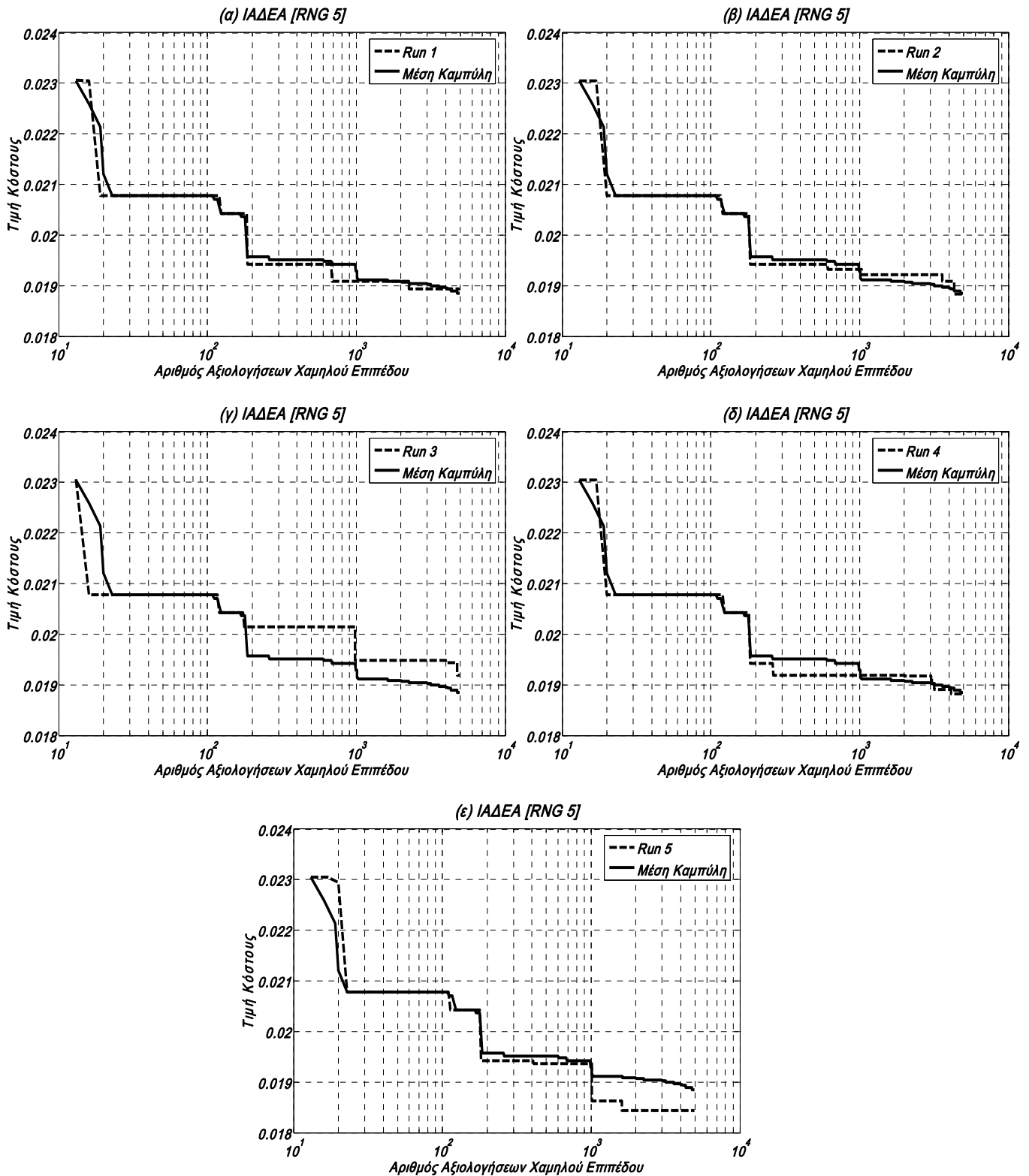
6.1.29 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΙΑΔΕΑ (2 επίπεδα αξιολόγησης) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 4). Η παραμετροποίηση στις υποψήφιες λύσεις υψηλού επιπέδου πραγματοποιείται με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής, ενώ σε εκείνες του χαμηλού με 7 σημεία σε κάθε πλευρά. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.



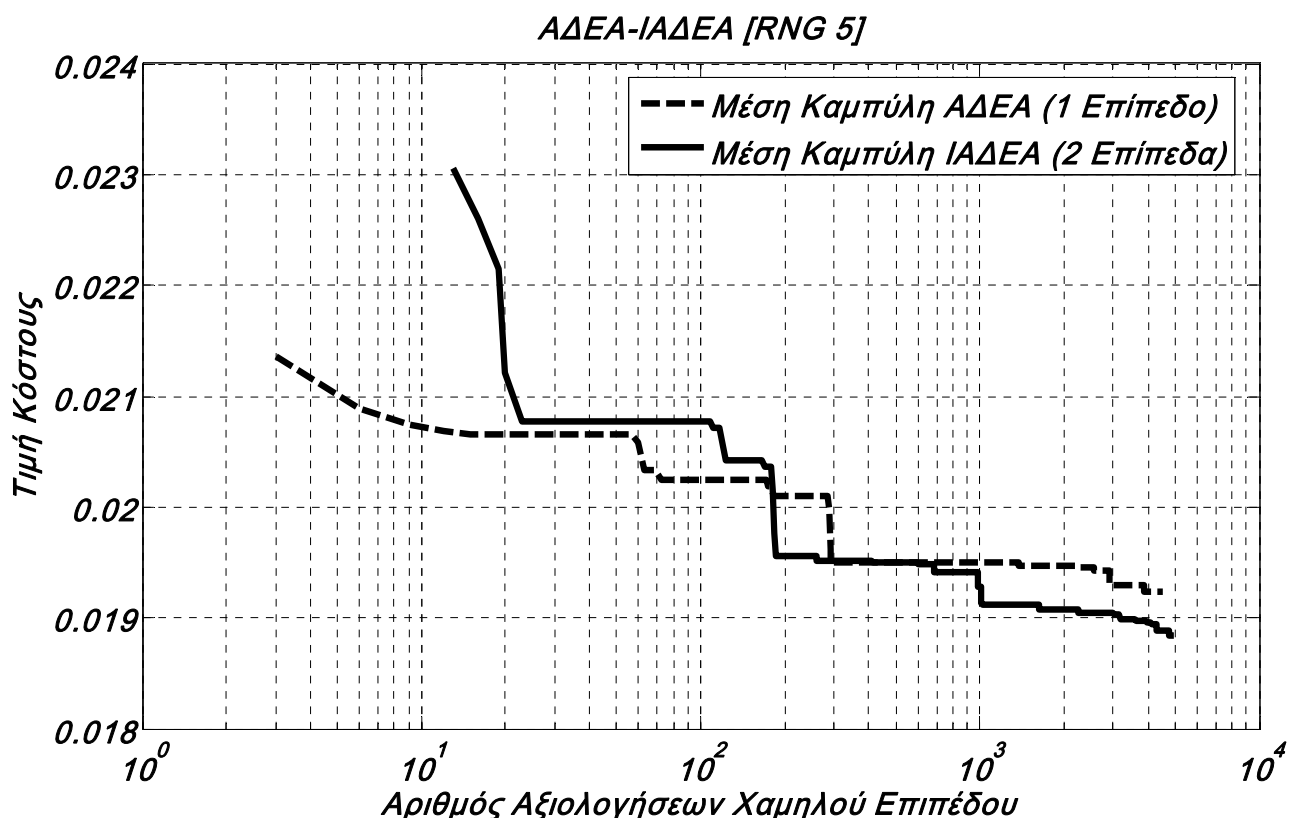
6.1.30 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή (παραμετροποίηση με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής) χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ και τον ΙΑΔΕΑ με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 4). Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιείται η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων, παραμετροποιώντας την αεροτομή με μικρότερο αριθμό σημείων Bezier. Φαίνονται οι μέσες καμπύλες για κάθε αλγόριθμο-Σύγκριση της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης.



6.1.31 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ (1 επίπεδο αξιολόγησης-υψηλό) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 5). Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 10 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά της αεροτομής. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Ο αριθμός των αξιολογήσεων υψηλού που πραγματοποιήθηκαν είναι το 1/3 αυτών που φαίνονται στον οριζόντιο άξονα.



6.1.32 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή χρησιμοποιώντας τον ΙΑΔΕΑ (2 επίπεδα αξιολόγησης) για μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 5). Η παραμετροποίηση στις υπονήφιες λύσεις υψηλού επιπέδου πραγματοποιείται με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής, ενώ σε εκείνες του χαμηλού με 7 σημεία σε κάθε πλευρά. Στα διαγράμματα (α)-(ε) φαίνεται η διαφορετική πορεία του αλγορίθμου για 5 δοκιμές με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών.

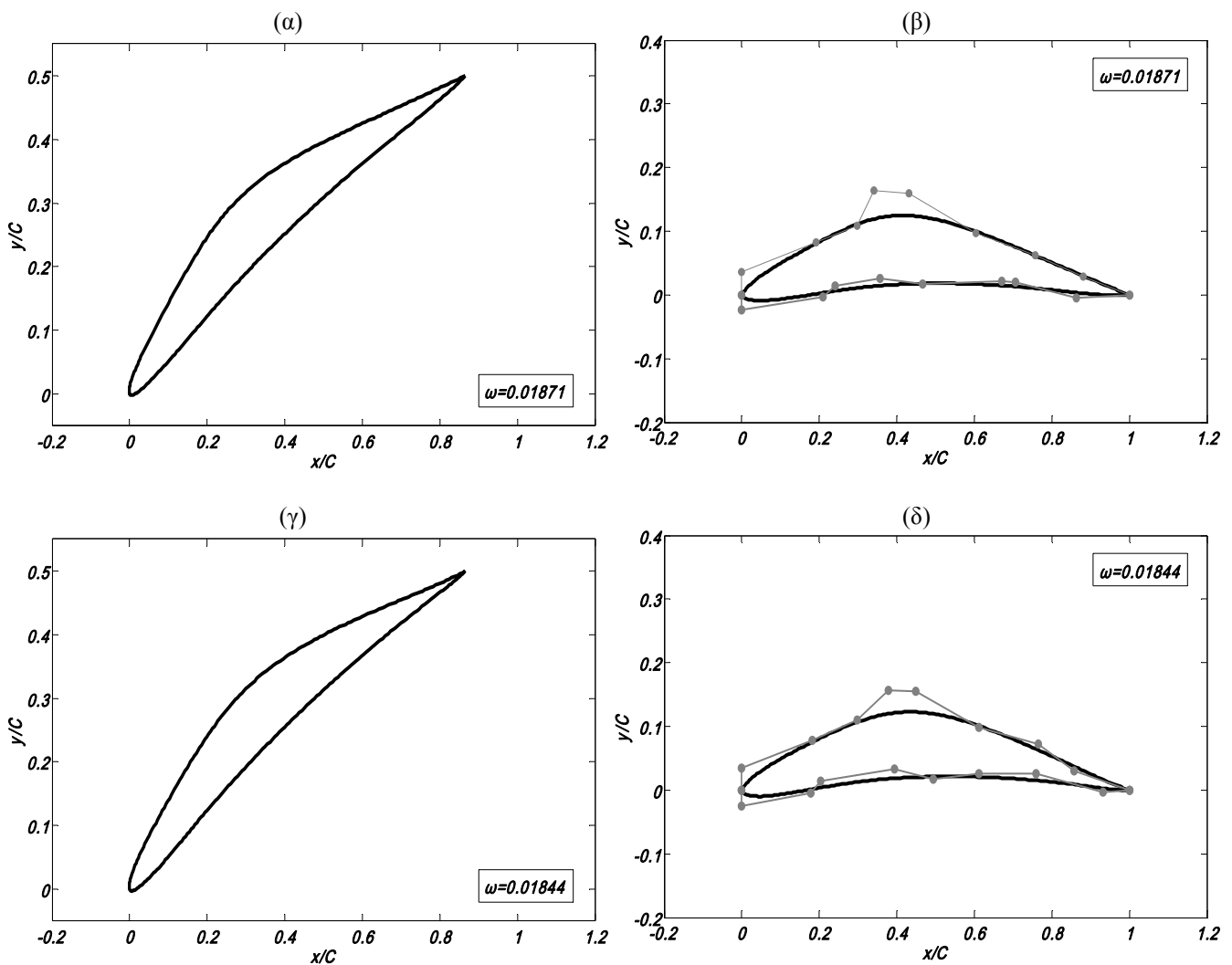


6.1.33 Βελτιστοποίηση του περιγράμματος αεροτομής πτερυγίου συμπίεστη (παραμετροποίηση με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής) χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ και τον ΙΑΔΕΑ με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών (RNG 5). Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιείται η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων, παραμετροποιώντας την αεροτομή με μικρότερο αριθμό σημείων Bezier. Φαίνονται οι μέσες καμπύλες για κάθε αλγόριθμο-Σύγκριση της ικανότητας εύρεσης βέλτιστης λύσης.

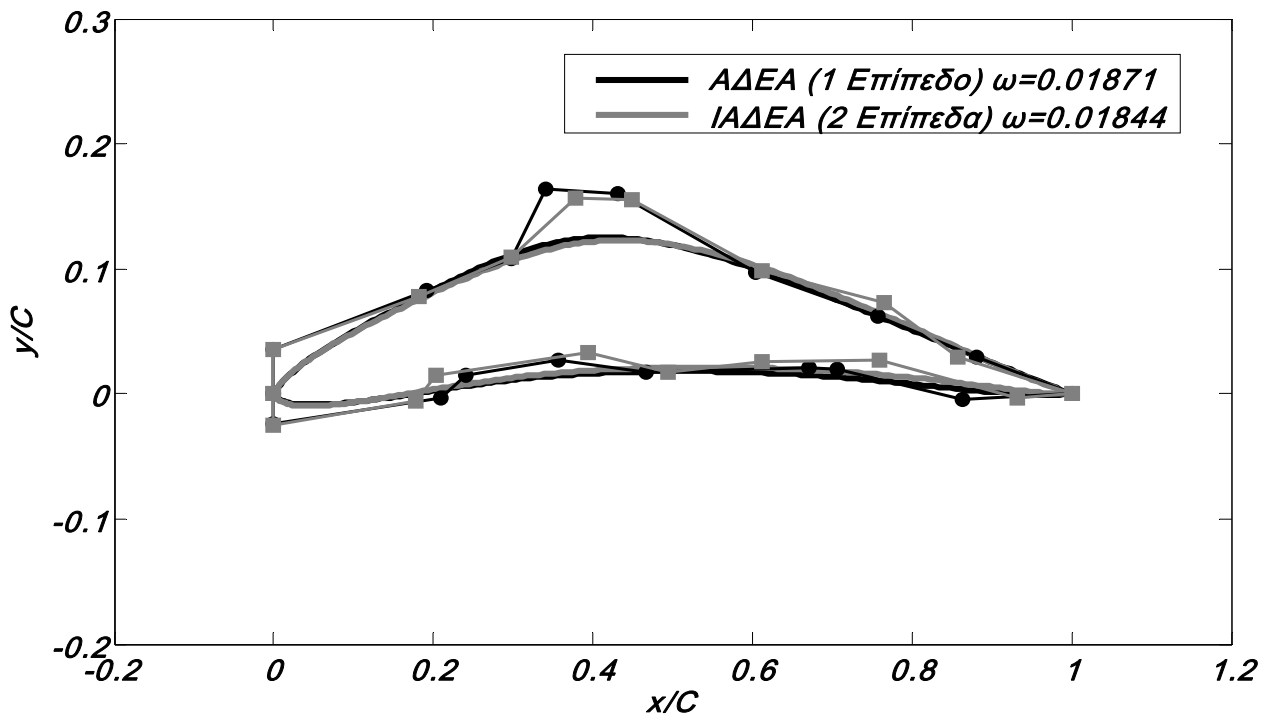
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα ο Ιεραρχικός ΑΔΕΑ δεν επιτυγχάνει σε όλες τις περιπτώσεις καλύτερη λύση από το τον ΑΔΕΑ με το ίδιο υπολογιστικό κόστος. Παρ' όλα αυτά, με όλες τις διαφορετικές γεννήτριες τυχαίων αριθμών επιτυγχάνει ικανοποιητική βέλτιστη λύση στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης του συντελεστή απωλειών ολικής πίεσης, ακολουθώντας, ενδεχομένως, τελείως διαφορετική πορεία εύρεσης της βέλτιστης λύσης από αυτήν που ακολουθεί ο ΑΔΕΑ. Παράγοντας που, ενδεχομένως, επηρεάζει αρνητικά την «καλή» πορεία του νέου αλγορίθμου είναι η «κακή» προσέγγιση του της τιμής κόστους των υποψήφιων λύσεων από το χρησιμοποιούμενο λογισμικό χαμηλού επιπέδου. Η διαφορά των σημείων ελέγχου (Bezier) κάθε πλευράς μεταξύ των υποψήφιων αεροτομών του υψηλού ($N=10$) και του χαμηλού επιπέδου ($N=7$) είναι μικρή. Ωστόσο, ο αριθμός $N=7$ είναι αρκετά μικρός για την παραμετροποίηση μιας αεροτομής, αν ληφθεί

υπόψη ότι τα 2 από αυτά είναι σταθερά σημεία και δεν αποτελούν μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος. Επιπλέον παράγοντας μπορεί να θεωρηθεί ο μικρός αριθμός αξιολογήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

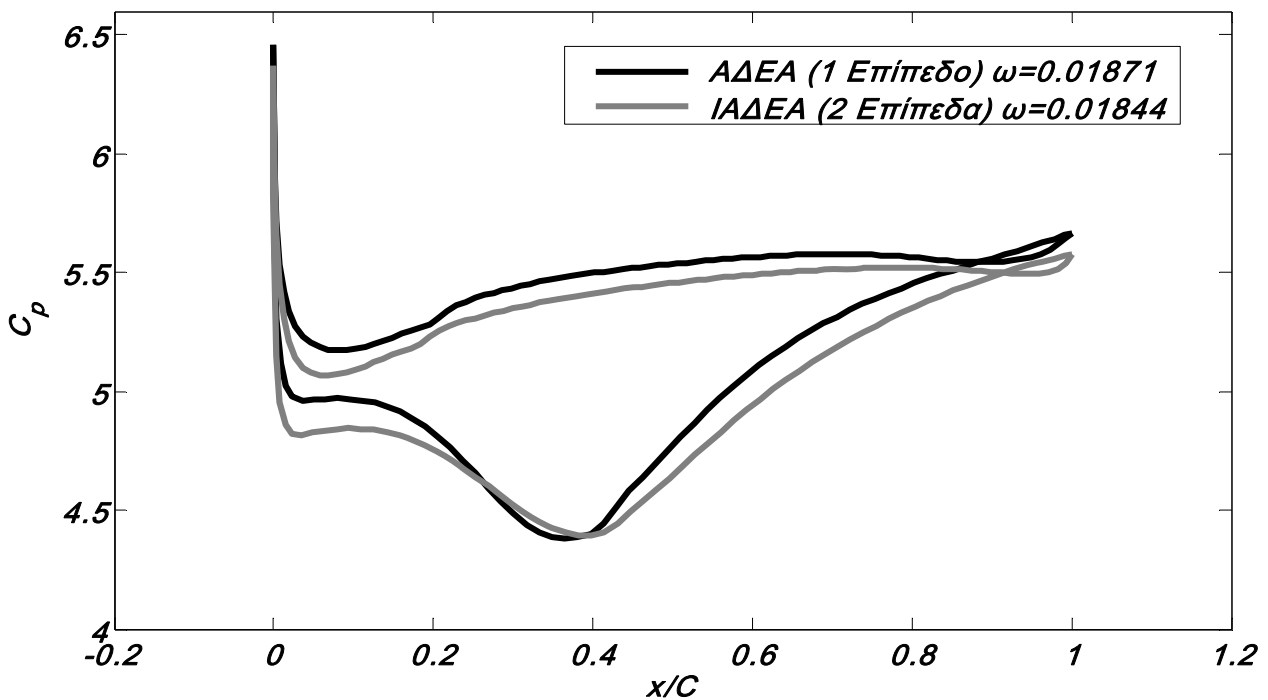
Ακολουθούν τα περιγράμματα των βέλτιστων αεροτομών που προέκυψαν από τη χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ.



6.1.34 Περίγραμμα βέλτιστης αεροτομής που προέκυψε με τη χρήση του ΑΔΕΑ (RNG 3), (α) με την πραγματική γωνία κλίσης 30° και (β) με μηδενική γωνία κλίσης και τα σημεία Bezier. Περίγραμμα βέλτιστης αεροτομής που προέκυψε με τη χρήση του ΙΑΔΕΑ (RNG 1), (γ) με την πραγματική γωνία κλίσης 30° και (δ) με μηδενική γωνία κλίσης και τα σημεία Bezier. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με μικρότερο αριθμό σημείων ελέγχου (Bezier).



6.1.35 Σύγκριση περιγραμμάτων βέλτιστων αεροτομών που προέκυψαν με τη χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ με μηδενική γωνία κλίσης και τα σημεία Bezier. Η παραμετροποίηση στις υποψήφιες λύσεις υψηλού επιπέδου πραγματοποιείται με 10 σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής, ενώ σε εκείνες του χαμηλού με 7 σημεία σε κάθε πλευρά.



6.1.36 Κατανομή του συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος της βέλτιστης αεροτομής που προέκυψαν με τη χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ και τα περιγράμματα των οποίων φαίνονται στο προηγούμενο σχήμα.

Υπενθυμίζουμε ότι και σε αυτές τις δοκιμές η σύγκριση του υπολογιστικού κόστους των δύο μεθόδων είναι εικονική καθώς, στην πράξη, το υπολογιστικό κόστος του υπολογισμού χρησιμοποιώντας τον ΙΑΔΕΑ είναι περίπου 2 φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κόστος χρησιμοποιώντας τον ΑΔΕΑ του ΕΘΣ. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι με τη χρήση παράλληλης επεξεργασίας με 10 επεξεργαστές ο χρόνος αναμονής του μηχανικού ήταν κατά μέσο όρο 22 και 11 λεπτά αντίστοιχα.

6.1.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΥΟ ΣΤΟΧΩΝ

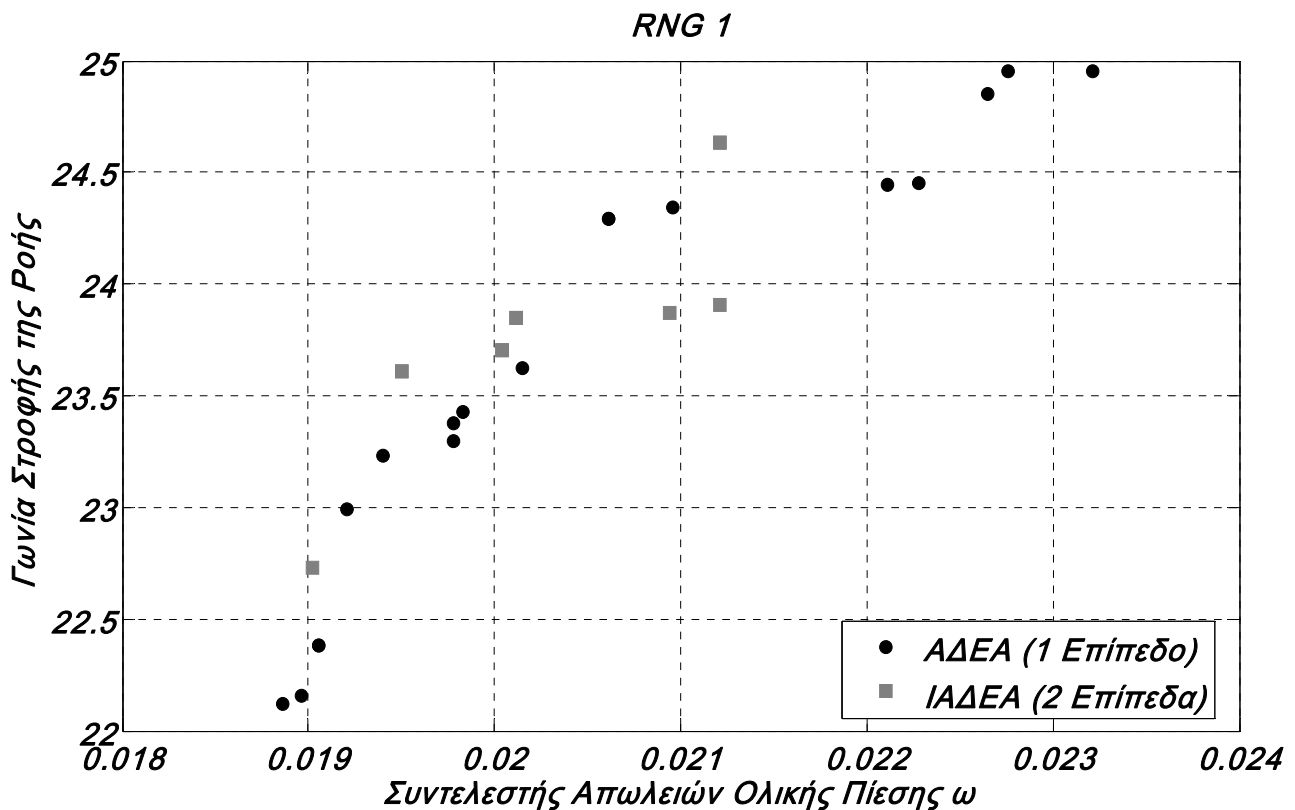
Η νέα μέθοδος εφαρμόστηκε και σε πρόβλημα σχεδιασμού βέλτιστης αεροτομής πτερυγίου συμπίεστή με δύο αντικρουόμενους στόχους. Σε αυτήν την περίπτωση, στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ολικής πίεσης αλλά και η μεγιστοποίηση της γωνίας στροφής της ροής, με τις συνθήκες ροής του προβλήματος ενός στόχου που εξετάστηκε παραπάνω. Υπενθυμίζονται οι συνθήκες ροής:

- Γωνία εισόδου της ροής: $\alpha_1 = 47^\circ$
- Γωνία κλίσης του πτερυγίου: $\gamma = 30^\circ$
- Αριθμός Mach στην είσοδο: $M_1 = 0.45$
- Αριθμός Reynolds: $Re_c = 841000$
- Λόγος διατομής εξόδου-εισόδου πτερύγωσης: $AVDR = 0.89$

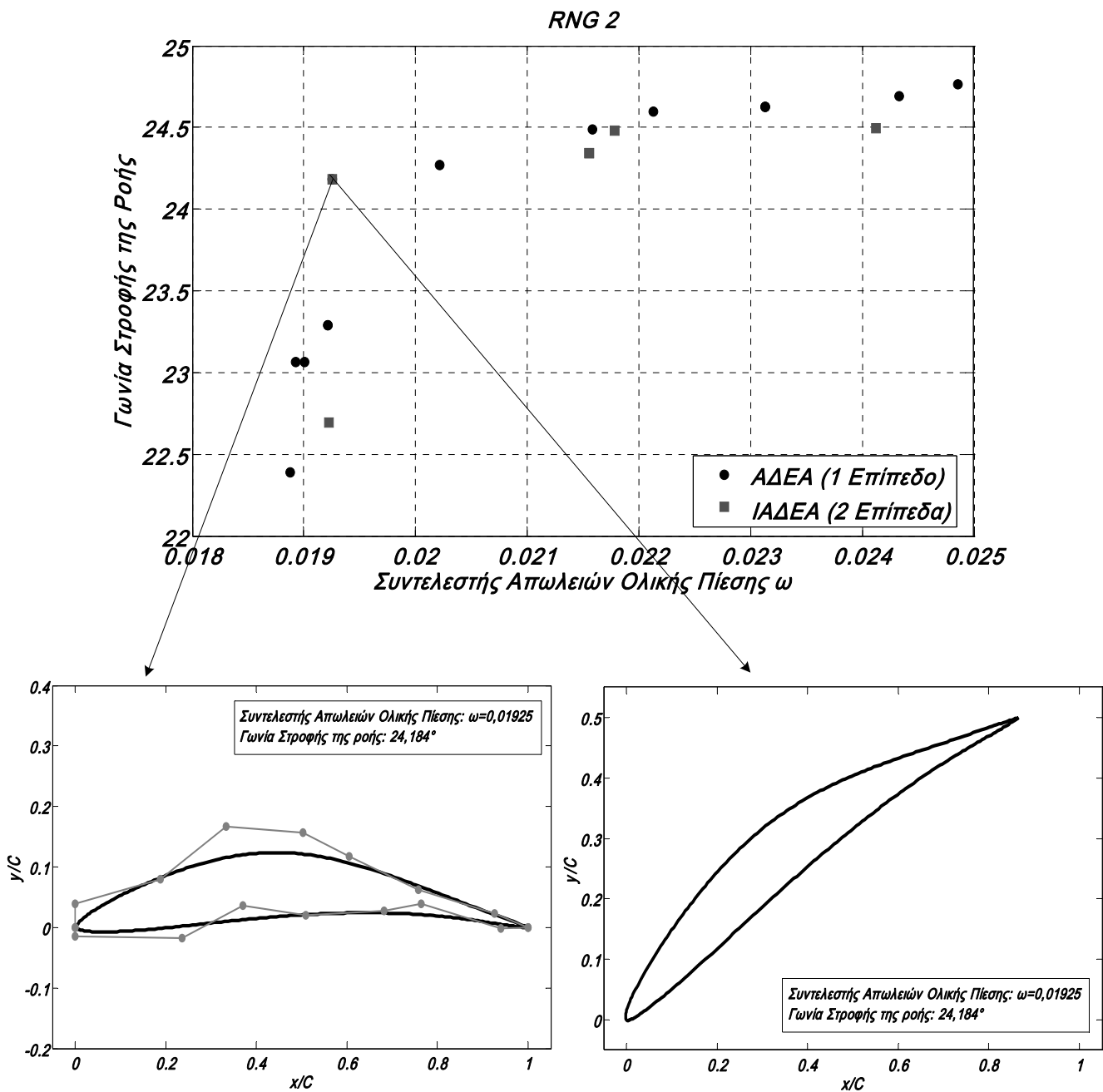
Οι περιορισμοί του προβλήματος τέθηκαν ακριβώς όπως και στα προβλήματα ενός στόχου και η παραμετροποίηση πραγματοποιήθηκε με $N = 9$ σημεία Bezier σε κάθε πλευρά της αεροτομής και οι ελεύθερες μεταβλητές του προβλήματος είναι 26, όπως ακριβώς και στο πρώτο πρόβλημα ενός στόχου. Το λογισμικό αξιολόγησης που χρησιμοποιείται και σε αυτήν την περίπτωση, και για τα δύο επίπεδα, είναι η ίδια ολοκληρωματική μέθοδος. Στο λογισμικό αξιολόγησης χαμηλού επιπέδου χρησιμοποιείται χειρότερο κριτήριο σύγκλισης της μεθόδου, όπως ακριβώς χρησιμοποιήθηκε νωρίτερα, δηλαδή πραγματοποιείται ιεραρχική αξιολόγηση. Για όλες τις δοκιμές, το πλέγμα των απογόνων έχει διαστάσεις 10×10 . Οι πληθυσμοί,

επομένως, γονέων και απογόνων αντίστοιχα είναι: $S_{\mu} = 50$ και $S_{\lambda} = 100$, εκ των οποίων $S_{low} = 85$ και $S_{high} = 15$.

Το ενιαίο κριτήριο αξιολόγησης του υπολογιστικού κόστους των δύο αλγορίθμων είναι ο αριθμός αξιολογήσεων χαμηλού επιπέδου, αντιστοιχίζοντας κάθε αξιολόγηση υψηλού σε τρεις αξιολογήσεις χαμηλού επιπέδου. Ο μέγιστος αριθμός αξιολογήσεων χαμηλού επιπέδου είναι πάλι 4500. Στην περίπτωση περισσότερων από έναν στόχων η πορεία σύγκλισης του αλγορίθμου δε μπορεί να απεικονισθεί σε συνάρτηση με το υπολογιστικό κόστος. Για το λόγο αυτό, απεικονίζεται το μέτωπο Pareto που προκύπτει, με το ίδιο ακριβώς υπολογιστικό κόστος, από τους δύο αλγορίθμους με χρήση 5 διαφορετικών γεννητριών τυχαίων αριθμών (RNG).

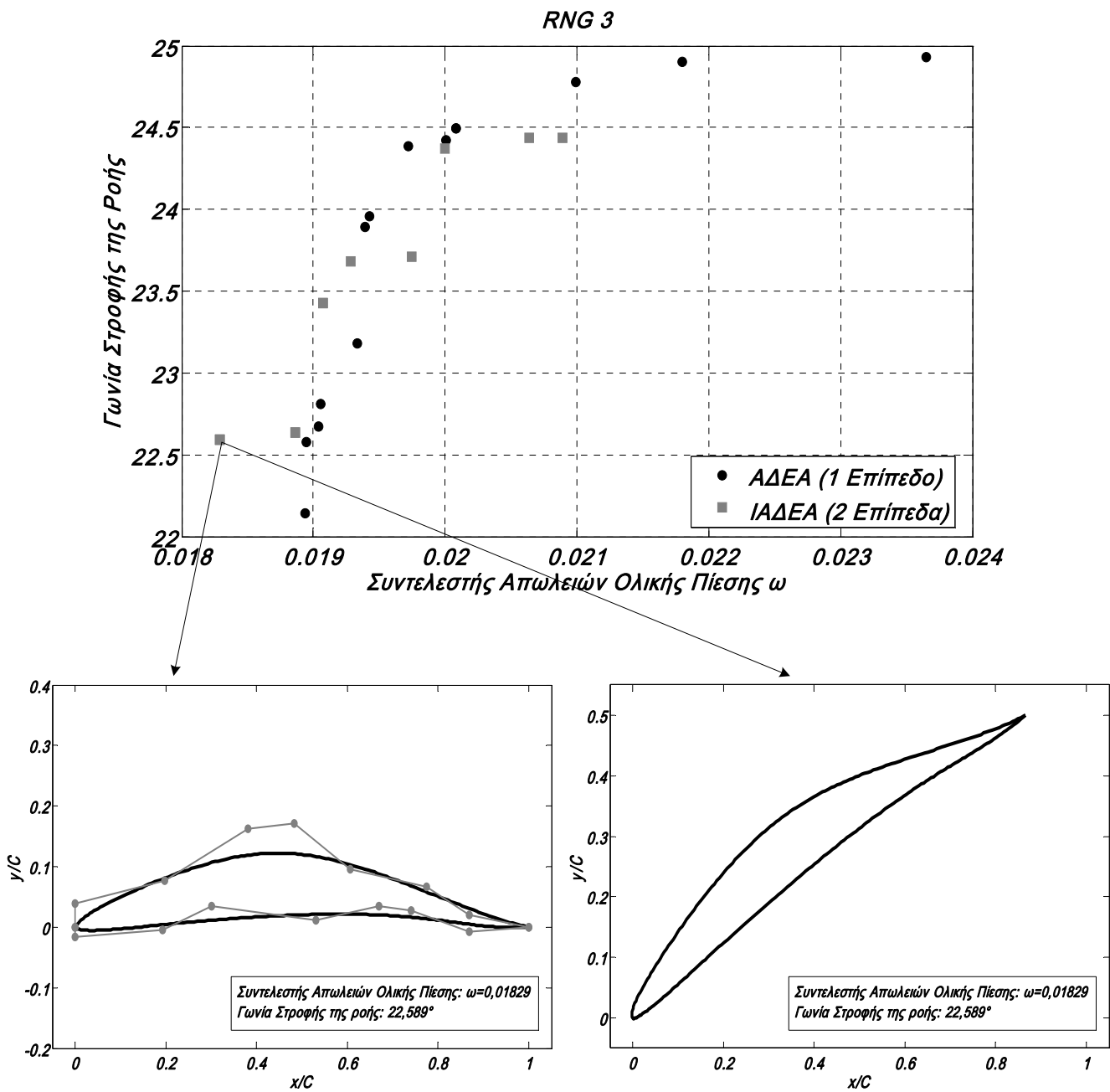


6.1.37 Μέτωπα Pareto που προέκυψαν με χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ με RNG 1. Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης.



6.1.38 (α) Μέτωπα Pareto που προέκυψαν με χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ με RNG 2. Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. (β) Περίγραμμα μιας αεροτομής που ανήκει στο μέτωπο Pareto που προέκυψε με χρήση του ΙΑΔΕΑ (2 Επίπεδα Αξιολόγησης) με μηδενική γωνία κλίσης και τα σημεία Bezier. (γ) Περίγραμμα της ίδιας αεροτομής με την πραγματική γωνία κλίσης 30° . Η λύση που επιλέχθηκε εκπληρώνει αρκετά καλά και τους δύο στόχους του προβλήματος.

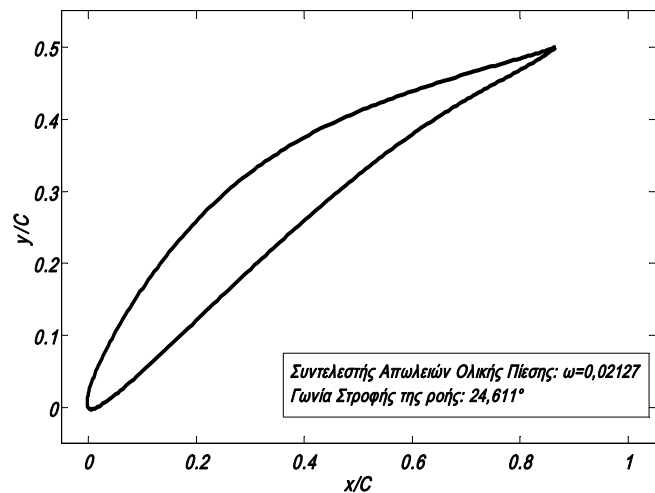
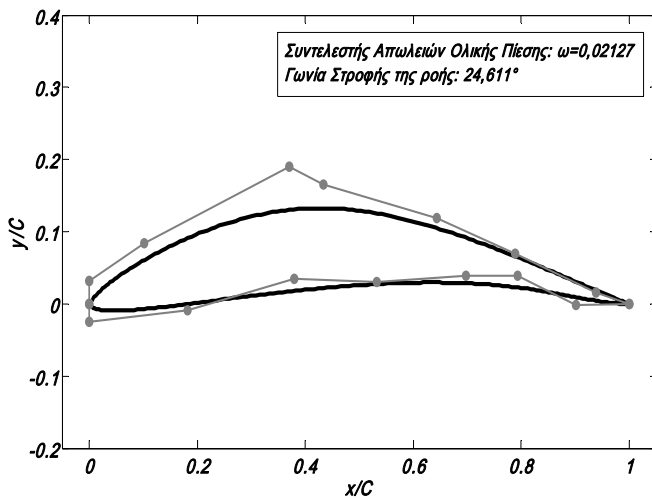
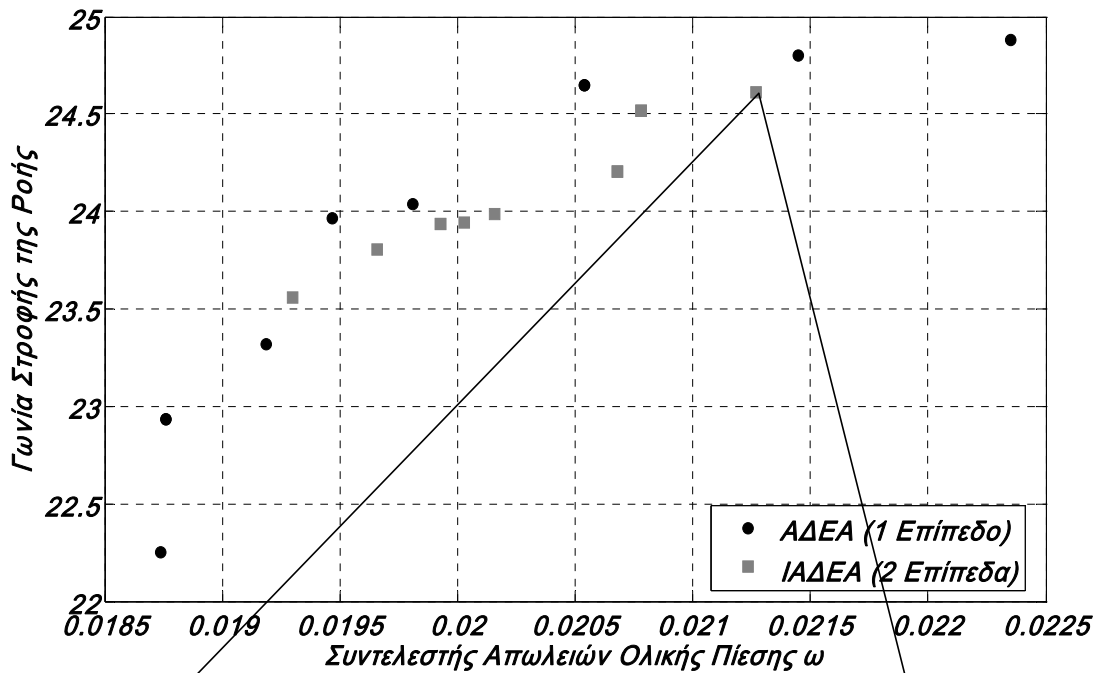
(β)



6.1.39 (α) Μέτωπα Pareto που προέκυψαν με χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ με RNG 3. Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. (β) Περίγραμμα μιας αεροτομής που ανήκει στο μέτωπο Pareto που προέκυψε με χρήση του ΙΑΔΕΑ (2 Επίπεδα Αξιολόγησης) με μηδενική γωνία κλίσης και τα σημεία Bezier. (γ) Περίγραμμα της ίδιας αεροτομής με την πραγματική γωνία κλίσης 30°. Η αεροτομή που επιλέχθηκε παρουσιάζει μικρό συντελεστή απωλειών ολικής πίεσης, αλλά εμφανίζει και σχετικά μικρή γωνία στροφής της ροής. Είναι, δηλαδή καλύτερη ως προς τον ένα στόχο του προβλήματος.

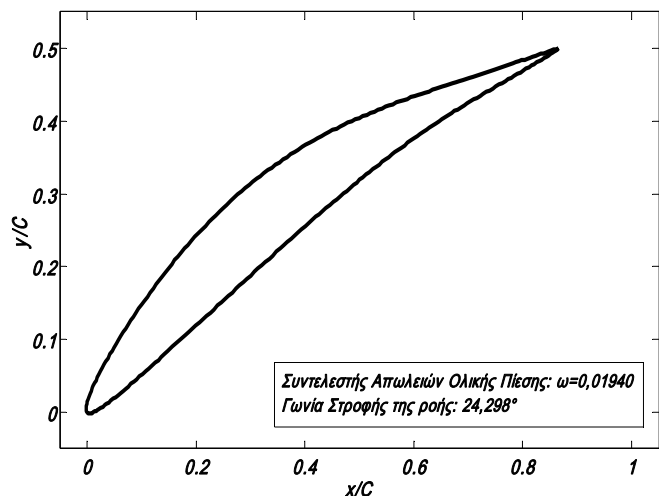
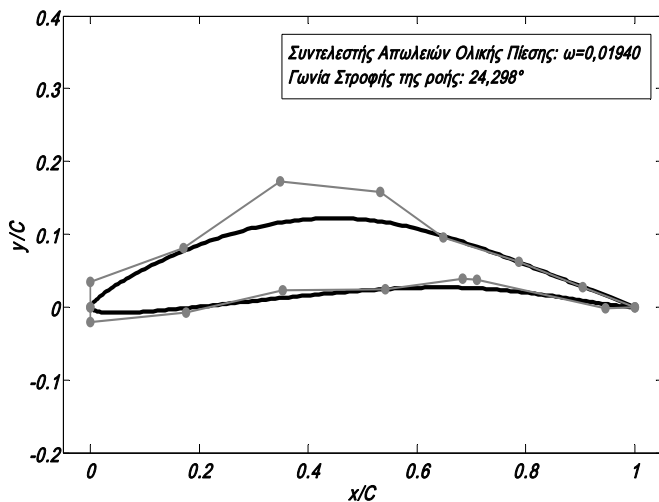
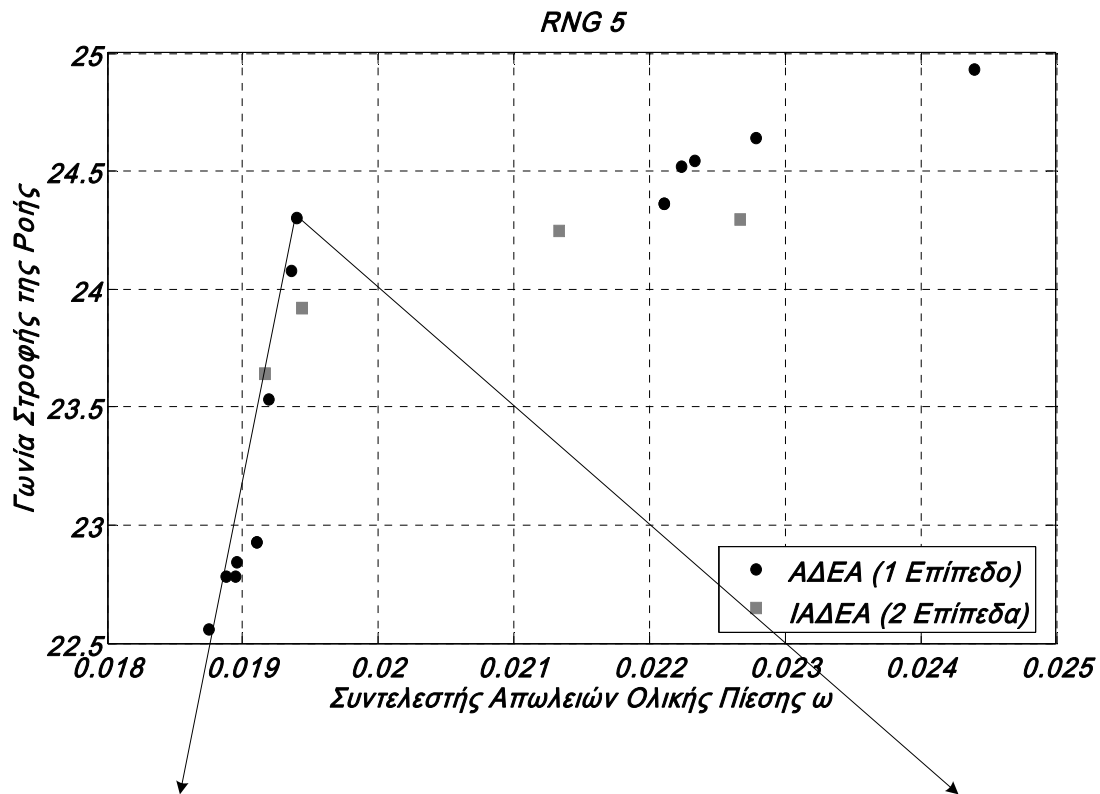
(β)

RNG 4



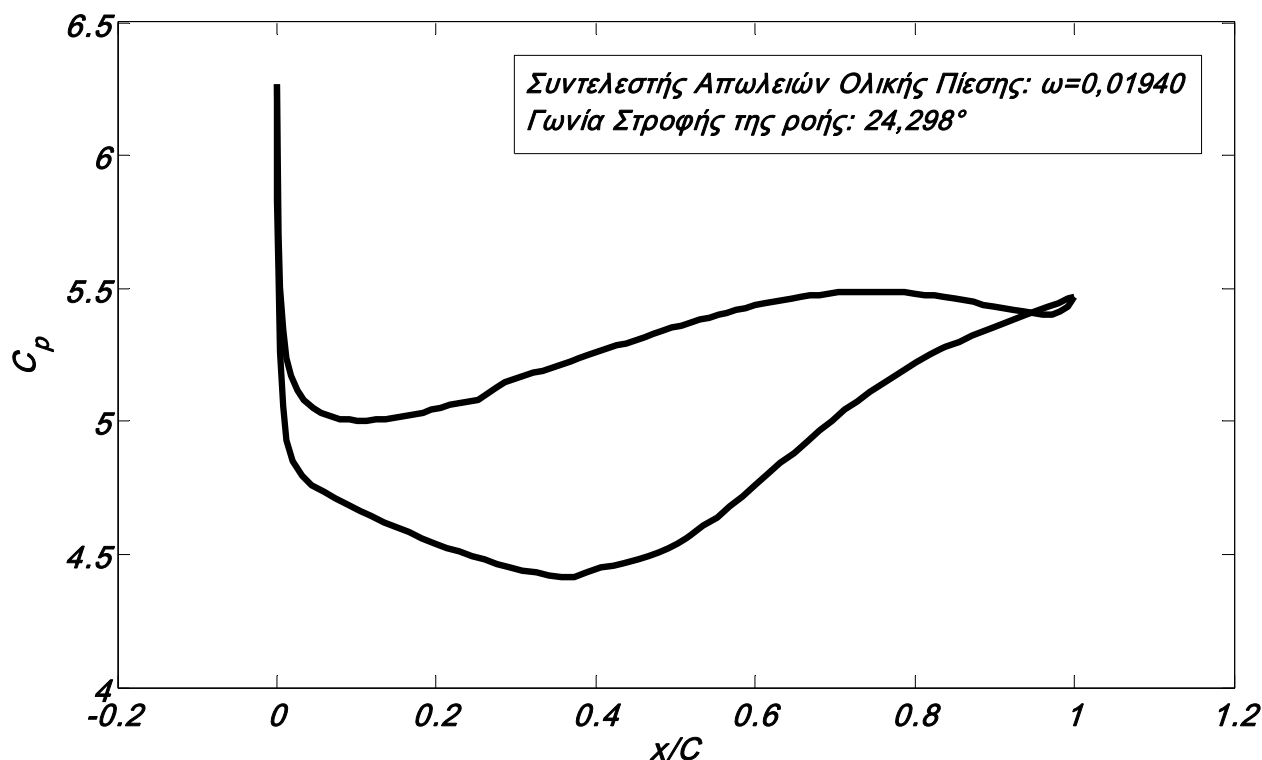
6.1.40 (α) Μέτωπα Pareto που προέκυψαν με χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ με RNG 4. Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. (β) Περίγραμμα μιας αεροτομής που ανήκει στο μέτωπο Pareto που προέκυψε με χρήση του ΙΑΔΕΑ (2 Επίπεδα Αξιολόγησης) με μηδενική γωνία κλίσης και τα σημεία Bezier. (γ) Περίγραμμα της ίδιας αεροτομής με την πραγματική γωνία κλίσης 30° . Η αεροτομή που επιλέχθηκε παρουσιάζει μεγάλη γωνία στροφής της ροής, αλλά εμφανίζει και σχετικά μεγάλο συντελεστή απωλειών ολικής πίεσης. Είναι, δηλαδή καλύτερη ως προς τον ένα στόχο του προβλήματος.

(β)



6.1.41 (α) Μέτωπα Pareto που προέκυψαν με χρήση του ΑΔΕΑ και του ΙΑΔΕΑ με RNG 5. Η παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με 9 σημεία ελέγχου (Bezier) σε κάθε πλευρά. Ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ χρησιμοποιήθηκε η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων με χειρότερο κριτήριο σύγκλισης. (β) Περίγραμμα μιας αεροτομής που ανήκει στο μέτωπο Pareto που προέκυψε με χρήση του ΑΔΕΑ (1 Επίπεδο Αξιολόγησης) με μηδενική γωνία κλίσης και τα σημεία Bezier. (γ) Περίγραμμα της ίδιας αεροτομής με την πραγματική γωνία κλίσης 30° . Η λύση που επιλέχθηκε εκπληρώνει αρκετά καλά και τους δύο στόχους του προβλήματος.

(β)



6.1.42 Κατανομή του συντελεστή πίεσης C_p κατά μήκος μιας βέλτιστης κατά Pareto αεροτομής που προέκυψε με τη χρήση του ΑΔΕΑ και το περίγραμμα της οποίας φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα.

Δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ δύο λύσεων που ανήκουν στο μέτωπο Pareto, και, επομένως, δε μπορεί να γίνει σαφής σύγκριση μεταξύ των δύο μετώπων που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους. Ωστόσο, παρατηρείται ότι ο αριθμός των λύσεων που ανήκουν στο μέτωπο Pareto που προκύπτει με τη χρήση του ΙΑΔΕΑ είναι μικρότερος από τον αριθμό των λύσεων που ανήκουν στο μέτωπο Pareto που προκύπτει με την εφαρμογή του ΑΔΕΑ. Το γεγονός αυτό, ενδεχομένως, οφείλεται στο μικρό σχετικά αριθμό αξιολογήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Η εικασία αυτή είναι λογική, αν ληφθεί υπόψη ότι το ποσοστό των αξιολογήσεων υψηλού επιπέδου που πραγματοποιούνται με την εφαρμογή του Ιεραρχικού ΑΔΕΑ σε σχέση με το συνολικό πληθυσμό είναι λίγες και από τις οποίες και μόνο προκύπτουν οι βέλτιστες κατά Pareto λύσεις. Προβλέπεται ότι με μεγαλύτερο συνολικό αριθμό αξιολογήσεων, ο αριθμός των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων θα αυξηθεί.

Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος φαίνεται να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε προβλήματα δύο στόχων.

7 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του Γενικευμένου Εξελικτικού Αλγορίθμου (ΕΑ). Επιπλέον, περιγράφεται ο Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος (ΔΕΑ), οποίος αποτελεί προϊόν προηγούμενης διπλωματικής εργασίας και είναι βασισμένος στη λογική των Κατανεμημένων Εξελικτικών Αλγορίθμων (ΚΕΑ)³⁵ [1,2,3]. Ο ΔΕΑ εμφανίζεται με δύο μορφές όταν εφαρμόζεται με τη βοήθεια πολυεπεξεργαστικού συστήματος. Παρουσιάζεται, λοιπόν, ο Σύγχρονος Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος (ΣΔΕΑ) και ο Ασύγχρονος Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος³⁶ (ΑΔΕΑ) [20]. Ο τελευταίος αποτέλεσε τη βάση του Ιεραρχικού Ασύγχρονου Δομημένου Εξελικτικού Αλγορίθμου (ΙΑΔΕΑ), η ανάπτυξη και η αξιολόγηση του οποίου είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η αξιολόγησή του νέου αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε κατά την εφαρμογή του σε προβλήματα σχεδιασμού βέλτιστων αεροδυναμικών σωμάτων.

³⁵ Distributed Evolutionary Algorithms (DEA)

³⁶ Asynchronous Grid Evolutionary Algorithm (AGREA)

Το θεμέλιο πάνω στο οποίο βασίζονται οι Δομημένοι Εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι η επιβολή ορισμένης τοπολογίας στον πληθυσμό των απογόνων και των γονέων. Συγκεκριμένα, οι υποψήφιες λύσεις του συνόλου των απογόνων τοποθετούνται σε ένα διδιάστατο πλέγμα και κάθε κόμβος του πλέγματος αυτού αντιστοιχεί σε μία υποψήφια λύση. Το σύνολο των γονέων τοποθετείται αντίστοιχα σε ένα ξεχωριστό διδιάστατο πλέγμα, όπως αναλύθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Ο νέος αλγόριθμος διαφοροποιείται από τους προηγούμενους Δομημένους ΕΑ καθώς κατανέμει τις υποψήφιες λύσεις σε δύο ξεχωριστά επίπεδα, το υψηλό και το χαμηλό, ανάλογα με τη θέση τους στο διδιάστατο πλέγμα των απογόνων. Τα μέλη του υψηλού επιπέδου αξιολογούνται με λογισμικό υψηλής ακρίβειας και συχνά μεγάλου υπολογιστικού κόστους. Αντίθετα, οι υποψήφιες λύσεις που έχουν τοποθετηθεί στο χαμηλό επίπεδο αξιολογούνται με λογισμικό το οποίο προσεγγίζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης με μικρότερη ακρίβεια και «χρεώνει» μικρότερο υπολογιστικό κόστος στη διαδικασία. Οι περισσότερες υποσχόμενες λύσεις του χαμηλού επιπέδου επαναξιολογούνται ως μέλη του υψηλού επιπέδου.

Επιπλέον, όπως περιγράφηκε, επειδή ο αλγόριθμος είναι ασύγχρονος, καταργείται η έννοια της γενιάς του κλασικού ΕΑ³⁷. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας τονίζεται ο ημι-ασύγχρονος χαρακτήρας του αλγορίθμου και, επιπλέον, αναφέρεται πως, με την κατάργηση λίστας αξιολόγησης των υποψήφιων λύσεων, ο αλγόριθμος μετατρέπεται σε περισσότερο ασύγχρονο.

Ο νέος αλγόριθμος (ΙΑΔΕΑ) περιγράφεται αναλυτικά και δοκιμάζεται ως προς την ικανότητα εύρεσης της βέλτιστης λύσης σε σύγκριση με τον ΑΔΕΑ. Η αξιολόγησή του επιτυγχάνεται κατά την εφαρμογή του σε προβλήματα σχεδιασμού βέλτιστης αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή ενός αλλά και δύο στόχων. Η εφαρμογή αυτή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του πολυεπεξεργαστικού συστήματος του ΕΘΣ χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη κατανεμημένης εργασίας PVM.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, αναλύονται τα συμπεράσματα που εξάγονται με βάση τις παρατηρήσεις από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αλλά και με βάση τη σύγκριση του ΙΑΔΕΑ με τον ήδη υπάρχοντα ΑΔΕΑ, όσον αφορά στην ικανότητα εύρεσης βέλτιστης λύσης με συγκεκριμένο υπολογιστικό κόστος.

³⁷ Evolutionary Algorithm (EA)

Παρατηρείται, λοιπόν, ότι κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ επιτυγχάνεται σημαντικό κέρδος σε υπολογιστικό κόστος. Τέλος, προτείνονται σχετικά με την εργασία πεδία, που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε δοκιμή του νέου αλγορίθμου σε περιπτώσεις σχεδιασμού βέλτιστης αεροτομής πτερυγίου συμπιεστή με έναν μόνο στόχο αλλά και με δύο αντικρουόμενους στόχους. Με στόχο την εκμετάλλευση του ασύγχρονου χαρακτήρα του νέου αλγορίθμου αλλά και τη μείωση της διάρκειας των δοκιμών, όλες οι διεργασίες πραγματοποιήθηκαν με τη συμβολή της παράλληλης επεξεργασίας και συγκεκριμένα με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης κατανεμημένης εργασίας PVM. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε στα ίδια προβλήματα βελτιστοποίησης ο ΑΔΕΑ του ΕΘΣ, ώστε να παρατηρηθεί συγκριτικά η πορεία των δύο αλγορίθμων με δεδομένο υπολογιστικό κόστος.

Από τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων βελτιστοποίησης ενός στόχου (§6.1.1), και περισσότερο κατά την εφαρμογή του ΑΔΕΑ, φαίνεται πως η σύγκλιση του αλγορίθμου επιπεδοποιείται, δηλαδή δε βρίσκει καλύτερη λύση για αρκετά μεγάλο αριθμό αξιολογήσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το γεγονός αυτό σημαίνει πως ο αλγόριθμος έχει βρεθεί σε ένα τοπικό βέλτιστο από το οποίο αργεί να ξεφύγει. Παρ' όλα αυτά φαίνεται ότι μετά από κάποιο αριθμό αξιολογήσεων ξεφεύγει και συνεχίζει την πορεία του προς την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει τον μη εγκλωβισμό των εξελικτικών αλγορίθμων σε τοπικά βέλτιστα, όπως είναι γνωστό από τη θεωρία.

Σε ορισμένες περιπτώσεις φαίνεται ότι η διαδικασία έχει τερματιστεί (από το χρήστη) σε φάση που ο αλγόριθμος παρουσιάζει καθοδική τάση (ελαχιστοποίηση). Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα του προκαθορισμένου υπολογιστικού κόστους που είχε τεθεί με σκοπό τη σύγκριση της ικανότητας εύρεσης της βέλτιστης λύσης των δύο αλγορίθμων. Ο περιορισμός υπολογιστικού κόστους ο οποίος τίθεται εδώ από το χρήστη, θα μπορούσε να αποτελεί και περιορισμό σε μια πραγματική βιομηχανική εφαρμογή. Δεν επηρεάζεται η σύγκριση των δύο αλγορίθμων, εφόσον ο ίδιος

περιορισμός τίθεται και για τους δύο. Επιπλέον, ακόμα και να ήταν επιθυμητή η επανάληψη μιας δοκιμής με μεγαλύτερο περιορισμό υπολογιστικού κόστους, είναι αδύνατο να αναπαραχθεί μια συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη γεννήτρια τυχαίων αριθμών, λόγω του ασύγχρονου χαρακτήρα του αλγορίθμου.

Αξίζει να σημειωθεί πως το δυναμικό του ΕΘΣ είναι δεδομένο και υπάρχουν καθημερινά εργασίες σε εξέλιξη που πρέπει να πραγματοποιηθούν στο διαθέσιμο πολυεπεξεργαστικό σύστημα. Για το λόγο αυτό η χρήση των επεξεργαστών έπρεπε να είναι συνετή κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των δοκιμών.

Το κάθε πρόβλημα ενός στόχου που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία δοκιμάστηκε με διαφορετικές αρχικοποιήσεις του πληθυσμού των απογόνων (RNG) αλλά και με βάση τη διαφορετική πορεία που δύναται να ακολουθήσει ο αλγόριθμος αρχικοποιούμενος με την ίδια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Η διαφορετική πορεία αυτή οφείλεται στον ασύγχρονο χαρακτήρα των αλγορίθμων, στο πολυεπεξεργαστικό σύστημα που χρησιμοποιείται αλλά και στις άλλες εργασίες που πραγματοποιούνται στους επεξεργαστές κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Παρ' όλα αυτά, επειδή οι αλγόριθμοι δεν είναι πλήρως ασύγχρονοι (ημι-ασύγχρονοι) και διατηρούν την έννοια της λίστας αξιολόγησης, σε κάποιες περιπτώσεις η πορεία που ακολουθούν οι αλγόριθμοι δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφοροποίηση. Κατά την εφαρμογή του ΙΑΔΕΑ, το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται σε μικρότερο βαθμό καθώς, λόγω της ύπαρξης δύο επιπέδων αξιολόγησης, είναι περισσότερο εύκολο ο αλγόριθμος να ακολουθήσει διαφορετικές πορείες εύρεσης βέλτιστης λύσης.

Παρουσιάζονται σε κάποιες από τις δοκιμές τα περιγράμματα των βέλτιστων αεροτομών που προέκυψαν με χρήση των δύο αλγορίθμων, τα σημεία ελέγχου (Bezier) και η κατανομή του συντελεστή πίεσης C_p . Επιδεικνύονται, για εποπτικούς λόγους, οι βέλτιστες αεροτομές από τους δύο αλγόριθμους σε σύγκριση σε κοινό διάγραμμα. Οι αεροτομές αυτές δημιουργούνται από διαφορετικό συνδυασμό σημείων Bezier (μεταβλητές σχεδιασμού), παρουσιάζουν διαφορετικό συντελεστή απωλειών ολικής πίεσης ω και διαφορετική κατανομή συντελεστή πίεσης. Επιπλέον, οι συγκεκριμένες αεροτομές έχουν ευρεθεί από τον κάθε αλγόριθμο σε σημείο που ο αλγόριθμος, ενδεχομένως, είναι ασύγκλητος.

Συνολικά, στα αποτελέσματα των δοκιμών σε προβλήματα ενός στόχου (§6.1.1) παρατηρείται ότι ο Ιεραρχικός ΑΔΕΑ μπορεί και είναι ανταγωνιστικός, με την έννοια μείωσης του υπολογιστικού κόστους, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις επιτυγχάνει καλύτερη λύση από τον ΑΔΕΑ με δεδομένο υπολογιστικό κόστος. Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών σε πρόβλημα αεροδυναμικής βελτιστοποίησης δύο στόχων (§6.1.2), όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δε μπορεί να πραγματοποιηθεί σαφής σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων. Δε φαίνεται σαφής υπεροχή της μεθόδου στα προβλήματα πολλών στόχων, ωστόσο, παρατηρείται πως θα μπορούσε να εξελιχθεί σε μια αρκετά ανταγωνιστική μέθοδο. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο και συμβαίνει σε πολλές τεχνικές οι οποίες μεταφέρονται από προβλήματα ενός στόχου σε προβλήματα πολλών στόχων, όπως στην περίπτωση χρήσης των Νευρωνικών Δικτύων.

Ωστόσο, η ικανότητα εύρεσης βέλτιστης λύσης του νέου αλγορίθμου, με μικρό σχετικά υπολογιστικό κόστος, εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από τη φύση του προβλήματος στο οποίο εφαρμόζεται. Συγκεκριμένα, εξαρτάται από το λογισμικό χαμηλού επιπέδου που θα χρησιμοποιηθεί, την ικανότητα αυτού να προσεγγίζει ικανοποιητικά την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του εκάστοτε προβλήματος βελτιστοποίησης, αλλά και το υπολογιστικό κόστος του υπολογισμού αυτού σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος της αξιολόγησης υψηλού επιπέδου. Κατά συνέπεια, και επειδή ακριβώς στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν η διαφορά υπολογιστικού κόστους μεταξύ του λογισμικού χαμηλού και υψηλού επιπέδου είναι εικονική, διατηρείται κάποια επιφύλαξη σε σχέση με τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν από αυτά.

Όταν ο νέος αλγόριθμος εφαρμοστεί σε προβλήματα βελτιστοποίησης με αισθητή διαφορά του χρόνου αξιολόγησης μεταξύ των επιπέδων, το ποσοστό αξιολογήσεων υψηλού επιπέδου σε σχέση με το συνολικό πληθυσμό, αναμένεται να είναι ακόμα μικρότερο πριν από κάθε ανανέωση του συνόλου των απογόνων (*ελάττωση του υπολογιστικού κόστους*). Το γεγονός αυτό πηγάζει από τον ασύγχρονο χαρακτήρα του αλγορίθμου. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι, καθώς κάθε αξιολόγηση του υψηλού επιπέδου θα διαρκεί περισσότερο από εκείνη του χαμηλού, τα άτομα χαμηλού επιπέδου θα επιστρέφουν από τις Διεργασίες-Εργάτες στον έλεγχο της Κεντρικής Διεργασίας σε μικρότερο χρόνο. Επειδή, λοιπόν, ο αλγόριθμος δεν

«περιμένει» την ολοκλήρωση των αξιολογήσεων όλων των υποψηφίων λύσεων πριν από την επόμενη ανανέωση του συνόλου των απογόνων, γίνεται κατανοητή η μείωση του ποσοστού των αξιολογήσεων υψηλού επιπέδου.

Από την άλλη πλευρά, αναμένεται η επίτευξη ικανοποιητικής βέλτιστης λύσης σε περισσότερες ανανεώσεις του συνόλου των απογόνων (*αύξηση του υπολογιστικού κόστους*). Το γεγονός αυτό εξηγείται, αν ληφθεί υπόψη ότι οι βέλτιστες λύσεις κάθε φορά προκύπτουν μόνο από υψηλού επιπέδου αξιολογήσεις.

Με βάση τα παραπάνω, θεωρείται πως η αξιολόγηση του αλγορίθμου που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας, με χρήση της ιεραρχικής αξιολόγησης αλλά και παραμετροποίησης, δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα.

Αισθητή διαφορά υπολογιστικού κόστους μεταξύ των δύο επιπέδων θα υπάρξει αν χρησιμοποιηθεί ως λογισμικό υψηλού επιπέδου η επίλυση της ροής γύρω από το αεροδυναμικό σώμα με τις εξισώσεις Navier-Stokes, και ως λογισμικό χαμηλού επιπέδου η ολοκληρωματική μέθοδος υπολογισμού οριακών στρωμάτων. Η εφαρμογή του νέου αλγορίθμου με τις προϋποθέσεις αυτές, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί στα πλαίσια μελλοντικής έρευνας, για την περαιτέρω αξιολόγησή του. Σκόπιμη θα ήταν η δοκιμή της νέας μεθόδου σε περισσότερο χρονοβόρα προβλήματα καθώς και η δοκιμή της με χρήση άλλου τρόπου ιεραρχίας, εκτός της ιεραρχίας ως προς την αξιολόγηση και ως προς την παραμετροποίηση, που χρησιμοποιείται εδώ. Επιπλέον, θα μπορούσε, μελλοντικά, να μετεξελιχθεί ο αλγόριθμος και να συνδυαστεί με τους εξελικτικούς αλγορίθμους που υποστηρίζονται από τη χρήση μεταπροτύπων ή και να μετασχηματιστεί έτσι ώστε να προσφέρει μεγαλύτερο κέρδος σε προβλήματα πολλών στόχων. Αρκετά ενδιαφέροντα είναι η μετεξέλιξη του ημι-ασύγχρονου χαρακτήρα των αλγορίθμων, οι οποίοι εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική εργασία, σε πραγματικά ασύγχρονο με την κατάργηση, ενδεχομένως, της λίστας αξιολόγησης των ατόμων του πληθυσμού. Κάτι τέτοιο ήδη βρίσκεται υπό εξέλιξη στο Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών του ΕΜΠ.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Giannakoglou K.C. and Karakassis M.K. *“Hierarchcal and Distributed Metamodel-Assised Evolutionary Algorithms”*, National Technical University of Athens, March 2006.
2. Herrera F. and Lozano M. and Moraga C. *“Hierarchical Distributed Genetic Algorithms”*, University of Dortmund.
3. Edwin D. de Jong Dirk Thierens and Richard A. Watson. *“Hierarchical Genetic Algorithms”*.
4. Charles Darwin. *“The Origin of Species by means of Natural Selection”*. Murray, London, 1859.
5. Goldberg D.E. *“Genetic Algorithms in search, optimization & machine learning”*. Addison-Wesley, 1989.
6. Michalewicz Z. *“Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”*. Springer- Verlag, Berlin Heidelberg, 1994.
7. Back T. and Hammel U. and Schutz M. and Schwefel H.-P. and Sparve J. *“Applications of Evolutionary Algorithms at the Center for Applier System Analysis”*. ECCOMAS 96, John Willey & Sons, 1996.
8. Back T. *“Evolutionary Algorithms in Theory and Practice. Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms”*. Oxford University Press.
9. Schwefel H.-P. *“Evolution and Optimum Seeking”*. John Willey & Sons, 1994.
10. Koza J. *“Genetic Programming: On the Programming of Computers by means of Natural Selection”*. MIT Press, 1992.
11. Koza J. *“Genetic Programming II: Automatic Discovery Reusable Programs”*. MIT Press, 1994.

12. Fogel L.J. , Owens A.J. , Walsh M.J. **“Artificial Intelligence Through Simulated Evolution”**. John Willey & Sons, New York, 1966.
13. Back T. An **“Overview of Parameter Control Methods by Self-Adaptation in Evolutionary Algorithms”**. Fundamenta Informaticae, 35:51-66, 1998.
14. Davis L. **“Handbook of Genetic Algorithms”**, Van Nostrand Reinhold, 1991.
15. Srinivas N., Deb K. **“Multiobjective optimization using non dominated sorting in genetic algorithms”**. Evolutionary Computation, 1994.
16. Deb K. and Agarwal S. and Pratap, A. and Meyarivan T. **“A Fast Elitist Non Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization: NSGA II”**, 2000.
17. Deb K, Zope P., Jain A. **“Distributed Computing of Pareto-Optimal Solutions Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms”**. Indian Institute of Technology.
18. Zitzler E., Loumanns M., Thiele L. **“SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm”**. Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, May 2001.
19. Alba E. and Tomassini M. **“Parallelism and Evolutionary Algorithms”**. October 2002.
20. Κλωνάρης Ι.Μ. **“Δομημένος Εξελικτικός Αλγόριθμος”**. Διπλωματική Εργασία. Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών ΕΜΠ, Σεπτέμβριος 2006.
21. Geist A. and Beguelin A. and Dongarra J. and Jiang W. Manchek R. and Sunderam V. **“PVM: Parallel Virtual Machine. A User’s Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing”**. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1994.
22. **“MPI: A Message-Passing Interface Standard”**. University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, 1997.

23. Γιαννάκογλου Κ.Χ. **“Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική”**. Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών, ΕΜΠ, 2005
24. Karakasis M.K. and Giannakoglou K.C. **“On the Use of Metamodel-Assisted Multi-Objective Evolutionary Algorithms”**, Engineering Optimization, Vol. 38(8), pp. 941-957, 2006
25. Papadimitriou D.I. and Kampolis I.C. and Giannakoglou K.C. **“Stochastic and Deterministic Optimization in Turbomachinery Applications based on the Adjoint Formulation”**. ERCOFTAC Design Optimization: Methods & Applications, Athens, Greece, March 31-April 2, 2004.
26. Drela M. and Giles M.B. Viscous – **“Inviscid Analysis of Transonic and Low Reynolds Number Airfoils”**. AIAA Journal, 25 (10): 1347-1355, 1987.