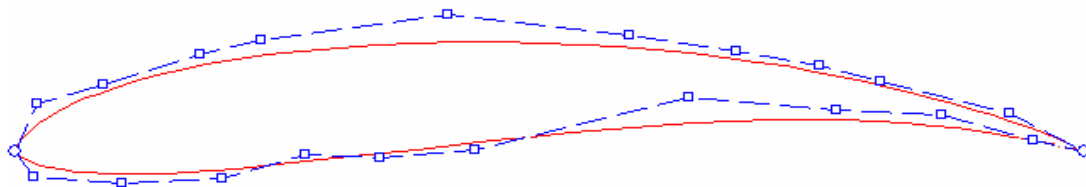


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



**ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ**

**Υπολογιστικό θέμα:** Σχεδίαση Αεροτομής Βέλτιστου Πτερυγίου Συμπιεστή  
με Χρήση Εξελικτικού Αλγορίθμου  
και της Θεωρίας Nash



Χρήστου Γεώργιος

**Επιβλέπων:** Κ.Χ. Γιαννάκογλου

2004-2005

## Διαδικασία-Προετοιμασία

Στο πρώτο μέρος αυτής της αναφοράς θα γίνει λόγος για όλα τα διαδικαστικά θέματα αυτής της εργασίας, ο τρόπος παραμετροποίησης, επιβολής των ποινών και θα παρουσιαστεί η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης του περυγίου συμπίεστη.

## Σκοπός-Προγράμματα

Ο σκοπός αυτού του θέματος είναι η εύρεση νέας, βελτιωμένης αεροτομής περυγίου συμπίεστη θεωρούμενη ως στοιχείο γραμμικής περυγώσης, ως προς την απώλεια ολικής πίεσης και τη γωνία στροφής, λαμβάνοντας ως αεροτομή αναφοράς μια τυποποιημένη αεροτομή περυγίου συμπίεστη, πάνω στην οποία είχαν πραγματοποιηθεί πειράματα από τον Shreeve [1]. Η νέα αυτή αεροτομή θα παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά σε δύο σημεία λειτουργίας, συγκεκριμένα σε δύο τιμές της γωνίας  $\alpha_1$ , η πρώτη εκ των οποίων γωνία αντιστοιχεί στο σημείο σχεδίασης (design point) ενώ η δεύτερη σε λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης (off-design point). Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν περισσότερα στοιχεία για τις γωνίες ροής ως προς τις οποίες πραγματοποιήθηκε η διαδικασία βελτιστοποίησης.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίστηκε σε δύο επιμέρους τμήματα. Το πρώτο τμήμα της οποίας ήταν το μέρος της βελτιστοποίησης. Το τμήμα αυτό αποτελούνταν από μία παραλλαγή ενός προϋπάρχοντος κώδικα βελτιστοποίησης, με τις κατάλληλες τροποποιήσεις για να συμπεριλάβει και τις επιπλέον απαιτήσεις της θεωρίας Nash. Περισσότερα για τη μέθοδο αυτή θα παρατεθούν στη συνέχεια. Το δεύτερο τμήμα αποτελούσε έναν κώδικα επίλυσης της ροής (evaluator). Χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MISES έκδοση 2.53 [2], ο οποίος είναι κώδικας ολοκληρωματικής επίλυσης οριακών στρωμάτων.

## Στοιχεία Γεωμετρίας και Ροής

Τα γεωμετρικά στοιχεία της γραμμικής περυγώσης είναι τα κάτωθι:

- Χορδή  $c = 12,73 \text{ cm}$
- Βήμα γραμμικής περυγώσης  $7.72 \text{ cm}$
- Stagger angle  $14,4^\circ$
- $AVDR=1/1.025$  (Axial Velocity-Density Ratio  $(\rho V_{ax})_{in} / (\rho V_{ax})_{out}$  )

Τα στοιχεία της ροής που μας ενδιαφέρουν παρουσιάζονται παρακάτω:

- $M_1=0,25$  (Mach εισόδου)
- Αριθμός Reynolds με βάση τη χορδή  $Re_c=700.000$
- Επίπεδο τύρβης στη ροή εισόδου  $Tu=1,5 \%$

- $a_1=40^\circ$  για το πρώτο σημείο λειτουργίας (σημείο σχεδίασης) και  $a_1=46^\circ$  για το δεύτερο σημείο λειτουργίας (λειτουργία σε σημείο εκτός σχεδίασης)

## Θεωρία Nash

Ο Nash (1928- ) εκτός του ότι υπήρξε μαθηματικός, ασχολήθηκε και με τη θεωρία των παιγνίων και την εφαρμογή τους στον τομέα των οικονομικών. Το γνωστότερό του επίτευγμα ήταν η εισαγωγή της έννοιας της ισορροπίας Nash (**Nash equilibrium**) στον τομέα αυτό [4]. Ο όρος αυτός αναφέρεται κυρίως σε παίγνια όπου οι εμπλεκόμενοι παίκτες (players) δε συνεργάζονται μεταξύ τους (non-cooperative game). Οι παίκτες, λέμε ότι βρίσκονται σε ισορροπία Nash, όταν με δεδομένη την επιλογή ενός παίκτη, οι υπόλοιποι δεν μπορούν να αλλάξουν την επιλογή τους επιφέροντας παράλληλα καλύτερα αποτελέσματα για τον εαυτό τους. Στην περίπτωση που αλλάζοντας την επιλογή τους, επιφέρουν μονάχα χειρότερα αποτελέσματα απ'ότι προηγουμένως, τότε ορίζεται η περίπτωση της αυστηρής ισορροπίας Nash.

Για την καλύτερη κατανόηση της παραπάνω έννοιας θα ακολουθήσει ένα παράδειγμα, συγκεκριμένα παρατίθεται το κλασικό παράδειγμα με τους δύο φυλακισμένους (γνωστό στη βιβλιογραφία με τον όρο Prisoner's Dilemma ) [5].

Το παράδειγμα αυτό αναφέρεται σε δύο φυλακισμένους οι οποίοι έχουν συλληφθεί από την αστυνομία κατηγορούμενοι για μία ληστεία. Δυστυχώς όμως η αστυνομία δεν έχει αρκετά στοιχεία για να τους φυλακίσει και τους δύο για το αδίκημα αυτό χωρίς την πιθανή ομολογία ενός. Έτσι, δίνεται η ευκαιρία σε καθένα φυλακισμένο είτε να ομολογήσει είτε όχι. Υπενθυμίζεται πως οι δύο κατηγορούμενοι δεν έχουν το δικαίωμα της συνεργασίας. Στην περίπτωση που κανείς δεν ομολογήσει, πάνε και οι δύο φυλακή για ένα χρόνο. Από την άλλη εάν και οι δύο ομολογήσουν πηγαίνουν φυλακή για 10 χρόνια έκαστος. Τέλος στην περίπτωση που ομολογήσει ο ένας από τους δύο, τότε αφήνεται ελεύθερος και ο άλλος παίρνει 20 χρόνια. Στη συνέχεια παρατίθεται ο σχετικός πίνακας με τις προσδοκόμενες αμοιβές (pay-off table).

		Παίκτης 1	
		confess	don't
Παίκτης 2	confess	10,10	0,20
	don't	20,0	1,1

Βλέπουμε ότι παρόλο που ο κάθε παίκτης έχει μία κυρίαρχη στρατηγική για αυτόν (Dominant Strategy), να ομολογήσει και φύγει ελεύθερος, το κοινό τους συμφέρον θα ήταν να μην ομολογήσουν και οι δύο, περνώντας 1 χρόνο στη φυλακή. Όμως οι δύο παίκτες βρίσκονται σε ισορροπία Nash μονάχα στην περίπτωση που και οι δύο ομολογήσουν και πάρει ο καθένας 10 χρόνια. Αυτό ισχύει γιατί με δεδομένο το ότι ο ένας σίγουρα θα ομολογήσει (δεν αλλάζει η επιλογή ενός), ο άλλος εάν μεταβάλλει τη στρατηγική του, αντί για 10 χρόνια θα πάρει 20.

Πάνω σε αυτήν την ιδέα της ισορροπίας θα βασιστεί και η κύρια ιδέα του τρέχοντος θέματος. Η ιδέα αυτή θα βασιστεί ουσιαστικά στην κατάτμηση της υπονήφιας αεροτομής-λύσης, στην εν συνεχεία τμηματική βελτιστοποίηση ως προς διαφορετικούς στόχους και στην τελική επανασύνθεση και αξιολόγηση της τελικής αεροτομής ως προς όλους τους στόχους. Παρόλο που θα επικοινωνούν μεταξύ τους οι παίκτες ανά ορισμένες γενές (όχι αμιγώς non cooperative), πρακτικά θα συντελείται βελτιστοποίηση έχοντας γνωστή την επιλογή του άλλου παίκτη (το άλλο μισό της αεροτομής). Στόχος είναι η επίτευξη μιας ισορροπίας Nash, όπου δηλ. ο ένας παίκτης δε θα μπορεί να βελτιωθεί άλλο, με σταθερή την επιλογή του άλλου.

Όμως αν αναφερθούμε με περισσότερη λεπτομέρεια στη διαδικασία που ακολουθήθηκε στο θέμα αυτό. Αρχίζοντας από μία αρχική αεροτομή, στην περίπτωση μας αεροτομή αναφοράς ήταν αυτή του Shreeve [1] σε  $0^\circ$  γωνία κλίσης, αναθέτουμε σε δύο παίκτες τις παραμέτρους που ελέγχουν την αεροτομή (συντεταγμένες των σημείων ελέγχου, ακτίνα καμπυλότητας και κλίση της μέσης γραμμής της ακμής προσβολής και εκφυγής). Ο τρόπος χωρισμού και ανάθεσης των παραμέτρων αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης αυτής της εργασίας. Στη συνέχεια όμως, και για εποπτικούς λόγους, αν θεωρήσουμε ότι αναθέτουμε στον πρώτο παίκτη τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων που ελέγχουν το πάνω μισό της αεροτομής και στο δεύτερο τις παραμέτρους του κάτω τμήματος. Ο πρώτος παίκτης βελτιστοποιεί το πάνω τμήμα ως προς έναν στόχο (π.χ. ελαχιστοποίηση απωλειών ολικής πίεσης για  $\alpha_1=40^\circ$ ) ενώ ο δεύτερος το κάτω τμήμα ως προς τον άλλο στόχο (για  $\alpha_1=46^\circ$ ) διατηρώντας παράλληλα όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους **σταθερές** καθ' όλη τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Μετά από έναν αριθμό γενεών, το οποίο είναι και αυτό αντικείμενο διερεύνησης, οι δύο παίκτες δίνουν ο ένας στον άλλον την καλύτερη του λύση, μ' αποτέλεσμα π.χ. ο παίκτης 1 να λαμβάνει τη βέλτιστη λύση για το κάτω μισό από το παίκτη 2 αλλά να του δίνει παράλληλα και τη βέλτιστη άνω αεροτομή. Η διαδικασία αυτή συνεχίζει μέχρι την ικανοποίηση κάποιου κριτηρίου τερματισμού

## Παραμετροποίηση

Σημαντικότερο βήμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης ήταν και το είδος της παραμετροποίησης που χρησιμοποιείται. Η γεωμετρική παραμετροποίηση της αεροτομής πραγματοποιήθηκε με πολώνυμα Bezier και σε  $0^\circ$  γωνία κλίσης. Αρχικά θεωρήθηκε πως κρατώντας σταθερά τις ακτίνες καμπυλότητας και την κλίση της μέσης γραμμής σε ακμή προσβολής και εκφυγής και έχοντας 9 εσωτερικά σημεία ελέγχου στο πάνω και κάτω τμήμα της αεροτομής θα πετυχαίναμε καλή ακρίβεια. Όμως μετά από μερικές δοκιμές αποφασίστηκε να ελευθερωθούν οι ακτίνες καμπυλότητας και η κλίση και να προστεθεί και άλλο ένα σημείο ελέγχου και στις δύο πλευρές της αεροτομής, ανεβάζοντας το συνολικό αριθμό στα 10 εσωτερικά σημεία σε κάθε πλευρά. Σκόπιμο θεωρείται να ειπωθεί σε αυτό το σημείο πως το δεύτερο και προτελευταίο σημείο ελέγχου προκύπτουν από τη γνώση της ακτίνας καμπυλότητας και της κλίσης της μέσης γραμμής, έτσι απλά χρειάστηκε ο καθορισμός των ορίων των 8 εσωτερικών σημείων κάθε φορά. Τα στοιχεία που αναφέρονται στην παραμετροποίηση της αεροτομής εισάγονταν στον κώδικα μέσω του αρχείου dataeas.dat. Όσον αφορά τον αριθμό των bits που ανατέθηκαν σε κάθε παράμετρο σχεδίασης, θεωρήθηκε πως για τις ακτίνες καμπυλότητας και για τις τεταγμένες των σημείων ελέγχων αρκετά θα ήταν 6 ενώ για την κλίση της μέσης γραμμής και τις τεταγμένες αφιερώθηκαν 8 bits. Τυπικό παράδειγμα του dataeas.dat φαίνεται παρακάτω. Απ' ότι θα δούμε και παρακάτω βλέπουμε ότι θα χρησιμοποιήσουμε 48

σχεδιαστικές παραμέτρους εκ των οποίων συνολικά **36** θα είναι **μη δεσμευμένοι βαθμοί ελευθερίας**, δηλ. μόνο 12 μεταβλητές παραμένουν παγωμένες.

```

48      ! number of parameters
***    kdig  bound1  bound2
      0      0.00   0.000          x_LE
      0      0.00   0.000          y_LE
      6      0.0056862 0.011  1      R_LE
      8      15.00   35.00  1      Phi_LE
      0      1.00   1.000          x_TE
      0      0.00   0.000          y_TE
      6      0.0079058 0.012  2      R_TE
      8      130.00  180.00  2      Phi_TE
      0      8      8
      6      0.050   0.090   1      x3_PS
      8      -0.010  0.035   1      y3_PS
      6      0.085   0.155   1      x4_PS
      8      0.008   0.050   1      y4_PS
      6      0.130   0.215   1      x5_PS
      8      0.020   0.100   1      y5_PS
      6      0.180   0.260   1      x6_PS
      8      0.040   0.120   1      y6_PS
      6      0.350   0.470   2      x7_PS
      8      0.070   0.120   2      y7_PS
      6      0.570   0.670   2      x8_PS
      8      0.045   0.100   2      y8_PS
      6      0.710   0.790   2      x9_PS
      8      0.030   0.075   2      y9_PS
      6      0.800   0.870   2      x10_PS
      8      0.030   0.075   2      y10_PS
      0      8      8
      6      0.055   0.090   1      x3_SS
      8      0.055   0.110   1      y3_SS
      6      0.150   0.220   1      x4_SS
      8      0.065   0.110   1      y4_SS
      6      0.220   0.320   1      x5_SS
      8      0.120   0.190   1      y5_SS
      6      0.300   0.400   1      x6_SS
      8      0.145   0.195   1      y6_SS
      6      0.450   0.550   2      x7_SS
      8      0.120   0.170   2      y7_SS
      6      0.600   0.700   2      x8_SS
      8      0.060   0.110   2      y8_SS
      6      0.730   0.800   2      x9_SS
      8      0.070   0.110   2      y9_SS
      6      0.790   0.860   2      x10_SS
      8      0.070   0.110   2      y10_SS
      0      61     61
      0      61     61
      0      41     41

```

```
0    41    41
0    101   101
0    101   101
```

Σημείωση: Η τέταρτη στήλη του dataeas.dat αναθέτει την εκάστοτε παράμετρο σχεδίασης σε κάποιον παίκτη.

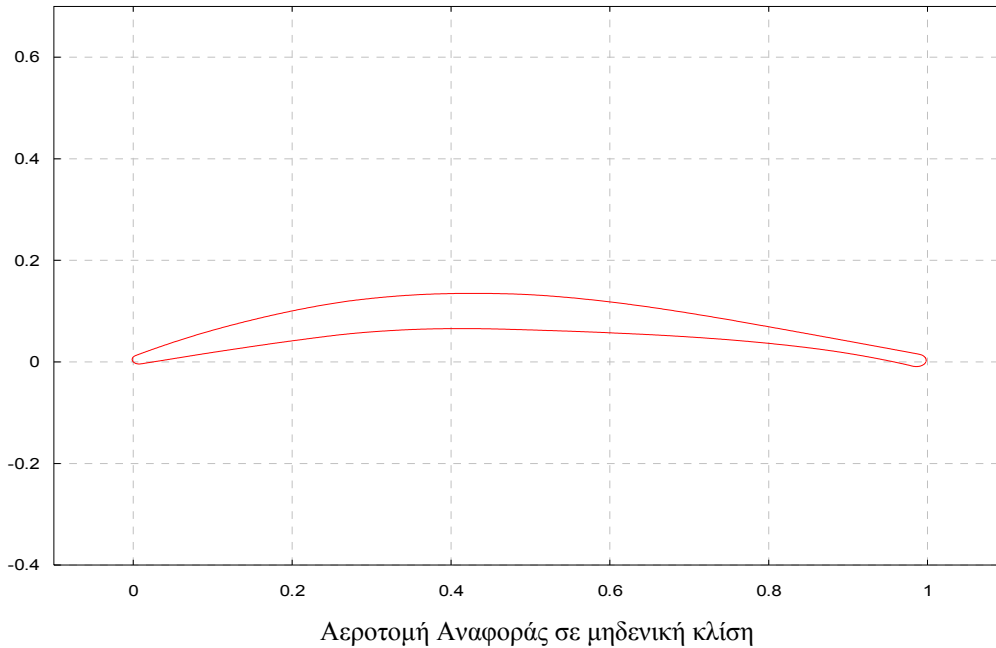
Εκτός από τη γεωμετρική παραμετροποίηση της αεροτομής, έπρεπε να καθοριστούν και οι παράμετροι του εξελικτικού αλγορίθμου. Αυτοί εισάγονταν στη διαδικασία μέσω του αρχείου eaparam.dat. Σε αυτήν αναγράφονται τα στοιχεία που φαίνονται παρακάτω:

```
25          ! population size  PARENTS
40          ! population size  OFFSPRING
0.95       ! crossover probability
0.035  10   ! mutation probability (start)
0.015  35   ! mutation probability (end)
4          ! selection mode for the mating pool
10000     ! when and how to stop
0         ! <0> Normal, <1> Gray or <-1> Real Coding
-10       ! Log10{stopping criterion}
1000     ! Maximum Generations
4000     ! Maximum Evaluations
5168     ! Random Seeding
1        ! Number of Objectives
10       ! Save every XXX generations (-ve: saves only
final!)
```

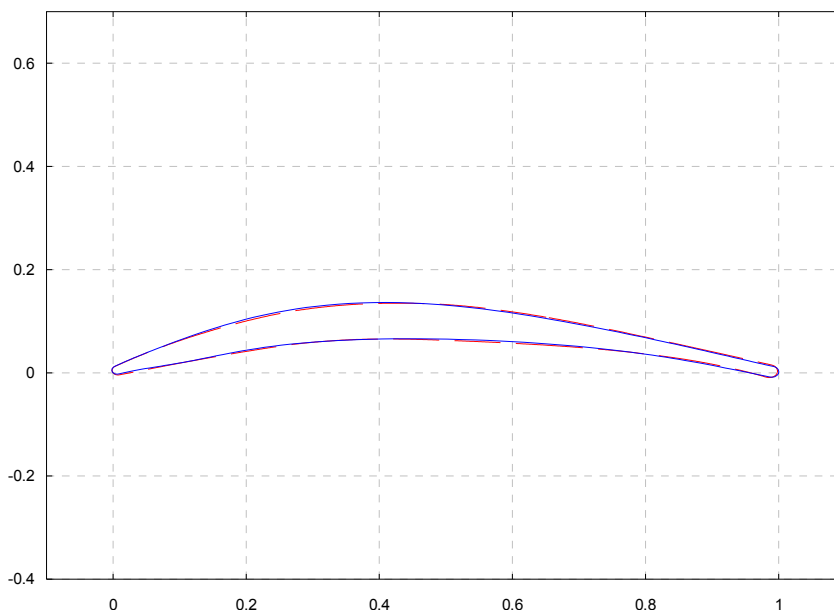
Χαρακτηριστική μορφή του eaparam.dat

## **Αεροτομή Αναφοράς**

Η αεροτομή αναφοράς καθ'όλη την εργασία αυτή ήταν η αεροτομή πάνω στην οποία πειραματίστηκε ο Shreeve [1].



Θεωρήθηκε σκόπιμο να προσεγγιστεί η αεροτομή αυτή, έτσι ώστε με βάση τις συντεταγμένες των σημείων ελέγχου της να ορίζονταν τα όρια διακύμανσης μέσα στα οποία θα κινούνταν οι παράμετροι κατά τη διαδικασία της κυρίου βελτιστοποίησης. Για το λόγο αυτό με τη βοήθεια ενός απλούστερου (κλασικού) κώδικα βελτιστοποίησης και χρησιμοποιώντας αντικειμενική συνάρτηση της μορφής:  $F_{obj} = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ , όπου  $y_i$  είναι η τεταγμένη του σημείου  $i$  της αεροτομής-προσέγγισης και  $\hat{y}_i$  η αντίστοιχη τεταγμένη της αεροτομής αναφοράς. Παρόλο που έγινε προσπάθεια για την όσο δυνατόν ελαχιστοποίηση αυτής της αντικειμενικής συνάρτησης, δε πραγματοποιήθηκε συστηματική βελτιστοποίηση μιας και η χρήση των σημείων ελέγχου θα βοηθούσαν απλά στον καθορισμό των ορίων. Έτσι μετά από την προαναφερθείσα διαδικασία καταλήξαμε στην παρακάτω αεροτομή με μπλε χρώμα ( η κόκκινη διακεκομμένη καμπύλη είναι η αναφοράς) με τις αντίστοιχες παραμέτρους σχεδίασης.



Με βάση λοιπόν τις τιμές σχεδίασης που υπολογίστηκαν δημιουργήθηκε το πρώτο dataeas.dat το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Μετά την πρώτη φορά τρεξίματος του αλγορίθμου προσαρμόστηκαν και πάλι τα όρια με βάση τις τελικές τιμές των παραμέτρων για επίτευξη καλύτερης ακρίβειας. Όμως χάρη σε αυτήν την αρχική γεωμετρική απλά βελτιστοποίηση, καθορίστηκαν τα πρώτα όρια.

## Περιορισμοί

Μιας και ο σκοπός αυτού του θέματος είναι η βελτιστοποίηση της αεροτομής ως προς την πτώση ολικής πίεσης στα δύο υπό μελέτη σημεία λειτουργίας, ο κορμός της υπ' όψη αντικειμενικής συνάρτησης είναι ο συντελεστής απωλειών  $\omega$ . Στη συνέχεια πρέπει να ενσωματωθούν στην αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί. Κατ' αρχήν αφού γίνεται βελτιστοποίηση και ως προς τη γωνία στροφής της ροής ( $\alpha_1$ - $\alpha_2$ ), το πόσο κοντά βρίσκεται η υποψήφια αεροτομή στην ελάχιστη τιμή της γωνίας στροφής θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη στην αντικειμενική συνάρτηση. Όμως εκτός από αεροδυναμικούς περιορισμούς πρέπει να υπάρχουν και κατασκευαστικοί περιορισμοί, οι οποίοι αναφέρονται στο πάχος της αεροτομής σε διάφορες θέσεις ως προς τη χορδή της. Ένας εξελκτικός αλγόριθμος συνήθως τείνει να κατευθύνεται προς την επίτευξη λεπτών αεροτομών με μικρές απώλειες και μεγάλη στροφή, για αυτό και είναι απαραίτητοι αυτοί οι περιορισμοί πάχους, για την απόρριψη τέτοιων υποψηφίων αεροτομών.

Όλοι οι περιορισμοί αυτοί είχαν τη μορφή ενός συντελεστή που πολλαζόταν με τις απώλειες για τη δημιουργία της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο συντελεστής αυτός είχε τη μορφή αύξουσας εκθετικής συνάρτησης:

$$penalty = e^{(a(x_{max}-x))}$$

όπου  $x_{max}$ : μέγιστη τιμή που δέχεται ποινή  
 $x_{min}$ : ελάχιστη τιμή που δέχεται ποινή  
 $a$ : συντελεστής που καθορίζει τη μέγιστη ποινή.

Για την επίτευξη μέγιστης ποινής π.χ.  $c$ , η τιμή του  $a$  θα παίρνει τιμή:  $a = \frac{\ln c}{x_{max} - x_{min}}$

Συγκεκριμένα για την περίπτωση των περιορισμών της γωνίας στροφής χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω περιορισμοί για τα δύο σημεία λειτουργίας:

	$\alpha_1=40^\circ$	$\alpha_1=46^\circ$
<b>ελάχιστη στροφή</b>	33	39
<b>μέγιστη στροφή</b>	39	45

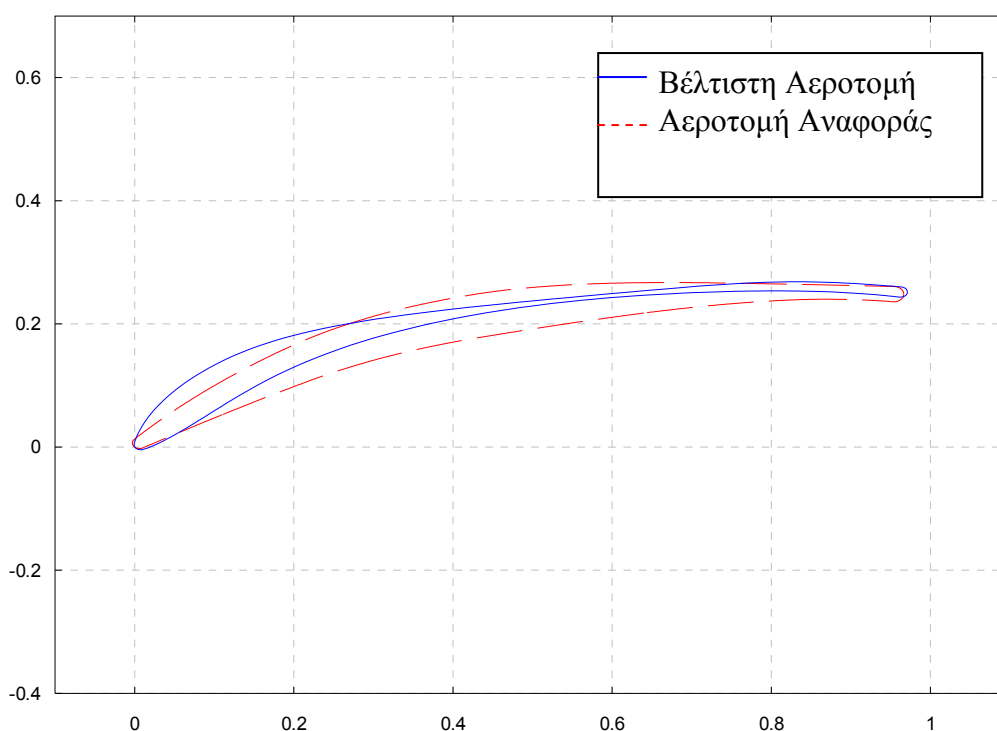
Περιορισμοί γωνίας στροφής

Σημειώνεται πως οι ποινές αυτές παρουσιάζονται στα αρχεία spen#.jtb, όπου # = 2 για  $\alpha = 40^\circ$  και # = 1 για  $\alpha = 46^\circ$ . Επίσης σε αυτό το αρχείο βρίσκεται και μια Τρίτη στήλη όπου αναγράφεται η μέγιστη τιμή του συντελεστή αμέσως πριν την απόρριψη της λύσης, δηλ. πριν την ελάχιστη γωνία. Και για τις δύο περιπτώσεις η μέγιστη τιμή είναι 1.5. Για γωνίες



στροφής μικρότερες της ελάχιστης απορρίπτεται η λύση, για ενδιάμεσες επιβάλλεται η ποινή ενώ για μεγαλύτερες από τη μέγιστη δεν επιβάλλεται ποινή. Επιλέχθηκαν αυτές οι συγκεκριμένες τιμές των ποινών μιας και κρίθηκαν οι πιο κατάλληλες για τις ανάγκες αυτής της εργασίας και μετά από κατάλληλη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια άλλης εργασίας [3]. Οι τιμές αυτές αποτέλεσαν μια μέση λύση ποινών, οι οποίες παρόλο που επιφέρουν σαφή βελτίωση των επιδόσεων, δεν είναι παράλληλα και τόσο αυστηρές έτσι ώστε να επιβάλλονται με συχνό ρυθμό και να επιβαρύνεται υπέρμετρα η διαδικασία.

Όσον αφορά τους κατασκευαστικούς περιορισμούς, αρχικά τοποθετήθηκαν περιορισμοί για το μέγιστο πάχος και επιπλέον επιλέχθηκαν ορισμένα σημεία στην αρχή και στο τέλος του πτερυγίου όπου έγιναν και εκεί έλεγχοι πάχους. Όμως σε μερικές περιπτώσεις (κατά την ανάθεση στους παίχτες ολόκληρη την πάνω και κάτω αεροτομή) προέκυψαν πτερύγια με την παρακάτω μορφή (μπλέ περίγραμμα):



Τα πτερύγια αυτά παρουσίαζαν πρόβλημα και στο κέντρο. Για αυτό το λόγο και αποφασίστηκε και η επιβολή περιορισμών και σε ορισμένα σημεία κοντά στο κέντρο. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν έλεγχοι σε 8 σημεία κατά το μήκος του πτερυγίου (περίπου ανά 12% κάθε φορά του πτερυγίου) και ορίστηκε ως κάτω όριο το 60% του αρχικού πάχους του πτερυγίου και ως άνω το 85%.

Με αυτούς τους περιορισμούς τα πτερύγια που υπολογίστηκαν είχαν να μεν χειρότερες απώλειες πίεσης, απ'ότι εάν ελέγχονταν μόνο το πάχος τους στο μπροστινό και πίσω τμήμα, αλλά παρουσιάζονταν σαφέστατα και πιο ανθεκτικά.

## Αποτελέσματα-Ανάλυση

Στο δεύτερο τμήμα της αναφοράς αυτής θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Θα παρουσιαστούν κατάλληλα περιγράμματα πτερυγίων και διαγράμματα που να φανερώνουν τις βελτιωμένες ιδιότητες ως προς τις αντίστοιχες του πτερυγίου αναφοράς. Πραγματοποιήθηκαν δύο παραμετρικές μελέτες. Η πρώτη διερεύνησε την κατάτμηση του πτερυγίου και τον τρόπο ανάθεσης των παραμέτρων σχεδίασης στους δύο παίκτες, ενώ η δεύτερη ασχολήθηκε με τη συχνότητα επικοινωνίας και ανταλλαγής των βέλτιστων λύσεων των παικτών μεταξύ τους.

## Ανάθεση Παραμέτρων Σχεδίασης

Κατά τη διερεύνηση αυτή δοκιμάστηκαν 3 εναλλακτικοί τρόποι κατάτμησης και ανάθεσης σε 2 παίκτες των συνολικών 36 ελεύθερων σχεδιαστικών παραμέτρων. Οι τρεις τρόποι παρουσιάζονται στη συνέχεια, ενώ στο τέλος θα παρασταθούν όλοι μαζί σε ένα διάγραμμα για να φανούν οι διαφορές τους. Όμως πριν παρουσιαστούν οι 3 αυτές μέθοδοι, θα παρουσιαστούν οι επιδόσεις της αεροτομής αναφοράς ως προς την οποία θα γίνουν όλες οι συγκρίσεις. Σημειώνεται πως κατά τη διάρκεια αυτής της διερεύνησης οι παίκτες αντάλλαξαν τις πληροφορίες τους κάθε 8 γενεές.

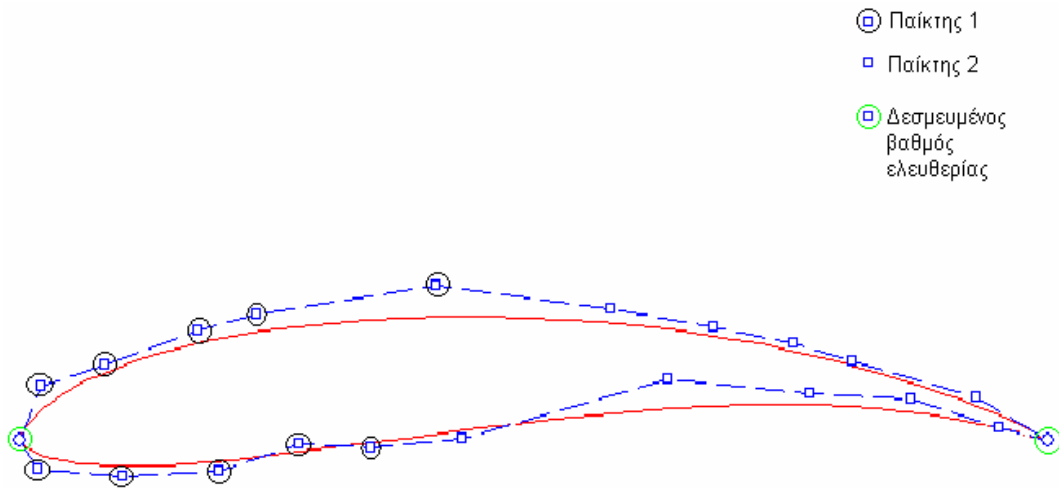
## Αεροτομή Αναφοράς

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν σε μορφή πίνακα ο συντελεστής απωλειών  $\omega$  για την αεροτομή αναφοράς στα δύο σημεία λειτουργίας όπως και η επιτυγχόμενη γωνία στροφής.

	$\alpha_1=40^\circ$	$\alpha_1=46^\circ$
$\omega$	21.2‰	25.5‰
$\alpha_1-\alpha_2$	36.0°	42.3°

## Παίκτης 1: Μπροστινό Τμήμα / Παίκτης 2: Πίσω Τμήμα

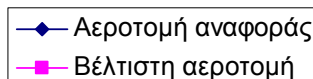
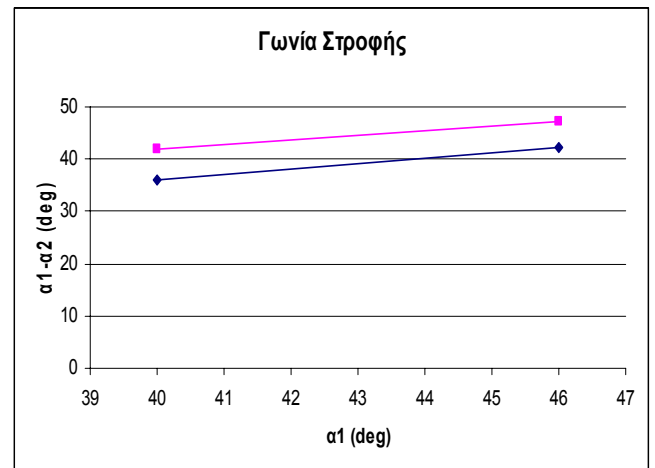
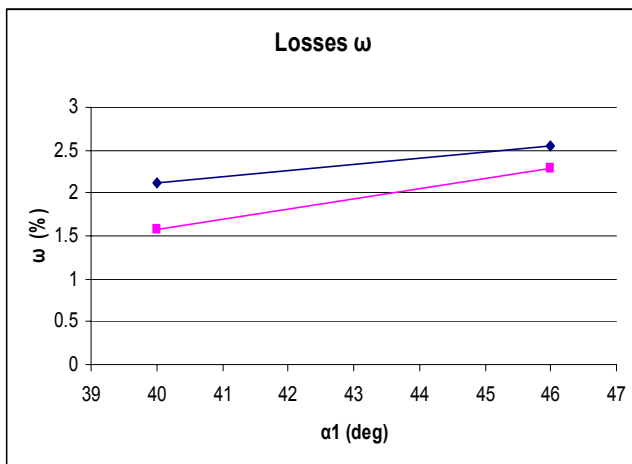
Σε αυτήν την περίπτωση ανατέθηκαν στον πρώτο παίκτη όλες οι σχεδιαστικές παράμετροι μέχρι και το έκτο σημείο ελέγχου συνολικά της αεροτομής, για την πλευρά υπερπίεσης και υποπίεσης (δηλ. ακτίνα καμπυλότητας και κλίση μέσης γραμμής για την ακμή προσβολής και τις συντεταγμένες 4 εσωτερικών σημείων πάνω και κάτω). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται άμεσα η παραπάνω ανάθεση.



Στη συνέχεια φαίνονται υπό μορφή πίνακα οι επιδόσεις αυτής της αεροτομής, μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης:

	$\alpha_1=40^\circ$	$\alpha_1=46^\circ$
$\omega$	15.8‰	22.9‰
$\alpha_1-\alpha_2$	41.8°	47.1°

Σε σχέση με την αεροτομή αναφοράς παίρνουμε τους παρακάτω πίνακες.



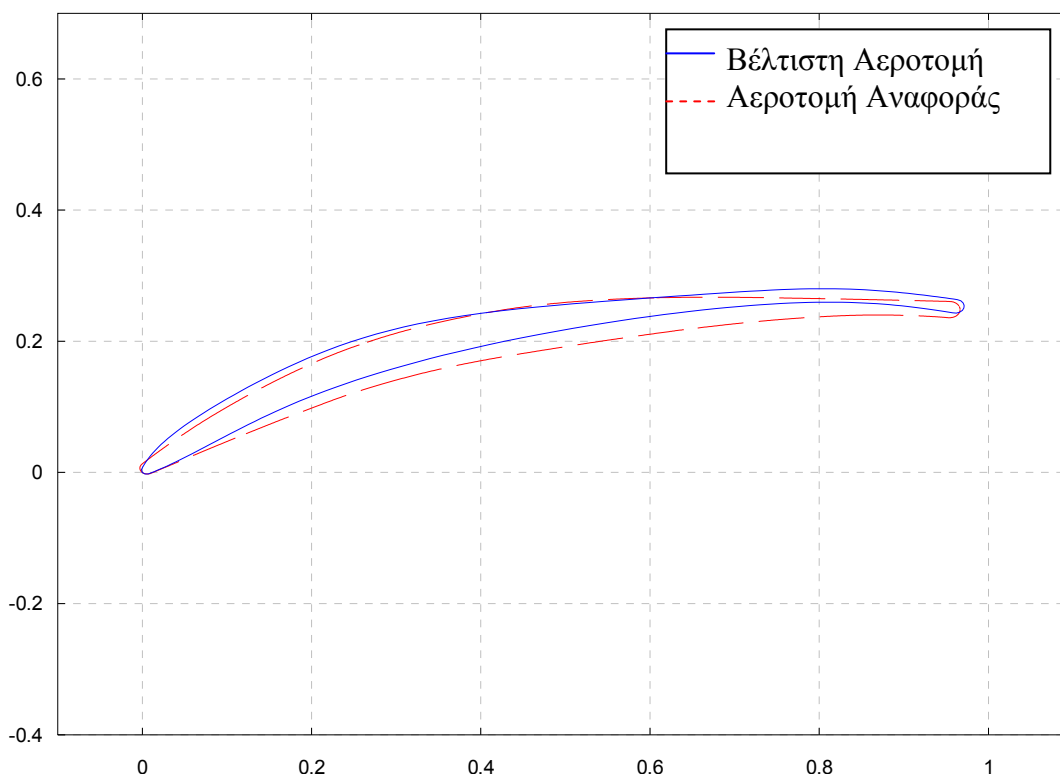
Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ( απώλειες με τις ποινές):

$$F_1 = 1.600 \cdot 10^{-2} \quad (\text{ως προς σημείο σχεδίασης})$$

$$F_2 = 2.311 \cdot 10^{-2} \quad (\text{λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης})$$

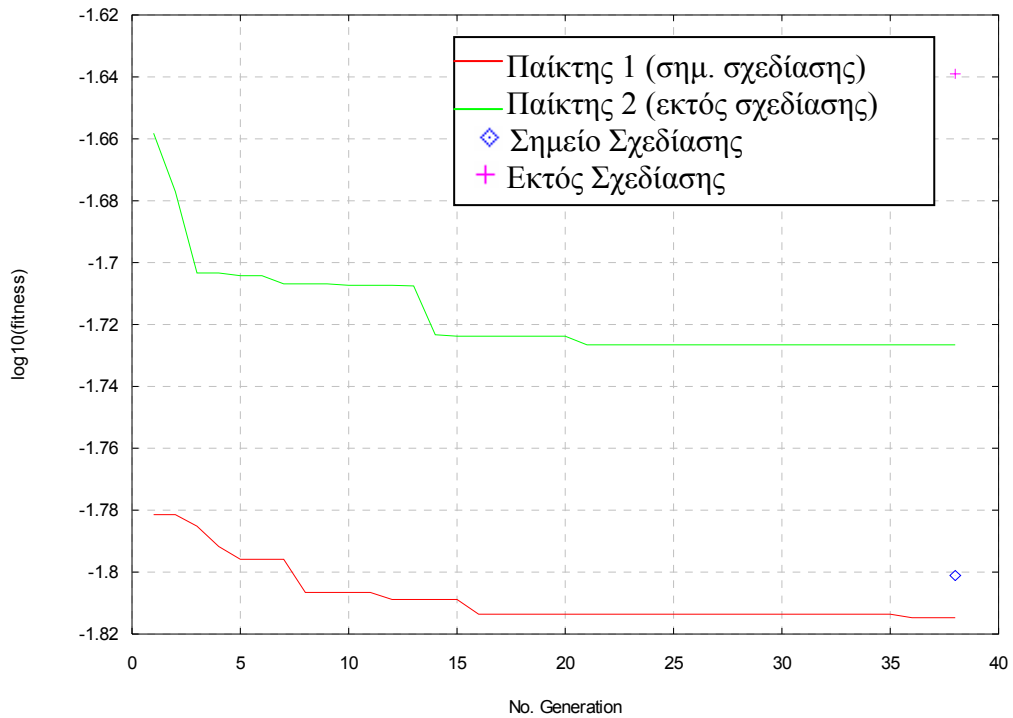
Παρατηρούμε πως οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι μεγαλύτερες από αυτές των απωλειών  $\omega$ . Αυτό συμβαίνει γιατί παραβιάζονται οι περιορισμοί του πάχους που έχουν οριστεί.

Απ'ότι φαίνεται επιτυγχάνονται καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με το πτερύγιο αναφοράς. Η μορφή του πτερυγίου φαίνεται στη συνέχεια:



Παρατηρούμε από το παραπάνω περίγραμμα ότι η αεροτομή τείνει να λεπτύνει, όπως και αναμενόταν, μιας και ο εξελικτικός αλγόριθμος τείνει να κατευθύνεται προς λεπτότερες αεροτομές, μιας και αυτές παρουσιάζουν μικρότερες απώλειες. Όμως παράλληλα το πτερύγιο γίνεται και πιο κυρτό, κάτι το οποίο συμβάλλει στις καλύτερες επιδόσεις (σαφώς μεγαλύτερες) όσον αφορά τη γωνία στροφής της ροής, η οποία και στα δύο σημεία λειτουργίας παρουσιάζει βελτίωση κατά  $5^\circ$  περίπου.

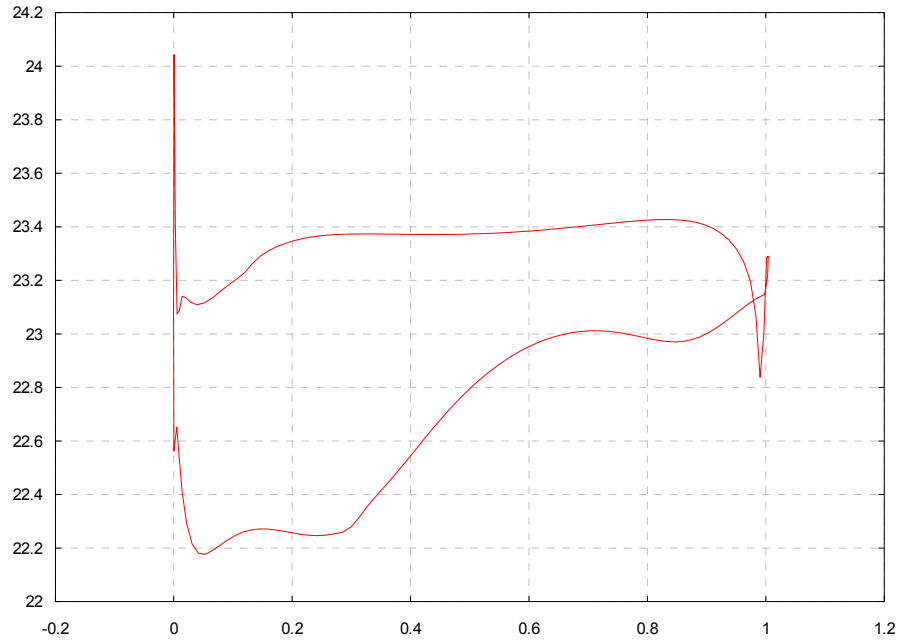
Μιας και η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια εξελικτικού αλγορίθμου, όπου κυρίαρχο ρόλο παίζει και η τυχειότητα, θεωρήθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί και η σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης των δύο παικτών.



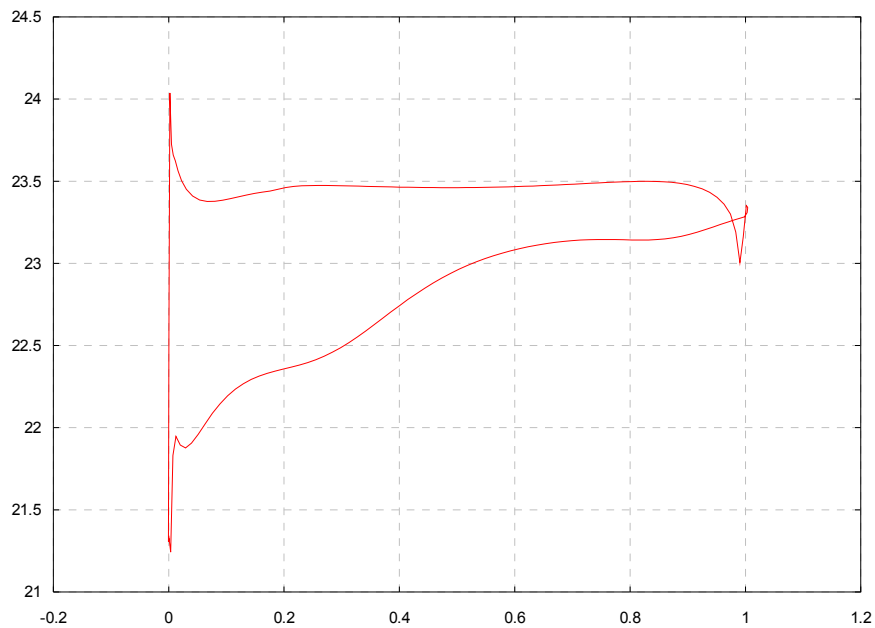
Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, μετά την 16<sup>η</sup> γενιά και οι δύο παίκτες είχαν πρακτικά πετύχει τη βέλτιστη λύση. Σημαντικό στοιχείο που φαίνεται και στο διάγραμμα είναι η συχνότητα ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των δύο παικτών. Η επικοινωνία πραγματοποιήθηκε κάθε 8 γενιές. Όμως παρατηρώντας την πορεία σύγκλισης του παίκτη 1 βλέπουμε ότι τα μεγάλα άλματα κατά την πορεία αυτή πραγματοποιήθηκε κατά την 8<sup>η</sup> και 16<sup>η</sup> γενιά.

Παρατήρηση: Στα διαγράμματα αυτά με συνεχή γραμμή παρουσιάζεται η σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης των δύο ξεχωριστών παικτών. Μετά το τέλος των υπολογισμών ενώνονταν οι καλύτερες λύσεις των δύο παικτών δημιουργώντας την τελική αεροτομή, την οποία στη συνέχεια αξιολογούσαμε και ως προς τους δύο στόχους. Η τελική αξιολόγηση φαίνεται στο διάγραμμα με τις δύο κουκίδες. Ένα για το σημείο σχεδίασης και ένα για τη λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης.

Μιας και έγινε κατ' αυτόν τον τρόπο ο χωρισμός και υπάρχει κίνδυνος να φορτιστεί πολύ το μπροστινό τμήμα της αεροτομής, παρουσιάζεται στη συνέχεια ο συντελεστής ανάκτησης πίεσης ( $C_p$ ) και για τα δύο σημεία λειτουργίας, με σκοπό να διαπιστώσουμε εάν πράγματι ισχύει κάτι τέτοιο. Μετά την παρατήρηση των παρακάτω διαγραμμάτων βλέπουμε πως πράγματι πραγματοποιείται το περισσότερο έργο από το μπροστινό μέρος της αεροτομής, μέχρι περίπου το 30% της χορδής.



Διάγραμμα  $C_p$  σημείου σχεδιασμού

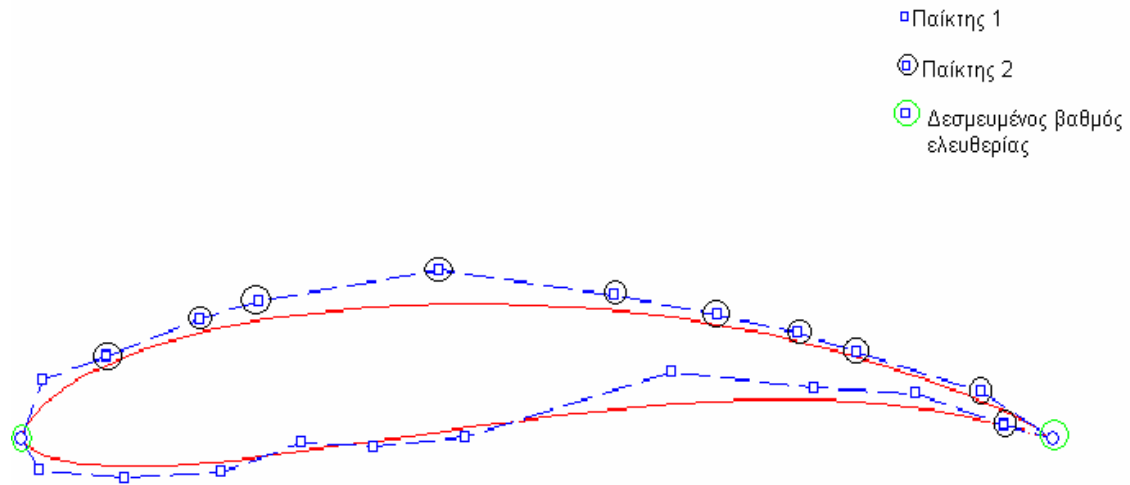


Διάγραμμα  $C_p$  λειτουργίας εκτός σημείου σχεδίασης

## **Παίκτης 1: Πλευρά Υπερπίεσης / Παίκτης 2: Πλευρά Υποπίεσης**

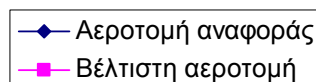
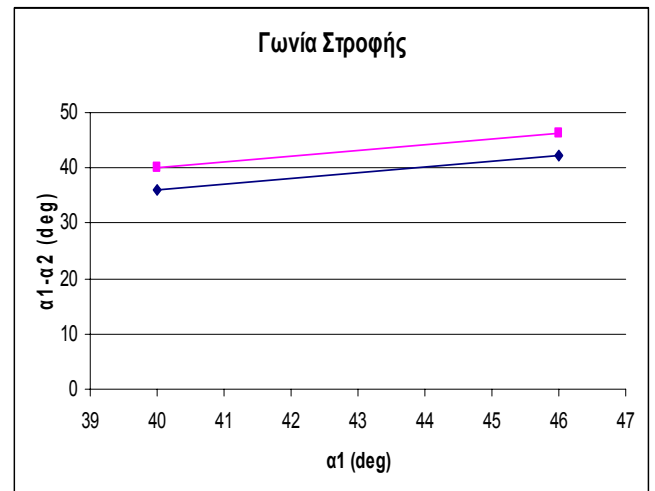
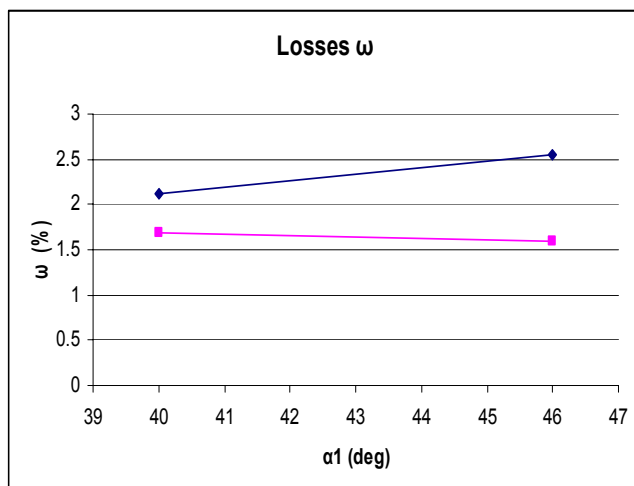
Κατά το χωρισμό αυτό ανατέθηκαν στον παίκτη 1 τα σημεία της πλευράς υπερπίεσης του πτερυγίου ενώ στον δεύτερο αυτά της πλευράς υποπίεσης. Όσον αφορά τις ακτίνες καμπυλότητας και την κλίση της μέσης γραμμής, τα μεγέθη της ακμής προσβολής ανατέθηκαν στον παίκτη 1 (πλευρά υπερπίεσης) μιας και ο παίκτης 2 είχε ήδη αναλάβει την πλευρά υποπίεσης που θεωρήθηκε πιο σημαντική, και για να μην επιφορτιστεί και με

την ακμή προσβολής δόθηκε αλλού. Συνεπώς τα αντίστοιχα μεγέθη της ακμής εκφυγής ανατέθηκαν στον παίκτη 2 (πλευρά υποπίεσης). Ακολουθεί και πάλι σχήμα όπου φαίνεται παραστατικά η εν λόγω κατάτμηση των σχεδιαστικών παραμέτρων.



Οι επιδόσεις της καλύτερης αεροτομής από αυτές που προέκυψαν φαίνονται στη συνέχεια σε σχέση με τις αντίστοιχες επιδόσεις του πτερυγίου αναφοράς.

	$\alpha_1=40^\circ$	$\alpha_1=46^\circ$
$\omega$	16.8‰	15.9‰
$\alpha_1-\alpha_2$	40.0°	46.2°

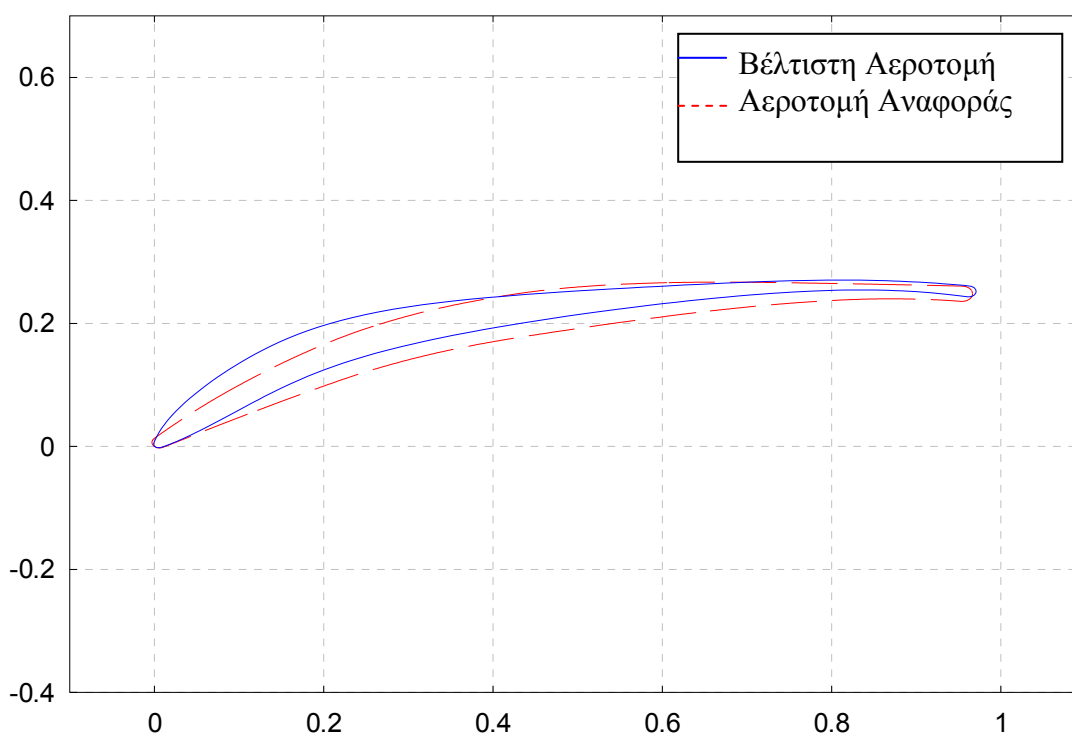


Ενώ και πάλι οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι:

$$F_1 = 1.701 \cdot 10^{-2} \text{ (ως προς σημείο σχεδίασης)}$$

$$F_2 = 1.611 \cdot 10^{-2} \text{ (λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης)}$$

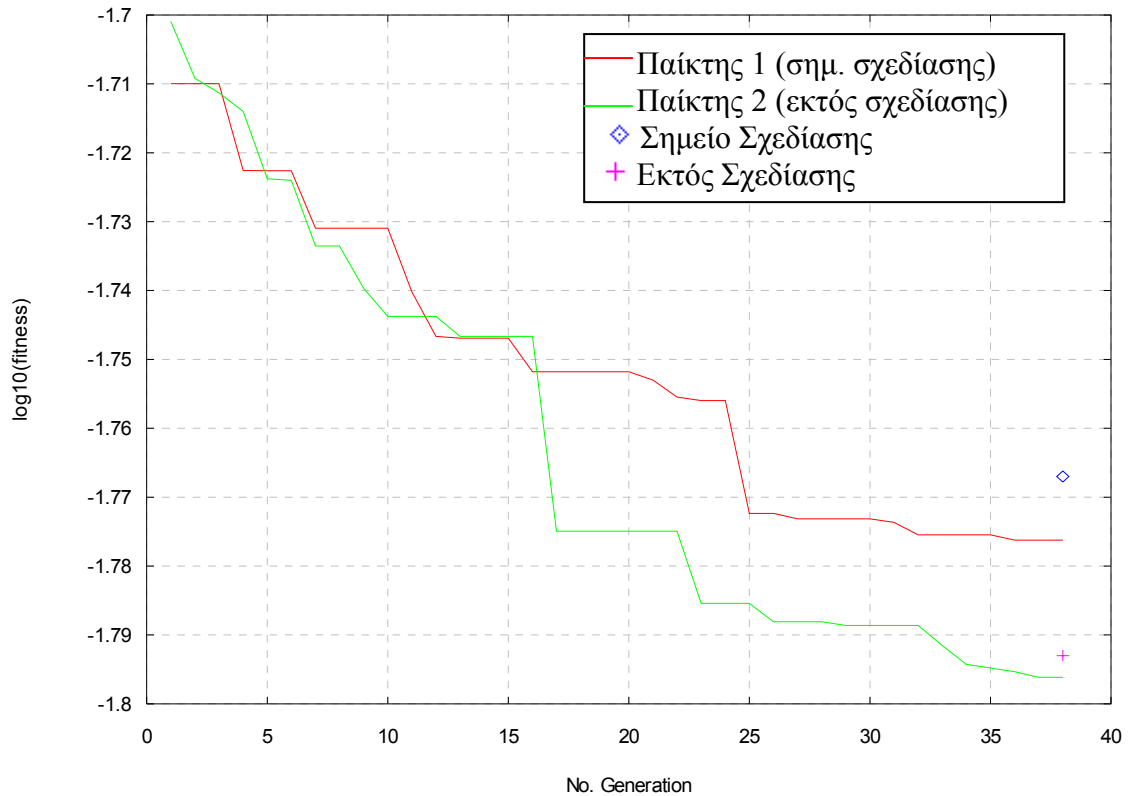
Και πάλι παραβιάζονται οι περιορισμοί πάχους που έχουν τεθεί, για αυτό και οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι μεγαλύτερες από τις τιμές των απωλειών. Παρατηρούμε όμως πως σε αυτήν την περίπτωση η λειτουργία σε σημείο εκτός σχεδίασης επιτυγχάνει καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά και τις απώλειες. Στη συνέχεια παρουσιάζεται και το περίγραμμα της εν λόγω αεροτομής.



Αν και αυτός ο χωρισμός δε θεωρήθηκε και ο καλύτερος, μιας και πιο σημαντική είναι η πλευρά υποπίεσης παρά η πλευρά υπερπίεσης σε μία αεροτομή και θεωρήθηκε μάλλον “άδικος” για τους 2 παίκτες. Αυτό ισχύει μιας και η πλευρά υποπίεσης είναι αυτή που καταλαβαίνει περισσότερο τη ροή. Η πλευρά αυτή καθορίζει ως επί το πλείστον τη συμπεριφορά ολόκληρης της αεροτομής.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα σύγκλισης, απ’ όπου και πάλι βλέπουμε πως ιδίως στην περίπτωση του παίκτη 2, οι απότομες μεταβολές της αντικειμενικής συνάρτησης συμβαδίζουν με αριθμό γενιάς όπου γίνεται ανταλλαγή πληροφοριών. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, εδώ η σύγκλιση σταθεροποιήθηκε αρκετά αργότερα και περί την 25<sup>η</sup> γενιά.

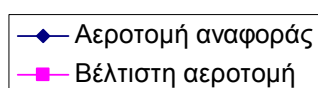
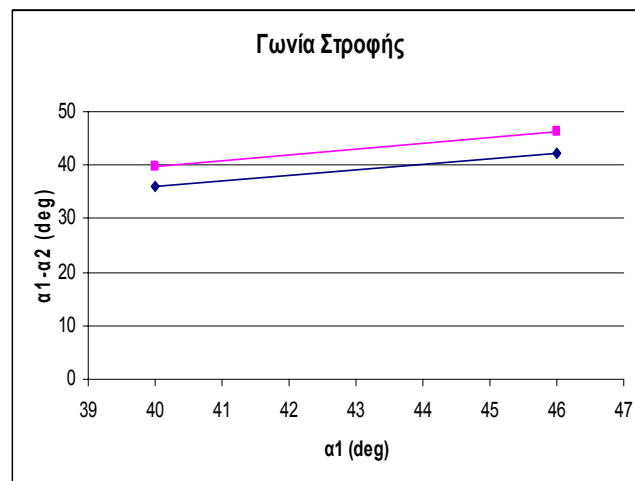
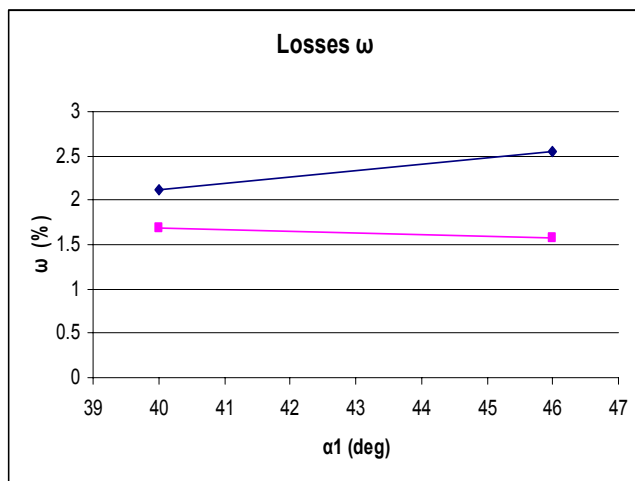




### Παίκτης 1: Τυχαία Ανάθεση / Παίκτης 2: Τυχαία Ανάθεση

Στην περίπτωση αυτή δοκιμάστηκε ο καταμερισμός των παραμέτρων στους δύο παίκτες με μοναδικό γνώρισμα την τυχαιότητα, δηλ. με τυχαίο τρόπο ανατέθηκαν οι ελεύθεροι σχεδιαστικοί παράμετροι στους δύο παίκτες. Αν και κάπως ανορθόδοξο θεωρήθηκε σκόπιμη η μελέτη αυτή της ανάθεσης στο πνεύμα της στοχαστικότητας που διέπει κάθε εξελικτικό αλγόριθμο. Με βάση αυτή τη λογική προχωρήσαμε και προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

	$\alpha_1=40^\circ$	$\alpha_1=46^\circ$
$\omega$	16.9‰	15.8‰
$\alpha_1-\alpha_2$	39.8°	46.3°

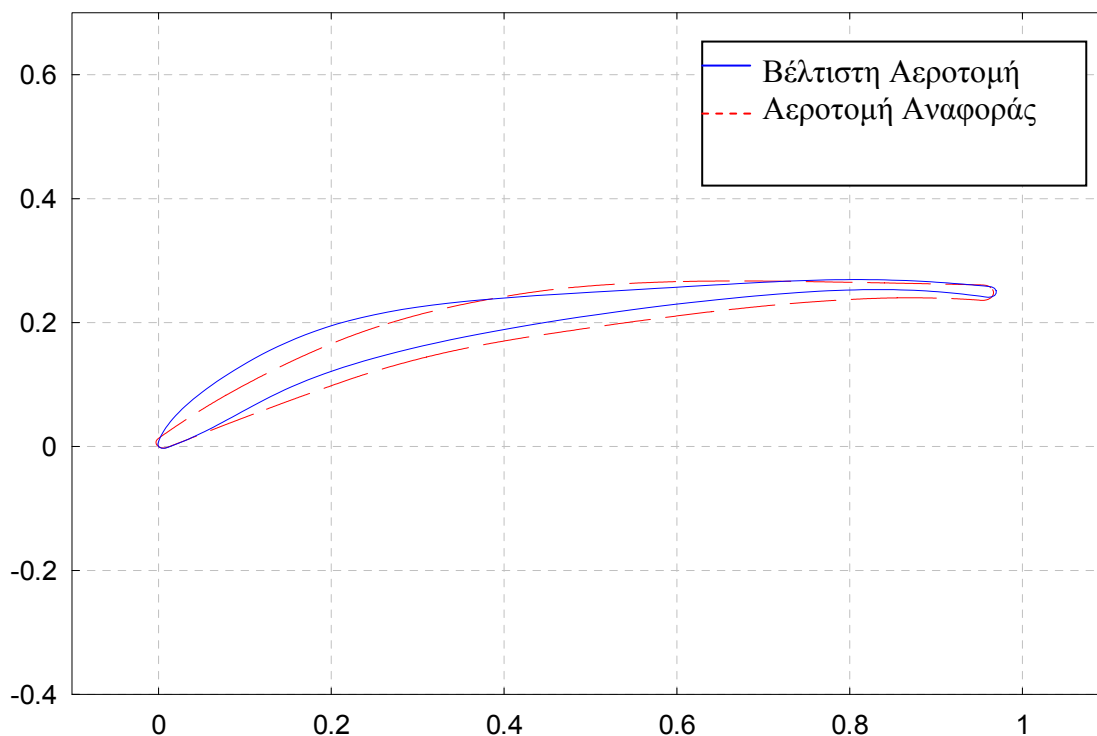


$F_1 = 1.721 \cdot 10^{-2}$  (ως προς σημείο σχεδίασης)

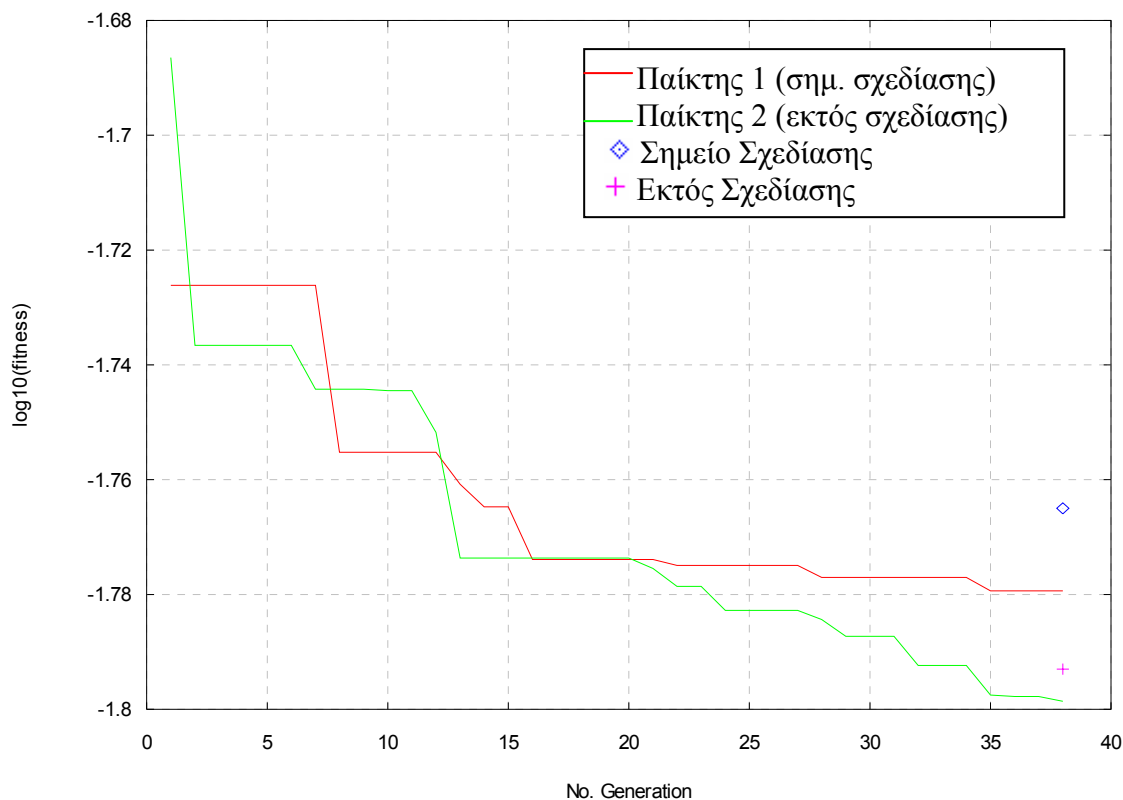
$F_2 = 1.612 \cdot 10^{-2}$  (λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης)

Όπως και στις υπόλοιπες περιπτώσεις έτσι και εδώ έχουμε παραβίαση μόνο των περιορισμών πάχους.

Το περίγραμμα του πτερυγίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Φαίνεται πλέον και με το μάτι πως είναι αρκετά λεπτό περίπου στο 70 % της χορδής.



Στη συνέχεια όπως και προηγουμένως παρατίθεται το διάγραμμα σύγκλισης. Βλέπουμε πως ενώ ο παίκτης 1 μετά την 16<sup>η</sup> γενιά δε μεταβάλλεται και πολύ, η σύγκλιση του παίκτη 2 προχωράει μέχρι και την 35<sup>η</sup> γενιά, απ' όπου και μετά φαίνεται ότι ομαλοποιείται.



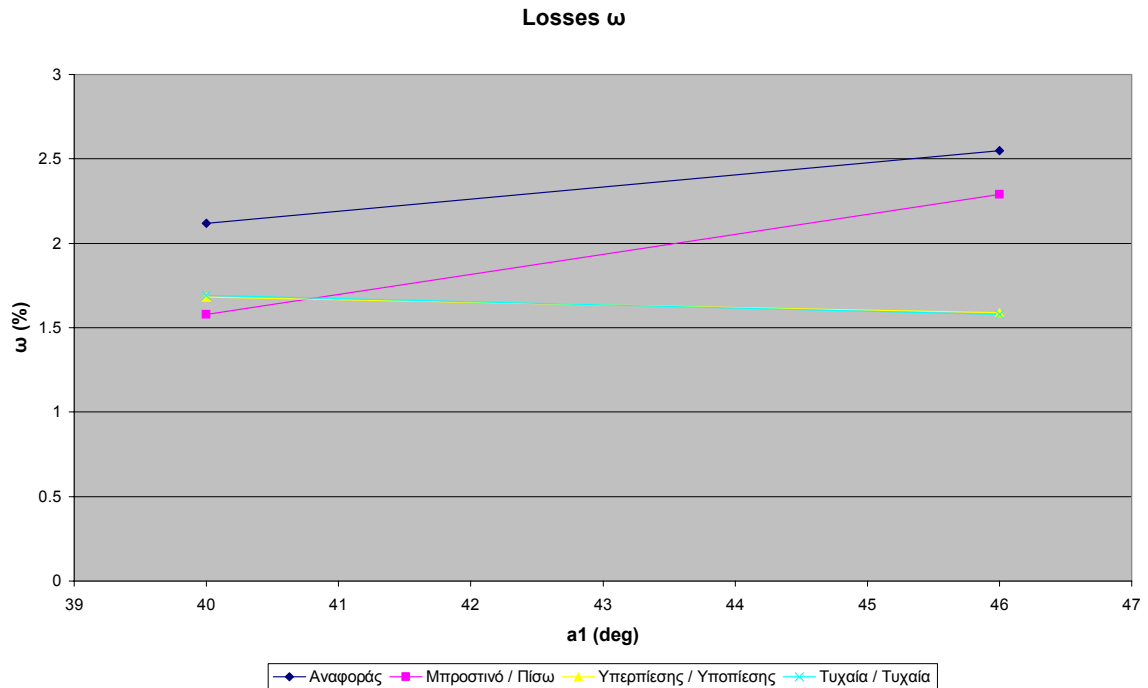
## Σύγκριση-Αξιολόγηση

Στο τμήμα αυτό θα παρουσιαστούν σε ένα διάγραμμα οι επιδόσεις και των τριών παραπάνω τρόπων χωρισμού των μεταβλητών σχεδίασης για να φανούν τα προτερήματα και ελαττώματα του καθνός.

Ο συνολικός πίνακας των επιδόσεων φαίνεται παρακάτω:

### Losses $\omega$

	$\alpha_1=40^\circ$	$\alpha_1=46^\circ$
<b>Μπρος / Πίσω</b>	15.8‰	22.9‰
<b>Υπερπίεση / Υποπίεση</b>	16.8‰	15.9‰
<b>Τυχαίο / Τυχαίο</b>	16.9‰	15.8‰



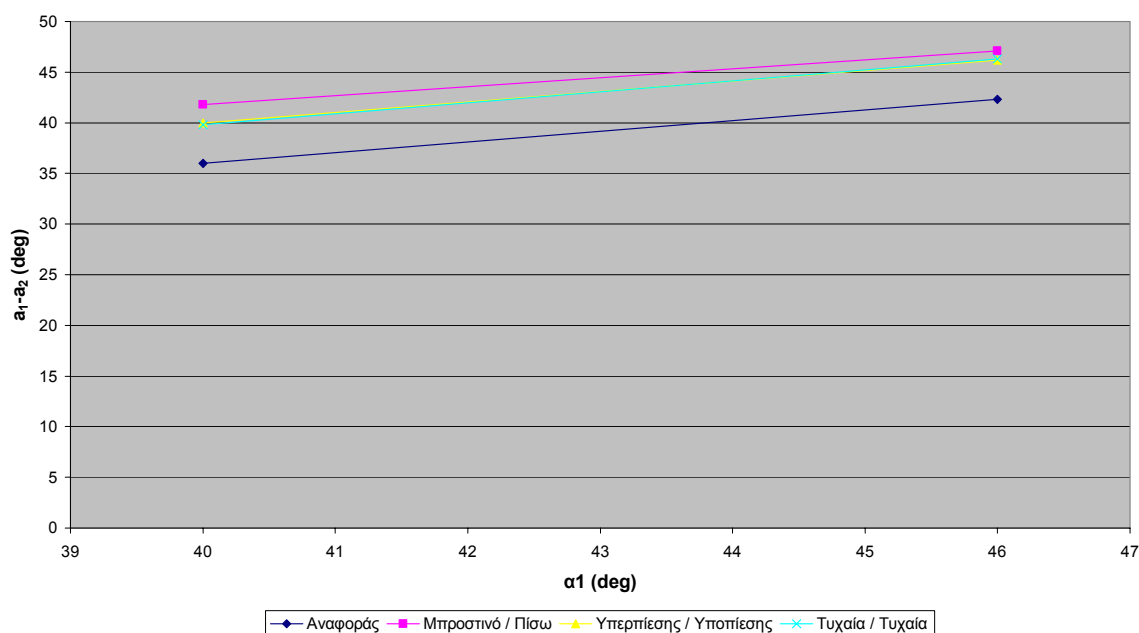
Βλέπουμε ότι ο πρώτος τρόπος διαχωρισμού δίνει μικρότερες απώλειες στο σημείο σχεδίασης ενώ οι άλλοι 2 τρόποι παρουσιάζουν σαφώς καλύτερες επιδόσεις ως προς τη λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης. Πάντως θετικό είναι πως σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση των επιδόσεων και ότι βελτιώνοντας ένα σημείο λειτουργίας δεν επιβαρύνουμε το άλλο.

Όσον αφορά τη γωνία στροφής έχουμε τον παρακάτω πίνακα:

### Γωνία Στροφής

	$\alpha_1=40^\circ$	$\alpha_1=46^\circ$
<b>Μπρος / Πίσω</b>	41.8°	47.1°
<b>Υπερπίεση / Υποπίεση</b>	40.0°	46.2°
<b>Τυχαίο / Τυχαίο</b>	39.8°	46.3°

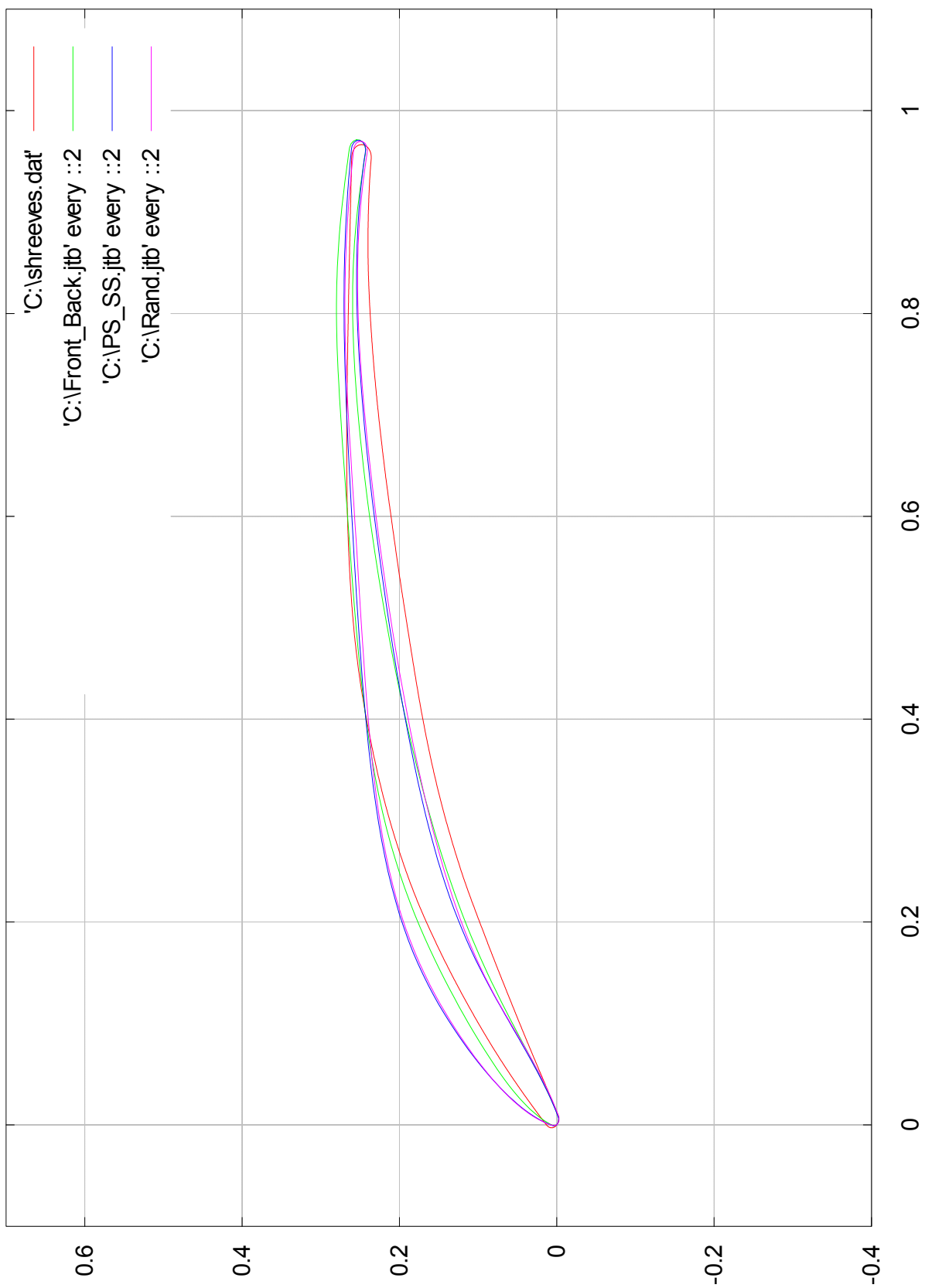
### Γωνία Στροφής



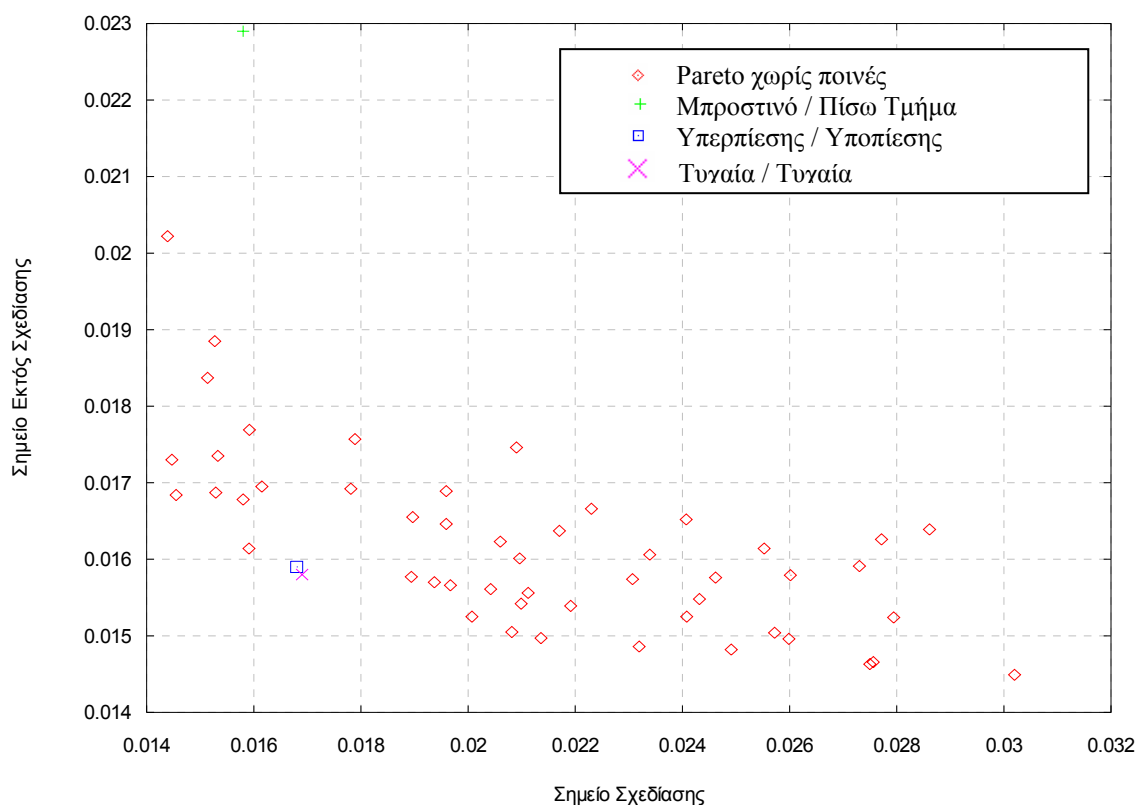
Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα και πίνακα βλέπουμε ότι σε κάθε περίπτωση βελτιώνεται η γωνία στροφής. Σημαντική όμως βελτίωση έχουμε με τον πρώτο διαχωρισμό (Μπροστινό / Πίσω Τμήμα), ενώ όταν διαλέξαμε τυχαία παραμέτρους κινδύνεψε η γωνία στροφής να πέσει μέσα στα όρια όπου τίθονταν περιορισμοί.

Στην επόμενη σελίδα φαίνονται όλα τα πτερύγια μαζί με την αεροτομή αναφοράς στο ίδιο σχεδιάγραμμα.

Παρατηρώντας το σχεδιάγραμμα βλέπουμε ότι τα πτερύγια που προκύπτουν από το διαχωρισμό σε πλευρά υπερπίεσης / πλευρά υποπίεσης και τυχαία ανάθεση / τυχαία ανάθεση παρουσιάζουν πιο αμβλεία ακμή προσβολής, όπως και πιο καμπυλομένο μπροστινό τμήμα (κατά το πρώτο 40% της χορδής) απ'ότι ο πρώτος διαχωρισμός, κάτι λογικό μιας και στο διαχωρισμό μπροστινό / πίσω τμήμα το μπροστινό τμήμα του πτερυγίου αντιμετωπίζεται σα σύνολο για αυτό και βγάζει καλύτερα αποτελέσματα. Εξαιτίας αυτών των δύο χαρακτηριστικών όμως, αυτά τα δύο πτερύγια παρουσιάζουν πολύ καλά αποτελέσματα κατά τη λειτουργία σε σημείο εκτός σχεδιασμού (μικρότερες απώλειες) σε σχέση με τον πρώτο τρόπο διαχωρισμού. Από την άλλη όμως, το πτερύγιο που προκύπτει από αυτόν τον πρώτο τρόπο διαχωρισμού, εξαιτίας της πιο μυτερής ακμής προσβολής παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις κατά την κανονική λειτουργία. Τέλος δικαιολογείται η αυξημένη γωνία στροφής που δίνει αυτό το πτερύγιο στη ροή, μιας και όπως παρατηρούμε, παρουσιάζει πιο κυρτή μέση γραμμή προς την ακμή εκφυγής απ'ότι τα άλλα δύο πτερύγια.



Στη συνέχεια παραθέτουμε το μέτωπο Pareto, προερχόμενο από παρόμοια διερεύνηση του ίδιου προβλήματος [3]. Στο Pareto αυτό παραθέτονται οι λύσεις που έχουν υπολογιστεί χωρίς την επίδραση των ποινών, οι τιμές δηλαδή αποτελούν τιμές απωλειών μονάχα. Σ' αυτό το διάγραμμα εισήχθησαν και οι επιδόσεις των τριών αεροτομών που υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία.



Από την παρατήρηση του παραπάνω διαγράμματος φαίνεται έκδηλα πως ενώ η λύση προερχόμενη από το διαχωρισμό σε Μπροστινό / Πίσω Τμήμα είναι σαφώς η ιδανικότερη για το σημείο σχεδιασμού, είναι παράλληλα και πολύ κακή όσον αφορά τη λειτουργία εκτός σημείου σχεδιασμού. Φαίνεται πως η ιδανικότερη λύση, σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό είναι η αεροτομή που προέρχεται από την τυχαία ανάθεση των σχεδιαστικών παραμέτρων. Όμως δεν πρέπει να ξεχνάμε πως σε αυτό το διάγραμμα φαίνονται οι επιδόσεις των αεροτομών μονάχα ως προς τις απώλειες. Όσον αφορά τη γωνία στροφής, η πρώτη αεροτομή παρουσιάζει σαφώς καλύτερες επιδόσεις από τις υπόλοιπες δύο λύσεις, όπως και αποδείχθηκε προηγουμένως.

Καταλήγοντας λοιπόν κρίθηκε πως ο πρώτος τρόπος ανάθεσης παραμέτρων σχεδίασης ήταν και ο αποδοτικότερος μιας και επιτεύχθηκε μεγάλη βελτίωση των επιδόσεων στο σημείο σχεδίασης, ενώ για λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης η επιτυγχόμενη γωνία στροφής ήταν αρκετά καλύτερη έναντι των άλλων. Επίσης όσον αφορά τη πορεία της σύγκλισης είδαμε με τη βοήθεια των κατάλληλων διαγραμμάτων, πως με αυτόν τον τρόπο διαχωρισμού η τελική λύση επιτεύχθηκε σε μικρότερο χρονικό διάστημα, δηλαδή με λιγότερο υπολογιστικό κόστος απ' ό,τι με τους άλλους τρόπους. Κάτι τέτοιο ήταν λογικό γιατί κατ' αυτόν τον τρόπο διαμοιράζεται η αεροτομή σε δύο περίπου ισοδύναμους παίκτες.

## Συχνότητα Ανταλλαγής Πληροφοριών Μεταξύ των Παικτών

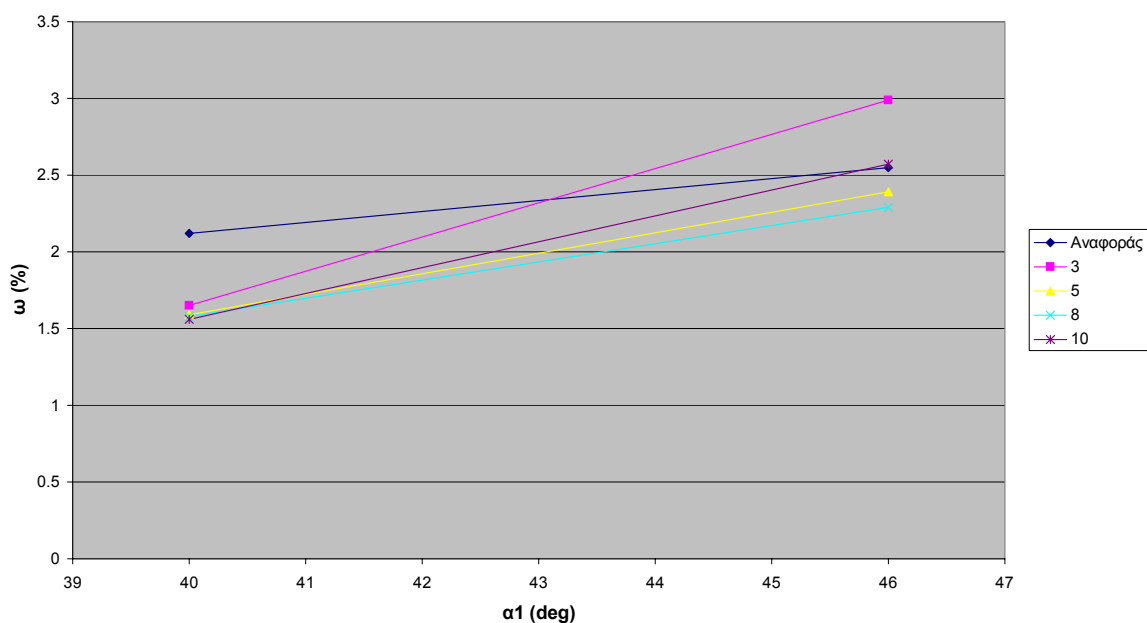
Κατά τη διερεύνηση αυτή μελετήθηκε η συχνότητα ανταλλαγής βέλτιστων λύσεων μεταξύ των δύο παικτών. Η συχνότητα αυτή εκφράζεται προφανώς σε αριθμό γενεών της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Σημειώνεται πως κατά τη διερεύνηση αυτή οι παράμετροι σχεδίασης ανατέθηκαν στον κάθε παίκτη με βάση τον πρώτο τρόπο χωρισμού, σε Μπροστινό / Πίσω τμήμα δηλαδή, μιας και θεωρήθηκε ο πιο αποδοτικός.

Δοκιμάστηκαν 4 συχνότητες επικοινωνίας, με βάση τις οποίες θεωρήθηκε ότι καλυπτόταν επαρκώς το πιθανό εύρος επικοινωνίας τους. Οι παίκτες αντάλλαζαν τη βέλτιστή τους λύση κάθε 3,5,8 και 10 γενές. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα:

Losses  $\omega$

	$\alpha_1=40^\circ$	$\alpha_1=46^\circ$
<b>3 generations</b>	16.5‰	29.9‰
<b>5 generations</b>	15.9‰	23.9‰
<b>8 generations</b>	15.8‰	22.9‰
<b>10 generations</b>	15.6‰	25.7‰

Losses  $\omega$



Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων για τις παραπάνω περιπτώσεις (απώλειες με ποινές).

Κάθε 3 γενές:  $F_1 = 1.683 \cdot 10^{-2}$  (σημείο σχεδίασης)  
 $F_2 = 3.203 \cdot 10^{-2}$  (σημείο εκτός σχεδίασης)



Κάθε 5 γενεές:  $F_1 = 1.631 \cdot 10^{-2}$   
 $F_2 = 2.501 \cdot 10^{-2}$

Κάθε 8 γενεές:  $F_1 = 1.600 \cdot 10^{-2}$   
 $F_2 = 2.311 \cdot 10^{-2}$

Κάθε 10 γενεές:  $F_1 = 1.593 \cdot 10^{-2}$   
 $F_2 = 2.603 \cdot 10^{-2}$

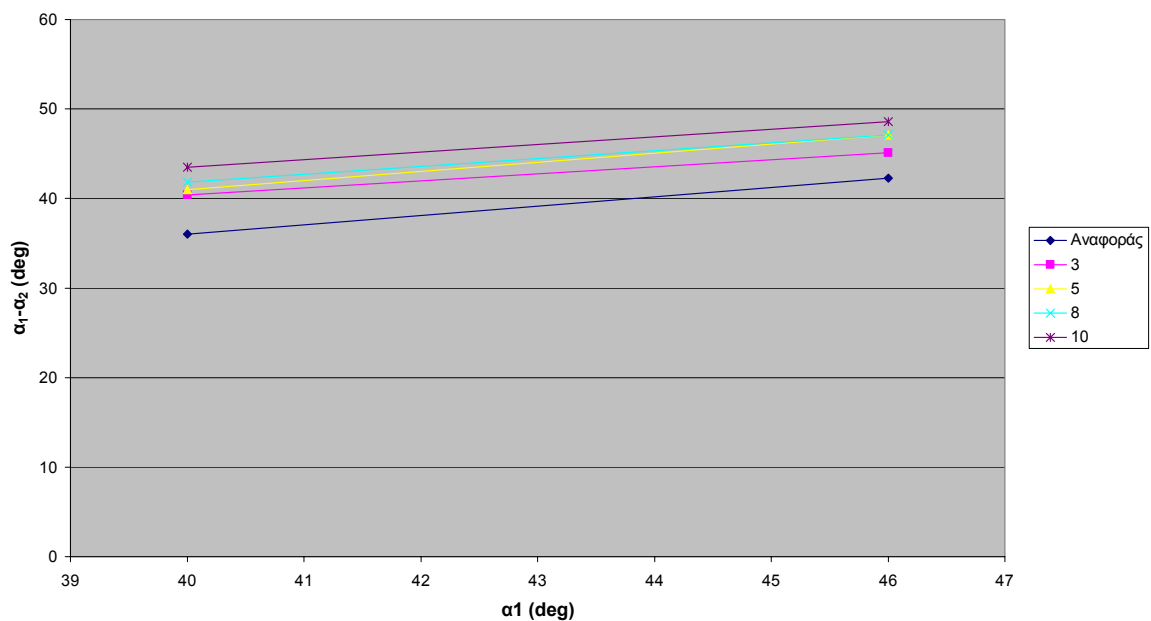
Παρατηρούμε πως σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές των απωλειών με ποινές είναι μεγαλύτερες από τις καθαρές απώλειες. Αυτό οφείλεται και πάλι στην παραβίαση των ορίων του πάχους.

Παρατηρούμε ότι για τις δύο ακραίες τιμές οι απώλειες για λειτουργία εκτός σημείου σχεδίασης είναι μεγαλύτερες από αυτές της αεροτομής αναφοράς, κάτι το οποίο δεν προκαλεί έκπληξη μιας και για την περίπτωση της ανταλλαγής κάθε 3 γενεές δεν προλαβαίνουν οι παίκτες να πετύχουν βέλτιστη τιμή για να ανταλλάξουν, ενώ για κάθε 10 γενεές χάνεται πολύς χρόνος στην επιμέρους βελτιστοποίηση, η οποία όμως δεν παίζει τον καθοριστικό ρόλο, αφού στο τέλος η αεροτομή κρίνεται ως σύνολο.

### Γωνία Στροφής

	$\alpha_1=40^\circ$	$\alpha_1=46^\circ$
<b>3 generations</b>	40.4°	45.1°
<b>5 generations</b>	41.0°	47.1°
<b>8 generations</b>	41.8°	47.1°
<b>10 generations</b>	43.5°	48.6°

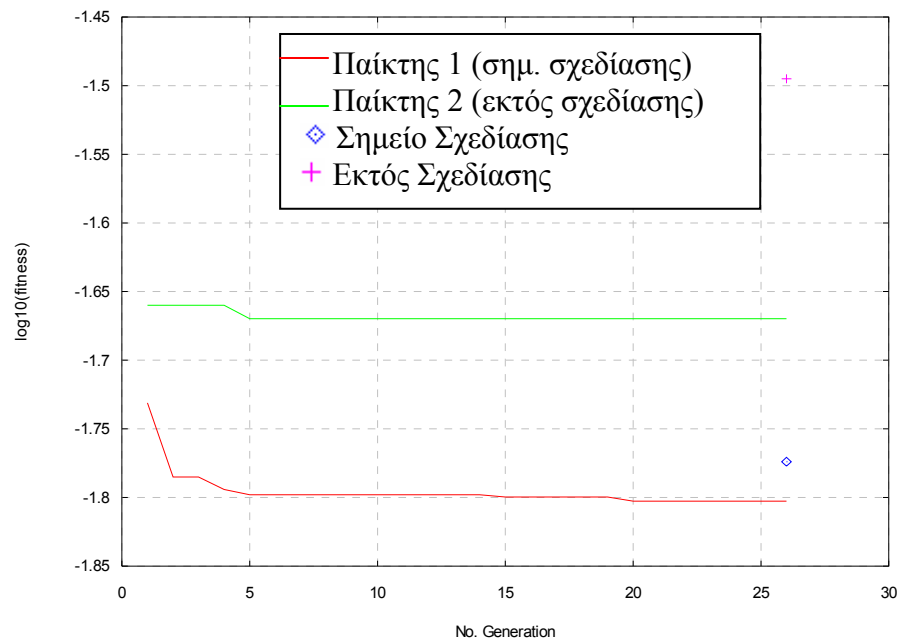
### Γωνία Στροφής



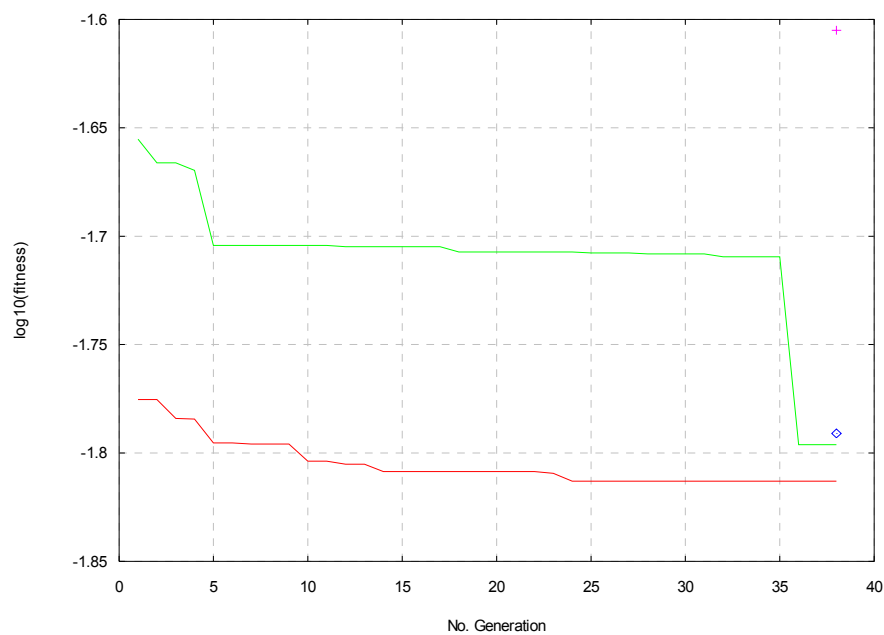
Όσον αφορά τη γωνία στροφής φαίνεται πως η βελτίωσή της δεν ευνοείται από συχνή επικοινωνία των 2 παικτών. Μάλιστα στην περίπτωση της επικοινωνίας κάθε 3 γενεές η επιτυγχόμενη γωνία στροφής ήταν ελάχιστα πάνω από το όριο επιβολής ποινών. Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα φαίνεται πως η επικοινωνία των 2 παικτών πρέπει να συμβαίνει μεταξύ 5 και 8 γενεών.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν διαγράμματα όπου θα φαίνεται η σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε μία από τις συχνότητες που διερευνήθηκαν.

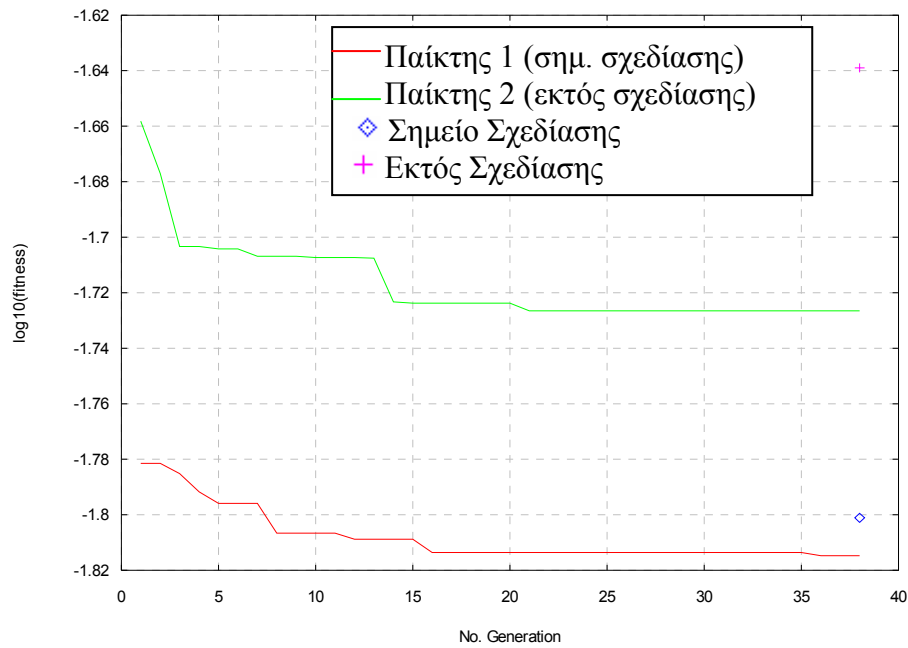
### Συχνότητα 3 γενεών



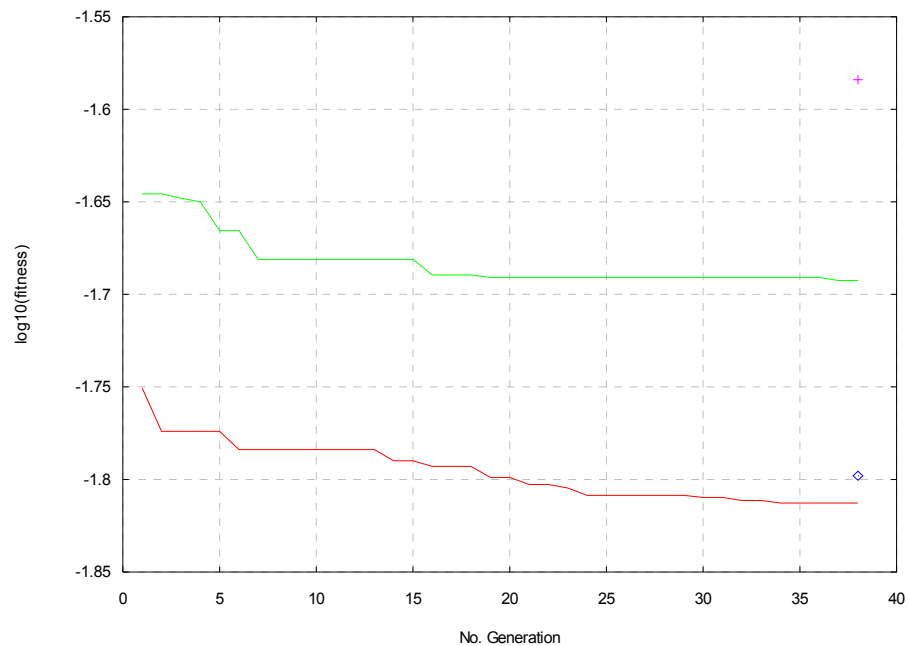
### Συχνότητα 5 γενεών



### Συχνότητα 8 γενεών



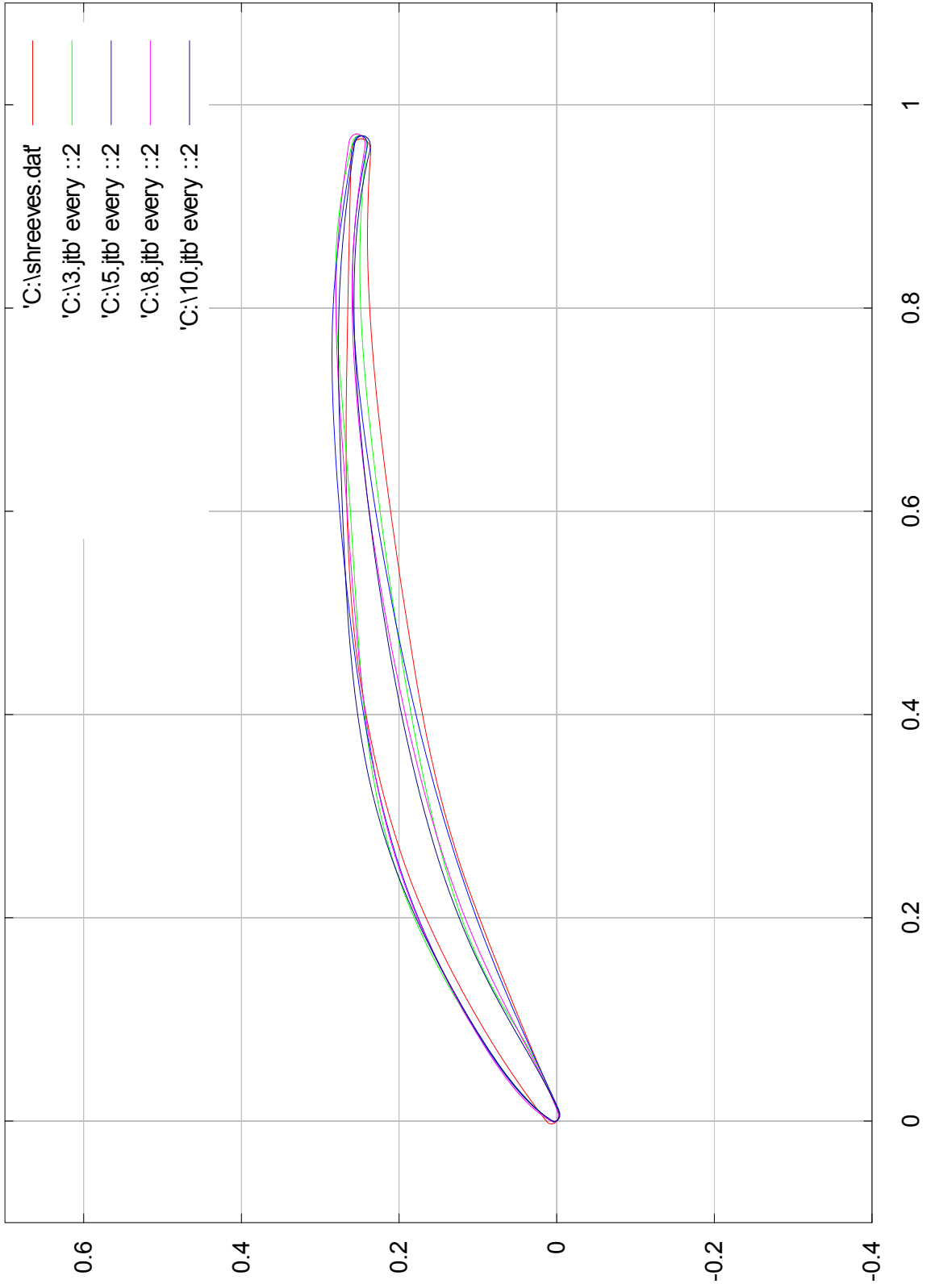
### Συχνότητα 10 γενεών



Από τα διαγράμματα της σύγκλισης βλέπουμε αρχικά πως κατά την επικοινωνία κάθε 3 γενεές η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται πολύ γρήγορα. Πρακτικά από την 5<sup>η</sup> γενιά και μετά έχει σταθεροποιηθεί η διαδικασία, κάτι το οποίο δεν είναι θετικό μιας και δείχνει ότι ουσιαστικά δεν πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση. Όσον αφορά το διάγραμμα της επικοινωνίας κάθε 5 γενεές παρατηρούμε μια απότομη πτώση της πορείας σύγκλισης, η οποία ίσως και να οφείλεται σε πιθανή μετάλλαξη, μιας και δεν αποτελούν συνήθη φαινόμενα τέτοιες μεμονωμένες πτώσεις. Φαίνεται πως το διάγραμμα για επικοινωνία κάθε 8 γενιές είναι και το πιο λογικό, αφού αρχικά παρουσιάζει πτώση και ως προς τους

δύο στόχους και στη συνέχεια ομαλοποιείται. Γενικότερα πάντως παρατηρούμε πως η πορεία του παίκτη 1 (σημείο σχεδίασης) είναι αρκετά ομαλή χωρίς απότομες μεταβολές.

Στη συνέχεια παρατίθενται και τα περιγράμματα των πτερυγίων που προέκυψαν. Από την παρατήρηση των παρακάτω πτερυγίων επιβεβαιώνονται κατά ένα μέρος και οι παραπάνω επιδόσεις. Παρατηρώντας τη μορφή του πτερυγίου που προκύπτει με επικοινωνία των παικτών ανά 10 γενεές (σκούρο μπλε χρώμα), βλέπουμε πως είναι σαφώς πιο κυρτό από τα υπόλοιπα, κάτι το οποίο εξηγεί και την αυξημένη γωνία στροφής της ροής που αυτό προκαλεί. Αντίθετα αυτό που προκύπτει με αντίστοιχη επικοινωνία κάθε 3 γενεές (πράσινο χρώμα), δεν παρουσιάζει μεγάλη κυρτότητα, για αυτό και προσδίδει μικρή γωνία στροφής. Όσον αφορά τις απώλειες, παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα πως το πτερύγιο που προκύπτει με την επικοινωνία των δύο παικτών κάθε 10 γενεές (σκούρο μπλε χρώμα), παρουσιάζει χειρότερες επιδόσεις στο σημείο εκτός σχεδίασης από την αεροτομή αναφοράς ακόμα. Αυτό οφείλεται και στο γεγονός πως το πτερύγιο αυτό, όπως φαίνεται και από το περίγραμμά του, είναι πολύ μυτερό, μ'αποτέλεσμα ενώ οι επιδόσεις του να είναι πολύ καλές για το σημείο σχεδίασης σε άλλα σημεία λειτουργίας αυτό υστερεί.



## Συμπεράσματα

Κατά τη διεκπεραίωση αυτού του θέματος δοκιμάστηκε μια νέα προσέγγιση όσον αφορά τη διαδικασία βελτιστοποίησης μιας αεροτομής με στόχο τη βελτίωση ορισμένων επιδόσεων σε πολλαπλά σημεία λειτουργίας. Αντίθετα με τον κλασικό τρόπο βελτίωσης, όπου η αεροτομή θεωρούνταν σα σύνολο κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης και απλά καταφεύγαμε σε τόσες διαδικασίες βελτιστοποίησης όσα και τα επιθυμητά σημεία λειτουργίας, εδώ πραγματοποιήθηκε η ανάθεση των σχεδιαστικών παραμέτρων σε τόσους παίκτες όσα και τα σημεία λειτουργίας. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την κατάτμηση της αεροτομής, στην περίπτωση μας σε δύο παίκτες, και την επιμέρους βελτιστοποίηση του καθενός, με τη συχνή επικοινωνία τους.

Αν και αρχικά η ιδέα φαίνεται κάπως “ανορθόδοξη”, είναι γεγονός ότι συνάδει με το γενικό πνεύμα της θεωρίας παιγνίων και ιδίως με το τμήμα των παιγνίων με αντικρουόμενους στόχους. Στην περίπτωση μας οι αντικρουόμενοι στόχοι είναι οι απαιτήσεις των δύο σημείων λειτουργίας.

Κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας διαπιστώθηκε πως παρόλο που από τη φύση τους οι εξελικτικοί αλγόριθμοι βασίζονται στη στοχαστικότητα, μία κατάλληλη και “δίκαιη” ανάθεση των παραμέτρων σχεδίασης βοηθάει τον αλγόριθμο στο να κατευθύνεται προς πιο αποδοτικές λύσεις. Παρόλο που μπορεί να επιτευχθούν βελτιωμένες επιδόσεις βασιζόμενοι στην τυχαιότητα, κρίνεται χρήσιμη η ανάθεση των σχεδιαστικών παραμέτρων κατά τρόπο λογικό και με φυσικό νόημα (π.χ. οι δύο πρώτοι τρόποι που εξετάστηκαν παραπάνω). Επιπλέον, προτέρημα αυτού του “λογικού” διαχωρισμού είναι και η γρηγορότερη σύγκλιση της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Όμως εκτός από τον τρόπο διαχείρισης των παραμέτρων, παρατηρήθηκε και ως σημαντικός παράγοντας η συχνότητα ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των δύο παικτών, και συγκεκριμένα των βέλτιστων λύσεων του καθενός. Όπως και αναμενόταν ούτε η συχνή, ούτε η αραιή επικοινωνία επιτυγχάνει τα καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στην πρώτη περίπτωση στο μειωμένο χρόνο επίτευξης επιμέρους βέλτιστης λύσης, ενώ στην άλλη στην υπερβολική χρονική διάρκεια.

Μετά το πέρας της εργασίας και παρατηρώντας τα αποτελέσματα, θα δει κανείς πως όσον αφορά τις ποινές, οι μεν ποινές της γωνίας στροφής ήταν ιδιαίτερα επιτυχημένες. Δυστυχώς όμως οι ποινές όσον αφορά το πάχος του πτερυγίου συχνά παραβιάζονταν και ίσως θεωρήθηκαν υπερβολικοί. Όμως βρέθηκαν άκρως απαραίτητοι, μιας και η τάση ήταν για δημιουργία πολύ λεπτών πτερυγίων, και μονάχα έτσι αποτρέπονταν αυτός ο κίνδυνος.

Εν κατακλείδι μπορούμε να πούμε πως η μέθοδος Nash αποτελεί μία αποδοτική μέθοδο κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, ιδίως εάν προβλεφθούν οι παραπάνω παράμετροι του προβλήματος. Παρουσιάζεται ιδιαίτερα πρόσφορη μάλιστα για τη χρήση σε δικτυομένους υπολογιστές, μιας και από τη φύση της, η απαιτούμενη εργασία διαμοιράζεται σε παίκτες ανεξάρτητα μεταξύ τους, εκτός από τις στιγμές επικοινωνίας.

## Βιβλιογραφία

1. Elazar Y. and Shreeve R.P. , "Viscous Flow in a Controlled Diffusion Compressor Cascade with Increasing Incidence", Transactions of the ASME, J. of Turbomachinery, Vol. 12, p.256-26 ,April1990.
2. Mark Drela and Harold Youngren, "A User's Guide to MISES 2.53", MIT Computational Aerospace Sciences Laboratory, December1998
3. Ρούσσος Ιωάννης, Σχεδίαση Αεροτομής Βέλτιστου Πτερυγίου Συμπιεστή σε πολλαπλά Σημεία Λειτουργίας, Αθήνα, 2005
4. McCain Roger A., Strategy and Conflict: An Introductory Sketch of Game Theory
5. en.wikipedia.org