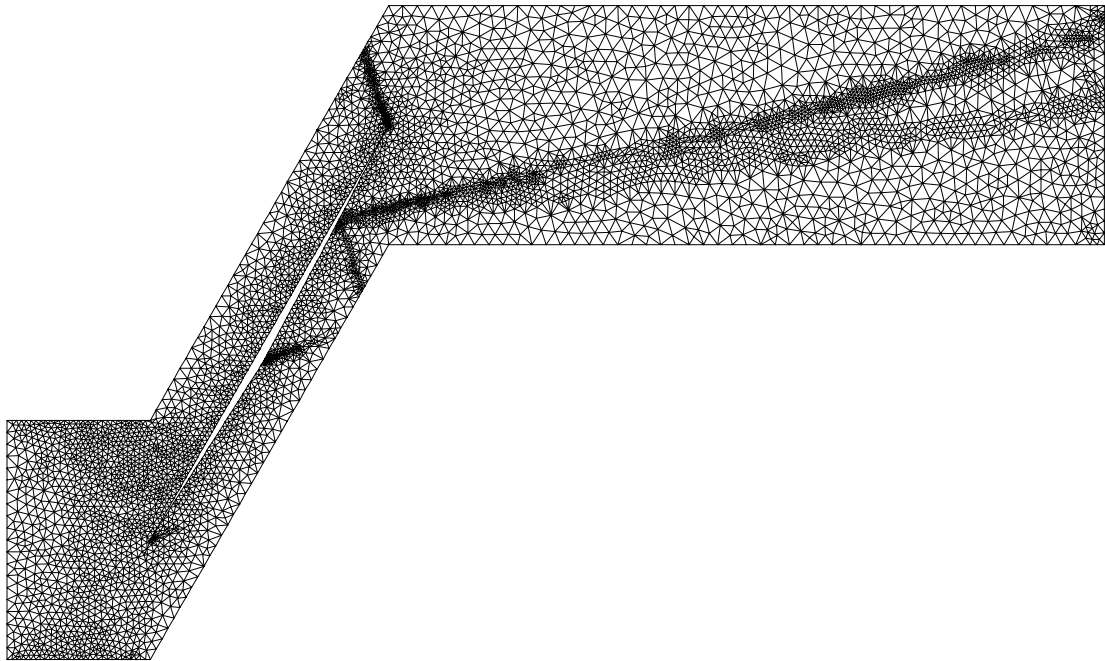


ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΘΕΜΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΥΠΕΡΗΧΗΤΙΚΟΥ ΣΥΜΠΙΕΣΤΗ



Ξενή Φλουρής 02100615
Μηχανολόγος Μηχανικός Μεταφορικών Μέσων
8^ο Εξάμηνο

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

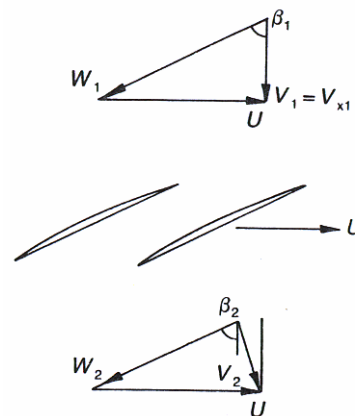
Η συμπεριφορά της κινητής πτερύγωσης ενός συμπιεστή σε συνθήκες υπερηχητικής ροής διαφέρει σημαντικά από αυτή σε συνθήκες υποηχητικής. Αυτό κυρίως έγκειται στη δημιουργία κυμάτων κρούσης τα οποία προκαλούν σημαντικές απώλειες επιπρόσθετες αυτών λόγω φαινομένων συνεκτικότητας. Οι απώλειες αυτές υπερτερούν συνήθως κατά πολύ των απωλειών λόγω συνεκτικότητας έτσι ώστε να μπορούμε να αμελήσουμε όλες τις υπόλοιπες..

Παρόλο που ο σχετικός αριθμός Mach της ροής είναι μεγαλύτερος της μονάδας $M > 1$, επιλέγουμε υποηχητική αξονική ταχύτητα, κατ'επέκταση και ο αξονικός αριθμός Mach της ροής είναι πάντα μικρότερος της μονάδας $M \cos \beta < 1$ κι έτσι οι διαταραχές μπορούν να διαδοθούν στην αντίθετη κατεύθυνση του ρότορα.

Από το γεγονός αυτό, ότι η αξονική ταχύτητα είναι υποηχητική ενώ η σχετική ταχύτητα είναι υπερηχητική, συνάγεται ότι η γωνία κλίσης γ μιας υπερηχητικής πτερύγωσης είναι πολύ μεγάλη, πολλές φορές 60° ακόμη και περισσότερο. Επίσης, λόγω της μεγάλης περιστροφικής ταχύτητας U σε συνδυασμό με τη σχέση του Euler

$$\Delta h_t = U_2 V_{u2} - U_1 V_{u1}$$

συνάγεται ότι είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μεγάλη συναλλαγή έργου μεταξύ ρευστού και πτερύγωσης με πολύ μικρή μεταβολή της περιφερειακής ταχύτητας U και με πολύ μικρή στροφή της ροής ($\beta_2 - \beta_1 =$ πολύ μικρή γωνία). Μάλιστα αν το εργαζόμενο μέσο είναι συμπιεστό ρευστό αυτό μπορεί να γίνει και χωρίς εκτροπή της ροής. Το μόνο που χρειάζεται είναι μείωση της αξονικής συνιστώσας της ταχύτητας. Σ' αυτή την περίπτωση $\beta_2 = \beta_1$ όπως απεικονίζεται και στο διπλανό σχήμα.



Αρκετά από τα χαρακτηριστικά της υπερηχητικής ροής μέσα στο ρότορα μοιάζουν ποιοτικά τουλάχιστον με αυτά μέσα σε ένα διαχύτη. Τα κύματα αντιδρούν σε αλλαγές που συμβαίνουν στην κατεύθυνση της ροής καθώς επίσης και αντιδρούν με τα τοιχώματα στο οποία προσπίτουν, στη συγκεκριμένη περίπτωση με τη πτερύγωση. Έχουν όμως δύο βασικές διαφορές.

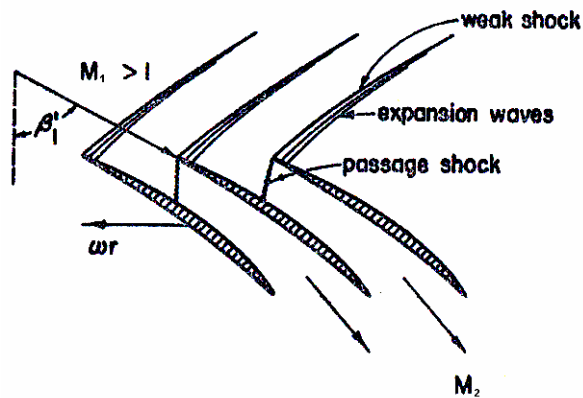
Η πρώτη διαφορά είναι ότι η ροή δεν μπορεί να θεωρηθεί διδιάστατη, τουλάχιστον όσον αφορά τη συνέχεια της παροχής μάζας. Αυτό γιατί ροή μπορεί να προκύψει κατά μήκος της έκτασης του πτερυγίου σε ανταπόκριση στις διαφορές πίεσης οφειλόμενες σε διάφορα μοτίβα ροής που συμβαίνουν σε διαφορετικές ακτίνες του πτερυγίου (το πτερύγιο εκτείνεται από την ακτίνα ποδός μέχρι την ακτίνα κεφαλής). Έτσι πρέπει να θεωρήσουμε το κανάλι ροής που απεικονίζεται στο σχήμα της επόμενης σελίδας ως ένα με μεταβλητό ύψος σε κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο της σελίδας μας. Αυτό βέβαια συμβαίνει και στην υποηχητική ροή αλλά σε μικρότερο βαθμό, τέτοιο ώστε να μπορεί να αμεληθεί.

Για να καθορίσουμε τις συνθήκες σε ένα τέτοιο κανάλι εισάγουμε το λόγο αξονικής ταχύτητας-πίεσης Ω . Ορίζεται ως

$$\Omega = (\rho_1 V_1 \cos \beta_1) / (\rho_2 V_2 \cos \beta_2)$$

και δεν είναι τίποτα άλλο από το λόγο παροχής μαζών ανά μονάδα επιφάνειας ανάντι και κατάντι της πτερύγωσης. Αν η ροή ήταν πράγματι διδιάστατη τότε $\Omega=1$,

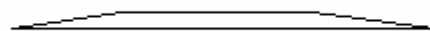
αυτό όμως δεν συμβαίνει στην πράξη. Αν $\Omega < 1$ τότε το κανάλι συγκλίνει κατάντι (έξοδος, θέση 2) ενώ αν το $\Omega > 1$ τότε αυτό αποκλίνει κατάντι.



Η δεύτερη βασική διαφορά είναι ότι τα κύματα που διαδίδονται από την ακμή εκφυγής της πτερύγωσης πρέπει να είναι πολύ αδύναμα αρκετά πριν τη πτερύγωση. Για να φανει η αναγκαιότητα αυτού ας θεωρήσουμε ότι ένα πτερύγιο δημιουργεί ένα ισχυρό πλάγιο κύμα κρούσης στην πλευρά υποπίεσής του. Τότε λόγω συμμετρίας το ίδιο θα συνέβαινε σε κάθε πτερύγιο της πτερύγωσης με αποτέλεσμα μια σειρά κυμάτων κρούσης να κινείται αντίθετα της ροής. Έτσι η ροή θα περνούσε από πολλά τέτοια κύματα και θα στρέφετο από κάθε ένα από αυτά στην ίδια καταύθυνση. Αυτό όμως είναι αδύνατο γιατί θα είχε σαν αποτέλεσμα μια μεγάλη στροφή της ροής. Έτσι τα κύματα κρούσης πρέπει να είναι αδύνατα αρκετά πριν τη πτερύγωση και μάλιστα, να εναλλάσσονται με κύματα εκτόνωσης τα οποία θα ακυρώνουν τη στροφή που αυτά προσδίδουν στη ροή. Από τα προηγούμενα συνάγεται επίσης ότι η ροή δε μπορεί να στραφεί από το υπερηχητικό τμήμα της πλευράς υποπίεσης της πτερύγωσης. Πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένη με την πλευρά υποπίεσης του πτερυγίου έτσι ώστε ο υπερηχητικός ρότορας να δουλεύει με σταθερή γωνία εξόδου της ροής. (παρόλο που αυτό το συμπέρασμα προκύπτει από διδιάστατη ανάλυση, τείνει να αποδυνκνείται και πειραματικά).

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω η αξονική ταχύτητα μέσα στο ρότορα μειώνεται συνοδευόμενη από ένα κύμα κρούσης. Από αυτό εξάγουμε ακόμα ένα χαρακτηριστικό των υπερηχητικών πτερυγίων του ρότορα. Ότι η κυρτότητά τους είναι πάρα πολύ μικρή έως μηδενική. Επίσης είναι πολύ λεπτά με πάχος που κυμαίνεται στο 2% του μήκους της χορδής και πολύ μυτερά στην ακμή προσβολής ούτως ώστε το κύμα (bow shock) που δημιουργείται στην περιοχή αυτή να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ακμή προσβολής (ιδανική περίπτωση να είναι προσκολλημένο, συνήθως όμως βρίσκεται λίγο πιο μπροστά).

Έτσι φτάνουμε στην σημερινή μορφή των πτερυγίων που δεν είναι τίποτα άλλο από ένα τετράπλευρο με την χορδή να αποτελεί ουσιαστικά τη μια πλευρά του πτερυγίου. Άλλη μία ευθεία, σχεδόν παράλληλη στη χορδή, αποτελεί την από πάνω πλευρά και δύο άλλες κεκλιμένες ευθείες που ενώνουν τα άκρα των δύο προηγούμενων κλείνουν το τετράπλευρο και αποτελούν το περίγραμμα του πτερυγίου. Βέβαια το πάχος του πτερυγίου στο σχήμα είναι υπερβολικό αλλά οποιαδήποτε προσπάθεια απεικόνισης του πτερυγίου με ίση κλίμακα και στις δυο

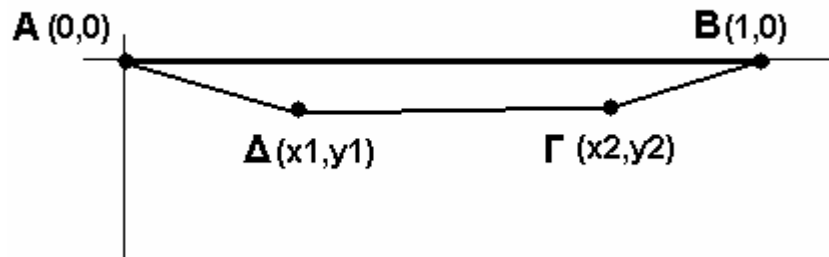


διαστάσεις θα είχαν αποτέλεσμα να απεικονίσουμε κάτι που μοιάζει πολύ σε ευθεία γραμμή.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

Βάσει τα πιο πάνω, η παραμετροποίηση του πτερυγίου καθίσταται πάρα πολύ εύκολη αφού θεωρώντας πτερύγιο με χορδή μοναδιαίου μήκους το μόνο που απαιτείται πλέον είναι ο καθορισμός των δύο σημείων της κάτω πλευράς του πτερυγίου όπως αυτό φαίνεται στο διπλανό σχήμα.

Έτσι γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το πτερύγιο παραμετροποιείται



αι με μόνο τέσσερις παραμέτρους όπως για παράδειγμα τις συντεταγμένες των σημείων Γ, Δ. Μια άλλη πιθανή παραμετροποίηση είναι ο καθορισμός των μηκών ΑΔ και ΒΓ και οι γωνία που σχηματίζουν το καθένα με τη χορδή ΑΒ.

Εγώ επέλεξα τον πρώτο τρόπο παραμετροποίησης με παραμέτρους τις x_1, y_1, x_2, y_2 γιατί με αυτό το τρόπο εισέρχεται και φαίνεται άμεσα το πάχος του πτερυγίου(y_1, y_2).

ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ – ΚΩΔΙΚΕΣ

Για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης μου δόθηκαν ένα πρόγραμμα δημιουργίας τριγωνικών πλεγμάτων(Grid Generator), ένας κώδικας επίλυσης της ροής Euler καθώς επίσης κι ένας εξελικτικός αλγόριθμος. Ο κώδικας Euler προτιμήθηκε του αντίστοιχου κώδικα Navier-Stokes χάριν υπολογιστικού κόστους αφού όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω στη θεωρία τα συνεκτικά φαινόμενα και συγκεκριμένα οι απώλειες λόγω συνεκτικότητας είναι ασθενέστερα των απωλειών λόγω του κύματος κι έτσι είναι δυνατόν να αγνοηθούν χωρίς αυτό να επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Επιπλέον αυτών απαιτείται ένα πρόγραμμα τροφοδοσίας σημείων(του περιγράμματος του πτερυγίου και της επιφάνειας ελέγχου) στη γεννήτρια πλέγματος και ένα πρόγραμμα υπολογισμού της αντικειμενικής συνάρτησης του στόχου μας.

ΣΤΟΧΟΙ

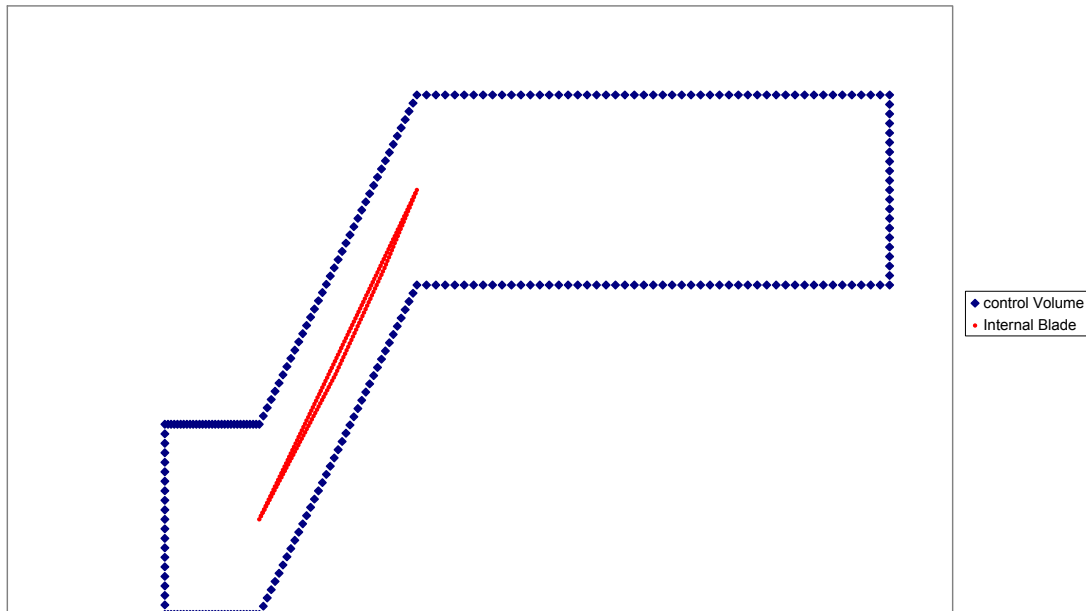
Η βελτιστοποίηση έγινε ως προς δύο στόχους που δεν ήταν άλλοι από την ελαχιστοποίηση των απωλειών και την μεγιστοποίηση της αύξησης της στατικής πίεσης(λόγος πίεσης) της πτερύγωσης. Λόγω του ότι ο διαθέσιμος εξελικτικός αλγόριθμος επιλύει μόνο προβλήματα ελαχιστοποίησης οι αντικειμενικές συναρτήσεις που επιλέχθηκαν ήταν τέτοιες που να συμβαδίζουν με τον πιο πάνω περιορισμό.

Ελαχιστοποίηση απωλειών : $F_1 = \min(\text{abs}(P_2 - P_1))$

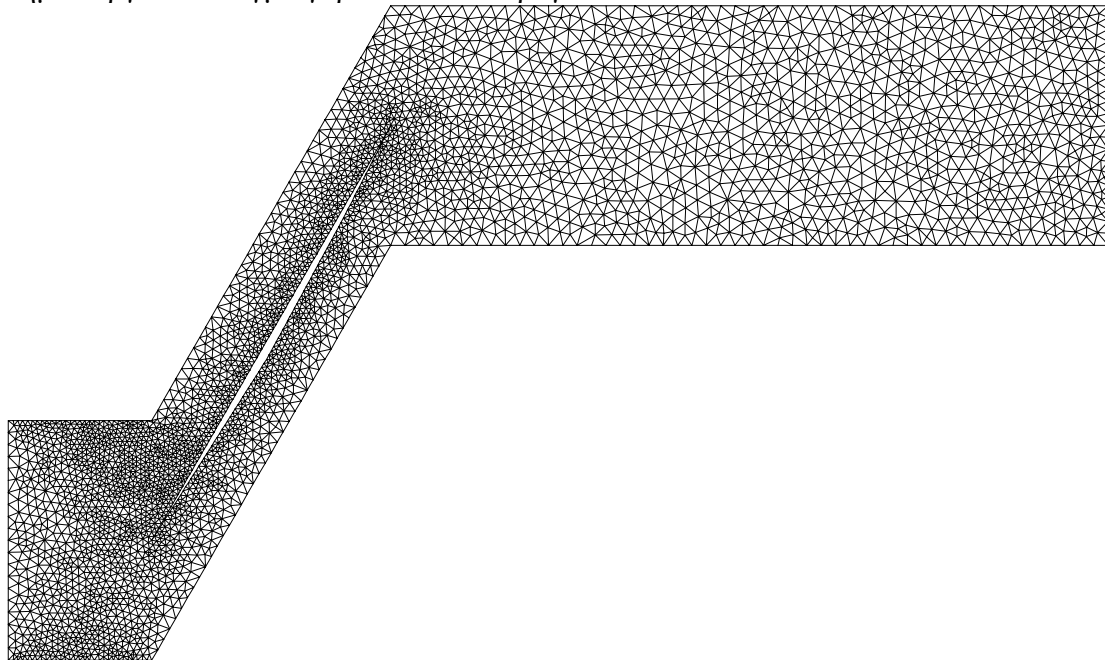
Μεγιστοποίηση κέρδους στατικής πίεσης : $F_2 = \max(P_2 - P_1) = \min(-(P_2 - P_1)) = \min(P_1 - P_2)$

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

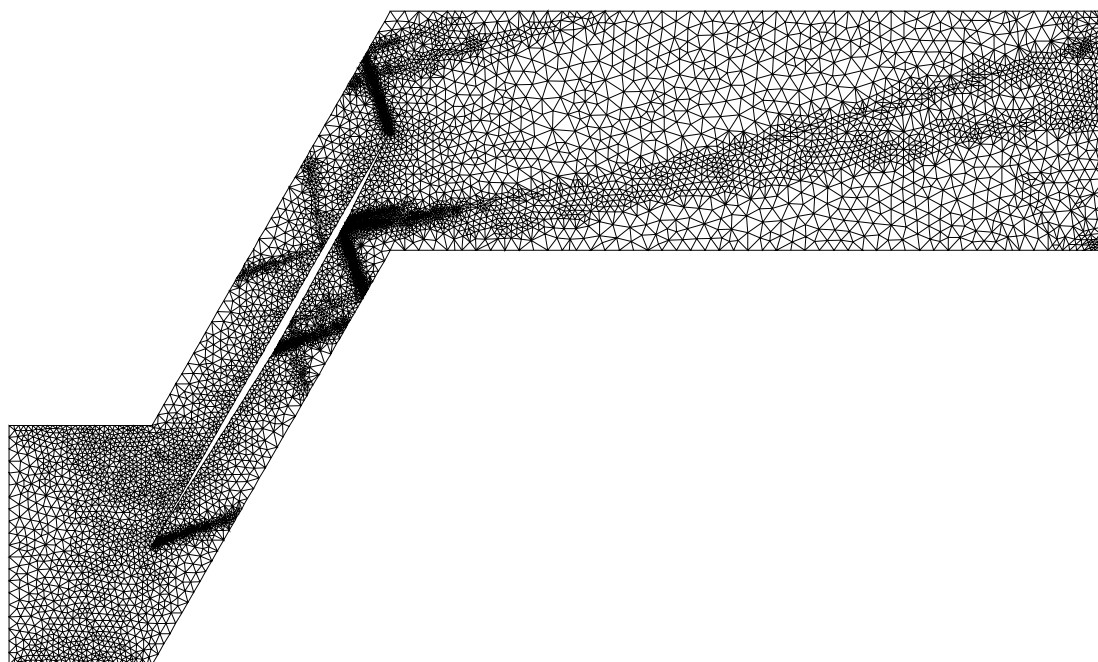
Αφού καθοριστούν οι παραμέτροι μιας υποψήφιας λύσης και πάρουν μια συγκεκριμένη τιμή τότε δίνονται αυτά στο πρόγραμμα τροφοδοσίας σημείων το οποίο δημιουργεί αρκετά σημεία τέτοια ώστε να καθορίζονται επαρκώς το περίγραμμα της επιφάνειας ελέγχου και του πτερυγίου όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



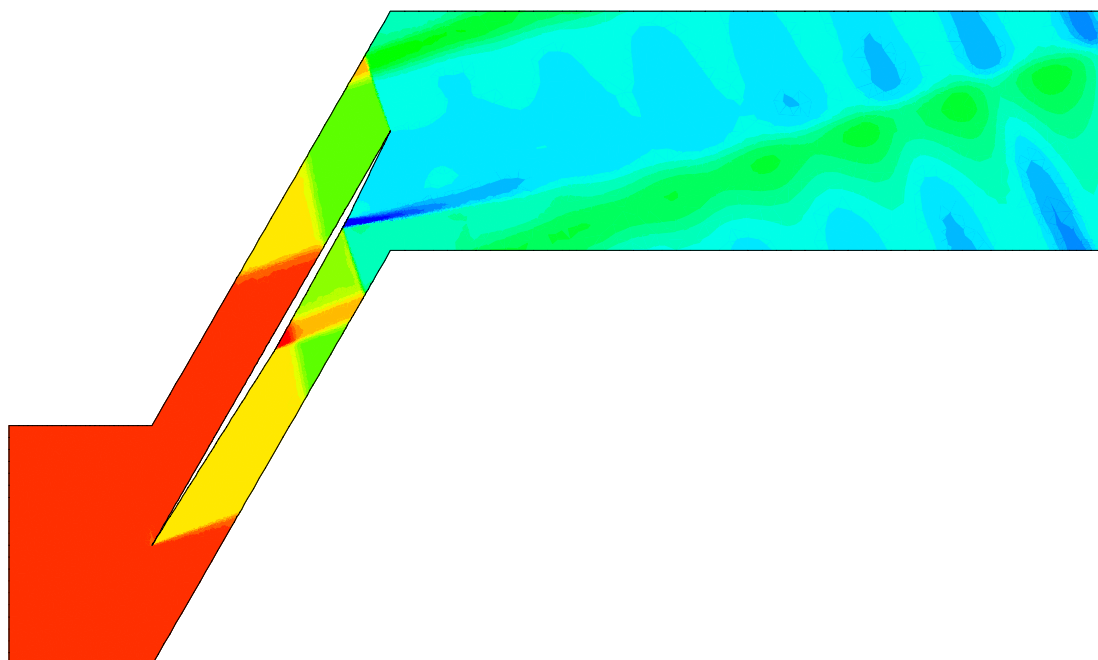
Ακολούθως τα σημεία αυτά τροφοδοτούνται στη γεννήτρια πλεγμάτων η οποία δημιουργεί το πλέγμα γύρω από το πτερύγιο.



Στη συνέχεια ο κώδικας Euler επιλύει τη ροή γύρω από το πτερύγιο κι έτσι μπορούμε να δούμε το κύμα κρούσης που δημιουργείται και να υπολογίσουμε της απώλειες και το λόγο πίεσης της πτερύγωσης.



Πιο κάτω ακολουθεί η γραφική απεικόνιση του αριθμού Mach της ροής γύρω από το πτερύγιο. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται τα σημεία όπου $M=1.6$, για κίτρινο $M=1.52$, για πορτοκαλί $M=1.55$, για πράσινο $M=1.45$, για γαλάζιο $M=1.30$ για μπλε $M=1.20$ και για τις ενδιάμεσες αποχρώσεις οι αντίστοιχες τιμές.



Τέλος, υπολογίζονται οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων από το αντίστοιχο πρόγραμμα και τροφοδοτούνται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης για να επιλεγούν βάσει αυτών οι νέες παραμέτροι για την επόμενη υποψήφια λύση.

ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Έτσι το μόνο που μένει να κάνουμε πριν τρέξουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι ο καθορισμός των ορίων των παραμέτρων του πτερυγίου μέσα στα οποία ο αλγόριθμος θα “ψάξει” να βρει τη λύση.

Από τη βιβλιογραφία, ο Denton πρότειναι ένα πτερύγιο το οποίο βάσει των υπολογισμών που έχει κάνει έχει πολύ καλά αποτελέσματα και οι παραμέτροι του είναι :

$$\begin{aligned}x_1 &= 0.417172829 \\y_1 &= -0.04183593231 \\x_2 &= 0.583008158 \\y_2 &= -0.04183553697\end{aligned}$$

Έτσι αναζητήθηκε λύση γύρω από την πιο πάνω. Τα όρια λοιπόν των παραμέτρων x_1 , y_1 , x_2 , y_2 καθορίστηκαν τελικά όπως πιο κάτω

$$\begin{aligned}0.150 < x_1 < 0.499 \\-0.01 < y_1 < -0.07 \\0.500 < x_2 < 0.850 \\-0.01 < y_2 < -0.07\end{aligned}$$

Επιπλέον επιλέχθηκε ως πέμπτη παράμετρος η γωνία κλίσης της πτερύγωσης $\gamma=60^\circ$, απαιτήθηκε όμως να παραμένει αμετάβλητη καθόλη τη διάρκεια της διαδικασίας.

Όσον αφορά τις παιρεταίρω ρυθμιστικές παραμέτρους του αλγορίθμου καθορίστηκαν τα πιο κάτω :

- Μέγεθος του συνόλου των γνέων : 15
- Μέγεθος του συνόλου των απογόνων κάθε γενεάς : 75
- Μέγεθος του συνόλου των βέλτιστων(elite) : 25
- Πιθανότητα διασταύρωσης : 0.95
- Πιθανότητα μετάλλαξης : αρχικά 0.035 και σταδιακή μείωση της στο 0.015
- Πιθανότητα επιλογής ενός απογόνου μέσω διαγωνισμού ως γονέα για την επόμενη γενεά : 0.95
- Πιθανότητα επιλογής ενός απογόνου ως elite για την επόμενη γενεά : 0.05
- Μέγιστος αριθμός αξιολογήσεων : 10000

Επίσης χάριν υπολογιστικού κόστους επιλέχθηκε το 450 ως ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων στη διαδικασία επίλυσης της ροής από τον κώδικα Euler(η επίλυση της ροής γίνεται με επαναληπτική διαδικασία μέχρις ότου συγκλίνει) καθώς επίσης και μόνο μια προσαρμογή(adaptation) του πλέγματος στη λύση. Σιωπηρή υπόθεση στον πρόωρο τερματισμό της επαναληπτικής διαδικασίας επίλυσης της ροής το ότι μια

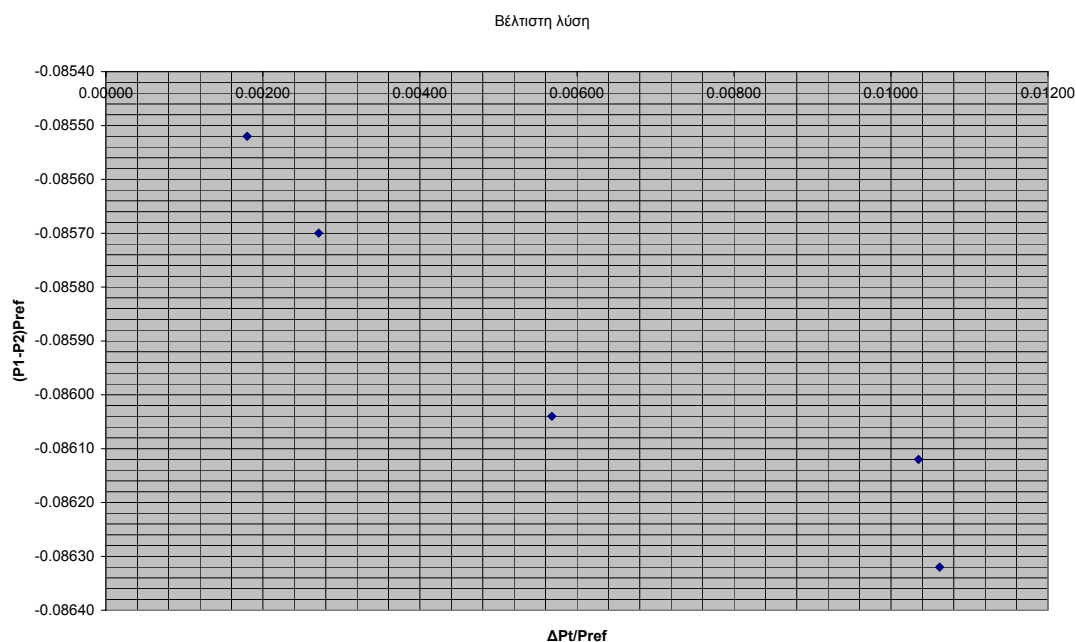
λύση η οποία είναι καλή έστω και αν δεν έχει συγκλίνει πλήρως η διαδικασία θα συνεχίσει να είναι καλή και μετά από περαιτέρω επεξεργασία.

Τέλος να αναφέρουμε ότι η στερεότητα της περύγωσης επιλέχθηκε ίση με δύο $\sigma=c/s=2$, ο αριθμός Mach στην είσοδο της περύγωσης ίσος με 1.60 $M_1=1.6$ και η γωνία της ροής στην είσοδο της περύγωσης ίση με 60° , όση δηλαδή και η γωνία κλίσης της περύγωσης.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της αντιφατικότητας των στόχων μας(μικρές απώλειες->ελάχιστο πάχος, μεγάλο κέρδος στατικής πίεσης-> σχετικά μεγάλο πάχος) η βέλτιστη λύση είναι ένα σύνολο λύσεων στο οποίο συμβιβάζονται οι δύο στόχοι με διαφορετική στάθμιση όμως στη κάθε λύση, με το ίδιο όμως τελικό αποτέλεσμα(π.χ την ίδια τιμή της σύνθετης αντικειμενικής συνάρτησης $F=F_1+\lambda F_2$). Έτσι έχουμε το μέτωπο λύσεων κατά Pareto(Pareto front) που φαίνεται στο σχημα που ακολουθεί.

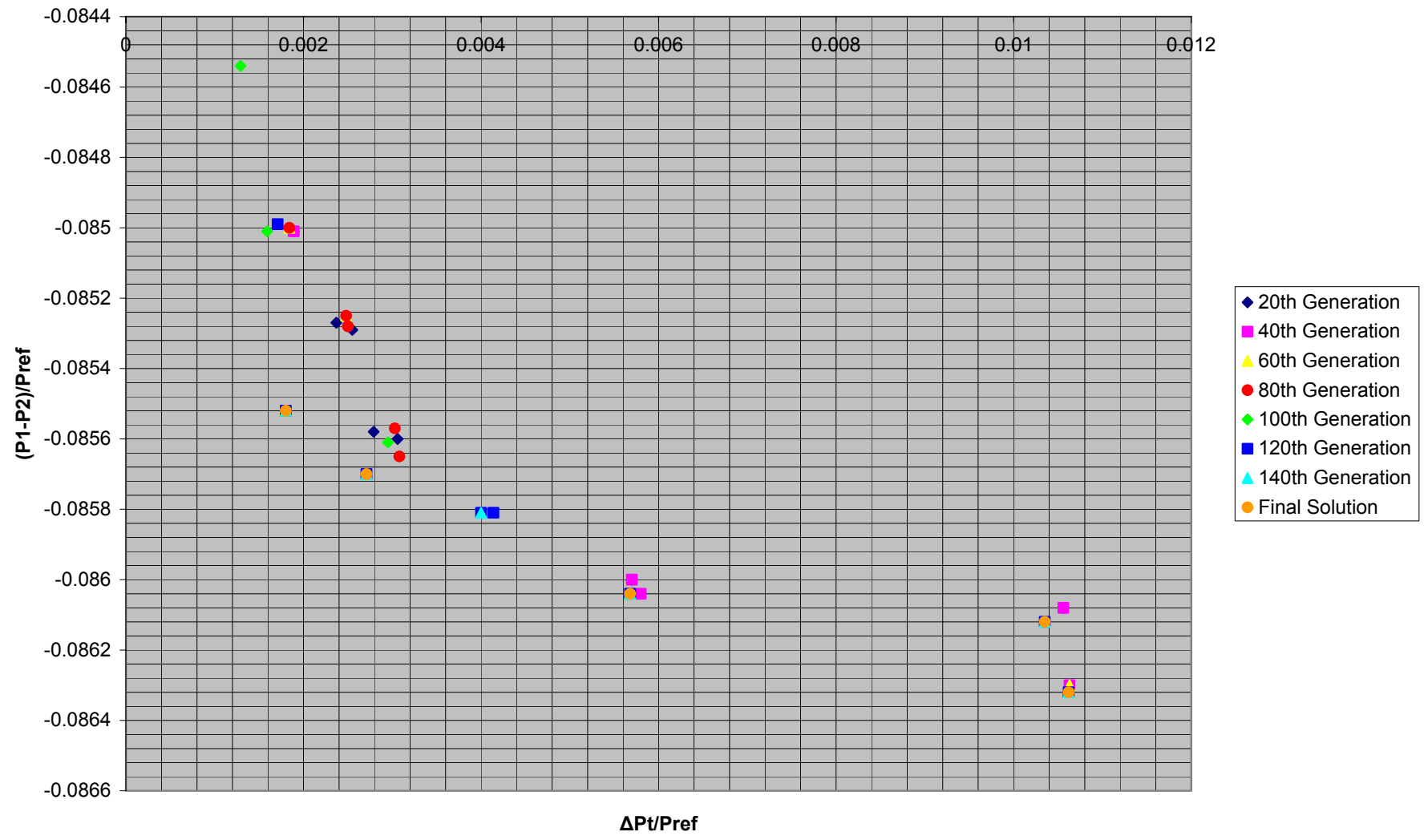
Ακόμα κάτι που χρήζει σχολιασμού είναι η πάρα πολύ μικρή μεταβολή που παρατηρείται στο κέρδος στατικής πίεσης που πρακτικά παραμένει αμετάβλητη. Αυτό όμως είναι κάτι το αναμενόμενο αφού αν πραγματικά θέλουμε ουσιαστική μεταβολή στο μέγεθος αυτό πρέπει να αλλάξουμε τη γωνία εισόδου της ροής.



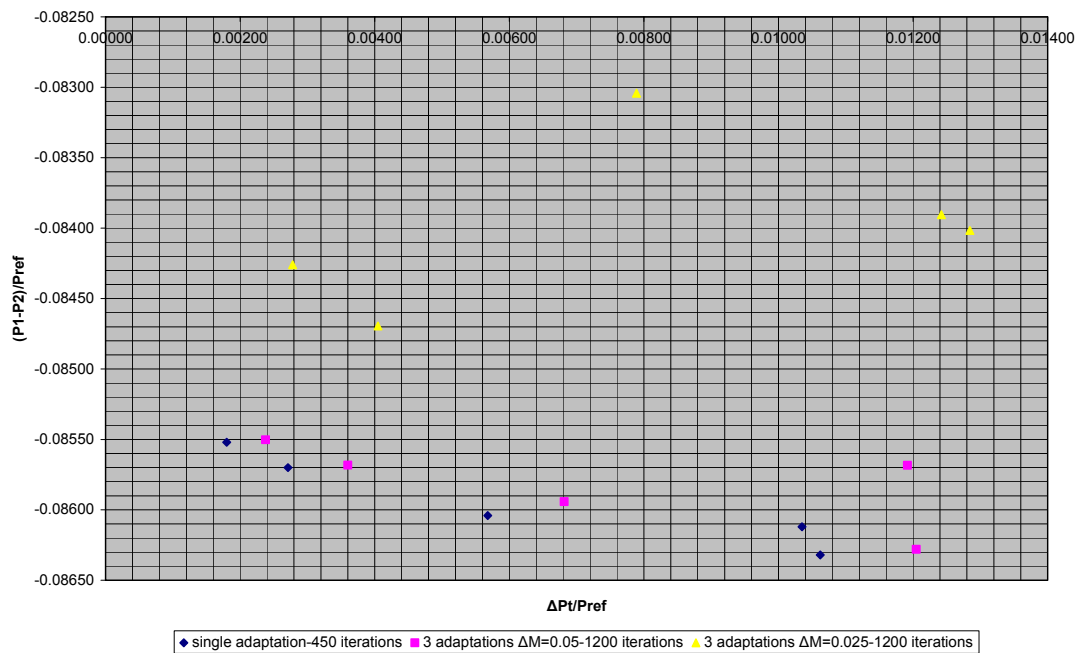
Σύγκριση της τελικής λύσης με τις ενδιάμεσες λύσεις (δειγματοληψία του μετώπου των βέλτιστων λύσεων ανά 20 γενιές) δείχνει όντως ότι η τελική λύση επικρατεί όλων των προηγούμενων όπως φαίνεται στο πιο γράφημα της απόμηνης σελίδας.

Παρατηρούμε επίσης ότι παρά το γεγονός ότι επιλέξαμε ο αριθμός του συνόλου των elite λύσεων να είναι 25(κατ' επέκταση έπρεπε να έχουμε 25 διαφορετικές λύσεις-25 διαφορετικά σημεία στο μέτωπο κατά Pareto της τελικής λύσης) εντούτοις στη τελική

λύση έχουμε μόνο 5 για το λόγο ότι παρουσιάζονται με βαθμό πολλαπλότητας μεγαλύτερο της μονάδας. Επίσης στη γραφική παράσταση σύγκρισης της τελικής λύσης με τις ενδιάμεσες παρατηρούμε ότι υπάρχουν πτερύγια που θα μπορούσαν να αποτελούν μέρος του τελικού μετώπου λύσεων αλλά δεν είναι. Αυτά όμως είναι προβλήματα στον εξελικτικό αλγόριθμο και πιο διεξοδική ενασχόληση με αυτό ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της εργασίας.



Με μια πιο διεξοδική ανάλυση της τελικής λύσης παρατηρούμε ότι η υπόθεση περί διατήρησης της καλής λύσης δεν είναι και τόσο ευσταθής αφού τα αποτελέσματα ως προς τους στόχους που θέσαμε αλλάζουν σημαντικά(βλ. Σχήμα)



Παρόλ' αυτά μια διεξοδική ανάλυση που θα συμπεριελάμβανε συνεκτικά φαινόμενα με χρήση των εξισώσεων Navier - Stokes, ψευδότριδιάστατη(quasi 3D) επίλυση της ροής ή και πλήρη τριδιάστατη επίλυση που θα λάμβανε υπόψη του τι γίνεται στο στερεό όριο του κελύφους του συμπιεστή θα είχε μεν αποτελέσματα πολύ κοντα στην πραγματικότητα αλλά θα στερείτω κάθε νοήματος. Ουσία της εργασίας άλλωστε είναι η εξοικίωση στη χρήση υπολογιστικών μεθόδων και η απόδειξη ότι με τα κατάλληλα εργαλεία όπως π.χ. ένα πανίσχυρο υπολογιστικό σύστημα μπορούμε να επιλύσουμε αριθμητικά ένα πρόβλημα με πολύ καλή προσέγγιση.

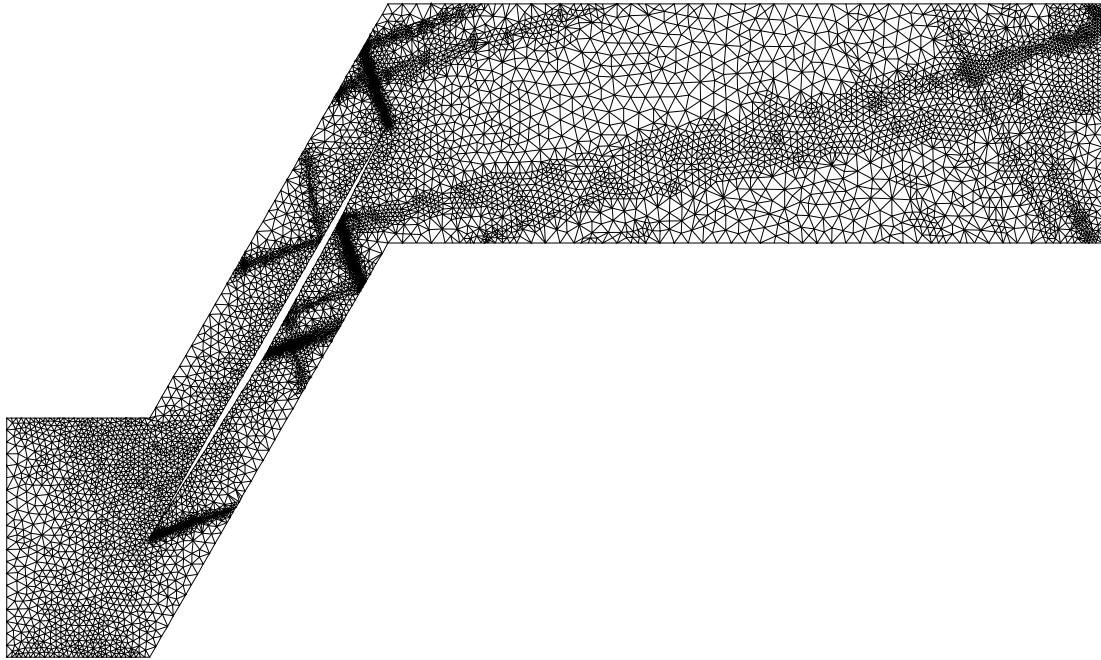
ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΛΥΣΗ

Elite 1

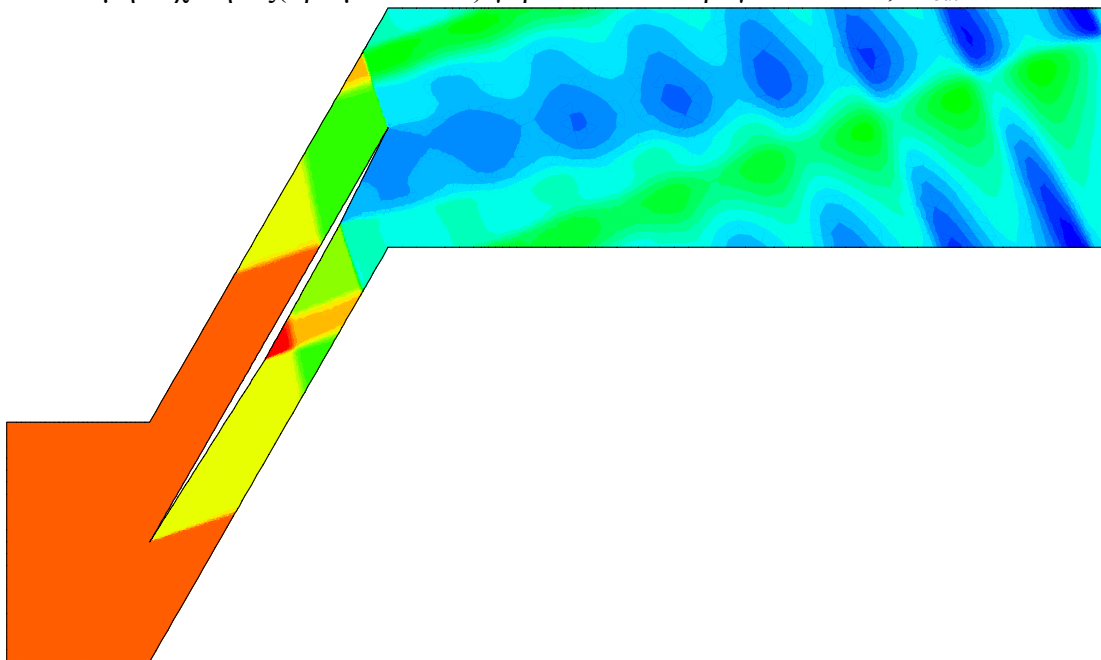
$$\Delta P_t / P_{ref} = 0.0018$$

$$\Delta P / P_{ref} = 0.08552, \pi_c = 1.508$$

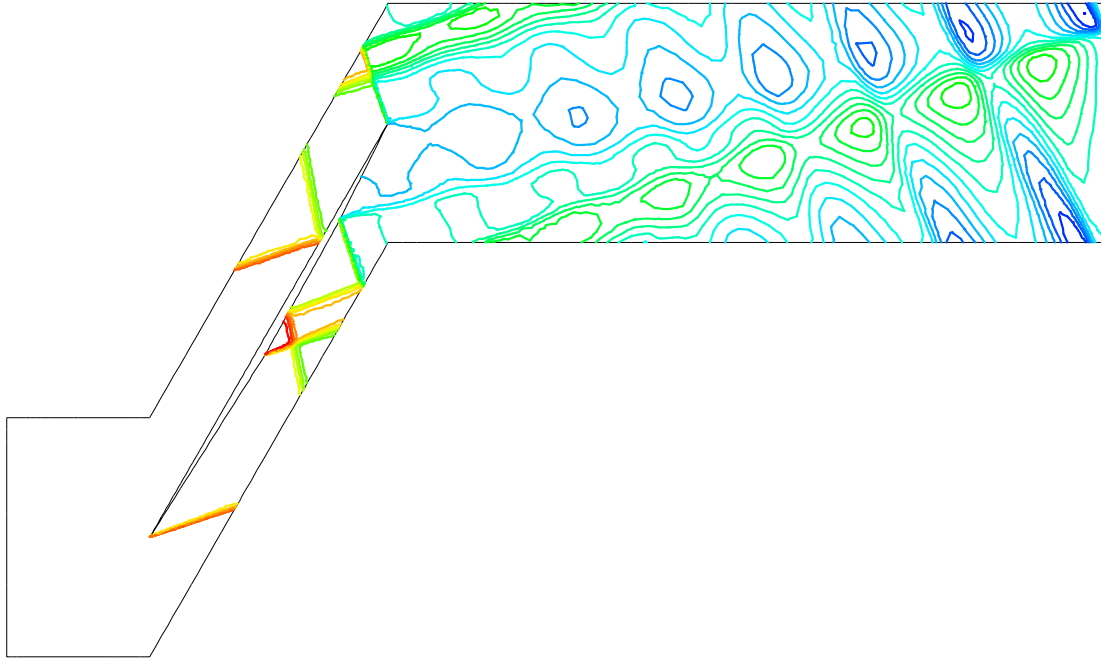
Μορφή πτερυγίου και προσαρμοσμένο σ' αυτή πλέγμα



Κατανομή ταχύτητας (αριθμού Mach) γύρω από το πτερόγιο. $M_{in} = 1.6$, $M_{out} = 1.2$



Γραμμές ισοταχύτητας(ίσου αριθμού Mach)

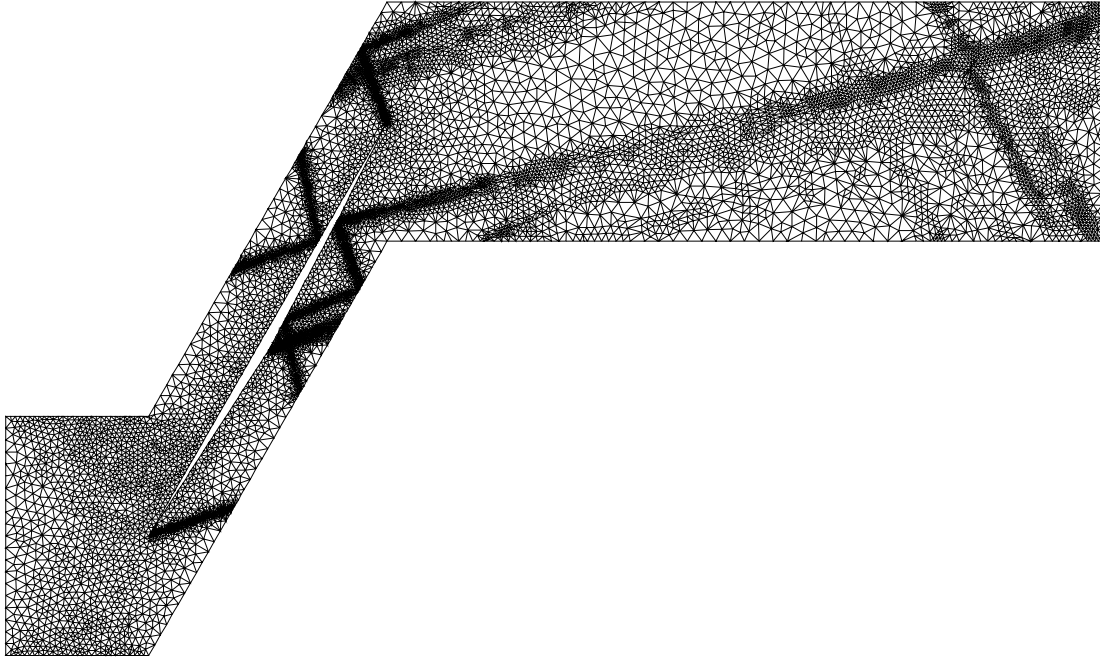


Elite 2

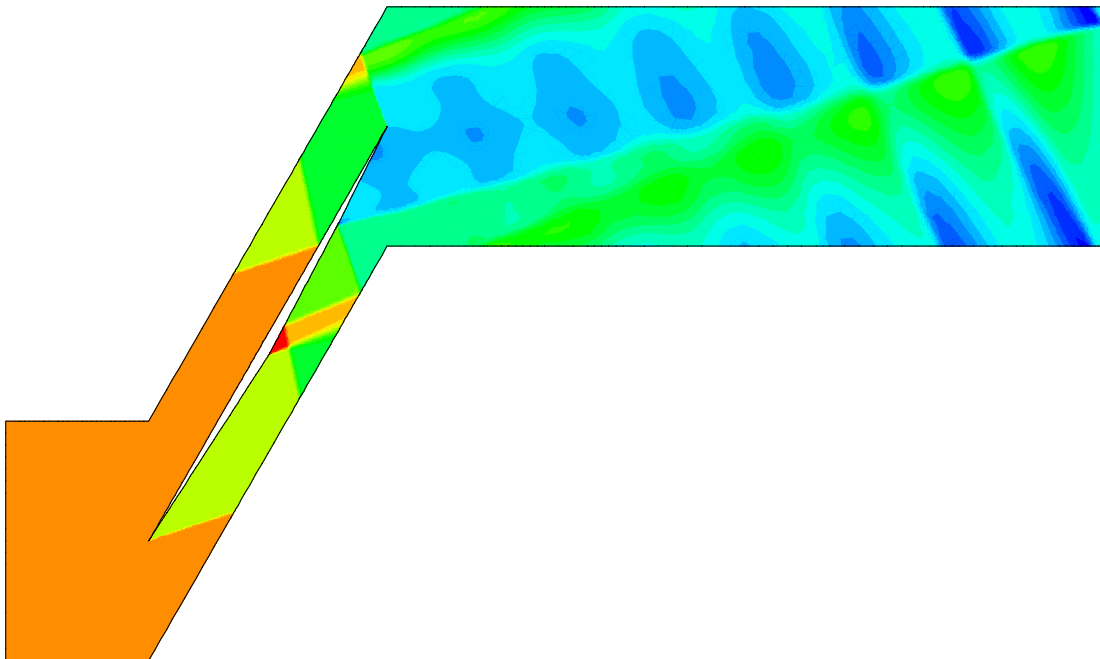
$$\Delta P_t/P_{ref}=0.00271$$

$$\Delta P/P_{ref}=0.08568, \pi_c=1.509$$

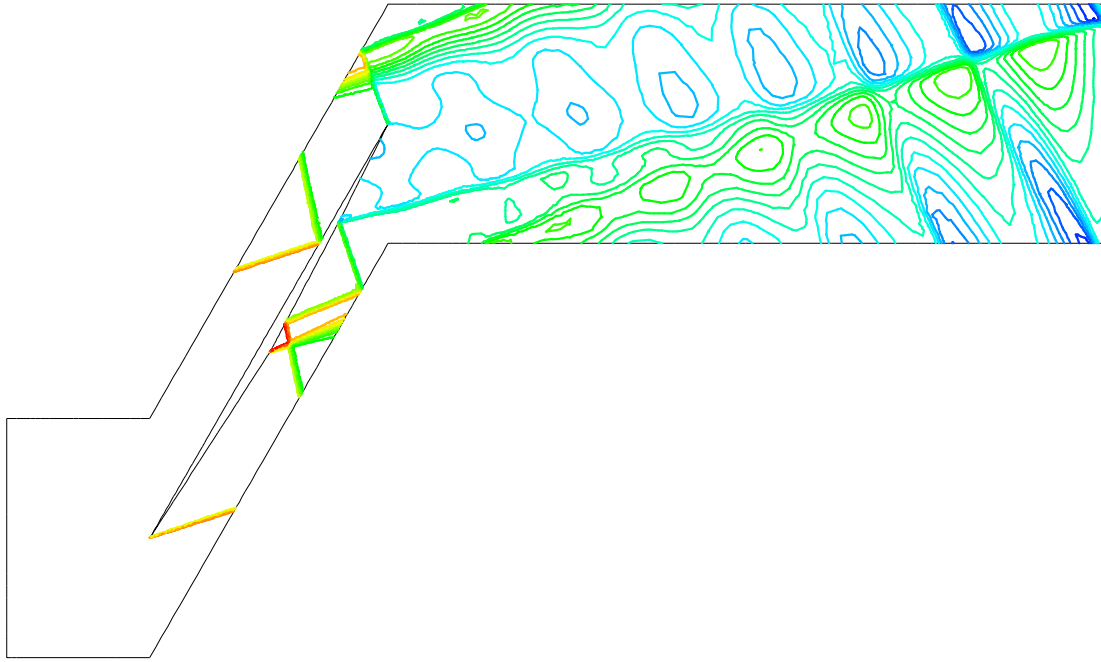
Μορφή πτερυγίου και προσαρμοσμένο σ' αυτή πλέγμα



Κατανομή ταχύτητας(αριθμού Mach) γύρω από το πτερόγιο. $M_{in}=1.6$, $M_{out}=1.3$



Γραμμές ισοταχύτητας(ίσου αριθμού Mach)

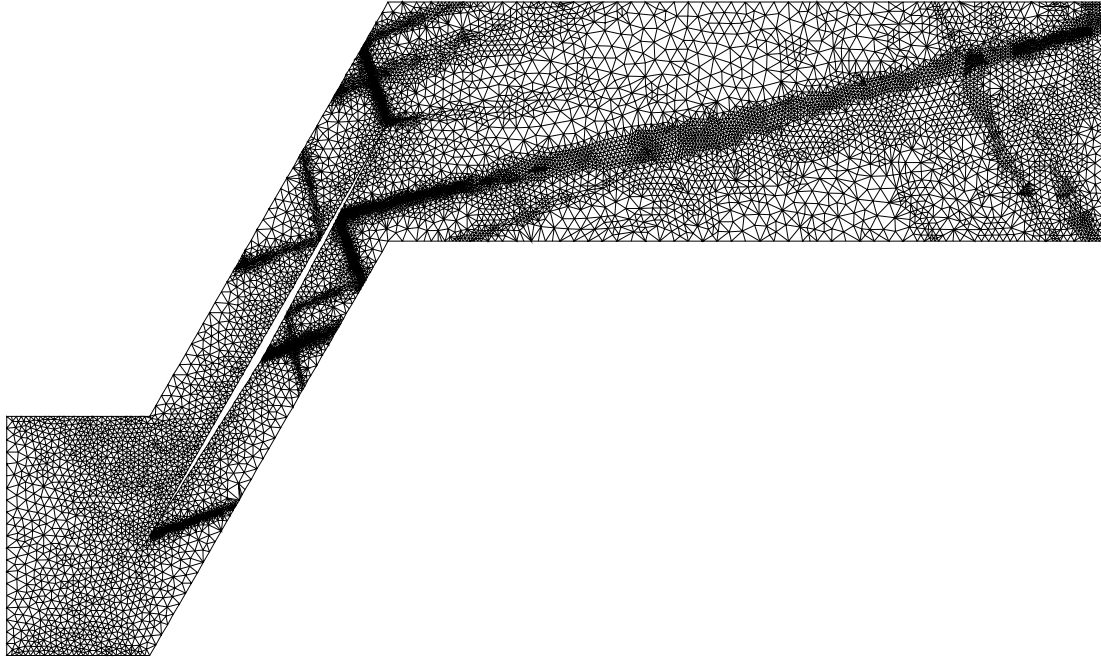


Elite 3

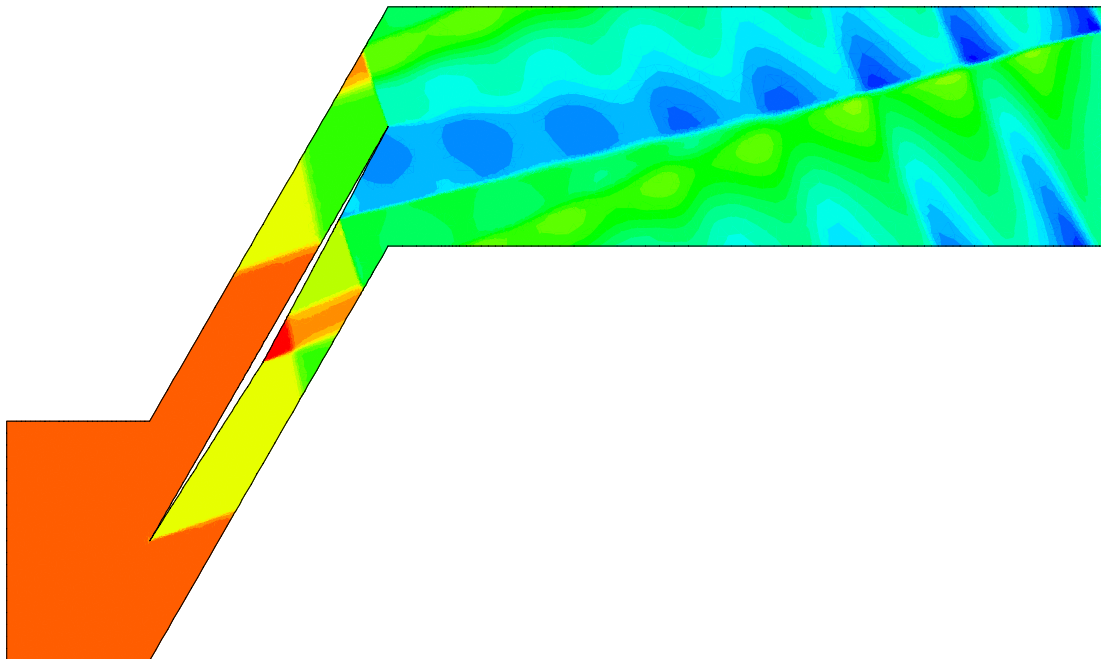
$$\Delta P_t / P_{ref} = 0.00568$$

$$\Delta P / P_{ref} = 0.08604, \pi_c = 1.511$$

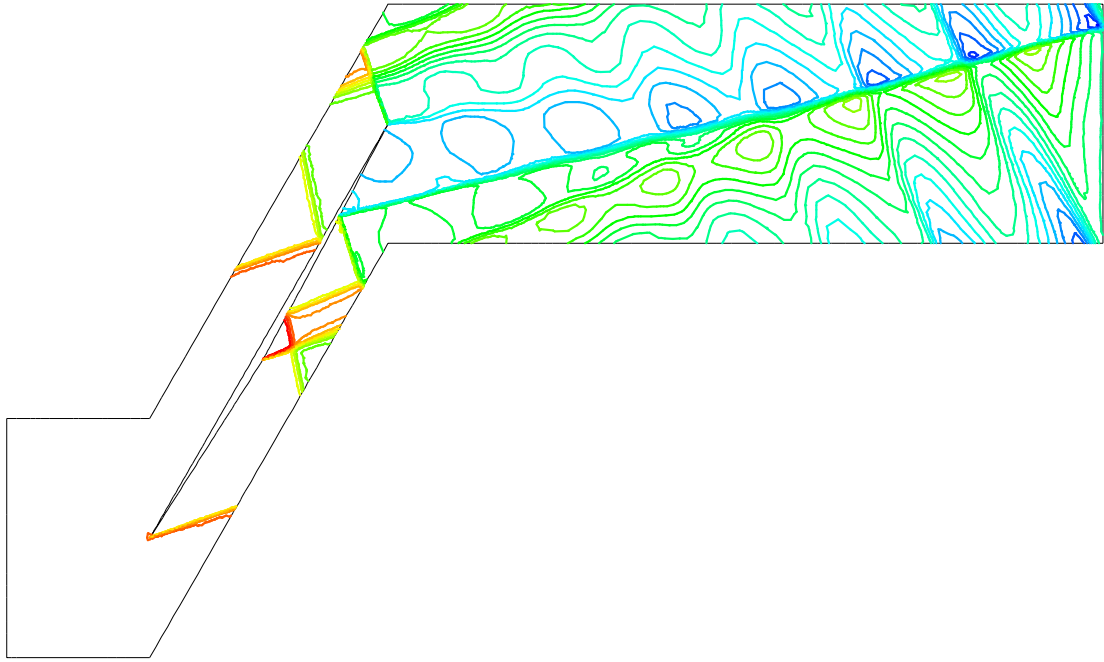
Μορφή πτερυγίου και προσαρμοσμένο σ' αυτή πλέγμα



Κατανομή ταχύτητας (αριθμού Mach) γύρω από το πτερόγιο. $M_{in} = 1.6$, $M_{out} = 1.31$



Γραμμές ισοταχύτητας(ίσου αριθμού Mach)

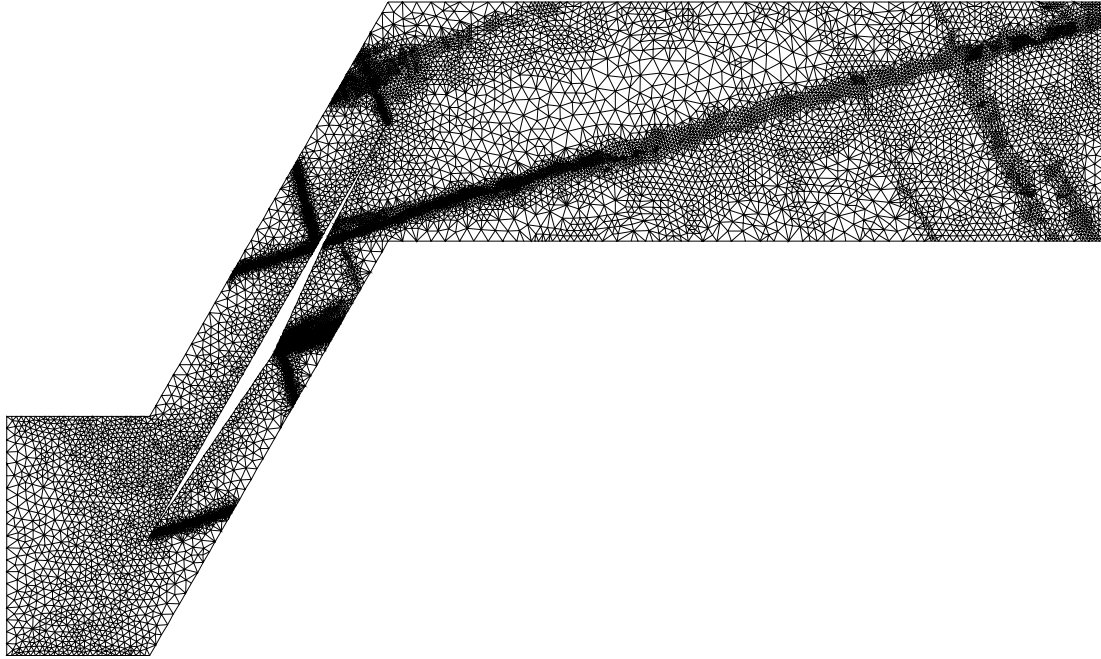


Elite 4

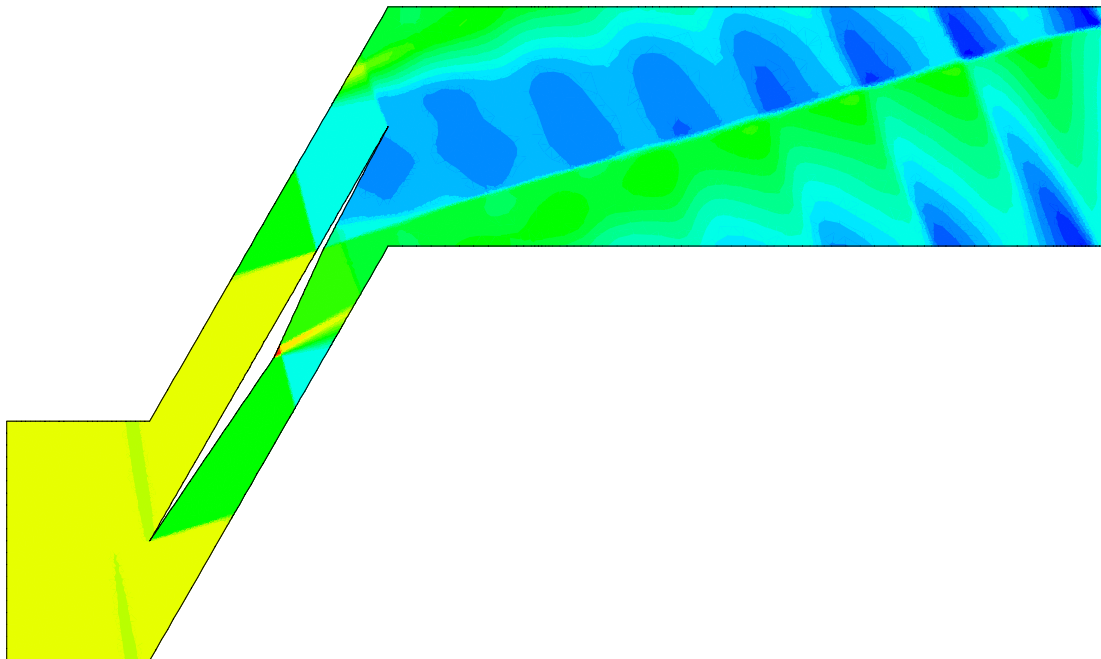
$$\Delta P_t/P_{ref}=0.01035$$

$$\Delta P/P_{ref}=0.08612, \pi_c=1.49$$

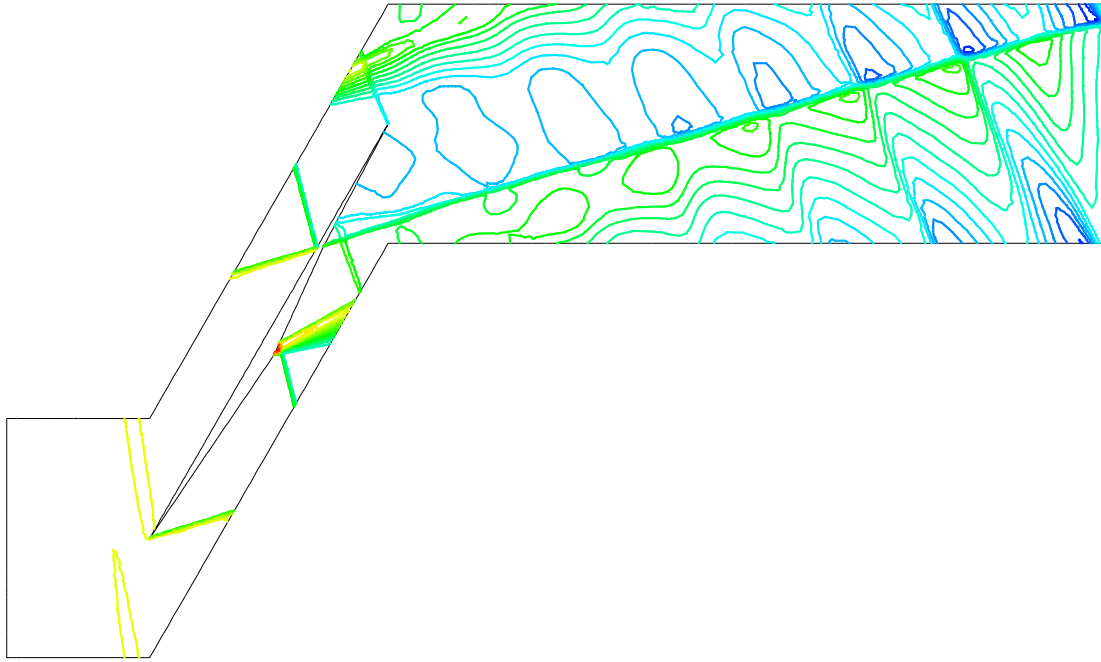
Μορφή πτερυγίου και προσαρμοσμένο σ' αυτή πλέγμα



Κατανομή ταχύτητας(αριθμού Mach) γύρω από το πτερόγιο. $M_{in}=1.6, M_{out}=1.3$



Γραμμές ισοταχύτητας(ίσου αριθμού Mach)

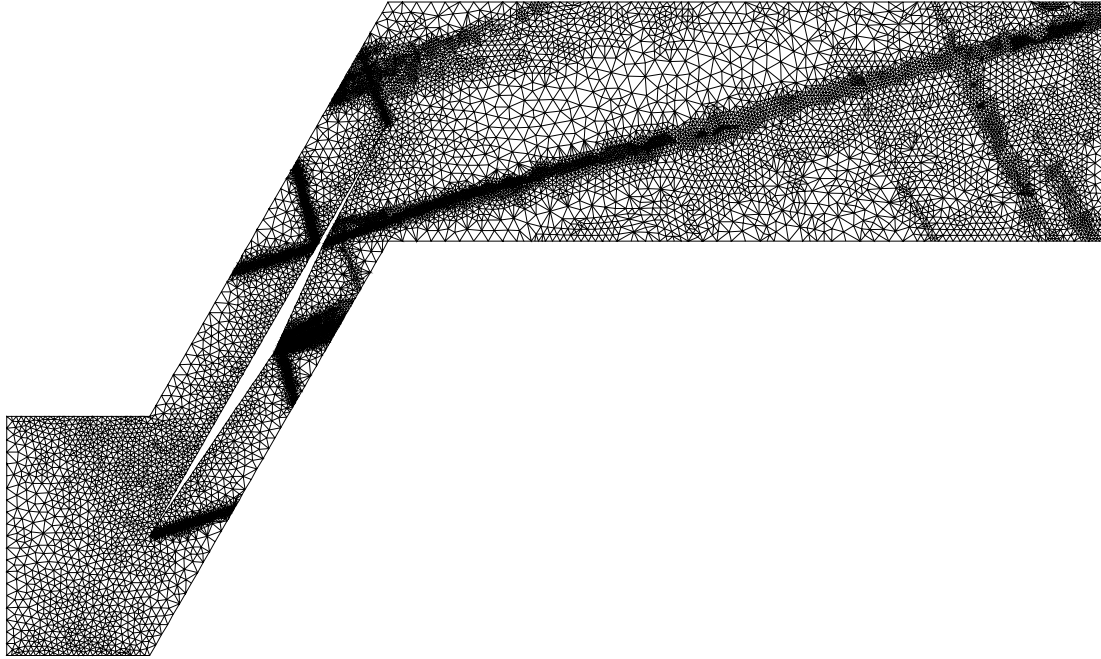


Elite 5

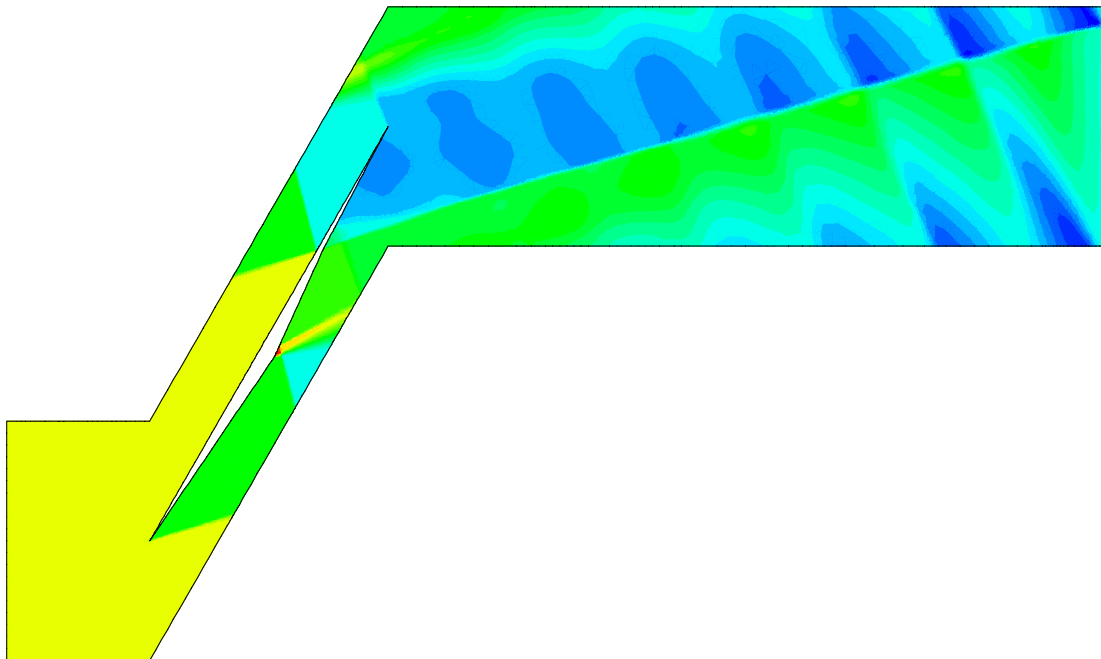
$$\Delta P_t/P_{ref}=0.01062$$

$$\Delta P/P_{ref}=0.08632, \pi_c=1.512$$

Μορφή πτερυγίου και προσαρμοσμένο σ' αυτή πλέγμα



Κατανομή ταχύτητας(αριθμού Mach) γύρω από το πτερόγιο. $M_{in}=1.6$, $M_{out}=1.31$



Γραμμές ισοταχύτητας(ίσου αριθμού Mach)

