

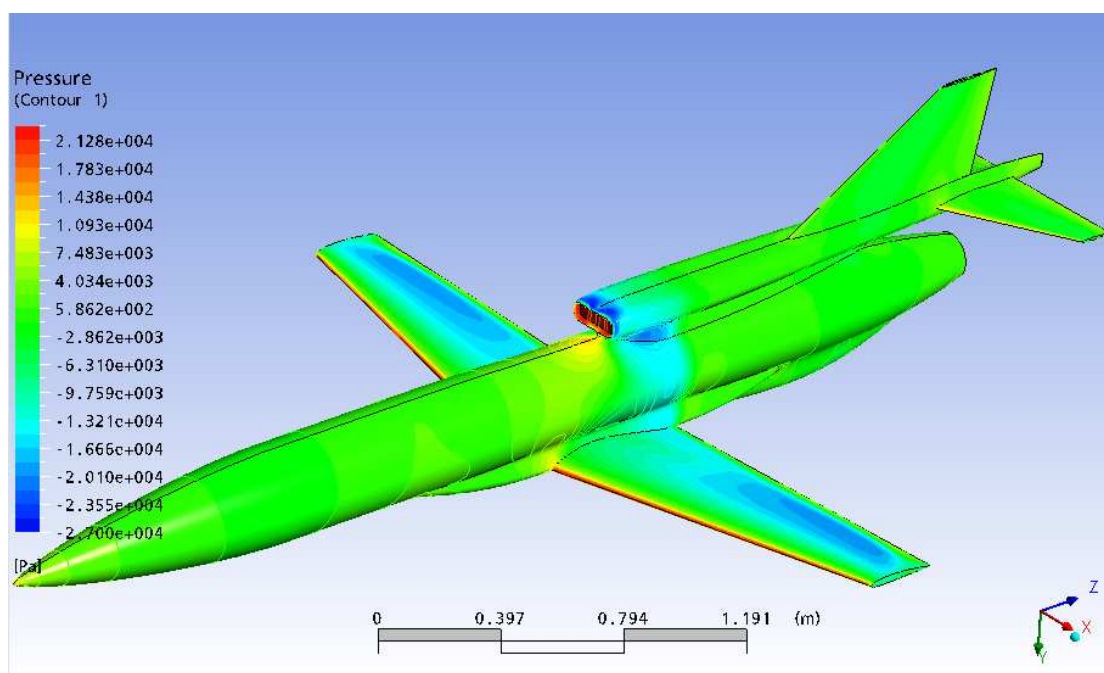


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Εφαρμογή μεθοδολογίας κατασκευής δομημένου
υπολογιστικού πλέγματος γύρω από αεροσκάφος για την
επίλυση της ροής



Πριμηκύριος Εμμανουήλ

ΑΜ: 2001010016

Επιβλέπων: Ιωάννης Κ. Νικολός, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά 2011

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον κ. Ι. Νικολό, επίκουρο καθηγητή,, ο οποίος ήταν ο επιβλέπων της εργασίας αυτής. Η προσφορά του, ηθική και διδακτική, είναι πολύ μεγάλη και δεν περιορίζεται μόνο στην πολύ καλή συνεργασία και καθοδήγηση. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Σαρακηνό Σωτήριο ,υποψήφιο διδάκτορα, για την ευγενική βοήθεια του σε διάφορους τομείς επιστημονικούς και τεχνικούς. Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω τον Παπαδόπουλο Φώτη, αν και δεν τον έχω γνωρίσει προσωπικά, που το έργο του ήταν οδηγός για την περάτωση αυτής της εργασίας.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Δελή και κ. Ρόβα, για την τιμή που μου έκαναν με το να είναι μέλη της εξεταστικής επιτροπής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να πω στους φίλους μου για τις αξέχαστες στιγμές που έζησα μαζί τους σε όλη την διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για την συμπαράσταση της όλα αυτά τα χρόνια.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στη γιαγιά μου Πριμηκυρίου Ειρήνη.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	3
Κατάλογος Εικόνων	4
1 Εισαγωγή	6
2 Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική	7
2.1 Ιστορικά στοιχεία	7
2.2 Τα μαθηματικά πίσω από την υπολογιστική ρευστοδυναμική	8
2.3 Ο επιλύτης	8
2.4 Το πλέγμα (Grid)	9
2.4.1 Δομημένο πλέγμα (Structured Grid)	9
2.4.2 Μη δομημένο πλέγμα (Unstructured Grid)	10
2.4.3 Υβριδικό πλέγμα (Hybrid Grid)	11
3 Ορισμός της γεωμετρίας του αεροσκάφους	13
3.1 Τροποποίηση γεωμετρίας για το περιβάλλον του ANSYS ICEM CFD 10.0	13
3.2 Κατασκευή γεωμετρίας του μοντέλου.	14
4 Δημιουργία των μπλοκς - Blocking Strategy	17
4.1 Αρχικό μπλοκ και O-Grid περιφερικά του αεροσκάφους	17
4.2 Blocking στο BOOM	21
4.3 Blocking ενδιάμεσου τμήματος ατράκτου-αεραγωγού (DIVERTER)	25
4.4 Blocking της ατράκτου (ATRAKTOS)	25
4.5 Blocking της γάστρας (BOX_WINGS)	27
4.6 Blocking κύριας πτέρυγας (FTERA)	28
4.7 Blocking ουραίου πτερώματος (PISO_FTERA)	29
4.8 Επιστροφή στο Blocking της γάστρας του αεροσκάφους (BOX_WINGS)	32
4.9 Διαμόρφωση των μπλοκς στον όγκο.	35
4.10 Δημιουργία O-Grid γύρω από το αεροσκάφος	38
5 Δημιουργία τριδιάστατου πλέγματος	40
6 Εισαγωγή πλέγματος και Μοντελοποίηση οριακών συνθηκών	49
6.1 Ορισμός του πεδίου ροής	49
6.2 Ορισμός επιμέρους οριακών συνθηκών	50
6.3 Παράμετροι του επιλύτη	54
7 Συμπεράσματα	60
Βιβλιογραφία	62
Ιστοσελίδες	62

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.4.1: Παράδειγμα δομημένου πλέγματος.

Εικόνα 2.4.2: Παράδειγμα μη δομημένου πλέγματος.

Εικόνα 2.4.3: Παράδειγμα υβριδικού πλέγματος.

Εικόνα 3.1.1: Μοντέλο σχεδιασμένο στο Catia.

Εικόνα 3.1.2: Μισό αεροσκάφος έτοιμο για εισαγωγή στο ANSYS ICEM CFD 10.0.

Εικόνα 3.2.1: Μοντέλο χωρίς τροποποιήσεις απευθείας από Catia.

Εικόνα 3.2.2: Μοντέλο με πρόσθετες επιφάνειες καμπύλες και σημεία και διαγραμμαμένες τις εσωτερικές επιφάνειες του αεραγωγού τύπου “S”.

Εικόνα 3.2.3: Τμήματα αεροσκάφους.

Εικόνα 3.2.4: Τμήματα του εξωτερικού κουτιού, που ορίζει το χωρίο ροής.

Εικόνα 4.1.1: Δημιουργία του πρώτου μπλοκ με αναφορά στις οριακές ακμές του κουτιού που περικλείει το αεροσκάφος.

Εικόνα 4.1.2: Επιλογή του πρώτου μπλοκ για δημιουργία του O-GRID επικολημένο στην επιφάνεια συμμετρίας.

Εικόνα 4.1.3: Μετακίνηση των ακμών του O-GRID σε σημεία που να περικλείουν το αεροσκάφος.

Εικόνα 4.1.4: Εργαλείο Index Control.

Εικόνα 4.1.5: Καμπύλες σε κρίσιμα μέρη τις γεωμετρίας.

Εικόνα 4.1.6: Αρχικές τομές (διαγώνια άποψη).

Εικόνα 4.1.7: Αρχικές Τομές (απεικόνιση στην διεύθυνση των Z).

Εικόνα 4.2.1: Επιλογή μπλοκ BOOM.

Εικόνα 4.2.2: Διεύθυνση των μπλοκ που είναι ενεργά .

Εικόνα 4.2.3: Τομές στα μπλοκ του BOOM.

Εικόνα 4.2.4: Ανάθεση κόμβων σε σημεία.

Εικόνα 4.2.5: Νέες τομές στο BOOM (βελάκια).

Εικόνα 4.2.6: Τα μπλοκ του BOOM χωρίς τη γεωμετρία μετά από την ανάθεση ακμών σε καμπύλες (οι αναθεμένες ακμές είναι πράσινες).

Εικόνα 4.2.7: Χείλος του αεραγωγού με και χωρίς στοιχεία γεωμετρίας (με τα βελάκια οι νέες τομές).

Εικόνα 4.2.8: Εισαγωγή των μπλοκ του αεραγωγού στο Part “MIX”.

Εικόνα 4.3.1: Επέκταση τομών στο μπλοκ του ενδιαμέσου τμήματος.

Εικόνα 4.3.2: Ολοκληρωμένα μπλοκ του ενδιαμέσου τμήματος.

Εικόνα 4.4.1: Νέες τομές στην άτρακτο.

Εικόνα 4.4.2: Ολοκληρωμένα τα μπλοκ στο κυλινδρικό τμήμα της ατράκτου.

Εικόνα 4.4.3: Μπλοκ μύτης αεροσκάφους.

Εικόνα 4.5.1: Τομές στο κάλυμμα της πτέρυγας.

Εικόνα 4.5.2: Πρόσθιο τμήμα του καλύμματος της πτέρυγας.

Εικόνα 4.6.1: επέκταση τομών πτέρυγας και νέα τομή του κουτιού στην άκρη της.

Εικόνα 4.6.2: Δημιουργία μπλοκ κύρια πτέρυγας.

Εικόνα 4.6.3: Τα μπλοκ της πτέρυγας ολοκληρωμένα και με συσχετίσεις.

Εικόνα 4.7.1: Τα μπλοκ του κατακόρυφου ουραίου πτερυγίου (κόκκινο βελάκι : νέα τομή στην άκρη του πτερυγίου, μπλε βελάκια : επεκτάσεις τομών).

Εικόνα 4.7.2: Νέα τομή στην άκρη του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου.

Εικόνα 4.7.3: Επεκτάσεις τομών στην αρχή και στο τέλος του οριζόντιου ουραίου πτερύγιου.

Εικόνα 4.7.4: επεκτεινόμενες τομές στο οριζόντιο ουραίο πτερύγιο.

Εικόνα 4.7.5: Ολοκληρωμένα μπλοκ του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου. Στο βελάκι η τομή που παρεμβάλλετε.

Εικόνα 4.8.1 : Επιλεγμένα μπλοκ του BOX_WINGS.

Εικόνα 4.8.2: Εργασίες στα επιλεγμένα μπλοκ.

Εικόνα 4.8.3: Τα μπλοκ τις γάστρας του αεροσκάφους.

Εικόνα 4.8.4: Πρόσθιο μπλοκ της γάστρας.

Εικόνα 4.8.5: Ιδιαιτερότητα στο μπλοκ της γάστρας.

Εικόνα 4.8.6: Μπλοκ στο τέλος της γάστρας.

Εικόνα 4.8.7: Επιφανειακό πλέγμα, έλεγχος για λάθη ή παραλήψεις.

Εικόνα 4.9.1: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης της πτέρυγας.

Εικόνα 4.9.2: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης στο άκρο της πτέρυγας.

Εικόνα 4.9.3: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης στο κάλυμμα της πτέρυγας.

Εικόνα 4.9.4: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης στο πίσω άκρο της γάστρας του αεροσκάφους.

Εικόνα 4.9.5: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης στο ουραίο οριζόντιο φτερό.

Εικόνα 4.9.6: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης ουραίο κάθετο φτερό.

Εικόνα 4.9.7: Τα μπλοκ στον όγκο της γεωμετρίας μετά από επέκταση όλων των τομών.

Εικόνα 4.9.8: Το πρώτο επίπεδο τομών στον άξονα των X από το Index Control.

Εικόνα 4.10.1: Μερικές λεπτομέρειες του O-Grid.

Εικόνα 4.10.2: Μετακινήσεις κόμβου του O-Grid στη βάση του αεραγωγού.

Εικόνα 4.10.3: Μετακινήσεις κόμβων του O-Grid στην άκρη της κύριας πτέρυγας.

Εικόνα 5.1: Διαδικασία δημιουργίας πλέγματος με ελάχιστα στοιχεία.

Εικόνα 5.2: Εισαγωγή παραμέτρων στις αποστάσεις των κόμβων στις ακμές του εξωτερικού O-Grid.

Εικόνα 5.3: Εισαγωγή παραμέτρων στις αποστάσεις των κόμβων στις ακμές του εσωτερικού O-Grid.

Εικόνα 5.4: Εισαγωγή παραμέτρων στις αποστάσεις των κόμβων στην αρχή του κάθετου ουραίου πτερυγίου.

Εικόνα 5.5: Εισαγωγή παραμέτρων στις αποστάσεις των κόμβων στο κάλυμμα της βάσης πάνω από τη κύρια πτέρυγα.

Εικόνα 5.6: Εισαγωγή παραμέτρων στις αποστάσεις των κόμβων στην είσοδο του αεραγωγού.

Εικόνα 5.7: Έλεγχος ποιότητας πλέγματος.

Εικόνα 5.8: Μη ποιοτικά στοιχεία στην άκρη του κάθετου ουραίου πτερυγίου.

Εικόνα 5.9: Μη ποιοτικά στοιχεία στην βάση του κάθετου ουραίου πτερυγίου.

Εικόνα 5.10: Μη ποιοτικά στοιχεία στην άκρη του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου και στην ουρά του αεροσκάφους.

Εικόνα 5.11: Μη ποιοτικά στοιχεία στην βάση της κύριας πτέρυγας και στο κάλυμμα της βάσης.

Εικόνα 5.12: Πλέγμα στην επιφάνεια συμμετρίας και στην μύτη του αεροσκάφους.

Εικόνα 5.13: Γενική απεικόνιση πλέγματος και πλέγμα στην είσοδο του αεραγωγού.

Εικόνα 5.14: Πλέγμα στη βάση του κάθετου και οριζόντιου ουραίου πτερυγίου.

Εικόνα 5.15: Πλέγμα στην πίσω άκρη του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου και στην ουρά του αεροσκάφους.

Εικόνα 5.16: Πλέγμα στο πρόσθιο μέρος του καλύμματος της βάσης και στην ένωση του με την γάστρα.

Εικόνα 5.17: Πλέγμα στην πρόσθια και οπίσθια μέρος της γάστρας.

Εικόνα 5.18: Πλέγμα στην άκρη της κύριας πτέρυγας και στο τμήμα πάνω αυτής.

Εικόνα 5.19: Άποψη με SCAN PLANE στο επίπεδο YZ.

Εικόνα 5.20: Άποψη με SCAN PLANE στο επίπεδο XY.

Εικόνα 6.1: Το γραφικό περιβάλλον του CFX-Pre με το υπολογιστικό χωρίο του προς μελέτη μοντέλου.

Εικόνα 6.1.1: Καρτέλες ορισμού των συνθηκών του πεδίου ροής.

Εικόνα 6.2.1: Οριακές συνθήκες στην επιφάνεια επιφάνεια εισόδου του ρευστού.

Εικόνα 6.2.2: Οριακές συνθήκες στην έξοδο του ρευστού.

Εικόνα 6.2.3: Οριακές συνθήκες στην πλευρική επιφάνεια.

Εικόνα 6.2.4: Δήλωση της συμμετρίας.

Εικόνα 6.2.5: Οριακές συνθήκες στην ομάδα επιφανειών AERO.

Εικόνα 6.2.6: Οριακές συνθήκες στην είσοδο του αεραγωγού (ENGINE_IN).

Εικόνα 6.2.7: Οριακές συνθήκες στην έξοδο του ρευστού από το αεροσκάφος (ENGINE_OUT).

Εικόνα 6.2.8: Το αεροσκάφος μετά την ανάθεση των οριακών συνθηκών.

Εικόνα 6.3.1: Ορισμός των παραμέτρων του επιλύτη.

Εικόνα 6.3.2: Τυπικό γράφημα πορείας της σύγκλισης για τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας (κόκκινο χρώμα: μέσο υπόλοιπο εξίσωσης συνέχειας, πράσινο χρώμα: υπόλοιπο εξίσωσης x-ορμής, γαλάζιο χρώμα: υπόλοιπο y-ορμής, πορτοκαλί χρώμα: υπόλοιπο z-ορμής).

Εικόνα 6.3.3: Ισογραμμές σταθερής στατικής πίεσης στην περιοχή εισόδου στον αεραγωγό του αεροσκάφους. Διακρίνονται τα σημεία ανακοπής στο χέιλος με τη μεγάλη τιμή της στατικής πίεσης (κόκκινο χρώμα).

Εικόνα 6.3.4: Γραμμές ροής κοντά στην επιφάνεια του αεροσκάφους. Διακρίνεται, μετά την είσοδο του αεραγωγού, το κατώ ρευμα που δημιουργεί η πτέρυγα, σε συνδυασμό με το boom. (ENGINE_OUT).

Εικόνα 6.3.5: Διανύσματα ταχύτητας κοντά στην είσοδο στον αεραγωγό, όπου διακρίνεται χαρακτηριστικά το οριακό στρώμα που σχηματίζεται στο τοίχωμα (επίπεδο συμμετρίας). Επίσης διακρίνεται η επιτάχυνση της ροής στην είσοδο του αεραγωγού, αλλά και στο καμπύλο τμήμα πάνω από τον αεραγωγό.είσοδο του αεραγωγού (ENGINE_IN).

Εικόνα 6.3.6: Ισογραμμές σταθερής τιμής του y^+ . Για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων δεν πρέπει να υπερβαίνει η τιμή του την τιμή 40, κάτι που ισχύει στην συγκεκριμένη περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα. Αυτό επιτεύχθηκε με τον πολύ καλό έλεγχο του πλέγματος που επιτρέπει η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε.

1 Εισαγωγή

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics - CFD) είναι ένα σχετικά νέο γνωστικό αντικείμενο στο χώρο της μηχανικής, που τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει αλματώδη ανάπτυξη. Η ολοένα και αυξανόμενη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς αλλά και η ανάγκη της βιομηχανίας για οικονομικές και αποτελεσματικές λύσεις στην μελέτη ρευστοδυναμικών φαινομένων είναι μερικοί λόγοι για την άνθηση στο αντικείμενο αυτό. Πλέον στην αγορά κυκλοφορούν ολοκληρωμένα πακέτα λογισμικού CFD και η προσομοίωση σε υπολογιστικό περιβάλλον έχει γίνει καθημερινή πρακτική, τόσο σε πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα, όσο και στη βιομηχανία.

Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθεί εμπορικό λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και θα εφαρμοστεί σε ένα πρόβλημα της αεροναυπηγικής, όπου η υπολογιστική ρευστοδυναμική βρίσκει απόλυτα πεδίο δράσης. Το κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των θετικών και αρνητικών επιπτώσεων από τη δημιουργία δομημένου εξαεδρικού υπολογιστικού πλέγματος γύρω από ένα αεροσκάφος για την επίλυση του αντίστοιχου πεδίου ροής. Επιπλέον στόχος είναι η τυποποίηση της μεθοδολογίας κατασκευής τέτοιου είδους πλεγμάτων γύρω από πραγματικές γεωμετρίες αεροσκαφών και η δημιουργία κατευθυντήριων οδηγιών για πιθανούς χρήστες στο μέλλον.

Η δημιουργία δομημένου εξαεδρικού πλέγματος είναι μια εργασία που χρειάζεται γνώσεις πλεγματοποίησης, εμπειρία και φαντασία. Λόγω έλλειψης τυποποιημένης μεθοδολογίας στην εξαεδρική πλεγματοποίηση, οι τρόποι που μπορεί να κατασκευαστεί ένα σωστό πλέγμα, ειδικά σε περίπλοκες γεωμετρίες, ποικίλουν ανάλογα με τον χρήστη και το χρησιμοποιούμενο λογισμικό.

Η γεωμετρία, που θα επιχειρήσουμε πλεγματοποίηση, ανήκει σε ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV) και κατασκευάστηκε παραμετρικά στο CATIA V5. Η συμμετρία του αεροσκάφους και οι δυνατότητες του λογισμικού πλεγματοποίησης (ANSYS ICEM CFD) μας επιτρέπουν να κατασκευάσουμε πλέγμα στο μισό αεροσκάφος, ώστε να μειωθεί το μέγεθος του πλέγματος.

Η δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος υλοποιήθηκε σε προσωπικό υπολογιστή, ενώ η αριθμητική επίλυση της ροής για το συγκεκριμένο υπολογιστικό πλέγμα πραγματοποιήθηκε σε συστοιχία 5 υπολογιστών, με χρήση παράλληλης επεξεργασίας με το λογισμικό ANSYS CFX. Τα χαρακτηριστικά κάθε ηλεκτρονικού υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε είναι: Μονοπύρηνος επεξεργαστής Pentium4 CPU 3.20 GHz, RAM 2GB και κάρτα γραφικών NVIDIA Quadro FX 500/600 PCI.

2 Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) είναι μία μέθοδος πρόβλεψης της συμπεριφοράς των ρευστών, η οποία βασίζεται στην **αριθμητική επίλυση** των εξισώσεων συνέχειας και ορμής (εξισώσεις *Navier-Stokes*) σε συνδυασμό με την εξίσωση ενέργειας, σε γεωμετρία που ορίζεται από το χρήστη. Αποτελεί ένα αποτελεσματικό και εύχρηστο εργαλείο προσομοίωσης της συμπεριφοράς των ρευστών. Έτσι μπορεί να μελετηθεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων στα χαρακτηριστικά της ροής (κατανομή ταχύτητας, πτώση πίεσης, μεταφορά θερμότητας, μεταφορά μάζας κ.λπ.).

Για να επιλυθεί το φυσικό πρόβλημα με μεθόδους **CFD**, το πρώτο βήμα είναι να διακριτοποιηθεί ο φυσικός χώρος της ροής σε ένα δίκτυο κελιών (πλέγμα, *grid*), όπου διακριτοποιούνται οι διαφορικές εξισώσεις, που περιγράφουν το φαινόμενο. Με τον τρόπο αυτό οι **διαφορικές** εξισώσεις μετατρέπονται σε εξισώσεις **διαφορών**, δηλαδή αλγεβρικές εξισώσεις, που **επιλύονται** διαδοχικά μέσα στα τριδιάστατα κελιά του πλέγματος. Τέλος, στα αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν γραφήματα των παραμέτρων της ροής (π.χ. ταχύτητας, πίεσης, διατμητικής τάσης) με διάφορες μορφές.

2.1 Ιστορικά στοιχεία

Οι υπολογιστές χρησιμοποιούνται για να επιλύουν προβλήματα ροής για πολλά χρόνια τώρα. Αρκετά προγράμματα έχουν γραφεί για να επιλύσουν είτε ειδικά προβλήματα, είτε ειδικές κατηγορίες προβλημάτων. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 αναπτύχθηκαν τα σύνθετα μαθηματικά που χρειάζονται για να γενικοποιηθούν οι αλγόριθμοι επίλυσης και δημιουργήθηκαν έτσι οι πρώτοι γενικής χρήσης επιλύτες. Αυτοί εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1980 και απαιτούσαν πολύ ισχυρούς υπολογιστές, πολύ καλή γνώση της ρευστοδυναμικής και μεγάλο χρόνο προετοιμασίας για το στήσιμο μιας προσομοίωσης. Συνακόλουθο ήταν η υπολογιστική ρευστοδυναμική να χρησιμοποιηθεί αρχικά αποκλειστικά στην επιστημονική έρευνα [ANSYS Doc].

Οι πρόσφατες εξελίξεις στον χώρο των υπολογιστών, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη ισχυρών γραφικών εργαλείων τρισδιάστατης μοντελοποίησης, κατέστησαν τη διαδικασία δημιουργίας ενός μοντέλου CFD και της ανάλυσής του πολύ ευκολότερη υπόθεση, με μειωμένο απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο και ως εκ τούτου μειωμένο κόστος. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η υπολογιστική ρευστοδυναμική να χρησιμοποιείται πλέον ευρέως ως εργαλείο βιομηχανικού σχεδιασμού, βοηθώντας έτσι στη μείωση του χρόνου ανάπτυξης ενός προϊόντος και στη βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική προσφέρει μια εναλλακτική λύση, συμφέρουσα από πλευράς κόστους και ακριβή στα αποτελέσματα, σε σχέση με τις δοκιμές σε μοντέλα υπό κλίμακα εντός αεροδυναμικής σήραγγας. Επίσης, οι διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία ελέγχονται άμεσα, προσφέροντας εμφανή πλεονεκτήματα [Παπαδόπουλος Φώτης, 2007].

2.2 Τα μαθηματικά πίσω από την υπολογιστική ρευστοδυναμική

Το σύνολο των εξισώσεων, που περιγράφουν τη μεταφορά ορμής, ενέργειας και μάζας σε ένα ρευστό είναι γνωστές ως εξισώσεις Navier-Stokes. Αυτές οι μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις ανακαλύφθηκαν στις αρχές του 19ου αιώνα και δεν επιδέχονται αναλυτικής λύσης (παρά μόνο σε πολύ απλές περιπτώσεις ροών), αλλά μπορούν να διακριτοποιηθούν και να επιλυθούν αριθμητικά.

Εξισώσεις που περιγράφουν άλλες διεργασίες, όπως την καύση ή άλλες χημικές αντιδράσεις, μπορούν να επιλυθούν σε συνδυασμό με τις εξισώσεις Navier-Stokes. Συχνά χρησιμοποιείται μια προσεγγιστική διαδικασία για την εξαγωγή των επιπλέον αυτών εξισώσεων (τα μοντέλα τύρβης είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων προσεγγιστικών μοντέλων).

Υπάρχει ένα σύνολο διαφορετικών μεθόδων επίλυσης, που χρησιμοποιούνται στους κώδικες CFD. Η πιο κοινή (και αυτή στην οποία βασίζεται το λογισμικό που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία) είναι η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων. Σε αυτή την τεχνική η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται με το πλέγμα σε μικρές υποπεριοχές, που καλούνται όγκοι ελέγχου. Οι εξισώσεις διακριτοποιούνται και επιλύονται επαναληπτικά για κάθε όγκο ελέγχου. Ως αποτέλεσμα παίρνουμε την προσέγγιση της τιμής κάθε μεταβλητής σε συγκεκριμένα σημεία μέσα σε κάθε όγκο ελέγχου [Παπαδόπουλος Φώτης, 2007].

2.3 Ο επιλύτης

Το λογισμικό, το οποίο επιλύει το ρευστοδυναμικό πρόβλημα, καλείται επιλύτης. Αρχικά οι μερικές διαφορικές εξισώσεις διακριτοποιούνται για κάθε όγκο ελέγχου στην περιοχή ενδιαφέροντός μας. Αυτό ισοδυναμεί με την εφαρμογή της αρχής διατήρησης της μάζας και της ορμής (για παράδειγμα) σε κάθε όγκο ελέγχου. Οι διαφορικές εξισώσεις με τη διαδικασία διακριτοποίησης μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, οι οποίες επιλύονται επαναληπτικά για όλους τους επιμέρους όγκους ελέγχου, στους οποίους έχουμε διακριτοποιήσει το πεδίο ροής που εξετάζουμε.

Η επαναληπτική προσέγγιση απαιτείται εξ αιτίας της μη γραμμικής φύσης των εξισώσεων και καθώς η λύση πλησιάζει την ακριβή λύση λέμε ότι συγκλίνει. Για κάθε επανάληψη καταγράφεται ένα σφάλμα ή υπόλοιπο (residual), ως ένα μέτρο της σταθερότητας της ροής σύγκλισης. Το κατά πόσον η λύση πλησιάζει την ακριβή λύση του προβλήματος εξαρτάται από ένα αριθμό παραγόντων, όπως το μέγεθος και το σχήμα των όγκων ελέγχου, καθώς και το μέγεθος του τελικού υπολοίπου. Σύνθετες φυσικές διαδικασίες, όπως η καύση και η τύρβη, μοντελοποιούνται με τη χρήση εμπειρικών ή ημι-εμπειρικών σχέσεων. Οι προσεγγίσεις, που ενυπάρχουν σε αυτά τα

μοντέλα, συμβάλουν στη διαφορά των λύσεων μεταξύ της αριθμητικής λύσης CFD και της πραγματικής ροής [ANSYS Doc].

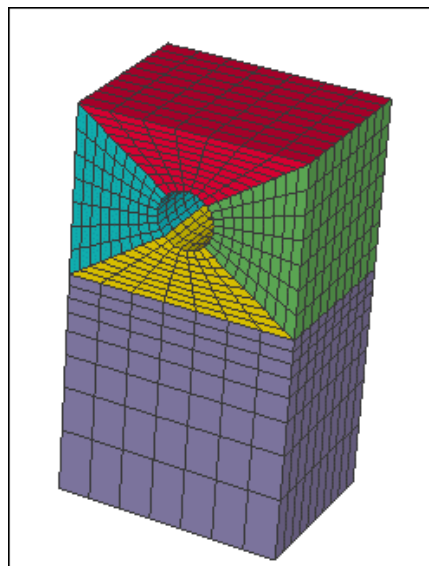
2.4 Το πλέγμα (Grid)

Η παραγωγή υπολογιστικού πλέγματος είναι η σημαντικότερη και πιο χρονοβόρα εργασία στην ανάλυση με μεθόδους υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Η ποιότητα του πλέγματος είναι το κλειδί για την ποιότητα της ανάλυσης, ανεξάρτητα από τον επιλύτη που χρησιμοποιούμε, αν και με ένα καλά κατασκευασμένο πλέγμα ο επιλύτης καθίσταται ταχύτερος και πιο αποδοτικός. Έτσι είναι σημαντικό για τον χρήστη μεθόδων CFD να γνωρίζει και να καταλαβαίνει όλες τις μεθόδους παραγωγής πλέγματος. Μόνο με τη γνώση αυτή θα μπορεί να επιλέξει το κατάλληλο εργαλείο για το πρόβλημα που αντιμετωπίζει.

2.4.1 Δομημένο πλέγμα (Structured Grid)

Το δομημένο πλέγμα αποτελείται από επαναλαμβανόμενα δομικά στοιχεία, που ονομάζονται μπλοκ. Αυτοί οι τύποι πλέγματος χρησιμοποιούν τα τετράπλευρα στοιχεία στις δύο διαστάσεις (2D) και τα εξάεδρα στοιχεία στις τρεις διαστάσεις (3D). Αν και η τοπολογία των στοιχείων του πλέγματος είναι σταθερή, το πλέγμα μπορεί να διαμορφωθεί για να ταιριάζει με τη γεωμετρία που μελετάται, μέσω της παραμόρφωσης των μπλοκ.

Οι μέθοδοι δομημένης πλεγματοποίησης στη διάρκεια των χρόνων εξελίχτηκαν εντυπωσιακά. Παλιότερα τα δομημένα πλέγματα αποτελούνταν από ένα και μοναδικό μπλοκ. Αργότερα αναπτύχθηκε η σύνδεση μεταξύ των μπλοκ και είχαμε δομημένα πλέγματα με πολλά μπλοκ, που περιέκλειαν διάφορες περιοχές της γεωμετρίας. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν λογισμικά που επέτρεπαν στα μπλοκ να «ταιριάζουν» τοπολογικά με τα φυσικά όρια της γεωμετρίας με εντολές σύνδεσης ακμής του μπλοκ με σημείο της γεωμετρίας. Ενώ όμως τα πλέγματα με πολλά μπλοκ δίνουν στο χρήστη περισσότερη ελευθερία στη κατασκευή του πλέγματος, οι απαιτήσεις σύνδεσης μπλοκ είναι αυτές που κάνουν δύσκολες αυτές της μεθόδους.



Εικόνα 2.4.4: Παράδειγμα δομημένου πλέγματος.

Για να ξεπεραστούν τα προβλήματα σύνδεσης των μπλοκς, αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι, οι οποίες παρόλο που βοηθούν το χρήστη στη κατασκευή του πλέγματος, στοιχίζουν στην ακρίβεια λύσης. Τέτοιες μέθοδοι είναι για παράδειγμα οι μέθοδοι "chimera grids", που επιτρέπουν στα ελεύθερα μπλοκς να προσαρμοστούν στα φυσικά όρια της γεωμετρίας με μια πιο ελεύθερη μορφή, επιτρέποντας αλληλεπικαλύψεις [www.cfdreview.com].

Το πλεονέκτημα των δομημένων πλεγμάτων είναι ότι επιτρέπουν στο χρήστη έναν υψηλό βαθμό ελέγχου. Επειδή ο χρήστης τοποθετεί τα σημεία και τις άκρες ελέγχου αμφίδρομα, έχει τη συνολική ελευθερία κατά τον προσδιορισμό θέσης του πλέγματος. Επιπλέον, τα εξάεδρα (3D) και τετράπλευρα (2D) στοιχεία είναι πολύ αποδοτικά στην πλήρωση του διαστήματος και επιτρέπουν σε μεγάλο ποσοστό στρέψη και παραμόρφωση προτού να επηρεαστεί σημαντικά η λύση. Αυτό επιτρέπει στο χρήστη να συμπυκνώσει φυσικά τα σημεία στις περιοχές υψηλών κλίσεων και να αραιώνει το πλέγμα μακριά από τις περιοχές αυτές. Ακόμα τα δομημένα πλέγματα, λόγω της τοπολογίας τους, απαιτούν χαμηλότερο ποσό μνήμης για ένα δεδομένο μέγεθος πλέγματος και οδηγούν σε ταχύτερη επίλυση της ροής.

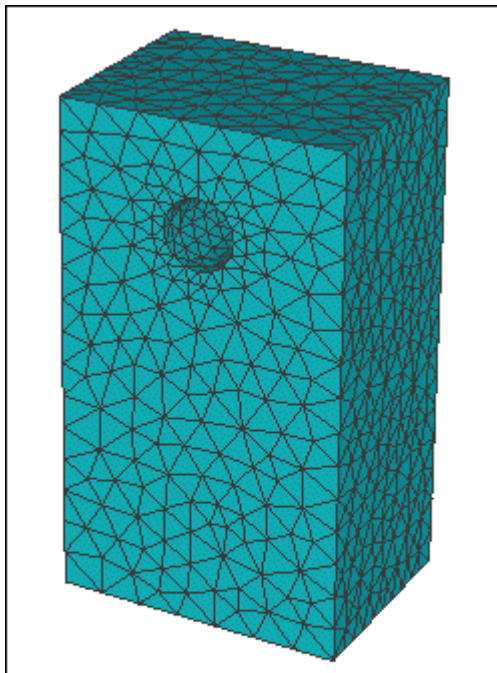
Το σημαντικότερο μειονέκτημα των δομημένων πλεγμάτων είναι ο χρόνος και η πείρα που απαιτούνται για να σχεδιάσει κάποιος μια βέλτιστη δομή μπλοκ. Επίσης, σε ορισμένα ιδιαίτερα σημεία γεωμετρίας π.χ. ρηχοί κώνοι και σφήνες, ο χρήστης αναγκάζεται να τεντώσει ή να στρέψει τα στοιχεία σε έναν βαθμό που έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ακρίβεια και στην απόδοση του επιλύτη. Οι χρόνοι παραγωγής πλέγματος μετριοούνται συνήθως σε ημέρες, εάν όχι σε εβδομάδες, σε αντίθεση με την αυτοματοποιημένη δημιουργία μη δομημένου πλέγματος, που ολοκληρώνεται σε ώρες [www.cfdreview.com].

2.4.2 Μη δομημένο πλέγμα (Unstructured Grid)

Το μη δομημένο πλέγμα αποτελείται από μια συλλογή στοιχείων, που δεν διατάσσονται με συγκεκριμένη δομή στο χώρο. Συνήθως αυτά τα στοιχεία είναι τριγωνικά στις δυο διαστάσεις (2D) και τετράεδρα στις τρεις διαστάσεις (3D). Ωστόσο υπάρχουν μερικοί κώδικες που μπορούν να παράξουν μη δομημένα τετράπλευρα στοιχεία σε δυο διαστάσεις (2D), αλλά δεν υπάρχουν ακόμα αποδοτικοί κώδικες που να παράγουν μη δομημένα εξάπλευρα στις τρεις διαστάσεις (3D). Όπως και με το δομημένο πλέγμα, τα στοιχεία του μη δομημένου πλέγματος μπορούν να παραμορφωθούν και να υποστούν στρέψη για να γεμίσουν την περιοχή που μελετάται [www.cfdreview.com].

Τα πλεονεκτήματα του μη δομημένου πλέγματος είναι ότι οι μέθοδοι παραγωγής του είναι εξαιρετικά αυτοματοποιημένες και απαιτούν από τον χρήστη λίγο χρόνο και μικρή προσπάθεια. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις ακόμα και άπειροι χρήστες, με λίγη ενασχόληση, μπορούν να παράξουν ένα έγκυρο πλέγμα για οσοδήποτε δύσκολη γεωμετρία. Έτσι καταλαβαίνουμε πως οι χρόνοι παραγωγής μη δομημένου πλέγματος μετριούνται συνήθως σε λεπτά ή ώρες για προβλήματα με δύσκολες γεωμετρίες.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των μη δομημένων πλεγμάτων είναι η έλλειψη έλεγχου των σχεδιαστικών παραμέτρων του πλέγματος από τους χρήστες. Ουσιαστικά οι χρήστες περιορίζονται στα στενά όρια, που οι μέθοδοι πραγματοποίησης τους δίνουν. Τα τρίγωνα (2D) και τα τετράεδρα (3D) στοιχεία έχουν το μειονέκτημα ότι δεν τεντώνουν ούτε στρίβουν πολύ, επομένως όλα τα στοιχεία έχουν κατά προσέγγιση το ίδιο μέγεθος και την ίδια μορφή, πρόβλημα που είναι σημαντικό κατά την προσπάθεια να καθοριστεί το πλέγμα σε μια τοπική περιοχή υψηλής σημαντικότητας. Έτσι συχνά ολόκληρο το πλέγμα πρέπει να γίνει πολύ πυκνότερο, προκειμένου να πάρει τις πυκνότητες της σημαντικής περιοχής. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι η παραγωγή μη δομημένου πλέγματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της γεωμετρίας του γεωμετρικού μοντέλου (CAD). Ένα ενδεχομένως μικροσκοπικό λάθος ή ατέλεια της ψηφιακής γεωμετρίας (CAD) είναι αρκετό ώστε να έχουμε αποτυχίες στην παραγωγή πλέγματος και ουσιαστικά σε πολλές περιπτώσεις να μην μπορούμε να κατασκευάσουμε πλέγμα αν δεν διορθώσουμε τη γεωμετρία. Επίσης, η επίλυση ενός μη δομημένου πλέγματος απαιτεί χαρακτηριστικά περισσότερη μνήμη και μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης από τα δομημένα πλέγματα [www.cfdreview.com].

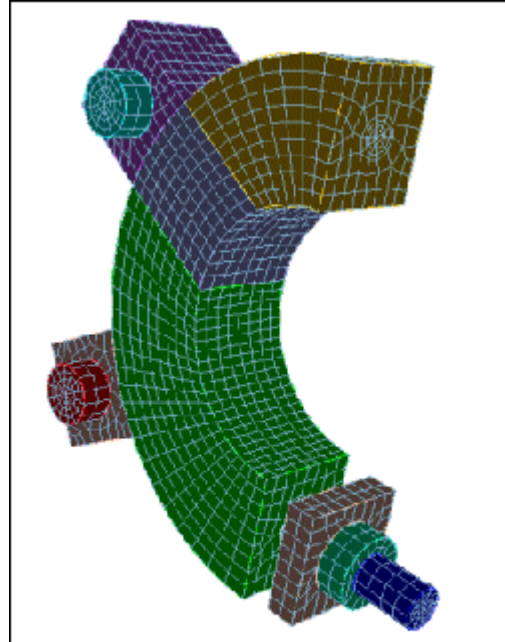


Εικόνα 2.4.5: Παράδειγμα μη δομημένου πλέγματος.

2.4.3 Υβριδικό πλέγμα (Hybrid Grid)

Τα υβριδικά πλέγματα έχουν σκοπό να εκμεταλλευθούν τις θετικές πτυχές και των δομημένων και των μη δομημένων πλεγμάτων. Χρησιμοποιούν κάποια μορφή δομημένου πλέγματος στις τοπικές περιοχές υψηλής σημαντικότητας και μη δομημένο πλέγμα στο μεγαλύτερο μέρος της υπόλοιπης περιοχής. Αυτό είναι και το πλεονέκτημά τους.

Τα υβριδικά πλέγματα περιλαμβάνουν εξάεδρα, τετράεδρα, πρισματικά και πυραμοειδή στοιχεία στις τρεις διαστάσεις (3D) και τρίγωνα και τετράπλευρα στις δυο διαστάσεις (2D). Τα διάφορα στοιχεία χρησιμοποιούνται σύμφωνα με τα προτερήματα και τις αδυναμίες τους. Τα εξάεδρα στοιχεία συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται πλησίον σε στερεά όρια. Τα πρισματικά στοιχεία είναι χρήσιμα κοντά σε τοίχους, αλλά πάσχουν από το γεγονός ότι είναι δύσκολο να συγκεντρωθούν στην πλευρική κατεύθυνση, λόγω της τριγωνικής δομής. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, τα τετράεδρα στοιχεία χρησιμοποιούνται για να γεμίσουν τον υπόλοιπο όγκο. Τα στοιχεία πυραμίδων χρησιμοποιούνται στη μετάβαση από τα εξάεδρα στοιχεία στα τετράεδρα στοιχεία. Πολλοί κώδικες προσπαθούν να αυτοματοποιήσουν την παραγωγή των πρισματικών πλεγμάτων, με το να επιτρέπουν στον χρήστη να καθορίζει το πλέγμα της επιφάνειας, στο οποίο θα βασιστεί το τριδιάστατο πλέγμα.



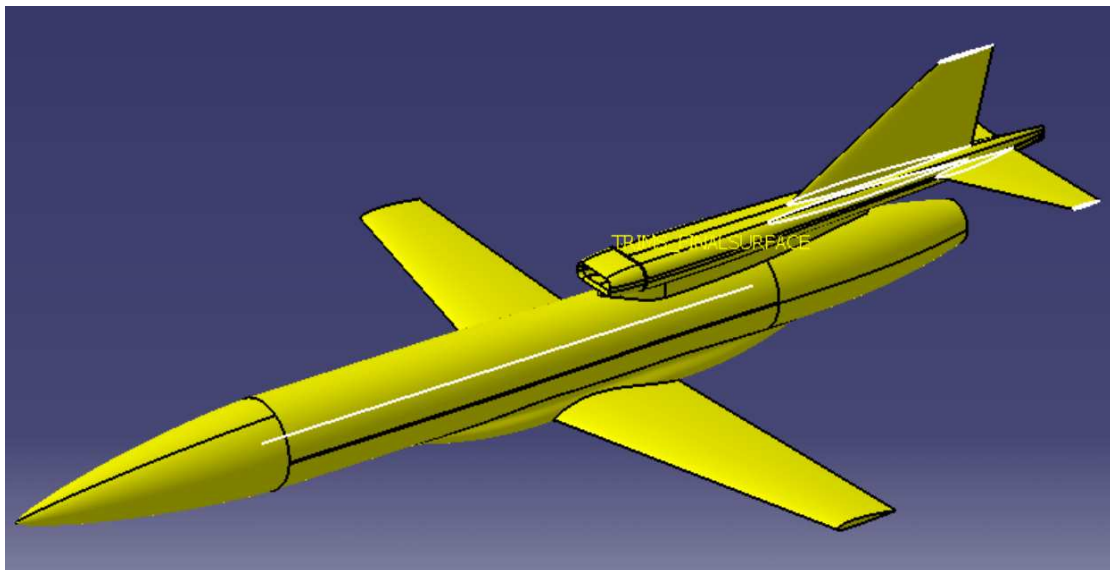
Εικόνα 2.4.6: Παράδειγμα υβριδικού πλέγματος.

Το μειονέκτημα του υβριδικού πλέγματος είναι ότι απαιτεί μεγάλη πείρα από το χρήστη και είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί. Οι υβριδικές μέθοδοι είναι χαρακτηριστικά λιγότερο εύρωστες από τις μη δομημένες μεθόδους. Η παραγωγή των δομημένων μερών του πλέγματος αποτυγχάνει συχνά, λόγω της περίπλοκης γεωμετρίας και της απειρίας του χρήστη. Επιπλέον, η επίλυση της ροής μπορεί να χρησιμοποιήσει τόσους πόρους όσους και σε έναν μη δομημένο πλέγμα. Ο χρόνος για να κατασκευαστεί ένα υβριδικό πλέγμα μετράται συνήθως σε ώρες ή μέρες.

3 Ορισμός της γεωμετρίας του αεροσκάφους

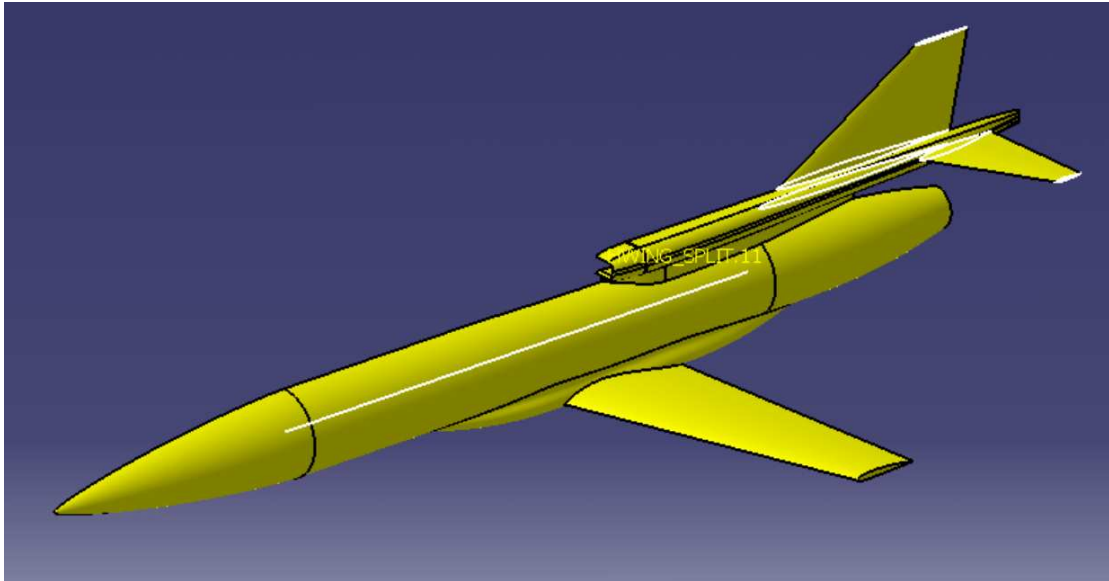
3.1 Τροποποίηση γεωμετρίας για το περιβάλλον του ANSYS ICEM CFD 10.0

Το αεροσκάφος γύρω από το οποίο θα κατασκευαστεί το δομημένο υπολογιστικό πλέγμα, σχεδιάστηκε στο λογισμικό CATIA V5 και χρησιμοποιήθηκε έτοιμο (**Εικόνα 3.1.1**).



Εικόνα 3.1.1: Μοντέλο σχεδιασμένο στο Catia.

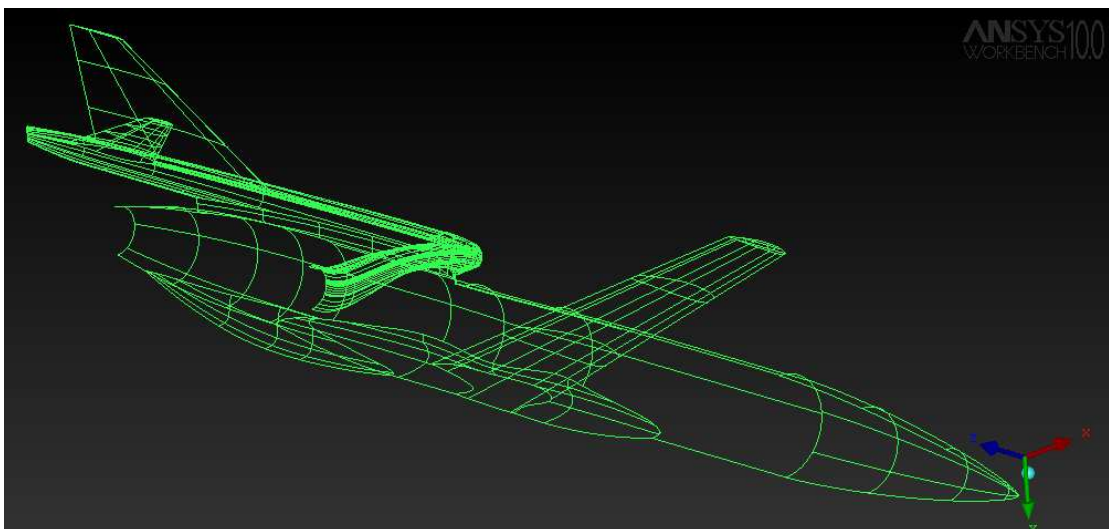
Στη συνέχεια, μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού CATIA, το διαχωρίσαμε στο ήμισυ και κρατήσαμε το ένα τμήμα (**Εικόνα 3.1.2**). Στη συνέχεια το αποθηκεύσαμε σαν αρχείο της μορφής *.model, το οποίο επιτρέπει την καλύτερη δυνατή εξαγωγή των γεωμετρικών οντοτήτων του μοντέλου, δηλαδή την βέλτιστη μεταφορά καμπυλών, σημείων και επιφανειών από το CATIA V5 στο ANSYS ICEM CFD, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η δημιουργία του πλέγματος. Για να γίνει σωστά η πλεγματοποίηση, απαιτήθηκε να διαμορφώσουμε κατάλληλα τη γεωμετρία του μοντέλου στο ANSYS ICEM CFD.



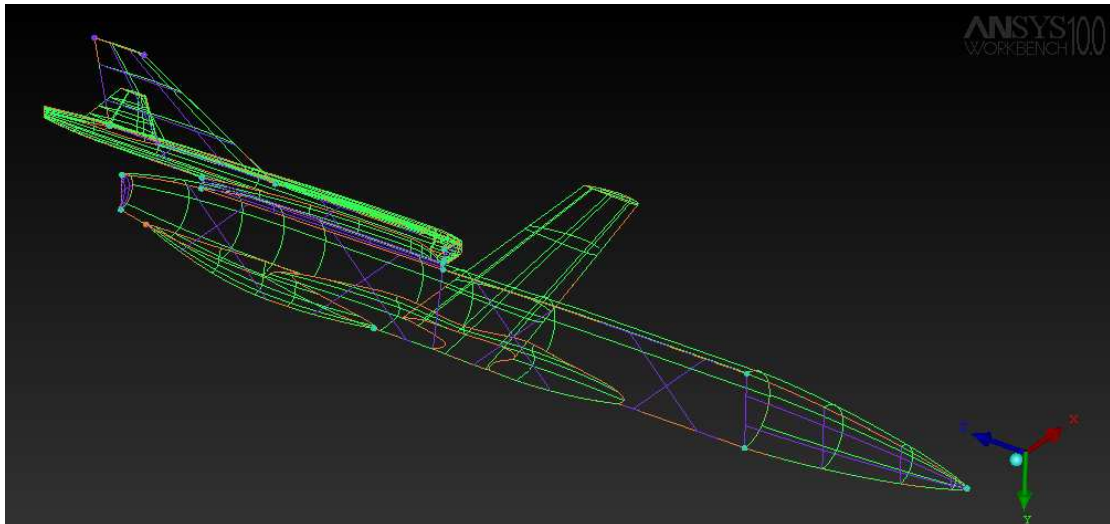
Εικόνα 3.1.2: Μισό αεροσκάφος έτοιμο για εισαγωγή στο ANSYS ICEM CFD.

3.2 Κατασκευή γεωμετρίας του μοντέλου.

Το μοντέλο, που εισήχθη στο λογισμικό ICEM CFD αποτελείτο μόνο από επιφάνειες (Εικόνα 3.2.1). Για την ευκολία καταργήθηκαν κάποιες περιττές επιφάνειες στο εσωτερικό του αεροσκάφους, που αντιστοιχούν στον αεραγωγό, και δημιουργήθηκαν βοηθητικές καμπύλες στο όρια των υπόλοιπων επιφανειών και μερικά σημεία στις άκρες αυτών των καμπυλών. Επίσης ορίστηκαν δυο επιφάνειες στην είσοδο (inlet) του αεραγωγού και στην έξοδο του κινητήρα (outlet) και μια μεγάλη επιφάνεια στο σημείο τομής του αεροσκάφους (επίπεδο συμμετρίας), που καλύπτει την κομμένη πλευρά του (η τελευταία ενέργεια μπορεί να χαρακτηριστεί ως περιττή, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο λογισμικό πλεγματοποίησης ή ποια έκδοση του ANSYS ICEM CFD χρησιμοποιούμε). (Εικόνα 3.2.2)



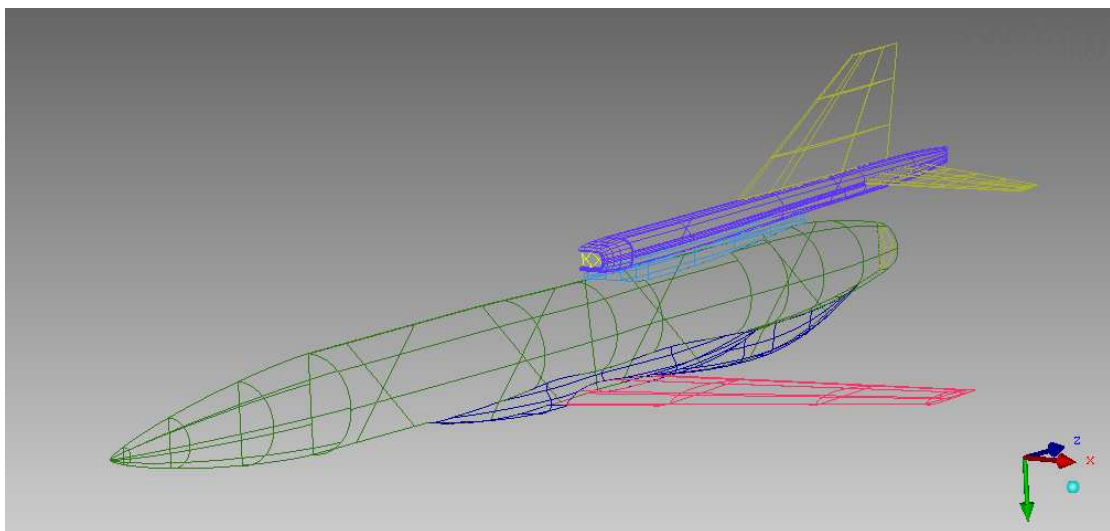
Εικόνα 3.2.1: Μοντέλο χωρίς τροποποιήσεις απευθείας από Catia.



Εικόνα 3.2.2: Μοντέλο με πρόσθετες επιφάνειες καμπύλες και σημεία και διαγραμμένες τις εσωτερικές επιφάνειες του αεραγωγού τύπου “S”.

Στη συνέχεια, για την περιγραφή του χωρίου ροής, κατασκευάσαμε ένα κουτί που περικλείει το αεροσκάφος με τη μια πλευρά του να εφάπτεται στο επίπεδο συμμετρίας (τομής). Το κουτί δημιουργήθηκε αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι οριακές συνθήκες, που επιβάλλονται στο εξωτερικό τμήμα του, δεν επηρεάζουν τη ροή στα τοιχώματα του αεροσκάφους (και αντίστροφα). Τέλος χωρίσαμε τη γεωμετρία μας σε διάφορα τμήματα, που θα χρησιμοποιούνται από δω και στο εξής:

Για το αεροσκάφος (Εικόνα 3.2.3) :

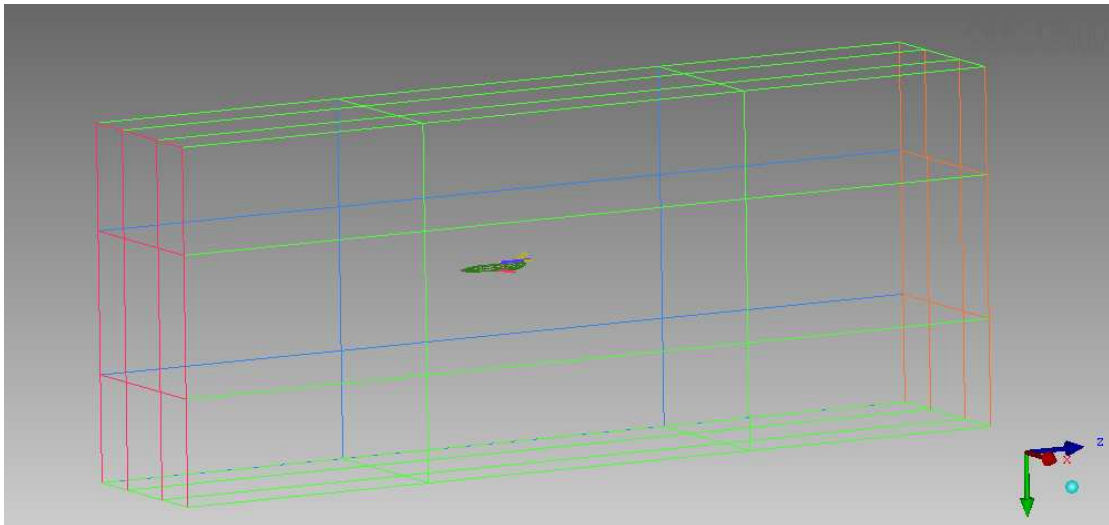


Εικόνα 3.2.3: Τμήματα αεροσκάφους.

- ATRAKTOS: Για την άτρακτο του αεροσκάφους (Πράσινο χρώμα).
- DIVERTER: Για το ενδιάμεσο τμήμα μεταξύ ατράκτου και αεραγωγού (Γαλάζιο χρώμα).
- BOX_WINGS: Για το κάλυμμα βάσης της πτέρυγας και της γάστρας του αεροσκάφους (Σκούρο Μπλε χρώμα).
- FTERA: Για την κύρια πτέρυγα του αεροσκάφους (Κόκκινο χρώμα)

- BOOM: Για το πάνω μέρος του αεροσκάφους, όπου βρίσκεται η είσοδος του αεραγωγού και στηρίζεται το ουραίο πτέρωμα (Μπλε χρώμα).
- PISO_FTERA: Για το ουραίο πτέρωμα, που αποτελείται από το οριζόντιο σταθερό και το κατακόρυφο σταθερό πτερύγιο (Χρυσό χρώμα)
- INLET: Για την είσοδο του αέρα από τον αεραγωγό στο πάνω μέρος του αεροσκάφους (Κίτρινο χρώμα).
- OUTLET: Για την έξοδο του αέρα από το ακροφύσιο του κινητήρα (Χρυσό χρώμα).

Για το εξωτερικό κουτί (Εικόνα 3.2.4) :



Εικόνα 3.2.4: Τμήματα του εξωτερικού κουτιού, που ορίζει το χωρίο ροής.

- IN: Για την είσοδο του ρευστού στο κουτί (Κόκκινο χρώμα).
- OUT: Για την έξοδο του ρευστού από το κουτί (Πορτοκαλί χρώμα).
- WALL: Για τα πλευρικά τοιχώματα του κουτιού (Ανοιχτό Πράσινο χρώμα).
- SYM: Για την επιφάνεια συμμετρίας (Μπλε χρώμα).

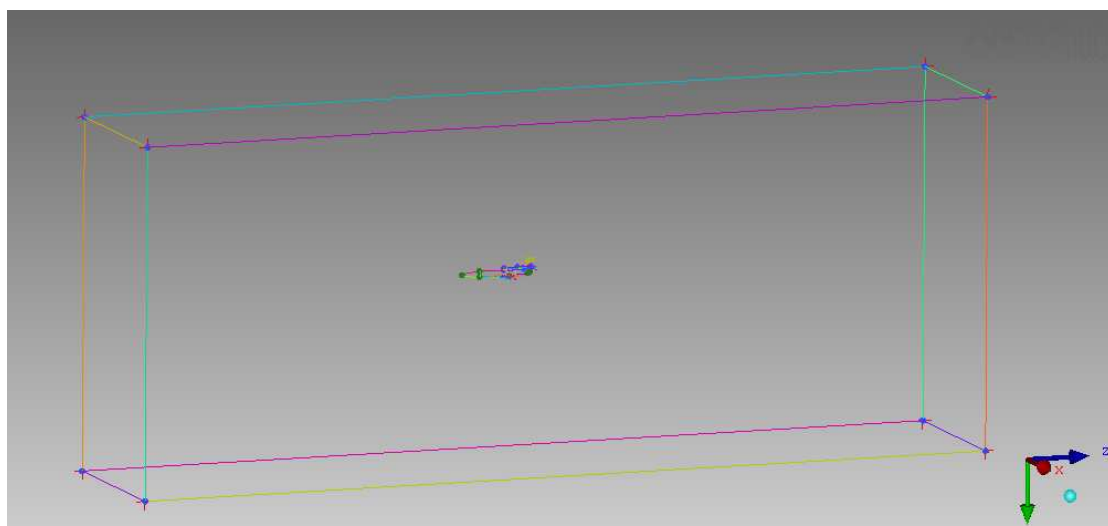
Η γεωμετρία του μοντέλου, κατά τη διάρκεια της δημιουργίας των μπλοκς, θα αναβαθμίζεται συνεχώς με καμπύλες και σημεία, έτσι ώστε να έχουμε ακριβείς αναθέσεις κόμβων και ακμών για καλύτερα αποτελέσματα.

4 Δημιουργία των μπλοκς - Blocking Strategy

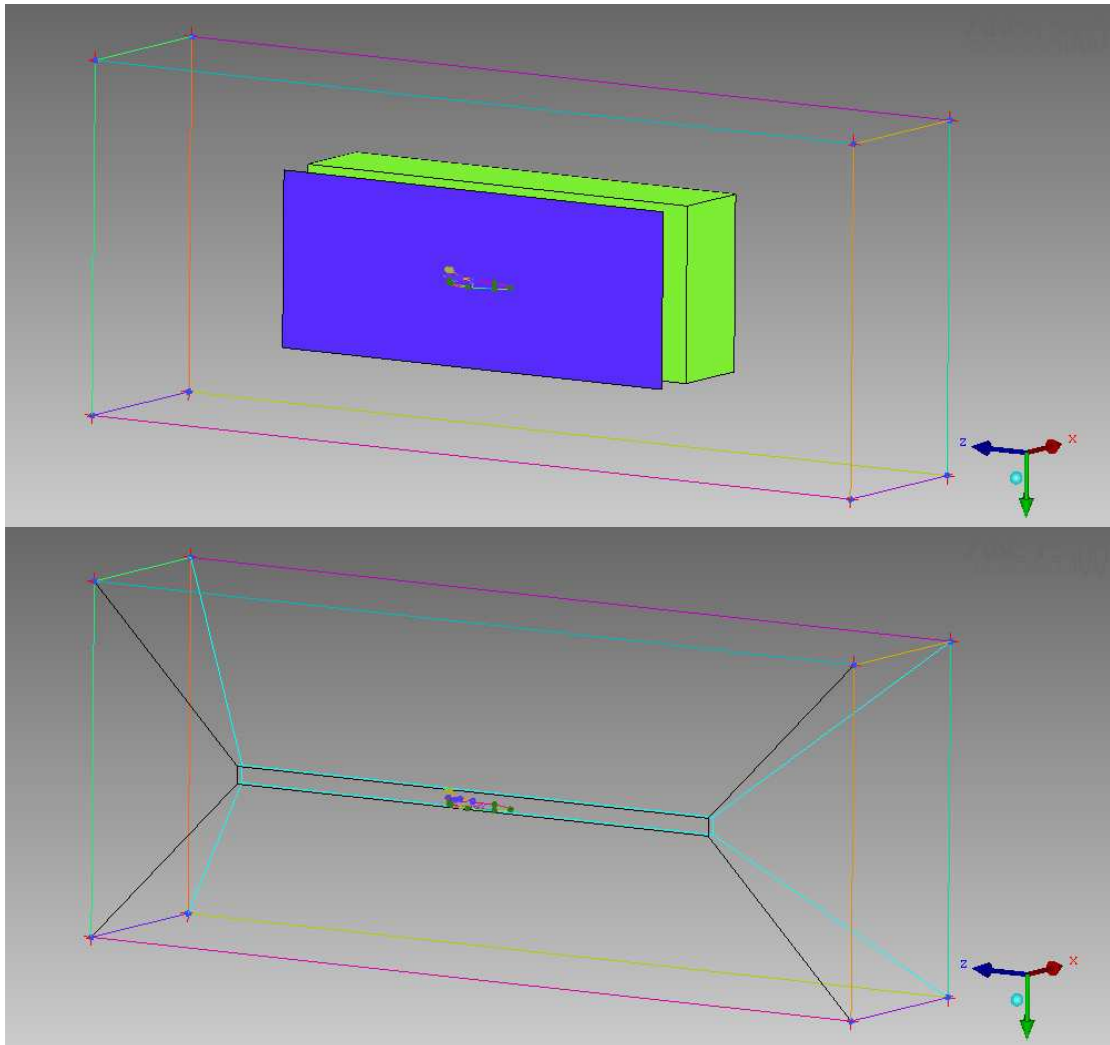
Το υπολογιστικό πλέγμα, που θα κατασκευαστεί, είναι τύπου Block-Structured (δομημένο κατά μπλοκς). Για την δημιουργία των μπλοκς του δομημένου πλέγματος, εμφανίζουμε τις καμπύλες της γεωμετρίας και ακολούθως δημιουργούμε τα μπλοκς, ξεκινώντας από τις γενικές οντότητες της γεωμετρίας και προχωρώντας προς τις ειδικές. Δηλαδή δημιουργούμε ένα αρχικό μπλοκ, από το οποίο, με διάφορες μετατροπές και διαχωρισμούς, θα καλύψουμε το σύνολο της γεωμετρίας μας. Στη συνέχεια θα περιγραφεί αναλυτικά η όλη διαδικασία, λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας, που αυτή παρουσιάζει.

4.1 Αρχικό μπλοκ και O-Grid περιφερικά του αεροσκάφους

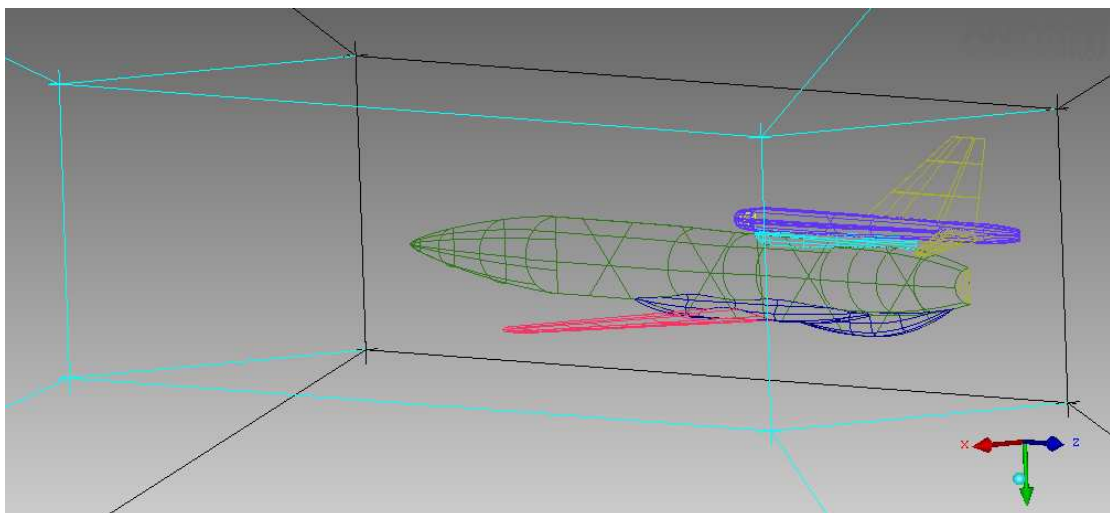
Αρχικά επιλέγουμε το κουτί που περικλείει το αεροσκάφος (**Εικόνα 4.1.1**) ως γεωμετρία αναφοράς για τη δημιουργία του πρώτου μπλοκ. Πραγματοποιούμε αναθέσεις των ακμών του αρχικού μπλοκ στις γωνίες του κουτιού και στη συνέχεια δημιουργούμε O-Grid στο εσωτερικό του, επικολλημένο στη πλευρά συμμετρίας (SYM) της γεωμετρίας (**Εικόνα 4.1.2**). Μετακινούμε τις ακμές του O-Grid σε σημεία τέτοια που να περικλείουν ολόκληρο το αεροσκάφος (**Εικόνα 4.1.3**).



Εικόνα 4.1.1: Δημιουργία του πρώτου μπλοκ με αναφορά στις οριακές ακμές του κουτιού που περικλείει το αεροσκάφος.



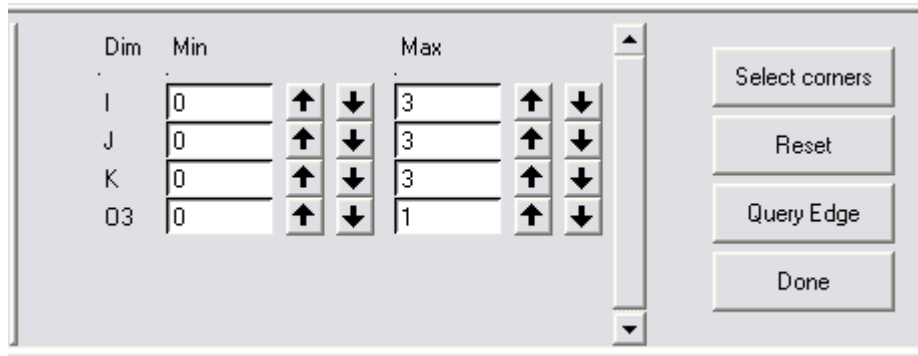
Εικόνα 4.1.2: Επιλογή του πρώτου μπλοκ για δημιουργία του O-GRID, επικολλημένο στην επιφάνεια συμμετρίας.



Εικόνα 4.1.3: Μετακίνηση των ακμών του O-GRID σε σημεία που να περικλείουν το αεροσκάφος.

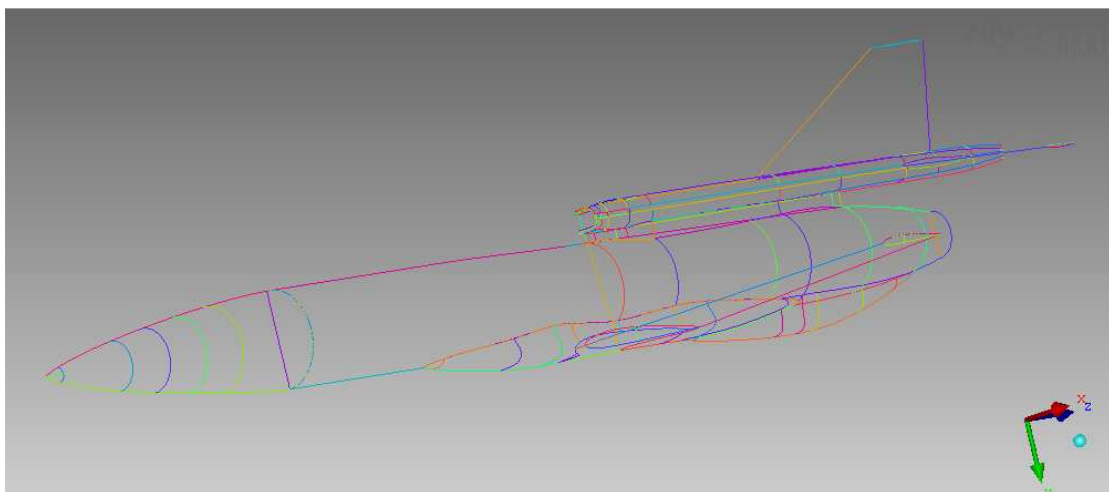
Από εδώ και στο εξής θα εργαζόμαστε στο μικρό κουτί-μπλοκ του O-Grid, που περικλείει το αεροσκάφος. Η δημιουργία νέων μπλοκς θα γίνεται μόνο μέσα στο

μικρό κουτί. Στο συγκεκριμένο λογισμικό (ANSYS ICEM CFD) ένα εργαλείο που θα χρησιμοποιήσουμε αρκετά είναι το **Index Control** (Εικόνα 4.1.4), το οποίο επιτρέπει στις τομές των μπλοκ να μην επεκτείνονται πέρα από τα όρια που έχουμε ορίσει. Έτσι κάθε νέα τομή, που θα κάνουμε, θα περιορίζεται στο μικρό κουτί και σε μικρότερα μπλοκ μέσα στο κουτί. Είναι σημαντικό να είμαστε αρκετά επιμελείς με αυτό το θέμα, διότι διαφορετικά η πλεγματοποίηση θα γίνει αρκετά κουραστική και η απεικόνιση των ακμών των μπλοκ θα δείχνει χαοτική. Έτσι είναι προτιμότερο να κάνουμε μια τομή σε ένα μπλοκ ή σε μια ομάδα μπλοκ και αν χρειάζεται αργότερα την επεκτείνουμε και σε υπόλοιπα.



Εικόνα 4.1.4: Εργαλείο Index Control.

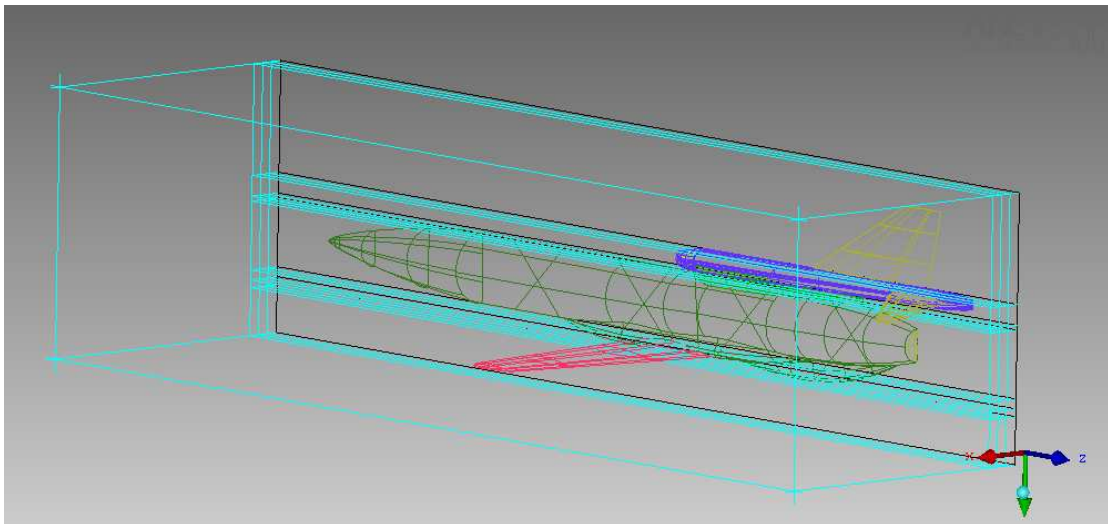
Σε αυτό το σημείο θα ήταν καλό να δημιουργήσουμε σημεία και καμπύλες πάνω σε κρίσιμες περιοχές στη γεωμετρία του αεροσκάφους (Εικόνα 4.1.5), τις οποίες επιλέγουμε με γνώμονα τις ιδιομορφίες της γεωμετρίας, (π.χ. αρχή, μέγιστο πλάτος, τέλος πτερυγίων, αρχή μέγιστο πλάτος, τέλος DIVERTER κ.λπ.). Φυσικά δεν μπορούμε να προνοήσουμε από την αρχή ποιά σημεία και ποιές καμπύλες θα μας είναι απαραίτητες, οπότε παίρνουμε ως δεδομένο ότι κατά τη διάρκεια της διαμόρφωσης μπλοκς θα δημιουργούμε την απαραίτητη γεωμετρία, που θα μας διευκολύνει για τις συσχετίσεις κόμβων και ακμών.



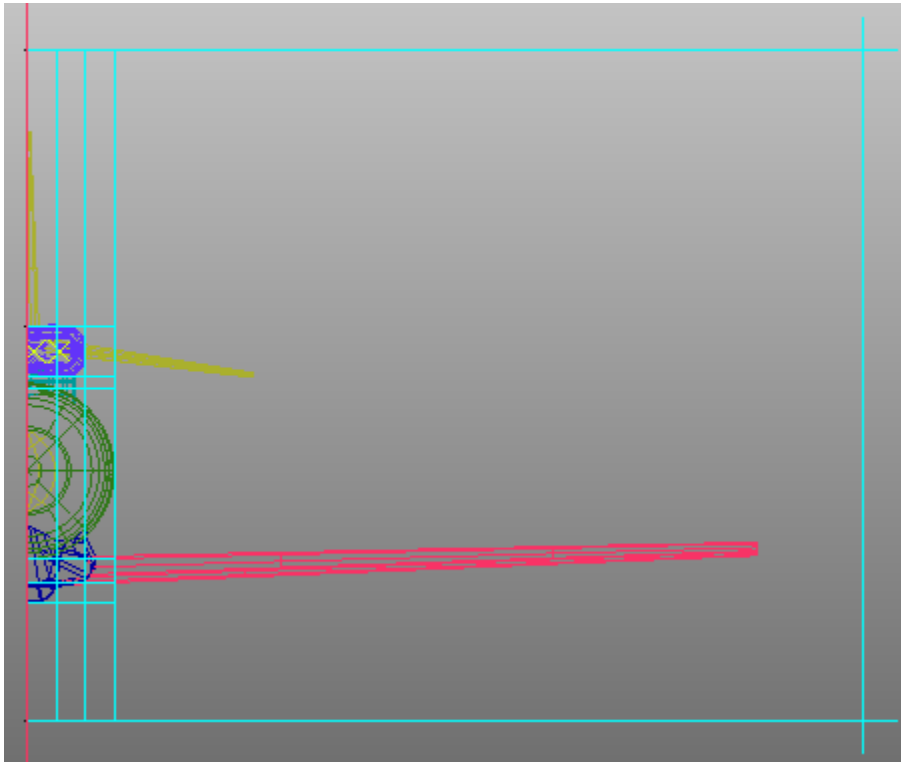
Εικόνα 4.1.5: Καμπύλες σε κρίσιμα μέρη της γεωμετρίας.

Τώρα είμαστε έτοιμοι να κάνουμε τις αρχικές τομές, οι οποίες είναι τρεις κάθετες (παράλληλες στον YZ επίπεδο) και έξι οριζόντιες (Παράλληλες στον XZ επίπεδο) σε σημεία που περιλαμβάνουν τα κύρια μέρη της γεωμετρίας του

αεροσκάφους (**Εικόνες 4.1.6, 4.1.7**). Στην εικόνα η πρώτη οριζόντια τομή έγινε στο σημείο που ξεκινά να προεξέχει η γάστρα του αεροσκάφους στο κάλυμμα βάσης της πτέρυγας, η δεύτερη έγινε στην αρχή του αεραγωγού στο κομμάτι BOOM ενώ η τρίτη στην αρχή της ατράκτου εφαπτόμενη στην άτρακτο. Οι κάθετες τομές έγιναν έτσι ώστε τα μπλοκ που σχηματίζονται, να περικλείουν τμήματα του αεροσκάφους, που αλλάζουν δραματικά τα στοιχεία της γεωμετρίας τους. Δηλαδή οι πρώτες τομές έγιναν στην αρχή και το τέλος του BOOM η επόμενη έγινε στο τέλος του DIVERTER η επόμενη στο τέλος της ατράκτου, η επόμενη στο σημείο ένωσης του καλύμματος της πτέρυγας με τη γάστρα του αεροσκάφους και η τελευταία στο κατώτατο σημείο του αεροσκάφους (**Εικόνα 4.1.7**). Για τις οριζόντιες τομές χρησιμοποιήσαμε το Index Control, έτσι ώστε να μην επεκταθούν πέρα από την τρίτη κάθετη τομή. Για το Index Control θα δώσουμε ένα παράδειγμα στη συνέχεια, για τον τρόπο που το χρησιμοποιούμε. Οι αρχικές τομές είναι οι πιο σημαντικές και προκύπτουν από διεξοδική ανάλυση της γεωμετρίας που μελετάται και από προσχέδιο, που είναι καλό να κάνουμε πριν προχωρήσουμε στην πλεγματοποίηση.

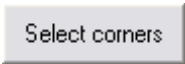


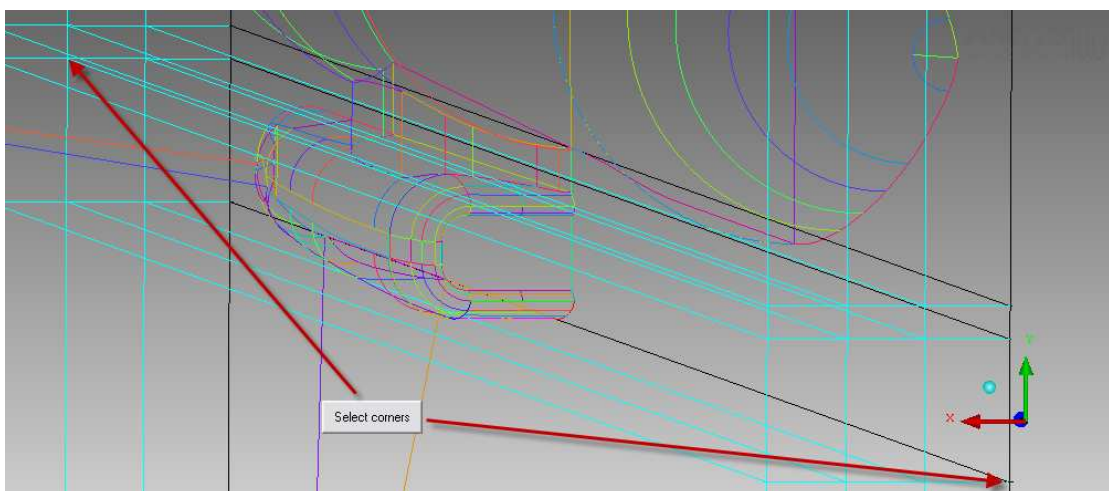
Εικόνα 4.1.6: Αρχικές τομές (διαγώνια άποψη).



Εικόνα 4.1.7: Αρχικές Τομές (απεικόνιση στην διεύθυνση των Z).

4.2 Blocking στο BOOM

Με το κουμπί  από το Index Control επιλέγουμε τους δυο κόμβους των μπλοκ που περικλείουν το BOOM (Εικόνα 4.2.1).



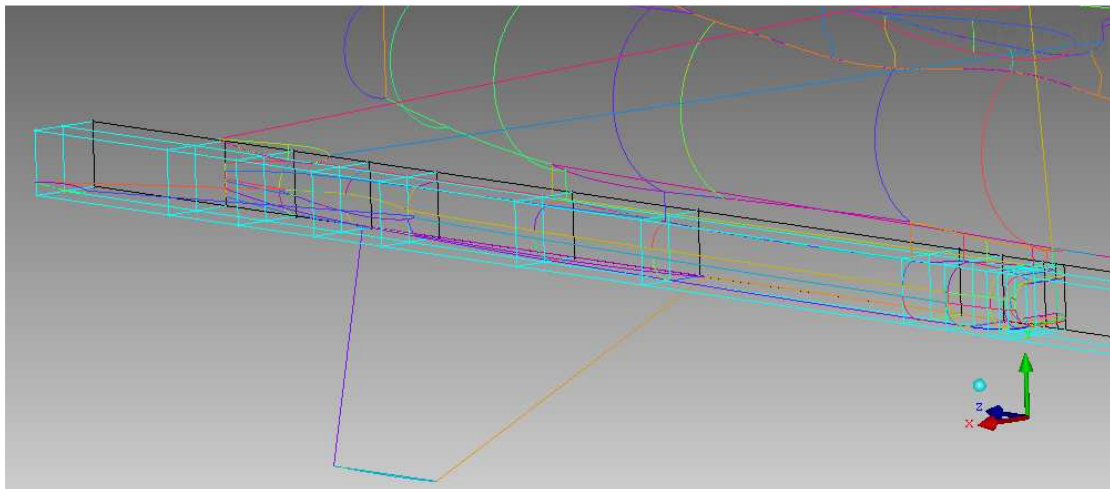
Εικόνα 4.2.1: Επιλογή μπλοκ BOOM.

Με αυτό τον τρόπο ή χειροκίνητα με τα βελάκια (Εικόνα 4.2.2) θα επιλέγουμε το μπλοκ ή τα μπλοκς που μας ενδιαφέρουν.

Dim	Min			Max		
I	1	↑	↓	3	↑	↓
J	2	↑	↓	3	↑	↓
K	1	↑	↓	2	↑	↓
O3	0	↑	↓	1	↑	↓

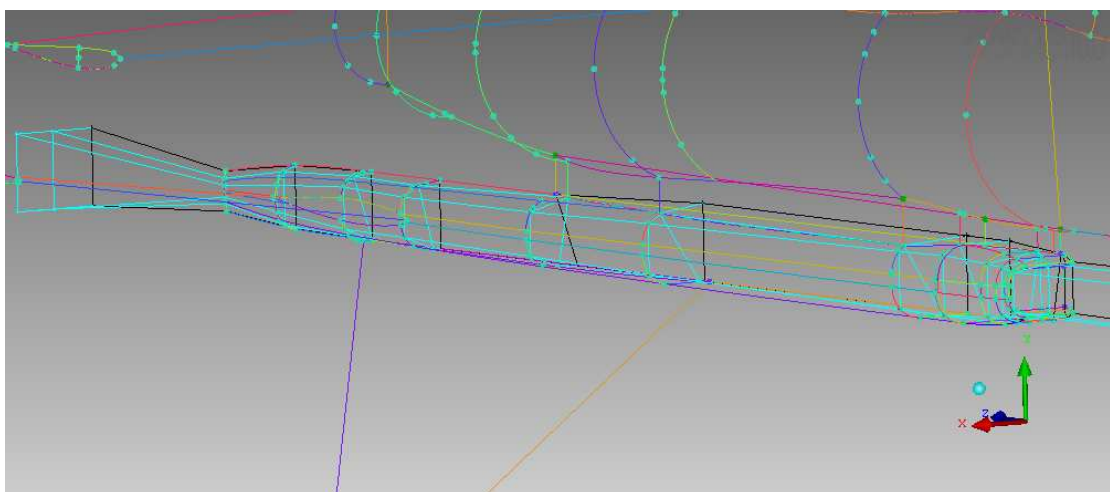
Εικόνα 4.2.2: Διεύθυνση των μπλοκ που είναι ενεργά.

Αφού έχουμε αφήσει ενεργά μόνο τα δυο μπλοκ του BOOM, δημιουργούμε κάθετες τομές, όπως βλέπουμε στην **Εικόνα 4.2.3**, δηλαδή στην αρχή, στο τέλος και σε ενδιάμεσα σημεία με κρίσιμη γεωμετρία.



Εικόνα 4.2.3: Τομές στα μπλοκ του BOOM.

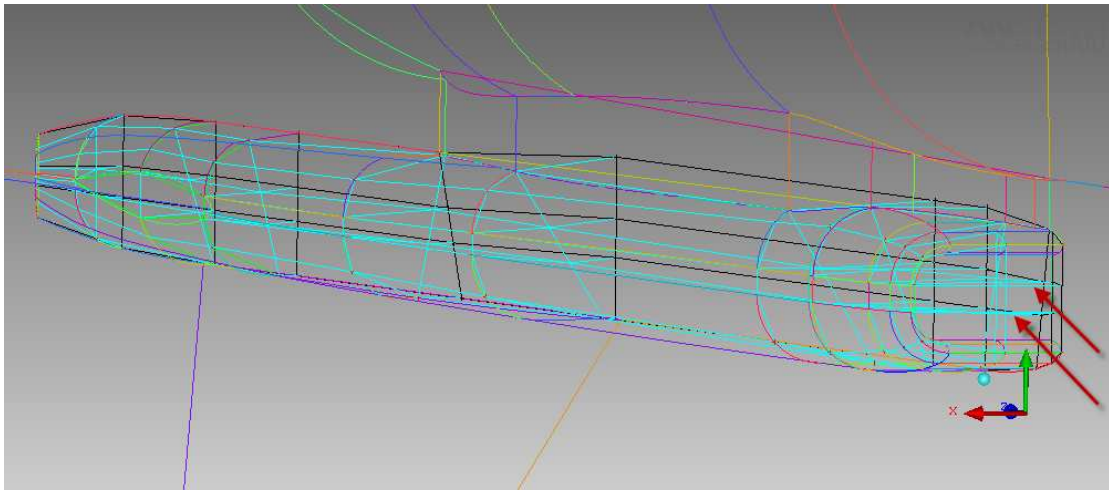
Έπειτα, αναθέτουμε τους κόμβους στα σημεία που έχουμε φτιάξει, ή που θα δημιουργήσουμε τώρα για τις ανάγκες της σύνδεσης (**Εικόνα 4.2.4**)



Εικόνα 4.2.4: Ανάθεση κόμβων σε σημεία.

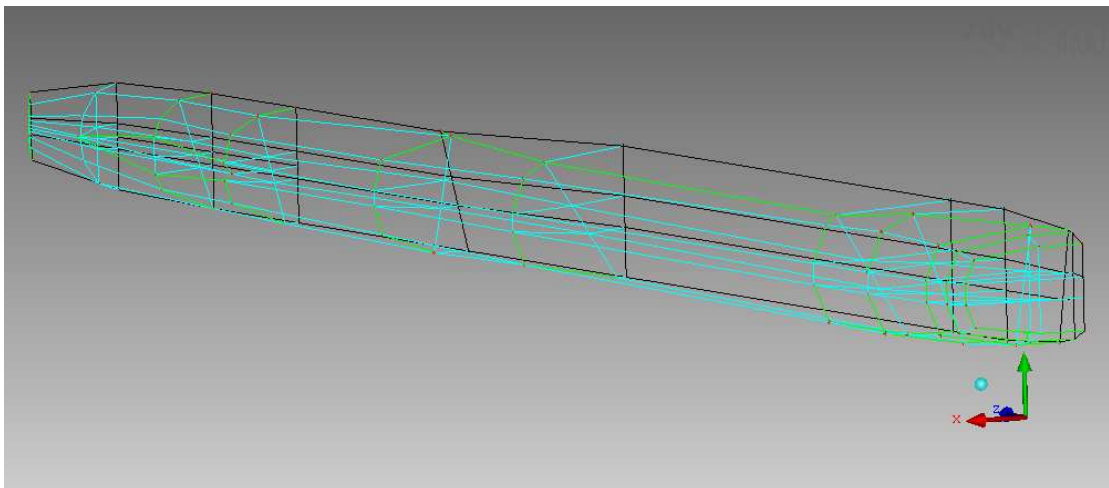
Επιλέγουμε πλέον τα μπλοκ μόνο του BOOM κάνουμε δυο τομές παράλληλες στο XZ επίπεδο και αναθέτουμε τους νέους κόμβους σε νέα σημεία. Στο πίσω μέρος του

BOOM συσχετίζουμε τους κόμβους των μπλοκς, έτσι ώστε να περιγράφουν τη βάση του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου (**Εικόνα 4.2.5**).



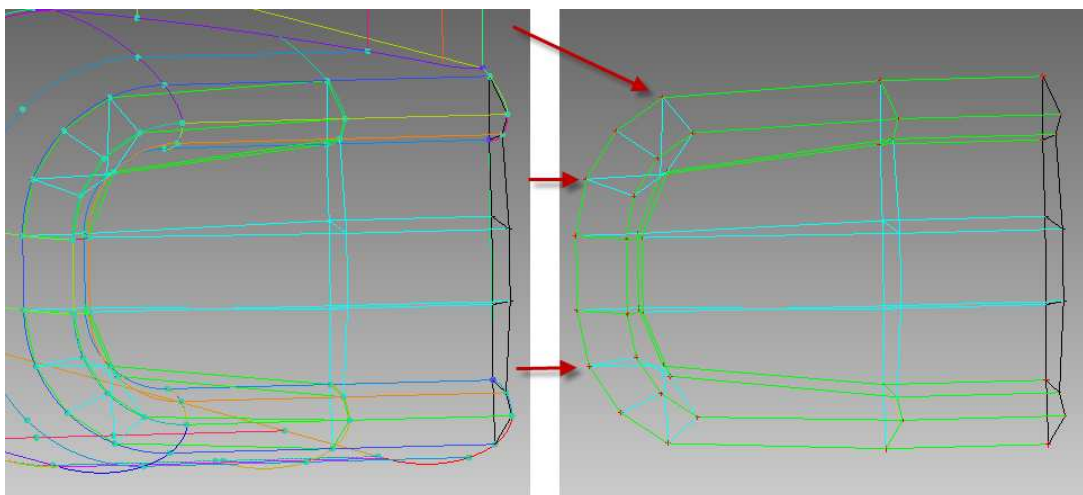
Εικόνα 4.2.5: Νέες τομές στο BOOM (βελάκια).

Προβάλλουμε τις ακμές στις καμπύλες του BOOM (**Εικόνα 4.2.6**).



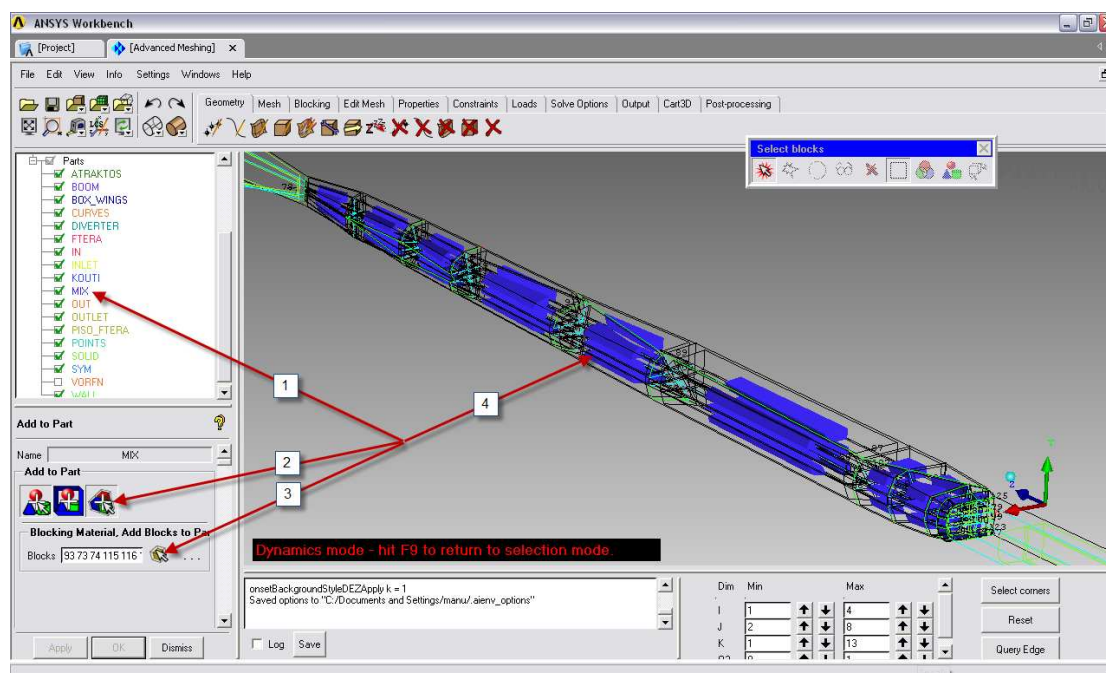
Εικόνα 4.2.6: Τα μπλοκ του BOOM χωρίς τη γεωμετρία μετά από την ανάθεση ακμών σε καμπύλες (οι αναθεμένες ακμές είναι πράσινες).

Στη συνέχεια επιλέγουμε μόνο τα μπροστινά μπλοκς στο χείλος του αεραγωγού, κάνουμε μια τομή παράλληλη στον Y άξονα και άλλες δυο παράλληλες στον X άξονα όπως στην **Εικόνα 4.2.7** και συσχετίζουμε καμπύλες και σημεία.



Εικόνα 4.2.7: Χείλος του αεραγωγού με και χωρίς στοιχεία γεωμετρίας (με τα βελάκια οι νέες τομές).

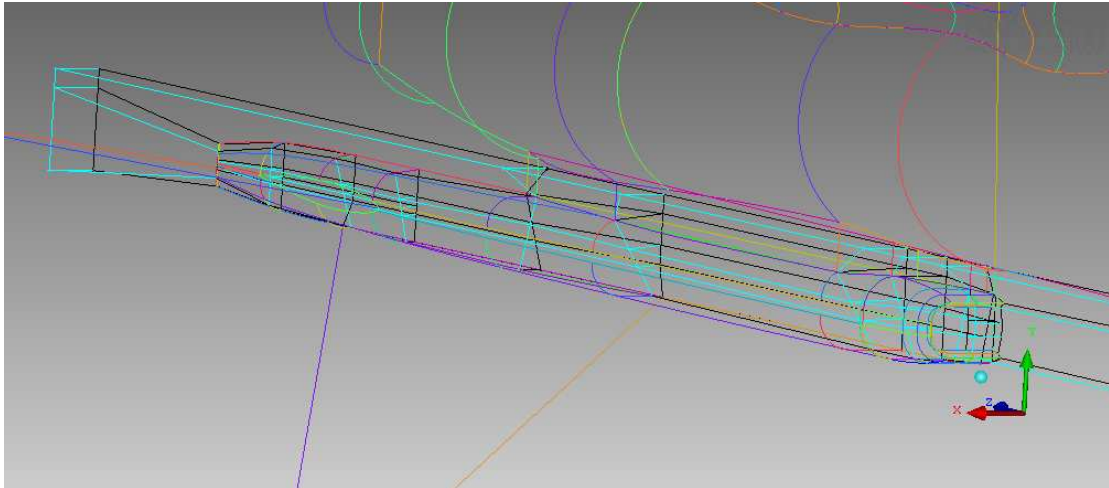
Τα μπλοκ του BOOM είναι έτοιμα. Τώρα δημιουργούμε ένα νέο τμήμα (Part), που το ονομάζουμε MIX και τοποθετούμε μέσα όλα τα μπλοκ του BOOM (Εικόνα 4.2.8). (Προσοχή με το χείλος του αεραγωγού, τοποθετούμε στο MIX μόνο τα μπλοκ του χείλους). Σε αυτό το τμήμα θα τοποθετούμε όλα τα μπλοκ του αεροσκάφους κάθε φορά που ολοκληρώνουμε τα μπλοκ κάποιου μέρους του. Με την ενέργεια αυτή διαφοροποιούμε τα μπλοκ του αεροσκάφους έτσι ώστε να αποτελούν διαφορετική οντότητα από τα υπόλοιπα μπλοκ της γεωμετρίας.



Εικόνα 4.2.8: Εισαγωγή των μπλοκ του αεραγωγού στο Part “MIX”.

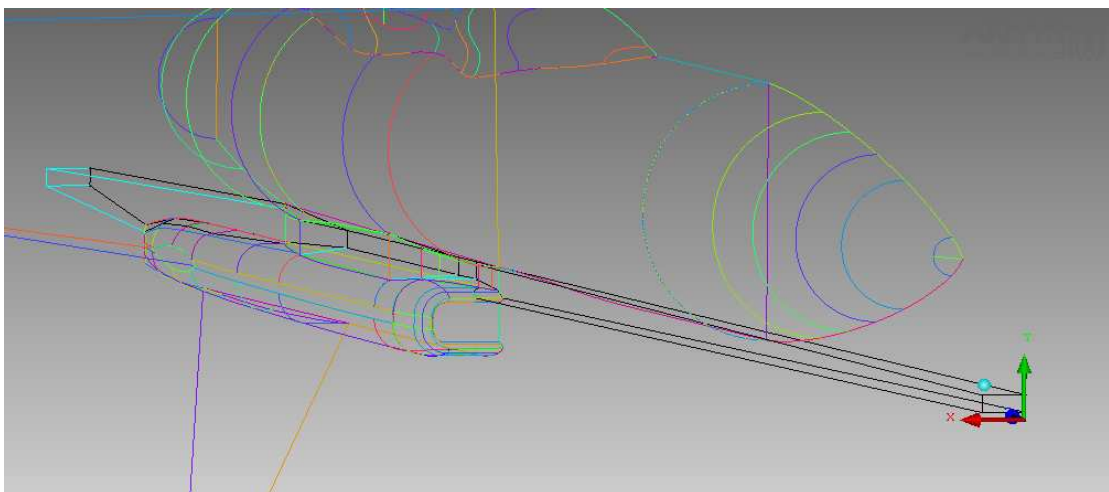
4.3 Blocking ενδιάμεσου τμήματος ατράκτου-αεραγωγού (DIVERTER)

Επιλέγουμε τα μπλοκ που περνάνε μέσα από το DIVERTER και επεκτείνουμε τις τομές (extend split), που είχαμε κάνει στον αεραγωγό και αφορούν και το ενδιάμεσο τμήμα (Εικόνα 4.3.1).



Εικόνα 4.3.1: Επέκταση τομών στο μπλοκ του ενδιάμεσου τμήματος.

Στη συνέχεια συσχετίζουμε κόμβους και ακμές των μπλοκ σε σημεία και καμπύλες της γεωμετρίας και τοποθετούμε τα μπλοκ στο τμήμα MIX (Εικόνα 4.3.2).

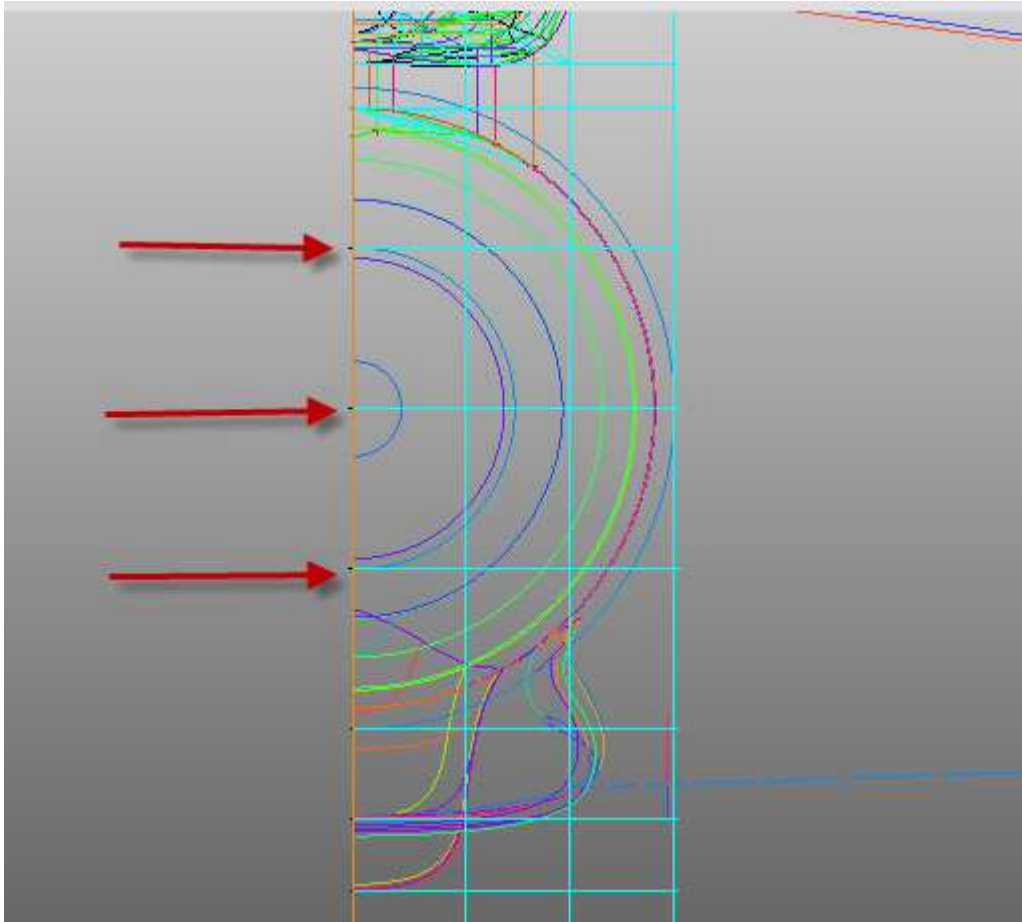


Εικόνα 4.3.2: Ολοκληρωμένα μπλοκ του ενδιάμεσου τμήματος.

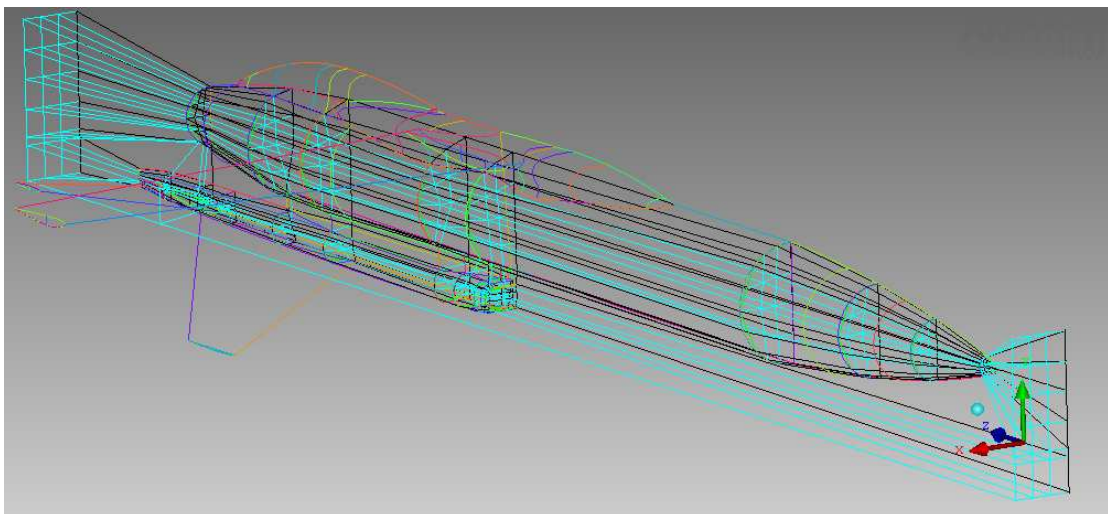
4.4 Blocking της ατράκτου (ATRAKTOS)

Επιλέγουμε τα μπλοκ που περικλείουν την άτρακτο σε όλο το μήκος του μικρού κουτιού-μπλοκ του O-GRID, κάνουμε τρεις τομές παράλληλες με το επίπεδο ZX, μία ακριβώς στη μέση τις ατράκτου και τις άλλες δύο συμμετρικά πάνω και κάτω από τη πρώτη (Εικόνα 4.4.1). Στη μύτη του αεροσκάφους κάνουμε τέσσερις τομές παράλληλες στο επίπεδο XY. Στον βασικό κορμό επεκτείνουμε κάποιες τομές από το

ενδιάμεσο τμήμα και επεκτείνουμε και μια τομή από τον BOOM στο πίσω μέρος του κυλίνδρου. Αναθέτουμε τους κόμβους σε σημεία, έτσι ώστε τα μπλοκ να πάρουν το σχήμα του κυλίνδρου, προβάλλουμε τις ακμές των μπλοκ σε καμπύλες της γεωμετρίας και τέλος τοποθετούμε τα νέα μπλοκ του κυλίνδρου στο τμήμα MIX (Εικόνα 4.4.2).

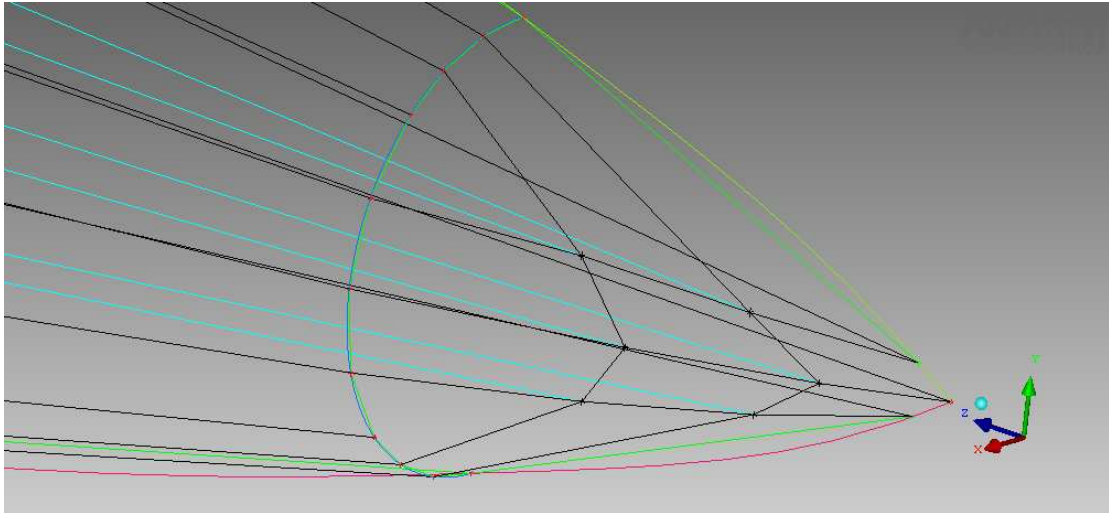


Εικόνα 4.4.1: Νέες τομές στην άτρακτο.



Εικόνα 4.4.2: Ολοκληρωμένα τα μπλοκ στο κυλινδρικό τμήμα της ατράκτου.

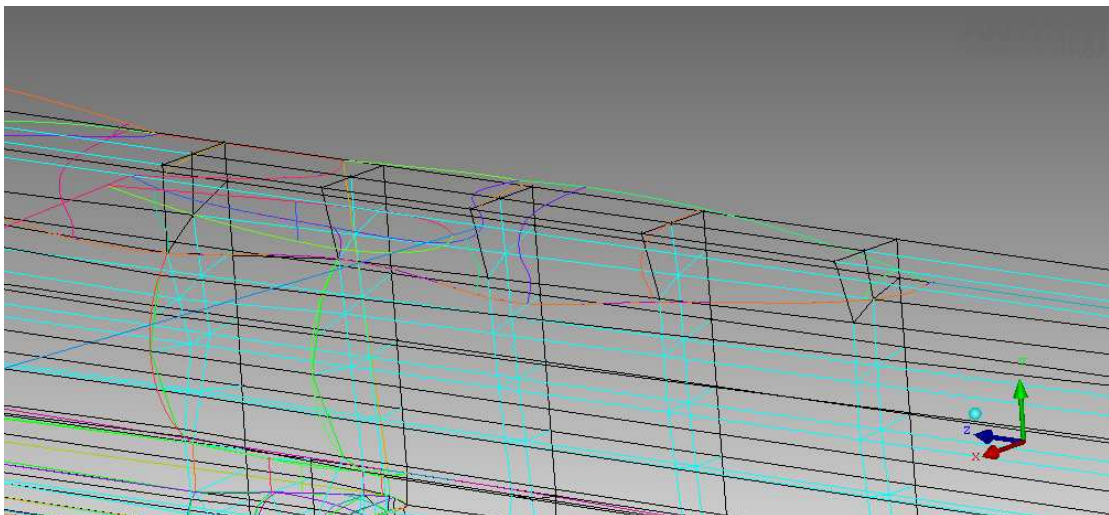
Στο μπροστινό μέρος της μύτης μετακινούμε τους εσωτερικούς κόμβους των μπλοκ, ώστε να ακουμπούν στην επιφάνεια του αεροσκάφους (Εικόνα 4.4.3).



Εικόνα 4.4.3 :Μπλοκς μύτης αεροσκάφους.

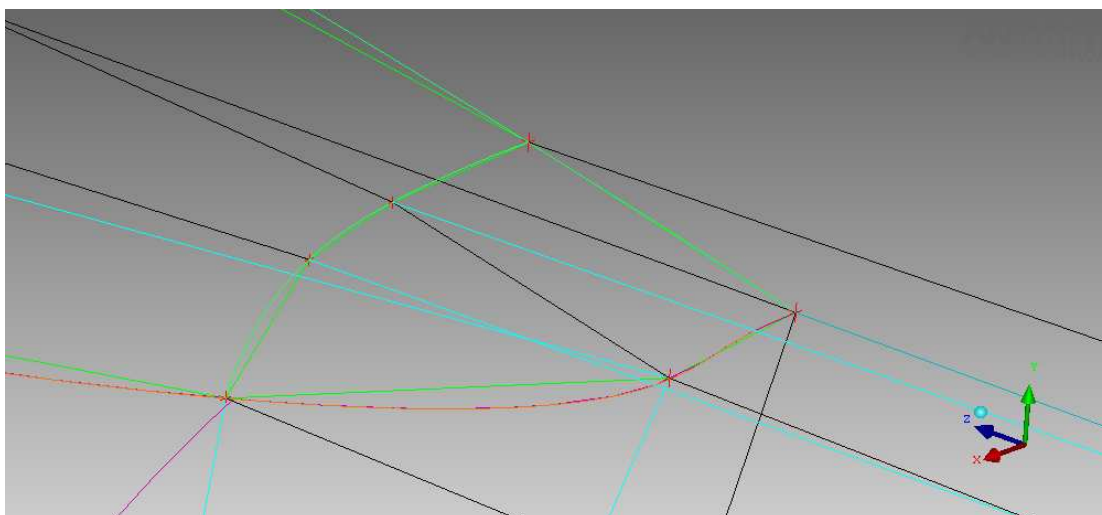
4.5 Blocking της γάστρας (BOX_WINGS)

Το κομμάτι BOX_WINGS αποτελείται από το κάλυμμα της πτέρυγας και τη γάστρα του αεροσκάφους. Το κομμάτι αυτό είναι το κατώτερο τμήμα του αεροσκάφους, με μια αρκετά πολύπλοκη γεωμετρία. Για το κάλυμμα της πτέρυγας ενεργοποιούμε τα μπλοκς που το περιβάλλουν και επεκτείνουμε δυο τομές από την άτρακτο, οι οποίες αντιστοιχούν στην πίσω άκρη και στο μέσο της κύριας πτέρυγας. Στη συνέχεια δημιουργούμε τρεις νέες τομές, οι οποίες αντιστοιχούν στο εμπρός άκρο της πτέρυγας και σε σημεία που αλλάζει η γεωμετρία στο κάλυμμα της πτέρυγας (**Εικόνα 4.5.1**).



Εικόνα 4.5.1: Τομές στο κάλυμμα της πτέρυγας.

Συσχετίζουμε καμπύλες και σημεία με ακμές και κορυφές των μπλοκ. Στο πρόσθιο μέρος του καλύμματος της βάσης μετακινούμε την κάτω ακμή του μπλοκ και την προβάλλουμε στην καμπύλη, που διαγράφει το κάλυμμα της πτέρυγας και ενώνεται με την άτρακτο (**Εικόνα 4.5.2**).

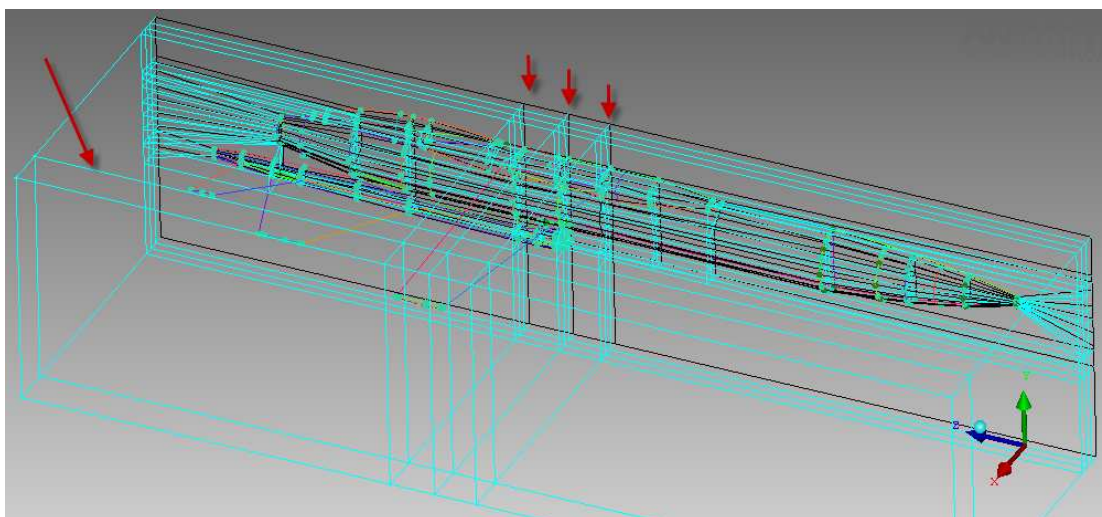


Εικόνα 4.5.2 : Πρόσθιο τμήμα του καλύμματος της πτέρυγας.

Στο σημείο αυτό θα ήταν φρόνιμο να κατασκευάσουμε τα μπλοκς της πτέρυγας και να επιστρέψουμε αργότερα για το **Blocking** του τμήματος BOX_WINGS.

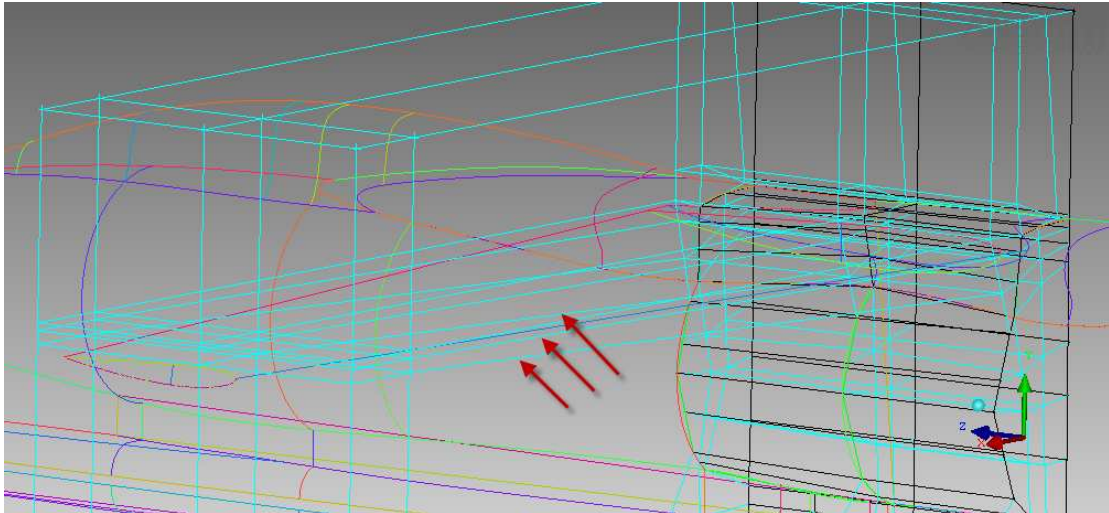
4.6 Blocking κύριας πτέρυγας (FTERA)

Επεκτείνουμε τις τομές στην αρχή στο μέσο και στο τέλος της πτέρυγας σε όλο το μικρό κουτί και τέμνουμε όλο το μικρό κουτί στην άκρη τις πτέρυγας (Εικόνα 4.6.1).



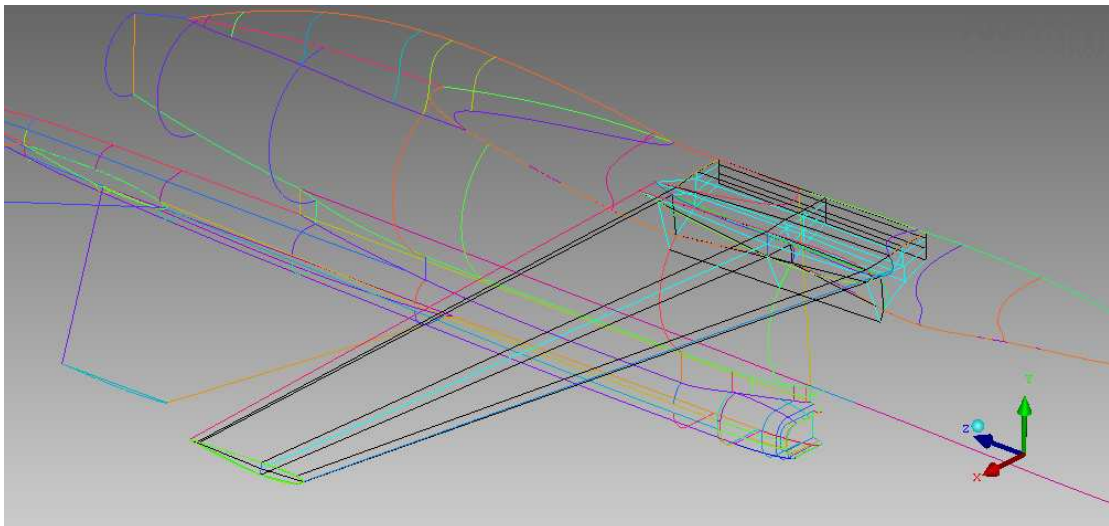
Εικόνα 4.6.1 : επέκταση τομών πτέρυγας και νέα τομή του κουτιού στην άκρη της.

Στη συνέχεια επιλέγουμε τα νέα μπλοκς που σχηματίστηκαν και επεκτείνουμε μια τομή στο κάτω μέρος της πτέρυγας (μεγαλύτερο Y στην Εικόνα). Κάνουμε επίσης δυο νέες τομές, μια περίπου στο μέσο Y της πτέρυγας και μια στο ανώτερο τμήμα της (μικρότερο Y στην εικόνα). (Εικόνα 4.6.2)



Εικόνα 4.6.2: Δημιουργία μπλοκ κύρια πτέρυγας.

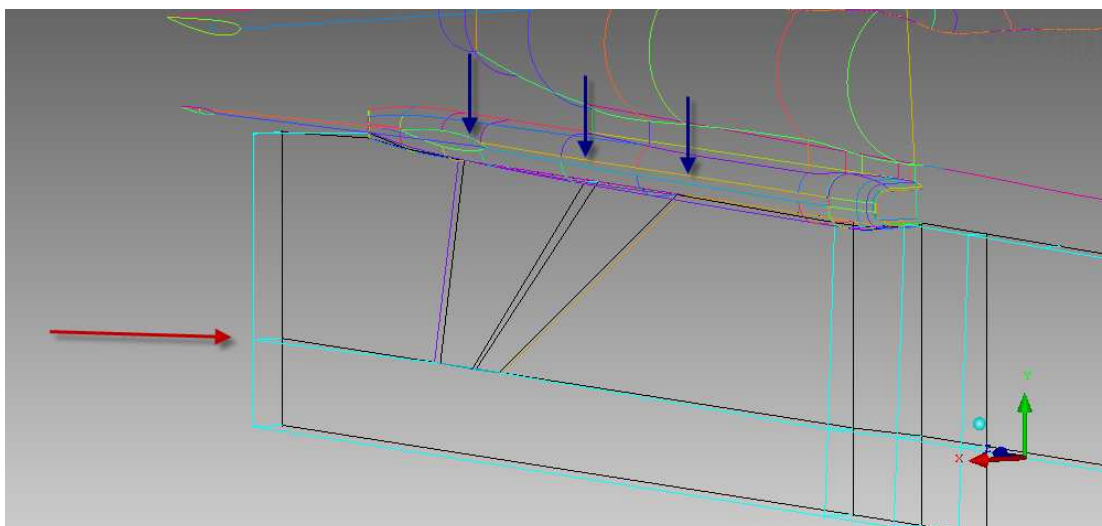
Έπειτα συσχετίζουμε καμπύλες και σημεία της πτέρυγας με τους αντίστοιχα μέρη των μπλοκ, και τοποθετούμε τα μπλοκ τις πτέρυγας στο (Part) MIX (Εικόνα 4.6.3).



Εικόνα 4.6.3: Τα μπλοκ της πτέρυγας ολοκληρωμένα και με συσχετίσεις.

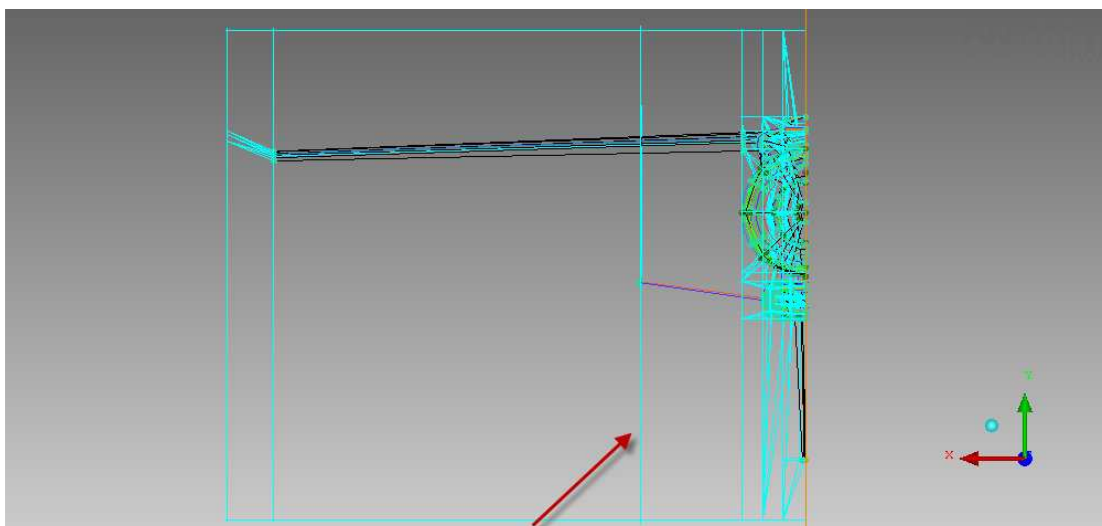
4.7 Blocking ουραίου περώματος (PISO_FTERA)

Εργαζόμαστε όπως και με την κύρια πτέρυγα, επεκτείνοντας είδη υπάρχουσες τομές, έτσι ώστε να δημιουργήσουμε τα μπλοκ, που θα στεγάσουν τα πίσω πτερύγια. Για το κατακόρυφο σταθερό πτερύγιο επιλέγουμε το μπλοκ που το περιβάλλει, κάνουμε μια τομή στην άκρη του πτερυγίου και επεκτείνουμε της τομές από το BOOM, που αντιστοιχούν στην αρχή, στη μέση και στο τέλος του. Στη συνέχεια συσχετίζουμε καμπύλες και σημεία και τοποθετούμε τα μπλοκ στο MIX (Εικόνα 4.7.1).



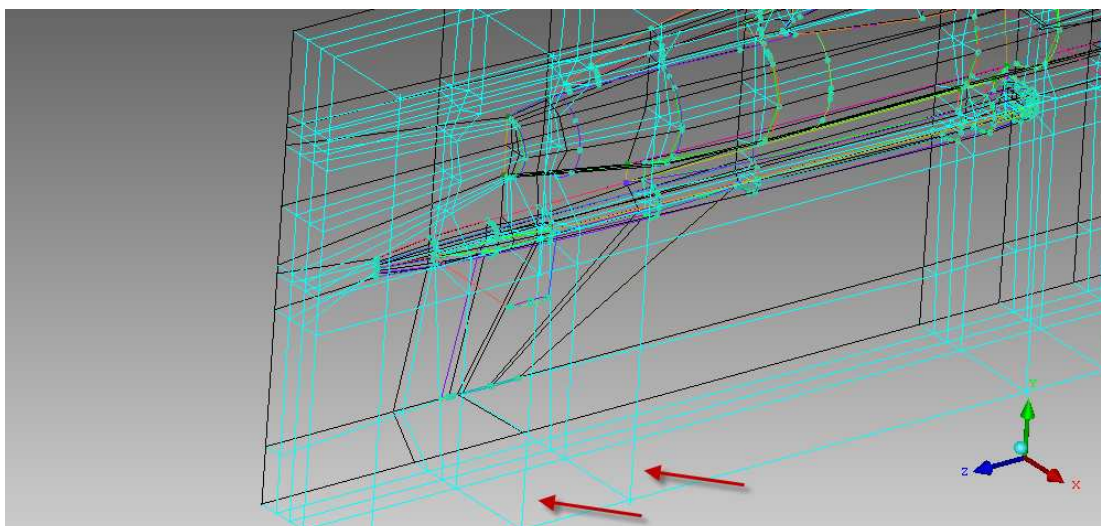
Εικόνα 4.7.1 : Τα μπλοκ του κατακόρυφου ουραίου πτερυγίου (κόκκινο βελάκι : νέα τομή στην άκρη του πτερυγίου, μπλε βελάκια : επεκτάσεις τομών).

Για το οριζόντιο ουραίο πτερύγιο αρχικά κάνουμε μια τομή στην άκρη του πτερυγίου σε ολόκληρο το μικρό κουτί (**Εικόνα 4.7.2**).



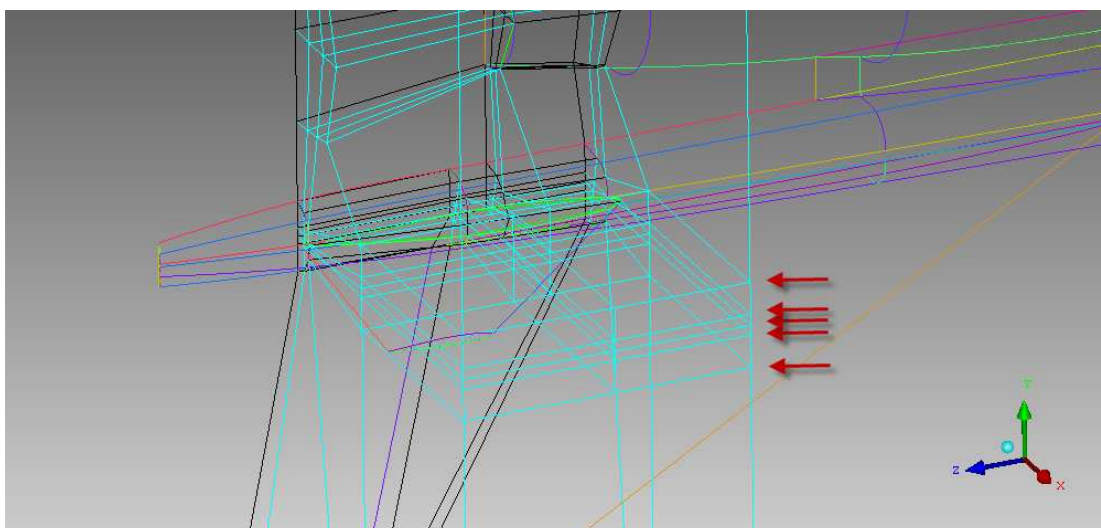
Εικόνα 4.7.2: Νέα τομή στην άκρη του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου.

Στη συνέχεια, αφού έχουμε επιλέξει όλα τα μπλοκ στη διεύθυνση των X μέχρι τη νέα τομή, επεκτείνουμε από το BOOM τις δύο τομές στην αρχή και στο τέλος του πτερυγίου (**Εικόνα 4.7.3**).



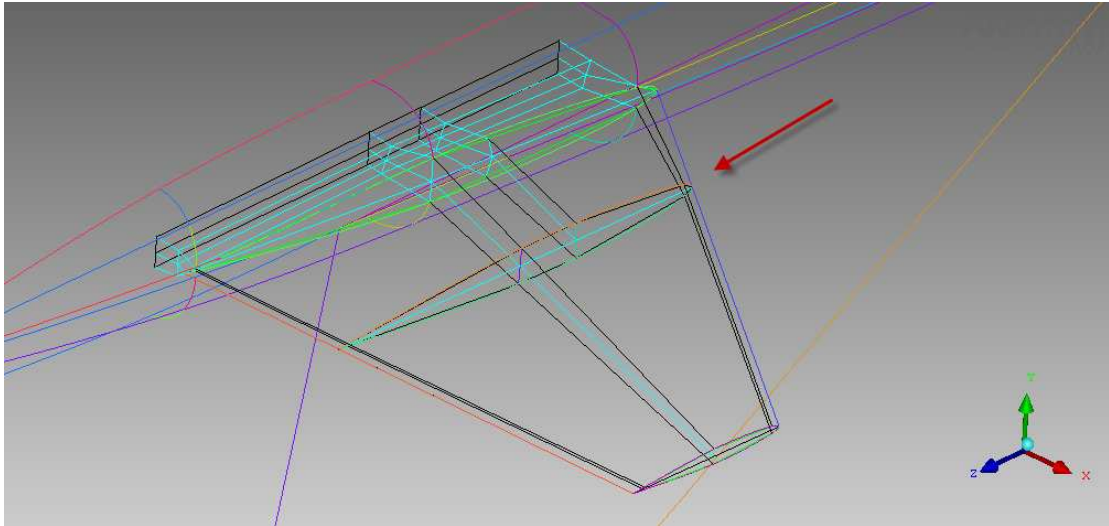
Εικόνα 4.7.3: Επεκτάσεις τομών στην αρχή και στο τέλος του οριζόντιου ουραίου πτερύγιου.

Έπειτα, αφού επιλέξουμε τα μπλοκ που δημιουργήθηκαν από τις νέες τομές, επεκτείνουμε από το BOOM τις ήδη υπάρχουσες τομές (**Εικόνα 4.7.4**). Τα μπλοκ από τις τρεις μεσαίες τομές είναι αυτά που θα στεγάσουν το οριζόντιο ουραίο πτερύγιο.



Εικόνα 4.7.4: επεκτεινόμενες τομές στο οριζόντιο ουραίο πτερύγιο.

Στη συνέχεια, συσχετίζουμε καμπύλες και σημεία και τοποθετούμε τα νέα μπλοκς στο MIX. Στη συγκεκριμένη περίπτωση βέβαια έχουμε ένα κόψιμο από τις αρχικές τομές, που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην άκρη του πτερυγίου και στη βάση του (**Εικόνα 4.7.5**). Έτσι πρέπει να φτιάξουμε τη γεωμετρία (σημεία) και να αναθέσουμε τις ακμές αυτές, που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από τη βάση του πτερύγιου. Ακριβώς για να αποφύγουμε τέτοιες ενέργειες χρησιμοποιούμε το INDEX CONTROL και κάνουμε τομές μόνο σε συγκεκριμένα μπλοκς, αφού οι ενέργειες αυτές είναι κουραστικές και χρονοβόρες. Βέβαια, στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν το αποφύγαμε, αλλά η δημιουργία των μπλοκς του μοντέλου που παρουσιάζεται, έχει λάβει υπόψη τέτοιες περιττές αναθέσεις.

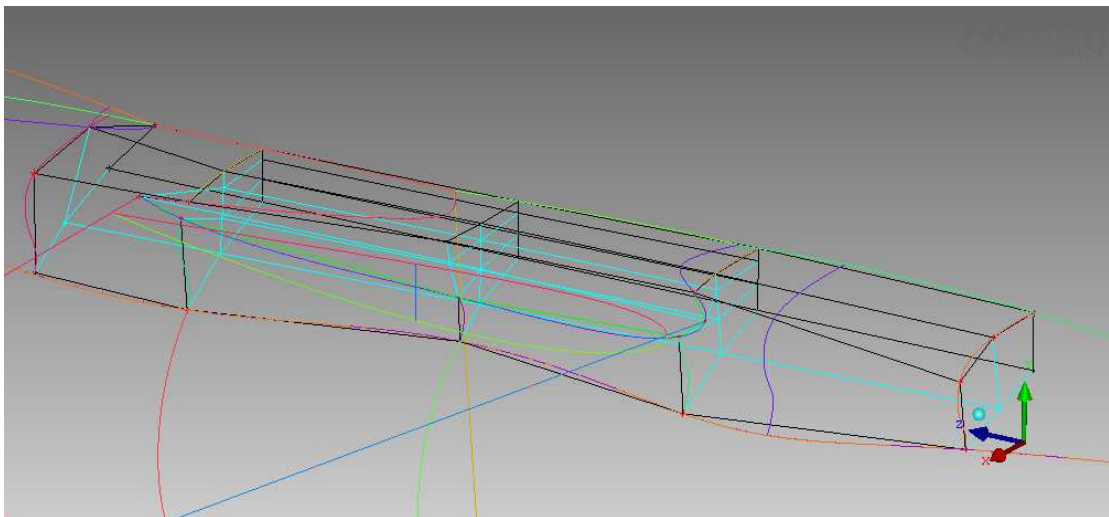


Εικόνα 4.7.5: Ολοκληρωμένα μπλοκ του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου. Στο βελάκι η τομή που παρεμβάλλεται.

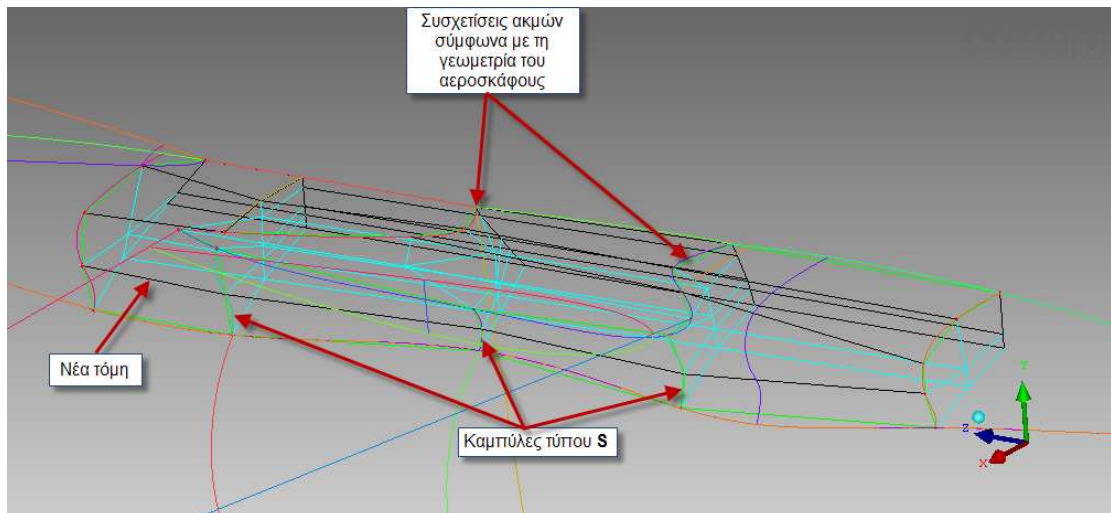
4.8 Επιστροφή στο Blocking της γάστρας του αεροσκάφους (BOX_WINGS)

Η διακοπή στην πλεγματοποίηση του καλύμματος της πτέρυγας έγινε γιατί χρειαζόμασταν τα μπλοκ της πτέρυγας και τις τομές, που αυτή δημιουργήσε.

Επιλεγούμε τα μπλοκ της **Εικόνας 4.8.1** και συσχετίζουμε τις ακμές των μπλοκ με τις καμπύλες που αντιστοιχούν, έτσι ώστε να έχουμε ακριβή αναπαράσταση του πλέγματος με τη γεωμετρία του αεροσκάφους. Κάνουμε επίσης μια νέα τομή και αναθέτουμε τους νέους κόμβους σε σημεία στην μέση περίπου των καμπύλων σε σχήμα S (**Εικόνα 4.8.2**).

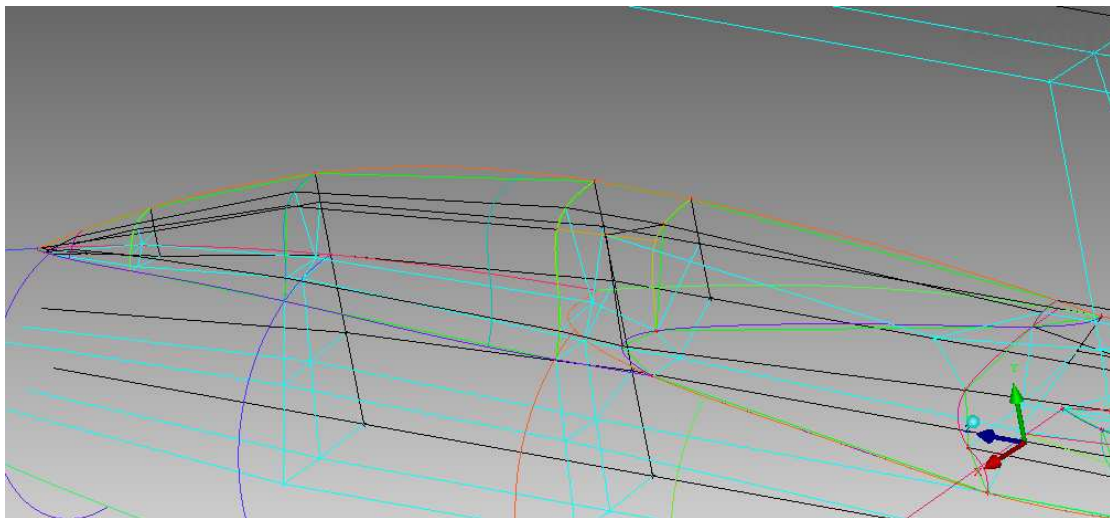


Εικόνα 4.8.1 : Επιλεγμένα μπλοκ του BOX_WINGS.



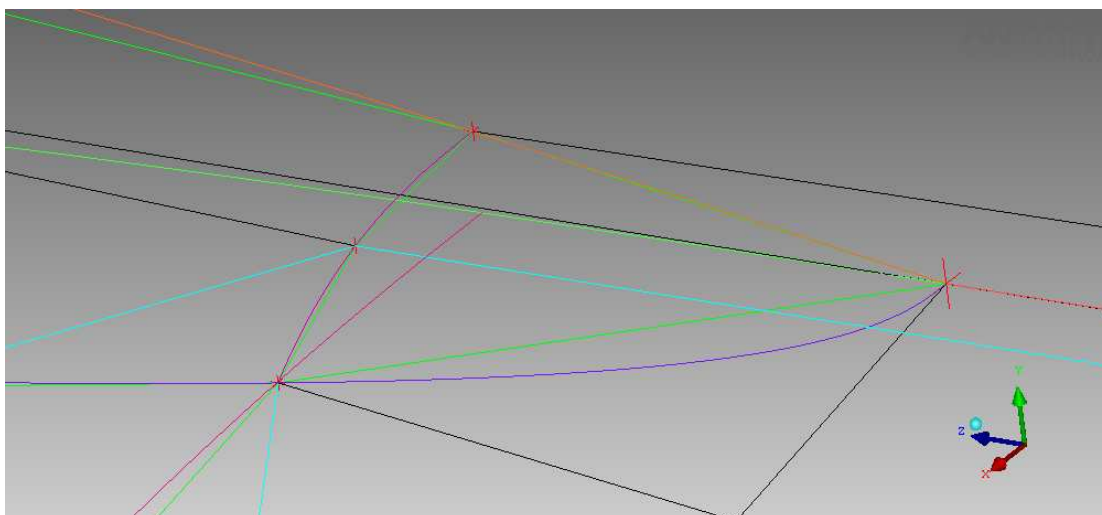
Εικόνα 4.8.2: Εργασίες στα επιλεγμένα μπλοκ.

Στη συνέχεια, θα επιχειρούμε να φτιάξουμε τα μπλοκ της γάστρας του αεροσκάφους. Ενεργοποιούμε τα μπλοκ που περιβάλλουν τη γάστρα (η διεύθυνση του X μένει ίδια με το κάλυμμα της πτέρυγας και το Y αυξάνεται κατά ένα!), επεκτείνουμε τις τομές που μας χρειάζονται από την άτρακτο και δημιουργούμε καινούριες στην κρίσιμη γεωμετρία της γάστρας. Συσχετίζουμε καμπύλες και σημεία και τοποθετούμε τα μπλοκ στο Part MIX (**Εικόνα 4.8.3**).



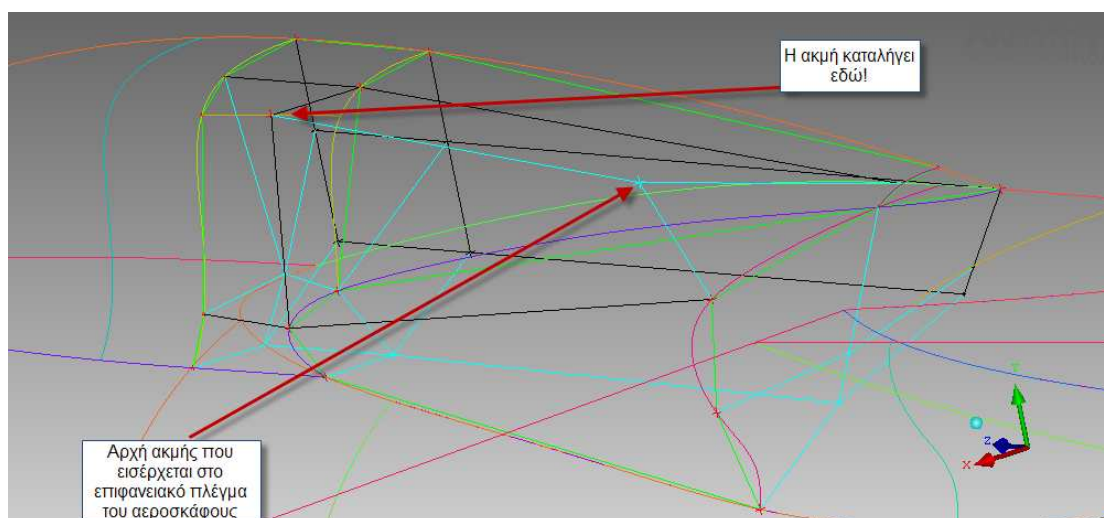
Εικόνα 4.8.3: Τα μπλοκ της γάστρας του αεροσκάφους.

Επιβάλλεται να προβάλλουμε κάποιες λεπτομέρειες. Στο πρόσθιο μέρος της γάστρας έγινε κάτι ανάλογο με το πρόσθιο μέρος του καλύμματος της πτέρυγας. Δηλαδή μετακινήσαμε και προβάλαμε την κάτω ακμή του μπλοκ στην καμπύλη, που ενώνει την γάστρα με το box της πτέρυγας (**Εικόνα 4.8.4**).



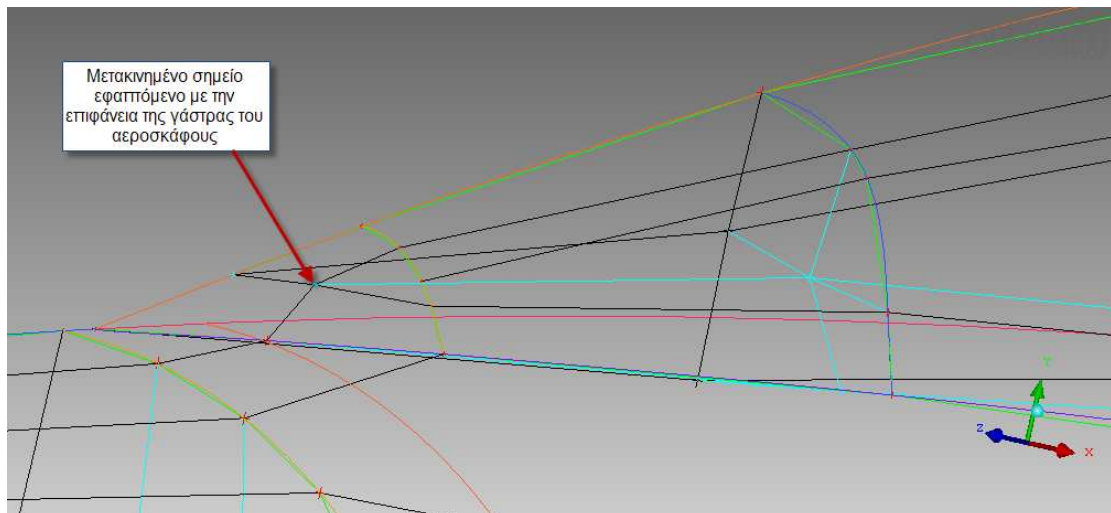
Εικόνα 4.8.4: Πρόσθιο μπλοκ της γάστρας.

Στο σημείο που η γάστρα παίρνει τη θέση του καλύμματος της πτέρυγας στην διεύθυνση των Z, μια ακμή, που μέχρι τώρα δεν αποτελούσε όριο του επιφανειακού πλέγματος του αεροσκάφους, εισέρχεται στην γεωμετρία του, ερχόμενη από το πλέγμα στον περιβάλλοντα όγκο (**Εικόνα 4.8.5**). Αυτή η ενέργεια είναι απαραίτητη γιατί το πλάτος της γάστρας σε αυτό το σημείο πλησιάζει το πλάτος του καλύμματος της πτέρυγας, αν και ξενίζει αφού γίνεται στο μέσο κάποιου τμήματος και όχι στην αρχή όπως συνήθως γίνεται.



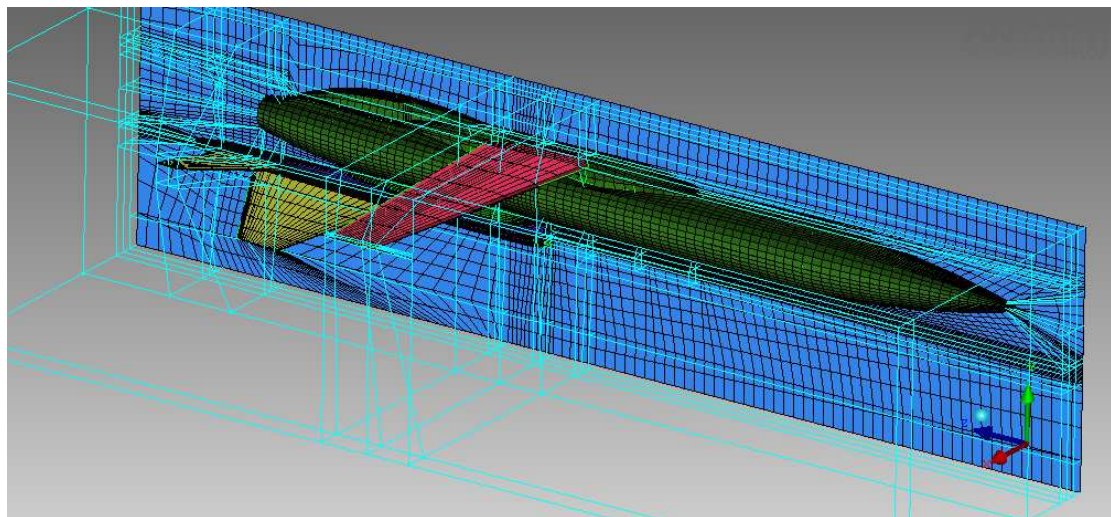
Εικόνα 4.8.5: Ιδιαιτερότητα στο μπλοκ της γάστρας.

Στο πίσω μέρος της γάστρας μετακινήσαμε και προβάλαμε την κάτω ακμή του μπλοκ στην καμπύλη που ενώνει την γάστρα με την άτρακτο και μετακινήσαμε τον κόμβο σε νοητό σημείο πάνω στην επιφάνεια της γάστρας (**Εικόνα 4.8.6**).



Εικόνα 4.8.6: Μπλοκ στο τέλος της γάστρας.

Τώρα ελέγχουμε αν όλα τα μπλοκ του αεροσκάφους βρίσκονται στο Part MIX και για τυχόν λάθη ή παραλήψεις που πιθανότατα έχουμε (συσχετίσεις ακμών με καμπύλες της γεωμετρίας). Μπορούμε να ελέγξουμε και οπτικά το επιφανειακό πλέγμα με την εντολή Pre-Mesh (**Εικόνα 4.8.7**), χωρίς να ενδιαφερόμαστε ακόμη για την πυκνότητα του στις διαφορετικές περιοχές.



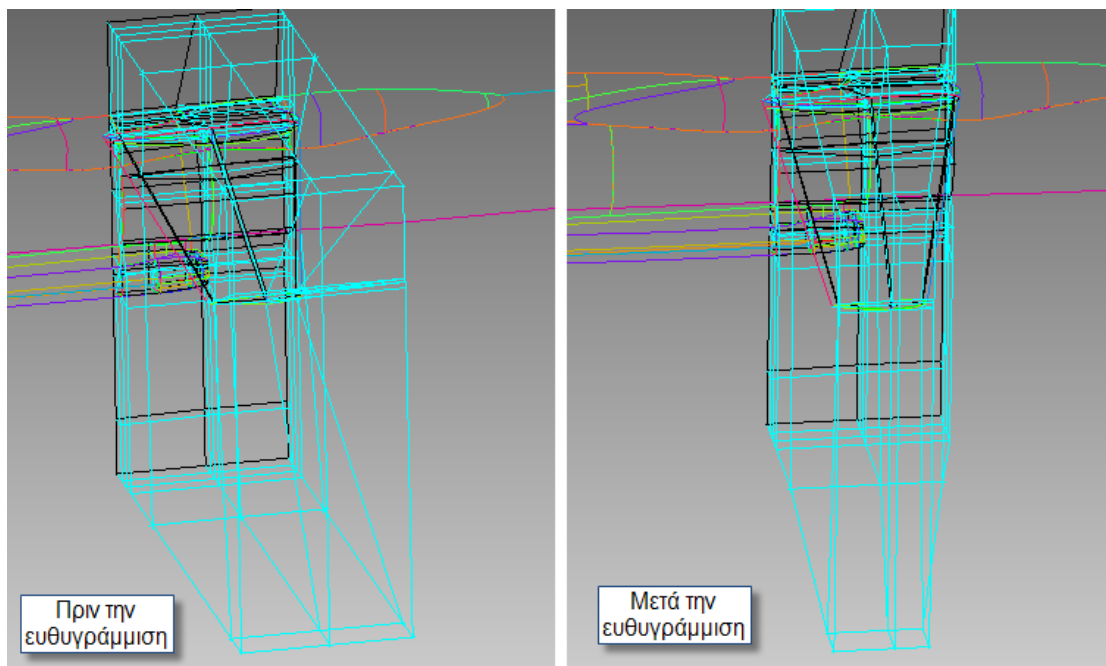
Εικόνα 4.8.7: Επιφανειακό πλέγμα, έλεγχος για λάθη ή παραλήψεις.

Αν είναι όλα εντάξει έχουμε τελειώσει με τα μπλοκς του αεροσκάφους.

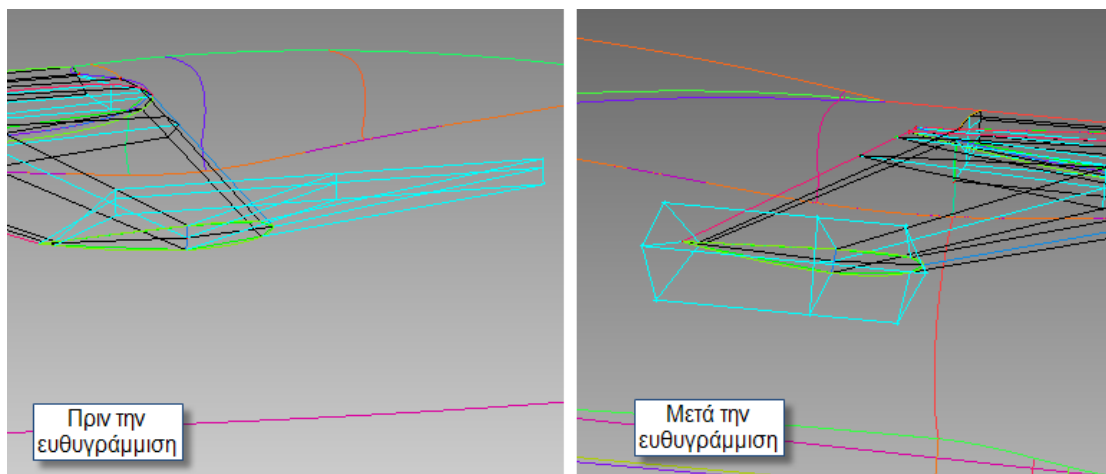
4.9 Διαμόρφωση των μπλοκς στον όγκο.

Για όμορφο και σωστό πλέγμα στον όγκο του μοντέλου είναι απαραίτητο να ευθυγραμμίσουμε τις κορυφές των μπλοκς του όγκου με τις αντικριστές στην επιφάνεια του αεροσκάφους. Στόχος είναι να έχουμε στοιχεία πλέγματος με όσο το δυνατόν πιο κάθετες γωνίες, που είναι ένα χαρακτηριστικό της ποιότητας του πλέγματος. Συνεπώς ελέγχουμε κάθε κορυφή των μπλοκς του όγκου και τις μετακινούμε ανάλογα.

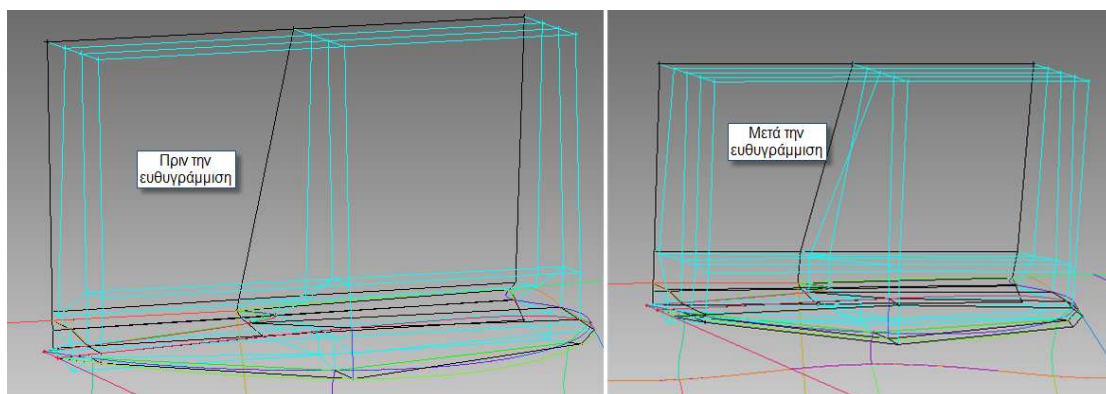
Μερικές μετατοπίσεις φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.



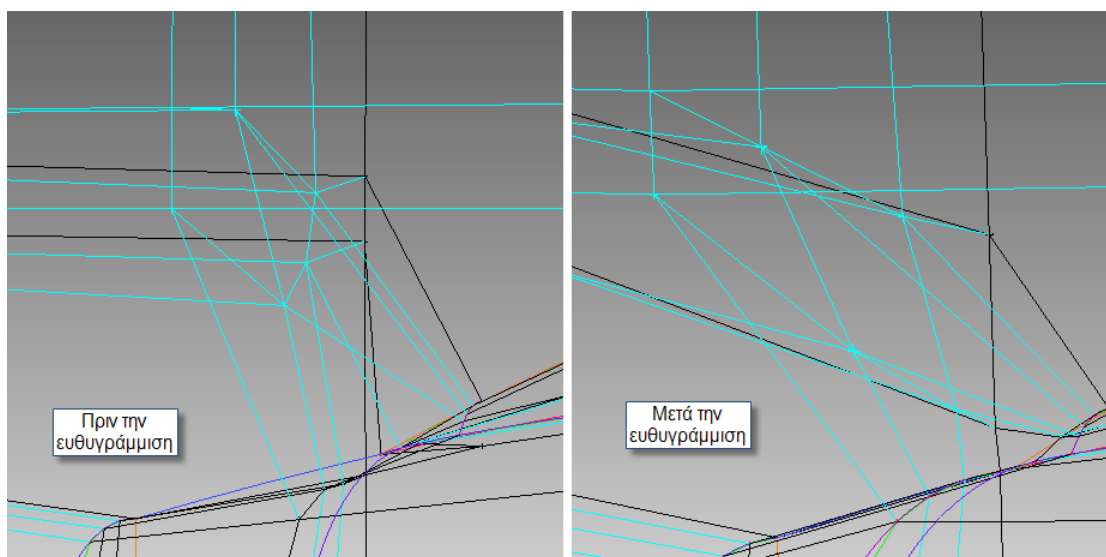
Εικόνα 4.9.1: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης της πτέρυγας.



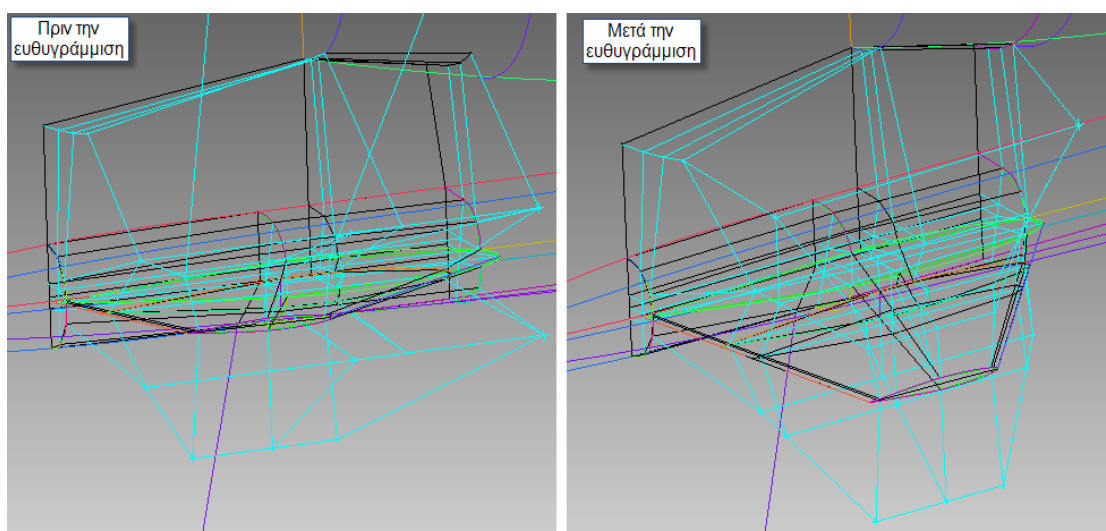
Εικόνα 4.9.2: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης στο άκρο της πτέρυγας.



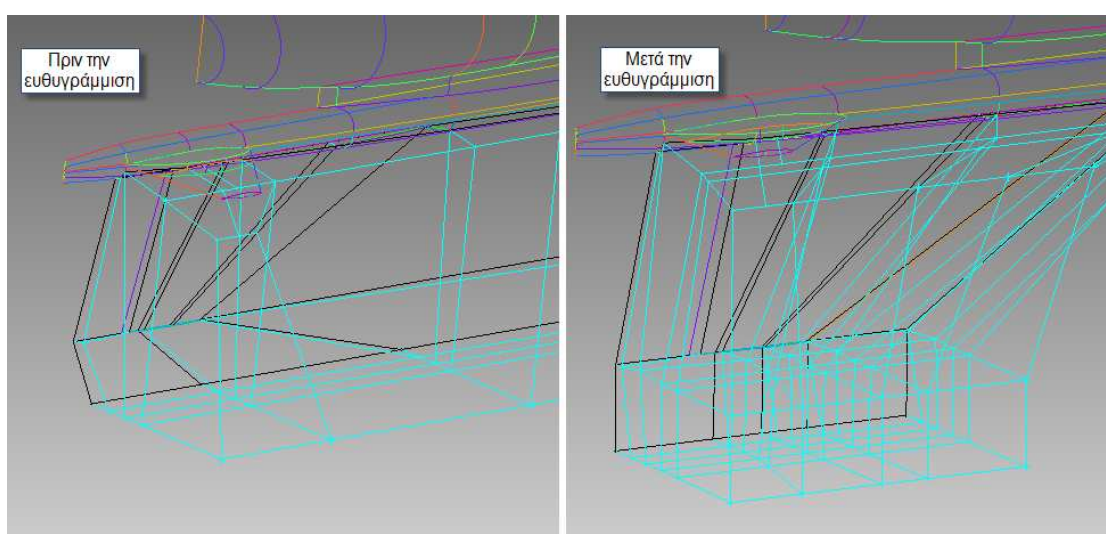
Εικόνα 4.9.3: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης στο κάλυμμα της πτέρυγας.



Εικόνα 4.9.4: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης στο πίσω άκρο της γάστρας του αεροσκάφους.

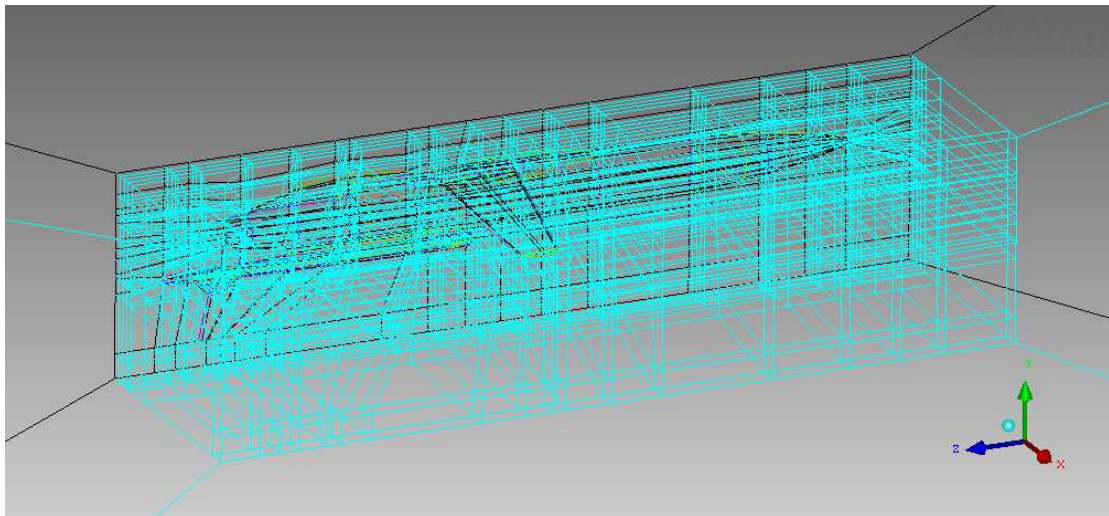


Εικόνα 4.9.5: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης στο ουραίο οριζόντιο πτερύγιο.

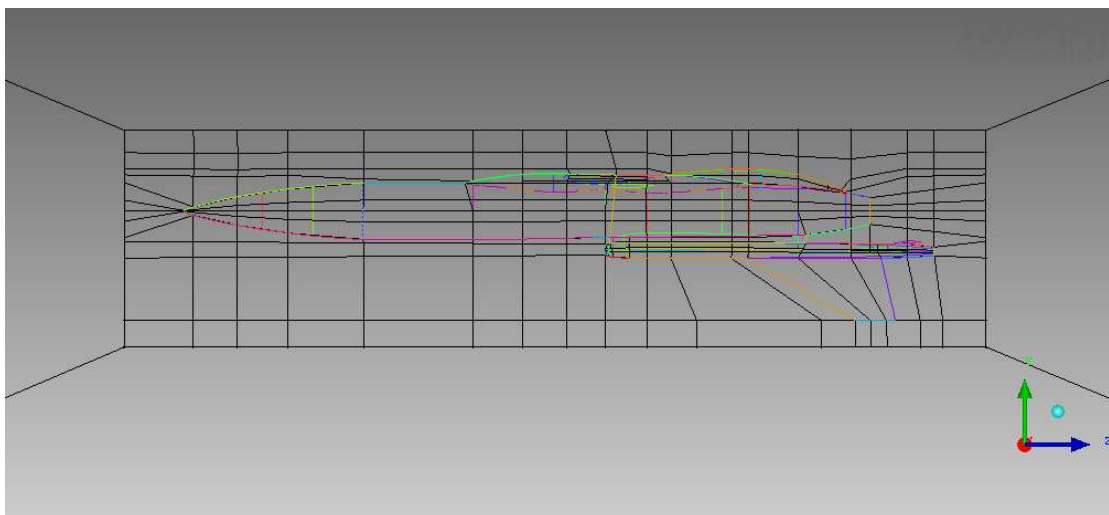


Εικόνα 4.9.6: Μετατοπίσεις ευθυγράμμισης στο ουραίο κάθετο πτερύγιο.

Στη συνέχεια επεκτείνουμε κάθε τομή στο αεροσκάφος πάντα μέσα στο μικρό μπλοκ του O-grid (**Εικόνα 4.9.7**) και με τη βοήθεια του Index Control (**Εικόνα 4.9.8**) ελέγχουμε διεξοδικά κάθε μπλοκ στον όγκο και εκτελούμε τις ανάλογες μετατοπίσεις κορυφών.



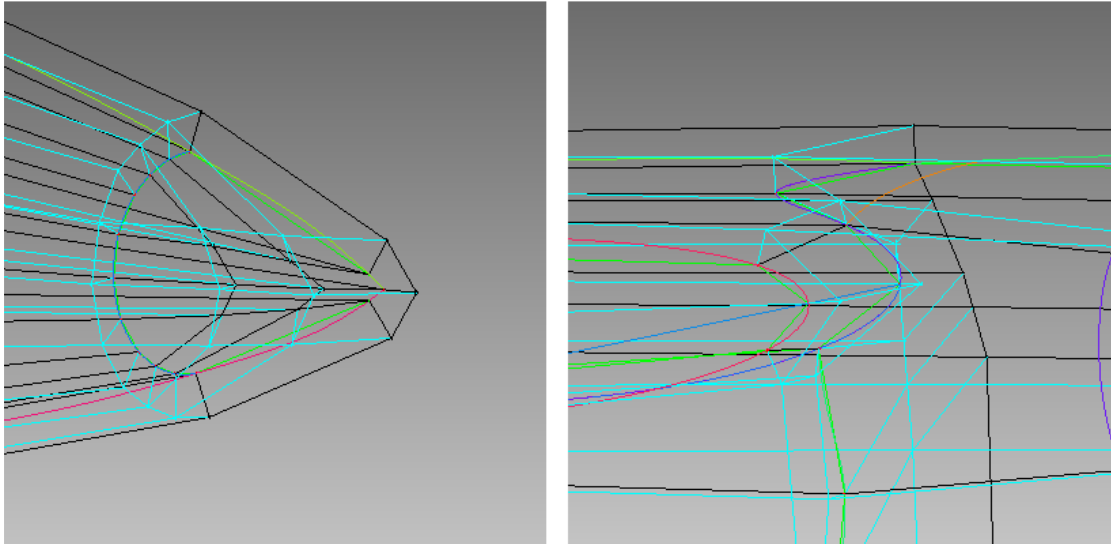
Εικόνα 4.9.7: Τα μπλοκ στον όγκο της γεωμετρίας μετά από επέκταση όλων των τομών.



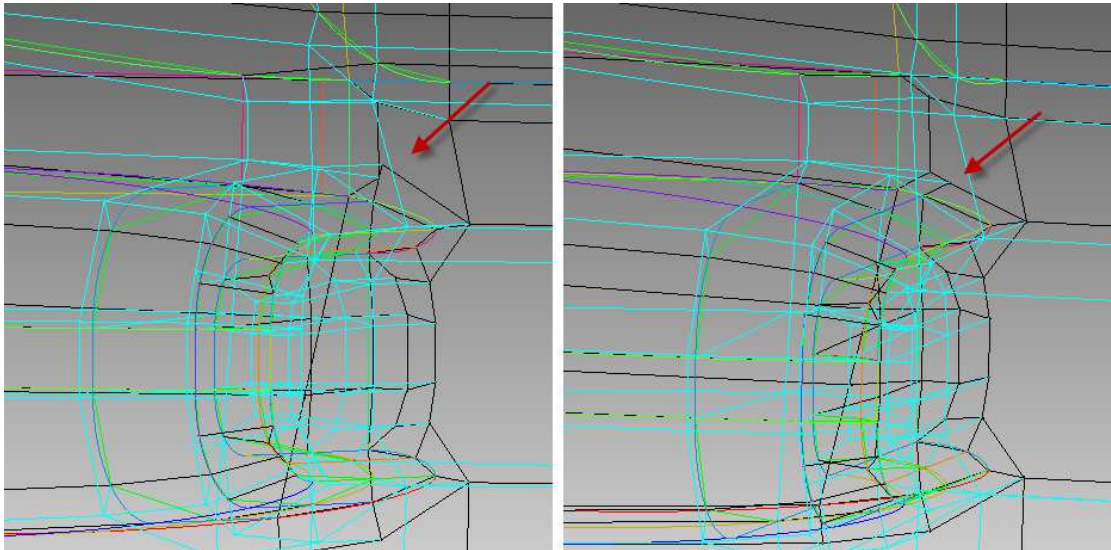
Εικόνα 4.9.8: Το πρώτο επίπεδο τομών στον άξονα των X από το Index Control.

4.10 Δημιουργία O-Grid γύρω από το αεροσκάφος.

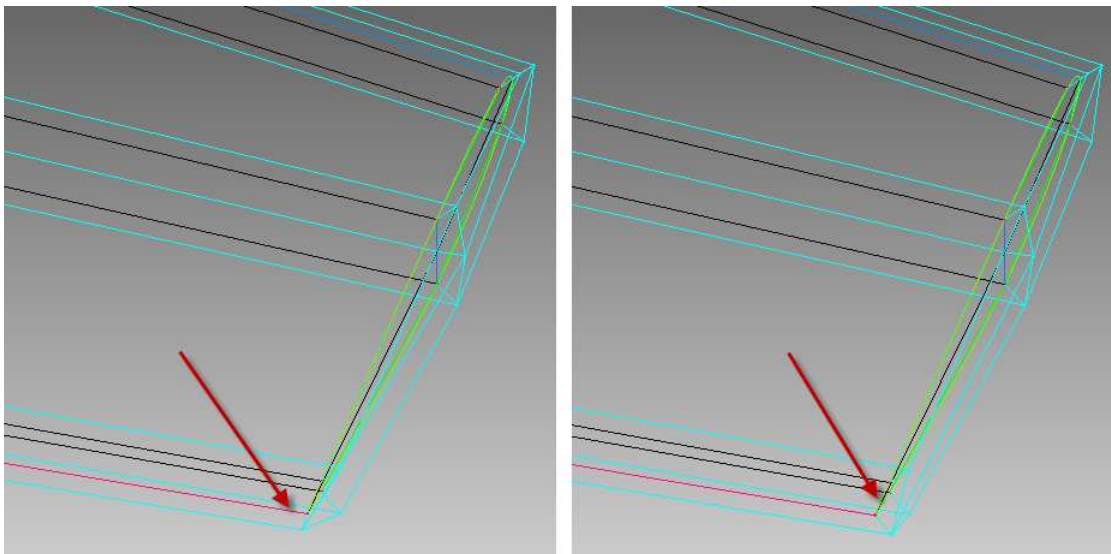
Για τη δημιουργία O-Grid γύρω από το αεροσκάφος επιλέγουμε την κατάλληλη εντολή του λογισμικού και δημιουργούμε O-Grid γύρω από τα μπλοκ του τμήματος MIX με συγκεκριμένο απόλυτο μήκος (**Εικόνα 4.10.1**). Στη συνέχεια μετακινούμε τον κόμβο από το μπλοκ του O-Grid στη βάση του αεραγωγού (**Εικόνα 4.10.2**) και στις άκρες των πτερυγίων (**Εικόνα 4.10.3**). Τέλος διαγράφουμε (delete) το τμήμα MIX που περιέχει τα μπλοκ του αεροσκάφους, αφού το πλέγμα στο εσωτερικό του δεν μας χρησιμεύει.



Εικόνα 4.10.1: Μερικές λεπτομέρειες του O-Grid.



Εικόνα 4.10.2: Μετακινήσεις κόμβων του O-Grid στη βάση του αεραγωγού.

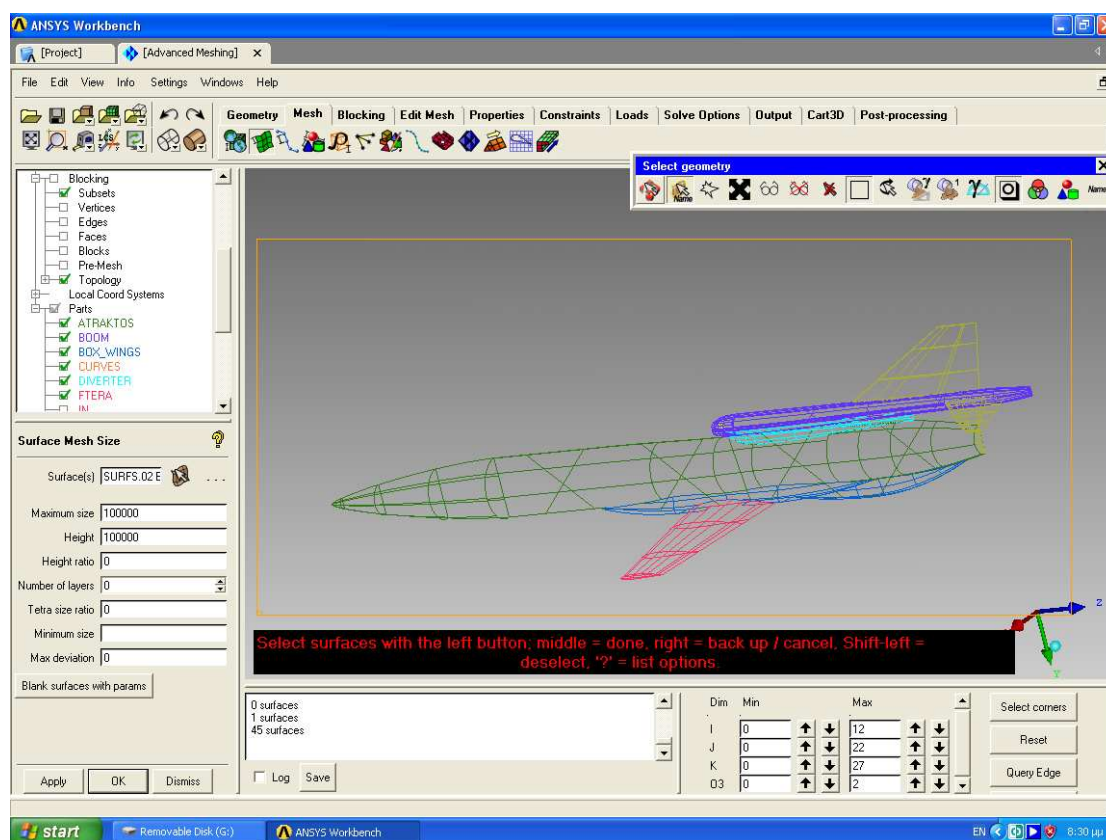


Εικόνα 4.10.3: Μετακινήσεις κόμβων του O-Grid στην άκρη της κύριας πτέρυγας.

5 Δημιουργία τριδιάστατου πλέγματος

Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι δεν υπήρχε η πολυτέλεια να φτιάξουμε πολύ πυκνό πλέγμα, λόγω των περιορισμών από τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων ηλεκτρονικών υπολογιστών. Με δοκιμές που έχουμε κάνει ο υπολογιστής μας μπορεί να επεξεργαστεί πλέγμα δυναμικότητας λιγότερων από 4.000.000 κόμβους. Αργότερα για την επίλυση θα χρησιμοποιήσουμε 5 υπολογιστές, που ο καθένας μπορεί να επιλύσει πλέγμα της τάξεως των 800.000 κόμβων. Με αυτά τα δεδομένα ο μέγιστος αριθμός κόμβων πλέγματος, που μπορούμε να κατασκευάσουμε, είναι κάτι λιγότερο από 4.000.000 κόμβους. Το μέγεθος αυτό είναι οριακά ικανοποιητικό για τις δοκιμές μας.

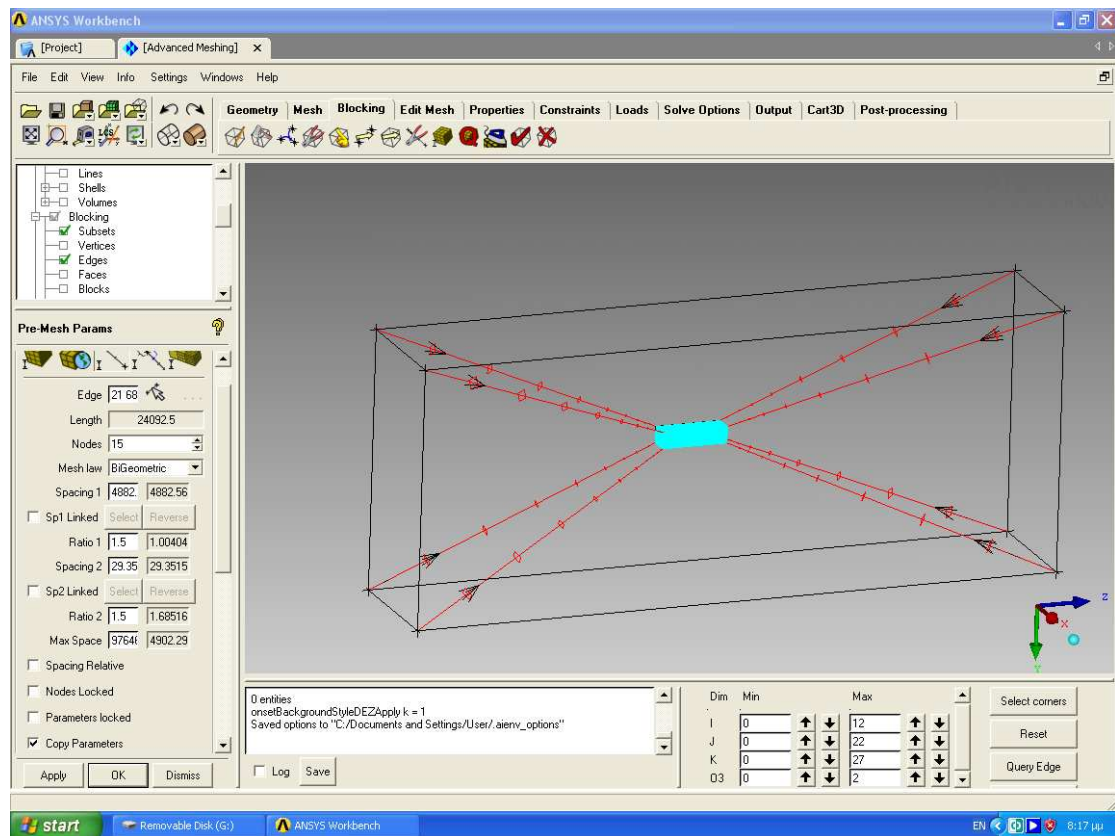
Η συνήθης διαδικασία για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του πλέγματος (μικρότερο-μεγαλύτερο μέγεθος, αναλογία μεταξύ των υψών των στοιχείων του πλέγματος, μεγαλύτερη απόκλιση των στοιχείων του πλέγματος από τη γεωμετρία) είναι σε κάθε μέρος της γεωμετρίας του μοντέλου να εισάγει κάποιος τις παραμέτρους εκείνες που τον ικανοποιούν. Στο δικό μας μοντέλο θα εργαστούμε από το ελάχιστο προς το βέλτιστο αφού λόγο περιορισμών δεν μπορούμε να κρατήσουμε τις αναλογίες. Έτσι αρχικά σαν βάση δίνουμε την εντολή να κατασκευαστεί πλέγμα με ελάχιστο αριθμό κόμβων που το λογισμικό θεωρεί ικανοποιητικό. Επιλέγουμε όλες τις επιφάνειες του αεροσκάφους με μοναδική παράμετρο έναν πολύ μεγάλο αριθμό για το μέγιστο ύψος των στοιχείων του πλέγματος (Εικόνα 5.1).



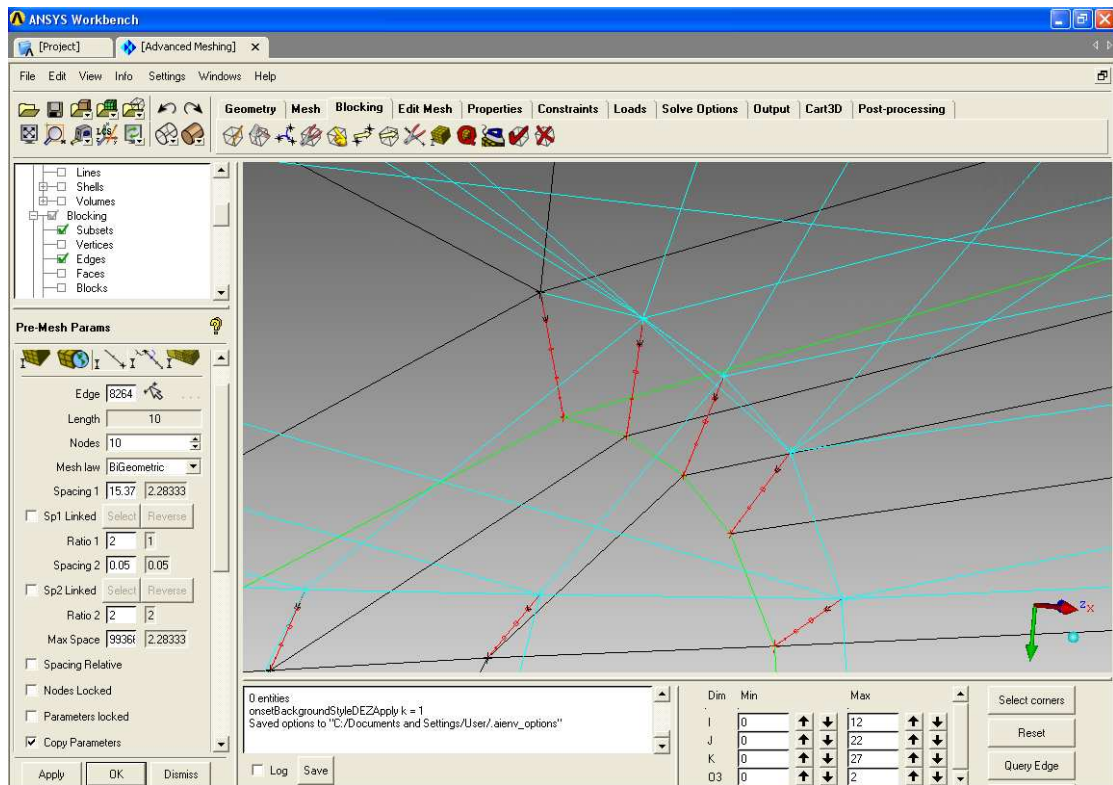
Εικόνα 5.1: Διαδικασία δημιουργίας πλέγματος με ελάχιστα στοιχεία.

Από δω και στο εξής πυκνώνουμε σε σημεία που θεωρούμε σημαντικά, προσέχοντας πάντα να μην υπερβούμε τους 4.000.000 κόμβους. Παρουσιάζονται σε διαδοχικές

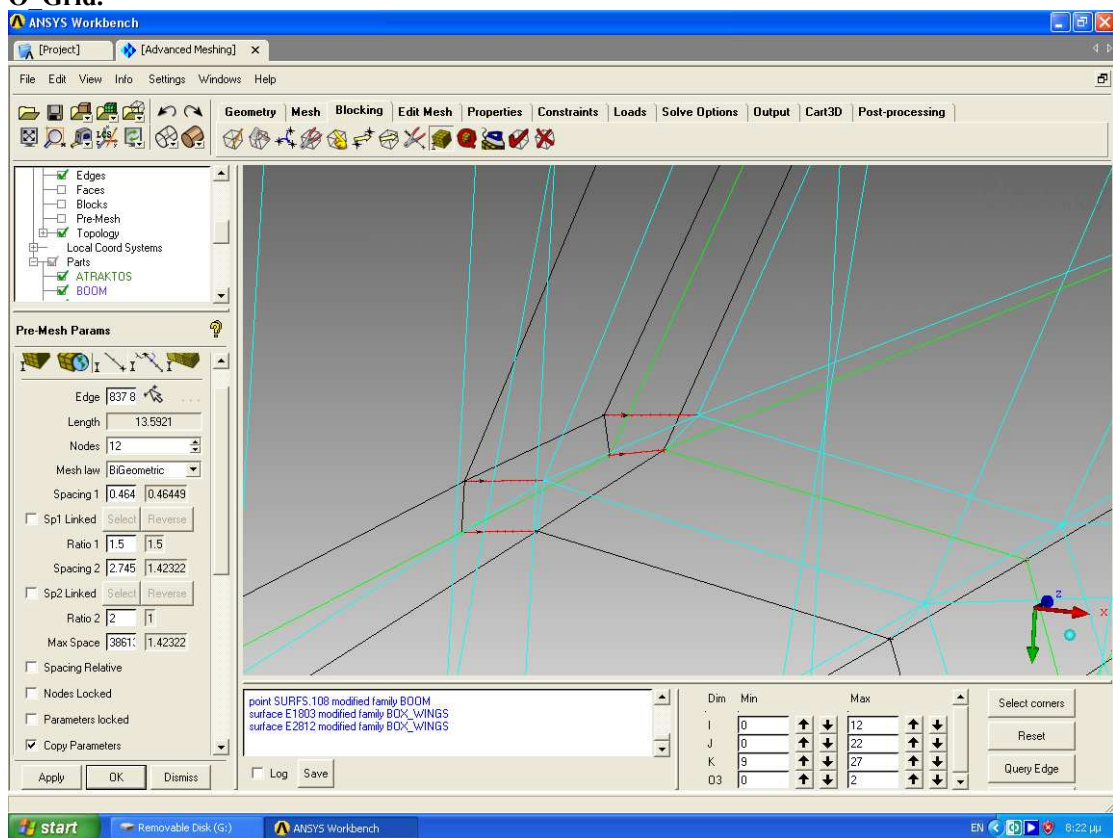
εικόνες (Εικόνες 5.2-5.6) οι τελικές μετατροπές που έγιναν σε διάφορα σημεία του μοντέλου μας.



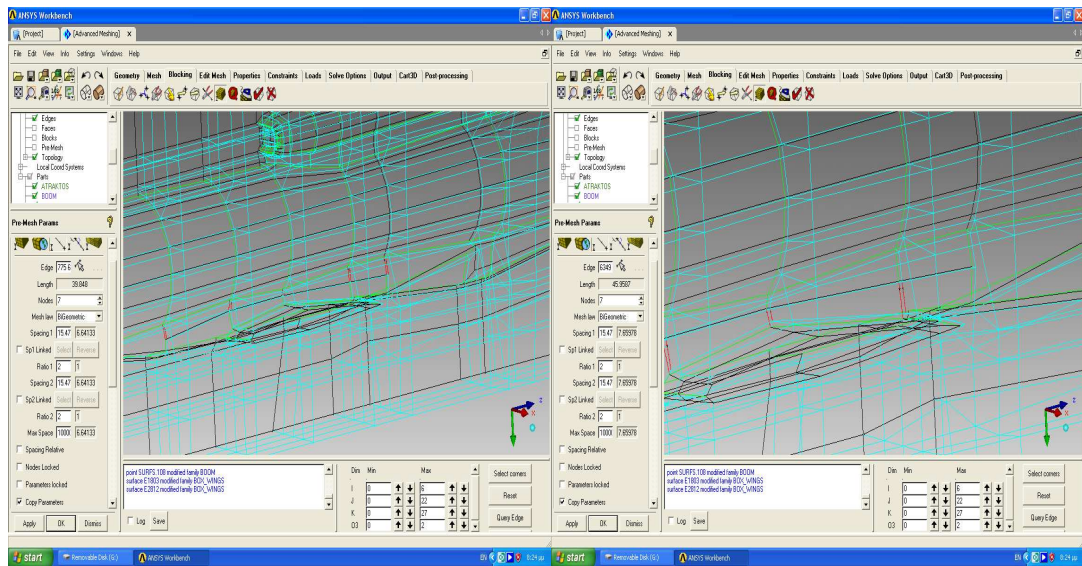
Εικόνα 5.2: Εισαγωγή παραμέτρων στις αποστάσεις των κόμβων στις ακμές του εξωτερικού O-Grid.



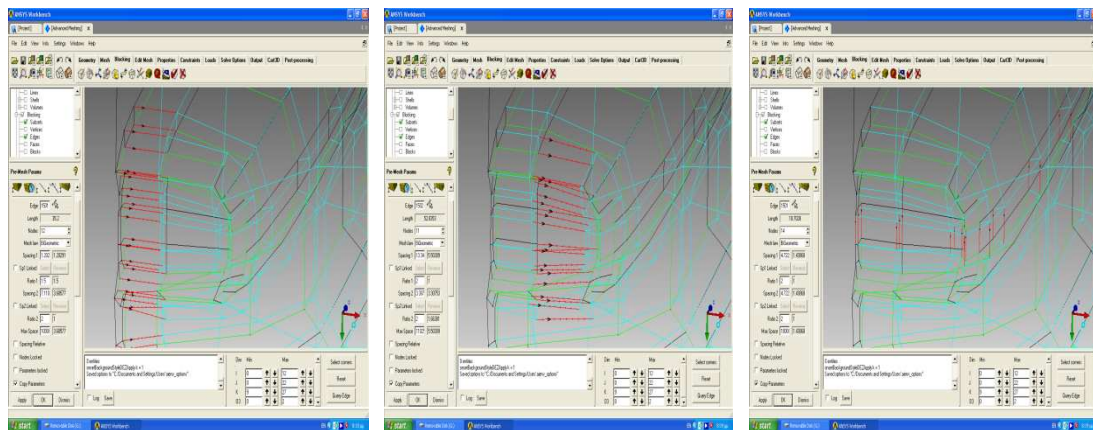
Εικόνα 5.3: Εισαγωγή παραμέτρων στις αποστάσεις των κόμβων στις ακμές του εσωτερικού O Grid.



Εικόνα 5.4: Εισαγωγή παραμέτρων στις αποστάσεις των κόμβων στην αρχή του κάθετου οριζαίου πτερυγίου.

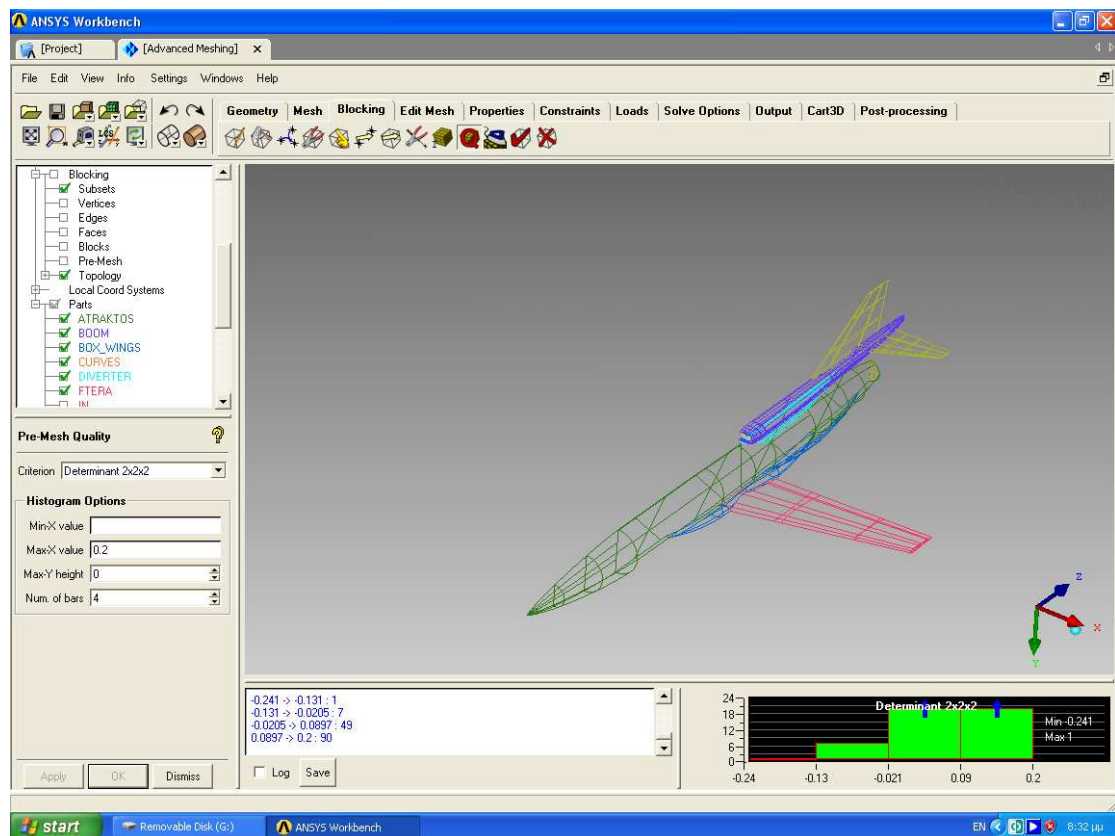


Εικόνα 5.5: Εισαγωγή παραμέτρων στις αποστάσεις των κόμβων στο κάλυμμα της βάσης πάνω από τη κύρια πτέρυγα.

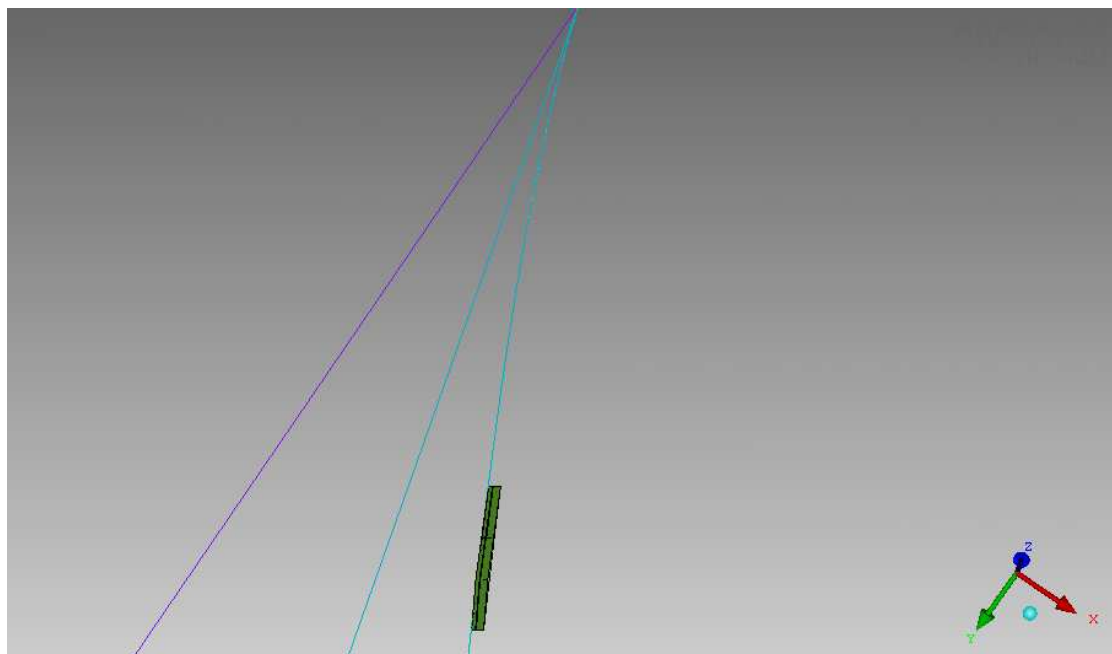


Εικόνα 5.6: Εισαγωγή παραμέτρων στις αποστάσεις των κόμβων στην είσοδο του αεραγωγού.

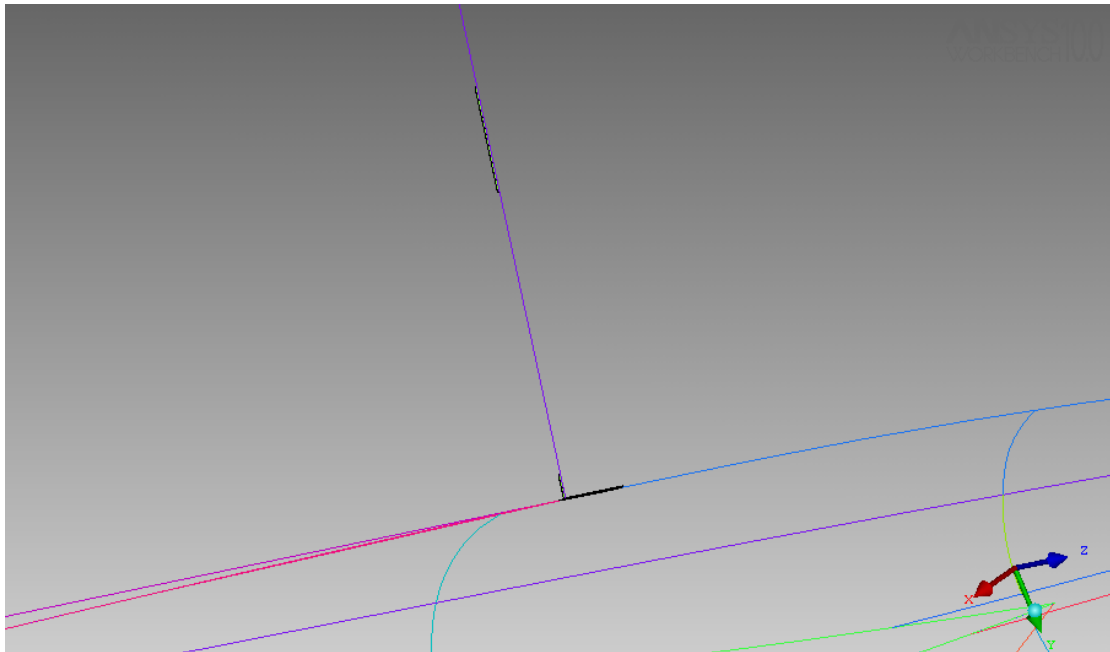
Το επόμενο βήμα είναι να ελέγξουμε την ποιότητα του πλέγματος μας, με κριτήριο το "Determinant $2 \times 2 \times 2$ " (**Εικόνα 5.7**). Σε ένα τέλειο πλέγμα τα στοιχεία του πλέγματος πρέπει να έχουν τιμή πάνω από 0.2. Στο δικό μας πλέγμα η ελάχιστη τιμή του κριτηρίου αυτού είναι -0.24. Αυτό συμβαίνει λόγω της γεωμετρίας του μοντέλου. Τα μη ποιοτικά στοιχεία πλέγματος συναντώνται κυρίως στις άκρες των περυγίων, γιατί τα περύγια καταλήγουν σε σημείο και όχι σε κάποιο πάχος, δηλαδή δεν υπάρχει απόσταση μεταξύ της πάνω και κάτω επιφάνειας των περυγίων. Αυτό είναι ένα πρόβλημα που δεν μπορούμε να επιλύσουμε. Ευτυχώς από τα περίπου 4.000.000 στοιχεία μόνο τα 144 έχουν τιμή κριτηρίου χαμηλότερη από 0.2, κάτι που είναι αποδεκτό. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μη αποδεκτά στοιχεία, που δεν επιδέχονται βελτίωση (**Εικόνες 5.8-5.11**).



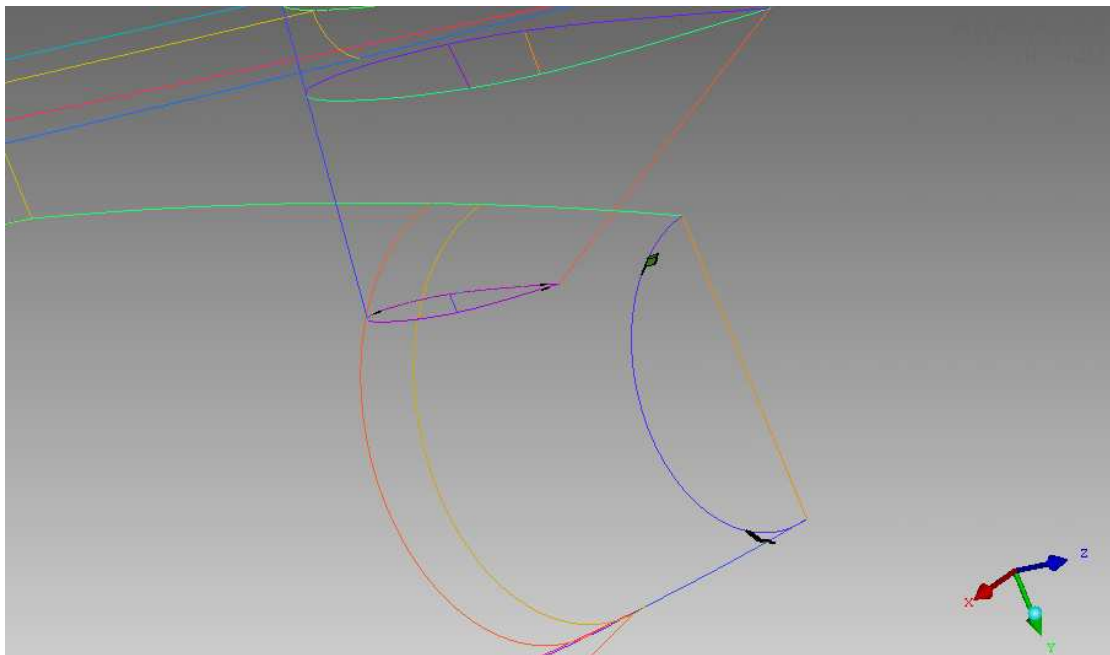
Εικόνα 5.7: Έλεγχος ποιότητας πλέγματος.



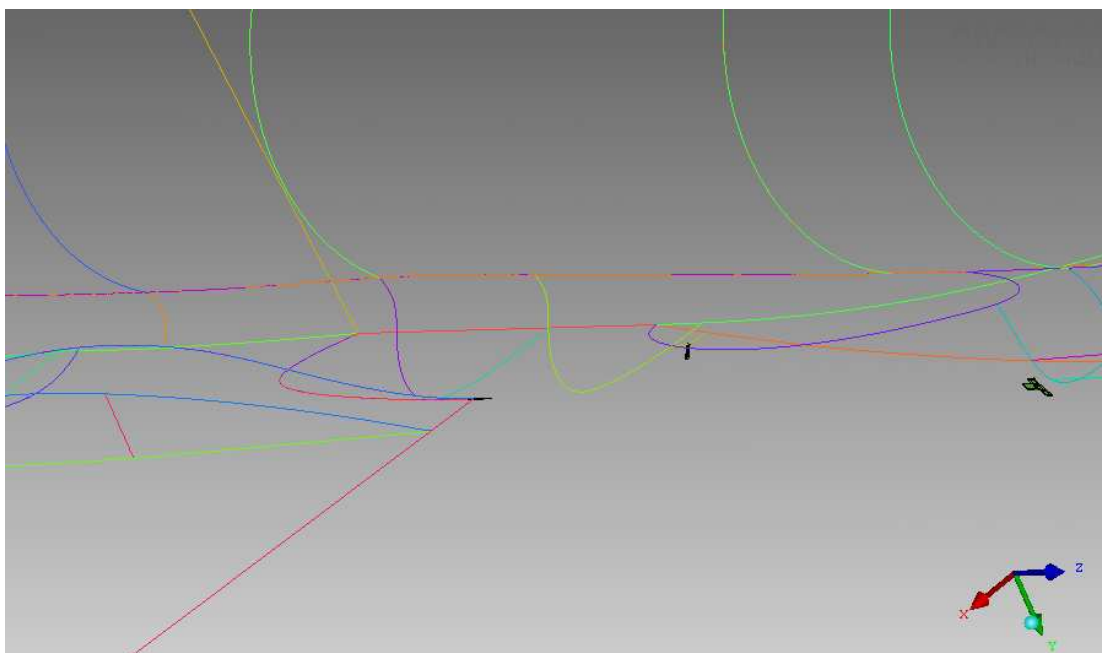
Εικόνα 5.8: Μη ποιοτικά στοιχεία στην άκρη του κάθετου ουραίου πτερυγίου.



Εικόνα 5.9: Μη ποιοτικά στοιχεία στην βάση του κάθετου ουραίου πτερυγίου.

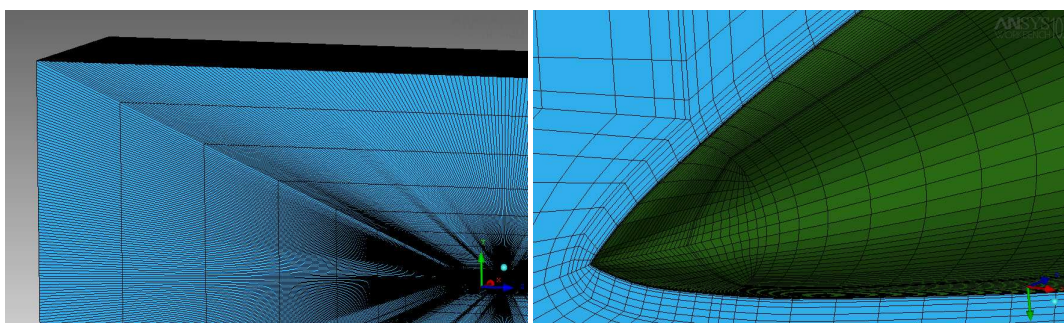


Εικόνα 5.10: Μη ποιοτικά στοιχεία στην άκρη του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου και στην ουρά του αεροσκάφους.

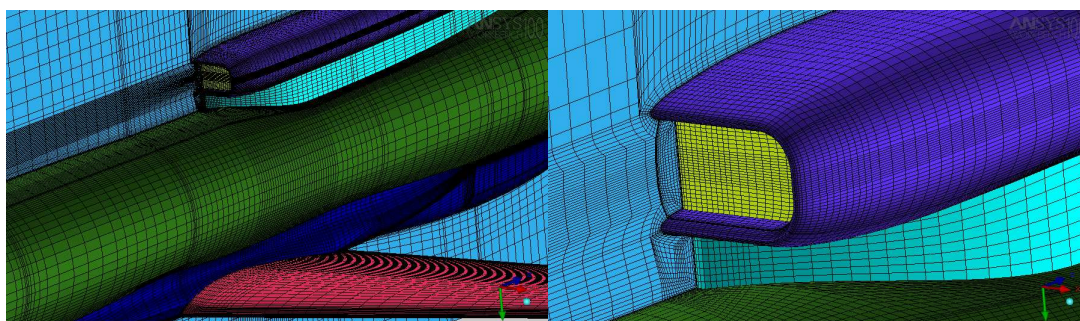


Εικόνα 5.11: Μη ποιοτικά στοιχεία στην βάση της κύριας πτέρυγας και στο κάλυμμα της βάσης.

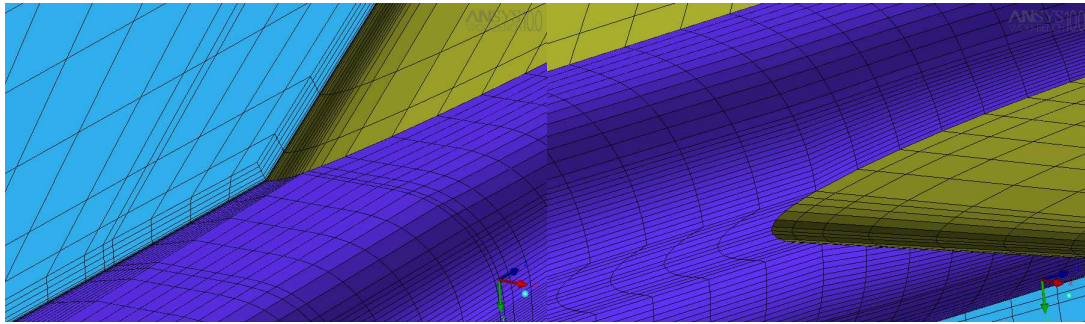
Τέλος, θα παρουσιάσουμε κάποιες λεπτομέρειες από το πλέγμα στην τελική του μορφή (Εικόνες 5.12-5.20).



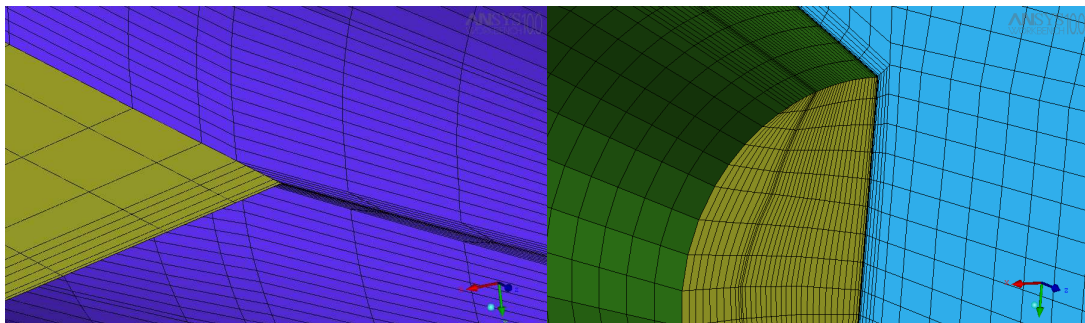
Εικόνα 5.12: Πλέγμα στην επιφάνεια συμμετρίας και στη μύτη του αεροσκάφους.



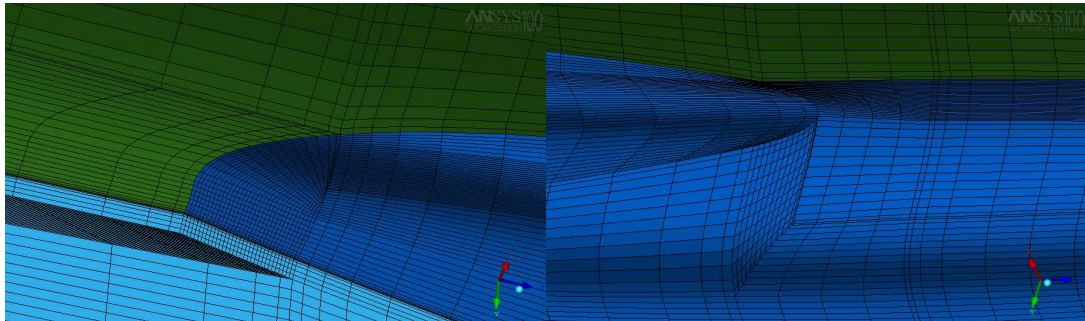
Εικόνα 5.13: Γενική απεικόνιση πλέγματος και πλέγμα στην είσοδο του αεραγωγού.



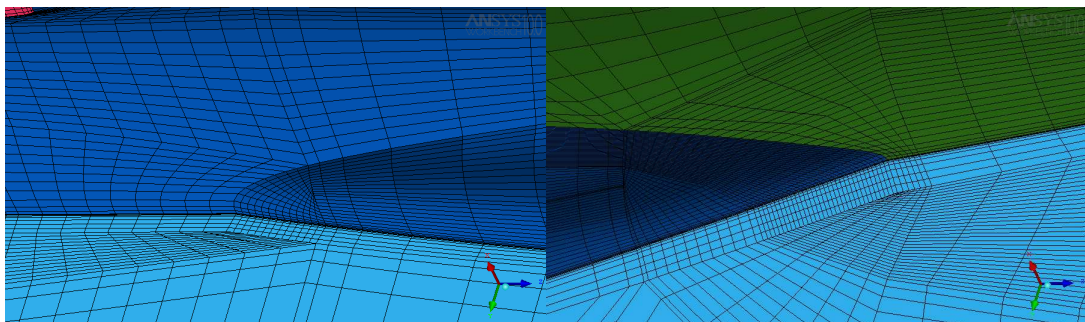
Εικόνα 5.14:Πλέγμα στη βάση του κάθετου και οριζόντιου ουραίου πτερυγίου.



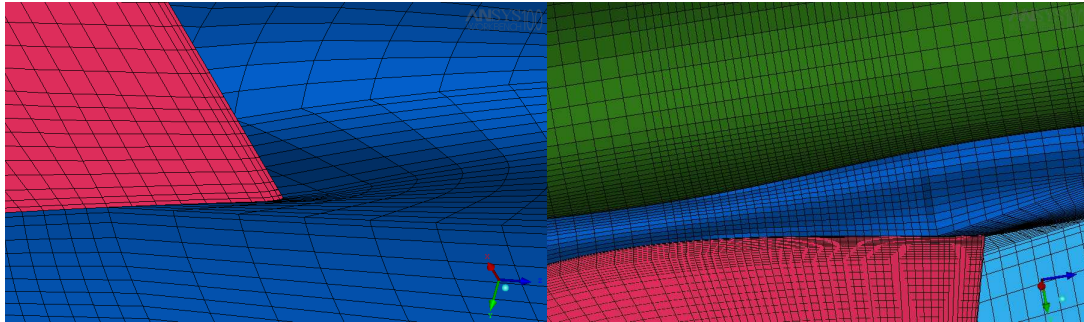
Εικόνα 5.15: Πλέγμα στην πίσω άκρη του οριζόντιου ουραίου πτερυγίου και στην ουρά του αεροσκάφους.



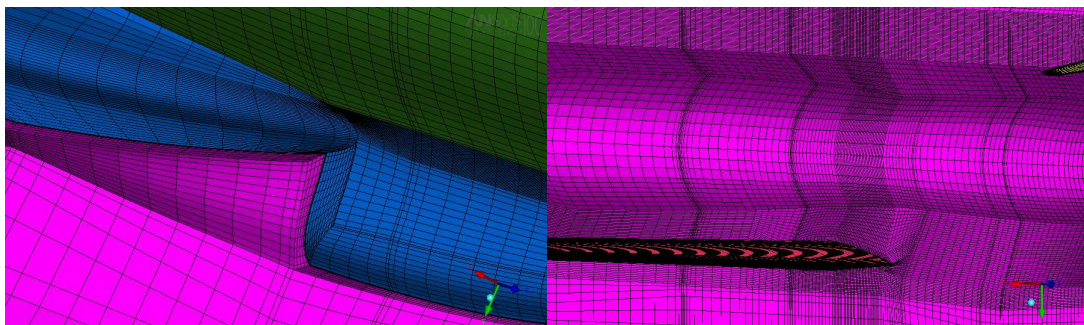
Εικόνα 5.16: Πλέγμα στο πρόσθιο μέρος του καλύμματος της βάσης και στην ένωση του με την γάστρα.



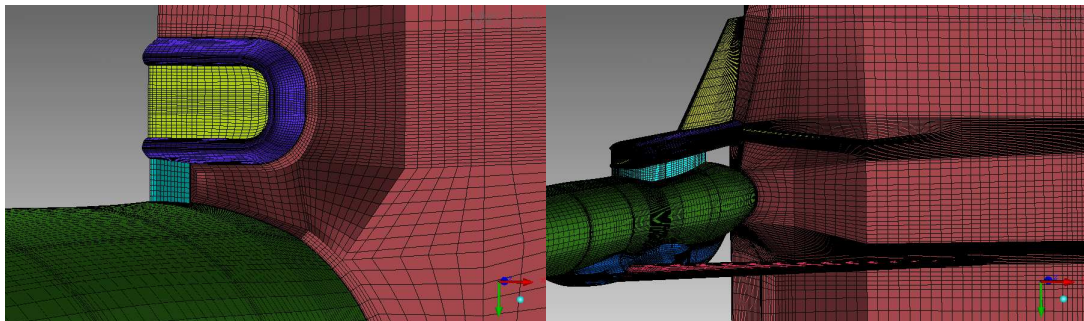
Εικόνα 5.17: Πλέγμα στην πρόσθιο και οπίσθιο μέρος της γάστρας.



Εικόνα 5.18: Πλέγμα στην άκρη της κύριας πτέρυγας και στο τμήμα πάνω αυτής.



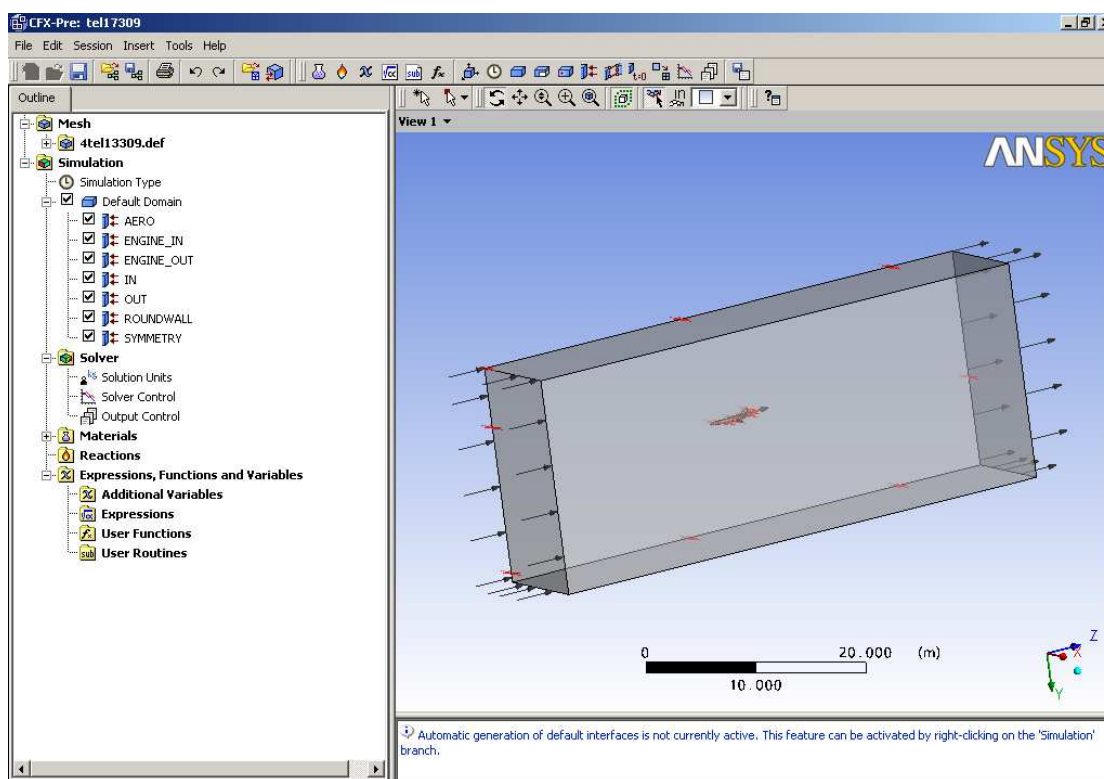
Εικόνα 5.19: Αποψη με SCAN PLANE στο επίπεδο YZ.



Εικόνα 5.20: Αποψη με SCAN PLANE στο επίπεδο XY.

6 Εισαγωγή πλέγματος και Μοντελοποίηση οριακών συνθηκών

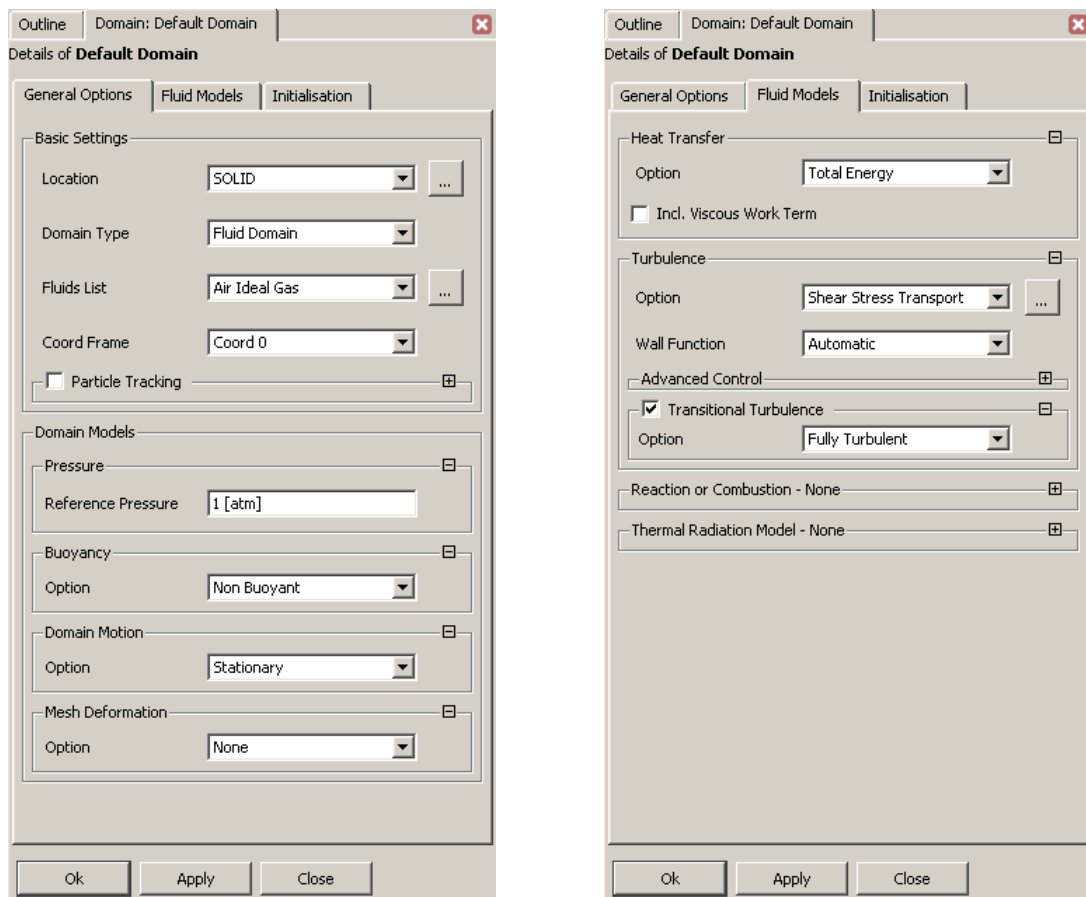
Μετά την πλεγματοποίηση του χωρίου μας και την εξαγωγή του σε μορφή κατάλληλη για το πρόγραμμα ανάλυσης της ροής ANSYS CFX 11.0, ορίζουμε στο λογισμικό την διαδρομή στον υπολογιστή μας όπου θα αποθηκευθούν τα αρχεία που θα παράξει το λογισμικό (αρχείο ορισμού του μοντέλου επίλυσης της ροής *.cls, αρχείο εισαγωγής στον επιλυτή *.def). Η διαδικασία εισαγωγής του πλέγματος και ορισμού των οριακών συνθηκών ξεκινά με την κλήση του CFX-Pre (**Εικόνα 6.1**).



Εικόνα 6.1: Το γραφικό περιβάλλον του CFX-Pre με το υπολογιστικό χωρίο του προς μελέτη μοντέλου.

6.1 Ορισμός του πεδίου ροής

Στη συνέχεια ορίζουμε το πεδίο της ροής. Ορίζουμε, στις καρτέλες που εμφανίζονται (**Εικόνα 6.1.1**), το είδος του ρευστού και την πίεση αναφοράς (που για την περίπτωση μας είναι η στατική πίεση για το δεδομένο ύψος πτήσης). Στην καρτέλα ορισμού του μοντέλου του ρευστού επιλέγουμε το μοντέλο επίλυσης ολικής ενέργειας για τη μεταφορά θερμότητας και το μοντέλο Shear Stress Transport (SST) για την μοντελοποίηση της τύρβης.

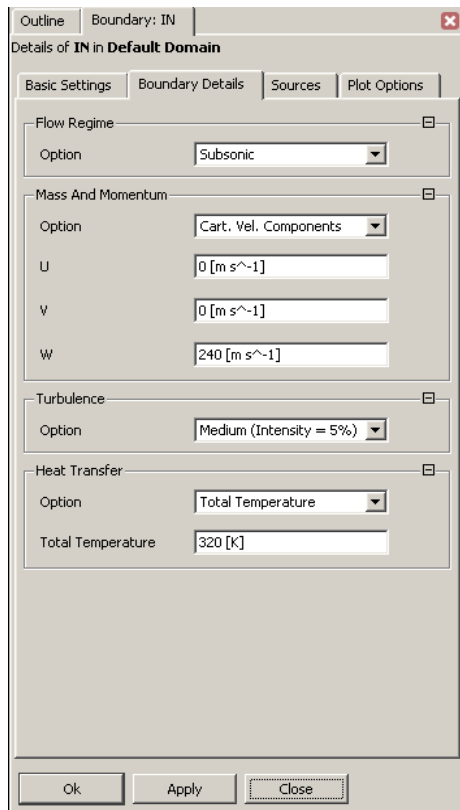


Εικόνα 6.1.1: Καρτέλες ορισμού των συνθηκών του πεδίου ροής.

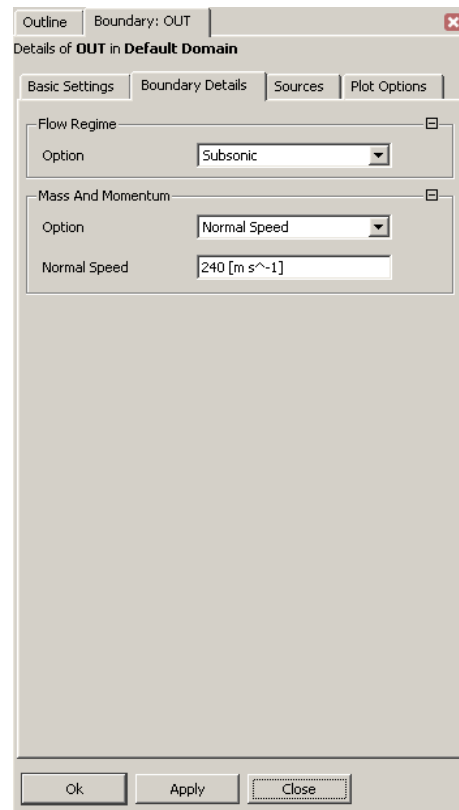
6.2 Ορισμός επιμέρους οριακών συνθηκών

Στη συνέχεια ορίζουμε διαδοχικά τις οριακές συνθήκες για όλο το μοντέλο. Αρχικά ορίζουμε οριακές συνθήκες στις επιφάνειες του κουτιού, που περικλείει το αεροσκάφος, επιλέγοντάς από τις αντίστοιχες ονομασίες της γεωμετρίας. Οι επιφάνειες αυτές είναι οι εξής :

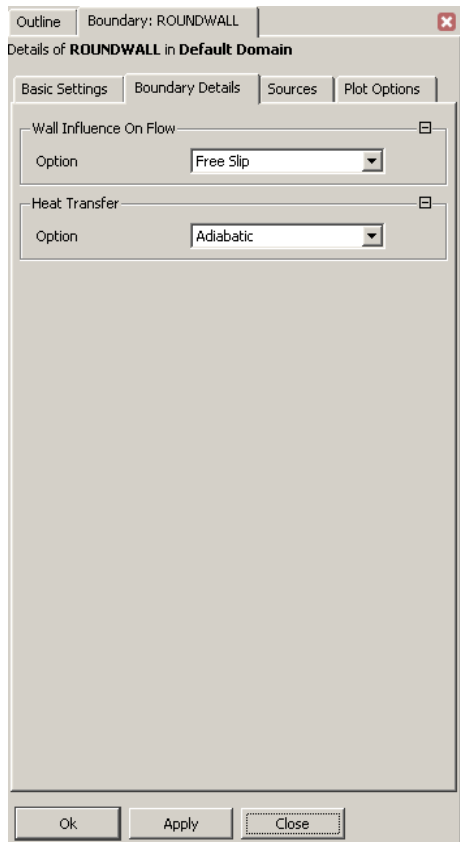
- IN Επιφάνεια εισόδου του ρευστού (**Εικόνα 6.2.1**).
- OUT Επιφάνεια εξόδου του ρευστού (**Εικόνα 6.2.2**).
- ROUNDWALL Το περιφερικό τοίχωμα του κουτιού με συνθήκες ολίσθησης ρευστού (**Εικόνα 6.2.3**).
- SYMMETRY Η επιφάνεια συμμετρίας του μοντέλου (**Εικόνα 6.2.4**).



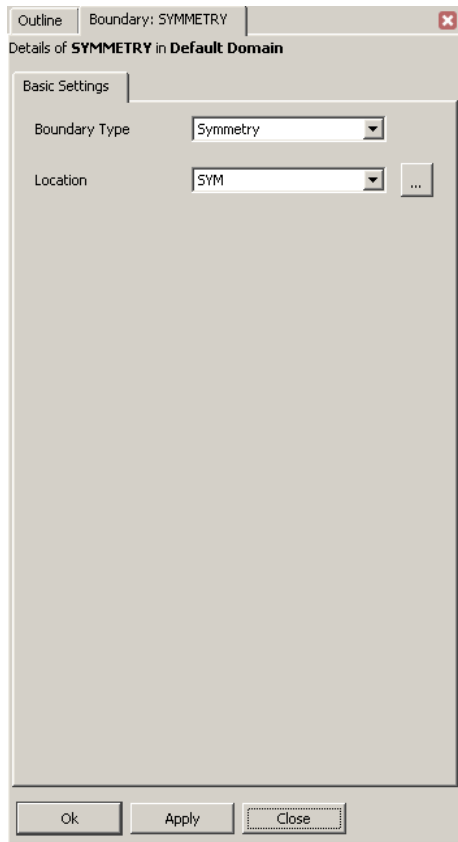
Εικόνα 6.2.1: Οριακές συνθήκες στην επιφάνεια εισόδου του ρευστού.



Εικόνα 6.2.2: Οριακές συνθήκες στην εξόδου του ρευστού.



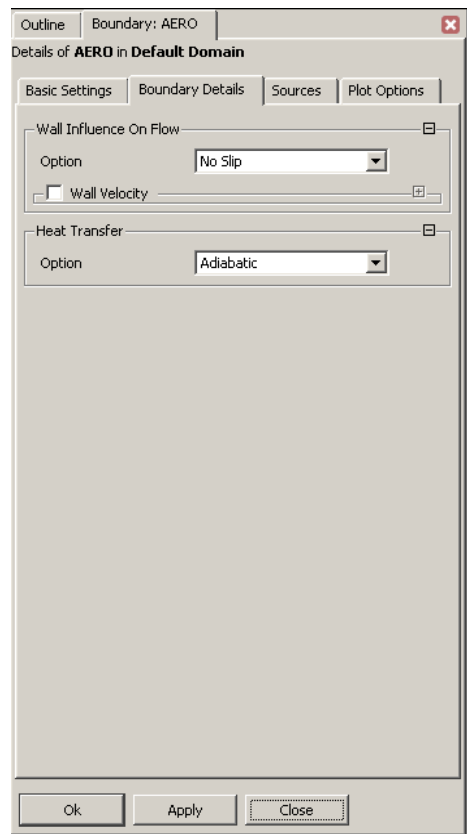
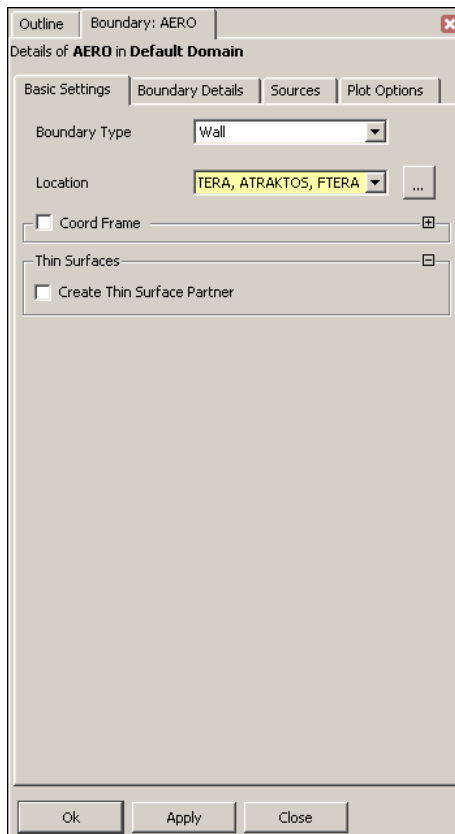
Εικόνα 6.2.3: Οριακές συνθήκες στην πλευρική επιφάνεια.



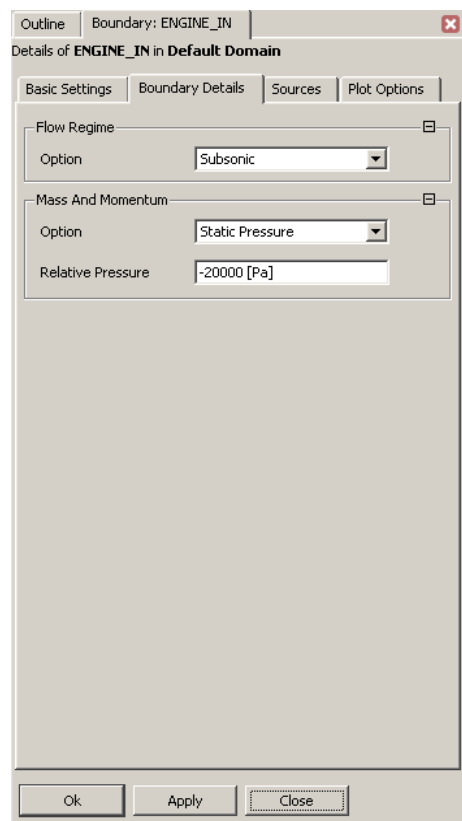
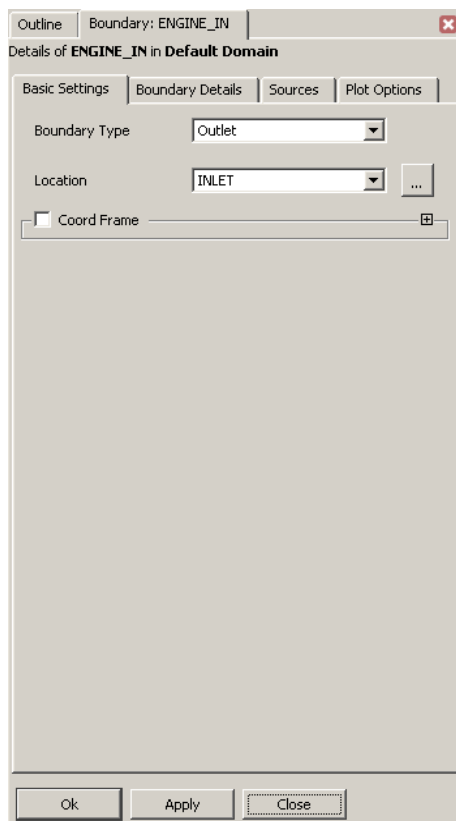
Εικόνα 6.2.4: Δήλωση της συμμετρίας.

Έπειτα ορίζουμε οριακές συνθήκες στις επιφάνειες του αεροσκάφους, οι οποίες είναι:

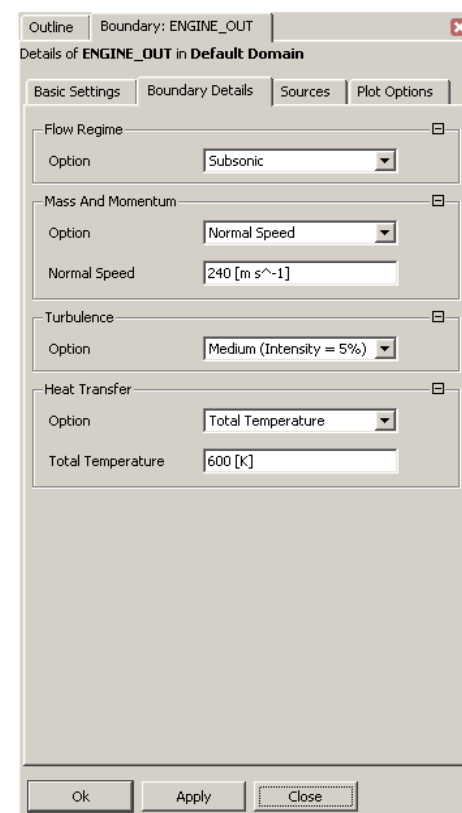
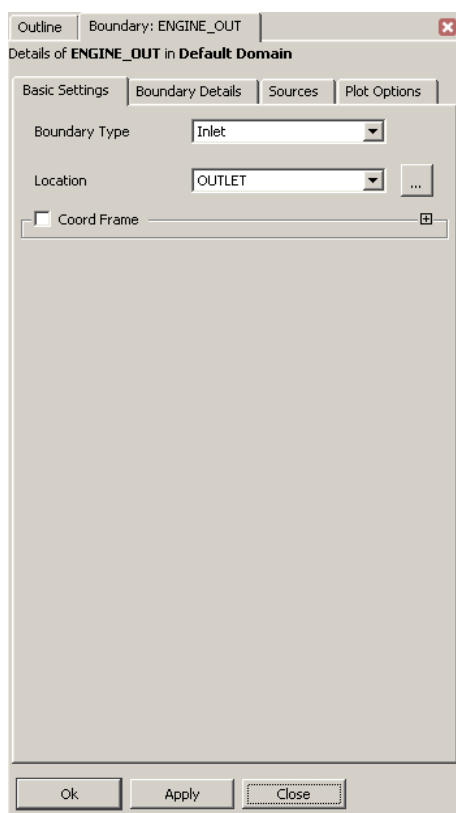
- **AERO:** Περιλαμβάνει όλες τις επιφάνειες του αεροσκάφους εκτός από τις επιφάνειες INLET και OUTLET (**Εικόνα 6.2.5**).
- **INLET** Επιφάνεια εισόδου του ρευστού στον αεραγωγό (**Εικόνα 6.2.6**).
- **OUTLET** Επιφάνεια εξόδου του ρευστού στην ουρά του αεροσκάφους (**Εικόνα 6.2.7**).



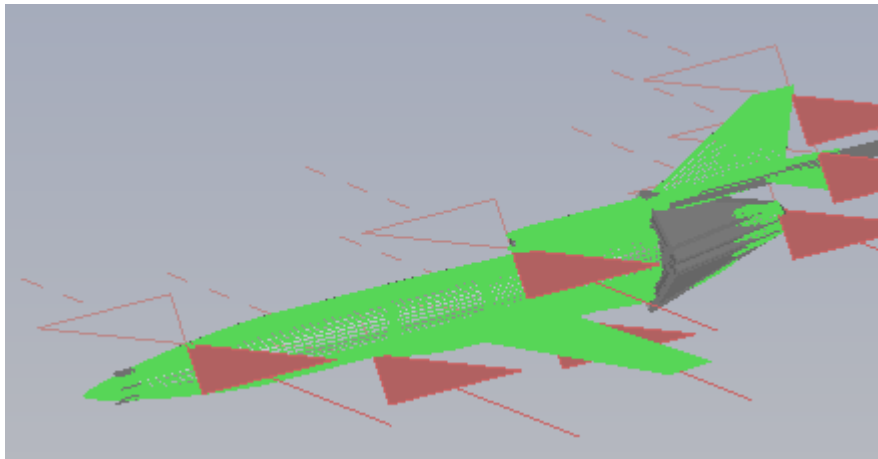
Εικόνα 6.2.5: Οριακές συνθήκες στην ομάδα επιφανειών AERO.



Εικόνα 6.2.6: Οριακές συνθήκες στην είσοδο του αεραγωγού (ENGINE_IN).



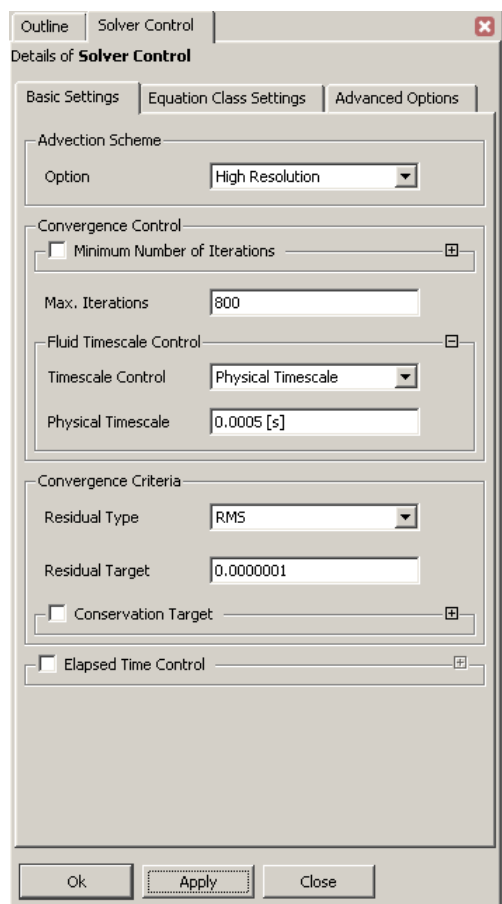
Εικόνα 6.2.7: Οριακές συνθήκες στην έξοδο του ρευστού από το αεροσκάφος (ENGINE_OUT).



Εικόνα 6.2.8: Το αεροσκάφος μετά την ανάθεση των οριακών συνθηκών.

6.3 Παράμετροι του επιλύτη

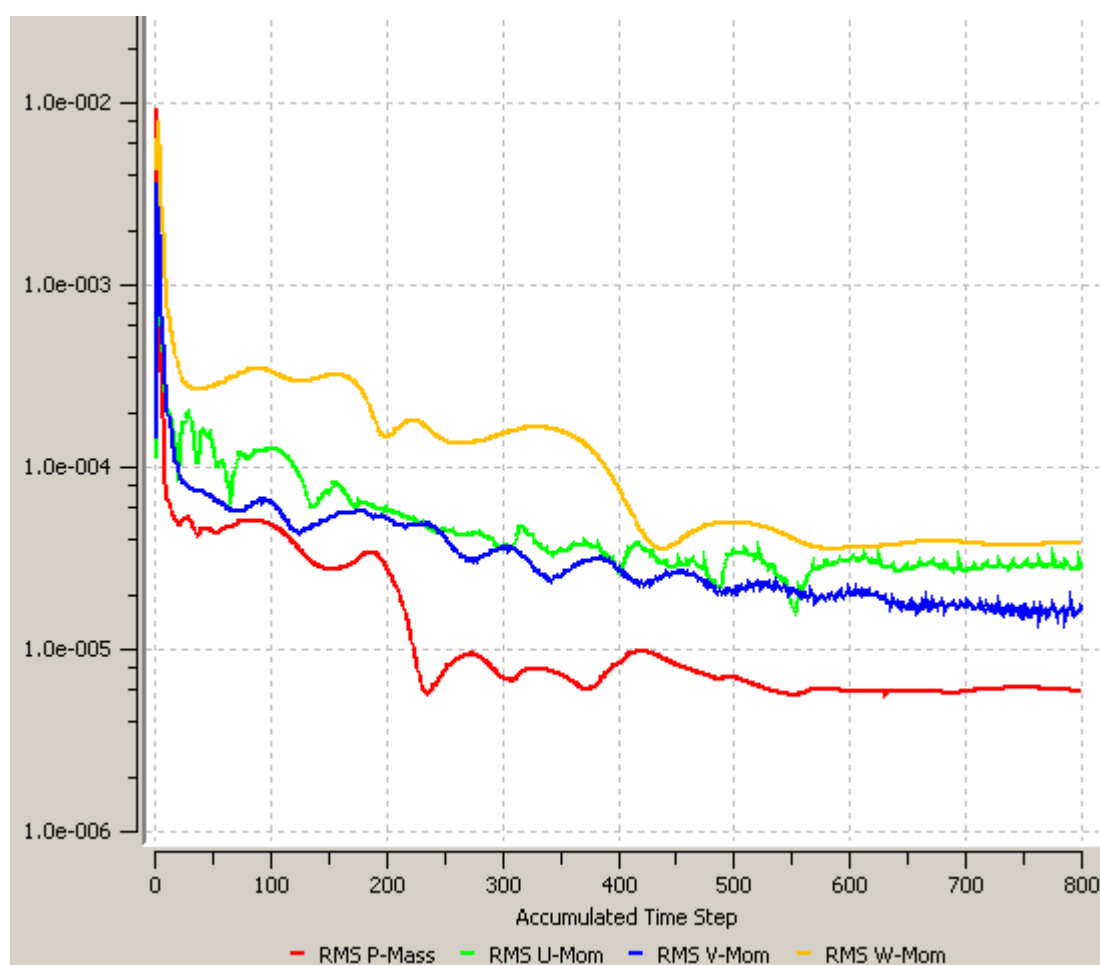
Για τον ορισμό των παραμέτρων της επίλυσης επιλέγουμε σχήμα υψηλής ανάλυσης, φυσική χρονική κλίμακα ίση με 0,0005 sec, αριθμό επαναλήψεων ίσο με 800 και στόχο σύγκλισης το 0,0000001 (Εικόνα 6.3.1).



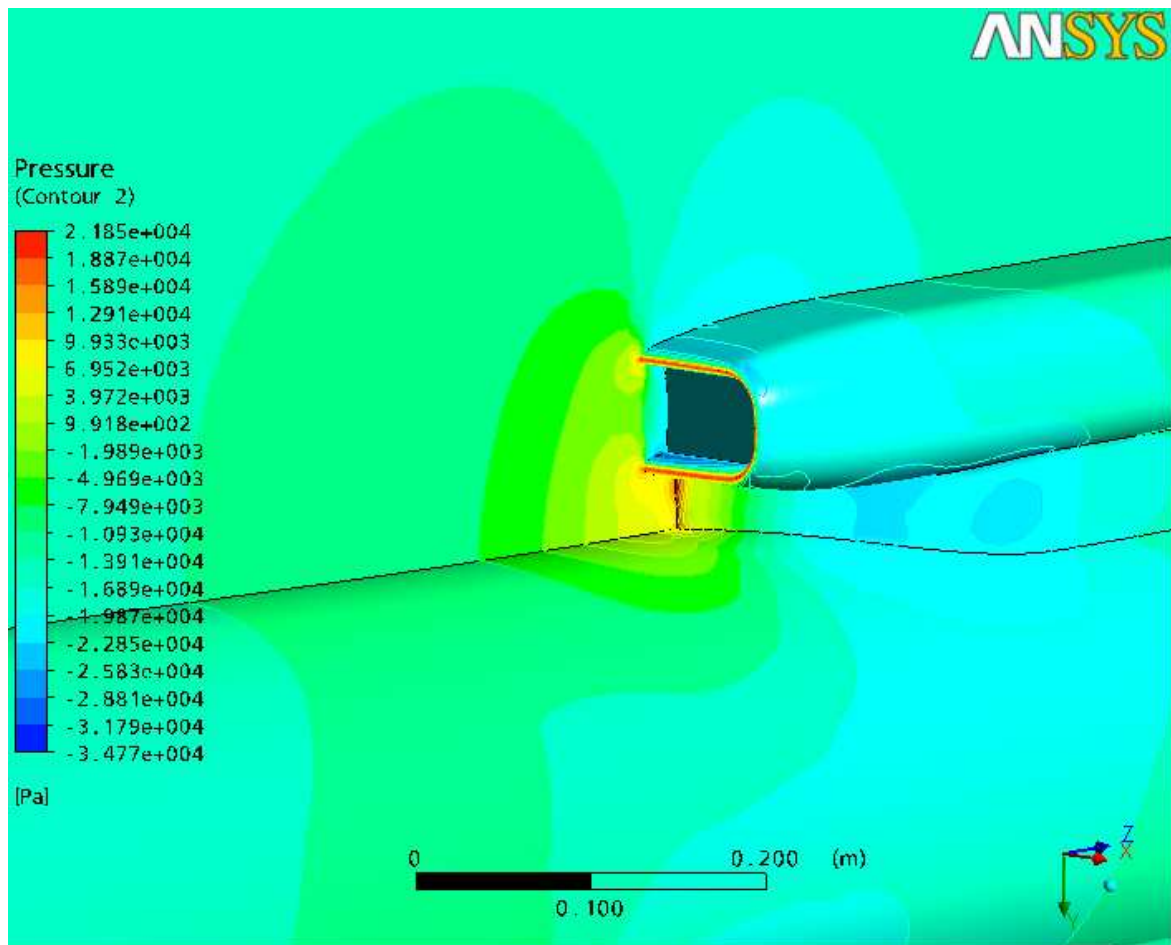
Εικόνα 6.3.1: Ορισμός των παραμέτρων του επιλύτη.

Αφού ορίσουμε τις παραμέτρους στον επιλύτη, το CFX-Pre κλείνει και ανοίγει ο επιλύτης (CFX-Solver) με προεπιλεγμένο αυτό το αρχείο. Επιλέγοντας Start Run αρχίζει η διαδικασία της επίλυσης, όπου μπορούμε να παρακολουθήσουμε αναλυτικά την πορεία των υπολοίπων των προς επίλυση εξισώσεων (ορμή, μάζα, ενέργεια).

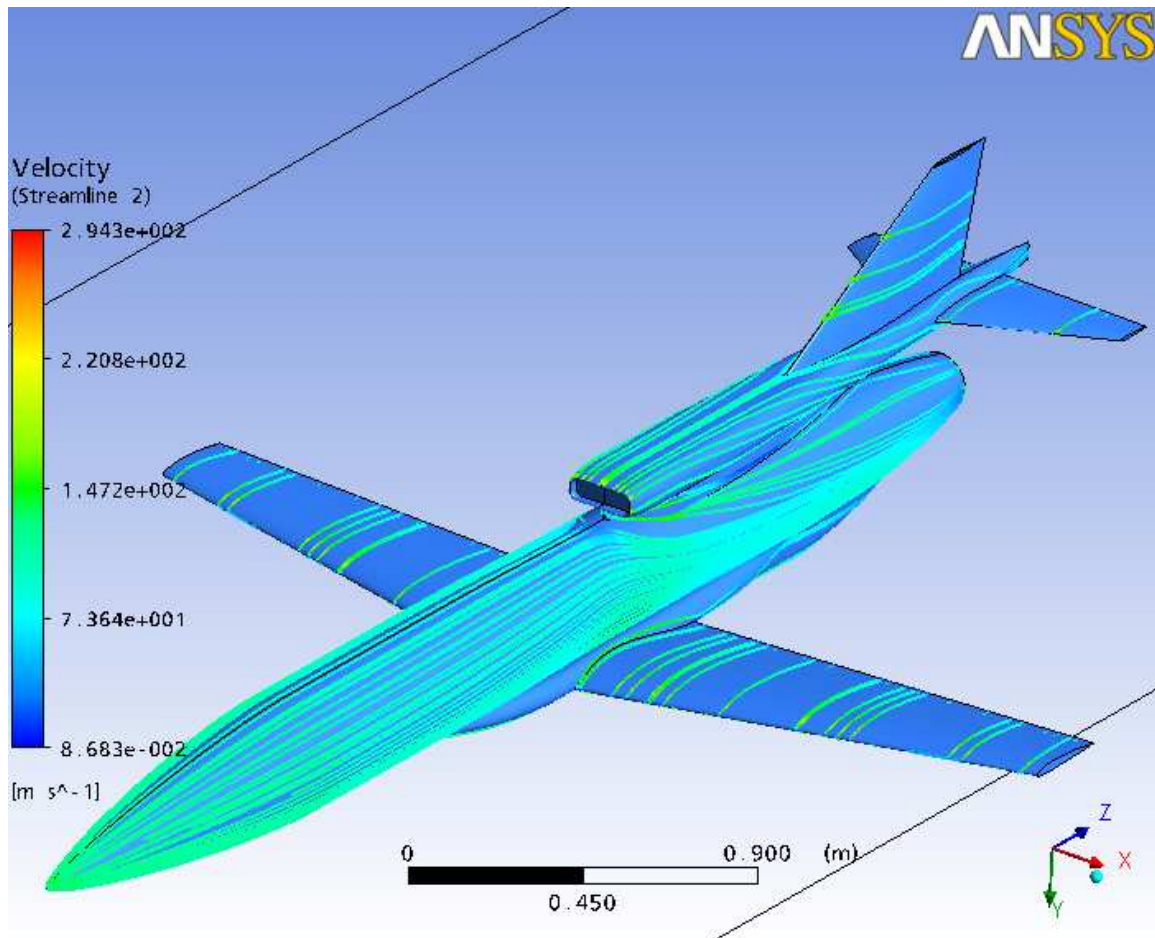
Στην **Εικόνα 6.3.2** δίδεται ένα τυπικό ιστορικό σύγκλισης των εξισώσεων ορμής και συνέχειας για τις 800 επαναλήψεις. Όπως είναι φανερό, μετά από περίπου 600 επαναλήψεις, τα υπόλοιπα των εξισώσεων παύουν να μειώνονται, ενώ αρχίζουν να εμφανίζονται υψίσυχνες ταλαντώσεις των υπολοίπων (ειδικά στην U και V συνιστώσες της ορμής). Αυτό το φαινόμενο είναι ένδειξη ότι υπάρχουν μικρές ταλαντώσεις στη ροή, που δεν επιτρέπουν την παραπέρα μείωση των υπολοίπων των εξισώσεων και τη σύγκλιση σε πλήρως μόνιμη κατάσταση ροής. Η μείωση όμως, σε κάθε περίπτωση, κατά 2,5 τάξεις μεγέθους των υπολοίπων είναι αρκετή για πρακτικές εφαρμογές, όπως η συγκεκριμένη. Τυπικά αποτελέσματα της ροής εμφανίζονται και σχολιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



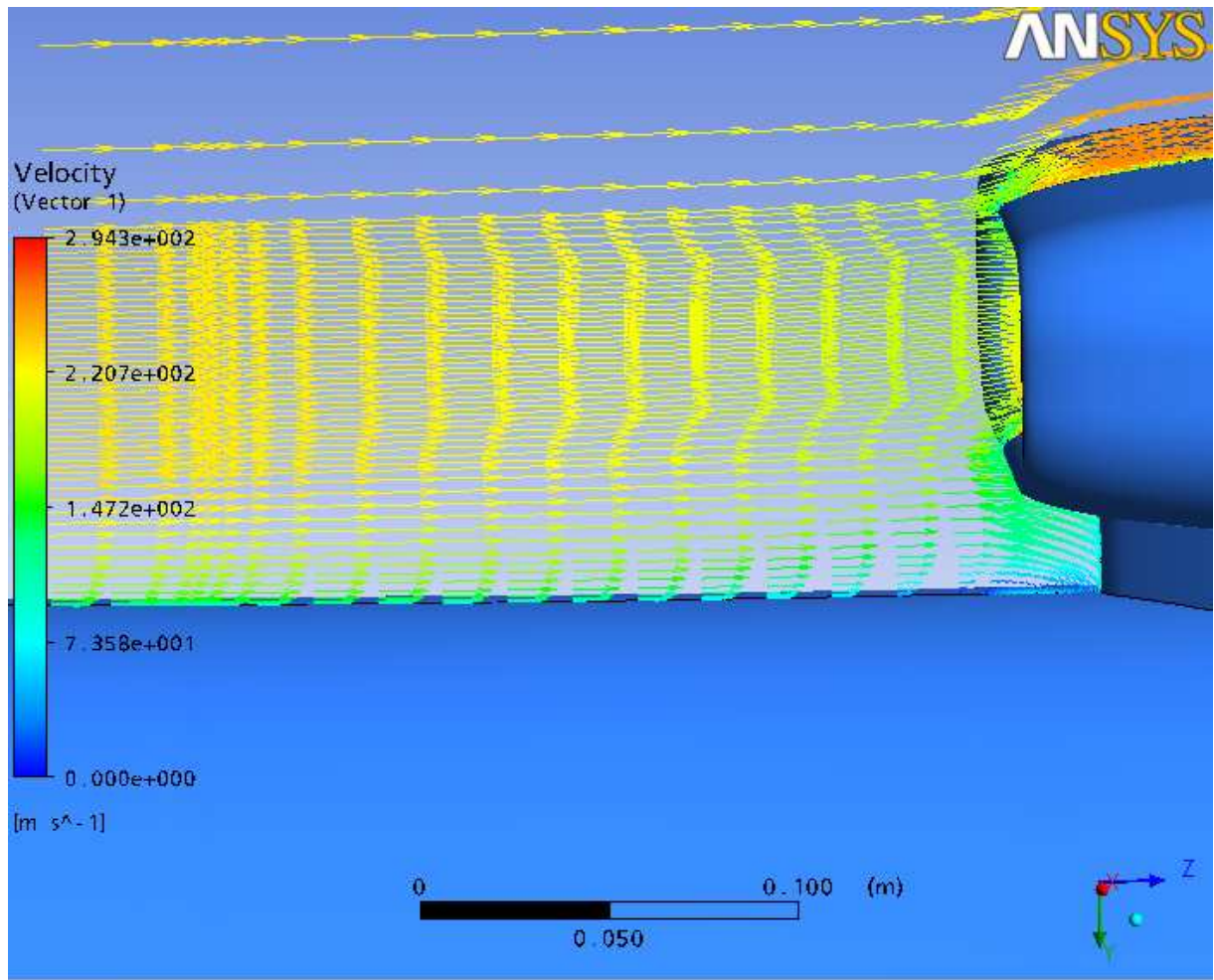
Εικόνα 6.3.2: Τυπικό γράφημα πορείας της σύγκλισης για τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας (κόκκινο χρώμα: μέσο υπόλοιπο εξίσωσης συνέχειας, πράσινο χρώμα: υπόλοιπο εξίσωσης x-ορμής, γαλάζιο χρώμα: υπόλοιπο y-ορμής, πορτοκαλί χρώμα: υπόλοιπο z-ορμής).



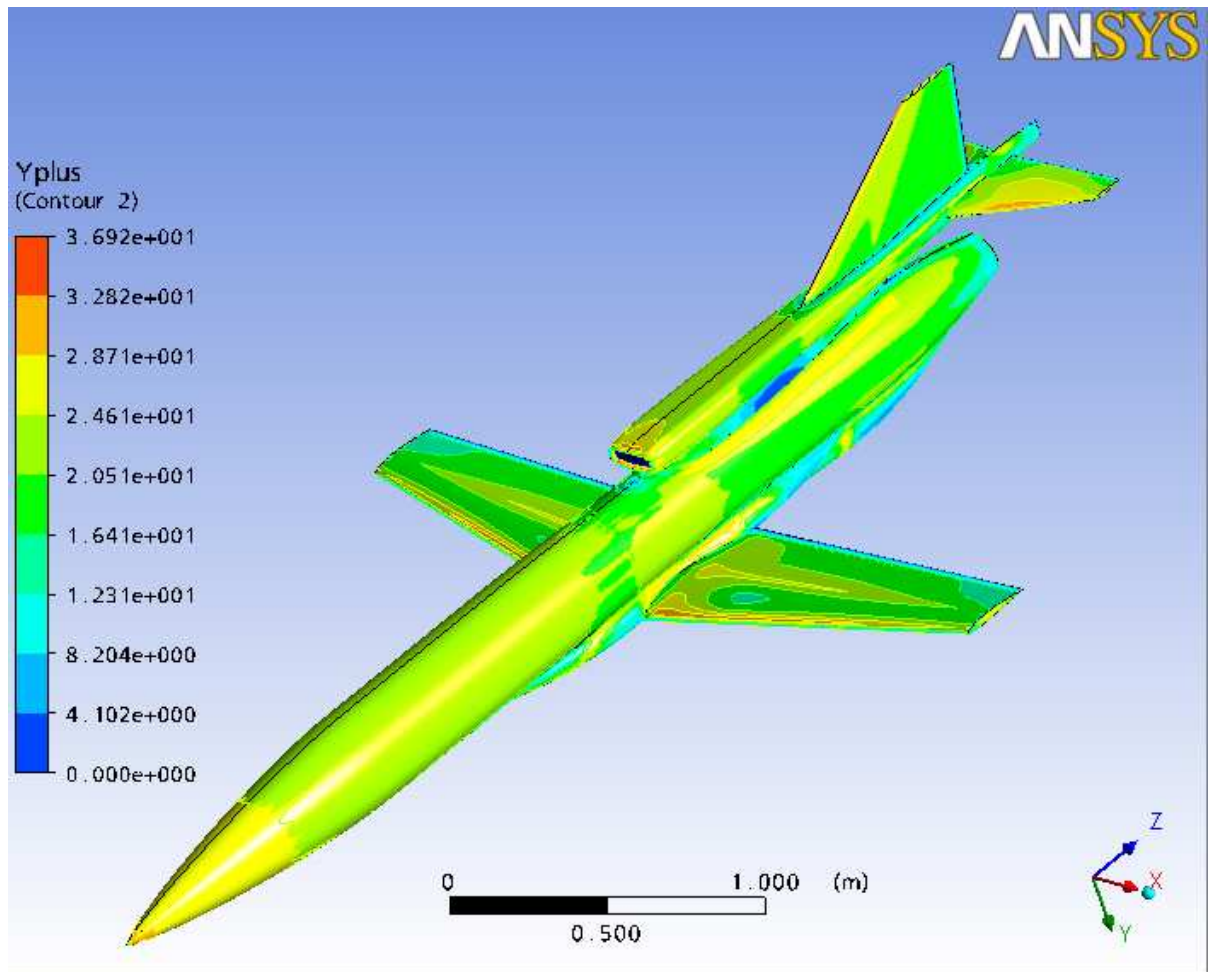
Εικόνα 6.3.3: Ισογραμμές σταθερής στατικής πίεσης στην περιοχή εισόδου στον αεραγωγό του αεροσκάφους. Διακρίνονται τα σημεία ανακοπής στο χείλος με τη μεγάλη τιμή της στατικής πίεσης (κόκκινο χρώμα).



Εικόνα 6.3.4: Γραμμές ροής κοντά στην επιφάνεια του αεροσκάφους. Διακρίνεται, μετά την είσοδο του αεραγωγού, το κατώ ρευμα που δημιουργεί η πτέρυγα, σε συνδυασμό με το boom.



Εικόνα 6.3.5: Διανύσματα ταχύτητας κοντά στην είσοδο στον αεραγωγό, όπου διακρίνεται χαρακτηριστικά το οριακό στρώμα που σχηματίζεται στο τοίχωμα (επίπεδο συμμετρίας). Επίσης διακρίνεται η επιτάχυνση της ροής στην είσοδο του αεραγωγού, αλλά και στο καμπύλο τμήμα πάνω από τον αεραγωγό.



Εικόνα 6.3.6: Ισογραμμές σταθερής τιμής του y^+ . Για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων δεν πρέπει να υπερβαίνει η τιμή του την τιμή 40, κάτι που ισχύει στην συγκεκριμένη περίπτωση, όπως φαίνεται στο σχήμα. Αυτό επιτεύχθηκε με τον πολύ καλό έλεγχο του πλέγματος που επιτρέπει η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε.

7 Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα, που εξήχθησαν από τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Απαιτήθηκε πολύ μεγάλος χρόνος για την εξοικίωση με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία και το λογισμικό ANSYS ICEM CFD, το οποίο οφείλεται τόσο στην πολυπλοκότητα της διαδικασίας καθ' εαυτής, όσο και στη δυσκολία χρήσης του λογισμικού.
- Ακόμα και για τον εξοικωμένο χρήστη, η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας σε πολύπλοκες γεωμετρίες είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα υπόθεση και απαιτεί ημέρες ή και εβδομάδες για την ολοκλήρωση του πλέγματος σε γεωμετρίες αντίστοιχες με αυτή που εξετασθηκε.
- Απαιτούνται συνεχείς διορθώσεις των blocks και συνεχείς δοκιμές στις παραμέτρους του πλέγματος για να προκύψει ικανοποιητικό πλέγμα. Η εμπειρία βοηθάει στη μείωση των δοκιμών, αλλά για την επίτευξη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών συχνά απαιτείται και η παρεμβολή επίλυσης της ροής (π.χ. για τον υπολογισμό του y^+ σε ολόκληρη τη στερεή επιφάνεια και τον έλεγχο της πυκνότητας του πλέγματος κοντά σε αυτή).
- Απαιτούνται μεγάλοι υπολογιστικοί πόροι (μνήμη και ταχύτητα) για τη δημιουργία του πλέγματος. Η χρησιμοποίηση ισχυρού υπολογιστικού συστήματος μειώνει τον χρόνο δημιουργίας του τριδιάστατου πλέγματος και επιτρέπει περισσότερες δοκιμές παραμέτρων.
- Η μέθοδος είναι εύρωστη, ακόμη και για προβληματικές γεωμετρίες CAD, σε αντίθεση με τη δημιουργία μη δομημένου πλέγματος. Αυτό φάνηκε στη συγκεκριμένη γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε, όπου στάθηκε αδύνατη η δημιουργία μη δομημένου πλέγματος, λόγω ατελειών της γεωμετρικής απεικόνισης.
- Η μεθοδολογία επιτρέπει την πολύ καλή ρύθμιση της απόστασης του πρώτου κόμβου από το τοίχωμα (μπορεί να αλλάζει σε διαφορετικές περιοχές της γεωμετρίας κατά βούληση), οπότε επιτυγχάνεται αντίστοιχα πολύ καλός υπολογισμός των συνεκτικών στρωμάτων στα τοιχώματα.
- Η εφαρμογή της συμφέρει μόνο όταν εφαρμόζεται επαναληπτικά σε παρόμοιες γεωμετρίες ή για πολλές διαφορετικές συνθήκες ροής. Διαφορετικά ο χρόνος υλοποίησης είναι ασύμφορος (πολύ μεγαλύτερος από τον υπολογιστικό χρόνο για κάθε επίλυση της ροής).
- Η μελλοντική εργασία, που προτείνεται για τη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής, επικεντρώνεται στην προσπάθεια δημιουργίας μη δομημένου πλέγματος (αφού λυθούν τα προβλήματα της γεωμετρίας) και η σύγκριση τόσο των αποτελεσμάτων της επίλυσης της ροής, όσο και του χρόνου δημιουργίας των πλεγμάτων και του χρόνου της επίλυσης της ροής.

Αναμένονται με ενδιαφέρον τα αποτελέσματα μιας τέτοιας σύγκρισης, που θα ολοκλήρωνε την παρούσα προσπάθεια.

Βιβλιογραφία

[ANSYS Doc] ANSYS CFX 10.0 Documentation.

[ANSYS Icem Doc] ANSYS Icem CFD 10.0 Documentation.

[ANSYS CFX], Release 10.0: Tutorials

Παπαδόπουλος Φώτης, 2007, *Παραμετρική μελέτη με χρήση υπολογιστικών μεθόδων, αεραγωγών τύπου «S» για χρήση σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα*, Διατριβή για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης.

Παπαδόπουλος Φώτης, 2005, *Οδηγίες χρήσης Icem CFD 5.1*.

Χατζηβασίλογλου Ευθυμία, 2008, *Συμβολή στη μελέτη της επίδρασης του ακτινικού διακένου σε αξονικούς συμπιεστές*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης.

Νικόλαος Μαρκάτος, 1995, *Υπολογιστική ρευστοδυναμική*, εκδόσεις Παπασωτηρίου.

Ιστοσελίδες

www.ansys.com

www.cfdreview.com/article.pl?sid=01/04/28/2131215

www.onera.fr