

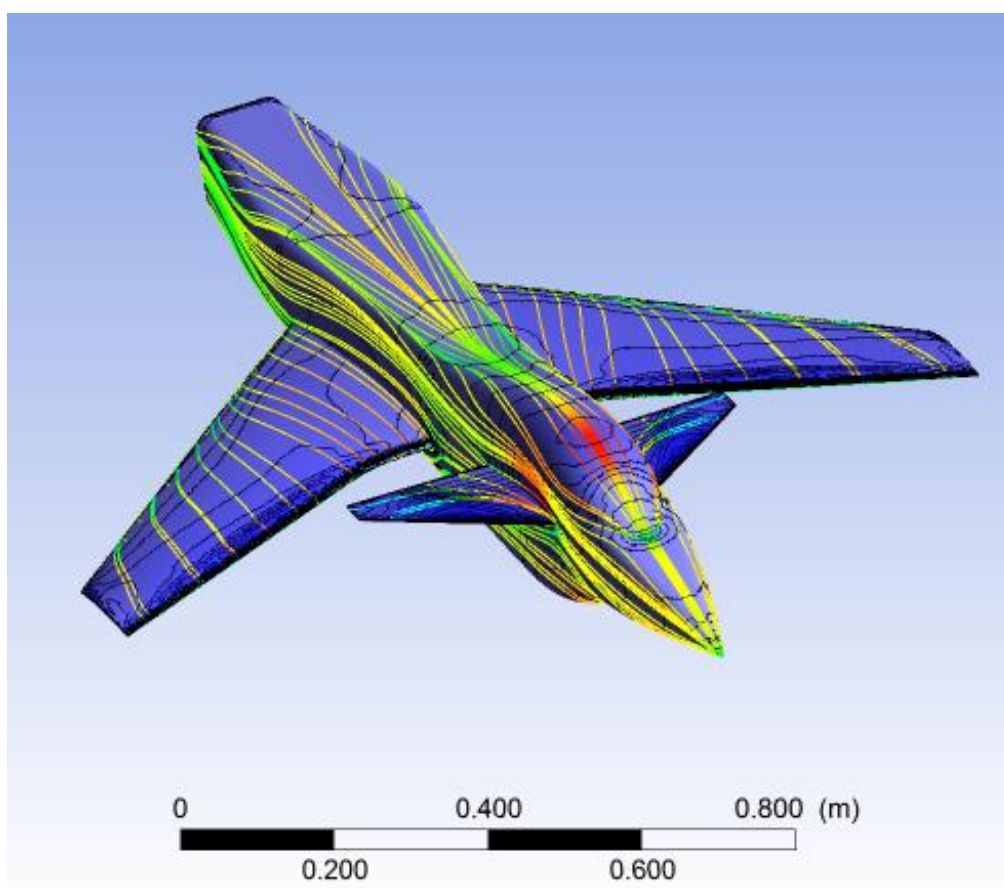


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ GALATEA

ΙΓΓΛΕΖΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

A.M: 2010010038



Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων : Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά, Σεπτέμβριος 2016



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ GALATEA

Διπλωματική Εργασία
του
Ιγγλεζάκη Δημητρίου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Νικολός Ιωάννης

.....

Δελής Ανάργυρος

.....

.....

Χανιά, 2016

(Υπογραφή)

.....

Ιγγλεζάκης Δημήτριος

Στον παπα-Γιώργη Χιωτάκη,

που έχω την ευλογία να

ήταν παππούς μου.

Με την ολοκλήρωση της Διπλωματικής Εργασίας ολοκληρώνονται οι προπτυχιακές σπουδές μου στη Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Με την ευκαιρία αυτή, αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικολό Ιωάννη για την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας, την καθοδήγηση του, την εξαιρετική και άψογη συνεργασία που είχαμε, καθώς επίσης και για την ευκαιρία που μου παρείχε να γνωρίσω και να εργαστώ έστω και σε πρωταρχικό στάδιο πάνω στον επιστημονικό τομέα της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής. Στην ολοκλήρωση της εργασίας τεράστια και πολύτιμη ήταν επίσης η συνεισφορά του Δρ. Λυγιδάκη Γεωργίου, όπου με πολύ προσωπική δουρεία, υπομονή και με χρήσιμες και καίριες πάντα συμβουλές και πληροφορίες με βοήθησε καθοριστικά στο έργο μου.

Τέλος, πιστεύω ότι οφείλω τουλάχιστον ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, τους φίλους και τους συναδέλφους μου, εντός και εκτός της Πολυτεχνειακής Κοινότητας, όπου ο κάθε ένας με τον δικό του τρόπο με βοήθησε και με στήριξε ώστε να επιτύχω τον στόχο μου και ήταν πάντα παρών όποτε χρειαζόταν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	7
Περιεχόμενα	8
Πίνακας Συντομογραφιών	10
Πίνακας Ορισμών.....	11
Πίνακας Εικόνων	12
Εισαγωγή.....	16
Μέρος 1ο : Σχεδιασμός Μοντέλου Με Χρήση Ηλεκτρονικού Υπολογιστή	18
Ιστορική Ανασκόπηση	18
Catia - Dassault Systemes.....	19
Γενικά.....	19
Βασικά χαρακτηριστικά περιβάλλοντος εργασίας του CATIA V5.....	19
Σχεδιασμός Μοντέλου	22
Περιγραφή Μοντέλου και Διαμορφώσεων προς Σχεδίαση	22
Σχεδιασμός Πτέρυγας (Wing).....	22
➤ Συγκέντρωση Δεδομένων	22
➤ Επεξεργασία Δεδομένων.....	23
➤ Προετοιμασία Περιβάλλοντος Εργασίας στο CATIA	24
➤ Εισαγωγή Δεδομένων στο CATIA	26
➤ Διαμόρφωση Τελικής Μορφής στην Πτέρυγα	29
Σχεδιασμός Πτερυγίου Canard.....	39
➤ Συγκέντρωση Δεδομένων	39
➤ Επεξεργασία Δεδομένων.....	39
➤ Προετοιμασία Περιβάλλοντος Εργασίας και Εισαγωγή Δεδομένων στο CATIA.....	41
➤ Διαμόρφωση Τελικής Μορφής στο Βοηθητικό Πτερύγιο.....	41
Σχεδιασμός Ατράκτου (Fuselage)	46
➤ Συγκέντρωση Δεδομένων	46
➤ Επεξεργασία Δεδομένων.....	46
➤ Προετοιμασία Περιβάλλοντος Εργασίας και Εισαγωγή Δεδομένων στο CATIA.....	46
➤ Διαμόρφωση Τελικής Μορφής Ατράκτου	47
❖ Δημιουργία Μη Διογκωμένης Ατράκτου (Parallel)	47

❖ Δημιουργία Διογκωμένης Ατράκτου (Expanding)	66
Σύνδεση Τμημάτων Μοντέλου (Fuselage-Wing-Canard).....	67
➤ Γεωμετρίες Μοντέλου M151/1	67
Όγκος Ρευστού γύρω από το Μοντέλο	73
Μέρος 2ο : Υπολογιστική Ρευστομηχανική	77
Εισαγωγή	77
Υπολογιστική Ρευστομηχανική	77
Γενικά.....	77
Περιγραφή Αρχής Λειτουργίας CFD Κώδικα	79
Στοιχεία Μιας Μεθόδου Αριθμητικής Επίλυσης	81
Μέθοδοι Προσομοίωσης Τυρβώδους Ροής.....	89
Γενική Περιγραφή Κώδικα Galatea	90
ANSYS - ANSYS CFX.....	94
Γενικά.....	94
Βασικά Χαρακτηριστικά Περιβάλλοντος Εργασίας - Workbench.....	96
Geometry Generation Software - Design Modeler	99
Mesh Generation Software - Meshing	110
ANSYS CFX-Pre	122
ANSYS CFX-Solver Manager	128
ANSYS CFD-Post	130
Galatea	136
Δεδομένα οριακών συνθηκών Galatea	136
Αποτελέσματα	137
Σύγκριση Γραφημάτων Cp-X	137
Συντελεστής Άνωσης – Συντελεστής Οπισθέλκουσας.....	149
Contours.....	151
Συμπεράσματα.....	171
Βιβλιογραφία	173
Παράρτημα Α : Πίνακες Δεδομένων Σχεδίασης	174
Παράρτημα Β: Πίνακες Ορισμού Πλεγμάτων.....	179
Παράρτημα Γ : Αποτελέσματα.....	185

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

a	Γωνία εισόδου ροής	L.E.	Leading Edge
aT	Wing twist angle	LES	Large Eddy Simulation
A _w	Reference Area	MAC	Mean Aerodynamic Chord
b	Wing span	MIT	Massachusetts Institute of Technology
c	chord	MPI	Message Passing Interface
\bar{c}	Reference wing chord	MUSCL	Monotonic Upwind Scheme for Conservation Laws
c ₀	Root chord	NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
c _T	Tip chord	P0	Πίεση εισόδου ροής
AGARD	Advisory Group for Aerospace Research and Development	PTC	Parametric Technology Corporation
AR	Aspect Ratio	RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
ARA	Aircraft Research Association	S	Wing area
CAD	Computer Aided Design	SMC	Standard Mean Chord
CAE	Computer Aided Engineering	SST	Shear Stress Transport
CAM	Computer Aided Manufacturing	T.E.	Trailing Edge
CATIA	Computer Aided Tree Dimensional Interactive Application	U0	Ταχύτητα εισόδου ροής
CFD	Computational Fluid Dynamics	x0	Αδιάστατη μεταβλητή x
C _L	Lift Coefficient	Λ	Sweep of $c/4$ line
C _D	Drag Coefficient	λ	Taper ratio
C _p	Pressure Coefficient		
d0	Πυκνότητα εισόδου ροής		
DAC-I	Design Augmented by Computer		
DM	Design Modeler Software		
DNS	Direct Numerical Simulation		
FAS	Full Approximation Scheme		
FMG	Full Multigrid		
FVM	Finite Volume Method		
IBM	International Business Machines Corporation		

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΙΣΜΩΝ

C_p	$= \frac{P - P_0}{0.5 * d_0 * U_0^2}$
x_0	$= \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$
MAC	$= \frac{2}{s} \int_0^{\frac{b}{2}} c^2 dy$
SMC	$= \frac{s}{b}$
AR	$= \frac{b^2}{s} = \frac{b}{c}$
λ	$= \frac{c_T}{c_0}$
C_L	$= \frac{Lift}{0.5 * d_0 * U_0^2 * A_w}$
C_D	$= \frac{Drag}{0.5 * d_0 * U_0^2 * A_w}$

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-11: Κεντρικό παράθυρο CATIA.
Εικόνα 1-2: Start Menu.
Εικόνα W1: Layout of the M151 forward swept wing model (Stanniland, 1985).
Εικόνα W2: Επεξεργασία δεδομένων Πίνακα A2 στο Microsoft Excel.
Εικόνα W3: Ενεργό περιβάλλον Generative Shape Design.
Εικόνα W4: Παράθυρο διαλόγου Product.
Εικόνα W5: Θέση πρότυπου αρχείου "GSD_PointSplineLoftFromExcel".
Εικόνα W6: Διαμόρφωση Αρχείου "GSD_PointSplineLoftFromExcel".
Εικόνα W7: Παράθυρο Μακροεντολών.
Εικόνα W8: Εισαγωγή σημείων και γραμμής στο περιβάλλον εργασίας του CATIA.
Εικόνα W9: "Τακτοποίηση" δέντρου εντολών.
Εικόνα W10: Μέτρηση απόστασης μεταξύ L.E και T.E πτέρυγας για $Y=0\text{ mm}$ (Measure Between).
Εικόνα W11: Ένωση άνω και κάτω γραμμής Section1 στο σημείο $O(0,0,0)$ (Join).
Εικόνα W12: Εντολή Scaling στο Section 1.
Εικόνα W13: Παράθυρο διαλόγου εντολής Line.
Εικόνα W14: Εντολή Line.
Εικόνα W15: Εντολή Rotate στο Section1.
Εικόνα W16: Εντολή Translate στο Section 1.
Εικόνα W17: Εισαγωγή Επιπέδου ZX για $Y=214,29$ με την εντολή Plane.
Εικόνα W18: Εντολή Intersection.
Εικόνα W19: Τελικό αποτέλεσμα διαμόρφωσης Section 1,2,3.
Εικόνα W20: Δημιουργία κλειστής καμπύλης σε κάθε Section
Εικόνα W21: Δημιουργία T.E γραμμών
Εικόνα W22: Δημιουργία όγκου πτέρυγας με την εντολή Multi-Sections Volume
Εικόνα W23: Τελική μορφή πτέρυγας
Εικόνα C1: Κάτοψη Canard
Εικόνα C2: Mean Aerodynamic Chord του περυγίου Canard
Εικόνα C3: Εισαγωγή δεδομένων Πίνακα A3 στο CATIA
Εικόνα C4: Εντολή Scaling στο Root Section του Canard
Εικόνα C5: Παράθυρο διαλόγου εντολή Point
Εικόνα C6: Παράθυρο διαλόγου εντολή Translate
Εικόνα C7: Βασικό σχέδιο Canard
Εικόνα C8: Ολοκληρωμένο σχέδιο Canard
Εικόνα C9: Τελική μορφή Canard
Εικόνα F1: Καμπύλες σχεδιασμού Ατράκτου (τελική θέση)
Εικόνα F2: Μεταφορά βασικών γραμμών
Εικόνα F3: Σχεδιασμός Fuselage Section στο επίπεδο για $X=450\text{mm}$
Εικόνα F4: Αντίστοιχα Sketch με το Fuselage Sketch για $X=450\text{mm}$
Εικόνα F5: Παράθυρο διαλόγου εντολής Multi-Sections Volume
Εικόνα F6: Εφαρμογή εντολή Multi-Sections Volume στα Section για $X=450\text{mm}$ και $X=390\text{mm}$
Εικόνα F2: Δημιουργία τμημάτων όγκου στο βασικό τμήμα Fuselage για $X=0-450\text{mm}$
Εικόνα F8: Χρήση εντολής Volume Sweep
Εικόνα F9: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Fuselage για $X=0-450\text{mm}$
Εικόνα F10: Σχεδιασμός Canopy Section στο επίπεδο για $X=450\text{mm}$
Εικόνα F11: Αντίστοιχα Sketch με το Canopy Sketch για $X=450\text{mm}$
Εικόνα F12: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Canopy για $X=237.5-450\text{mm}$
Εικόνα F13: Σχεδιασμός Fuselage-Canopy Section στο επίπεδο για $X=500\text{mm}$
Εικόνα F14: Αντίστοιχα Sketch με το Fuselage-Canopy Sketch για $X=500\text{mm}$
Εικόνα F15: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Fuselage-Canopy για $X=450-500\text{mm}$

Εικόνα F16: Σχεδιασμός Intake Section στο επίπεδο για $X=500\text{mm}$
Εικόνα F17: Αντίστοιχα Sketch με το Intake Sketch για $X=500\text{mm}$
Εικόνα F18: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Intake για $X=267.7\text{-}500\text{mm}$
Εικόνα F19: Σχεδιασμός Fuselage-Canopy-Intake Section στο επίπεδο για $X=500\text{mm}$
Εικόνα F20: Αντίστοιχα Sketch με το Fuselage-Canopy-Intake Sketch για $X=500\text{mm}$
Εικόνα F21: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Fuselage-Canopy-Intake για $X=500\text{-}550\text{mm}$
Εικόνα F22: Σχεδιασμός Fuselage-Canopy-Intake Section στο επίπεδο για $X=550\text{mm}$
Εικόνα F23: Αντίστοιχα Sketch με το Fuselage-Canopy-Intake Sketch για $X=550\text{mm}$
Εικόνα F24: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Fuselage-Canopy-Intake για $X=550\text{-}900\text{mm}$
Εικόνα F25: Σχεδιασμός Fuselage-Intake Section στο επίπεδο για $X=900\text{mm}$
Εικόνα F26: Αντίστοιχα Sketch με το Fuselage-Intake Sketch για $X=900\text{mm}$
Εικόνα F27: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Fuselage-Intake για $X=900\text{-}1700\text{mm}$
Εικόνα F28: Ένωση βασικών τμημάτων Ατράκτου (Parallel)
Εικόνα F29: Χρήση της εντολής Split από την γραμμή εργαλειών Operations
Εικόνα F30: Σημεία σύνδεσης Ατράκτου με Πτέρυγα και πτερύγιο Canard
Εικόνα F31: Ένωση βασικών τμημάτων Ατράκτου (Expanding)
Εικόνα A1: Εισαγωγή Ατράκτου και Πτέρυγας στο Assembly Design
Εικόνα A2: Τελική θέση Πτέρυγας πάνω στην Άτρακτο
Εικόνα A3: Τελική θέση πτερυγίου Canard
Εικόνα A4: Παράθυρο διαλόγου εντολής Angle Constraint
Εικόνα A5: Ορίσματα εντολής Angle Constraint
Εικόνα A6: Περιστροφή πτερυγίου Canard
Εικόνα A7: Διογκωμένη Άτρακτος με Canard σε γωνία 0° (Expanding-off)
Εικόνα A8: Μη Διογκωμένη Άτρακτος με Canard σε γωνία 0° (Parallel-off)
Εικόνα A9: Ενιαίος όγκος γεωμετρίας (Airplane)
Εικόνα A10: Σχέδιο ορθογωνίου πάνω στο επίπεδο ZX
Εικόνα A11: Όγκος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου
Εικόνα A12: Εντολή Remove από την γραμμή εργαλειών Volumes
Εικόνα A13: Όγκος ρευστού γύρω από το Μοντέλο M151/1
Εικόνα 2-1 : Κεντροκομβική και Κεντροκυβελική Μέθοδος (Αδαμούδης, 2005)
Εικόνα 2-2: Μη δομημένο πλέγμα γύρω από αεροτομή NACA 0012 στις δύο διαστάσεις (Λυγιδάκης, 2009).
Εικόνα 2-3: Body-fitted (a) και Cartesian grid (b) κοντά σε στερεό τοίχωμα (Blazek, 2001)
Εικόνα 2-4: Δομημένο, body-fitted υπολογιστικό πλέγμα σε 2 διαστάσεις: (a) ο φυσικός χώρος, (b) ο υπολογιστικός χώρος.
Εικόνα 2-5: Μη δομημένο υβριδικό πλέγμα σε 2 διαστάσεις (Blazek, 2001)
Εικόνα 2-6: Διάγραμμα ροής δεδομένων προς ανάλυση στο ANSYS CFX
Εικόνα 2-7: Βασικό παράθυρο εργασίας Workbench (ANSYS, ANSYS CFX Introduction, 2013)
Εικόνα 2-8 :Η ομάδα εργαλείων του συστήματος Fluid Flow (CFX), όπως εμφανίζεται στο Project Schematic (ANSYS, ANSYS CFX Introduction, 2013)
Εικόνα 2-9: Λίστα διαθέσιμων ενεργειών του κελιού Geometry
Εικόνα 2-DM1: Κεντρικό Παράθυρο Λογισμικού Design Modeler
Εικόνα 2-DM2: Καρτέλες επιλογής κατάστασης λειτουργίας (ANSYS, ANSYS Meshing User's Guide, 2013)
Εικόνα 2-DM3: Όγκος ρευστού γύρω από την γεωμετρία Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία -3° που έχει εισαχθεί από το Αρχείο STP
Εικόνα 2-DM4: Σχεδιασμός ορθογωνίου παραλληλογράμμου με την χρήση της εντολής Rectangle του Draw Toolbox
Εικόνα 2-DM5: Ορισμός διαστάσεων ορθογωνίου (Όγκος $1^{\text{ος}}$) μέσω των εντολών Horizontal και Vertical από το Dimensions Toolbox

Εικόνα 2-DM6: Ορίσματα εντολής Extrude (Όγκος 1^{ος})

Εικόνα 2-DM7: Ορισμός διαστάσεων τραπεζίου (Όγκος 2ος) μέσω των εντολών Horizontal και Vertical από το Dimensions Toolbox

Εικόνα 2-DM8: Ορίσματα εντολής Extrude (Όγκος 2^{ος})

Εικόνα 2-DM9: 1^{ος} και 2^{ος} Όγκος

Εικόνα 2-DM10: Επιφάνειες που σχηματίζουν την γεωμετρία του μοντέλου M151/1

Εικόνα 2-DM11: Δείγμα μικρών επιφανειών πάνω σε τμήμα του μοντέλου

Εικόνα 2-DM12: Δείγμα αποτελέσματος συγχώνευσης γειτονικών επιφανειών σε τμήμα του μοντέλου

Εικόνα 2-DM13: Επιφάνειες Inlet

Εικόνα 2-DM14: Επιφάνειες Outlet

Εικόνα 2-DM15: Επιφάνεια Sym (Symmetry)

Εικόνα 2-DM16: Επιφάνεια Wall

Εικόνα 2-DM17: Επιφάνειες Airplane

Εικόνα 2-DM18: Επιφάνειες Canard

Εικόνα 2-DM19: Επιφάνειες Wing

Εικόνα 2-DM20: Επιφάνειες Fuselage

Εικόνα 2-M1: Defaults και Sizing Group παράμετροι στο Detail of "Mesh"

Εικόνα 2-M2: Inflation Group παράμετροι στο Detail of "Mesh"

Εικόνα 2-M3: Advanced, Defeaturing και Statistics Group παράμετροι στο Detail of "Mesh"

Εικόνα 2-M4: Εφαρμογή Body Sizing

Εικόνα 2-M5: Εφαρμογή Body Sizing2

Εικόνα 2-M6: Εφαρμογή Face Sizing

Εικόνα 2-M7: Εφαρμογή Face Sizing 2

Εικόνα 2-M8: Εφαρμογή Edge Sizing

Εικόνα 2-M9: Πλέγμα με εμφανές διαφορά πυκνότητας λόγω εφαρμογής των Body Sizing

Εικόνα 2-M10: Δημιουργία Inflation στα όρια της γεωμετρίας

Εικόνα 2-M11: Δημιουργία Inflation στα όρια της γεωμετρίας σε τομή στο ύψος του Canard

Εικόνα 2-G1: The New Case Dialog Box

Εικόνα 2-G2: Κύρια τμήματα παράθυρου εργασίας του λογισμικού ANSYS CFX-Pre (ANSYS, ANSYS CFX-Pre User's Guide, 2013)

Εικόνα 2-G3: Simulation Definition in Quick Setup Mode

Εικόνα 2-G4: Physics Definition in Quick Setup Mode

Εικόνα 2-G5: Boundary Definition in Quick Setup Mode (Airplane Boundary)

Εικόνα 2-G6: Inlet and Outlet Boundaries Definition

Εικόνα 2-G7: Sym and Wall Boundaries Definition

Εικόνα 2-G8: Final Operations in Quick Setup Mode

Εικόνα 2-G9: Λεπτομέρειες του Solver Control in Flow Analysis -Basic Settings

Εικόνα 2-G10: Λεπτομέρειες του Expert Parameters in Flow Analysis –Convergence Control

Εικόνα 2-S1: CFX-Solver Manager Interface

Εικόνα 2-S2: Αρχικό παράθυρο διαλόγου "Define Run"

Εικόνα 2-P1: Παράδειγμα του CFD-Post Interface (ANSYS, ANSYS CFD-Post User's Guide, 2013)

Εικόνα 2-P2: Details of Plane γ500

Εικόνα 2-P3: Details of Polyline 1

Εικόνα 2-P4: Details of Point 1 (Minimum x)

Εικόνα 2-P5: Details of Point 2 (Maximum x)

Εικόνα 2-P6: Σημεία Point 1 (Xmin), Point 2 (Xmax) και Polyline 1

Εικόνα 2-P7: Details of Plane Inlet (P0)

Εικόνα 2-P8: Details of Plane Inlet (U0)

Εικόνα 2-P9: Details of Plane Inlet (d0)

Εικόνα 2-P10: Τύποι που εισήχθησαν στην καρτέλα Expressions

Εικόνα 3-1: Τομές στο μοντέλο όπου υπολογίστηκε ο Συντελεστής Πίεσης C_p

Εικόνα 3-2: Σημεία απόκλισης κατά μήκος των τομών

Εικόνα 3-3: Mach Number Contours στο επίπεδο συμμετρίας (πάνω: Ansys, κάτω: Galatea)

Εικόνα 3-4: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο συμμετρίας

Εικόνα 3-5: Dimensionless Velocity Contours στο επίπεδο συμμετρίας

Εικόνα 3-6: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.15m$ για το Canard

Εικόνα 3-7: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο $Y=0.15m$ για το Canard

Εικόνα 3-8: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο $Y=0.15m$ για την Πτέρυγα

Εικόνα 3-9: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.5m$ για την Πτέρυγα

Εικόνα 3-10: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.25m$ για το Canard

Εικόνα 3-11: Dimensionless Pressure Contours πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου

Εικόνα 3-12: Dimensionless Pressure Contours πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου

Εικόνα 3-13: Mach Number Contours στο επίπεδο συμμετρίας (πάνω: Ansys, κάτω: Galatea)

Εικόνα 3-14: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο συμμετρίας

Εικόνα 3-15: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.15m$

Εικόνα 3-16: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.25m$ για το Canard

Εικόνα 3-17: Dimensionless Pressure Contours πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου

Εικόνα 3-18: Mach Number Contours στο επίπεδο συμμετρίας

Εικόνα 3-19: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο $Y=0.15m$

Εικόνα 3-20: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο $Y=0.5m$ για την Πτέρυγα

Εικόνα 3-21: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.25m$ για το Canard

Εικόνα 3-22: Dimensionless Pressure Contours πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βασικός στόχος της εργασίας είναι να πραγματοποιήσει αξιολόγηση και πιστοποίηση του εργαστηριακού κώδικα υπολογιστικής Ρευστομηχανικής Galatea. Ο τρόπος αξιολόγησης και πιστοποίησης περιλαμβάνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξάγει ο κώδικας Galatea με τα αποτελέσματα από τον εμπορικό κώδικα CFD, ANSYS CFX, για πληθώρα πλεγμάτων σε τρεις διαφορετικές γεωμετρίες του μοντέλου M151/1. Το M151/1 είναι ένα μοντέλο πειραματικού αεροσκάφους εμπροσθοκλινούς πτέρυγας με πτερύγια Canard. Στην εργασία περιλαμβάνεται η περιγραφή ολόκληρης της διαδικασίας αξιολόγησης και πιστοποίησης, ξεκινώντας από το στάδιο του σχεδιασμού του μοντέλου M151/1, συνεχίζοντας στην διαμόρφωση και δημιουργία πλέγματος στον όγκο που το περιβάλλει, έπειτα στην εφαρμογή επίλυσης των προσομοιώσεων και ολοκληρώνοντας με την σύγκριση αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων από την επεξεργασία αυτών. Πιο συγκεκριμένα, η δομή της εργασίας διαιρείται σε τρία βασικά μέρη, που περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω.

Αρχικά, στο πρώτο μέρος πραγματοποιείται ο σχεδιασμός τριών γεωμετριών του μοντέλου M151/1, βασιζόμενος στην Test Case E8 της AGARD-AR-303-Vol 2, με την χρήση του εμπορικού λογισμικού CAD CATIA της Dassault Systemes. Αυτό το τμήμα της εργασίας ξεκινάει με γενική παρουσίαση του CATIA και του τρόπου χρήσης του και στην συνέχεια πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή σχεδιασμού των γεωμετριών του μοντέλου M151/1, χωρίζοντας το σε τρία βασικά τμήματα, την πτέρυγα (Wing), το πτερύγιο Canard και την άτρακτο (Fuselage). Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού των τριών βασικών τμημάτων του μοντέλου, περιγράφεται η διαδικασία σύνθεσης των γεωμετριών αλλά και η δημιουργία του όγκου που τις περιβάλλει, πάνω στον οποίο επικεντρώνεται η εργασία.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας εστιάζει στον τομέα της υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD). Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται μερικές γενικές πληροφορίες, αναλύονται κάποιοι βασικοί ορισμοί για τον τομέα του CFD και περιγράφεται ο εργαστηριακός κώδικας Galatea με τις βασικές αρχές λειτουργίας του. Έπειτα, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος χρήσης του λογισμικού ANSYS σε όλα τα στάδια επίλυσης προβλημάτων Ρευστομηχανικής. Στην αναλυτική περιγραφή λειτουργίας του λογισμικού ANSYS περιλαμβάνεται και εκτενής περιγραφή των επιμέρους λογισμικών Design Modeler, ANSYS Meshing, CFX-Pre, Solver Manager και CFD-Post που εμπεριέχει.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος της παρούσας εργασίας οπτικοποιούνται και αναλύονται τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος Ρευστομηχανικής από τους κώδικες ANSYS CFX και Galatea για κάθε πλέγμα κάθε γεωμετρίας του μοντέλου M151/1. Η αξιολόγηση και πιστοποίηση του κώδικα Galatea επιτυγχάνεται με κατάλληλη επεξεργασία και σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο κώδικων και την εξαγωγή συμπερασμάτων, όσον αφορά στην ακρίβεια αυτών.

Τέλος, σημειώνεται ότι για την επίτευξη βέλτιστης δυνατής περιγραφής των παραπάνω λογισμικών, στη ροή της εργασίας χρησιμοποιήθηκε μεγάλος αριθμός εικόνων. Οι εικόνες συνοψίζονται στον πίνακα εικόνων, ενώ περιλαμβάνονται επίσης και αναλυτικά

παραρτήματα με πίνακες δεδομένων σχεδίασης του μοντέλου, ορισμάτων και αποτελεσμάτων των εκάστοτε πλεγμάτων.

ΜΕΡΟΣ 1Ο : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τον σπόρο για την ανάπτυξη του σύγχρονου λογισμικού CAD φύτεψε ο Ευκλείδης ο Αλεξανδρεύς περίπου το 350 π.Χ. με το έργο του «Το Στοιχείο», όπου αναπτύσσονται τα θεωρήματα και αξιώματα της γνωστής σήμερα σε ολόκληρο τον κόσμο Ευκλείδειου Γεωμετρίας. Στην συνέχεια καλλιεργήθηκε μέσω της γραφικής επικοινωνίας που αναπτύχθηκε από τους Έλληνες, τους Αρχαίους Αιγύπτιους και Ρωμαίους. Για να φτάσει η εποχή του Leonardo da Vinci (1452-1519) με την δημιουργία, από τον ίδιο, σχεδίων, μηχανών, μηχανισμών αλλά και ρομπότ (Codex Atlanticus). Έπειτα από δύο αιώνες περίπου, ο θεμελιωτής της παραστατικής Γεωμετρίας, Γάλλος Φυσικομαθηματικός Gaspard Monge (1746-1818) έγραψε το πρώτο βιβλίο τεχνικού σχεδίου στην Ευρώπη με τίτλο «Geometrie Descriptive» και έδειξε ότι μπορούμε να αναπαραστήσουμε επακριβώς ένα τρισδιάστατο αντικείμενο σχεδιάζοντας υπό συγκεκριμένους κανόνες (Παπαδόπουλος, 2004).

Ερχόμενοι στην πιο σύγχρονη ιστορία και στην δεκαετία του 1960, ξεκίνησε η ανάπτυξη των συστημάτων σχεδιομελέτης με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD). Η πρώτη εφαρμογή CAD αναπτύχθηκε από τον Ivan Sutherland στο MIT το 1963 και ονομάστηκε SKETCHPAD. Παρόλα αυτά, οι πρώτες εμπορικές εφαρμογές CAD υλοποιήθηκαν κυρίως από βιομηχανίες αυτοκινήτων, αεροσκαφών και ηλεκτρικών, όπως η General Motors (DAC-I, 1964), η Lockheed Bell (GRAPHIC-1, 1965) και η Renault (UNISURF, 1971). Από το σημείο αυτό και μετά η ανάπτυξη και η βελτίωση των εφαρμογών CAD ταυτίστηκε με την ανάπτυξη του τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών με έμφαση στην τρισδιάστατη απεικόνιση αντικειμένων (Dassault Systemes, 1977, CATIA) (Μπιλάλης & Μαραβελάκης, 2009).

Στις μέρες μας, στη βιομηχανία λογισμικού CAD ηγούνται ελάχιστοι προμηθευτές όπως:

- IBM-Dassault Systemes με τα CATIA, ENOVIA, SolidWorks.
- Siemens (UGS) με τα Unigraphics, iMAN, SolidEdge.
- PTC με τα Pro/Engineer, WindChill.
- Autodesk με το Inventor.
- Επίσης μερικές μικρές εταιρίες λογισμικού CAD με αυξημένη εξειδίκευση, σε συμβατότητα δε με τα προϊόντα των ηγετών στο χώρο.

CATIA - DASSAULT SYSTEMES

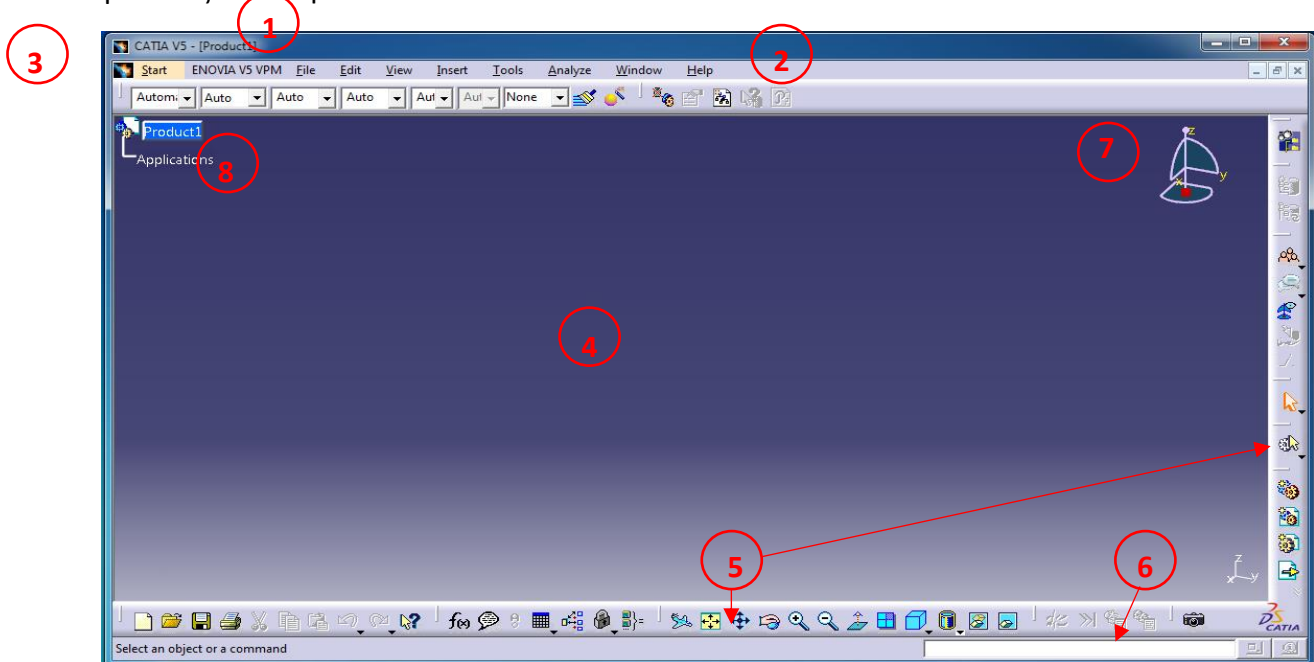
Γενικά

Το λογισμικό CATIA σχεδιάστηκε με στόχο να κάνει ικανό τον χρήστη να προσομοιώσει, σε ένα 3D περιβάλλον, ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος με την χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών. Ιδιαίτερη βαρύτητα αποδίδεται στη δημιουργία, μεταβολή, ανάλυση, βελτιστοποίηση της μορφής και τον προγραμματισμό των παραγωγικών διαδικασιών του προϊόντος (Μπιλάλης & Μαραβελάκης, 2009). Αποτελεί μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα για CAD, CAM και CAE εφαρμογές ψηφιακού σχεδιασμού και προσομοίωσης προϊόντων. Αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '70 από την γαλλική εταιρία Dassault Systemes, θυγατρική της Dassault Aviation με αρχικό στόχο την εσωτερική χρήση του από την τελευταία και την δημιουργία του μαχητικού Mirage. Το 1981 άρχισε να πωλείται και να διανέμεται από την IBM, ενώ το 1984 επιλέχθηκε από την Boeing Company ως το βασικό σχεδιαστικό πρόγραμμα της εταιρίας. Το 1988 δημιουργήθηκε νέα έκδοση του λογισμικού, το οποίο από τότε συνεχώς αναπτύσσεται και εξελίσσεται (Dassault Systemes & IBM, 2008).

Στην παρούσα εργασία μέσω του CATIA V5 δημιουργήθηκε σε τρισδιάστατη μορφή και σαν ενιαίος όγκος το μοντέλο που μελετήθηκε. Έπειτα, με τον τρόπο που περιγράφεται σε επόμενο στάδιο της παρούσας αναφοράς, το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή πλέγματος γύρω από αυτό.

Βασικά χαρακτηριστικά περιβάλλοντος εργασίας του CATIA V5

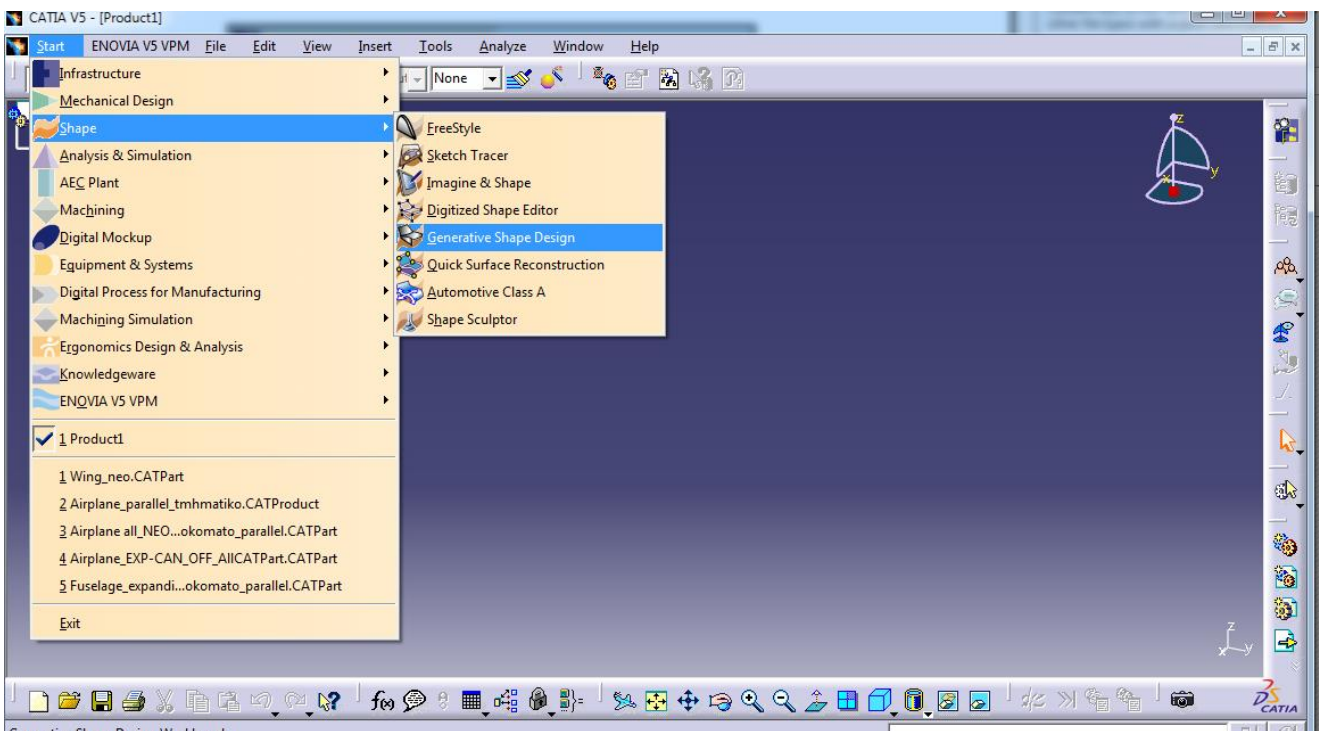
Η δομή με την οποία έχει φτιαχτεί το γραφικό περιβάλλον του CATIA (GUI- Graphics Users Interface), επιτρέπει την επικοινωνία του λογισμικού με τον χρήστη και μέσω αυτού εκτελούνται όλες οι λειτουργίες του. Κύριος εκφραστής του GUI είναι το κεντρικό παράθυρο του CATIA, το οποίο φέρει ορισμένα γενικά χαρακτηριστικά, ανεξαρτήτως επιμέρους περιβάλλοντος και παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-1.



Εικόνα 1-13: Κεντρικό παράθυρο CATIA.

Πρόκειται για ένα κλασικό παράθυρο μορφής Windows, στο πάνω μέρος του οποίου φαίνεται η ονομασία του προγράμματος στο οποίο ανήκει, δηλαδή αναφέρεται η ονομασία και η έκδοση του CATIA (1), ακολουθούμενη από τον τύπο και την ονομασία του προς επεξεργασία αρχείου. Κάτω ακριβώς από αυτό βρίσκεται η μπάρα των βασικών Menu (2) μέσω της οποίας εκτελούνται λειτουργίες όπως άνοιγμα και αποθήκευση αρχείων, εκτύπωση, ρυθμίσεις που αφορούν το λογισμικό κ.α.

Στην αρχή αυτής της μπάρας εμφανίζεται ένα Menu με την ονομασία Start (3). Μέσω αυτού έχουμε πρόσβαση στα διάφορα επιμέρους τμήματα του CATIA και είναι εφικτή η συνεργασία τους χωρίς πολύπλοκες διαδικασίες, αφού η μεταφορά δεδομένων γίνεται αυτόματα. Ουσιαστικά το Menu αυτό καταγράφει τα διάφορα περιβάλλοντα που ανήκουν στο κάθε τμήμα και επιτρέπει, μέσω της επιλογής τους, την μεταβίβαση από το ένα στο άλλο (Εικόνα 1-2).



Εικόνα 1-2: Start Menu.

Το ενεργό περιβάλλον του λογισμικού (4) καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του παραθύρου και επιλέγεται από το Start Menu. Σε αυτό το τμήμα γίνεται η απεικόνιση του προϊόντος ή των σχεδίων που επεξεργαζόμαστε και έχει κατά προεπιλογή μπλε φόντο. Περιμετρικά του ενεργού περιβάλλοντος βρίσκονται οι γραμμές εργαλείων (5), οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με το ενεργό περιβάλλον που έχει επιλεγεί και περιέχουν τις συντομεύσεις των εντολών και των εργαλείων επεξεργασίας. Κάτω δεξιά είναι η γραμμή εντολών (6), η οποία προσφέρει την δυνατότητα στον χρήστη να γράφει εντολές με την μορφή κειμένου. Πάνω δεξιά βρίσκεται η πυξίδα (7) η οποία προσανατολίζεται ανάλογα με την θέση του σχεδίου και παρουσιάζει τις κατευθύνσεις των επιπέδων (XY,YZ,ZX) και των αξόνων (X,Y,Z). Τέλος, το GUI του CATIA διαθέτει ως βασικό γνώρισμα την εμφάνιση ενός δέντρου εντολών (8), το οποίο δημιουργείται κατά τον σχεδιασμό των προϊόντων και ανάλογα με τις εντολές που εφαρμόζονται.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των λογισμικών CAD (όπως και του CATIA) είναι η ποικιλία τρόπων που παρέχουν για τον σχεδιασμό και την δημιουργία μια συγκεκριμένης γεωμετρίας ή κάποιου προϊόντος. Ως συνέπεια αυτού, πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένας τρόπος, επιλεγμένος από τον συντάκτη αυτής, με βασικό κριτήριο την μετέπειτα ευκολότερη αντιμετώπιση δυσκολιών στην εφαρμογή της εργασίας και όχι απαραίτητα τον απλούστερο τρόπο σχεδιασμού του μοντέλου.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Περιγραφή Μοντέλου και Διαμορφώσεων προς Σχεδίαση

Το μοντέλο που σχεδιάστηκε είναι ένα πειραματικό μαχητικό αεροσκάφος με εμπροσθοκλινή πτέρυγα και βοηθητικό πτερύγιο σταθερότητας και ευελιξίας (Canard), με ονομασία ARA M151/1.

Τα χαρακτηριστικά και όλες οι σχεδιαστικές πληροφορίες του M151/1, καθώς και των επιμέρους διαμορφώσεων, αποτελούν τμήμα της αναφοράς «Investigation into the aerodynamic characteristics of a combat aircraft research model fitted with a forward swept wing» (Stanniland, 1985) που αποτελεί την Test Case E8 από τον τόμο AGARD-AR-303 Vol II.

Με βάση τα δεδομένα που δίνονται στην αναφορά του D. Stanniland σχεδιάστηκαν τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις του μοντέλου M151/1, που παρουσιάζονται παρακάτω.

- 1) M151/1 με άτρακτο διογκωμένη (expanding) και canard σε γωνιά 0° (off) σε σχέση με την άτρακτο.
- 2) M151/1 με άτρακτο μη διογκωμένη (παράλληλη-parallel) και canard σε γωνιά 0° (off) σε σχέση με την άτρακτο.
- 3) M151/1 με άτρακτο διογκωμένη (expanding) και canard σε γωνιά -3° σε σχέση με την άτρακτο.

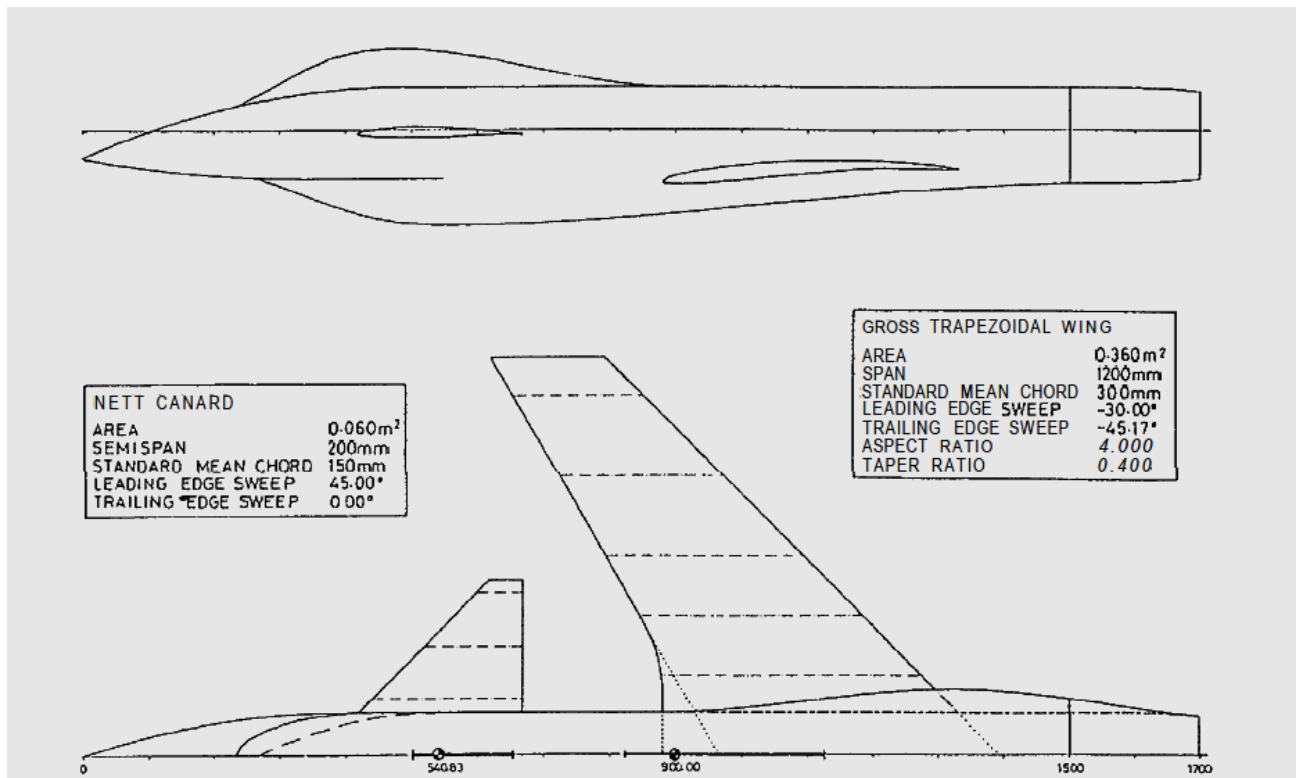
Για την επίτευξη του σχεδιασμού του μοντέλου M151/1 και στις τρεις προαναφερθείσες διαμορφώσεις, χωρίστηκε σε τρία τμήματα, τα οποία σχεδιάστηκαν ξεχωριστά και στη συνέχεια έγινε η κατάλληλη σύνθεση τους. Τα τμήματα αυτά είναι η Πτέρυγα (Wing), το πτερύγιο Canard και η Άτρακτος (Fuselage) για την οποία δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρίες, η Διογκωμένη (expanding) και η μη Διογκωμένη (παράλληλη-parallel).

Σχεδιασμός Πτέρυγας (Wing)

➤ Συγκέντρωση Δεδομένων

Παρακάτω συγκεντρώνονται όλα τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά για την πτέρυγα, που δίνονται στην αναφορά της Test Case E8.

- Reference wing area = 0.3600 m^2
- Reference wing chord, $\bar{c} = 0.3000 \text{ m}$
- Reference wing span = 1.2000 m
- Aspect ratio = 4.0
- Taper ratio = 0.4
- Leading edge sweep = -30°
- Twist distribution = Βλέπε πίνακα A1 στο Παράρτημα Α για τον ορισμό
- Gross semi-span = 0.600 m
- Root chord $C_0 = 0.4286 \text{ m}$
- Tip chord $C_T = 0.17143 \text{ m}$
- Tip L.E. point = 0.6225 m



Εικόνα W1: Layout of the M151 forward swept wing model (Stanniland, 1985).

Επιπλέον, στους Πίνακες A1 και A2 του Παραρτήματος Α ορίζονται τρεις αεροτομές της πτέρυγας, η περιστροφή της πτέρυγας και η μαθηματική περιγραφή των χειλών προσβολής (Leading Edge→L.E) και εκφυγής (Trailing Edge→T.E) αντίστοιχα, όπως δίνονται στην εν λόγω αναφορά.

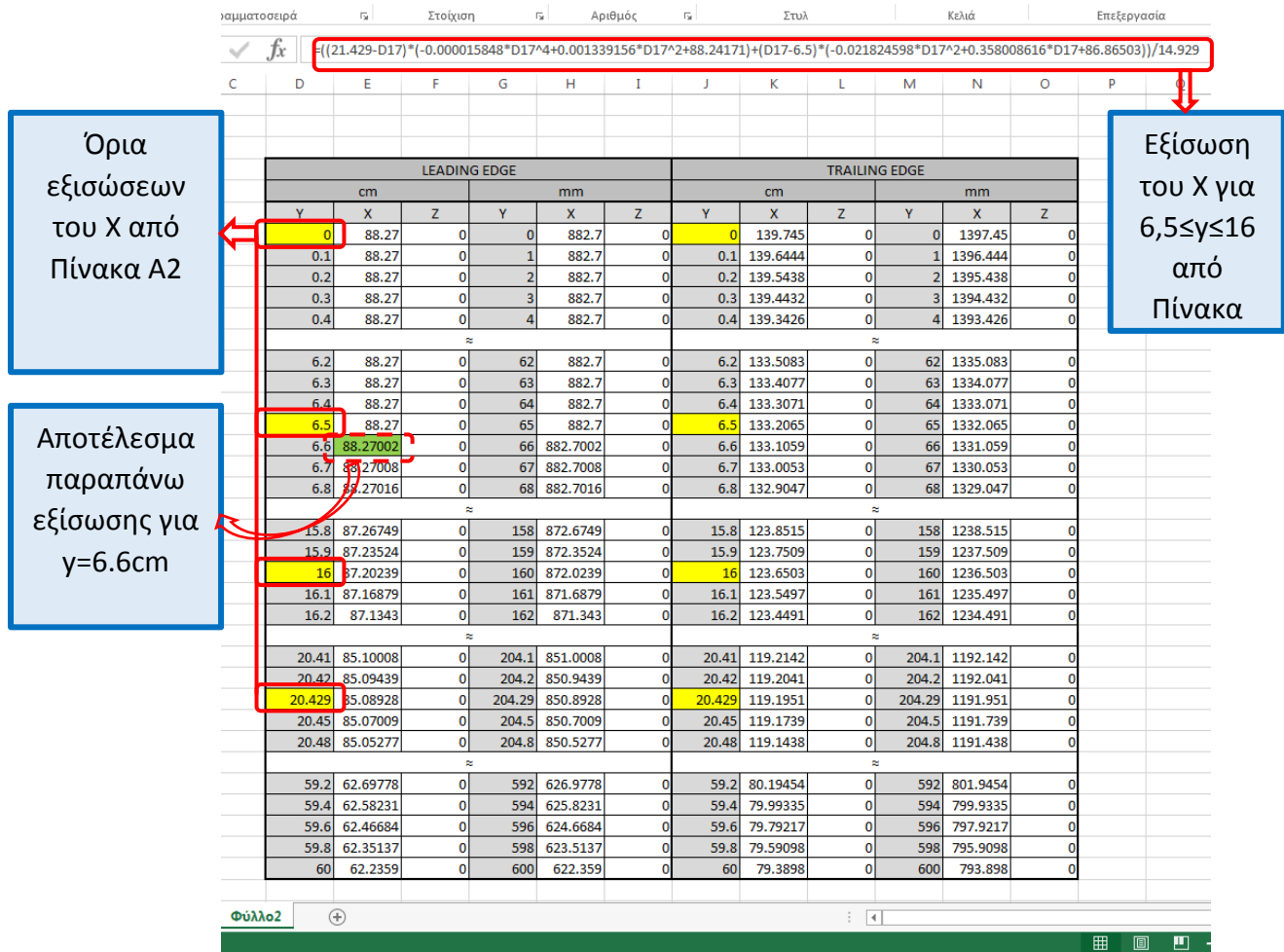
➤ **Επεξεργασία Δεδομένων**

Για την εισαγωγή των δεδομένων στο CATIA και την σωστή χρήση αυτών ήταν αναγκαία η περεταίρω επεξεργασία των δεδομένων.

Αρχικά, στο Πίνακα A1 στο Παράρτημα Α ορίζονται τρεις αεροτομές της πτέρυγας με συντεταγμένες που έχουν αδιαστατοποιηθεί, διαιρώντας αυτές με το μήκος της χορδής (c) στο εκάστοτε Υ. Οι αεροτομές που ορίζονται είναι οι παρακάτω:

- Section 1 για $Y = 0 \text{ cm}$
- Section 2 για $Y = 21,429 \text{ cm}$
- Section 3 για $Y = 60 \text{ cm}$

Για την επεξεργασία των δεδομένων του Πίνακα A2 στο Παράρτημα Α, με την χρήση του Microsoft Excel, δημιουργήθηκε ένας πίνακας συντεταγμένων σημείων (Y,X,Z). Μεταβάλλοντας το Υ από $0 < Y < 60 \text{ cm}$ και ορίζοντας το Χ σύμφωνα με τις εξισώσεις του Πίνακα A2 και $Z = 0 \text{ cm}$ ορίστηκαν 409 σημεία που ανήκουν στο χείλος προσβολής και άλλα 409 σημεία του χείλους εκφυγής με ίδια συντεταγμένη Υ. Έπειτα μετατράπηκαν οι υπόψη συντεταγμένες σε χιλιοστά (mm), καθώς σε χιλιοστά ορίζονται οι αποστάσεις στο CATIA (Εικόνα W2).

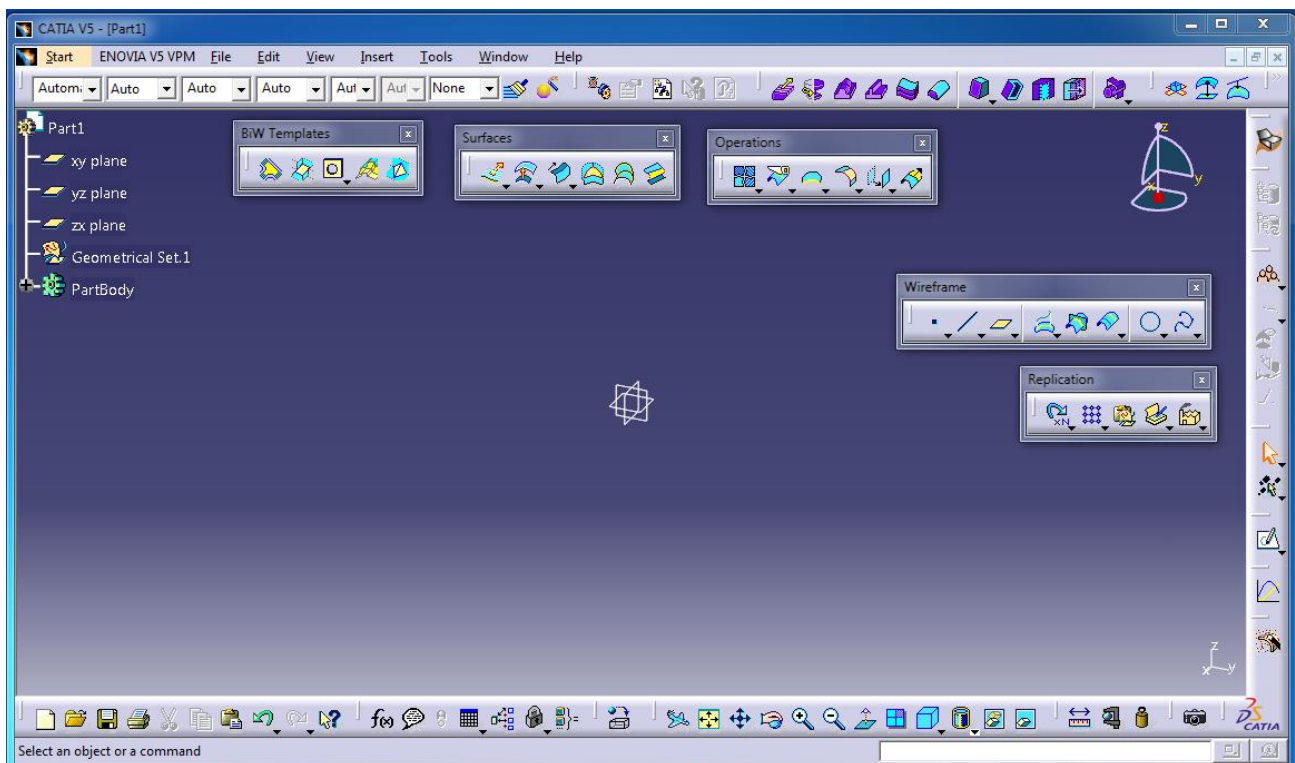


Εικόνα W2: Επεξεργασία δεδομένων Πίνακα A2 στο Microsoft Excel.

➤ **Προετοιμασία Περιβάλλοντος Εργασίας στο CATIA**

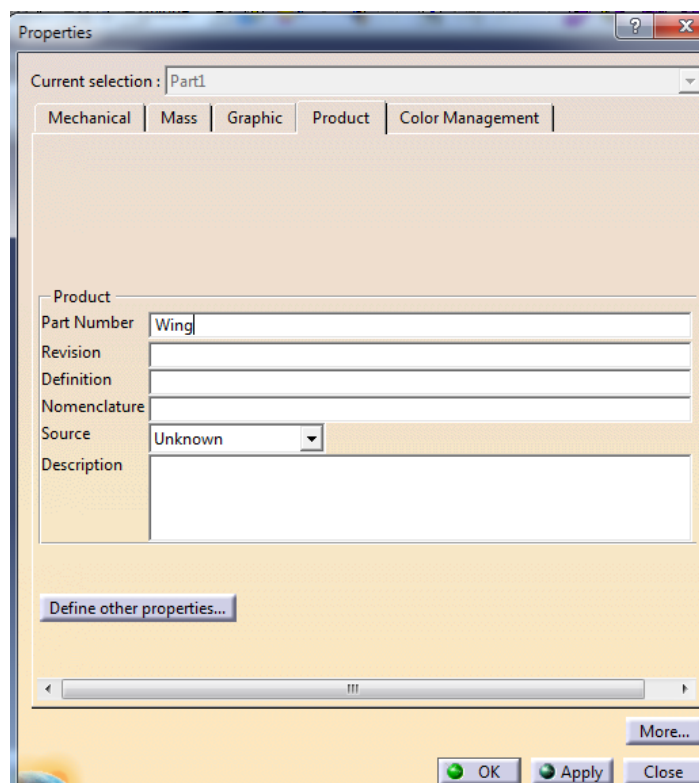
Αρχικά ανοίγεται το πρόγραμμα CATIA και από το κεντρικό παράθυρο (Εικόνα 1) μέσω του **Start Menu → Shape → Generative Shape Design** (Εικόνα 2) ενεργοποιείται το περιβάλλον του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Όπως φαίνεται στην Εικόνα W3, ενεργοποιήθηκαν οι κατάλληλες γραμμές εργαλείων για το συγκεκριμένο περιβάλλον εργασίας και εμφανίστηκαν στο κέντρο οι θέσεις των επιπέδων XY,YZ,ZX.

Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



Εικόνα W3: Ενεργό περιβάλλον *Generative Shape Design*.

Πατώντας **δεξί Κλικ** στο Part1, στην κορυφή του δέντρου εντολών, και επιλέγοντας την εντολή **Properties** εμφανίζεται το αντίστοιχο παράθυρο διαλόγου. Στην καρτέλα **Product**, στο πλαίσιο **Part Number** ορίστηκε το όνομα του εξαρτήματος (Wing) (Εικόνα W4).



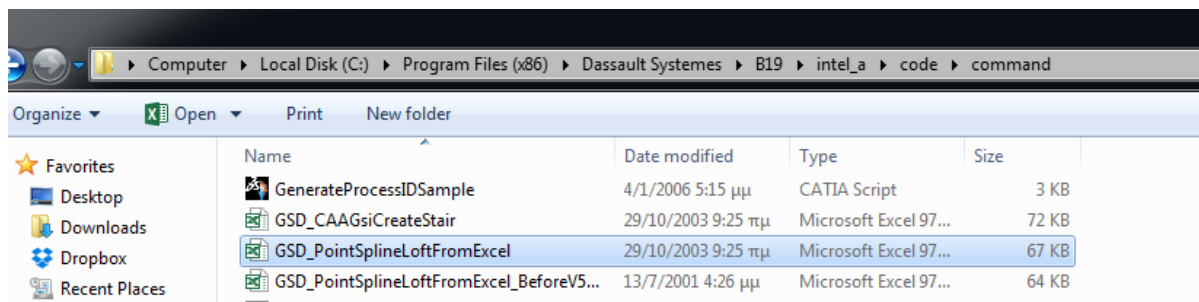
Εικόνα W4: Παράθυρο διαλόγου *Product*.

Στο δέντρο καταγράφονται όλα τα χαρακτηριστικά που προκύπτουν από την εκτέλεση εντολών συμπεριλαμβανομένων των οντοτήτων σχεδιασμού (επιφάνειες, γραμμές κ.λπ.) και των αριθμητικών τιμών των παραμέτρων (αναλογία, διαστάσεις κ.λπ.), καθώς και των σχέσεων και αλληλεξαρτήσεων αυτών. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπει την αποτύπωση της λογικής που υιοθετήθηκε κατά το σχεδιασμό και την ανασκόπηση πληροφοριών κατά την περαιτέρω επεξεργασία του εξαρτήματος-προϊόντος. Κατά αντιστοιχία με πριν, εφαρμόζεται και η αλλαγή ονόματος σε όλα τα στάδια και είδη εντολών πάνω στο δέντρο. Η αλλαγή ονομασίας κάθε εντολής του δέντρου πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά την εφαρμογή της για λόγους διευκόλυνσης και κατανόησης του σχεδιασμού σε επόμενα στάδια.

➤ Εισαγωγή Δεδομένων στο CATIA

Τα δεδομένα που υπάρχουν και είναι εφικτό να εισαχθούν στο CATIA μαζί και χωρίς ιδιαίτερο κόπο είναι σε μορφή συντεταγμένων σημείων, όπως παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Υπάρχει ποικιλία τρόπων εισαγωγής δεδομένων και διάφοροι τρόποι εισαγωγής σημείων, όπως απαιτήθηκε τελικά και στην παρούσα περίπτωση.

Για την εισαγωγή των σημείων από πίνακα του Microsoft Excel πρέπει να αντιγραφεί το πρότυπο αρχείο **GSD_PointSplineLoftFromExcel** από τον φάκελο εγκατάστασης του λογισμικού στον υπολογιστή και να αποθηκευτεί σε μια άλλη τοποθεσία.



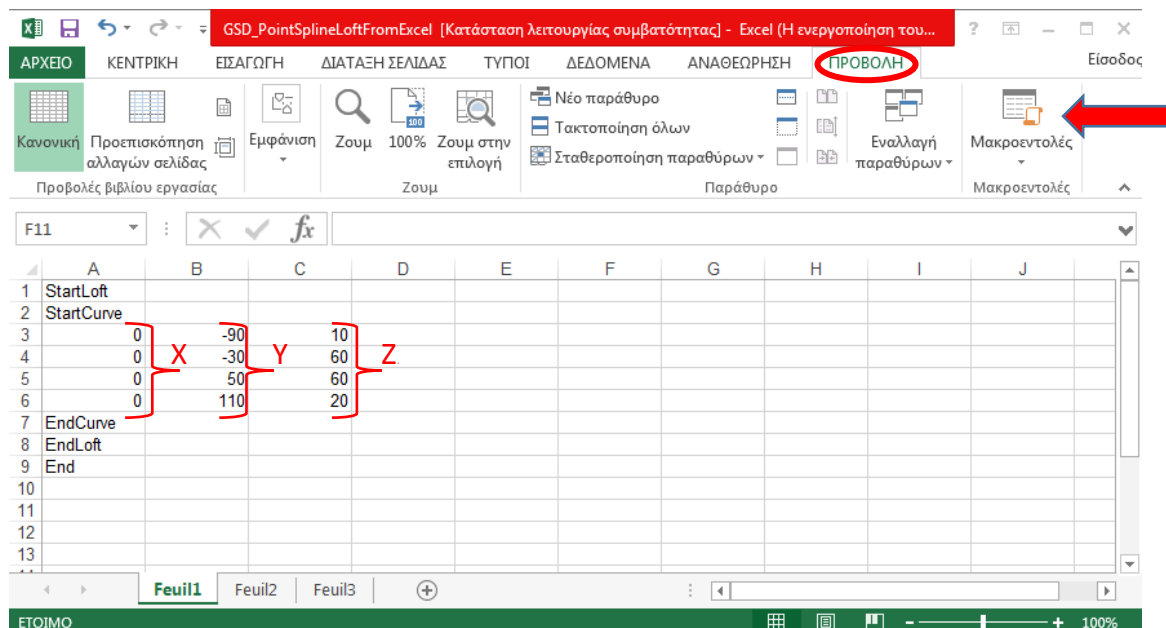
Εικόνα W5: Θέση πρότυπου αρχείου "GSD_PointSplineLoftFromExcel".

Το συγκεκριμένο αρχείο Excel περιέχει ενεργοποιημένες Μακροεντολές που εισάγουν στο CATIA τις συντεταγμένες των σημείων που είναι καταχωρημένες σε αυτό με κατάλληλη διαμόρφωση. Μέσω αυτού του αρχείου υπάρχει η δυνατότητα εισόδου των δεδομένων ως απλά σημεία, ως σημεία ενωμένα με γραμμή Spline αλλά και ως σημεία ενωμένα με παραπάνω από μια γραμμή Spline οι οποίες να σχηματίζουν επιφάνεια. Λόγω του μεγάλου πλήθους σημείων αλλά και της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας της πτέρυγας τα σημεία εισήχθησαν ξεχωριστά για κάθε γραμμή.

Αρχικά εισήχθησαν στο CATIA τα σημεία του χείλους προσβολής. Για την ολοκλήρωση αυτού του σταδίου απαιτήθηκε η διαμόρφωση του αρχείου **GSD_PointSplineLoftFromExcel**. Βάζοντας στην στήλη A της Εικόνας W6 τις συντεταγμένες X των σημείων που προέκυψαν από την επεξεργασία του Πίνακα A2 του Παραρτήματος A (Εικόνα W2) και αντίστοιχα στην στήλη B και C τις συντεταγμένες Y και Z, ορίστηκαν τα σημεία του χείλους προσβολής της πτέρυγας από τα δεδομένα. Διατηρώντας τα **StartLoft**, **StartCurve** στα κελιά πάνω από τις συντεταγμένες και τα **EndCurve**, **EndLoft** και **End** στα κελιά αμέσως μετά τις συντεταγμένες, όπως φαίνεται στην

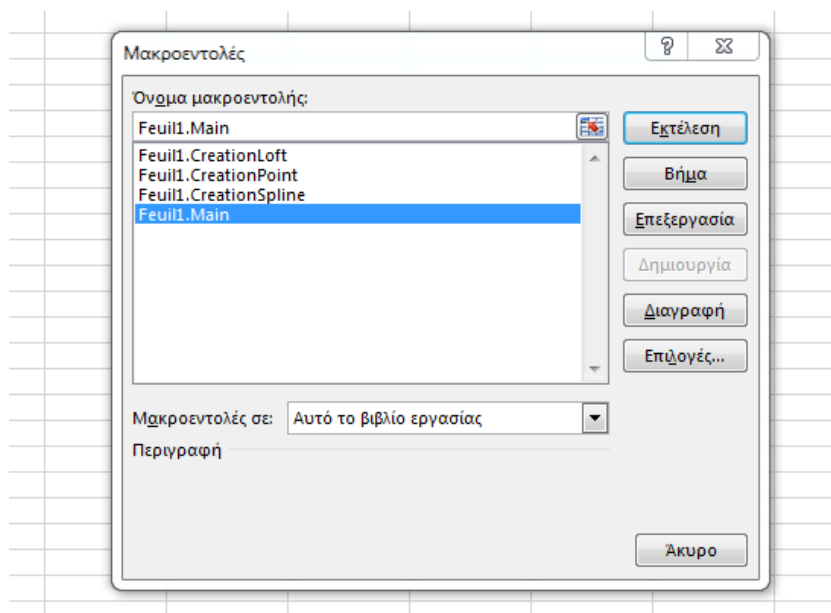
Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου

Εικόνα W6, ολοκληρώνεται η διαμόρφωση του αρχείου έτσι ώστε να δημιουργηθούν στο CATIA τα σημεία αλλά και μια Spline καμπύλη που τα ενώνει.



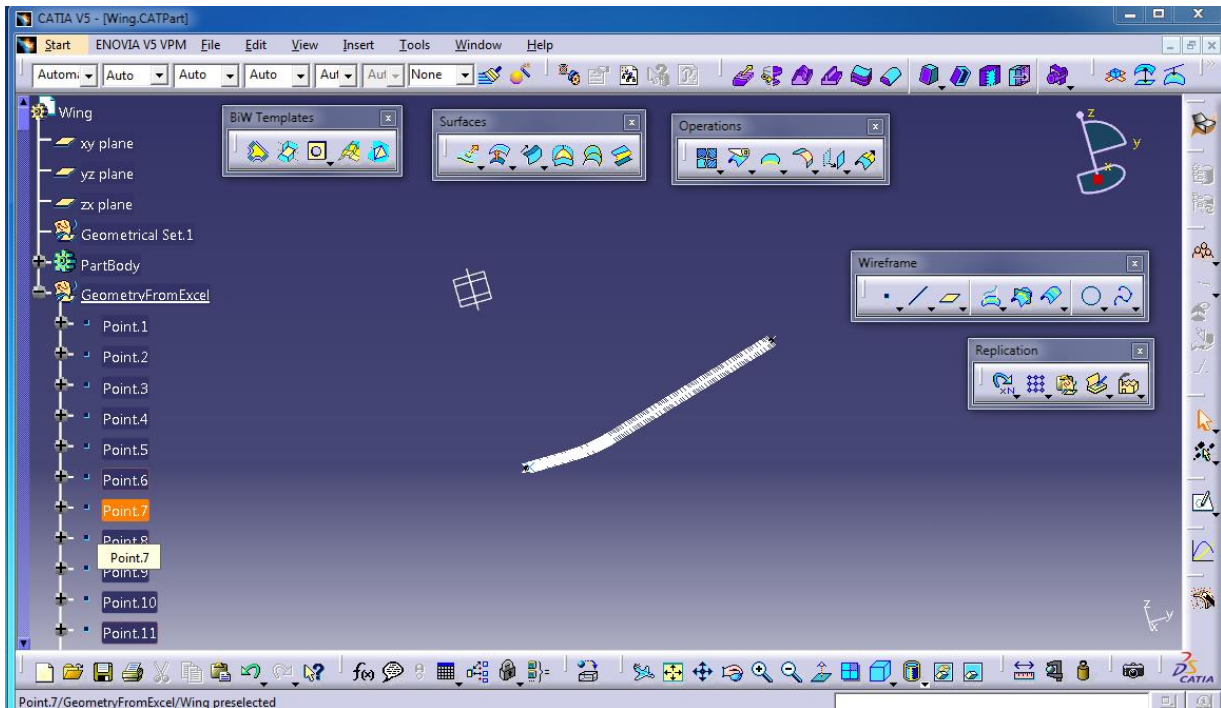
Εικόνα W6: Διαμόρφωση Αρχείου "GSD_PointSplineLoftFromExcel".

Στη συνέχεια, πατώντας την επιλογή **Μακροεντολές** στην καρτέλα **Προβολή** του Excel (Εικόνα W6) ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου που προβάλλει τις ορισμένες Μακροεντολές. Έπειτα επιλέχθηκε η Μακροεντολή **Feuil1.Main** σε αυτό το βιβλίο εργασίας και η εντολή **Εκτέλεση** (Εικόνα W7). Τέλος στο παράθυρο «User Info» που ανοίγεται καταχωρούμε τον αριθμό **2** που αντιστοιχεί στην εισαγωγή και δημιουργία σημείων και γραμμής Spline που τα ενώνει.

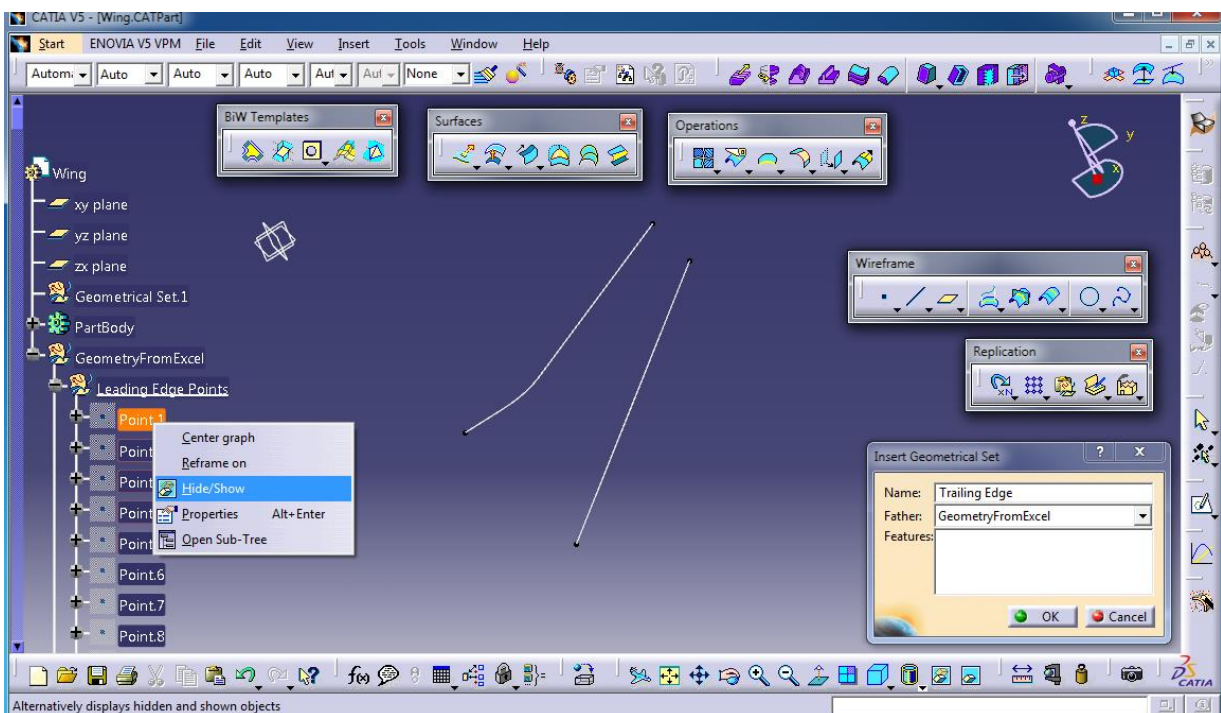


Εικόνα W7: Παράθυρο Μακροεντολών.

Επιστρέφοντας στο περιβάλλον εργασίας του CATIA επιβεβαιώνεται η εισαγωγή των σημείων και της γραμμής που τα ενώνει, όπως διακρίνεται στην Εικόνα W8.



Εικόνα W8: Εισαγωγή σημείων και γραμμής στο περιβάλλον εργασίας του CATIA.



Εικόνα W9: "Τακτοποίηση" δέντρου εντολών.

Τελειώνοντας με την εισαγωγή δεδομένων κάθε φορά, είναι απαραίτητη η «τακτοποίηση» του δέντρου εντολών μετονομάζοντας και ομαδοποιώντας τα δεδομένα του με κατάλληλο τρόπο. Η ομαδοποίηση γίνεται δημιουργώντας νέο **Geometrical Set** από την επιλογή **Insert → Geometrical Set** της μπάρας βασικών Menu και ονομάζοντας και ορίζοντας την θέση του στο

Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου

δέντρο από το παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται στην οθόνη. Έπειτα, επιλέγοντας τα δεδομένα του δέντρου που απαιτείται να ομαδοποιηθούν και πατώντας πάνω σε αυτά **δεξί Κλικ → Selected Objects → Change Geometrical Set** υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί σε ποιο «κλαδί» του δέντρου να μεταφερθούν. Επιπλέον, επιλέγοντας τα σημεία και πατώντας πάνω σε αυτά **δεξί Κλικ → Hide/Show** υπάρχει η δυνατότητα να κρυφτούν από το παράθυρο εργασίας, όπως και οποιαδήποτε άλλη οντότητα σχεδιασμού (επιφάνειες, γραμμές κ.λπ.) κριθεί απαραίτητο (Εικόνα W9).

Κατά αντιστοιχία της διαδικασίας εισαγωγής σημείων και γραμμών μέσω του Microsoft Excel, που περιγράφηκε παραπάνω, εισήχθησαν επιπλέον:


- Σημεία και γραμμή Spline του Trailing Edge.
- Σημεία και γραμμή Spline άνω καμπύλης των:
 - Section 1 για $Y = 0$ mm.
 - Section 2 για $Y = 214,29$ mm.
 - Section 3 για $Y = 600$ mm.
- Σημεία και γραμμή Spline κάτω καμπύλης των:
 - Section 1 για $Y = 0$ mm.
 - Section 2 για $Y = 214,29$ mm.
 - Section 3 για $Y = 600$ mm.


➤ Διαμόρφωση Τελικής Μορφής στην Πτέρυγα


Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας εισαγωγής των δεδομένων και της ανάλογης «τακτοποίησης» του δέντρου θα πρέπει να μεγεθυνθούν κατά συγκεκριμένη κλίμακα οι γραμμές κάθε Section ώστε η χορδή που σχηματίζεται να είναι ίση με την απόσταση μεταξύ του χείλους προσβολής (L.E) και χείλους εκφυγής (T.E) στο αντίστοιχο Y .

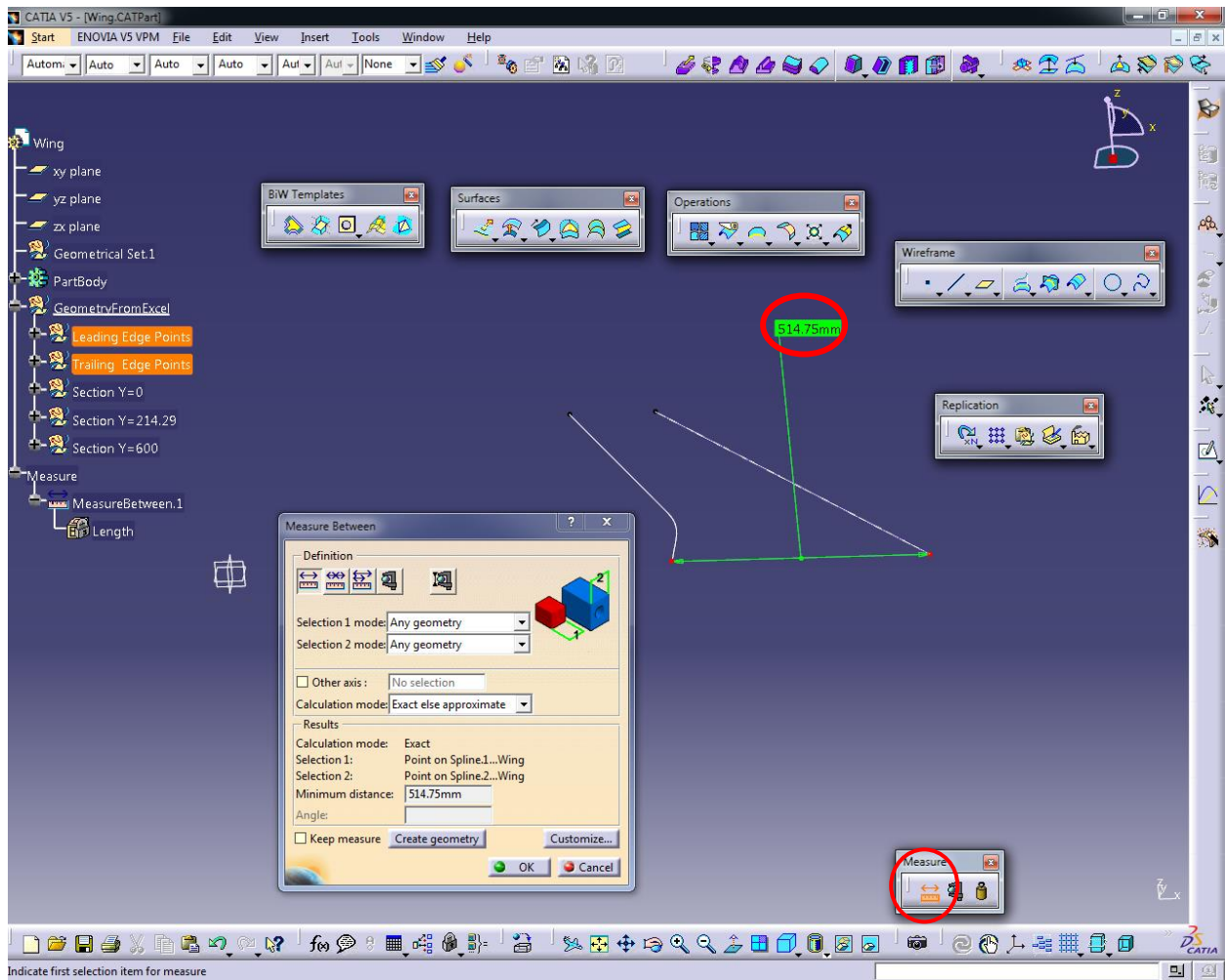
Section 1($Y=0$ mm)

Αρχικά μετρήθηκε η απόσταση μεταξύ L.E και T.E για $Y=0$ mm (514.75mm)

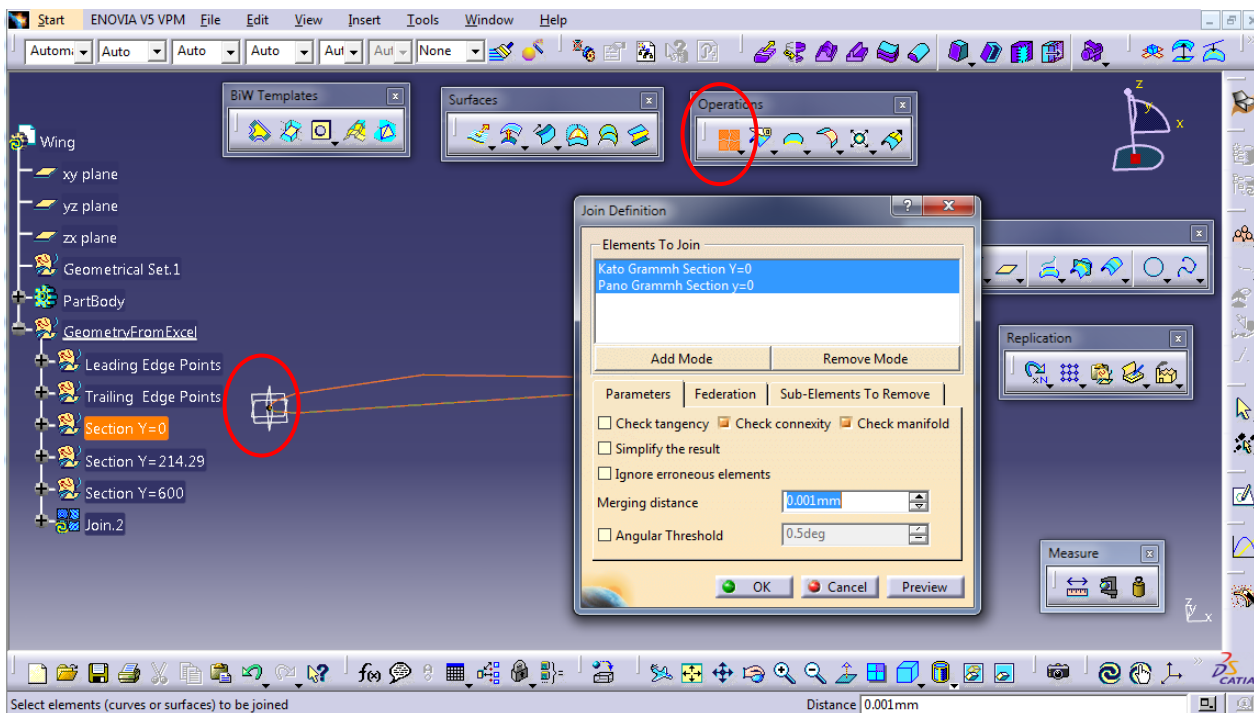
χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Measure Between**  από την γραμμή εργαλείων Measure και επιλέγοντας τα ακραία σημεία για $Y=0$ mm των L.E. και T.E. (Εικόνα W10). Έπειτα επιλέχθηκαν η πάνω και κάτω γραμμή του Section1, οι οποίες αρχίζουν από την αρχή των αξόνων O (0,0,0) και τέμνονται στο σημείο αυτό (Έχουν κοινό το πρώτο σημείο – O (0,0,0)), ενώ χρησιμοποιήθηκε

η εντολή **Join**  από την γραμμή εργαλείων Operations με σκοπό να ενωθούν οι δυο γραμμές στο σημείο O και να σχηματίσουν ολόκληρο το Section1 (Εικόνα W11).

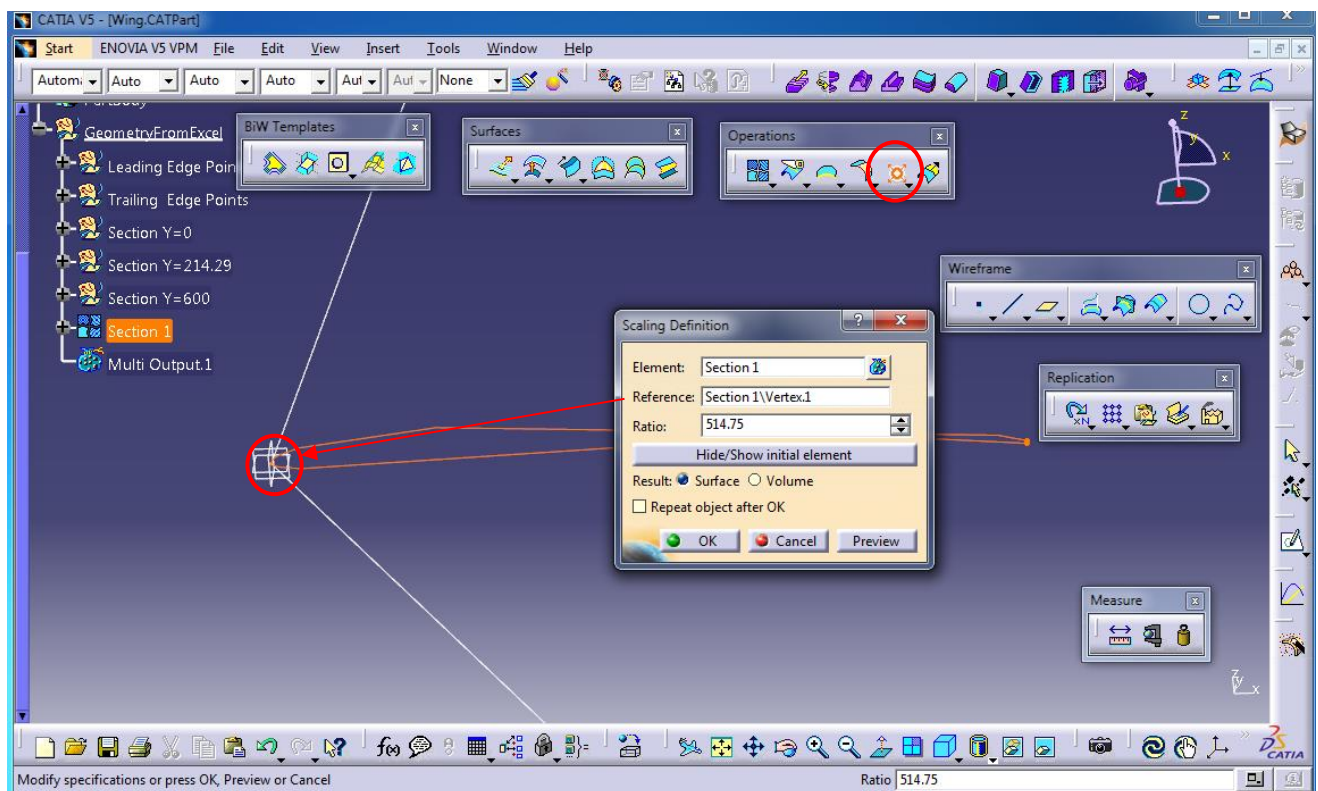
Από την επεξεργασία των δεδομένων παρατηρήθηκε ότι οι συντεταγμένες των σημείων στις διατομές (Section) της πτέρυγας (Πίνακας A1, Παράρτημα A) έχουν αδιαστατοποιηθεί διαιρώντας αυτές με το μήκος της χορδής (c) για το συγκεκριμένο Y . Επιλέγοντας όλο το Section1 και χρησιμοποιώντας την εντολή **Scaling**  από την γραμμή εργαλείων **Operations**, καθώς και ορίζοντας στο παράθυρο διαλόγου της εντολής ως Reference το σημείο O που είναι και το σημείο ένωσης και ως Ratio την απόσταση 514.75 mm μεταξύ L.E. και T.E. για $Y=0$ mm (Εικόνα W12), επανέρχεται το Section στην κλίμακα 1:1.



Εικόνα W10: Μέτρηση απόστασης μεταξύ L.E και T.E πτέρυγας για $Y=0$ mm (Measure Between).



Εικόνα W11: Ένωση άνω και κάτω γραμμής Section1 στο σημείο $O(0,0,0)$ (Join).

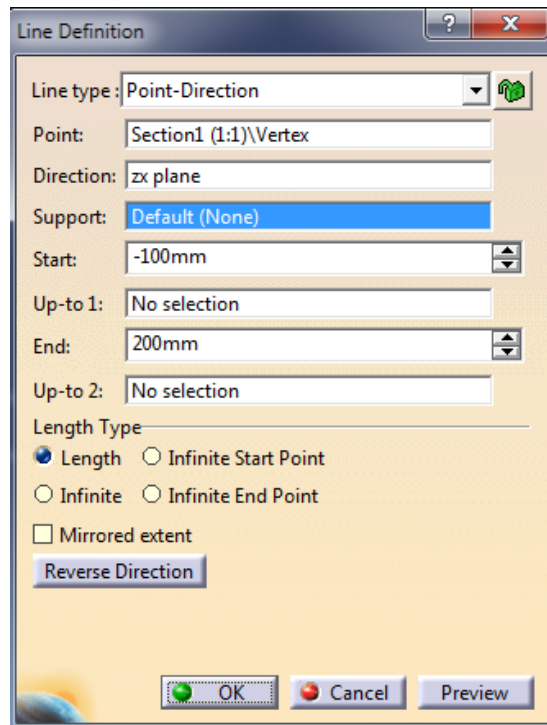


Εικόνα W12: Εντολή *Scaling* στο *Section 1*.

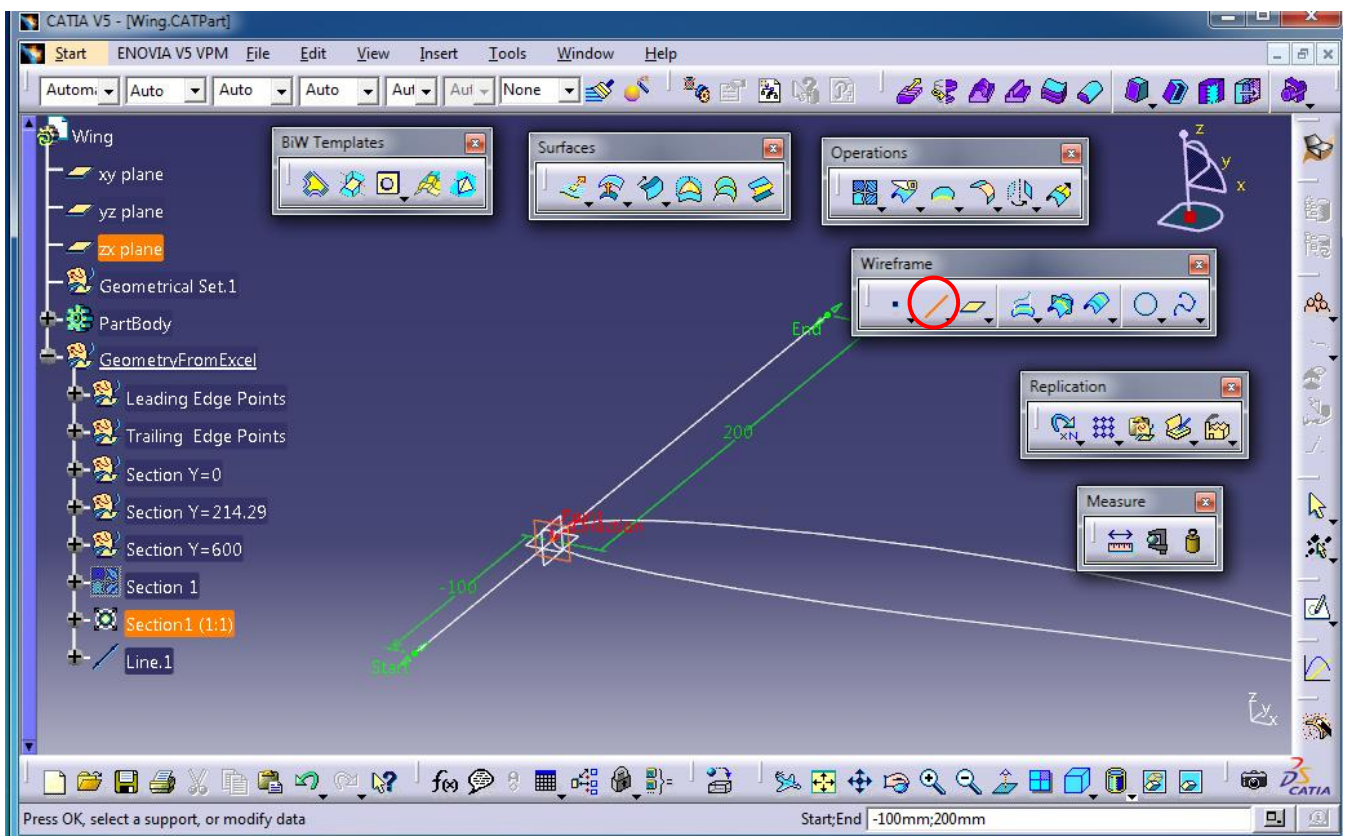
Στην συνέχεια στο **Section1(1:1)** εφαρμόστηκε η περιστροφή της πτέρυγας στο σημείο $Y=0$ (α $T = -2,8^\circ$, Πίνακας A1, Παράρτημα A) με την εντολή **Rotate** από την γραμμή εργαλείων **Operations**. Για την χρήση της εντολής αυτής απαιτείται η δημιουργία μίας γραμμής που να διέρχεται από το σημείο περιστροφής (O (0,0,0)- κορυφή Section1) και γύρω από το οποίο θα περιστραφεί το Section1(1:1) (για όρισμα στην εντολή **Rotate**). Η δημιουργία της γραμμής έγινε με την εντολή **Line** από την γραμμή εργαλείων **Wireframe** και ταυτίζεται στην παρούσα περίπτωση με τον άξονα Y του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Τα δεδομένα για τον ορισμό της γραμμής στο αντίστοιχο παράθυρο διαλόγου παρουσιάζονται στις Εικόνες W13 και W14. Έπειτα χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Rotate**, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα W15.

Τέλος, μετά την ολοκλήρωση της διαμόρφωσής του Section1 στην μορφή **Rotate Section1 (1:1)** (Εικόνα W16) μεταφέρθηκε στην τελική του θέση ώστε να εφάπτεται το L.E. στο σημείο $Y=0$. Αυτό επετεύχθη με την εντολή **Translate** από την γραμμή εργαλείων **Operations**, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα W16.

Υπενθυμίζεται ότι παράλληλα με τον σχεδιασμό κάθε γεωμετρίας πραγματοποιείται «τακτοποίηση» του δέντρου εντολών με ομαδοποίηση, μετονομασία και απόκρυψη των απαραίτητων οντοτήτων σχεδιασμού.

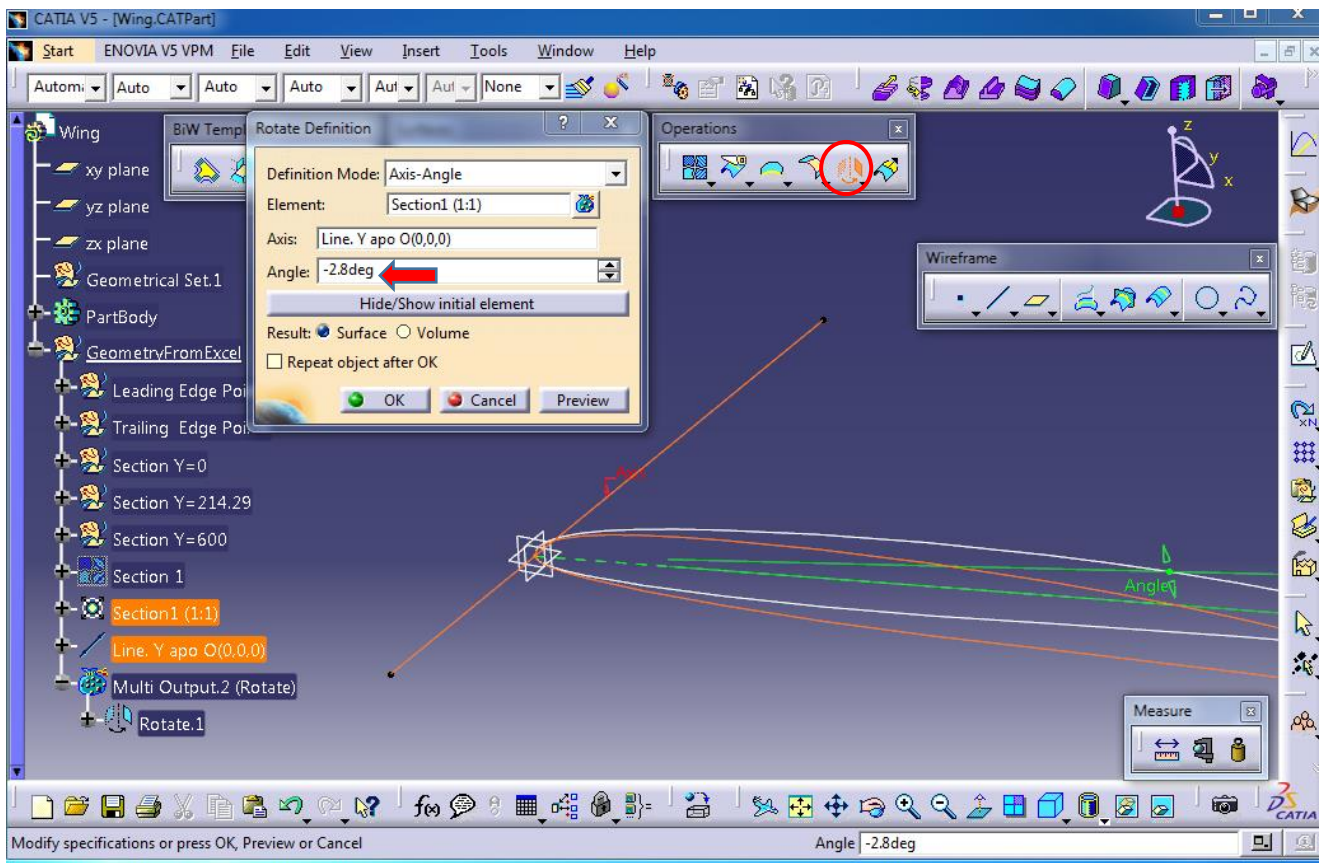


Εικόνα W13: Παράθυρο διαλόγου εντολής Line.

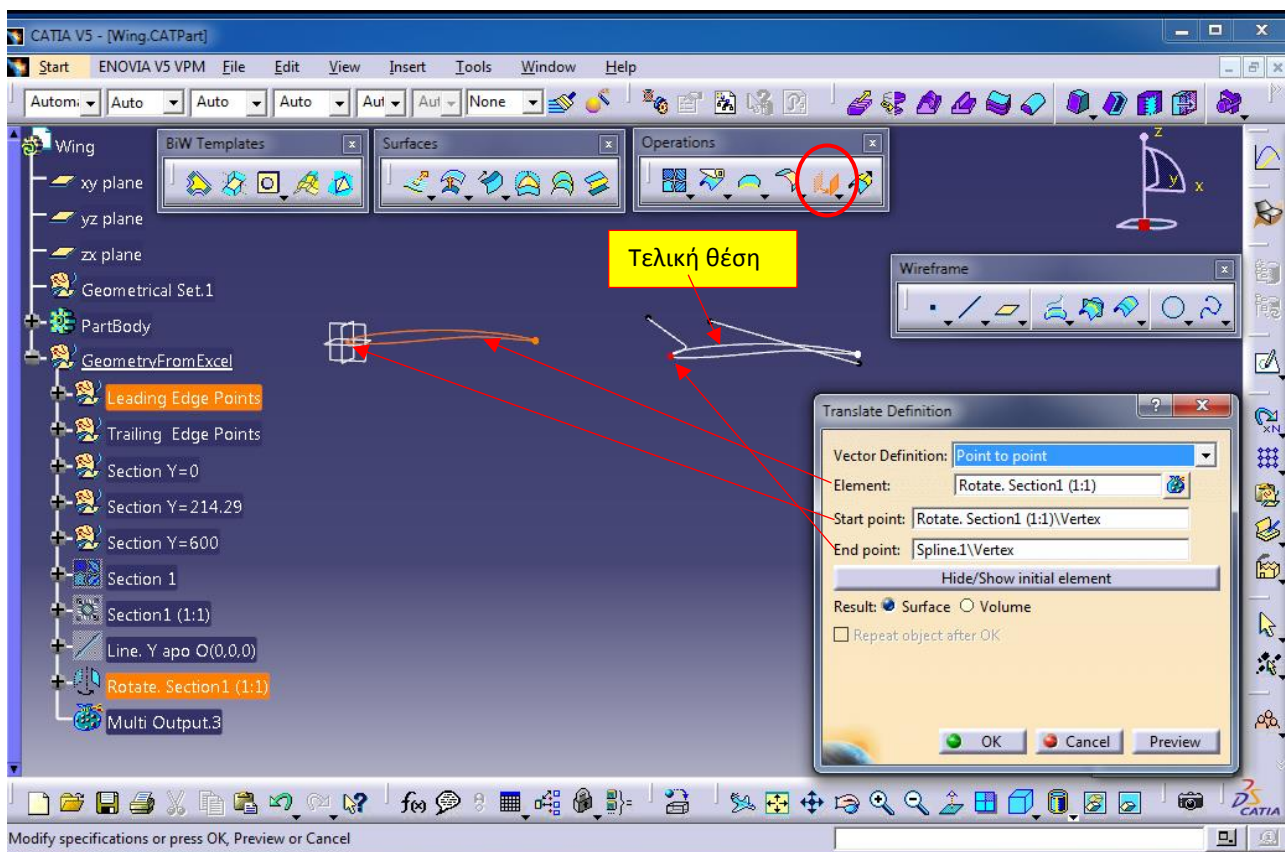


Εικόνα W14: Εντολή Line.

Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



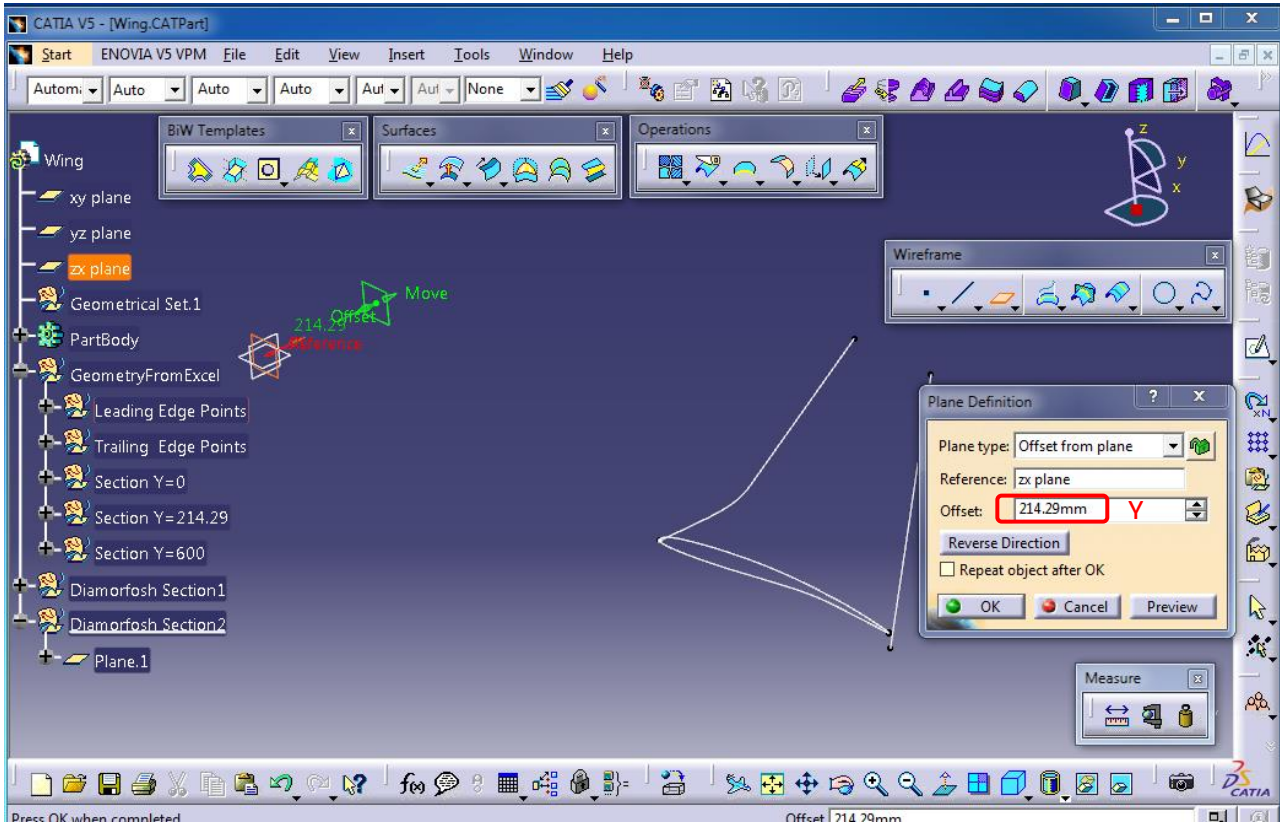
Εικόνα W15: Εντολή Rotate στο Section1.





Εικόνα W16: Εντολή Translate στο Section 1.

Section 2 (Y=214,29mm) και Section 3 (Y=600mm)

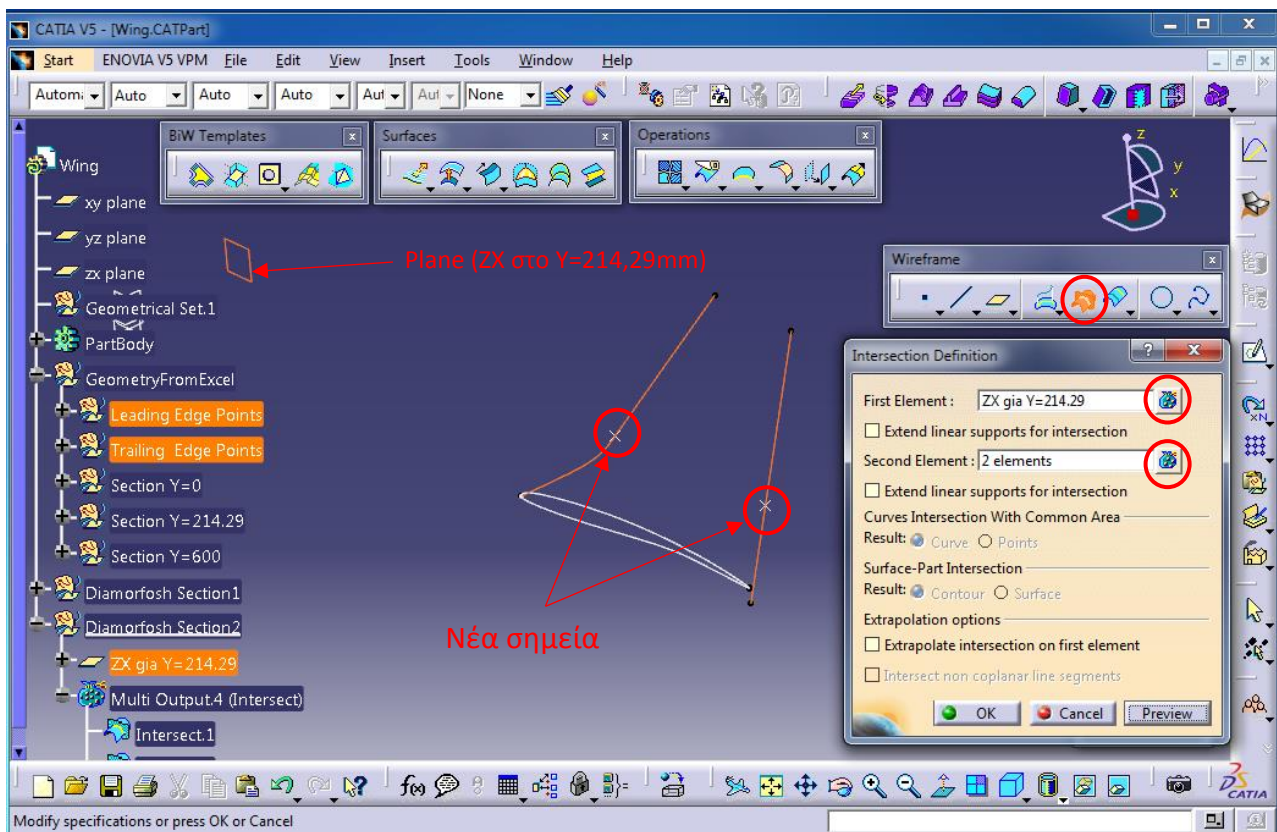
Ξεκινώντας την διαμόρφωση του Section 2 απαιτείται η μέτρηση της απόστασης μεταξύ των L.E. και T.E. για Y=214,29 mm. Για την εύρεση των σημείων που τέμνουν τα L.E. και T.E. το επίπεδο ZX για Y=214,29 mm δημιουργήθηκε το συγκεκριμένο επίπεδο με την εντολή **Plane** από την γραμμή εργαλείων Wireframe με τα ορίσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα W17.



Εικόνα W17: Εισαγωγή Επιπέδου ZX για Y=214,29 με την εντολή Plane.

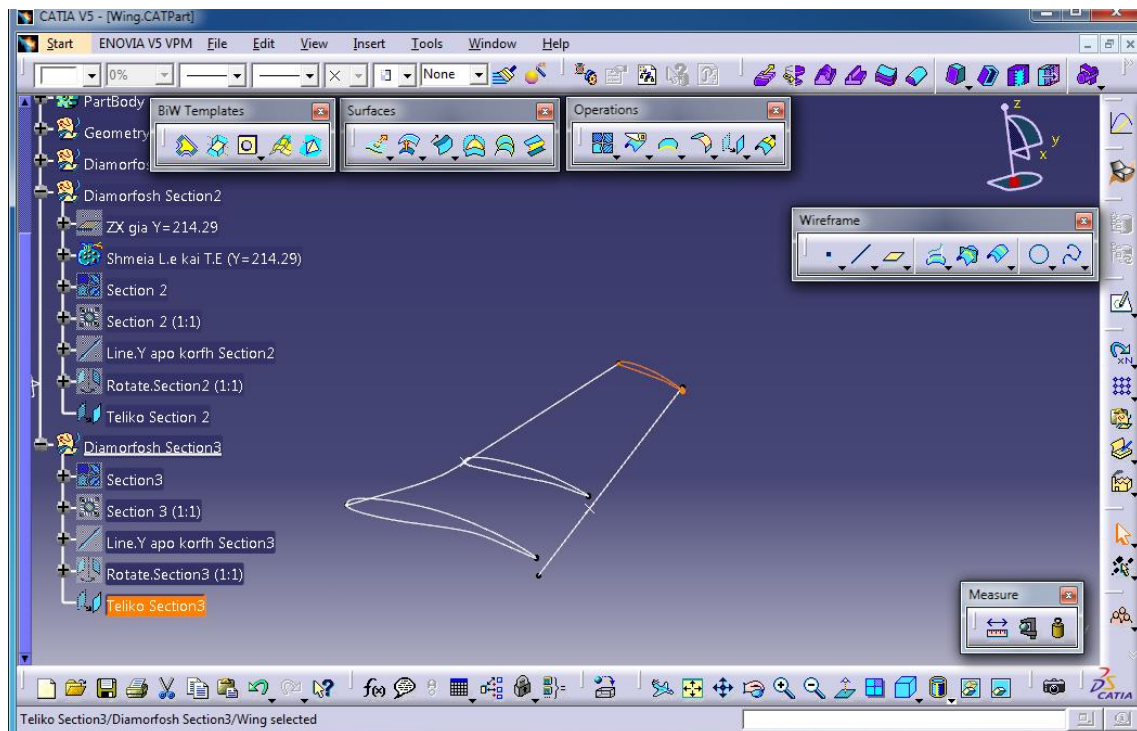
Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Intersection** από την γραμμή εργαλείων Wireframe με σκοπό την δημιουργία των σημείων που τέμνουν τα L.E και T.E το επίπεδο ZX για Y=214,29 mm. Στο παράθυρο διαλόγου της εντολής για την δήλωση των ορισμάτων (Εικόνα W18), πατώντας το σύμβολο  δίνεται η δυνατότητα επιλογής πολλών ορισμάτων (γραμμές, επίπεδα κ.λπ.). Στο κενό για τον ορισμό του **First Element** στο παράθυρο διαλόγου της εντολής απλά επιλέχθηκε το Plane (ZX στο Y=214,29mm), που δημιουργήθηκε νωρίτερα, ενώ στο κενό για τον ορισμό του **Second Element**, πατώντας το σύμβολο , επιλέχθηκαν οι γραμμές των L.E. και T.E. Τα νέα σημεία που δημιουργήθηκαν πάνω στις γραμμές των L.E. και T.E. είναι αυτά στα οποία μετέπειτα μετρήθηκε η απόσταση μεταξύ τους (Εικόνα W18).

Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου





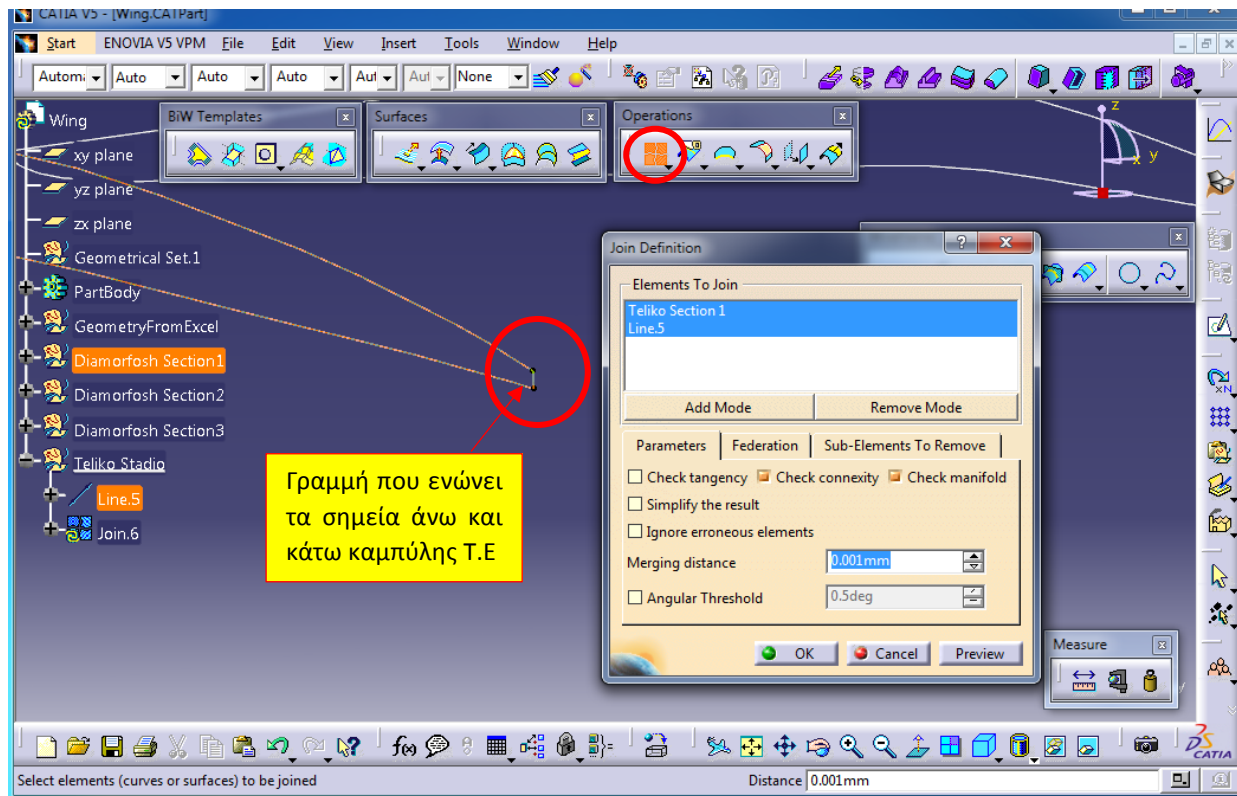
Εικόνα W18: Εντολή Intersection.

Η ολοκλήρωση της διαμόρφωσης του Section 2 αλλά και η διαμόρφωση του Section 3 πραγματοποιήθηκαν κατά αντιστοιχία με την διαμόρφωση του Section 1 που περιεγράφηκε αναλυτικά παραπάνω (Εικόνα W19).



Εικόνα W19: Τελικό αποτέλεσμα διαμόρφωσης Section 1,2,3.

Προχωρώντας για το τελικό στάδιο του σχεδιασμού, σε κάθε Section ενώθηκαν με μια κάθετη γραμμή, μέσω της εντολής **Line** , το σημείο του T.E της άνω καμπύλης με το αντίστοιχο της κάτω καμπύλης. Έπειτα χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Join**  στο κάθε Section και την αντίστοιχη γραμμή ένωσης με σκοπό την δημιουργία μια κλειστής καμπύλης για κάθε Section (Εικόνα W20).



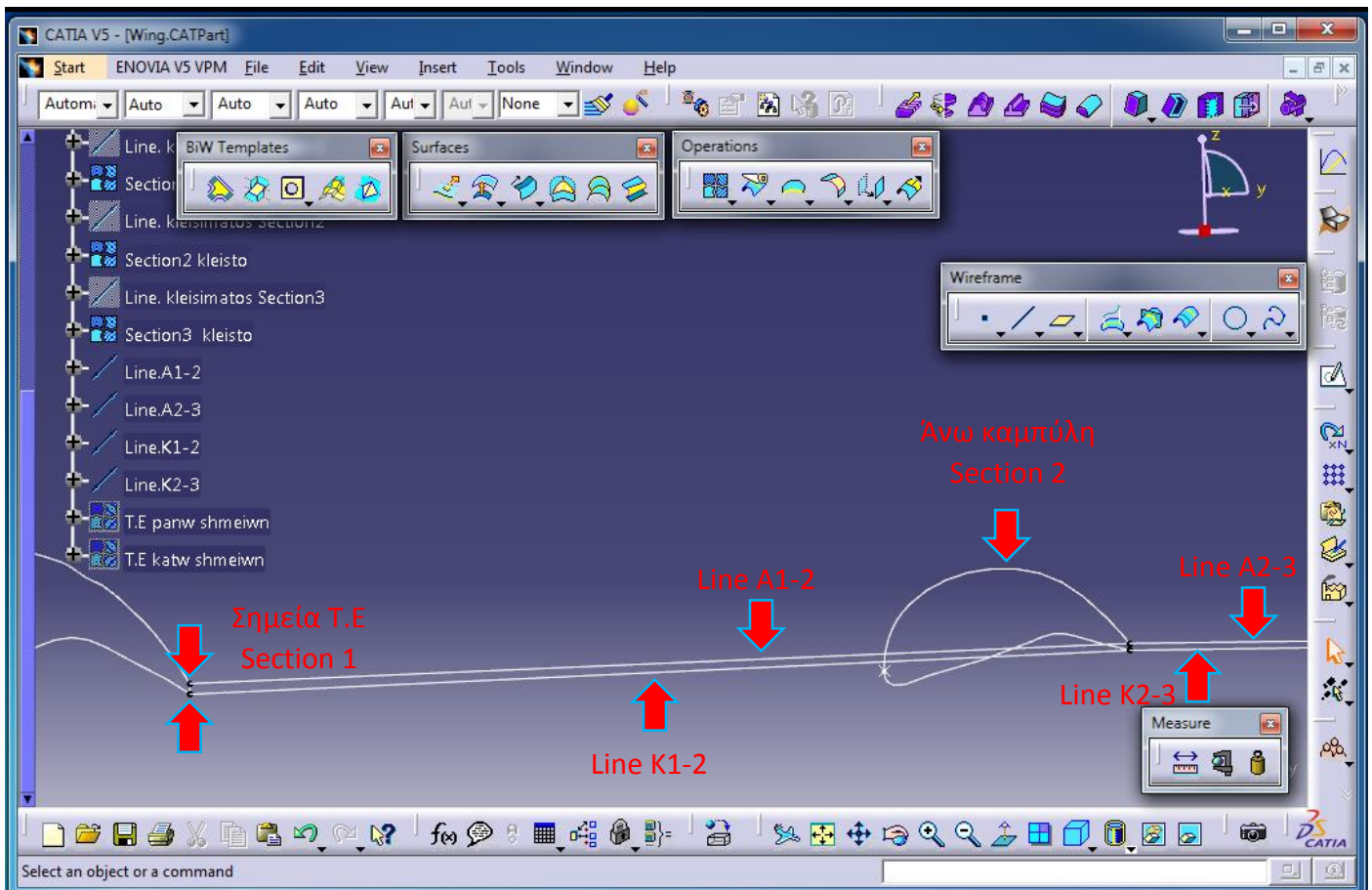
Εικόνα W20: Δημιουργία κλειστής καμπύλης σε κάθε Section

Στην συνέχεια με την εντολή **Line** , ενώθηκαν τα παρακάτω σημεία μεταξύ τους.

- Σημείο του T.E. της άνω καμπύλης Section 1 με το αντίστοιχο Section 2 (**Line A1-2**).
- Σημείο του T.E. της άνω καμπύλης Section 2 με το αντίστοιχο Section 3 (**Line A2-3**).
- Σημείο του T.E. της κάτω καμπύλης Section 1 με το αντίστοιχο Section 2 (**Line K1-2**).
- Σημείο του T.E. της κάτω καμπύλης Section 2 με το αντίστοιχο Section 3 (**Line K2-3**).

Και με την εντολή **Join**  ενώθηκαν οι παρακάτω γραμμές μεταξύ τους (Εικόνα W21).

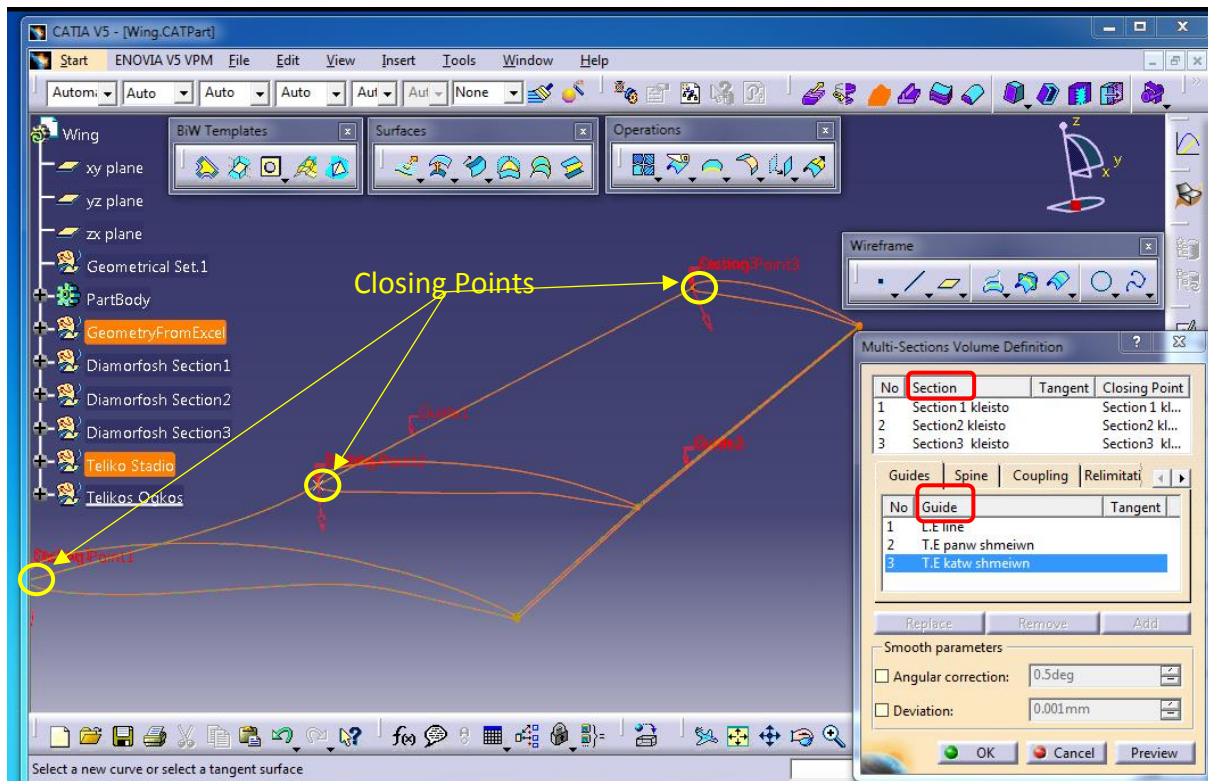
- **Line A1-2** με **Line A2-3** (T.E. panw shmeiwn).
- **Line K1-2** με **Line K2-3** (T.E. katw shmeiwn).



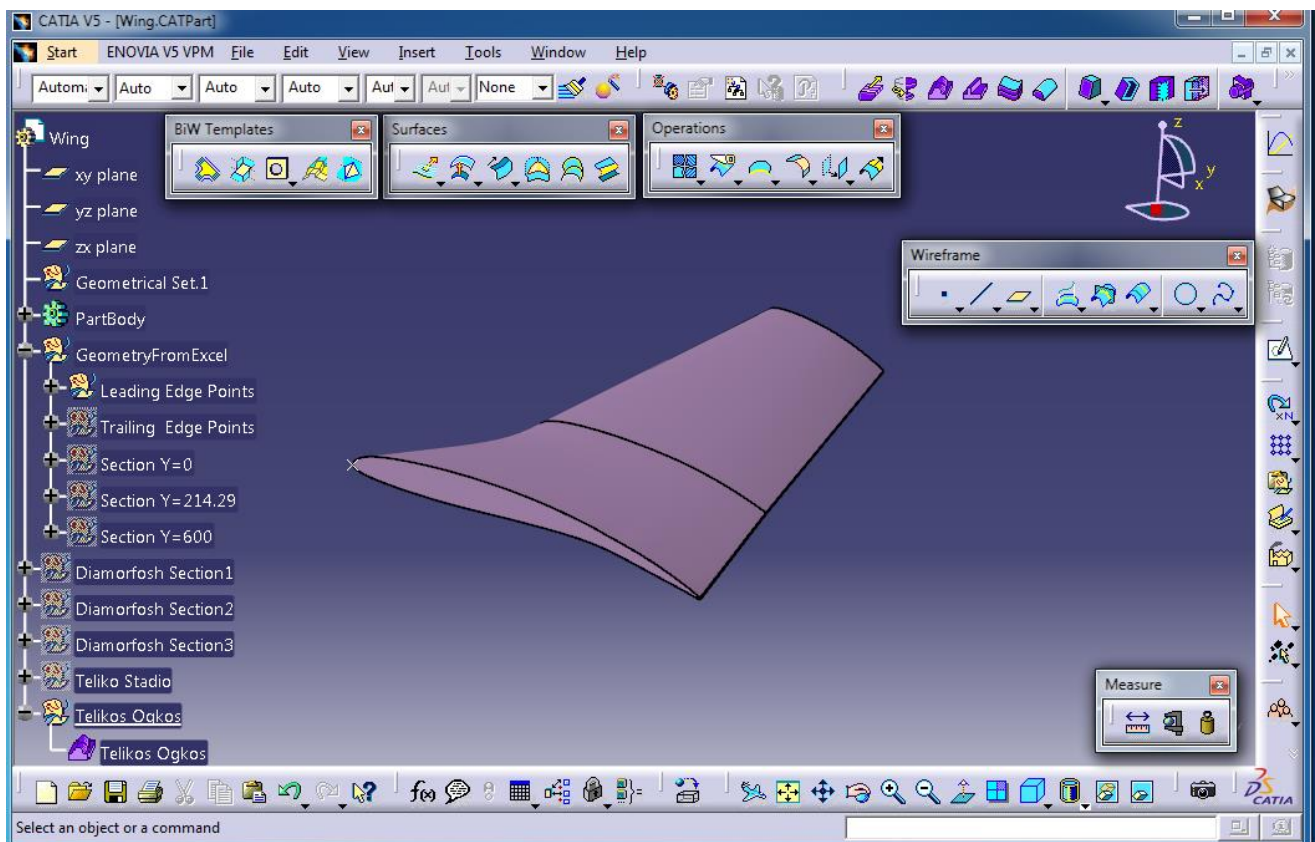
Εικόνα W21: Δημιουργία T.E γραμμών

Ολοκληρώνοντας με το σχεδιασμό της πτέρυγας δημιουργήθηκε ο τελικός όγκος. Για την δημιουργία του τελικού όγκου χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Multi-Sections Volume** από την γραμμή εργαλείων **Volumes**. Στο παράθυρο ορισμάτων της εντολής, στο κενό **Section** επιλέχθηκαν οι τρεις **κλειστές** καμπύλες των Sections της πτέρυγας **με την σειρά**. Στο κενό **Guide** επιλέχθηκαν οι τρεις γραμμές **L.E. line**, **T.E. panw shmeiwn**, **T.E. katw shmeiwn** (Εικόνα W22). Αξίζει να σημειωθεί ότι βασικό ρόλο στην σωστή δημιουργία του όγκου με αυτήν την εντολή παίζει ο ορισμός των **Closing Points**. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε τα σημεία αυτά σε κάθε Section να είναι τα **αντίστοιχα**.

Η τελική μορφή της πτέρυγας, καθώς επίσης και του δέντρου εντολών, εμφανίζονται στην Εικόνα W23. Σημειώνεται ότι το μοναδικό σχεδιαστικό σημείο που δεν αποκρύφτηκε με την εντολή **Hide** είναι το πρώτο σημείο της L.E γραμμής για $Y=0$, καθώς χρησιμοποιήθηκε αργότερα σαν **σημείο σύνδεσης** με την Άτρακτο.



Εικόνα W22: Δημιουργία όγκου πτέρυγας με την εντολή Multi-Sections Volume



Εικόνα W23: Τελική μορφή πτέρυγας

Σχεδιασμός Πτερυγίου Canard

➤ Συγκέντρωση Δεδομένων

Παρακάτω συγκεντρώνονται όλα τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά για το Canard που δίνονται στην αναφορά της Test Case E8.

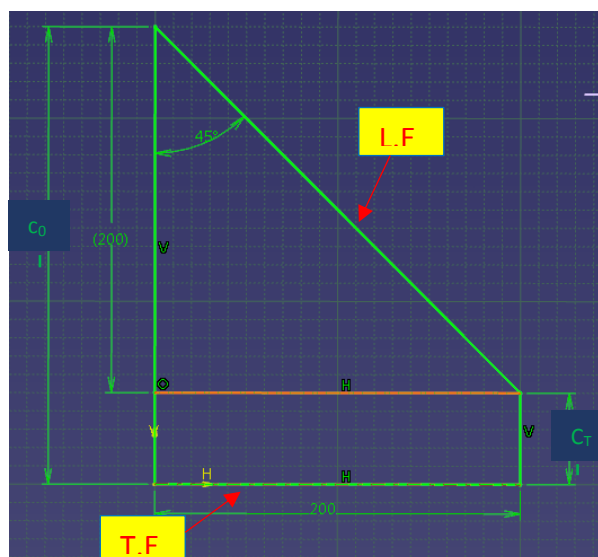
- Οπισθοκλινές πτερύγιο.
- Γωνία Leading Edge = 45° .
- Γωνία Trailing Edge = 0° .
- Taper Ratio = 0.2.
- Επιφάνεια (Area) = 0.060 m^2 . (Εικόνα 3)
- Ημiekπέτασμα (Semi-span) = 200 mm. (Εικόνα 3)
- Standard Mean Chord (SMC) = 150 mm. (Εικόνα 3)
- Mean Aerodynamic Chord (MAC) είναι στο σημείο $X = 54,083 \text{ cm}$ και $Z = -0,5 \text{ cm}$, το οποίο είναι και σημείο περιστροφής του Canard.
- Η κανονική θέση του Canard είναι με γωνία -3° .
- Έχει σχεδιαστικά χαρακτηριστικά αεροτομής NACA 64206.
- Η συστροφή (twist) του Canard είναι 0° στο κύριο σώμα και -4° (Nose down) στο ακροπτερύγιο (Tip). Εφαρμόζεται ως προς την μέση της χορδής c στο σημείο $\frac{c}{2}$ και γραμμικά από το κύριο σώμα προς το ακροπτερύγιο (Tip).

Επιπλέον, στον Πίνακα A3 του Παραρτήματος A ορίζεται η αεροτομή της πτέρυγας.

➤ Επεξεργασία Δεδομένων

Για τον σχεδιασμό του Canard ήταν αναγκαία η εύρεση επιπλέον χαρακτηριστικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων και ήταν απαραίτητα για τον άμεσο σχεδιασμό του Canard. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τη χρήση βασικής γεωμετρίας, καθώς επίσης και βασικών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών πτέρυγας.

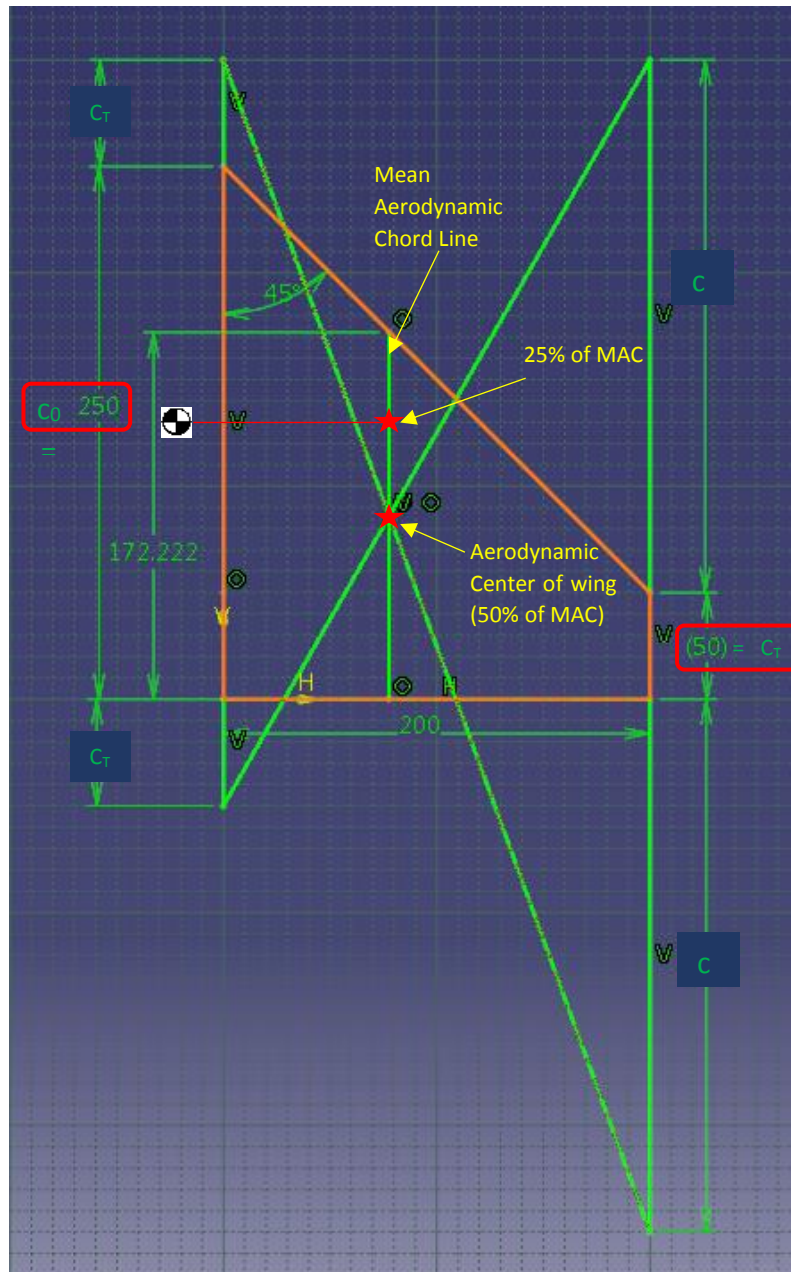
Αρχικά σχεδιάσαμε την κάτοψη του Canard με σκοπό τον υπολογισμό των c_0 και c_T .



Εικόνα C1: Κάτοψη Canard

Η κάτοψη χωρίζεται σε δυο σχήματα με την τοποθέτηση της πορτοκαλί γραμμής στην Εικόνα C1. Παρατηρείται ότι το τρίγωνο που σχηματίζεται στην πάνω πλευρά είναι ορθογώνιο ισοσκελές (γωνιά 45°). Κατά συνέπεια το μήκος της κάθετης πλευράς του θα είναι ίσο με το μήκος του T.E. (200 mm). Επιπλέον γνωρίζοντας ότι $\text{Taper Ratio} = \frac{c_T}{c_0} = 0.2$ συμπεραίνεται ότι $c_0 = 250 \text{ mm}$ και $c_T = 50 \text{ mm}$

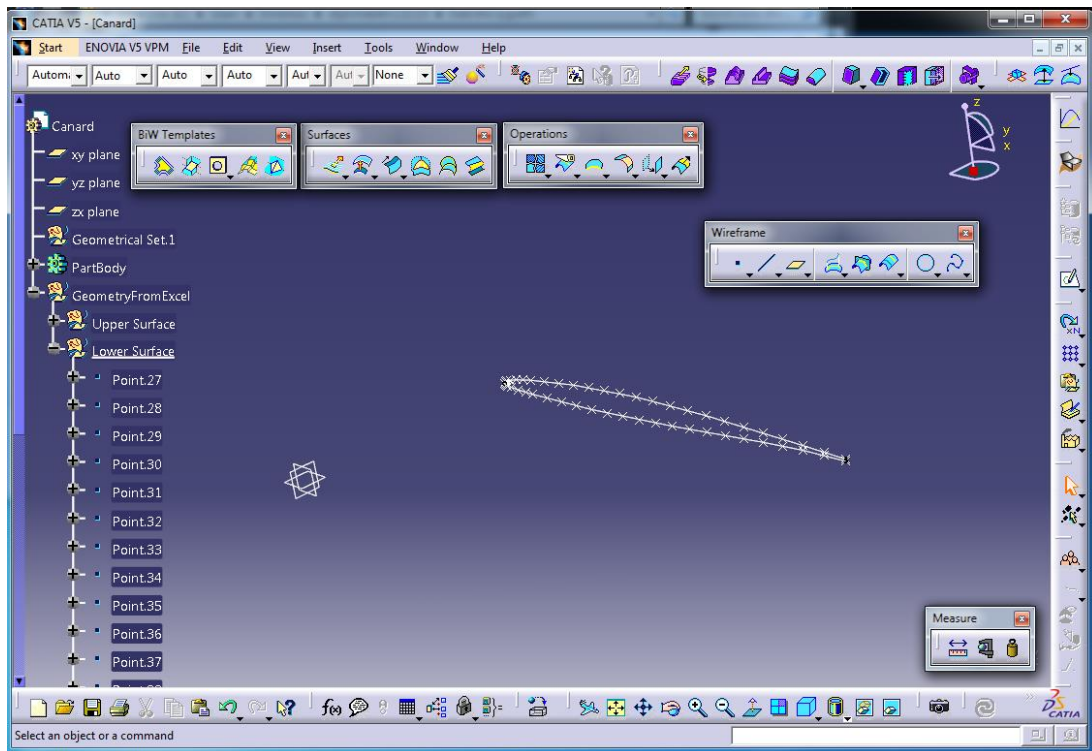
Στην συνέχεια βρέθηκε η MAC που θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα για την εύρεση του σημείου σύνδεσης του Canard με την Άτρακτο (Εικόνα C2).



Εικόνα C2: Mean Aerodynamic Chord του πτερυγίου Canard

➤ Προετοιμασία Περιβάλλοντος Εργασίας και Εισαγωγή Δεδομένων στο CATIA

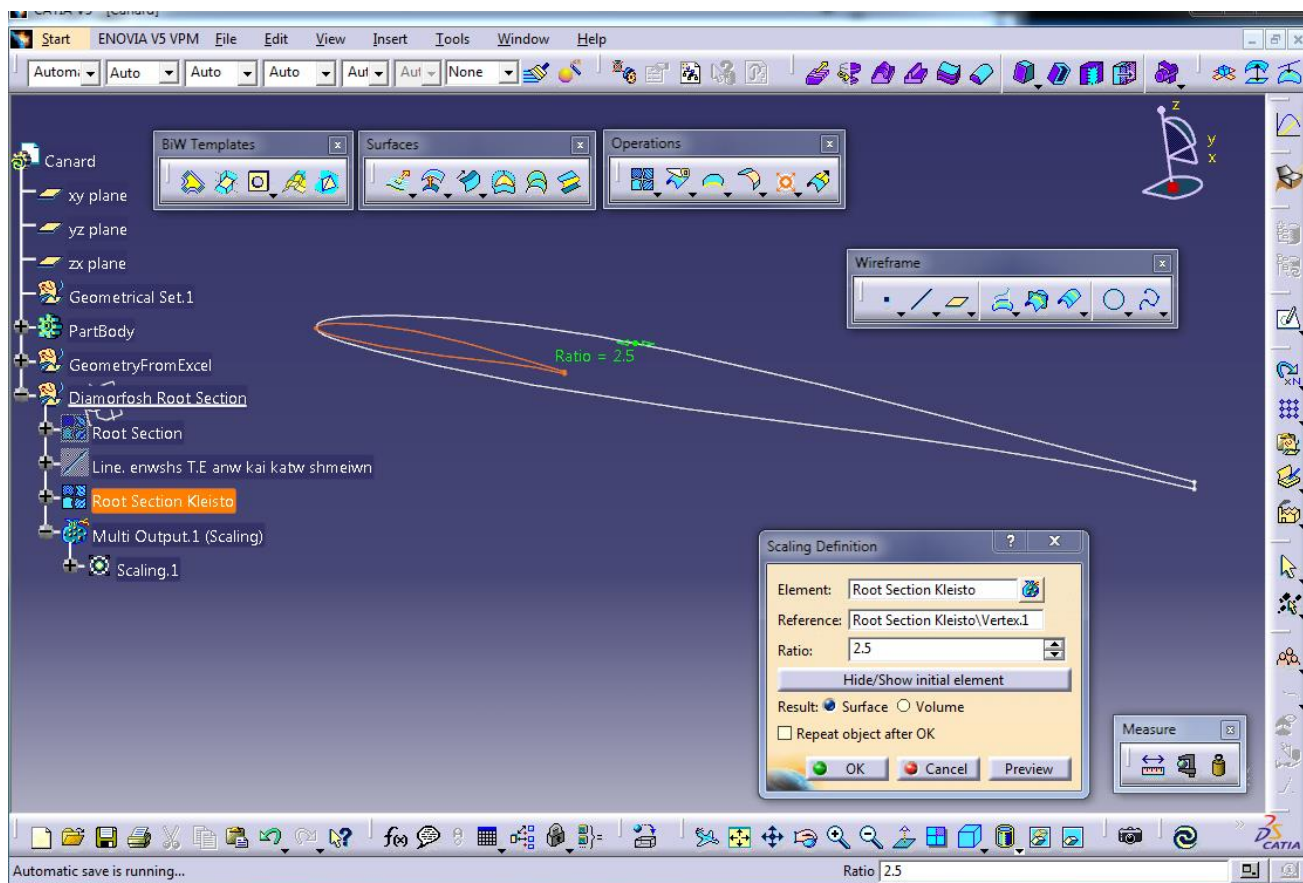
Για την προετοιμασία του περιβάλλοντος εργασίας και την εισαγωγή των δεδομένων στο CATIA ακολουθήθηκαν αντίστοιχες διαδικασίες με αυτές του σχεδιασμού της πτέρυγας. Μέσω του Microsoft Excel εισήχθησαν τα δεδομένα του Πίνακα A3 του Παραρτήματος Α, ως Upper και Lower Surface ξεχωριστά και για $Y = 65\text{mm}$.



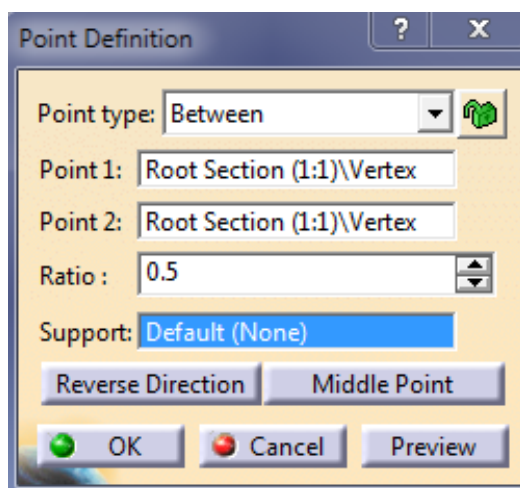
Εικόνα C3: Εισαγωγή δεδομένων Πίνακα A3 στο CATIA

➤ Διαμόρφωση Τελικής Μορφής στο Βοηθητικό Πτερύγιο

Το Section που δημιουργήθηκε από την εισαγωγή του Πίνακα A3 έχει μήκος χορδής $c=100\text{ mm}$. Αρχικά ενώθηκαν η πάνω και η κάτω καμπύλη του Section με την εντολή **Join** και έπειτα τα άνω και κάτω σημεία του T.E. με την δημιουργία μιας κάθετης γραμμής με την εντολή **Line** (Vertical Line (T.E Points, Root Section)). Στην συνέχεια δημιουργήθηκε μια ενιαία κλειστή καμπύλη με την ένωση του Section και της γραμμής που ενώνει τα σημεία του T.E. μέσω της εντολής **Join**. Έπειτα μεταβλήθηκε το Section στην επιθυμητή διάσταση, εφαρμόζοντας την εντολή **Scaling** με **Ratio 2.5** και **Reference** το **μπροστινό σημείο του Section** (Root Section) (Εικόνα C4). Με την εντολή **Point** από την γραμμή εργαλείων Wireframe βρέθηκε το σημείο στην μέση της κάθετης γραμμής, μεταξύ των άνω και κάτω T.E σημείων (Εικόνα C5). Από το σημείο αυτό δημιουργήθηκε μια γραμμή μέχρι το μπροστινό σημείο του Section, όπου ενώνεται με το L.E. Η νέα γραμμή αποτελεί την χορδή αυτής της αεροτομής. Επιπλέον, από το ίδιο σημείο δημιουργήθηκε άλλη μια γραμμή παράλληλη με τον άξονα Y (ZX plane) μήκους 200 mm και αποτέλεσε την γραμμή T.E. του Canard. Εφαρμόζοντας την εντολή **Scaling** στο Root Section με **Ratio = 0.2** και **Reference** το σημείο στη **μέση της Vertical Line (T.E Points, Root Section)** δημιουργήθηκε το **Tip Section**.

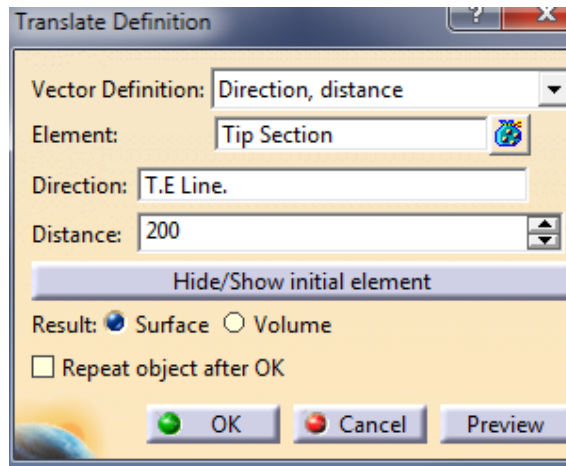


Εικόνα C4: Εντολή Scaling στο Root Section του Canard



Εικόνα C5: Παράθυρο διαλόγου εντολή Point

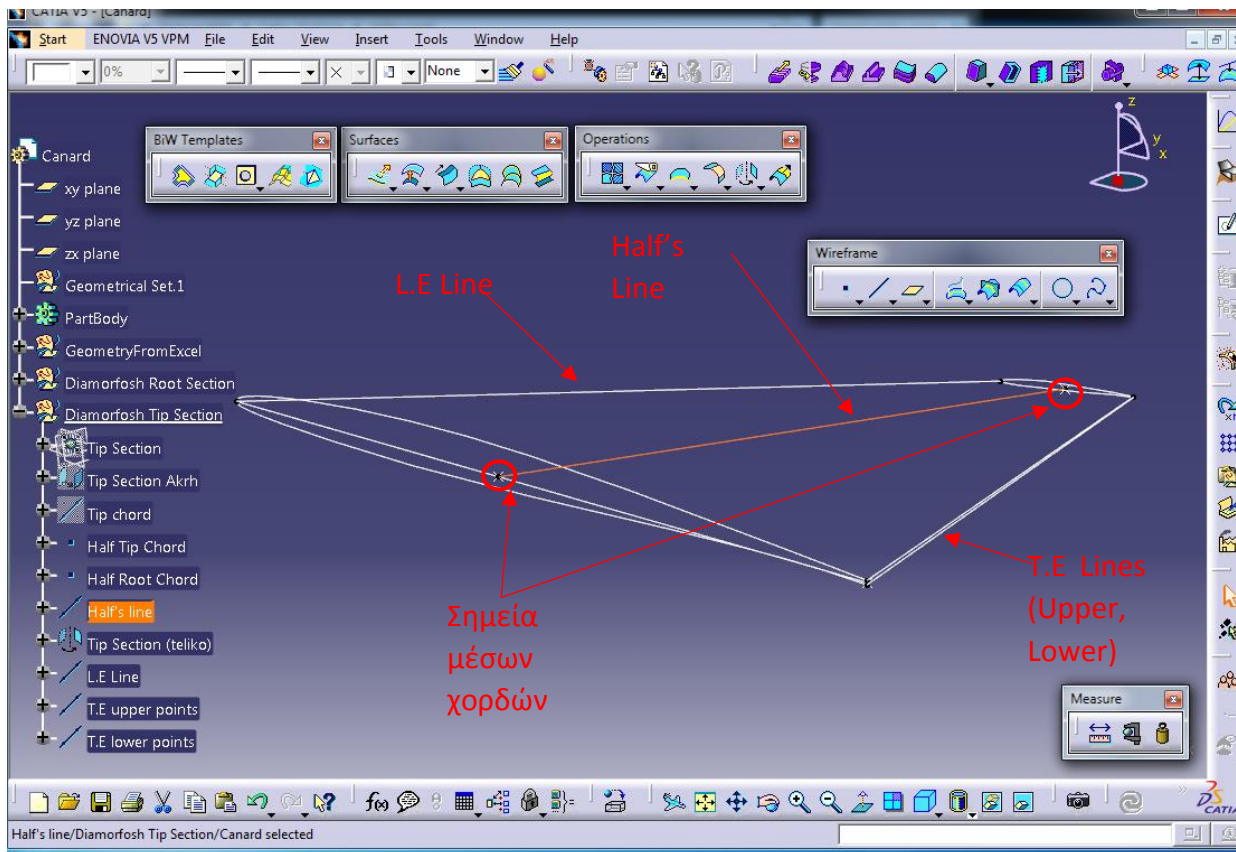
Χρησιμοποιώντας την εντολή **Translate**  μεταφέρθηκε το Tip Section στην άλλη άκρη της γραμμής T.E. του Canard (Εικόνα C6).



Εικόνα C6: Παράθυρο διαλόγου εντολή Translate

Για να πάρει το Tip Section την τελική του θέση χρειάστηκε να περιστραφεί επιπλέον ως προς το σημείο στη μέση της χορδής του. Για να επιτευχθεί αυτό, σχεδιάστηκε η χορδή του Tip Section αντίστοιχα με πριν και βρέθηκαν τα σημεία στη μέση κάθε χορδής με την εντολή **Point**. Τα σημεία αυτά ενώθηκαν μεταξύ τους με μια γραμμή (Half's Line). Μετά από την προεργασία

αυτή εφαρμόστηκε η εντολή **Rotate** και περιστράφηκε το Tip Section κατά -4° ως προς την Half's Line. Ολοκληρώνοντας το βασικό σχεδιασμό του Canard ενώθηκαν με γραμμές αντίστοιχα τα μπροστινά σημεία των Sections, δημιουργώντας την L.E. Line και τα άνω και κάτω σημεία των T.E. (Εικόνα C7).



Εικόνα C7: Βασικό σχέδιο Canard


Σε αυτό το σημείο της σχεδίασης πρακτικά είχε ολοκληρωθεί το βοηθητικό πτερύγιο. Εξαιτίας απαιτήσεων που προέκυψαν σε πιο προχωρημένο στάδιο της εργασίας καθώς και για λόγους ευελιξίας και αποφυγής δυσκολιών, κρίθηκε απαραίτητη η επέκταση του βοηθητικού πτερυγίου ώστε να εφάπτεται στο επίπεδο ZX ($Y = -65\text{mm}$). Επισημαίνεται δε ότι, το τμήμα της επέκτασης προς το επίπεδο ZX δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών του Canard (MAC, αεροδυναμικό κέντρο κ.α.). Η επέκταση σχεδιάστηκε **μόνο** για λόγους σωστής εφαρμογής της διαδικασίας ένωσης του Canard με την Άτρακτο.

Για το σχεδιασμό της επέκτασης απαιτήθηκε επιμήκυνση της **T.E Line**, που ξεκινάει από το σημείο στη μέση της απόστασης των T.E. Points του Root Section κατά 65 mm προς την κατεύθυνση του -Y. Αυτό είχε ως συνέπεια και την επιμήκυνση της χορδής στο νέο Section που δημιουργήθηκε (R_0 Section) κατά 65mm καθώς το Tip Section έμεινε σταθερό.

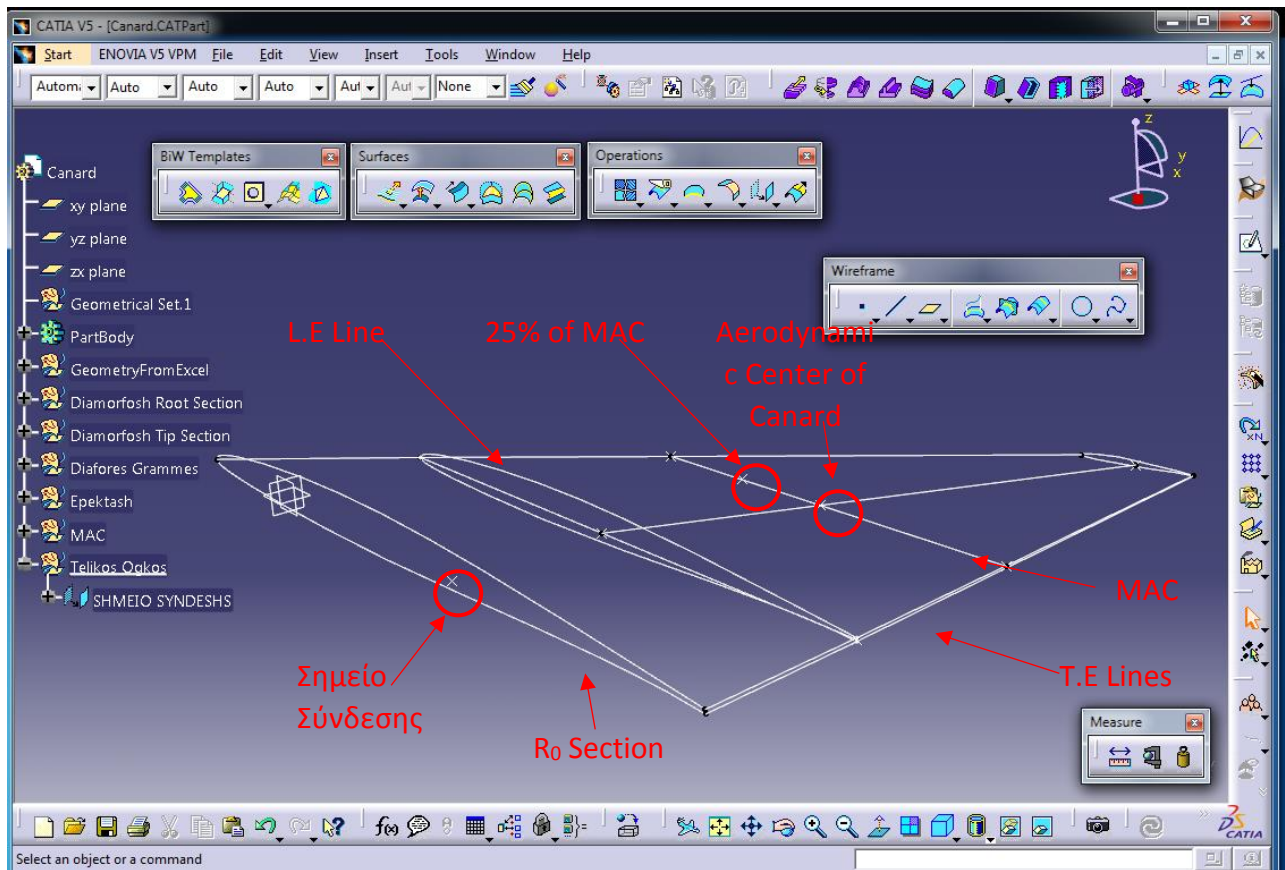
Αρχικά εφαρμόστηκε η εντολή **Line** για την επέκταση της T.E Line και στη συνέχεια η εντολή **Scaling** στο Root Section με **Ratio** = $315/250 = 1,26$ για τη δημιουργία του **R_0 Section**. Έπειτα με την εντολή **Translate** μεταφέρθηκε το R_0 Section πάνω στο επίπεδο ZX. Τέλος, επεκτείνοντας τις T.E γραμμές και την L.E γραμμή αντίστοιχα με προηγούμενως και κάνοντας τις ενιαίες με την εντολή **Join** ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός του Canard (Εικόνα C8).

Πριν δημιουργηθεί ο τελικό όγκος του Canard στην τελική μορφή του, σχεδιάστηκε επιπλέον η MAC στο σημείο που απεικονίζεται στην Εικόνα C2. Το σημείο που βρίσκεται στο 25% του μήκους MAC προβλήθηκε στο επίπεδο ZX και αποτελεί το σημείο σύνδεσης του Canard με την Άτρακτο με συντεταγμένες (540.83 , 0 , -5) στο σύστημα συντεταγμένων του M151/1 (Εικόνα C8).

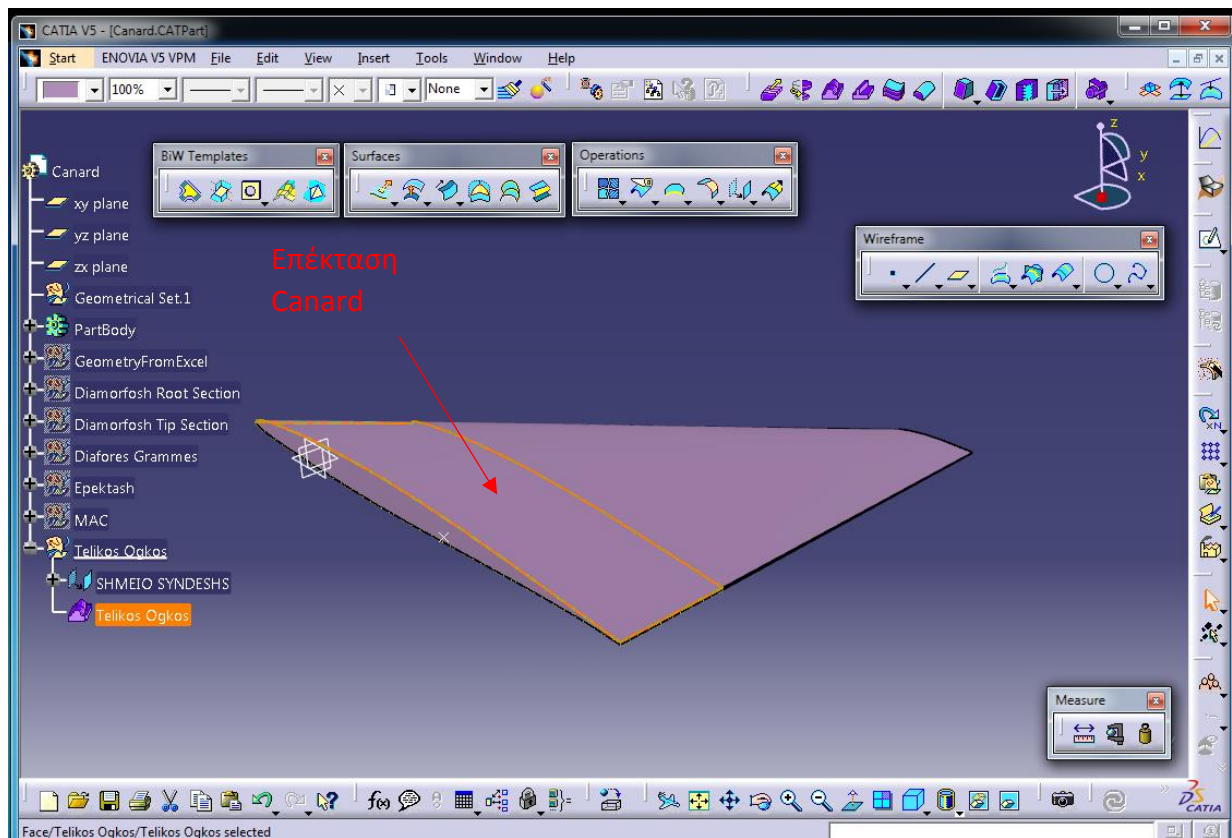
Για τη δημιουργία του τελικού όγκου του Canard χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Multi-Sections**

Volume  από τη γραμμή εργαλείων Volumes κατά αντιστοιχία με την διαδικασία δημιουργίας τελικού όγκου στην πτέρυγα που περιγράφεται στην Εικόνα W22 (Εικόνα C9).

Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



Εικόνα C8: Ολοκληρωμένο σχέδιο Canard



Εικόνα C9: Τελική μορφή Canard

Σχεδιασμός Ατράκτου (Fuselage)

➤ Συγκέντρωση Δεδομένων

Παρακάτω συγκεντρώνονται όλα τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά για την Άτρακτο που δίνονται στην αναφορά της Test Case E8.

- Ορθογωνική διατομή (πλάτος 13cm).
- Στρογγυλεμένες γωνίες ακτίνας $r=2\text{cm}$ μακριά από το ρύγχος (Nose).
- Αεραγωγός (Intake) στην κάτω πλευρά της Ατράκτου με ορθογωνική διατομή, ανοδική καμπυλότητα προς το πίσω μέρος της ατράκτου και στρογγυλεμένες γωνίες ακτίνας $r=2\text{cm}$ μακριά από το την αρχή του.
- Καλύπτρα (Canopy) ελλειπτικής διατομής μέχρι το $X=480\text{mm}$, η οποία ενώνεται στην ορθογωνικής διατομής άτρακτο για $X=900\text{mm}$.
- Βασική δομή ατράκτου με σταθερό πλάτος 13cm, όπου ελαττώνεται σταδιακά στα 12cm και στη συνέχεια στα 10cm στο πίσω τμήμα της. (Parallel Fuselage)
- Δεύτερη δομή ατράκτου με μέγιστο πλάτος 20,119cm κοντά στο χείλος εκφυγής της πτέρυγας. (Expanding Fuselage)

Επιπλέον, στο Πίνακα A4 του Παραρτήματος A ορίζεται η μαθηματική περιγραφή της Ατράκτου (Fuselage, Canopy, Intake), όπως δίνονται στην αναφορά.

➤ Επεξεργασία Δεδομένων

Για την εισαγωγή των δεδομένων του Πίνακα A4 του Παραρτήματος A απαιτείται πρωτίτερα η επεξεργασία των εξισώσεων που δίνονται. Κατασκευάστηκαν Πίνακες σημείων (X, Y, Z) για κάθε καμπύλη, όπου καταχωρήθηκαν οι εξισώσεις όπως αντίστοιχα εφαρμόστηκε στο σχεδιασμό της πτέρυγας. Στον άξονα X ορίστηκαν 170 σημεία με βήμα μεταβολής 10mm και επίσης τα σημεία αλλαγής ορίων που δεν εμπεριέχονται σε αυτά, καθώς η Άτρακτος φέρει μήκος $170\text{cm}=1700\text{mm}$. Σημειώνεται ότι τα σημεία των εξισώσεων της καλύπτρας (Canopy) και της εξίσωσης της καμπύλης Fuselage Plan View – Expanding Bodyside ($882.745 \leq X \leq 1330\text{mm}$) στον άξονα X ορίστηκαν με βήμα μεταβολής 5mm.

Η τρίτη συντεταγμένη για κάθε σημείο ορίζεται **μηδέν** σε κάθε Πίνακα που απαιτείται. Εξαιρείται ο Πίνακας της καμπύλης **Fuselage Plan View – Parallel Bodyside**, όπου απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στον ορισμό της συντεταγμένης Z στα σημεία $0 \leq X \leq 550\text{mm}$. Λόγω απαιτήσεων του σχεδιασμού σε μετέπειτα στάδιο, η συντεταγμένη Z ορίστηκε ως **η μέση των σημείων των Fuselage Upper και Fuselage Lower καμπυλών ως προς την συντεταγμένη Z [(Z_{Fu} + Z_{FL})/2]**. Η τροποποίηση των δεδομένων αυτών πραγματοποιήθηκε για την ευκολότερη επίτευξη της καμπυλότητας της Ατράκτου ως προς την κατεύθυνση -Z στο τμήμα του ρύγχους ($0 \leq X \leq 550\text{mm}$).

➤ Προετοιμασία Περιβάλλοντος Εργασίας και Εισαγωγή Δεδομένων στο CATIA

Για την προετοιμασία του περιβάλλοντος εργασίας και την εισαγωγή των δεδομένων στο CATIA ακολουθήθηκαν αντίστοιχες διαδικασίες με αυτές του σχεδιασμού της πτέρυγας και του Canard. Μέσω του Microsoft Excel εισήχθησαν τα δεδομένα του Πίνακα A4 του Παραρτήματος A. Εισήχθησαν ξεχωριστά οι παρακάτω καμπύλες:

- Fuselage Upper.
- Fuselage Lower.
- Fuselage Plan View – Parallel Bodyside για $0 \leq X \leq 550\text{mm}$.
- Fuselage Plan View – Parallel Bodyside για $550 \leq X \leq 1700\text{mm}$.
- Fuselage Plan View – Expanding Bodyside για $882.745 \leq X \leq 1700\text{mm}$.
- Canopy Upper.
- Canopy Plan View.
- Intake Lower.
- Intake Plan View.

Σημειώνεται ότι τα δεδομένα των γωνιών και του Canopy Section εισήχθησαν κατά το σχεδιασμό μέσω CATIA.

➤ Διαμόρφωση Τελικής Μορφής Ατράκτου

Στην παρούσα φάση της εργασίας απαιτήθηκε ο σχεδιασμός δυο διαφορετικών γεωμετριών Ατράκτου (Parallel - Expanding). Πιο συγκεκριμένα, οι δύο γεωμετρίες διέφεραν στο τμήμα για $882.745 \leq X \leq 1700\text{ mm}$. Το γεγονός αυτό έδωσε την δυνατότητα τροποποίησης της πρώτης γεωμετρίας που σχεδιάστηκε (Parallel) με σκοπό τον ευκολότερο και ταχύτερο σχεδιασμό της δεύτερης (Expanding).


Η λογική σχεδίασης που εφαρμόστηκε για την δημιουργία της Ατράκτου είναι ο **τμηματικός** σχεδιασμός κατά μήκος της με την δημιουργία **ξεχωριστών τομών** (Section) στα κύρια μέρη της (Canopy – Fuselage - Intake), όπου η ολική τομή είναι πολύπλοκη, και **ενιαίων τομών** στα τμήματα με απλούστερη ολική τομή. Η επιλογή αυτού του τρόπου σχεδίασης έγινε για λόγους αποφυγής προβλημάτων σε μετέπειτα στάδιο της εργασίας, λόγω συμβατότητας των εμπορικών λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν (CATIA - ANSYS) και όχι με γνώμονα τον ευκολότερο και ταχύτερο σχεδιασμό. Τα βασικά τμήματα που χωρίστηκε η Άτρακτος για τις απαιτήσεις του σχεδιασμού της είναι τα παρακάτω.

- Fuselage για X από 0-450 mm.
- Canopy για X από 237.5-450 mm.
- Fuselage - Canopy για X από 450-500 mm.
- Intake για X από 267.7-500 mm.
- Fuselage – Canopy - Intake για X από 500-550 mm.
- Fuselage – Canopy - Intake για X από 550-900 mm.
- Fuselage –Intake για X από 900-1700 mm.

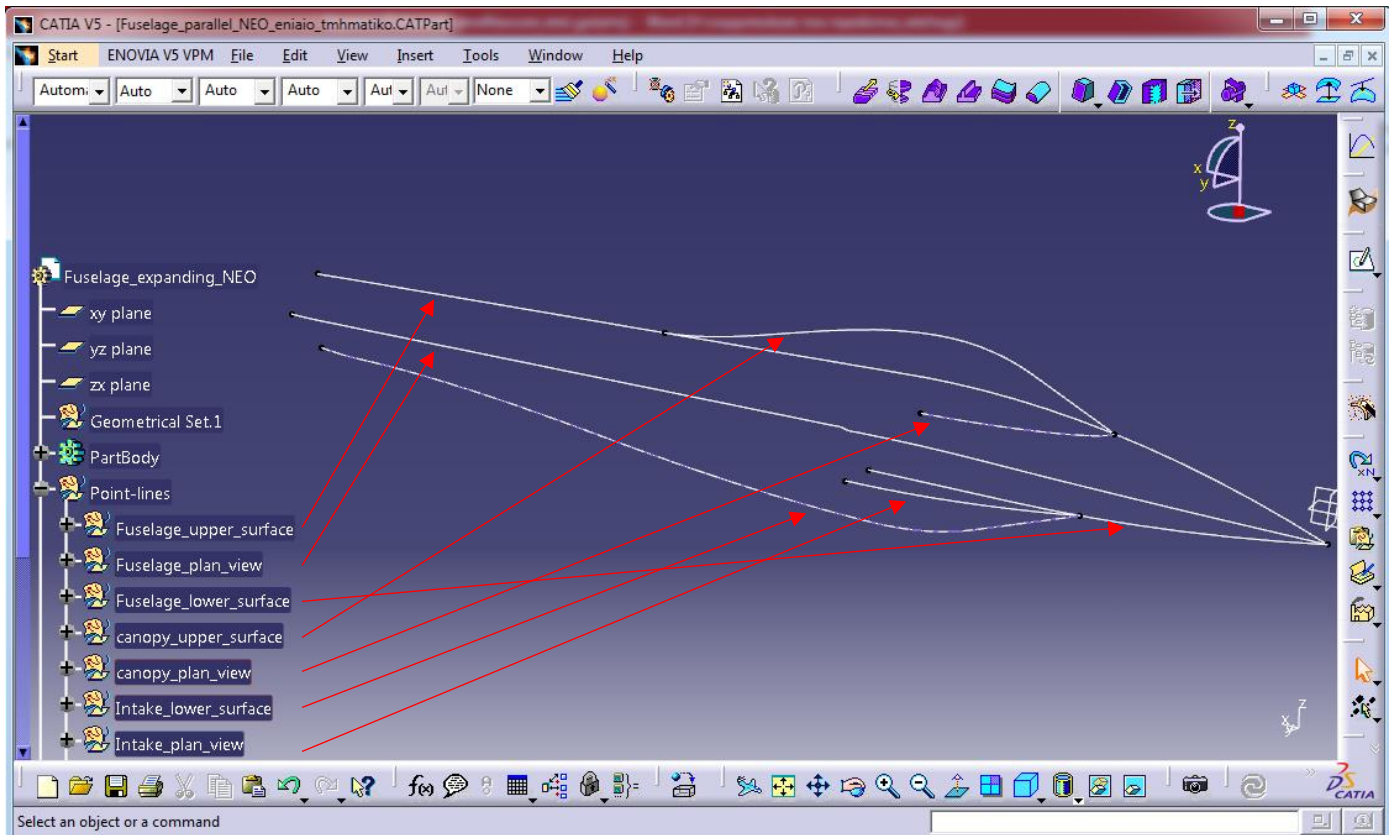
Σημειώνεται ότι τα παραπάνω βασικά τμήματα αποτελούνται από επιμέρους μικρότερα με κοινό χαρακτηριστικό το βασικό σχήμα της τομής τους αλλά με διαφορετικές διαστάσεις.

❖ Δημιουργία Μη Διογκωμένης Ατράκτου (Parallel)




Καθώς τα σημεία έχουν εισαχθεί και δημιουργήθηκαν οι καμπύλες, μεταφέρθηκαν στην

τελική τους θέση με την εντολή **Translate** . Οι καμπύλες που μεταφέρθηκαν είναι η **Canopy Plan View** προς την φορά του άξονα +Z, ώστε το αρχικό της σημείο να ταυτίζεται με το σημείο ένωσης των καμπυλών Fuselage Upper και Canopy Upper όπως επίσης και η καμπύλη **Intake**

Plan View προς την φορά του άξονα -Z ώστε το αρχικό της σημείο να ταυτίζεται με το σημείο ένωσης των καμπυλών Fuselage Lower και Intake Lower (Εικόνα F1).

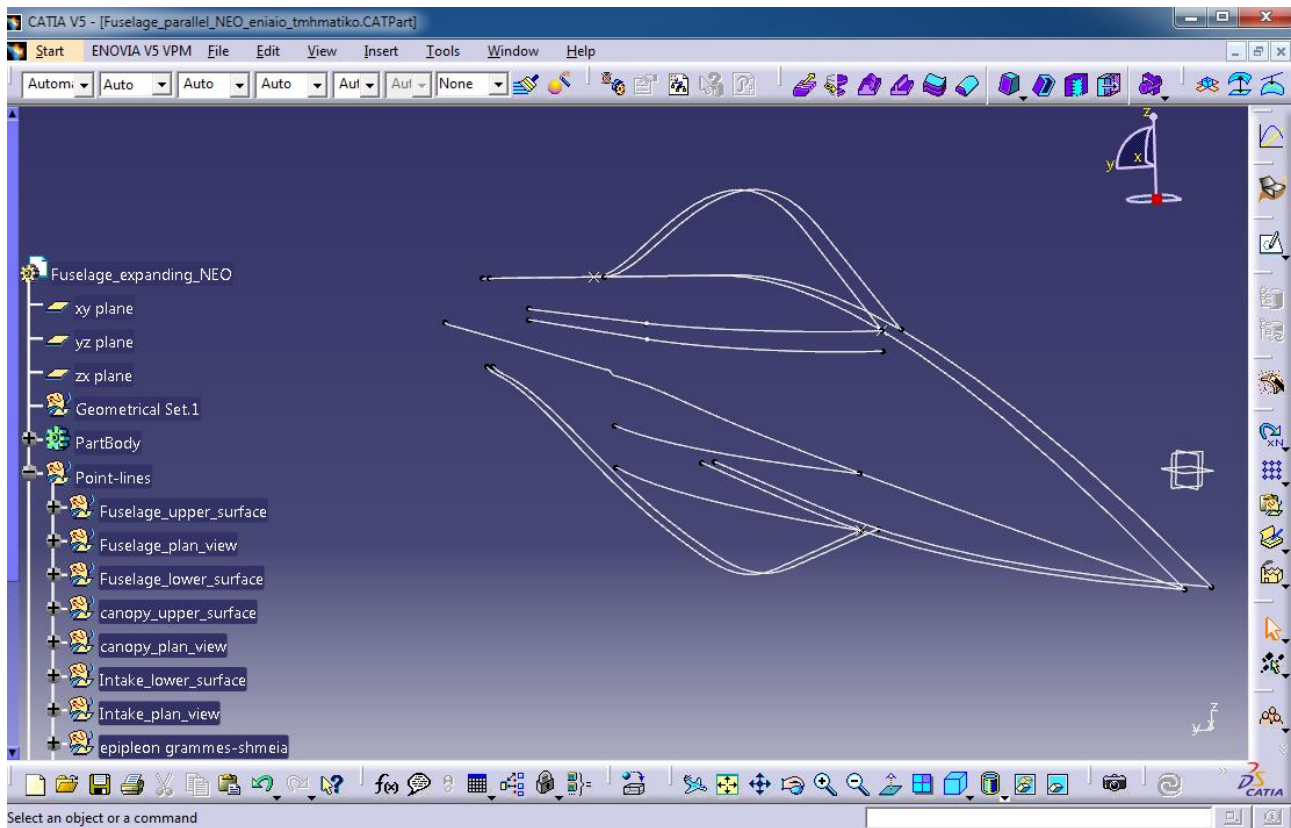


Εικόνα F1: Καμπύλες σχεδιασμού Ατράκτου (τελική θέση)


Στην συνέχεια, δημιουργήθηκε μια ευθεία παράλληλη με τον άξονα X, που ξεκινούσε από το τελικό σημείο της καμπύλης Canopy_Plan_View και τελείωνε στο σημείο για X=900 mm (**Line** ). Έπειτα αυτές οι δύο γραμμές ενώθηκαν (**Join** ) δημιουργώντας την γραμμή **Canopy_Plan_View_All**. Η τελική γραμμή **Canopy_Plan_View_All** μεταφέρθηκε κατά Z= -10 mm (**Translate** ) δημιουργώντας μια νέα γραμμή χωρίς να γίνει ωστόσο απόκρυψη της μητρικής. Αντίστοιχα μεταφέρθηκαν και οι παρακάτω γραμμές (Εικόνα F2):

- **Fuselage Upper Surface** κατά Y=-10 mm.
- **Fuselage Lower Surface** κατά Y=-10 mm.
- **Canopy Upper Surface** κατά Y=-10 mm.
- **Intake Lower Surface** κατά Y=-10 mm.
- **Intake Plan View** κατά Z=30 mm.

Η παραπάνω διαδικασία μεταφοράς των γραμμών πραγματοποιήθηκε με σκοπό την καλύτερη ένωση των όγκων που θα δημιουργηθούν αργότερα και την αποφυγή προβλημάτων σε επόμενο στάδιο της εργασίας.





Εικόνα F2: Μεταφορά βασικών γραμμών







Με την ολοκλήρωση των βασικών γραμμών όπου θα χρησιμοποιηθούν ως οδηγοί στην δημιουργία των όγκων ξεκινάει ο σχεδιασμός των τομών (Sections) της Ατράκτου. Σχεδιάστηκαν πολλά Sections κατά μήκος του άξονα X. Για τον λόγο αυτό απαιτήθηκε η δημιουργία επιπέδων (Planes) παράλληλα στο επίπεδο YZ για τα αντίστοιχα X που σχεδιάστηκαν οι τομές. Αυτό επετεύχθη με την εντολή **Plane**  και επιλέγοντας συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων της εντολής από το παράθυρο διαλόγου. Τα επίπεδα αυτά στην συνέχεια μετονομάστηκαν με βάση την συντεταγμένη X.

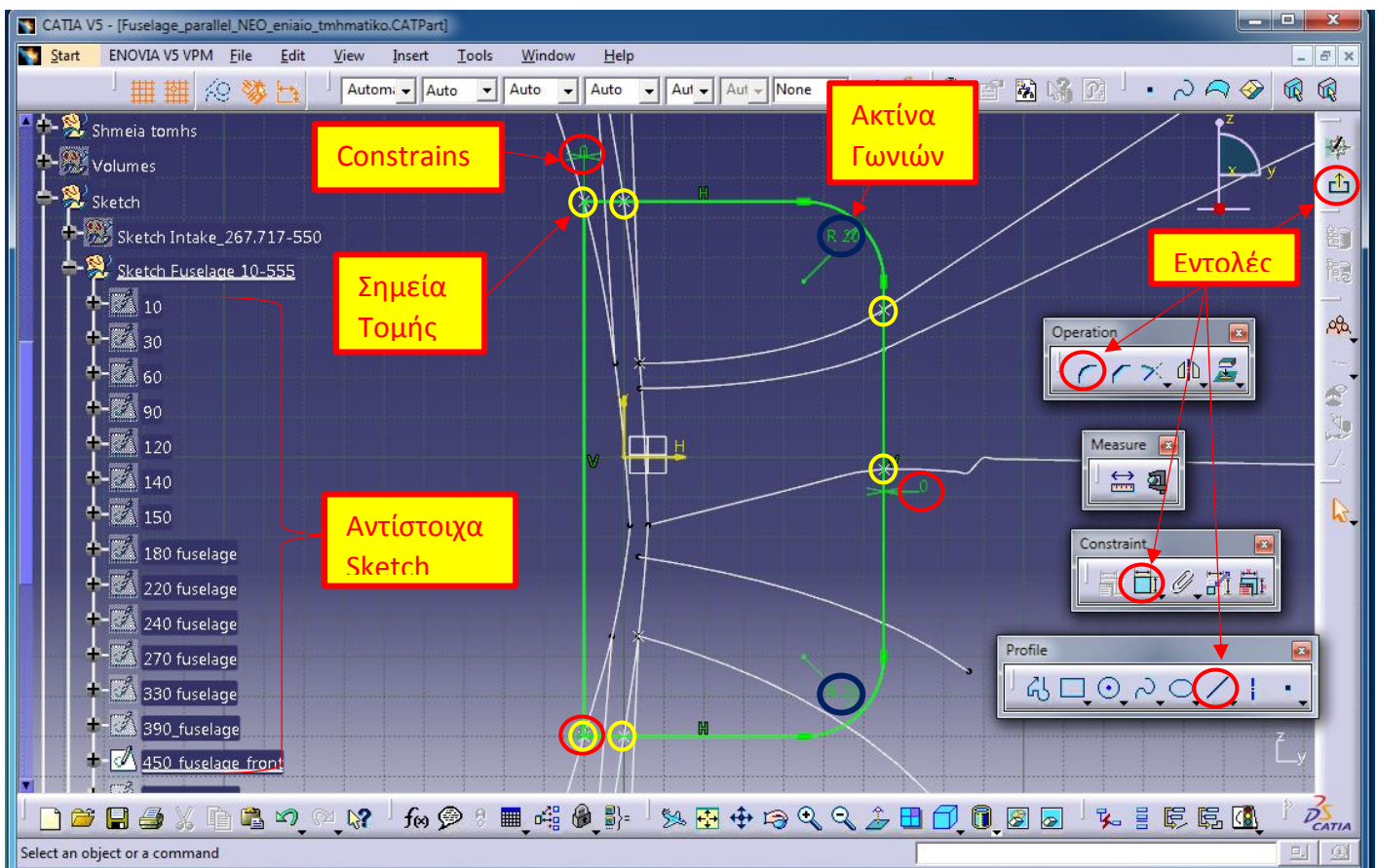
Δημιουργήθηκαν τα παρακάτω επίπεδα:

- Από X=10 mm έως X=220 mm ανά 30 mm.
- Από X=240 mm έως X=390 mm ανά 30 mm.
- Από X=450 mm έως X=500 mm ανά 10 mm.
- Από X=500 mm έως X=900 mm ανά 50 mm.
- Και επιπλέον για X= 140/ 237,5/ 255/ 267,7/ 400/ 1300/ 1500/ 1700 mm.

Για κάθε Plane απαιτείται η εύρεση των σημείων που τέμνει τις βασικές γραμμές σχεδίασης με την εντολή **Intersection**  και την χρήση της μαζικής επιλογής  (Σημεία Τομής).

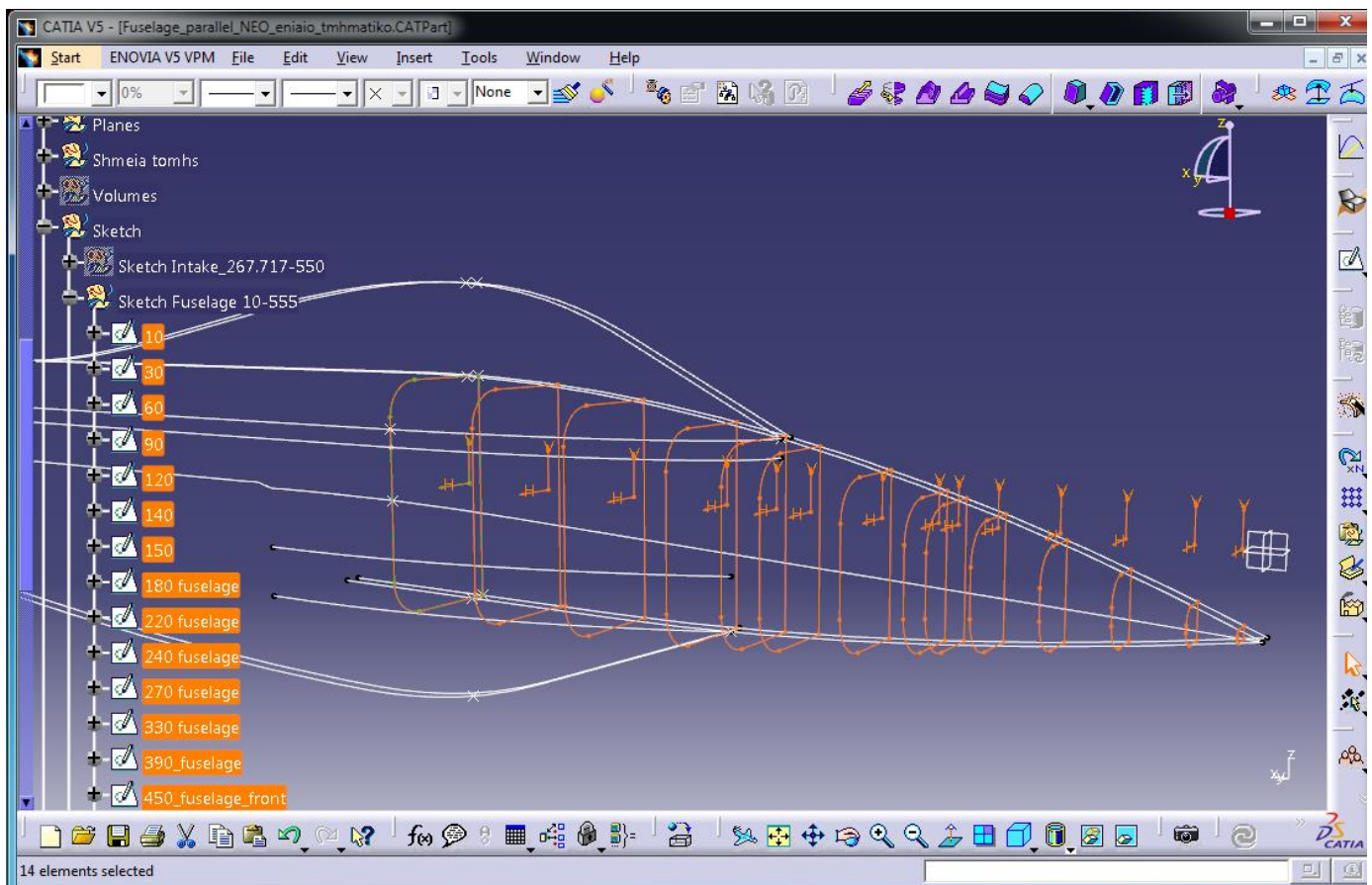
Έχοντας ορίσει τα Plane πάνω στα οποία επρόκειτο να σχεδιαστούν οι τομές άρχισε ο σχεδιασμός του βασικού τμήματος **Fuselage για X=0-450mm**. Επιλέγοντας το **Plane 450** και

έπειτα την εντολή **Sketch**  το ενεργό περιβάλλον του CATIA διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να επιτρέπεται ο σχεδιασμός πάνω στο επιλεγμένο επίπεδο. Με την χρήση των εντολών **Line**  της γραμμής εργαλείων **Profile** και της εντολής **Corner**  της γραμμής εργαλείων **Operation** σχεδιάστηκε το κατάλληλο Section (Εικόνα F3). Στη συνέχεια με τη χρήση της εντολής **Constraint**  της γραμμής εργαλείων **Constraint** ορίστηκαν οι απαραίτητοι περιορισμοί μεταξύ των γραμμών και των ακραίων σημείων των γραμμών που σχεδιάστηκαν με τα Σημεία Τομής του Plane (Εικόνα F3). Σημειώνεται δε ότι, η ακτίνα των γωνιών που προκύπτουν από την εντολή **Corner**  ορίζονται σύμφωνα με τον πίνακα που έχει δημιουργηθεί από τις εξισώσεις **Fuselage Corner Radius** του Πίνακα A4 στο Παράρτημα Α. Τέλος, επιλέγοντας το Exit Workbench  ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός του Section.




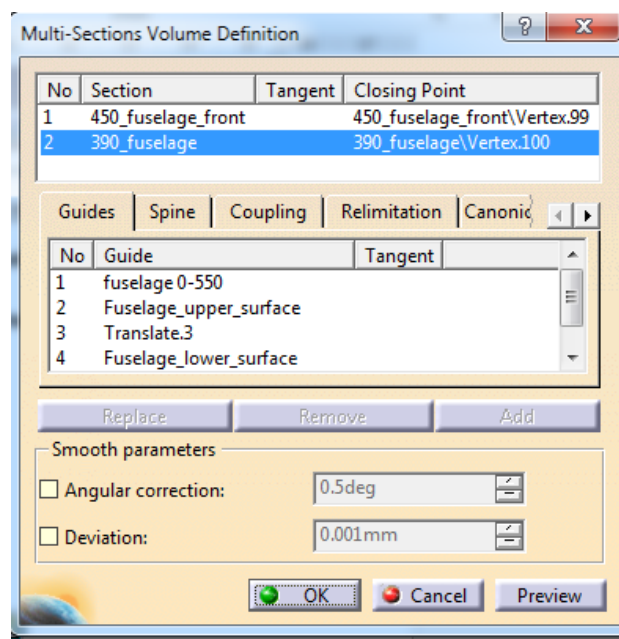
Εικόνα F3: Σχεδιασμός Fuselage Section στο επίπεδο για X=450mm

Επιλέγοντας το Sketch που ολοκληρώθηκε για X= 450 mm, πατώντας δεξί κλικ στο ποντίκι και την επιλογή Copy, υπάρχει η δυνατότητα αντιγραφής του. Έπειτα επιλέγοντας ένα άλλο Plane και την επιλογή Paste δημιουργείται ένα ίδιο Sketch πάνω στο νέο επίπεδο. Μεταβάλλοντας τους **περιορισμούς (Constraint)** με βάση τα δεδομένα του νέου Plane και με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να **μην αφαιρεθεί ή να προστεθεί**, κατά την διαμόρφωση, κάποια γραμμή ή κάποιο σημείο στο νέο Sketch, ολοκληρώνεται η δημιουργία ενός **αντίστοιχου Sketch** με το πρώτο. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω δημιουργήθηκαν όλα τα αντίστοιχα Sketch της Εικόνας F3 (Εικόνα F4).

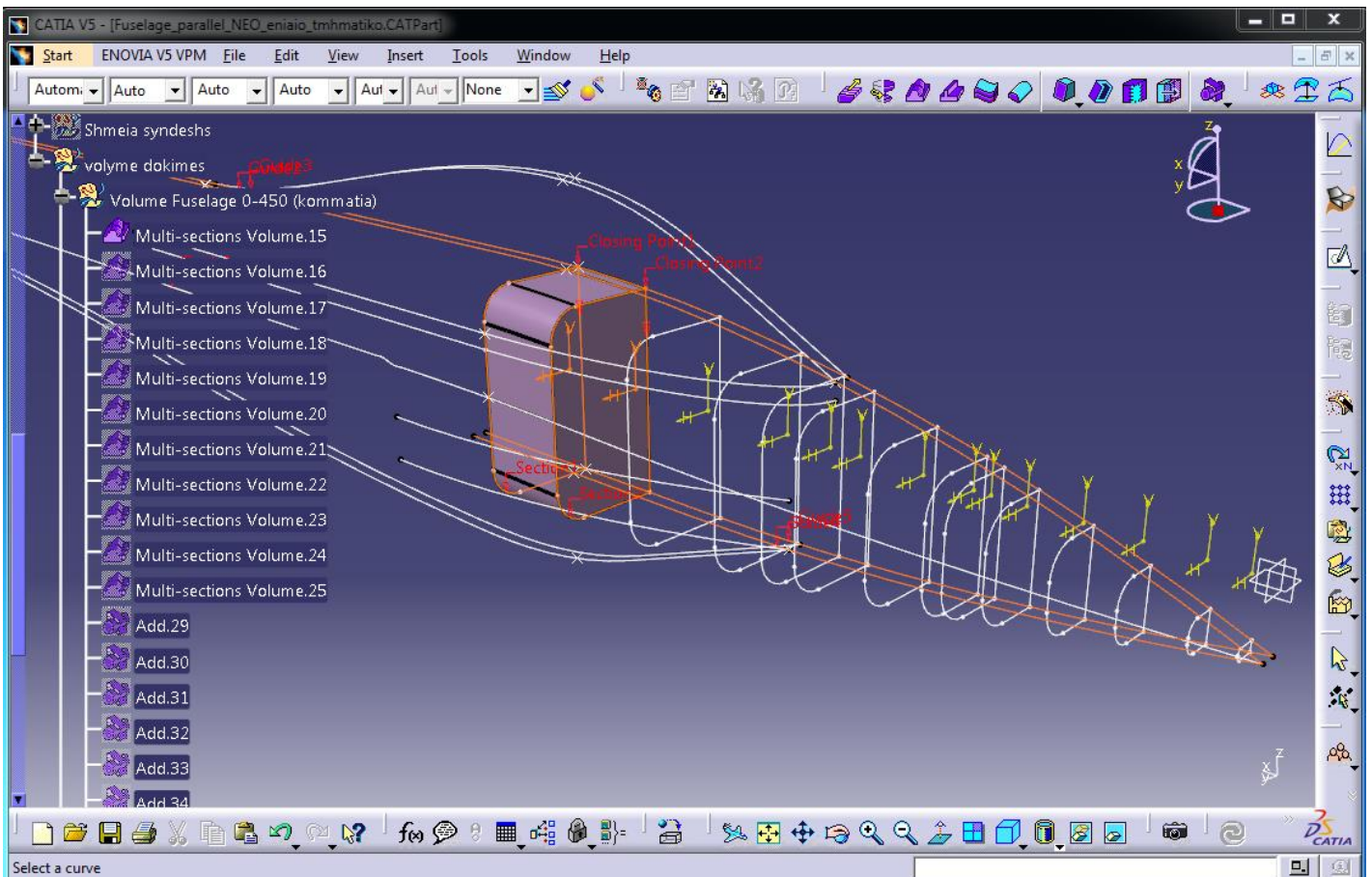


Εικόνα F4: Αντίστοιχα Sketch με το Fuselage Sketch για X=450mm

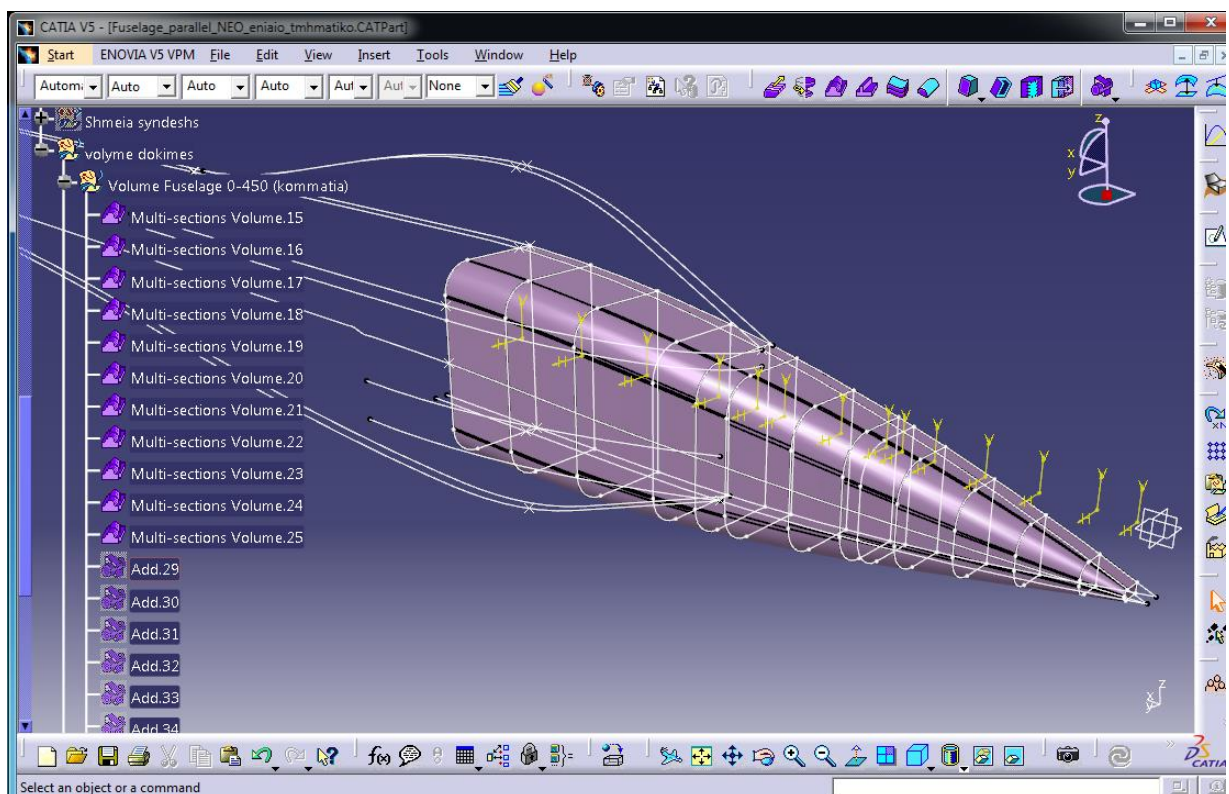
Η δημιουργία του όγκου στο βασικό τμήμα **Fuselage** για **X=0-450mm** πραγματοποιήθηκε με την χρήση της εντολής **Multi-Sections Volume**  και εφαρμόζοντας την με την σειρά ανά δύο Section (Εικόνες F5,F6,F7).



Εικόνα F5: Παράθυρο διαλόγου εντολής Multi-Sections Volume

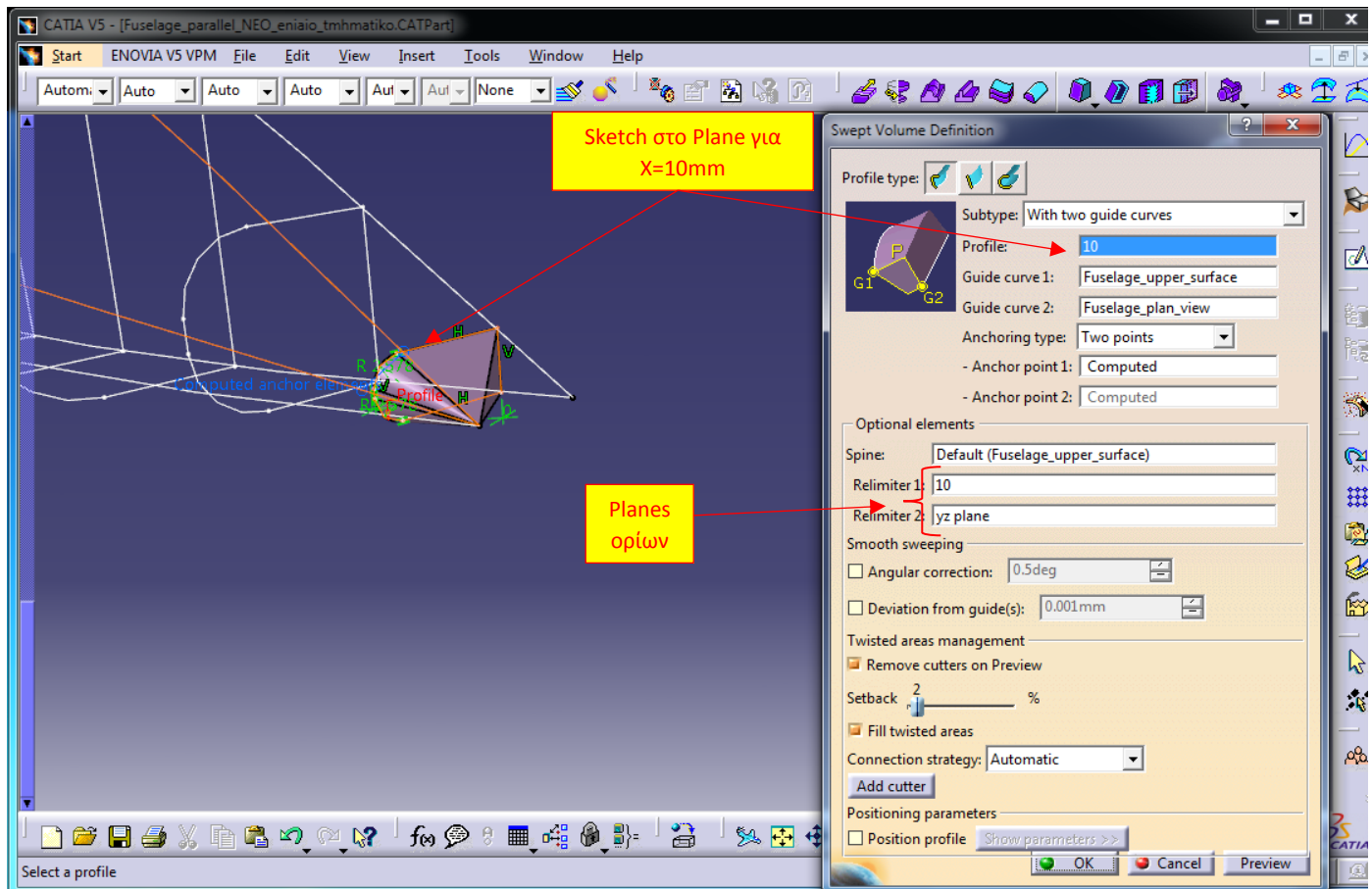


Εικόνα F6: Εφαρμογή εντολή Multi-Sections Volume στα Section για $X=450\text{mm}$ και $X=390\text{mm}$



Εικόνα F4: Δημιουργία τμημάτων όγκου στο βασικό τμήμα Fuselage για $X=0-450\text{mm}$

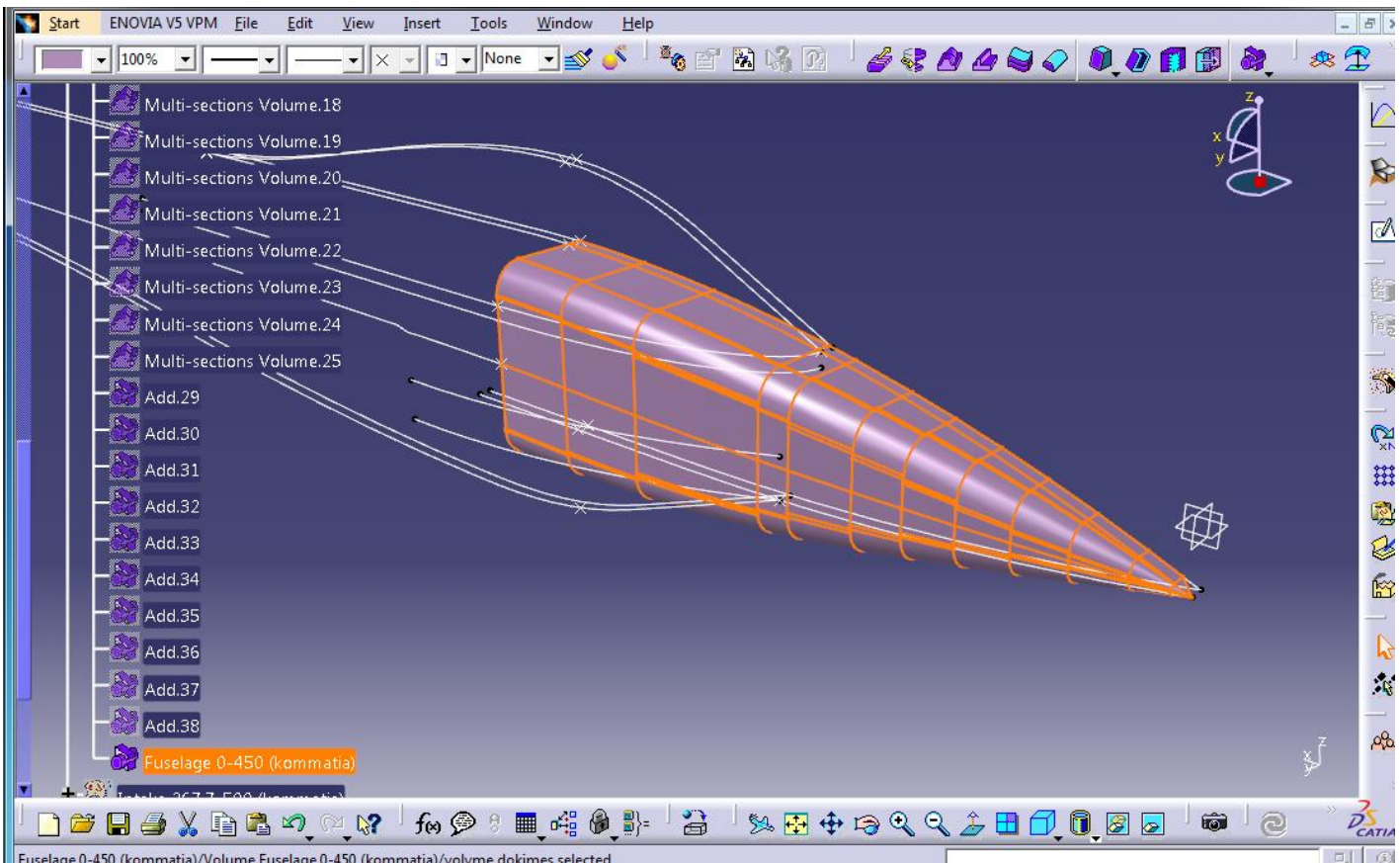
Το τμήμα του όγκου για $X=0-10$ mm κατασκευάστηκε με την εντολή **Volume Sweep** με τα ορίσματα που απεικονίζονται στην Εικόνα F8.








Εικόνα F8: Χρήση εντολής Volume Sweep

Για την ολοκλήρωση του βασικού τμήματος **Fuselage για $X=0-450$ mm** εφαρμόστηκε η εντολή **Add** της γραμμής εργαλείων **Volumes** για κάθε επιμέρους όγκο με τη σειρά. Με την εφαρμογή της εντολής **Add** επιτεύχθηκε η ενοποίηση των επιμέρους όγκων και η δημιουργία ενός ενιαίου όγκου (**Fuselage 0-450**) για όλο το βασικό τμήμα **Fuselage για $X=0-450$ mm** (Εικόνα F9).

Καίριο σημείο για την επίτευξη του σχεδιασμού αποτελεί αυτός των Sections. Η σωστή εφαρμογή της εντολής **Multi-Sections Volume** απαιτεί την ύπαρξη ίδιου αριθμού σημείων στο σχεδιασμό κάθε Section ακόμα και αν αυτά συμπίπτουν. Το γεγονός αυτό είναι απαραίτητο καθώς κατά την εφαρμογή της εντολής πραγματοποιείται αντιστοίχιση των σημείων στα Sections που χρησιμοποιούνται. Τέλος, επισημαίνεται ότι δημιουργήθηκαν πολλά επιμέρους τμήματα και όχι ένα ενιαίο (αν και ήταν και αυτό εφικτό) με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας πολλών επιφανειακών γραμμών καμπυλότητας. Το χαρακτηριστικό αυτό δίνει την δυνατότητα μεγαλύτερης ευελιξίας κατά την χρήση του λογισμικού Design Modeler του Ansys σε μετέπειτα στάδιο της παρούσας εργασίας.

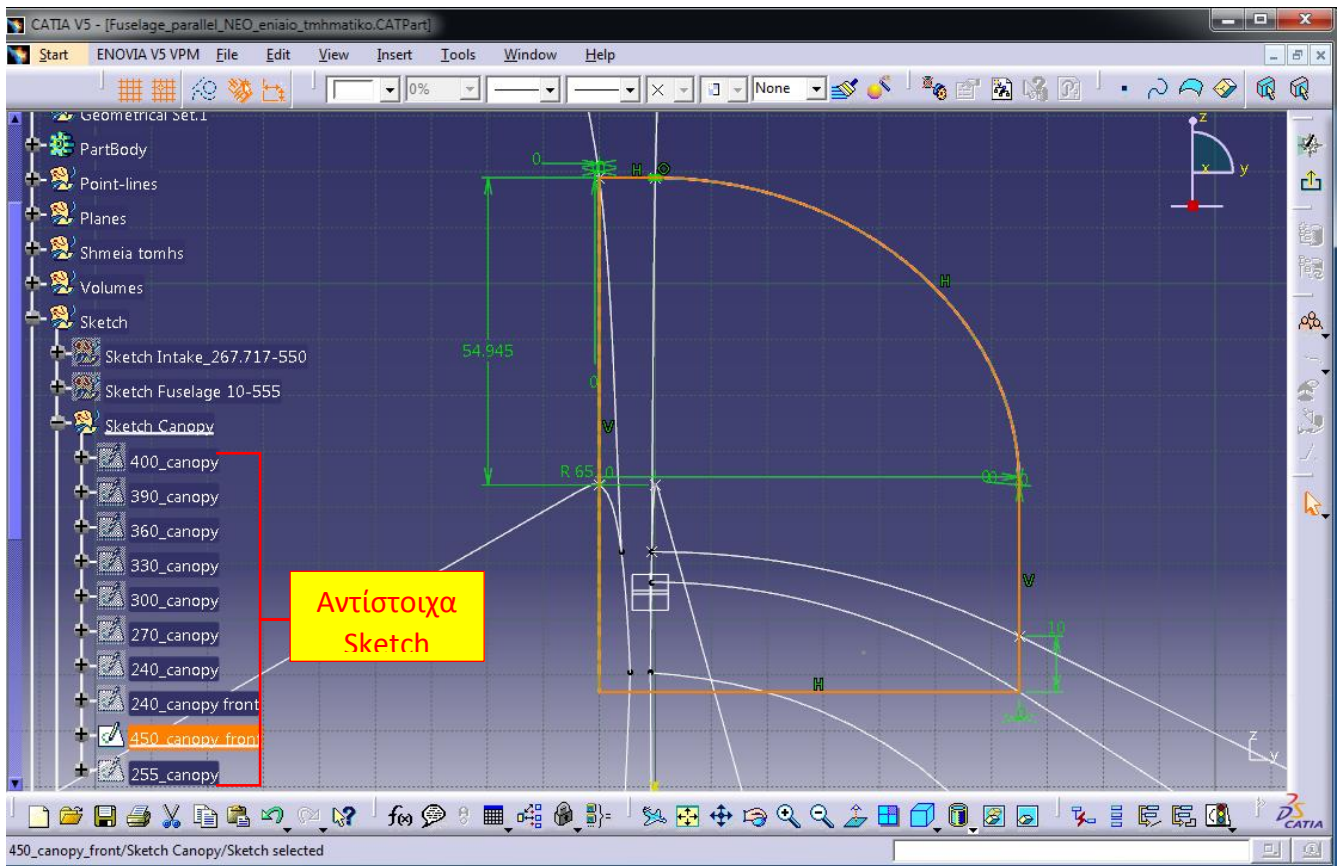


Εικόνα F9: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Fuselage για X=0-450mm

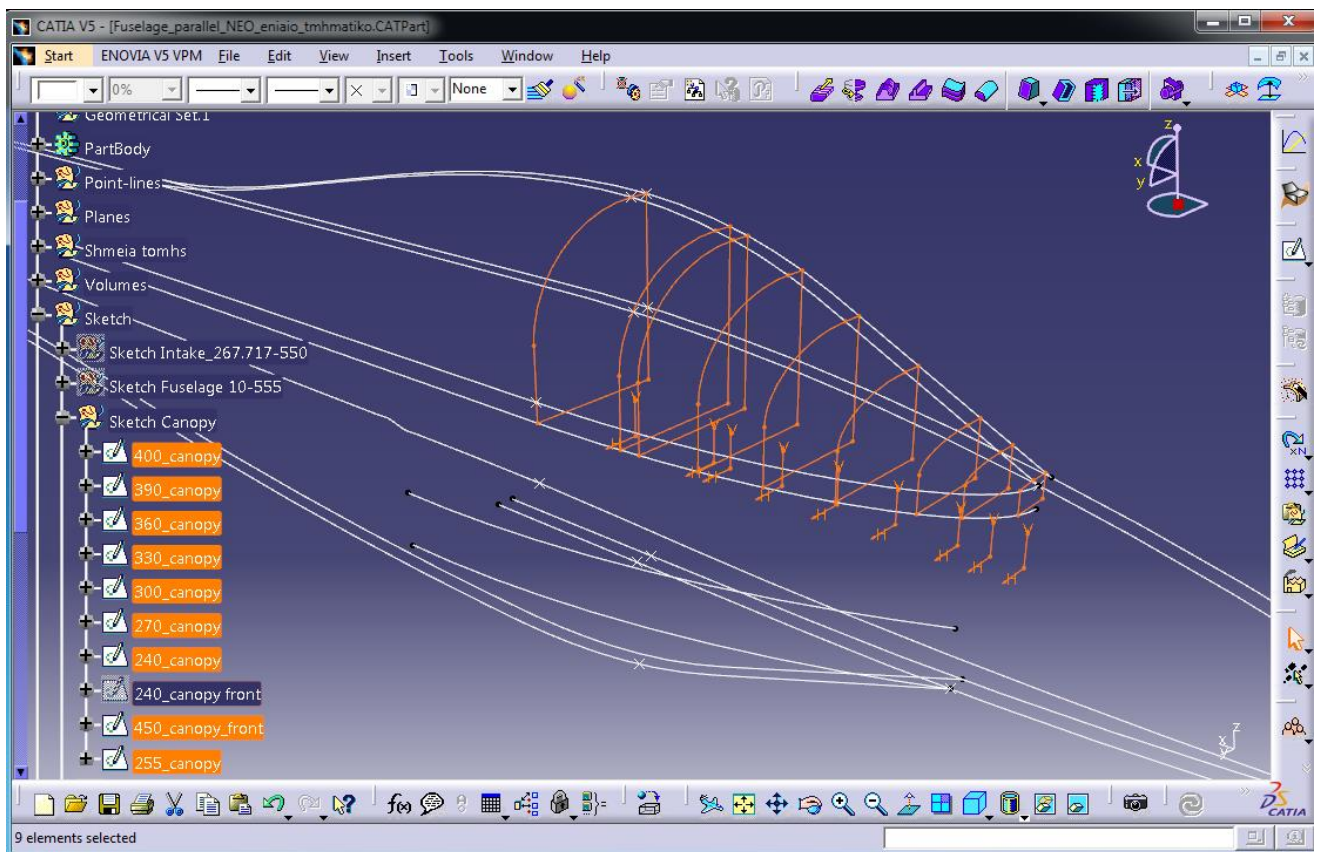
Η τομή του βασικού τμήματος **Canopy για X=237,5-450mm** ορίζεται στο Πίνακα A4 (Σχήμα 1) του Παραρτήματος Α. Με χρήση της εντολής **Sketch**  σχεδιάστηκε το Section πάνω στο Plane για X=450 mm χρησιμοποιώντας τα εργαλεία **Line**  και **Ellipse**  της γραμμής εργαλείων **Profile** (Εικόνα F10). Με τις εντολές **Constraint**  και **Constraints Defined in Dialog Box**  της γραμμής εργαλείων **Constraint** ορίστηκαν οι κατάλληλοι περιορισμοί όπου απαιτήθηκε. Σημειώνεται ότι το Section έχει επεκταθεί μέχρι τις επιπρόσθετες βασικές γραμμές με ευθείες που εφάπτονται στην έλλειψη. Το μήκος των ημιαξόνων των εκάστοτε ελλείψεων, που χρησιμοποιήθηκαν στα διάφορα Planes, έχει βρεθεί με την βοήθεια του Microsoft Excel κατά την επεξεργασία των δεδομένων και συμφώνως του Πίνακα A4 στο Παράρτημα Α.

Εφαρμόζοντας αντίστοιχη διαδικασία με αυτήν για το σχεδιασμό του βασικού τμήματος **Fuselage για X=0-450mm** που περιεγράφηκε παραπάνω, σχεδιάστηκαν τα **Αντίστοιχα Sketch** (Εικόνα F10) στα άλλα Planes (Εικόνα F11) και δημιουργήθηκε ο τελικός ενιαίος όγκος του βασικού τμήματος **Canopy για X=237,5-450mm** (Εικόνα F12).

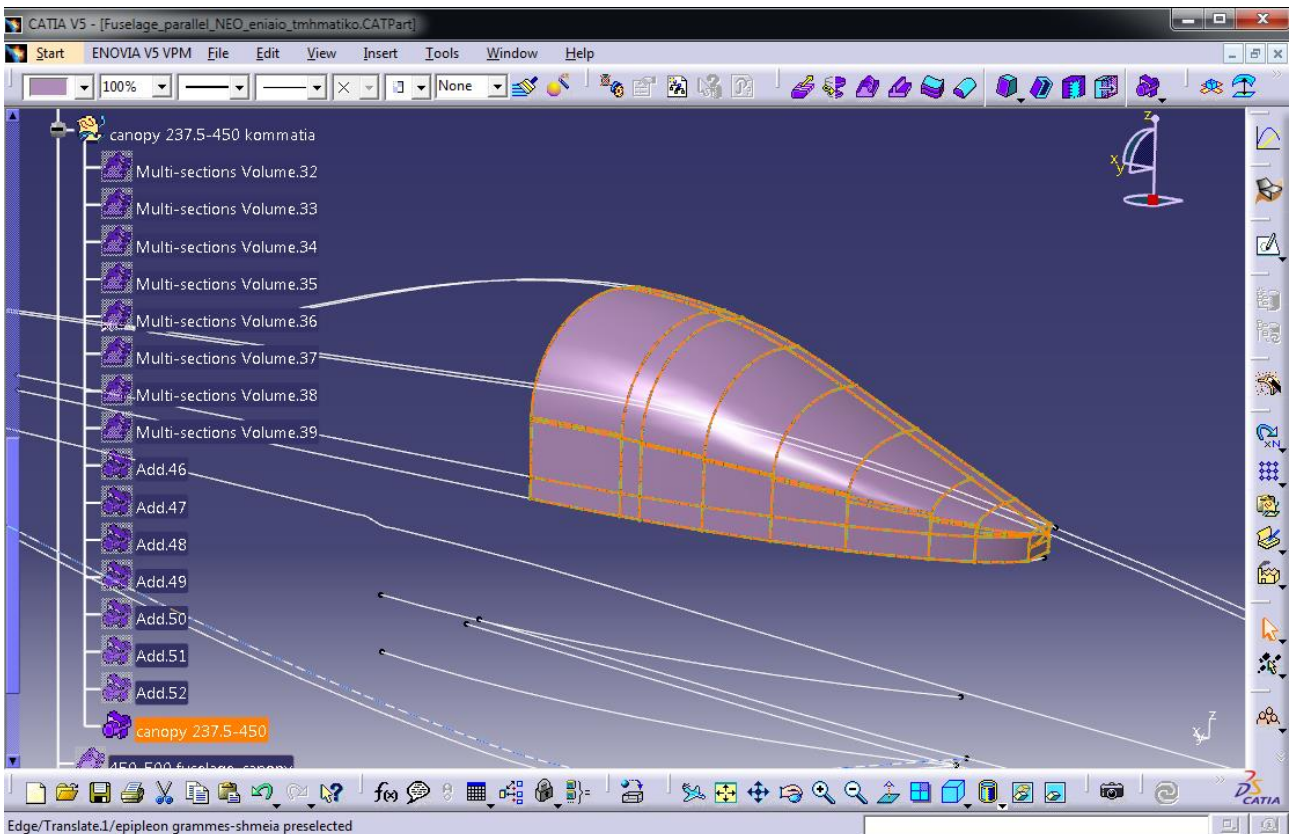
Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



Εικόνα F10: Σχεδιασμός Canopy Section στο επίπεδο για X=450mm



Εικόνα F11: Αντίστοιχα Sketch με το Canopy Sketch για X=450mm

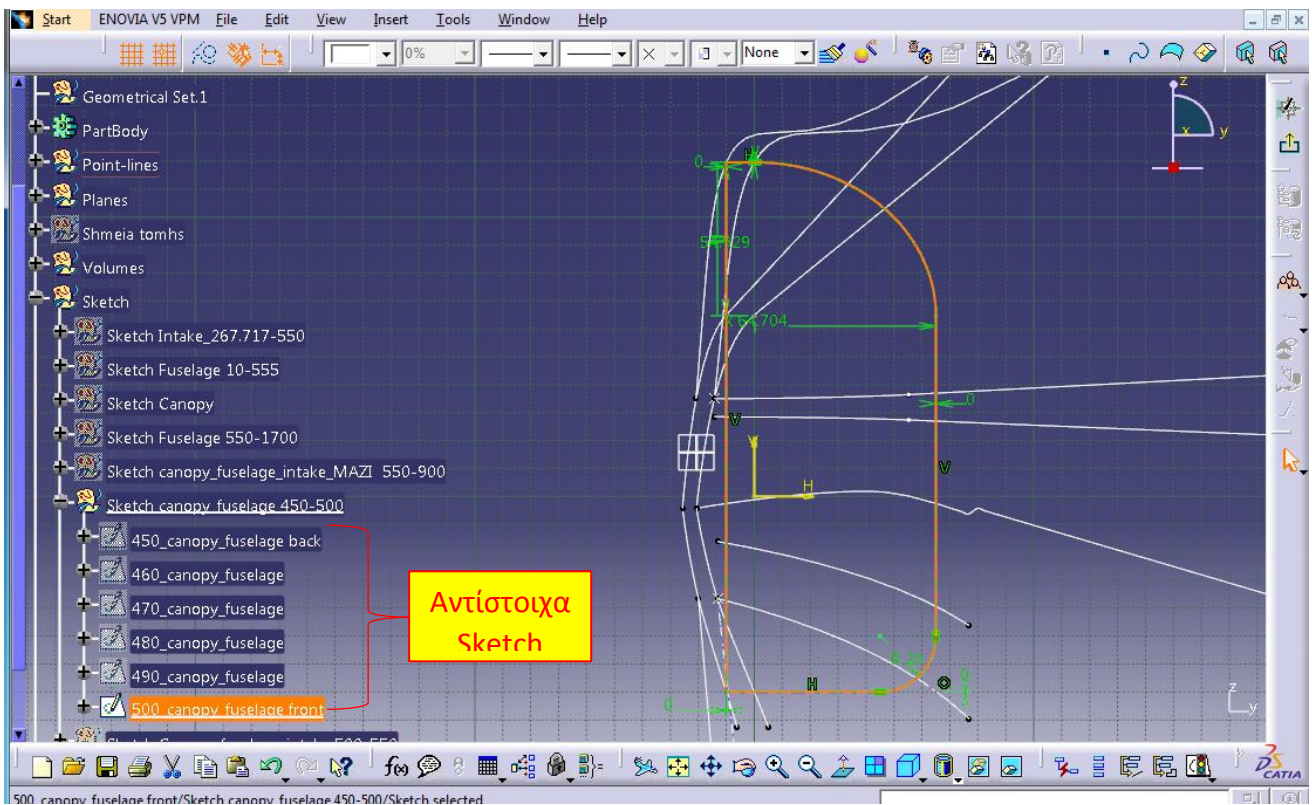


Εικόνα F12: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Canopy για X=237.5-450mm

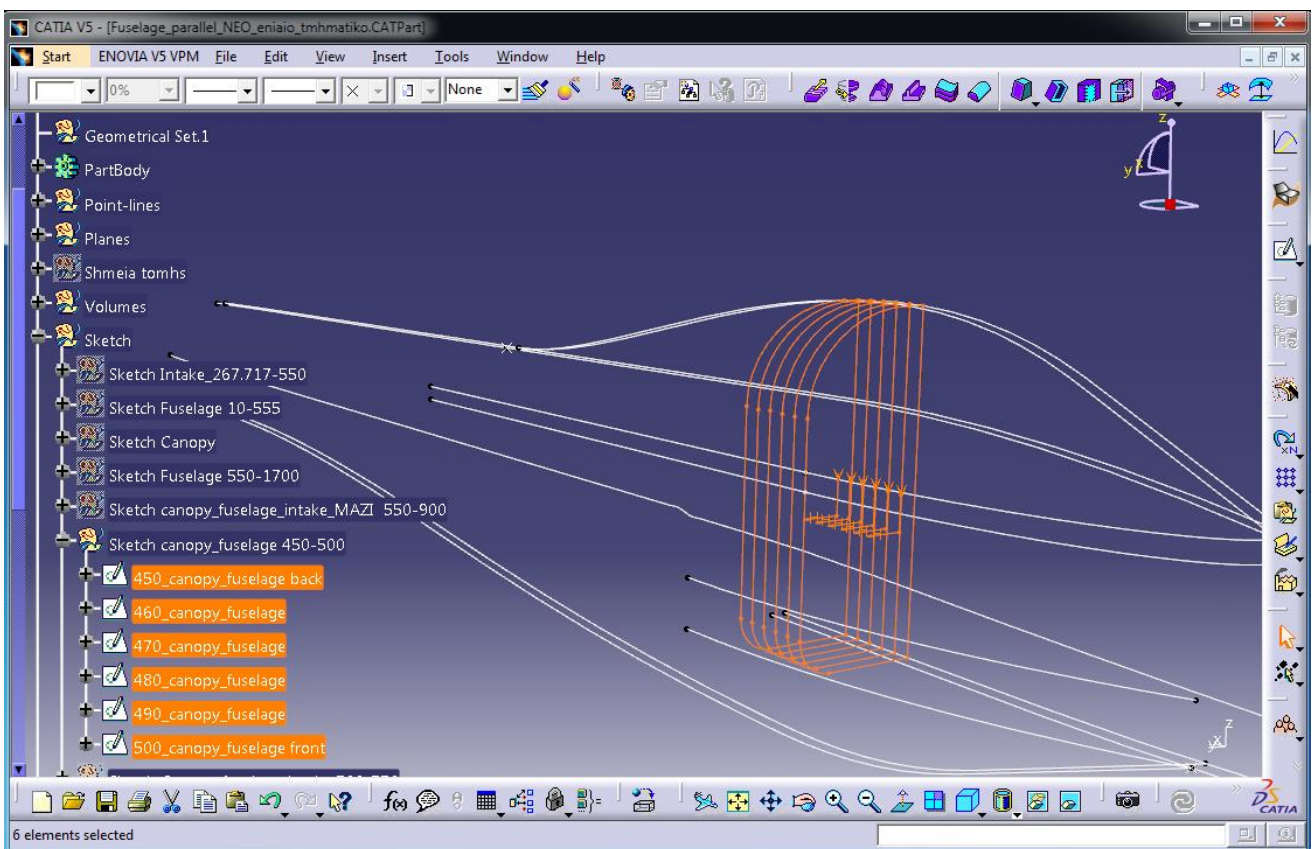
Στη συνέχεια σχεδιάστηκε το βασικό τμήμα **Fuselage-Canopy για X=450-500mm** όπου λόγω της απλούστερης γεωμετρίας συμπεριελήφθησαν στο σχεδιασμό της ίδια τομής και το τμήμα της κύριας Ατράκτου (Fuselage) και της Καλύπτρας (Canopy). Κατά αντιστοιχία με τα προηγούμενα βασικά τμήματα σχεδιάστηκε η τομή πάνω στο **επίπεδο για X=500mm** και με την κατάλληλη διαμόρφωση δημιουργήθηκαν τα **Αντίστοιχα Sketch** (Εικόνα F13). Έπειτα, δημιουργήθηκε ο τελικός ενιαίος όγκος του βασικού τμήματος **Fuselage-Canopy για X=450-500mm** με την χρήση της εντολής **Multi-Sections Volume**, συμπεριλαμβάνοντας όλα τα αντίστοιχα Sketch **μαζί** (Εικόνα F14). Σημειώνεται ότι η τομή στο επιμέρους τμήμα της Καλύπτρας ορίζεται στο Πίνακα A4 (Σχήμα 2) του Παραρτήματος Α.

Με αντίστοιχη λογική σχεδιάστηκαν και δημιουργήθηκαν οι όγκοι στα υπόλοιπα βασικά τμήματα της Ατράκτου, όπως παρουσιάζονται στις Εικόνες F15 – F27. Η ολοκλήρωση του σχεδιασμού της γεωμετρίας της Ατράκτου (Parallel) έγινε με την ένωση των όγκων των βασικών τμημάτων με την εντολή **Add** (Εικόνα F28). Στο σημείο αυτό του σχεδιασμού και για την τελειοποίηση της Ατράκτου χρησιμοποιήθηκε επιπλέον η εντολή **Split** της γραμμής εργαλείων **Operations** με σκοπό την αφαίρεση της επέκτασης που είχε σχεδιαστεί προς την κατεύθυνση του άξονα -Y και τον ορισμό του επιπέδου ZX ως επιπέδου συμμετρίας της Ατράκτου (Εικόνα F29).

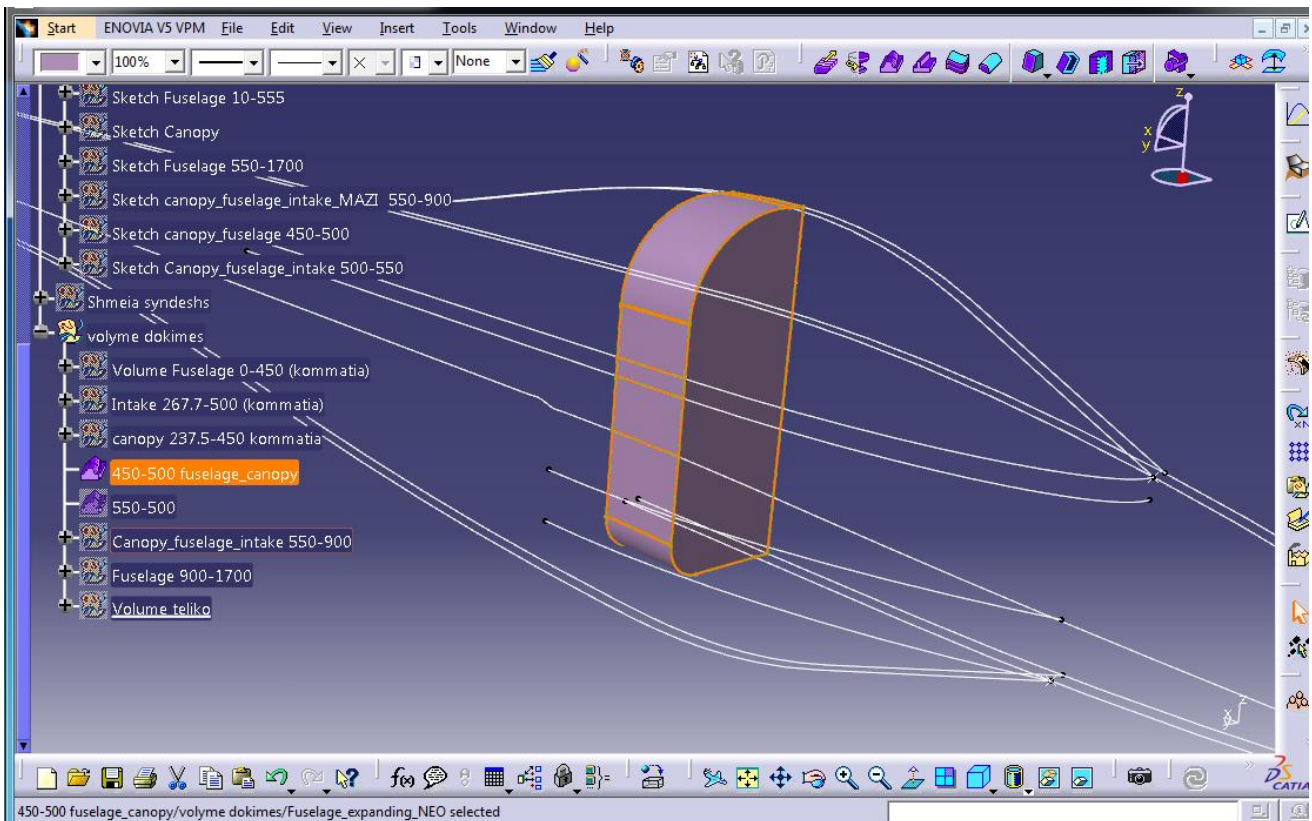
Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



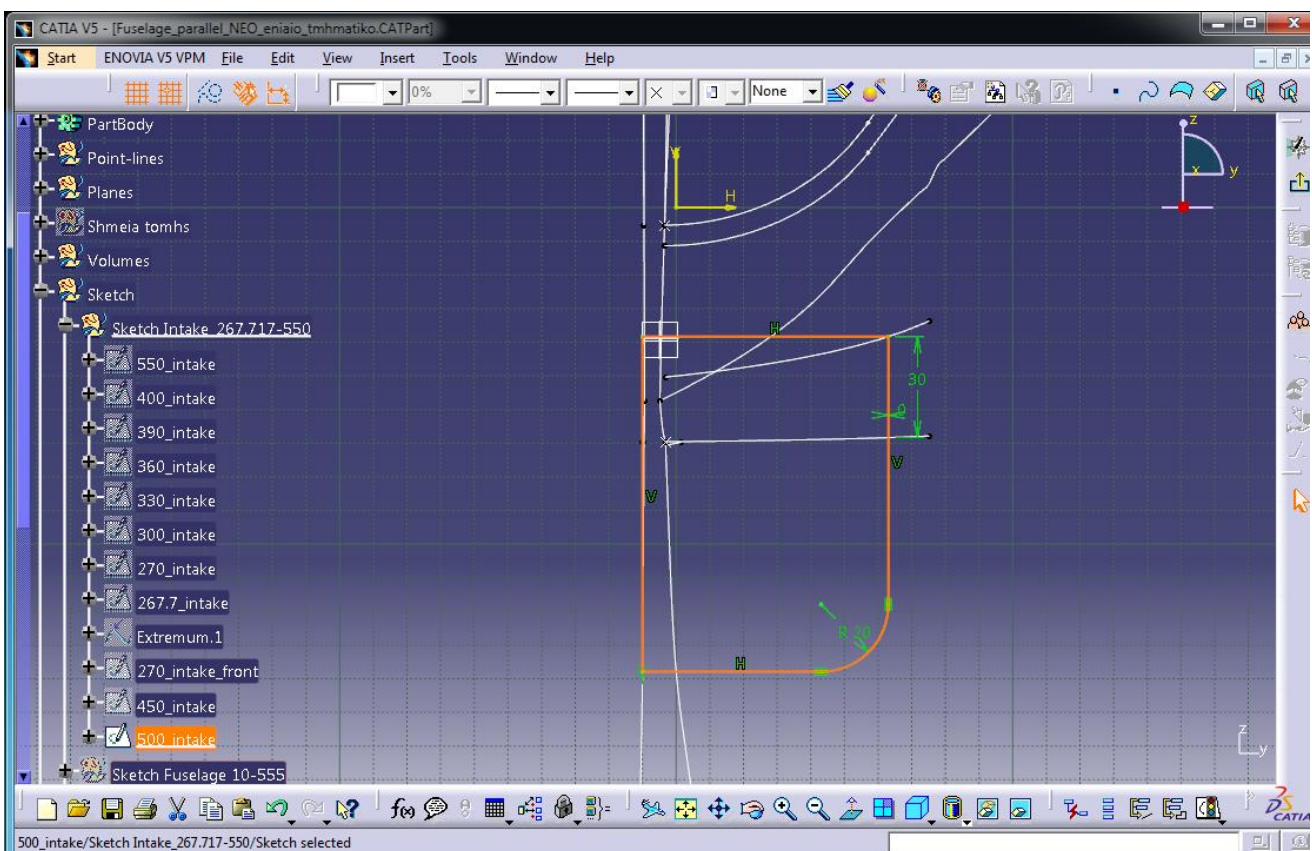
Εικόνα F13: Σχεδιασμός Fuselage-Canopy Section στο επίπεδο για X=500mm



Εικόνα F14: Αντίστοιχα Sketch με το Fuselage-Canopy Sketch για X=500mm

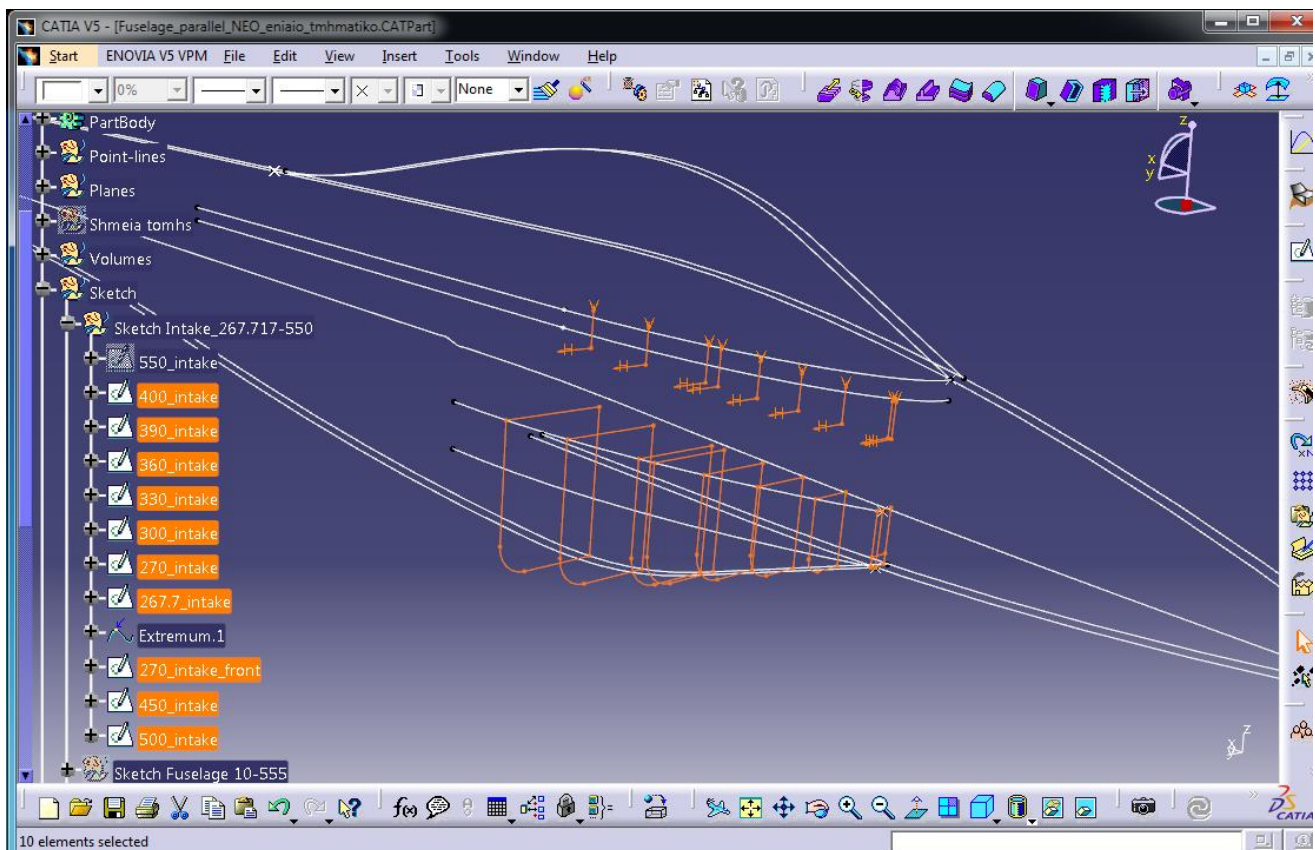


Εικόνα F15: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Fuselage-Canopy για $X=450-500\text{mm}$

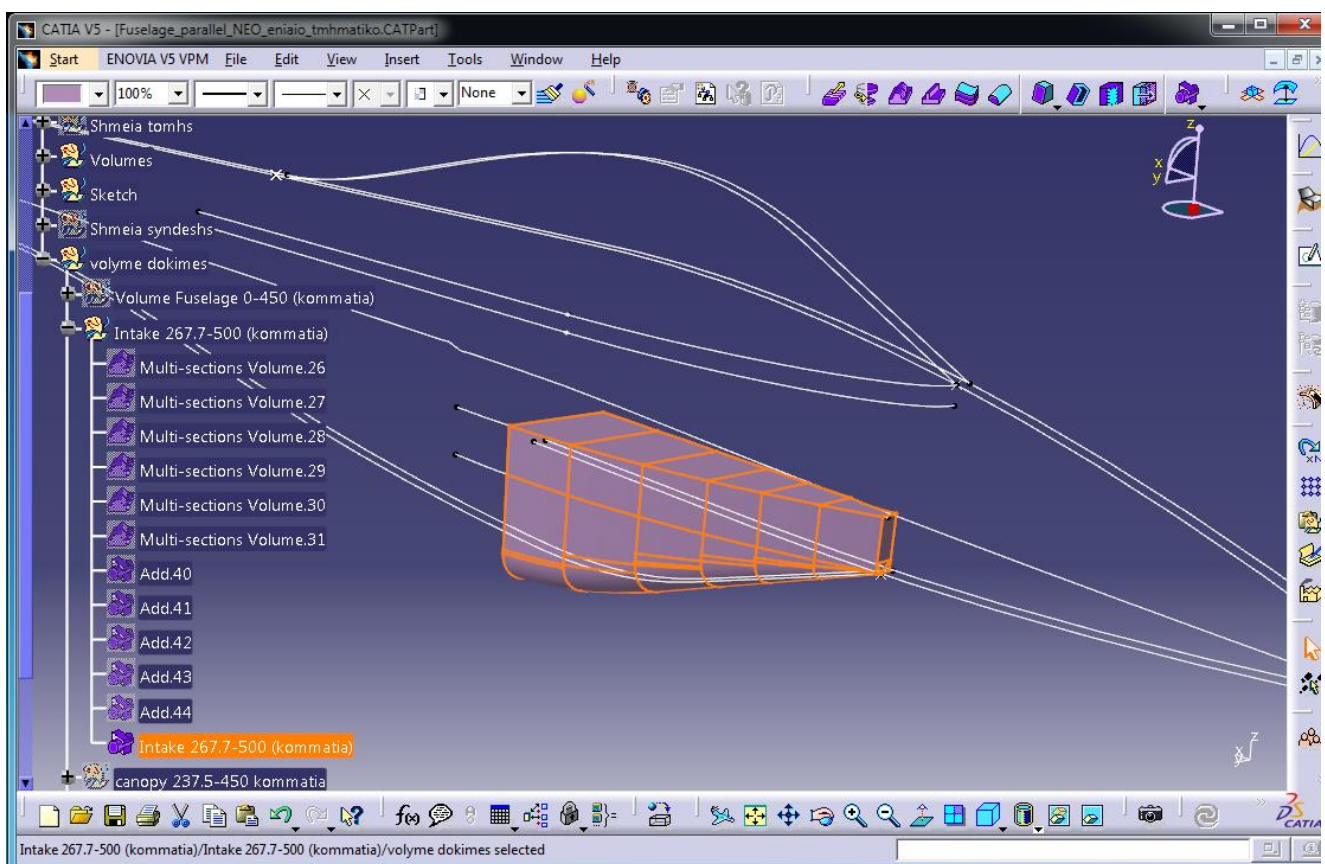


Εικόνα F16: Σχεδιασμός Intake Section στο επίπεδο για $X=500\text{mm}$

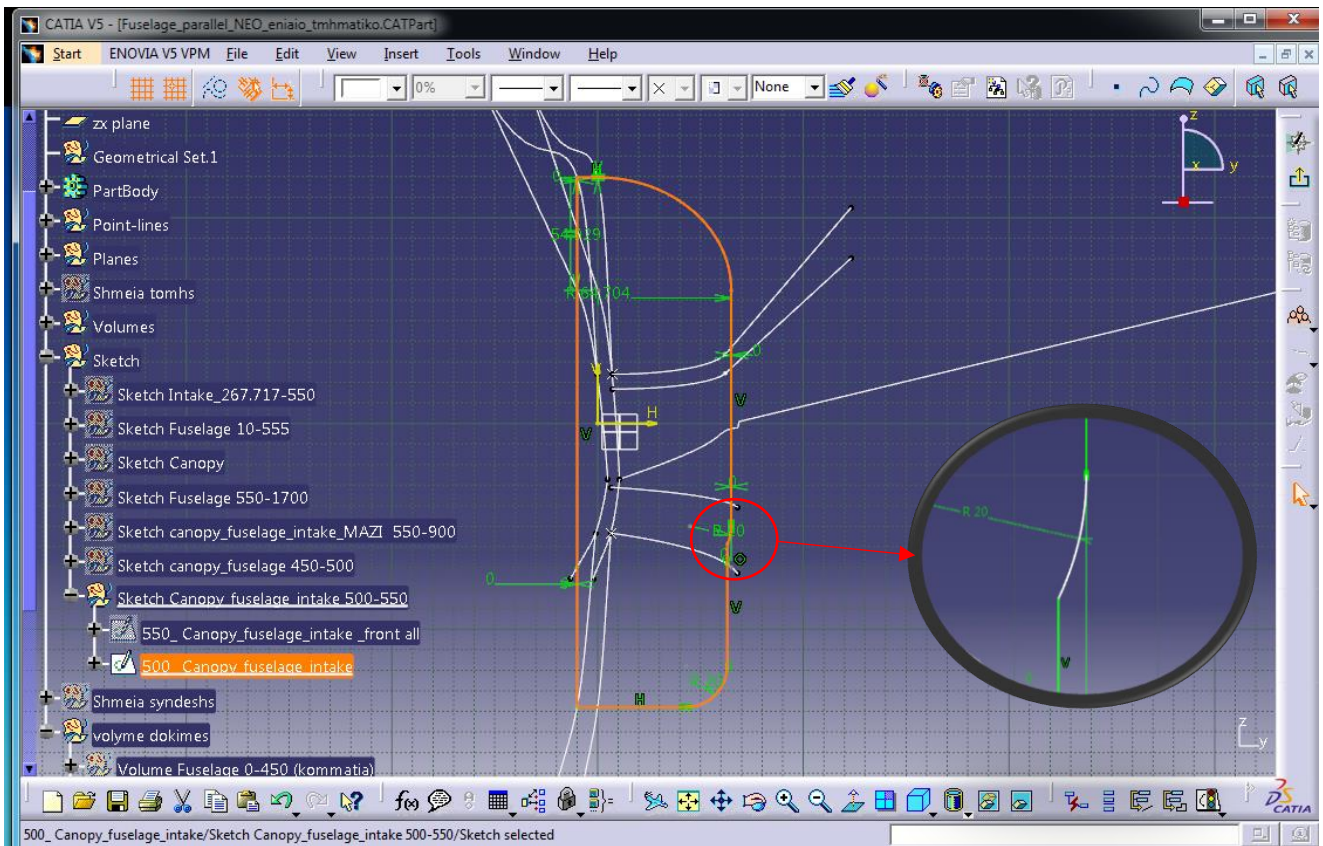
Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



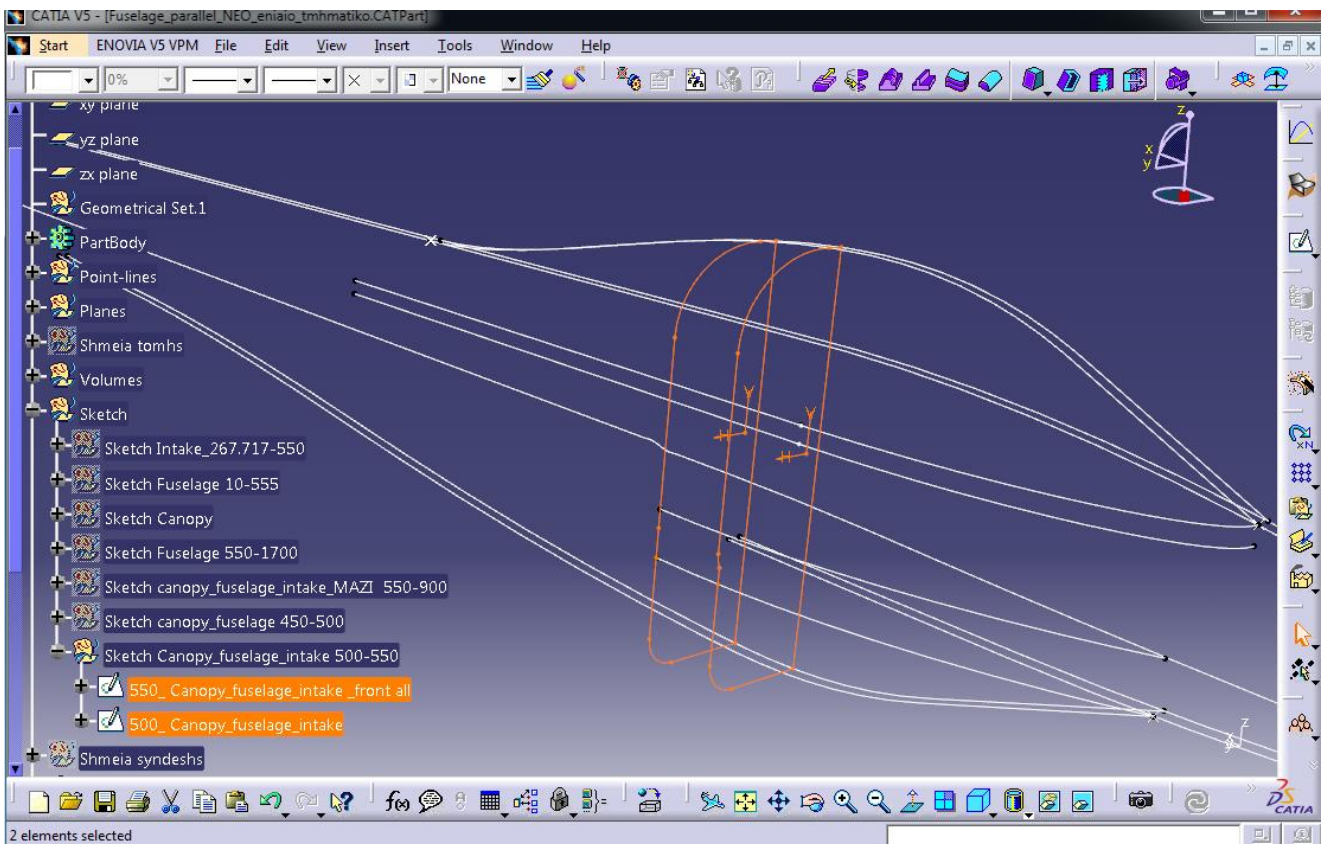
Εικόνα F17: Αντίστοιχα Sketch με το Intake Sketch για X=500mm



Εικόνα F18: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Intake για X=267.7-500mm

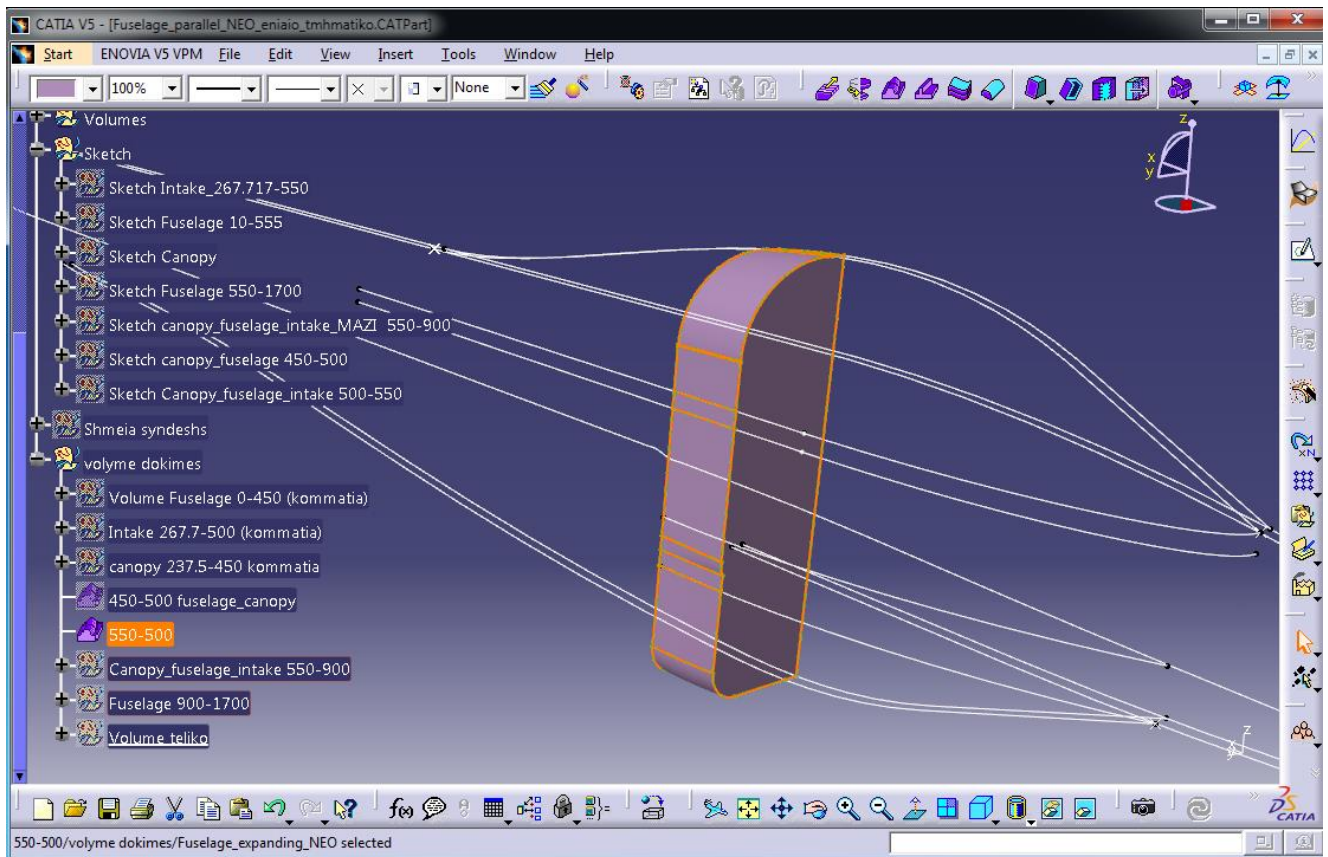


Εικόνα F19: Σχεδιασμός Fuselage-Canopy-Intake Section στο επίπεδο για $X=500\text{mm}$

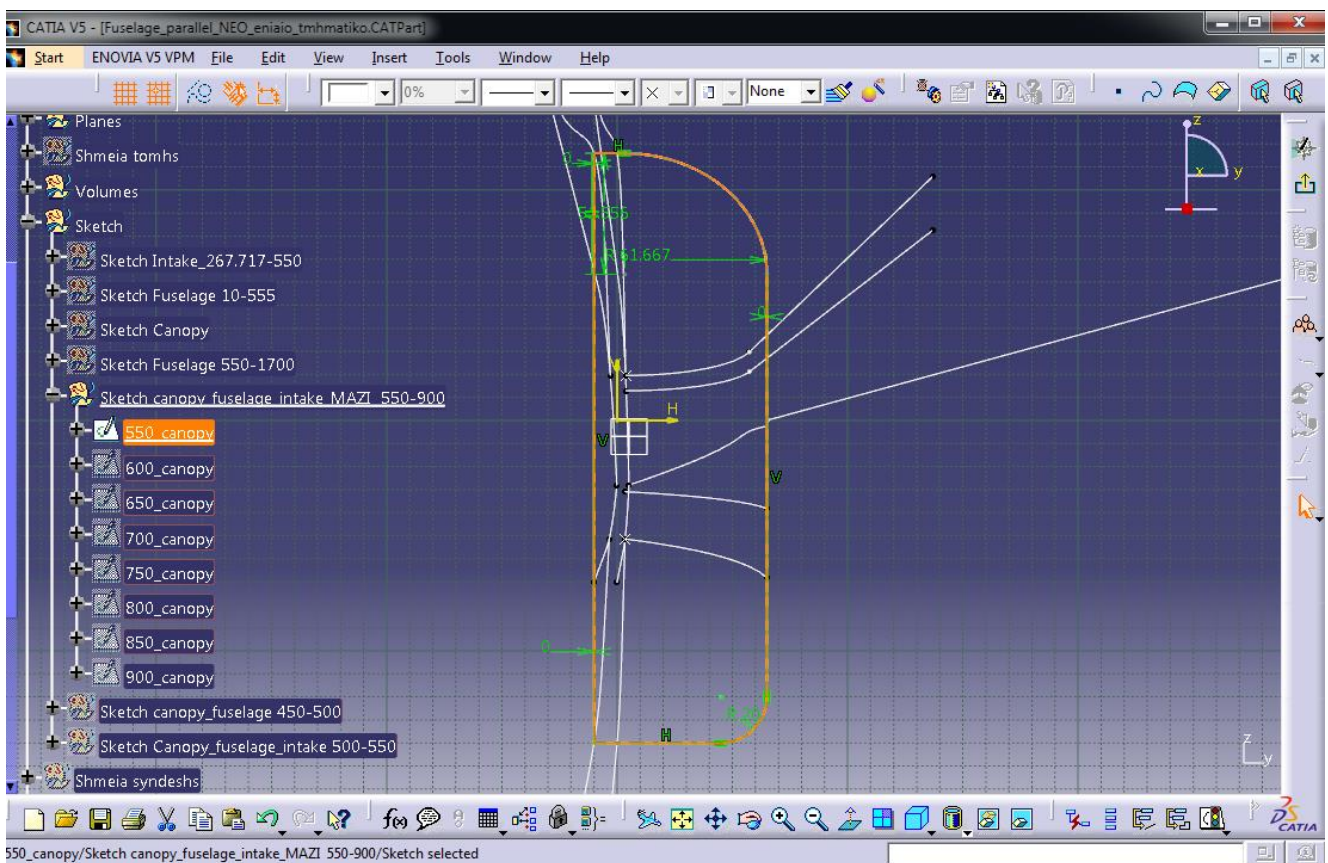


Εικόνα F20: Αντίστοιχα Sketch με το Fuselage-Canopy-Intake Sketch για $X=500\text{mm}$

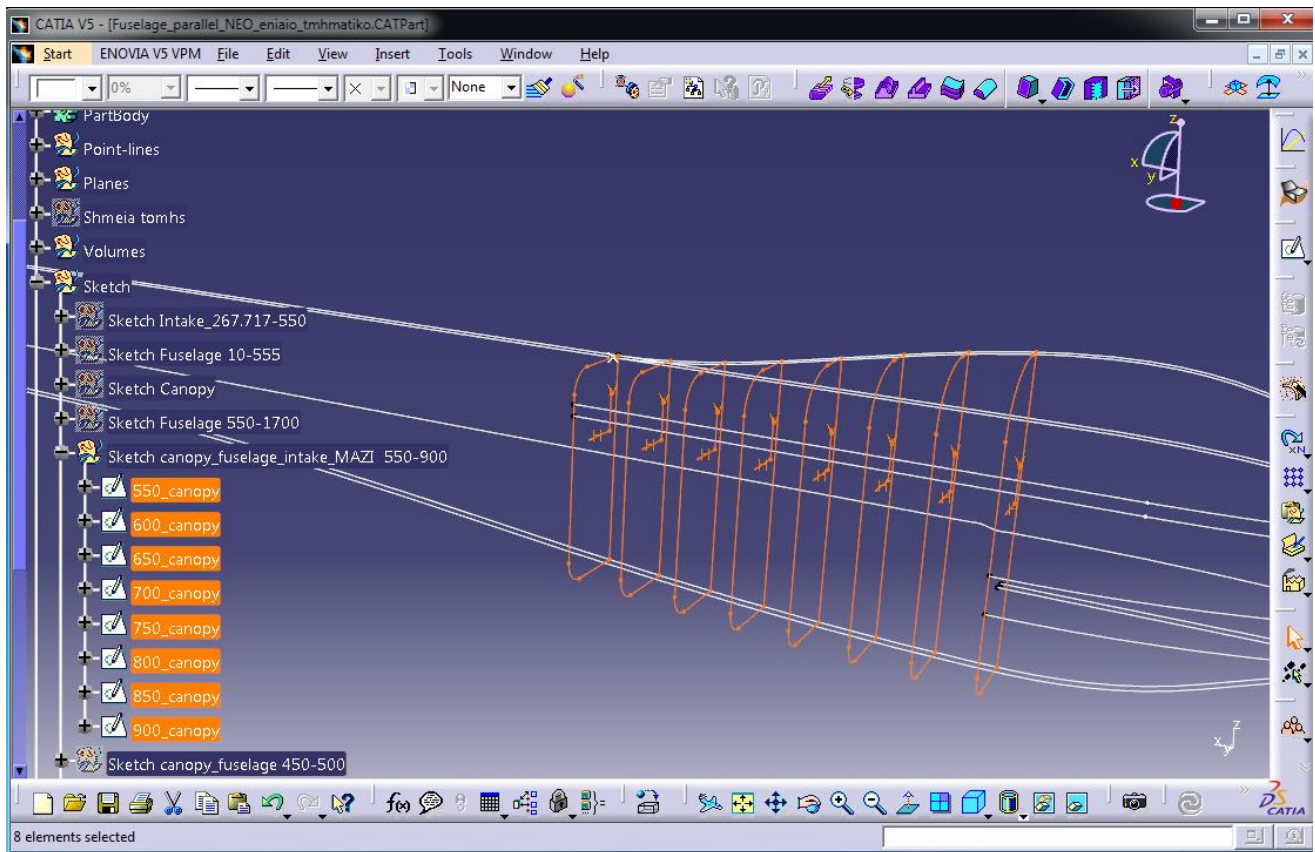
Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



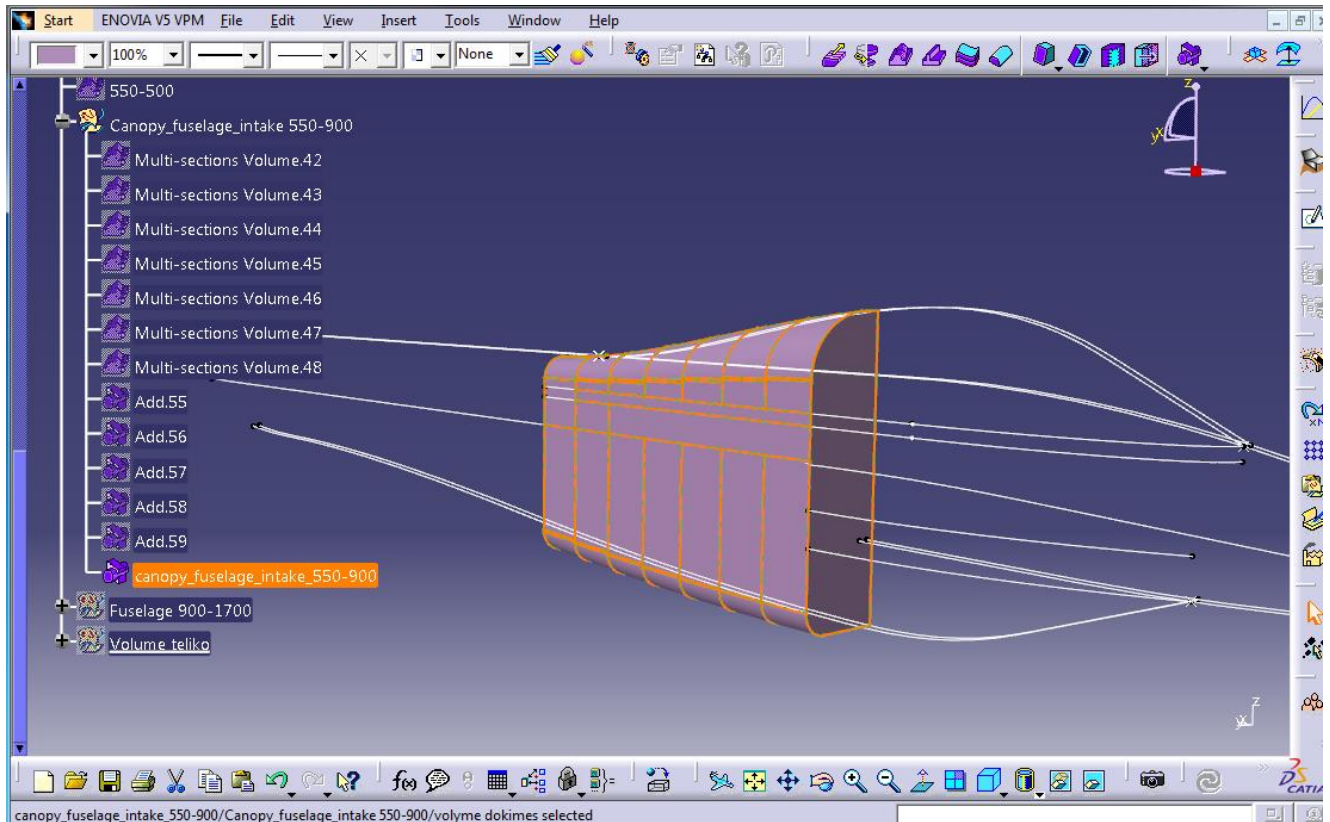
Εικόνα F21: Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Fuselage-Canopy-Intake για X=500-550mm



Εικόνα F22: Σχεδιασμός Fuselage-Canopy-Intake Section στο επίπεδο για X=550mm

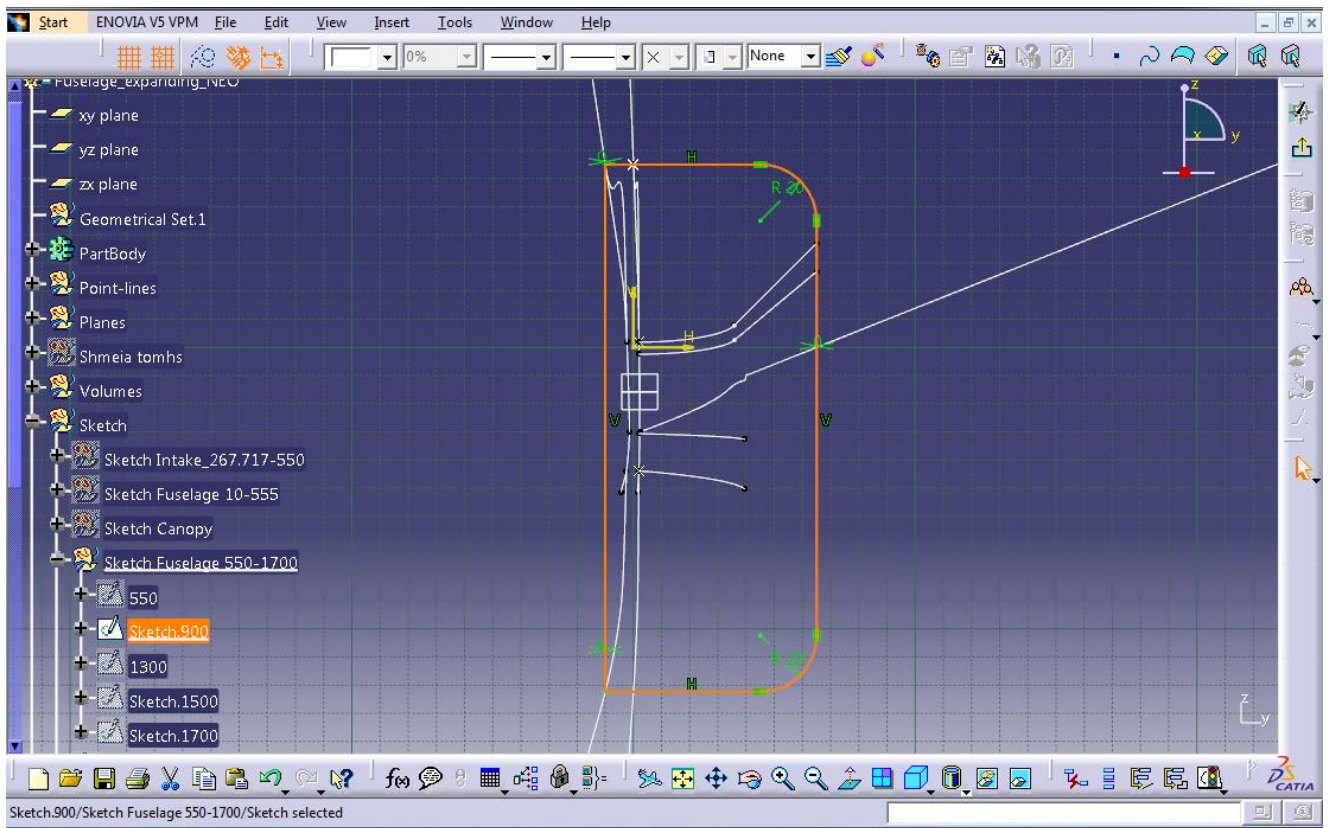


Εικόνα F23: Αντίστοιχα Sketch με το Fuselage-Canopy-Intake Sketch για X=550mm

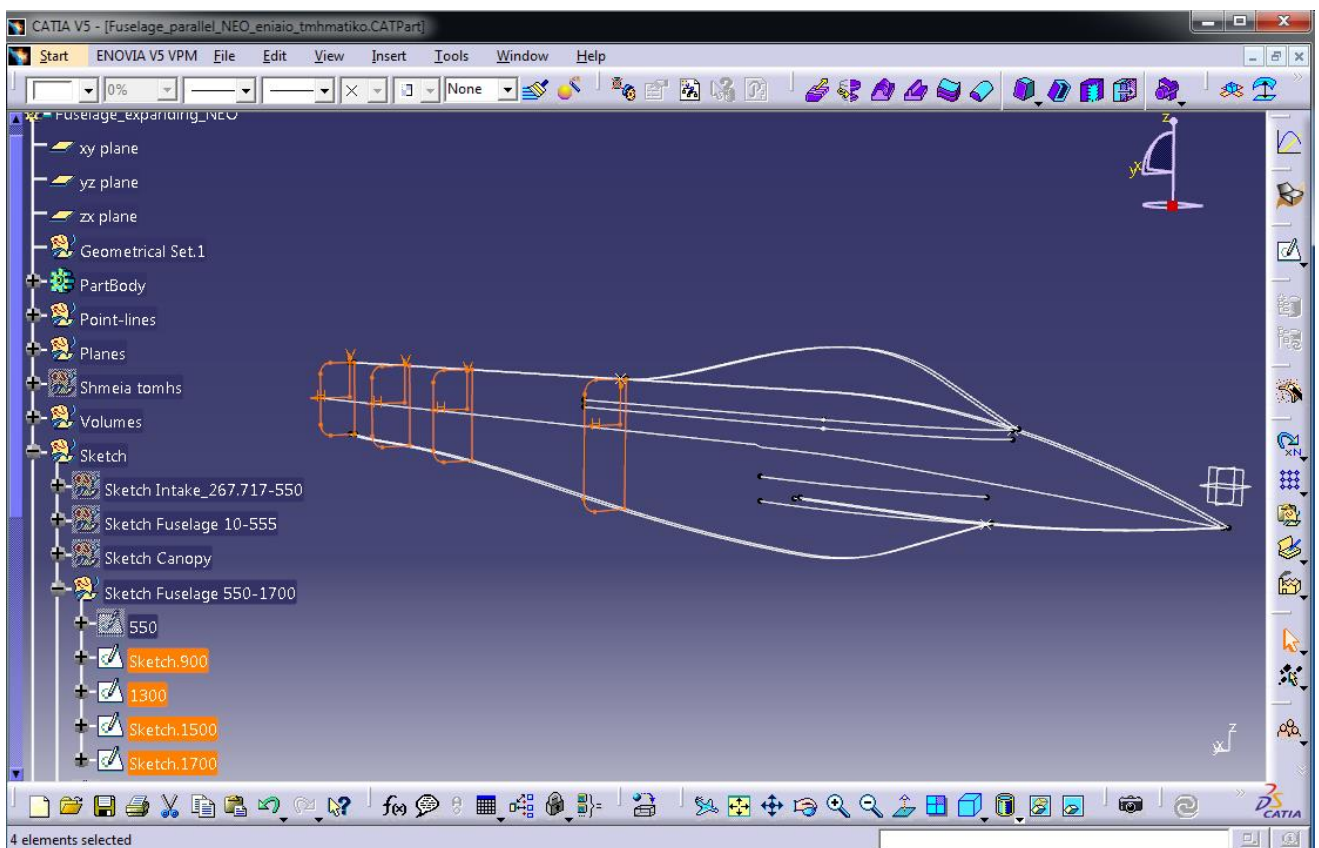


Εικόνα F24 Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Fuselage-Canopy-Intake για X=550-900mm

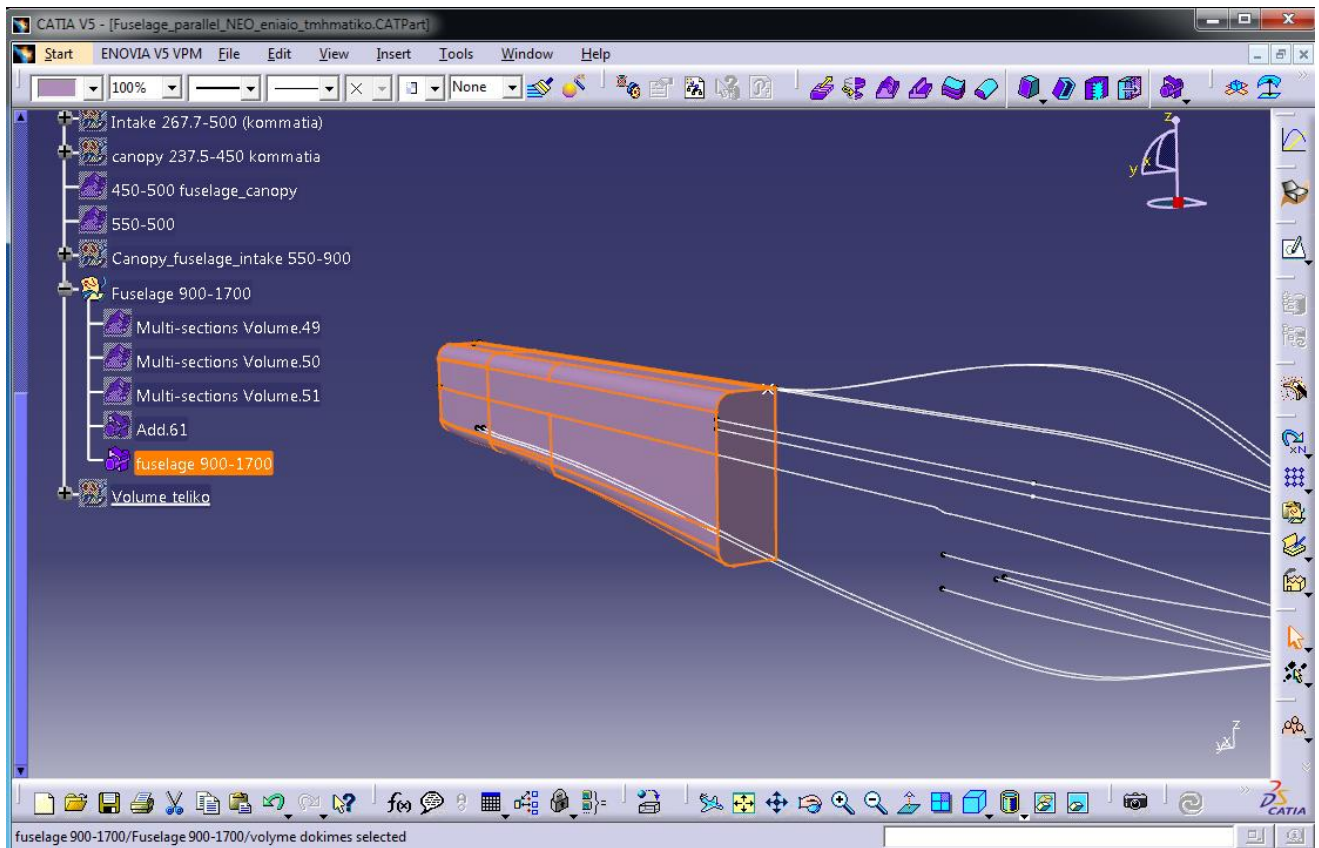
Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



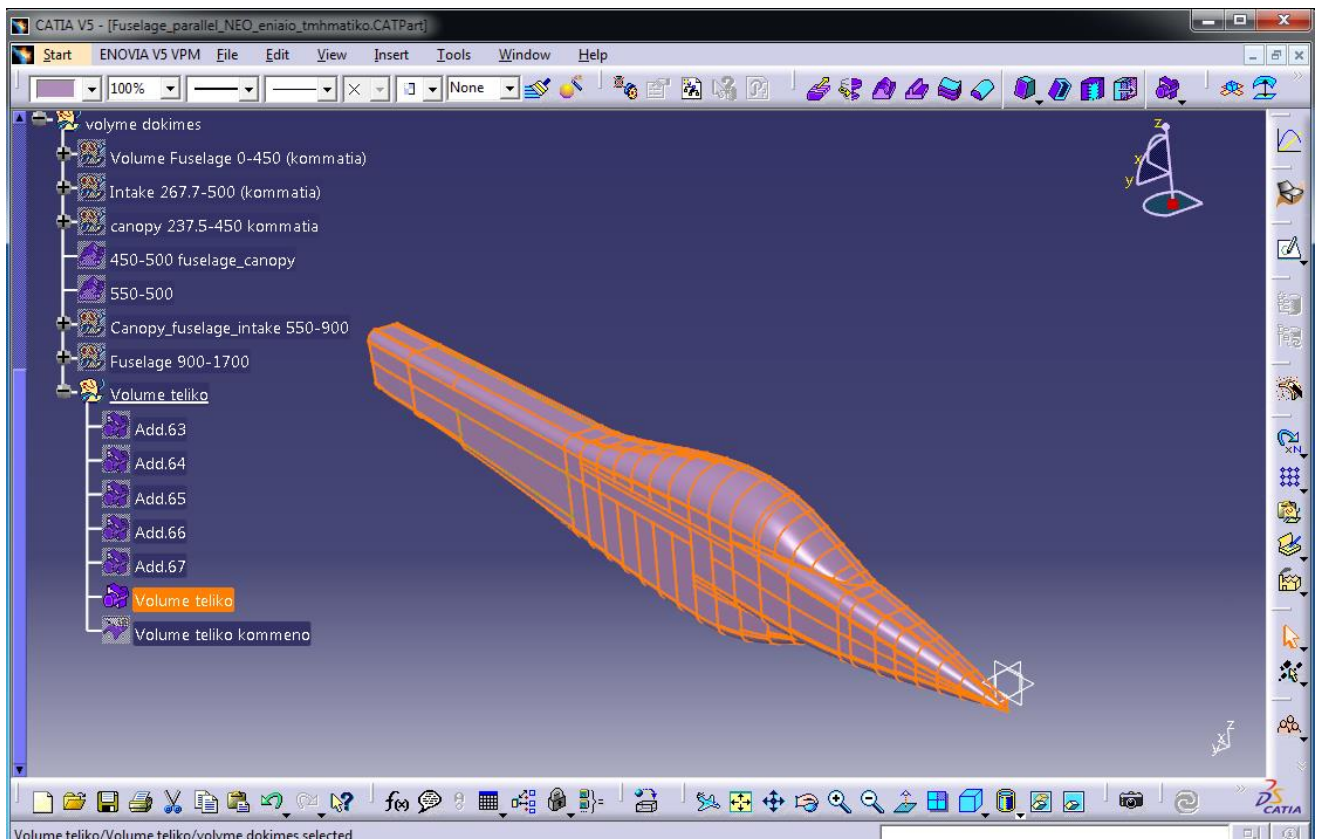
Εικόνα F25: Σχεδιασμός Fuselage-Intake Section στο επίπεδο για X=900mm



Εικόνα F26: Αντίστοιχα Sketch με το Fuselage-Intake Sketch για X=900mm

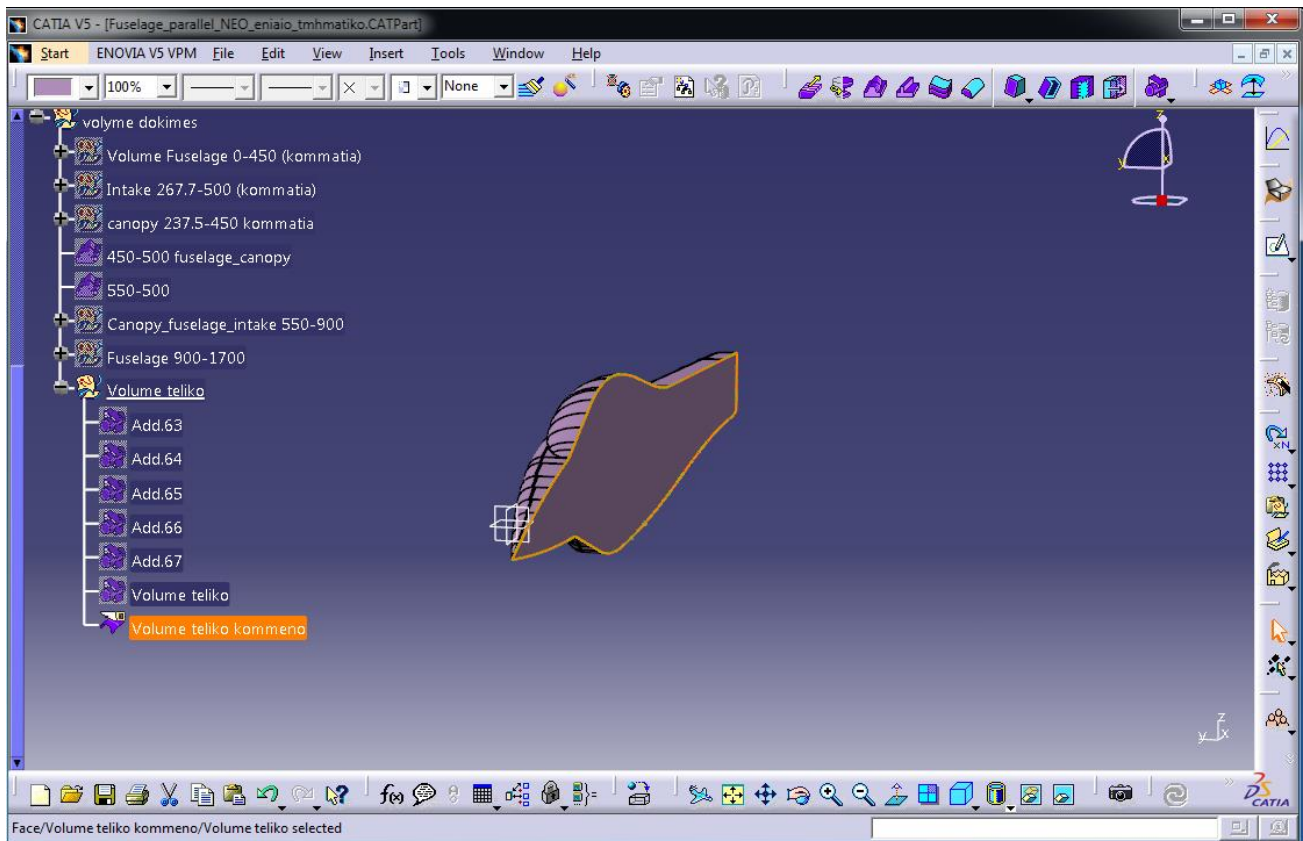


Εικόνα F27 Ενιαίος όγκος βασικού τμήματος Fuselage-Intake για X=900-1700mm



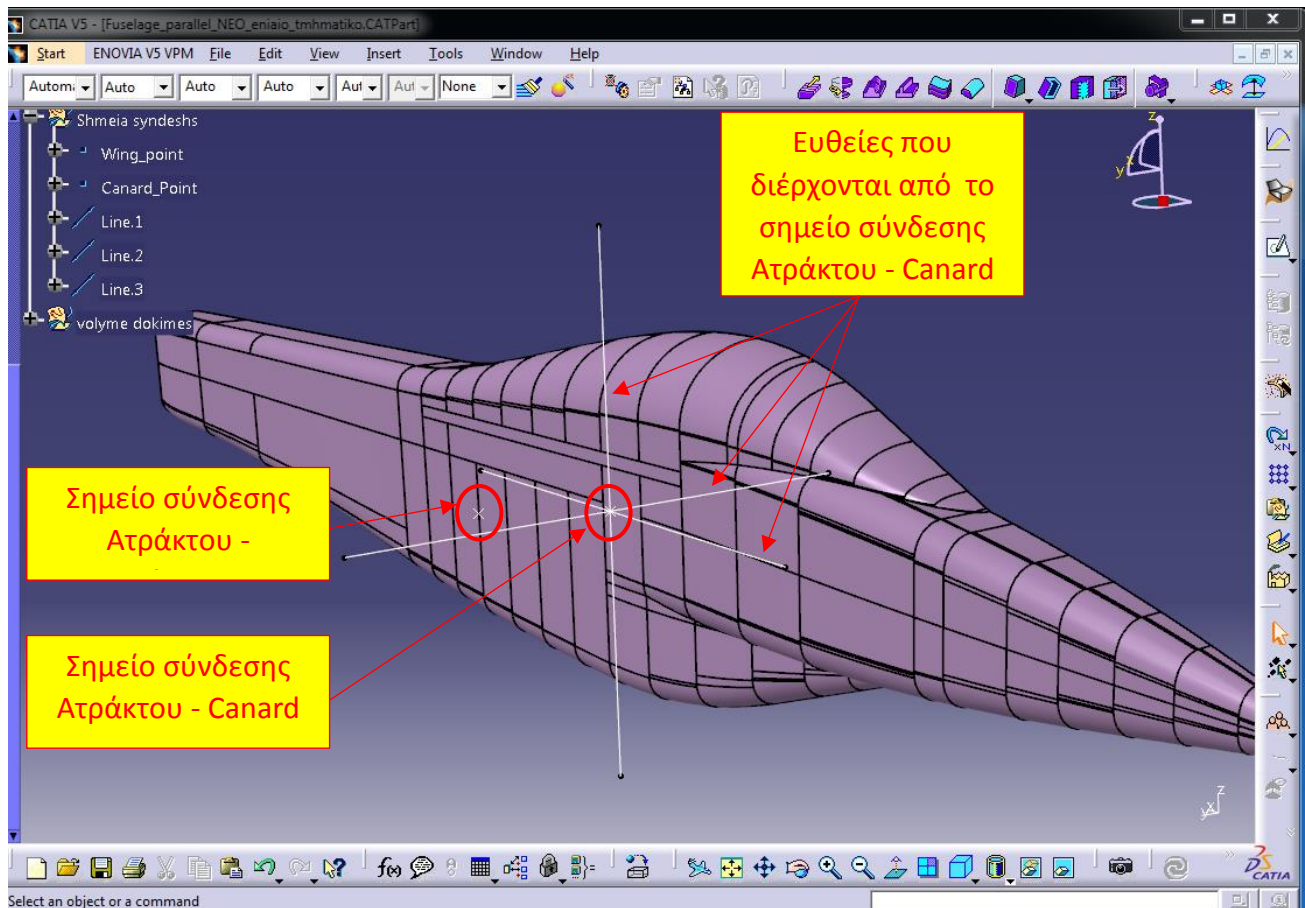
Εικόνα F28: Ένωση βασικών τμημάτων Ατράκτου (Parallel)

Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



Εικόνα F29: Χρήση της εντολής Split από την γραμμή εργαλειών Operations




Για διευκόλυνση στην διαδικασία σύνδεσης των τμημάτων του μοντέλου βρέθηκαν επιπλέον τα αντίστοιχα σημεία σύνδεσης της Πτέρυγας και του πτερυγίου Canard στην Άτρακτο. Ως σημείο σύνδεσης της Πτέρυγας στην Άτρακτο ορίστηκε το σημείο (882.7 , 0.0001 , -75.75) και για το πτερύγιο Canard το σημείο (540.83 , 65 , -5). Στο σημείο σύνδεσης του Βοηθητικού Πτερυγίου σχεδιάστηκαν να διέρχονται και τρεις ευθείες παράλληλες στους άξονες του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων όπου θα χρησιμοποιηθούν για την περιστροφή Canard ως προς την Άτρακτο (Εικόνα F30).



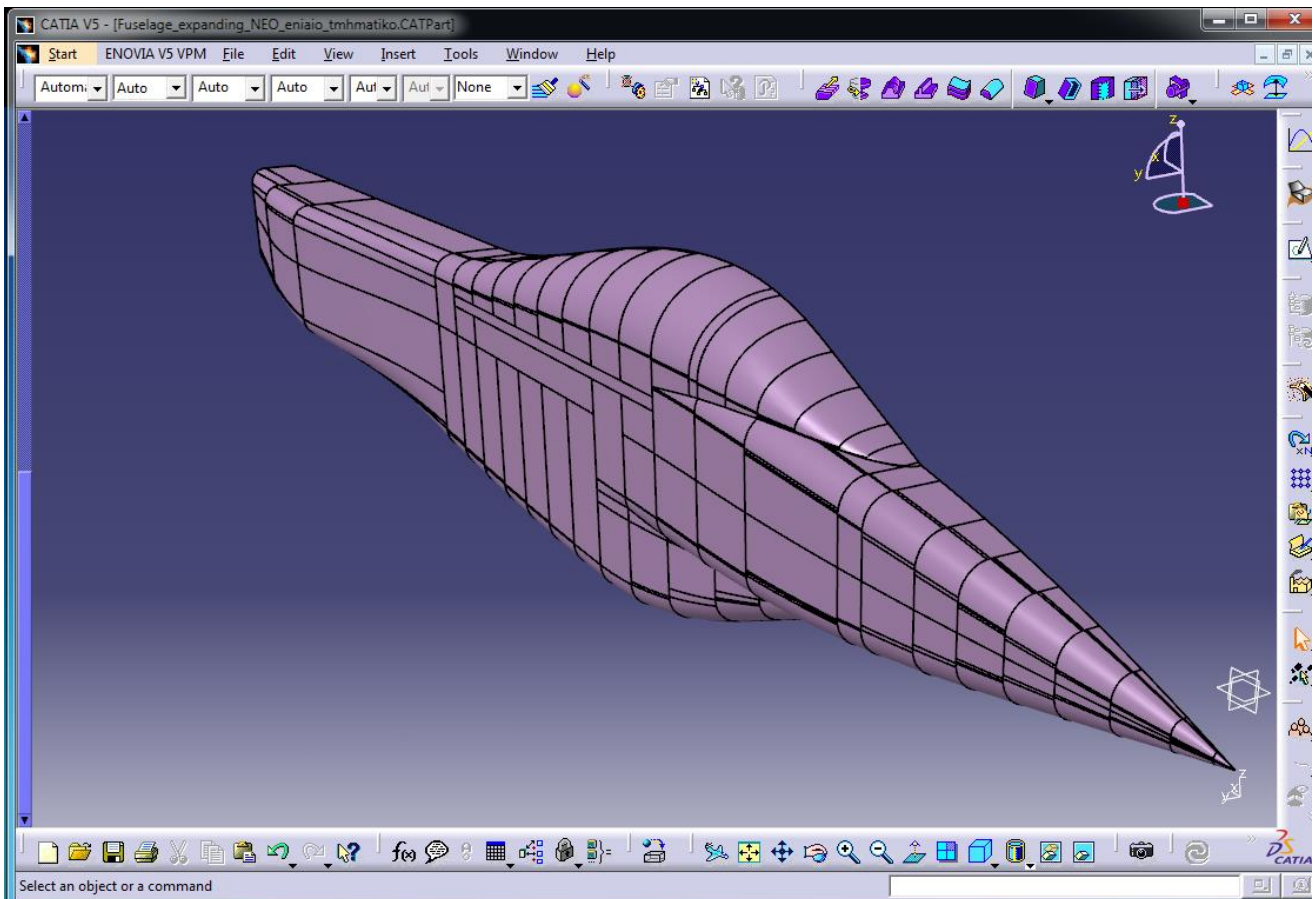
Εικόνα F30: Σημεία σύνδεσης Ατράκτου με Πτέρυγα και πτερύγιο Canard

❖ Δημιουργία Διογκωμένης Ατράκτου (Expanding)

Για τη δημιουργία της Διογκωμένης Ατράκτου τροποποιήθηκε η Μη Διογκωμένη. Η διαφορά μεταξύ τους εμφανίζεται στο βασικό τμήμα **Fuselage – Intake για X=900 -1700mm** και συγκεκριμένα στην καμπύλη **Fuselage Plan View**.

Η δημιουργία του νέου διογκωμένου βασικού τμήματος **Fuselage – Intake για X=900 - 1700mm** έγινε χρησιμοποιώντας την εντολή **Split**  στην καμπύλη **Fuselage Plan View – Parallel Bodyside** για X=900 mm και επιλέγοντάς το τμήμα για X<900 mm. Σε αυτό το τμήμα της καμπύλης ενώθηκε η καμπύλη **Fuselage Plan View – Expanding Bodyside**, χρησιμοποιώντας την εντολή **Join** . Στη συνέχεια τροποποιήθηκαν οι **περιορισμοί (Constraints)** στα **Sketch 900/ 1300/ 1500/ 1700** ώστε να εφάπτονται με την νέα καμπύλη και στην εντολή **Multi-Sections Volume**  αντικαταστάθηκε η καμπύλη **Fuselage Plan View – Parallel Bodyside**, που είχε χρησιμοποιηθεί ως οδηγός (Guide), με την νέα καμπύλη.

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία ένωσης των βασικών τμημάτων της Ατράκτου ολοκληρώνεται η δημιουργία της Διογκωμένης Ατράκτου (Expanding) (Εικόνα F31).



Εικόνα F31: Ένωση βασικών τμημάτων Ατράκτου (Expanding)

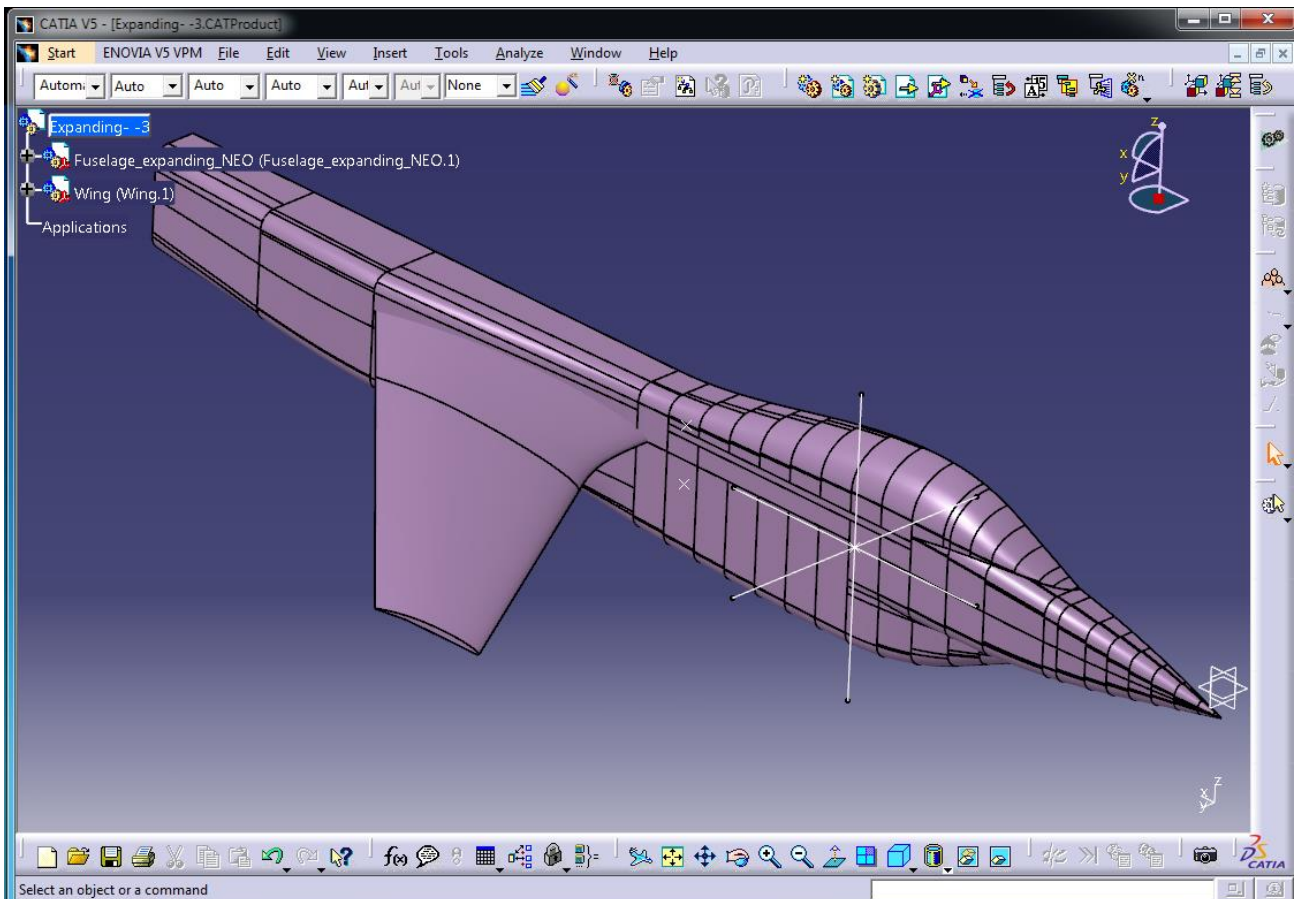
Σύνδεση Τμημάτων Μοντέλου (Fuselage-Wing-Canard)

Έχοντας περατώσει τον σχεδιασμό των τμημάτων του μοντέλου M151, απαιτήθηκε η σύνδεση αυτών, για την ολοκλήρωση της διαδικασίας δημιουργίας του. Σε αυτό το σημείο της εργασίας πραγματοποιήθηκε η απαιτούμενη ένωση των τμημάτων και η μετατροπή τους σε ενιαία γεωμετρία. Όπως έχει προαναφερθεί, απαιτείται η δημιουργία τριών διαφορετικών γεωμετριών του μοντέλου.






➤ Γεωμετρίες Μοντέλου M151/1

Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία -3° (Expanding - -3°)

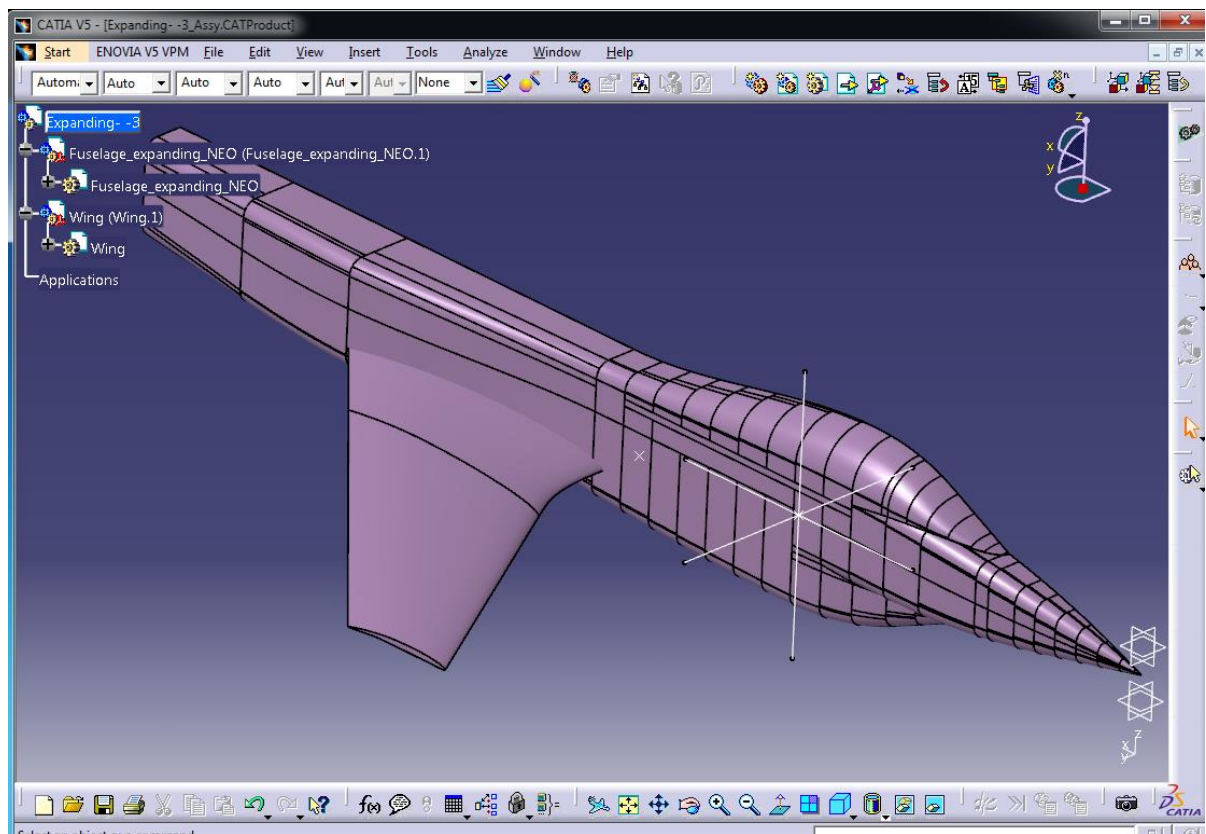
Η ένωση των τμημάτων πραγματοποιείται στο ενεργό περιβάλλον **Assembly Design** του λειτουργικού προγράμματος CATIA μέσω του **Start Menu → Mechanical Design → Assembly Design**. Αρχικά επιλέγεται ο κεντρικός κόμβος του δέντρου εντολών (Expanding - -3°) με απλό κλικ και έπειτα εισάγεται η Άτράκτος (Expanding) μέσω των εντολών **Insert → Existing Component** της κεντρικής γραμμής εργαλείων του προγράμματος. Στην συνέχεια, με τον ίδιο τρόπο εισάγεται η Πτέρυγα (Εικόνα A1).



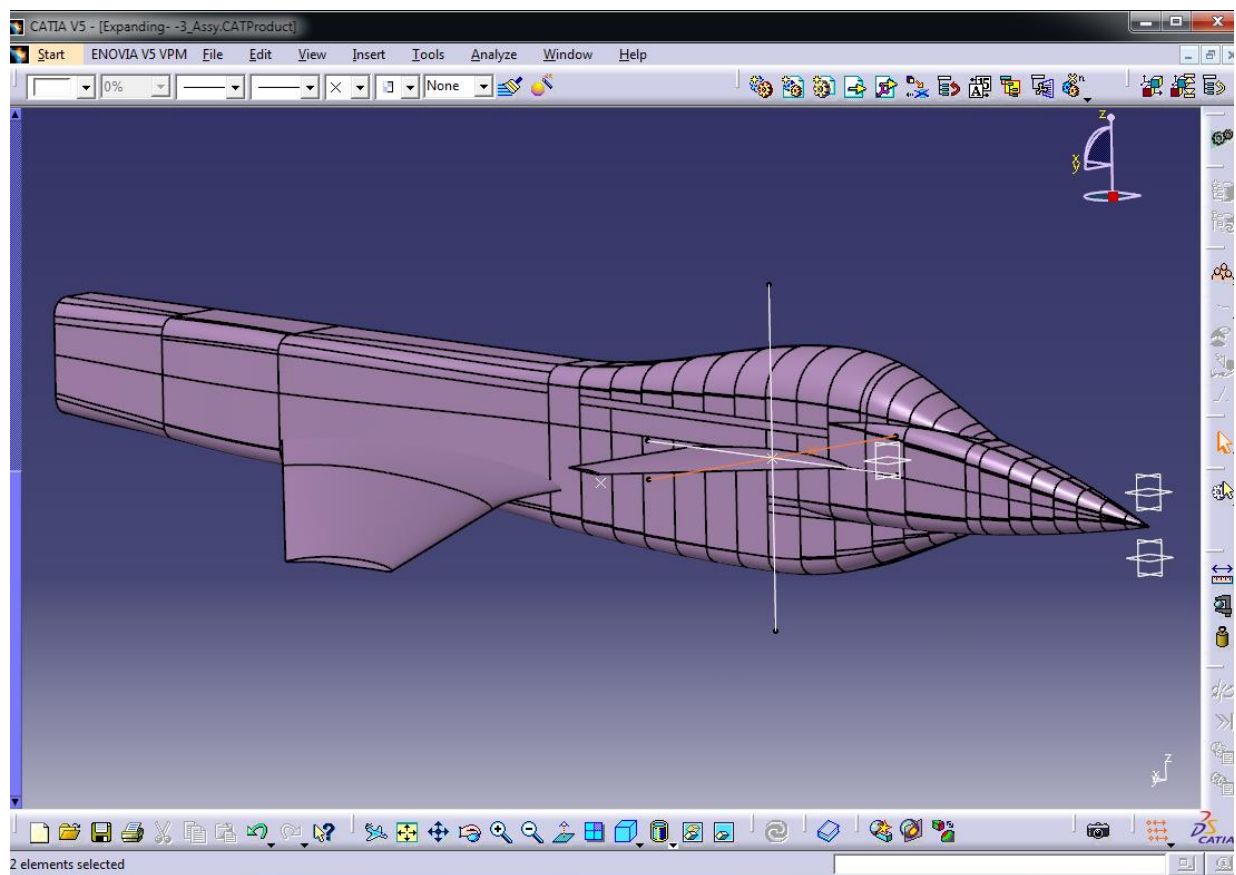
Εικόνα A1: Εισαγωγή Ατράκτου και Πτέρυγας στο Assembly Design

Επιλέγοντας την εντολή **Snap**  της γραμμής εργαλείων **Move** και έπειτα με τη σειρά πρώτα το σημείο σύνδεσης της Πτέρυγας και στη συνέχεια το σημείο σύνδεσης της Πτέρυγας στην Άτρακτο, μεταφέρεται η Πτέρυγα στην τελική της θέση (Εικόνα A2). Αντίστοιχα εισάγεται το πτερύγιο Canard και μεταφέρεται στο σημείο σύνδεσης με την Άτρακτο (Εικόνα A3). Στο συγκεκριμένο σημείο χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση της εντολής **Snap** , καθώς επιλέχθηκε το σημείο σύνδεσης του πτερυγίου Canard και η ευθεία που είναι παράλληλα στο άξονα Y από την Άτρακτο. Τέλος, για να περιστραφεί το πτερύγιο Canard κατά γωνία -3° σε σχέση με την Άτρακτο, χρησιμοποιήθηκε η εντολή **Angle Constraint**  της γραμμής εργαλείων **Constraints**. Για την επίτευξη της περιστροφής απαιτήθηκε η επιλογή κατά σειρά της χορδής της τομής στην ρίζα του Βοηθητικού Πτερυγίου (Chord Root Section) και της ευθείας που είναι παράλληλα με τον άξονα Z από την Άτρακτο. Στο παράθυρο διαλόγου **Constraint Properties** της εντολής **Angle Constraint** ορίζουμε την γωνία μεταξύ των ευθειών σε 93° (Εικόνα A4, A5). Για την εφαρμογή του περιορισμού της γωνίας απαιτείται η εντολή **Update**  από τη γραμμή εργαλείων ή μέσω των επιλογών **Edit** → **Update**  της κεντρικής γραμμής εργαλείων (Εικόνα A6).

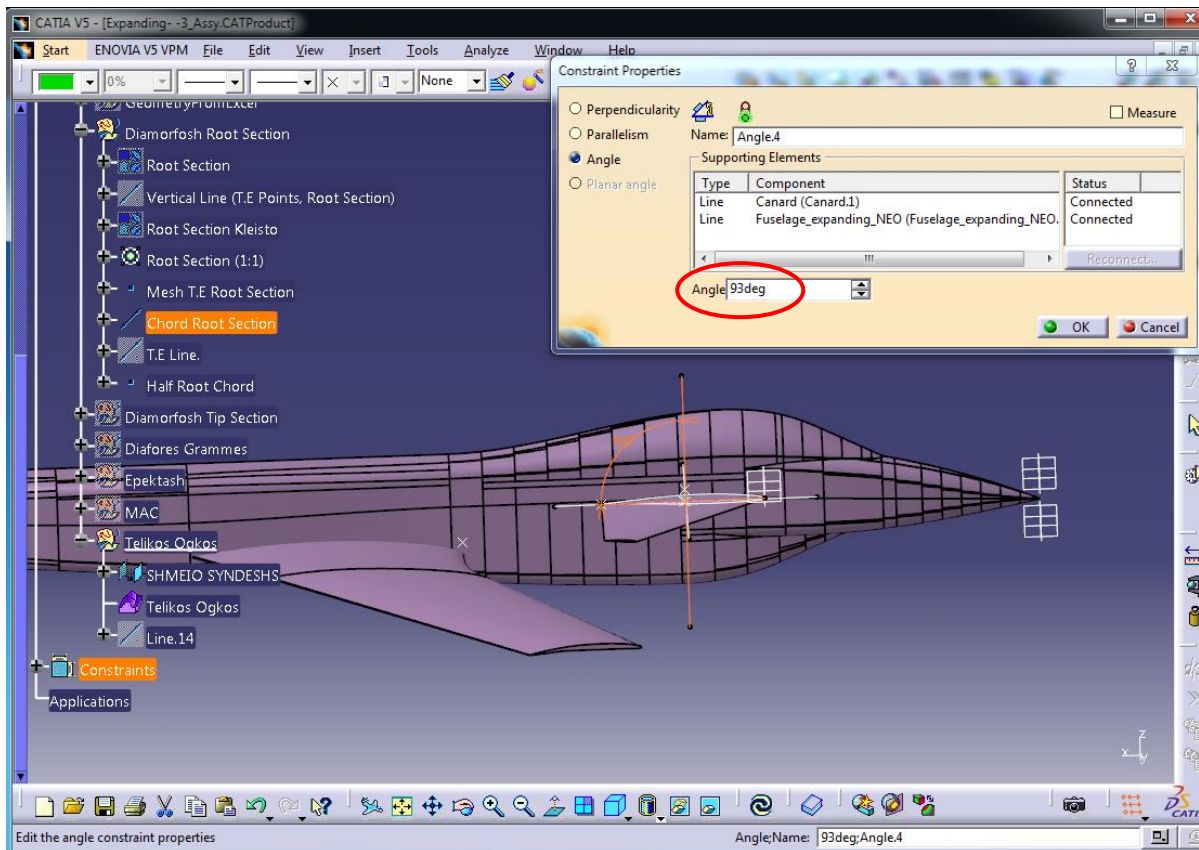
Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



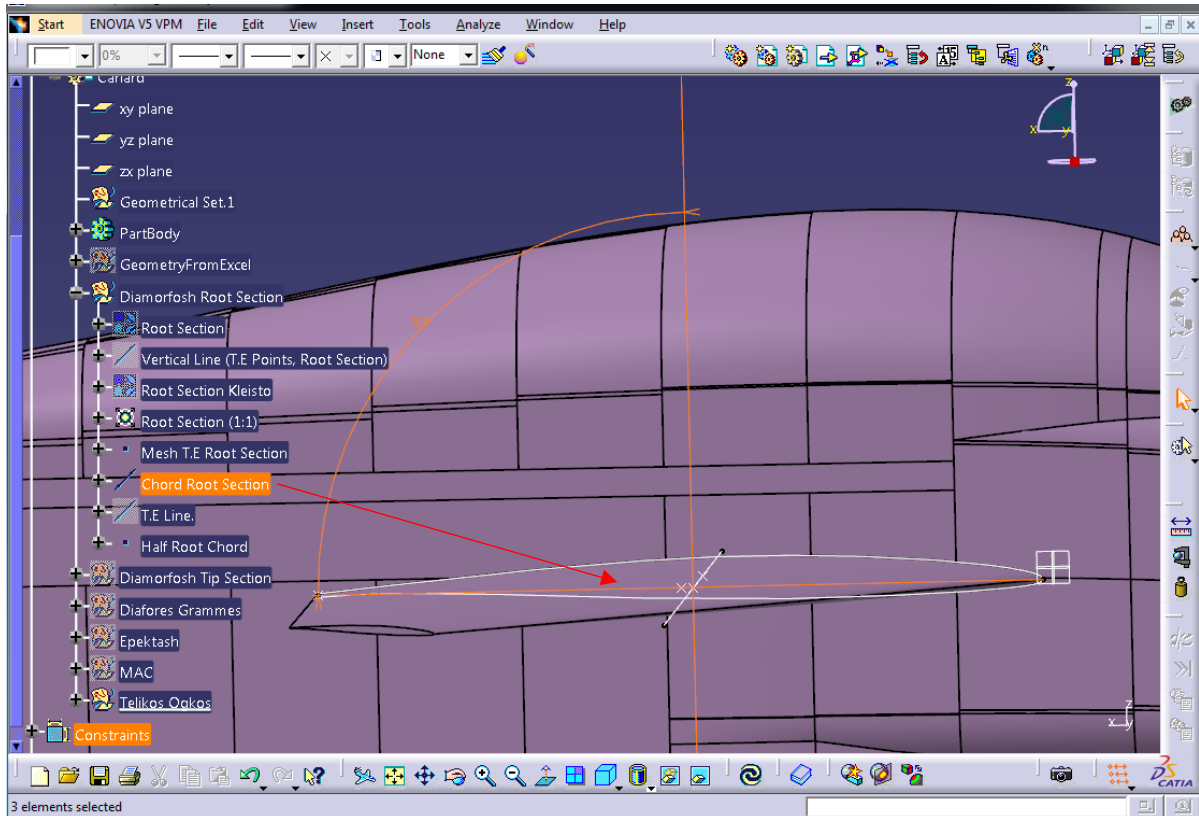
Εικόνα A2: Τελική θέση Πτέρυγας πάνω στην Άτρακτο



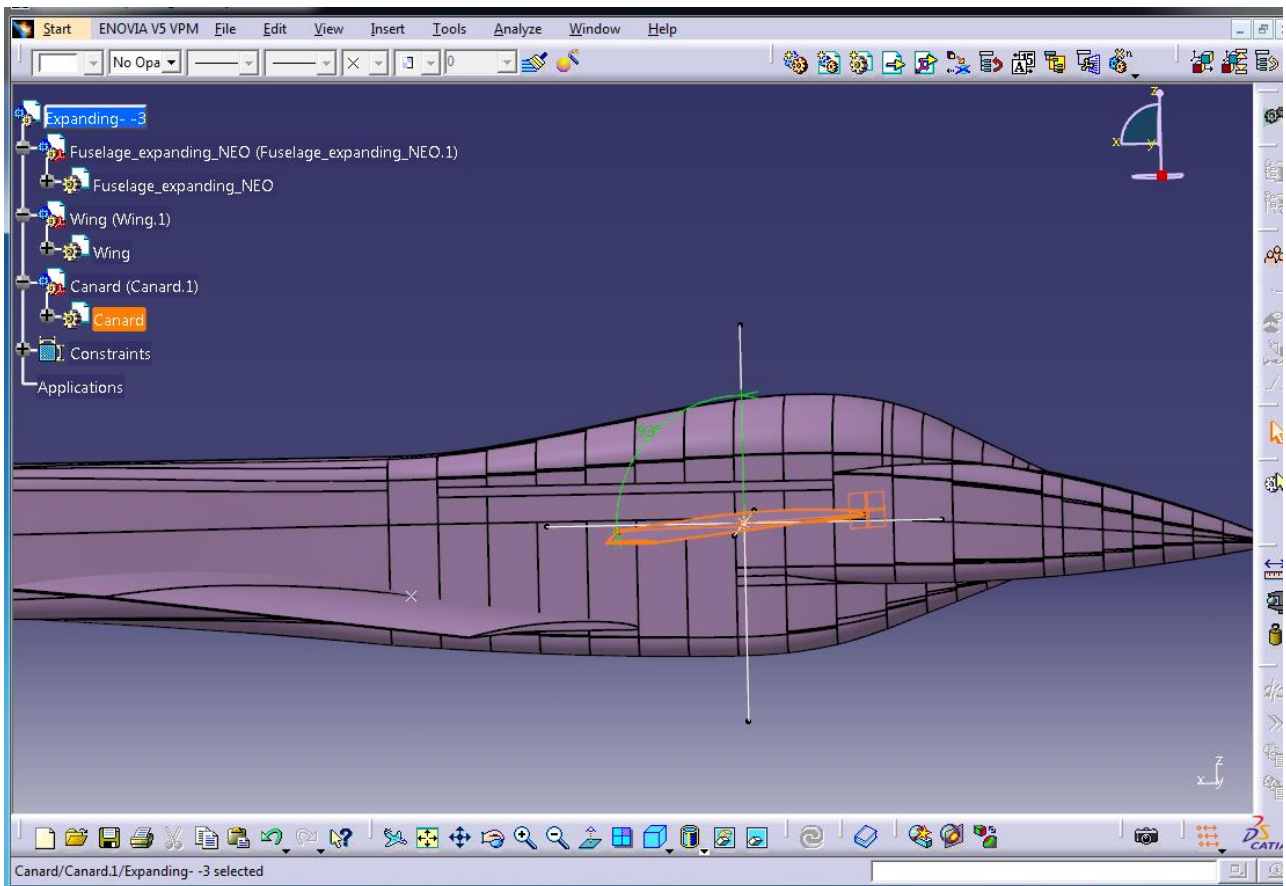
Εικόνα A3: Τελική θέση πτερυγίου Canard



Εικόνα Α4: Παράθυρο διαλόγου εντολής Angle Constraint



Εικόνα Α5: Ορίσματα εντολής Angle Constraint



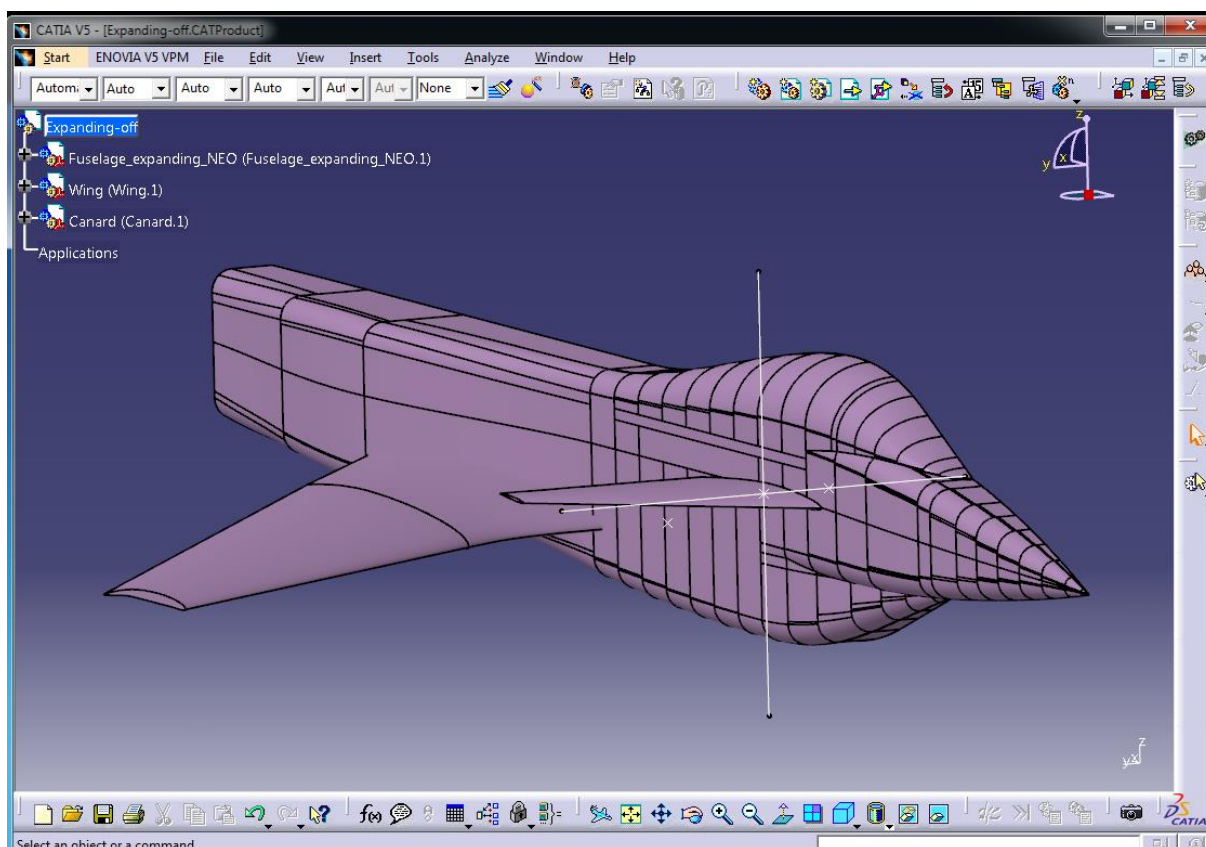
Εικόνα Α6: Περιστροφή πτερυγίου Canard

Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία 0° (Expanding - off)

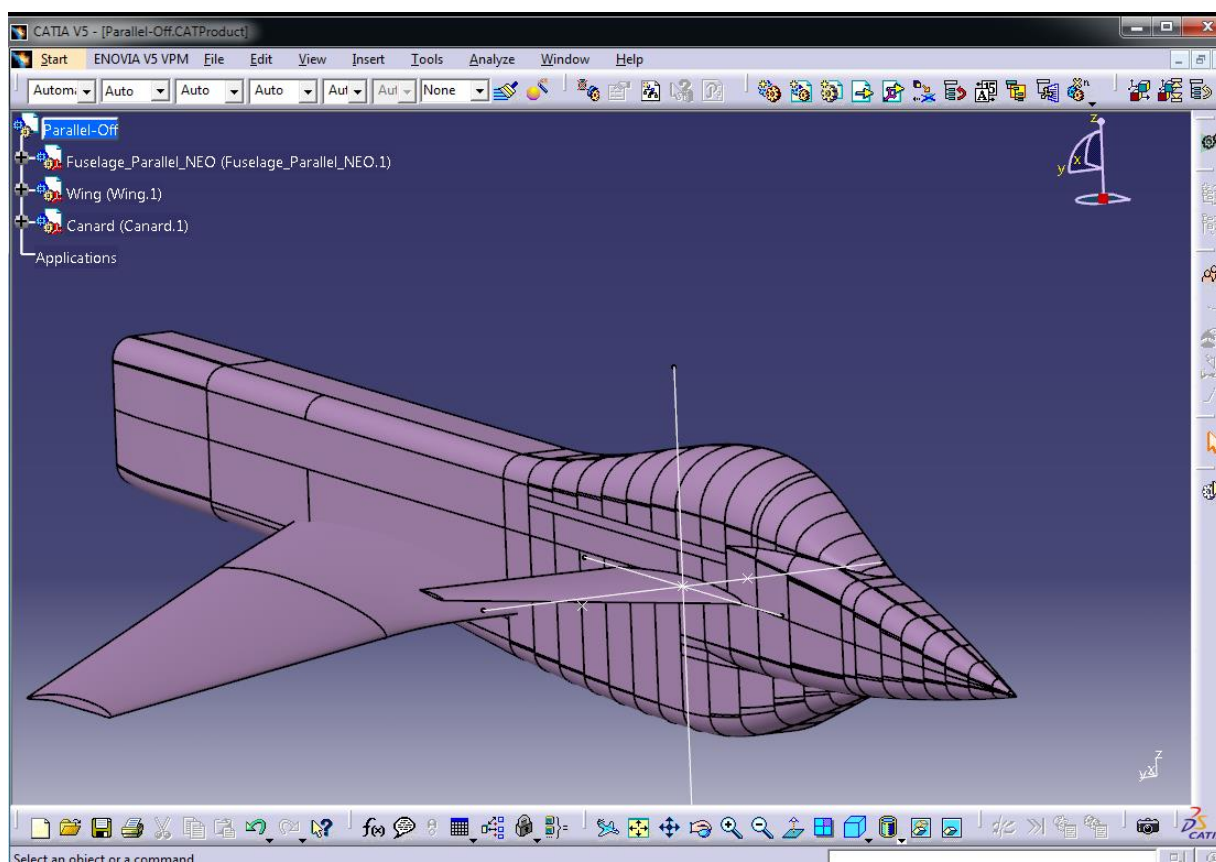
Αντίστοιχα με την προηγούμενη γεωμετρία (Expanding - -3°) αλλά χωρίς την περιστροφή του Βοηθητικού Πτερυγίου δημιουργήθηκε η γεωμετρία της Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία 0° (Expanding - off) (Εικόνα Α7).

Μη Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία 0° (Parallel - off)

Αντίστοιχα με την προηγούμενη γεωμετρία (Expanding - off) αλλά εισάγοντας την μη διογκωμένη Ατράκτο (Parallel) δημιουργήθηκε η γεωμετρία της Μη Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία 0° (Parallel - off) (Εικόνα Α8).




Εικόνα A7: Διογκωμένη Άτρακτος με Canard σε γωνία 0° (Expanding-off)

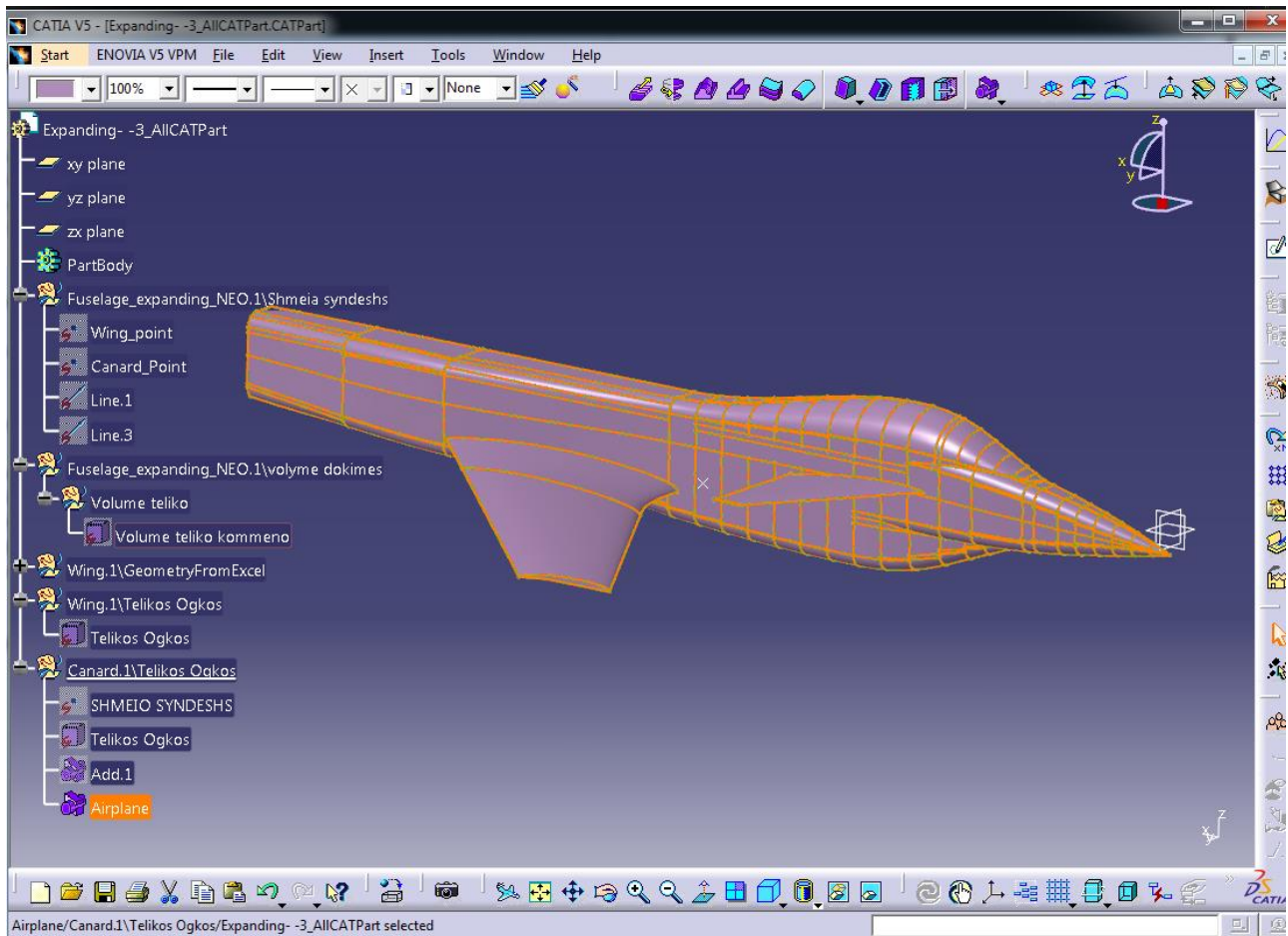


Εικόνα A8: Μη Διογκωμένη Άτρακτος με Canard σε γωνία 0° (Parallel-off)



Όγκος Ρευστού γύρω από το Μοντέλο


Όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή της παρούσας εργασίας, στα επόμενα στάδια μελετήθηκε η ροή ρευστού γύρω από το μοντέλο και όχι το μοντέλο αυτό καθαυτό. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάγκη εύρεσης του όγκου αυτού του ρευστού. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας του όγκου του ρευστού γύρω από το μοντέλο για την γεωμετρία Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία -3° . Τονίζεται ότι αντίστοιχη διαδικασία επαναλήφθηκε και για τις άλλες δύο γεωμετρίες.

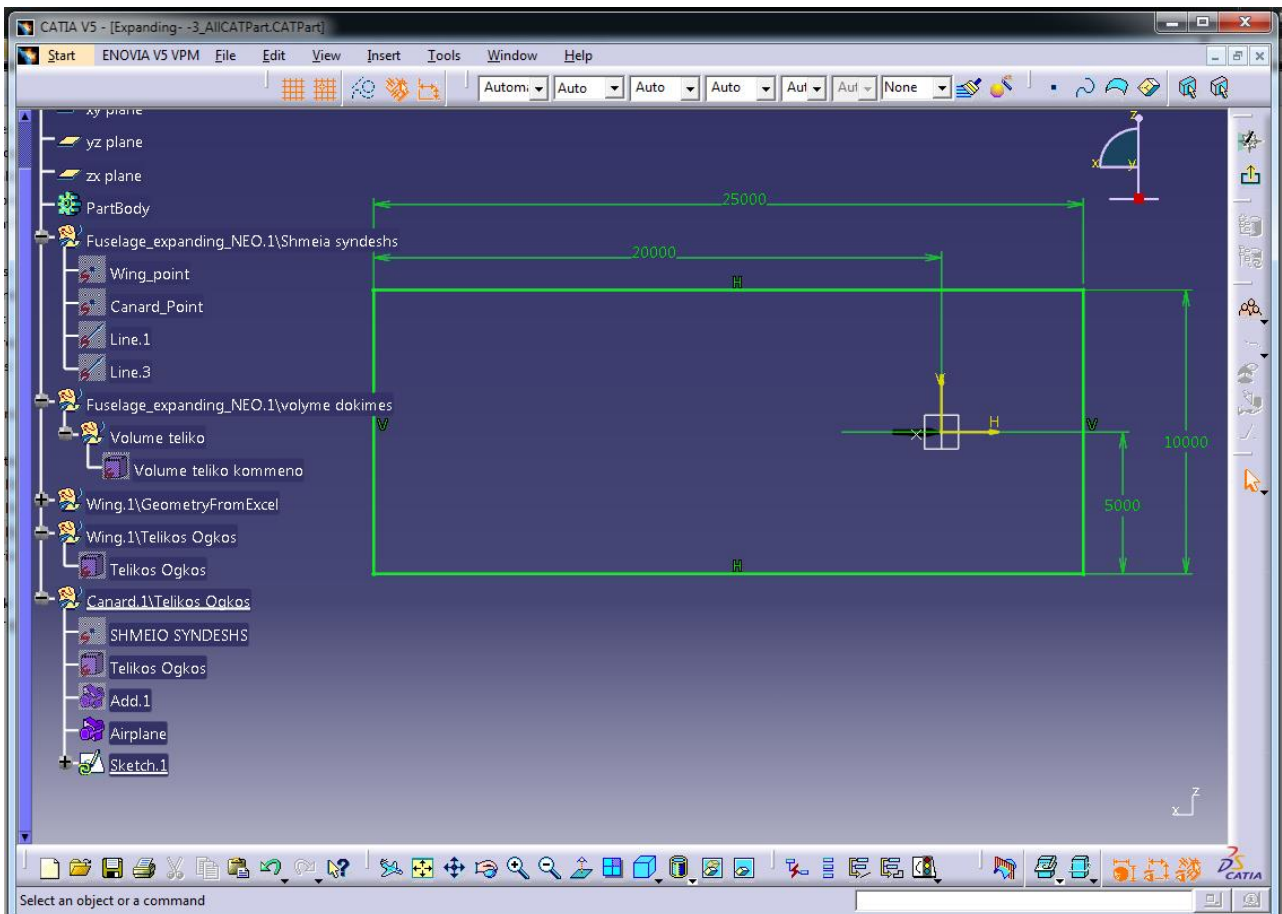
Έχοντας ολοκληρώσει την σύνθεση της γεωμετρίας στο ενεργό περιβάλλον του **Assembly Design**, επιλέγοντας τον κεντρικό κόμβο του δέντρου εντολών και ακολουθώντας το παρακάτω μονοπάτι εντολών από την κεντρική γραμμή εντολών (**Tools** → **Generate CATPart from Product**) ενεργοποιείται ένα νέο περιβάλλον εργασίας, ίδιο με το **Generative Shape Design** που εμπεριέχει όλα τα τμήματα της γεωμετρίας μαζί. Στην συνέχεια επιλέχθηκαν ξεχωριστά από το δέντρο εντολών οι τελικοί όγκοι κάθε τμήματος και πατώντας **δεξί κλικ** → **Define In Work Object** ορίστηκαν ως κύρια αντικείμενα για επεξεργασία. Έπειτα, χρησιμοποιώντας διαδοχικά την εντολή **Add** , κατασκευάστηκε ο επιθυμητός ενιαίος όγκος (Airplane) (Εικόνα A9).



Εικόνα A9: Ενιαίος όγκος γεωμετρίας (Airplane)

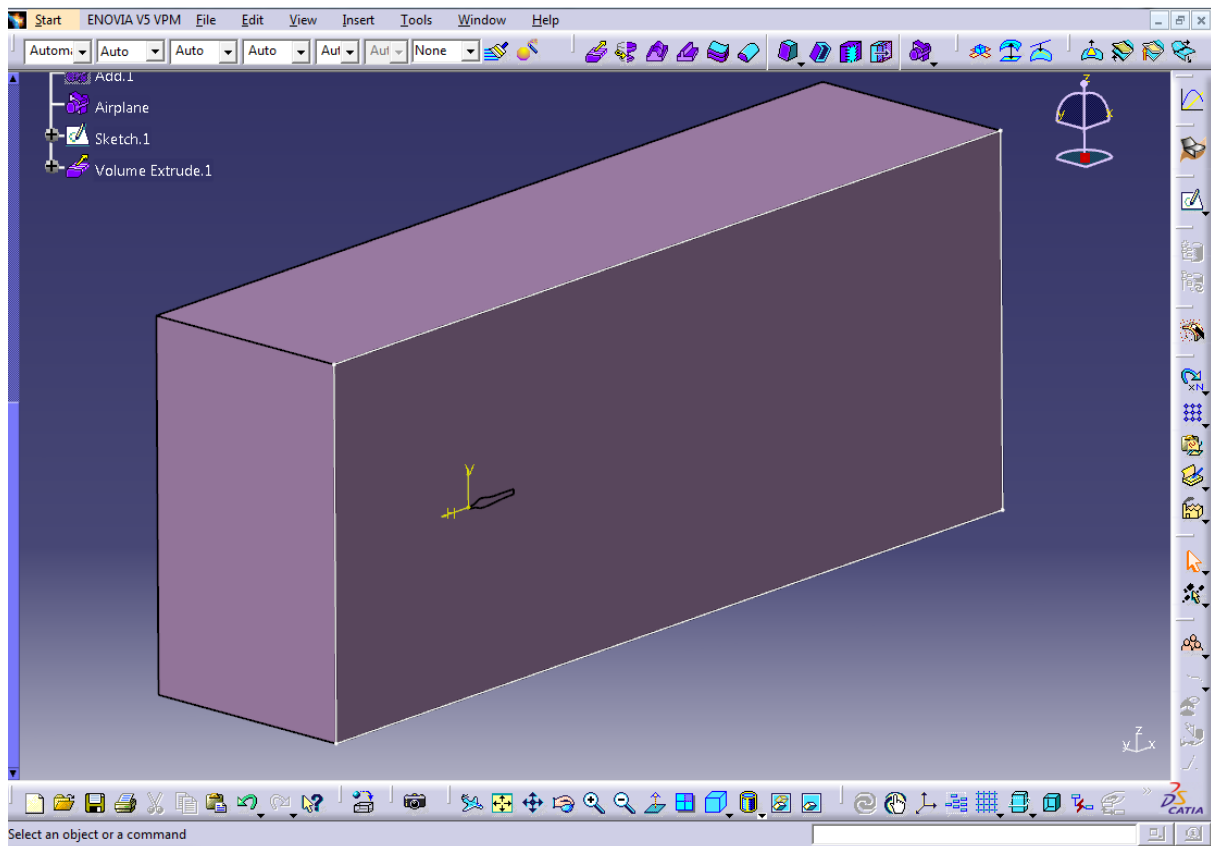
Μέσω της εντολής **Sketch**  σχεδιάστηκε ένα ορθογώνιο πάνω στο επίπεδο ZX με διαστάσεις που απεικονίζονται στην Εικόνα A10 και εμπεριέχει το μοντέλο σε συγκεκριμένη θέση. Έπειτα, έγινε χρήση της εντολής **Volume Extrude**  της γραμμής εργαλείων **Volumes** πάνω στο Sketch που σχεδιάστηκε με σκοπό να σχηματιστεί ένας ορθογώνιος παραλληλεπίπεδος όγκος διαστάσεων $25000 \times 10000 \times 6000 \text{ mm}^3$. Ο όγκος αυτός εμπεριέχει το μοντέλο και η μία πλευρά του ταυτίζεται με το επίπεδο συμμετρίας του μοντέλου (Εικόνα A11).

Τέλος, με την χρήση της εντολής **Remove**  από την γραμμής εργαλείων **Volumes** αφαιρέθηκε ο όγκος του μοντέλου από τον όγκο του ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου (Εικόνα A12). Ο όγκος που απέμεινε αποτελεί τον όγκο του ρευστού γύρω από το μοντέλο M151/1 που μελετήθηκε στο επόμενο στάδιο της εργασίας (Εικόνα A13). Για την μετέπειτα επεξεργασία του αρχείου απαιτείται η αποθήκευση του ως **STP** αρχείο. Στο στάδιο αυτό, ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός του μοντέλου και η επεξεργασία που απαιτείτο στα πλαίσια του λογισμικού CATIA V5.

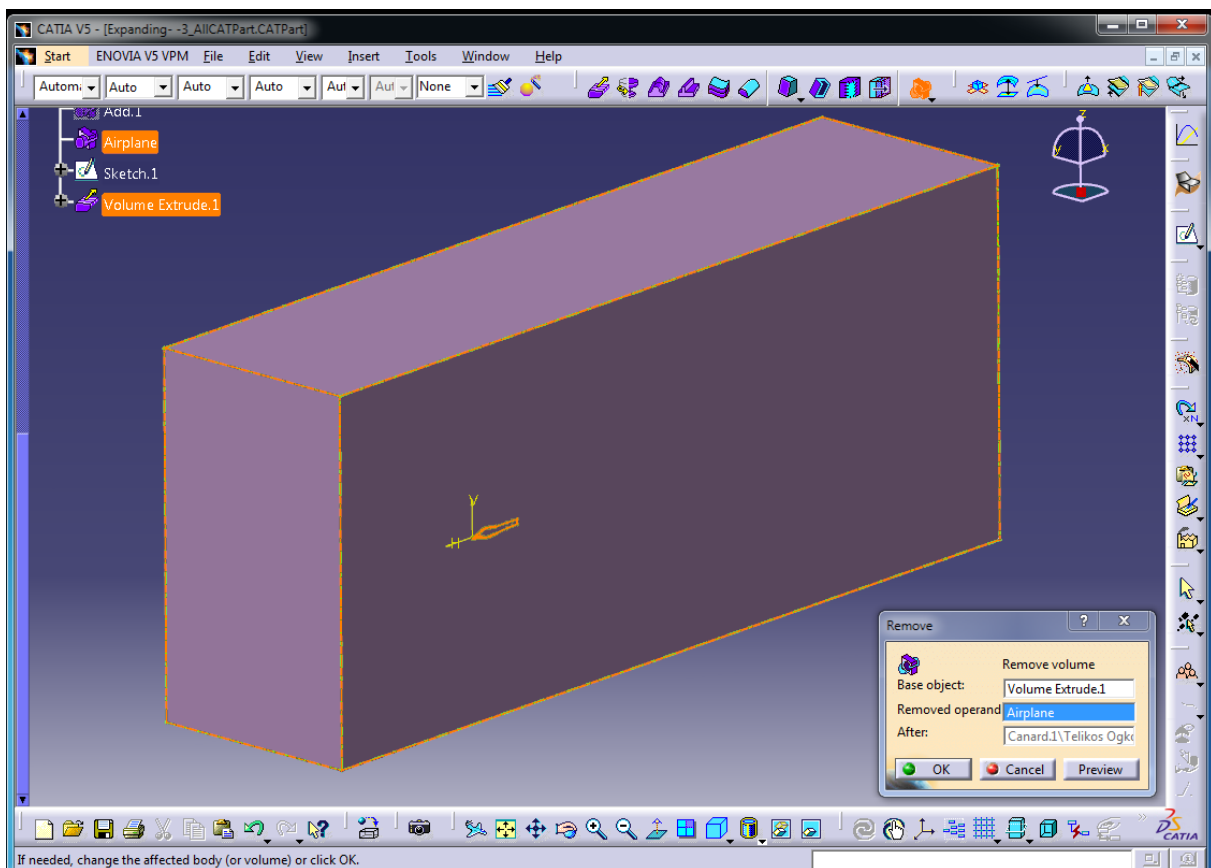


Εικόνα A10: Σχέδιο ορθογωνίου πάνω στο επίπεδο ZX

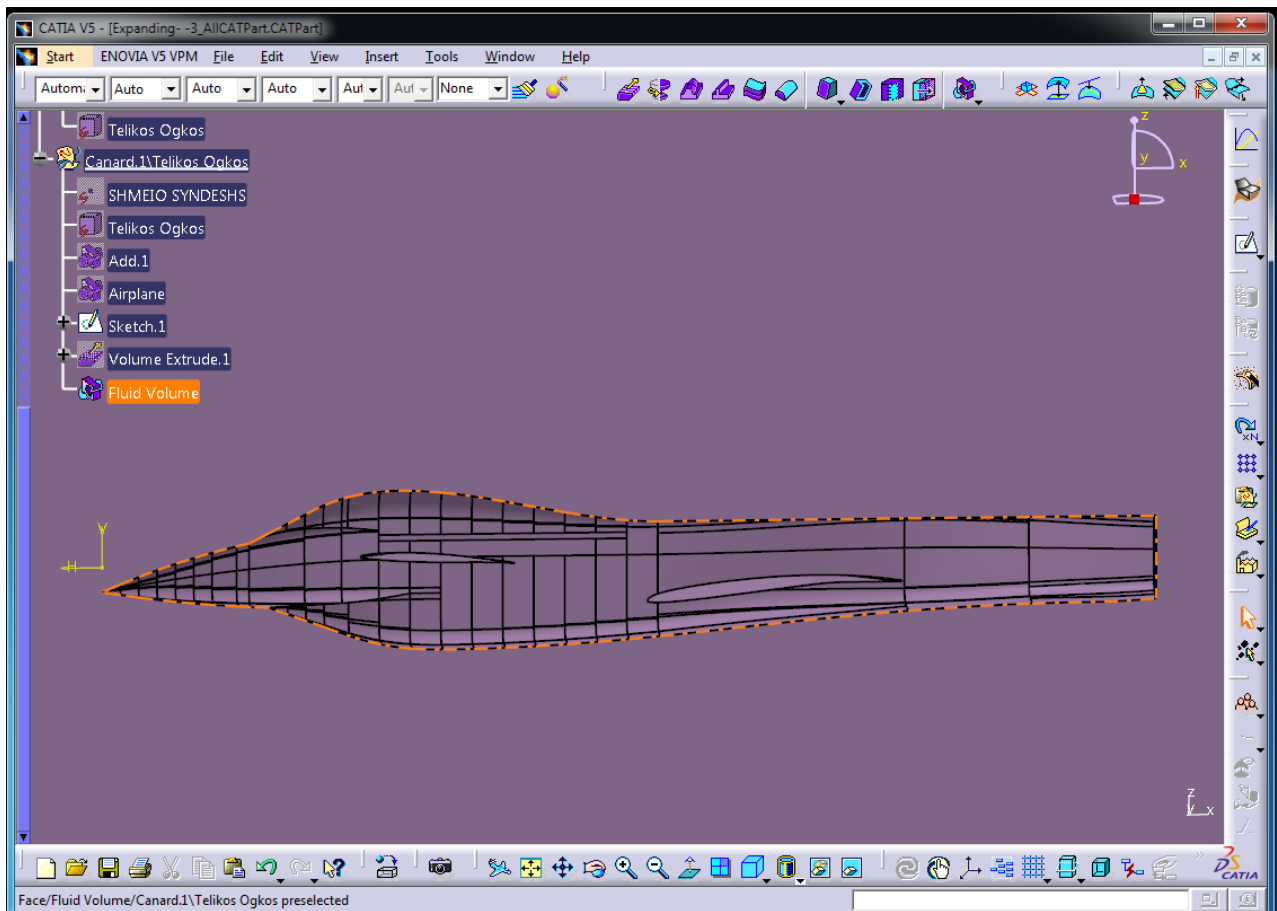
Μέρος 1^ο: Σχεδιασμός Μοντέλου



Εικόνα A11: Όγκος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου



Εικόνα A12: Εντολή Remove από την γραμμή εργαλείων Volumes



Εικόνα A13: Όγκος ρευστού γύρω από το Μοντέλο M151/1

ΜΕΡΟΣ 2Ο : ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται μια βασική περιγραφή και επεξήγηση των αρχών λειτουργίας ενός κώδικα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής καθώς και πολλών βασικών εννοιών που χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των λογισμικών CFD, ANSYS CFX (εμπορικό λογισμικό) και Galatea (ακαδημαϊκό λογισμικό) που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και γενικότερα του εμπορικού λογισμικού ANSYS. Με τη βοήθεια του λογισμικού ANSYS και των επιμέρους προγραμμάτων που περιλαμβάνει πραγματοποιήθηκε η κατάλληλη επεξεργασία του μοντέλου M151/1 και κατασκευάστηκε υπολογιστικό πλέγμα στον όγκο του ρευστού. Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βασικών τμημάτων, εισήχθησαν τα δεδομένα του προβλήματος ροής στους επιλύτες CFD που αναφέρονται παραπάνω και πραγματοποιήθηκε εξαγωγή των αποτελεσμάτων λύσης με την χρήση κατάλληλων λογισμικών μεταεπεξεργασίας. Τέλος, δια μέσου της σύγκρισης των αποτελεσμάτων από τους δύο επιλύτες, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση και πιστοποίηση του λογισμικού υπολογιστικής Ρευστομηχανικής Galatea.

Στον Πίνακα 2-1 παρουσιάζονται συνολικά το σύνολο των γεωμετριών που αναλύθηκαν και ο αριθμός των διαφορετικών δοκιμών (διαφορετικά πλέγματα) που πραγματοποιήθηκαν για την κάθε μία από αυτές. Για την κάθε γεωμετρία δημιουργήθηκαν πλέγματα με βασική διαφορά στην πυκνότητα τους με σκοπό την διεύρυνση του δείγματος των δοκιμών και την επίτευξη, στα πλαίσια του εφικτού, καλύτερης και ακριβέστερης αξιολόγησης του κώδικα Galatea.

<u>Γεωμετρίες</u>	<u>Test 1</u>	<u>Test 2</u>	<u>Test 3</u>	<u>Test 4</u>
<i>Expanding -3</i>	2.88 million Nodes	3.45 million Nodes	4.96 million Nodes	7.63 million Nodes
<i>Expanding-off</i>	2.02 million Nodes	3.8 million Nodes	5.25 million Nodes	
<i>Parallel-off</i>	4.42 million Nodes	3.42 million Nodes	5.75 million Nodes	

Πίνακας 2-1: Πλέγματα ανά γεωμετρία μοντέλου

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

Γενικά

Η Ρευστομηχανική αποτελεί ξεχωριστό κλάδο της κλασικής Μηχανικής με κύριο αντικείμενο την μελέτη της συμπεριφοράς των ρευστών επί ασκούμενων δυνάμεων ή προσφοράς ενέργειας σε αυτά. Προβλήματα Ρευστομηχανικής εμφανίζονται σε πολλούς τομείς επιστημών (όπως αναφέρεται παρακάτω), τα οποία απαιτείται να επιλυθούν με σκοπό την περεταίρω εξέλιξη των επιστημονικών κλάδων και κατ' επέκταση την βελτίωση της ποιότητας ζωής του ανθρώπου.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι να δουλέψει κανείς πάνω σε προβλήματα Ρευστομηχανικής. Ο πρώτος τρόπος είναι με θεωρητική ή αναλυτική Ρευστομηχανική. Ο δεύτερος τρόπος αφορά στην πειραματική Ρευστομηχανική. Τέλος, μεγάλος αριθμός μηχανικών, χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση προβλημάτων ρευστομηχανικής με χρήση της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD) (Oh, 2012). Η μελέτη και η επίλυση με αναλυτικές μεθόδους των προβλημάτων Ρευστομηχανικής είναι πολύ δύσκολη λόγω των μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων που τα περιγράφουν και της αυξημένης πολυπλοκότητας αυτών. Από την άλλη μεριά, η μελέτη των προβλημάτων αυτών μέσω πειραματικών δοκιμών αποδεικνύεται κατά κύριο λόγο χρονοβόρα και πολύ υψηλού κόστους. Η ανάγκη επίλυσης των παραπάνω προβλημάτων οδήγησε στη δημιουργία ενός νέου κλάδου της Ρευστομηχανικής, αυτόν της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics, CFD) (Λυγιδάκης, 2009). Με την χρήση του CFD δίνεται η δυνατότητα να προσομοιωθεί ένα οποιοδήποτε πρόβλημα ροής με τη χρήση υπολογιστή αντί των πραγματικών πειραμάτων, ενώ δίνει την άμεση δυνατότητα εξαγωγής και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων.

Η Υπολογιστική Ρευστομηχανική αναπτύχθηκε παράλληλα με τη ραγδαία εξέλιξη στον τομέα των υπολογιστών και της πληροφορικής, εξαιτίας των αρκετά μεγάλων υπολογιστικών απαιτήσεων της (Chattot, 2002). Ο κλάδος αυτός εξετάζει μεθόδους ανάπτυξης και επίλυσης διακριτών μοντέλων για τις μερικές διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τα Ρευστομηχανικά προβλήματα, χρησιμοποιώντας στοιχεία από τη μαθηματική φυσική και την αριθμητική ανάλυση. Όσον αφορά στην περιγραφή της κίνησης των ρευστών στην θεωρούμενη μη-συνεκτική κίνηση αυτών χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις Euler, ενώ στην συνεκτική κίνηση οι εξισώσεις Navier – Stokes. Λόγω αδυναμίας αναλυτικής επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων καθίσταται αναγκαία η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Με την αύξηση των δυνατοτήτων αυτών, ιδιαίτερα κατά την τελευταία 15ετία, αποδείχθηκαν ισχυρά εργαλεία, ικανά να επιλύουν τις εν λόγω διαφορικές εξισώσεις με ικανοποιητική ακρίβεια και σε αποδεκτό χρόνο. Το γεγονός αυτό είχε ως συνέπεια την εύρεση λύσεων σε πολλά ρευστομηχανικά προβλήματα σε ερευνητικό επίπεδο αλλά και την ταχεία αύξηση του επιστημονικού ενδιαφέροντος και του αριθμού επιστημόνων στο συγκεκριμένο τομέα.

Για τον υπολογισμό μιας προσεγγιστικής αριθμητικής λύσης είναι απαραίτητη η χρήση μιας μεθόδου διακριτοποίησης, η οποία ουσιαστικά προσεγγίζει το σύστημα των μερικών διαφορικών εξισώσεων με ένα σύστημα αλγεβρικών και το οποίο δύναται να επιλυθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι προσεγγίσεις εφαρμόζονται σε μικρά διαστήματα του χώρου (και μικρά χρονικά βήματα για μεταβατικά προβλήματα), οπότε η λύση αποδίδεται σε διακριτά σημεία του χώρου (και του χρόνου). Σημειώνεται ωστόσο ότι, η ακρίβεια της λύσης εξαρτάται σημαντικά από την ποιότητα της προσέγγισης που χρησιμοποιήθηκε (Αδαμούδης, 2005).

Σε θεωρητικό επίπεδο είναι εφικτός ο υπολογισμός λύσης με οποιαδήποτε επιθυμητή ακρίβεια. Παρόλα αυτά, σε πολλά πρακτικά προβλήματα ροής ρευστών, όπως η τυρβώδη ροή και οι πολυφασικές ροές, δεν είναι εφικτή η εύρεση ακριβούς λύσης με αποτέλεσμα την ανάγκη επινόησης μοντέλων. Αν και η χρήση μοντέλων μειώνει την ακρίβεια της λύσης, μειώνει αισθητά το υπολογιστικό κόστος, με συνέπεια να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές. Σε περίπτωση που μια αναλυτική ή πειραματική λύση υπάρχει, η αριθμητική προσομοίωση και τα

μαθηματικά μοντέλα τα οποία κωδικοποιούνται σε προγράμματα υπολογιστών επιβεβαιώνονται με σύγκριση με την ήδη υπάρχουσα λύση. Αυτή η σύγκριση αποτελεί επιτακτική ανάγκη για την εξακρίβωση της ορθότητας κάθε αριθμητικής λύσης σε σχέση με την πραγματικότητα. Το γεγονός ότι μία μαθηματική περιγραφή και λύση έχει την δυνατότητα να μοντελοποιηθεί, ονομάζεται *πιστοποίηση/επικύρωση (validation)* και αποτελεί την συνηθέστερη τακτική εξαγωγής συμπερασμάτων (Oh, 2012). Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις δεν υπάρχει αναλυτική λύση. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιείται η προσομοίωση για την εύρεση της υπολογιστικής προσεγγιστικής λύσης ως η οικονομικότερη επιλογή από πλευράς ασφάλειας, εξοικονόμησης χρόνου και άλλων. Για παράδειγμα, αν είναι επιθυμητή η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων για 3D ροή γύρω από έναν κύλινδρο για διάφορους τύπους ρευστού και μεταβαλλόμενες ταχύτητες, το CFD αποδεικνύεται μία πολύ χρήσιμη μέθοδος. Θα απαιτούνταν πάρα πολύ χρόνος να αλλάξει το ρευστό, να καθαριστεί το δοχείο για κάθε επιθυμητό τύπο ρευστού, όπως και να αλλάξει η ταχύτητα ροής του ρευστού, σε περίπτωση της πειραματικής μεθοδολογίας. Με το CFD η διαφορά στις προσομοιώσεις υλοποιείται με απλή μεταβολή της τιμής της ταχύτητας, πυκνότητας, θερμοκρασίας και όποιου άλλου δεδομένου είναι απαραίτητο.

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένες βασικές περιπτώσεις χρήσης της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Malalasekra W. & Versteeg H., 2007):

- Αεροδυναμική αεροσκαφών και οχημάτων (άνωση και οπισθέλκουσα).
- Υδροδυναμική πλοίων.
- Κινητήρες (εσωτερικής καύσης και αεριωθούμενοι).
- Στροβιλομηχανές – Αεροσυμπιεστές (ροή, διάχυση και μετάδοση θερμότητας).
- Ηλεκτρική και ηλεκτρονική μηχανική (ψύξη πλακετών).
- Χημική μηχανική (ανάμειξη, διαχωρισμός, σχηματισμός πολυμερών).
- Εσωτερικός και εξωτερικός σχεδιασμός κτηρίων (φορτία ανέμου, θέρμανση, εξαερισμός).
- Ναυπηγική μηχανική (δομικά φορτία πλοίων).
- Περιβαλλοντική μηχανική (κατανομή και εξάπλωση μόλυνσης).
- Υδρολογία και ωκεανογραφία (ροή σε ποτάμια, εκβολές, ωκεανούς).
- Μετεωρολογία (πρόβλεψη καιρού, μελέτη αέριων στρωμάτων).
- Βιοφαρμακευτική μηχανική και ιατρική (ροή αίματος στο κυκλοφορικό).

Περιγραφή Αρχής Λειτουργίας CFD Κώδικα

Οι κώδικες CFD είναι δομημένοι πάνω σε αριθμητικούς αλγόριθμους που επιλύουν προβλήματα ροής ρευστών. Οι κώδικες αυτοί παρέχουν εύκολη πρόσβαση και λογική σχεδίασης, ώστε να μπορεί εύκολα κάποιος να ορίσει τις παραμέτρους του προβλήματος και να εξάγει τα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτόν, όλοι οι CFD κώδικες (προγράμματα), εστιάζοντας κυρίως στους εμπορικούς, αποτελούνται από τρία βασικά τμήματα.

- Προ-Επεξεργαστή (Pre-processor)
- Επιλύτη (Solver)
- Μετά- Επεξεργαστή (Post- processor)

Προ-επεξεργαστής (Pre-processor)

Κατά την διαδικασία της προ-επεξεργασίας εισάγονται τα δεδομένα του προβλήματος ροής. Αυτό πραγματοποιείται συνήθως μέσω μια εύχρηστης πλατφόρμας επικοινωνίας με τον χρήστη, που στην συνέχεια μετατρέπει τα δεδομένα σε μορφή κατάλληλη για την εισαγωγή στον επιλύτη. Τα δεδομένα εισαγωγής κατηγοριοποιούνται ως κάτωθι:

- Ορισμός της γεωμετρίας.
- Δημιουργία υπολογιστικού πλέγματος.
- Επιλογή φυσικών και χημικών φαινομένων που θα μοντελοποιηθούν.
- Ορισμός ιδιοτήτων ρευστού.
- Ορισμός οριακών συνθηκών.

Σημειώνεται ότι η λύση στο πρόβλημα ροής (ταχύτητα, πίεση, θερμοκρασία κ.α.) ορίζεται στους κόμβους σε κάθε κελί. Η ακρίβεια της λύσης εξαρτάται από τον αριθμό των κελιών και των κόμβων του πλέγματος. Γενικά, όσο πυκνότερο πλέγμα δημιουργηθεί τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια της λύσης επιτυγχάνεται. Η δημιουργία βέλτιστου πλέγματος επιτυγχάνεται με την μεταβολή της πυκνότητας του ανάλογα με την κρισιμότητα κάθε περιοχής της γεωμετρίας και με σκοπό την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια της λύσης σε συνδυασμό με το μικρότερο δυνατό υπολογιστικό κόστος (Malalasekera W. & Versteeg H., 2007).

Επιλύτης

Με την πάροδο των ετών αναπτύχθηκαν διάφορες μεθοδολογίες αριθμητικής επίλυσης, με πλήθος διαφορών μεταξύ τους, οι οποίες εστιάζονται κυρίως στον τομέα εφαρμογής τους. Π.χ., οι τρεις πιο δημοφιλείς και συνηθισμένες μέθοδοι διακριτοποίησης είναι:

- Μέθοδος διακριτοποίησης πεπερασμένων διαφορών.
- Μέθοδος διακριτοποίησης πεπερασμένων στοιχείων.
- Μέθοδος διακριτοποίησης πεπερασμένων όγκων.

Άλλες μέθοδοι είναι η μέθοδος των οριακών στοιχείων (boundary element methods), η υψηλής ανάλυσης (high- resolution methods) και αυτή άνευ πλέγματος όπως η φασματική μέθοδος (Oh, 2012).

Οι αριθμητικοί αλγόριθμοι περιγράφονται βασικά από τρία βήματα:

- Εισαγωγή και προσαρμογή των εξισώσεων ροής (μερικές διαφορικές εξισώσεις) πάνω σε όλους τους (πεπερασμένους) όγκους ελέγχου της γεωμετρίας.
- Διακριτοποίηση-Μετατροπή των ολοκληρωτικών εξισώσεων σε αλγεβρικές εξισώσεις.
- Επίλυση του αλγεβρικού συστήματος εξισώσεων με μία επαναληπτική μέθοδο.

Μετά- Επεξεργαστής

Κατά την μετέπειτα επεξεργασία πραγματοποιείται διαχείριση μεγάλου όγκου πληροφορίας μέσω κατάλληλου προγράμματος. Σε αυτό οφείλεται η δυνατότητα εύκολης και γρήγορης εξαγωγής συμπερασμάτων, μέσω της ευέλικτης επεξεργασίας των αποτελεσμάτων και

την δυνατότητα οπτικοποίησης αυτών. Έτσι μέσω του προγράμματος αυτού γίνεται εφικτή η υλοποίηση των παρακάτω (Malalasekra W. & Versteeg H., 2007).

- Εμφάνιση γεωμετρίας και πλέγματος.
- Δημιουργία γραφημάτων με βέλη, γραμμές, χρωματικούς διαχωρισμούς, 2D, 3D.
- Οπτικοποίηση ροής σωματιδίων.
- Διαχείριση προβολής αποτελεσμάτων (περιστροφή, εστίαση κ.α.).
- Έγχρωμη εξαγωγή αποτελεσμάτων.
- Animation.

Στοιχεία Μιας Μεθόδου Αριθμητικής Επίλυσης

Στη συνέχεια αναφέρονται επιγραμματικά και έπειτα περιγράφονται αναλυτικά τα σημαντικότερα στοιχεία που συνιστούν μια μέθοδο αριθμητικής επίλυσης:

- Το μαθηματικό μοντέλο.
- Η μέθοδος διακριτοποίησης.
- Το σύστημα συντεταγμένων και η διανυσματική βάση.
- Το πλέγμα.
- Οι προσεγγίσεις.
- Η μέθοδος επίλυσης.
- Το κριτήριο σύγκλισης.

Το Μαθηματικό Μοντέλο

Το μαθηματικό μοντέλο περιλαμβάνει το σύστημα των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την ροή και τις οριακές συνθήκες του προβλήματος, όπως για παράδειγμα την αρχή διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας), τις εξισώσεις Euler (εξισώσεις ορμής για μη συνεκτικό ρευστό), την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας (Α' Θερμοδυναμικός Νόμος για ανοικτά συστήματα σε διαφορική μορφή). Ανάλογα με τον τύπο της ροής και γενικότερα ανάλογα με το υπό εξέταση ρευστομηχανικό πρόβλημα, πραγματοποιείται και η κατάλληλη διατύπωση του συστήματος των μερικών διαφορικών εξισώσεων, π.χ. για δύο ή τρεις διαστάσεις, για συμπιεστό ή ασυμπίεστο ρευστό, για συνεκτική ή μη ροή κ.α. Εφόσον υφίστανται επιπλέον φυσικά φαινόμενα, όπως η παρουσία τύρβης, η καύση ή η μεταφορά θερμότητας, το μαθηματικό μοντέλο διαφοροποιείται περαιτέρω ώστε να συμπεριλάβει τα προαναφερθέντα φυσικά φαινόμενα στο σύστημα των μερικών διαφορικών εξισώσεων (Λυγιδάκης, 2009)

Η Μέθοδος Διακριτοποίησης

Στη συνέχεια απαιτείται η επιλογή της μεθόδου διακριτοποίησης, η οποία προσεγγίζει το σύστημα των εξισώσεων με ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Η λύση που προκύπτει από το προαναφερθέν σύστημα προσφέρει μια προσέγγιση της λύσης σε διακριτά σημεία του πεδίου ροής. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι βασικές και πιο δημοφιλείς μέθοδοι διακριτοποίησης είναι: α) η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite differences), β) η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (finite volumes) και γ) η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements). Όλες οι παραπάνω μέθοδοι αποδίδουν εν γένει την ίδια ποιοτικά

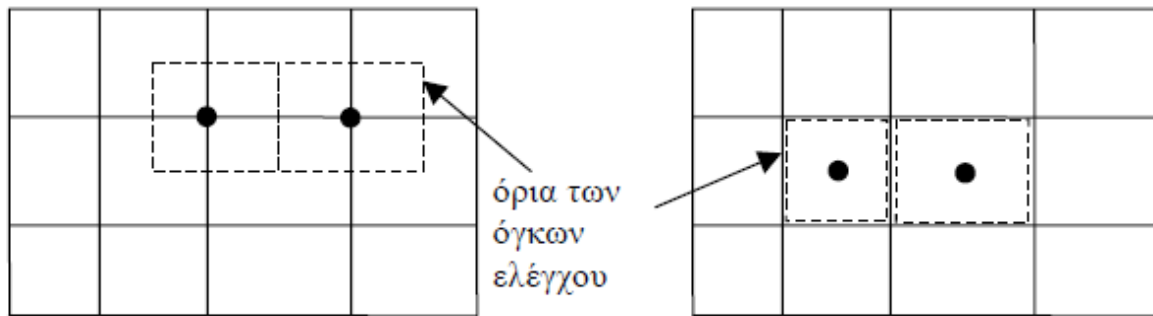
λύση, εφόσον βέβαια χρησιμοποιηθεί πλέγμα υψηλής πυκνότητας. Επομένως, η επιλογή της μεθόδου καθορίζεται κυρίως από τη φύση του υπό εξέταση προβλήματος (Λυγιδάκης, 2009).

Η μέθοδος διακριτοποίησης των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί την παλαιότερη από τις βασικές μεθόδους καθώς και την πιο εύκολα εφαρμόσιμη σε απλές γεωμετρίες. Χρησιμοποιήθηκε πρώτα από τον Euler γύρω στο 1768 (Blazek, 2001). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο σε δομημένα πλέγματα και δεν είναι τόσο κοινά διαδεδομένη όσο οι άλλες δύο, εξαιτίας κυρίως των γεωμετρικών περιορισμών στην εφαρμογή της (Oh, 2012). Κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απλότητα εφαρμογής της. Το αδύναμο σημείο της εμφανίζεται στο εύρος χρήσης της λόγω του περιορισμού χρήσης της σε δομημένα πλέγματα (Blazek, 2001). Παρόλα αυτά, στις μέρες μας υπάρχουν κώδικες που χρησιμοποιούν την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και διαχειρίζονται επικαλυπτόμενα πλέγματα, ενσωματώνοντας τα όρια των γεωμετριών με αποτέλεσμα την δυνατότητα χρήσης της σε δύσκολες και περίπλοκες γεωμετρίες (Oh, 2012).

Η μέθοδος διακριτοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε αρχικά με σκοπό την επίλυση προβλημάτων δομικής ανάλυσης στον τομέα της αντοχής υλικών (Λυγιδάκης, 2009). Εφαρμόστηκε αρχικά από τον Turner το 1956 και 10 χρόνια αργότερα ερευνητές άρχισαν να την χρησιμοποιούν και στις εξισώσεις αριθμητικής επίλυσης συνεχούς μέσου (Blazek, 2001). Η μέθοδος αυτή έγινε ελκυστική λόγω της ολοκληρωτικής διατύπωσης και της χρήσης της σε μη δομημένο πλέγμα, που είναι προτιμότερο για προβλήματα ροής γύρω από σύνθετες γεωμετρίες. Επιπλέον η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για εφαρμογή και σε μη νευτώνεια ρευστά. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει πολύ αυστηρή μαθηματική θεμελίωση, ιδιαίτερα για τα ελλειπτικά και παραβολικά προβλήματα. Παρόλα αυτά, η μέθοδος είναι μαθηματικά ισοδύναμη με την μέθοδο πεπερασμένων όγκων, αλλά με υψηλότερο αριθμητικό έργο. Για το λόγο αυτό είναι λιγότερο δημοφιλής από την μέθοδο πεπερασμένων όγκων. Τέλος, πολλές φορές οι δύο αυτές μέθοδοι συνδυάζονται, ιδιαίτερα σε μη δομημένα πλέγματα (Blazek, 2001).

Η μέθοδος πεπερασμένων όγκων αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο χωρικής διακριτοποίησης, που ουσιαστικά μετατρέπει το πολύπλοκο σύστημα των διαφορικών εξισώσεων σε ένα επιλύσιμο σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Χρησιμοποιήθηκε πρώτα από τον McDonald για την προσομοίωση 2D συνεκτικής ροής (Blazek, 2001). Η χρήση της μεθόδου επιτρέπει τη διακριτοποίηση των μερικών διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν τη ροή του ρευστού, ολοκληρώνοντας τις εξισώσεις σε όγκους ελέγχου (Control Volumes, CV). Οι τελευταίοι περιέχουν τα διακριτά σημεία του πεδίου, στα οποία θα υπολογιστούν οι μεταβλητές επίλυσης, που καλούνται και υπολογιστικοί κόμβοι. Υπάρχουν δύο τρόποι παράστασης των υπολογιστικών κόμβων. Στην πρώτη περίπτωση κάθε υπολογιστικός κόμβος, στον οποίο θα αποθηκευτούν και τα ζητούμενα μεγέθη, εντοπίζεται σε σημείο τομής των γραμμών του πλέγματος και τα όρια των όγκων αναφοράς εντοπίζονται ενδιάμεσα μεταξύ γειτονικών υπολογιστικών κόμβων. Στην δεύτερη περίπτωση, οι γραμμές του πλέγματος διαμορφώνουν τα όρια των όγκων αναφοράς και οι υπολογιστικοί κόμβοι βρίσκονται στα κέντρα τους. Η πρώτη περίπτωση που περιγράφηκε ονομάζεται *κεντροκομβική μέθοδος*, ενώ η δεύτερη ονομάζεται *κεντροκυψελική*. Για Καρτεσιανό διδιάστατο δομημένο πλέγμα δίδονται στην Εικόνα 2-1. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως με επιτυχία (Αδαμούδης, 2005). Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένων όγκων είναι η απευθείας εφαρμογή της

τμηματικής διακριτοποίησης στο φυσικό χώρο, ενώ επιπλέον δεν δημιουργείται πρόβλημα με κάθε μετατροπή στα συστήματα συντεταγμένων, όπως στην περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Συγκρίνοντας την με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία και μπορεί να εφαρμοστεί με την ίδια ευκολία και σε δομημένο αλλά και μη-δομημένο πλέγμα. Το χαρακτηριστικό αυτό την κάνει προτιμητέα και καταλληλότερη σε προβλήματα ροής με πολύπλοκη γεωμετρία (Blazek, 2001).



Εικόνα 2-1 : Κεντροκομβική και Κεντροκυψελική Μέθοδος (Αδαμούδης, 2005)

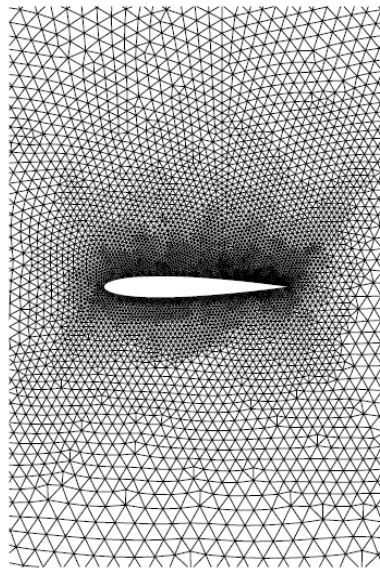
Το Σύστημα Συντεταγμένων και η Διανυσματική Βάση

Ο τρόπος διατύπωσης του συστήματος των μερικών διαφορικών εξισώσεων, όπως προαναφέρθηκε, εξαρτάται από το υπό εξέταση ρευστομηχανικό πρόβλημα. Ως εκ τούτου η μορφή του συστήματος αυτού εξαρτάται άμεσα και από το σύστημα συντεταγμένων που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Ως σύστημα συντεταγμένων δύναται να χρησιμοποιηθεί το καρτεσιανό, το κυλινδρικό, το σφαιρικό, το καμπυλόγραμμο ορθογώνιο ή μη-ορθογώνιο σύστημα, σταθερό ή μεταβλητό. Η επιλογή εξαρτάται από το υπό εξέταση πρόβλημα και επηρεάζει τελικά τον τύπο του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί.

Επιπρόσθετα, ένας άλλος παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει την διατύπωση των εξισώσεων, είναι η διανυσματική βάση. Από μαθηματική σκοπιά κάθε επιλογή της διανυσματικής βάσης είναι ισοδύναμη με τις υπόλοιπες. Αντίθετα από τη σκοπιά της αριθμητικής επίλυσης κάποιες μορφές παρουσιάζουν ιδιαίτερες δυσκολίες κατά την διαχείριση τους (Αδαμούδης, 2005).

Το Πλέγμα

Το πλέγμα διαιρεί το πεδίο ροής σε ένα πλήθος κυψελών (cells) και ορίζει ταυτόχρονα τα διακριτά σημεία, στα οποία θα υπολογιστούν οι τιμές των μεταβλητών. Κατά συνέπεια, ο τρόπος κατασκευής του πλέγματος είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την αποτελεσματική επίλυση ενός προβλήματος. Μια ποικιλία πλεγμάτων δύναται να χρησιμοποιηθεί σε φυσικά προβλήματα, όπως δομημένα ή μη-δομημένα πλέγματα, ενώ δεν υφίσταται περιορισμός στον αριθμό και στο σχήμα των κυψελών. Στα διδιάστατα πλέγματα οι κυψέλες είναι συνήθως τρίγωνα και τετράπλευρα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, ενώ στα τριδιάστατα πλέγματα οι κυψέλες είναι συνήθως τετράεδρα ή εξάεδρα, αν και υπάρχουν περιπτώσεις υβριδικών μη δομημένων πλεγμάτων με παρουσία στο ίδιο πλέγμα εξάεδρων, τετραέδρων, πρισμάτων και πυραμίδων (Λυγιδάκης, 2009).

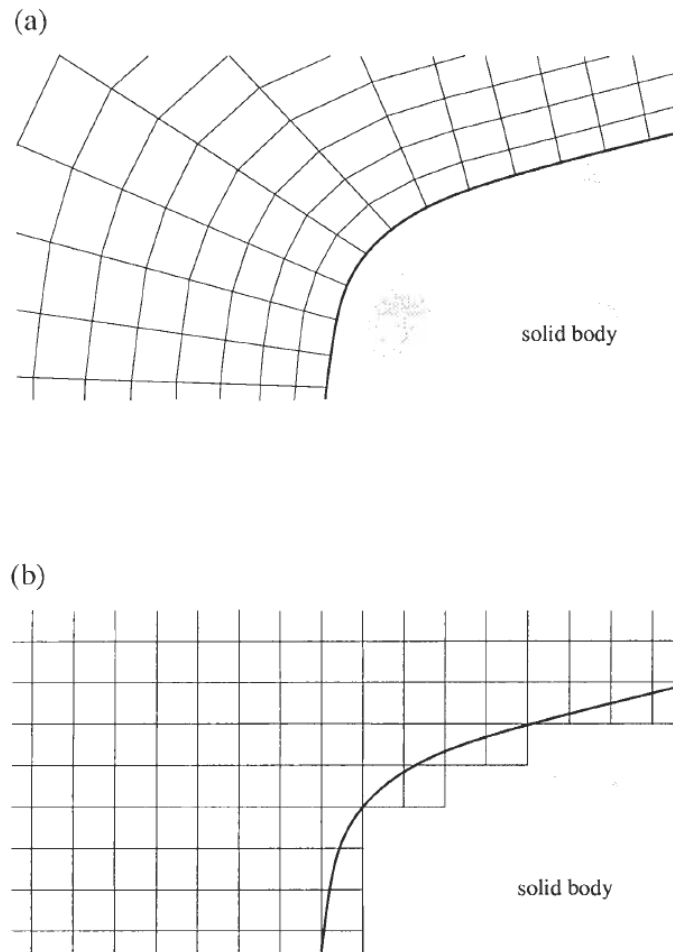


Εικόνα 2-2: Μη δομημένο πλέγμα γύρω από αεροτομή NACA 0012 στις δύο διαστάσεις (Λυγιδάκης, 2009).

Η βασικότερη προϋπόθεση στην δημιουργία πλέγματος είναι η μη ύπαρξη τρυπών μεταξύ των κελιών του πλέγματος αλλά και τα κελιά να μην υπερκαλύπτονται. Επιπρόσθετα, το πλέγμα πρέπει να είναι ομαλό, να μην έχει απότομες μεταβολές στο όγκο των κελιών ή να τεντώνονται έντονα και τα στοιχεία γενικά πρέπει να είναι όσο πιο κανονικά σχηματισμένα είναι εφικτό. Επιπλέον, αν το πλέγμα αποτελείται από τετράπλευρα ή εξάεδρα, δεν πρέπει να είναι πολύ ανακατεμένες οι γραμμές του πλέγματος. Σε αντίθετη περίπτωση τα αριθμητικά σφάλματα θα αυξηθούν σημαντικά (Blazek, 2001).

Στην περίπτωση που το πλέγμα δημιουργηθεί από τα όρια της γεωμετρίας προς τον υπόλοιπο φυσικό χώρο ονομάζεται *body-fitted grid* (Εικόνα 2-3 (α)). Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του τρόπου δημιουργίας πλέγματος είναι η μεγάλη ακρίβεια πάνω στα όρια της γεωμετρίας. Είναι απαραίτητη για τα επιφανειακά επίπεδα κατά μήκος του στερεού σώματος, προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια της τελικής λύσης. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η αύξηση της πολυπλοκότητας της εφαρμογής της δημιουργίας του πλέγματος, ιδιαίτερα στην περίπτωση πραγματικών γεωμετριών (Blazek, 2001).

Στην άλλη περίπτωση το *Cartesian grid* (Εικόνα 2-3 (b)), όπου οι ακμές των κελίων προσανατολίζονται παράλληλα με τις καρτεσιανές συντεταγμένες, μπορεί να δημιουργηθεί πολύ εύκολα. Πλεονέκτημα αυτού του τρόπου δημιουργίας πλέγματος είναι η απλούστερη εκτίμηση της ροής στις εξισώσεις από ότι με τον *body-fitted* τρόπο. Αλλά όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-3 είναι δύσκολο να επιτευχθεί μια γενικά ακριβής προσέγγιση των ορίων της γεωμετρίας. Εξαιτίας αυτού του βασικού μειονεκτήματος, η *body-fitted* προσέγγιση είναι προτιμότερη, ιδιαίτερα στο βιομηχανικό περιβάλλον όπου η διαμορφώσεις έχουν μεγάλη γεωμετρική πολυπλοκότητα (Blazek, 2001).

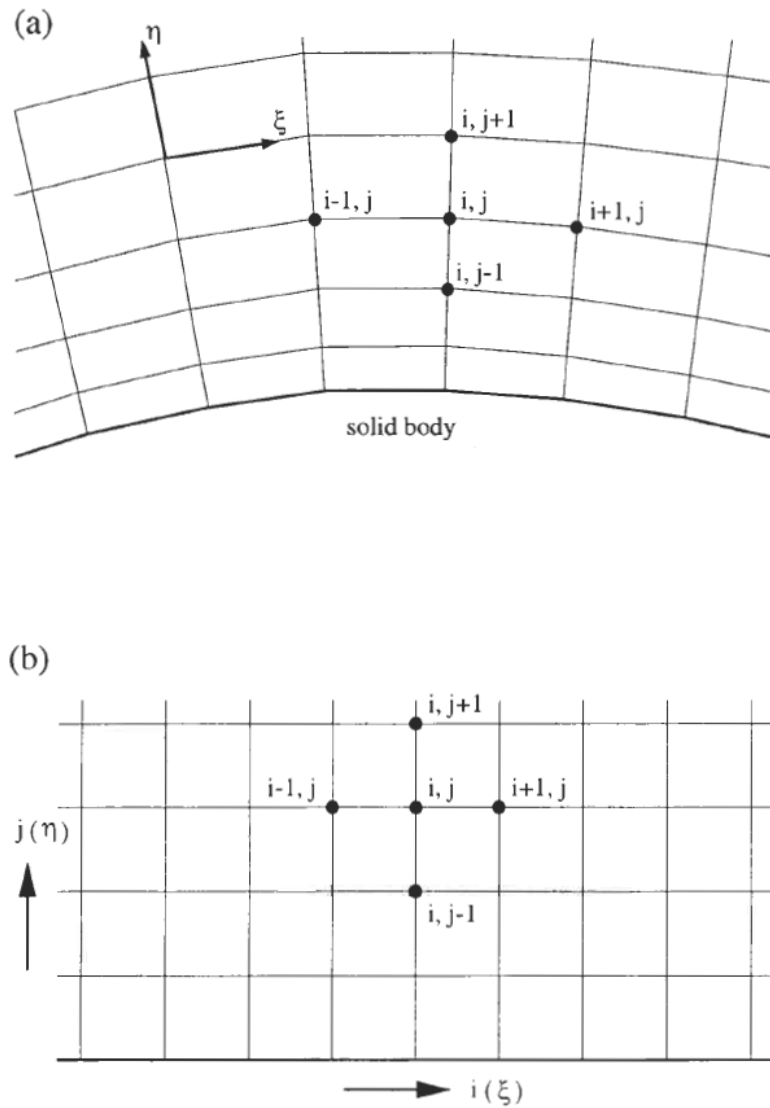


Εικόνα 2-3: Body-fitted (a) και Cartesian grid (b) κοντά σε στερεό τοίχωμα (Blazek, 2001)

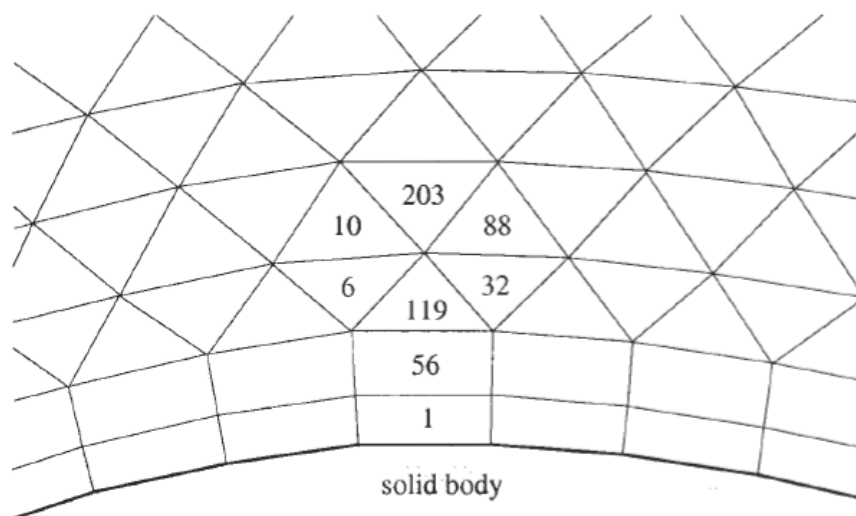
Επιπλέον υπάρχουν δύο βασικοί τύποι πλέγματος. Το *δομημένο πλέγμα (Structured grid)* όπου κάθε κόμβος του πλέγματος (node) είναι μοναδικά αναγνωρισμένος από τον δείκτη i, j, k και τις αντίστοιχες καρτεσιανές συντεταγμένες $X_{i,j,k}, Y_{i,j,k}$ και $Z_{i,j,k}$. Τα κελιά του πλέγματος είναι τετράπλευρα για 2D και εξάεδρα για 3D πλέγμα. Αν το πλέγμα είναι body-fitted, τότε ονομάζεται *καμπυλόγραμμο πλέγμα (Curvilinear grid)* (Εικόνα 2-4). Το *μη-δομημένο πλέγμα (Unstructured grid)*, αποτελεί το δεύτερο τύπο πλέγματος (Εικόνα 2-5), όπου τα κελιά του όπως και οι κόμβοι του δεν έχουν ιδιαίτερη διάταξη ή προσανατολισμό. Γειτονικά κελιά ή σημεία δεν μπορούν να είναι άμεσα αναγνωρίσιμα μέσω του δείκτη τους (π.χ. το κελί 6 γειτονεύει με το κελί 119). Στο παρελθόν, τα κελιά ήταν τρίγωνα για 2D και τετράεδρα για 3D. Σήμερα, το μη-δομημένο πλέγμα αποτελείται συνήθως από ανάμειξη τετράπλευρων και τριγώνων στο 2D και εξάεδρων, τετράεδρων, πρισμάτων και πυραμίδων για 3D, ώστε να καλύπτουν τα οριακά στρώματα κατάλληλα. Σε αυτήν την περίπτωση τα πλέγματα ονομάζονται *υβριδικά (hybrid)* ή *ανάμεικτα (mixed)*. Για παράδειγμα τα εξάεδρα και τα πρίσματα εφαρμόζονται για διακριτοποίηση των οριακών στρωμάτων και το υπόλοιπο τμήμα της ροής αποτελείται από τετράεδρα. Οι πυραμίδες χρησιμοποιούνται ως μεταβατικά στοιχεία μεταξύ εξάεδρων ή πρισμάτων και τετράεδρων (Blazek, 2001).

Τα μη δομημένα πλέγματα παρουσιάζουν σαφή πλεονεκτήματα έναντι των δομημένων πλεγμάτων. Συγκεκριμένα, τα μη δομημένα πλέγματα καθιστούν εύκολη την προσέγγιση οποιασδήποτε γεωμετρίας χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα, ενώ αντίθετα είναι πολύ δύσκολη και χρονοβόρα η κατασκευή δομημένων πλεγμάτων γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίες. Τα πλέγματα δε που δημιουργούνται στην δεύτερη περίπτωση πιθανόν να έχουν έντονα παραμορφωμένες κυψέλες, με αποτέλεσμα να εισάγονται σφάλματα στα αποτελέσματα από την πρώτη φάση κιόλας της διακριτοποίησης. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των μη δομημένων πλεγμάτων είναι η δυνατότητα τοπικής παρέμβασης στο πλέγμα, σε περιοχές όπου εμφανίζονται έντονα μεταβαλλόμενα φαινόμενα, όπως οριακά στρώματα ή κύματα κρούσης. Η προαναφερθείσα τοπική προσαρμογή του μη δομημένου πλέγματος δύναται να υλοποιηθεί κατά την διάρκεια της επίλυσης ενός προβλήματος, εφόσον εμφανιστούν μεταβατικά φαινόμενα, αυξάνοντας αρκετά την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Αντίθετα, στην περίπτωση των δομημένων πλεγμάτων η επέμβαση θα πρέπει να πραγματοποιηθεί στο σύνολο του πλέγματος, ώστε να διατηρηθεί ο χαρακτήρας του δομημένου πλέγματος.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα των μη δομημένων πλεγμάτων είναι η δυσκολία χειρισμού τους. Καθώς δεν υφίσταται το νόημα της κατεύθυνσης κατά μήκος των γραμμών του πλέγματος, παρουσιάζεται μία ακανόνιστη σύνδεση των κυψελών. Επακόλουθα, η έλλειψη δομής απαιτεί τη δημιουργία κατάλληλων δομών δεδομένων, όπου θα φυλάσσονται τα τοπολογικά στοιχεία του πλέγματος. Η δημιουργία αυτών των δομών αλλά και ο χειρισμός τους είναι αρκετά χρονοβόρος, ενώ ταυτόχρονα έχει υψηλές απαιτήσεις μνήμης από τον Η/Υ. Παράδειγμα διδιάστατου μη δομημένου πλέγματος είναι στην Εικόνα 2-2, όπου βλέπουμε το πλέγμα γύρω από μία αεροτομή NACA 0012.



Εικόνα 2-4: Δομημένο, body-fitted υπολογιστικό πλέγμα σε 2 διαστάσεις: (α) ο φυσικός χώρος, (β) ο υπολογιστικός χώρος.



Εικόνα 2-5: Μη δομημένο υβριδικό πλέγμα σε 2 διαστάσεις (Blazek, 2001)

Οι Προσεγγίσεις

Ανάλογα με την μέθοδο διακριτοποίησης που χρησιμοποιείται απαιτούνται και οι κατάλληλες προσεγγίσεις, ώστε να υλοποιηθεί η μετάβαση από τις διαφορικές στις αλγεβρικές εξισώσεις. Στην περίπτωση της μεθόδου διακριτοποίησης των πεπερασμένων διαφορών, επιλέγονται οι προσεγγίσεις των παραγώγων, ενώ στην περίπτωση της μεθόδου διακριτοποίησης των πεπερασμένων όγκων, επιλέγονται οι προσεγγίσεις των ολοκληρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, προσεγγίζονται τα επιφανειακά και τα τριπλά ολοκληρώματα που εμφανίζονται στις εξισώσεις, όταν οι τελευταίες ολοκληρωθούν σε κατάλληλο όγκο αναφοράς. Τέλος, στη μέθοδο διακριτοποίησης των πεπερασμένων στοιχείων απαιτείται η επιλογή των στοιχείων και των συναρτήσεων βαρύτητας (weighting functions) (Αδαμούδης, 2005).

Γενικότερα, η ακρίβεια των προσεγγίσεων καθορίζεται από πολλούς παράγοντες. Συνήθως, η υψηλή ακρίβεια απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος, πλέγμα υψηλής ποιότητας, ενώ παρουσιάζει δυσκολία κατά τον προγραμματισμό και παράγει περίπλοκους πίνακες. Κατά συνέπεια, απαιτείται ένας συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας, της απλότητας, της ευκολίας στην εφαρμογή και της υπολογιστικής αποδοτικότητας.

Η Μέθοδος Επίλυσης

Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία των προσεγγίσεων αποφέρει τελικά ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με μέγεθος ανάλογο του μεγέθους του πλέγματος. Το εν λόγω σύστημα επιλύεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, κατά την οποία μια αρχική λύση βελτιώνεται σε κάθε επανάληψη (εσωτερική ή εξωτερική). Η επιλογή του κατάλληλου επιλύτη, π.χ., ρητού ή πεπλεγμένου, εξαρτάται από τον τύπο του πλέγματος και από το πλήθος των κόμβων που εμπλέκονται σε κάθε αλγεβρική εξίσωση (Λυγιδάκης, 2009).

Το Κριτήριο Σύγκλισης

Ένα κριτήριο σύγκλισης, το οποίο καθορίζεται από τον χρήστη, αναλαμβάνει τελικά τον τερματισμό τόσο των εσωτερικών όσο και των εξωτερικών επαναλήψεων. Αυτό το κριτήριο σύγκλισης αντιστοιχεί στο μέγιστο υπόλοιπο (residual) των αποτελεσμάτων, το οποίο δέχεται ο χρήστης. Εναλλακτικά, οι επαναλήψεις δύνανται να τερματιστούν εφόσον ξεπεράσουν ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων, αριθμό κατάλληλο ώστε να εξασφαλίζεται ότι η συνέχεια της διαδικασίας δεν θα αποφέρει σημαντική βελτίωση στην ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων. Ο αριθμός αυτός δύναται και πάλι να καθοριστεί από τον χρήστη. Ο τερματισμός των επαναληπτικών διαδικασιών αποτελεί ένα ιδιαίτερα κρίσιμο στοιχείο, καθώς επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια της λύσης, την αποδοτικότητα της μεθόδου και το χρόνο επίλυσης. Κατά συνέπεια το μέγιστο αποδεκτό υπόλοιπο των αποτελεσμάτων καθώς και ο αριθμός των εσωτερικών και εξωτερικών επαναλήψεων θα πρέπει να καθορίζεται πολύ προσεκτικά από τον χρήστη (Λυγιδάκης, 2009).

Μέθοδοι Προσομοίωσης Τυρβώδους Ροής

Τύρβη απαντάται στις περισσότερες περιπτώσεις ροής στην φύση και στις βιομηχανικές εφαρμογές. Φυσικές τυρβώδης ροές μπορούμε να συναντήσουμε σε ωκεανούς, ποταμούς και στην ατμόσφαιρα ενώ βιομηχανικές τυρβώδης ροές σε εναλλάκτες θερμότητας, χημικούς αντιδραστήρες κ.α. (Andersson, et al., 2012). Το κύριο χαρακτηριστικό της τυρβώδους ροής (αντίθετης της στρωτής) είναι ότι τα στοιχεία του ρευστού κινούνται σε σύνθετες και ακανόνιστες τροχιές. Η έντονη αυτή κίνηση προκαλεί ανάμειξη πολλών στρωμάτων του ρευστού. Εξαιτίας της αύξησης της ορμής και της ενέργειας που ανταλλάσσεται μεταξύ μορίων και τοιχωμάτων στερεού, η τυρβώδης ροή εμφανίζει υψηλότερη επιφανειακή τριβή και μετάδοση θερμότητας σε σύγκριση με την στρωτή (Blazek, 2001).

Η τυρβώδης ροή χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση δινών στην ροή του ρευστού, με ευρύ φάσμα σε κλίμακα μεγέθους και χρόνου, που αλληλεπιδρούν δυναμικά με σύνθετο τρόπο. Δεδομένης της σημαντικότητας αποφυγής ή δημιουργίας στροβιλισμού σε εφαρμογές στην μηχανική, δεν είναι τυχαίο ότι πλήθος ερευνητών εστιάζουν στην ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων για την κατανόηση και εκμετάλλευση των βασικών επιπτώσεων από τους στροβιλισμούς (Malalasekera W. & Versteeg H., 2007). Η απευθείας προσομοίωση της τύρβης είναι δύσκολη και δυνητικά άγονη για τους ερευνητές CFD λόγω των υπολογιστικών δυσκολιών που εμφανίζει. Εξαιτίας του μεγάλου φάσματος εμφάνισης των στροβιλισμών (μέγεθος και χρόνο) καθίσταται πρακτικά αδύνατη η πλήρης επίλυση του φαινομένου. Το γεγονός αυτό οδήγησε τους ερευνητές να επιλέγουν μια σταθερή κλίμακα μεγέθους και χρόνου από το πεδίο τιμών και να το μοντελοποιούν (Oh, 2012). Οι μέθοδοι μοντελοποίησης της τυρβώδους ροής ομαδοποιούνται στις επόμενες τρεις βασικές κατηγορίες και επακόλουθα σε αρκετά μοντέλα τύρβης (Malalasekera W. & Versteeg H., 2007):

Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Σε αυτήν την κατηγορία πραγματοποιείται πλήρης μοντελοποίηση της τύρβης, ανεξαρτήτως του μεγέθους των στροβιλισμών, ενώ αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μεθοδολογία για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων. Τα αντίστοιχα μοντέλα αλληλεπιδρούν με τις εξισώσεις ροής μέσω της τυρβώδους συνεκτικότητας (δυναμικής ή συνεκτικής), ενώ δύνανται να χρησιμοποιηθούν είτε σε μόνιμη είτε σε μεταβαλλόμενη ροή, καθώς εκτελούν χρονική στάθμιση των τυρβώδων όρων. Ευρέως εφαρμοζόμενα μοντέλα αυτής της κατηγορίας είναι τα k-ε, k-ω, SST, Spalart-Almaras, κ.λπ.

Large Eddy Simulation (LES). Σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία οι μεγαλύτερες δίνες προσομοιώνονται απευθείας από τις εξισώσεις ροής, ενώ οι μικρότερες μοντελοποιούνται αντίστοιχα με την τεχνική RANS. Ως εκ τούτου, προβλέπουν την χωρική στάθμιση του υπολογιστικού χωρίου και δύνανται να εφαρμοσθούν μόνο σε χρονικά μεταβαλλόμενα προβλήματα. Παρά την αυξημένη ακρίβεια που προσφέρει η συγκεκριμένη μεθοδολογία, απαιτεί σχετικά αυξημένους υπολογιστικούς πόρους (λόγω πολύ μικρής χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης) με συνέπεια τη μη χρήση της σε ιδιαίτερα πολύπλοκα προβλήματα ακόμα και σήμερα. Τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας ωστόσο εμφανίζονται απλούστερα αυτών της προηγούμενης.

Direct Numerical Simulation (DNS). Η προσέγγιση αυτή προβλέπει την επίλυση της ροής χωρίς βοηθητικά μοντέλα, παρά μόνο με τις εξισώσεις Navier-Stokes. Απαιτεί υπερβολικά μικρή

χωρική και χρονική διακριτοποίηση και κατά συνέπεια υπερβολικά μεγάλους υπολογιστικούς πόρους. Ως εκ τούτου εφαρμόζεται μόνο σε πολύ απλά προβλήματα για ερευνητικούς σκοπούς, ενώ ακόμα και για αυτά οι αντίστοιχες προσομοιώσεις απαιτούν υπερβολικό χρόνο επεξεργασίας.

Γενική Περιγραφή Κώδικα Galatea

Στην συνέχεια περιγράφεται ο κώδικας Galatea, ένας ακαδημαϊκός κώδικας υπολογιστικής Ρευστομηχανικής που αναπτύχθηκε στην Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων μόνιμης ροής συμπιεστού ρευστού και μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, όπως αναφέρεται στην διδακτορική διατριβή του Δρ. Γεώργιου Λυγιδάκη με τίτλο «On the Numerical Solution of Compressible Fluid Flow and Radiative Heat Transfer Problems». Ο κώδικας αυτός δύναται να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο, π.χ., σε θαλάμους καύσης, βιομηχανικούς φούρνους, εσωτερική ή εξωτερική αεροδυναμική ροή, κινητήρες τύπου ramjet, κ.λπ.

Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μεθοδολογία τύπου χρονοπροέλασης για την προσομοίωση ατρίβους και συνεκτικής στρωτής ή τυρβώδους μόνιμης συμπιεστής ροής. Η διακριτοποίηση των εξισώσεων Navier-Stokes επί τριδιάστατων τετραεδρικών ή υβριδικών μη-δομημένων υπολογιστικών πλεγμάτων επιτυγχάνεται με την κεντροκομβική μέθοδο πεπερασμένων όγκων (FVM/Finite Volume Method). Για την μοντελοποίηση τυρβώδους ροής εφαρμόζονται οι κατά Reynolds ολοκληρωμένες εξισώσεις Navier-Stokes (RANS/Reynolds-Averaged Navier-Stokes), χρησιμοποιώντας την υπόθεση Boussinesq και επακόλουθα τον όρο της τυρβώδους συνεκτικότητας, για τον υπολογισμό της οποίας συμπεριλήφθηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα τύρβης, το k-ε, το k-ω και το SST (Shear Stress Transport). Για την εκτίμηση των μη-συνεκτικών διανυσμάτων ροής εφαρμόζεται ο προσεγγιστικός επιλύτης του Roe, θεωρώντας ένα τοπικό μονοδιάστατο πρόβλημα Riemann στη διεπαφή των γειτονικών όγκων ελέγχου. Αύξηση της ακρίβειας του προαναφερθέντος υπολογισμού επιτυγχάνεται με την εφαρμογή σχήματος δεύτερης τάξης χωρικής ακρίβειας, βασισμένου στην τεχνική MUSCL (Monotonic Upwind Scheme for Conservation Laws). Το εν λόγω σχήμα συνδυάζεται με κατάλληλη συνάρτηση περιορισμού (Van Albada-Van Leer, Min-mod ή Barth-Jespersen) προκειμένου να διασφαλιστεί η μονοτονία μεταξύ των τιμών των μεταβλητών των γειτονικών όγκων ελέγχου. Η εκτίμηση των συνεκτικών διανυσμάτων ροής προϋποθέτει τον πρωτότερο υπολογισμό των παραγώγων των συνιστωσών της ταχύτητας και της θερμοκρασίας στη διεπαφή των όγκων ελέγχου, η οποία συμπίπτει με το μέσο της ακμής που συνδέει τους αντίστοιχους υπολογιστικούς κόμβους. Για τον υπόψη υπολογισμό εισήχθησαν δύο τεχνικές στην παρούσα μεθοδολογία, εκ των οποίων η πρώτη βασίζεται στη δημιουργία νέων δυικών όγκων ελέγχου γύρω από την υπό εξέταση ακμή (edge-dual volume method), ενώ σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο οι επιθυμητές παράγωγοι προκύπτουν από τις αντίστοιχες των ακραίων κόμβων της ακμής (nodal-averaging method). Ο υπολογισμός τόσο των μη-συνεκτικών όσο και των συνεκτικών διανυσμάτων ροής εκτελείται με σάρωση των ακμών του πλέγματος, χρησιμοποιώντας κατάλληλες δομές δεδομένων (edge-based data structures), προκειμένου να μειωθεί όσο το δυνατόν ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος. Η χρονική ολοκλήρωση και τελική κατάσταση της ροής προσεγγίζεται επαναληπτικά, είτε με ρητό σχήμα, εφαρμόζοντας την

μέθοδο Runge-Kutta τεσσάρων βημάτων (RK(4)) και δεύτερης τάξης χρονικής ακρίβειας, είτε με σημειακά πεπλεγμένο σχήμα, εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο Jacobi ή τον αλγόριθμο Gauss-Seidel. Για την επιτάχυνση της επίλυσης εφαρμόζεται επιπρόσθετα η τεχνική του τοπικού ψευδο-χρονικού βήματος (local time-stepping technique). Τέλος, σημειώνεται ότι για τις εξισώσεις των μοντέλων τύρβης ακολουθείται παρόμοια με τις εξισώσεις ροής διαδικασία χρονικής ολοκλήρωσης και υπολογισμού των διανυσμάτων ροής, εκτός του προσεγγιστικού επιλύτη του Roe και του σχήματος δεύτερης τάξης χωρικής ακρίβειας, καθώς η κύρια συνεισφορά στα εν λόγω μοντέλα προέρχεται από τους συνεκτικούς όρους.

Με στόχο την επιτάχυνση της αριθμητικής επίλυσης τόσο των προβλημάτων ροής όσο και των προβλημάτων μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας (επιπλέον της διάρθρωσης των δεδομένων κατά τις ακμές του υπολογιστικού πλέγματος και της εφαρμογής της τεχνικής του τοπικού ψευδο-χρονικού βήματος), χρησιμοποιήθηκε μεθοδολογία παράλληλης επεξεργασίας και πολυπλέγματος. Η μέθοδος παραλληλοποίησης βασίζεται στην τεχνική διαμέρισης του υπολογιστικού πλέγματος σε μικρότερα υποχωρία (domain decomposition approach), ώστε να καταστεί δυνατή η ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων σε αυτά. Η όλη διαδικασία ξεκινάει στον κύριο επεξεργαστή με την εφαρμογή του λογισμικού METIS, το οποίο διαχωρίζει τους κόμβους του αρχικού πλέγματος σε μικρότερα σύνολα κόμβων (core nodes). Ωστόσο, με αυτόν τον τρόπο τα στοιχεία του πλέγματος στα όρια των υπο-συνόλων (υπο-πλεγμάτων) παραμένουν ανολοκλήρωτα, καθώς δεν περιέχονται όλοι οι κόμβοι τους στα αντίστοιχα σύνολα. Για την ολοκλήρωση τους προστίθενται οι ελλείποντες κόμβοι (ghost nodes) στα αντίστοιχα υπο-πλέγματα, δημιουργώντας ταυτόχρονα μία περιοχή αλληλοκάλυψης ανάμεσα τους, ενώ στη συνέχεια διανέμονται τα απαραίτητα δεδομένα και στους υπόλοιπους επεξεργαστές. Η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των γειτονικών υπο-πλεγμάτων, που αφορά στις τιμές των μεταβλητών καθώς και των παραγώγων αυτών, επιτυγχάνεται μέσω των κόμβων στις περιοχές αλληλοκάλυψης και τις εντολές του πρωτόκολλου επικοινωνίας MPI (Message Passing Interface). Οι προαναφερθείσες τιμές των ghost κόμβων δεν υπολογίζονται από τις εξισώσεις μεταφοράς, αλλά λαμβάνονται απευθείας από τους αντίστοιχους core κόμβους των γειτονικών υπο-πλεγμάτων.

Η μέθοδος πολυπλέγματος (multigrid method) εφαρμόζεται σε χωρική μορφή για την περίπτωση προβλημάτων ροής και μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας, καθώς και σε γωνιακή και συνδυασμένη χωρική-γωνιακή μορφή μόνο για προβλήματα ακτινοβολίας. Η χωρική μέθοδος βασίζεται στη δημιουργία μίας σειράς αραιότερων του αρχικού πλεγμάτων και στην επίλυση προσεγγιστικών εξισώσεων σε αυτά, με σκοπό την ταχύτερη σύγκλιση στην τελική λύση. Για τη δημιουργία αυτών των πλεγμάτων εφαρμόζεται η τεχνική συσσωμάτωσης (agglomeration approach), σύμφωνα με την οποία οι όγκοι ελέγχου των γειτονικών κόμβων ενώνονται δημιουργώντας ένα νέο υπερ-κόμβο του αραιότερου υπο-πλέγματος. Η υπόψη συσσωμάτωση, η οποία δύναται να είναι είτε ισότροπη (isotropic) είτε κατευθυνόμενη (directional), πραγματοποιείται με τρόπο τέτοιο ώστε να διατηρεί την αρχική τοπολογία, ενώ ξεκινάει από τις οριακές επιφάνειες και εκτείνεται προς το εσωτερικό του πλέγματος προσομοιάζοντας την τεχνική του προελαύνοντος μετώπου (advancing front technique). Ωστόσο, η εν λόγω ένωση υπόκειται σε προκαθορισμένους περιορισμούς, που αφορούν κυρίως στους κόμβους των εσωτερικών και εξωτερικών ορίων των υπο-πλεγμάτων, π.χ., ένας οριακός κόμβος δύναται να ενωθεί μόνο με έναν άλλο οριακό του ίδιου είδους, ενώ οι "ghost" κομβοί δε

λαμβάνονται υπόψη κατά την κύρια διαδικασία αλλά ενώνονται σύμφωνα με τη συσσωμάτωση που έχουν υποστεί οι αντίστοιχοι τους core κόμβοι στα γειτονικά υπο-πλέγματα. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, η όλη διαδικασία ξεκινάει σε κάθε υπο-πλέγμα με την ένωση των όγκων ελέγχου των οριακών κόμβων στερεάς επιφάνειας με αυτούς των γειτονικών τους, επίσης οριακών κόμβων, ενώ στη συνέχεια καταρτίζεται λίστα με τους κόμβους που έχουν έρθει σε επαφή με το "μέτωπο" της συσσωμάτωσης (seed nodes). Η ένωση των κόμβων και η δημιουργία υπερ-κόμβων συνεχίζεται με τη συσσωμάτωση των όγκων ελέγχου των "seed" κόμβων με αυτούς των γειτονικών τους. Κατόπιν καταρτίζεται μία νέα λίστα "seed" κόμβων με τον ίδιο τρόπο και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου εξεταστούν όλοι οι κόμβοι του υπολογιστικού πλέγματος. Στην περίπτωση της κατευθυνόμενης συσσωμάτωσης, η οποία εφαρμόζεται σε πλέγματα υβριδικού τύπου και δύναται να είναι είτε μερική (semi-directional) είτε ολική (full-directional), η διαδικασία ξεκινάει από τους οριακούς κόμβους των πρισματικών στοιχείων και συνεχίζεται στους κόμβους των επόμενων πρισματικών στρωμάτων, διατηρώντας το μοτίβο συσσωμάτωσης των πρώτων. Αφού ολοκληρωθεί η ένωση των πρισματικών κόμβων, η διαδικασία συνεχίζεται ισότροπα για τους υπόλοιπους κόμβους, εκκινώντας από τους γειτονικούς των ανώτερων πρισματικών στρωμάτων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι "ghost" κόμβοι δε λαμβάνονται υπόψη κατά την κύρια διαδικασία, αλλά ενώνονται σύμφωνα με τη συσσωμάτωση που έχουν υποστεί οι αντίστοιχοι τους "core" κόμβοι στα γειτονικά υπο-πλέγματα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται "ghost" ψευδο-υπερ-κόμβοι, καθώς ο περικλειόμενος αριθμός κόμβων τους πιθανόν να διαφέρει από αυτόν στους αντίστοιχους core υπερ-κόμβους. Εφόσον απαιτείται ακόμη αραιότερο πλέγμα, η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται. Η επίλυση των εξισώσεων στη εν λόγω σειρά πλεγμάτων πραγματοποιείται με το σχήμα FAS (Full Approximation Scheme) σε κύκλο σχήματος V, σύμφωνα με το οποίο στα αραιότερα πλέγματα επιλύεται μία προσεγγιστική μορφή των εξισώσεων μεταφοράς. Η μεταφορά πληροφορίας σε έναν υπερ-κόμβο από τους περικλειόμενους κόμβους του (restriction) αφορά στις σταθμισμένες κατ' όγκο συντηρητικές μεταβλητές τους και στο άθροισμα των διανυσμάτων ροής τους. Αντίθετα, από τον υπερ-κόμβο μεταφέρονται στους περικλειόμενους κόμβους του (prolongation) οι διορθώσεις των μεταβλητών είτε με απλή μεταφορά στην περίπτωση ατριβούς ροής είτε με μεταφορά σταθμισμένη με την απόσταση μεταξύ τους στην περίπτωση συνεκτικής ροής. Για την επίτευξη ακόμη μεγαλύτερης επιτάχυνσης κατά τα πρώτα στάδια του σχήματος FAS, εφαρμόζεται το σχήμα FMG (Full Multigrid).

Επιπρόσθετα, με σκοπό την περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας της παρούσας μεθόδου και πέραν της εφαρμογής των προαναφερθέντων σχημάτων υψηλότερης τάξης χωρικής ακρίβειας, αναπτύχθηκε μεθοδολογία αυτόματης τοπικής πύκνωσης του πλέγματος. Με αυτόν τον τρόπο δύνανται να αυξηθούν οι βαθμοί ελευθερίας του υπό εξέταση πλέγματος, αποφεύγοντας ταυτόχρονα την απαίτηση κατασκευής ενός νέου εξαρχής. Η υπόψη τεχνική αναδεικνύεται ιδιαίτερα πολύτιμη σε περιπτώσεις εμφάνισης τοπικών φαινομένων, π.χ. περιοχές κυμάτων κρούσης, αποκόλλησης ροής, κ.λπ., καθώς και σε προβλήματα που αντιμετωπίζονται για πρώτη φορά, με συνέπεια να μην είναι εκ των προτέρων γνωστό το απαιτούμενο επίπεδο πύκνωσης στις διάφορες περιοχές του πλέγματος. Η όλη διαδικασία δύναται να διαιρεθεί σε τέσσερα βασικά βήματα: α) Εντοπισμός των περιοχών προς πύκνωση και σημείωση των αντίστοιχων ακμών βάσει ενός προκαθορισμένου κριτηρίου, π.χ. ακμές που περιλαμβάνουν κόμβους με τιμή του αριθμού Mach υψηλότερη της μονάδας. β) Διάχυση της πληροφορίας σημείωσης στις

Μέρος 2^ο: Υπολογιστική Ρευστομηχανική

γειτονικές ακμές, ώστε να καταστεί δυνατή η διαίρεση των αντίστοιχων στοιχείων του πλέγματος. γ) Διαίρεση των σημειωμένων ακμών και εισαγωγή νέων κόμβων στο μέσο τους. δ) Διαίρεση των αντίστοιχων πλευρών και στοιχείων του πλέγματος, βάσει προκαθορισμένων κανόνων διαίρεσης, π.χ., ένα πρισματικό στοιχείο δύναται να διαιρεθεί σε δύο ή τέσσερα νέα πρισματικά στοιχεία.

Εφαρμόζοντας τις ανωτέρω τεχνικές έχει αναπτυχθεί ο ακαδημαϊκός κώδικας Galatea (Γαλάτεια).» (Lygidakis, 2015)

Σημειώνεται ότι η παραμετροποίηση των προβλημάτων ροής, η εφαρμογή και κάθε λειτουργία που απαιτήθηκε στα πλαίσια χρήσης του κώδικα Galatea για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του Δρ. Γεωργίου Λυγιδάκη.

ANSYS - ANSYS CFX

Γενικά

Το λογισμικό ANSYS της ομώνυμης εταιρίας είναι ένα από πιο διαδεδομένα λογισμικά προσομοιώσεων. Η εταιρία ιδρύθηκε το 1970 και δραστηριοποιείται πάνω στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, στην υπολογιστική μηχανική ρευστών, στα ηλεκτρονικά, στους ημιαγωγούς και στην κατασκευή λογισμικών για τον σχεδιασμό, μελέτη, και βελτιστοποίηση αυτών (www.ansys.com).

Το ANSYS CFX είναι ένα λογισμικό υπολογιστικής ρευστομηχανικής γενικού σκοπού, που συνδυάζει ένα ανεπτυγμένο επιλύτη και τη δυνατότητα εύκολης προ- και μετά- επεξεργασίας των προβλημάτων ροής. Πιο συγκεκριμένα, το λογισμικό αυτό περιλαμβάνει (ANSYS, ANSYS CFX Introduction, 2013):

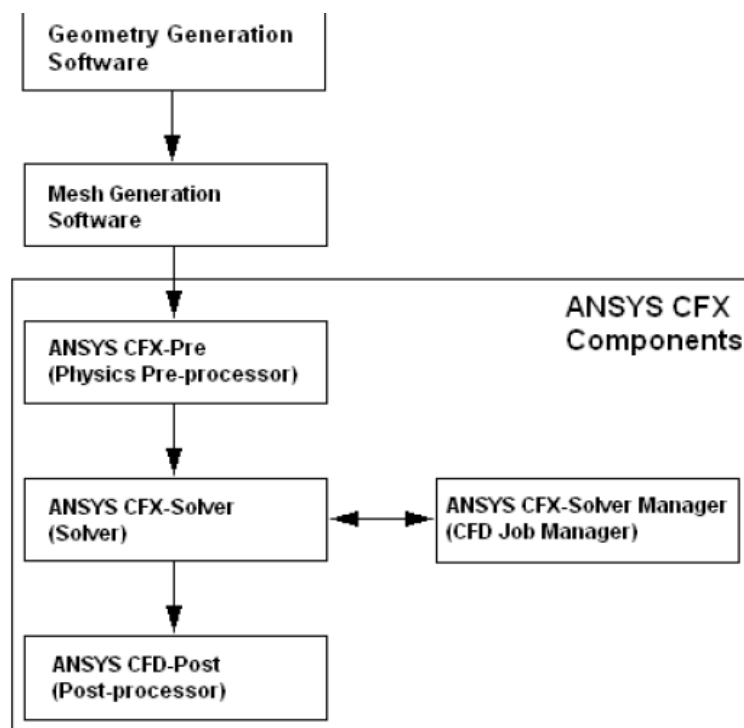
- Έναν ισχυρό και αξιόπιστο επιλύτη.
- Πλήρη δυνατότητα ορισμού του προβλήματος ροής και ανάλυσης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων αυτού.
- Χρήση μενού και γραφικών κατάλληλων για αυτόματη διόρθωση και αλληλεπίδραση με τον χρήστη κατά την διαδικασία ορισμού του προβλήματος.

Πιο αναλυτικά, ο επιλύτης του βασίζεται στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes με μεθοδολογία τύπου SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) επί διδιάστατων ή τριδιάστατων τετραεδρικών, εξαεδρικών ή υβριδικών μη-δομημένων υπολογιστικών πλεγμάτων, για την διακριτοποίηση των οποίων εφαρμόζεται η κεντροκομβική μέθοδος πεπερασμένων όγκων (FVM/Finite Volume Method). Για την προσομοίωση τυρβώδους ροής περιλαμβάνει διάφορες μεθόδους, όπως η μεθοδολογία RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) σε συνδυασμό με τα μοντέλα τύρβης k-ε, k-ω και SST (Shear Stress Transport), η μεθοδολογία LES (Large Eddy Simulation) με το μοντέλο του Smagorinsky, η μεθοδολογία DES (Detached Eddy Simulation), κ.λπ. Επιπρόσθετα, παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της μεταβατικής περιοχής της ροής, ήτοι από την τυρβώδη στην στρωτή περιοχή, ενώ η μοντελοποίηση κοντά στο τοίχωμα δύναται να υλοποιηθεί είτε με συναρτήσεις τοίχου είτε με την προσέγγιση του χαμηλού αριθμού Reynolds. Για την αύξηση της ακρίβειας των υπολογισμών εφαρμόζονται δεύτερης τάξης ακρίβειας σχήματα, που βασίζονται στην ανάπτυξη κατά Taylor των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών, ενώ για τον υπολογισμό των απαραίτητων παραγώγων εφαρμόζονται συναρτήσεις σχήματος (shape functions). Η χρονική ολοκλήρωση και τελική ή μη κατάσταση της ροής στην περίπτωση σταθερού ή χρονικά μεταβαλλόμενου φαινομένου αντίστοιχα προσεγγίζεται επαναληπτικά με το Backward Euler σχήμα πρώτης ή δεύτερης τάξης χρονικής ακρίβειας. Για την επιτάχυνση της διαδικασίας επίλυσης εφαρμόζεται επιπρόσθετα μέθοδος παράλληλης επεξεργασίας, η οποία βασίζεται στην τεχνική διαμέρισης του υπολογιστικού πλέγματος σε μικρότερα υποχωρία (domain decomposition approach), ώστε να καταστεί δυνατή η ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων σε αυτά, καθώς και στις εντολές του πρωτόκολλου επικοινωνίας MPI (Message Passing Interface) για την επικοινωνία των εν λόγω γειτνιαζόντων υποχωρίων. Για περαιτέρω επιτάχυνση εφαρμόζεται μεθοδολογία αλγεβρικού πολυπλέγματος (Algebraic Multigrid). Τέλος, οι δυνατότητες του εν λόγω λογισμικού επεκτείνονται στην

προσομοίωση ροών πολλαπλών στοιχείων και φάσεων, καθώς και ροών σε συνδυασμό με καύση και μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Για το τελευταίο φαινόμενο δύνανται να εφαρμοστούν διάφορες μέθοδοι, π.χ., Monte Carlo ή Discrete Transfer Method (DTM). Το ANSYS CFX είναι κατάλληλο για μοντελοποίηση:

- Σταθερής και μεταβαλλόμενης ροής.
- Στρωτής ή τυρβώδους ροής.
- Υποηχητικής, διηχητικής και υπερηχητικής ροής.
- Μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας.
- Πλευστότητας.
- Μη Νευτώνειου ρευστού.
- Πολυφασικής ροής.
- Καύσης.
- Ροής σε πολλαπλά συστήματα αναφοράς.
- Ροής σωματιδίων.

Η δομή του ANSYS CFX αποτελείται από τέσσερα επιμέρους λογισμικά, τα οποία παίρνουν την γεωμετρία και το πλέγμα που έχει δημιουργηθεί και με κατάλληλη ροή πληροφορίας και δεδομένων πραγματοποιείται τμηματικά η ανάλυση (Εικόνα 2-6). Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται αναλυτικά η προαναφερθείσα ροή, η οποία και εφαρμόζεται στο επόμενο στάδιο της παρούσας εργασίας. Σημειώνεται ότι στην συνέχεια της εργασίας και κατά την ανάλυση και χρήση των παρακάτω λογισμικών, παρουσιάζεται αναλυτικά μόνο η γεωμετρία Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία -3° (Expanding -3) και για μια περίπτωση πλέγματος 2.88 εκατομμυρίων κόμβων (Test 1).

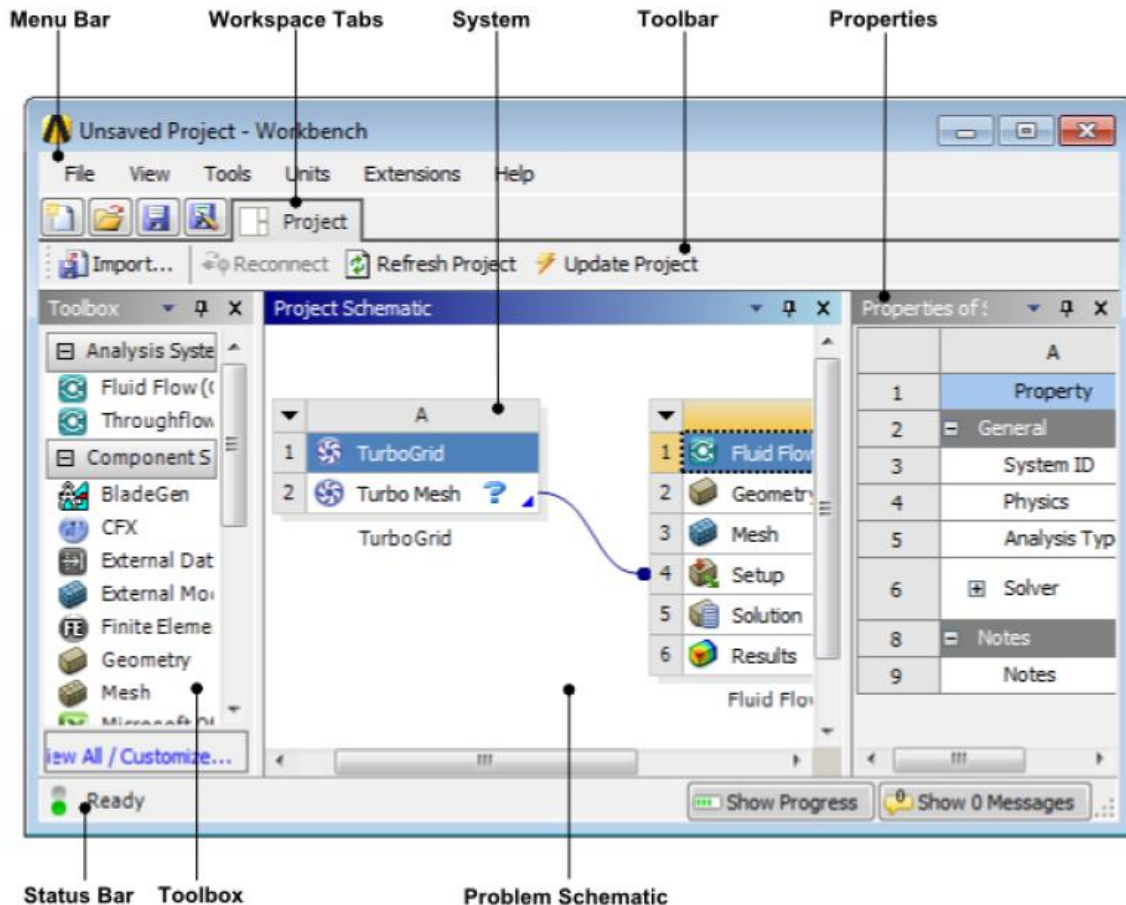


Εικόνα 2-6: Διάγραμμα ροής δεδομένων προς ανάλυση στο ANSYS CFX

(ANSYS, ANSYS CFX Introduction, 2013)

Βασικά Χαρακτηριστικά Περιβάλλοντος Εργασίας - Workbench

Το κεντρικό παράθυρο εργασίας είναι το Workbench, σκοπός του οποίου είναι να διευκολύνει την επιλογή συστήματος (ομάδας εργαλείων) που θα χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση και επίλυση των διάφορων τύπων προβλημάτων. Στη συνέχεια αναφέρονται κάποια πολύ βασικά χαρακτηριστικά του Workbench που απαιτήθηκαν κατά την διάρκεια της εργασίας.



Εικόνα 2-7: Βασικό παράθυρο εργασίας Workbench

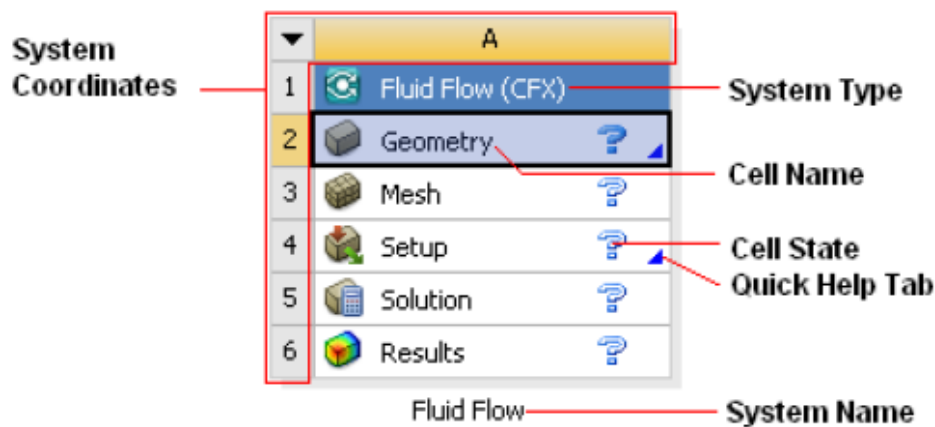
(ANSYS, ANSYS CFX Introduction, 2013)

Αρχικά, μόλις επιλεγεί το επιθυμητό σύστημα από το Toolbox (**Fluid Flow (CFX)** για την παρούσα εργασία) και μετακινηθεί μέσα στο Project Schematic, τότε εμφανίζονται οδηγίες προσανατολισμού στα παράθυρα Properties και Message. Τα χαρακτηριστικά αυτά και οι ενδείκτες κατάστασης στα κελιά του συστήματος καθοδηγούν τον χρήστη κατά την σταδιακή ολοκλήρωση εφαρμογής του.

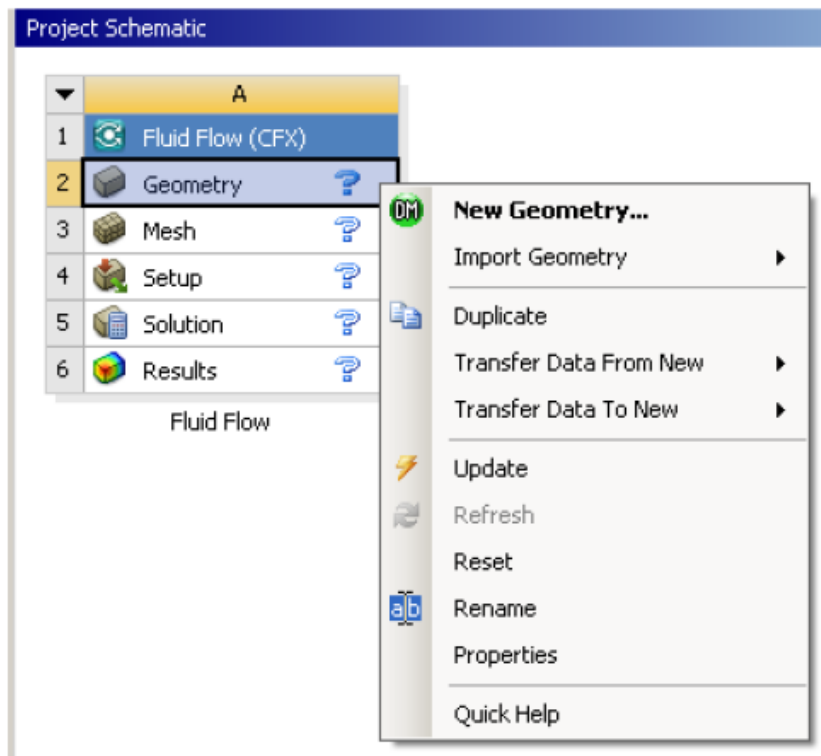
Στο Toolbox εμφανίζονται τα συστήματα που είναι διαθέσιμα. Το Analysis Systems περιλαμβάνει συστήματα τα οποία εξυπηρετούν σε λύσεις συγκεκριμένων τύπων προβλημάτων. Για παράδειγμα το **Fluid Flow (CFX)**, που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή, περιέχει εργαλεία για την δημιουργία ή διαμόρφωση της γεωμετρίας, την κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος, την εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος στον επιλύτη και την χρήση αυτού,

καθώς επίσης και για την επεξεργασία και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Στο Components Systems εμπεριέχονται ανεξάρτητα τα λογισμικά που στηρίζονται τα Analysis Systems. Στο Custom Systems περιλαμβάνονται συνδυασμοί από ξεχωριστά analysis systems και τέλος στο Design Exploration εμπεριέχονται συστήματα, τα οποία δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη να δει παραμετρικές μεταβολές των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις μεταβολές των δεδομένων εισαγωγής.

Στο Project Schematic παρέχεται η δυνατότητα στον χρήστη να διαχειριστεί την διαδικασία επίλυσης του προβλήματος. Σε αυτό το τμήμα κρατείται το αρχείο δεδομένων και φαίνεται η πορεία των διαδικασιών και των ενεργειών που είναι διαθέσιμες για εφαρμογή. Όταν μετακινηθεί ένα σύστημα από το Analysis systems toolbox στο Project Schematic εμφανίζεται μια ομάδα εργαλείων όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-8. Πατώντας δεξί κλικ σε κάθε κελί εμφανίζεται μια λίστα με τις δυνατές ενέργειες σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 2-8 :Η ομάδα εργαλείων του συστήματος Fluid Flow (CFX), όπως εμφανίζεται στο Project Schematic (ANSYS, ANSYS CFX Introduction, 2013)



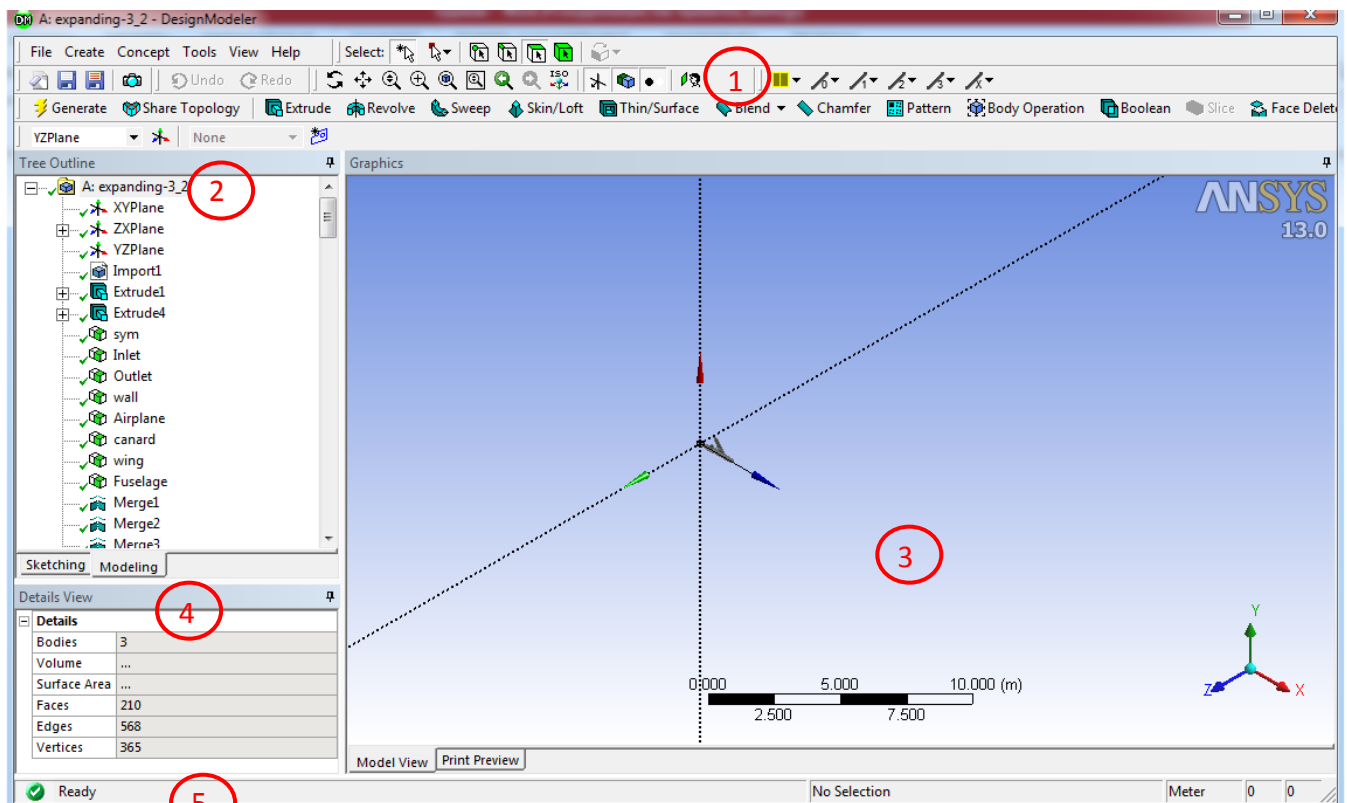
Εικόνα 2-9: Λίστα διαθέσιμων ενεργειών του κελιού Geometry

Geometry Generation Software - Design Modeler

Το ANSYS Design Modeler (DM) είναι ένα λογισμικό σχεδιασμένο για επεξεργασία γεωμετριών σε CAD μοντέλα. Η δομή του λογισμικού διευκολύνει την άμεση σχεδίαση 2D σχεδίων, 3D τμημάτων και εξαρτημάτων ή ακόμα και την εισαγωγή 3D μοντέλων για προεπεξεργασία πριν πραγματοποιηθεί ανάλυση μηχανικής σε αυτά (ANSYS, Design Modeler User's Guide, 2013). Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή του μοντέλου M151/1 στο ANSYS και τη διαμόρφωση αυτού κατάλληλα ώστε να είναι εφικτή η δημιουργία ποιοτικού πλέγματος σε επόμενο στάδιο.

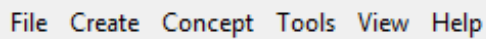
Τα βασικά εργαλεία αλληλεπίδρασης με τον χρήστη στο DM χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- *Toolbars (1)*: Υπάρχουν εννιά Toolbars στο πάνω μέρος του κεντρικού παραθύρου και εμπεριέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό εργαλείων για επεξεργασία.
- *Tree Outline and Toolboxes (2)*: Βρίσκονται στα αριστερά του κεντρικού παραθύρου και απεικονίζονται ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας που είναι το λογισμικό.
- *Graphics Window (3)*: Βρίσκεται στο κέντρο του κεντρικού παραθύρου του προγράμματος, έχει μεταβαλλόμενο μέγεθος και εκεί απεικονίζεται το μοντέλο.
- *Detail View (4)*: Βρίσκεται στη κάτω αριστερή γωνία του κεντρικού παραθύρου και απεικονίζει διάφορα είδη πληροφοριών, ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας που βρίσκεται το λογισμικό.
- *Status Bar (5)*: Βρίσκεται στο κάτω μέρος του κεντρικού παραθύρου και παρουσιάζει πληροφορίες για την συνεχή κατάσταση του λογισμικού.



Εικόνα 2-DM1: Κεντρικό Παράθυρο Λογισμικού Design Modeler

Menu Toolbar:



Selection Toolbar:



File Toolbar:



Undo/Redo toolbar:



Rotation Modes Toolbar:



Display Toolbar:



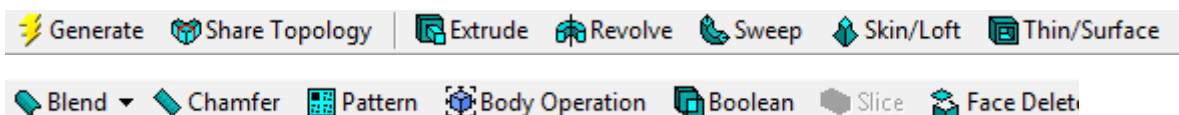
Graphics Options Toolbar:



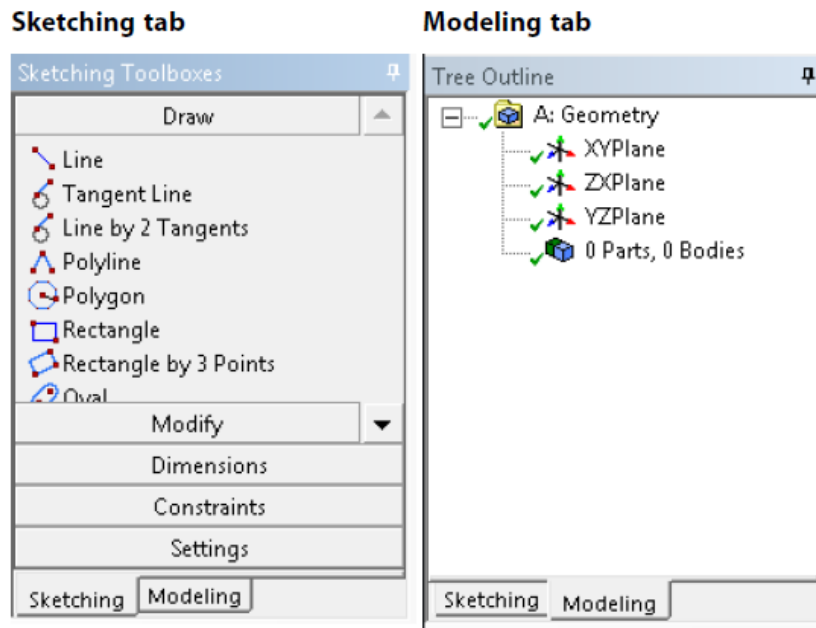
Active Plane/ Sketch Toolbar:



Feature Toolbar:







Εκκινώντας το DM είναι προεπιλεγμένη η επιλογή της καρτέλας λειτουργίας *Modeling* που βρίσκεται στο κάτω μέρος του *Tree Outline and Toolboxes*. Μέσω αυτής της καρτέλας και κατά συνέπεια αυτής της κατάστασης λειτουργίας, απεικονίζεται το Tree Outline. Στο Tree Outline καταγράφονται όλες οι εντολές που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό ή την διαμόρφωση του μοντέλου. Επιλέγοντας την καρτέλα *Sketching* αλλάζει η κατάσταση λειτουργίας του λογισμικού και δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να σχεδιάσει σε 2D. Αυτό γίνεται με την βοήθεια των εντολών στα πέντε Toolboxes που εμφανίζονται.

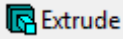
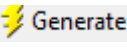


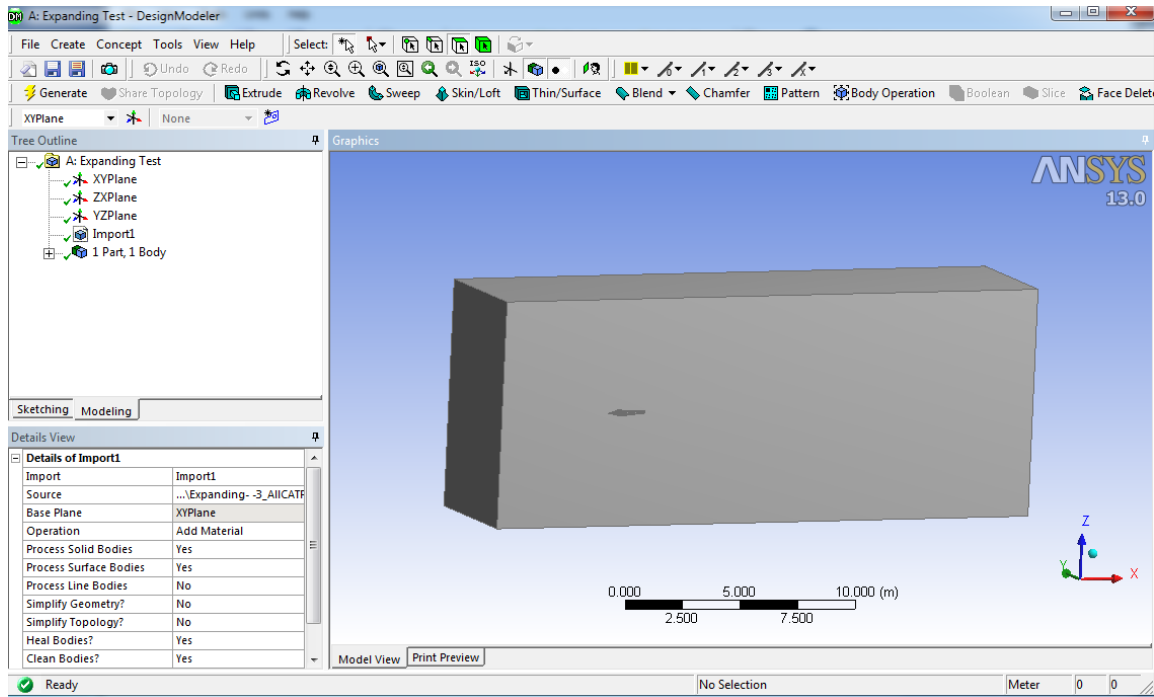
Εικόνα 2-DM2: Καρτέλες επιλογής κατάστασης λειτουργίας (ANSYS, ANSYS Meshing User's Guide, 2013).

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, με τη χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού επιτεύχθηκε η απαραίτητη διαμόρφωση των γεωμετριών που κατασκευάστηκαν στο Πρώτο Μέρος της παρούσας εργασίας και σε επόμενο στάδιο αναλύθηκαν. Αρχικά, έγινε εισαγωγή στο DM του αρχείου **STP** που δημιουργήθηκε από το λογισμικό CATIA επιλέγοντας το **Import Geometry** από τη λίστα διαθέσιμων ενεργειών του Geometry στο παράθυρο του Workbench. Στην συνέχεια, επιλέγοντας το **Edit Geometry** εκκινεί το λογισμικό DM. Στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται και πριν την ολοκλήρωση του ανοίγματος ορίζεται η επιθυμητή μονάδα μήκους (Meter). Επιλέγοντας το **Generate** από την Feature Toolbar εισάγεται η γεωμετρία του αρχείου **STP** (Εικόνα 2-DM3).

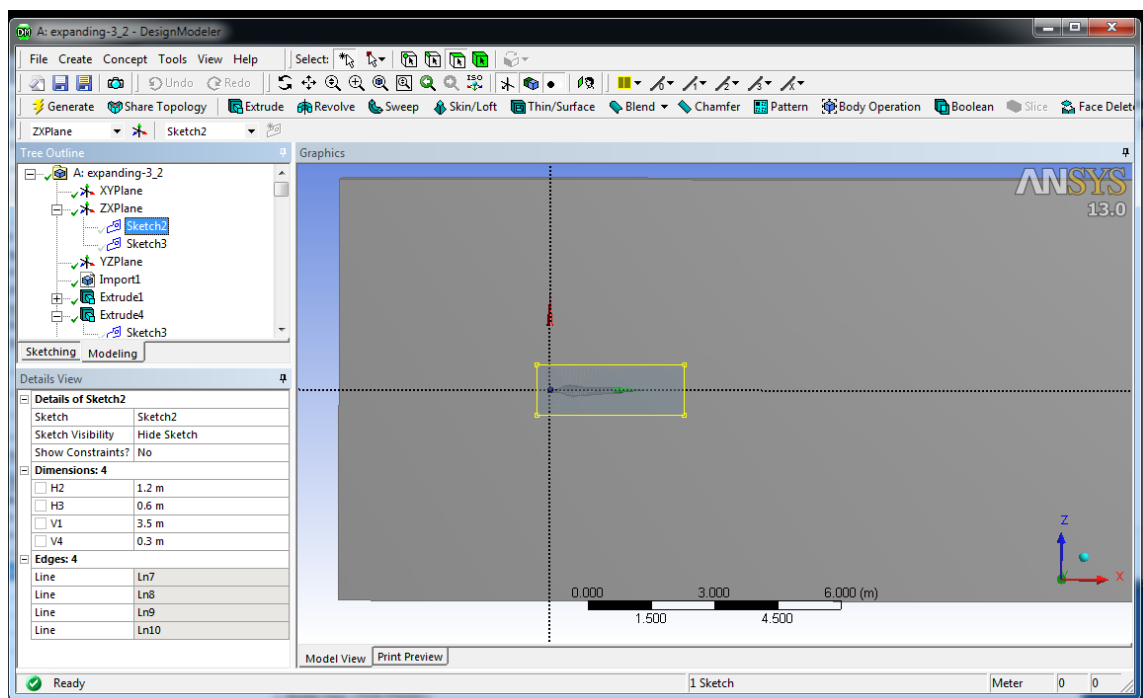
Η γεωμετρία που φαίνεται στην Εικόνα 2-DM3 αποτελεί τον όγκο του ρευστού γύρω από την γεωμετρία M151/1. Μέσα σε αυτόν τον όγκο σχεδιάστηκαν και ορίστηκαν δύο μικρότεροι όγκοι με την βοήθεια των οποίων θα εφαρμοστεί μεταβολή πυκνότητας στο πλέγμα που θα δημιουργηθεί σε επόμενο στάδιο της εργασίας. Για τον σχεδιασμό και την δημιουργία του κάθε όγκου ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

- Επιλογή του ZXPlane από το Tree Outline.
- Επιλογή της εντολής New Sketch από Sketch Toolbar.
- Επιλογή του Sketch που εμφανίζεται στο Tree Outline και έπειτα της Sketching Tab.
- Σχεδιασμός ορθογωνίου παραλληλογράμμου και τραπεζίου με την χρήση της εντολής  **Rectangle** ή  **Line** από το Draw Toolbox έτσι ώστε να εμπεριέχει το τμήμα του αεροπλάνου (Όγκος 1^{ος} → Εικόνα 2-DM4 και Όγκος 2^{ος} → Εικόνα 2-DM7).
- Ορισμός διαστάσεων ορθογωνίου μέσω των εντολών  **Horizontal** και  **Vertical** από το Dimensions Toolbox όπως ορίζονται στην Εικόνα 2-DM5 (Όγκος 1^{ος}) και στην Εικόνα 2-DM7 (Όγκος 2^{ος}).

- Επιλογή του Sketch που εμφανίζεται στο Tree Outline και έπειτα της εντολής  από την Feature Toolbar με ορίσματα που απεικονίζονται στην Εικόνα 2-DM6 (Όγκος 1^{ος}) και στην Εικόνα 2-DM8 (Όγκος 2^{ος}).
- Τέλος, επιλογή της εντολής  από την Feature Toolbar για την δημιουργία του όγκου που ορίστηκε.

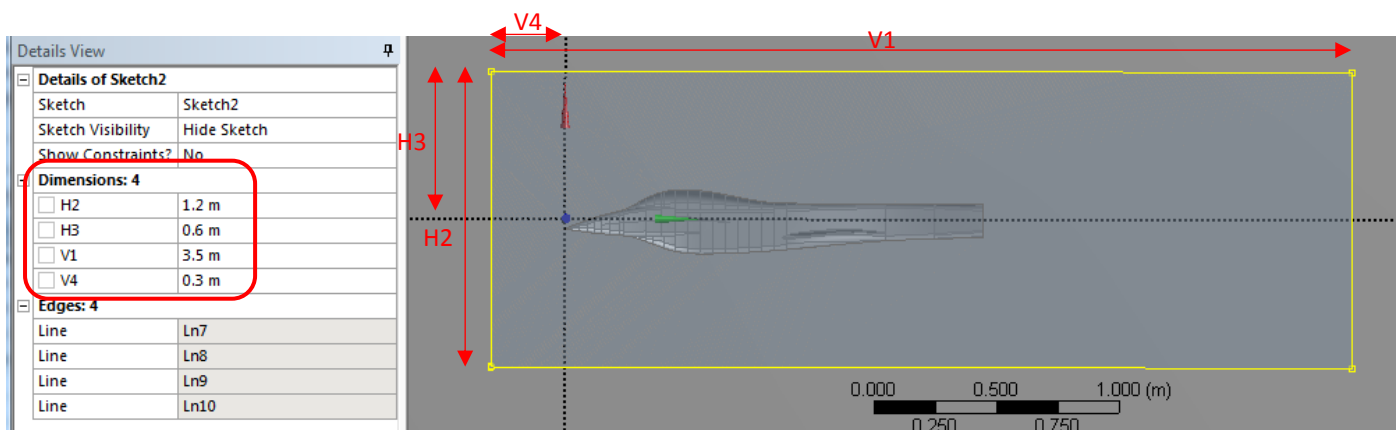


Εικόνα 2-DM3: Όγκος ρευστού γύρω από την γεωμετρία Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία -3° που έχει εισαχθεί από το Αρχείο STP

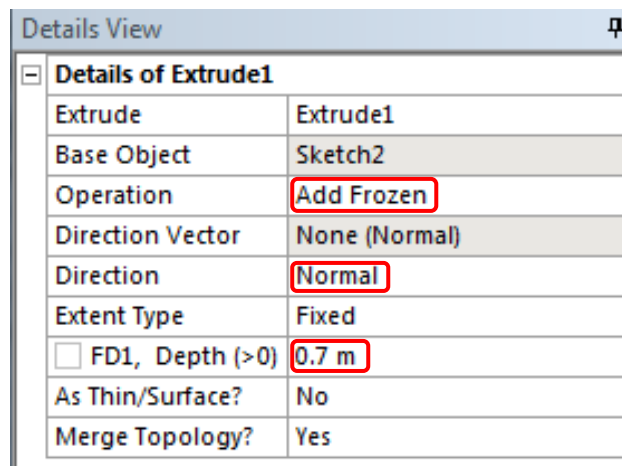


Εικόνα 2-DM4: Σχεδιασμός ορθογωνίου παραλληλογράμμου με την χρήση της εντολής Rectangle του Draw Toolbox

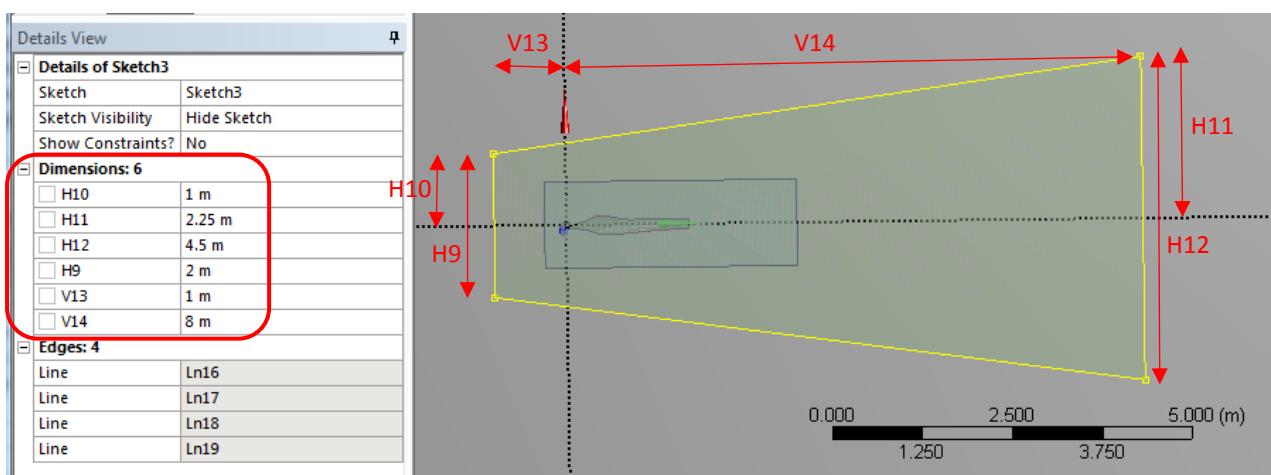
Μέρος 2^ο: ANSYS



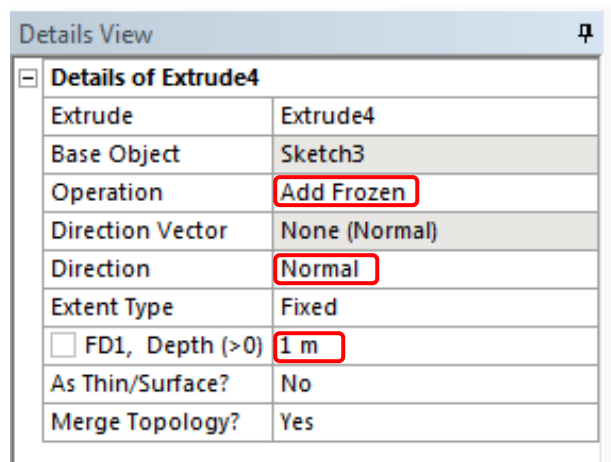
Εικόνα 2-DM5: Ορισμός διαστάσεων ορθογωνίου (Όγκος 1^{ος}) μέσω των εντολών Horizontal και Vertical από το Dimensions Toolbox



Εικόνα 2-DM6: Ορίσματα εντολής Extrude (Όγκος 1^{ος})

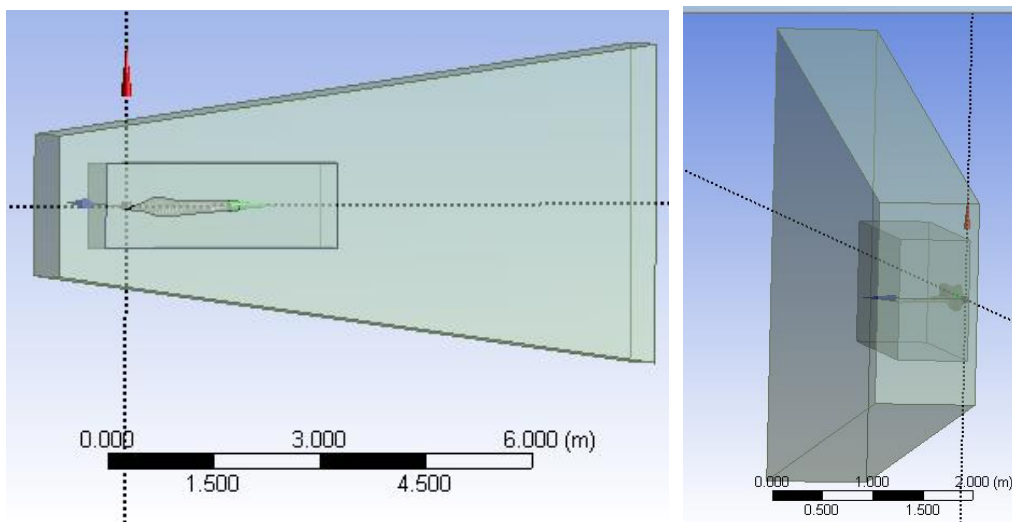


Εικόνα 2-DM7: Ορισμός διαστάσεων τραπεζίου (Όγκος 2^{ος}) μέσω των εντολών Horizontal και Vertical από το Dimensions Toolbox



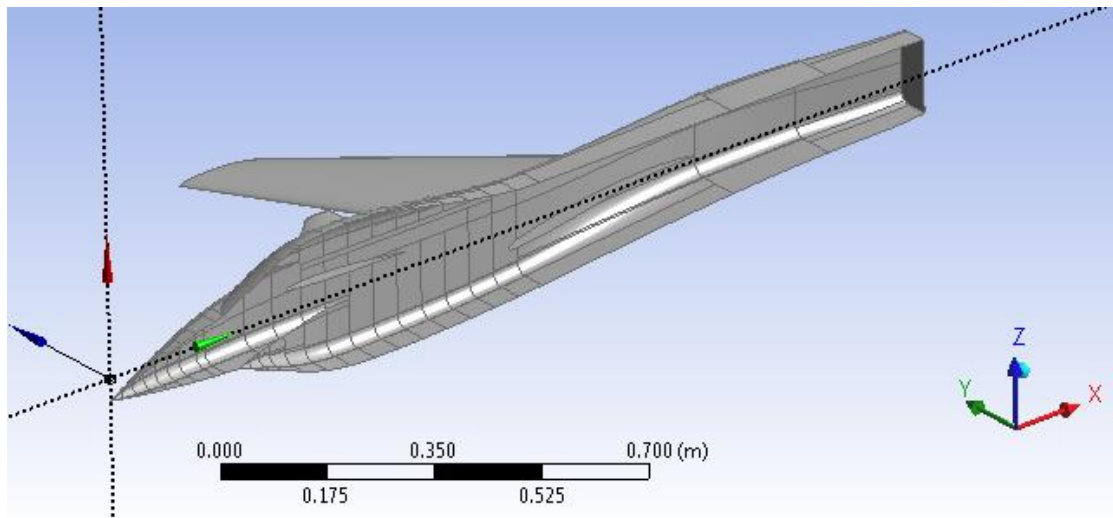
Εικόνα 2-DM8: Ορίσματα εντολής Extrude (Όγκος 2^{ος})

Σημειώνεται ότι χρησιμοποιώντας στο όρισμα **Operation** της εντολής Extrude την επιλογή **Add Frozen** επιτυγχάνεται πρακτικά δέσμευση του ήδη υπάρχοντος υλικού από τον αρχικό όγκο για την δημιουργία του νέου όγκου χωρίς να προστίθεται υλικό. Με αυτόν τον τρόπο εξακολουθεί να υφίσταται το κενό από υλικό που έχει αφαιρεθεί ίσο με τον όγκο του αεροσκάφους κατά το τελευταίο στάδιο σχεδιασμού στο CATIA. Μαρκάροντας τις πλευρές του συνολικού όγκου, χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Selection Filter-Model Faces (3D)** από την Selection Toolbar και έπειτα επιλέγοντας με **δεξί κλικ** στην επιφάνεια την εντολή **Hide Face(s)** επιτυγχάνεται απόκρυψη των επιφανειών με αποτέλεσμα να φαίνονται οι όγκοι που δημιουργήθηκαν (Εικόνα 2-DM9).




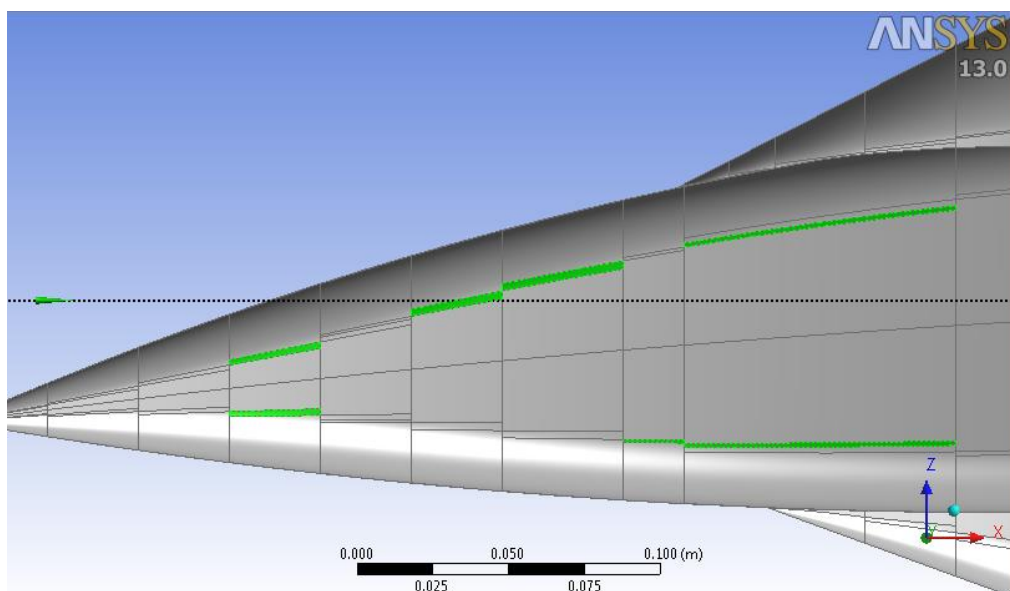
Εικόνα 2-DM9: 1^{ος} και 2^{ος} Όγκος

Χρησιμοποιώντας το εργαλείο **Selection Filter-Bodies** από την Selection Toolbar επιλέχθηκαν οι όγκοι και πραγματοποιήθηκε απόκρυψη και σε αυτούς. Σε αυτό το σημείο, στο Graphics Window προβάλλονται μόνο οι επιφάνειες που σχηματίζουν την γεωμετρία του μοντέλου M151/1 (Εικόνα 2-DM10).

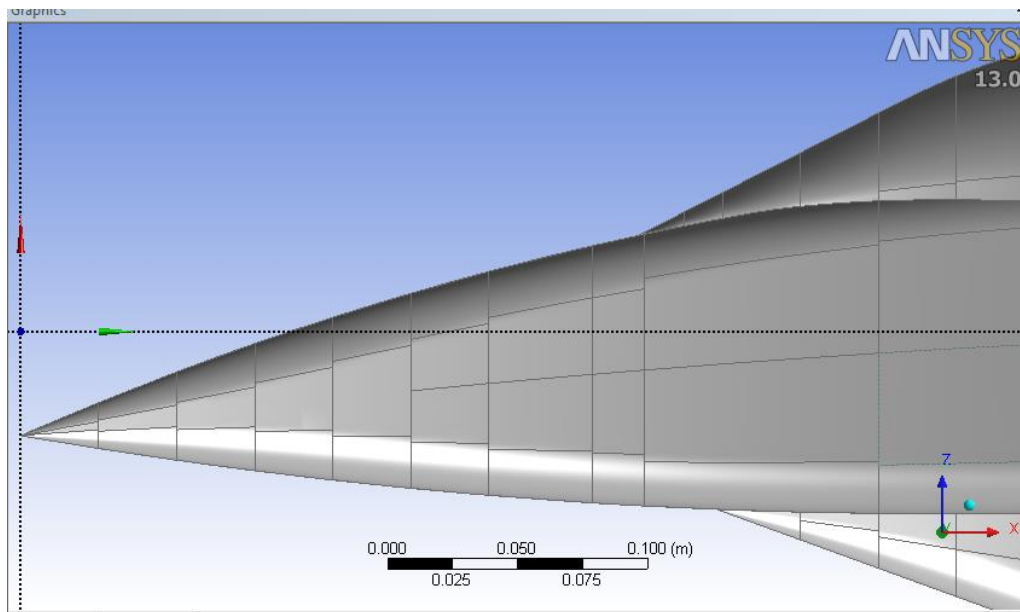


Εικόνα 2-DM10: Επιφάνειες που σχηματίζουν την γεωμετρία του μοντέλου M151/1



Παρατηρείται ότι ο αριθμός των επιφανειών που σχηματίζουν το σύνολο της επιφάνειας του μοντέλου είναι πολύ μεγάλος και με μεγάλη ποικιλία μεγεθών. Το γεγονός αυτό προκαλεί προβλήματα στην δημιουργία πλέγματος, καθώς το λογισμικό κατασκευής πλέγματος δεν μπορεί να φτιάξει ποιοτικό πλέγμα πάνω σε όλη την επιφάνεια του μοντέλου και πολύ κοντά σε αυτήν, δημιουργώντας ασυνέχειες και αλληλοκαλύψεις. Για αποφυγή αυτού του προβλήματος εφαρμόστηκε ένωση των γειτονικών επιφανειών με την εντολή  Merge από την λίστα Tools του Menu Toolbar. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιήθηκε μείωση του πλήθους των επιφανειών περίπου στο ένα τρίτο του αρχικού και επετεύχθη συγχώνευση των πολύ μικρών επιφανειών που είχαν δημιουργηθεί με μεγαλύτερες, που ήταν και το κυριότερο εμπόδιο δημιουργίας πλέγματος. Η εφαρμογή της συγκεκριμένης εντολής απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για την αποφυγή παραμόρφωσης των επιφανειών λόγω πολυπλοκότητας της γεωμετρίας.

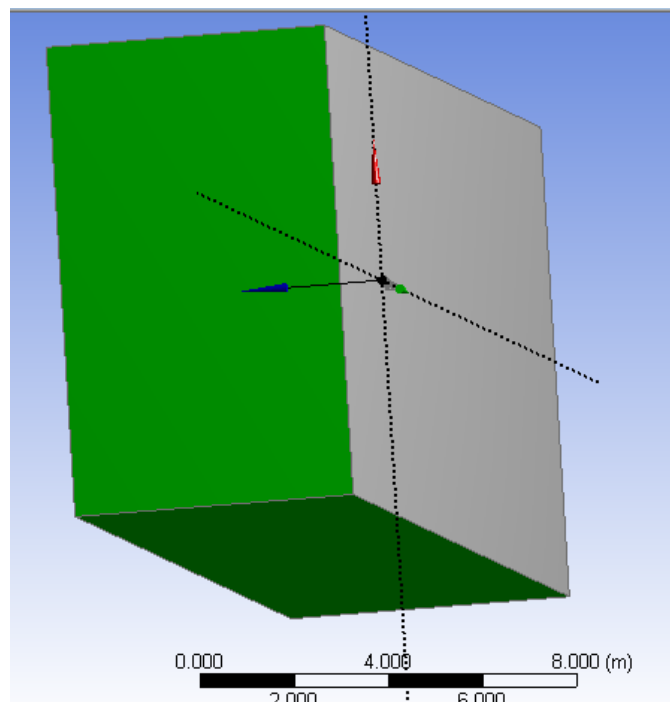


Εικόνα 2-DM11: Δείγμα μικρών επιφανειών πάνω σε τμήμα του μοντέλου

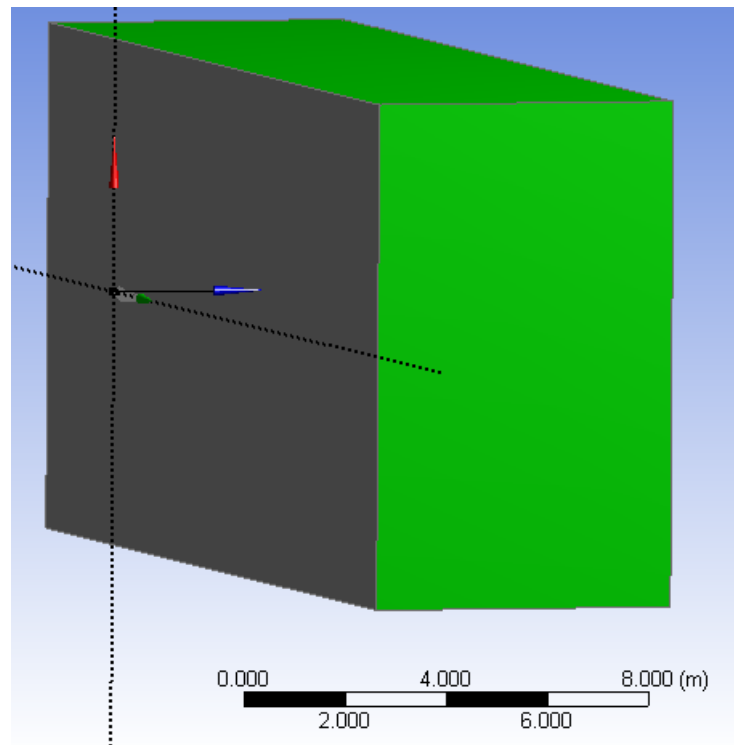


Εικόνα 2-DM12: Δείγμα αποτελέσματος συγχώνευσης γειτονικών επιφανειών σε τμήμα του μοντέλου

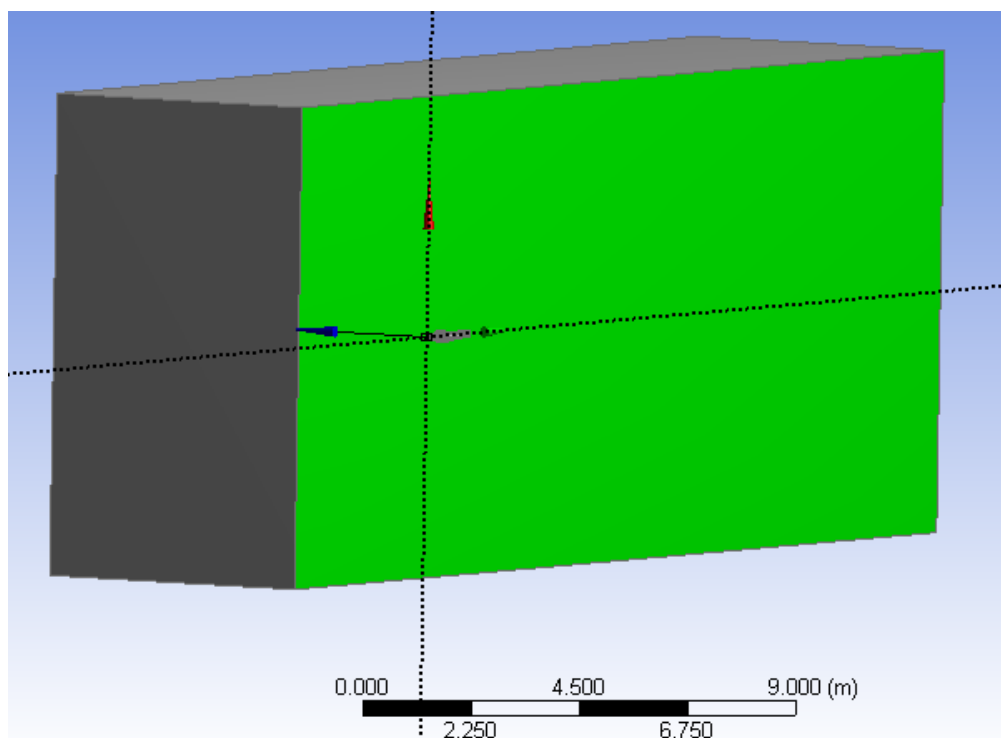
Ολοκληρώνοντας την επεξεργασία της γεωμετρίας στο DM, ονομάστηκαν οι επιφάνειες του όγκου αλλά και του αεροσκάφους για ευκολότερη επεξεργασία στην συνέχεια. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας τις επιφάνειες (**Selection Filter-Model Faces (3D)** ) που θα έχουν κοινή ονομασία και με **δεξί κλικ** πάνω σε αυτές και την εντολή **Named Selection**  γίνεται η καταχώριση της ονομασίας. Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται οι επιφάνειες ανά ονομασία. Σημειώνεται ότι η ονομασία των επιφανειών ορίστηκε με βάση τις ανάγκες που εμφανίζονται στο στάδιο δημιουργίας πλέγματος και κυρίως στο στάδιο εισαγωγής δεδομένων προβλήματος.



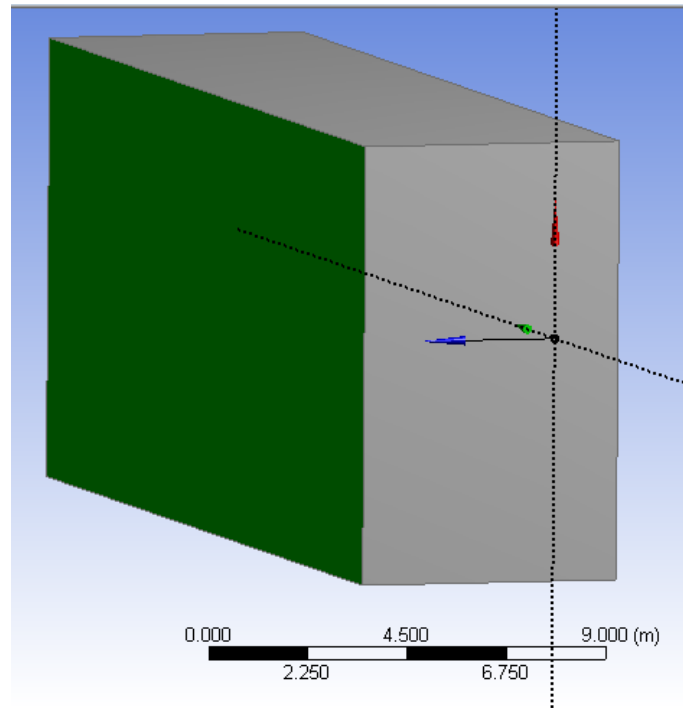
Εικόνα 2-DM13: Επιφάνειες Inlet



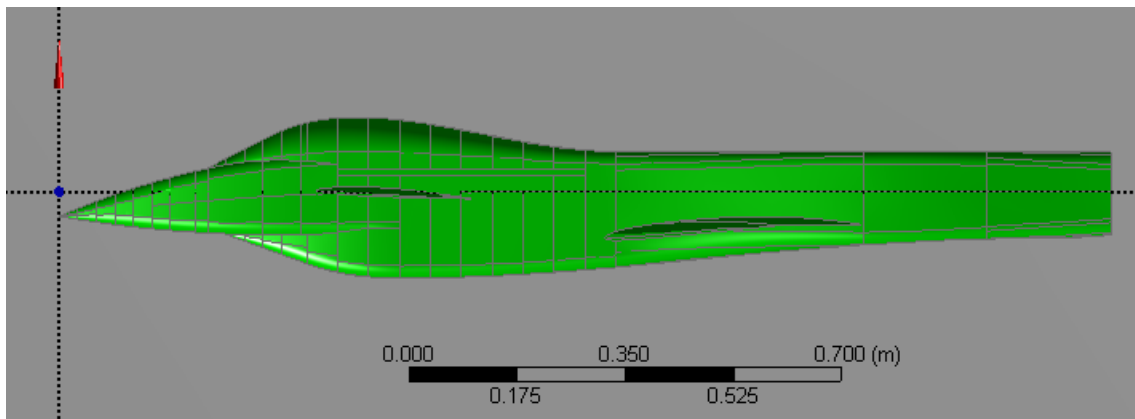
Εικόνα 2-DM14: Επιφάνειες Outlet



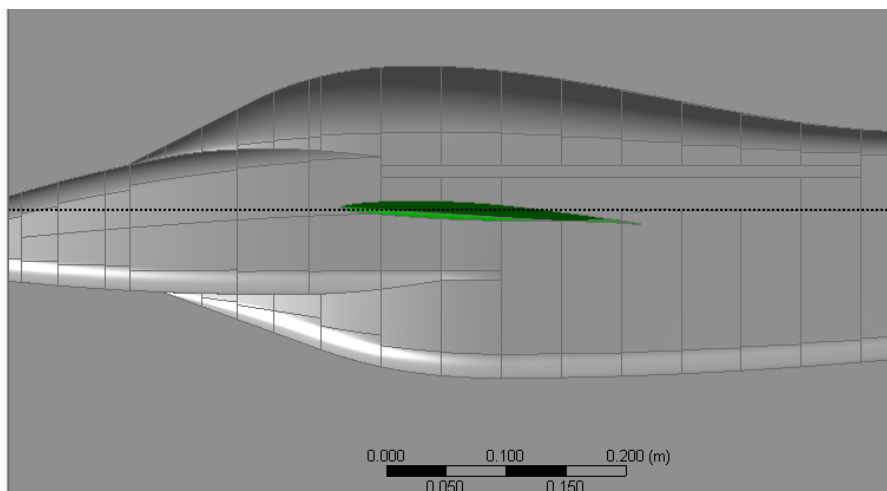
Εικόνα 2-DM15: Επιφάνεια Sym (Symmetry)



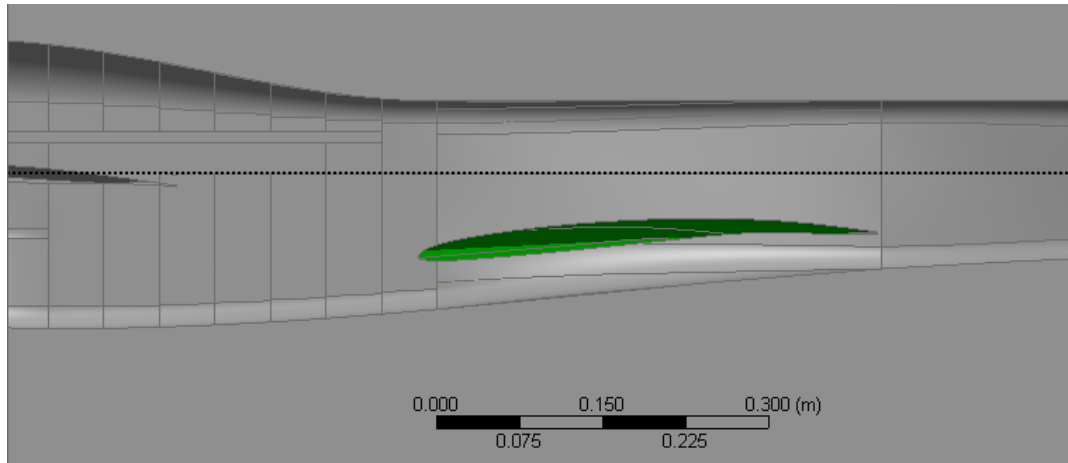
Εικόνα 2-DM16: Επιφάνεια Wall



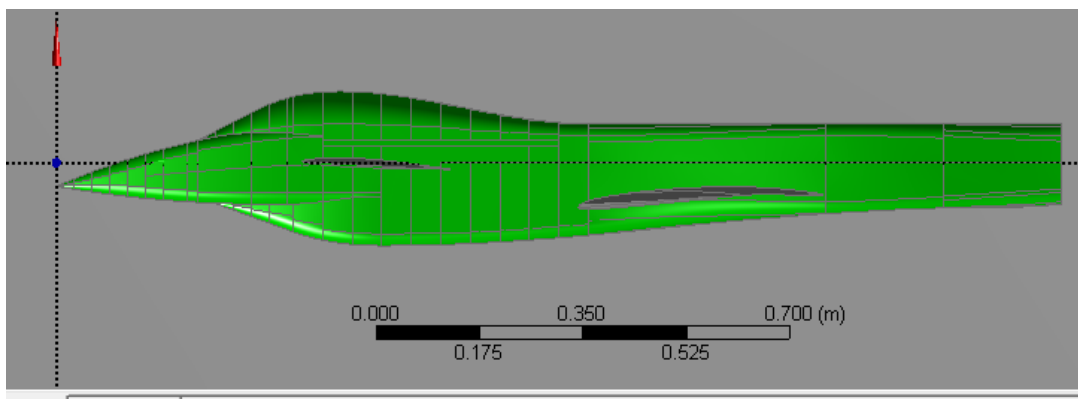
Εικόνα 2-DM17: Επιφάνειες Airplane




Εικόνα 2-DM18: Επιφάνειες Canard



Εικόνα 2-DM19: Επιφάνειες Wing



Εικόνα 2-DM20: Επιφάνειες Fuselage

Τέλος, αποθηκεύοντας τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν πρωτύτερα μέσω της εντολής **Save Project**  από το File Toolbar, ολοκληρώθηκε η επεξεργασία που απαιτούσε η γεωμετρία πριν προχωρήσει στην διαδικασία δημιουργίας πλέγματος. Με την αποθήκευση πραγματοποιείται και ταυτόχρονη καταχώριση στο Workbench. Στο κελί **Geometry**, της ομάδας εργαλείων Fluid Flow (CFX) που απεικονίζεται στο Project Schematic του Workbench, ο ενδείκτης κατάστασης θα έχει μεταβληθεί και θα εμφανιστεί ένα πράσινο τικ (✓). Αυτό δηλώνει ότι όλα τα στοιχεία που απαιτούνται έχουν καταχωρηθεί και μπορεί να συνεχιστεί η επεξεργασία στο επόμενο στάδιο. Έχοντας επιλέξει το κελί **Geometry** στο Properties of Schematic του Workbench, η επιλογή **Named Selections (A9)** ανοίγει και αυτομάτως από κάτω εμφανίζεται ένα ακόμα κελί που λέγεται **Named Selection Key**. Για να περάσουν οι ονομασίες των επιφανειών και στα επόμενα στάδια του συστήματος με το τρόπο που ονομάστηκαν παραπάνω πρέπει το κελί **B10** να είναι κενό.

Mesh Generation Software - Meshing

Σκοπός του λογισμικού Meshing στο ANSYS Workbench είναι να παρέχει ένα καλό και εύκολο στην χρήση εργαλείο δημιουργίας υπολογιστικών πλεγμάτων, που θα απλοποιεί τις διαδικασίες δημιουργίας πλέγματος. Το συγκεκριμένο λογισμικό έχει το πλεονέκτημα της υψηλής αυτοματοποίησης μαζί με το υψηλό επίπεδο διαχείρισης ελέγχου από τον χρήστη. Μέσω του ANSYS Meshing μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω μέθοδοι δημιουργίας πλέγματος:

- Assembly Level Meshing vs. Part/Body Level Meshing.
- Meshing by Algorithm.
- Meshing by Element Shape.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος δημιουργίας πλέγματος μέσω Αλγορίθμου. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει την δυνατότητα εφαρμογής μέσω δυο διαφορετικών τεχνικών δημιουργίας πλέγματος, τον «patch conforming» και τον «patch independent». Η τεχνική «patch conforming», η οποία και χρησιμοποιήθηκε, είναι μια τεχνική με μεγάλη ακρίβεια πάνω σε πολύπλοκες επιφάνειες και στα όρια αυτών (ακμές, κορυφές). Χρησιμοποιείται συνήθως σε πολύπλοκα μοντέλα με δυσπρόσιτα και λεπτά χαρακτηριστικά γεωμετρίας και προσφέρει την δυνατότητα χρήσης του ίδιου πλέγματος για φορτία, οριακές συνθήκες, αποτελέσματα ή κάθε σκοπό, χωρίς να απαιτείται δημιουργία νέου πλέγματος σε περίπτωση αλλαγής του βασικού σκοπού. Η τεχνική «patch independent» προτιμάται σε περίπτωσης λιγότερο πολύπλοκων γεωμετριών και σε καταστάσεις όπου τα όρια των γεωμετριών δε διαδραματίζουν βασικό ρόλο, όπως όταν απαιτείται για μεγάλο και χωρίς πολλές λεπτομέρειες μοντέλο ή για πολύ ομοιόμορφο σε μεγέθη πλέγμα (ANSYS, ANSYS Meshing User's Guide, 2013).

Ανοίγοντας το ANSYS Meshing πατώντας **δεξί κλικ** στο κελί **Mesh** και στην συνέχεια **Edit**, παρατηρείται ότι η βασική δομή και το μεγάλο πλήθος των κεντρικών γραμμών εργαλείων και εντολών είναι κοινό και βασισμένο στην ίδια λογική σχεδίασης με το Design Modeler. Επιλέγοντας απλά το **Mesh** από το **Tree Outline** εμφανίζονται τα γενικά χαρακτηριστικά και οι λεπτομέρειες ορισμού του πλέγματος στο παράθυρο **Details of "Mesh"**, που βρίσκεται κάτω από το **Tree Outline**. Με βάση τα χαρακτηριστικά που ορίζονται στο **Details of "Mesh"** δημιουργείται το πλέγμα στην επιθυμητή γεωμετρία. Για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας πλέγματος με στοχευμένα πυκνώματα σε κρίσιμα σημεία της γεωμετρίας, δίνεται η δυνατότητα εφαρμογής πύκνωσης με **δεξί κλικ** στο **Mesh** από το **Tree Outline** → **Insert** → **Sizing** και ορισμό των λεπτομερειών αυτής από το παράθυρο **Details of "Sizing"**. Μέσω της επιλογής **Insert** υπάρχει δυνατότητα χρήσης και επιπλέον εργαλείων για τοπικό έλεγχο του πλέγματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται όλα τα χαρακτηριστικά που ορίστηκαν για την δημιουργία του συγκεκριμένου πλέγματος (Test 1) της γεωμετρίας διογκωμένης ατράκτου με Canard σε γωνία -3° του μοντέλου M151/1. Οι λεπτομέρειες ορισμού όλων των πλεγμάτων που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Details of "Mesh"	
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
<input type="checkbox"/> Relevance	0
[-] Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	5.e-003 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	1.370 m
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (2.750 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	1.3636e-006 m
[+] Inflation	
[+] Advanced	
[+] Defeaturing	
[+] Statistics	

Εικόνα 2-M1: Defaults και Sizing Group παράμετροι στο Detail of "Mesh"

Defaults Group

Physics Preference: δηλώνει το είδος φυσικής ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί και με βάση αυτό πραγματοποιείται η δημιουργία πλέγματος. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι Mechanical, Electromagnetic, **CFD** και Explicit.

Solver Preference: δηλώνει τον κώδικα CFD με τον οποίο θα γίνει επίλυση και βάση αυτού καταχωρεί κάποιες τιμές ορισμάτων που είναι επιθυμητές για τον κάθε κώδικα. Για CFD οι διαθέσιμες επιλογές είναι **CFX**, Fluent ή Polyflow.

Relevance: επιτρέπει τον έλεγχο της λεπτομέρειας κατά την δημιουργία πλέγματος. Παίρνει τιμές από -100 (high speed) έως +100 (high accuracy). Σημειώνεται ότι όσο μεγαλύτερη ακρίβεια είναι επιθυμητή, τόσο περισσότερα στοιχεία, περισσότερο χρόνο και τελικά περισσότερη υπολογιστική μνήμη απαιτείται.

Sizing Group

Use Advanced Size Function: παρέχει μεγαλύτερο έλεγχο των εξισώσεων όσον αφορά στο μέγεθος των στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, οι Advanced Size Functions ελέγχουν τις γωνίες μεταξύ γειτονικών στοιχείων (Curvature- type size functions), τον αριθμό των στοιχείων που εδράζονται σε κενό μεταξύ δύο γεωμετριών (Proximity- type size functions) και την κλιμάκωση

μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου μεγέθους στοιχείων, βασιζόμενο στο ποσοστό αύξησης που έχει οριστεί (all size functions). Οι διαθέσιμες επιλογές είναι Off, On: Proximity and Curvature, On: Proximity, **On: Curvature** και On: Fixed. Στην περίπτωση του CFD έχει οριστεί σαν προεπιλογή η **On: Curvature** όπου και επιλέχθηκε.

Curvature Size Function: εξετάζει την κυρτότητα των ακμών και των επιφανειών και υπολογίζει το μέγεθος των στοιχείων ώστε να μην υπερβαίνουν το μέγιστο καθορισμένο μέγεθος ή την κανονική γωνία καμπυλότητας, τα οποία έχουν υπολογιστεί αυτόματα, είτε έχουν οριστεί από τον χρήστη. Η συγκεκριμένη εξίσωση ορίζεται από τις παρακάτω πέντε ιδιότητες.

Curvature Normal Angle: είναι η μέγιστη επιτρεπτή γωνία μιας ακμής ενός στοιχείου. **(Default (18.0°))**

Min Size: είναι το μικρότερο μέγεθος που θα επιστρέψουν ως αποτέλεσμα οι εξισώσεις στον Mesher. Υπάρχει πιθανότητα μερικά στοιχεία να είναι μικρότερα, υπό την προϋπόθεση τοπικών χαρακτηριστικών ή άλλων γεωμετρικών ανωμαλιών. **(5e -003m)**

Max Face Size: είναι το μεγαλύτερο μέγεθος που θα επιστρέψουν ως αποτέλεσμα οι εξισώσεις στον surface Mesher. Υπάρχει πιθανότητα μερικά στοιχεία να έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια υπό εξειδικευμένες προϋποθέσεις. Ορίζεται τιμή μεγαλύτερη του μηδενός ή γίνεται αποδεκτή η προεπιλογή. Για να οριστεί η προεπιλογή, υπολογίζεται μια αρχική τιμή του Max Face Size και έπειτα κλιμακώνεται με βάση την τιμή του Relevance. **(1.370m)**

Max Size: είναι το μεγαλύτερο μέγεθος που θα επιστρέψουν ως αποτέλεσμα οι εξισώσεις στον Mesher. Ορίζεται τιμή μεγαλύτερη του μηδενός ή γίνεται αποδεκτή η προεπιλογή. **(Default (2.750m))**

Growth Rate: είναι ο λόγος αύξησης του μήκους της ακμής του στοιχείου σε κάθε διαδοχικό επίπεδο. **(Default (1.20))**

Relevance Center: ορίζει το εύρος του Relevance slider control στο Default Group. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι **Coarse**, Medium και Fine. Η προεπιλογή ορίζεται αυτόματα συμφώνως του Physics Preference.

Initial Size Seed: επιτρέπει τον έλεγχο της αρχικής κατανομής του μεγέθους του πλέγματος σε κάθε τμήμα. Διαθέσιμες επιλογές είναι η **Active Assembly** και η Full Assembly.

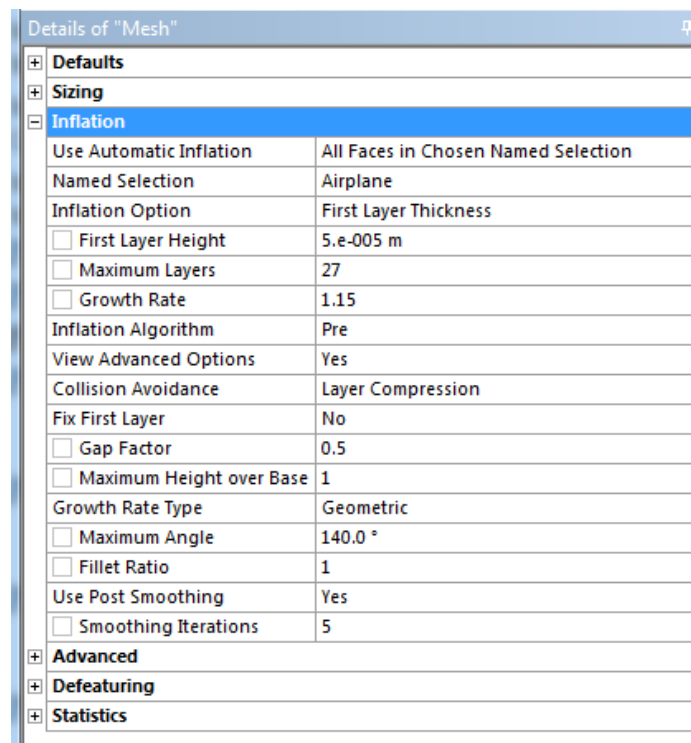
Smoothing: βελτιώνει την ποιότητα του πλέγματος μετακινώντας κόμβους, αφού λάβει υπόψη τους γειτονικούς τους κόμβους και στοιχεία. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι Low, **Medium**, High και ρυθμίζουν τον

αριθμό των επαναλήψεων βελτίωσης καθώς και το κατώτερο όριο από το οποίο θα ξεκινάει η βελτιστοποίηση.

Transition: επηρεάζει τον λόγο με τον οποίο γειτονικά στοιχεία μεγεθύνονται. Η επιλογή **Slow** παρέχει ομαλή μετάβαση ενώ η επιλογή **Fast** προκαλεί πιο απότομη μεταβολή.

Span Angle Center: ορίζεται ως στόχος για την βελτίωση βάσει της καμπυλότητας. Το πλέγμα υποδιαιρείται σε καμπύλες περιοχές μέχρι τα επιμέρους στοιχεία να καλύπτουν αυτήν την γωνία. **Coarse** (-91° μέχρι 60°), **Medium** (-75° μέχρι 24°) και **Fine** (-36° μέχρι 12°).

Minimum Edge Length: παρέχει ένδειξη της μικρότερης σε μήκος ακμής στο μοντέλο.



Εικόνα 2-M2: Inflation Group παράμετροι στο Detail of "Mesh"

Inflation Group

Η δημιουργία Inflation είναι χρήσιμη για CFD ανάλυση στα οριακά στρώματα των γεωμετριών. Η επιλογή και οι ρυθμίσεις για γενικό Inflation στην γεωμετρία προβάλλονται στο Detail of "Mesh". Επιλέγοντας τη δημιουργία Inflation πρακτικά δημιουργούνται πυκνά και ομοιόμορφα στρώματα στοιχείων πολύ κοντά στα όρια της γεωμετρίας, παρέχοντας έτσι καλύτερα αποτελέσματα.

Use Automatic Inflation: δίνεται η επιλογή εφαρμογής αυτόματης δημιουργίας Inflation σε μία επιφάνεια, εξαρτώμενη από το αν η υπό εξέταση επιφάνεια είναι ή όχι μέλος του Named Selections Group. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι **None**, **Program Controlled** και **All Faces in Chosen Named**

Selection. Η δημιουργία αυτόματου Inflation επιτυγχάνεται μόνο για 3D γεωμετρίες.

Named Selection: Επιλέγεται το τμήμα για αυτόματο Inflation μέσα από την λίστα των Named Selections. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε όλη η επιφάνεια της γεωμετρίας του αεροσκάφους (**Airplane**).

Inflation Option: Ορίζονται τα ύψη των στρωμάτων που θα δημιουργηθούν και ο τρόπος που θα εφαρμοστούν. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι Smooth Transition, Total Thickness, **First Layer Thickness**, First Aspect Ratio και Last Aspect Ratio. Στην περίπτωση του **First Layer Thickness** που επιλέχθηκε, δημιουργούνται σταθερά στρώματα χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τα ορίσματα First Layer Height, Maximum Layers και Growth Rate. Αντίθετα από την επιλογή Smooth Transition, με την χρήση του **First Layer Thickness** το πάχος του πρώτου στρώματος και κάθε επόμενου δύναται να παραμείνει αμετάβλητο.

First Layer Height: ορίζεται το ύψος που πρώτου στρώματος. (**5e-005m**)

Maximum Layers: ορίζεται ο μέγιστος αριθμός στρωμάτων που θα δημιουργηθούν. Παίρνει τιμές από 1εως 1000. (**27**)

Growth Rate: είναι ο λόγος αύξησης του πάχους του στρώματος των στοιχείων σε κάθε διαδοχικό επίπεδο. (**1.15**)

Inflation Algorithm: ορίζεται ο αλγόριθμος δημιουργίας του Inflation. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι **Pre** και **Post** και εξαρτώνται από την επιλεγμένη μέθοδο δημιουργίας πλέγματος. Στην περίπτωση της «Patch Conforming» είναι διαθέσιμοι και οι δύο αλγόριθμοι σε 3D πλέγμα. Επιλέγοντας τον **Pre** αλγόριθμο δημιουργείται πρώτα το Inflation γύρω από την γεωμετρία και έπειτα το υπόλοιπο πλέγμα.

View Advanced Options: δίνεται η επιλογή για ρύθμιση επιπλέον επιλογών για το Inflation. (**Yes**)

Collision Avoidance: ορίζει το είδος της προσέγγισης που θα εφαρμοστεί για την αποφυγή σύγκρουσης και κακής ποιότητας ένωσης κατά την δημιουργία των στρωμάτων του Inflation με το υπόλοιπο πλέγμα. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι **Layer Compression** ή **Star Stepping**. Στο **Layer Compression** γίνεται συμπίεση των στρωμάτων ως προς το ύψος τους ώστε να μην δημιουργούνται συγκρούσεις και να μένει σταθερός ο αριθμός των στρωμάτων σε όλη την περιοχή.

Fix First Layer: ορίζει αν το ύψος από το πρώτο στρώμα τροποποιηθεί ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση στρωμάτων. (**No**)

Gap Factor: ορίζει την επιτρεπτή διατήρηση κενών μεταξύ τεμνόμενων πρισμάτων. Παίρνει τιμές από 0-2. (**Default (0.5)**).

Maximum Height over Base: ορίζει το μέγιστο επιτρεπτό λόγο διαστάσεων πρίσματος (που ορίζεται ως ο λόγος του ύψους από την βάση προς την βάση του τριγώνου). Παίρνει τιμές 0.1-5. **(Default (1.0))**.

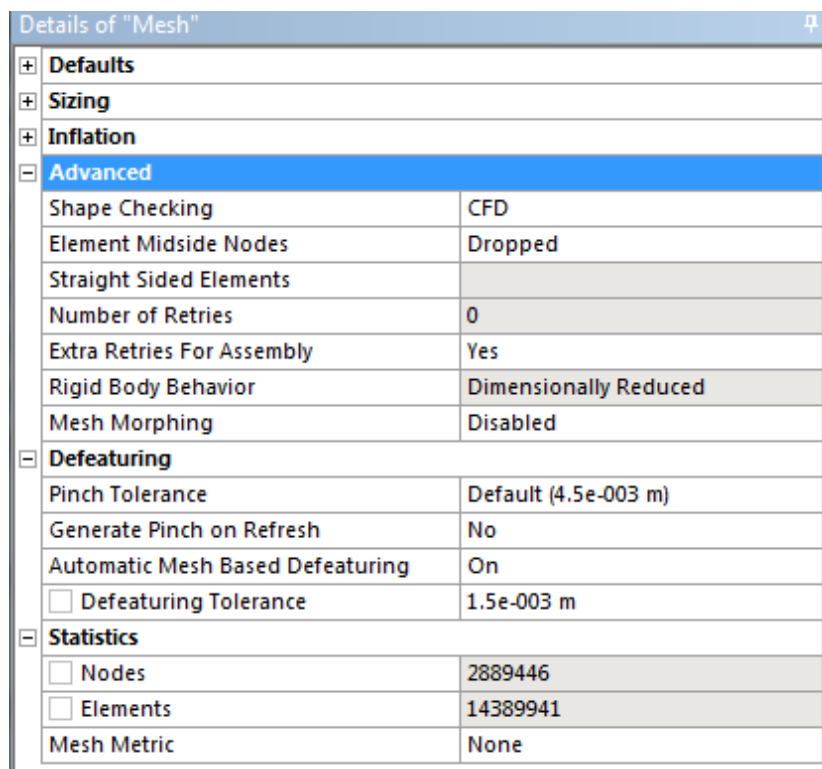
Growth Rate Type: Ορίζει το ύψος των στρώματων του Inflation, δεδομένου του αρχικού ύψους και του λόγου ύψους. Διαθέσιμες επιλογές είναι **Geometric**, Exponential, Linear. Με βάση την **Geometric** επιλογή το ύψος του πρίσματος σε ένα τυχαίο στρώμα ορίζεται ως $h \cdot r^{(n-1)}$, όπου h είναι το αρχικό ύψος, r είναι ο λόγος ύψους και n είναι ο αριθμός στρώματος. Το συνολικό ύψος το στρώματος n είναι : $h(1-r^n)/(1-r)$.

Maximum Angle: καθορίζει την ανάπτυξη πρισματικού στρώματος γύρω από γωνίες και αν τα πρίσματα θα προσχωρούν σε γειτονικές επιφάνειες. Παίρνει τιμές από 90°-180°. **(Default (140°))**.

Fillet Ratio: καθορίζει εάν δημιουργηθεί λωρίδα αναλογικά με το συνολικό ύψος των πρισματικών στοιχείων, όταν αυτά δημιουργούνται σε γωνιακή ζώνη από τετραδικό πλέγμα. Παίρνει τιμές από 0 έως 1 και κάνει δυνατό τον έλεγχο της ομαλότητας του πρισματικού στρώματος.

Use Post Smoothing: καθορίζει αν θα εφαρμοστεί βελτιστοποίηση για το Inflation μετά την δημιουργία του. **(Yes)**

Smoothing Iterations: ορίζει τον αριθμό των βελτιωτικών επαναλήψεων που θα εφαρμοστούν μετά την δημιουργία του Inflation. Παίρνει τιμές από 0 έως 20. **(Default (5))**.



Εικόνα 2-M3: Advanced, Defeaturing και Statistics Group παράμετροι στο Detail of "Mesh"

Advanced Group

- Shape Checking:** Στην περίπτωση του **CFD** χρησιμοποιεί ένα κριτήριο ελέγχου του σχήματος της γεωμετρίας, βασισμένο στο όγκο των στοιχείων.
- Element Midside Nodes:** καθορίζει αν το πλέγμα που πρόκειται να δημιουργηθεί θα έχει ενδιάμεσους κόμβους (τετραγωνικά στοιχεία) ή θα είναι χωρίς ενδιάμεσους κόμβους (γραμμικά στοιχεία). Μειώνοντας τον αριθμό των ενδιάμεσων κόμβων, μειώνεται και ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι Program Controlled, **Dropped** και Kept. Με την επιλογή Dropped αφαιρούνται οι ενδιάμεσοι κόμβοι από όλα τα στοιχεία.
- Number of Retries:** καθορίζει τις φορές όπου ο Mesher θα προσπαθήσει να ξαναφτιάξει το πλέγμα σε περίπτωση που αποτύχει η διαδικασία δημιουργίας του λόγω κακής ποιότητας αυτού. Σε κάθε προσπάθεια θα αυξάνεται η ακρίβεια του πλέγματος μέχρι να επιτευχθεί ένα καλό πλέγμα. Το γεγονός αυτό όμως μπορεί να αυξήσει πολύ τον αριθμό των στοιχείων πάνω από το επιθυμητό όριο. Παίρνει τιμές από 0 έως 4 και στην περίπτωση του CFD η προεπιλογή είναι **0** που επιλέχθηκε.
- Extra Retries For Assembly:** καθορίζει εάν ο Mesher θα προσπαθήσει να ξαναφτιάξει το πλέγμα σε περίπτωση που αποτύχει η διαδικασία δημιουργίας του, λόγω κακής ποιότητας αυτού σε ένα συγκρότημα εξαρτημάτων. **(Yes)**.
- Rigid Body Behavior:** καθορίζει αν η δημιουργία πλήρους πλέγματος για ένα άκαμπτο σώμα είναι προτιμότερη από ένα πλέγμα που εφάπτεται στην επιφάνεια. Είναι ρύθμιση για όλους τους τύπους σωμάτων και έχει διαθέσιμες επιλογές την **Dimensionally Reduced** (δημιουργεί μόνο πλέγματα εφαπτόμενα στην επιφάνεια) και την Full Mesh (δημιουργεί πλήρες πλέγμα).
- Mesh Morphing:** η ενεργοποίηση αυτής της επιλογής περιορίζει πολύ μια τυχόν τροποποίηση της γεωμετρίας, καθώς το πλέγμα ακολουθεί την τροποποίηση και δεν ξαναδημιουργείται από την αρχή. **(Disabled)**

Defeaturing Group

- Pinch Tolerance:** επιτρέπει τον καθορισμό των ανοχών που θα χρησιμοποιηθούν κατά την αυτόματη δημιουργία των Pinch Controls. **(Default (4.5e-003m))**.
- Generate Pinch on Refresh:** καθορίζει αν τα Pinch Controls ξαναδημιουργηθούν μετά από μια μεταβολή στην γεωμετρία. **(No)**
- Automatic Mesh Based Defeaturing:** η εφαρμογή δημιουργίας πλέγματος απλοποιεί κάποιες μικρές λεπτομέρειες και κάποια σημεία της γεωμετρίας

αυτόματα με βάση το Defeaturing Tolerance. Όταν το **Automatic Mesh Based Defeaturing** είναι **On**, τότε λεπτομέρειες μικρότερες ή ίσες με την τιμή του Defeaturing Tolerance αφαιρούνται αυτόματα.

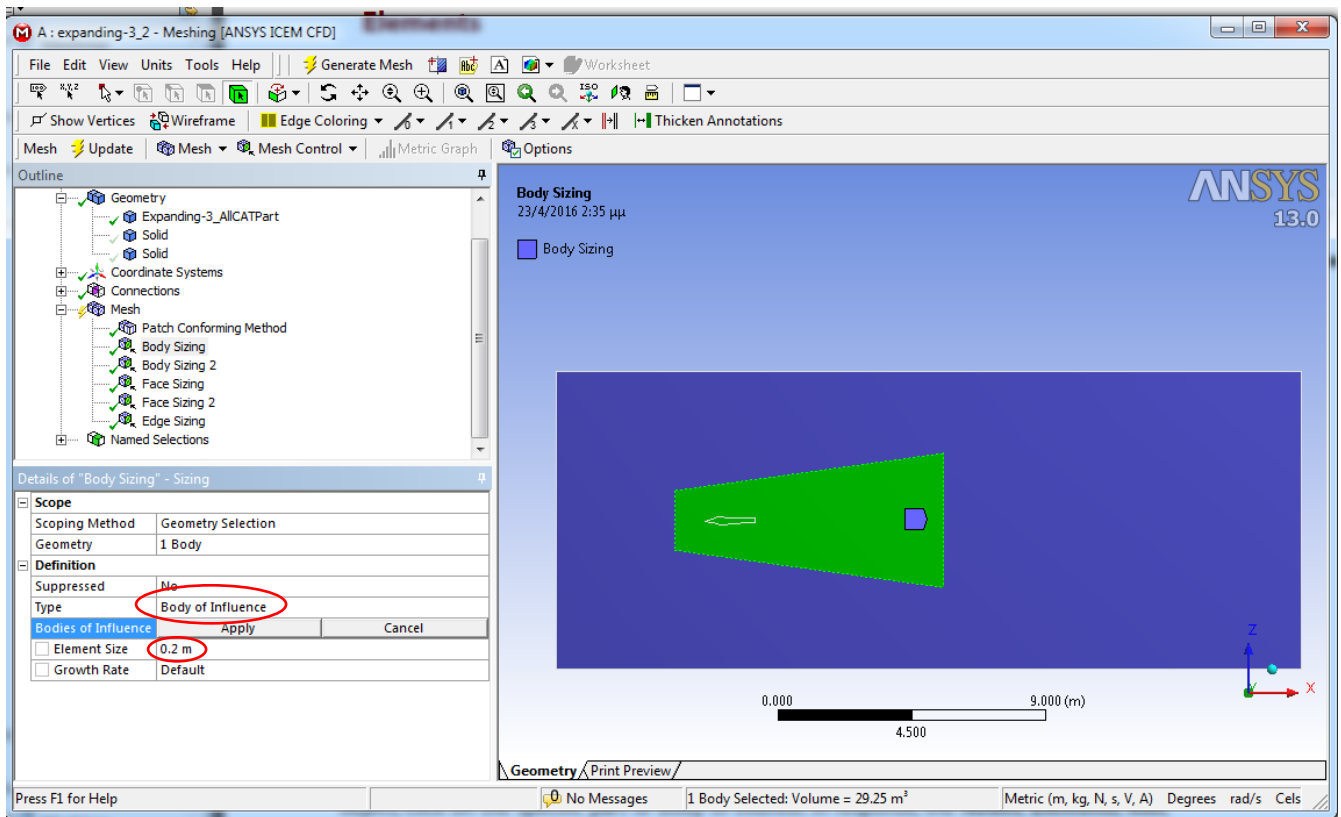
Defeaturing Tolerance: 1.5e-003m

Statistics Group

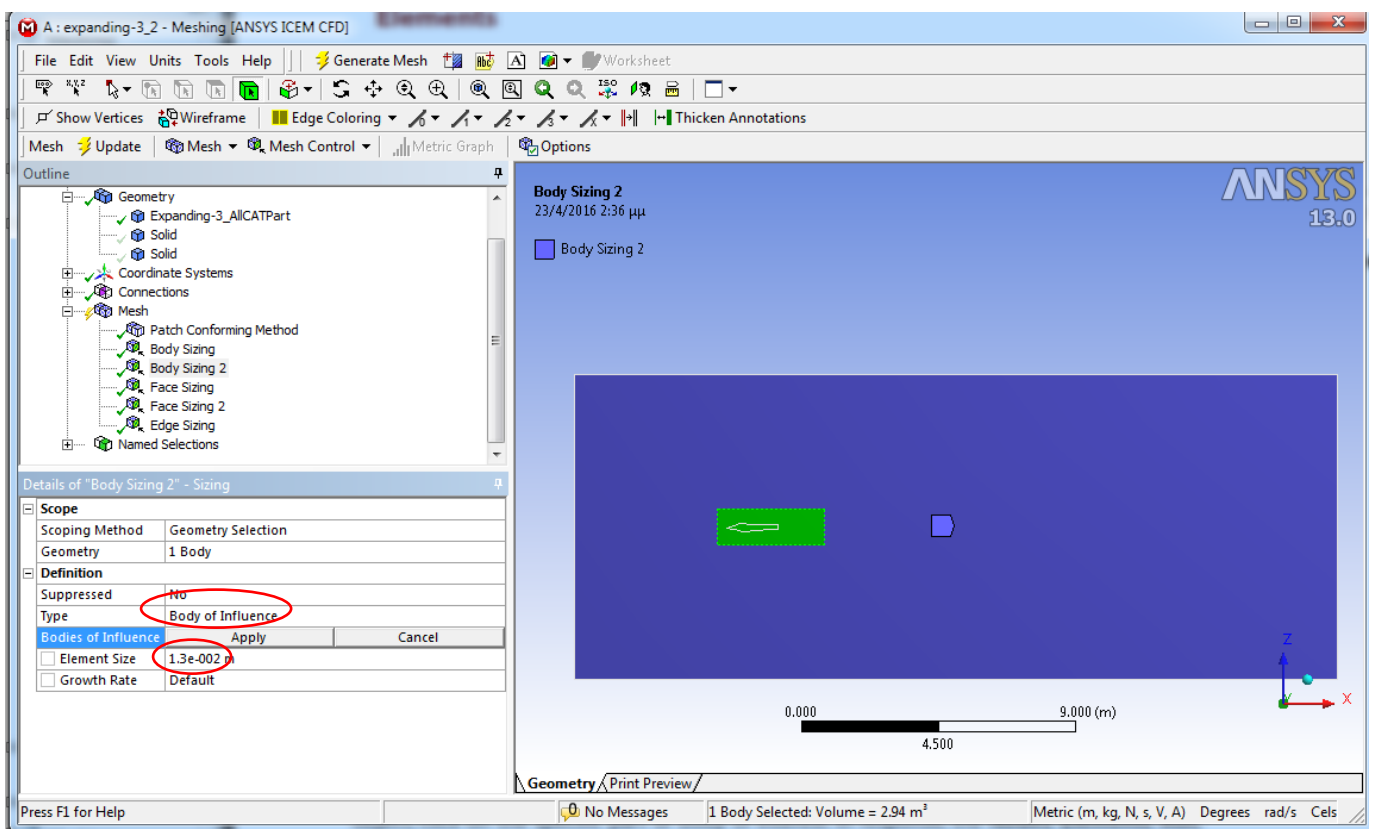
- Nodes:** παρέχει ένδειξη του συνόλου των κόμβων στο πλέγμα. Αν το μοντέλο αποτελείται από πολλά τμήματα ή σώματα, υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης του αριθμού των κόμβων στα ανεξάρτητα τμήματα, απλά επιλέγοντάς τα από το Geometry του Tree Outline. **(2889446)**
- Elements:** παρέχει ένδειξη του συνόλου των στοιχείων στο πλέγμα. Αν το μοντέλο αποτελείται από πολλά τμήματα ή σώματα, υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης του αριθμού των στοιχείων στα ανεξάρτητα τμήματα απλά επιλέγοντάς τα από το Geometry του Tree Outline. **(14389941)**
- Mesh Metric:** επιτρέπει την εμφάνιση μετρικών πληροφοριών του πλέγματος και με αυτόν τον τρόπο διευκολύνει την αξιολόγηση της ποιότητας του.

Εκτός από τις γενικές ρυθμίσεις δημιουργίας πλέγματος που παρουσιάστηκαν παραπάνω, εφαρμόστηκαν και επιμέρους πέντε πυκνώσεις στον όγκο του ρευστού με σκοπό την επίτευξη ποιοτικότερου πλέγματος. Στις Εικόνες 2-M4 έως 2-M8 παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά και τα ορίσματα για τις πυκνώσεις που εφαρμόστηκαν.

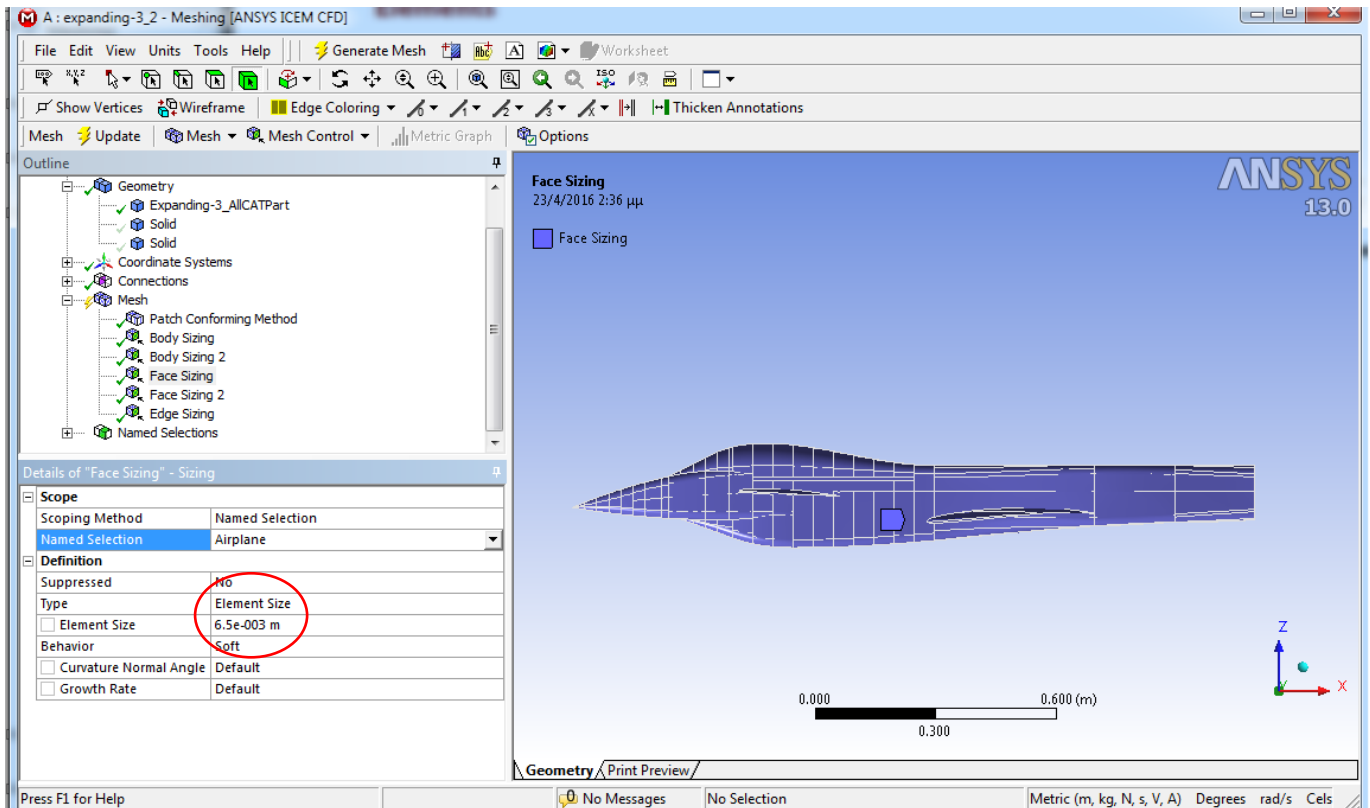
Τέλος, επιλέγοντας το **Generate Mesh** ξεκινάει η διαδικασία υπολογισμού και δημιουργίας του πλέγματος που ορίστηκε παραπάνω (Εικόνα 2-M9 έως 2-M11). Η ολοκλήρωση της διαδικασίας διαρκεί μερικά λεπτά έως και ώρα, ανάλογα με τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί και τις απαιτήσεις του χρήστη. Με το πέρας της διαδικασίας αποθηκεύεται η εργασία μέσω **File → Save Project**. Μόλις τερματιστεί το ANSYS Meshing απαιτείται να εφαρμοστεί **Update** στο κελί Mesh. Με την ολοκλήρωση του Update εμφανίζεται ένα πράσινο tik στον ενδείκτη κατάστασης και επιτρέπεται η συνέχιση της επεξεργασίας στο επόμενο στάδιο της εισαγωγής των δεδομένων του προβλήματος.



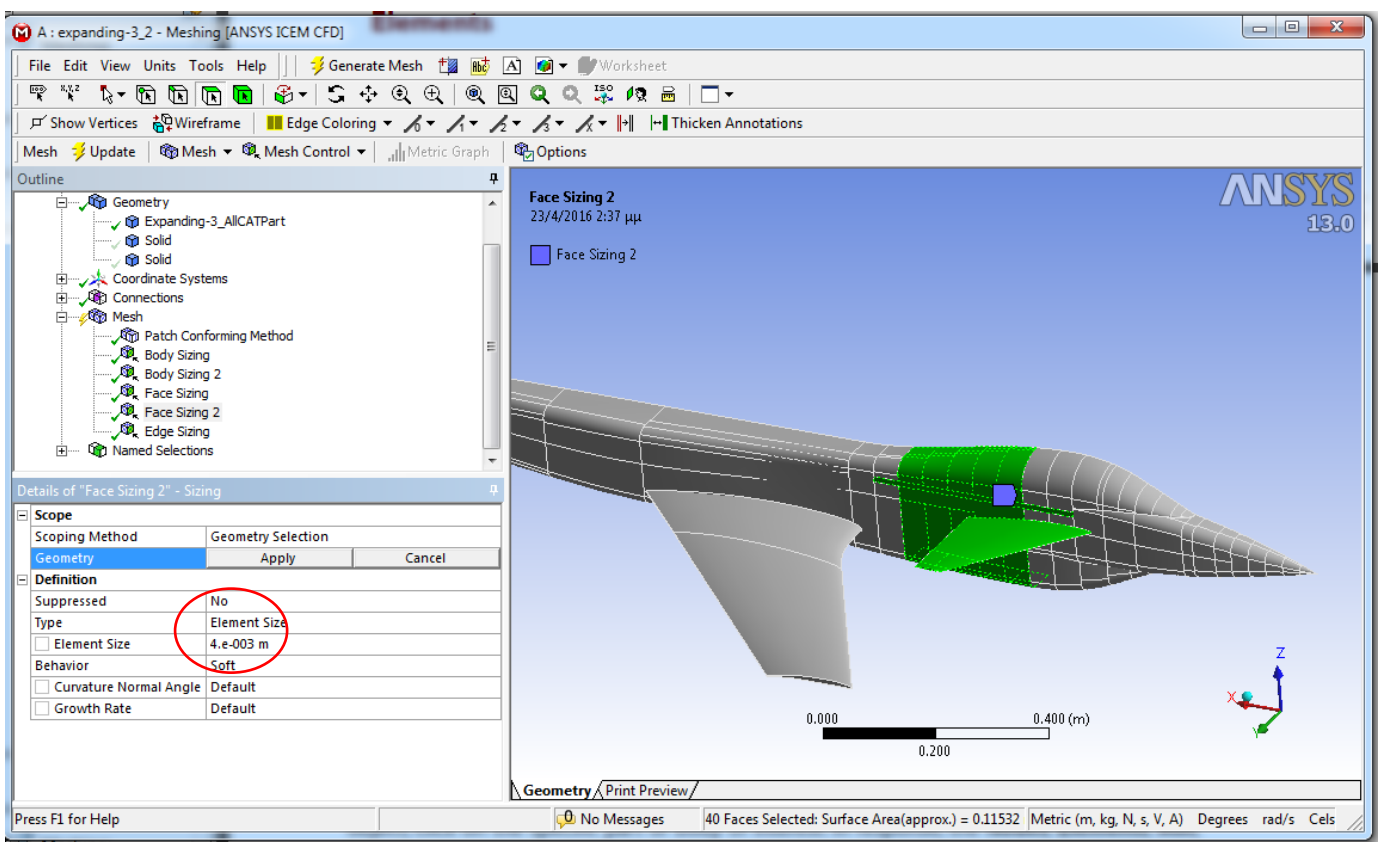
Εικόνα 2-M4: Εφαρμογή Body Sizing



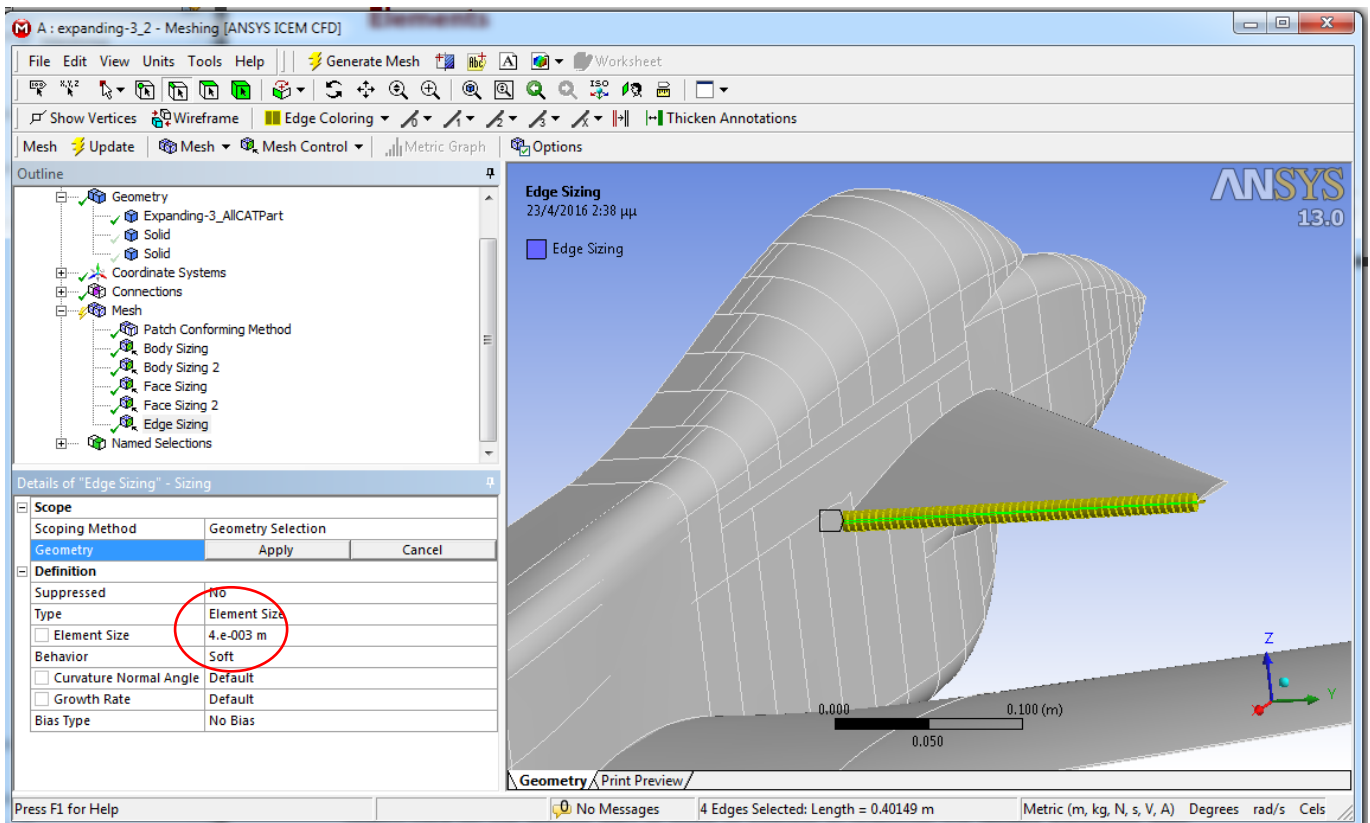
Εικόνα 2-M5: Εφαρμογή Body Sizing2



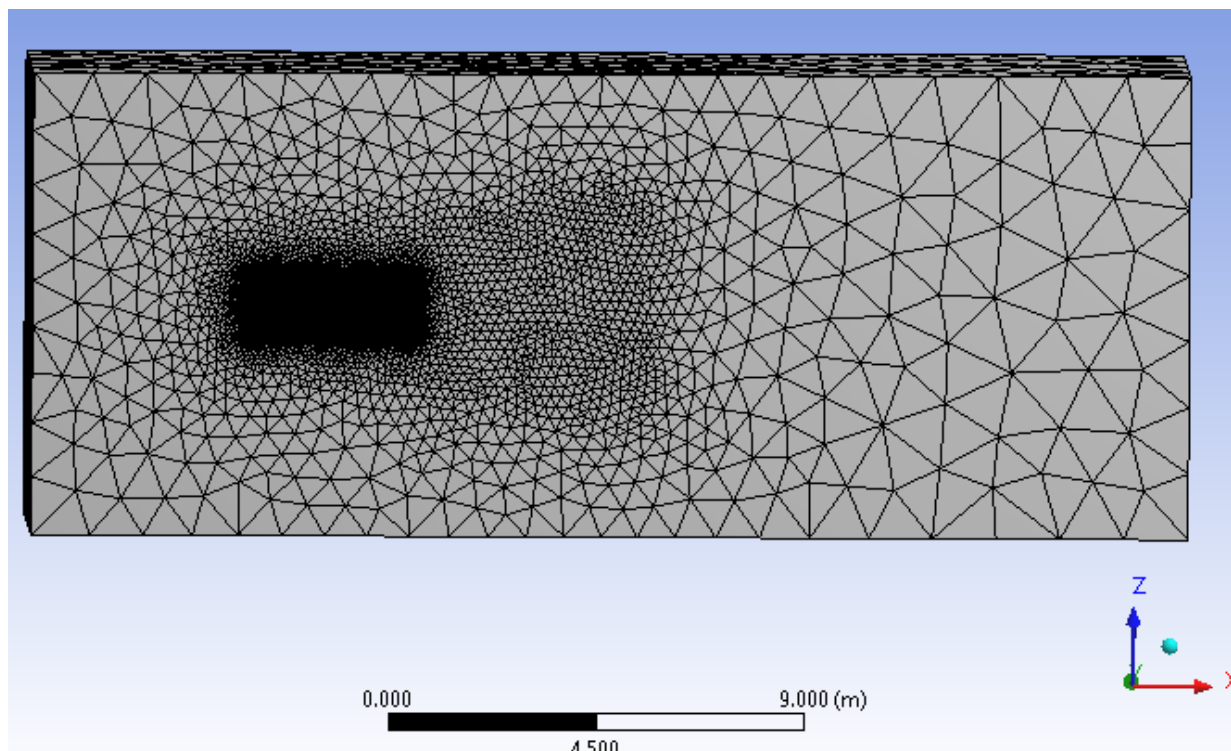
Εικόνα 2-M6: Εφαρμογή Face Sizing



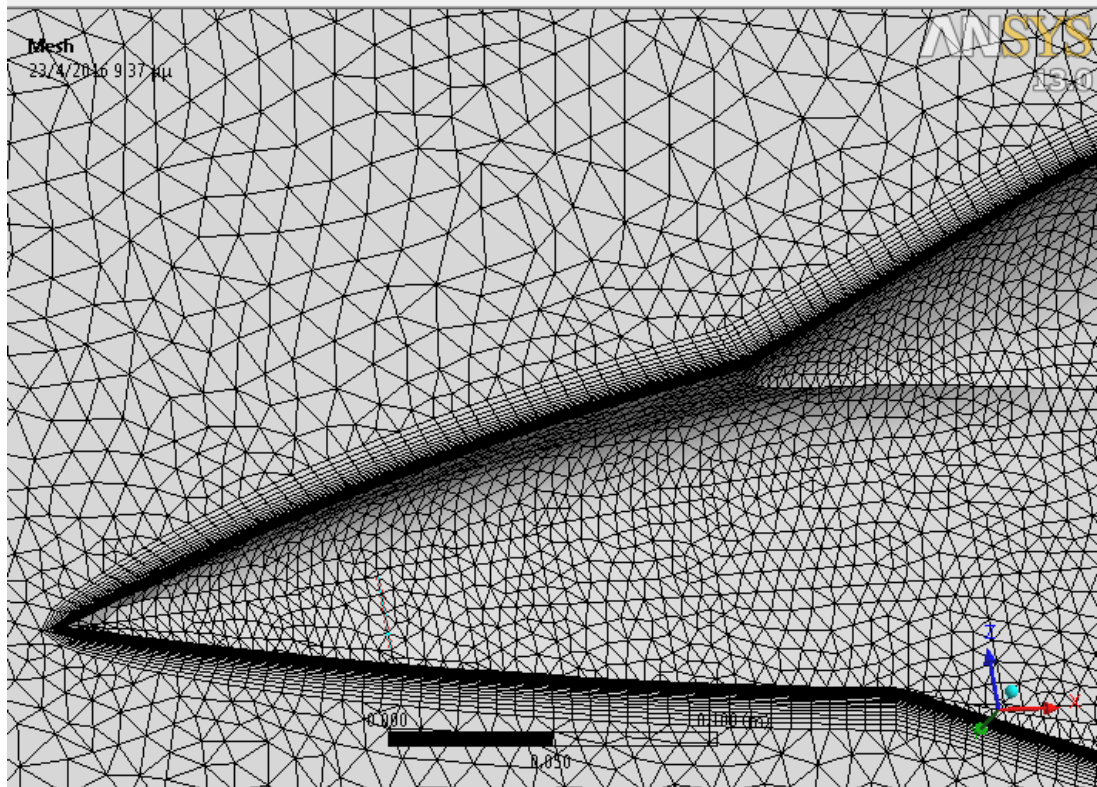
Εικόνα 2-M7: Εφαρμογή Face Sizing 2



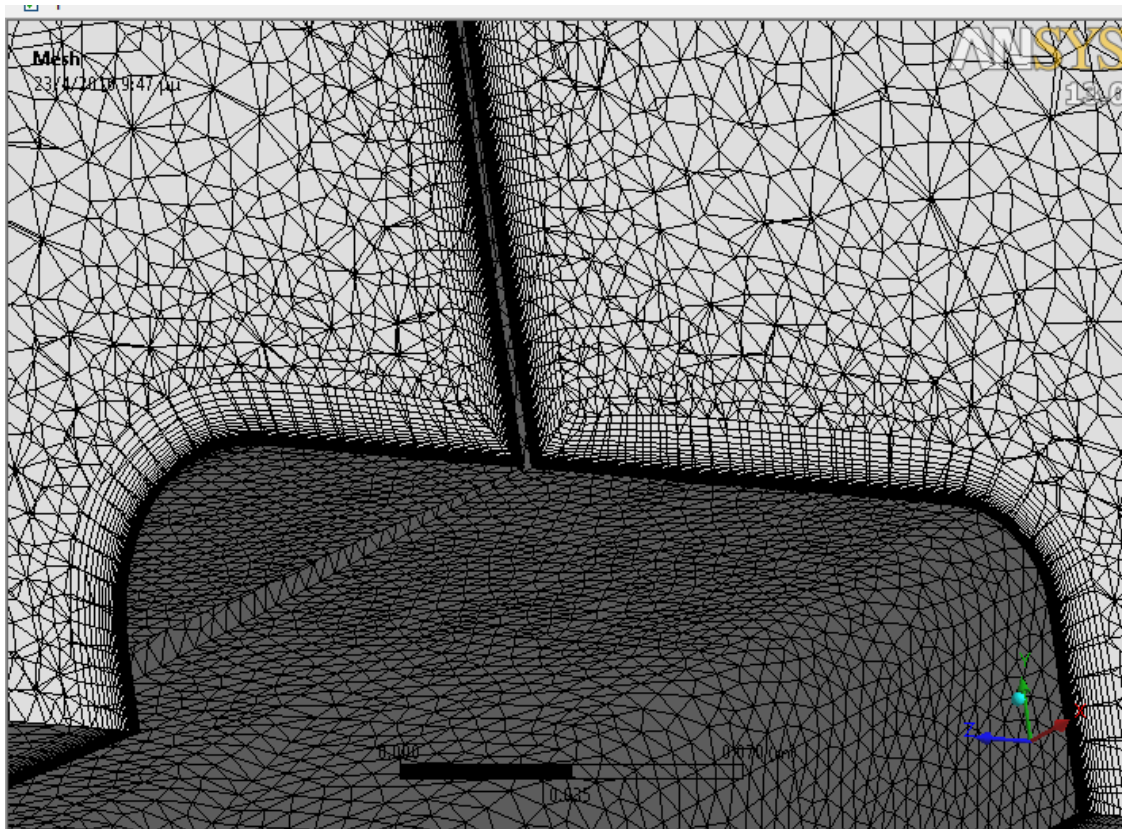
Εικόνα 2-M8: Εφαρμογή Edge Sizing



Εικόνα 2-M9: Πλέγμα με εμφανές διαφορά πυκνότητας λόγω εφαρμογής των Body Sizing



Εικόνα 2-M10: Δημιουργία Inflation στα όρια της γεωμετρίας

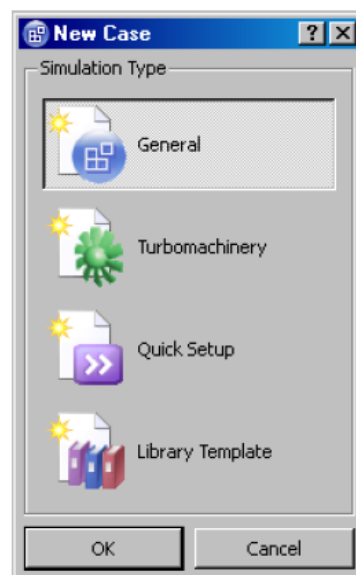


Εικόνα 2-M11: Δημιουργία Inflation στα όρια της γεωμετρίας σε τομή στο ύψος του Canard

ANSYS CFX-Pre

Το λογισμικό ANSYS CFX-Pre παρέχει την δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει τις φυσικές ιδιότητες και τα δεδομένα του προβλήματος Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής, που πρόκειται να προσομοιώσει. Παρέχει πληθώρα δυνατοτήτων στον χρήστη, καθώς επίσης και ευκολία στη σύνθεση του εκάστοτε προβλήματος. Τα δεδομένα που καταχωρούνται στο CFX-Pre στέλνονται αυτόματα στον CFX-Solver για να πραγματοποιηθεί η επίλυση του προβλήματος. Τα ίδια δεδομένα και οι φυσικές ιδιότητες που ορίστηκαν σε αυτό το στάδιο της εργασίας, όπως περιγράφεται στην συνέχεια, εφαρμόστηκαν για όλα τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν και περιγράφονται στο Παράστημα Β.

Ανοίγοντας το ANSYS CFX-Pre μέσω του κελίου **Setup** από το Project Schematic του Workbench (είτε επιλέγοντας την εκκίνηση ορισμού νέας προσομοίωσης), πρέπει να οριστεί το είδος της προσομοίωσης που είναι επιθυμητή, μέσω του παραθύρου διαλόγου που εμφανίζεται. Ο διαχωρισμός των επιλογών παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-G1 (ANSYS, ANSYS CFX-Pre User's Guide, 2013).

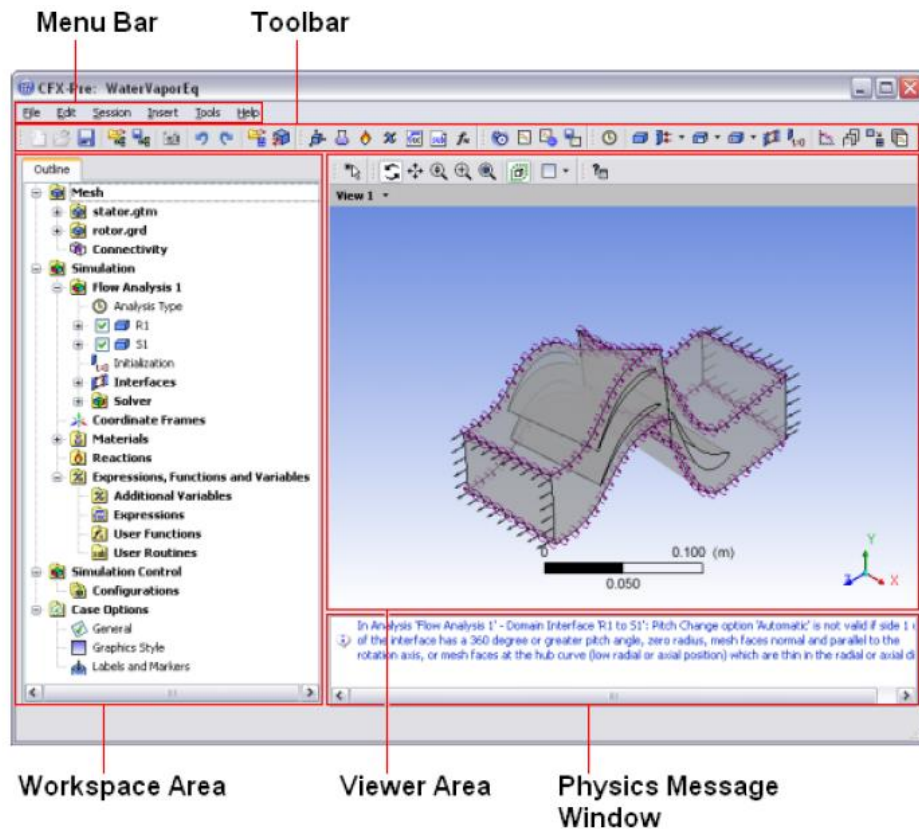


Εικόνα 2-G1: The New Case Dialog Box

Μέσω της επιλογής **General** υπάρχει η δυνατότητα ορισμού κάθε είδους CFD προσομοίωσης. Η επιλογή **Turbomachinery** εστιάζει μόνο στην προσομοίωση στροβιλομηχανών ή συμπιεστών απλοποιώντας την διαδικασία. Με το **Quick Setup mode** πραγματοποιείται απλοποίηση της διαδικασίας ορισμού των φυσικών ιδιοτήτων και δεδομένων για απλά προβλήματα προσομοίωσης, όπως στις περιπτώσεις μονοφασικών προβλημάτων με ένα όγκο/τμήμα μελέτης. Για πιο σύνθετα προβλήματα προσομοίωσης υπάρχει περιορισμός στη χρήση του, που επιτρέπει τον μερικό αρχικό ορισμό του προβλήματος με την πρόσθεση επιπλέον φυσικών λεπτομερειών σε μετέπειτα στάδιο ορισμού. Το **Library Template mode** παρέχει διαθέσιμες φυσικές ιδιότητες και δεδομένα για προγραμματισμό συγκεκριμένων προσομοιώσεων. Στην συνέχεια περιγράφεται η αναλυτική διαδικασία ορισμού του προβλήματος CFD μέσω του General mode, σύμφωνα με την Test Case E8 από την AGARD-AR-303 Vol II (Stanniland, 1985) για την περίπτωση $\alpha = 5.5^\circ$ και $M=0.7$.

Μέρος 2^ο: ANSYS

Τα κύρια τμήματα του λογισμικού είναι η Viewer Area όπου γίνεται απεικόνιση και επεξεργασία του μοντέλου, η Workspace Area, στην οποία πραγματοποιείται ο ορισμός των φυσικών χαρακτηριστικών και δεδομένων, το Physics message window, το βασικό μενού και οι μπάρες εργαλείων (Εικόνα 2-G2).

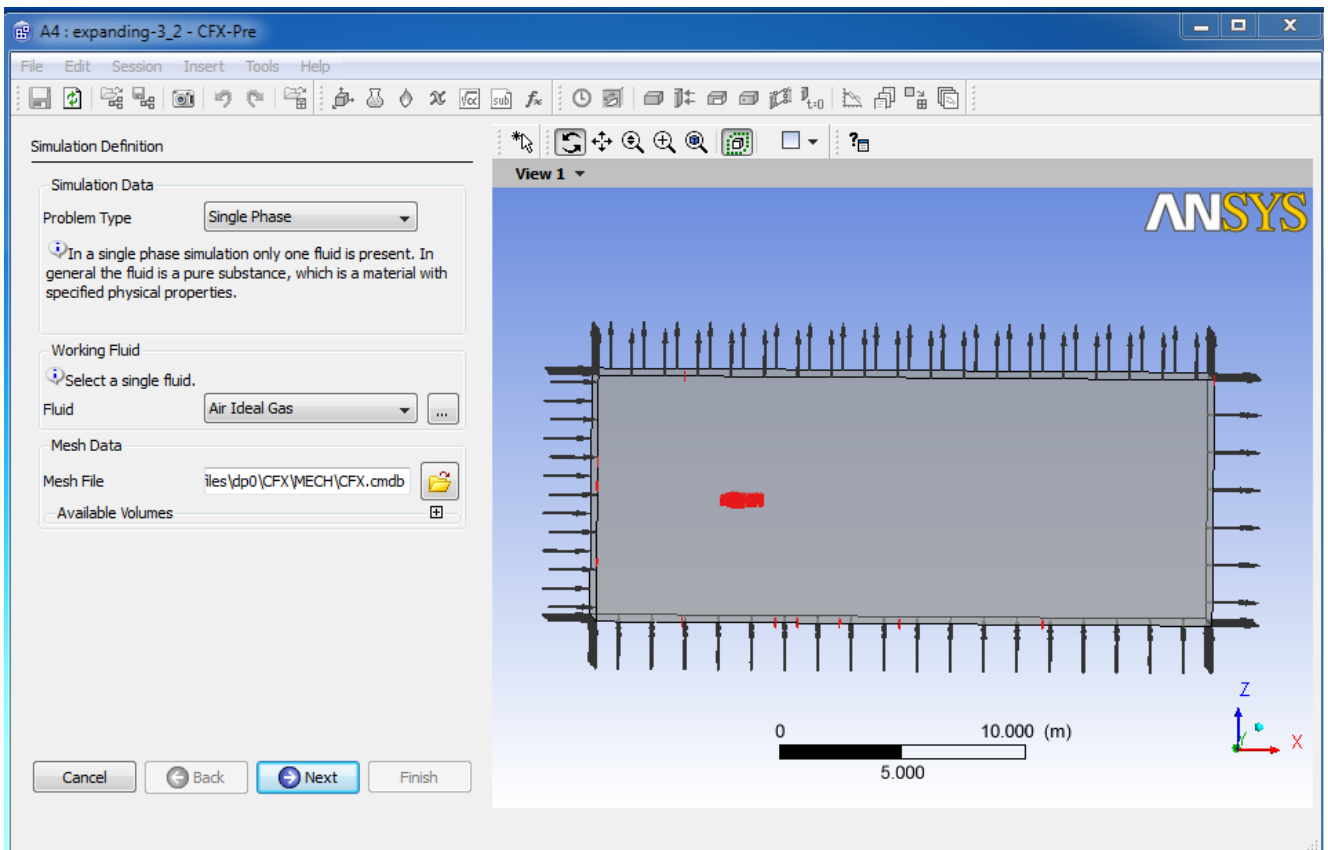


Εικόνα 2-G2: Κύρια τμήματα παράθυρου εργασίας του λογισμικού ANSYS CFX-Pre

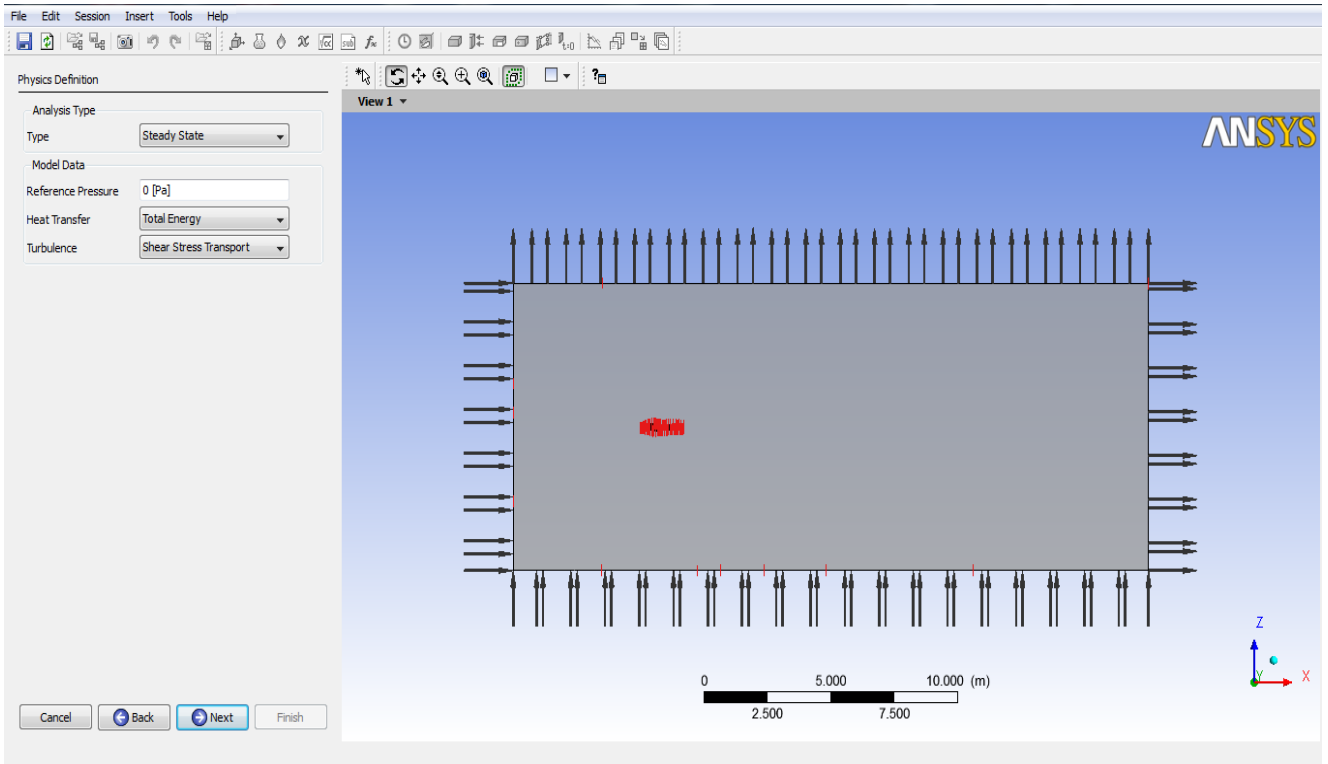
(ANSYS, ANSYS CFX-Pre User's Guide, 2013)

Στη Workspace Area περιέχεται το Outline Tree View και ποικιλία λεπτομερειών που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία ορισμού του εκάστοτε προβλήματος, όπως χαρακτηριστικά πλέγματος και υλικών, εξισώσεις, αντιδράσεις κ.α. Το CFX-Pre πραγματοποιεί αυτόματο έλεγχο των δεδομένων που ορίζονται για το πρόβλημα και παρουσιάζει τυχόν ασυνέπειες ή λανθασμένα ορίσματα μέσω μηνυμάτων στο Physics Message Window.

Για να οριστούν τα βασικά χαρακτηριστικά του προβλήματος εύκολα και γρήγορα χρησιμοποιήθηκε το Quick Setup Mode μέσω των **Tools → Quick Setup Mode**. Στις Εικόνες 2-G3 έως 2-G8 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα βασικά ορίσματα μέσω του Quick Setup Mode. Αρχικά ορίζεται ο τύπος του προβλήματος (**Single Phase**), ανάλογα με τον αριθμό των ρευστών που εμφανίζονται στο πρόβλημα, το είδος του ρευστού που συμμετέχει στο πρόβλημα (**Air Ideal Gas**) και το αρχείο που βρίσκονται τα δεδομένα του πλέγματος (Εικόνα 2-G3). Στο επόμενο στάδιο του Quick Setup Mode ορίζεται ο τύπος της ανάλυσης που θα εφαρμοστεί (**Steady State**), η πίεση αναφοράς (**Reference Pressure= 0 Pa**), η χρήση ή μη της εξίσωσης ενέργειας (**Total Energy**) και το μοντέλο τύρβης (**Shear Stress Transport- SST**) που θα εφαρμοστεί στην επίλυση (Εικόνα 2-G4).



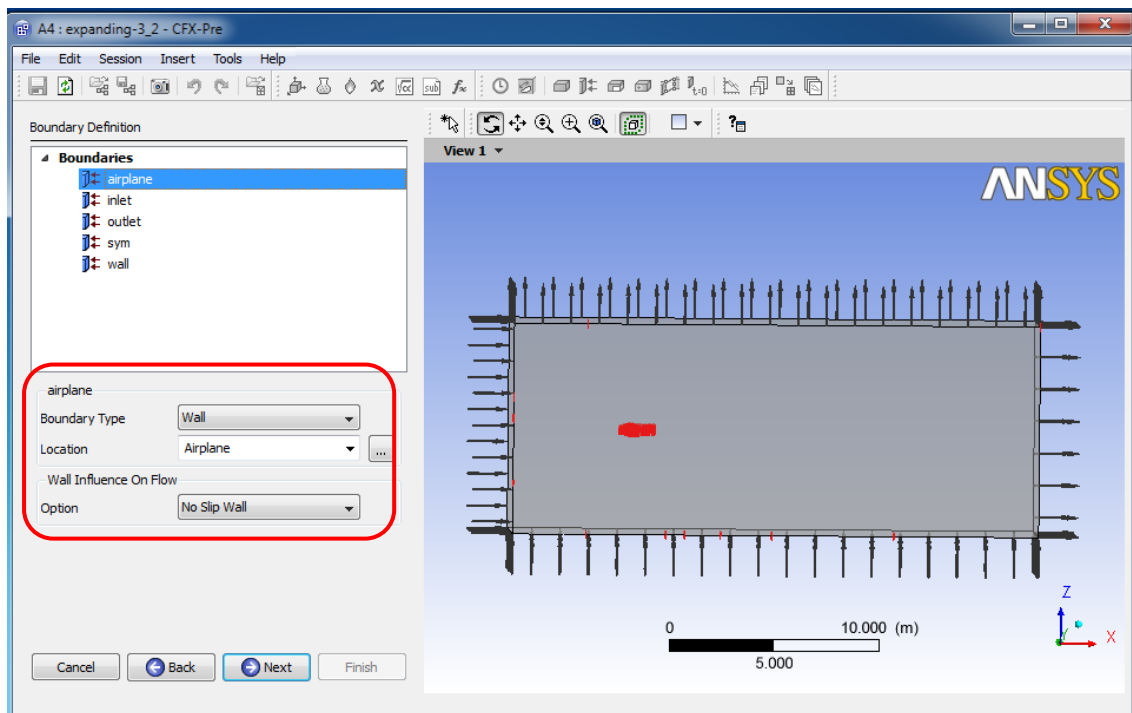
Εικόνα 2-G3: Simulation Definition in Quick Setup Mode



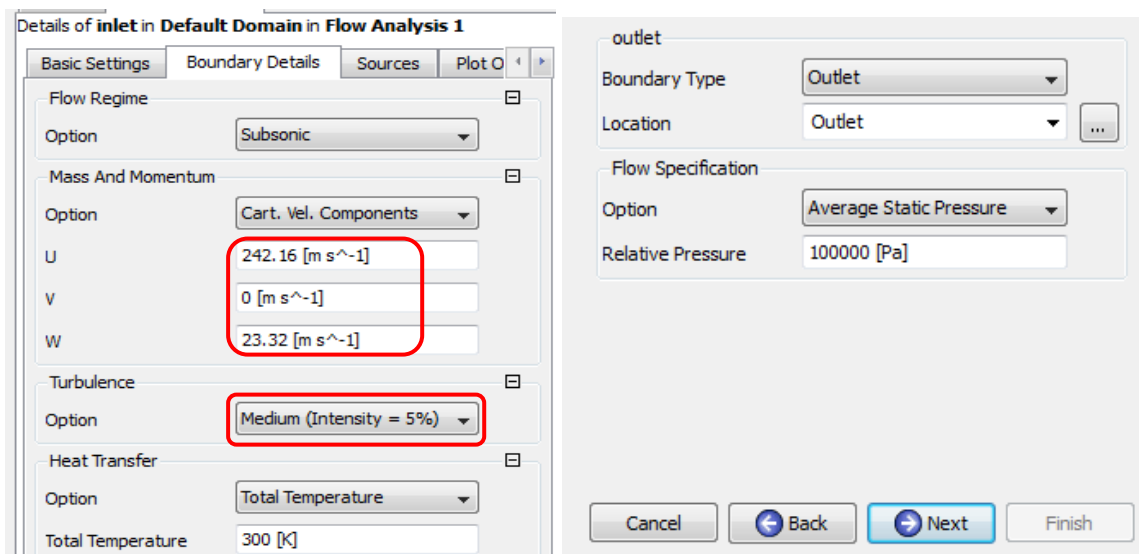
Εικόνα 2-G4: Physics Definition in Quick Setup Mode

Μέρος 2^ο: ANSYS

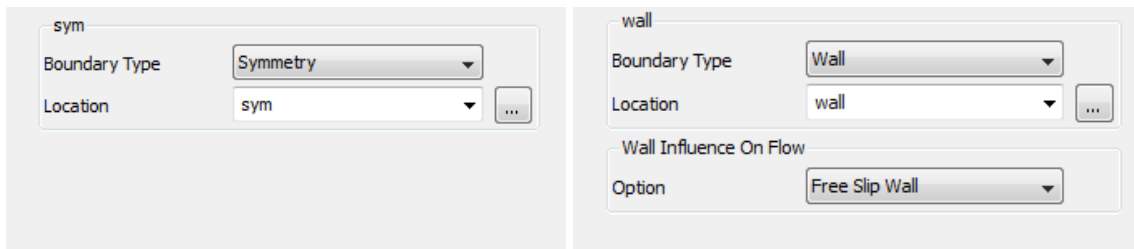
Συνεχίζοντας την διαδικασία ζητείται ο ορισμός των οριακών συνθηκών. Πατώντας **δεξί κλικ** πάνω στο **Boundaries** και έπειτα **Add Boundary**, εισήχθησαν ένα-ένα τα **Airplane**, **Inlet**, **Outlet**, **Sym** και **Wall Boundaries** με τις ρυθμίσεις και τα δεδομένα που παρουσιάζονται στις παρακάτω Εικόνες. Στην επιλογή **Location** επιλέγεται η αντίστοιχη **Named Selection** και τα διανυσματικά ορίσματα της ταχύτητας ροής στην εισαγωγή βρέθηκαν για δεδομένα $T=300\text{K}$, $M=0,7$ Mach, τον τύπο της ταχύτητας του ήχου $V_s = \sqrt{\gamma RT}$ και γωνία εισόδου $\alpha=5.5^\circ$.



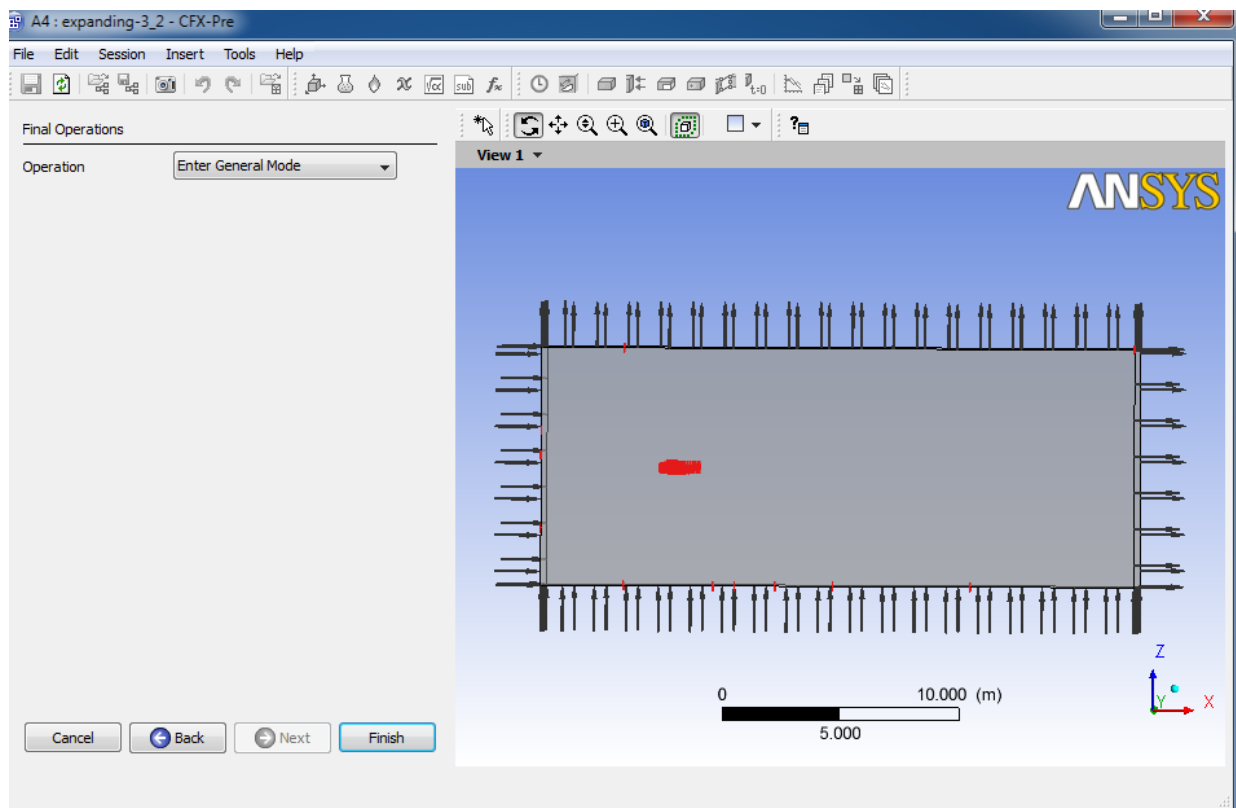
Εικόνα 2-G5: Boundary Definition in Quick Setup Mode (Airplane Boundary)



Εικόνα 2-G6: Inlet and Outlet Boundaries Definition

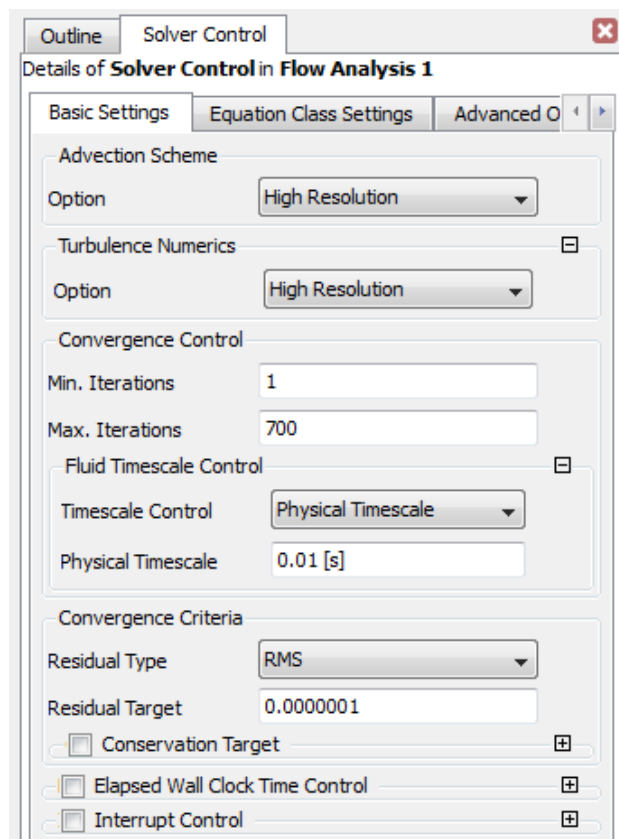


Εικόνα 2-G7: Sym and Wall Boundaries Definition

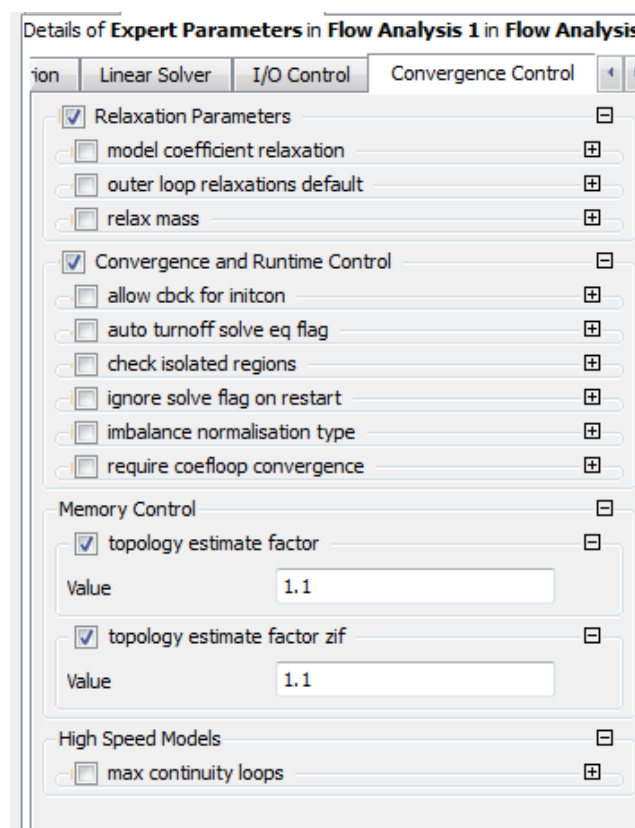


Εικόνα 2-G8: Final Operations in Quick Setup Mode

Ολοκληρώνοντας το Quick Setup έχουν οριστεί τα βασικά τμήματα του προβλήματος. Ωστόσο, απαιτείται εισαγωγή περαιτέρω ορισμάτων. Ανοίγοντας τα **Analysis Type**, **Default Domain** και τα **Boundaries** ξεχωριστά από το **Outline Tree** δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιβεβαιώσει, τροποποιήσει ή να προσθέσει επιπλέον ορίσματα συμπληρωματικά πάνω στα βασικά τμήματα που ορίστηκαν μέσω του Quick Setup. Στην παρούσα εργασία δεν απαιτείται κάτι αντίστοιχο αλλά επιβάλλεται να τροποποιηθούν κάποια ορίσματα που αφορούν τον Solver. Επιλέγοντας το **Solver Control** από το **Outline Tree** ανοίγει ένα παράθυρο όπου ορίζονται όλες οι λεπτομέρειες που αφορούν τον επιλύτη, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 2-G9. Τέλος, απαιτείται η εισαγωγή ειδικών παραμέτρων, η οποία επιτυγχάνεται πατώντας **δεξί κλικ** στο **Solver** από το **Outline Tree**, **Insert** → **Expert Parameters**. Στο παράθυρο που ανοίγει και στην καρτέλα **Convergence Control** επιλέγονται τα **topology estimate factor** και **topology estimate factor zif** από το **Memory Control** και μεταβάλλεται η τιμή τους σε **1.1** (Εικόνα 2-G10). Αποθηκεύοντας το αρχείο ολοκληρώνεται η διαδικασία ορισμού των παραμέτρων του προβλήματος CFD.



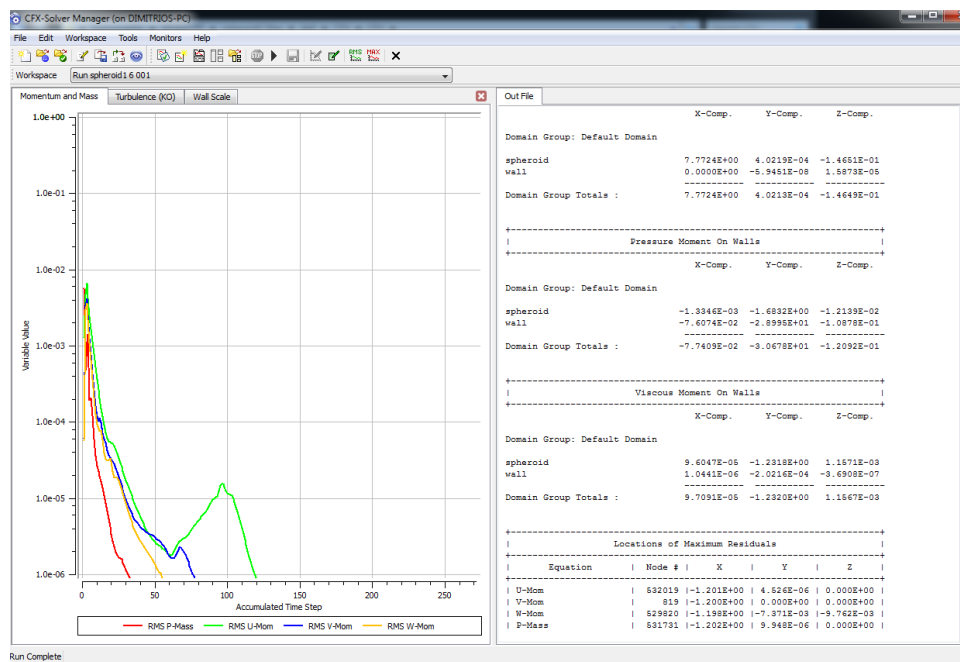
Εικόνα 2-G9: Λεπτομέρειες του Solver Control in Flow Analysis -Basic Settings



Εικόνα 2-G10: Λεπτομέρειες του Expert Parameters in Flow Analysis –Convergence Control

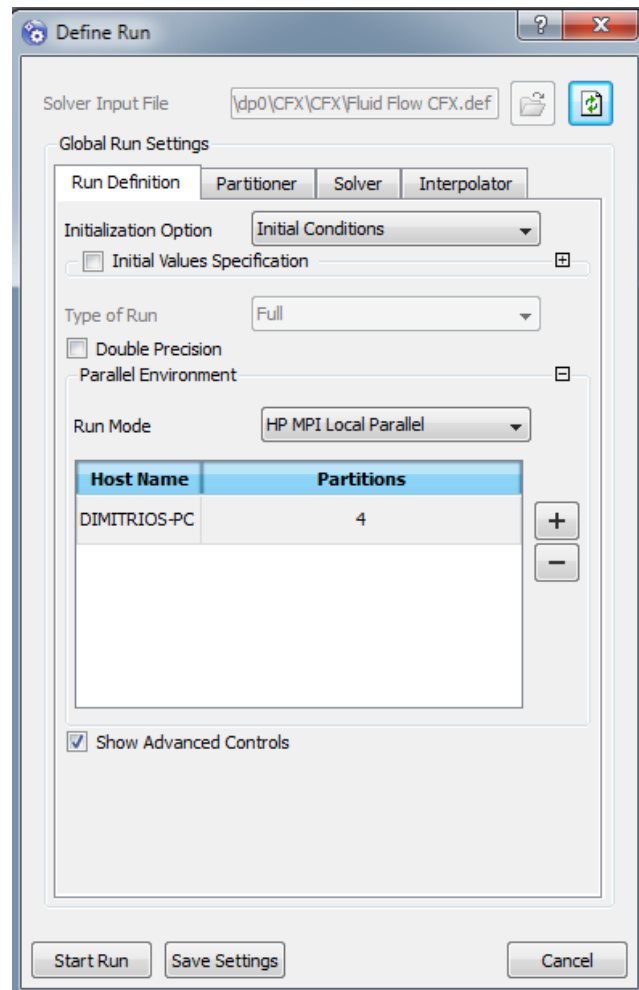
ANSYS CFX-Solver Manager

Το ANSYS CFX-Solver Manager είναι ένα λογισμικό που επιτρέπει στο χρήστη να ορίζει της ιδιότητες για τον υπολογισμό CFD, να ελέγχει τον CFD-Solver άμεσα και να προβάλει πληροφορίες για την τρέχουσα επίλυση. Το συγκεκριμένο λογισμικό προβάλλει ποικιλία αποτελεσμάτων και χρησιμοποιεί γραφήματα δεδομένων κατά την διάρκεια επίλυσης του προβλήματος. Συνήθως αριστερά βρίσκεται το διάγραμμα εξέλιξης της σύγκλισης και δεξιά το κείμενο αποτελεσμάτων που εξάγει το λογισμικό (ANSYS, CFX-Solver Manager User's Guide, 2009).



Εικόνα 2-S1: CFX-Solver Manager Interface

Ανοίγοντας το ANSYS CFX-Solver Manager, μέσω του κελιού **Solution** από το Project Schematic του Workbench, εμφανίζεται ένα αρχικό παράθυρο διαλόγου (Εικόνα 2-S2). Μέσω αυτού του παραθύρου μπορούν να ρυθμιστούν οι γενικές ιδιότητες για το συγκεκριμένο τρέξιμο του κώδικα επίλυσης, όπως για παράδειγμα αν είναι επιθυμητή η συνέχιση της λύσης από όπου και εφόσον είχε διακοπεί, ο αριθμός των τμημάτων που θα τρέχουν παράλληλα εάν είναι εφικτή αυτή η δυνατότητα, οι ιδιότητες του κώδικα διαχωρισμού σε τμήματα κ.α. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και σε πιο πυκνά πλέγματα εφαρμόστηκε παράλληλο τρέξιμο σε τέσσερις πυρήνες του επεξεργαστή. Επιλέγοντας το Start Run ξεκινάει να τρέχει ο κώδικας επίλυσης του προβλήματος βάσει όλων των δεδομένων που ορίστηκαν στα προηγούμενα στάδια. Μετά την ολοκλήρωση του τρεξίματος είτε λόγω σύγκλισης των εξισώσεων είτε λόγω πέρατος των προκαθορισμένων επαναλήψεων δίνεται η δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων και η ανάλυση αυτών, όπως περιγράφεται στο επόμενο στάδιο της εργασίας.



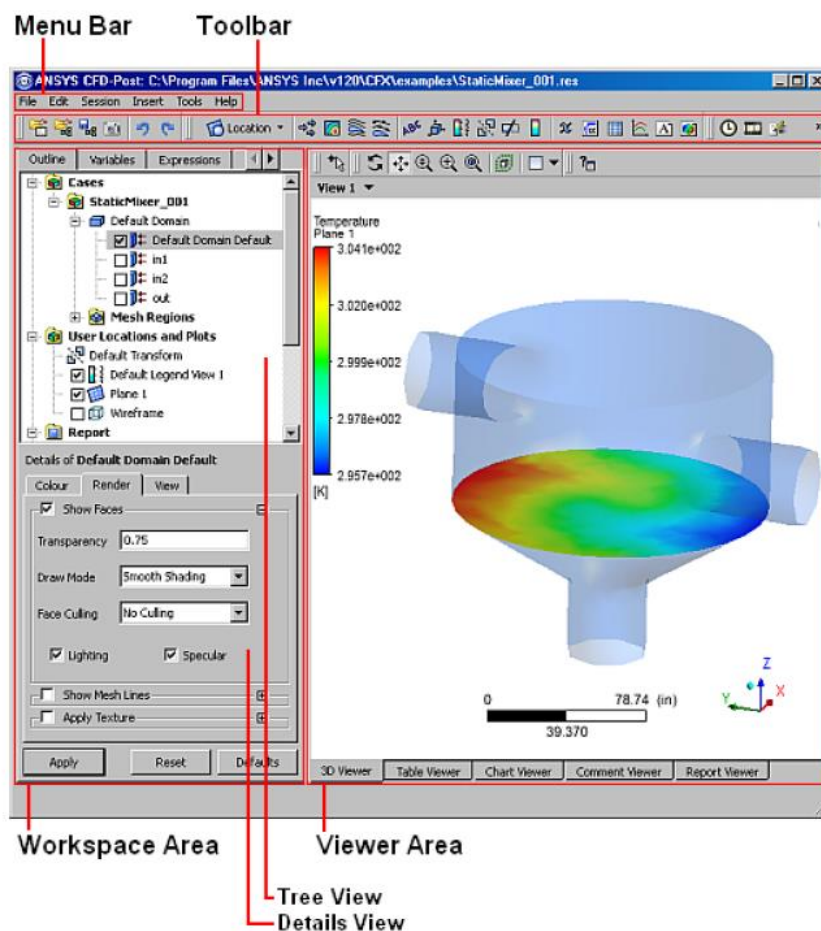
Εικόνα 2-S2: Αρχικό παράθυρο διαλόγου "Define Run"

ANSYS CFD-Post

Το ANSYS CFD-Post είναι ένας ευέλικτος και πολύ καλά ανεπτυγμένος μετά-επεξεργαστής αποτελεσμάτων. Το λογισμικό αυτό είναι σχεδιασμένο για να διευκολύνει την οπτικοποίηση και να παρέχει ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων από την CFD προσομοίωση. Κάποιες από τις δυνατότητές του αναφέρονται παρακάτω (ANSYS, ANSYS CFD-Post User's Guide, 2013).

- Γραφική αλληλεπίδραση με τον χρήστη, μέσω ενός παραθύρου προβολής, στο οποίο όλα τα γραφικά δεδομένα που εξάγονται είναι σχεδιασμένα από το CFD-Post.
- Υποστηρίζει ποικιλία από γραφικά και γεωμετρικά δεδομένα, από τα οποία συνήθως κατά την μετά-επεξεργασία σχεδιάζονται γραφήματα, οπτικοποιούνται πλέγματα και ορίζονται τοποθεσίες για ακριβείς ποσοτικοί υπολογισμοί.
- Δυνατότητα χρήσης κλίμακας και διανυσμάτων σε μεταβλητές που ορίζει ο χρήστης.
- Μεταβαλλόμενο πάγωμα/σταθεροποίηση των δεδομένων σε περίπτωση συγκρίσεων με άλλα αρχεία.
- Δυνατότητα μετά-επεξεργασίας σε εφαρμογή με στροβιλομηχανές ή συμπιεστές.
- Έλεγχος και επεξεργασία της προβολής κάθε αντικειμένου με πολλαπλές οπτικές καθώς και δυνατότητα αποθήκευσης εικόνων.
- Δημιουργία λεπτομερών αναφορών δεδομένων και γραφημάτων (XY, time plots).
- Δυνατότητα ανάγνωσης μεγάλης ποικιλίας διαφορετικών τύπων αρχείου.
- Υποστηρίζει μεταβαλλόμενα δεδομένα, συμπεριλαμβανομένου και κινούμενου πλέγματος.
- Εισάγει και εξάγει δεδομένα ANSYS, γενικά δεδομένα και γεωμετρίες.
- Υποστηρίζει μακροεντολές.
- Εξάγει πολλών διαφορετικών τύπων αρχεία, όπως και animation.

Ανοίγοντας το ANSYS CFX-Post μέσω του κελίου **Result** από το Project Schematic του Workbench εμφανίζεται η βασική επιφάνεια αλληλεπίδρασης με τον χρήστη, η οποία είναι της μορφής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-P1 και βασίζεται στην ίδια σχεδιαστική λογική με τα λογισμικά που περιεγράφηκαν στα προηγούμενα στάδια.

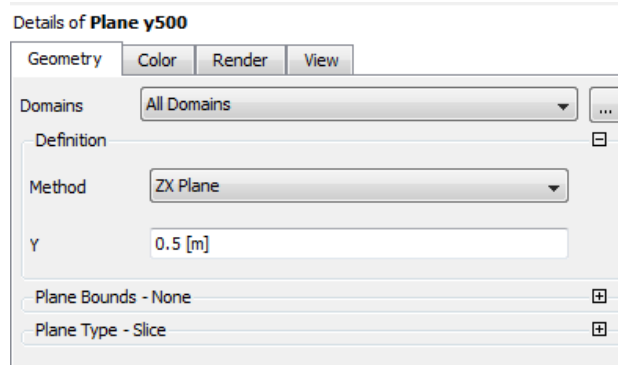


Εικόνα 2-P1: Παράδειγμα του CFD-Post Interface (ANSYS, ANSYS CFD-Post User's Guide, 2013)

Το CFD-Post χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τα τρεξίματα όλων των πλεγμάτων των γεωμετριών με τον επιλύτη CFX. Πιο συγκεκριμένα, μέσω του λογισμικού αυτού δημιουργήθηκαν γραφήματα διανυσμάτων και ισογραμμών για ποικιλία μεταβλητών (πίεση, ταχύτητα, Αριθμός Mach, θερμοκρασία, Cr) καθώς και γραφήματα Cr-x κατά μήκος της επιφάνειας, προβλήθηκε η ροή και απεικονίστηκαν οι στροβιλισμοί με την χρήση διανυσμάτων και γραμμών ροής και τέλος δημιουργήθηκε animation με την κίνηση σωματιδίων γύρω από την γεωμετρία του μοντέλου. Λόγω κοινής σχεδιαστικής λογικής με τα προηγούμενα λογισμικά στο συγκεκριμένο στάδιο της εργασίας θα αναλυθεί εκτενώς μόνο ο τρόπος εισαγωγής των εξισώσεων και των μεταβλητών ως μια πιο εξειδικευμένη χρήση της παραπάνω εφαρμογής. Τα επεξεργασμένα αποτελέσματα και τα γραφήματα που δημιουργήθηκαν από το CFD-Post παρουσιάζονται σε επόμενο στάδιο της εργασίας.

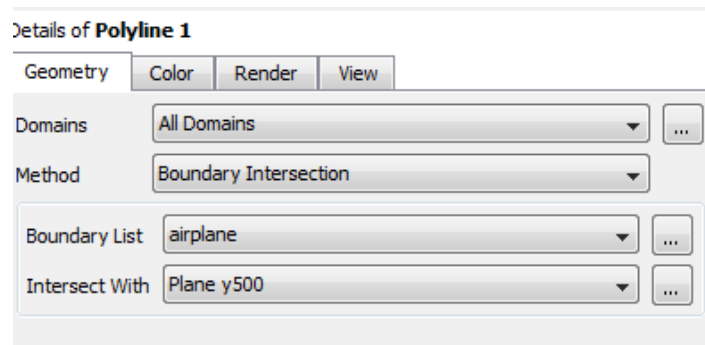
Ο σκοπός της εισαγωγής εξισώσεων και μεταβλητών στο CFD-Post είναι η δυνατότητα εξαγωγής του γραφήματος Cr-x για συγκεκριμένες τομές της επιφάνειας του μοντέλου απευθείας μέσω αυτού. Η περιγραφή βήμα – βήμα που ακολουθεί εστιάζει στην εξαγωγή γραφήματος Cr-x για $y=500\text{ mm}$ πάνω στην επιφάνεια της Πτέρυγας.

- Δημιουργήθηκε ένα **XZ Plane για $y=500\text{mm}$** που τέμνει την Πτέρυγα στο επιθυμητό σημείο.



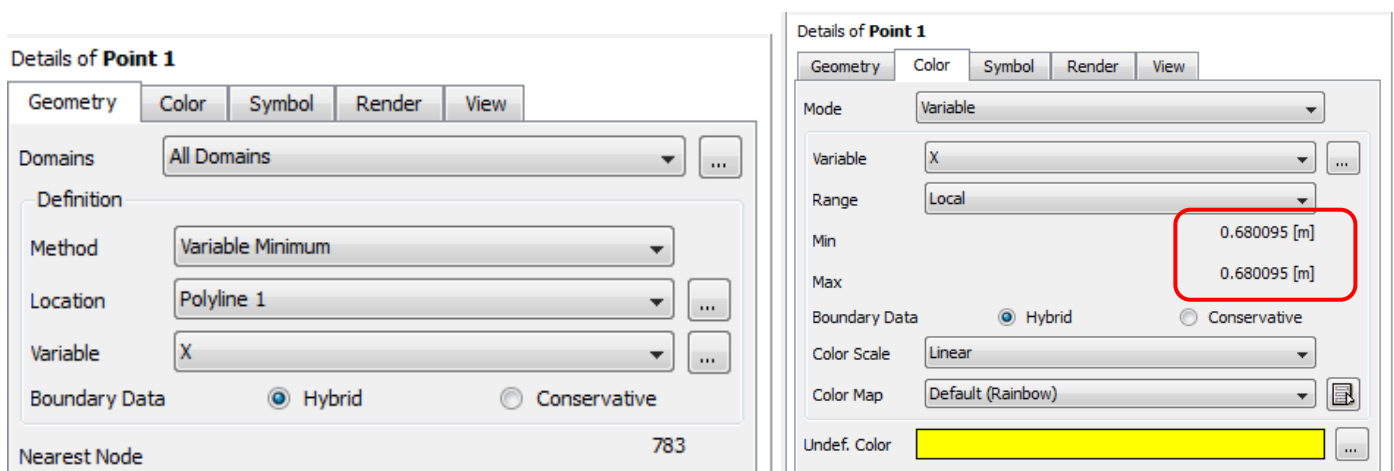
Εικόνα 2-P2: Details of Plane y500

- Δημιουργήθηκε **Polyline** στο σημείο τομής των **Airplane** και **Plane y500**

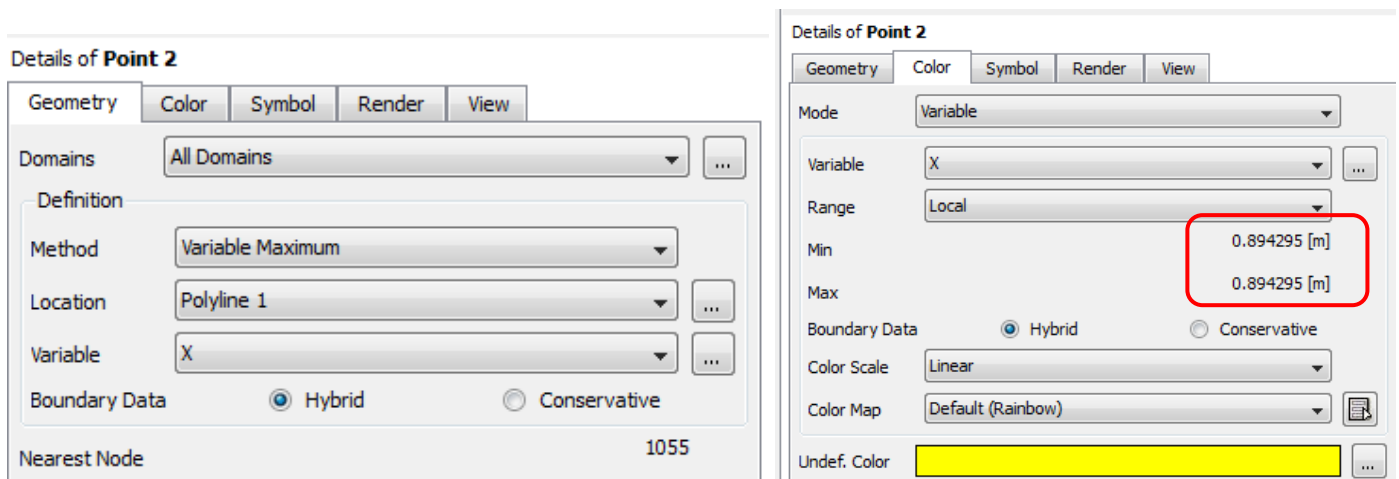


Εικόνα 2-P3: Details of Polyline 1

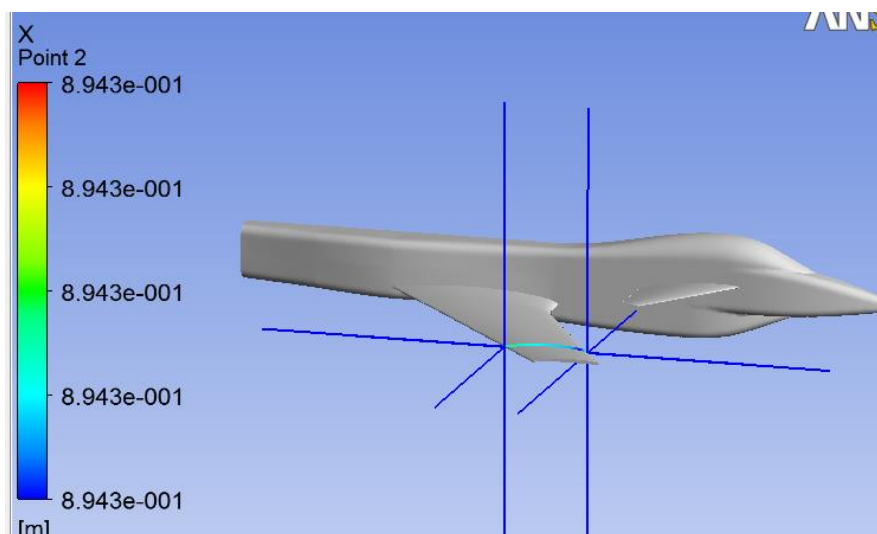
- Βρέθηκαν τα σημεία (Point) για ελάχιστο και μέγιστο X.



Εικόνα 2-P4: Details of Point 1 (Minimum x)

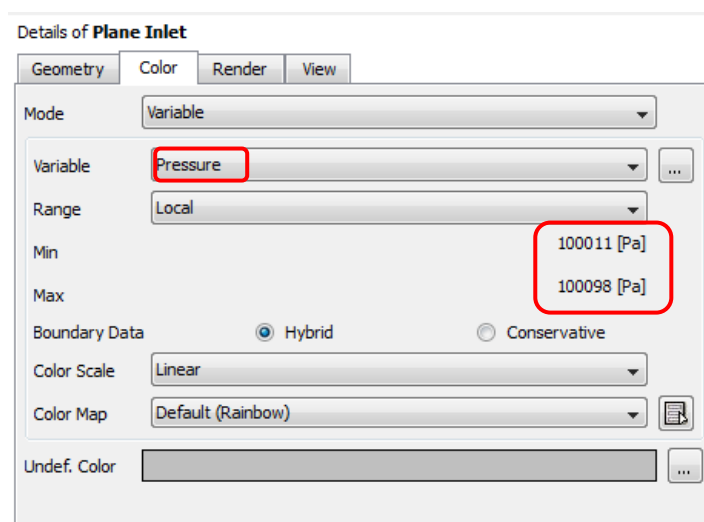


Εικόνα 2-P5: Details of Point 2 (Maximum x)

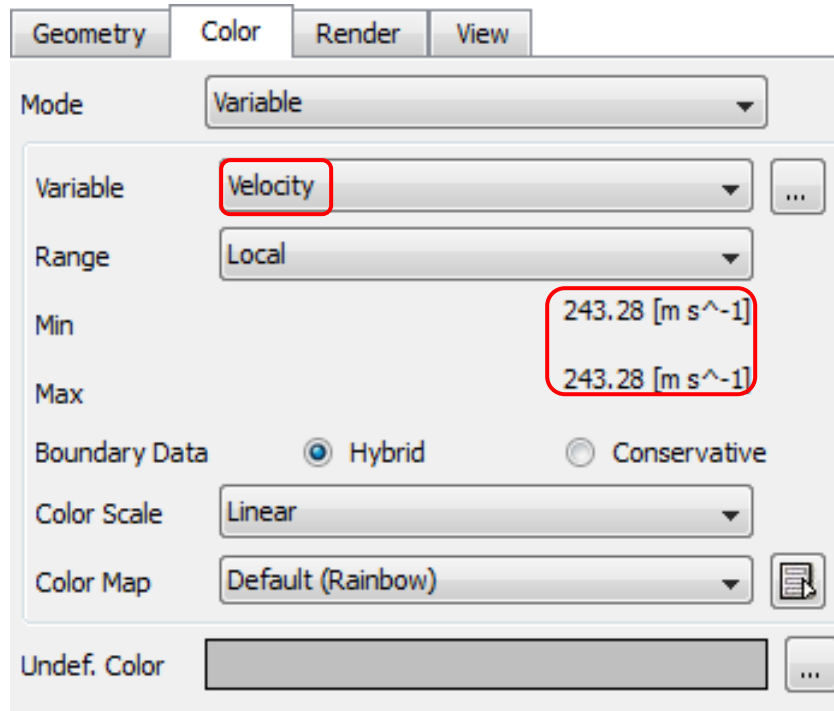


Εικόνα 2-P6: Σημεία Point 1 (x_{min}), Point 2 (x_{max}) και Polyline 1

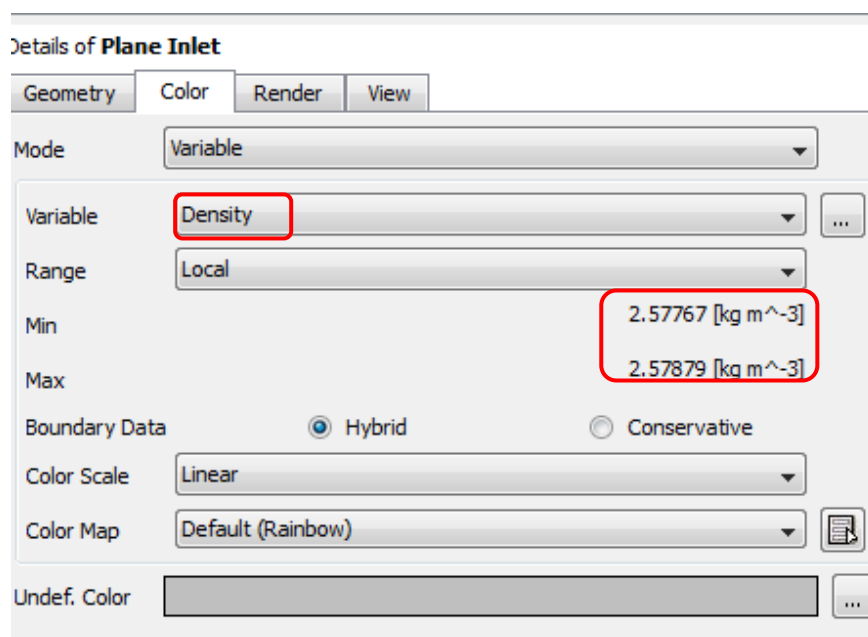
- Δημιουργήθηκε ένα **YZ Plane** για $x=-5m$ και βρέθηκε η τοπική πίεση(P_0), ταχύτητα (U_0) και πυκνότητα (d_0).



Εικόνα 2-P7: Details of Plane Inlet (P_0)



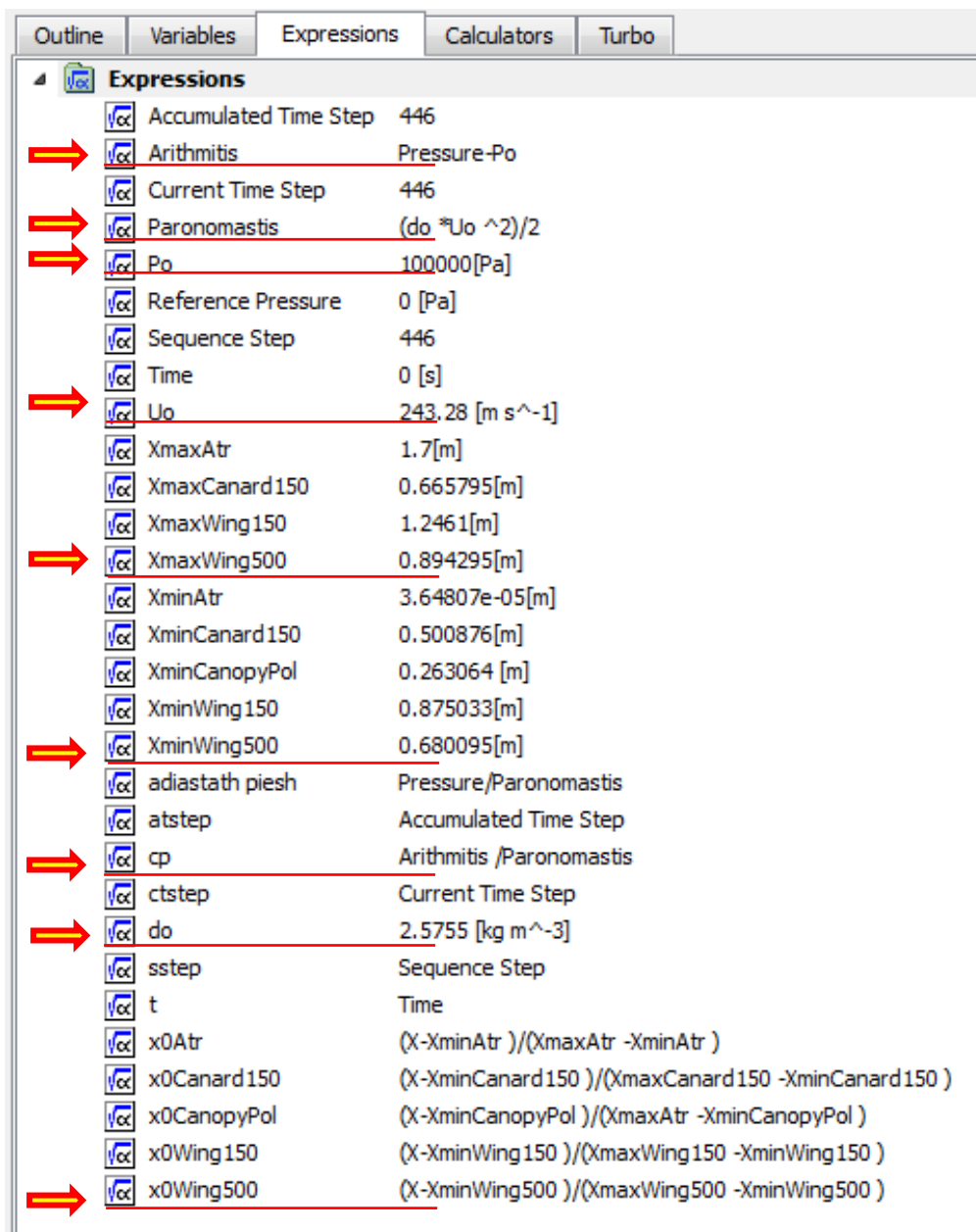
Εικόνα 2-P8: Details of Plane Inlet (U0)



Εικόνα 2-P9: Details of Plane Inlet (d0)

- Ο τύπος του συντελεστή πίεσης C_p είναι: $C_p = \frac{P - P_0}{0.5 \cdot d_0 \cdot U_0^2}$
- Ο τύπος για x είναι: $x_0 = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$

- Στην καρτέλα **Expressions** στο **Workspace Area** εισάγονται οι παρακάτω τύποι.



Εικόνα 2-P10: Τύποι που εισήχθησαν στην καρτέλα Expressions

- Στην καρτέλα **Variables** στο **Workspace Area** εισάγονται οι μεταβλητές **Cp** και **X0Wing500**.
- Για την δημιουργία του γραφήματος **Cp-x για y=500mm** χρησιμοποιούμε ως ορίσματα τα ακόλουθα:

Location: Polyline 1

X Axis Variable: X0Wing500

Y Axis Variable: Cp

GALATEA

Δεδομένα οριακών συνθηκών Galatea

Κατά των ορισμό των οριακών συνθηκών στο κώδικα Galatea χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δεδομένα με αυτά του ANSYS και πιο συγκεκριμένα ορίστηκαν οι ίδιες επιφάνειες ως Inlet, Outlet, Airplane, Wall και Symmetry. Τέλος, ορίστηκαν τα αδιάστατα μεγέθη του αριθμού Mach ($M=0.7$), του αριθμού Reynolds που υπολογίστηκε ($Re=4689152.24$) και η γωνία εισόδου ($\alpha=5,5^\circ$).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δημιουργήθηκαν συνολικά δέκα διαφορετικά πλέγματα όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1. Ωστόσο, εισήχθησαν οι ίδιες παράμετροι ροής στο κάθε πρόβλημα. Στη συνέχεια κάθε πρόβλημα επιλύθηκε μέσω του ANSYS CFX και του Galatea. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και η επεξεργασία αυτών πραγματοποιήθηκε μέσω του CFD-Post για τα αποτελέσματα του ANSYS CFX και μέσω του λογισμικού Tecplot για τα αποτελέσματα του Galatea. Όσον αφορά στα δεδομένα των γραφημάτων C_p -X και τα C_L , C_D από το Galatea που παρουσιάζονται στην συνέχεια, εξήχθησαν με τη βοήθεια ενός κώδικα που δημιούργησε και προσαρμοσε στις αντίστοιχες ανάγκες ο Δρ. Γεώργιος Λυγιδάκης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της υπόψη εργασίας ζητήθηκε η αποδέσμευση των πειραματικών δεδομένων-αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης πειραματικής δοκιμής από την ARA (Aircraft Research Association) και πιο συγκεκριμένα από τον κ. Nigel Corby (Business Development Executive). Το αποτέλεσμα στο αίτημα αποδέσμευσης των συγκεκριμένων πειραματικών δεδομένων ήταν ωστόσο αρνητικό, καθώς δεν υπήρξε ανταπόκριση από το Υπουργείο Άμυνας του Ηνωμένου Βασιλείου (the original customer) προς τον ARA.

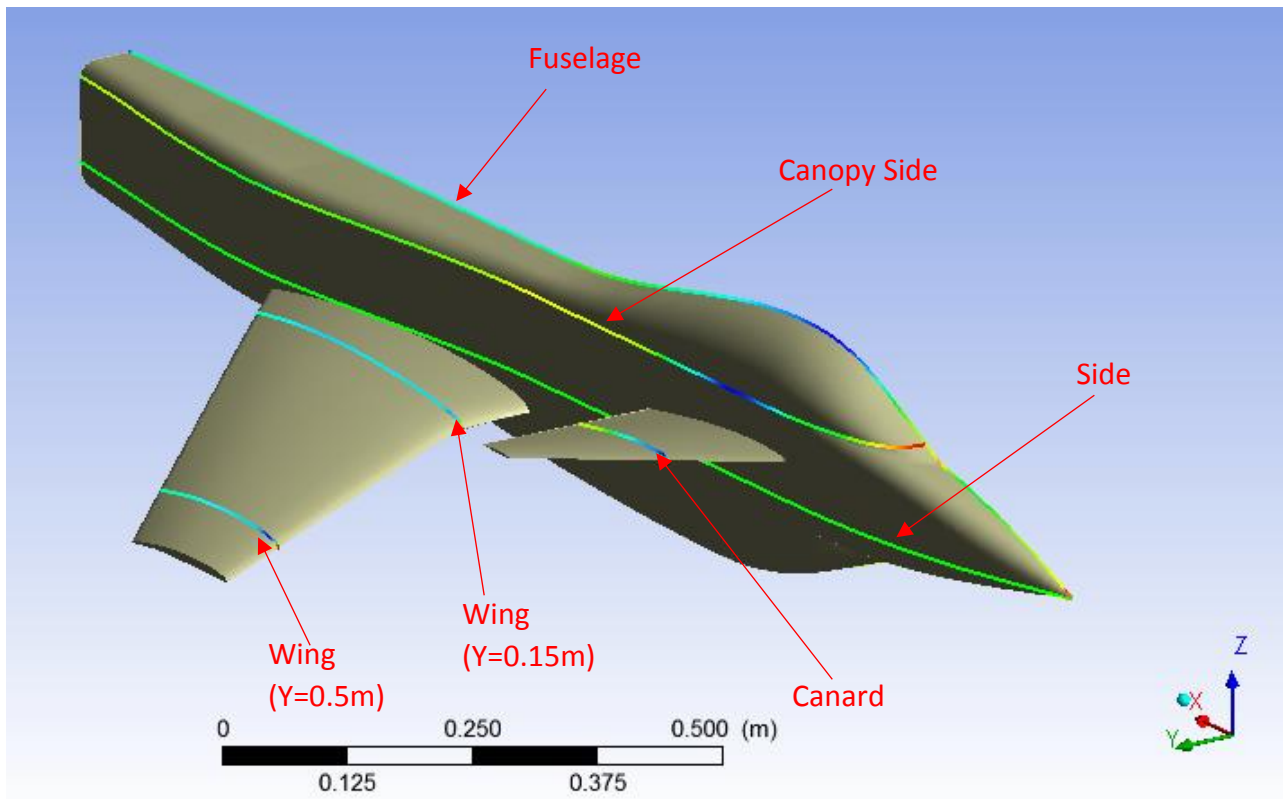
Σε αυτό το στάδιο της εργασίας επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα που εξήχθησαν έπειτα από επεξεργασία του συνόλου των αποτελεσμάτων. Στο Παράρτημα Γ εμπεριέχεται ένα μεγάλο τμήμα του συνόλου των επεξεργασμένων αποτελεσμάτων.

Η αξιολόγηση και η σύγκριση των δυο κώδικων CFD βασίστηκε κατά κύριο λόγο στην σύγκριση γραφημάτων C_p -X πάνω σε έξι συνολικά τομές του μοντέλου M151 (Εικόνα 3-1). Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκαν συγκριτικοί πίνακες του Συντελεστή Άνωσης C_L (Πίνακας 3-1) και του Συντελεστή Οπισθέλκουσας C_D (Πίνακας 3-2), ενώ τέλος εξήχθησαν πλήθος γραφημάτων με ισογραμμές (Contours) Πίεσης, Ταχύτητας και αριθμού Mach, που συνέβαλαν στην οπτικοποίηση καθώς επίσης και στην ποιοτική αλλά και ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ C_p -X

Στα πλαίσια της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν γραφήματα C_p -X για τις παρακάτω τομές του μοντέλου (Εικόνα 3-1):

- **Fuselage:** Τομή πάνω στο επίπεδο συμμετρίας του μοντέλου.
- **Fuselage Side:** Τομή στο επίπεδο $Z=-0,04$ m που τέμνει το μοντέλο από το ρύγχος της άτρακτου έως την ουρά.
- **Canopy Side:** Τομή στο επίπεδο $Z=0,05$ m που τέμνει την άτρακτο του μοντέλου στο ύψος της καλύπτρας.
- **Wing ($Y=0.15$ m):** Αεροτομή της πτέρυγας στο επίπεδο $Y=0,15$ m.
- **Wing ($Y=0.5$ m):** Αεροτομή της πτέρυγας στο επίπεδο $Y=0,5$ m.
- **Canard:** Αεροτομή του πτερυγίου Canard στο επίπεδο $Y=0,15$ m.

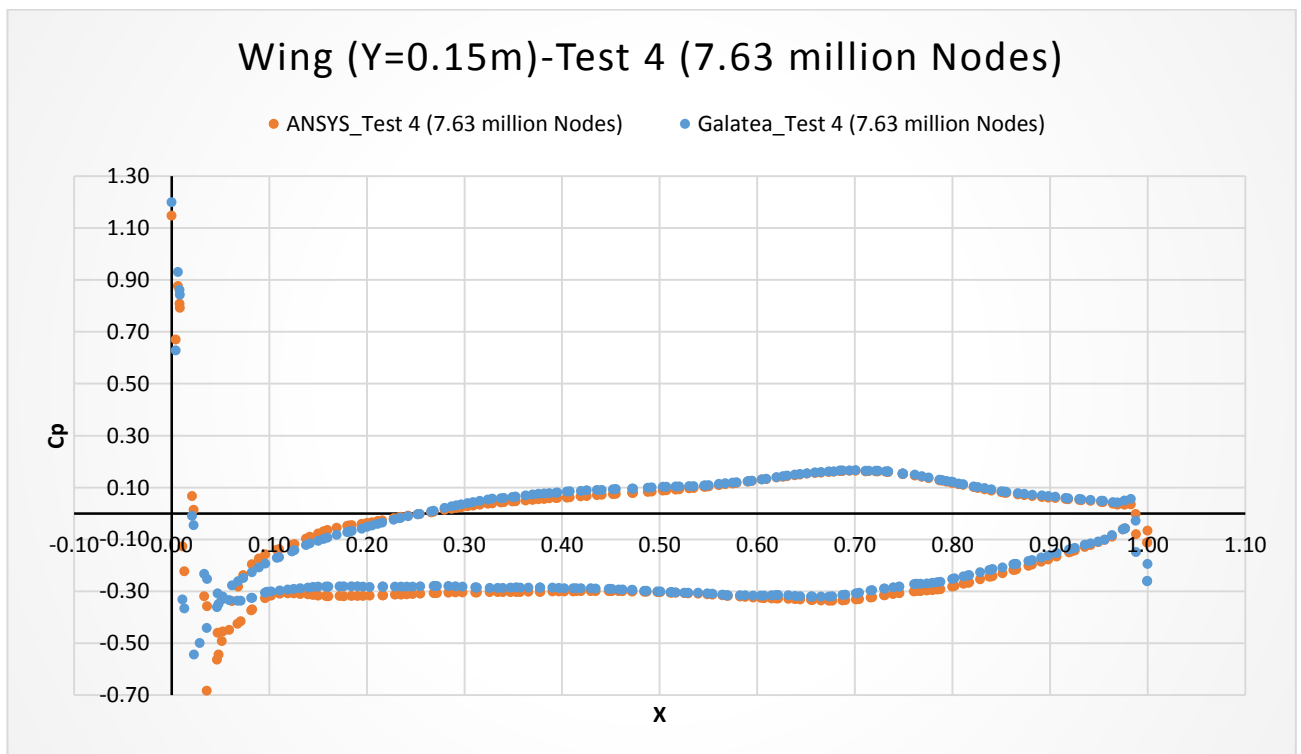
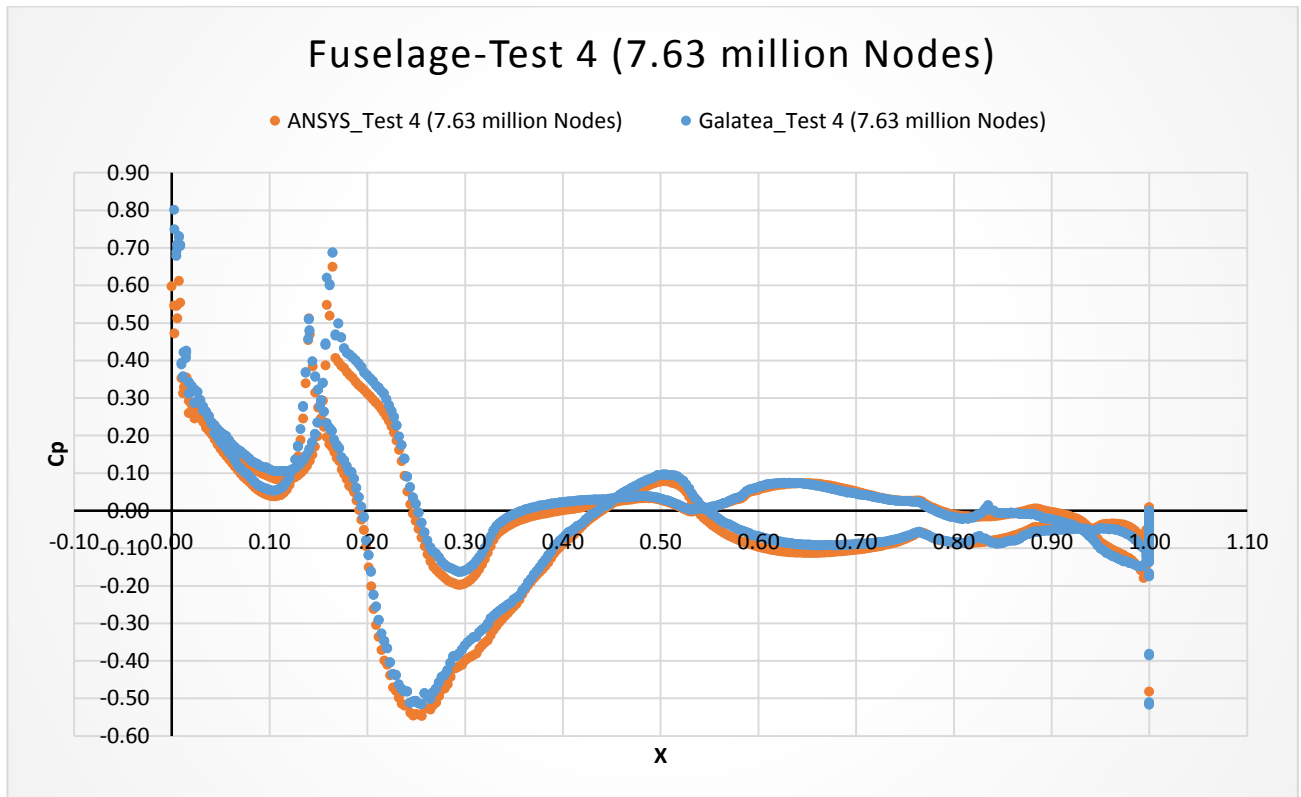


Εικόνα 3-1: Τομές στο μοντέλο όπου υπολογίστηκε ο Συντελεστής Πίεσης C_p

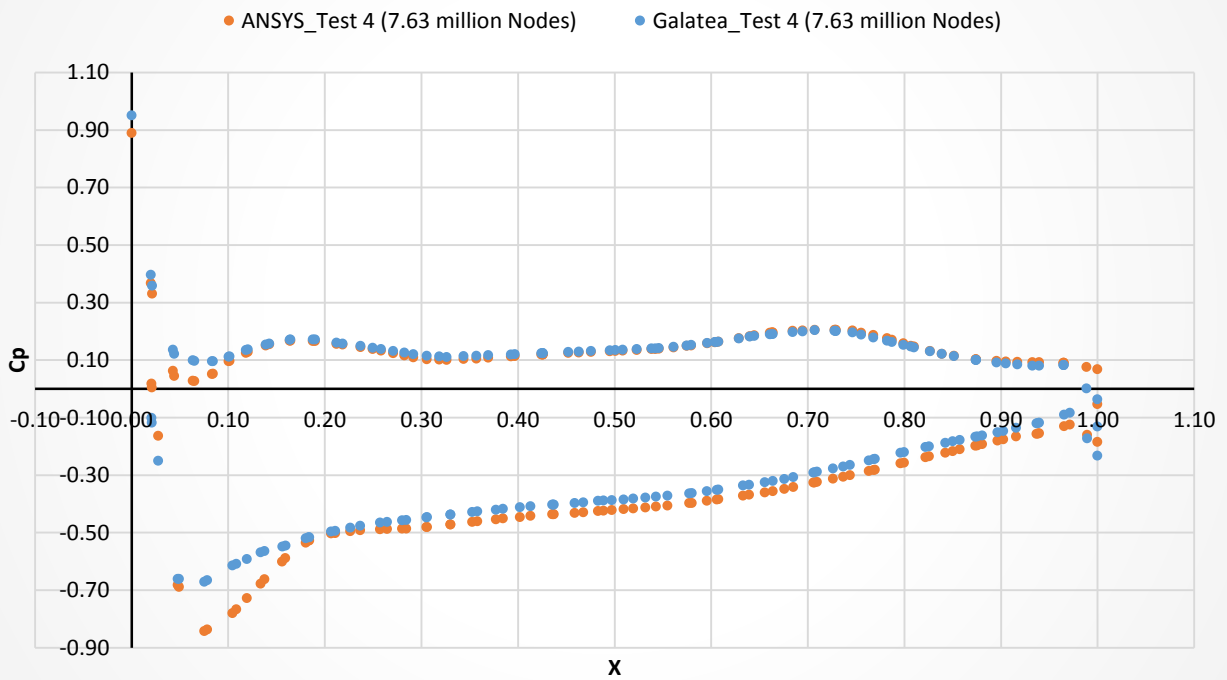
Έχοντας δημιουργήσει το σύνολο των γραφημάτων C_p -X (με το X να έχει αδιαστατοποιηθεί) πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο κωδίκων CFD στα αντίστοιχα πλέγματα. Μεγαλύτερη ομοιότητα διαπιστώθηκε στα αποτελέσματα των πυκνότερων πλεγμάτων κάθε γεωμετρίας, τα οποία και παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Αποτελέσματα

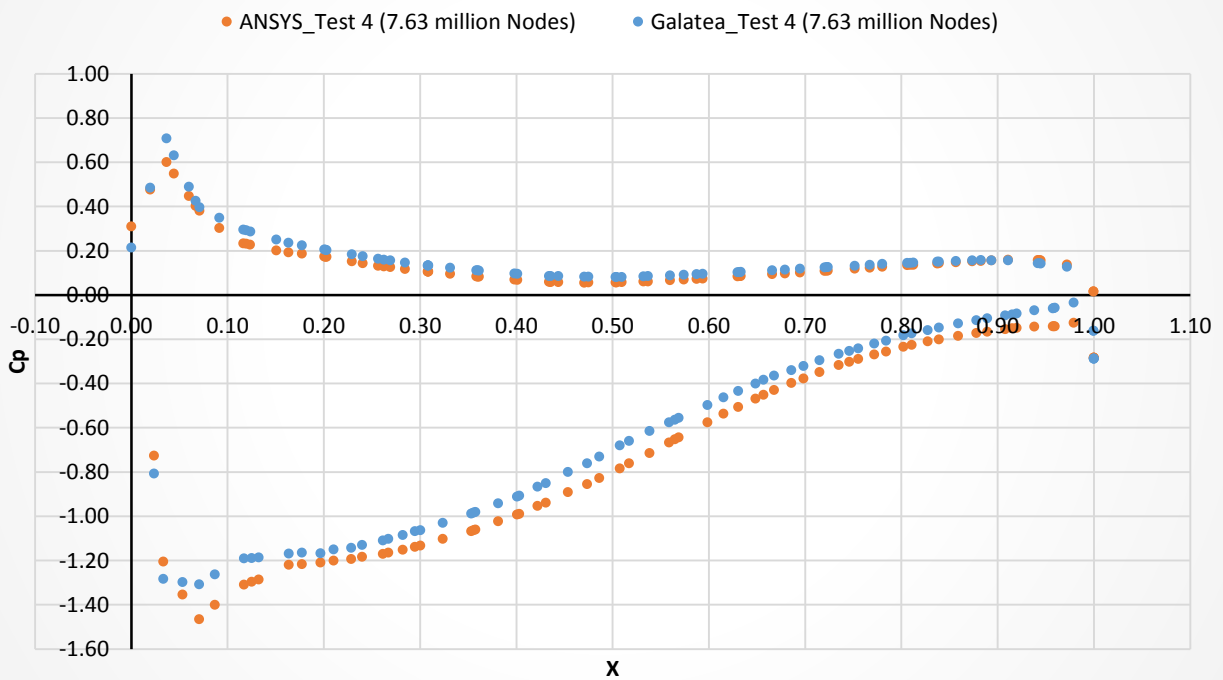
Συγκριτικά γραφήματα ANSYS-Galatea για τη γεωμετρία Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία -3° και πλέγμα Test 4



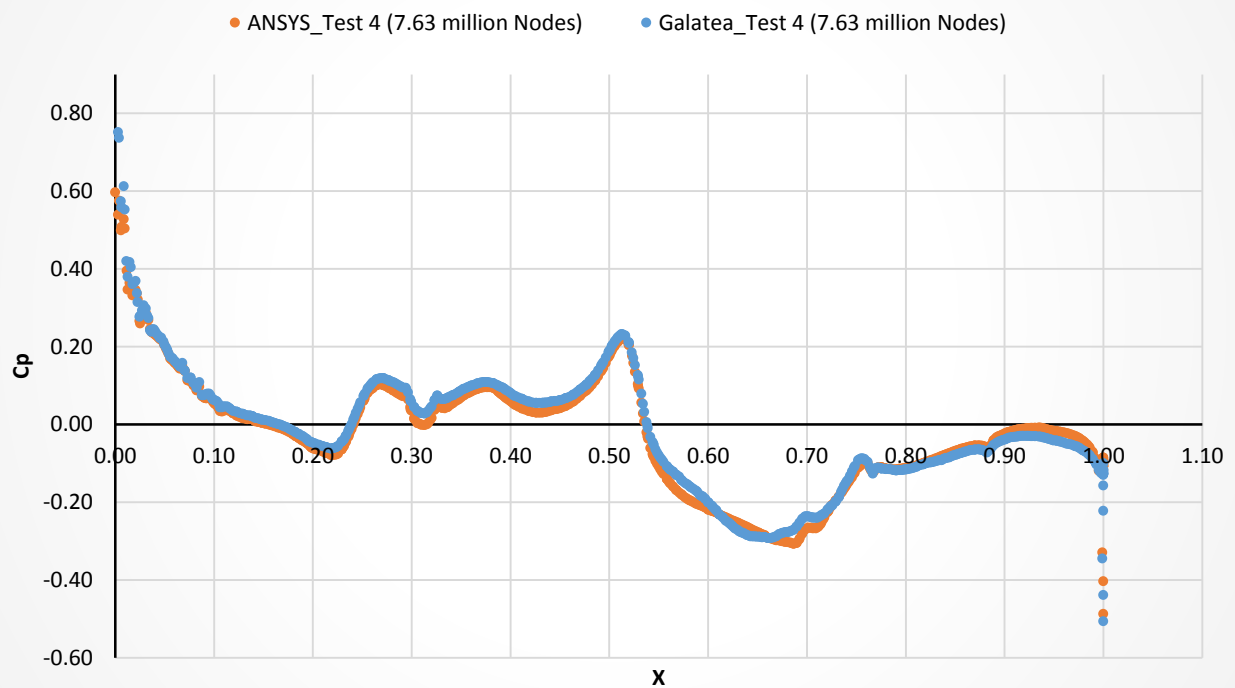
Wing (Y=0.5m)-Test 4 (7.63 million Nodes)



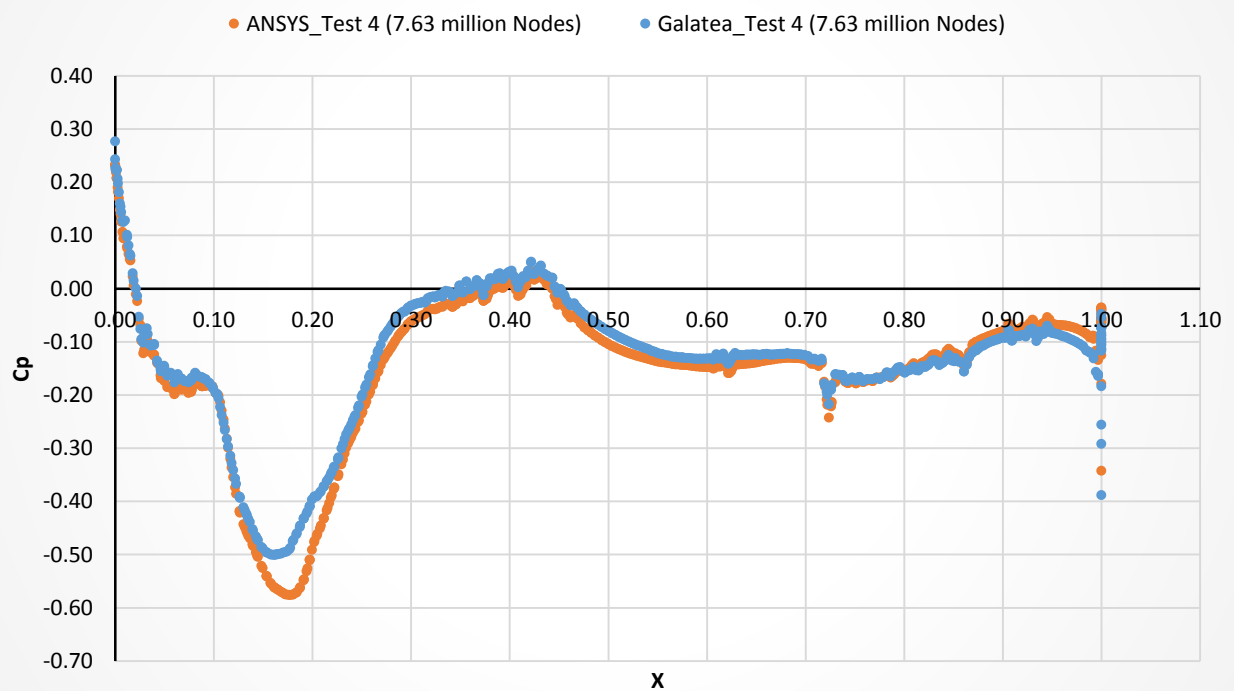
Canard-Test 4 (7.63 million Nodes)



Fuselage Side-Test 4 (7.63 million Nodes)



Canopy Side-Test 4 (7.63 million Nodes)



Στο γράφημα που αφορά στο **Fuselage** επιτυγχάνεται γενικά καλή σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στο διάστημα $X=0,15$ έως το $X=0,35$ (το τμήμα από την αρχή της καλύπτρας έως και το σημείο μέγιστης καμπυλότητας του Intake, περίπου στην μέση του ριζοπτέρυγος του Canard) παρατηρείται μία σχετικά μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων της τάξεως του 0,01, αλλά με την ίδια τροχιά καμπύλης.

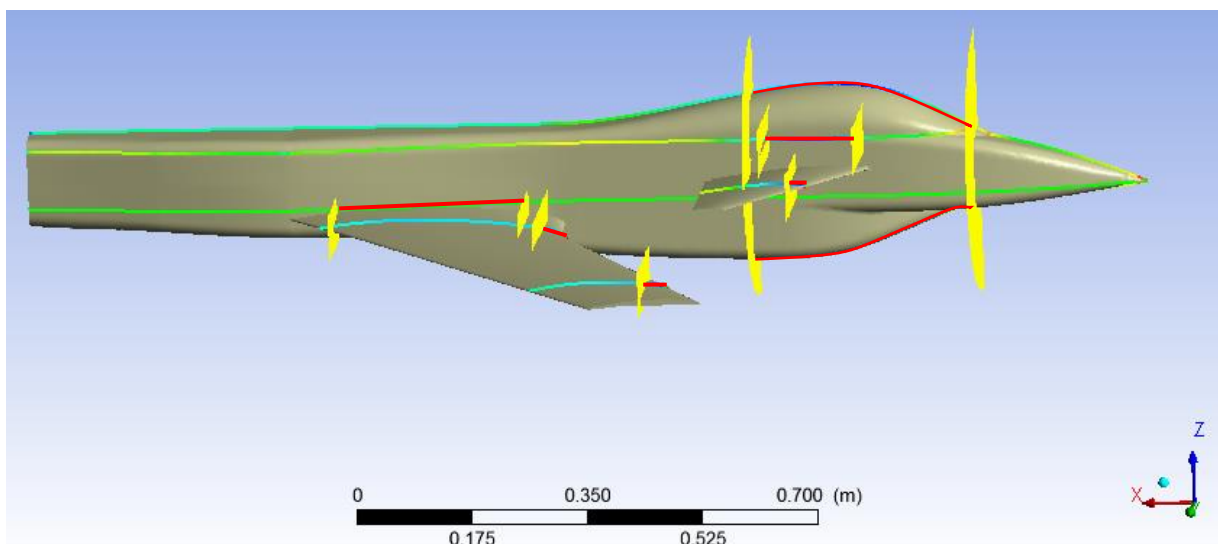
Στο γράφημα **Fuselage Side** επιτυγχάνεται και πάλι μία πολύ καλή σύγκριση αν και υφίσταται μια μικρή απόκλιση στο τμήμα $X=0,55$ έως $X=0,72$ της τάξεως του 0,02 και με ελαφρώς διαφοροποιημένη τροχιά καμπύλης. Το τμήμα αυτό της τομής βρίσκεται πάνω από την πτέρυγα στο κοντινότερο σημείο με το ριζοπτέρυγο.

Στο γράφημα **Canopy Side** υπάρχει μια πιο αισθητή απόκλιση των αποτελεσμάτων για $X=0,11$ έως $X=0,21$, με μέγιστη τιμή απόκλισης 0,05 στην κλίμακα του C_p . Το τμήμα της τομής αυτής είναι πάνω από το Canard.

Όσον αφορά στις αεροτομές της πτέρυγας και του Canard παρατηρείται ταύτιση της τιμής του C_p για το πάνω τμήμα των γραφημάτων (κάτω τμήμα αεροτομής). Πιο συγκεκριμένα στην αεροτομή **Wing ($Y=0.15m$)** υπάρχει απόκλιση της τάξεως του 0,01 στην κλίμακα του C_p με την ίδια ωστόσο τροχιά καμπύλης στο μεγαλύτερο τμήμα της κάτω καμπύλης του γραφήματος. Έντονη απόκλιση παρατηρείται στο τμήμα $X=0$ έως $X=0.08$ με μέγιστη απόκλιση ίση με 0,12 στην κλίμακα του C_p . Αντίστοιχο φαινόμενο εμφανίζεται και στο γράφημα **Wing ($Y=0.5m$)** μεταξύ των $X=0$ και $X=0,15$.

Στο γράφημα **Canard**, πέρα από την ταύτιση της τιμής του C_p για το πάνω τμήμα του γραφήματος, παρατηρείται μια απόκλιση της τάξεως του 0,05 στην κλίμακα του C_p με την ίδια όμως καμπυλότητα σε όλο το μήκος της κάτω καμπύλης του γραφήματος.

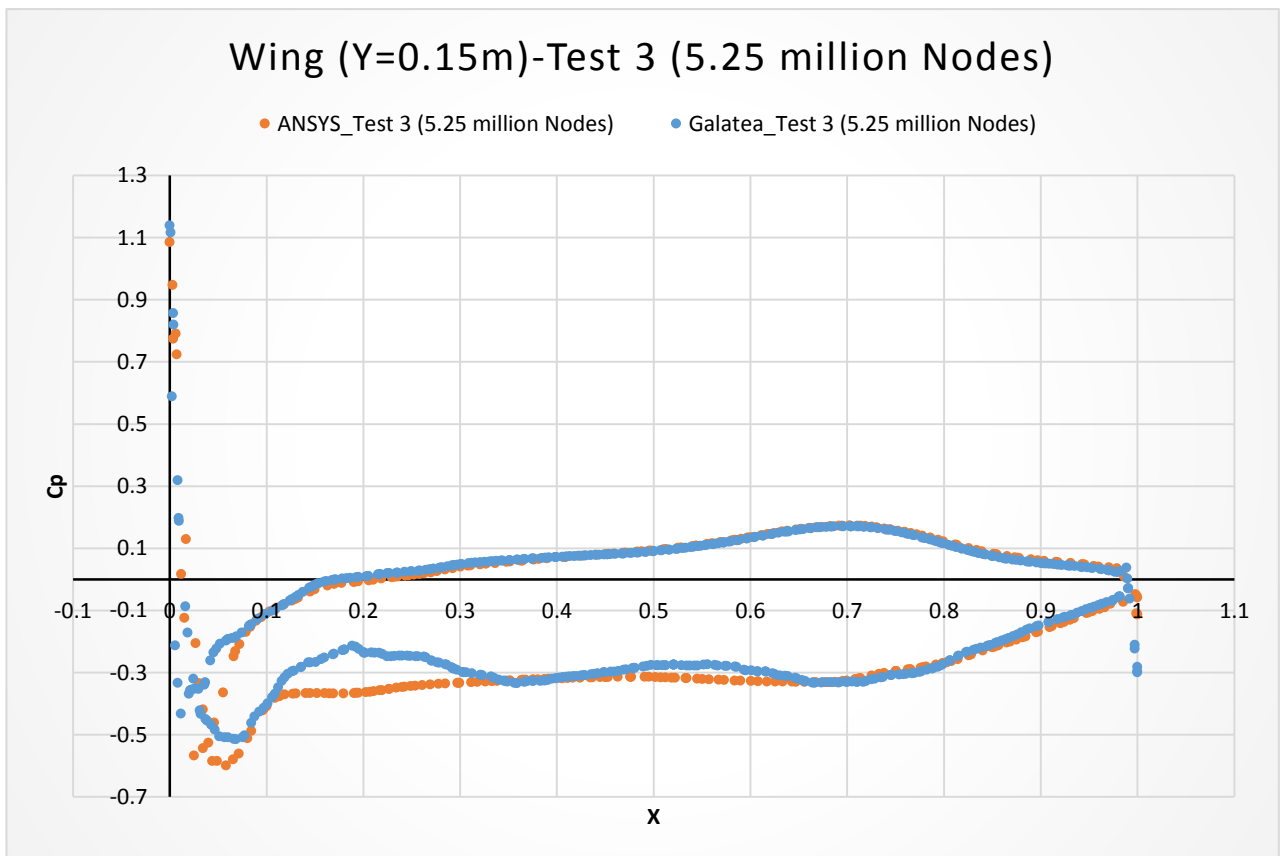
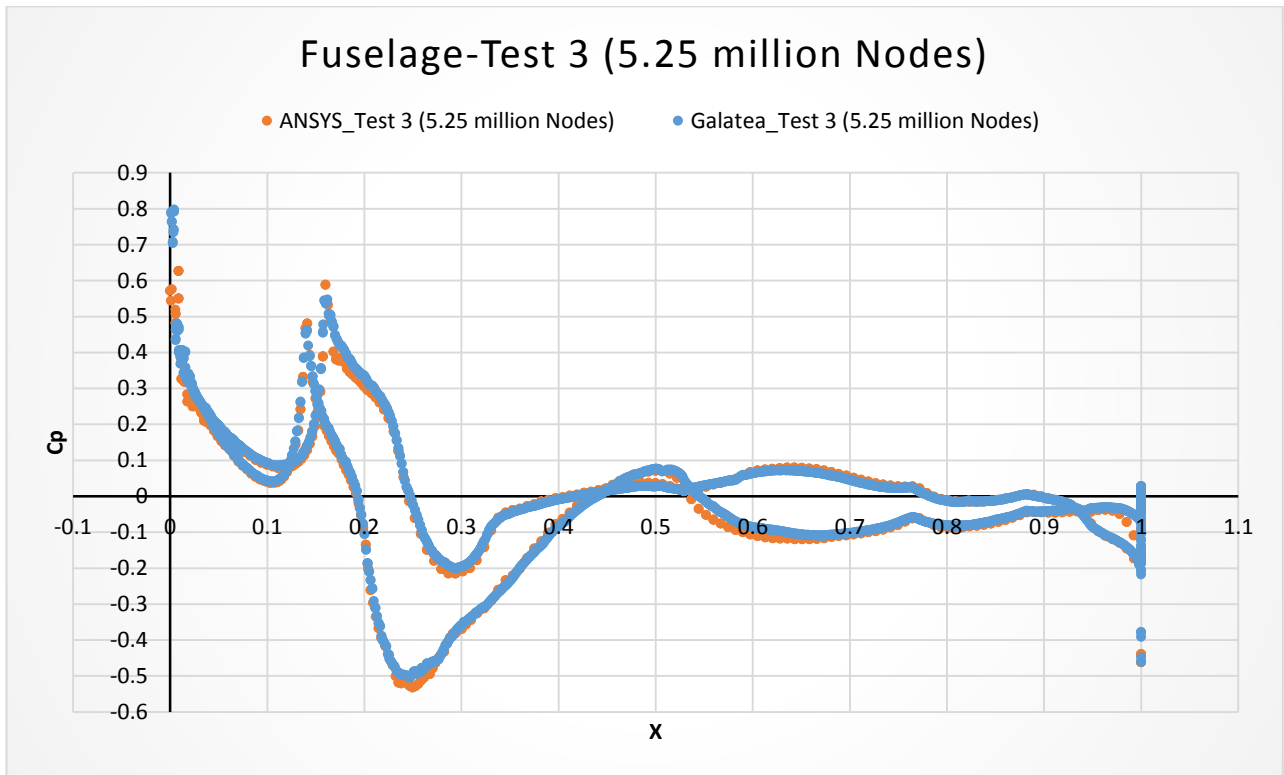
Στην Εικόνα 3-1 που ακολουθεί σημειώνονται με κόκκινο χρώμα τα τμήματα των τομών με την μεγαλύτερη απόκλιση όπως αναφέρονται παραπάνω.



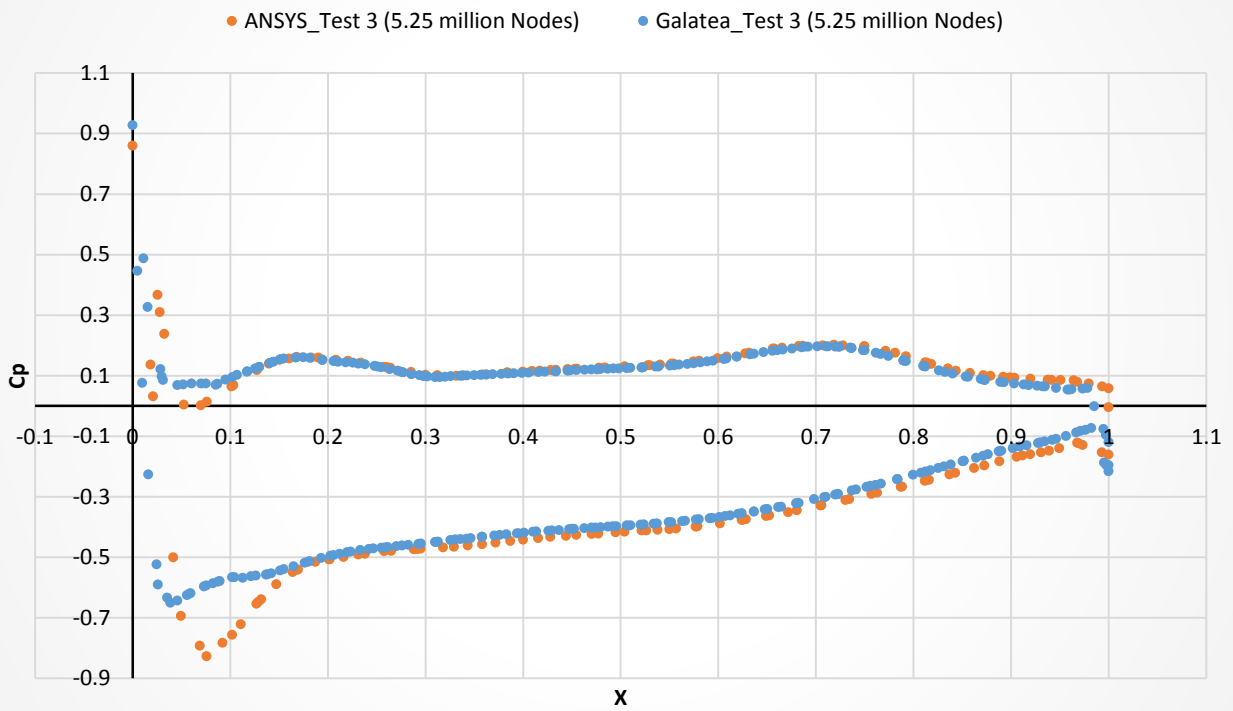
Εικόνα 3-2: Σημεία απόκλισης κατά μήκος των τομών

Αποτελέσματα

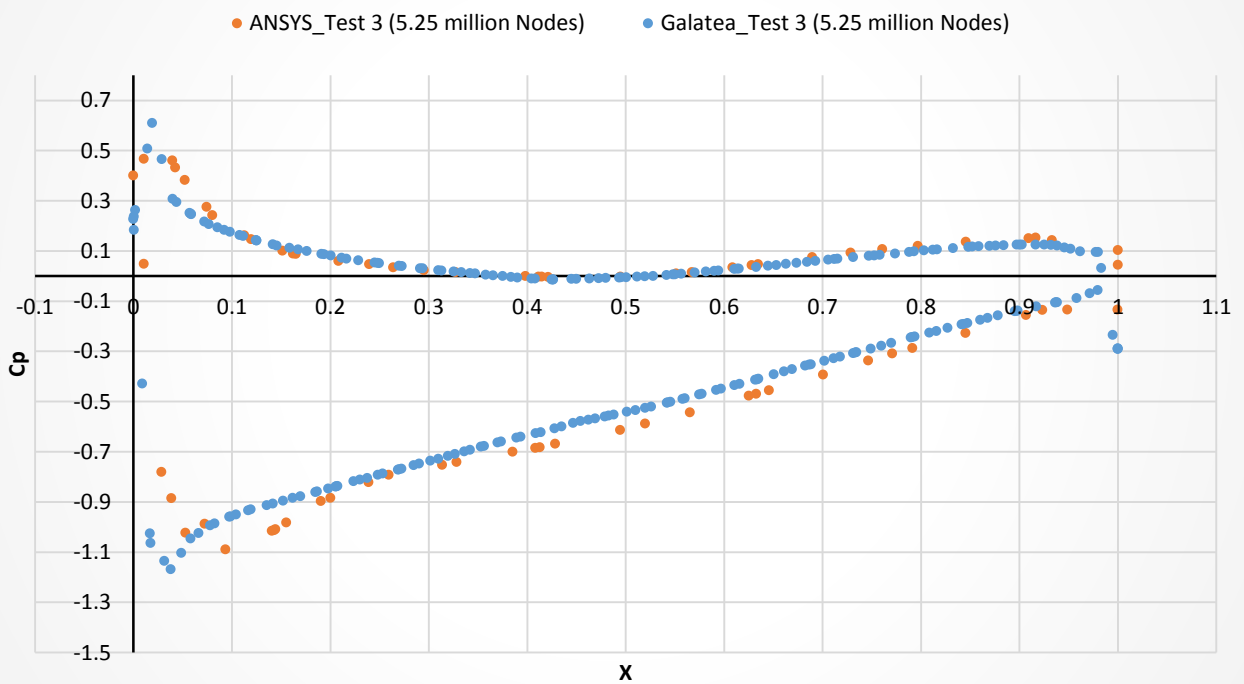
Συγκριτικά γραφήματα ANSYS-Galatea για την γεωμετρία Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία 0° και πλέγματος Test 3



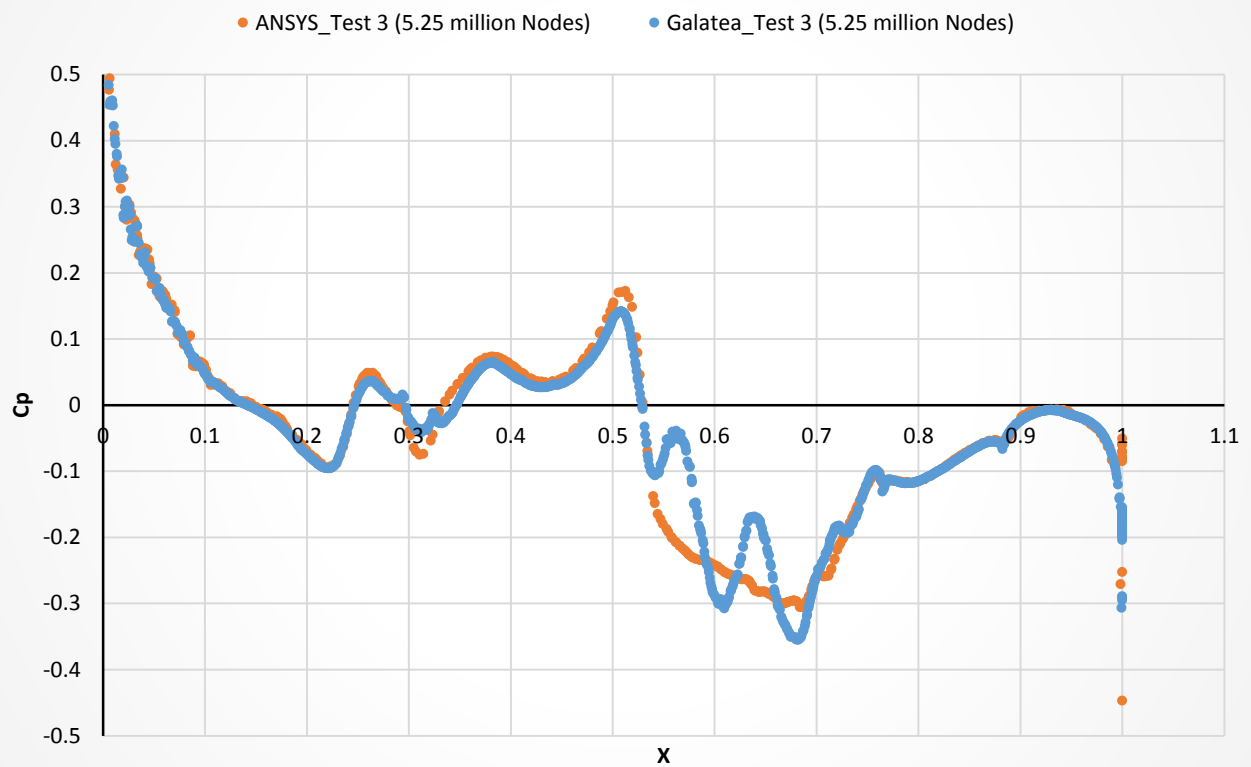
Wing (Y=0.5m)-Test 3 (5.25 million Nodes)



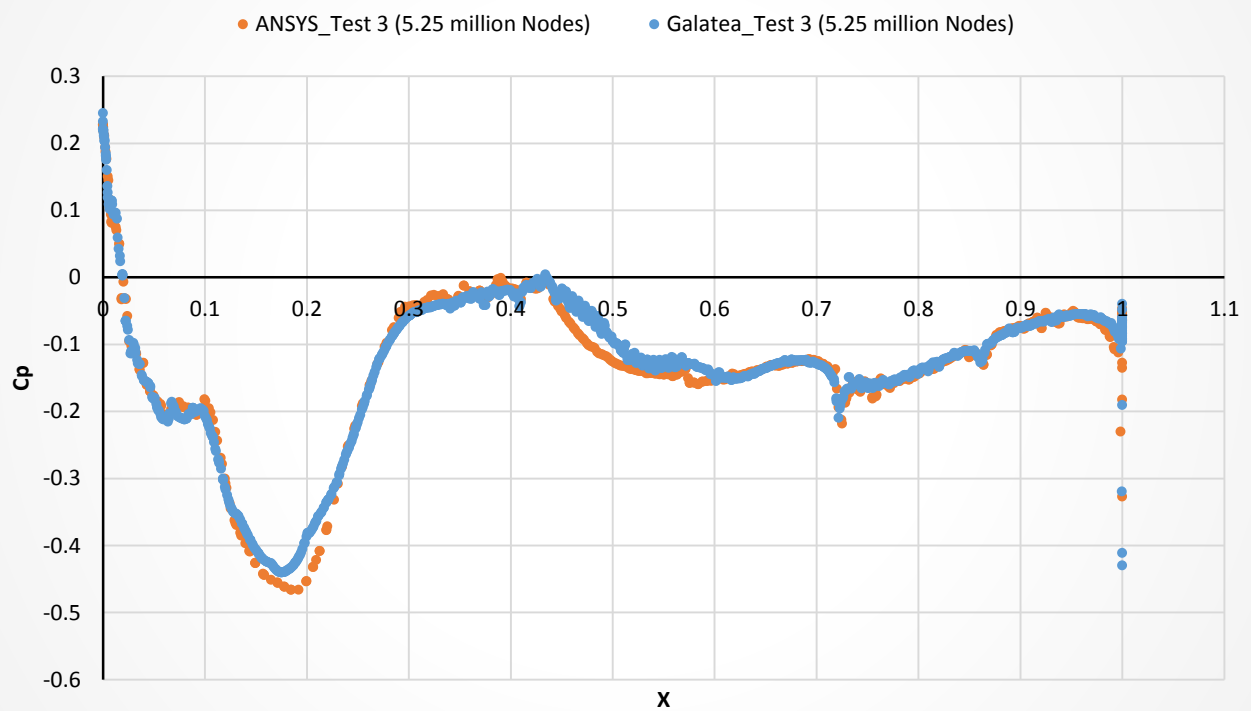
Canard-Test 3 (5.25 million Nodes)



Fuselage Side-Test 3 (5.25 million Nodes)



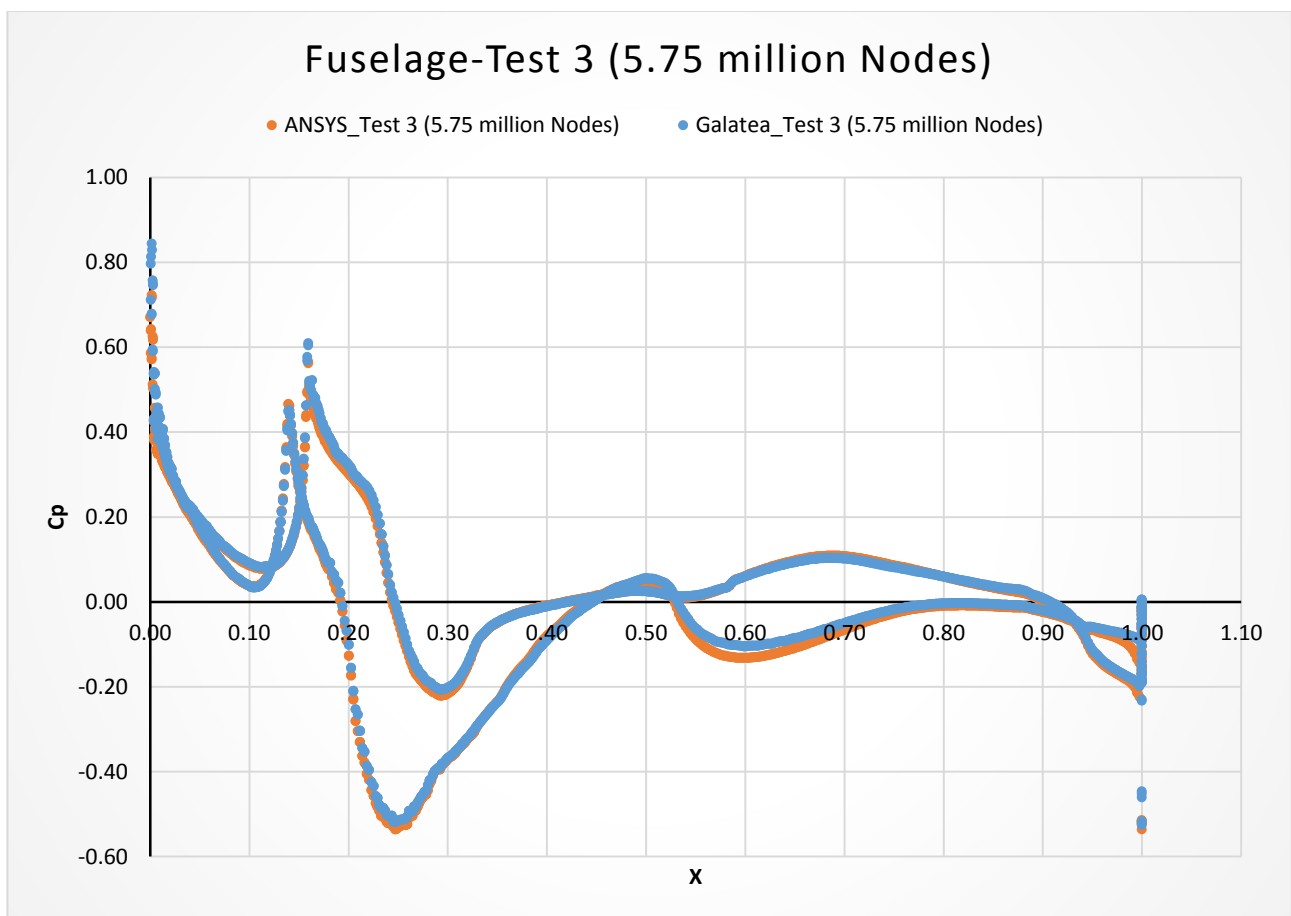
Canopy Side-Test 3 (5.25 million Nodes)



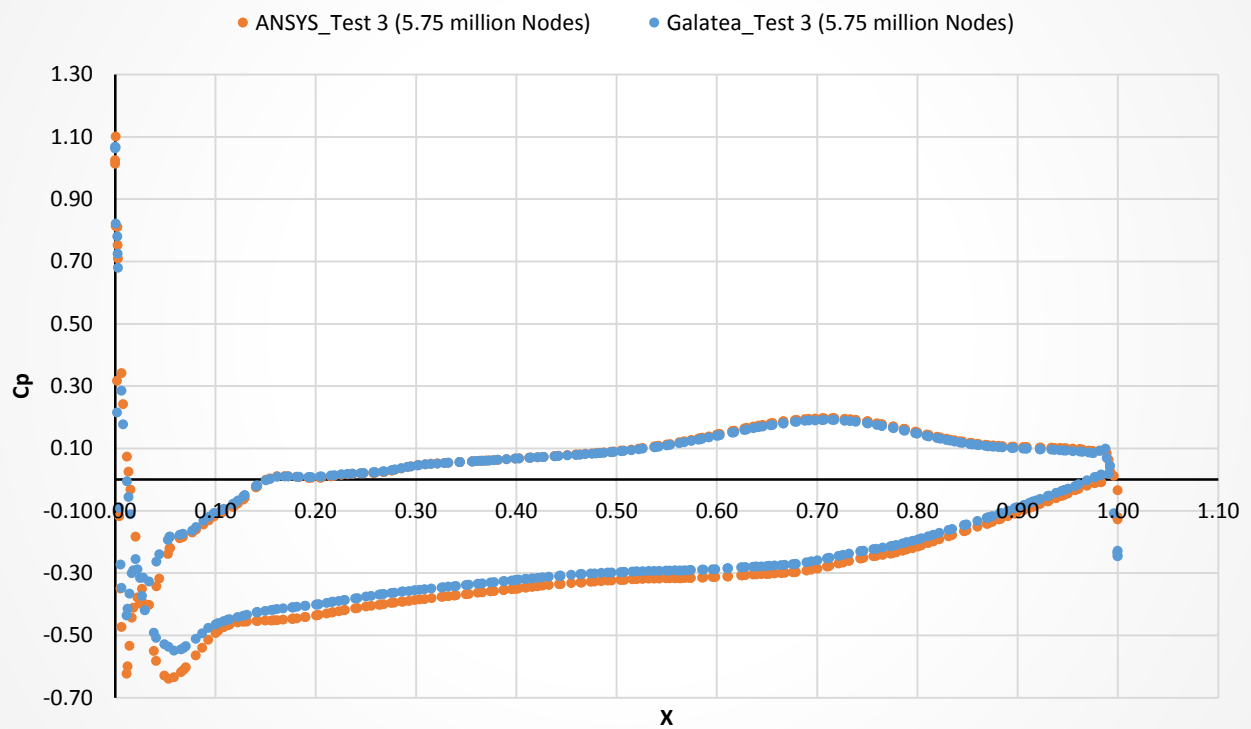
Στην γεωμετρία διογκωμένης ατράκτου με Canard σε γωνία 0° παρατηρούνται αντίστοιχες αποκλίσεις και στα ίδια σημεία κάθε τομής. Σημειώνεται ότι το παρόν πλέγμα είναι αραιότερο κατά 2 εκατομμύρια κόμβους περίπου. Εξάιρεση παρουσιάζεται στο γράφημα **Canard**, όπου υπάρχει μια πιο έντονη διαφοροποίηση για $X=0$ έως $X=0,15$ αλλά με μικρότερη απόκλιση κατά μήκος της κάτω πλευράς. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται λαμβάνοντας υπόψιν την μεταβολή της γωνίας του Canard.

Επιπλέον, εμφανίζονται πολύ πιο έντονες μεταβολές στα γραφήματα των **Wing ($Y=0.15m$)** και **Fuselage Side**. Η αύξηση αυτή των μεταβολών παρατηρείται στα ίδια σημεία των τομών με την προηγούμενη γεωμετρία και αποδίδονται στην μη επαρκή σύγκλιση του κώδικα Galatea στη συγκεκριμένη προσομοίωση, γεγονός που διαπιστώνεται και από τα γραφήματα του κώδικα Galatea για την συγκεκριμένη γεωμετρία στο Παράρτημα Γ.

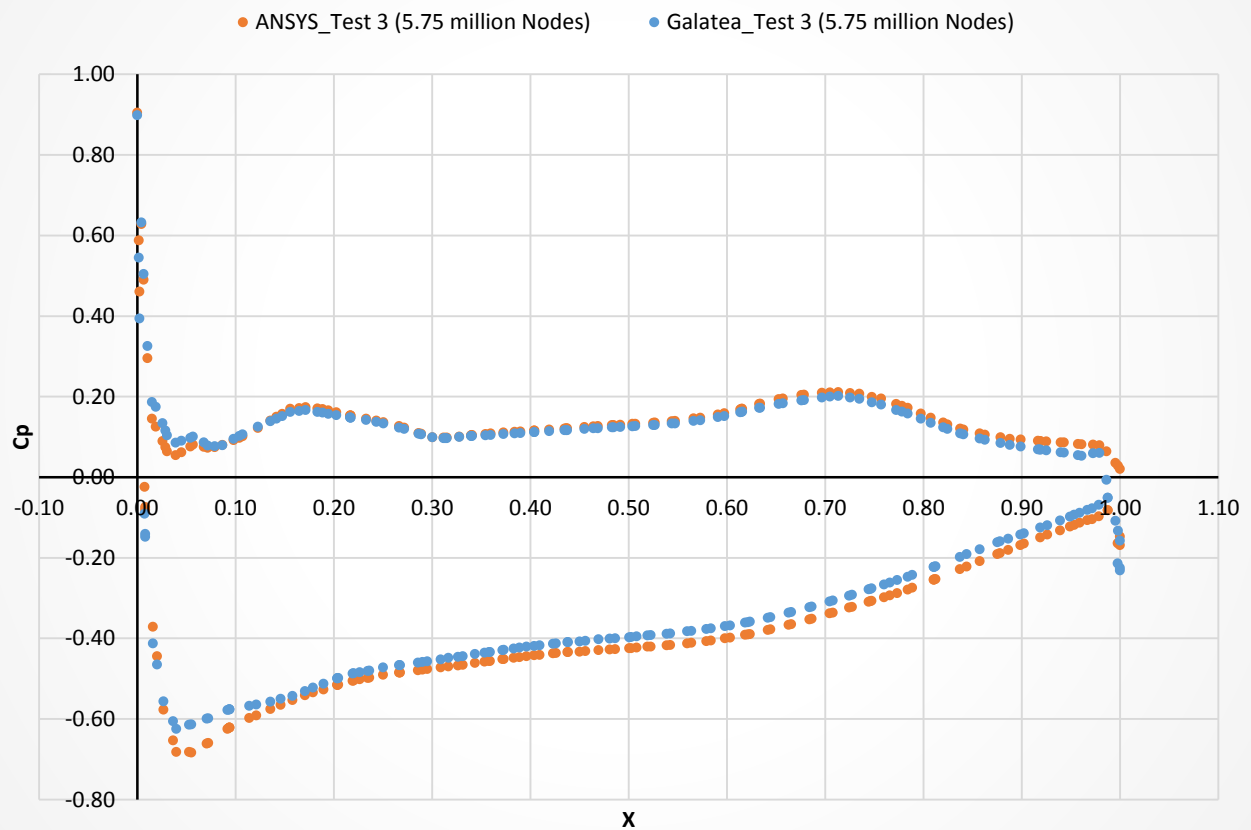
Συγκριτικά γραφήματα ANSYS-Galatea για την γεωμετρία Μη Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία 0° και πλέγματος Test 3

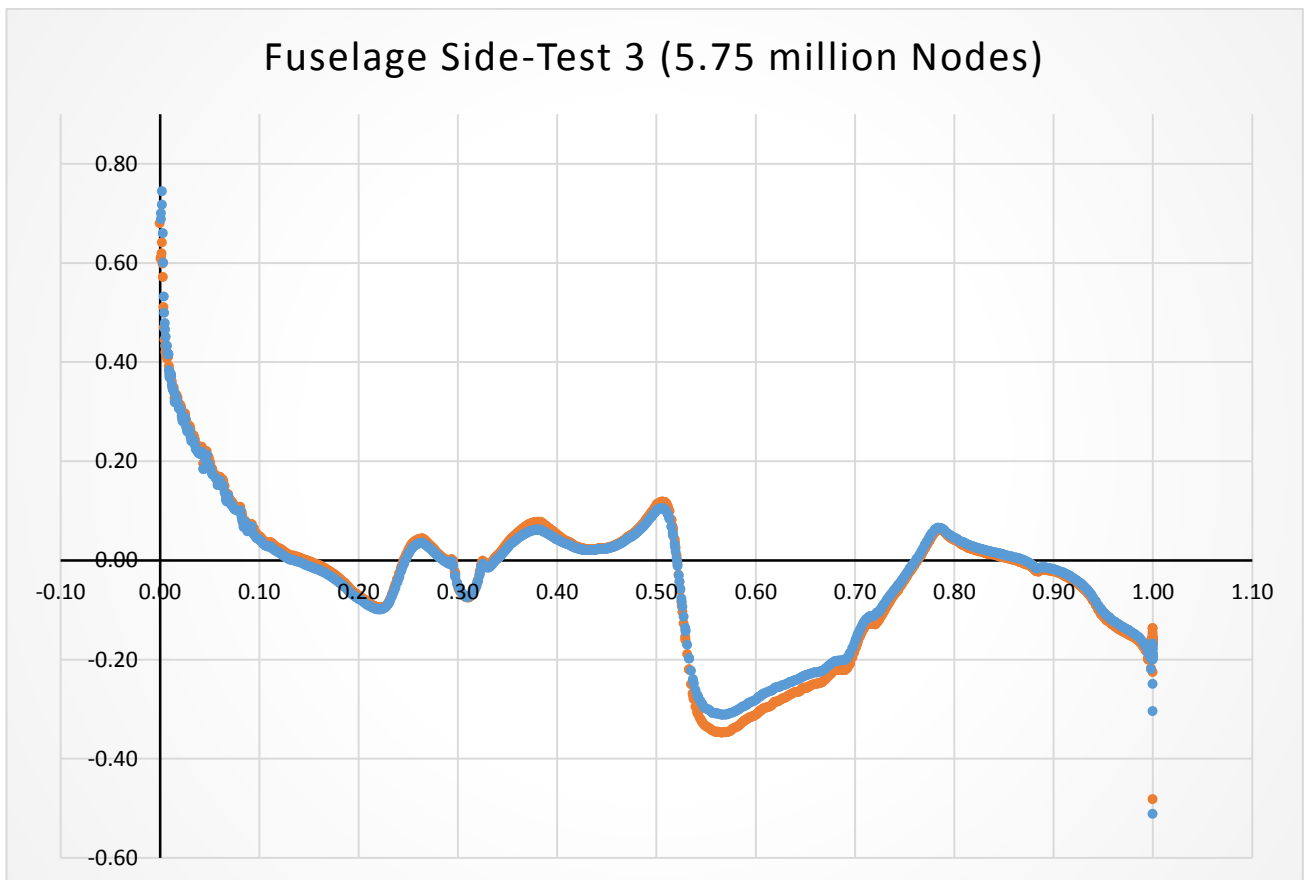
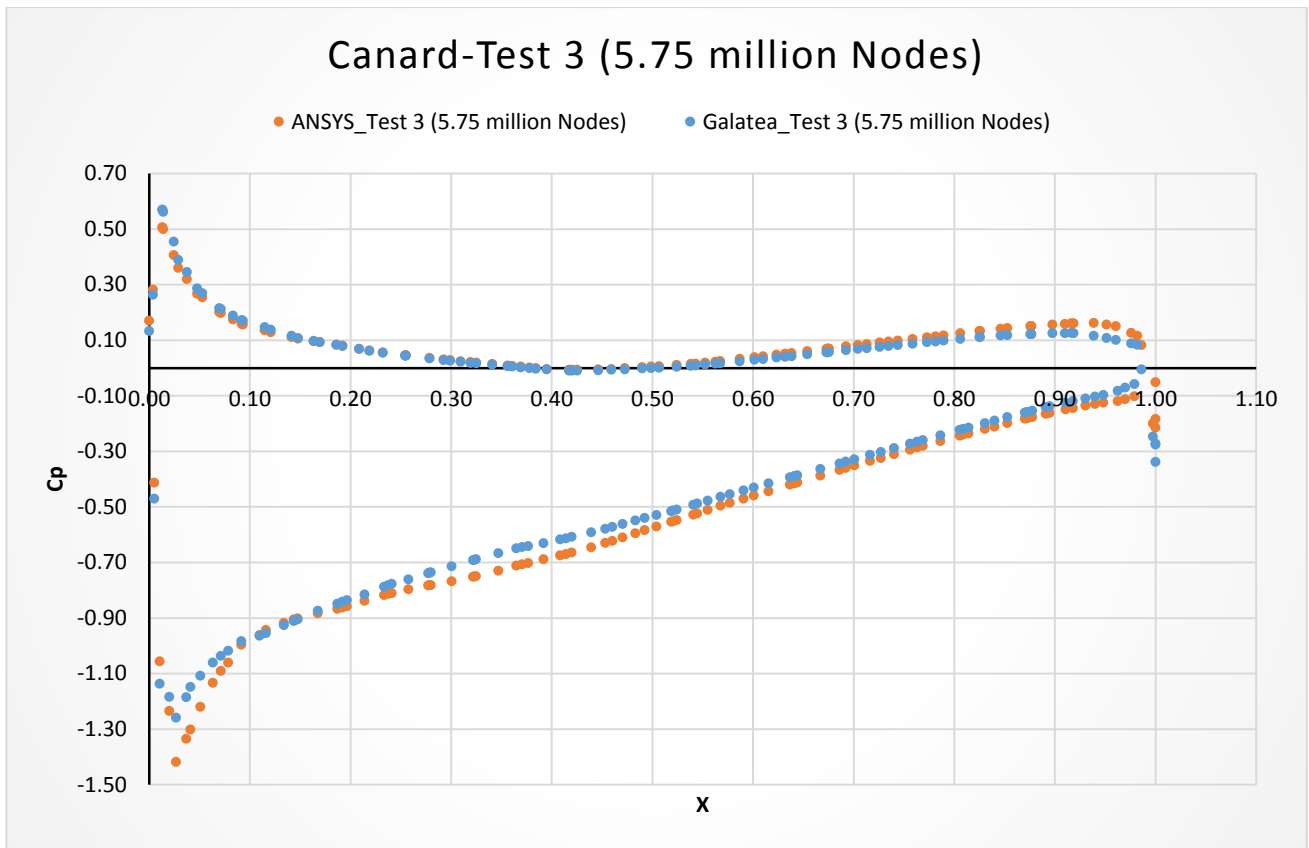


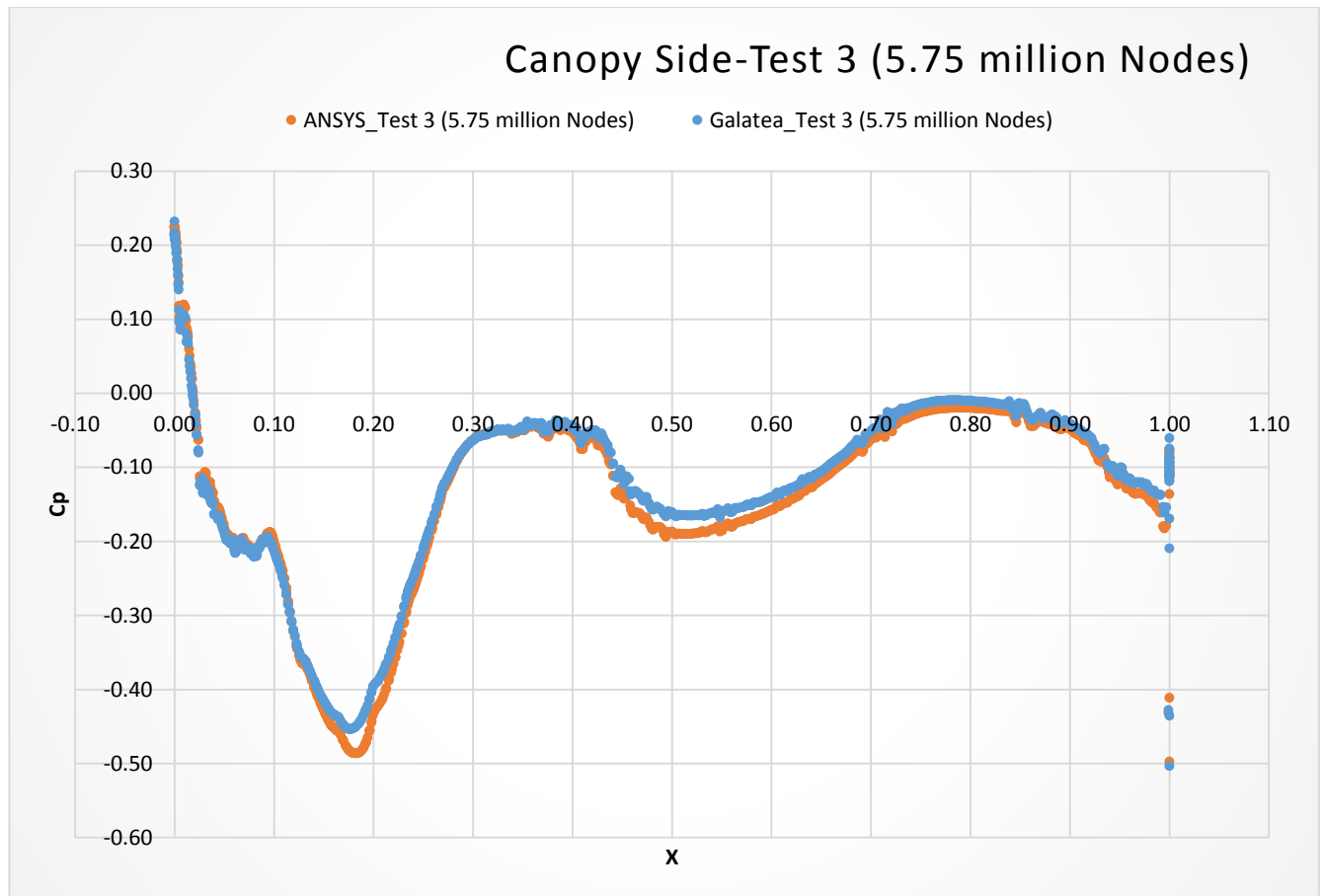
Wing (Y=0.15m)-Test 3 (5.75 million Nodes)



Wing (Y=0.5m)-Test 3 (5.75 million Nodes)







Στην γεωμετρία μη διογκωμένης ατράκτου με Canard σε γωνία 0° διαπιστώνεται από τα γραφήματα μικρότερη απόκλιση της τιμής του C_p σε σχέση με τις αποκλίσεις στις άλλες δύο γεωμετρίες. Επιπλέον, παρατηρείται αισθητή βελτίωση των γραφημάτων στις αεροτομές της πτέρυγας και του Canard μεταξύ των $X=0$ και $X=0,15$. Οι βελτιώσεις αυτές αποδίδονται στην απλούστερη μορφή της υπόψη γεωμετρίας και επακόλουθα στην καλύτερη μορφή πλέγματος.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΩΣΗΣ – ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ

Ένα σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης και σύγκρισης των δύο κωδίκων είναι ο συντελεστής άνωσης και ο συντελεστής οπισθέλκουσας που υπολογίζεται από τον κάθε ένα για τα ίδια πλέγματα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι Πίνακες 3-1 και 3-2, στους οποίους έχει υπολογιστεί ο Συντελεστής Άνωσης C_L και Οπισθέλκουσας C_D για όλα τα πλέγματα και κατ' επέκταση για όλα τα τρεξίματα των κωδίκων ANSYS και Galatea. Επιπλέον, υπολογίστηκε η διαφορά μεταξύ των αντίστοιχων τρεξιμάτων και το ποσοστό επί τις εκατό απόκλισης των αποτελεσμάτων του Galatea από τα αντίστοιχα του ANSYS.

Συντελεστής Άνωσης – Συντελεστής Οπισθέλκουσας

	Lift ANSYS (N)	CL			
		ANSYS	Galatea	Διαφορά	Ποσοστό Απόκλισης ως προς το Ansys (%)
Exp -3					
Test 1	7585.68	0.334789892	0.302699771	0.032090121	9.585152257
Test 2	7560.39	0.333673731	0.30889426	0.024779472	7.426257921
Test 3	7594.85	0.335194605	0.312300771	0.022893834	6.830012642
Test 4	7570.09	0.334101836	0.314500813	0.019601023	5.866781005
Exp-off					
					-
Test 1	7326.56	0.323353771	0.289796815	0.033556956	10.37778405
Test 2	7364.92	0.325046769	0.301499588	0.02354718	7.2442437
Test 3	7326.56	0.323353771	0.300964087	0.022389684	6.924206759
Parallel-off					
					-
Test 1	7649.06	0.345735789	0.31838207	0.027353719	7.911740519
Test 2	7649.06	0.345735789	0.306141272	0.039594517	11.45224712
Test 3	7639.98	0.345325375	0.322177474	0.023147901	6.703214715
Aw (Expanding)= 0.297 m²					
Aw (Parallel)= 0.290 m²					

Πίνακας 3-1: Συγκριτικός Πίνακας Συντελεστή Άνωσης C_L

	Drag ANSYS (N)	CD			
		ANSYS	Galatea	Διαφορά	Ποσοστό Απόκλισης ως προς το Ansys (%)
Exp -3					
Test 1	941.316	0.041544474	0.036537819	0.005006655	12.05131309
Test 2	942.039	0.041576383	0.040324395	0.001251988	3.01129535
Test 3	930.973	0.041087991	0.040579509	0.000508482	1.237544731
Test 4	924.815	0.040816211	0.041943283	-0.001127072	-2.761335051
Exp-off					-
Test 1	795.656	0.035115848	0.030731443	0.004384405	12.48554618
Test 2	730.186	0.032226365	0.029124766	0.003101599	9.624414096
Test 3	795.656	0.035115848	0.032909512	0.002206336	6.283020657
Parallel-off					-
Test 1	767.163	0.034675595	0.032868294	0.001807301	5.212024864
Test 2	767.163	0.034675595	0.02946342	0.005212175	15.03124819
Test 3	757.749	0.034250084	0.032809633	0.001440451	4.205686768
Aw (Expanding)= 0.297 m²					
Aw (Parallel)= 0.290 m²					

Πίνακας 3-2: Συγκριτικός Πίνακας Συντελεστή Οπισθέλκουσας C_D

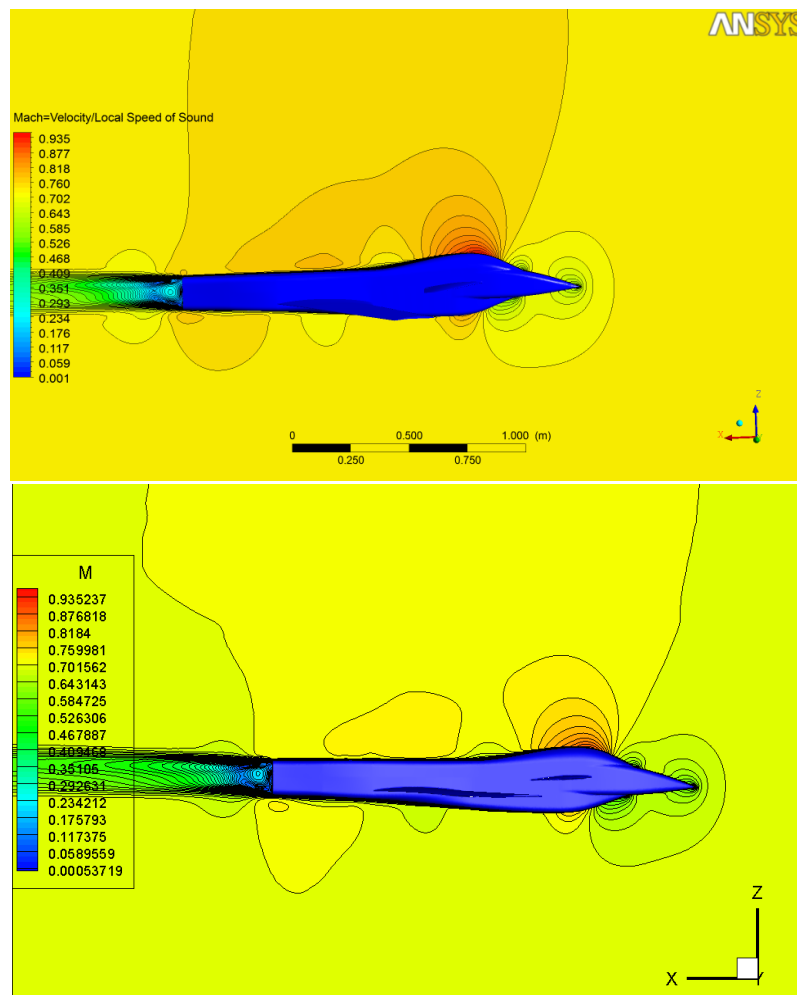
Αποτελέσματα

Με βάση τα αποτελέσματα από τους παραπάνω πίνακες επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι η σύγκλιση των αποτελεσμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητα των πλεγμάτων. Επιπρόσθετα διαπιστώνεται μια απόκλιση των αποτελεσμάτων του Galatea της τάξεως του 6-7% ως προς τα αποτελέσματα του ANSYS για τις συγκεκριμένες πυκνότητες πλεγμάτων, όσον αφορά το C_L , και ακόμα μικρότερη απόκλιση στο C_D . Η απόκλιση αυτή αποδίδεται στο διαφορετικό επιλύτη που χρησιμοποιούν οι δύο κώδικες, ήτοι pressure-based για το ANSYS και density-based για το Galatea.

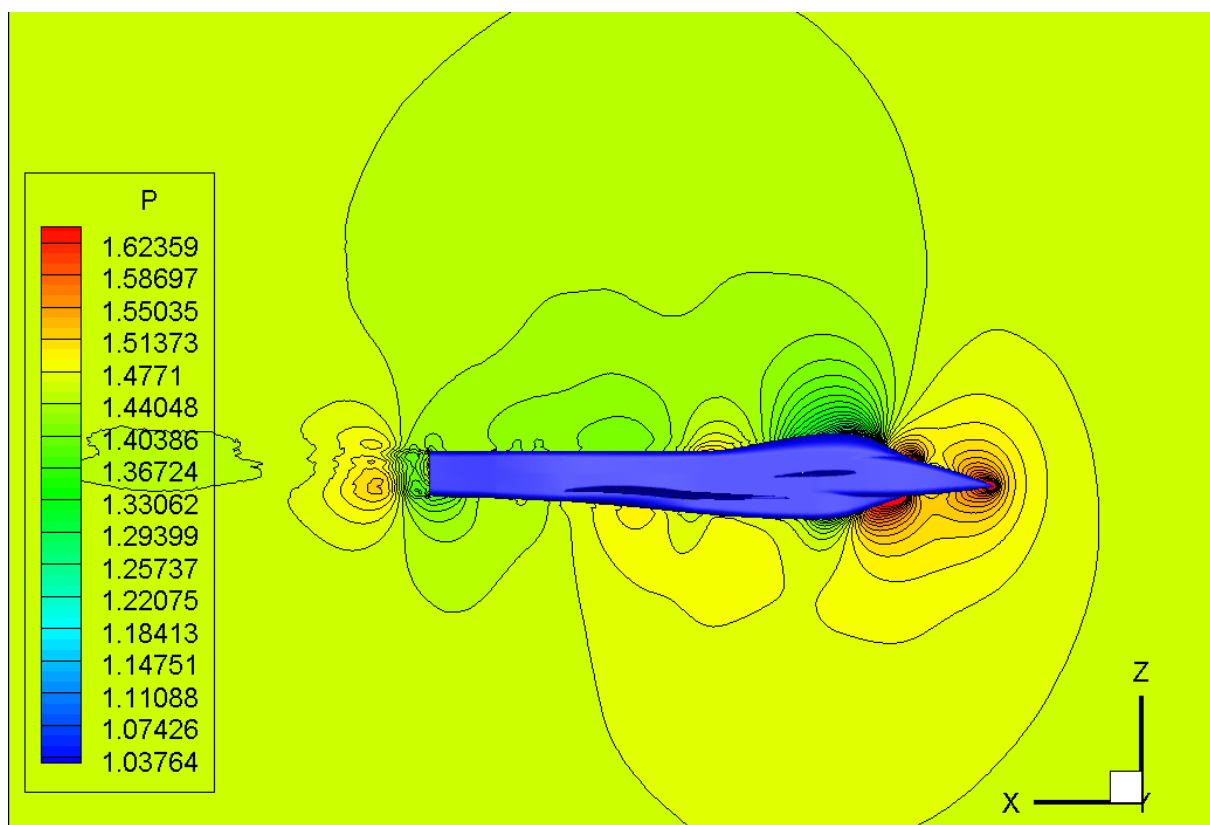
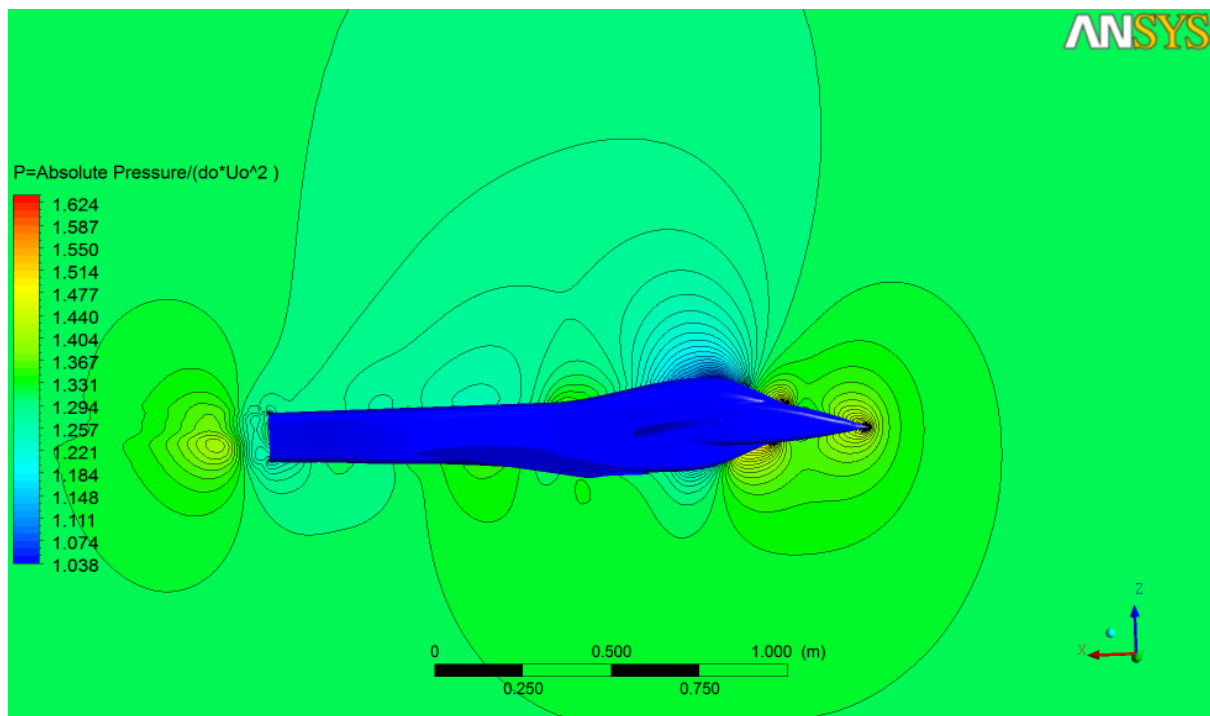
CONTOURS

Για την οπτικοποίηση καθώς επίσης και την ποιοτική και ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων, δημιουργήθηκαν ισοϋψείς καμπύλες με χρωματική διαφοροποίηση επιπέδων (Contours) για τις μεταβλητές της πίεσης, της ταχύτητας και του αριθμού Mach. Η δημιουργία των Contours εφαρμόστηκε πάνω σε συγκεκριμένα επίπεδα, που τέμνουν τις γεωμετρίες του μοντέλου, καθώς επίσης και πάνω στην επιφάνεια αυτού. Στην συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά Contours που εξήχθησαν και για τις τρεις γεωμετρίες στις περιπτώσεις των πυκνότερων πλεγμάτων.

Contours ANSYS-Galatea για την γεωμετρία Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία -3°

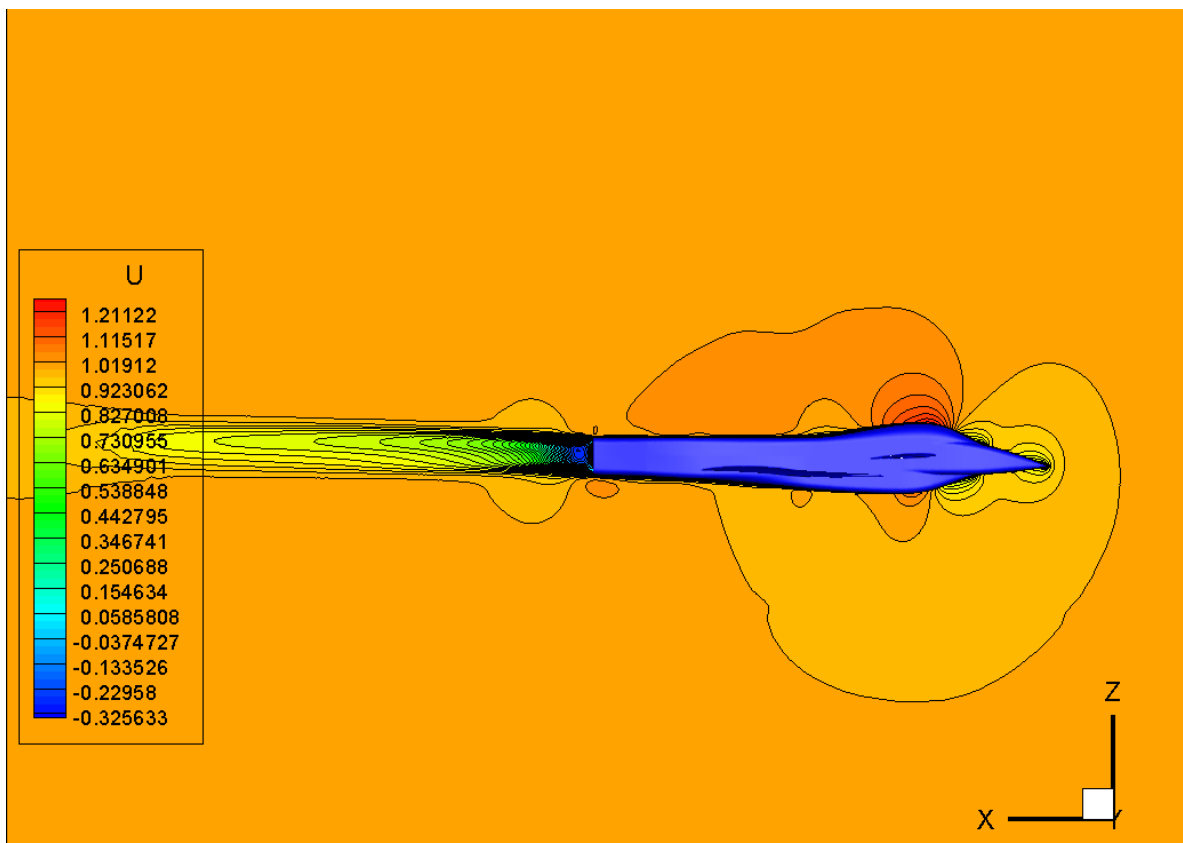
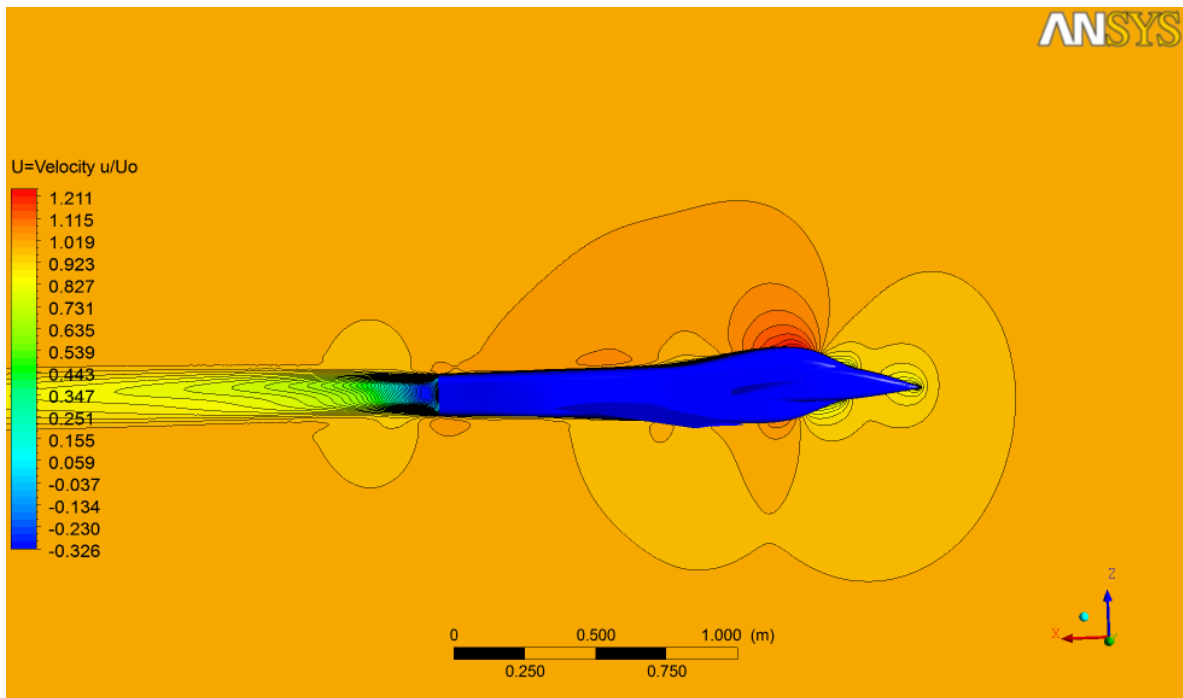


Εικόνα 3-3: Mach Number Contours στο επίπεδο συμμετρίας (πάνω: Ansys, κάτω: Galatea)

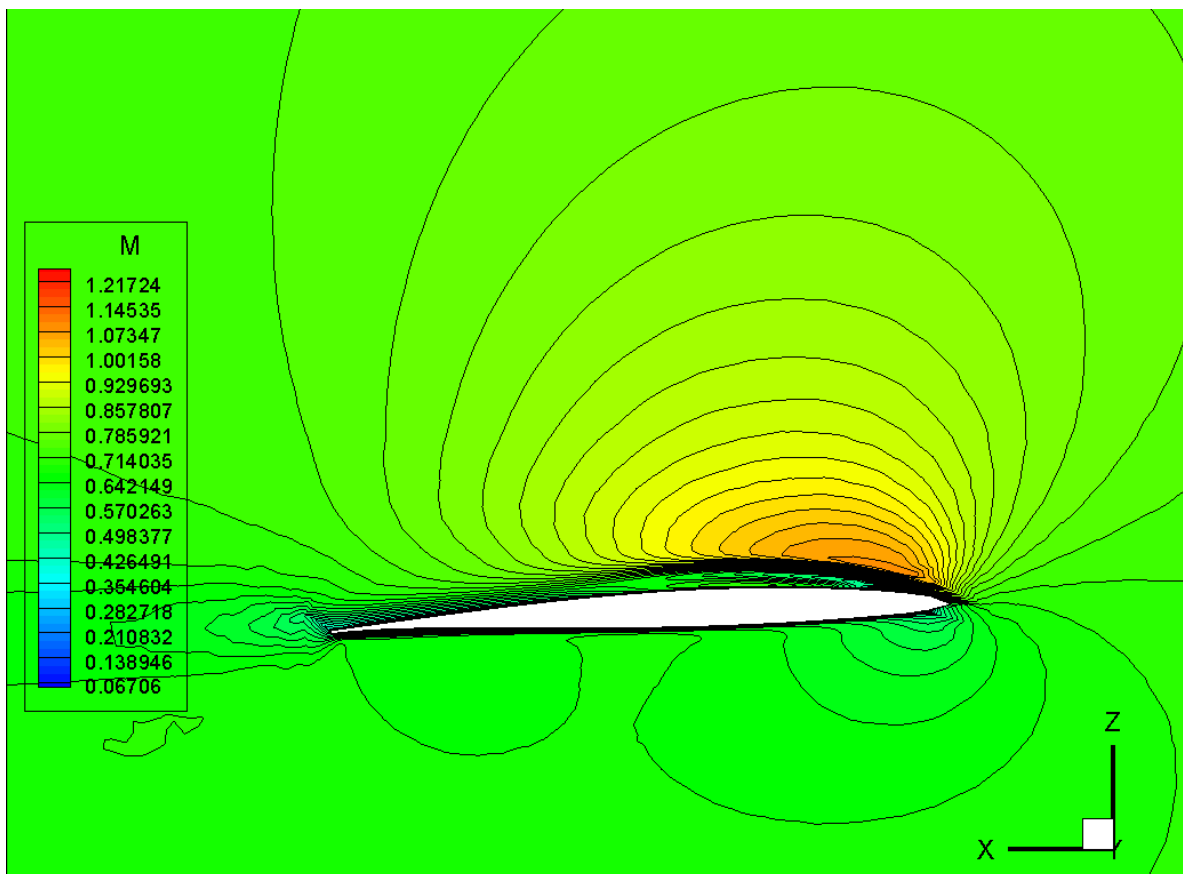
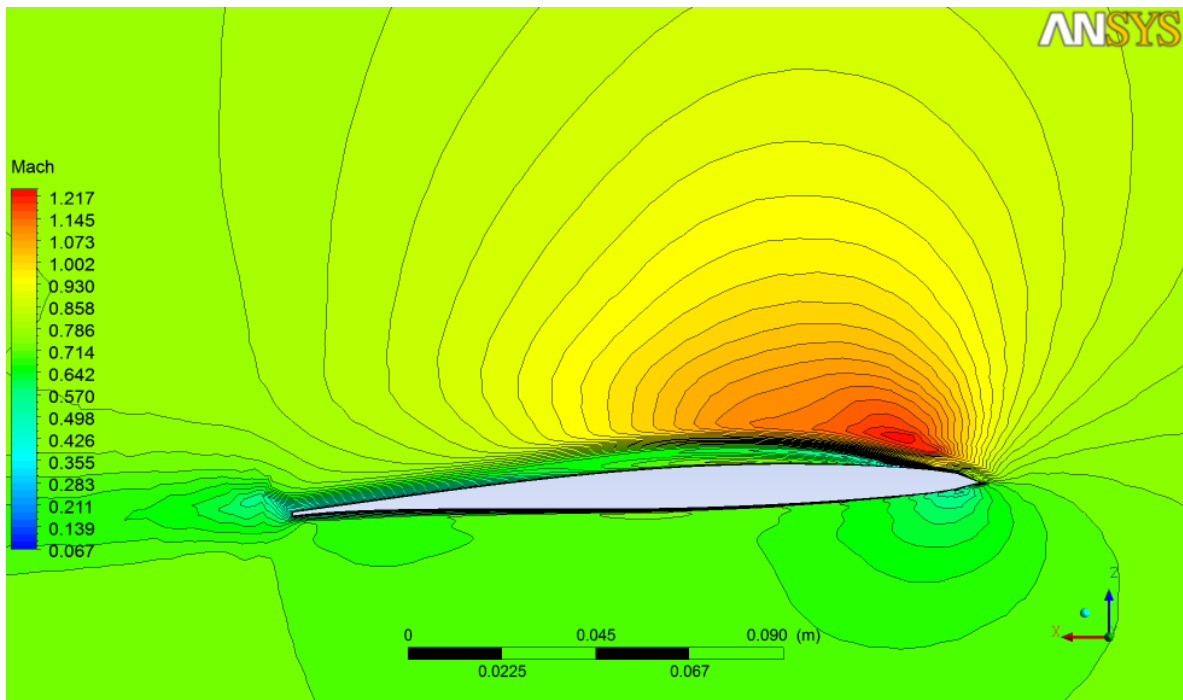


Εικόνα 3-4: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο συμμετρίας

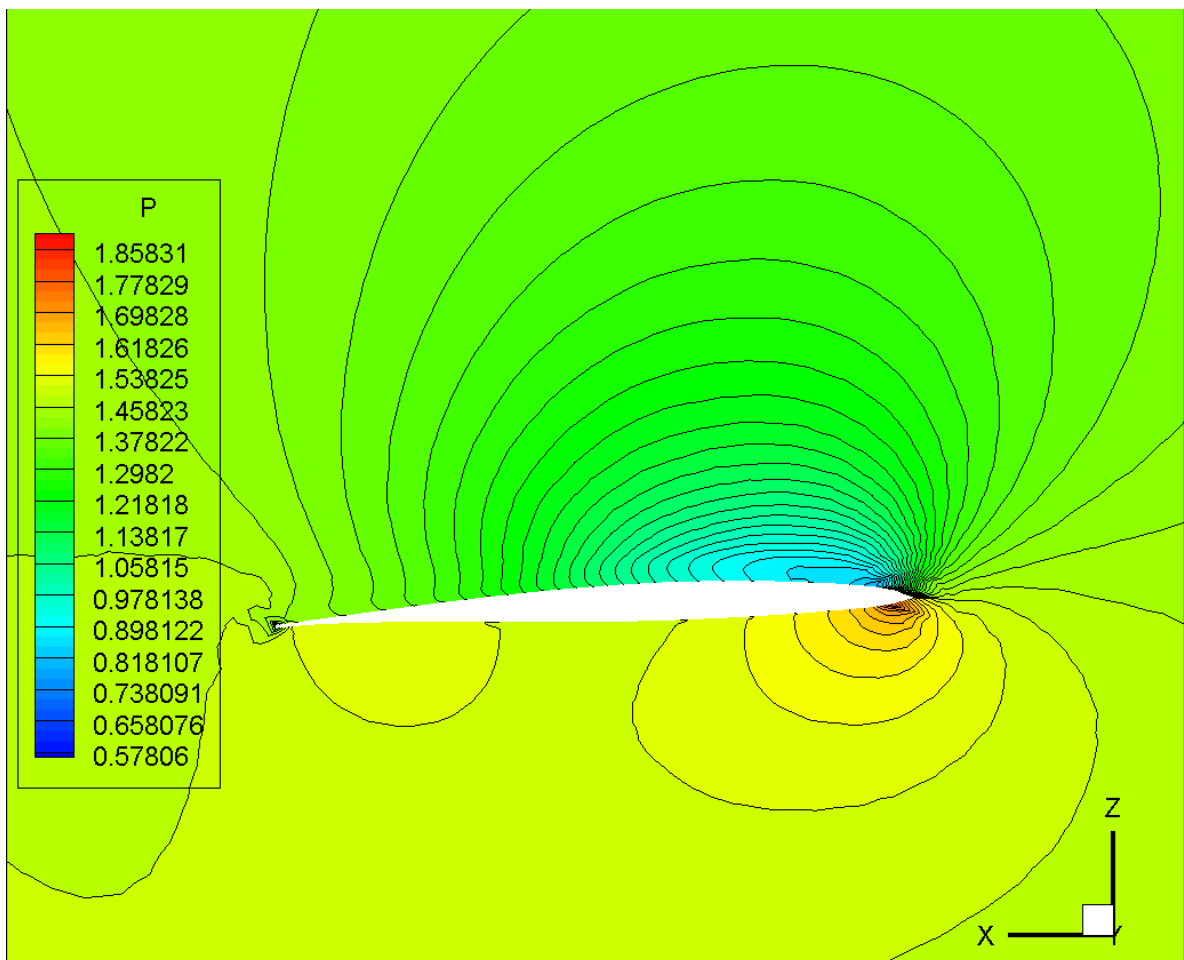
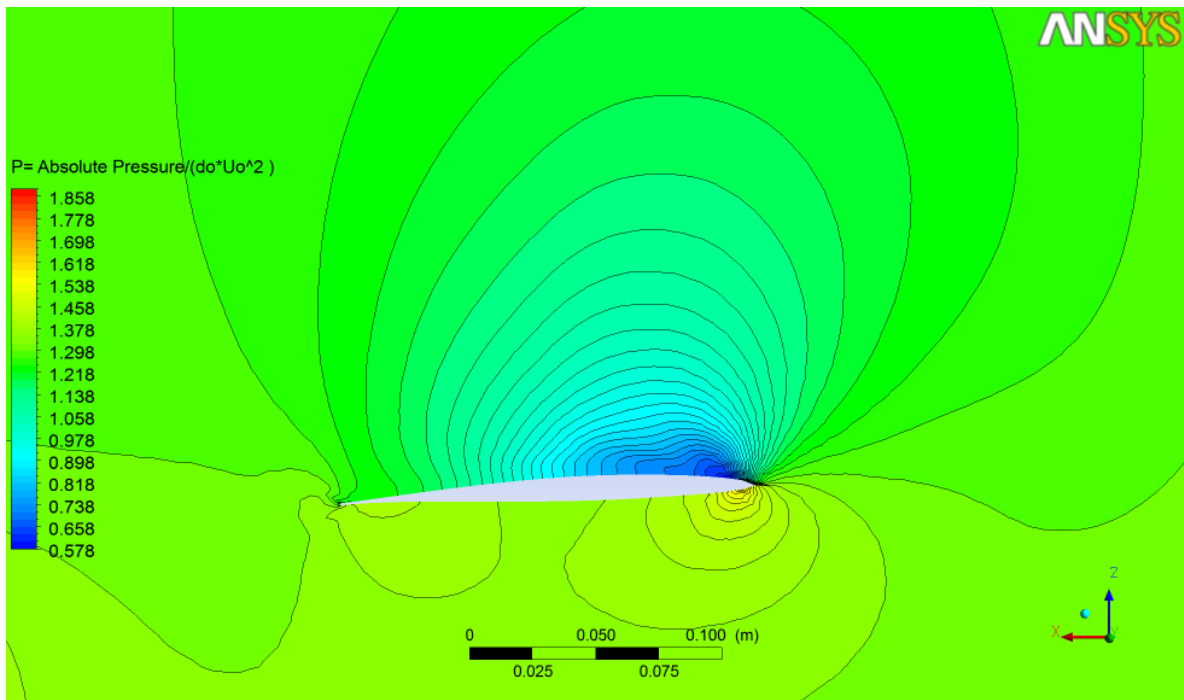
Αποτελέσματα



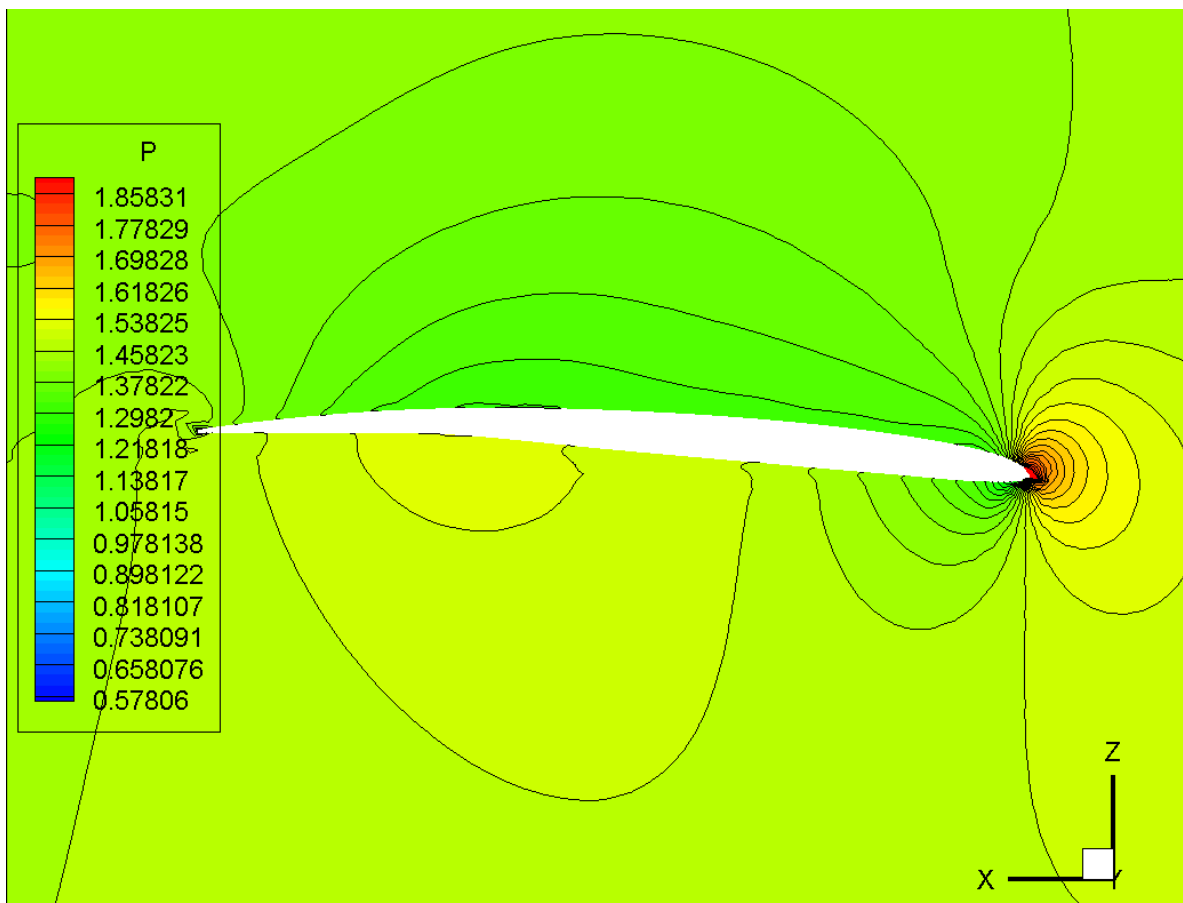
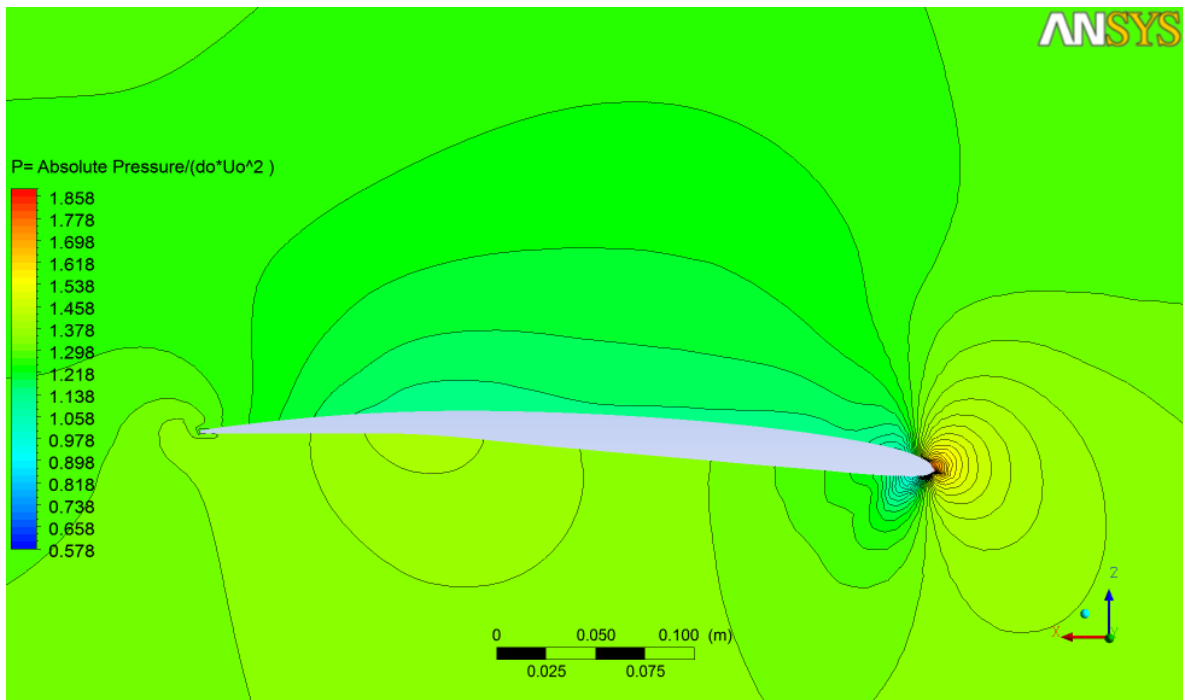
Εικόνα 3-5: Dimensionless Velocity Contours στο επίπεδο συμμετρίας



Εικόνα 3-6: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.15m$ για το Canard

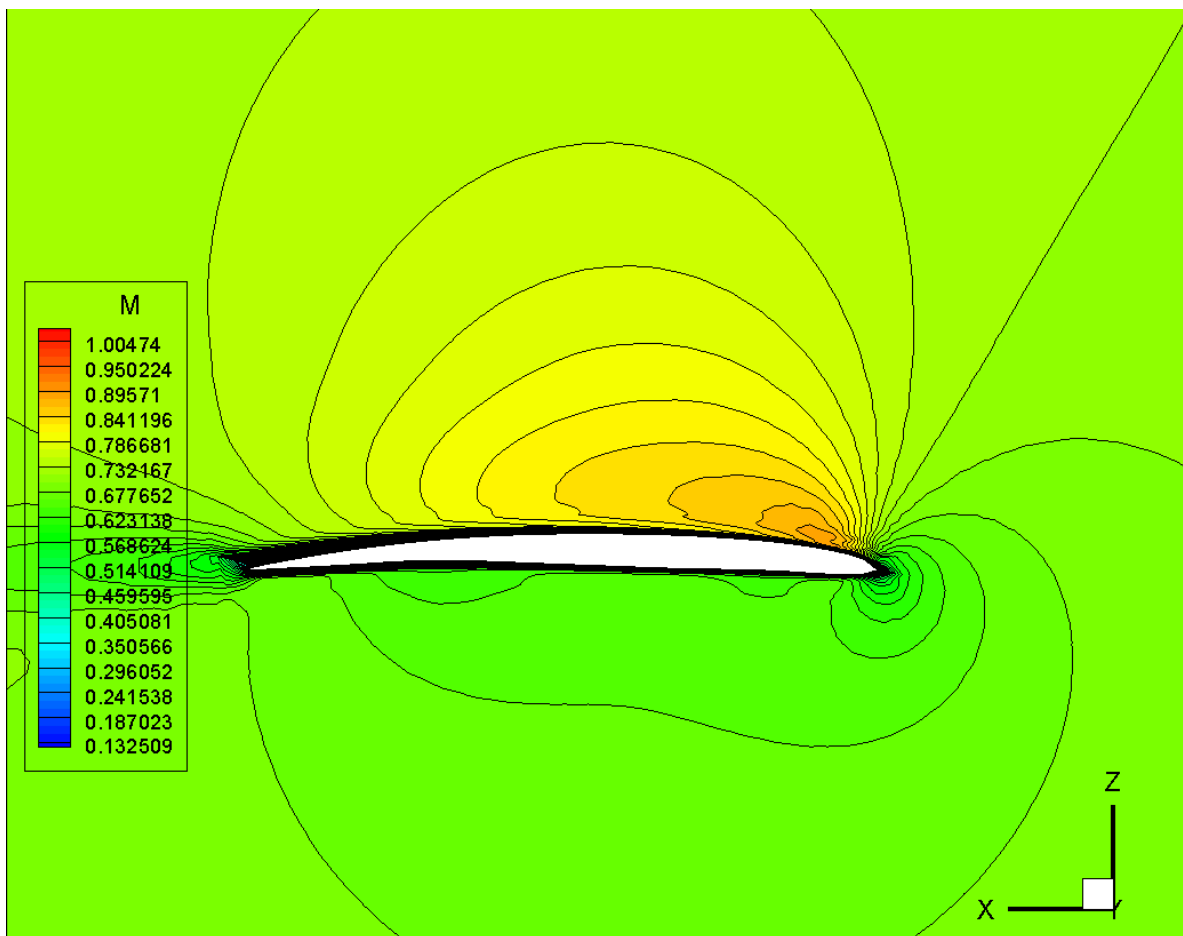
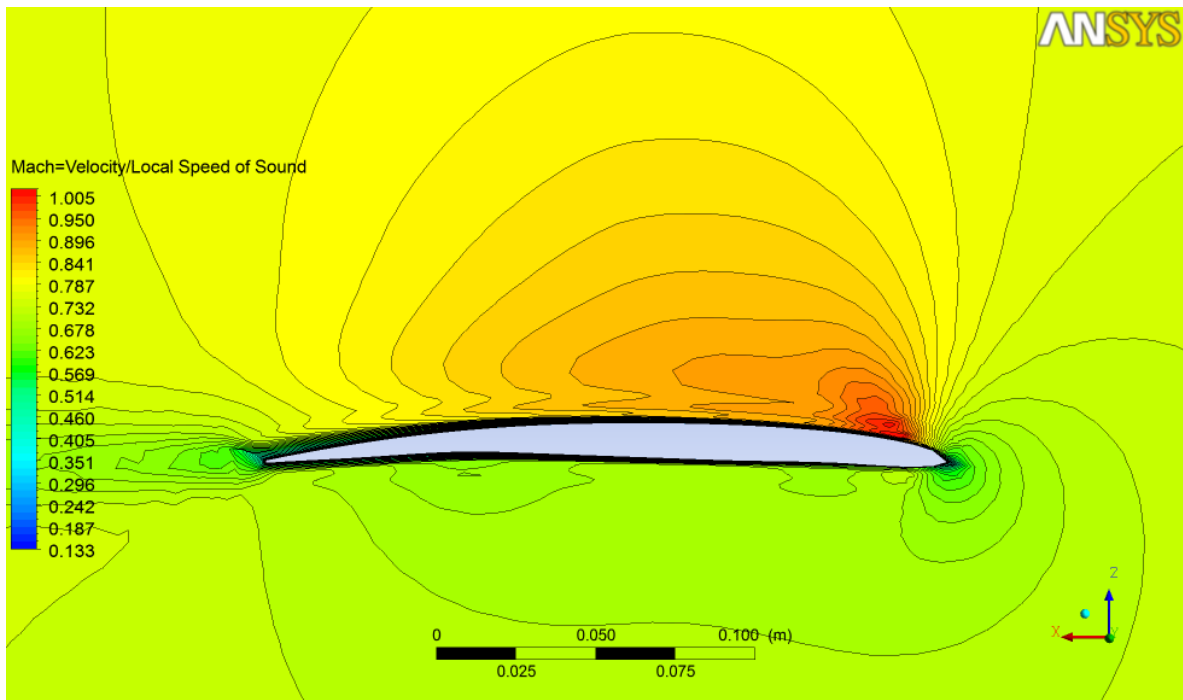


Εικόνα 3-7: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο $Y=0.15\text{m}$ για το Canard

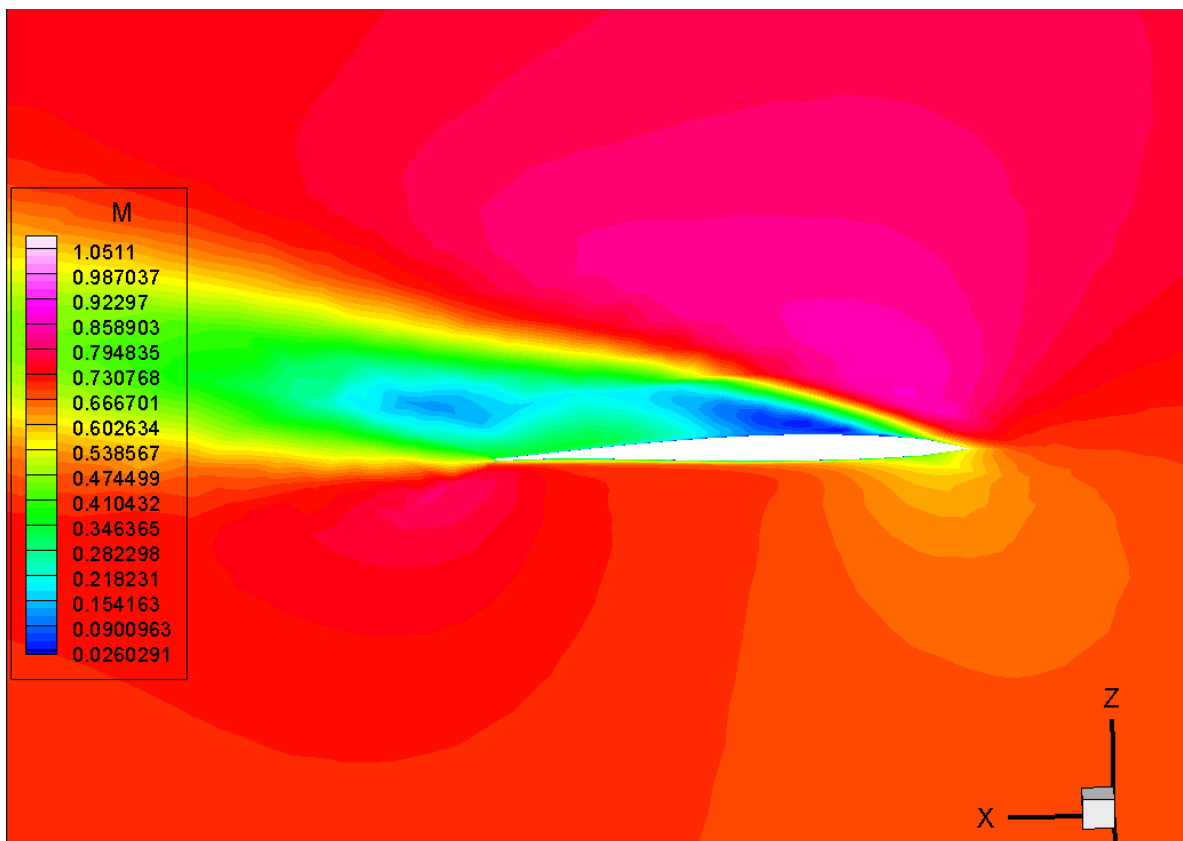
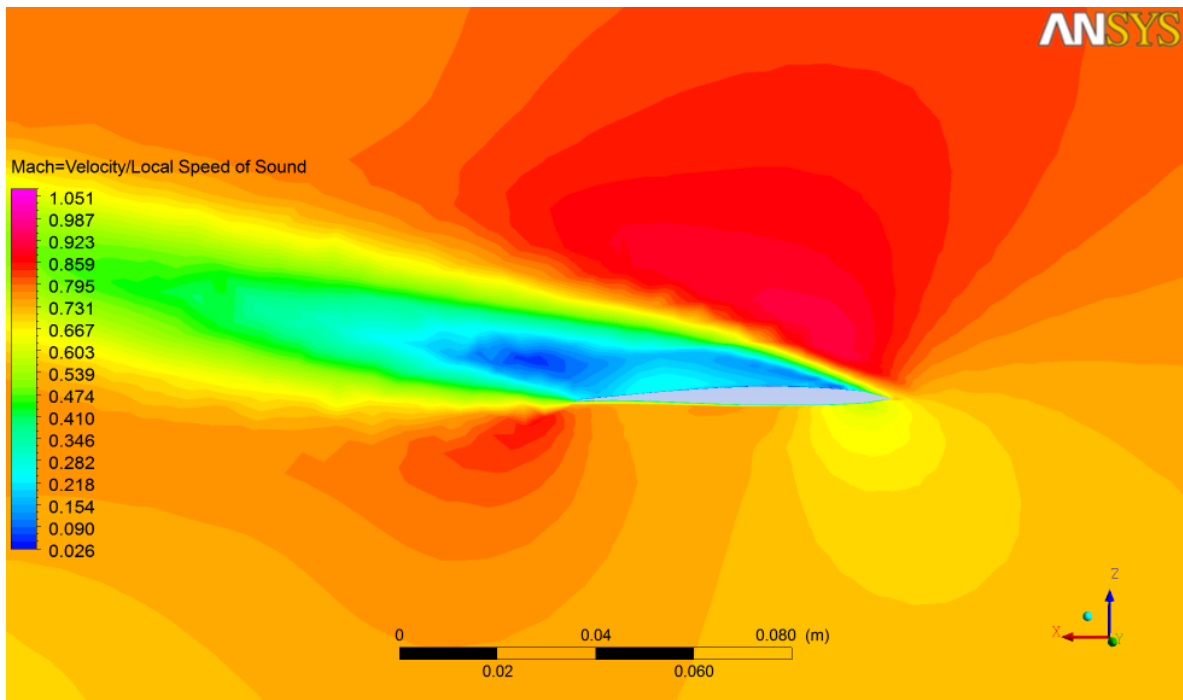


Εικόνα 3-8: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο $Y=0.15m$ για την Πτέρυγα

Αποτελέσματα

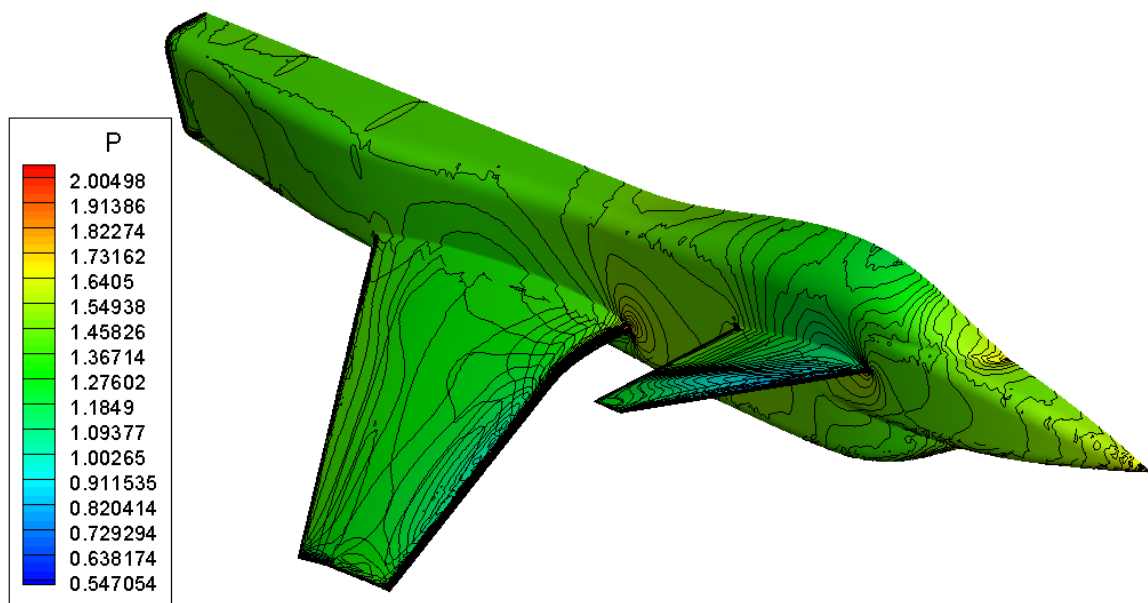
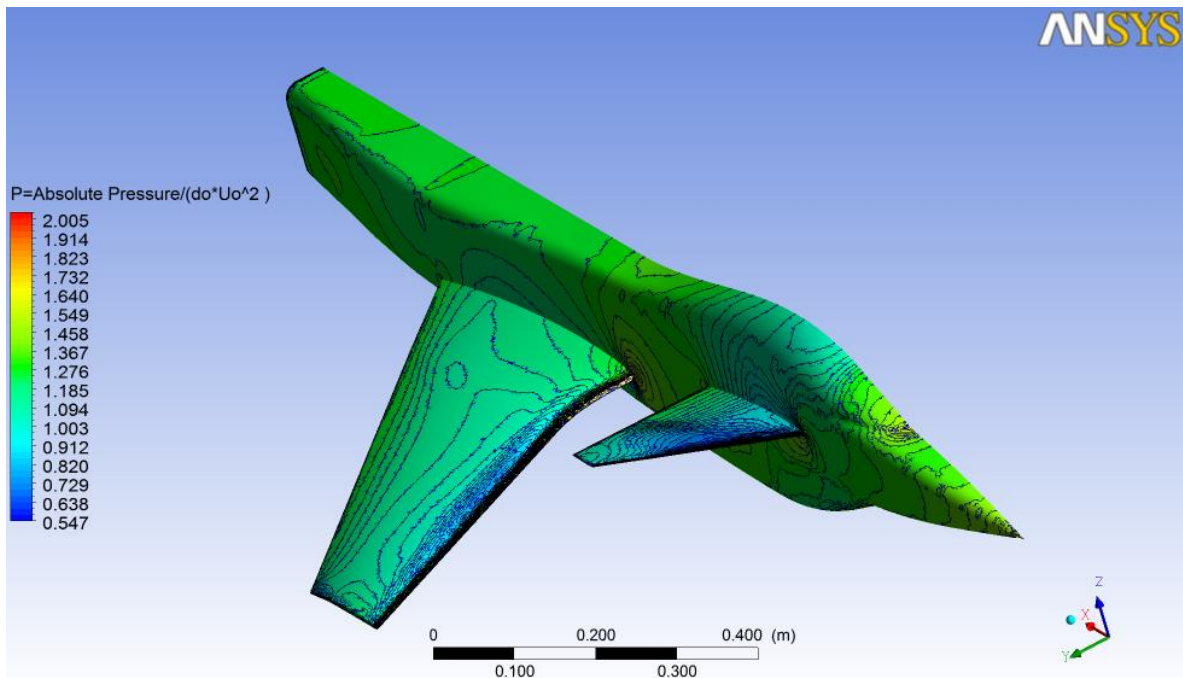


Εικόνα 3-9: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.5m$ για την Πτέρυγα

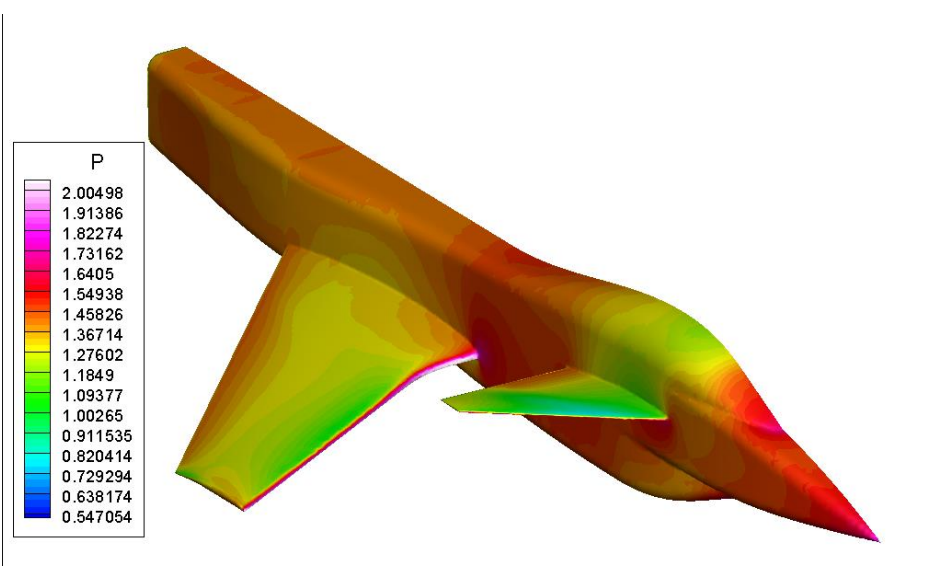
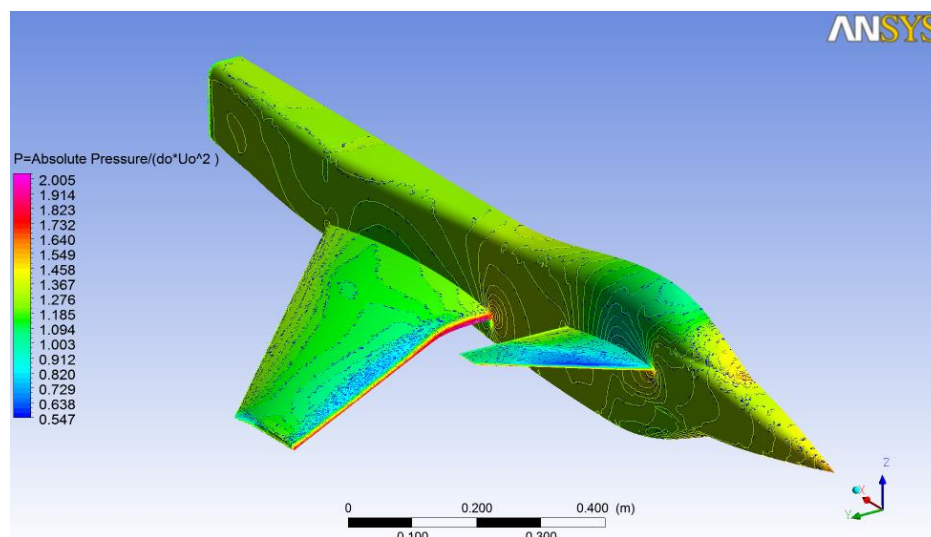


Εικόνα 3-10: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.25m$ για το Canard

Αποτελέσματα



Εικόνα 3-11: Dimensionless Pressure Contours πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου



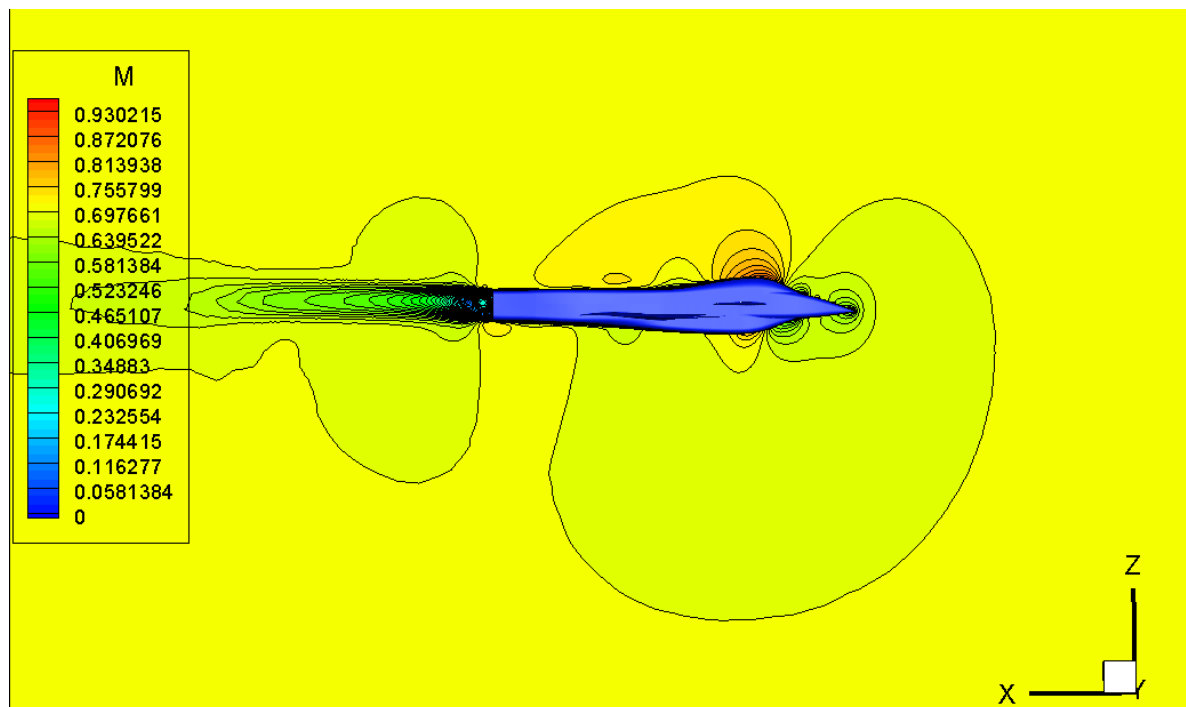
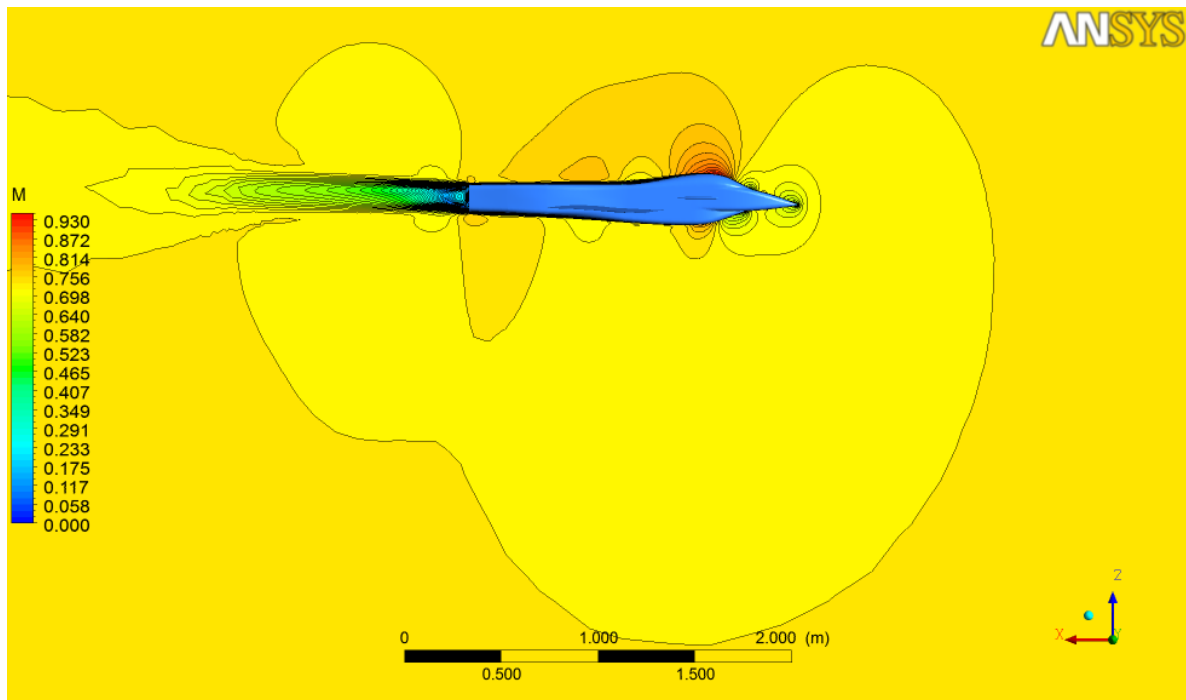
Εικόνα 3-12: Dimensionless Pressure Contours πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου

Παρατηρώντας τα παραπάνω Contours διαπιστώνεται ότι το σχήμα αλλά και το ύψος των αντίστοιχων ισοϋψών καμπυλών σχεδόν ταυτίζεται μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο κωδίκων. Λαμβάνοντας υπόψιν την διαφοροποίηση των χρωματικών επιπέδων ανάμεσα στα δύο λογισμικά προβολής των αποτελεσμάτων, επιβεβαιώνεται και οπτικά το γεγονός ότι η απόκλιση των αποτελεσμάτων κυμαίνεται στο 0,1 της μονάδας στην κλίμακα του εκάστοτε αδιάστατου μεγέθους. Τέλος, όσον αφορά στα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του μοντέλου στην παρούσα γεωμετρία, παρατηρείται ότι η ροή παραμένει σε υποηχητικές τιμές ταχύτητας για τις συγκριμένες οριακές συνθήκες γύρω από όλη την επιφάνεια (διηχητικές τιμές εμφανίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές).

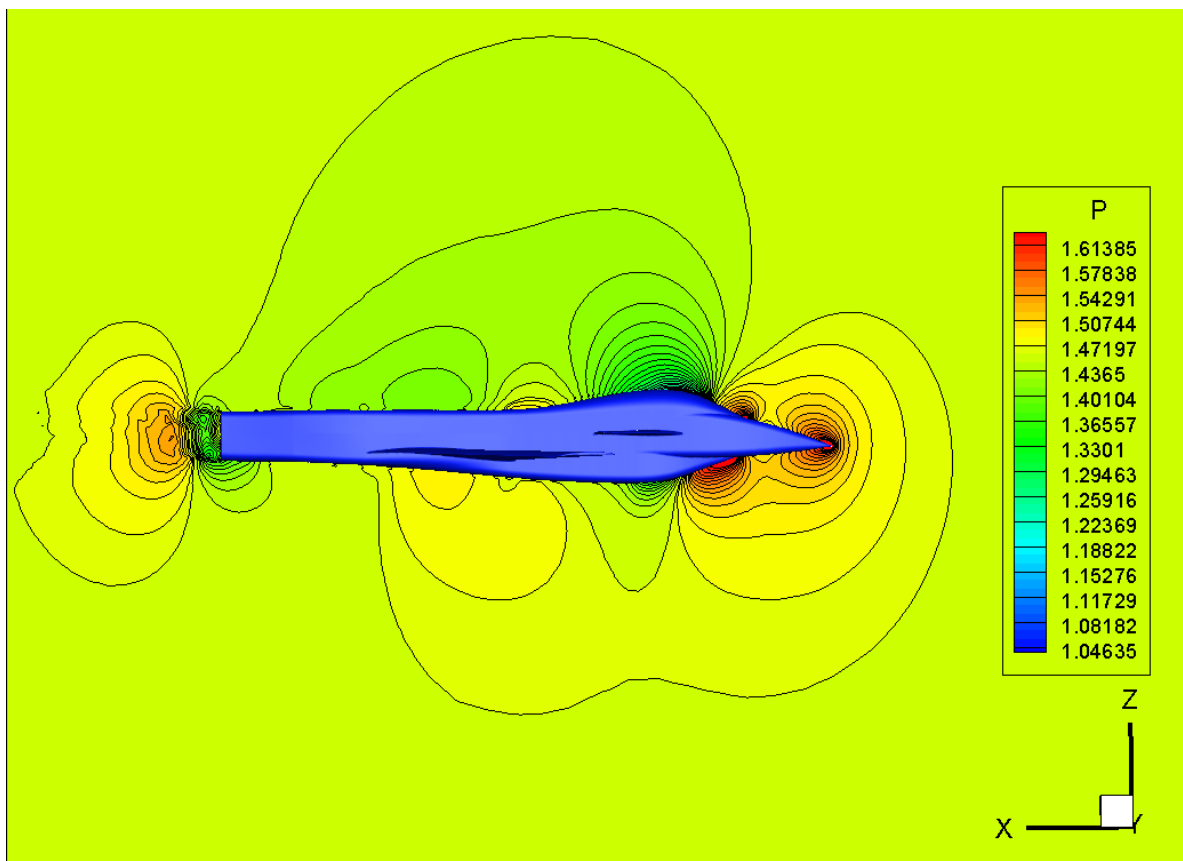
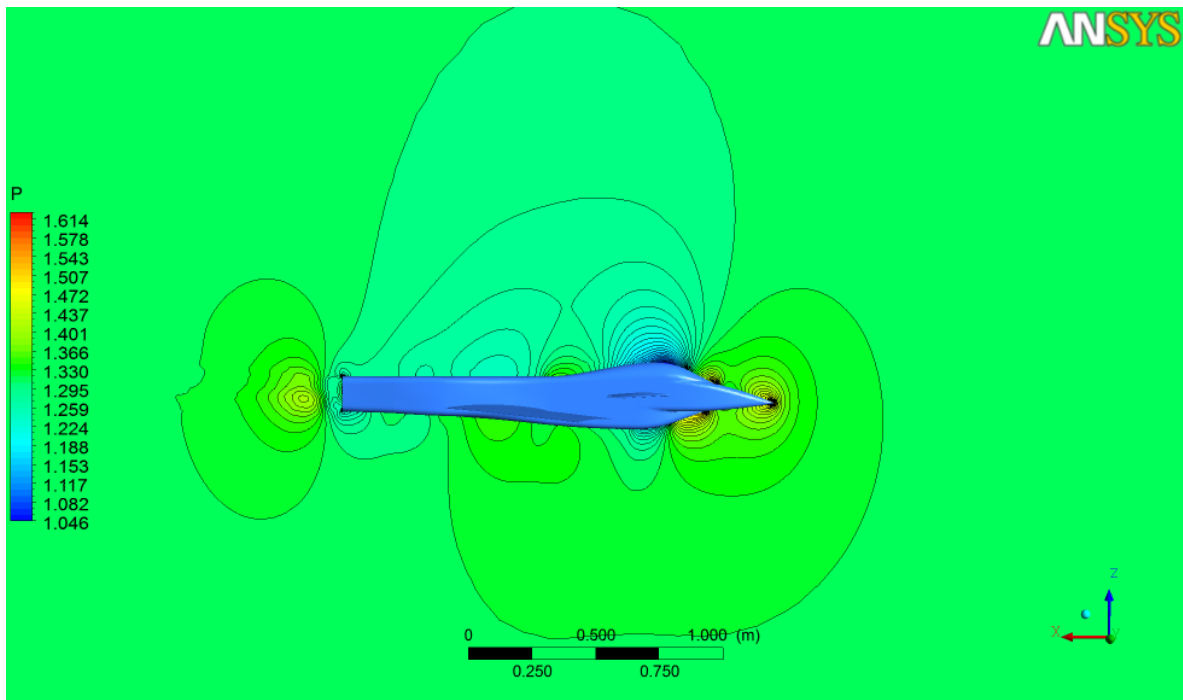
Αποτελέσματα

Contours ANSYS-Galatea για την γεωμετρία Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία 0°

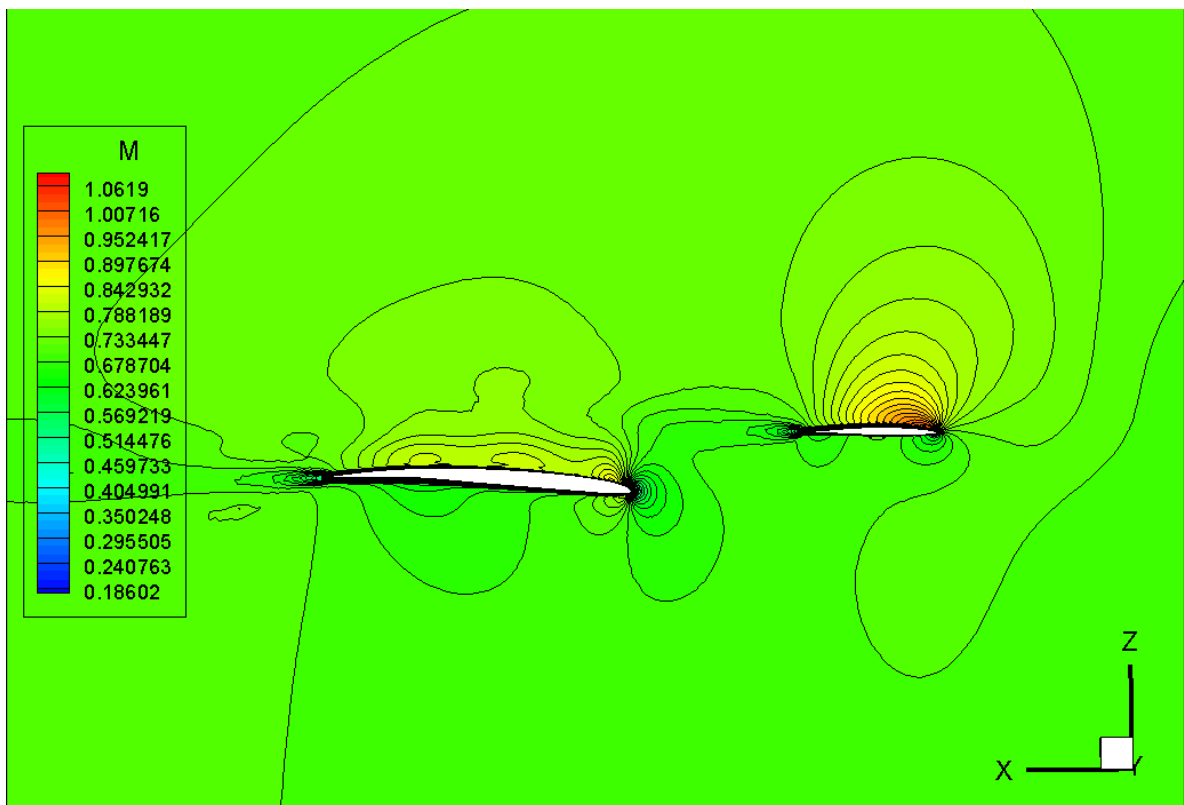
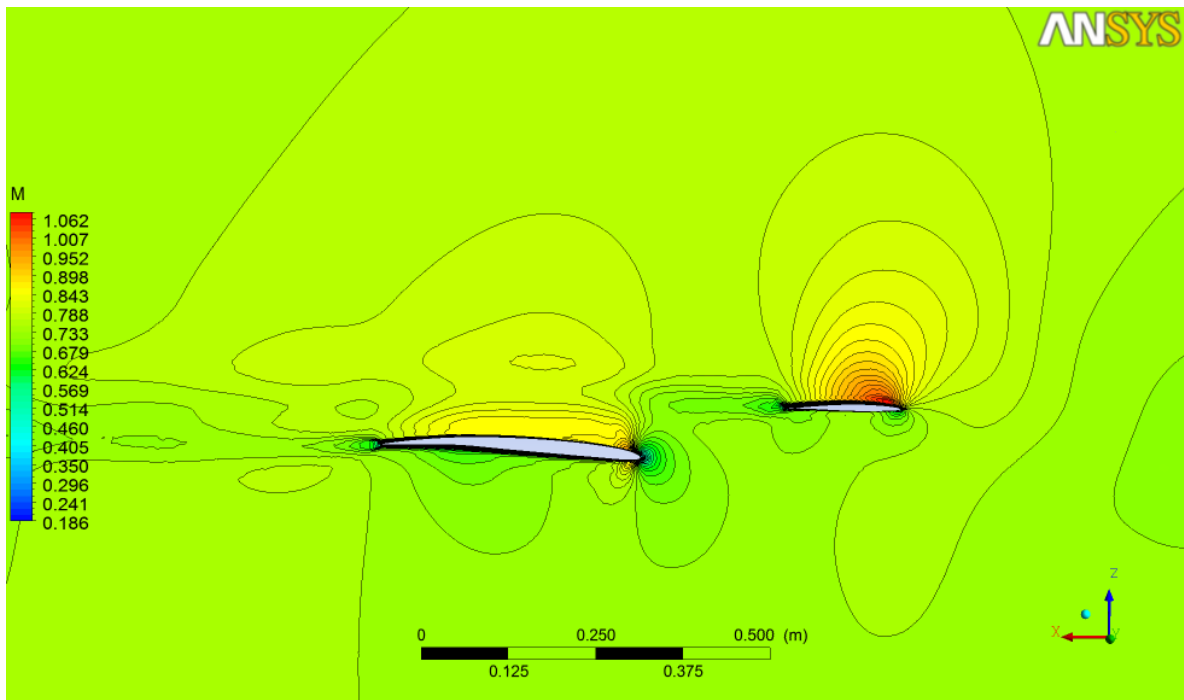
Αντίστοιχη ταύτιση και ιδίου μεγέθους αποκλίσεις αποτελεσμάτων παρατηρούνται και στην περίπτωση της εν λόγω γεωμετρίας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι εμφανής η μη επαρκής σύγκλιση του κώδικα Galatea γύρω από την πτέρυγα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω στην περίπτωση των γραφημάτων Cr-X (Εικόνες 3-15 και 3-17). Σημειώνεται ότι και σε αυτή τη γεωμετρία η ροή παραμένει σε υποηχητικές τιμές ταχύτητας για τις συγκεκριμένες οριακές συνθήκες γύρω από όλη την επιφάνεια του μοντέλου.



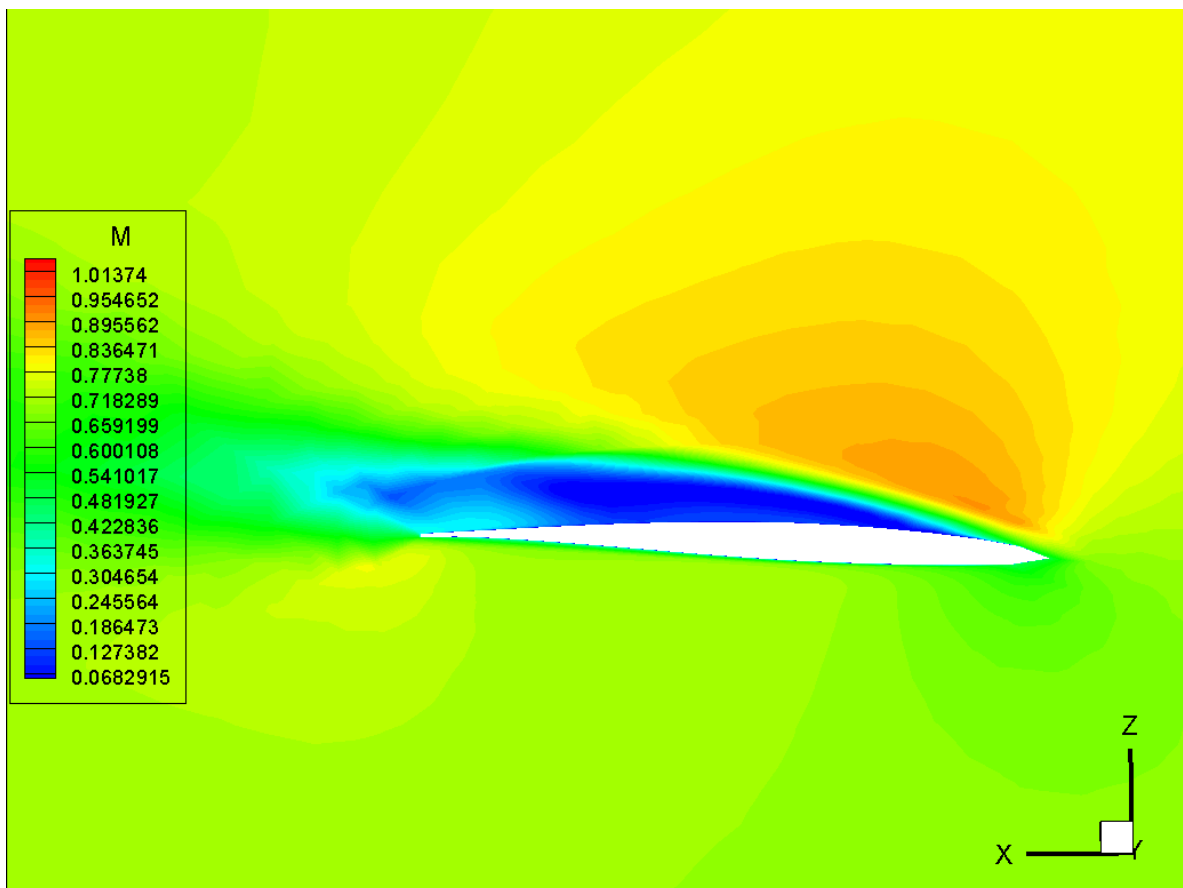
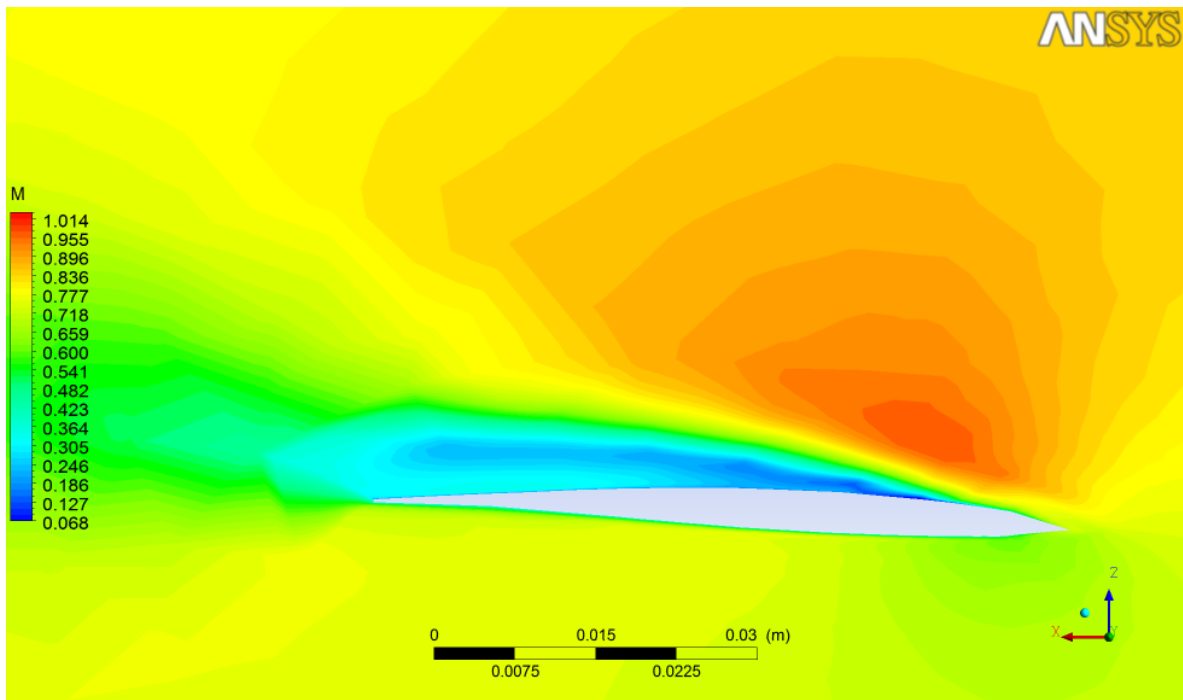
Εικόνα 3-13: Mach Number Contours στο επίπεδο συμμετρίας (πάνω: Ansys, κάτω: Galatea)



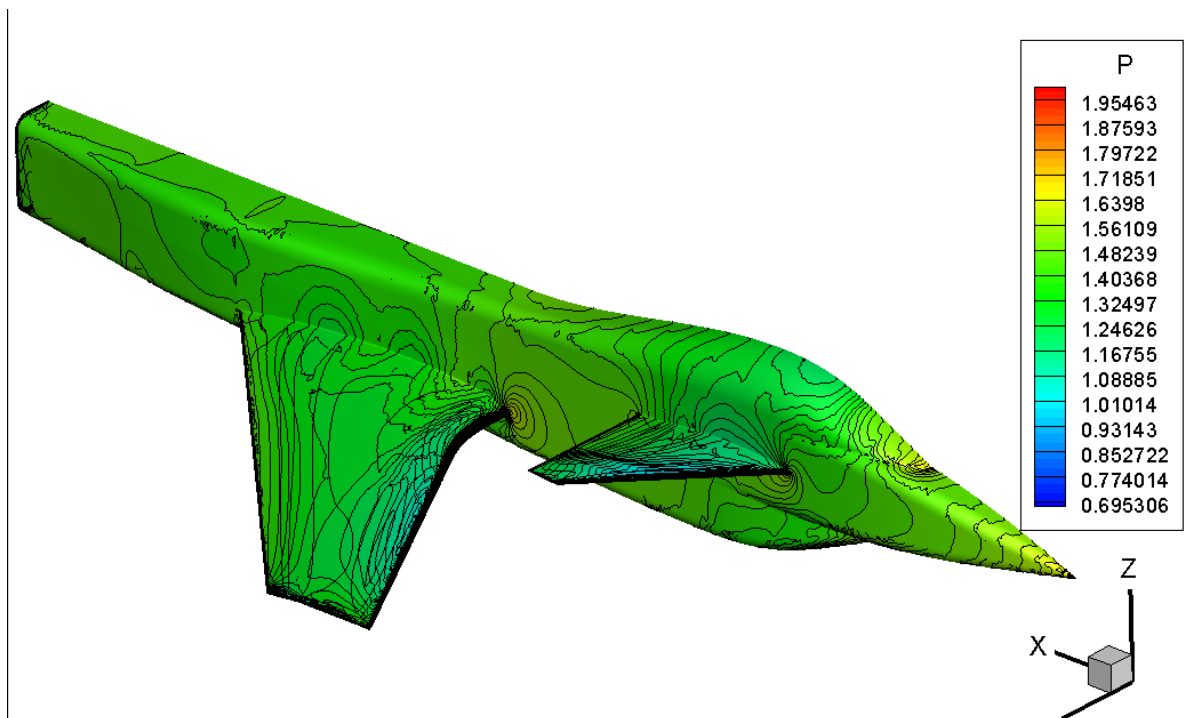
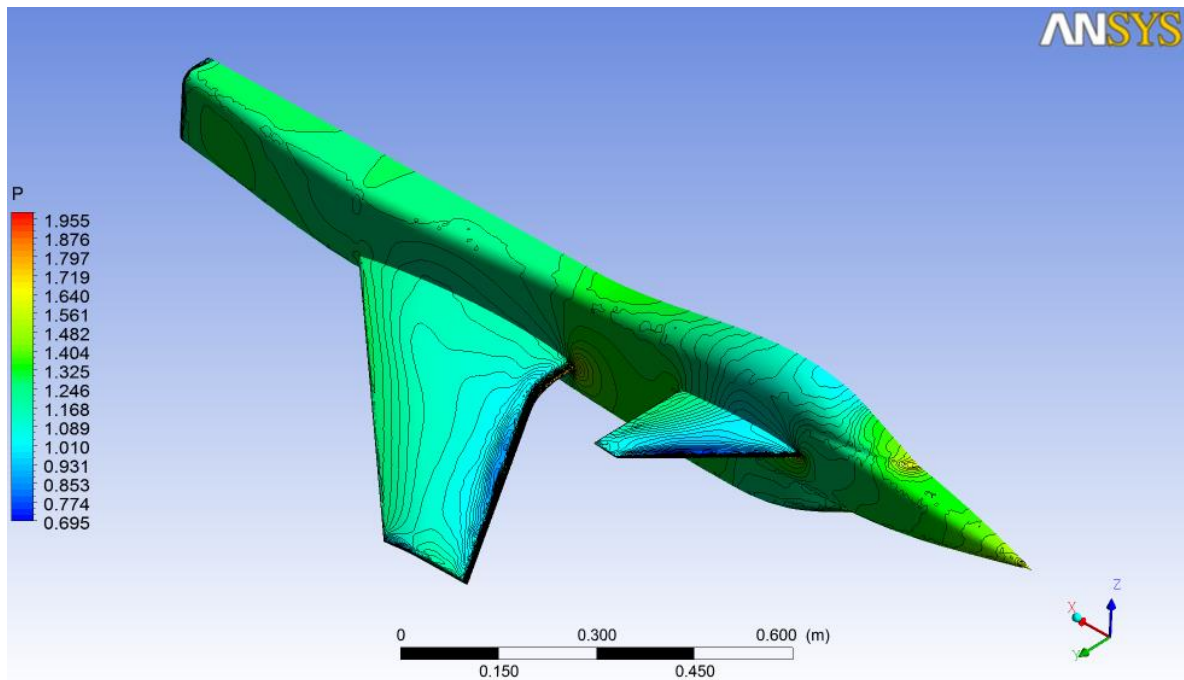
Εικόνα 3-14: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο συμμετρίας



Εικόνα 3-15: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.15m$



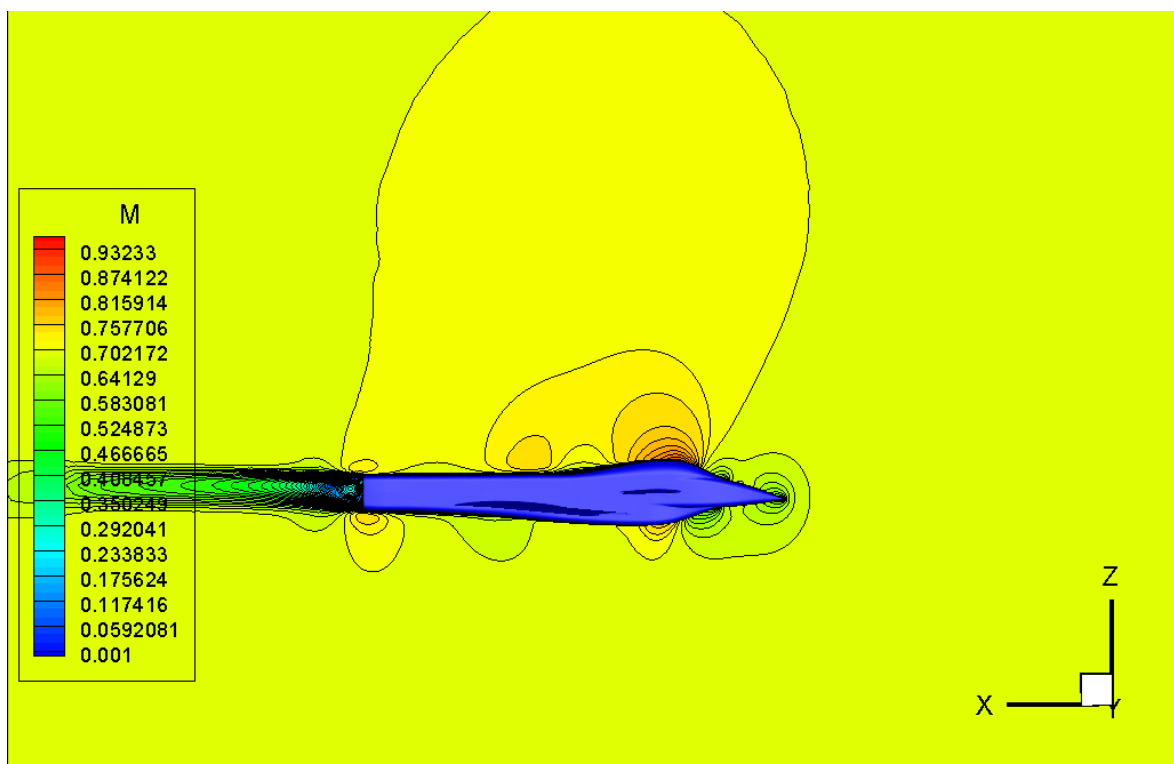
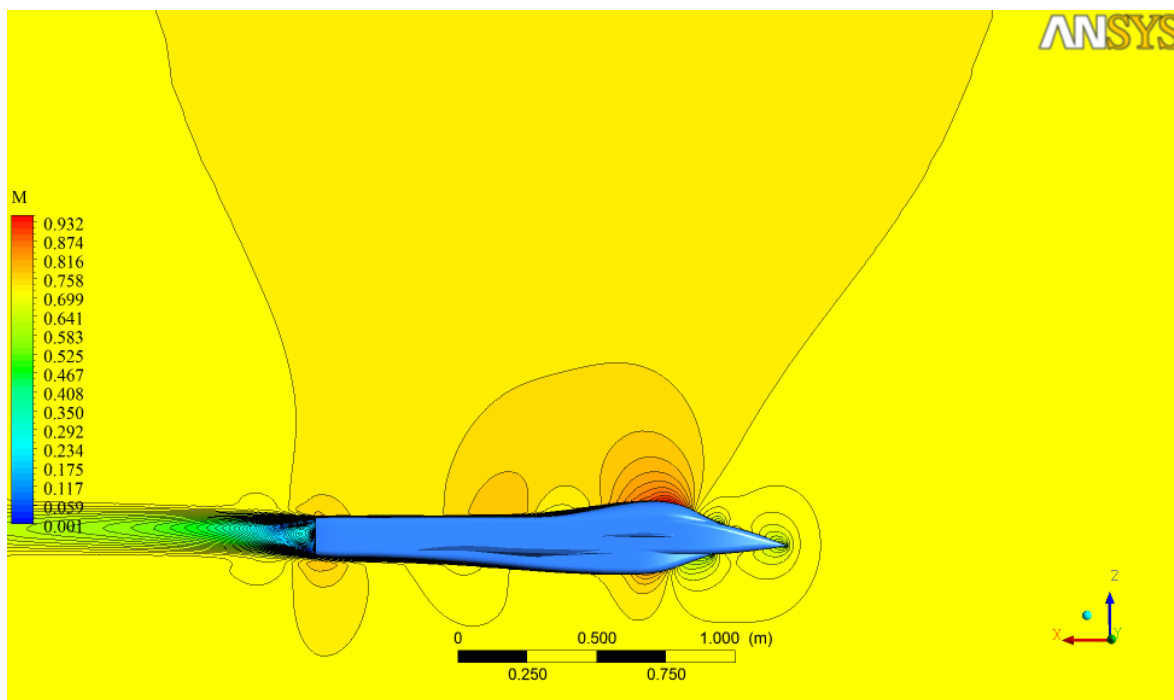
Εικόνα 3-16: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.25m$ για το Canard



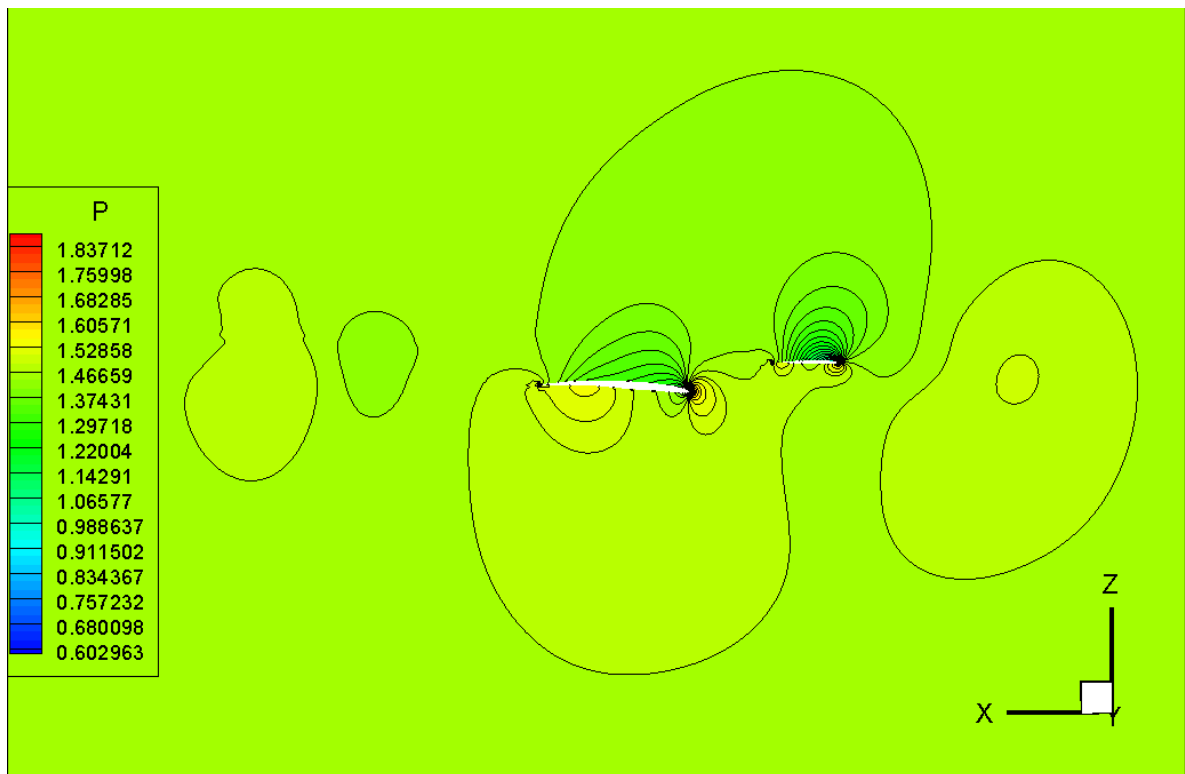
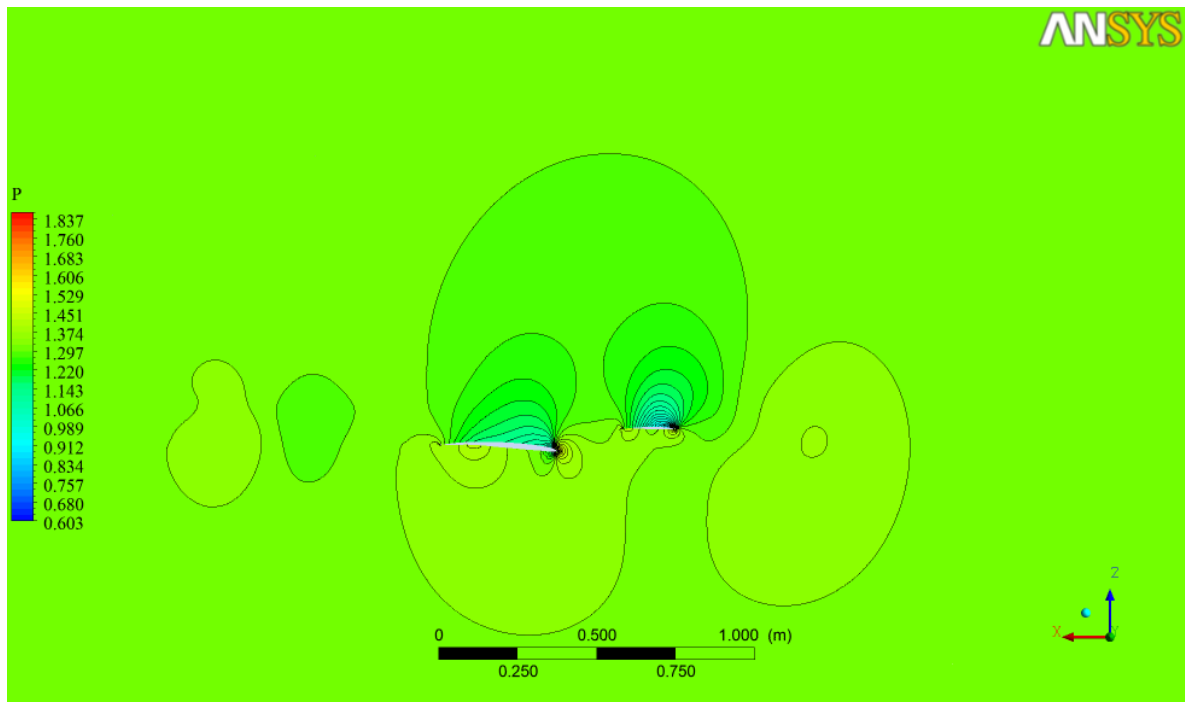
Εικόνα 3-17: Dimensionless Pressure Contours πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου

Contours ANSYS-Galatea για την γεωμετρία Μη Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία 0°

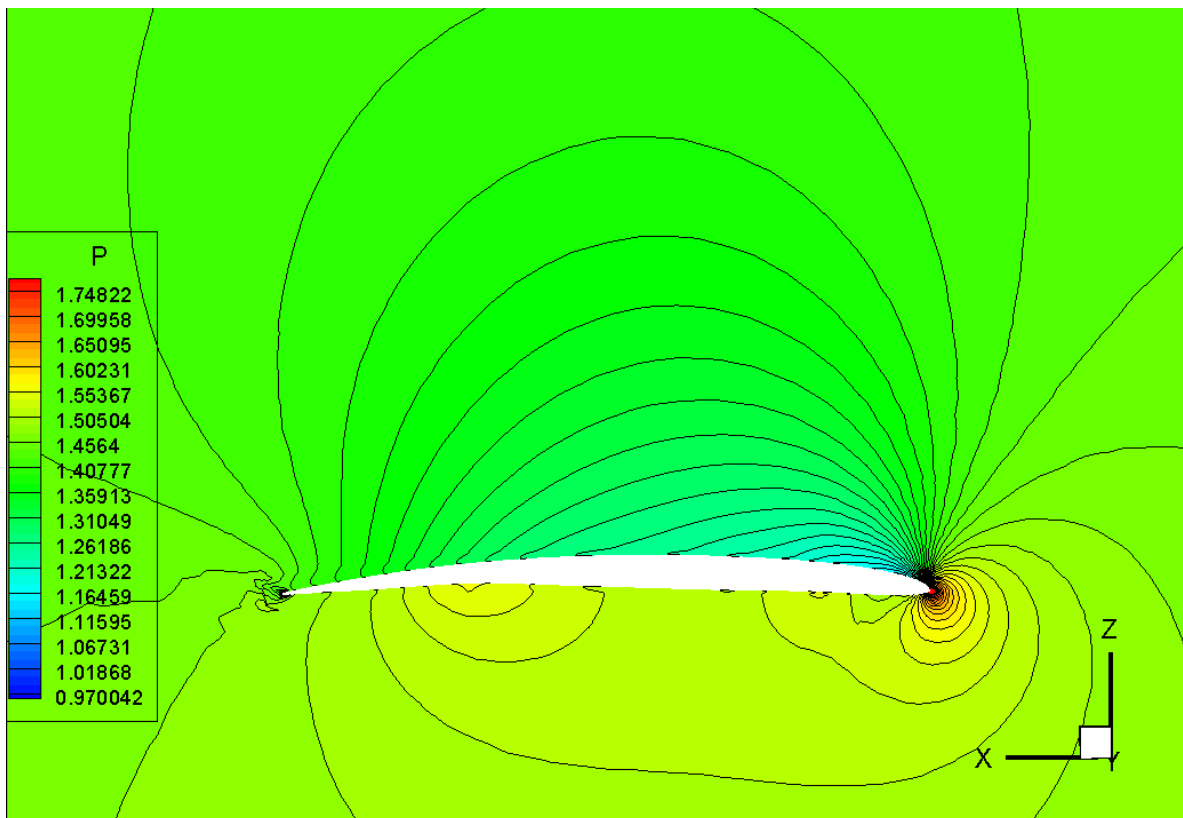
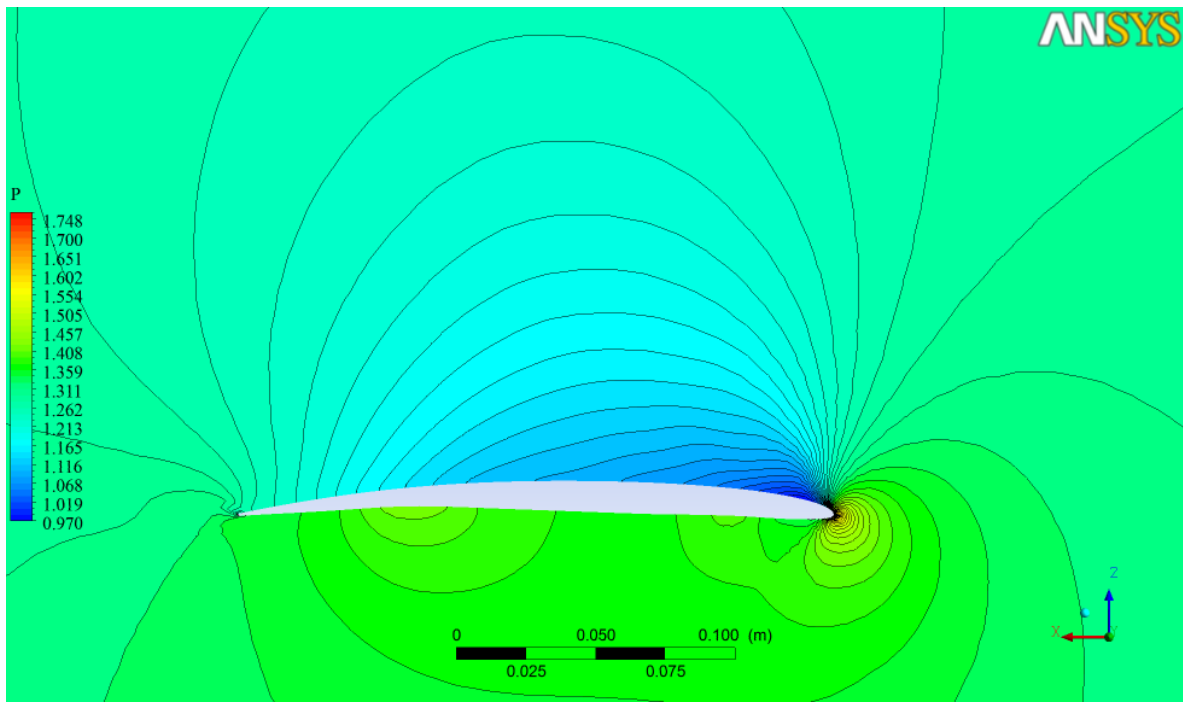
Στην εν λόγω γεωμετρία διαπιστώνεται ελαφρώς καλύτερη σύγκλιση αποτελεσμάτων, όπως παρουσιάζεται από τα Contours που ακολουθούν, αλλά και από τα γραφήματα Cr-X που προηγήθηκαν.



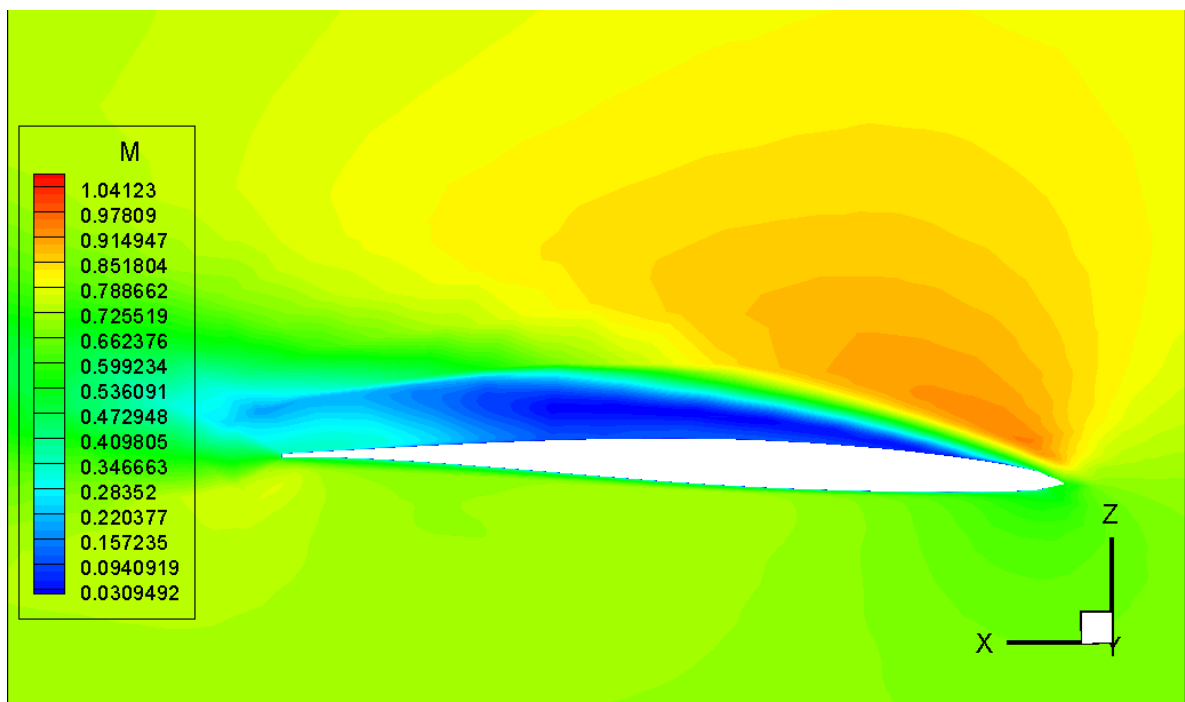
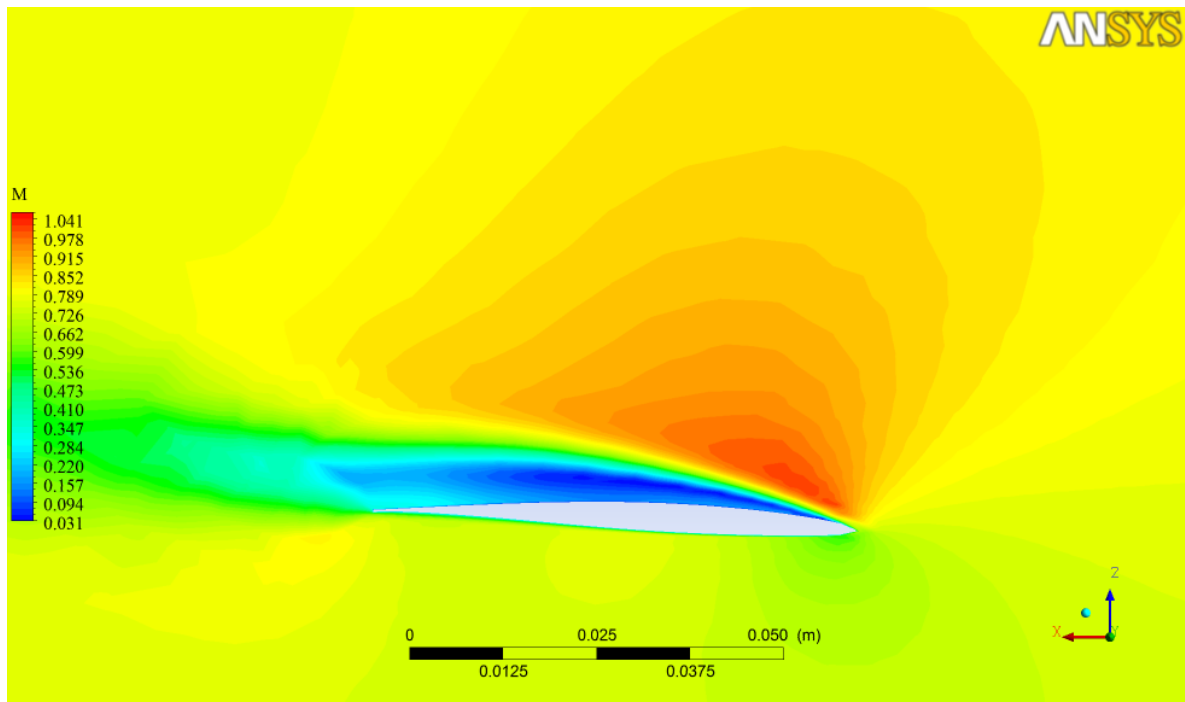
Εικόνα 3-18: Mach Number Contours στο επίπεδο συμμετρίας



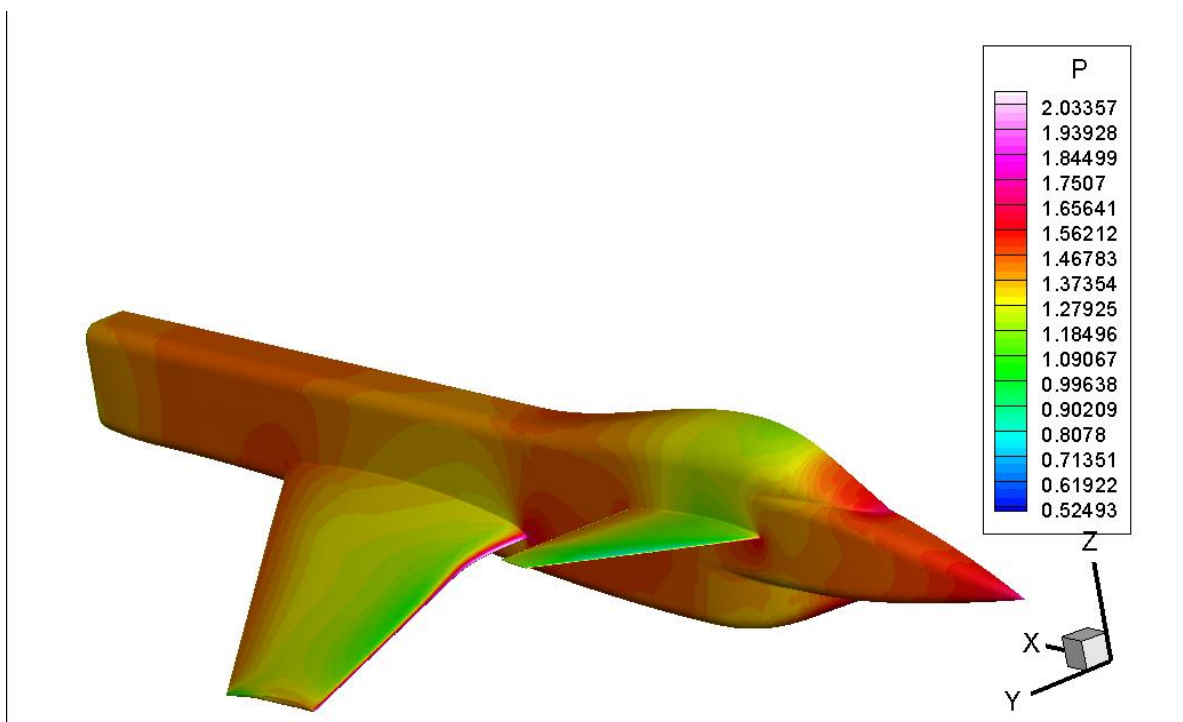
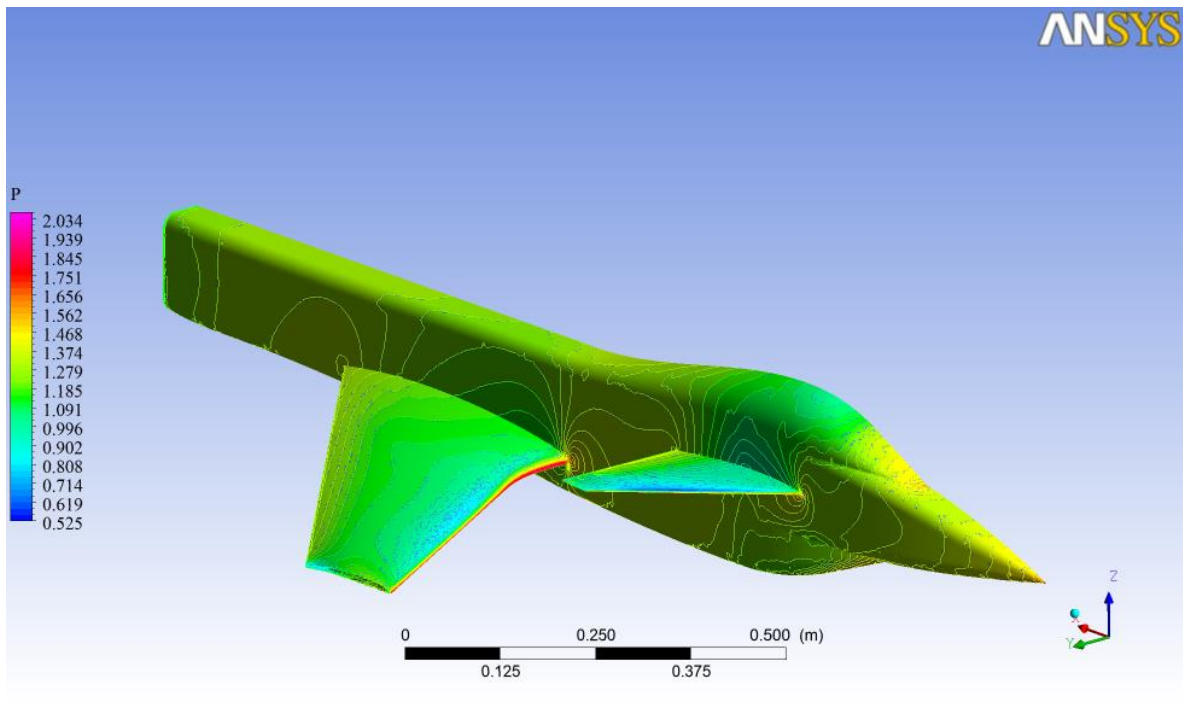
Εικόνα 3-19: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο $Y=0.15m$



Εικόνα 3-20: Dimensionless Pressure Contours στο επίπεδο $Y=0.5m$ για την Πτέρυγα



Εικόνα 3-21: Mach Number Contours στο επίπεδο $Y=0.25m$ για το Canard



Εικόνα 3-22: Dimensionless Pressure Contours πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας της παρατηρήσεις από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, όπως εξήχθησαν και παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία (προηγούμενο κεφάλαιο καθώς επίσης και Παράρτημα Γ), δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης και πιστοποίησης του εργαστηριακού κώδικα Galatea, που αποτελεί και τον κύριο στόχο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, πιστοποιήθηκε η μεγάλη συσχέτιση μεταξύ της πυκνότητας του χρησιμοποιούμενου πλέγματος και της απόκλισης των αποτελεσμάτων των δυο κωδίκων (λόγω μη ύπαρξης πειραματικών δεδομένων τα αποτελέσματα του ενός αποτελούν σημείο αναφοράς για τον άλλο). Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω της αύξησης του πλήθους των βαθμών ελευθερίας του πλέγματος (υπολογιστικών κόμβων) και κατ' επέκταση της αύξησης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Η συσχέτιση αυτή επιβεβαιώνεται από τα γραφήματα Cr-X, τους Συντελεστές Άνωσης και Οπισθέλκουσας καθώς και από τα Contours για διαφορετικής πυκνότητας συγκρίσεις πλεγμάτων.

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι οι αποκλίσεις των γραφημάτων Cr-X παρουσιάζονται για τα ίδια διαστήματα X κατά μήκος των αντίστοιχων τομών σε όλες τις γεωμετρίες του μοντέλου (Κρίσιμα Σημεία). Εντοπίζοντας την θέση των εν λόγω διαστημάτων πάνω στην επιφάνεια του μοντέλου (Εικόνα 3-2) διαπιστώνεται ότι πρόκειται για επιφάνειες με αυξημένη γεωμετρική πολυπλοκότητα, οι οποίες κατ' επέκταση αυξάνουν τοπικά την πολυπλοκότητα της ροής. Στις ίδιες θέσεις εμφανίζονται οι μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις στα γραφήματα Cr του Παραρτήματος Γ και είναι κατά κανόνα οι μοναδικές που διαφέρουν από τα αποτελέσματα του λογισμικού ANSYS CFX. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι απαιτείται βελτίωση του πλέγματος στα σημεία αυτά, ήτοι τοπική αύξηση της πυκνότητας και δημιουργία πιο ομοιόμορφων στοιχείων. Επιπρόσθετα, επικεντρώνοντας την προσοχή στα αποτελέσματα της γεωμετρίας Μη Διογκωμένης Ατράκτου με Canard σε γωνία 0°, παρατηρούνται μικρότερες αποκλίσεις μεταξύ των εξεταζόμενων λογισμικών. Δεδομένου ότι η γεωμετρία αυτή αποτελεί και την απλούστερη μορφή του μοντέλου M151/1, συμπεραίνεται ότι οι μικρές σχετικά αποκλίσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο κωδίκων και οι οποίες αποδίδονται κατά κύριο λόγο στη διαφορετική μεθοδολογία επίλυσης που ακολουθούν, π.χ., pressure-based για το ANSYS CFX και density-based για το Galatea, αυξάνουν στις περιοχές πολύπλοκης γεωμετρίας με μη καλοσχηματισμένο πλέγμα. Ως εκ τούτου, οι εν λόγω διαφοροποιήσεις δύνανται να αποδοθούν περισσότερο στη γεωμετρία και τη δομή του πλέγματος και λιγότερο στην πραγματική απόκλιση των υπολογισμών και στην ακρίβεια αυτών.

Ωστόσο, στα γραφήματα Cr του Παραρτήματος Γ για τον κώδικα Galatea παρατηρούνται πιο έντονες μεταβολές του Cr κατά την πύκνωση των πλεγμάτων για τις ίδιες γεωμετρίες σε αντίθεση με αυτές του ANSYS CFX όπου περιορίζονται μόνο στα Κρίσιμα Σημεία. Ως εκ τούτου, υποδηλώνεται η μεγαλύτερη ευαισθησία της αριθμητικής μεθοδολογίας που χρησιμοποιεί ο κώδικας Galatea στην πυκνότητα του εξεταζόμενου πλέγματος, συγκρινόμενης με αυτής του εμπορικού λογισμικού.

Εν κατακλείδι, λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω συμπεράσματα διαπιστώνεται ότι ο κώδικας Galatea προσφέρει την δυνατότητα ποιοτικών αποτελεσμάτων μεγάλης ακρίβειας

συγκρίνοντάς τον με έναν από τους πιο πολυχρησιμοποιημένους και διαδεδομένους εμπορικούς κώδικες στον τομέα του CFD, τον ANSYS CFX. Για τη διεκπεραίωση ωστόσο ακριβέστερων συγκρίσεων ως προς την συγκεκριμένη Test Case που εφαρμόστηκε απαιτείται αποδέσμευση και χρήση των πειραματικών δεδομένων, κάτι που όπως προαναφέρθηκε δεν κατέστη δυνατό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

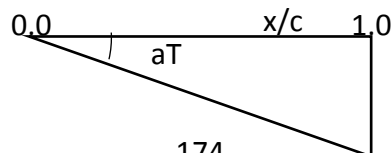
- Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Van Wachem, B. (2012). *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge University Press.
- ANSYS, I. (2009). *CFX-Solver Manager User's Guide*.
- ANSYS, I. (2013). *ANSYS CFD-Post User's Guide*.
- ANSYS, I. (2013). *ANSYS CFX Introduction*.
- ANSYS, I. (2013). *ANSYS CFX-Pre User's Guide*.
- ANSYS, I. (2013). *ANSYS Meshing User's Guide*.
- ANSYS, I. (2013). *Design Modeler User's Guide*.
- ANSYS, I. (2013). *Solver Theory Guide*.
- Blazek, J. (2001). *Computational Fluid Dynamics*. Elsevier.
- Chattot, J.-J. (2002). *Computational Aerodynamics and Fluid Dynamics_ An Introduction*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Dassault Systemes, & IBM. (2008). *CATIA V5 User Manual*.
- Lygidakis, G. N. (2015, March). On the Numerical Solution of Compressible Fluid Flow and Radiative Heat Transfer Problems. Chania.
- Malalasekera W., & Versteeg H. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics*. Pearson Ed.
- Oh, H. W. (2012). *Applied Computational Fluid Dynamics*. Rijeka: InTech .
- Stanniland, D. (1985). Investigation into the aerodynamic characteristics of a combat aircraft research model fitted with a forward swept wing. *AGARD-AR-303 Vol II*.
- www.ansys.com. (n.d.).
- Αδαμούδης, Λ. (2005). Επίλυση των εξισώσεων Euler σε τρεις διαστάσεις με χρήση μη δομημένου πλέγματος και εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων όγκων. Χανιά.
- Λυγιδάκης, Γ. (2009). Ανάπτυξη μεθοδολογίας αυτόματης πύκνωσης μη δομημένου πλέγματος κατά την αριθμητική επίλυση εξισώσεων Euler στις τρεις διαστάσεις. *Διπλωματική Εργασία*. Χανιά.
- Μπιλάλης, Ν., & Μαραβελάκης, Ε. (2009). *Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση*. Αθήνα: Εκδόσεις Κριτική ΑΕ.
- Παπαδόπουλος, Χ. (2004). Χαρακτηριστικά και Σύγχρονες Τάσεις στα Εργαλεία Παραμετρικού Σχεδιασμού, Παρουσίαση Πανεπιστημίου Πατρών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Πίνακας Α1: M151 section and twist definition

Table 1				Table 1 (contd)			
	Y = 0.000	21.429	60.000 cm		Y = 0.000	21.429	60.000 cm
aT=	-2.8	-3	2	aT=	-2.8	-3	2
x/c =	z/c =	z/c =	z/c =	x/c =	z/c =	z/c =	z/c =
0	0	0	0	0	0	0	0
0.002408	0.005839	0.006068	0.005492	0.002408	-0.00297	-0.00315	-0.0025
0.009607	0.011572	0.012115	0.011091	0.009607	-0.00555	-0.0055	-0.00445
0.02153	0.017091	0.018051	0.0168	0.02153	-0.00753	-0.00725	-0.00577
0.03806	0.02229	0.023616	0.0225	0.03806	-0.0089	-0.00835	-0.00631
0.05904	0.027103	0.02856	0.028069	0.05904	-0.00972	-0.00875	-0.00611
0.084265	0.03155	0.032954	0.033481	0.084265	-0.01004	-0.0086	-0.00507
0.113495	0.035734	0.036958	0.038736	0.113495	-0.00986	-0.00772	-0.00314
0.146447	0.039742	0.040586	0.043713	0.146447	-0.00918	-0.006	-0.00088
0.182804	0.043576	0.043759	0.048216	0.182804	-0.00801	-0.00485	0.000898
0.222215	0.047167	0.046465	0.052153	0.222215	-0.00631	-0.00386	0.002175
0.264302	0.050405	0.048719	0.055462	0.264302	-0.00401	-0.00291	0.003356
0.308659	0.053172	0.050493	0.058036	0.308659	-0.00106	-0.00174	0.004695
0.354858	0.055387	0.05173	0.059837	0.354858	0.002481	-0.00041	0.006285
0.402455	0.057	0.052393	0.060941	0.402455	0.006364	0.001005	0.008144
0.450992	0.057921	0.052489	0.061414	0.450992	0.010278	0.002501	0.010115
0.5	0.057986	0.052056	0.06119	0.5	0.013964	0.004188	0.011896
0.549009	0.057062	0.051103	0.060106	0.549009	0.017233	0.006196	0.013418
0.597545	0.055214	0.049566	0.058012	0.597545	0.020118	0.008494	0.014949
0.645142	0.052627	0.047347	0.054892	0.645142	0.022108	0.010638	0.016432
0.691342	0.049402	0.044393	0.050899	0.691342	0.022596	0.011782	0.017024
0.735699	0.044558	0.040725	0.046259	0.735699	0.021177	0.011317	0.015898
0.777785	0.041221	0.036451	0.041145	0.777785	0.018268	0.00951	0.013262
0.817197	0.036428	0.03175	0.035685	0.817197	0.014824	0.007235	0.010133
0.853553	0.031339	0.026837	0.030044	0.853553	0.011588	0.00519	0.007357
0.886505	0.026116	0.021947	0.024452	0.886505	0.00878	0.003566	0.005164
0.915735	0.02094	0.017294	0.019153	0.915735	0.006319	0.002253	0.003411
0.940961	0.016	0.013052	0.014348	0.940961	0.004106	0.001117	0.001922
0.96194	0.011505	0.009348	0.01018	0.96194	0.00213	0.00011	0.00063
0.97847	0.007654	0.006291	0.00676	0.97847	0.000449	-0.00075	-0.00045
0.990393	0.004466	0.003981	0.00419	0.990393	-0.00085	-0.00141	-0.00128
0.997592	0.002707	0.002518	0.002571	0.997592	-0.0017	-0.00184	-0.00181
1	0.002	0.002	0.002	1	-0.002	-0.002	-0.002

❖ **aT** is positive nose up and is applied as a shear relative to the wing leading edge



Πίνακας A2: Mathematical definition of wing

<u>LEADING EDGE</u>	
$0 \leq y \leq 6.50$	$X = 88.27$
$6.50 \leq y \leq 16.00$	$X = [(21.429 - y)(-0.000015848y^4 + 0.001339156y^2 + 88.24171) + (y - 6.50)(-0.021824598y^2 + 0.358008616y + 86.86503)] / 14.929$
$16.00 \leq y \leq 21.429$	$X = [(21.429 - y)(-0.030102543y^2 + 0.63168139y + 84.80175) + (y - 16.00)(-0.01516362y^2 + 0.07253242y + 89.92377)] / 5.429$
$21.429 \leq y \leq 60.00$	$X = 96.8769 - 0.57735y$
<u>TRAILING EDGE</u>	
	$X = 139.745 - 1.00592y$

❖ Dimensions in centimeters , model scale

Πίνακας A3: M151 Canard section definition

NACA 64206					
(Station and ordinates given in per cent of airfoil chord)					
Upper Surface			Lower Surface		
Station (X)		Ordinate (Z)	Station (X)		Ordinate (Z)
0		0	0		0
0.459		0.542	0.541		-0.442
0.704		0.664	0.796		-0.524
1.198		0.859	1.302		-0.645
2.44		1.208	2.56		-0.836
4.934		1.719	5.066		-1.087
7.432		2.115	7.568		-1.267
9.933		2.444	10.067		-1.41
14.937		2.97	15.063		-1.624
19.943		3.367	20.057		-1.775
24.952		3.667	25.048		-1.877
29.961		3.897	30.039		-1.935
34.971		4.011	35.029		-1.951
39.981		4.066	40.019		-1.924
44.991		4.014	45.009		-1.824
50		3.878	50		-1.672
55.008		3.67	54.992		-1.48
60.015		3.402	59.985		-1.26
65.02		3.08	64.98		-1.028
70.023		2.712	69.977		-0.799
75.025		2.307	74.975		-0.587
80.024		1.868	79.976		-0.401
85.02		1.41	84.98		-0.259
90.015		0.94	89.985		-0.187
95.007		0.473	94.993		-0.224
100		0	100		-0.5

Πίνακας A4: Mathematical definition of the fuselage

Fuselage Upper Surface	
$0.00 \leq x \leq 50.00$	$Z = [15449.898 - (x - 50.000)^2]^{1/2} - 117.7976$
$50.00 \leq x \leq 160.00$	$Z = 6.500$
$160.00 \leq x \leq 170.00$	$Z = 6.500 - 0.0050 (x - 160.000)$
Fuselage Lower Surface	
$0.00 \leq x \leq 35.00$	$Z = 198.6667 - [42298.778 - (x - 35.000)^2]^{1/2}$
$35.00 \leq x \leq 55.00$	$Z = -7.0000$
Fuselage Plan View- Parallel Bodyside	
$0.00 \leq x \leq 40.00$	$Y = [15958.492 - (x - 40.000)^2]^{1/2} - 119.8269$
$40.00 \leq x \leq 160.00$	$Y = 6.500$
$160.00 \leq x \leq 170.00$	$Y = 6.500 - 0.0050 (x - 160.000)^2$
Fuselage Plan View- Expanding Bodyside	
$88.2745 \leq x \leq 133.00$	$Y = -0.000079548 x^3 + 0.026403042 x^2 - 2.801815 x + 102.8050$
$133.00 \leq x \leq 170.00$	$Y = 0.000087201 x^3 - 0.040984257 x^2 + 6.274314 x - 304.607$
Fuselage Corner Radius	
$0.00 \leq x \leq 15.00$	$r = 4(x/15) - 2(x/15)^2$
$15.00 \leq x \leq 170.00$	$r = 2.00$
Canopy Upper Surface	
$23.75 \leq x \leq 34.00$	$Z = 0.50953 x - 8.4039$
$34.00 \leq x \leq 48.00$	$Z = 0.00035234 x^3 - 0.061535 x^2 + 3.472015 x - 51.8454$
$48.00 \leq x \leq 90.00$	$Z = 0.000148472 x^3 - 0.03073372 x^2 + 1.924198 x - 25.97085$
Canopy Plan View	
$23.75 \leq x \leq 45.00$	$Y = 6.500 [1 - (x - 45.000)^2/21.25^2]^{1/2}$
Canopy Section	
$23.75 \leq x \leq 48.00$	Ellipse with semi-axes (y_c , ($z_c - z_{FU}$)) [1]
$48.00 \leq x \leq 90.00$	Elliptic shoulder with semi-axes (r_y , r_z) with flat top [2]

	$r_y = [(90.000 - x)/42.000] (-0.002551020 x^2 + 0.244897959 x + 0.622448979) + [(x - 48.000)/42.000] (0.002551020 x^2 - 0.459183673 x + 22.66326530)$
	$r_z = [(90.000 - x)/42.000] (-0.001993254 x^2 + 0.191352381 x + 0.923642857) + [(x - 48.000)/42.000] (0.001993254 x^2 - 0.358785714 x + 18.14535714)$
Intake Lower Surface	
$26.77 \leq x \leq 40.00$	$Z = -0.36397 x + 2.9088$
$40.00 \leq x \leq 55.00$	$Z = -0.0002233 x^3 + 0.04395311 x^2 - 2.80836111 x + 44.6539$
$55.00 \leq x \leq 100.00$	$Z = -0.00000835 x^3 + 0.00310815 x^2 - 0.2661593 x - 7.3749$
$100.00 \leq x \leq 160.00$	$Z = -0.000005572 x^3 + 0.001297561 x^2 + 0.012709937 x - 19.9305$
$160.00 \leq x \leq 170.00$	$Z = -7.50000 + 0.0050 (x - 160.000)^2$
Intake Plan View	
$26.77 \leq x \leq 55.00$	$Y = [4167.029 - (x - 55.000)^2]^{1/2} - 58.0525$
Intake Corner Radius	
$26.77 \leq x \leq 40.00$	$r = 4((x - 26.77)/13.23) - 2((x - 26.77)/13.23)^2$

❖ Dimensions in centimeters , model scale

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΠΙΝΑΚΕΣ ΟΡΙΣΜΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΩΝ

Πίνακας Β1: Ορίσματα πλεγμάτων γεωμετρίας διογκωμένης ατράκτου με Canard σε γωνία -3°

<i>Expanding -3</i>				
<u>Defaults Group</u>	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Physics Preference	CFD	CFD	CFD	CFD
Solver Preference	CFX	CFX	CFX	CFX
Relevance	0	0	0	0
<u>Sizing Group</u>				
Use Advanced Size Function	On: Curvature	On: Curvature	On: Curvature	On: Curvature
Relevance Center	Coarse	Coarse	Coarse	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly	Active Assembly	Active Assembly	Active Assembly
Smoothing	Medium	Medium	Medium	Medium
Transition	Slow	Slow	Slow	Slow
Span Angle Center	Fine	Fine	Fine	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18.0°)	Default (18.0°)	Default (18.0°)	Default (18.0°)
Min Size	5.00E-03	5.00E-03	5.00E-03	5.00E-03
Max Face Size	1.370 m	1.370 m	1.370 m	1.370 m
Max Size	Default (2.750 m)	Default (2.750 m)	Default (2.750 m)	Default (2.750 m)
Growth Rate	Default (1.20)	Default (1.20)	Default (1.20)	Default (1.20)
Minimum Edge Length	1.3636E-06	1.3636E-06	1.3636E-06	1.3636E-06
<u>Inflation Group</u>				
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Named Selection	All Faces in Chosen Named Selection	All Faces in Chosen Named Selection	All Faces in Chosen Named Selection
Named Selection	Airplane	Airplane	Airplane	Airplane
Inflation Option	First Layer Thickness	First Layer Thickness	First Layer Thickness	First Layer Thickness
First Layer Height	5.00E-05	2.50E-05	1.50E-05	1.20E-05
Maximum Layers	27	30	40	40
Growth Rate	1.15	1.15	1.13	1.13
Inflation Algorithm	Pre	Pre	Pre	Pre
View Advanced Options	Yes	Yes	Yes	Yes
Collision Avoidance	Layer Compression	Layer Compression	Layer Compression	Layer Compression
Fix First Layer	No	No	No	No
Gap Factor	0.5	0.5	0.5	0.5
Maximum Height over Base	1	1	1	1
Growth Rate Type	Geometric	Geometric	Geometric	Geometric
Maximum Angle	140.0°	140.0°	140.0°	140.0°
Fillet Ratio	1	1	1	1
Use Post Smoothing	Yes	Yes	Yes	Yes
Smoothing Iterations	5	5	5	5
<u>Advanced Group</u>				
Shape Checking	CFD	CFD	CFD	CFD
Element Midside Nodes	Dropped	Dropped	Dropped	Dropped
Number of Retries	0	0	0	0

Extra Retries For Assembly	Yes	Yes	Yes	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced	Dimensionally Reduced	Dimensionally Reduced	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled	Disabled	Disabled	Disabled
<u>Defeaturing Group</u>				
Pinch Tolerance	Default (4.5E-03 m)	Default (4.5E-03 m)	Default (4.5E-03 m)	Default (4.5E-03 m)
Generate Pinch on Refresh	No	No	No	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On	On	On	On
Defeaturing Tolerance	1.5E-03 m	1.5E-03 m	1.5E-03 m	1.5E-03 m
<u>Statistics Group</u>				
Nodes	2889446	3450348	4964957	7634480
Elements	14389941	17428781	23678642	39579955
Mesh Metric	None	None	None	None
<u>Local Sizing</u>				
Body Sizing	0.2	0.2	0.125	0.1
Body Sizing 2	1.30E-02	1.20E-02	1.10E-02	9.00E-03
Face Sizing (Airplane)	6.50E-03	6.50E-03	4.00E-03	3.50E-03
Face Sizing 2 (Center Fuselage)	4.00E-03	4.00E-03	3.00E-03	3.00E-03
Edge Sizing (T.E Canard)	4.00E-03	4.00E-03	3.00E-03	3.00E-03

Πίνακας Β2: Ορίσματα πλεγμάτων γεωμετρίας διογκωμένης ατράκτου με Canard σε γωνία 0°

<i>Expanding -Off</i>			
<u>Defaults Group</u>	Test 1	Test 2	Test 3
Physics Preference	CFD	CFD	CFD
Solver Preference	CFX	CFX	CFX
Relevance	0	0	0
<u>Sizing Group</u>			
Use Advanced Size Function	On: Curvature	On: Curvature	On: Curvature
Relevance Center	Coarse	Coarse	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly	Active Assembly	Active Assembly
Smoothing	Medium	Medium	Medium
Transition	Slow	Slow	Slow
Span Angle Center	Fine	Fine	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18.0°)	Default (18.0°)	Default (18.0°)
Min Size	5.00E-03	2.00E-03	3.00E-03
Max Face Size	Default (1.3750 m)	Default (1.3750 m)	Default (1.3750 m)
Max Size	Default (2.750 m)	Default (2.750 m)	Default (2.750 m)
Growth Rate	Default (1.20)	Default (1.20)	Default (1.20)
Minimum Edge Length	1.9866E-06	1.9866E-06	1.9866E-06
<u>Inflation Group</u>			
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Named Selection	All Faces in Chosen Named Selection	All Faces in Chosen Named Selection
Named Selection	Airplane	Airplane	Airplane
Inflation Option	First Layer Thickness	First Layer Thickness	First Layer Thickness
First Layer Height	5.00E-05	2.50E-05	1.00E-05
Maximum Layers	30	32	44
Growth Rate	1.15	1.15	1.11
Inflation Algorithm	Pre	Pre	Pre
View Advanced Options	Yes	Yes	Yes
Collision Avoidance	Layer Compression	Layer Compression	Layer Compression
Fix First Layer	No	No	No
Gap Factor	0.5	0.5	0.5
Maximum Height over Base	1	1.1	1
Growth Rate Type	Geometric	Geometric	Geometric
Maximum Angle	140.0°	140.0°	140.0°
Fillet Ratio	1	1	1
Use Post Smoothing	Yes	Yes	Yes
Smoothing Iterations	5	5	5
<u>Advanced Group</u>			
Shape Checking	CFD	CFD	CFD
Element Midside Nodes	Dropped	Dropped	Dropped
Number of Retries	0	0	0

Extra Retries For Assembly	Yes	Yes	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced	Dimensionally Reduced	Dimensionally Reduced
Mesh Morphing	Disabled	Disabled	Disabled
<u>Defeaturing Group</u>			
Pinch Tolerance	Default (4.5E-03 m)	Default (1.8E-03 m)	Default (2.7E-03 m)
Generate Pinch on Refresh	No	No	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On	On	On
Defeaturing Tolerance	1.5E-03 m	1.5E-03 m	1E-03 m
<u>Statistics Group</u>			
Nodes	2023372	3800602	5258044
Elements	9346383	16233314	13664163
Mesh Metric	None	None	None
<u>Local Sizing</u>			
Body Sizing	0.2	0.1	0.1
Body Sizing 2	1.28E-02	1.10E-02	2.00E-02
Face Sizing (Nose)	5.00E-03	4.00E-03	2.00E-03
Face Sizing 2 (Wing)	5.00E-03	3.00E-03	2.00E-03
Edge Sizing (Front Canopy/Inlet)	5.00E-03	4.00E-03	1.50E-03
Edge Sizing2 (Top Canopy)	5.00E-03	4.00E-03	2.00E-03
Face Sizing 3 (Airplane)			3.00E-03

Πίνακας Β3: Ορίσματα πλεγμάτων γεωμετρίας μη διογκωμένης ατράκτου με Canard σε γωνία 0°

<i>Parallel - Off</i>			
<u>Defaults Group</u>	Test 1	Test 2	Test 3
Physics Preference	CFD	CFD	CFD
Solver Preference	CFX	CFX	CFX
Relevance	0	0	0
<u>Sizing Group</u>			
Use Advanced Size Function	On: Curvature	On: Curvature	On: Curvature
Relevance Center	Coarse	Coarse	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly	Active Assembly	Active Assembly
Smoothing	Medium	Medium	Medium
Transition	Slow	Slow	Slow
Span Angle Center	Fine	Fine	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18.0°)	Default (18.0°)	Default (18.0°)
Min Size	1.80E-03	1.80E-03	1.80E-03
Max Face Size	Default (1.3750 m)	Default (1.3750 m)	Default (1.3750 m)
Max Size	Default (2.750 m)	Default (2.750 m)	Default (2.750 m)
Growth Rate	Default (1.20)	Default (1.20)	Default (1.20)
Minimum Edge Length	1.4872E-05	1.4872E-05	1.4872E-05
<u>Inflation Group</u>			
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Named Selection	All Faces in Chosen Named Selection	All Faces in Chosen Named Selection
Named Selection	Airplane	Airplane	Airplane
Inflation Option	First Layer Thickness	First Layer Thickness	First Layer Thickness
First Layer Height	2.50E-05	5.00E-05	1.30E-05
Maximum Layers	30	25	38
Growth Rate	1.15	1.15	1.12
Inflation Algorithm	Pre	Pre	Pre
View Advanced Options	Yes	Yes	Yes
Collision Avoidance	Layer Compression	Layer Compression	Layer Compression
Fix First Layer	No	No	No
Gap Factor	0.5	0.5	0.5
Maximum Height over Base	1.1	1	1.1
Growth Rate Type	Geometric	Geometric	Geometric
Maximum Angle	140.0°	140.0°	140.0°
Fillet Ratio	1	1	1
Use Post Smoothing	Yes	Yes	Yes
Smoothing Iterations	5	5	5
<u>Advanced Group</u>			
Shape Checking	CFD	CFD	CFD
Element Midside Nodes	Dropped	Dropped	Dropped
Number of Retries	0	0	0
Extra Retries For Assembly	Yes	Yes	Yes
Rigid Body Behavior	Dimensionally Reduced	Dimensionally Reduced	Dimensionally Reduced

Mesh Morphing	Disabled	Disabled	Disabled
<u>Defeaturing Group</u>			
Pinch Tolerance	Default (1.62E-03 m)	Default (1.62E-03 m)	Default (1.62E-03 m)
Generate Pinch on Refresh	No	No	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On	On	On
Defeaturing Tolerance	3E-04 m	3E-04 m	3E-04 m
<u>Statistics Group</u>			
Nodes	4425228	3424320	5754348
Elements	20183642	16843379	23166477
Mesh Metric	None	None	None
<u>Local Sizing</u>			
Body Sizing	0.2	0.2	0.19
Body Sizing 2	1.30E-02	1.35E-02	1.30E-02
Face Sizing (Airplane)	6.00E-03	7.00E-03	4.00E-03
Face Sizing 2(Nose)	2.00E-03	3.00E-03	2.00E-03
Face Sizing 3 (Central Fuselage)	3.00E-03	4.50E-03	3.00E-03
Face Sizing 4 (Front Canopy/Inlet)	3.00E-03	4.00E-03	3.00E-03
Edge Sizing (Front Canopy/Inlet)	3.00E-03	4.00E-03	2.00E-03
Edge Sizing (Canard/Wing)	4.00E-03	4.00E-03	3.00E-03

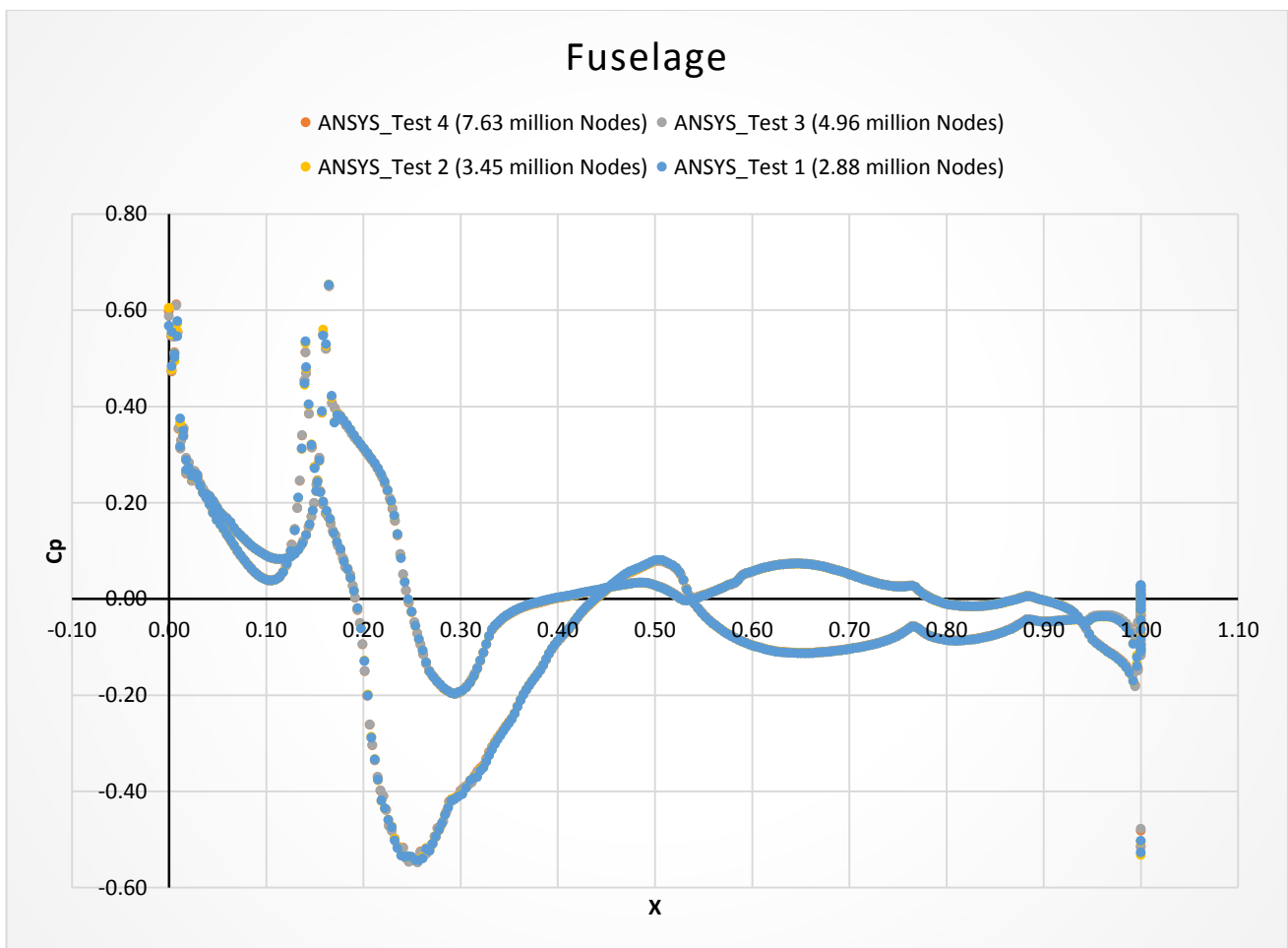
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Γραφήματα Συντελεστή Πίεσης C_p

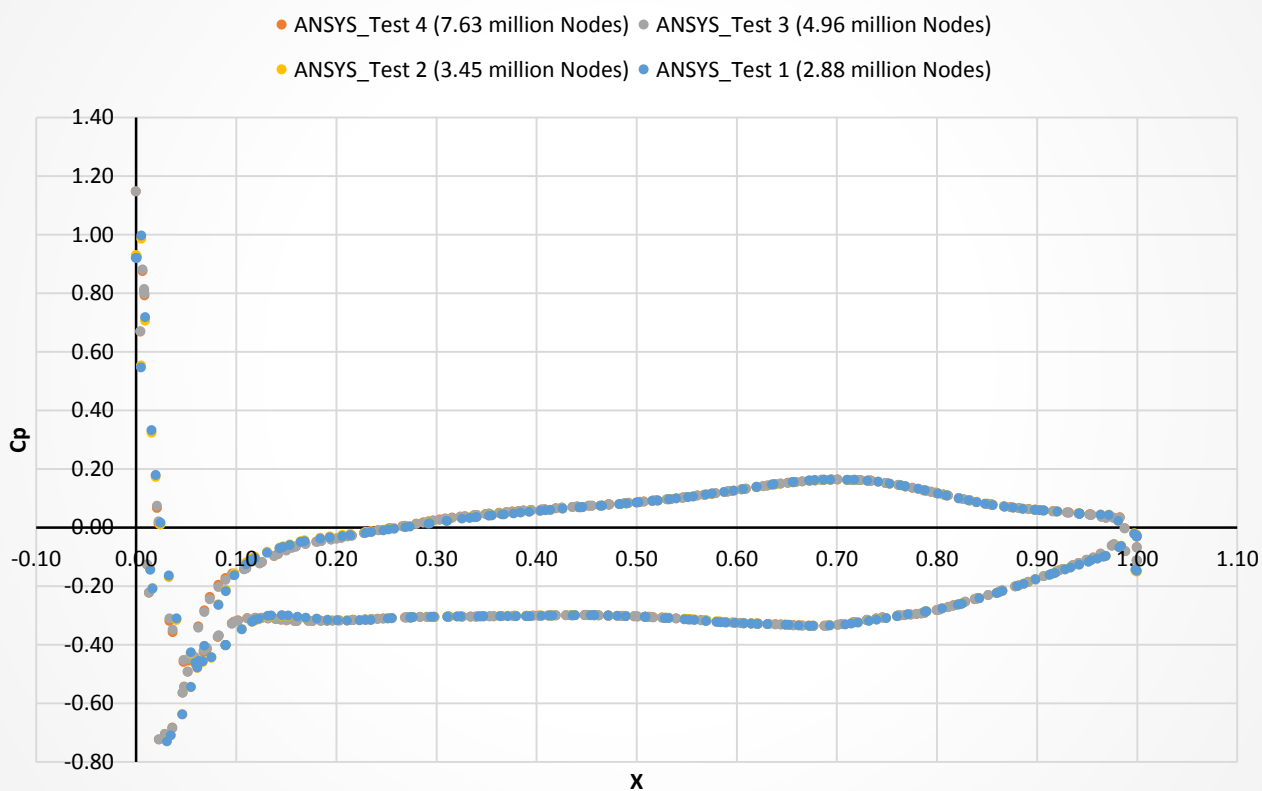
Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα γραφήματα C_p ανά κώδικα CFD και γεωμετρία μοντέλου για διάφορα επίπεδα πυκνότητας πλέγματος.

ANSYS

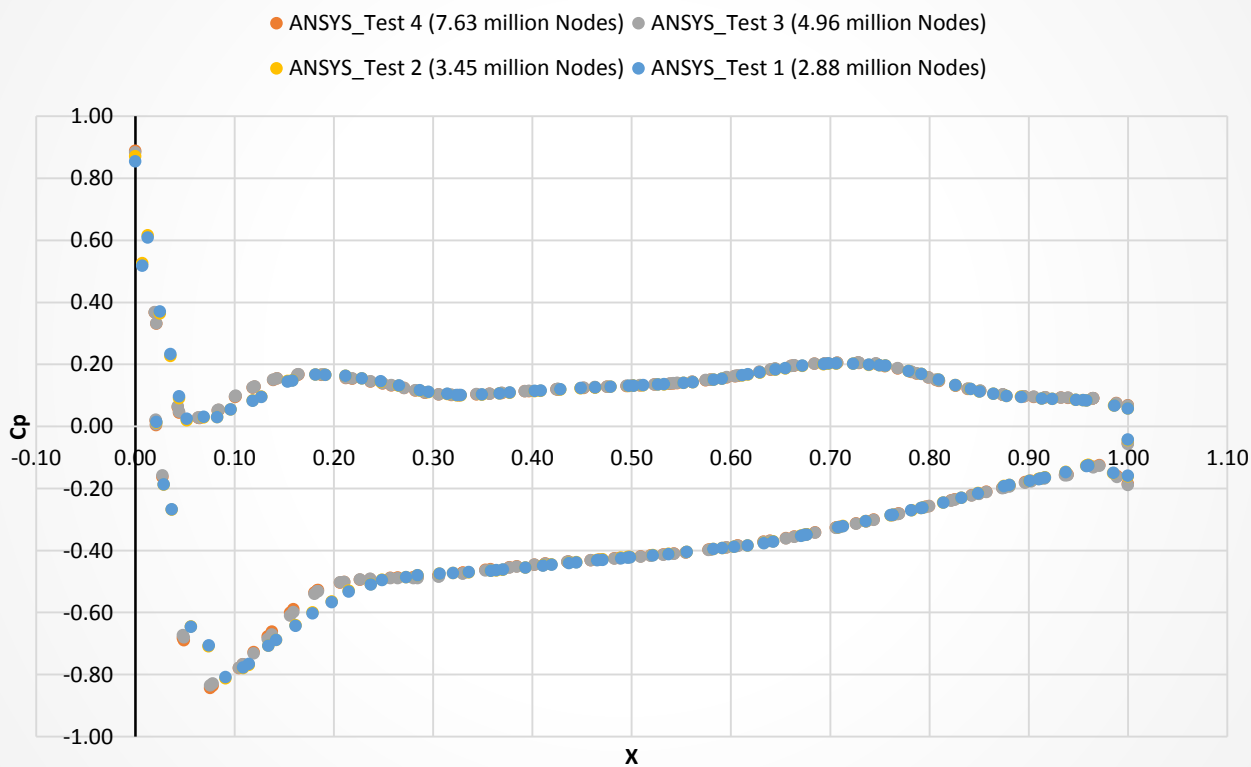
Διογκωμένη Άτρακτος με Canard σε γωνία -3°



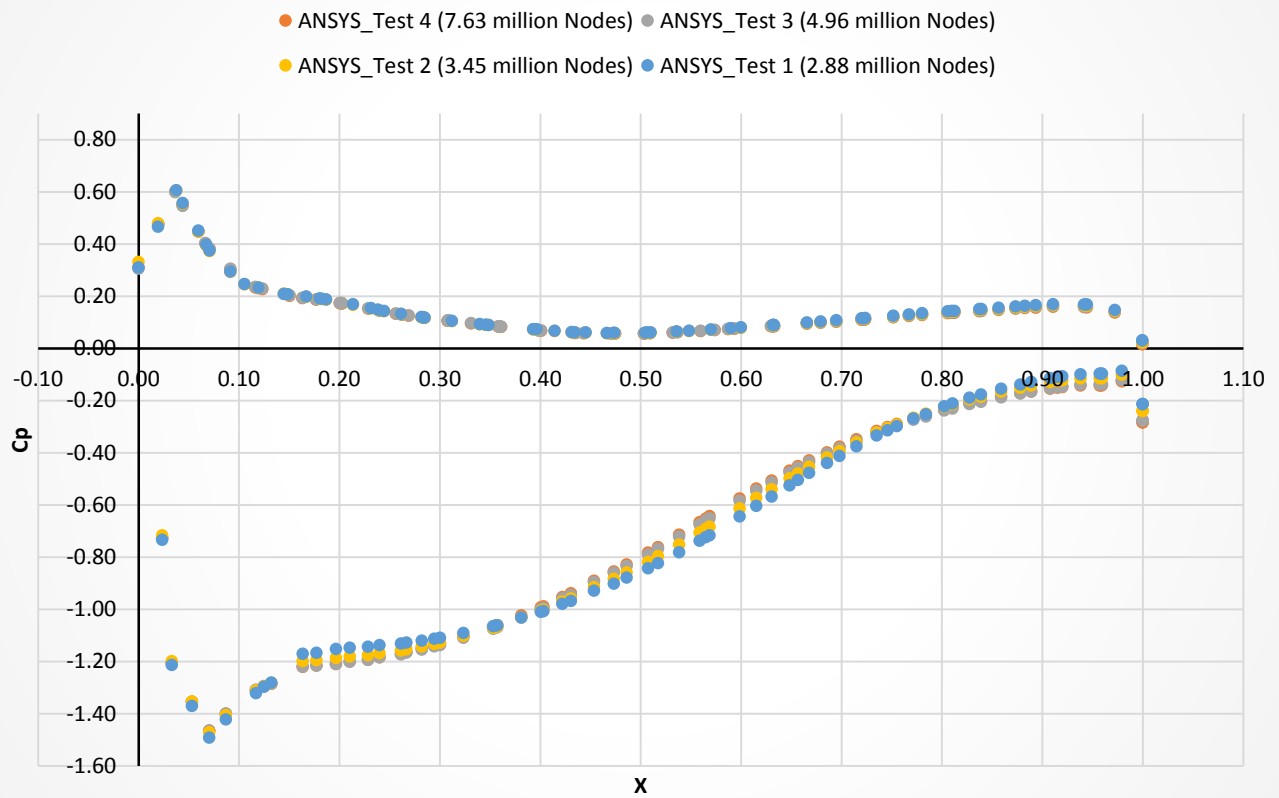
Wing (Y=0.15m)



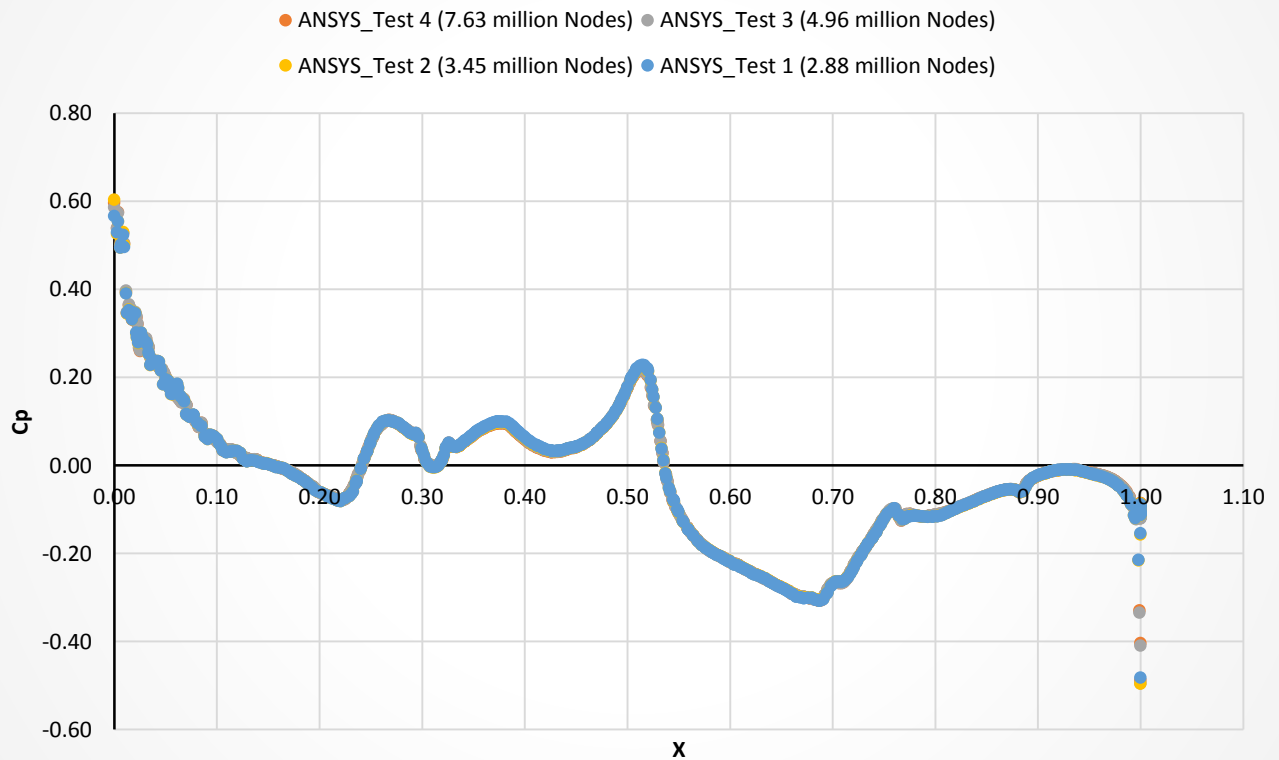
Wing (Y=0.5m)



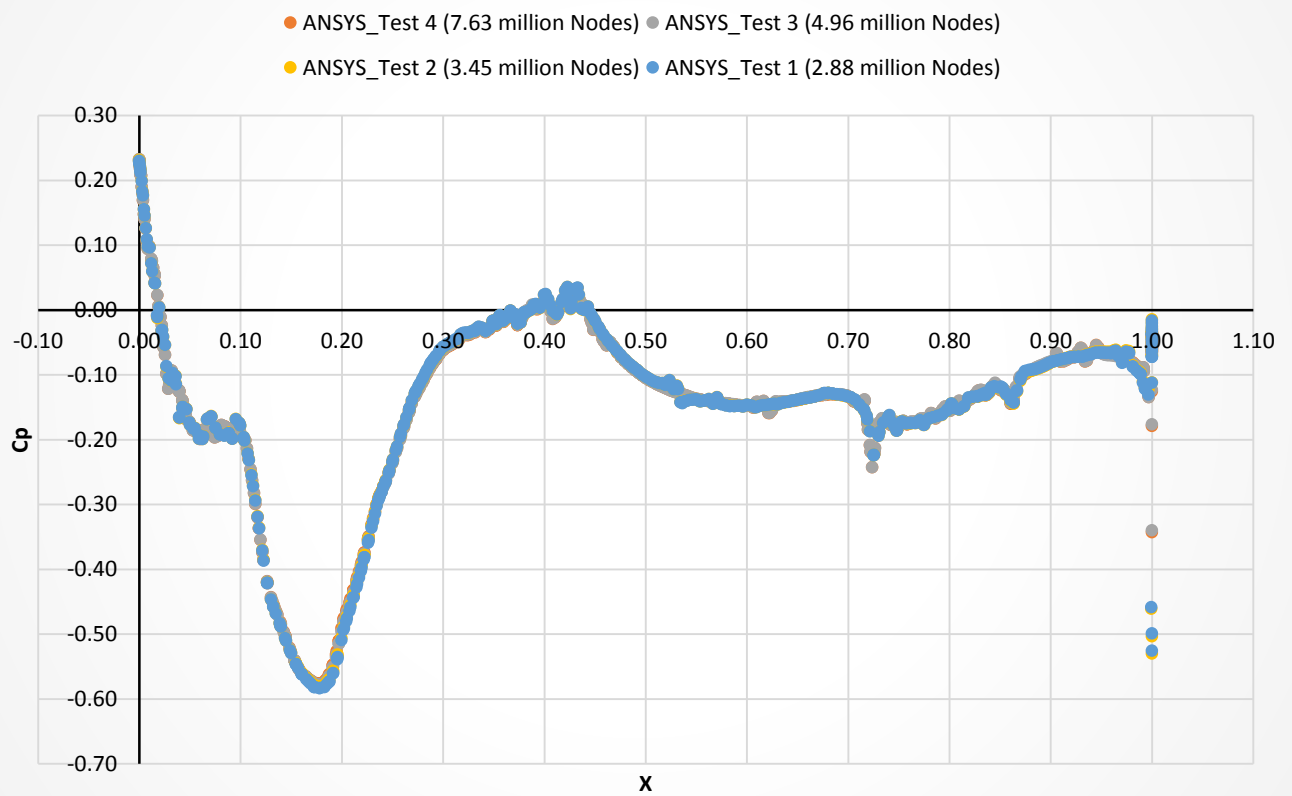
Canard



Fuselage Side

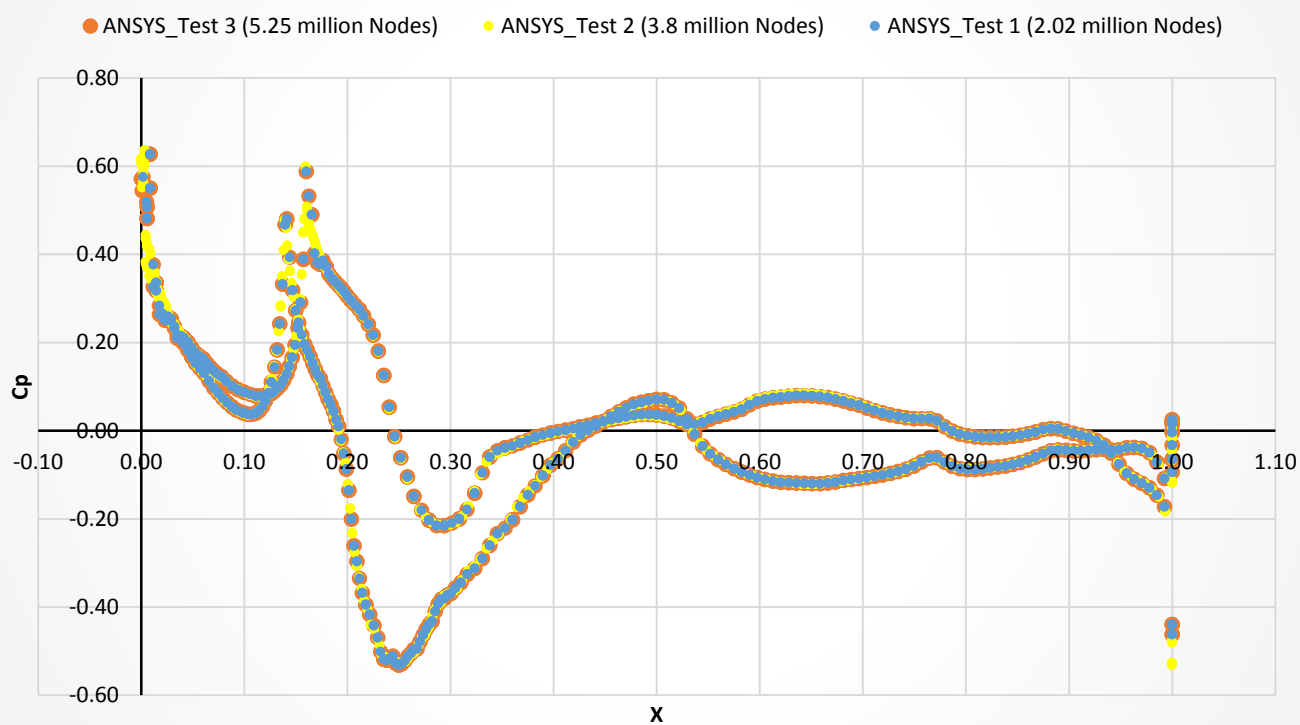


Canopy Side

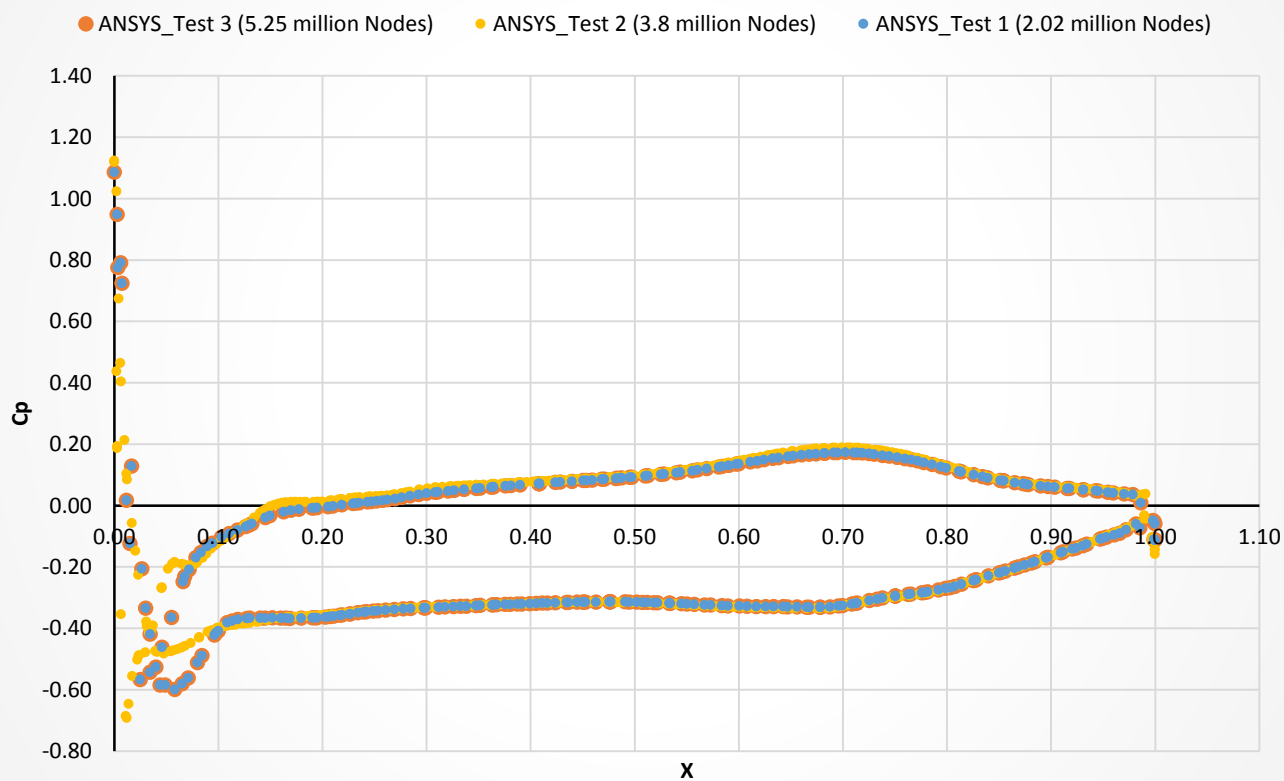


Διογκωμένη Άτρακτος με Canard σε γωνία 0°

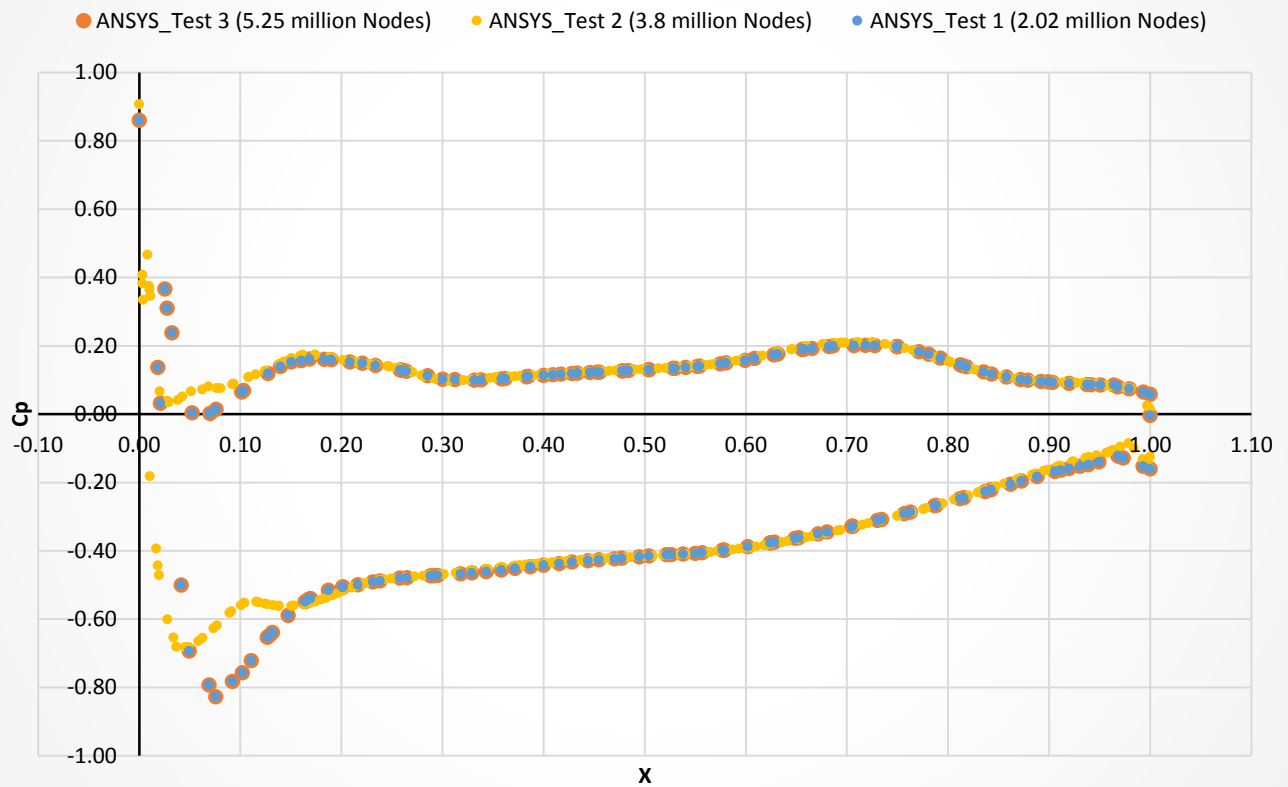
Fuselage



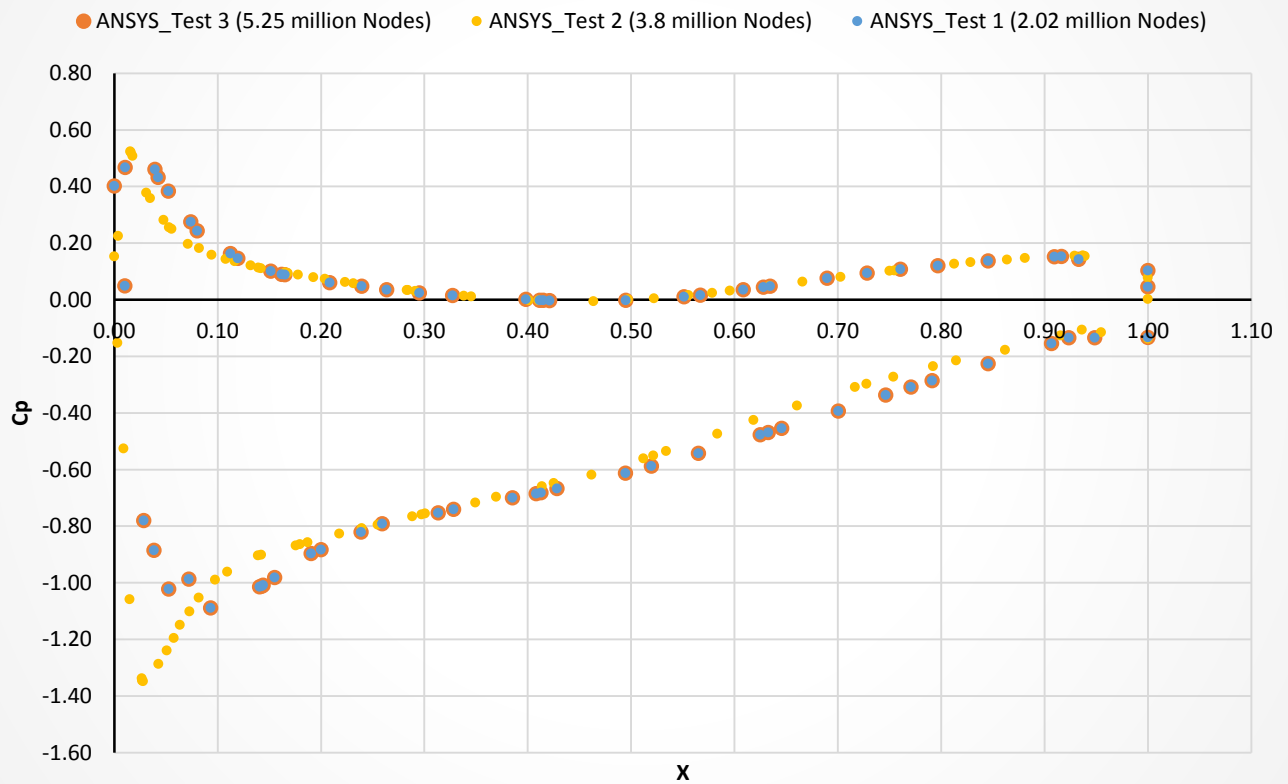
Wing (Y=0.15m)



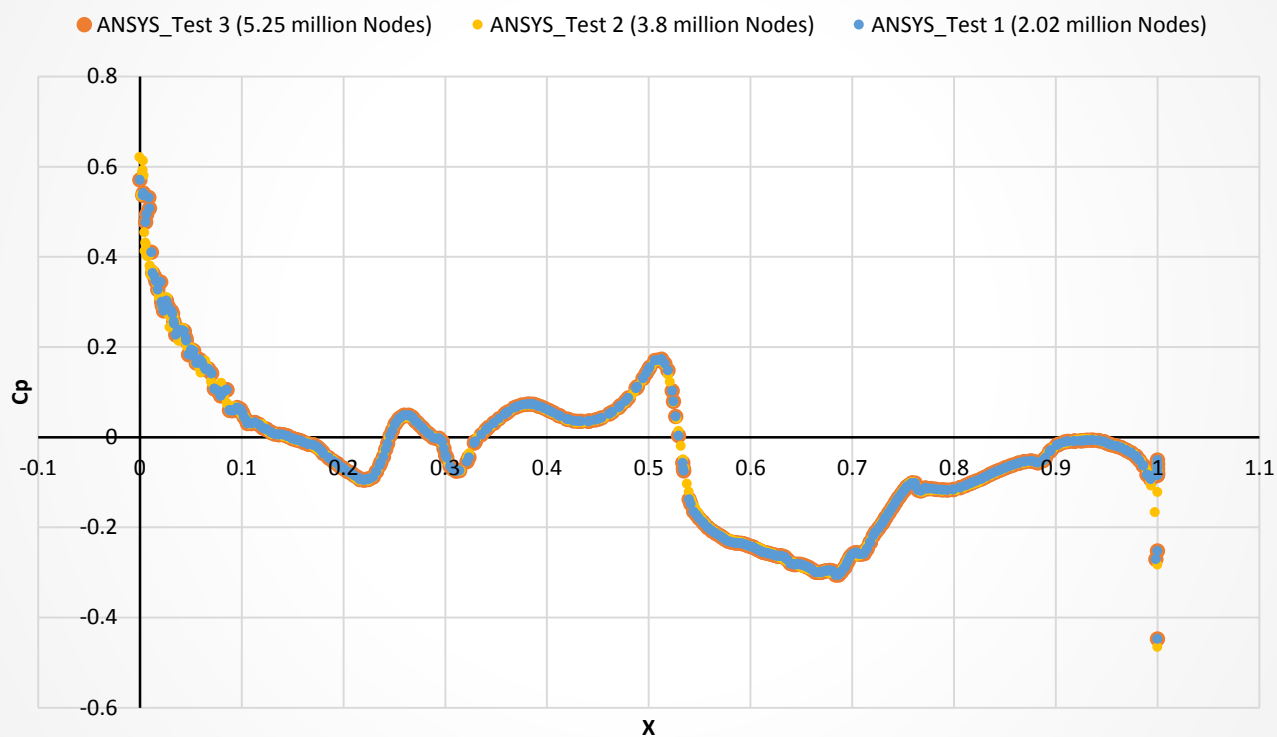
Wing (Y=0.5m)



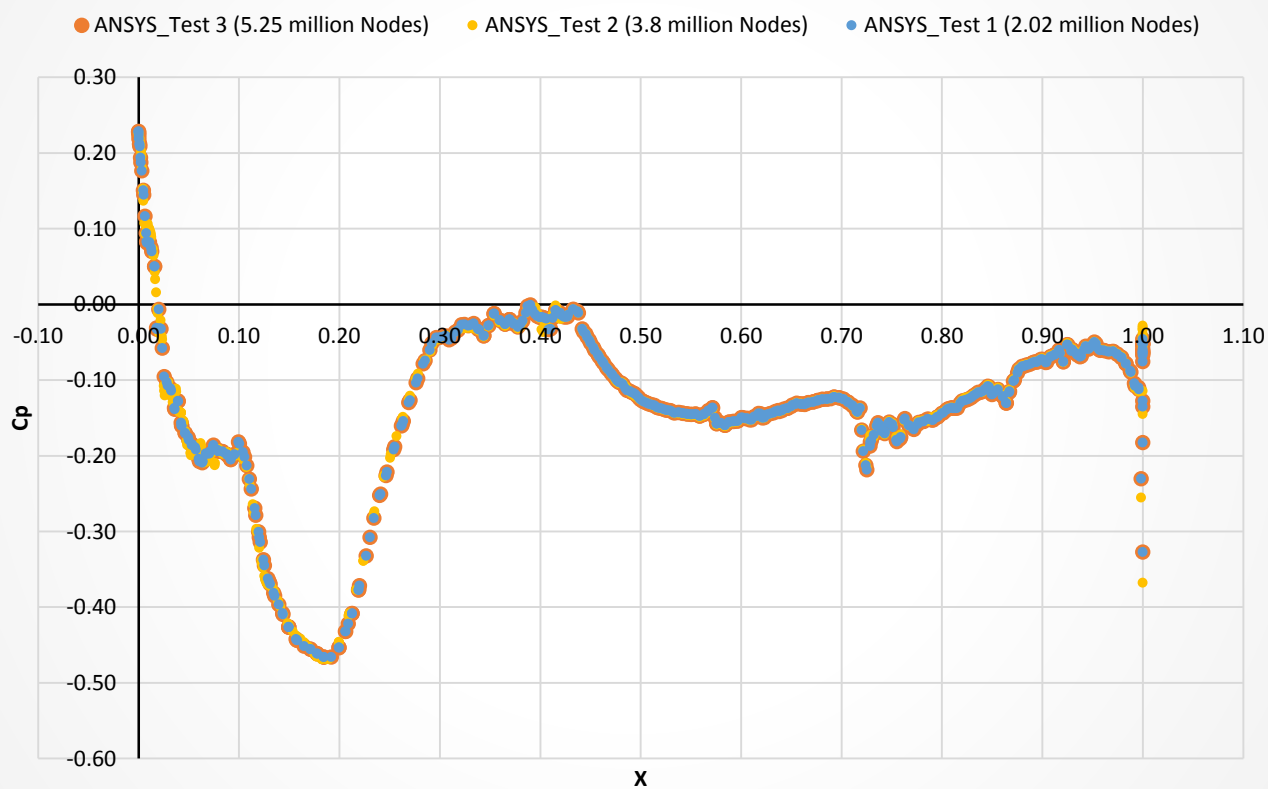
Canard



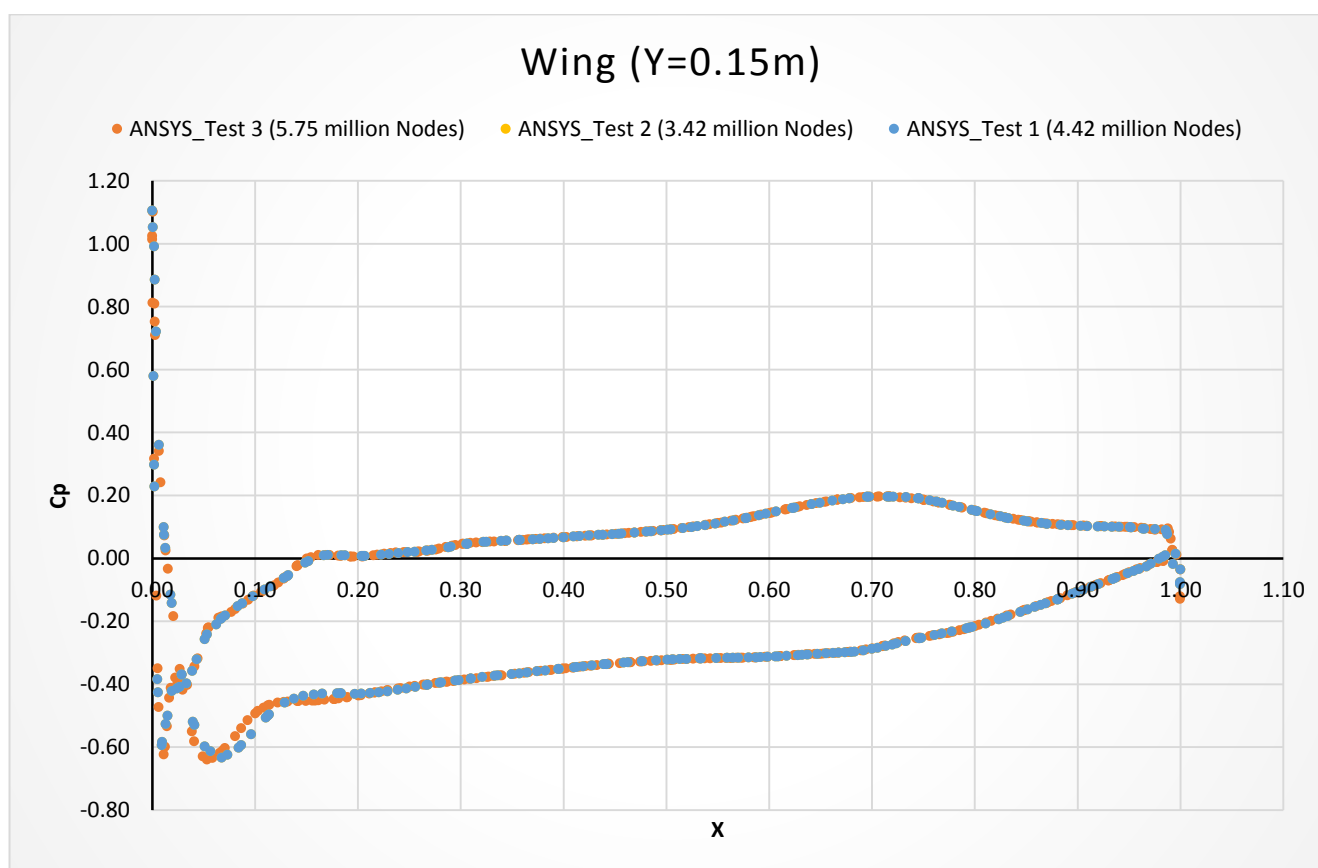
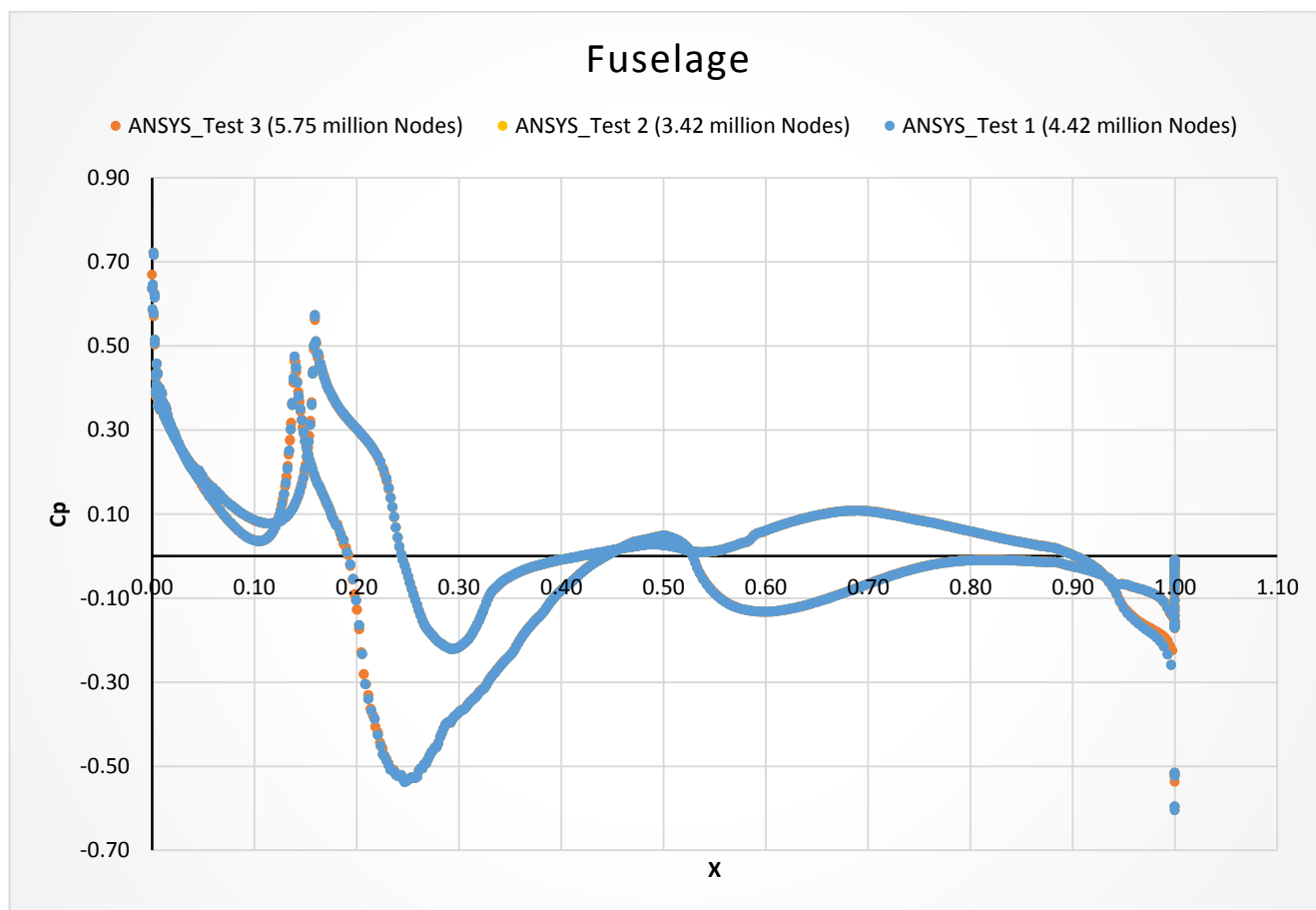
Fuselage Side



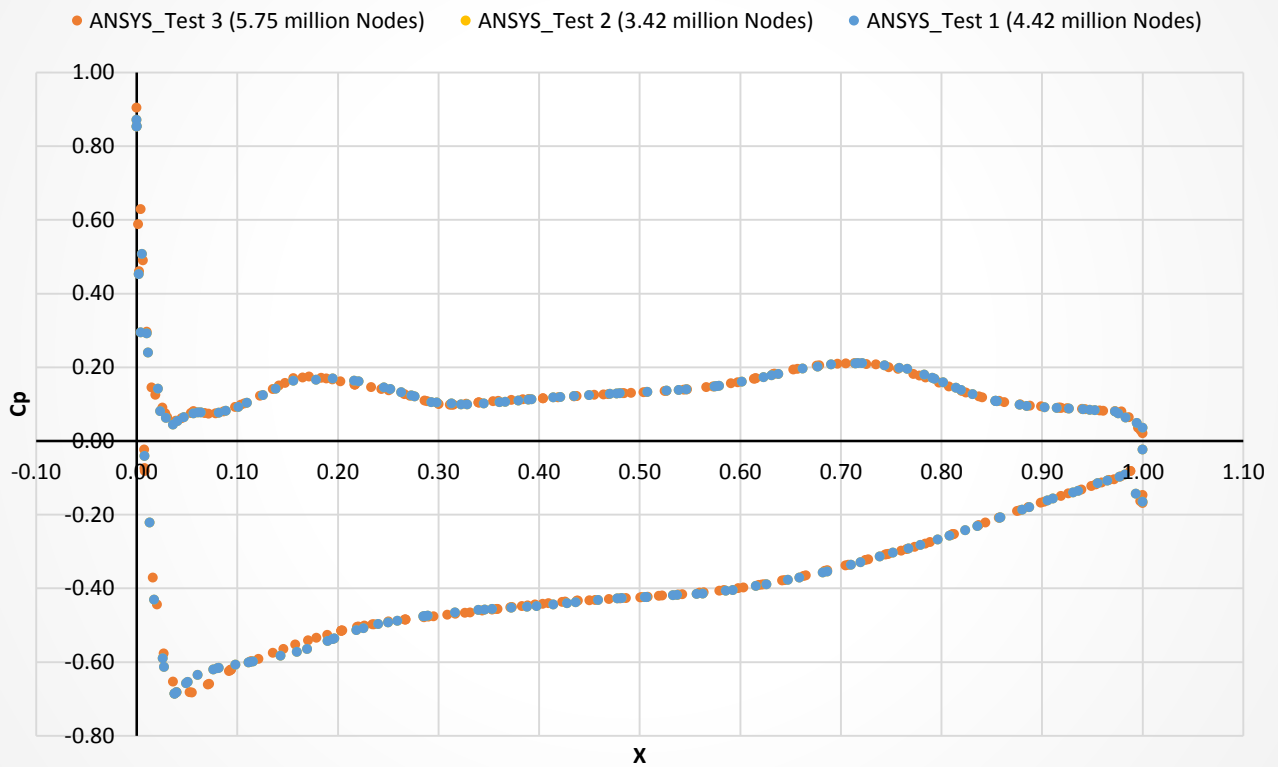
Canopy Side



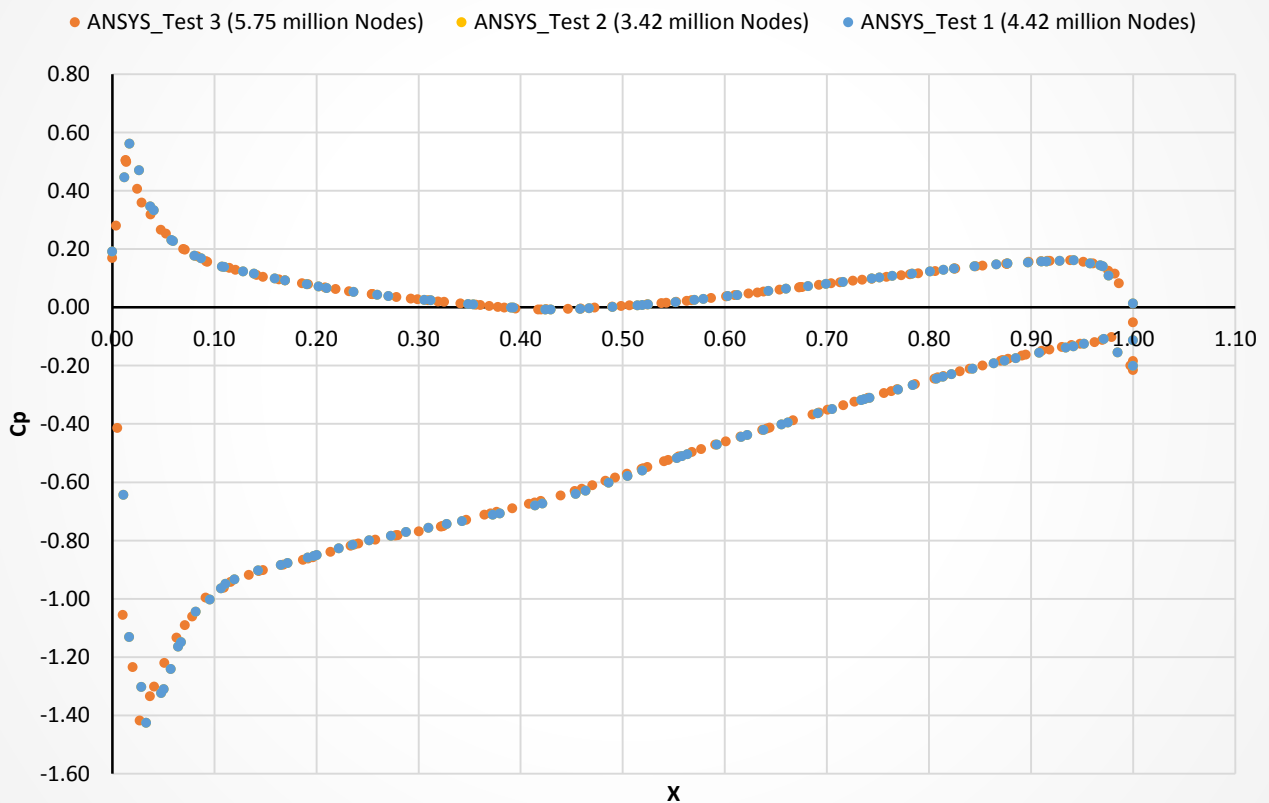
Μη Διογκωμένη Άτρακτος με Canard σε γωνία 0°



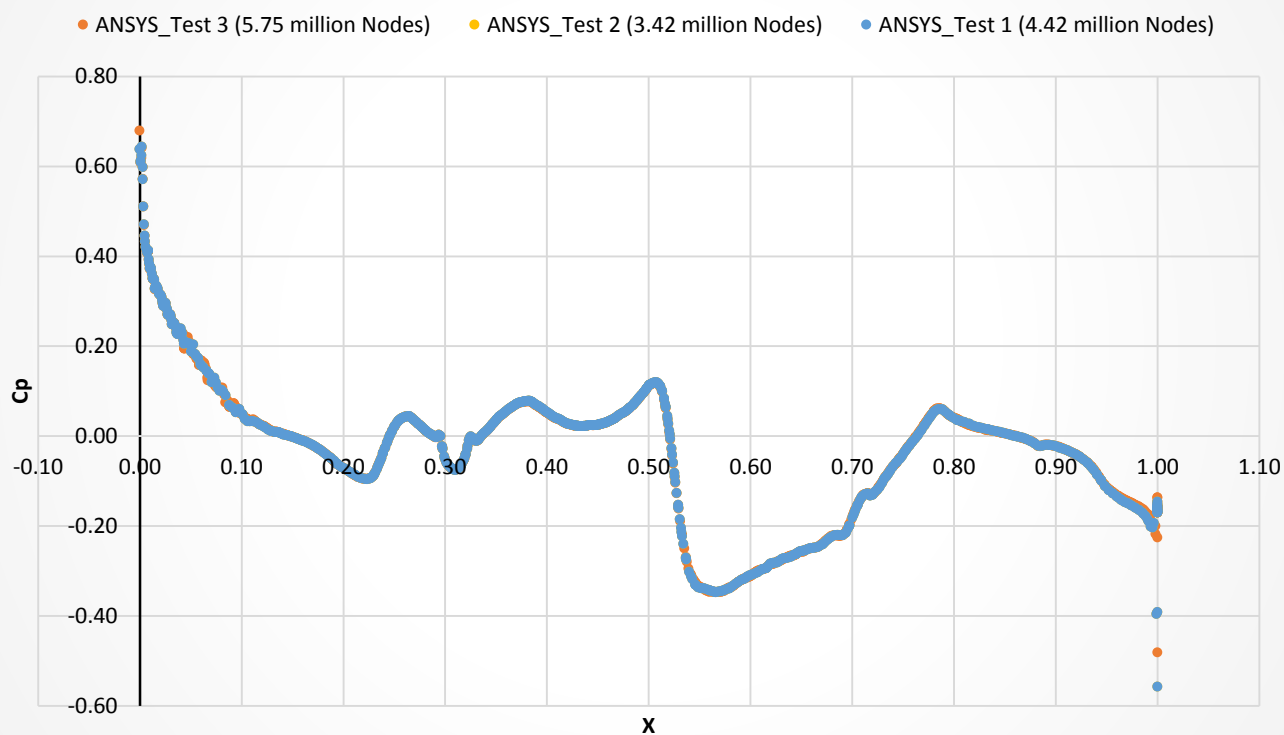
Wing (Y=0.5m)



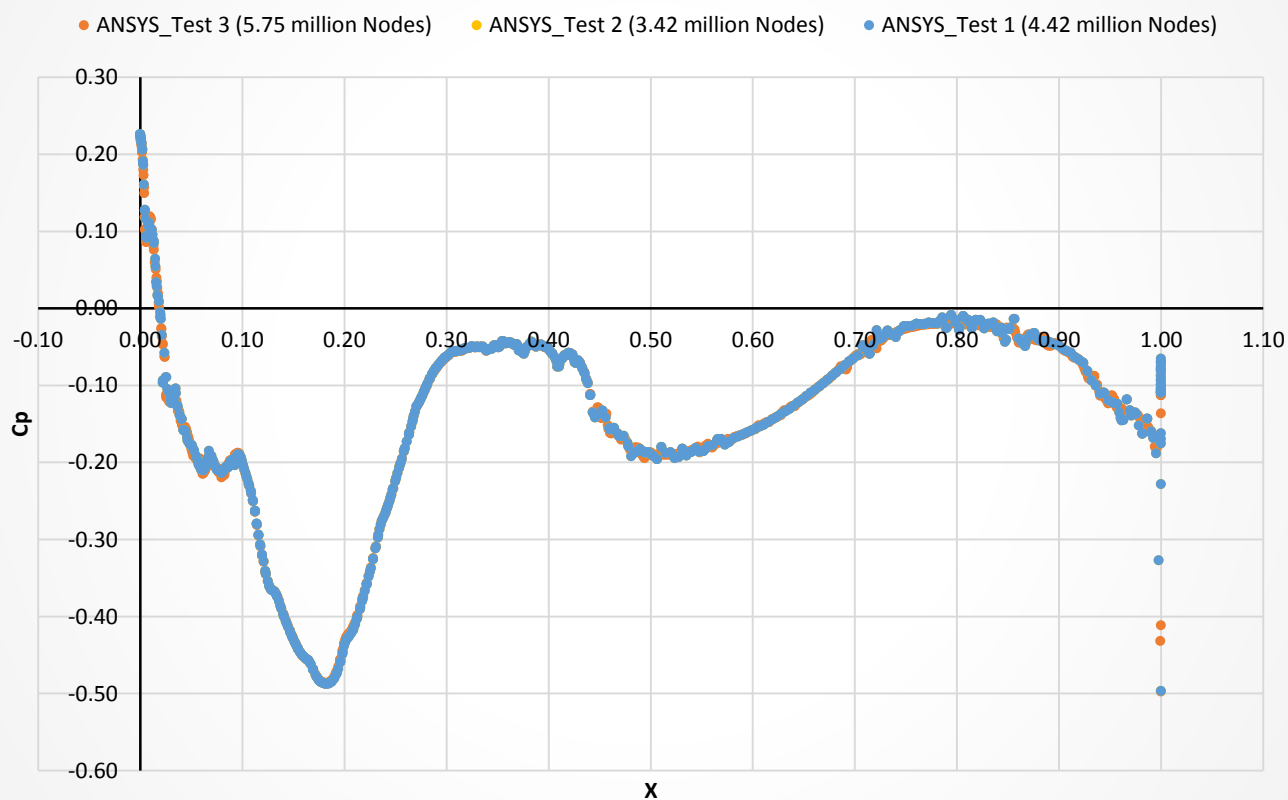
Canard



Fuselage Side



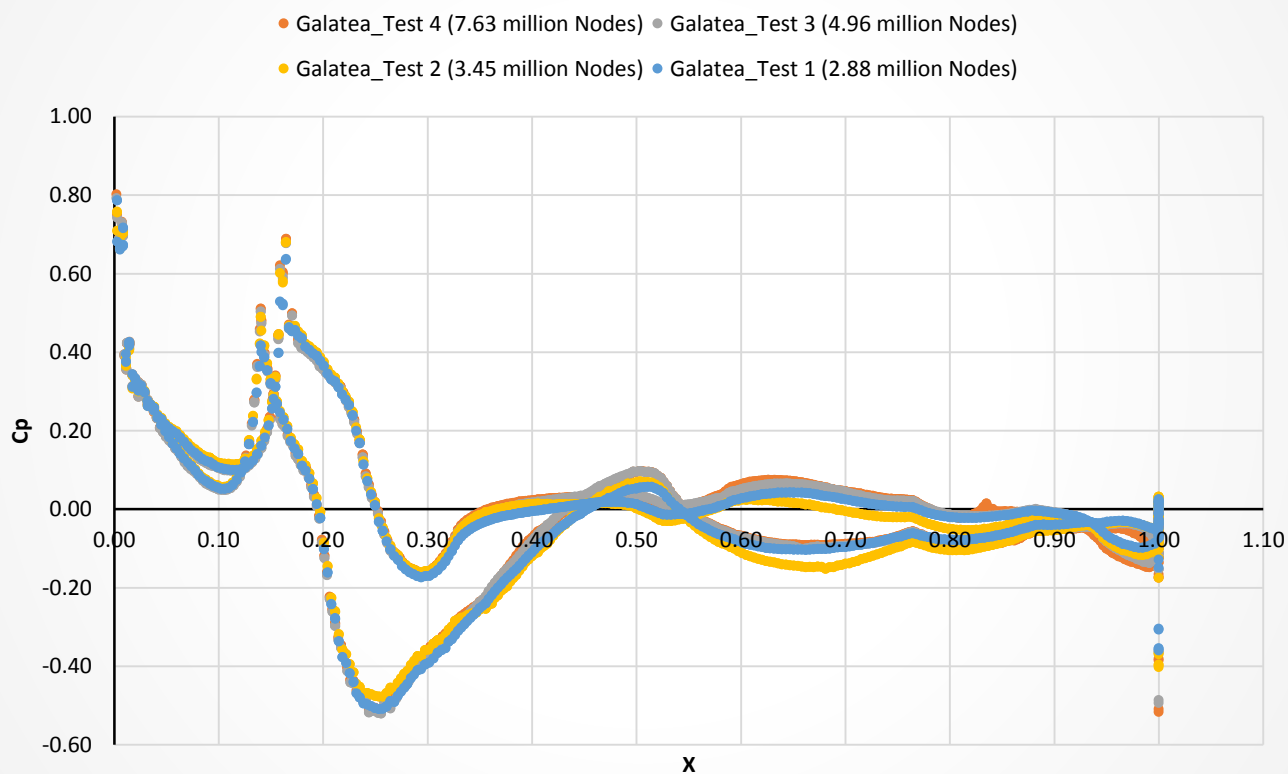
Canopy Side



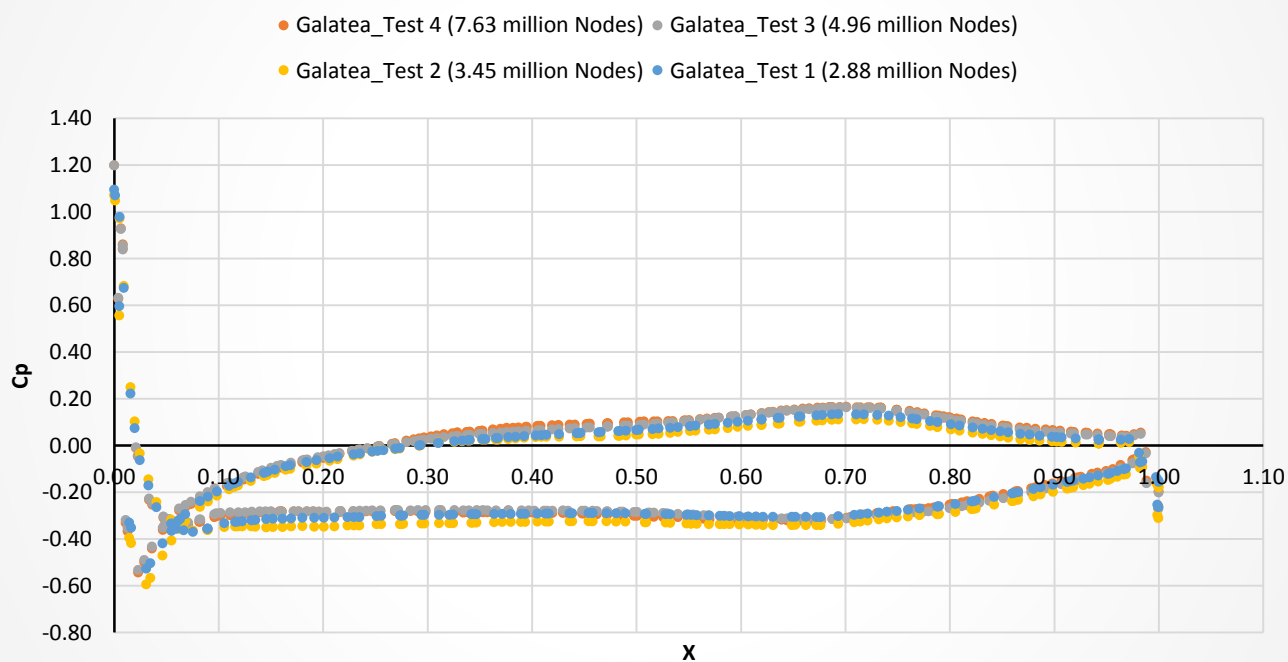
Galatea

Διογκωμένη Άτρακτος με Canard σε γωνία -3°

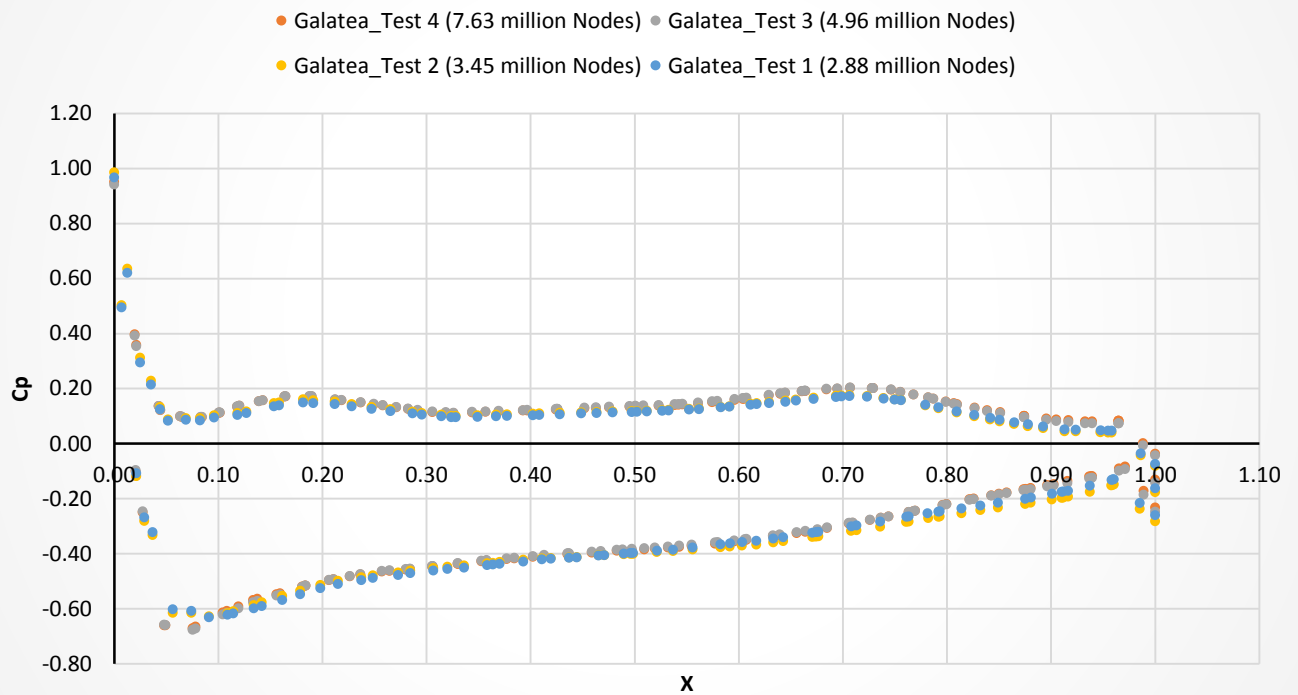
Fuselage



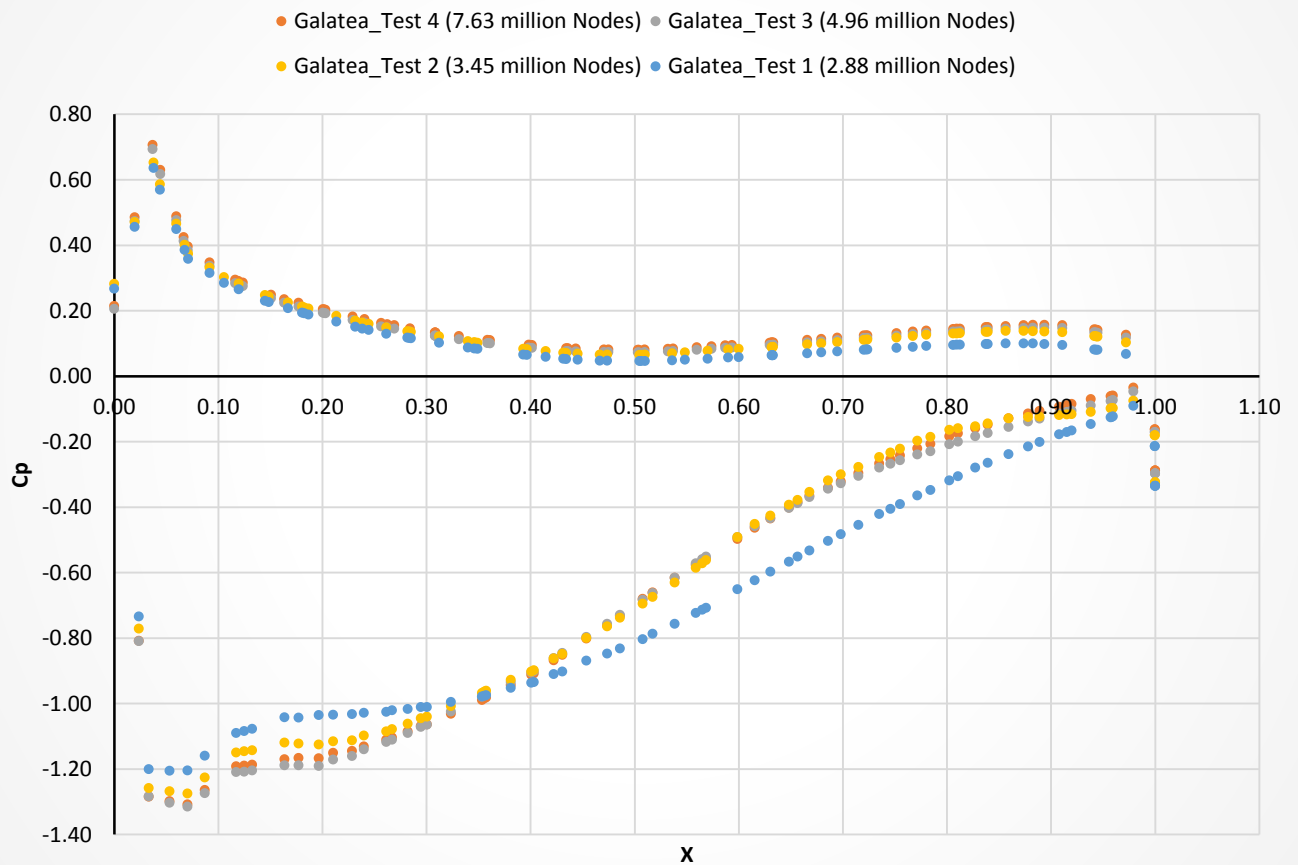
Wing ($Y=0.15m$)



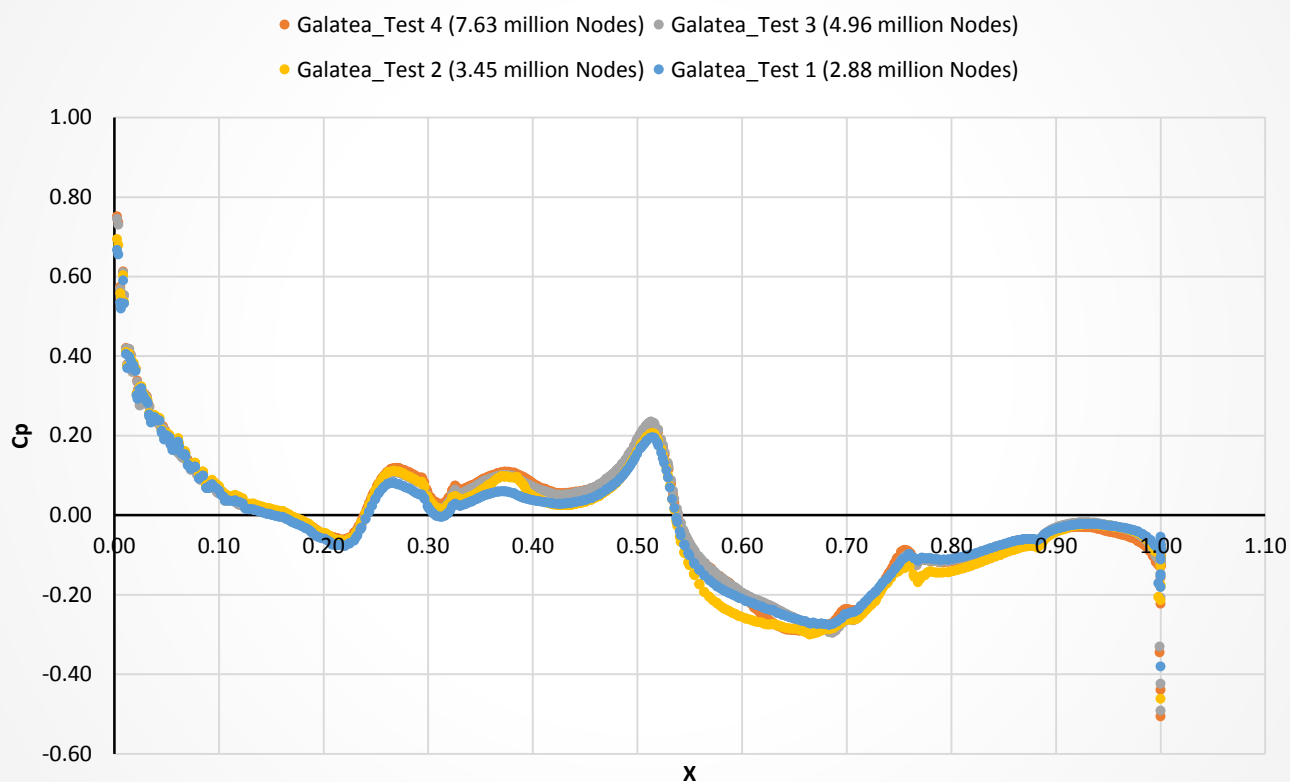
Wing (Y=0.5m)



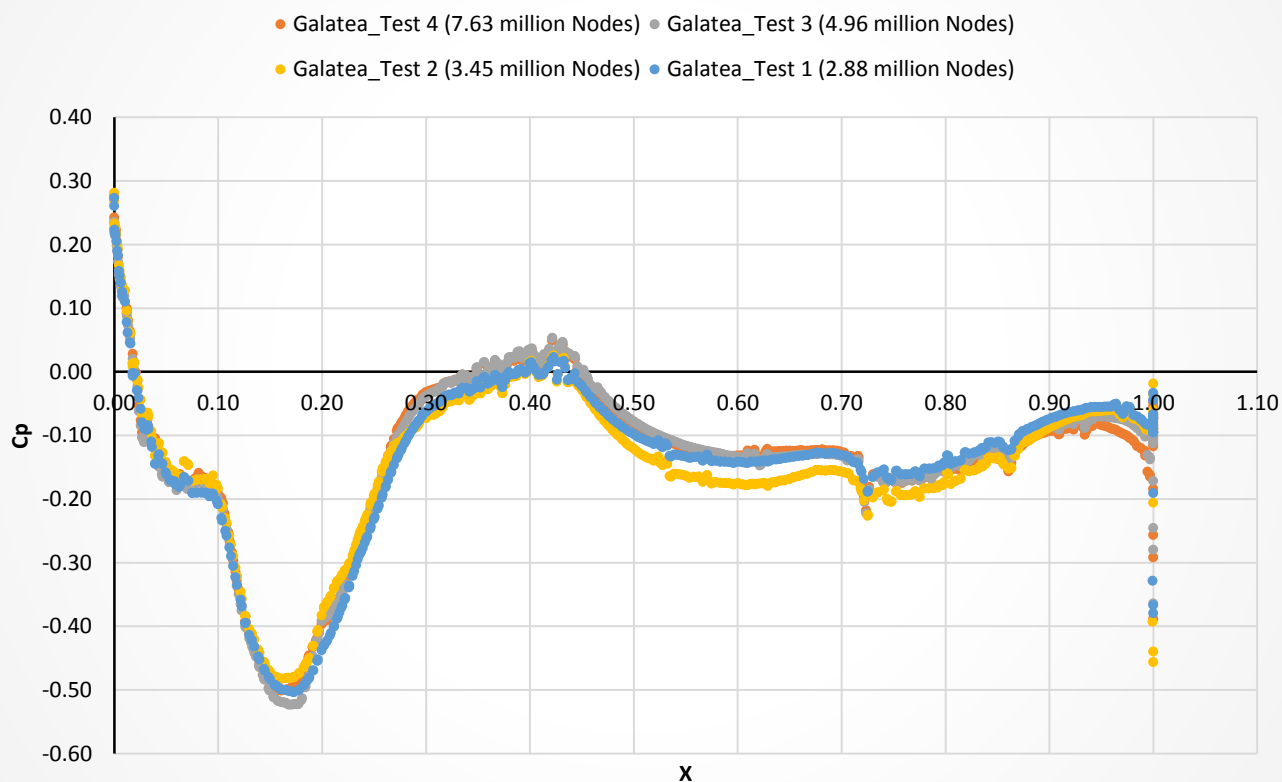
Canard



Fuselage Side

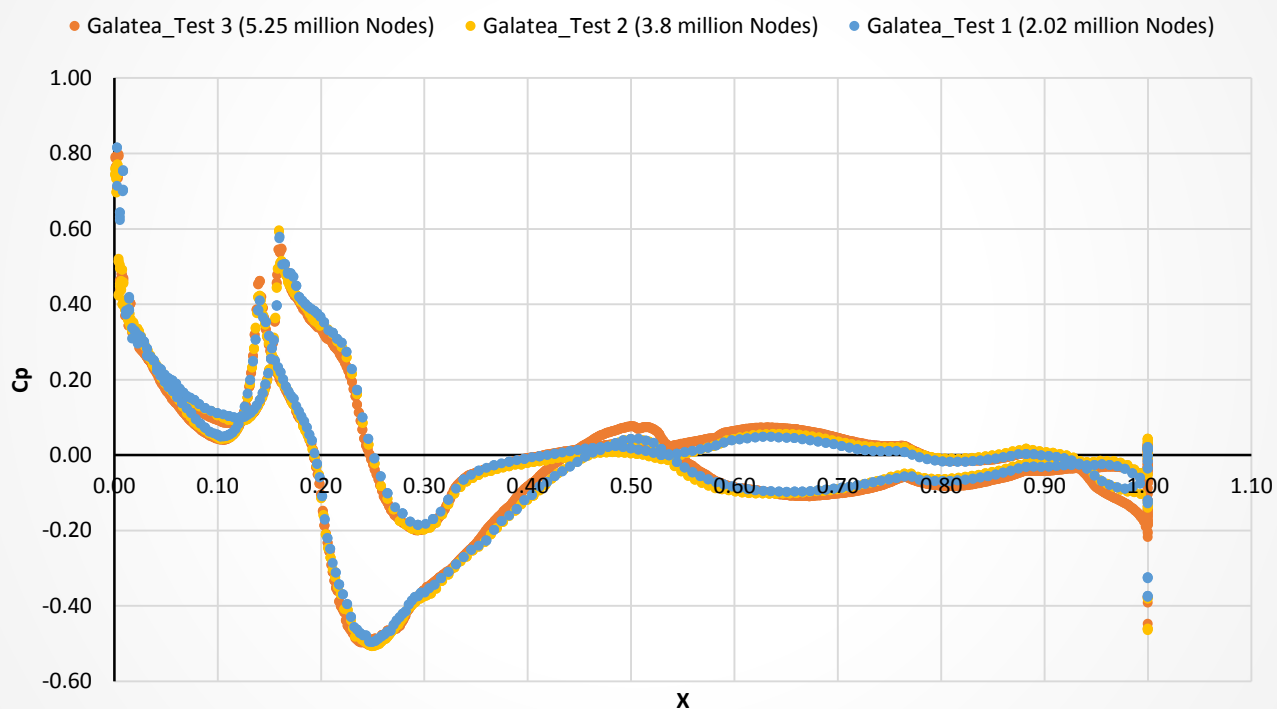


Canopy Side

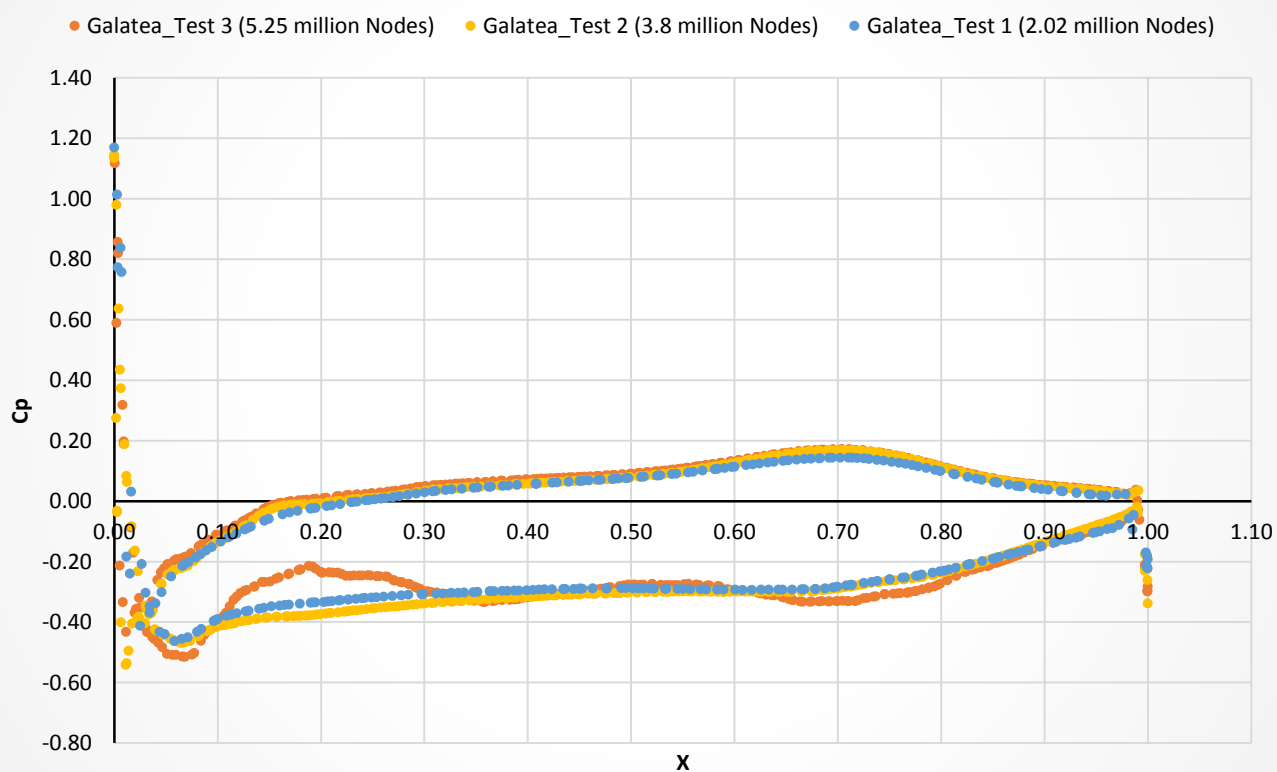


Διογκωμένη Άτρακτος με Canard σε γωνία 0°

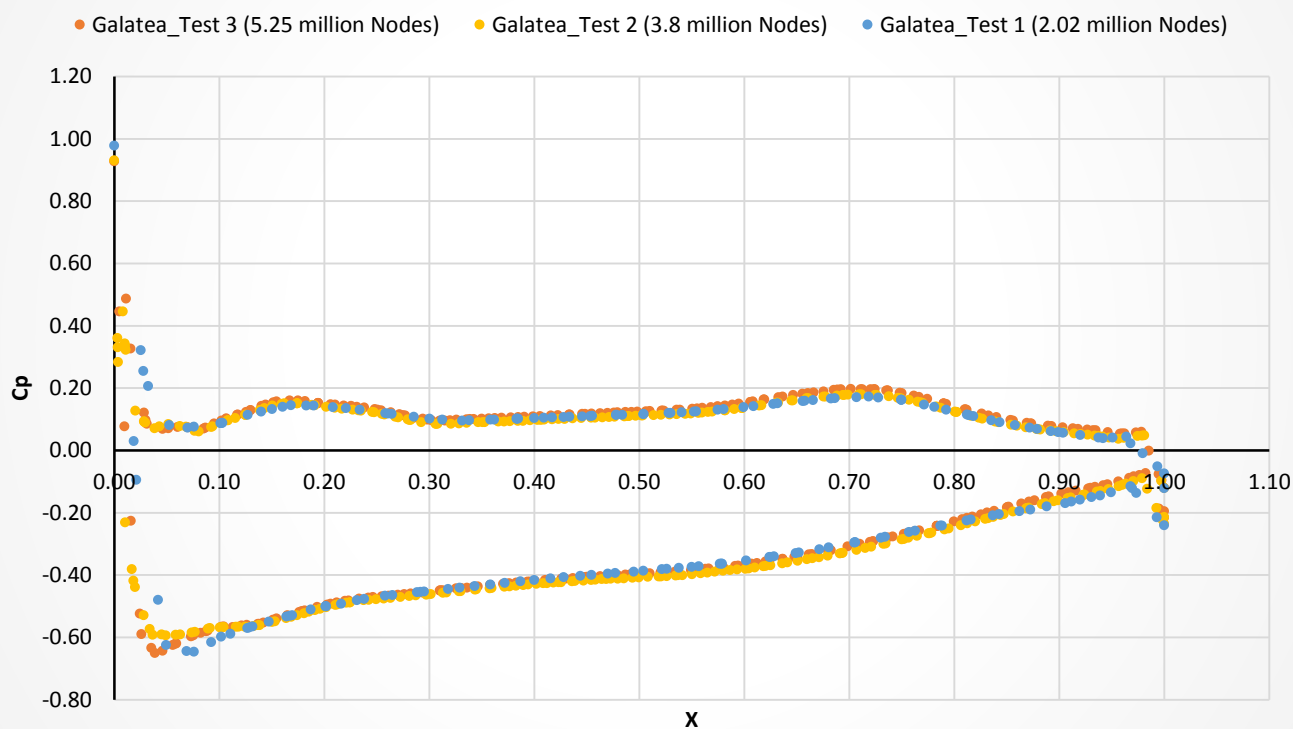
Fuselage



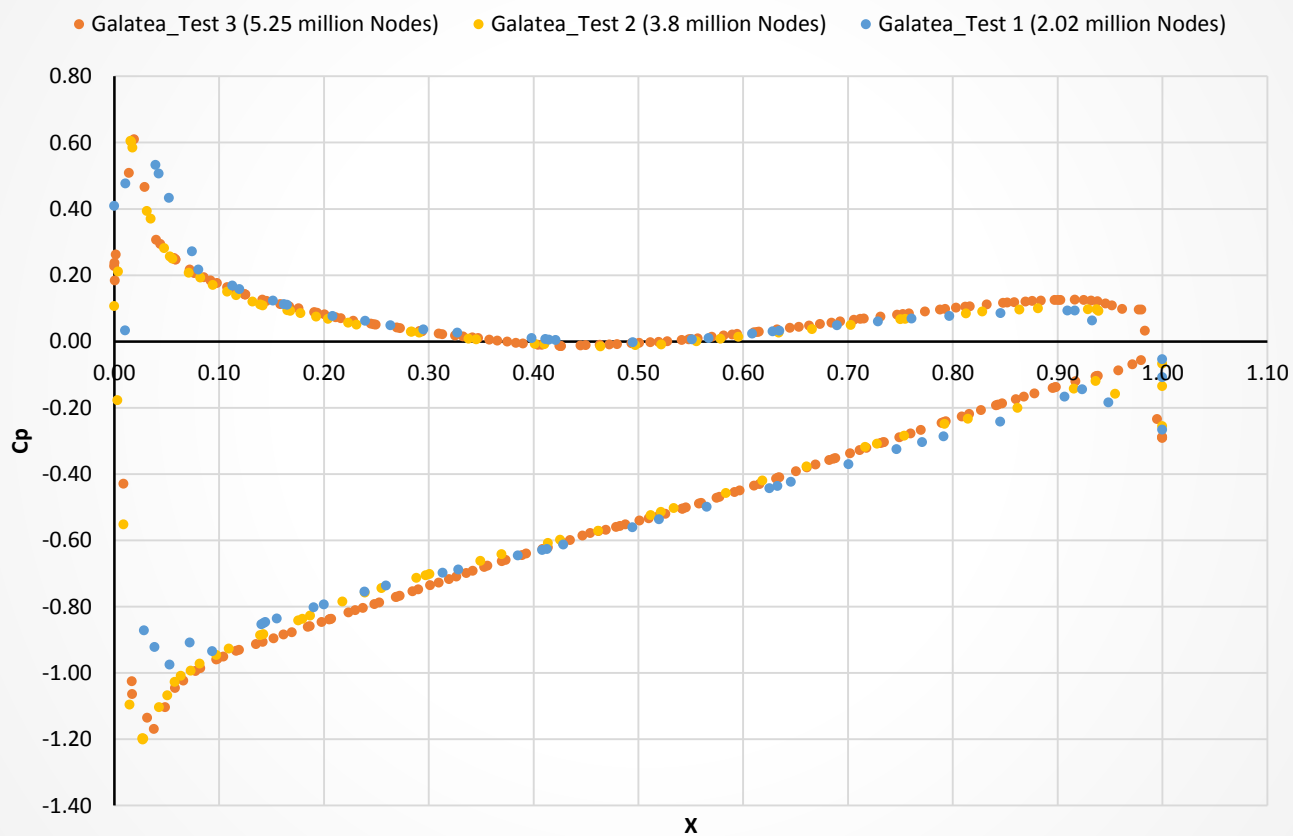
Wing ($Y=0.15m$)



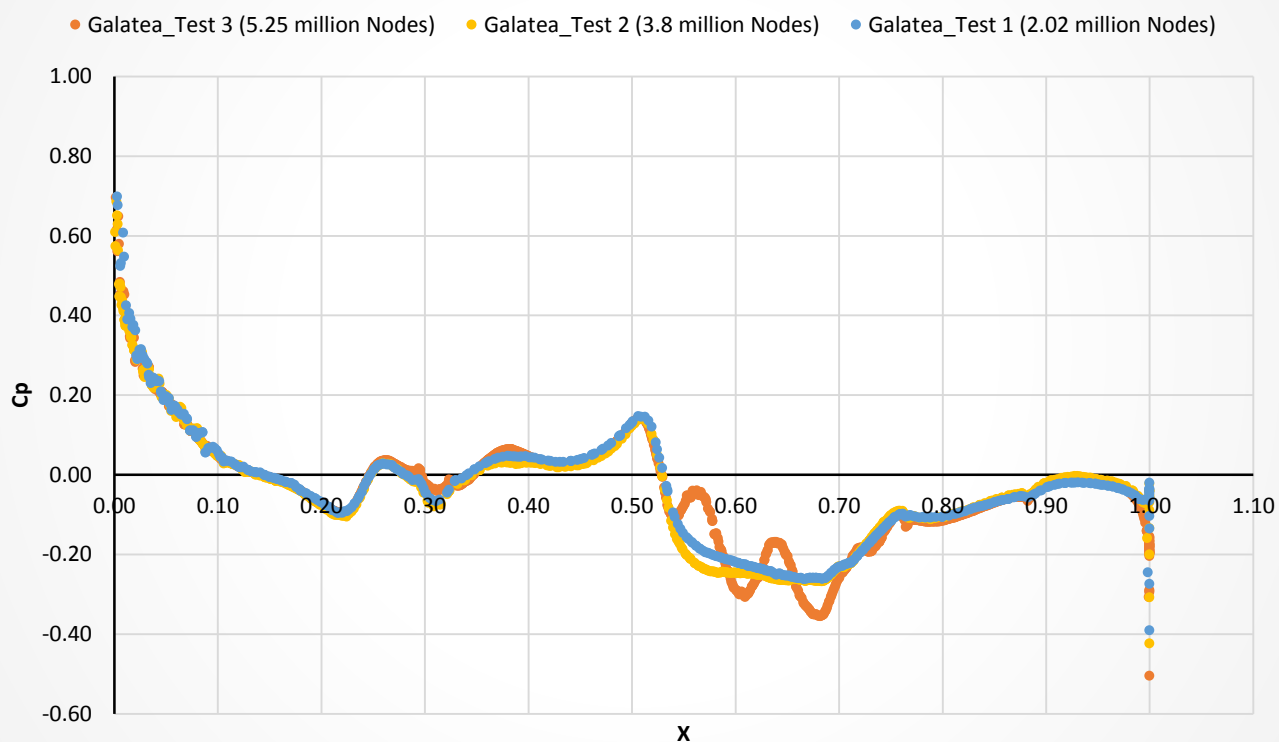
Wing (Y=0.5m)



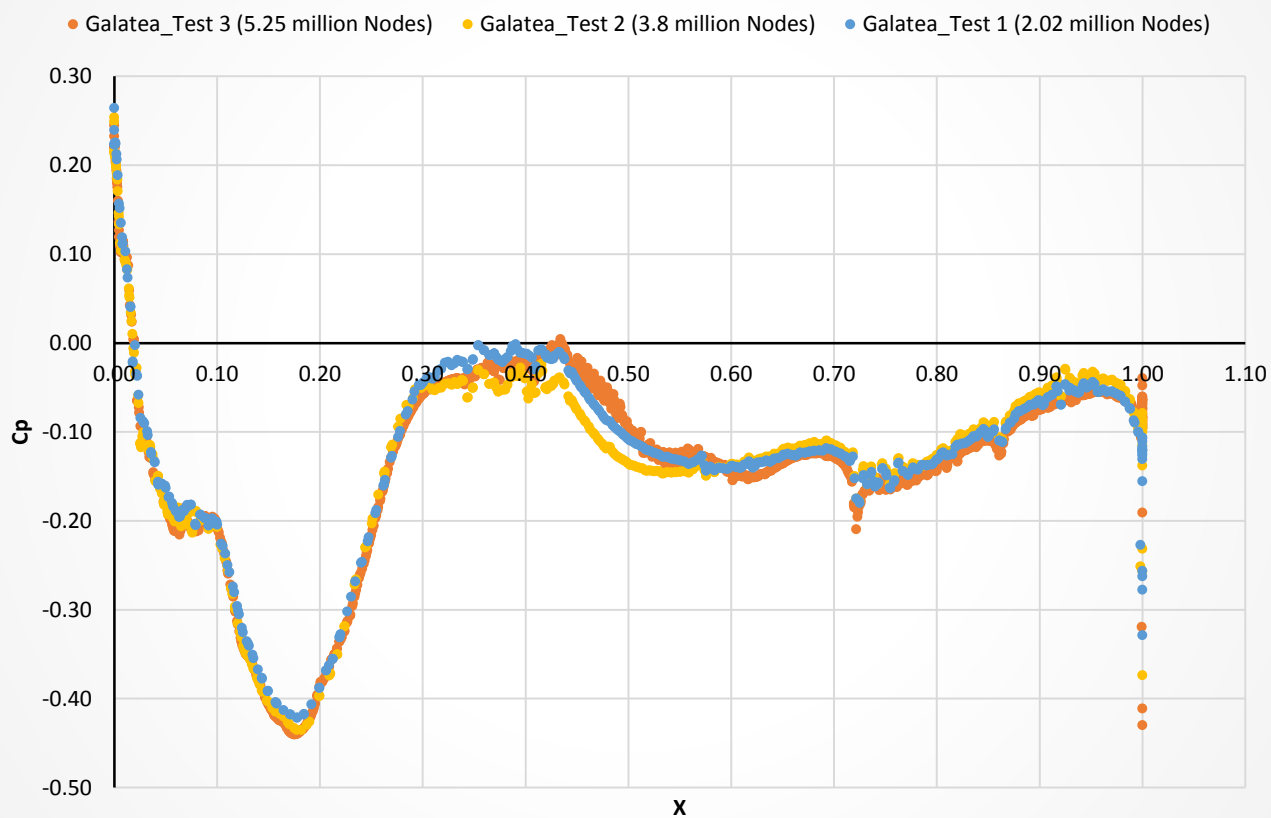
Canard



Fuselage Side

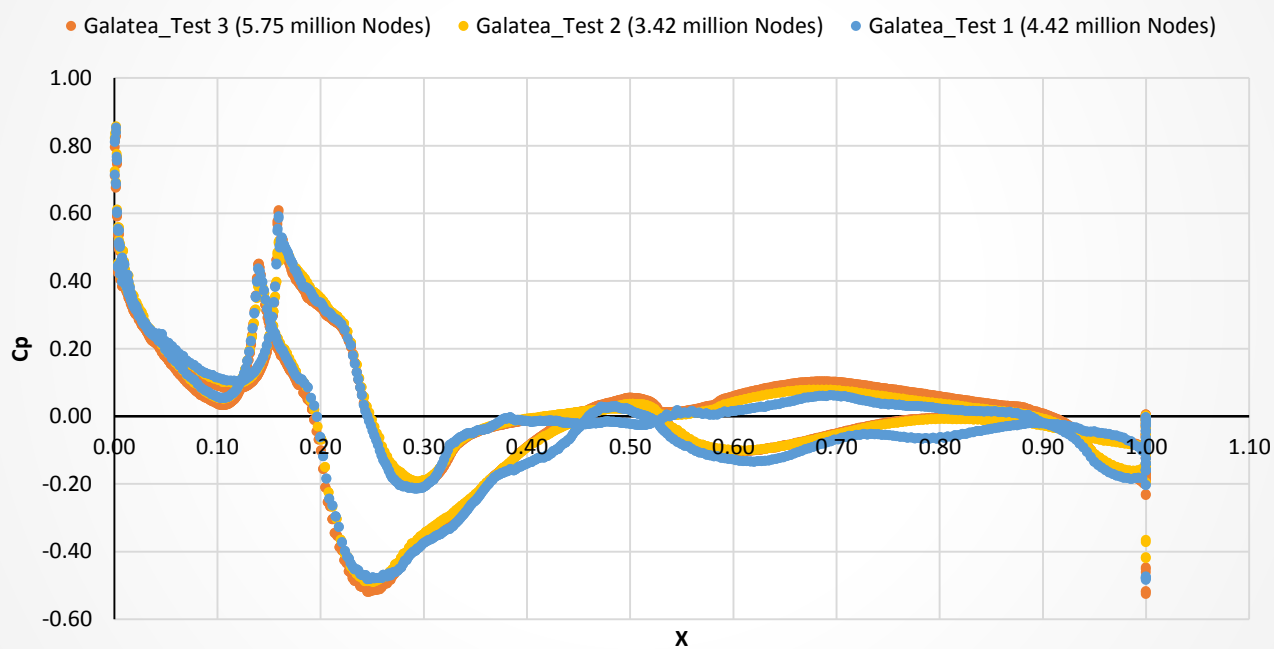


Canopy Side

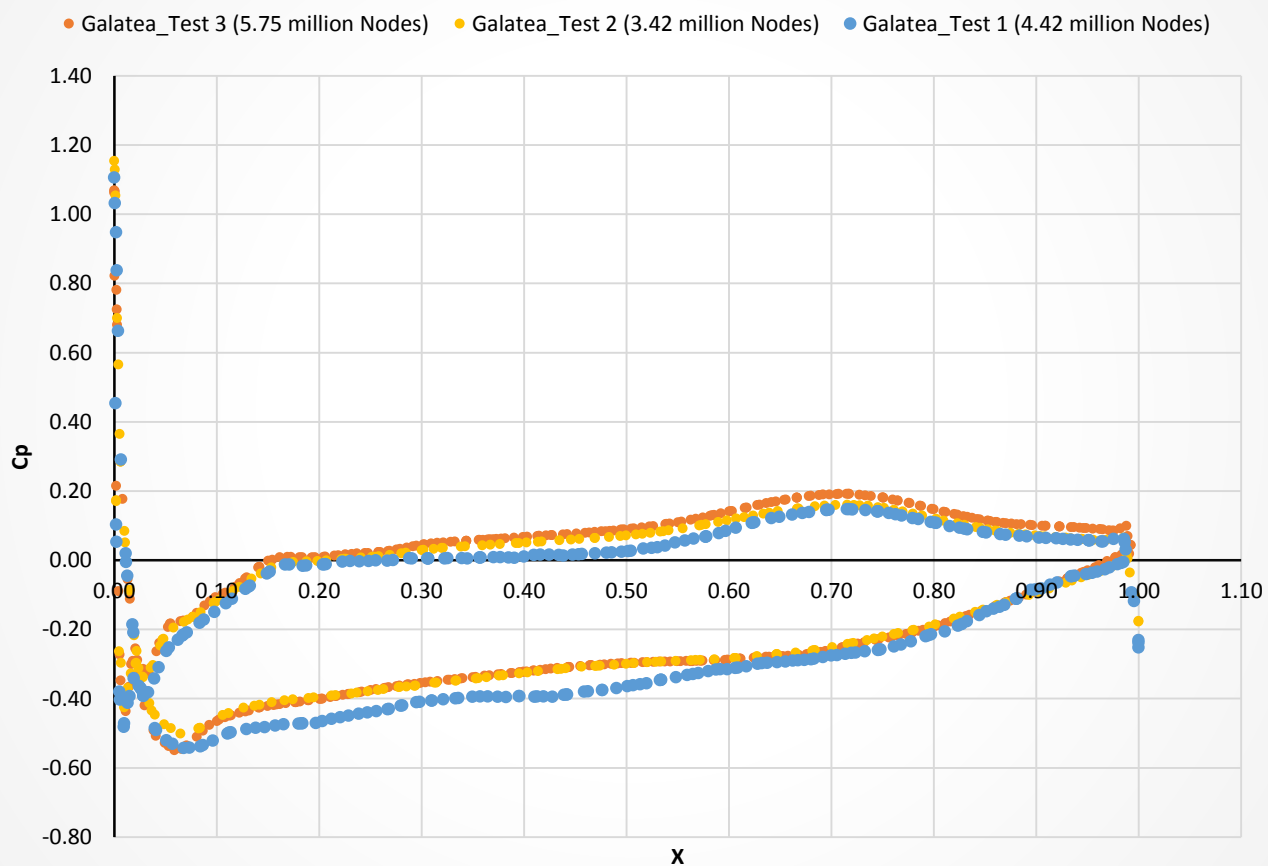


Μη Διογκωμένη Άτρακτος με Canard σε γωνία 0°

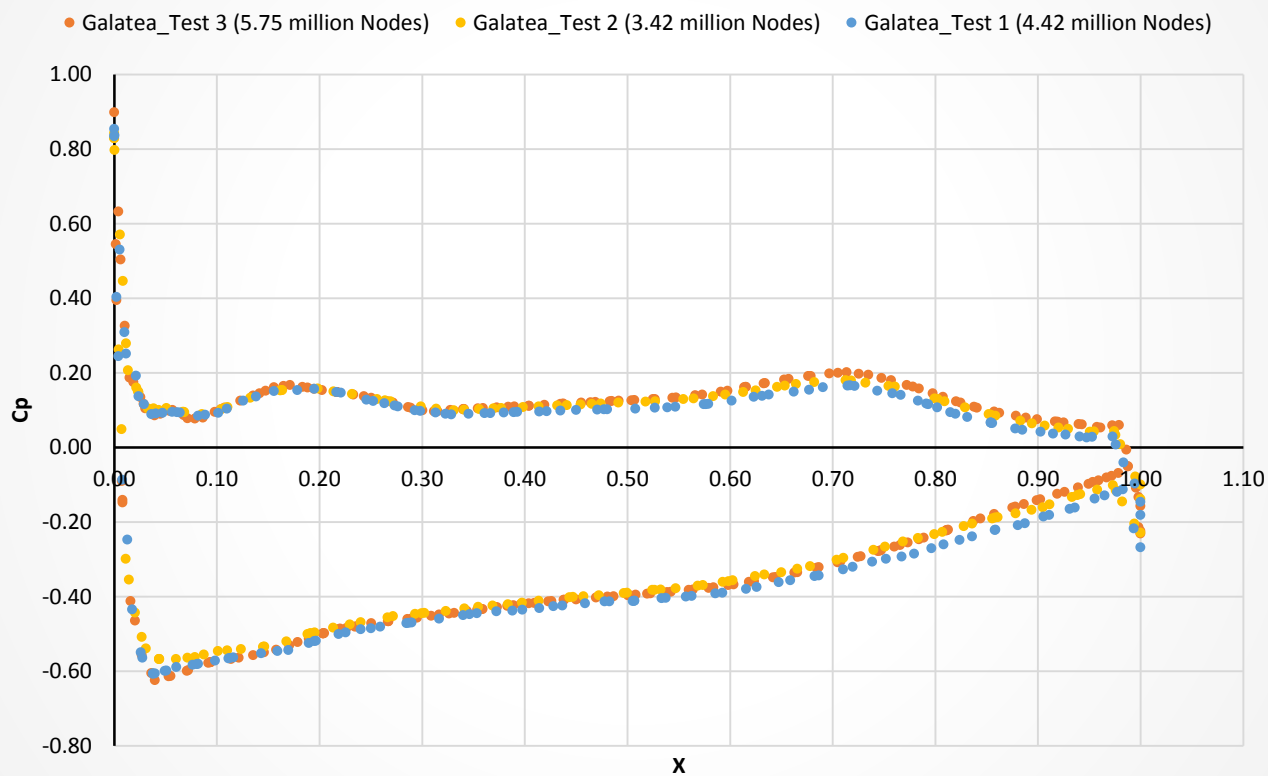
Fuselage



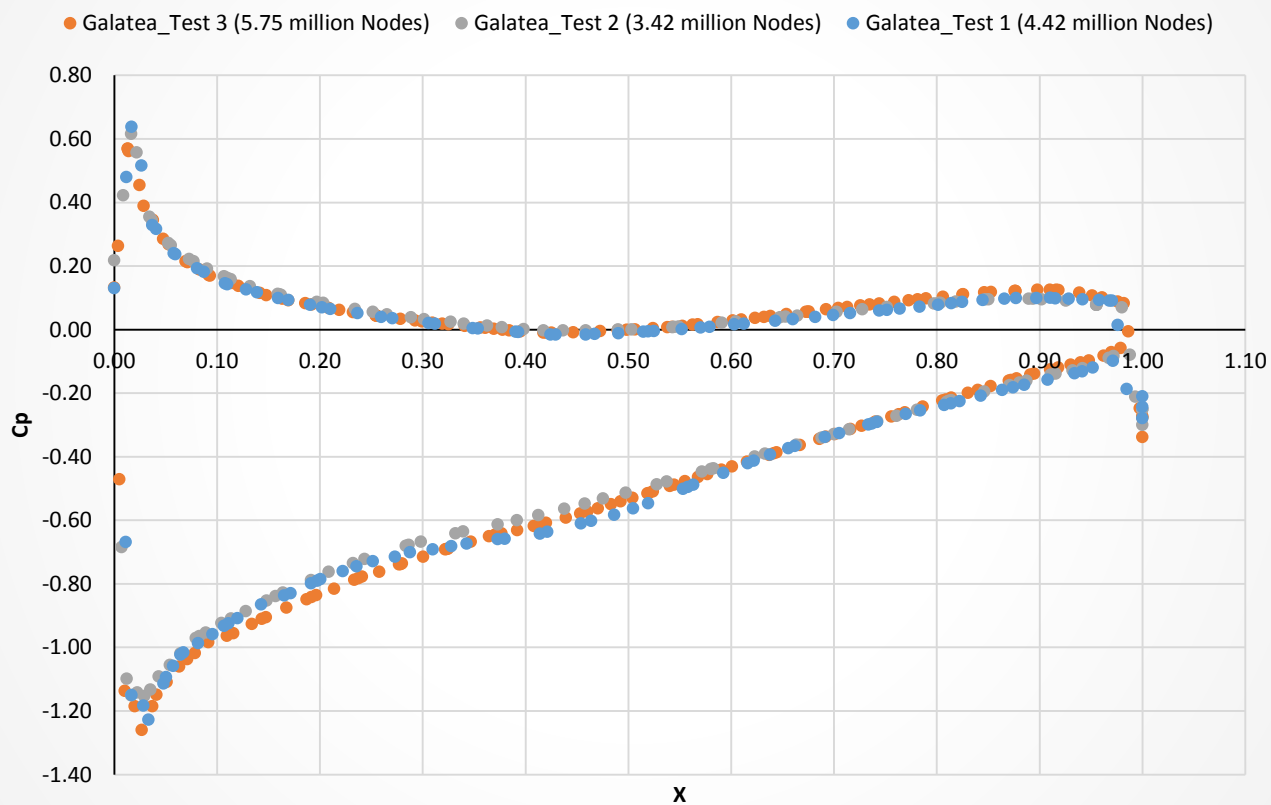
Wing ($Y=0.15m$)



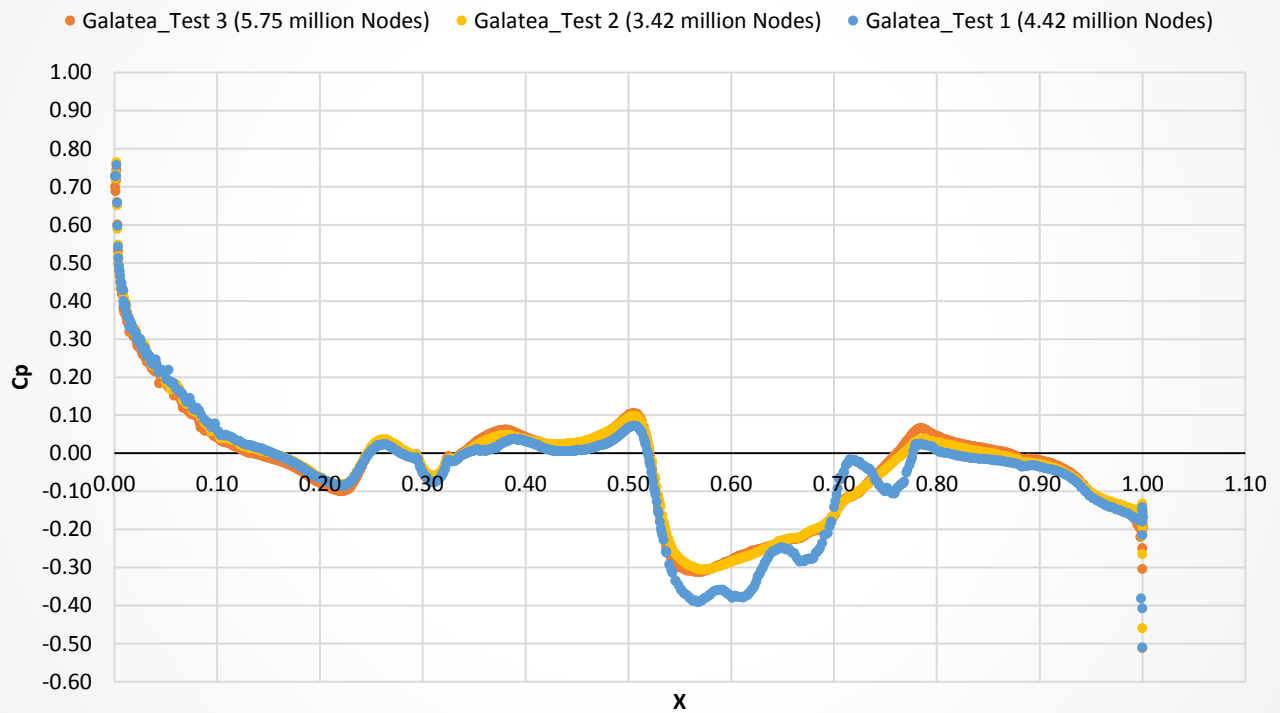
Wing (Y=0.5m)



Canard



Fuselage Side



Canopy Side

