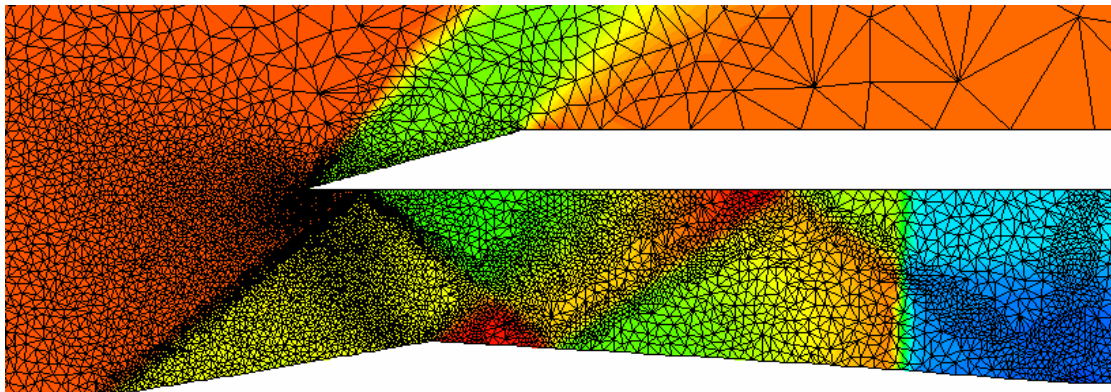




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ

Υπολογιστικό Θέμα:
Σχεδίαση μορφής αεραγωγού εισόδου κυλοαεριοθητή
(ramjet) με βέλτιστη συμπεριφορά σε υπερηχητικές
συνθήκες ροής.



Ιωάννης Χ. Καμπόλης

Επιβλέπων: Κ.Χ. Γιαννάκογλου

2004

Εισαγωγή

Ο αγωγός εισόδου (air inlet) είναι το εξάρτημα που αναλαμβάνει να οδηγήσει το εργαζόμενο μέσο (συνήθως αέρας) στον κινητήρα για τη συμπίεση, την καύση και την αποτόνωση. Αν και ο ίδιος δεν προσφέρει έργο στην ροή, επηρεάζει ισχυρά την απόδοση της μηχανής και την παραγόμενη ώση. Αγωγοί εισόδου χρησιμοποιούνται σε όλες τις προωθητικές μηχανές: αεριοστροβίλους, αυλοαεριομητές (ramjet) και αυλοαεριομητές υπερηχητικής καύσης (supersonic combustion ramjet – scramjet).

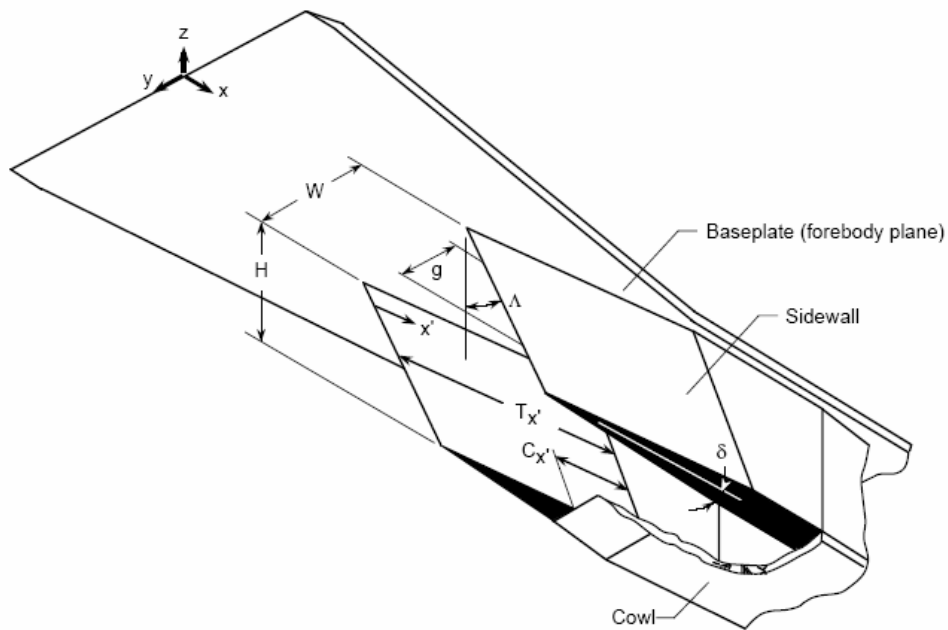
Οι αγωγοί εισόδου διαφέρουν ανάλογα με τη σχετική ταχύτητα οχήματος- ελεύθερης ροής και τον τύπο του κινητήρα που χρησιμοποιείται. Για υποηχητικές ροές χρησιμοποιούνται υποηχητικοί αγωγοί εισόδου, ιδιαίτερα απλοί στην κατασκευή. Ένας τυπικός υποηχητικός αγωγός εισόδου είναι μικρός σε μήκος, έχει παχύ χείλος (το αρχικό τμήμα του αγωγού) και η διατομή του αλλάζει ομαλά. Αντίθετα οι υπερηχητικοί αγωγοί εισόδου έχουν οξύ χείλος για να περιορίζουν τις απώλειες των κρουστικών κυμάτων κατά τη διάρκεια της πτήσης και μπορεί να έχουν απότομες αλλαγές γεωμετρίας.



**Υποηχητικός Αγωγός Εισόδου
σε κινητήρα αεροσκάφους**

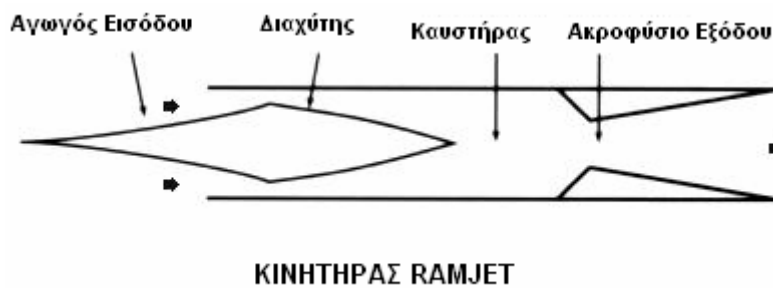


**Υπερηχητικός Αγωγός Εισόδου
σε κινητήρα αεροσκάφους**



Αεραγωγός εισόδου για κινητήρα Ramjet

Ειδική κατηγορία υπερηχητικών αγωγών εισόδου είναι εκείνοι που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες scramjet. Για να εντοπιστούν οι διαφορές θα αναφερθούμε γρήγορα στους **αυλοαεριοθητές (ramjet)** και στους **αυλοαεριοθητές υπερηχητικής καύσης (scramjet)**. Οι αυλοαεριοθητές δεν έχουν κινητά μέρη όπως οι στροβιλοκινητήρες, αντίθετα επιτυγχάνουν συμπίεση του εργαζόμενου μέσου μέσω της ίδιας της κίνησης του οχήματος. Ο αέρας(εργαζόμενο μέσο) που εισέρχεται στον αγωγό εισόδου με υπερηχητική ταχύτητα επιβραδύνεται σε υποηχητική ταχύτητα με ταυτόχρονη συμπίεση και μετά αναμειγνύεται με το καύσιμο. Η διόγκωση των θερμών αερίων μετά την καύση του μίγματος αέρα- καυσίμου επιταχύνει τα καυσαέρια. Το παραγόμενο έργο ισούται με τη διαφορά των κινητικών ενεργειών του αέρα εισαγωγής από αυτήν των καυσαερίων (αμελητέα συνεισφορά στο παραγόμενο έργο έχει και η διαφορά της πίεσης εισόδου -εξόδου). Οι κινητήρες ramjet δεν είναι αυτοεκκινούμενοι: ένα βοηθητικό προωθητικό σύστημα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να επιταχύνει το όχημα πάνω από την ηχητική ταχύτητα ώστε να μπορεί να γίνει υπερηχητική συμπίεση στον αγωγό εισόδου.



Ο κινητήρας scramjet διαφέρει από τον ramjet στην ταχύτητα του εργαζόμενου μέσου κατά την καύση: η ροή είναι υπερηχητική στην φάση της καύσης. Οι κινητήρες scramjet χρησιμοποιούνται για ταχύτητες μεγαλύτερες των 5 Mach και όπως και οι ramjet δεν είναι αυτοεκκινούμενοι.



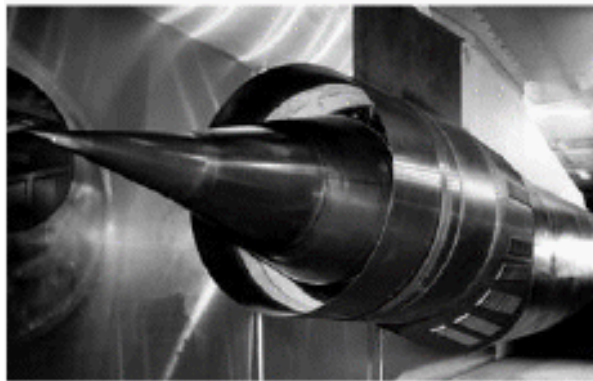
Οι αγωγοί εισόδου κατάλληλοι για τους αυλοαεριοθητές υπερηχητικής καύσης (scramjet) πρέπει να έχουν τέτοια γεωμετρία ώστε να συμπιέζουν το εργαζόμενο μέσο χωρίς να επιβραδύνουν τη ροή σε υποηχητική. Οι κινητήρες scramjet βρίσκονται ακόμη σε στάδιο έρευνας και χρησιμοποιούνται μονάχα σε πειραματικά οχήματα.

Στην εργασία αυτή δεν θα εμβραθύνουμε περισσότερο σε τέτοιου είδους αγωγούς εισόδου. Θα ασχοληθούμε με συμβατικούς υπερηχητικούς αγωγούς εισόδου οι οποίοι έχουν σχεδόν τις ίδιες επιθυμητές ιδιότητες είτε προορίζονται για κινητήρες ramjet είτε για αεριοστροβίλους, με τους πρώτους να είναι πιο απαιτητικοί σε ποιότητα σχεδίασης για τον εξής λόγο: Στους κινητήρες ramjet το εργαζόμενο μέσο συμπιέζεται αποκλειστικά και μόνο

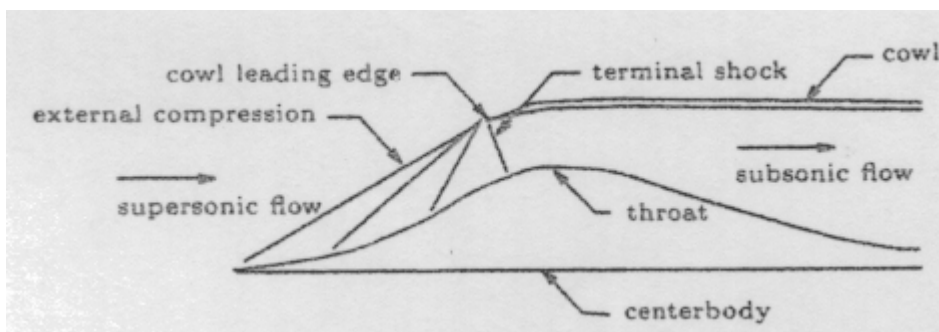
στον αεραγωγό εισόδου, ενώ στους στροβιλοκινητήρες μετά τον αγωγό εισόδου ακολουθεί ο συμπιεστής, από τον οποίο διέρχεται το εργαζόμενο μέσο πριν την καύση.

Συμβατικοί Υπερηχητικοί Αγωγοί Εισόδου

Οι αγωγοί εισόδου υψηλών ταχυτήτων (υπερηχητικών) είναι απαραίτητα δομικά στοιχεία των μηχανών πρόωσης στην αεροναυπηγική (αεριοστρόβιλοι) και στην πυραυλική (αυλοαεριοθητές). Ο λειτουργικός στόχος που εξυπηρετούν είναι η τροφοδοσία της μηχανής με συγκεκριμένη παροχή αέρα μέγιστης δυνατής ολικής πίεσεως. Δευτερεύων στόχος, αλλά όχι αμελητέος είναι η προσαγωγή του εργαζόμενου μέσου με όσο το δυνατόν περισσότερο ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας στη μηχανή. Ο δεύτερος αυτός στόχος παρουσιάζει επιπλέον δυσκολίες επειδή ο αγωγός εισόδου βρίσκεται ήδη μέσα σε μη ομοιόμορφο πεδίο ροής, αφού τοποθετείται πάνω στην άτρακτο του οχήματος. Η ροή στους συμβατικούς υπερηχητικούς αγωγούς εισόδου εισέρχεται υπερηχητική και μετά από μια σειρά κυμάτων κρούσης που συμπιέζουν το εργαζόμενο μέσο εξέρχεται υποηχητική (ουσιαστική διαφορά με αεραγωγούς κινητήρων scramjet, όπου η ροή απαιτείται να εξέλθει από τον αγωγό υπερηχητική). Τυπική μορφή είναι η αξονοσυμμετρική ή η τετραγωνική με απλή ή σύνθετη γεωμετρία, ανάλογα με τις ελάχιστες απαιτήσεις στην απόδοση. Γενικά υπάρχουν δύο τύποι αγωγών εισόδου ως προς τη θέση συμπίεσης του εργαζόμενου μέσου: οι *αγωγοί εξωτερικής συμπίεσης* και οι *αγωγοί μίκτης συμπίεσης*.

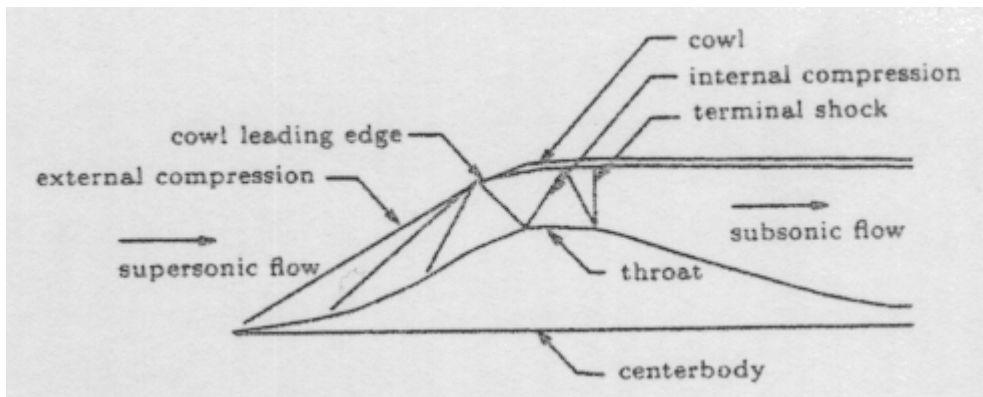


Αξονοσυμμετρικός Υπερηχητικός Αγωγός Εισόδου



Αγωγός Εξωτερικής Συμπίεσης

Στην πιο πάνω εικόνα απεικονίζεται ένας αγωγός εισόδου εξωτερικής συμπίεσης. Διακρίνονται το κάλυμμα (cowl), ο κορμός (centerbody), ο λαιμός (throat) καθώς και η υπερηχητική και η υποηχητική περιοχή της ροής. Στους αγωγούς εξωτερικής συμπίεσης η ροή επιβραδύνεται σε υποηχητική πριν την ακμή πρόσπτωσης του καλύμματος του αγωγού μέσω μίας σειράς πλάγιων κυμάτων κρούσης (ή ιδανικότερα μέσω ισεντροπικής συμπίεσης) μετά τα οποία ακολουθεί ένα σχεδόν κάθετο κύμα κρούσης (terminal shock – τελικό κύμα κρούσης). Η ροή επιβραδύνεται περαιτέρω στο αποκλίνον τμήμα του αγωγού εισόδου (υποηχητικός διαχύτης).



Αγωγός Μικτής Συμπίεσης

Στους αγωγούς μικτής συμπίεσης η ροή επιβραδύνεται τόσο ανάντι όσο και κατάντι της ακμής πρόσπτωσης του καλύμματος του αγωγού- τα κύματα κρούσης κατάντι της ακμής πρόσπτωσης του καλύμματος συχνά αναφέρονται ως σύστημα εσωτερικών κυμάτων κρούσης. Το τελικό κύμα κρούσης βρίσκεται στην αποκλίνουσα περιοχή του αγωγού επιτυγχάνοντας σταθερότητα ως προς τις μικρές διαταραχές της ροής.

Χαρακτηριστικά μεγέθη υπερηχητικών αγωγών εισόδου

Η αποτελεσματικότητα του αγωγού εισόδου ως προς την επιβράδυνση της ροής αξιολογείται με το βαθμό ανάκτησης ολικής πίεσης, δηλαδή το πηλίκο της μέσης ολικής πίεσης εξόδου \bar{p}_t από τον αγωγό (και είσοδο στον κινητήρα) προς την ολική πίεση της ελεύθερης ροής $p_{t\infty}$:

$$\eta = \frac{\bar{p}_t}{p_{t\infty}}$$

Σε μία ιδανική, πλήρως ισεντροπική συμπίεση ο βαθμός ανάκτησης ολικής πίεσης θα ήταν ίσος με την μονάδα ($\eta = 1$).

Ο συντελεστής παροχής ορίζεται ως το πηλίκο της παροχής εισόδου του αγωγού \dot{m} προς την μέγιστη παροχή εισόδου \dot{m}_{\max} :

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\max}}$$

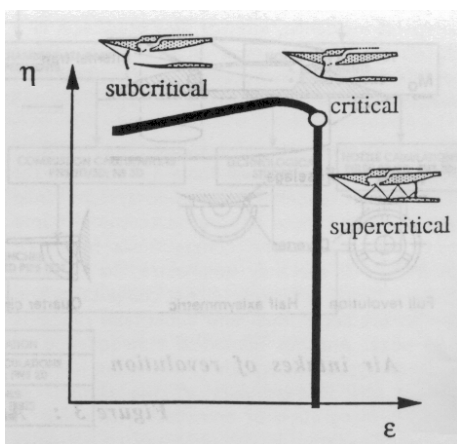
Επίσης ορίζεται ο λόγος διατομών ως εξής:

$$x = \frac{\text{Διατομή Εισόδου}}{\text{Διατομή Λαιμού}}$$

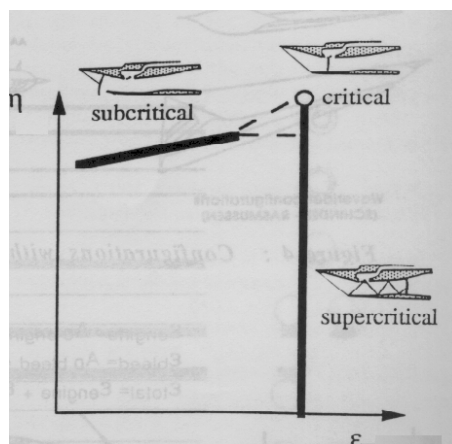
Για να σχηματιστεί το σύστημα των εσωτερικών κυμάτων κρούσης σε αγωγό μικτής συμπίεσης πρέπει ο λόγος διατομών να έχει τιμή μικρότερη από την εκείνη που απαιτείται για ηχητική κατάσταση της ροής στον λαιμό του αγωγού (και παροχή \dot{m}_{\max}). Ο λόγος διατομών συνήθως υπολογίζεται κατά την φάση της σχεδίασης (για τον γρήγορο αποκλεισμό των γεωμετριών που οδηγούν σε αεραγωγούς εξωτερικής συμπίεσης) μέσω μονοδιάστασης μη-συνεκτικής ανάλυσης ή από πίνακες ισεντροπικής ροής

χρησιμοποιώντας τις σχέσεις **Rankine- Hugoniot**, την εξωτερική γεωμετρία του αγωγού εισόδου και τον αριθμό Mach της αδιατάρακτης ροής. Σε περίπτωση που ο λόγος διατομών έχει μία πολύ μεγάλη τιμή τότε δεν θα σχηματισθεί το σύστημα των εσωτερικών κυμάτων κρούσης. Αντί αυτού θα σχηματισθεί ένα σχεδόν κάθετο κύμα κρούσης ανάντι της ακμής πρόσπτωσης του καλύμματος του αγωγού, το οποίο θα επιφέρει μεγάλη πτώση τόσο στην ολική πίεση εξόδου του αγωγού όσο και στην παροχή.

Η απόδοση ενός αγωγού εισόδου περιγράφεται από μία μονάχα καμπύλη για δεδομένη ταχύτητα πτήσης και γωνία πρόσπτωσης. Η καμπύλη απεικονίζει τον συντελεστή ανάκτησης ολικής πίεσης συναρτήσει του συντελεστή παροχής και η τυπική της μορφή είναι η εξής για αγωγούς εξωτερικής συμπίεσης αριστερά και μικτής συμπίεσης δεξιά:



Χαρακτηριστική αγωγού εξωτερικής συμπίεσης



Χαρακτηριστική αγωγού μικτής συμπίεσης

Στην καμπύλη αυτή μπορούμε να ξεχωρίσουμε τρεις περιοχές:

- **Υπερκρίσιμη λειτουργία (Supercritical Running):** το κάθετο κύμα κρούσης που χωρίζει την υπερηχητική από την υποηχητική ροή βρίσκεται μέσα στον αγωγό κατάντι της ακμής πρόσπτωσης του καλύμματος για τους αγωγούς εξωτερικής συμπίεσης, ενώ για τους αγωγούς μικτής συμπίεσης το τελικό κύμα κρούσης βρίσκεται μετά το λαιμό.
- **Κρίσιμη λειτουργία (Critical Running):** Το κύμα κρούσης βρίσκεται ακριβώς στην ακμή πρόσπτωσης του καλύμματος για αγωγούς εξωτερικής συμπίεσης, ενώ για αγωγούς μικτής συμπίεσης το τελικό κύμα κρούσης βρίσκεται ακριβώς στο λαιμό.
- **Υποκρίσιμη λειτουργία (Subcritical Running):** Για τους αγωγούς εξωτερικής συμπίεσης το κάθετο κύμα κρούσης βρίσκεται ανάντι της ακμής πρόσπτωσης του καλύμματος. Για τους αγωγούς μικτής συμπίεσης το φαινόμενο είναι πιο σύνθετο: αρχικά ένα μη μόνιμο κύμα κρούσης εμφανίζεται πριν το λαιμό, το οποίο καταλήγει επίσης ανάντι της ακμής πρόσπτωσης του καλύμματος του αγωγού.

Τυπικός στόχος βελτιστοποίησης των αγωγών εισόδου είναι η μεγιστοποίηση του συντελεστή ανάκτησης ολικής πίεσης (ιδανικά ισεντροπική συμπίεση) με περιορισμούς σχετικά με την παροχή λειτουργίας και τον σχηματισμό ή μη του συστήματος εσωτερικών κυμάτων κρούσης.

Σχεδίαση- Βελτιστοποίηση υπερηχητικών αγωγών εισόδου

Στο παρελθόν οι μελέτες αγωγών εισόδου περιορίζονταν σε δοκιμές σε αεροδυναμικές σήραγγες. Η μέθοδος, εκτός από ιδιαίτερος χρονοβόρα και ακριβή, περιόριζε τις μελέτες στις προδιαγραφές των εγκαταστάσεων. Έτσι ήταν πολύ δύσκολο να δοκιμαστούν αγωγοί εισόδου για μεγάλες ταχύτητες πτήσης. Με την πρόοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών, της αριθμητικής ανάλυσης και της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής μεγάλο μέρος της σχεδίαση των αγωγών εισόδου γίνεται πλέον με προσομοιώσεις σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

Οι υπολογιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται χωρίζονται στις εμπειρικές μεθόδους και στις αριθμητικές. Οι εμπειρικές μέθοδοι χρησιμοποιούν την μονοδιάστατη ανάλυση συμπίεστου ρευστού σε συνδυασμό με τις εξισώσεις των κυμάτων κρούσης για να προβλέψουν την συμπίεση του εργαζομένου μέσου και βασίζονται σε εμπειρικά δεδομένα από σήραγγες για τον υπολογισμό των απωλειών. Οι αριθμητικές μέθοδοι είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής του αγωγού εισόδου, τις πιέσεις στα τοιχώματα, την καταλληλότερη θέση του αγωγού εισόδου πάνω στην άτρακτο και τον υπολογισμό του πλήρους πεδίου ροής. Η σχεδίαση αγωγών εισόδου ακολουθεί τέσσερις φάσεις [14].

Αρχικά επιλύονται οι γεωμετρικές με χρήση μονοδιάστατης ανάλυσης για να επιβεβαιωθεί ότι επιτυγχάνεται η απαιτούμενη παροχή μάζας (ΦΑΣΗ I). Κατόπιν χρησιμοποιείται ένας επιλύτης των εξισώσεων Euler για να προβλεφθεί η θέση των κυμάτων κρούσης, η τελική παροχή με ακρίβεια καθώς και ο συντελεστής ανάκτησης ολικής πίεσης. Διερευνάται παραμετρικά η απόδοση του αγωγού εισόδου σε διάφορες γωνίες πρόσπτωσης και σε ένα εύρος αριθμών Mach ώστε να επιλεγεί εκείνη που συμπεριφέρεται βέλτιστα σε ένα εύρος συνθηκών πτήσης. Η επίλυση των εξισώσεων Euler προτιμάται σε αυτήν τη φάση σχεδίασης γιατί οι απώλειες εξαιτίας των κυμάτων κρούσης είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες λόγω των συνεκτικών φαινομένων του εργαζόμενου μέσου και το κόστος σε υπολογιστικό χρόνο πολύ μικρότερο. Μια περίπτωση που η επιλύονται οι εξισώσεις Navier- Stokes σε αυτήν τη φάση σχεδίασης, αντί των εξισώσεων Euler, είναι η περίπτωση που συμπεριλαμβάνει αποκόλληση της ροής πάνω στην άτρακτο, ανάντι του αγωγού εισόδου. (ΦΑΣΗ II)

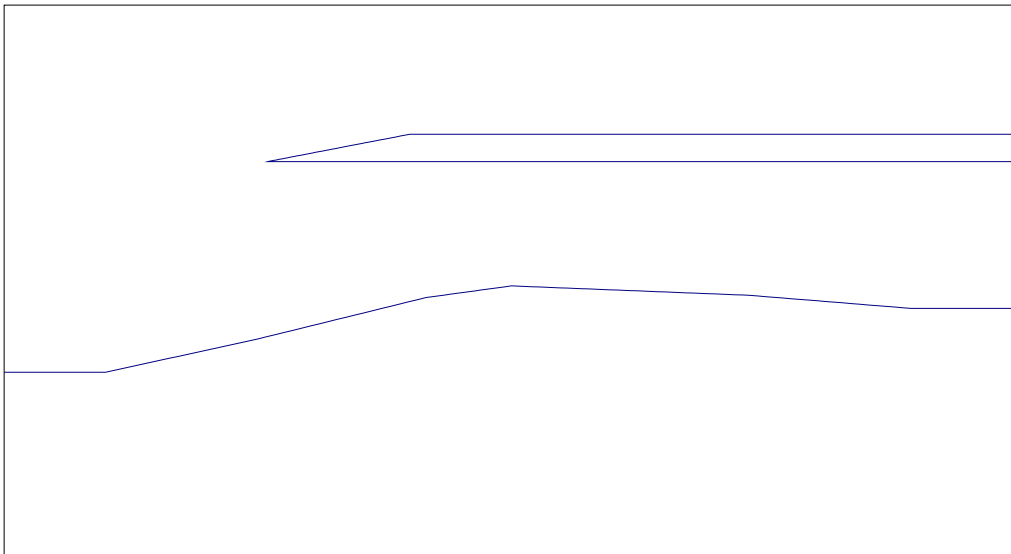
Όταν βρεθεί μία γεωμετρία αγωγού με επιθυμητές ιδιότητες διερευνάται η βέλτιστη θέση του στην άτρακτο και οι επιπτώσεις της στον ολικό συντελεστή άνωσης και οπισθέλκουσας του οχήματος με επίλυση των εξισώσεων Navier – Stokes. Μία επαλήθευση των αποτελεσμάτων με επίλυση των εξισώσεων Navier- Stokes είναι πάντα απαραίτητη για φαινόμενα αποκόλλησης, επίδρασης κυμάτων κρούσης με το οριακό στρώμα (shock induced separation, shock- boundary layer interaction). (ΦΑΣΗ III)

Στο τέλος επαλήθευση της συμπεριφοράς του αγωγού εισόδου γίνεται με την κατασκευή ενός πρωτοτύπου και με την χρήση πειραματικών διατάξεων.(ΦΑΣΗ IV).

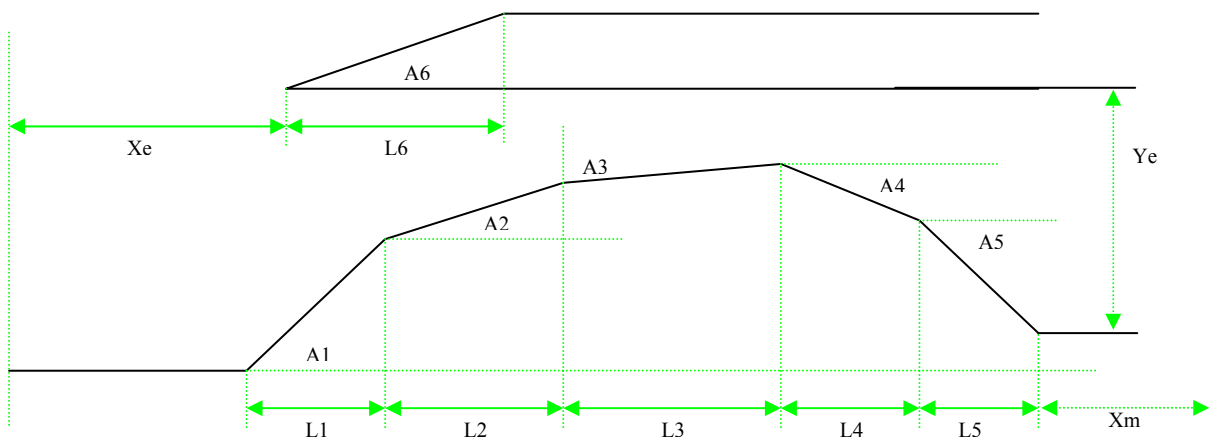
Η παρούσα εργασία θα περιορισθεί μονάχα στην δεύτερη φάση σχεδίασης – βελτιστοποίησης υπερηχητικών αγωγών εισόδου.

Ορισμός Προβλήματος

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την επανασχεδίαση ενός υπερηχητικού αξονοσυμμετρικού αγωγού εισόδου. Ο αρχικός αγωγός εισόδου, ο οποίος θα καλείται αγωγός αναφοράς (reference) είναι κατάλληλος συνθήκες πτήσης πολύ υψηλών ταχυτήτων και μεγάλων υψομέτρων με αριθμό Mach ονομαστικού σημείου σχεδίασης (design point) $M_{DP} = 4$ [13]. Ο αγωγός θα σχεδιαστεί για πτήση με αριθμό Mach 2. Στο πιο κάτω σχήμα απεικονίζεται μία τομή του αγωγού αναφοράς.



Παραμετροποίηση



Ο αγωγός εισόδου μπορεί να σχηματιστεί χρησιμοποιώντας ως ελεύθερες παραμέτρους τις τιμές έξι (6) γωνιών και εννέα (9) ευθυγράμμων τμημάτων όπως στο πιο πάνω σχήμα. Η πιο πάνω παραμετροποίηση περιέχει τον περιορισμό στην διάμετρο εξόδου του αγωγού που καθορίζεται από τον κινητήρα αν κατά την διάρκεια της σχεδίασης η μεταβλητή Y_e

παραμείνει σταθερή και ίση με την ακτίνα εισόδου του κινητήρα. Οι γωνίες A1, A2 πρέπει να είναι θετικές ενώ η γωνία $90^\circ - A3$ πρέπει επίσης να είναι θετική (περιορισμοί που καλύπτουν την θετική κλίση των τριών πρώτων ευθυγράμμων τμημάτων). Οι γωνίες A4 και A5 λαμβάνονται επίσης θετικές ώστε τα ευθύγραμμα τμήμα L4 και L5 να έχουν αρνητική κλίση. Θετική λαμβάνεται και η γωνία A6. Το μήκος X_e είναι σταθερό ως κατασκευαστικός περιορισμός, ενώ ανάλογος περιορισμός λαμβάνεται και για το μέγιστο μήκος του ευθύγραμμου τμήματος X_m που καταλήγει στον κινητήρα. Συνολικά δηλαδή οι 12 ελεύθερες μεταβλητές του προβλήματος είναι οι έξι γωνίες A1, A2, A3, A4, A5 και A6 και τα αντίστοιχα ευθύγραμμα τμήματα L1, L2, L3, L4, L5 και L6.

Στόχος είναι η επανασχεδίαση του αγωγού με μέγιστο συντελεστή ανάκτησης ολικής πίεσης. Ως λειτουργικός περιορισμός επιλέχθηκε η λειτουργία του σε περιορισμένο εύρος αριθμού Mach για την έξοδο του αγωγού εισόδου, λόγω ελλείψεως δεδομένων παροχής εισόδου του κινητήρα (συνεπώς και του αεραγωγού). Ως επιθυμητό βέλτιστο εύρος αριθμού Mach εξόδου για τον αγωγό και εισόδου για τον κινητήρα λαμβάνεται $M_{out}=0.4 - 0.6$, εύρος που επιβλήθηκε ως περιορισμός αντί του περιορισμού συγκεκριμένης παροχής.

Επιλύτης Πεδίου Ροής

Για την επίλυση του πεδίου ροής εντός και εκτός του αεραγωγού χρησιμοποιήθηκε ο αξονοσυμμετρικός επιλύτης των εξισώσεων Euler που προγραμματίστηκε από τον κ. Θ. Ζερβογιάννη [1] στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας στο Ε.Θ.Σ. του Ε.Μ.Π.

Η μέθοδος του προγραμματισμού του αξονοσυμμετρικού επιλύτη ακολουθεί τη βασική δομή του λογισμικού PUMA (**P**arallel **U**nstructured **M**ultigrid **A**dapted-**G**rid) του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του Ε.Μ.Π. Η επίλυση των εξισώσεων Euler επιτυγχάνεται μέσω της επίλυσης πολλών μονοδιάστατων προβλημάτων Riemann με χρήση του προσεγγιστικού επιλύτη του Roe, μετά από ανάντι διακριτοποίηση σε κάθε ακμή του μη-δομημένου πλέγματος. Η ακρίβεια δεύτερης τάξης επιτυγχάνεται με παρεμβολή των μεταβλητών στα όρια των υπολογιστικών κυψελών με χρήση του αναπτύγματος Taylor ενώ η μονοτονία της λύσης εξασφαλίζεται με χρήση συναρτήσεων περιορισμού (limiters). Η σύγκλιση επιταχύνεται περαιτέρω με χρήση τοπικού χρονικού βήματος και τελικά το σύστημα των εξισώσεων επιλύεται με σημειακά πεπλεγμένο σχήμα Jacobi.

Οι εξισώσεις Euler γραμμένες σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων με μηδενικές παραγώγους κατά την περιφερειακή κατεύθυνση $\frac{\partial(\bullet)}{\partial\theta}$ είναι οι εξής:

$$\frac{\partial \bar{w}^*}{\partial t} + \frac{\partial \bar{F}^*}{\partial r} + \frac{\partial \bar{G}^*}{\partial z} = \bar{K}^*$$

$$\bar{w}^* = (\rho^* \quad \rho^* u_r \quad \rho^* u_z \quad \rho^* u_\theta \quad \rho^* E)^T$$

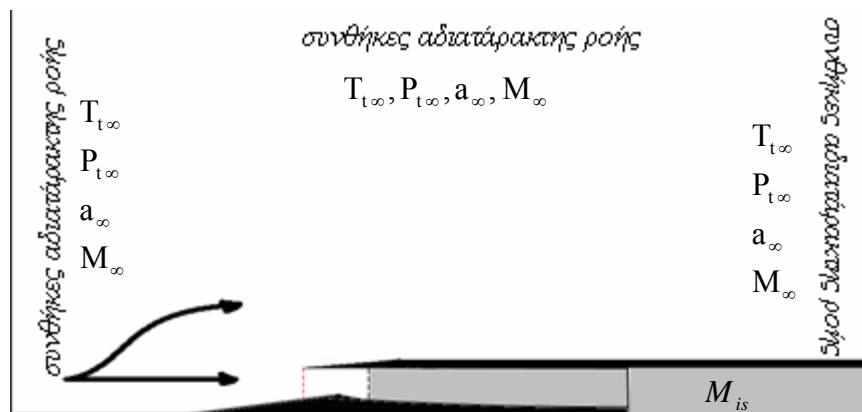
$$\bar{F}^* = \begin{bmatrix} \rho^* u_r \\ \rho^* u_r^2 + p^* \\ \rho^* u_r u_z \\ \rho^* u_r u_\theta \\ u_r (\rho^* E + p^*) \end{bmatrix}, \quad \bar{G}^* = \begin{bmatrix} \rho^* u_r \\ \rho^* u_r u_z \\ \rho^* u_z^2 + p^* \\ \rho^* u_z u_\theta \\ u_z (\rho^* E + p^*) \end{bmatrix}, \quad \bar{K}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\rho^* u_\theta^2 + p^*}{r} \\ 0 \\ -\frac{\rho^* u_r u_\theta}{r} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Οι μεταβλητές της πίεσης και της πυκνότητας (p και ρ αντίστοιχα) αντικαταστάθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές πολλαπλασιασμένες με την ακτίνα r σε κάθε θέση έτσι ώστε οι όροι των χωρικών και των χρονικών παραγώγων να διατηρήσουν την συντηρητική γραφή τους:

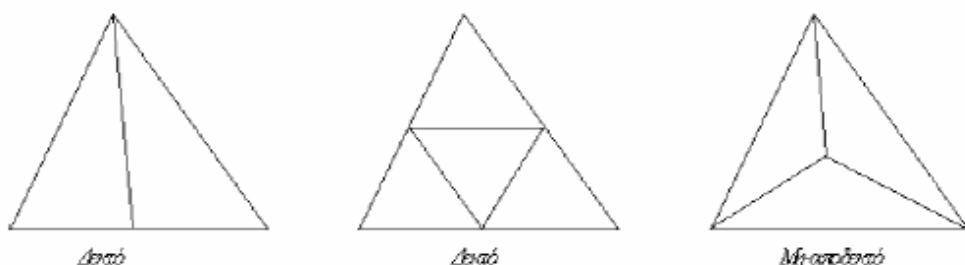
$$\rho^* = r\rho \quad \text{και} \quad p^* = rp$$

Στις διδιάστατες αξονοσυμμετρικές εξισώσεις Euler εκτός από τους όρους πηγής έχει προστεθεί και η εξίσωση διατήρησης της ορμής κατά την περιφερειακή συνιστώσα, η οποία ικανοποιείται ταυτοτικά (είναι μηδενική) σε περίπτωση απουσίας περιφερειακής συνιστώσας της ταχύτητας. Ο προσεγγιστικός επιλύτης του Roe εκφράζεται με παρόμοιο τρόπο όπως στις εξισώσεις του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων με αντικατάσταση της πυκνότητας με την τιμή ρ^* του αξονοσυμμετρικού προβλήματος.

Για την επίλυση του προβλήματος επιλέχθηκε ο επιλύτης των μη-δομημένων πλεγμάτων με συνάρτηση περιορισμού (limiter) τη μονοδιάστατη συνάρτηση περιορισμού των Van Leer – Van Albada. Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν ήταν ολική θερμοκρασία ($T_{t\infty}$), ολική πίεση ($P_{t\infty}$), μηδενική γωνία εισόδου (α_∞), αριθμός Mach (M_∞) πτήσης στην ελεύθερη-αδιατάρακτη ροή και ο ισεντροπικός αριθμός Mach στην έξοδο του αγωγού (M_{is}). Η επιπλέον οριακή συνθήκη (5 αντί για 4) του ισεντροπικού αριθμού Mach στην έξοδο του αγωγού καθορίζει τη θέση του κρουστικού κύματος μέσα στον αγωγό και δεν λαμβάνεται υπόψη λόγω του ανάντι σχήματος εάν δεν υπάρχει κρουστικό κύμα και η ροή είναι εξ' ολοκλήρου υπερηχητική. Για να διατηρηθεί η πληροφορία της πίεσης εξόδου που δόθηκε ως οριακή συνθήκη μέσω του ισεντροπικού αριθμού Mach το πεδίο ροής θα πρέπει να περιλαμβάνει τόσο υπερηχητική όσο και υποηχητική αρχικοποίηση. Η υποηχητική αρχικοποίηση θα πρέπει να περιορίζεται στο εσωτερικό του αεραγωγού (γκρίζα περιοχή του σχήματος), ενώ το υπόλοιπο πεδίο αρχικοποιείται με συνθήκες αδιατάρακτης ροής, όπως στο πιο κάτω σχήμα.



Για επιπλέον ακρίβεια στη λύση χρησιμοποιείται προσαρμογή του πλέγματος με αισθητήριο την κλίση του αριθμού Mach από κόμβο σε κόμβο. Για την διαδικασία της προσαρμογής μαρκάρονται οι πλευρές των τριγώνων του μη-δομημένου πλέγματος με τη βοήθεια ενός κριτηρίου (σε αυτήν την εργασία χρησιμοποιήθηκε ως τέτοιο η μεταβολή του αριθμού Mach) και ανάλογα με το πλήθος των πλευρών που έχουν προσημειωθεί διασπάζεται το αρχικό πλεγματοεικό στοιχείο με δύο μόνο τρόπους που απεικονίζονται στο πιο κάτω σχήμα μαζί με έναν μη-αποδεκτό τρόπο[16].



Τυπικός χρόνος επίλυσης του πεδίου ροής γύρω από έναν αεραγωγό σε υπολογιστή Intel Pentium 4 με συχνότητα λειτουργίας 2.4GHz και μνήμη RAM 1GB είναι 1.5 ώρες με μία μονάχα προσαρμογή του πλέγματος στη λύση. Ο χρόνος επίλυσης είναι τόσο μεγάλος λόγω

του μεγάλου πλέγματος που χρησιμοποιείται και της επιπλέον πύκνωσής του από την προσαρμογή, της ύπαρξης κυμάτων κρούσης αλλά και εξαιτίας της φυσικής δυσκολίας επίλυσης του πεδίου ροής με επιβολή της πίεσης στην έξοδο του αγωγού.

Εργαλείο Σχεδίασης - Βελτιστοποίησης

Ως εργαλείο σχεδίασης- βελτιστοποίησης του αεραγωγού χρησιμοποιείται εξελικτικός αλγόριθμος. Το εργαλείο βελτιστοποίησης αποτελεί υποσύνολο του λογισμικού EASY [2] στο εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών αρχικά προγραμματισμένο σε γλώσσα C++, σε Fortran 77 (F77). Η έκδοση αυτή προγραμματίστηκε για τις ανάγκες της εργασίας αυτής. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι υπολογιστικά μοντέλα τα οποία με μία μέθοδο αντίστοιχη της φυσικής προσαρμογής των οργανισμών στο περιβάλλον επιλύουν προβλήματα μέσω της εξέλιξης υποψηφίων λύσεων. Κάθε λύση χαρακτηρίζεται μονοσήμαντα από ένα μοναδικό σύνολο(set) τιμών των παραμέτρων του προβλήματος προς επίλυση. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι χειρίζονται πληθυσμούς υποψηφίων λύσεων δίνοντας περισσότερες ευκαιρίες επιβίωσης (αναπαραγωγή, παραμονή στον πληθυσμό) σε εκείνες ικανοποιούν περισσότερο ένα κριτήριο (π.χ. στην λύση εκείνη που ελαχιστοποιεί μία αντικειμενική συνάρτηση). Με τον όρο αναπαραγωγή περιγράφεται η διαδικασία από την οποία μία καινούρια λύση (άτομο) παράγεται από δύο ή περισσότερες ήδη υπάρχουσες. Η παρούσα εργασία δεν θα σταθεί στους εξελικτικούς αλγορίθμους. Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στις βιβλιογραφικές αναφορές [2], [3]. Εξαιτίας του μεγάλου χρόνου αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης (επίλυση του πεδίου ροής γύρω αλλά και εντός ενός αεραγωγού) κρίθηκε σκόπιμη ενέργεια η παραλληλία του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και η χρήση της μεθόδου της προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης.

Παραλληλία- Βάση Δεδομένων

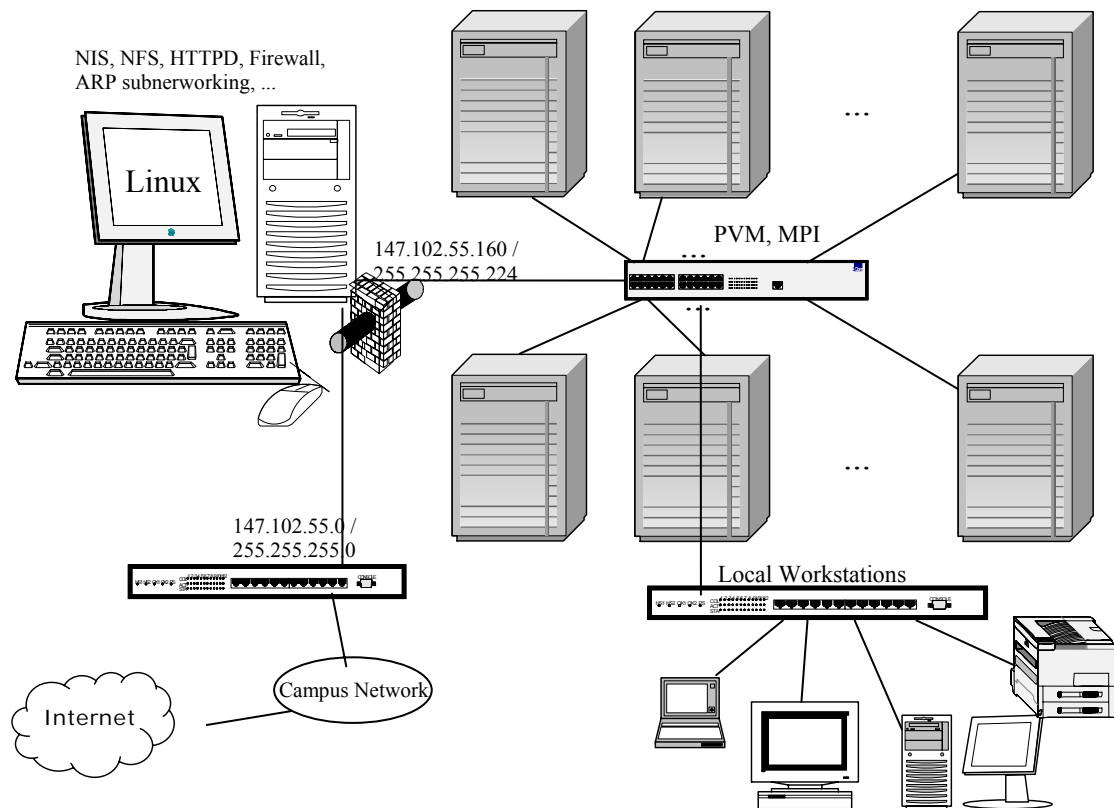
Η διαθέσιμη στο **ΕΘΣ/ΕΜΠ** συστοιχία προσωπικών υπολογιστών, με την ονομασία **ΒΕΛΟΣ**, διαθέτει 38+1(server) επεξεργαστές, που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για παράλληλη επεξεργασία. Πρόκειται για ετερογενές σύστημα, λόγω των συνεχών αναβαθμίσεων του με προσθήκη νέων υπολογιστικών μονάδων. Αυτή τη στιγμή, η συστοιχία ΒΕΛΟΣ αποτελείται από:

- 6 Διεπεξεργαστικές Μονάδες – PIII στα 500 MHz,
- 2 Διεπεξεργαστικές Μονάδες – PIII στα 1000 MHz,
- 12 Μονάδες – P4 στα 2.4 GHz
- 8 Μονάδες Athlon 64 3000+
- 2 Μονάδες P4 στα 3.0 GHz
- 1 Διακομιστή – P4 στα 3.0 GHz

Βασικά στοιχεία του Συστήματος:

- RAM: 512-2048MB ανά Μονάδα
- NIC: 3COM/Intel Fast/Gigabit Ethernet Cards
- Switches: 3COM Fast Ethernet Switches, 3COM Gigabit Ethernet Switches
- O/S: RedHat Linux 8, RedHat Linux 9, Fedora Core 2,
- Πρωτόκολλα-βιβλιοθήκες: παράλληλης Επεξεργασίας PVM, MPI, Επικοινωνίας SSH για εξωτερική πρόσβαση, RSH, RLOGIN για επικοινωνία μεταξύ των μονάδων.

Στο διακομιστή επιπρόσθετα λειτουργούν υπηρεσίες κεντρικής διαχείρισης των χρηστών (NIS), διαμοίρασης μόνιμου αποθηκευτικού χώρου (NFS), ασφάλειας (Firewall) και διαδικτύου (http server).



Για αποφυγή άσκοπων αξιολογήσεων απαιτείται ένας έξυπνος αλγόριθμος παραλληλίας. Κάθε γενιά του εξελικτικού αλγορίθμου περιλαμβάνει λ υποψήφιες λύσεις που πρέπει να αξιολογηθούν, δηλαδή απαιτούνται λ κλήσεις του επιλύτη ροής. Έστω ότι υπάρχουν ν διαθέσιμοι επεξεργαστές για ίσο αριθμό κλήσεων του επιλύτη ροής. Ο εξελικτικός αλγόριθμος ψάχνει σε μία βάση δεδομένων αν έχει αξιολογήσει στο παρελθόν οποιαδήποτε από τα λ άτομα της τρέχουσας γενιάς. Έστω ότι βρίσκει κ από αυτά και ανακτά τις τιμές καταλληλότητας από την βάση δεδομένων τότε παραμένουν $\lambda - \kappa$ προς αξιολόγηση. Αν $\lambda - \kappa \leq \nu$ τότε μπορούν συγχρόνως να αξιολογηθούν όλες οι υποψήφιες λύσεις. Αν $\lambda - \kappa > \nu$ τότε γίνονται ν κλήσεις του επιλύτη ροής, μία από κάθε επεξεργαστή για μία υποψήφια λύση. Οι υπόλοιπες μπαίνουν σε μία ουρά (queue) εξυπηρέτησης και περιμένουν τον πρώτο διαθέσιμο επεξεργαστή. Κάθε φορά που μία υποψήφια λύση τελειώνει την φάση της αξιολόγησης (συγκρίνει ή αποτυγχάνει ο επιλύτης ροής) ενημερώνεται η βάση δεδομένων. Κατόπιν το επόμενο άτομο (υποψήφια λύση) που βρίσκεται στην ουρά εξυπηρέτησης ελέγχει την ανανεωμένη πλέον βάση δεδομένων και εάν δεν υπάρχει ταυτόσημη εγγραφή αποστέλλεται για αξιολόγηση. Σε περίπτωση που υπάρχει ταυτόσημη εγγραφή ανακτάται η τιμή καταλληλότητας και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία για τα υπόλοιπα άτομα της ουράς μέχρι αυτά να εξαντληθούν.

Με αυτόν τον τρόπο αξιοποιούνται οι υπολογιστικοί πόροι με τον μέγιστο βαθμό απόδοσης (ελάχιστος νεκρός χρόνος- χρόνος αναμονής), σε αντίθεση με ένα σύστημα το οποίο θα ισοκατένυε αρχικά ίσο αριθμό ατόμων σε κάθε επεξεργαστή. Σε τέτοια περίπτωση π.χ. σε ένα σύστημα με 2 επεξεργαστές και 10 άτομα ανά επεξεργαστή υπάρχει η πιθανότητα ο επιλύτης ροής να αποκλίνει πολύ γρήγορα για τα 4 πρώτα άτομα του πρώτου επεξεργαστή.

Αυτό θα έχει ως συνέπεια ο πρώτος επεξεργαστής να τελειώσει νωρίτερα από το δεύτερο, ενώ στην ουρά του δεύτερου θα υπάρχουν ακόμα άτομα για αξιολόγηση. Στον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται σε τέτοια περίπτωση (αποτυχίας 4 ατόμων) ο επεξεργαστής θα τροφοδοτηθεί αμέσως με καινούρια δεδομένα. Επιπλέον, με χρήση της βάσης δεδομένων για αποθήκευση των ατόμων που αξιολογούνται εξοικονομούνται υπολογιστικοί πόροι.

Πρωτόκολλο MPI

Η υλοποίηση του πιο πάνω παράλληλου μοντέλου γίνεται σε επίπεδο διεργασιών βάσει του πρωτοκόλλου **MPI** [4]. Κάθε ηλεκτρονικός υπολογιστής μπορεί να εκτελεί συγχρόνως παραπάνω από μία διεργασία σε περίπτωση π.χ. που διαθέτει παραπάνω του ενός επεξεργαστή. Επιπλέον ο ηλεκτρονικός υπολογιστής που εκτελεί τον εξελικτικό αλγόριθμο μπορεί να εκτελεί και μία διεργασία αξιολόγησης και συγχρόνως να αξιολογεί άτομα του πληθυσμού. Η επιλογή του αριθμού των διεργασιών που εκτελεί ο κάθε Η/Υ μπορεί να αντισταθμίσει την υπεροχή κάποιων Η/Υ σε ταχύτητα έναντι άλλων. π.χ. σε ένα σύστημα Η/Υ με έναν υπολογιστή Α με δύο επεξεργαστές και τριών Β με έναν επεξεργαστή μπορεί ο υπολογιστής Α να εκτελεί συγχρόνως δύο διεργασίες αξιολόγησης και ο καθένας από τους Β μία.

MPI είναι ακρωνύμιο του Message Passing Interface, δηλαδή περιβάλλον μεταφοράς μηνυμάτων. Το MPI αποτελεί ένα σύνολο υπορουτινών που επιτρέπουν τη συγγραφή παράλληλου κώδικα υψηλής απόδοσης μέσω πολλών διεργασιών που ανταλλάσσουν μεταξύ τους μηνύματα. Μέσω των μηνυμάτων που περιέχουν τις τιμές μεταβλητών ή και πινάκων μεταβλητών είναι δυνατή η εκτέλεση ενός παράλληλου προγράμματος σε μία συστοιχία προσωπικών ηλεκτρονικών υπολογιστών σε χρόνο υποπολλαπλάσιο του σειριακού αλγορίθμου.

Εναλλακτική επιλογή αποτελούσε το πρωτόκολλο PVM το οποίο μπορεί και εργάζεται με σταθμούς εργασίας διαφορετικής αρχιτεκτονικής. Προτιμήθηκε το MPI διότι όλοι οι επεξεργαστές βασίζονται στο ίδιο λειτουργικό σύστημα και διότι το MPI είναι ταχύτερο από το PVM στην ανταλλαγή δεδομένων αλλά και στον έλεγχο σφαλμάτων μετάδοσης.

Προσεγγιστική προ-αξιολόγηση

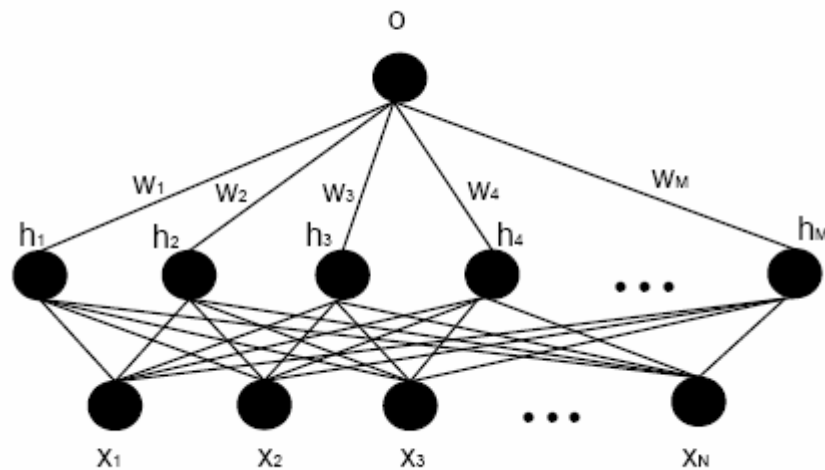
Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι ένα ισχυρό εργαλείο υπολογισμού του ολικού ελαχίστου/μεγίστου ενός συναρτησιακού. Η ανάγκη μεγάλου αριθμού αξιολογήσεων (στην περίπτωση αυτή, επίλυση του πεδίου ροής) καθιστά δύσκολη την εφαρμογή τους σε προβλήματα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Για την αντιστάθμιση του μειονεκτήματός τους αυτού, έχει προταθεί η χρήση της μεθόδου της προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης των υποψηφίων λύσεων [2, 5-7]. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένα προσεγγιστικό μοντέλο (μεταμοντέλο) μικρών απαιτήσεων σε υπολογιστικό κόστος (αντί του χρονοβόρου επιλύτη ροής) για μία πρώτη αξιολόγηση ολόκληρου του πληθυσμού. Κατόπιν οι ένα ποσοστό των καλύτερων λύσεων, βάσει του προσεγγιστικού μοντέλου, επαναξιολογούνται με το ακριβές μοντέλο (επίλυση του πεδίου ροής). Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει σημαντική μείωση του υπολογιστικού κόστους και βαθύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου. Για να είναι δυνατή η χρήση του ίδιου προσεγγιστικού μοντέλου σε μεγάλο εύρος εφαρμογών επιλέγεται ως μεταμοντέλο **τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ΤΝΔ- artificial neural network – ANN)**[9]. Στην παρούσα εργασία το ΤΝΔ που χρησιμοποιήθηκε ήταν **δίκτυο συναρτήσεων ακτινικής βάσης (Radial Basis Function Network- *RBFN*)**.

Ένα τυπικό δίκτυο RBF είναι ένα δίκτυο τριών επιπέδων: το επίπεδο εισόδου (input layer), το κρυμμένο επίπεδο (hidden layer) και το επίπεδο εξόδου. Ο κάθε νευρώνας του

κρυμμένου επιπέδου αντιστοιχίζεται με ένα διάνυσμα διαστάσεως ίσης με την διάσταση του επιπέδου εισόδου, το **κέντρο** της συνάρτησης ακτινικής βάσης (**RBF center**). Ο μη-γραμμικός μετασχηματισμός (συνάρτηση ενεργοποίησης) που συνδέει το επίπεδο εισόδου με το κρυμμένο επίπεδο συναρτάται της Ευκλείδειας απόστασης μεταξύ του δείγματος που έχει παρουσιαστεί στο επίπεδο εισόδου και του κέντρου ακτινικής βάσης του αντίστοιχου νευρώνα και της ρυθμιστικής ποσότητας r . Η απόκριση του δικτύου παράγεται από τον γραμμικό μετασχηματισμό που συνδέει το κρυμμένο επίπεδο με το επίπεδο εξόδου. Τελικά, η απόκριση του δικτύου σχετικά με το δείγμα \mathbf{x} που έχει παρουσιαστεί στο επίπεδο εισόδου δίνεται από την σχέση:

$$O = \sum_{i=1}^M w_i f(\|x - c_i\|_2, r_i)$$

Οι άγνωστοι σε αυτήν την σχέση είναι οι συντελεστές w_i του γραμμικού μετασχηματισμού, οι οποίοι προσδιορίζονται κατά την εκπαίδευση του δικτύου με τον εξής τρόπο: Για κάθε διαθέσιμο σημείο που θα χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση του δικτύου γράφεται η πιο πάνω εξίσωση και κατόπιν επιλύεται ένα γραμμικό σύστημα από το οποίο προκύπτουν οι συντελεστές w_i . Η συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η $f(u, r) = \exp(-u^2/r^2)$.



Δίκτυο RBF

Πριν την χρήση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου απαιτείται η αξιολόγηση ενός ελάχιστου αριθμού υποψηφίων λύσεων, από τις οποίες θα χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες κάθε φορά για την εκπαίδευση του μοντέλου. Ο αριθμός των αξιολογήσεων με το ακριβές μοντέλο (από την στιγμή που θα αρχίσει να χρησιμοποιείται το μεταμοντέλο) καθορίζεται από τον χρήστη. Περισσότερα για τα δίκτυα ακτινικής βάσης, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και το συνδυασμό τους με εξελικτικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης παρατίθενται στις βιβλιογραφικές αναφορές [5- 12].

Διαχείριση Περιορισμών

Σε περίπτωση παραβίασης περιορισμών υιοθετείται η τακτική συναρτήσεων ποινής (Penalty function) [15]. Η αντικειμενική συνάρτηση έχει την μορφή:

$$\phi = F + \sum_i \omega_p \min[\exp(c_i / r_i), c_{\max}]$$

όπου c_i η τιμή του i -οστού περιορισμού ανισότητας $F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0$
 $c_i = \max(F_i(x_1, x_2, \dots, x_n), 0)$

r_i ένας ρυθμιστικός παράγοντας

ω_p τιμή ποινής.

c_{\max} η μέγιστη τιμή που επιτρέπεται να λάβει η συνάρτηση ποινής

F η τιμή καταλληλότητας από τον εξωτερικό επιλύτη (στην παρούσα εργασία από τον επιλύτη ροής)

Η εκθετική κατανομή της ποινής χρησιμοποιείται για την άσκηση μεγάλης πίεσης ικανοποίησης του περιορισμού όταν η λύση απέχει από αυτήν, ενώ δίνει προτεραιότητα στην καταλληλότητα της λύσης όταν ο περιορισμός διαταράσσεται λίγο. Επιβλήθηκε επιπλέον μέγιστη τιμή της συνάρτησης ποινής διότι σε περιπτώσεις που ο περιορισμός i παραβιάζεται κατά πολύ από την υποψήφια λύση, η τιμή της καταλληλότητας του ατόμου δεν θα εξαρτάται καθόλου από τον εξωτερικό επιλύτη, δυσχεραίνοντας το έργο του εξελικτικού αλγορίθμου να ξεχωρίσει την 'καλή λύση' και να συνεχίσει προς αυτήν την κατεύθυνση.

Να σημειωθεί ότι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι δεν επιβάλλουν καμία απαίτηση για τη συνέχεια ή λειότητα της αντικειμενικής συνάρτησης ϕ , παρόλα αυτά η συνάρτηση που χρησιμοποιείται είναι συνεχής (συνεχής συνάρτηση διευκολύνει την πορεία σύγκλισης). Μια τακτική που χρησιμοποιείται συχνά για να επιβάλει την ικανοποίηση των περιορισμών είναι η αλλαγή της τιμής του ω_p από γενιά σε γενιά μέσω ενός πολλαπλασιαστή (π.χ. 2 ή 3). Μια τέτοια τακτική δεν υιοθετήθηκε σε αυτήν την εργασία, για δύο λόγους: αρχικά ο αλγόριθμος βρήκε εύκολα λύσεις που ικανοποιούσαν τους περιορισμούς και, δεύτερον, απαιτείται αλγοριθμική αλλαγή στην βάση δεδομένων ώστε να μπορεί να ενημερώνει την τιμή καταλληλότητας κάθε ατόμου ανάλογα με το αν παραβιάζει περιορισμό και, στην περίπτωση αυτή να υπολογίζει εκ νέου την καταλληλότητα από την τιμή του ω_p .

Αποτελέσματα

Διαδικασία αξιολόγησης – κριτήριο τερματισμού

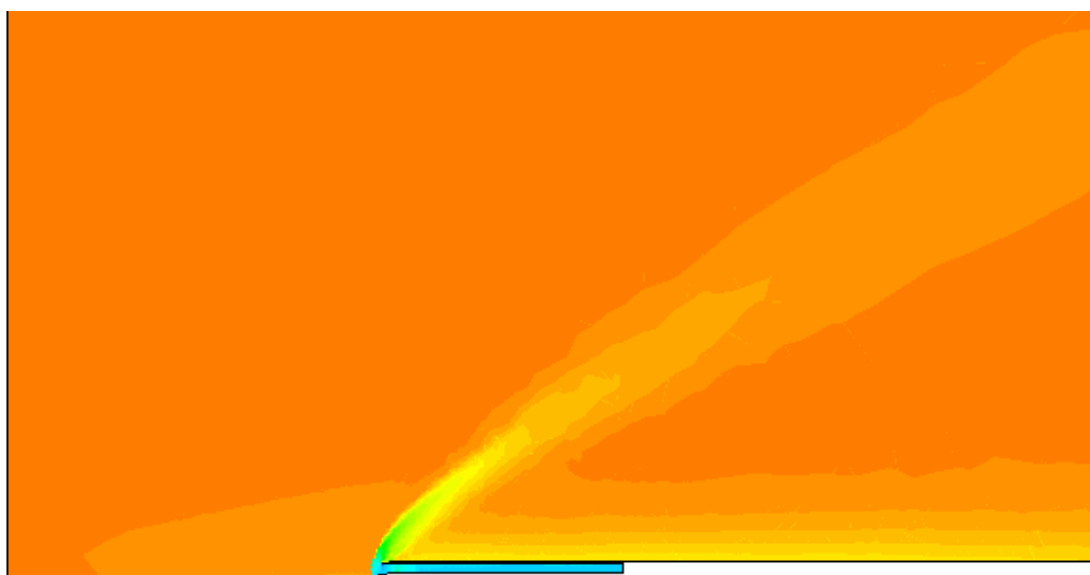
Η διαδικασία αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης περιλαμβάνει την ανάγνωση των παραμέτρων σχεδίασης από το αρχείο επικοινωνίας με τον εξελικτικό αλγόριθμο, την κατασκευή του περιγράμματος του πλέγματος (contour), την κατασκευή του πλέγματος, την επίλυση του πεδίου ροής και τελικά την απόδοση της τιμής καταλληλότητας μετά τον έλεγχο παραβίασης των περιορισμών. Η κατασκευή πλέγματος γίνεται με λογισμικό του εργαστηρίου. Το πλέγμα που απαιτείται για την επίλυση της ροής είναι διδιάστατο χωρίς συγκεκριμένες επιθυμητές ιδιότητες (π.χ. ελάχιστη απόσταση πρώτου κόμβου από τον τοίχο που απαιτείται για την επίλυση των εξισώσεων Navier- Stokes χαμηλών αριθμών Reynolds- επιλύονται οι εξισώσεις Euler), συνεπώς η δημιουργία του είναι αμελητέου χρόνου. Υπενθυμίζεται ότι λόγω του πυκνού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε, της προσαρμογής του πλέγματος στη λύση αλλά και της φυσικής δυσκολίας του προβλήματος ο χρόνος αξιολόγησης μίας υποψήφιας λύσης είναι περίπου 1 ½ ώρα σε έναν επεξεργαστή.

Ως κριτήριο τερματισμού λήφθηκαν οι 1500 αξιολογήσεις που αντιστοιχούν σε υπολογιστικό κόστος περίπου 20 ημερών σε 5 επεξεργαστές. Ο εξελικτικός αλγόριθμος είχε πληθυσμό απογόνων και γονέων 50 και 10 ατόμων αντίστοιχα, ενώ η διαδικασία της προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης ξεκίνησε μετά τις 100 αξιολογήσεις, με 5 αξιολογήσεις ανά γενιά. Χρησιμοποιήθηκε δυαδική κωδικοποίηση για την αναπαράσταση των μεταβλητών και ως σχήμα διασταύρωσης δυαδική ενός σημείου ανά μεταβλητή με χρήση δύο γονέων για τον σχηματισμό ενός απογόνου, με πιθανότητα αναπαραγωγής 90%. Ως σχήμα επιλογής γονέων χρησιμοποιήθηκε η πιθανοτική επιλογή με διαγωνισμό (3 διαγωνιζόμενα άτομα, πιθανότητα διαγωνισμού 90%).

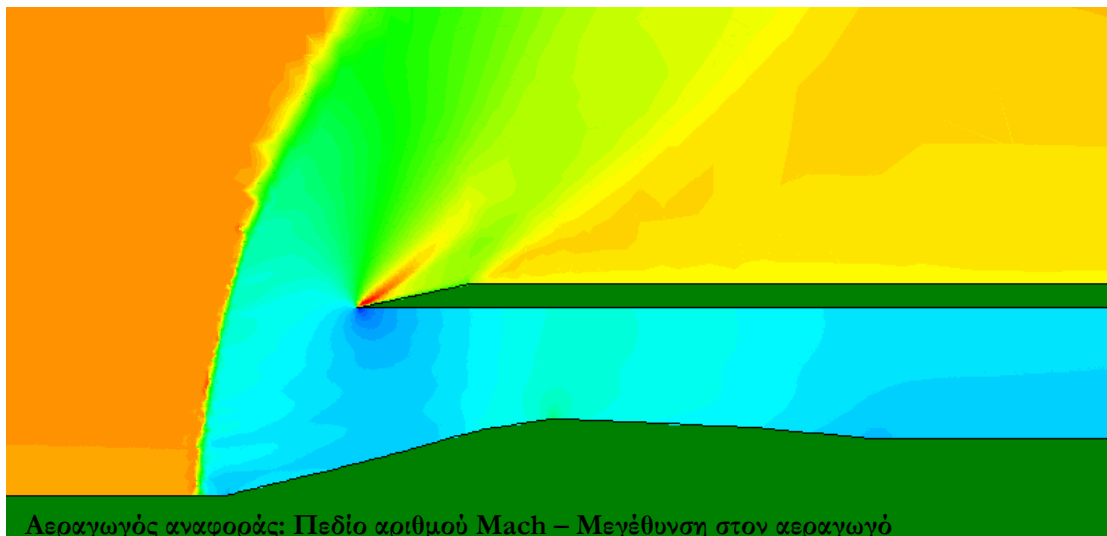
Απόδοση αεραγωγού αναφοράς

Ο αεραγωγός αναφοράς ικανοποιεί τον περιορισμό αριθμού Mach στην είσοδο του κινητήρα ($M=0.5$) και έχει βαθμό ανάκτησης ολικής πίεσης $\eta=0.7030$

Στις εικόνες πιο κάτω φαίνεται το πεδίο του αριθμού Mach σε όλο το υπολογιστικό χωρίο αλλά και λεπτομερώς κοντά στον αεραγωγό:



Αεραγωγός αναφοράς: Πεδίο αριθμού Mach σε ολόκληρο το υπολογιστικό χωρίο



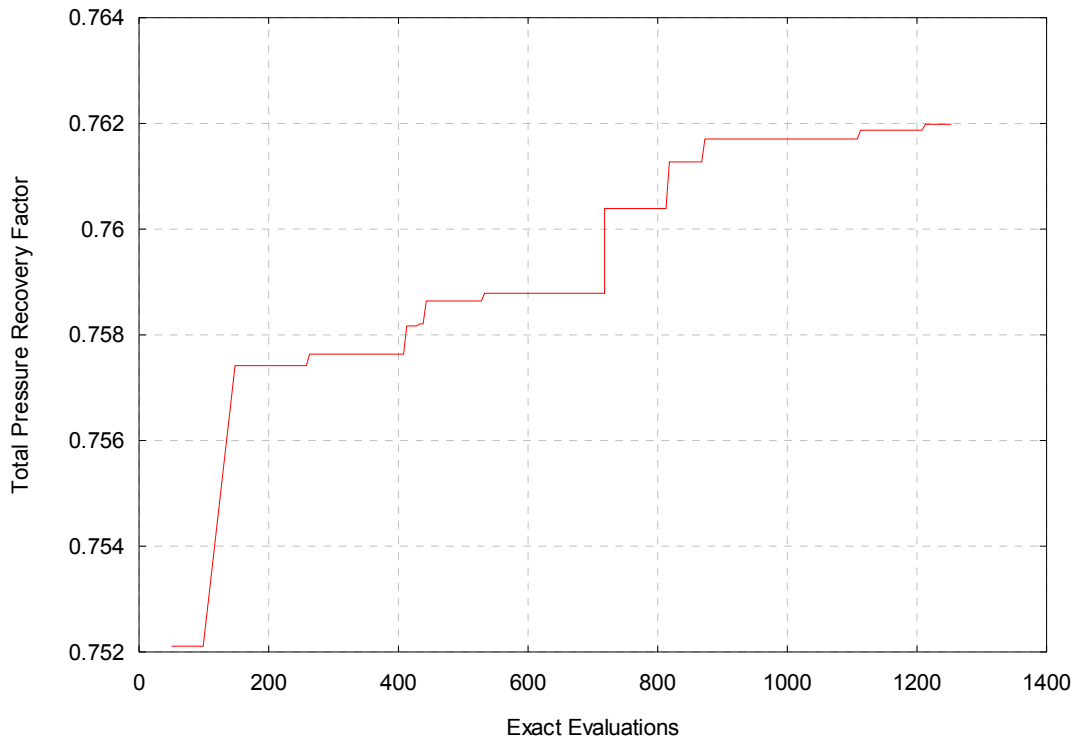
Ένα ενδιαφέρον ακόμα μέγεθος είναι το πεδίο της πίεσης, το οποίο θα εξετάσουμε μόνο κοντά στον αεραγωγό:



Βλέπουμε το κύμα κρούσης έξω από τον αεραγωγό εισόδου, συνεπώς ο αεραγωγός εργάζεται σε υποκρίσιμη λειτουργία εκτελώντας εξωτερική συμπίεση. Η εξωτερική συμπίεση έχει μικρότερο βαθμό απόδοσης από την μικτή συμπίεση. Παρατηρούμε την συμπίεση του εργαζόμενου μέσου μετά το κύμα κρούσης, αλλά και ότι διαφεύγει εργαζόμενο μέσο υψηλής πίεσης, αποτονούμενο στην ατμόσφαιρα λόγω της θέσης του κρουστικού κύματος. Ο αεραγωγός είναι τυπικός εξωτερικής συμπίεσης και υποκρίσιμης λειτουργίας. Η πίεση αυξάνεται απότομα μετά το κύμα κρούσης, ελαττώνεται στο συγκλίνον τμήμα του αγωγού, στο οποίο επιταχύνεται η ροή και αυξάνεται στο τμήμα του διαχύτη, όπου η ροή επιβραδύνεται επιπλέον.

Σύγκλιση του αλγορίθμου

Η πορεία σύγκλισης του αλγορίθμου εμφανίζεται στο πιο κάτω γράφημα συναρτήσει του αριθμού των κλήσεων του εξωτερικού επιλύτη. Στον άξονα των τεταγμένων βρίσκεται ο βαθμός ανάκτησης ολικής πίεσης της καλύτερης λύσης μέχρι εκείνη την στιγμή.



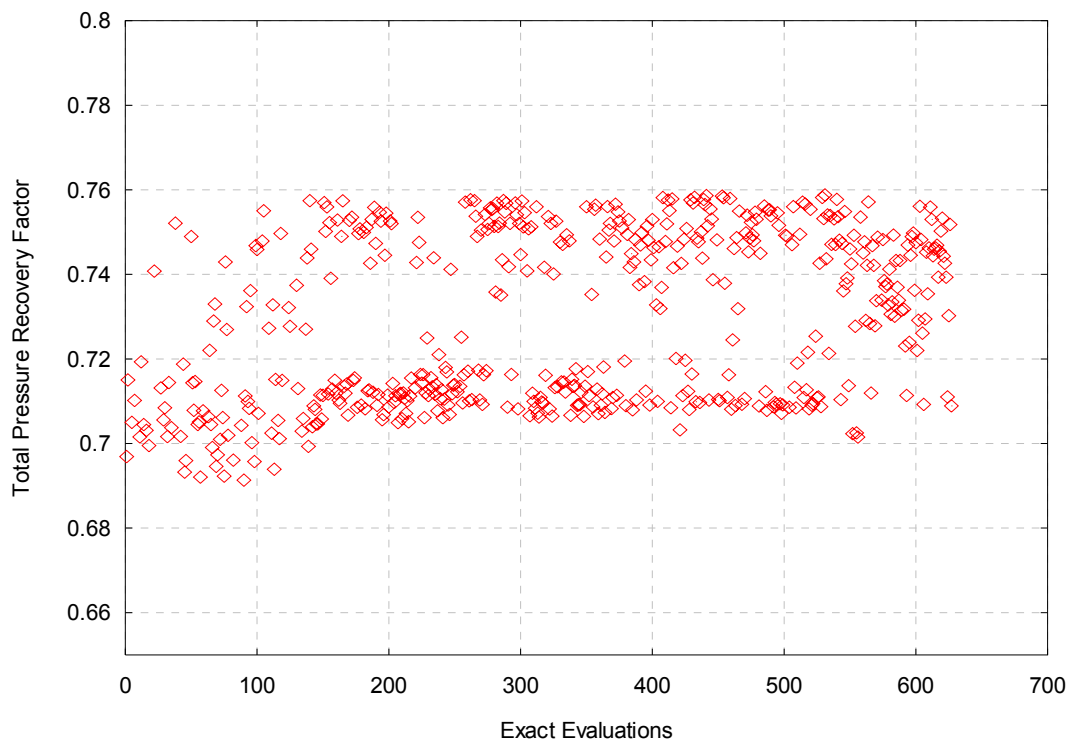
Σύγκλιση Αλγορίθμου

Βλέπουμε πως με ευκολία ο αλγόριθμος βρήκε μία πολύ καλύτερη λύση από τον αεραγωγό αναφοράς στην πρώτη κιόλας γενιά. Το πιο κάτω σχήμα απεικονίζει τη συνάρτηση καταλληλότητας των 600 περίπου πρώτων ατόμων που διαχειρίστηκε ο εξελικτικός αλγόριθμος. Διαχωρίζουμε κυρίως δύο ζώνες: εκείνη με υψηλή τιμή καταλληλότητας (συντελεστή ανάκτησης ολικής πίεσης) και εκείνη με χαμηλή, περίπου ίδια με εκείνη του αγωγού αναφοράς. Η ζώνη χαμηλής τιμής αποτελεί και το κάτω όριο, αφού από τους πίνακες του κάθετου κύματος κρούσης λαμβάνεται για Mach ελεύθερης ροής 2.0 συντελεστής ανάκτησης ολικής πίεσης 0.7209. Οι χαμηλότερες τιμές μπορεί να οφείλονται σε τυχόν ποινή ή και στο γεγονός ότι ένα μέρος της ροής που κανονικά θα συνέχιζε μέσα στον αγωγό δραπετεύει λόγω του σημείου ανακοπής κατάντι της ακμής πρόσπτωσης του καλύμματος του αεραγωγού.

Η ζώνη χαμηλής τιμής δημιουργήθηκε από διασταυρώσεις ατόμων χαμηλής τιμής συνάρτησης καταλληλότητας ή από ατυχείς μεταλλάξεις. Η ζώνη υψηλής τιμής δημιουργήθηκε από διασταυρώσεις ατόμων υψηλής τιμής καταλληλότητας και επιτυχείς μεταλλάξεις. Μπορούμε ακόμα να παρατηρήσουμε ότι ο αρχικός πληθυσμός είχε πολύ καλή κατανομή στην χαμηλή ζώνη, ενώ η υψηλή ζώνη περιείχε μόνο 2-3 άτομα.

Η χαμηλή αντιπροσώπευση της υψηλής ζώνης στις πρώτες γενιές δείχνει ότι το πρόβλημα είναι δύσκολο. Η υψηλή ζώνη άρχισε αντιπροσωπεύεται ικανοποιητικά (καλή εξερεύνηση της υπερεπιφάνειας της αντικειμενικής συνάρτησης- exploration) μετά τις 150 αξιολογήσεις, δηλαδή μετά την 12 γενιά τουλάχιστον (2 γενιές x 50 αξιολογήσεις + 10 γενιές x 5 αξιολογήσεις- υπενθυμίζεται ότι μετά την 2^η γενιά στις 100 αξιολογήσεις ξεκίνησε η

λειτουργία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων). Αυτό αποδεικνύει την ομαλή λειτουργία του αλγορίθμου προσεγγιστικής προ-αξιολόγησης.



Τιμή καταλληλότητας των 600 πρώτων υποψηφίων λύσεων

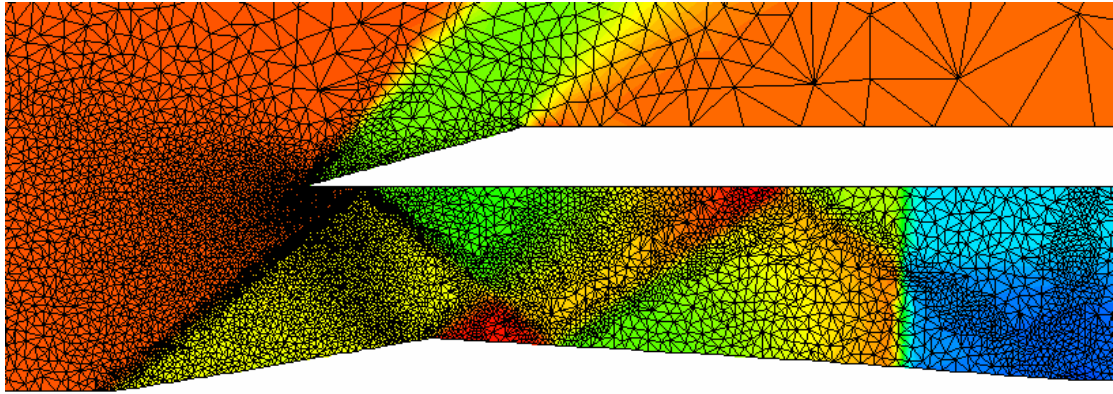
Βέλτιστος αεραγωγός

Ο βέλτιστος αεραγωγός ικανοποιεί τον περιορισμό αριθμού Mach ($M=0.559$) στην είσοδο του κινητήρα και έχει βαθμό ανάκτησης ολικής πίεσης $\eta = 0.76198$.

Στα πιο κάτω σχήματα βλέπουμε το πεδίο του αριθμού Mach στο χωρίο επίλυσης αλλά και σε λεπτομέρεια κοντά στον αεραγωγό.

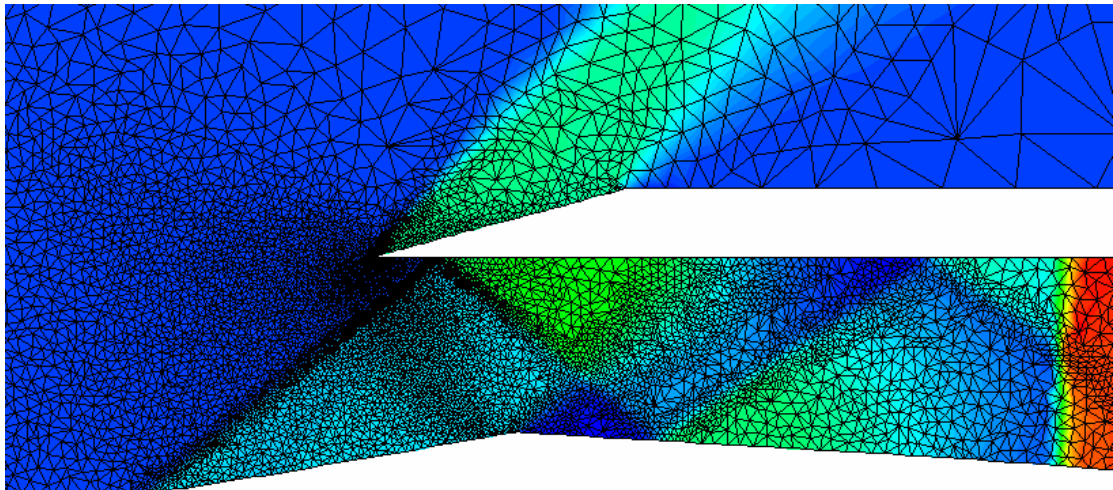


Βέλτιστος αεραγωγός: Πεδίο αριθμού Mach σε ολόκληρο το υπολογιστικό χωρίο



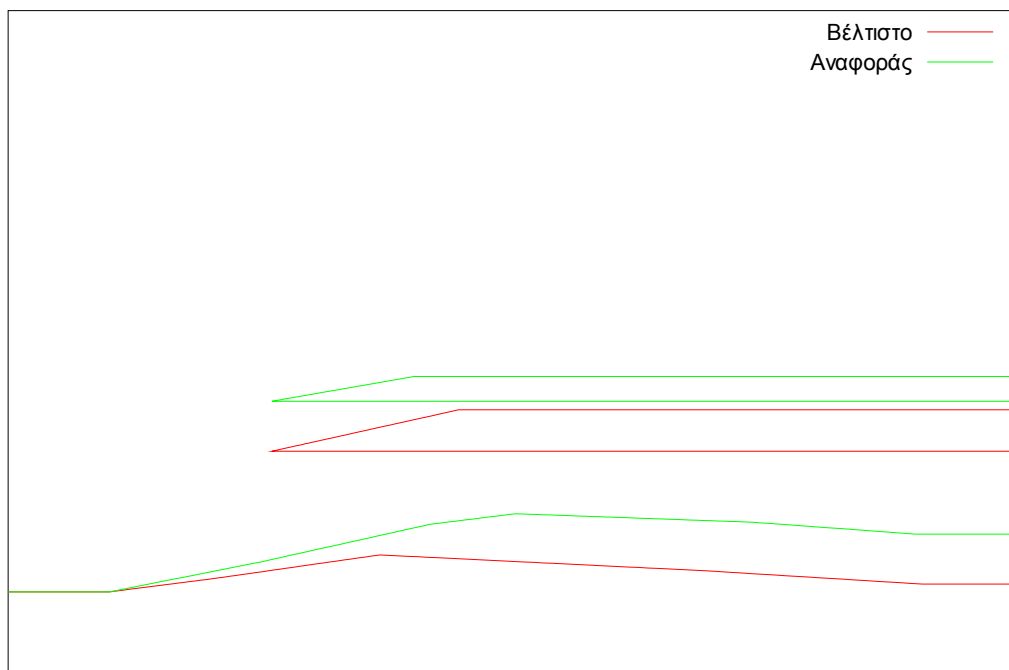
Βέλτιστος αεραγωγός: Πεδίο αριθμού Mach – Μεγέθυνση στον αεραγωγό

Ένα ακόμα ενδιαφέρον μέγεθος είναι εκείνο της πίεσης το οποίο θα δούμε πάλι σε λεπτομέρεια κοντά στον αεραγωγό:



Βέλτιστος αεραγωγός: Πεδίο πίεσεως – Μεγέθυνση στον αεραγωγό

Στο σχήμα που απεικονίζεται με λεπτομέρεια το πεδίο του αριθμού Mach κοντά στον αεραγωγό παρατηρούμε τις πυκνώσεις του πλέγματος που έγιναν αυτόματα από τον επιλύτη και ακολουθούν τις ανακλάσεις του αρχικού κύματος συμπίεσης. Επιπλέον παρατηρούμε ότι χωρίς τις διαδοχικές προσαρμογές η τελική θέση του κάθετου κύματος κρούσης θα ήταν διαφορετική. Δηλαδή θα παίρναμε εσφαλμένο πεδίο ροής και εσφαλμένο συντελεστή ανάκτησης ολικής πίεσης. Σημειώνεται ότι το αρχικό πλέγμα αποτελούνταν από 22000 τριγωνικά στοιχεία και το τελικό από 38000. Στο σχήμα του πεδίου της πίεσης βλέπουμε τις διαδοχικές συμπιέσεις από τα κύματα κρούσης αλλά και την τελική συμπίεση μετά το τελικό κύμα κρούσης (terminal shock). Ο βέλτιστος αεραγωγός είναι αεραγωγός μικτής συμπίεσης και εργάζεται σε υπερκρίσιμη λειτουργία.



Μία ενδιαφέρουσα σύγκριση είναι η κοινή απεικόνιση των τομών των δύο αεραγωγών (βέλτιστου & αναφοράς). Η τελική διάμετρος είναι κοινή (λόγω περιορισμού), όμως η διαμόρφωση είναι εντελώς διαφορετική. Αρχικά η βέλτιστη μορφή έχει πιο ομαλή θετική κλίση στα τοιχώματα, ενώ αργότερα έχει πιο απότομη αρνητική κλίση. Επίσης η διατομή λαιμού είναι πιο μικρή στον βέλτιστο αεραγωγό. Ακολουθούν σε πίνακα οι τιμές των παραμέτρων σχεδίασης του αεραγωγού αναφοράς, του βέλτιστου, αλλά και τα όρια τους μέσα στα οποία έγινε η βελτιστοποίηση.

Παράμετρος Σχεδίασης	Αεραγωγός Αναφοράς	Βέλτιστος Αεραγωγός	Κατώτερο όριο	Ανώτερο όριο
1	0.075	0.053189	0.0375	0.11250
2	13.6	8.88719	6.8	20.40
3	0.083	0.05837	0.0415	0.1245
4	15.2	9.903030	7.6	22.80
5	0.042	0.021656	0.0210	0.063
6	8.6	9.781133	4.3	12.90
7	0.117	0.160631	0.0585	0.17550
8	-2.5	-3.40053	-1.25	-3.750
9	0.08	0.1067057	0.04	0.1200
10	-5.1	-4.289882	-2.55	-7.65
11	0.07	0.092067	0.035	0.1050
12	12	15.14956	6.0	18.0

Βιβλιογραφία:

- [1] Θ. Ζερβογιάννης, Προγραμματισμός κώδικα επίλυσης αξονοσυμμετρικών πεδίων ροής για δομημένα και μη-δομημένα πλέγματα, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών Ε.Μ.Π., 2004
- [2] Α. Π. Γιώτης, Χρήση Εξελικτικών Τεχνικών, Υπολογιστικής Ευφυΐας και Μεθόδων Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής στη Βελτιστοποίηση- Αντίστροφη Σχεδίαση Πτερυγώσεων Στροβιλομηχανών, μέσω Παράλληλης Επεξεργασίας, Διδακτορική Διατριβή, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών Ε.Μ.Π., 2003.
- [3] D.E. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison- Wesley Publishing Company Inc.
- [4] MPI: A Message- Passing Interface Standard, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, 1995
- [5] K. Giannakoglou, Acceleration of Genetic Algorithms using Artificial Neural Networks- Theoretical Background, Von-Karman Institute Lecture Series 2000-07, May 2000
- [6] M. Emmerich, A. Giotis, M. Ozdemir, T. Back, K.C. Giannakoglou, Metamodel-assisted evolution strategies, PPSN VII, Granada, Spain, 2002
- [7] M. Karakasis, A.P. Giotis and K.C. Giannakoglou, Inexact information aided, low-cost, distributed genetic algorithms for aerodynamic shape optimization, Int. J. for Numerical Methods in Fluids, 2004.
- [8] I.C. Karpolis, E.I. Karangelos, K.C. Giannakoglou, Gradient- assisted radial basis function networks: theory and applications, Applied Mathematical Modelling 28, 2004, 197-209
- [9] S. Haykin, Neural Networks, second ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1998
- [10] I.C. Karpolis, D.I. Papadimitriou, K.C. Giannakoglou, Evolutionary Optimization using a new Radial Basis Function Network and the Adjoint Formulation, IPDO International Conference 2004, Rio de Janeiro, Brazil
- [11] D.I. Papadimitriou, I.C. Karpolis, K.C. Giannakoglou, Stochastic and Deterministic Optimization in Turbomachinery Applications based on the Adjoint Formulation, ERCOFTAC Design Optimization International Conference 2004, Athens, Greece
- [12] M.K. Karakasis, K.C. Giannakoglou, On the use of surrogate evaluation models in multi-objective evolutionary algorithms, ECCOMAS 2004 International Conference, Jyväskylä, Finland
- [13] D. Knight, Application of Genetic Algorithms to High Speed Air Intake Design, Von-Karman Institute Lecture Series 2000, May 2000
- [14] AGARD REPORT 804, Special Course on Missile Aerodynamics, Advisory Group for Aerospace Research and Development, Specialised Printing Services Limited, Essex, 1994.
- [15] Κ.Χ. Γιαννάκογλου, Αεροδυναμική Βελτιστοποίηση, ΕΜΠ, 2003
- [16] Π.Ι.Κ. Λιακόπουλος, Μέθοδος και λογισμικό προσαρμογής μη-δομημένων πλεγμάτων τετραεδρικών στοιχείων κατά την επίλυση προβλημάτων ροής, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών Ε.Μ.Π., 2001.