



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Βελτίωση της σχεδίασης αεραγωγού κυψέλης καυσίμου για την κίνηση ηλεκτρικού οχήματος

Σαχινίδης Ν. Κωνσταντίνος

Επιβλέπων: Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός, Καθηγητής

Χανιά, Ιούλιος 2025

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αφορά στην βελτίωση της σχεδίασης του αεραγωγού κυψέλης καυσίμου ενός ηλεκτρικού αγωνιστικού οχήματος (της ομάδος TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης). Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αρχικά θα δημιουργηθεί ένα παραμετρικό μοντέλο της γεωμετρίας του συστήματος με τη χρήση του λογισμικού CATIA V5R20. Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις της ροής του αέρα ψύξης μέσα από το σύστημα και την κυψέλη καυσίμου, με τη χρήση του λογισμικού CFD ANSYS CFX για διαφορετικές διαμορφώσεις, ώστε να βελτιωθεί η απαγωγή θερμότητας από την κυψέλη καυσίμου και να επιτευχθεί ομοιόμορφο θερμοκρασιακό πεδίο στην έξοδο της κυψέλης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θα χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση της σχεδίασης του συστήματος.

Abstract

The subject of this Diploma Thesis concerns the improvement of the design of the fuel cell air duct of an electric racing vehicle (of the TUCer team of the Technical University of Crete). In the framework of the diploma thesis, a parametric model of the system geometry will initially be created using the CATIA V5R20 software. Simulations of the cooling air flow through the system and the fuel cell will then be performed, using the CFD software ANSYS CFX for different configurations, in order to improve heat dissipation from the fuel cell and achieve a uniform temperature field at the cell outlet. The results of the simulations will be used to improve the system design.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή.....	10
2 Κυψέλη Καυσίμου Υδρογόνου.....	11
2.1 Ιστορία κυψελών καυσίμου.....	11
2.2 Τρόπος λειτουργίας κυψέλης καυσίμου PEM.....	12
2.3 Κυψέλη καυσίμου αυτοκινήτου	16
3 Εμφωλευμένοι Αεραγωγοί τύπου Naca Duct.....	18
3.1 Εμφωλευμένοι αεραγωγοί τύπου Naca με αποκλίνοντα τοιχώματα.....	18
3.2 Προτεινόμενες γεωμετρικές μεταβλητές.....	19
3.3 Χείλος προσβολής.....	20
4. Καθολική προεπισκόπηση μοντέλου.....	22
4.1 Σχεδιασμός μοντέλων.....	22
4.1.1 Σχεδιασμός μοντέλου εισαγωγής Naca-S_duct_1.....	24
4.1.2 Σχεδιασμός εμφωλευμένων αεραγωγών τύπου Naca duct.....	57
4.1.3 Σχεδιασμός διαχύτη (Diffuser).....	70
4.1.4 Σχεδιασμός μοντέλου εισαγωγής Naca-S_duct_2.....	76
4.1.5 Σχεδιασμός Fluid domains	85
5 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική.....	97
5.1 Γενικά.....	97
5.2 Πως λειτουργεί ένας κώδικας CFD.....	97
5.2.1 Προ-επεξεργαστής.....	98
5.2.2 Επιλυτής.....	98
5.2.3 Μετα-επεξεργαστής.....	98
5.3 Κυβερνώντες μαθηματικές εξισώσεις – Εξισώσεις ANSYS-CFX.....	99
5.3.1 Εξίσωση συνέχειας.....	99
5.3.2 Η διανυσματική εξίσωση της ορμής.....	99
5.3.3 Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας	99
5.3.4 Η εξίσωση της θερμικής ενέργειας.....	100
5.4 ANSYS-CFX.....	100
5.4.1 Δημιουργία γεωμετρίας και πλέγματος της.....	100
5.4.2 Ορισμός φυσικού προβλήματος	100
5.4.3 Επίλυση	101
5.4.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων (post-processing)	101
5.6 Εισαγωγή μοντέλου στο ANSYS Workbench και πραγματοποίηση προσομοίωσης ..	101
5.6.1 Geometry.....	102
5.6.2 Mesh.....	102
5.6.3 ANSYS CFX-Pre.....	114

6 Αποτελέσματα	122
6.1 Naca-S_duct_1(στάσιμο όχημα)	122
6.2 Naca-S_duct_2	129
7 Συμπεράσματα.....	135
Βιβλιογραφία.....	137

Εικόνες

Εικόνα 1 Ιστορική εξέλιξη κυψελών καυσίμου (Qasem & Abdulrahman, 2024).....	12
Εικόνα 2 Τομή κυψέλης καυσίμου PEM (Lipman & Weber, 2018).....	13
Εικόνα 3 Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας κυψέλης καυσίμου PEM (Lipman & Weber, 2018)	14
Εικόνα 4 Στοιβα κυψελών καυσίμου, σύνδεση σε σειρά (Larminie & Dicks).....	15
Εικόνα 5 Κυψέλη καυσίμου 1020ACS.....	16
Εικόνα 6 Απαιτούμενα εύρη θερμοκρασιών	17
Εικόνα 7 Κατηγορίες αεραγωγών NACA (Sacks & Spreiter, 1951).....	18
Εικόνα 8 α) Στρόβιλοι κατά μήκος των αποκλινόντων τοιχωμάτων β) Περιοχές ταχυτήτων (Sacks & Spreiter, 1951)	19
Εικόνα 9 Εμφωλευμένος αεραγωγός με καμπύλα αποκλίνοντα τοιχώματα και γεωμετρικές μεταβλητές (Pignier, O'Reilly, & Boi, 2016)	19
Εικόνα 10 Δοκιμαστικά χείλη προσβολής στο πείραμα (W.Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945) ..	20
Εικόνα 11 Χείλος 6 σε ίντσες (W.Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945)	21
Εικόνα 12 Αρχική θέση κυψέλης καυσίμου	23
Εικόνα 13 Νέα θέση κυψέλης καυσίμου	23
Εικόνα 14 Αρχική θέση πυκνωτών	24
Εικόνα 15 Νέα θέση πυκνωτών.....	24
Εικόνα 16 Επίπεδο ορισμένο στην επιφάνεια εισαγωγής.....	25
Εικόνα 17 Όρια επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης. Με κίτρινο χρώμα αναπαρίστανται οι προβολές των ακμών ενώ με πράσινο τα ευθύγραμμα τμήματα ένωσής τους και συμμετρία.	25
Εικόνα 18 Επίπεδο ορισμένο παραμετρικά σε σχέση με το αρχικό.	26
Εικόνα 19 Προβολή άξονα συμμετρίας στο νέο επίπεδο (κίτρινο χρώμα)	26
Εικόνα 20 Επίπεδο δισδιάστατης σχεδίασης S-duct	27
Εικόνα 21 Σχεδίαση S-duct.....	28
Εικόνα 22 Σχεδίαση S-duct.....	29
Εικόνα 23 Σχεδίαση εισαγωγής S-duct.....	30
Εικόνα 24 Τόξα εισαγωγής.....	32
Εικόνα 25 Ένωση τόξων.....	32
Εικόνα 26 Τόξα οριζόντιων πτερυγίων εξαγωγής	34
Εικόνα 27 Εισαγωγή S-duct.....	36
Εικόνα 28 Οριζόντια πτερύγια εισαγωγής S-duct	36
Εικόνα 29 Ενοποίηση οριζόντιων πτερυγίων μέσω εντολής connect.....	37
Εικόνα 30 Προβολή εσωτερικών ακμών των υπό γωνία δοκών.....	37
Εικόνα 31 Φυσικά όρια και όρια ασφαλείας	38
Εικόνα 32 Δημιουργία επιπέδου, χρήση πράσινου ευθύγραμμου τμήματος και κάθετου ορίου επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης. Αντίστοιχα γίνεται και από την άλλη πλευρά	39
Εικόνα 33 Ενοποίηση Εξωτερικών τμημάτων.....	39
Εικόνα 34 Εντολή Extrude.....	40
Εικόνα 35 Δημιουργία γραμμών για χρήση εντολής Fill.....	41
Εικόνα 36 Εντολή Fill, δημιουργία πλάγιας επιφάνειας	42
Εικόνα 37 Ενιαίος αγωγός S-duct, εντολή Join.....	42
Εικόνα 38 Τομή δοκού πλαισίου.....	43
Εικόνα 39 Sketch τομής αγωγού	44
Εικόνα 40 Εξώθηση Sketch δοκού	44
Εικόνα 41 Εντολή Split	45
Εικόνα 42 Διαδικασία δημιουργίας επιφανειών στα περιγράμματα της τομής.	46
Εικόνα 43 Εικόνα 28 Δημιουργία φιλέτων μέσω εντολών α),β) "Egde fillets", 'γ)' "Variable fillets"	47
Εικόνα 44 Ορισμός πάχους κατασκευής μέσω "Thick surface"	48
Εικόνα 45 Εντολή "Join", συνένωση καμπυλών οριζόντιου πτερυγίου.	48
Εικόνα 46 Εντολή "Extrude surface", εξώθηση επιφάνειας πτερυγίου.....	49
Εικόνα 47 Προσθήκη πάχους στα πτερύγια.	49
Εικόνα 48 Τομή πτερυγίων	50
Εικόνα 49 Εισαγωγή σημείο επί της ακμής και παραμετροποίησή του.	50

Εικόνα 50 Εισαγωγή σημείων στις ακμές εισόδου του αεραγωγού και παραμετροποίηση τους	51
Εικόνα 51 Ορισμός επιπέδων με χρήση των τριών σημείων	52
Εικόνα 52 Γεωμετρία κάθετου πτερυγίου	52
Εικόνα 53 α) Επιφάνεια κάθετου πτερυγίου, β) Εξώθηση τρισδιάστατο κάθετου πτερυγίου, γ) S-duct.....	53
Εικόνα 54 Στρογγυλέψεις των πάνω ακμών των τομών κάθετων πτερυγίων- S-duct	54
Εικόνα 55 Στρογγυλέψεις των ακμών των τομών των δύο τύπων πτερυγίων	54
Εικόνα 56 Ακμές των τομών των οριζόντιων πτερυγίων με τον αεραγωγό	55
Εικόνα 57 Περιοχές εισόδου και εξόδου	55
Εικόνα 58 Προφίλ εγχοπών	56
Εικόνα 59 Τρισδιάστατα αντικείμενα εγχοπών.....	56
Εικόνα 60 Αποτέλεσμα αεραγωγού έπειτα από την αφαίρεση των εγχοπών για τη σωστή συναρμολόγηση στην κυψέλη	57
Εικόνα 61 Επίπεδο σχεδίασης Naca.....	58
Εικόνα 62 Διαστασιολόγηση διαθέσιμου χώρου για ανάπτυξη των Naca ducts.....	58
Εικόνα 63 Προεπισκόπηση αρχείου Exce	59
Εικόνα 64 Αρχείο εισαγωγής συντεταγμένων Naca duct , κάτοψη και πλάγια όψη	61
Εικόνα 65 Γεωμετρία κάτοψης	61
Εικόνα 66 Εξώθηση προφίλ κάτοψης.....	62
Εικόνα 67 Εξώθηση προφίλ πλάγιας όψης.....	62
Εικόνα 68 Αποκοπή περιττού τμήματος.....	63
Εικόνα 69 Δημιουργία φιλέτων στις ακμές	63
Εικόνα 70 Εντολή Multiple Extract για εξαγωγή προφίλ. α) Προφίλ εξόδου Naca β) προφίλ εισόδου S-duct.....	64
Εικόνα 71 Ευθύγραμμα τμήματα για ολοκλήρωση προφίλ εισόδου S-duct	65
Εικόνα 72 Φλάντζα σύνδεσης S-duct - Naca-duct.....	65
Εικόνα 73 Απόδοση πάχους	66
Εικόνα 74 Σύστημα αεραγωγών.....	66
Εικόνα 75 Αποκοπή τμήματος που εξώθηκε κατά τα αρνητικά Z	67
Εικόνα 76 Συντεταγμένες χείλους προσβολής	67
Εικόνα 77 Γεωμετρία χείλους πρόσπτωσης.....	68
Εικόνα 78 Εξώθηση προφίλ χείλους προς την τρίτη διάσταση.....	69
Εικόνα 79 Αποκοπή και παραμονή της γεωμετρίας που ορίζεται από τα τοιχώματα του Naca duct.....	69
Εικόνα 80 Εντολής "Thick Surface" για απόδοση πάχους στο χείλος.....	70
Εικόνα 81 Τελικό μοντέλο Naca duct.....	70
Εικόνα 82 Περίγραμμα γεωμετρίας καναλιών.....	71
Εικόνα 83 "corner" ακτίνας 0.1mm στις γωνίες.....	71
Εικόνα 84 Ορισμός επιπέδου για δημιουργία φλάντζας	72
Εικόνα 85 Σχεδιασμός γεωμετρίας καναλιών στο νέο επίπεδο	72
Εικόνα 86 "corner" της γεωμετρίας του επιπέδου φλάντζας.....	72
Εικόνα 87 Επίπεδο εξόδου diffuser	73
Εικόνα 88 Δισδιάστατη γεωμετρία ανεμιστήρα.....	73
Εικόνα 89 Δισδιάστατη γεωμετρία ανεμιστήρα.....	74
Εικόνα 90 Σχεδίαση οδηγών "splines".....	74
Εικόνα 91 Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου επιφανείας διαχύτη.	75
Εικόνα 92 Απόδοση πάχους	75
Εικόνα 93 Δημιουργία φιλέτου στην εσωτερική ακμή.	76
Εικόνα 94 Κάτοψη αεραγωγών	76
Εικόνα 95 Φυσικά όρια και διαστασιολόγηση	77
Εικόνα 96 Δημιουργία οριζόντιων επιφανειών αεραγωγού	78
Εικόνα 97 Κάτοψη κάθετων πλευρικών επιφανειών	78
Εικόνα 98 α) Εξώθηση κάθετων επιφανειών, β), γ) Εντολή "split" για αποκοπή περιττών τμημάτων	79
Εικόνα 99 "Sketch" προφίλ αποκοπής δοκού	80
Εικόνα 100 α) Εξώθηση προφίλ β) Αποκοπή	81
Εικόνα 101 α) Δημιουργία ευθύγραμμων τμημάτων, β) δημιουργία επιφανειών	82
Εικόνα 102 Δημιουργία φιλέτων	82
Εικόνα 103 Μετακίνηση πτερυγίων.....	83

Εικόνα 104 S_duct_2.....	84
Εικόνα 105 Δημιουργία εκ νέου του τρισδιάστατου μοντέλου επιφανειών του S-duct	85
Εικόνα 106 α) Εισαγωγή φιλέτων πλαϊνών ακμών β) Αποκοπή προφίλ δοκού γ) Εισαγωγή φιλέτων στις ακμές της αποκοπής	86
Εικόνα 107 Απόκτηση όγκου ρευστού του μοντέλου προσομοίωσης.....	87
Εικόνα 108 Απόκτηση όγκου ρευστού του μοντέλου κατασκευής.....	87
Εικόνα 109 Εντολή "Intersect"	88
Εικόνα 110 Εντολή "Remove".....	88
Εικόνα 111 Όγκος πεδίου ροής S-duct	88
Εικόνα 112 Απόκτηση όγκων Naca duct	89
Εικόνα 113 Αποκοπή τμήματος 10mm.....	89
Εικόνα 114 Αποκοπή χείλους προσβολής	90
Εικόνα 115 Εξώθηση τμήματος 10mm από τον όγκο ροής	90
Εικόνα 116 Όγκος ροής κατασκευαστικού μοντέλου	90
Εικόνα 117 Αφαίρεση "corners".	91
Εικόνα 118 Τρισδιάστατο μοντέλο επιφανείας διαχύτη προσομοίωσης	91
Εικόνα 119 Απόκτηση όγκου ροής μοντέλου προσομοίωσης.	92
Εικόνα 120 Εντολή "Intersect" μεταξύ των δύο όγκων ροής	92
Εικόνα 121 Όγκος ροής ανεμιστήρα.....	93
Εικόνα 122 "Sketch" κυψέλης καυσίμου	93
Εικόνα 123 Παραγωγή όγκου κυψέλης.	94
Εικόνα 124 Διαστασιολόγηση όγκου ροής περιβάλλοντος αέρα	95
Εικόνα 125 Παραγωγή όγκου ροής περιβάλλοντος αέρα.....	95
Εικόνα 126 Αφαίρεση όγκων Naca duct	96
Εικόνα 127 ANSYS Workbench.....	101
Εικόνα 128 Αντικείμενο στο περιβάλλον Meshing.....	102
Εικόνα 129 Ορισμός Flow domains.....	102
Εικόνα 130 Interface Naca_Ambient.....	103
Εικόνα 131 Interface S_duct_Fuelcell.....	103
Εικόνα 132 Interface Fuelcell_Diffuser	103
Εικόνα 133 Interface Diffuser_Fan.....	104
Εικόνα 134 Name Selections	104
Εικόνα 135 Καθολικός χειρισμός πλέγματος.....	105
Εικόνα 136 Επιφάνειες που χρειάζεται "Inflation" (κόκκινο χρώμα)	107
Εικόνα 137 geom_bodies.....	108
Εικόνα 138 Λεπτομέρειες επιλογών πλέγματος "geom_bodies"	108
Εικόνα 139 "Fins"	109
Εικόνα 140 "Sizing" των "Fins".....	109
Εικόνα 141 "Ambient"	110
Εικόνα 142 Μεταβλητές "Sizing" του "Ambient"	110
Εικόνα 143 "Ambient_Naca interfaces"	111
Εικόνα 144 Μεταβλητές "Sizing" του "Ambient_Naca_Interface"	111
Εικόνα 145 Λεπτομέρεια πλέγματος S-duct.....	112
Εικόνα 146 Λεπτομέρεια πλέγματος Ambient, Naca, S-duct.....	112
Εικόνα 147 Λεπτομέρεια πλέγματος καναλιού.....	113
Εικόνα 148 Λεπτομέρεια πλέγματος κυψέλης, διαχύτη, ανεμιστήρα	113
Εικόνα 149 "Domain Ambient"	114
Εικόνα 150 Ορισμός ιδιοτήτων "Ambient Domain".	115
Εικόνα 151 Ορισμός ιδιοτήτων "Fuel cell Domain".....	116
Εικόνα 152 Ορισμός "Domain" και "Subdomain".....	116
Εικόνα 153 Εφαρμογή ιδιοτήτων για τη πηγή θερμότητας.....	117
Εικόνα 154 Τοιχώματα κατασκευής	117
Εικόνα 155 Ιδιότητες τοιχωμάτων	118
Εικόνα 156 Συμμετρικές επιφάνειες.....	118
Εικόνα 157 Ανοίγματα περιβάλλοντος αέρα	119
Εικόνα 158 Ιδιότητες "Opening"	119

Εικόνα 159 "Outlet"	120
Εικόνα 160 "Opening" κινούμενου αυτοκινήτου.....	120
Εικόνα 161 " Inlet"	121
Εικόνα 162 Δάπεδο	121
Εικόνα 163 Τοιχώματα "Ambient domain".	121
Εικόνα 164 Τομή επιπέδου, τοπική ταχύτητα Naca-duct	122
Εικόνα 165 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής αγωγού S-εξόδου Naca	123
Εικόνα 166 Ροϊκές γραμμές , περιοχή Naca duct	123
Εικόνα 167 Ροϊκές γραμμές	124
Εικόνα 168 Γραμμές ροή , κάτοψη.....	124
Εικόνα 169 Τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, μοντέλο 2 NACA S DUCT.....	125
Εικόνα 170 Τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής, μοντέλο Naca_S-duct_1.....	126
Εικόνα 171 Θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, μοντέλο 2 NACA S DUCT	127
Εικόνα 172 Θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, μοντέλο Naca_S-duct_1.....	127
Εικόνα 174 Τομή επιπέδου, τοπική ταχύτητα Naca-duct	129
Εικόνα 175 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής αγωγού S-εξόδου Naca	130
Εικόνα 176 Γραμμές ροής, λεπτομέρεια NACA με χείλος πρόσπτωσης	130
Εικόνα 177 Γραμμές ροής.....	131
Εικόνα 178 Ροϊκές γραμμές σε κάτοψη μοντέλου.....	132
Εικόνα 179 Πεδίο ταχυτήτων στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης	133
Εικόνα 180 Πεδίο θερμοκρασιών εξωτερική επιφάνειας κυψέλης	134

Πίνακες

Πίνακας 1 Εύρη θερμοκρασιών	16
Πίνακας 2 Πίνακας αναλογιών Naca duct.....	59
Πίνακας 3 Προδιαγραφές.....	128
Πίνακας 4 Σημεία λειτουργίας	128

Εξισώσεις

Εξίσωση 1	14
Εξίσωση 2	14
Εξίσωση 3	14
Εξίσωση 4	17
Εξίσωση 5	17
Εξίσωση 6	99
Εξίσωση 7	99
Εξίσωση 8	99
Εξίσωση 9	99
Εξίσωση 10	99
Εξίσωση 11	100

1 Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία αφορά τη βελτίωση του συστήματος αεραγωγών που σχεδιάστηκε κατά την ανάπτυξη του συστήματος ψύξης της κυψέλης καυσίμου του αυτοκινήτου της ομάδας TUCER, του Πολυτεχνείου Κρήτης, (ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ-ΙΑΣΟΝΑΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ , Ιούλιος 2023). Το σύστημα καλείται να χρησιμοποιηθεί για τη ψύξη της κυψέλης καυσίμου PEMFC, με αυστηρούς περιορισμούς κατά τη λειτουργία της, με τροφοδοσία ψυκτικού αέρα από το δάπεδο του αυτοκινήτου. Επιλέχθηκε η βελτίωση των μοντέλων αεραγωγών που χρησιμοποιούν Naca duct, καθώς προσφέρουν μειωμένη αντίσταση και ικανοποιούν τους κανονισμούς που εφαρμόζονται στον διαγωνισμό που συμμετέχει η ομάδα (Shell Eco Marathon). Ο συνδυασμός των Naca ducts με τον καμπύλο αεραγωγό τύπου S-duct, δυσχεραίνει την ομοιόμορφη κατανομή της ροής και προκαλεί μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας στα κανάλια της κυψέλης καυσίμου, με αποτέλεσμα η θερμική απόδοση του συστήματος να υποβαθμίζεται. Αντικείμενο λοιπόν της εργασίας, είναι η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας εισόδου χωρίς την προσθήκη εκτροπών ή γεννητριών δινών, ενώ διατηρείται η γεωμετρία του διαχύτη και ο ανεμιστήρας, με σκοπό τη βελτίωση της κατανομής της ροής με απόρροια τη ελαχιστοποίηση των θερμικών διακυμάνσεων στην εξωτερική επιφάνεια της κυψέλης. Σχεδιάζονται παραμετρικά από την αρχή δύο διαμορφώσεις στο πρόγραμμα CATIA V5R20 για ευκολότερη μεταβολή των γεωμετρικών μεταβλητών. Η μεθοδολογία ανάπτυξης βασίζεται στη υπολογιστική ρευστοδυναμική προσομοίωση (CFD) που εκτελείται στο πρόγραμμα ANSYS-CFX, η οποία παρέχει αποτελέσματα για τα προφίλ ταχυτήτων και πιέσεων της ροής καθώς και των θερμοκρασιών στην επιφάνεια εξόδου της κυψέλης. Αρχικά η εργασία αρχίζει με την θεωρητική ανασκόπηση των βασικών εξαρτημάτων του συστήματος, στη συνέχεια αναλύεται η μεθοδολογία σχεδίασης και τα μοντέλα ενώ ακολουθεί η προσομοίωση αυτών και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

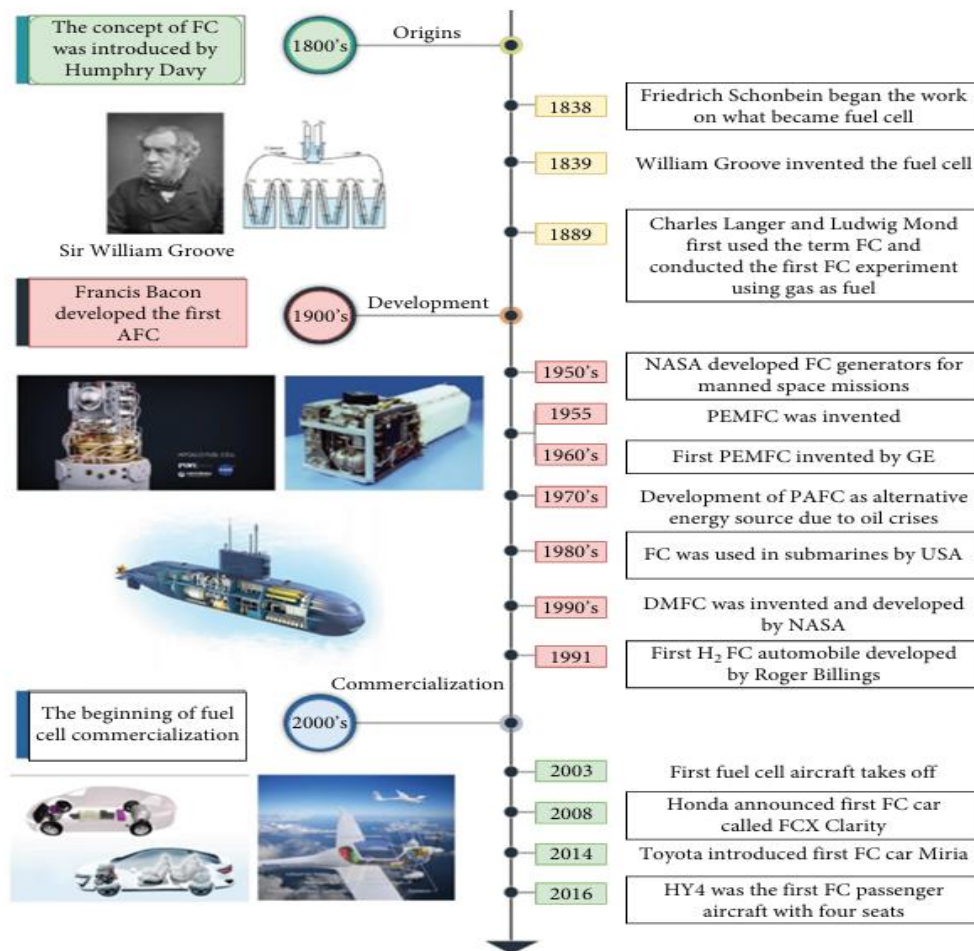
2 Κυψέλη Καυσίμου Υδρογόνου

Οι κυψέλες καυσίμου αν και η εμφάνισή τους χρονολογείται αρκετές δεκαετίες πίσω στον χρόνο, έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον καθώς είναι φιλικές προς το περιβάλλον γεννήτριες ενέργειας. Η λειτουργία τους βασίζεται στην μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική, ηλεκτροχημικά. Παρόμοια με τις μπαταρίες, χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια και ηλεκτρολύτες αλλά παράγουν συνεχώς ηλεκτρικό ρεύμα μέσω εξωτερικής προμήθειας καυσίμου αντί να την αποθηκεύουν. Οι κυψέλες καυσίμου εμφανίζονται σε πολλές εφαρμογές όπως μεταφορές, διαστημόπλοια και φορητών ή σταθερών εγκαταστάσεων. Οι κυψέλες καυσίμου κατατάσσονται σε κυψέλες καυσίμου (Qasem & Abdulrahman, 2024) :

- Με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)
- Άμεσης μεθανόλης (DMFCs)
- Στερεού οξειδίου (SOFCs)
- Φωσφορικού οξέος (PAFCs)
- Αλκαλικές (AFCs)
- Με τήγματα ανθρακικών αλάτων (MCFCs)

2.1 Ιστορία κυψελών καυσίμου

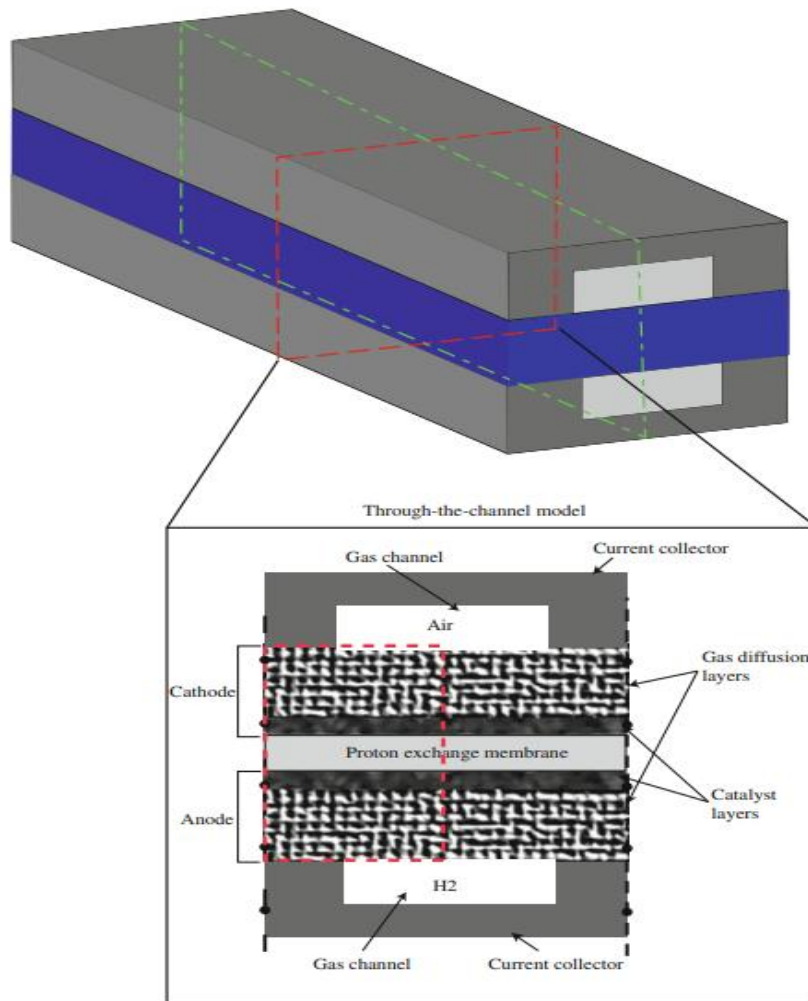
Η ιστορία των κυψελών καυσίμου ξεκινάει το 1839 όταν << ο πατέρας της επιστήμης των κυψελών καυσίμου>> Sir William Grove, αξιοποίησε την εμπειρία του στην ηλεκτρόλυση για να σκεφτεί μια αντίστροφη διαδικασία που θα παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια. Λίγα χρόνια αργότερα το 1889, οι Charles Langer και Ludwig Mond εισήγαγαν τον όρο <<Fuel Cell>> μελετώντας τες με χρήση αέριου άνθρακα ως καύσιμο. Η πρώτη αλκαλική κυψέλη καυσίμου αναπτύχθηκε από τον Francis Bacon, στις αρχές του 1900. Τέλη του 1950 και αρχές του 1960 η NASA ξεκίνησε έρευνες για τη χρήση κυψελών καυσίμου στις επανδρωμένες αποστολές της. Ο Williard Thomas Grubb ανέπτυξε την πρώτη κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) με χρήση πλατίνας ως καταλύτη. Οι κυψέλες καυσίμου εισήχθησαν τόσο στον δημόσιο όσο και στον ιδιωτικό τομέα λόγω της ανθεκτικότητας τους και αξιοπιστίας τους για μακροχρόνια λειτουργία. Το 2008 η τεχνολογία τους έγινε πλέον εμπορικά διαθέσιμη για πολλές εφαρμογές . Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται μια σύνοψη της ιστορικής εξέλιξής τους (Qasem & Abdulrahman, 2024) (Lipman & Weber, 2018).



Εικόνα 1 Ιστορική εξέλιξη κυψελών καυσίμου (Qasem & Abdulrahman, 2024)

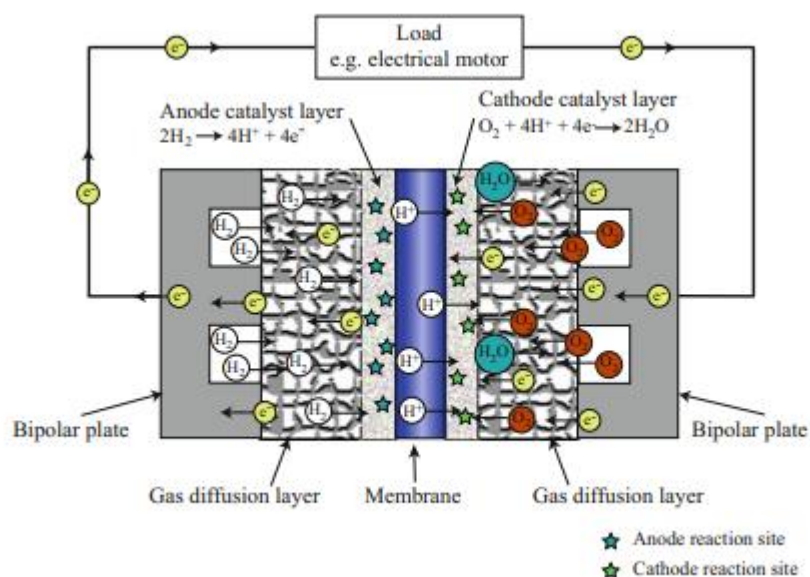
2.2 Τρόπος λειτουργίας κυψέλης καυσίμου PEM

Η κυψέλη καυσίμου PEMFC είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή μετατροπής ενέργειας που μετατρέπει τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου σε ηλεκτρική μέσω δύο ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, οι οποίες αντιδράσεις διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη, αεροστεγή και αγωγίμο στα ιόντα. Στις PEM ο ηλεκτρολύτης είναι μια μεμβράνη που είναι αγωγίμη στα πρωτόνια. Η μεμβράνη με επίστρωση καταλύτη (CCM), καλύπτεται (ένα από τη κάθε πλευρά) στρώμα μεταφοράς αερίων που αποτελείται από μικροπορώδες στρώμα καθώς και από στρώμα διάχυσης αερίων (GDL). Αυτή λοιπόν η κατασκευή, ονομάζεται κατασκευή ηλεκτροδίου-μεμβράνης (MEA) και τοποθετείται ανάμεσα σε δύο πλάκες που περιέχουν κανάλια για την παροχή των αντιδρώντων αερίων καθώς και την απόρριψη του νερού που παράγεται κατά τη διαδικασία. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται μια τομή μιας PEMFC (Lipman & Weber, 2018).



Εικόνα 2 Τομή κυψέλης καυσίμου PEM (Lipman & Weber, 2018)

Το σύνολο των περιοχών του στρώματος διάχυσης αερίων (GDL) και του στρώματος του καταλύτη (CL) αποτελούν από τη μία μεριά τη κάθοδο και από την άλλη τη άνοδο. Επομένως η κυψέλη αποτελείται από την άνοδο, τη κάθοδο και τον ηλεκτρολύτη (μεμβράνη). Η μεμβράνη πολυμερικού ηλεκτρολύτη θεωρείται η «καρδιά» μιας PEMFC. αυτή μεταφέρει ιόντα και εμποδίζει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα ηλεκτρόδιο ή την στρώση καταλύτη στον άλλο. Η κάθοδος και η άνοδος είναι το θετικό και αρνητικό άκρο αντίστοιχα, τα οποία συνδέουν τον ηλεκτρολύτη και το εξωτερικό κύκλωμα. Στην άνοδο βρίσκεται συνεχώς το καύσιμο ενώ στην κάθοδο το οξειδωτικό μέσο. Το καύσιμο είναι συνήθως καθαρό υδρογόνο ή μίγμα υδρογονοειδών αερίων όπως μεθανόλη, αιθανόλη και φυσικό αέριο, ενώ τα οξειδωτικά μέσα είναι καθαρό οξυγόνο ή οξυγόνο από αέρα ή αλογόνα (Lipman & Weber, 2018) (Qasem & Abdulrahman, 2024).



Εικόνα 3 Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας κυψέλης καυσίμου PEM (Lipman & Weber, 2018)

Στην PEMFC, η αντίδραση υδρογόνου διασπάται σε δύο ηλεκτροχημικές ημιαντιδράσεις:

Αντίδραση ανόδου



Εξίσωση 1

Αντίδραση καθόδου



Εξίσωση 2

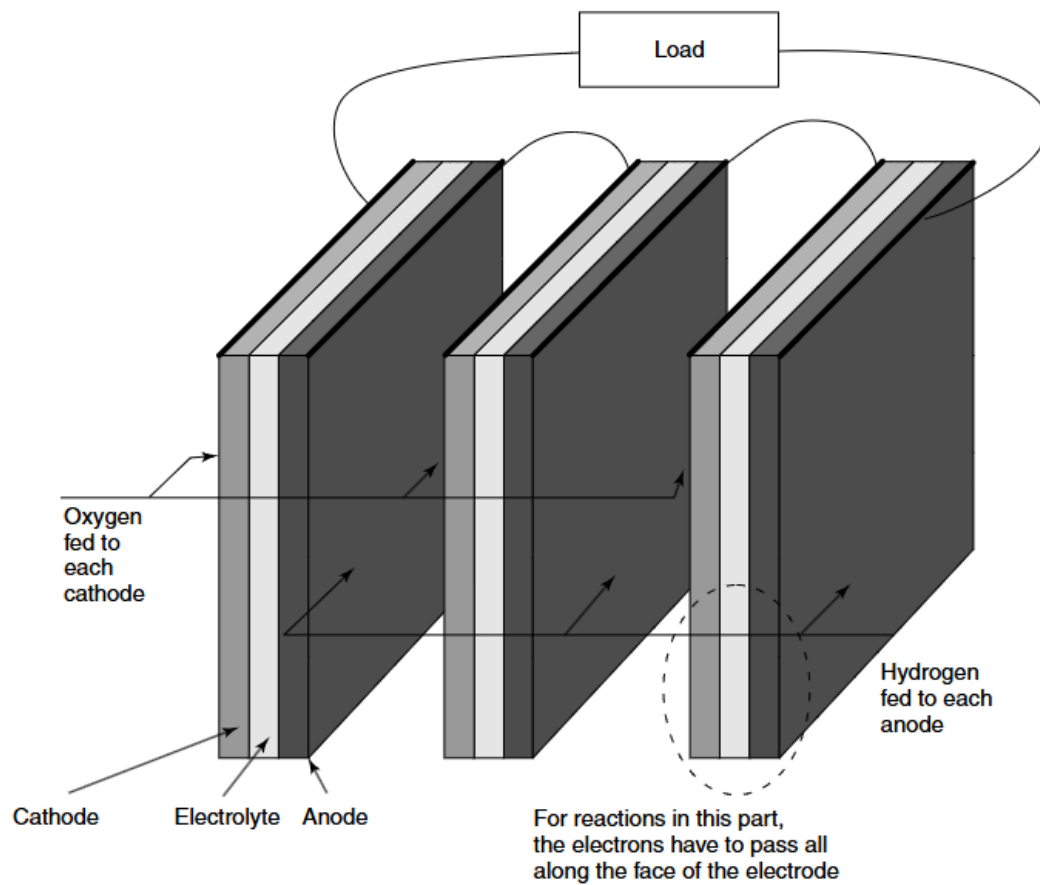
Συνολική Αντίδραση



Εξίσωση 3

Η αντίδρασης στην άνοδο υπαγορεύει τη παραγωγή, από το υδρογόνο H_2 , ιόντων (H^+) και ηλεκτρονίων (e^-). Τα (H^+), λοιπόν, διασχίζουν τον ηλεκτρολύτη, δηλαδή τη μεμβράνη και περνούν στη πλευρά της καθόδου, ενώ από την άλλη, τα ηλεκτρόνια κινούνται προς την κάθοδο διασχίζοντας όμως, το εξωτερικό κύκλωμα. Στην κάθοδο τα ιόντα (H^+) υδρογόνου που έχουν περάσει και τα ηλεκτρόνια που έρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα ενώνονται με το οξυγόνο (O_2) που εισέρχεται και παράγουν νερό. Στο εξωτερικό κύκλωμα συνδέεται κάποιο φορτίο, όπως για παράδειγμα στη περίπτωση του αυτοκινήτου της TUCER ηλεκτρικός κινητήρας, όπου αξιοποιείται για τη κίνηση του οχήματος, δηλαδή τα ηλεκτρόνια χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή έργου πριν καταναλωθούν και πάλι στη κάθοδο (Qasem & Abdulrahman, 2024).

Η τάση μιας κυψέλης καυσίμου είναι μικρή, περίπου 0.7 V . Αυτό σημαίνει ότι για χρήση σε πρακτικές εφαρμογές που απαιτείται μια χρήσιμη τάση, πρέπει να υπάρξει σύνδεση αυτών σε σειρά. Η διάταξη με την οποία συνδέονται οι κυψέλες καυσίμου ονομάζεται <<στοίβα>> (Εικόνα 4) (Lipman & Weber, 2018).



Εικόνα 4 Στοιβα κυψελών καυσίμου, σύνδεση σε σειρά (Larminie & Dicks).

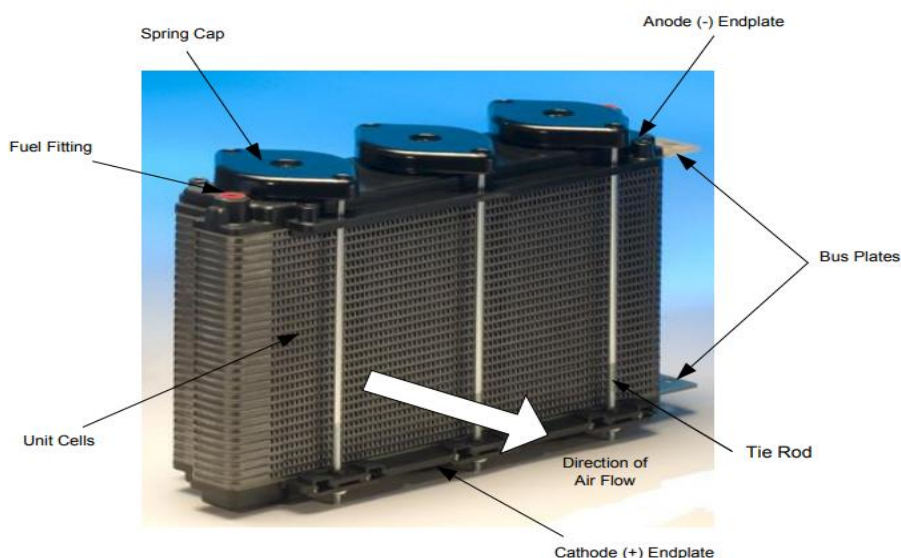
2.3 Κυψέλη καυσίμου αυτοκινήτου

Όπως αναφέρεται στην Μεταπτυχιακή εργασία (ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ-ΙΑΣΟΝΑΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ , Ιούλιος 2023) η κυψέλη καυσίμου που χρησιμοποιείται στο αυτοκίνητο είναι η 1020ACS της εταιρίας Ballard (Εικόνα 5). Η στοιβα 1020ACS είναι ανοιχτού τύπου καθόδου και απαιτεί ροή αέρα για να :

- παρέχεται οξειδωτικό για την αντίδραση της κυψέλης καυσίμου
- παρέχεται ψυκτικό μέσο για τη στοιβα, ώστε να απομακρύνεται η παραγόμενη θερμότητα

Στις γενική περίπτωση η απαίτηση της ροής του ψυκτικού μέσου υπερέχει αυτή της ροή του οξειδωτικού, επομένως η ψύξη είναι αυτή που ελέγχει τη ροή αέρα (Ballard, 2015).

Η κυψέλη μπορεί να παράξει από 0 έως 75A με εύρος τιμών ανά κυψέλη 0.5 έως 1 V/cell. Με βάση τις τιμές αυτές, υπάρχουν προκαθορισμένα εύρη θερμοκρασιών που πρέπει να λειτουργεί η κυψέλη (Ballard, 2015).



Εικόνα 5 Κυψέλη καυσίμου 1020ACS (Ballard, 2015)

Πίνακας 1 Εύρη θερμοκρασιών (Ballard, 2015)

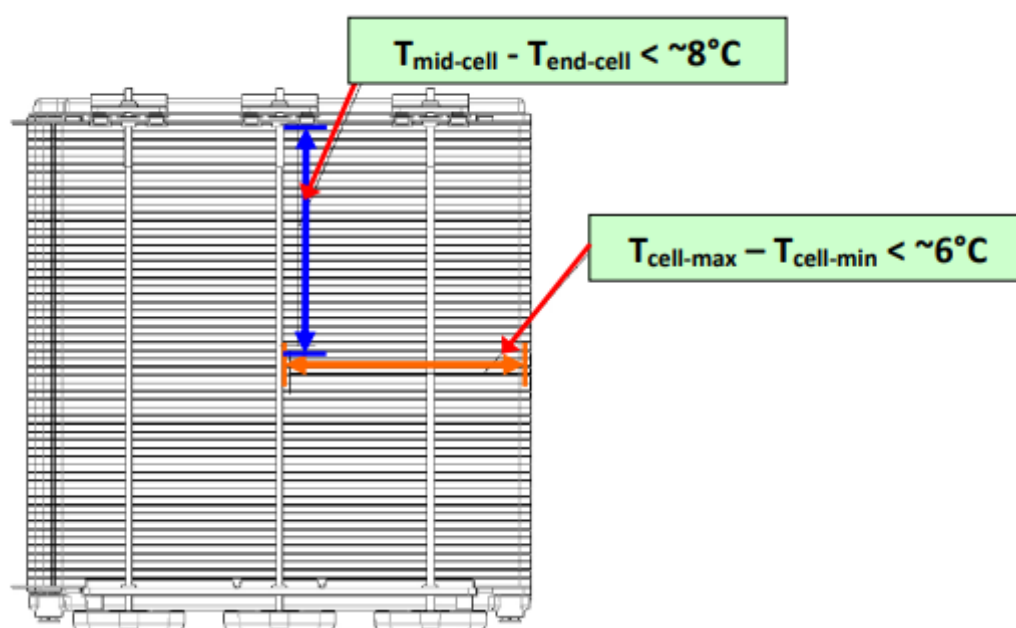
Stack Current(A)	0	7.3	14.5	29.0	51.7	65.3	77.0	87.1
Maximum(°C)	52	55	57	62	70	75	75	75
Optimum (°C)	26	30	34	41	53	61	67	72
Minimum (°C)	6	10	14	21	33	41	47	65
Required: greater than -10 °C								

Με βάση την παρακάτω εξίσωση προσδιορίζεται η βέλτιστη θερμοκρασία που πρέπει να λειτουργεί η κυψέλη (Ballard, 2015).

$$T_{opt} = 0.53I + 26.01$$

Εξίσωση 4

Επιπλέον απαιτείται η ομοιόμορφη ροή ώστε τα εύρη των θερμοκρασιών να είναι εντός ορισμένων τιμών θερμοκρασίας όπως απαιτείται από την κατασκευάστρια εταιρία. Επομένως, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του κέντρου και του πάνω (κάτω) άκρου θα πρέπει να είναι μικρότερη των 8 βαθμών Κελσίου, ενώ αυτή της μέγιστης και της ελάχιστης θερμοκρασίας κατά μήκος μιας κυψέλης μικρότερη των 6 βαθμών Κελσίου (Εικόνα 6). Σημαντική απόκλιση από τις παραπάνω τιμές δηλώνει ανομοιομορφία στο προφίλ θερμοκρασιών και της ροής.



Εικόνα 6 Απαιτούμενα εύρη θερμοκρασιών (Ballard, 2015)

Όσο αναφορά το θερμικό μοντέλο της κυψέλης καυσίμου, η παραγόμενη θερμότητα προκύπτει από την εξίσωση (Ballard, 2015):

$$q_{created} = n \cdot (1.253 - V_{cell}) \cdot I$$

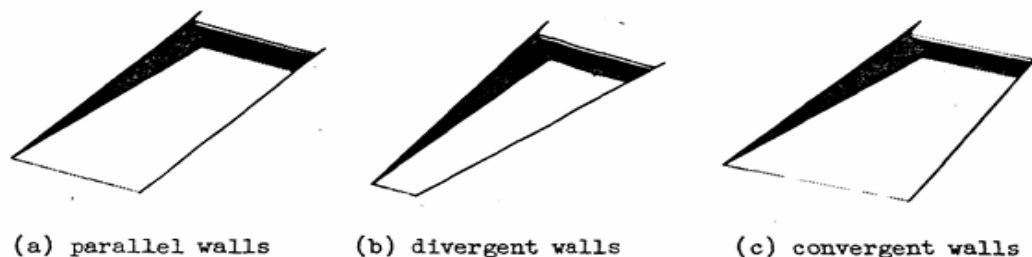
Εξίσωση 5

Όπου n ο αριθμός των κελιών (=28). Η κατασκευάστρια εταιρία προτείνει την αποτύπωση της κατάστασης λειτουργίας στο τέλος ζωής της κυψέλης. Οι παράμετροι για το τέλος ζωής είναι $V_{cell}=0.5$ V και $I=75$ A. Επομένως, $q_{created} = 56.48$ w/cell (ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ-ΙΑΣΟΝΑΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ, Ιούλιος 2023) (Ballard, 2015).

3 Εμφωλευμένοι Αεραγωγοί τύπου Naca Duct

Οι εμφωλευμένοι αεραγωγοί τύπου Naca Duct, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες (Sacks & Spreiter, 1951).

- Παράλληλα τοιχώματα
- Αποκλίνοντα τοιχώματα
- Συγκλίνοντα τοιχώματα



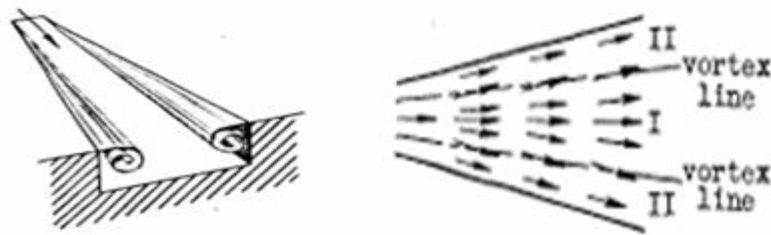
Εικόνα 7 Κατηγορίες αεραγωγών NACA (Sacks & Spreiter, 1951)

Σύμφωνα με τους Sacks και Spreiter η ροή στους εμφωλευμένους αεραγωγούς αποτελεί πρόκληση για την μαθηματική μοντελοποίηση τους. Οι εμφωλευμένοι αεραγωγοί με παράλληλα τοιχώματα αποτελούν την απλούστερη περίπτωση καθώς η ροή ακολουθεί την ίδια τροχιά με αυτά των τοιχωμάτων και επομένως μπορεί να προσεγγιστεί με δισδιάστατη ανάλυση. Αντίθετα, οι αεραγωγοί με αποκλίνοντα τοιχώματα παρουσιάζουν δύο διαφοροποιήσεις. Πρώτον, το οριακό στρώμα δεν μπορεί να συμπεριφέρεται όπως σε μια δυσδιάστατη ροή διότι αυτή έχει κατεύθυνση προς τα έξω ακολουθώντας τα αποκλίνοντα τοιχώματα. Δεύτερον, δημιουργούνται στρόβιλοι διότι η ροή στρέφεται προς τα μέσα διασχίζοντας τους τοίχους. Τέλος, η κατηγορία με συγκλίνοντα τοιχώματα παρουσιάζει και αυτή παρόμοια συμπεριφορά με αυτή των αποκλινόντων τοιχωμάτων. Η ανάπτυξη του οριακού στρώματος κατά μήκος του δαπέδου επηρεάζεται από τη σύγκλιση των τοιχωμάτων καθώς και είναι δυνατή η ύπαρξη ζεύγους στροβίλων, λόγω μη παραλληλότητας. Παρόλα αυτά η κατηγορία των αποκλινόντων τοιχωμάτων παρουσιάζει πιο υποσχόμενα πειραματικά αποτελέσματα από τις υπόλοιπες (Sacks & Spreiter, 1951).

3.1 Εμφωλευμένοι αεραγωγοί τύπου Naca με αποκλίνοντα τοιχώματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει χρήση της κατηγορίας των αποκλινόντων τοιχωμάτων καθώς παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Αναλυτικότερα για τη συμπεριφορά της ροής, τα οριακά στρώματα που χρήζουν ενδιαφέροντος είναι αυτά που αναπτύσσονται κατά μήκος της ράμπας καθώς και στους πλαϊνούς τοίχους αυτής. Οι έρευνες έχουν δείξει ότι το οριακό στρώμα στους τοίχους έχει μηδενικό αρχικό πάχος και αναπτύσσεται σε μικρή επιφάνεια γεγονός που το κάνει τόσο σημαντικό στις απώλειες εισόδου, εκτός και αν η απόκλιση είναι αρκετά μεγάλη που μπορεί να προκληθεί αποκόλληση. Αυτό της ράμπας αντίθετα, περικλείει μεγαλύτερη επιφάνεια και έχει μεγαλύτερο αρχικό πάχος και αποτελεί μείζονος σημασίας στοιχείο της ροής. Ο ρυθμός ανάπτυξης τους εξαρτάται από την κατανομή της πίεσης και την απόκλιση της ροής. Η κατανομή της πίεσης όμως επηρεάζεται από τη γεωμετρία της εισόδου και τον λόγο της μαζικής ροής ενώ από την άλλη η απόκλιση της ροής εξαρτάται από τη γεωμετρία του επιπέδου σχήματος της εισόδου και από της ταχύτητες που δημιουργούνται ως αποτέλεσμα των στροβίλων. Οι ταχύτητες αυτές αποκλίνουν από τη γραμμή συμμετρίας του αεραγωγού, δημιουργώντας δύο περιοχές. Η πρώτη περιοχή βρίσκεται κοντά στον άξονα συμμετρίας

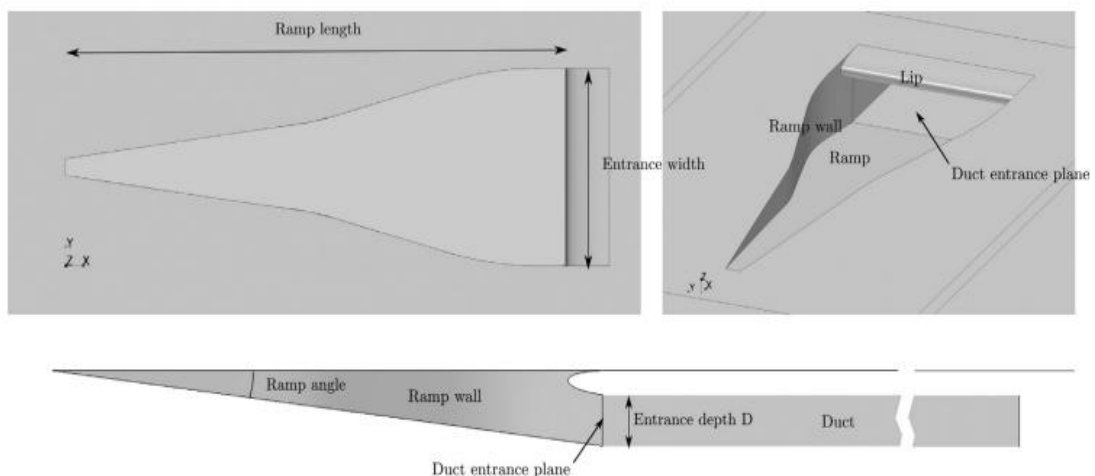
όπου η στρόβιλοι ενισχύουν την απόκλιση της ροής ενώ η δεύτερη περιοχή βρίσκεται προς τα τοιχώματα όπου τα ακολουθεί με λιγότερη συνεισφορά των στρόβιλων. Απόρροια των παραπάνω είναι ότι η δημιουργία του οριακού στρώματος είναι εντονότερη κοντά στους τοίχους της ράμπας όπου δεν υπάρχει απόκλιση, ενώ η ανάπτυξη κοντά στον άξονα συμμετρίας είναι πιο αργή (Sacks & Spreiter, 1951).



Εικόνα 8 α) Στρόβιλοι κατά μήκος των αποκλινόντων τοιχωμάτων β) Περιοχές ταχυτήτων (Sacks & Spreiter, 1951)

3.2 Προτεινόμενες γεωμετρικές μεταβλητές

Η σχεδίαση των αεραγωγών εξαρτάται από κάποιες γεωμετρικές μεταβλητές. Μέσα από την πειραματική μελέτη (W.Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945), οι ερευνητές προτείνουν ορισμένες τιμές για τη σχεδίαση εμφωλευμένων αεραγωγών.



Εικόνα 9 Εμφωλευμένος αεραγωγός με καμπύλα αποκλίνοντα τοιχώματα και γεωμετρικές μεταβλητές (Pignier, O'Reilly, & Boi, 2016)

Σχεδίαση Ράμπας

1. Η χρήση αποκλινόντων τοιχωμάτων για την ράμπα είναι απαραίτητη καθώς δείχνει την καλύτερη ανάκτηση πίεσης. Μάλιστα τα καμπύλα αποκλίνοντα τοιχώματα είναι τα καλύτερα.
2. Η γωνία της ράμπας θα πρέπει να βρίσκεται έως 10° . Για ράμπα 10° θα πρέπει να υπάρχει μικρότερη απόκλιση.
3. Αποδεικνύεται ότι η καλύτερη ανάκτηση πίεσης επιτυγχάνεται για λόγο πλάτους προς βάθους ίσο με 4.

Αναλογία διαστάσεων των εισόδων

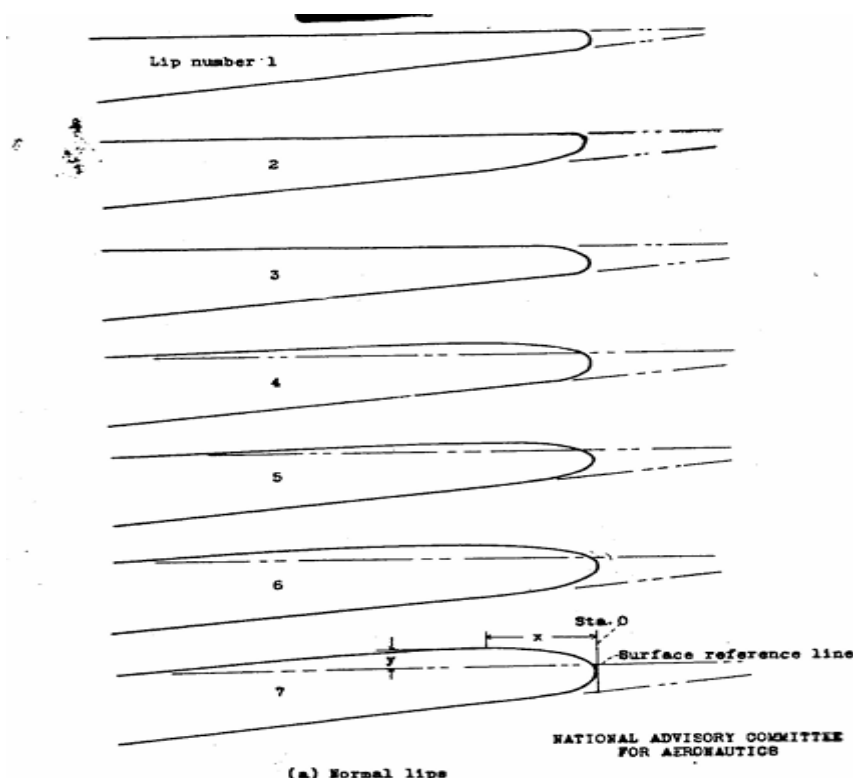
1. Η χρήση τετραγωνικής εισόδου έναντι ορθογώνιας με λόγο διαστάσεων 4 εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες πίεσης.

Πάχος οριακού στρώματος

1. Η αύξηση του οριακού στρώματος μειώνει την ανάκτηση πίεσης. Η μείωση αυτή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση εκτροπέων κατά μήκος της κορυφής των τοιχωμάτων της ράμπας. (Δεν χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη λόγω κανονισμών).

3.3 Χείλος προσβολής

Το χείλος προσβολής αποτελεί μείζονος σημασίας στοιχείου του αεραγωγού Naca. Όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα της Μεταπτυχιακής εργασίας (ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ-ΙΑΣΟΝΑΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ , Ιούλιος 2023), η παρουσία του χείλους προσβολής έδωσε καλύτερα αποτελέσματα. Σύμφωνα με τους (W.Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945), δοκιμάστηκαν έξι χείλη προσβολής. Το χείλος 1, ήταν η πρώτη προσπάθεια και αποτέλεσε σχέδιο αναφοράς, όμως έδωσε χαμηλή κρίσιμη ταχύτητα. Το χείλος 2 με στρογγύλευση στην εσωτερική πλευρά, ενώ βελτίωσε την ροή δεν κατάφερε να αυξήσει την κρίσιμη ταχύτητα. Το χείλος 3, με αντίθετη στρογγύλευση προκάλεσε χειροτέρευση στην κατάσταση της ροής με αύξηση απωλειών. Το χείλος 4 σχεδιάστηκε να προεξέχει και με στρογγύλευση και στις 2 πλευρές αύξησε τη κρίσιμη ταχύτητα και μείωσε την αποκόλληση. Το χείλος 5 σχεδιάστηκε με μικρότερη ακτίνα στρογγύλευσης από το 4 αλλά δεν έδειξε κάποια σημαντική βελτίωση. Τέλος το χείλος 6 με καμπυλότητα στην εξωτερική πλευρά και αύξηση του ύψους του κρίθηκε ικανοποιητικό (Εικόνα 10). Σημειώνεται ότι οι δοκιμές αφορούσαν αεροπλάνα.



Εικόνα 10 Δοκιμαστικά χείλη προσβολής στο πείραμα (W.Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945)

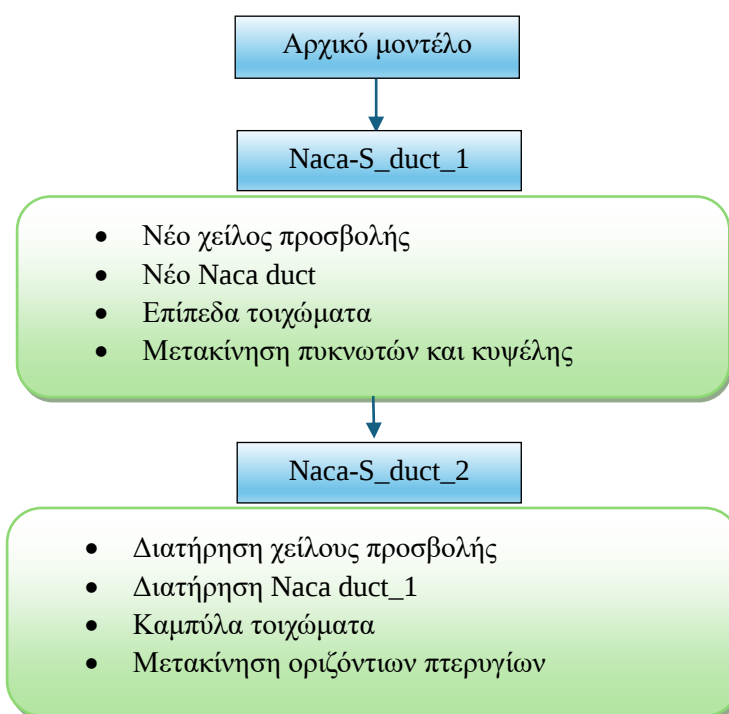
LIP 6 IN INCHES

Station	Outer surface	Inner surface
0	-0.240	-0.240
.25	-.087	-.462
.50	-.037	-.537
.75	-.012	-.597
1.00	0	-.627
1.50	0	-.692
2.00	0	-.757
2.50	0	-.819
3.00	0	-.879
3.50	0	-.940
4.00	0	-1.002
4.50	0	-1.064
Leading-edge radius = 0.125		

Εικόνα 11 Χείλος 6 σε ίντσες (W.Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945)

4. Καθολική προεπισκόπηση μοντέλου

Η διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου βασίστηκε σε παραγωγικό τρόπο σκέψης. Ως βάση για την ανάπτυξη κα βελτίωση του αεραγωγού χρησιμοποιήθηκε ο αεραγωγός Naca-S-duct με χείλος προσβολής της μεταπτυχιακής εργασίας . Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, προέκυψε η επιτακτική ανάγκη για αλλαγές στην υπάρχουσα γεωμετρία του αυτοκινήτου. Αναλυτικότερα, η απότομη κλίση του αεραγωγού S-duct προκαλούσε αποκολλήσεις του οριακού στρώματος με αποτέλεσμα την ύπαρξη ανομοιόμορφης ροής στα κανάλια εισόδου καθώς και περιοχές υψηλών στροβιλισμών. Τα φαινόμενα αυτά δυσχέραιναν την ομοιόμορφη κατανομή ροής στην κυψέλη και ως εκ τούτου την ανομοιόμορφη θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια.

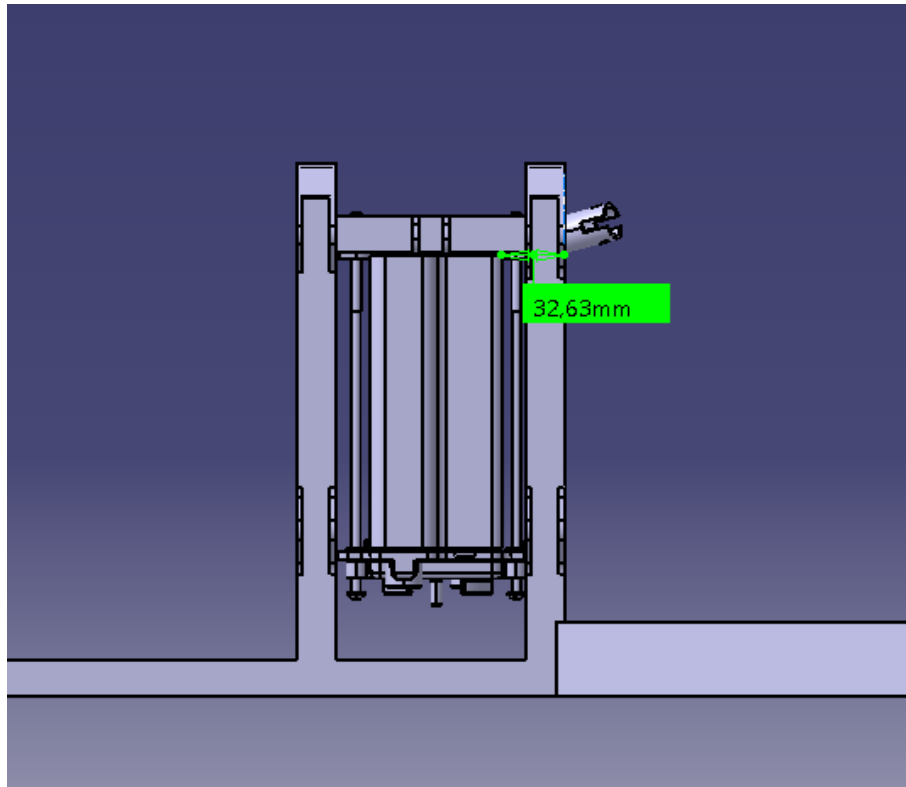


Σχήμα 1 Γράφημα ροής εργασιών των μοντέλων

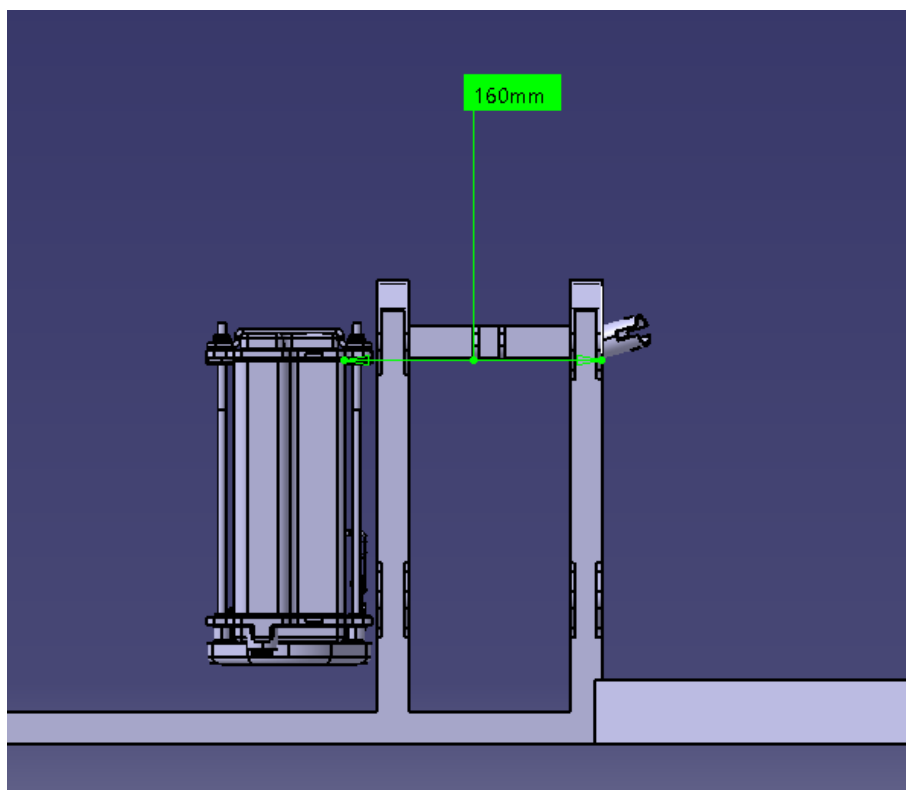
Επομένως, εξετάστηκαν οι επιλογές της απομάκρυνσης των πυκνωτών και τοποθέτησής τους σε υψηλότερο σημείο διατηρώντας όμως το κέντρο βάρους του αυτοκινήτου χαμηλά, το χείλος προσβολής του αεραγωγού Naca, καθώς και μετακίνηση της κυψέλης κατά 127,37 mm πιο πίσω. Σε δεύτερο στάδιο εξετάστηκαν τα πλαϊνά τοιχώματα του αεραγωγού S-duct. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται οι παραπάνω προσεγγίσεις μοντέλων του προβλήματος.

4.1 Σχεδιασμός μοντέλων

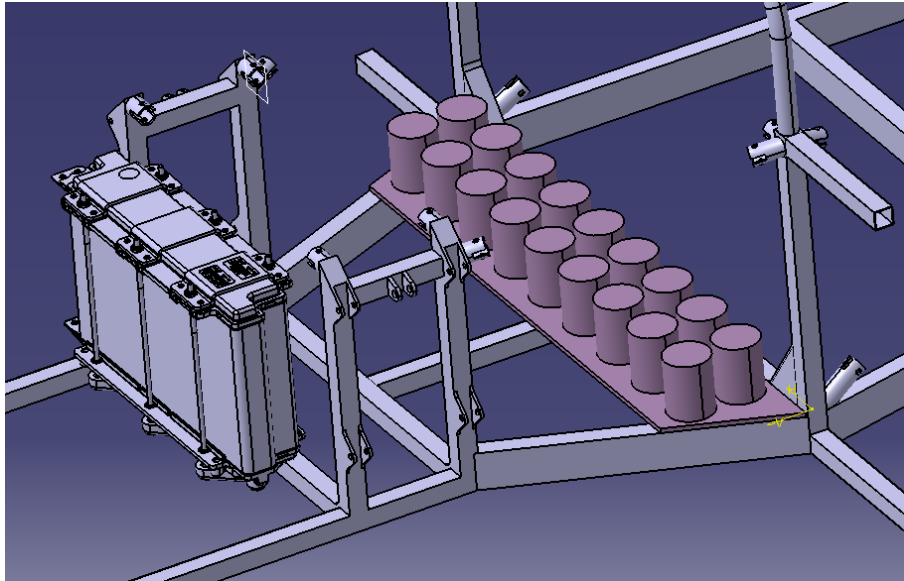
Ο αναλυτικός σχεδιασμός θα επικεντρωθεί στο μοντέλο Naca-S_duct_1. Αρχικά, θα χρειαστεί να μετακινηθεί η κυψέλη καυσίμου και η διάταξη των πυκνωτών. Όπως φαίνεται στις Εικόνες 12 και 13 η κυψέλη τοποθετήθηκε 127,37 mm πιο πίσω. Η απόσταση αυτή κρίθηκε και από τον παράγοντα της κατασκευής και οριοθέτησης του διαχύτη και του ανεμιστήρα, δηλαδή θα πρέπει να χωράνε στο κάλυμμα. Επίσης στις Εικόνες 14 και 15 παρουσιάζεται στα πλαίσια της βελτίωσης του αεραγωγού ψύξης της κυψέλης η νέα προτεινόμενη θέση των πυκνωτών. Η βάση των πυκνωτών μπορεί να προσαρμοστεί με κατάλληλα υποστηρίγματα μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης στους σωλήνες ανθρακωνημάτων που στηρίζουν τα δύο πλαίσια του αυτοκινήτου.



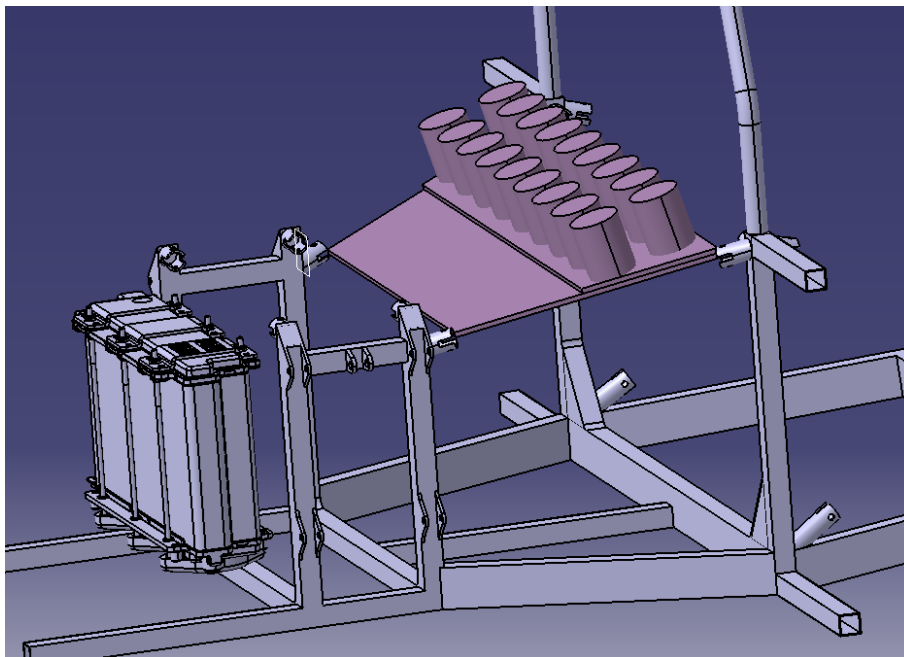
Εικόνα 12 Αρχική θέση κυψέλης καυσίμου



Εικόνα 13 Νέα θέση κυψέλης καυσίμου



Εικόνα 14 Αρχική θέση πυκνωτών

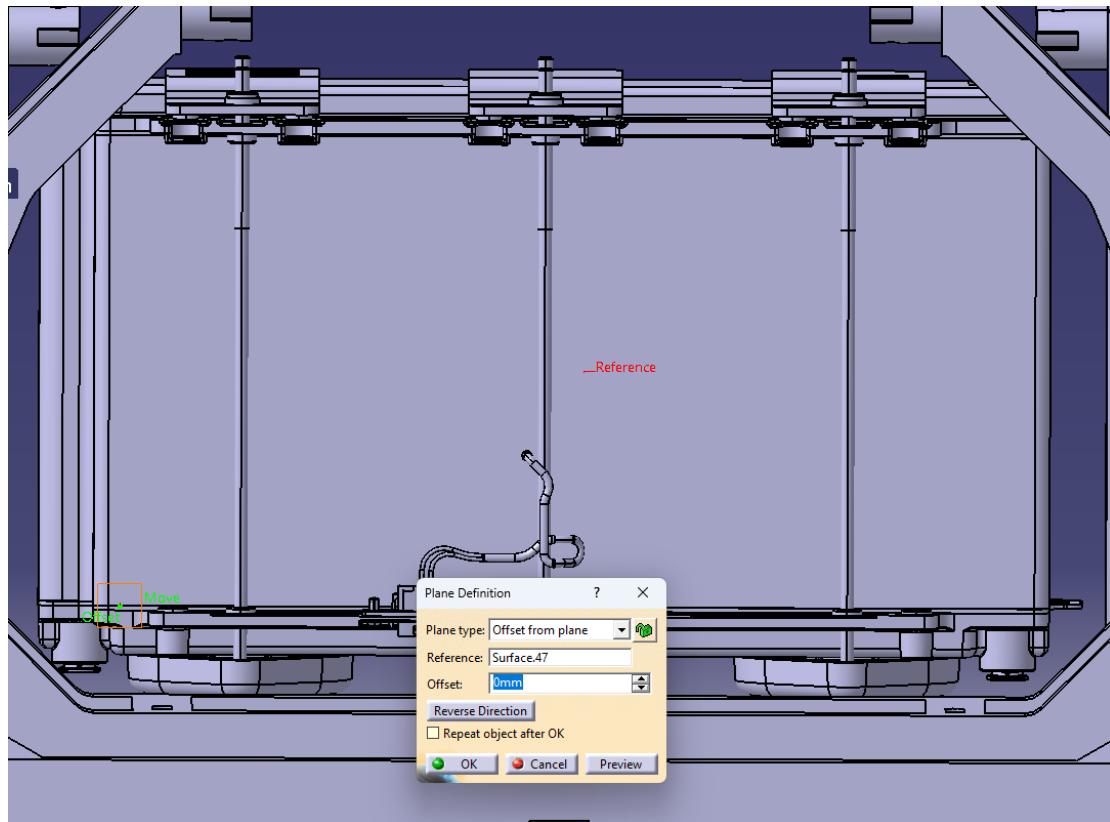


Εικόνα 15 Νέα θέση πυκνωτών

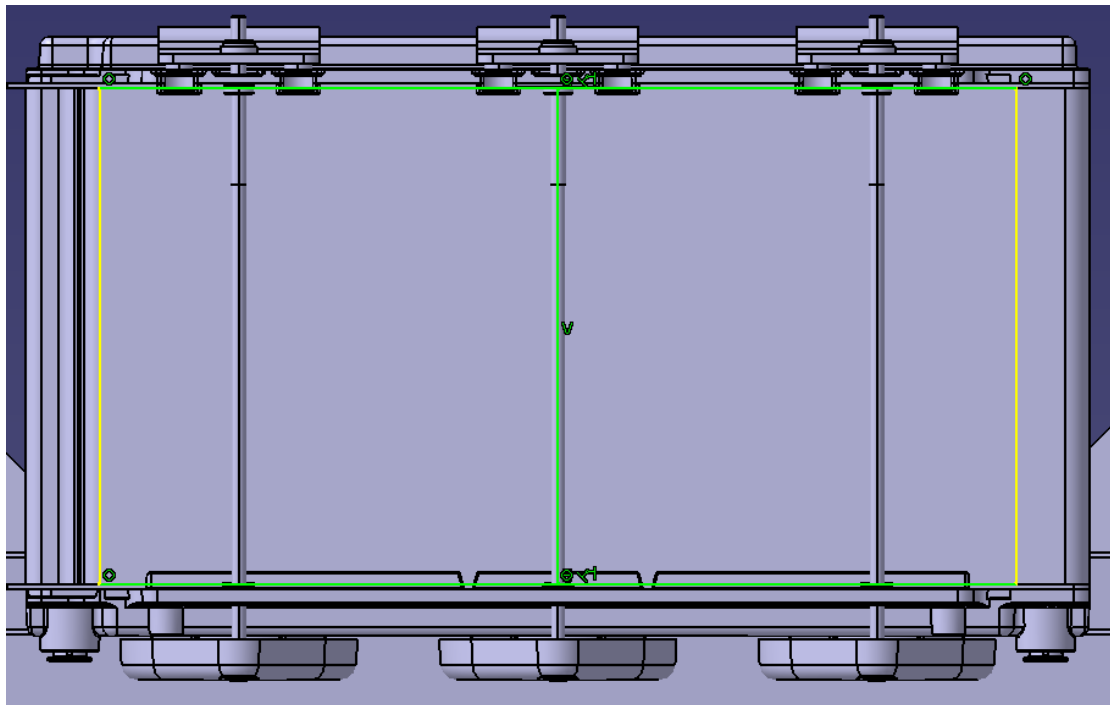
4.1.1 Σχεδιασμός μοντέλου εισαγωγής Naca-S_duct_1

Στην παρούσα ενότητα επικεντρωνόμαστε στη σχεδίαση του δεύτερου μοντέλου. Αρχικά θα χρειαστεί να προσδιορίσουμε τη χωροταξική διάταξη της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου. Για να γίνει αυτό θα χρειαστεί να οριστεί επίπεδο σχεδίασης στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης Εικόνα 16 . Στο επίπεδο αυτό θα γίνει προβολή των ακμών της επιφάνειας εισαγωγής της κυψέλης στην οποία περιέχονται τα κανάλια εισόδου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 17, γίνεται προβολή της δεξιάς και αριστερής ακμής της επιφάνειας (κίτρινο χρώμα) και έπειτα ενώνονται με ευθύγραμμο τμήματα (πράσινο χρώμα) ώστε να οριστούν τα όρια της. Επίσης σχεδιάζεται επιπλέον ευθύγραμμο τμήμα που αποτελεί τον άξονα συμμετρίας. Το πρώτο παραμετρικά ορισμένο στοιχείο αποτελεί το επίπεδο της Εικόνας 18. Ορίζεται ως παράλληλο με αυτό της επιφάνειας εισαγωγής και μέσω της μεταβλητής “flange_length” τοποθετείται κατά 60mm προς τα εμπρός (αρνητικά y). Στο επίπεδο αυτό γίνεται προβολή

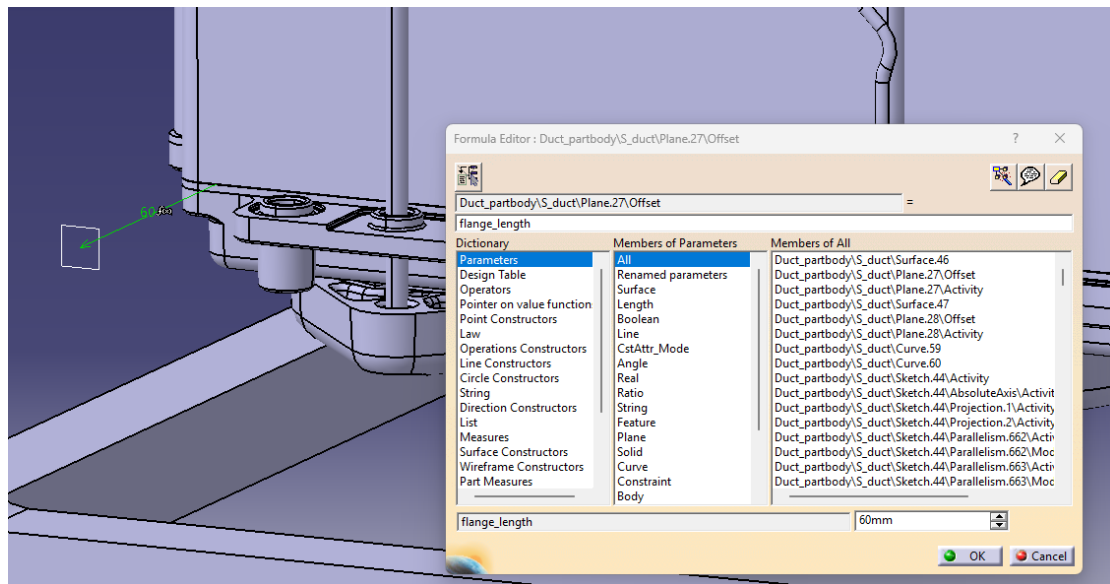
του παραπάνω άξονα συμμετρίας (Εικόνα 19). Ο λόγος δημιουργίας του είναι αφενός η δημιουργία φλάντζας εισαγωγής λόγω των αντικειμένων που υπάρχουν πριν της επιφάνειας εισόδου και αφετέρου η επέκταση της σταθερής διατομής του αεραγωγού S-duct έτσι ώστε να υπάρχει χώρος και χρόνος για ομαλότερη κατανομή και ανάπτυξη της ροής.



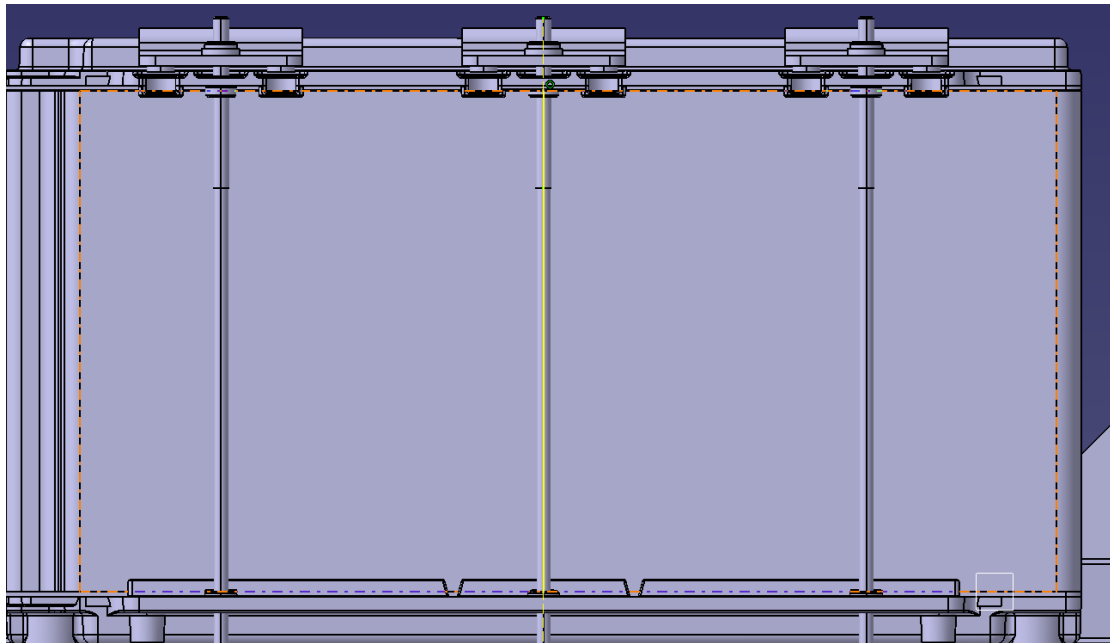
Εικόνα 16 Επίπεδο ορισμένο στην επιφάνεια εισαγωγής



Εικόνα 17 Όρια επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης. Με κίτρινο χρώμα αναπαρίστανται οι προβολές των ακμών ενώ με πράσινο τα ευθύγραμμα τμήματα ένωσής τους και συμμετρίας.

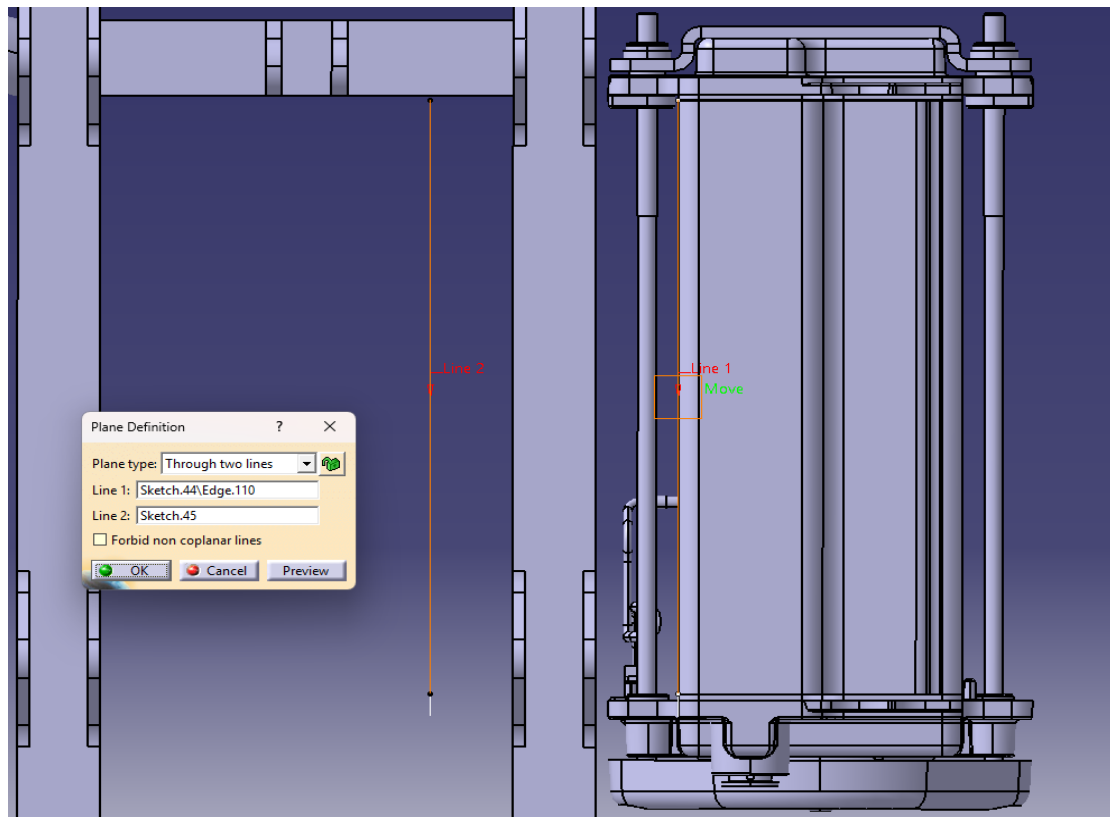


Εικόνα 18 Επίπεδο ορισμένο παραμετρικά σε σχέση με το αρχικό.



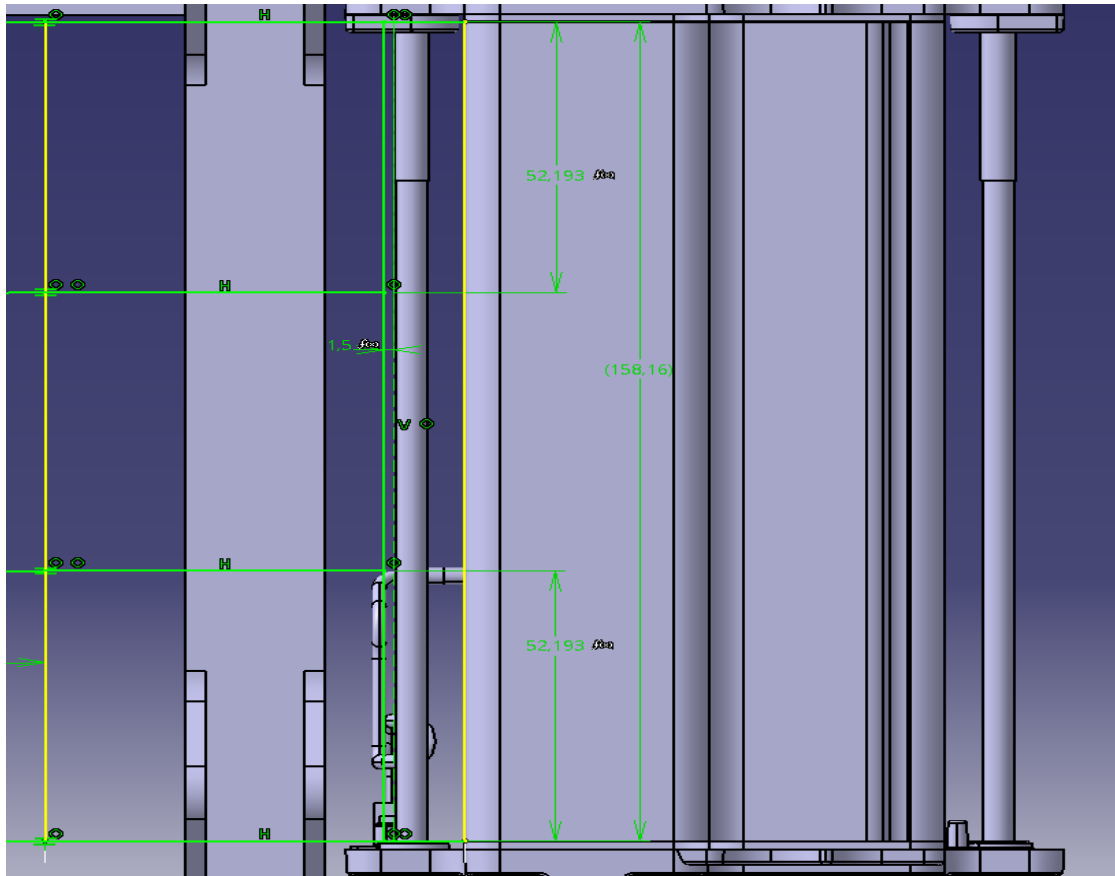
Εικόνα 19 Προβολή άξονα συμμετρίας στο νέο επίπεδο (κίτρινο χρώμα)

Στη συνέχεια ορίστηκε τρίτο επίπεδο κάθετο στα προηγούμενα δύο, μέσω των δύο ευθύγραμμων τμημάτων που αποτελούν άξονα συμμετρίας και προβολής του, αντίστοιχα. Στο επίπεδο αυτό θα σχεδιαστεί και η κύρια γεωμετρία του αεραγωγού S-duct, όπου θα οριστεί ως επί το πλείστον και η παραμετρική σχεδιάσή του (Εικόνα 20).



Εικόνα 20 Επίπεδο δισδιάστατης σχεδίασης S-duct

Εξαιρετικά σημαντικό αποτελεί το πάχος της κατασκευής. Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει κενό μεταξύ των καναλιών εισόδου και των ελασμάτων συγκράτησής αυτών. Το κενό αυτό θα αποτελέσει και το πάχος της κατασκευής το οποίο θα οριστεί παραμετρικά με τη μεταβλητή *“airways_thickness”*. Επομένως θα γίνει προβολή των αξόνων όπου ορίστηκε το επίπεδο (κίτρινο χρώμα). Έπειτα θα σχεδιαστεί κάθετο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα το οποίο θα οριοθετεί και τον άξονα συγκράτησης των ελασμάτων. Επί αυτού ένα δεύτερο παράλληλο ευθύγραμμο τμήμα (πράσινο χρώμα) θα ορίζει μέσω της μεταβλητής *“offset_from_chassis”* την απόσταση που θα έχουν τα πτερύγια από το φυσικό όγκο της κυψέλης που θα συναντούν κατά τη προσέγγισή τους προς αυτή και αυτό δεν είναι άλλο από τον παραπάνω κοχλία συγκράτησης. Βάση αυτών των ευθύγραμμων τμημάτων η σχεδίαση συνεχίζεται με την δημιουργία τεσσάρων παράλληλων ευθύγραμμων τμημάτων, όπου θα αποτελούν τα φυσικά όρια του S-duct καθώς και τα δύο οριζόντια πτερύγια. Τα φυσικά όρια τοποθετήθηκαν με χρήση περιορισμών μέσω σημείων. Αναλυτικότερα με τον πρώτο βαθμό συνέχειας coincidence μεταξύ των άκρων αυτών και των κάθετων ορίων της κατασκευής. Εν συνεχεία απαραίτητη είναι η μετακίνησή των πτερυγίων παραμετρικά. Επομένως ορίστηκαν αποστάσεις από τα τοιχώματα του αεραγωγού οι οποίες αποτελούν ποσοστιαίο κλάσμα του συνολικού ύψους της επιφάνειας εισαγωγής της κυψέλης το οποίο είναι 158,16mm. Αρχικά ορίστηκαν στο 33% όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6. Επίσης όπως αναφέρθηκε παραπάνω διατηρούν απόσταση από τον άξονα συγκράτησης (*offset_from_chassis*) 1,5mm (Εικόνα 21).



Εικόνα 21 Σχεδίαση S-duct

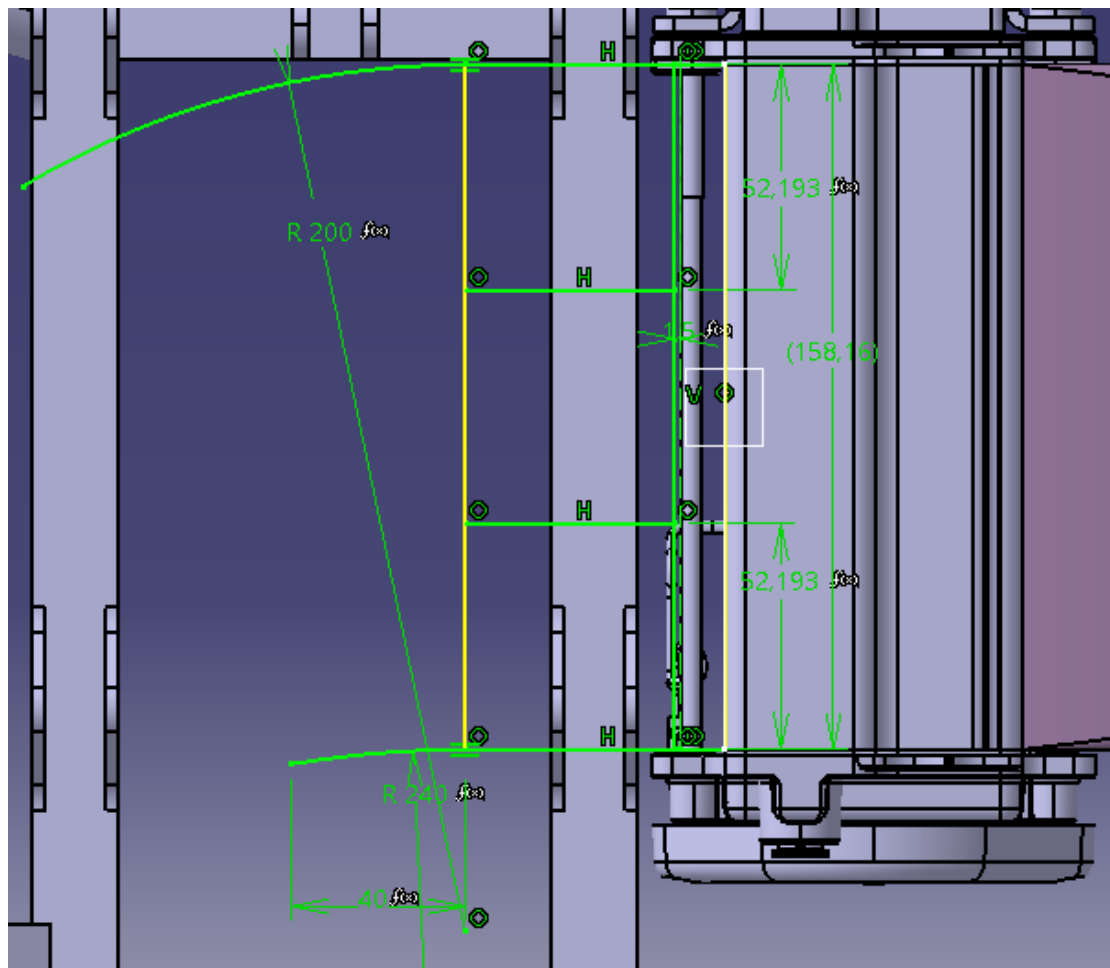
Συνεχίζοντας προς την εισαγωγή του αεραγωγού, δημιουργούνται οι πρώτες καμπύλες που οδηγούν προς το πάτωμα του αυτοκινήτου (Εικόνα 22). Καταρχάς, δημιουργείται το άνω τόξο και κάτω τόξο με τους εξής περιορισμούς.

Περιορισμοί Άνω τόξου

- ✓ Το δεξί σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το αντίστοιχο άνω ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Εφαπτόμενο (tangency) με το παραπάνω ευθύγραμμο τμήμα για αποφυγή ακμής η οποία θα δημιουργούσε αποκολλήσεις στη ροή.
- ✓ Το κέντρο του μπορεί να ολισθαίνει μόνο ως προς τον άξονα συμμετρίας του επιπέδου που ρυθμίζεται με τη μεταβλητή *'flange length'*, δηλαδή άξονα Z του σχεδίου.
- ✓ Μεταβλητή με όνομα *'radius_up_inlet'* ελέγχει την ακτίνα του.
- ✓ Το αριστερό άκρο του θα μείνει προς το παρόν ελεύθερο.

Περιορισμοί Κάτω τόξου

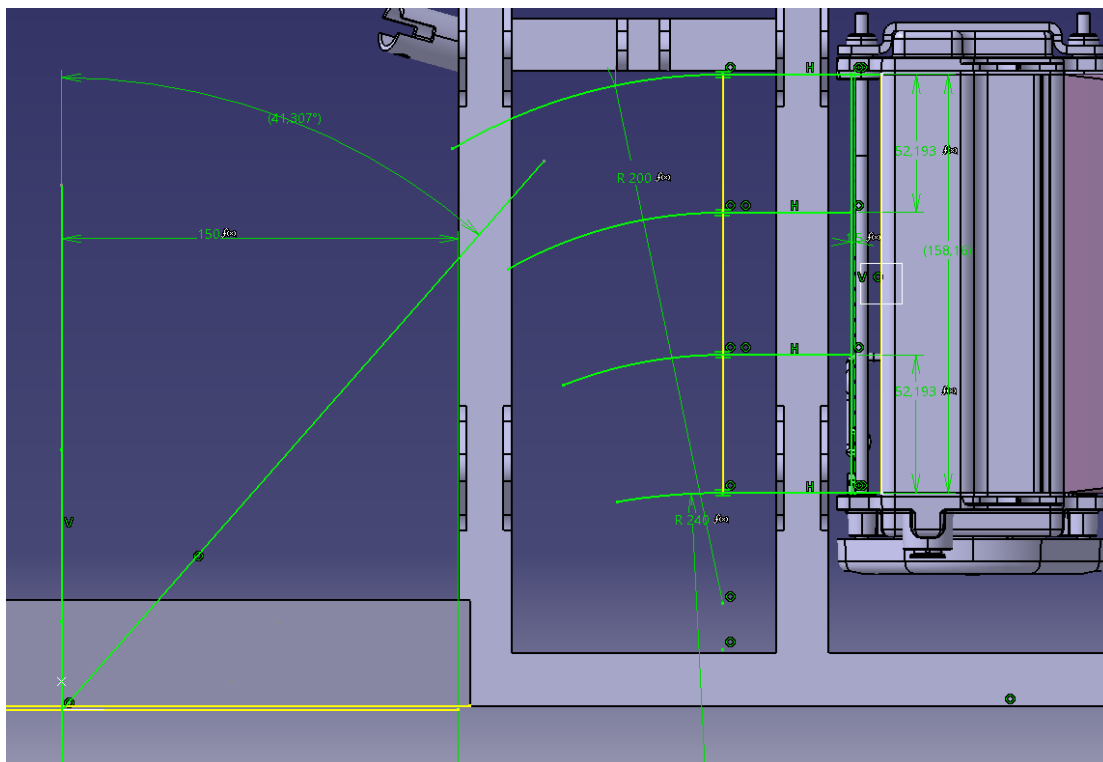
- ✓ Το δεξί σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το αντίστοιχο κάτω ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Εφαπτόμενο (tangency) με το παραπάνω ευθύγραμμο τμήμα για αποφυγή ακμής η οποία θα δημιουργούσε αποκολλήσεις στη ροή.
- ✓ Το κέντρο του μπορεί να ολισθαίνει μόνο ως προς τον άξονα συμμετρίας του επιπέδου που ρυθμίζεται με τη μεταβλητή “*flange length*”, δηλαδή άξονα Z του σχεδίου.
- ✓ Μεταβλητή με όνομα “*input_dwn_fc_radius*” ελέγχει την ακτίνα του
- ✓ Η μεταβλητή “*input_dwn_fc_radius_length*” ελέγχει την απόσταση του αριστερού άκρου από τον άξονα συμμετρίας του δεύτερου επιπέδου.



Εικόνα 22 Σχεδίαση S-duct

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η σχεδίαση της εξαγωγής του αεραγωγού S-duct και αντίστοιχα εισαγωγής της κυψέλης, η διαδικασία συνεχίζεται για τη δημιουργία της εισαγωγής του S-duct. Όπως και παραπάνω θα πρέπει αρχικά να δημιουργηθεί μια χωροταξική οριοθέτηση των δομικών στοιχείων του αυτοκινήτου, τα οποία θα είναι και τα όρια της κατασκευής. Επομένως γίνεται προβολή επί του επιπέδου της κάτω ακμής της δοκού του σκελετού που βρίσκεται στο πάτωμα του αυτοκινήτου καθώς και του πατώματος αυτού (αναπαρίστανται με

κίτρινο χρώμα). Έπειτα σχεδιάζεται κάθετο ευθύγραμμο τμήμα το οποίο με τον περιορισμό coincidence δύναται να μετακινείται κατά την οριζόντια διεύθυνση, δηλαδή επί των κίτρινων προαναφερθέντων ευθύγραμμων τμημάτων (Εικόνα 23). Η σημασία του τμήματος αυτού είναι η αναπαράσταση της αρχής του αεραγωγού S-duct. Επομένως είναι απαραίτητο να οριστεί παραμετρικά η απόσταση που θα έχει από την πρώτη κάθετη δοκό που συναντά ο S-duct. Ο λόγος που γίνεται ορισμός από τη πρώτη κάθετη δοκό και όχι από το τμήμα που όριζε παραπάνω τη φλάντζα προσαρμογής δεν είναι άλλος από την οριοθέτηση του πλαισίου η οποία δεν επιτρέπει τον αυθαίρετο ορισμό της εισαγωγής. Επομένως, μέσω της μεταβλητής “*max_dist_chassis*” ορίζουμε παραμετρικά την απόσταση του. Έπειτα η τομή που δημιουργείται μεταξύ του κάθετου αυτού τμήματος και της κίτρινης ευθείας του πατώματος αποτελεί επίπεδο περιστροφής επί του οποίου σχεδιάζεται ευθύγραμμο τμήμα που διέρχεται από αυτή. Με τον περιορισμό coincidence μεταξύ του ενός άκρου και της τομής το ευθύγραμμο τμήμα διέρχεται μέσω αυτής και περιστρέφεται παραμετρικά μέσω της γωνίας που δημιουργεί με το κάθετο ευθύγραμμο τμήμα που προσχεδιάστηκε, μέσω της μεταβλητής “*angle_tang*”. Ο λόγος σχεδίασης του είναι η διαχείριση από τον χρήστη της καμπυλότητας του αεραγωγού, Εικόνα 23.



Εικόνα 23 Σχεδίαση εισαγωγής S-duct

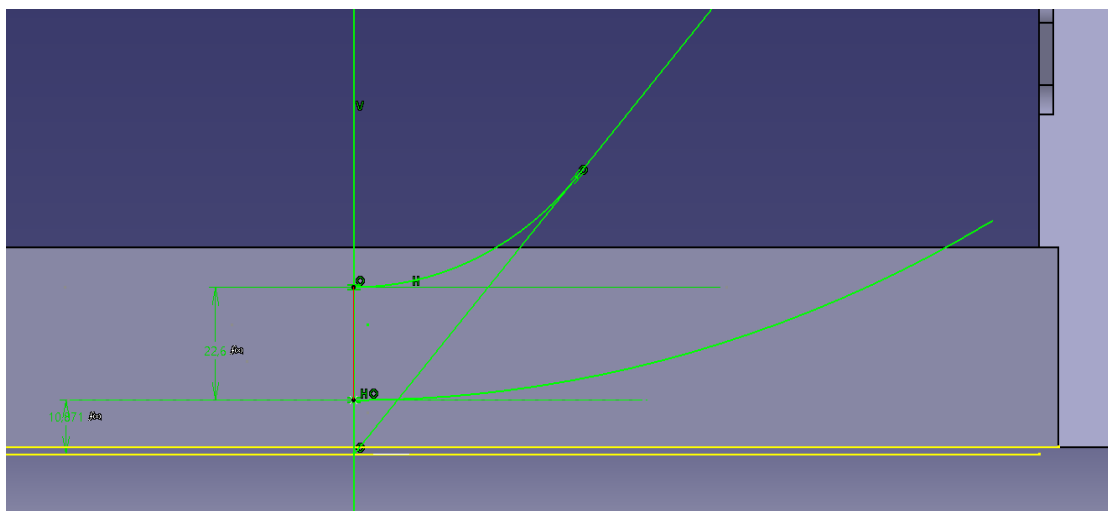
Στη συνέχεια σχεδιάζονται τα τόξα που θα δομήσουν την γεωμετρία εισαγωγής. Αρχικά σχεδιάζονται δυο οριζόντια ευθύγραμμα τμήματα (διακεκομμένα) η χρήση των οποίων είναι ιδιαίτερα σημαντική ώστε η εισαγωγή S-duct και η εξαγωγή Naca duct να είναι εφαπτόμενες ώστε να αποκλείονται φαινόμενα αποκόλλησης. Οι αποστάσεις των τμημάτων αυτών από το δάπεδο του αυτοκινήτου ορίζουν το ύψος του χείλους προσβολής καθώς και το ύψος της εισαγωγής, μεταβλητές οι οποίες αποτελούν μείζονος σημασίας χαρακτηριστικά για τη βέλτιστη δημιουργία του Naca duct. Το κάτω τόξο απέχει από το δάπεδο απόσταση που παραμετροποιείται μέσω της μεταβλητής “*lip_high*” ενώ το πάνω μέσω της “*inlet_high*”, η οποία όμως ορίζεται μεταξύ των δύο τμημάτων (Εικόνα 24). Έφόσον έχουν οριστεί τα παραπάνω, σχεδιάζονται δύο τόξα τα οποία πληρούν τους παρακάτω περιορισμούς.

Περιορισμοί άνω τόξου

- ✓ Το αριστερό σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το κάθετο ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Το δεξί σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το περιστρεφόμενο τμήμα.
- ✓ Το κέντρο του μπορεί να ολισθαίνει μόνο ως προς τον κάθετο ευθύγραμμο τμήμα, δηλαδή άξονα Z του σχεδίου.
- ✓ Μεταβλητή με όνομα *'bellmouth_radius'* ελέγχει την ακτίνα του.
- ✓ Εφαπτόμενο με το οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Εφαπτόμενο με το περιστρεφόμενο ευθύγραμμο τμήμα.

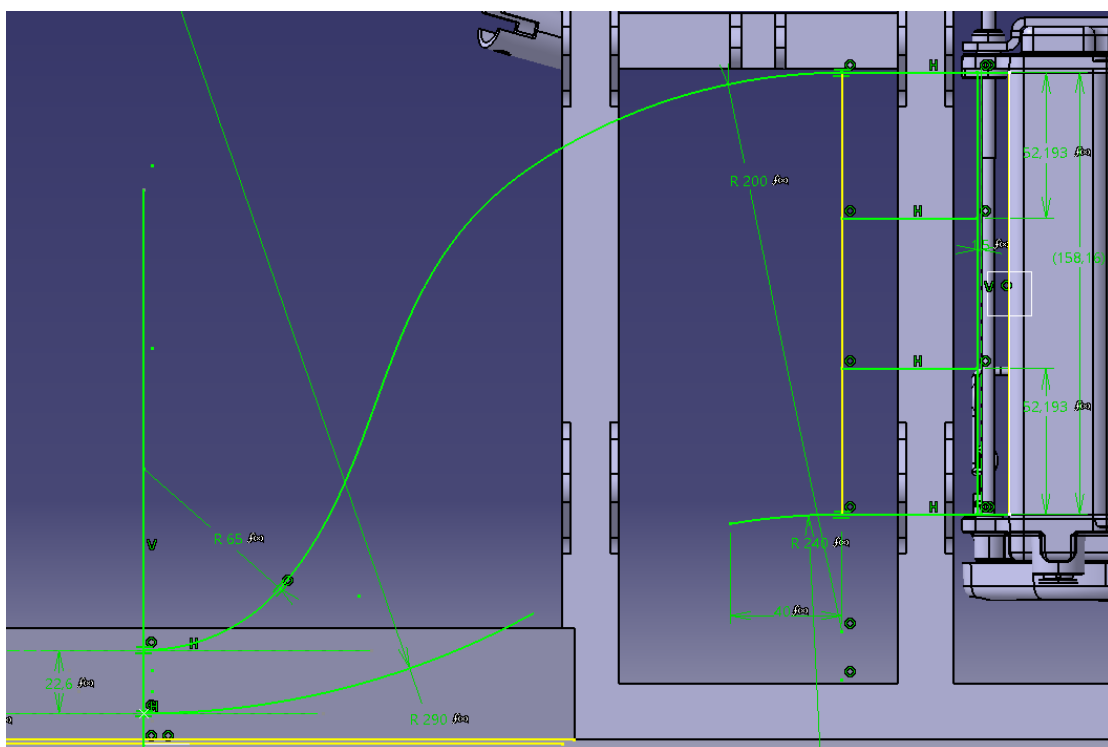
Περιορισμοί κάτω τόξου

- ✓ Το αριστερό σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το κάθετο ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Το δεξί σημείο απέχει απόσταση που ορίζεται μέσω της μεταβλητής *'input_airway_radius_length_fc_base'* από τη πρώτη κάθετη δοκό .
- ✓ Το κέντρο του μπορεί να ολισθαίνει μόνο ως προς τον κάθετο ευθύγραμμο τμήμα, δηλαδή άξονα Z του σχεδίου.
- ✓ Μεταβλητή με όνομα *'input_airway_radius'* ελέγχει την ακτίνα του.
- ✓ Εφαπτόμενο με το οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα.



Εικόνα 24 Τόξα εισαγωγής

Για να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του αεραγωγού θα χρειαστεί τα τόξα αυτά να ενωθούν. Επομένως μέσω της εντολής “connect”, επιλέγοντας τις δύο ελεύθερες άκρες των δύο πάνω τόξων δημιουργείται μια spline που τις ενώνει. Ως βαθμός συνέχειας επιλέχθηκε δεύτερου βαθμού συνέχειας (tangency) με το κάτω τόξο και τρίτου βαθμού (curvature) με το άνω τόξο (Εικόνα 25).



Εικόνα 25 Ένωση τόξων

Σειρά στο σχεδιασμό του αεραγωγού έχει η δημιουργία εσωτερικών οριζόντιων πτερυγίων. Στόχος είναι να μοιραστεί όσο το δυνατόν καλύτερα η ροή στα κανάλια για να έχουμε πιο ομοιόμορφη ροή και επομένως ομοιόμορφο προφίλ θερμοκρασιών. Θα σχεδιαστούν δύο εσωτερικά οριζόντια πτερύγια τα οποία θα χωρίσουν τον αεραγωγό σε τρία ξεχωριστά κανάλια. Κρίνεται αναγκαίο να είναι παραμετρικά σχεδιασμένα έτσι ώστε να μεταβάλλεται ο όγκος και η γεωμετρία κάθε καναλιού. Η φιλοσοφία είναι ίδια με το βασικό κορμό του S-duct. Αναλυτικότερα σχεδιάζονται δύο τόξα στην πλευρά εισαγωγής και εξαγωγής του αεραγωγού, τα οποία έπειτα θα ενωθούν με την εντολή connect. Πριν ξεκινήσει η σχεδίαση των τόξων προηγείται η ένωση με διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα των δύο άκρων των εξωτερικών τόξων που απαρτίζουν τα τοιχώματα του S-duct. Επιπρόσθετα, ορίζεται ως διάσταση αναφοράς το μήκος του παραπάνω τμήματος έτσι ώστε να οριστεί παραμετρικά η διχοτόμηση του από τα άκρα των πτερυγίων. Επίσης είναι κρίσιμο να οριστεί η γωνία του μεταξύ της προβολής του άξονα συμμετρίας του επιπέδου που ορίζει την φλάντζα προσαρμογής και η παραμετροποίηση της με την μεταβλητή “ *angle_outlet*”. Η παραμετροποίηση αυτή δίνει τη δυνατότητα ελέγχου και του ελεύθερου άκρου το πάνω τόξου της εξωτερικής γεωμετρίας που αφέθηκε ελεύθερο. Ο λόγος που έγινε αυτό είναι για να είναι ευκολότερα κατανοητή η γωνία της καμπύλης του S-duct που δημιουργεί με τον άξονα Z.

Επομένως ξεκινώντας με τα τόξα εξαγωγής, σχεδιάζονται δύο τόξα όπου οι δεξιές άκρες τους θα ξεκινούν εφαπτομενικά από τα ενδιάμεσα ευθύγραμμα τμήματα που προσχεδιάστηκαν όπως φαίνεται στην Εικόνα 26. Αναλυτικότερα οι περιορισμοί τους είναι οι εξής.

Περιορισμοί άνω τόξου πτερυγίου εξαγωγής

- ✓ Το δεξί σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το αντίστοιχο οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Το αριστερό σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα .
- ✓ Ορισμός δεύτερου βαθμού συνέχειας (tangency) με το οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Ορισμός παραμετρικής απόστασης ως ποσοστιαία της διακεκομμένης γραμμής, από το άκρο του κάτω πτερυγίου(απόσταση * ποσοστό%).

Περιορισμοί κάτω τόξου πτερυγίου εξαγωγής

- ✓ Το δεξί σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το αντίστοιχο οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Το αριστερό σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα .
- ✓ Ορισμός δεύτερου βαθμού συνέχειας (tangency) με το οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Ορισμός παραμετρικής απόστασης ως ποσοστιαία της διακεκομμένης γραμμής, από το άκρο του κάτω τόξου της εξωτερικής γεωμετρίας (απόσταση * ποσοστό%).

Technical drawing of a mechanical assembly, showing a cross-section of a housing and internal components. The drawing includes dimensions in mm, such as 40.00, 48.581, 147.210, 52.193, and 158.10. It also shows radii R 200 and R 240. The assembly is labeled with 'H' and 'V' at various points.

Παρόμοια είναι και η διαδικασία σχεδίασης των κάτω πτερυγίων. Αρχικά σχεδιάζεται ένα κάθετο ευθύγραμμο τμήμα το οποίο θα έχει όμοια χρήση όπως στην περιοχή εξόδου του S-duct, δηλαδή μέσω της μεταβλητής “*fillet_inlet_fins*αδιάστατος συντελεστής*” θα ορίζεται παραμετρικά η απόσταση που θα έχουν τα πτερύγια από την έξοδο του Naca duct και αντίστοιχα την είσοδο του S-duct, η σημασία της ύπαρξης του είναι η αποφυγή των επικαλύψεων των φιλέτων που θα δημιουργηθούν σε μετέπειτα στάδιο σχεδίασης. Στη συνέχεια σχεδιάζονται δύο κάθετα ευθύγραμμα διακεκομμένα τμήματα τα οποία ορίζονται σε οριζόντια κατεύθυνση και με πρώτο βαθμό συνέχειας με την παραπάνω κάθετο. Ιδιαίτερη σημασία έχει ο ορισμός της παραμετρικής απόστασης των πτερυγίων καθέτως, όπως αντίστοιχα συνέβη και στην έξοδο του S-duct. Επομένως, ορίζονται όπως φαίνεται στην Εικόνα 27 οι αποστάσεις των διακεκομμένων από την πάνω οριζόντια διακεκομμένη για το πρώτο ευθύγραμμο τμήμα και μεταξύ αυτών. Ο ορισμός γίνεται ως το ποσοστό της μεταβλητής “*inlet hight*”.

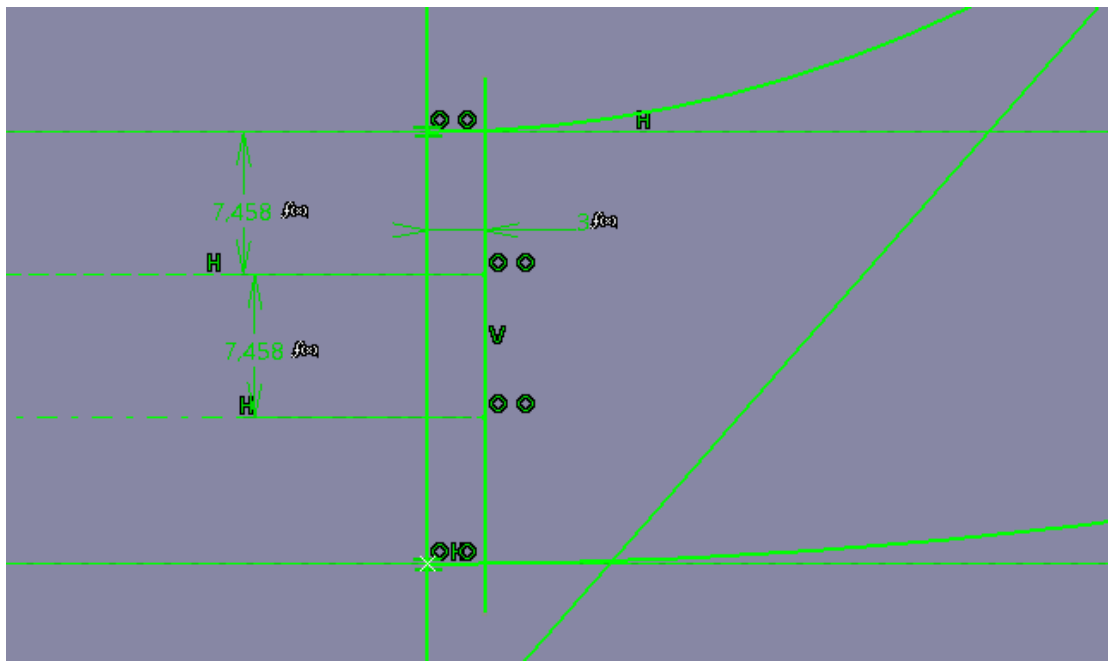
Σελίδα 34

Περιορισμοί κάτω τόξου πτερυγίου εισαγωγής

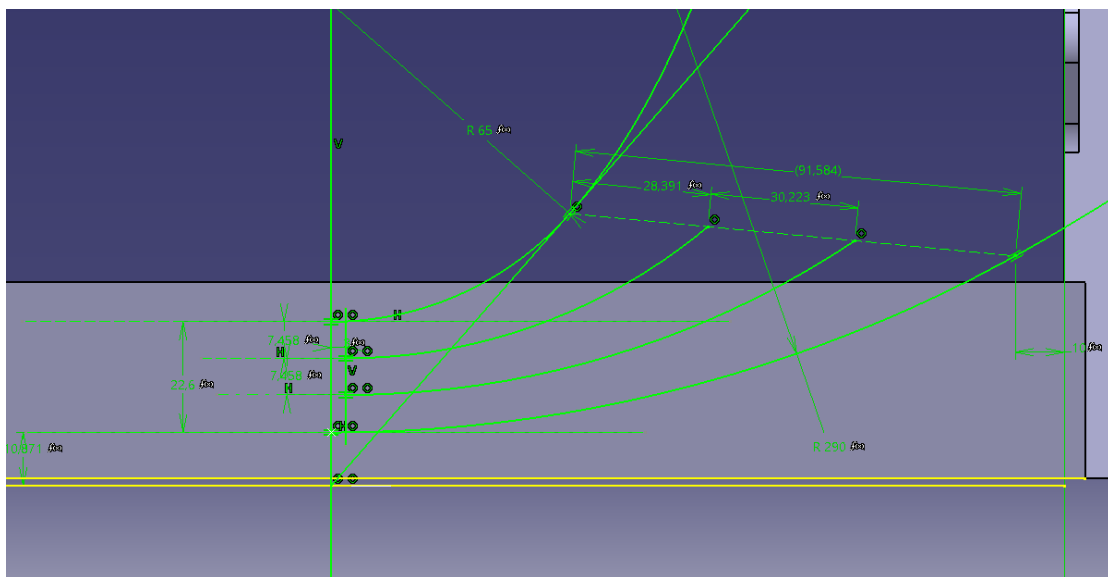
- ✓ Το αριστερό σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το αντίστοιχο οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Ορισμός ως εφαπτόμενο (tangency) με το αντίστοιχο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα, ο λόγος που συμβαίνει αυτό θα γίνει κατανοητός στη συνέχεια όπου θα χρειαστεί να ενοποιηθούν όλα τα ξεχωριστά αντικείμενα που σχεδιάστηκαν.
- ✓ Ορισμός παραμετρικής απόστασης ως ποσοστό του μήκους αναφοράς της διακεκομμένης γραμμής, από το άκρο του πάνω τόξου της εξωτερικής γεωμετρίας (απόσταση * ποσοστό%).
- ✓ Η απόσταση του αριστερού σημείου μεταβάλλεται έμμεσα από τις αποστάσεις των διακεκομμένων ευθύγραμμων τμημάτων.

Περιορισμοί κάτω τόξου πτερυγίου εισαγωγής

- ✓ Το αριστερό σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το αντίστοιχο οριζόντιο ευθύγραμμο τμήμα.
- ✓ Ορισμός ως εφαπτόμενο (tangency) με το αντίστοιχο διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα, ο λόγος που συμβαίνει αυτό θα γίνει κατανοητός στη συνέχεια όπου θα χρειαστεί να ενοποιηθούν όλα τα ξεχωριστά αντικείμενα που σχεδιάστηκαν.
- ✓ Ορισμός παραμετρικής απόστασης ως ποσοστό του μήκους αναφοράς της διακεκομμένης γραμμής, από το άκρο του πάνω πτερυγίου (απόσταση * ποσοστό%).
- ✓ Η απόσταση του αριστερού σημείου μεταβάλλεται έμμεσα από τις αποστάσεις των διακεκομμένων ευθύγραμμων τμημάτων.

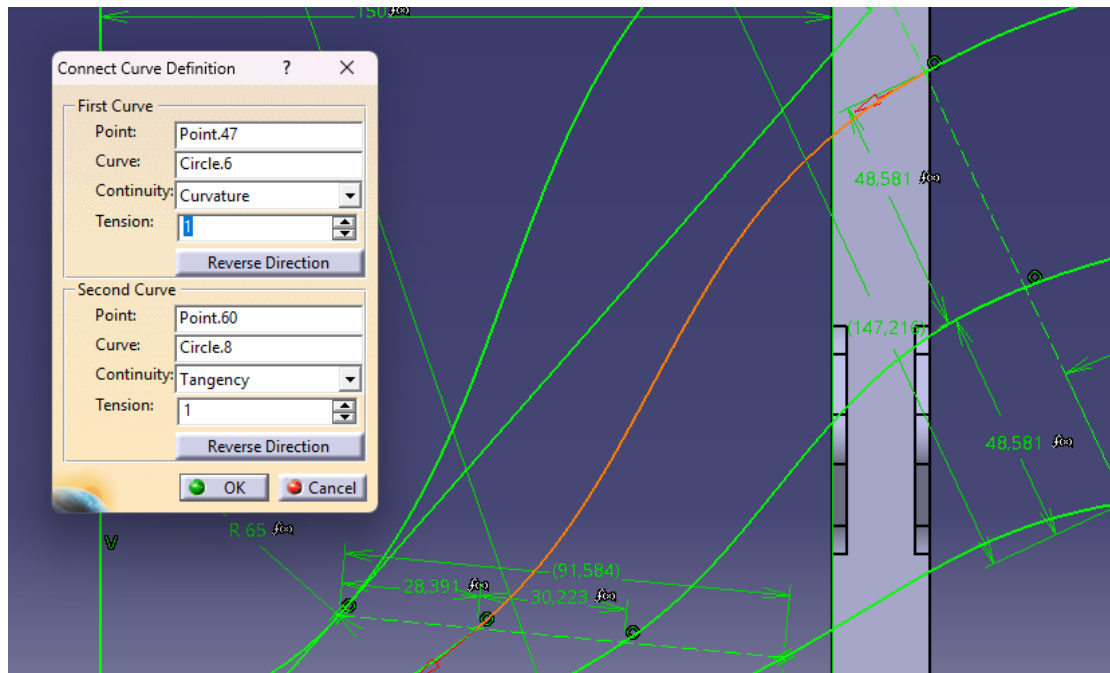


Εικόνα 27 Εισαγωγή S-duct



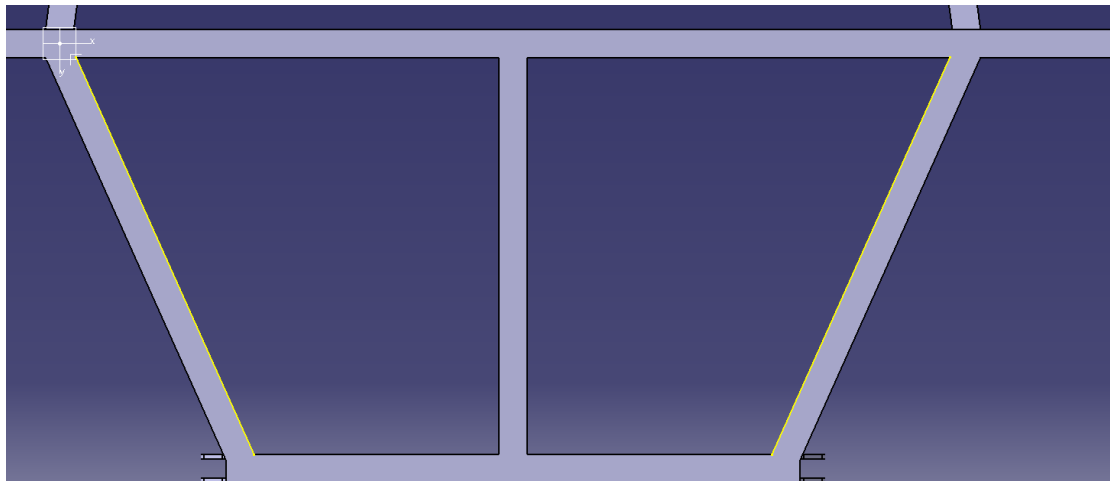
Εικόνα 28 Οριζόντια περύγια εισαγωγής S-duct

Τελευταίο στάδιο για την δημιουργία των οριζόντιων περυγίων είναι η ενοποίησή τους. Όπως και με τα τόξα της εξωτερικής γεωμετρίας θα χρησιμοποιηθεί η εντολή connect για τη σύνδεση με spline των τόξων. Χρησιμοποιούνται οι περιορισμοί curvature για το πάνω τόξο και tangency για το κάτω (Εικόνα 29).



Εικόνα 29 Ενοποίηση οριζόντιων περυγίων μέσω εντολής connect

Στο σημείο αυτό έχει ολοκληρωθεί η δυσδιάστατη σχεδίαση του αεραγωγού και επομένως μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία σχεδίασης στη τρίτη διάσταση ώστε να οδηγηθεί τρισδιάστατος αεραγωγός S-duct. Η διαδικασία σχεδίασης του Naca-S_duct_1 περιλαμβάνει επίπεδα τοιχώματα. Καταρχάς δημιουργείται “Sketch” επί του επιπέδου το οποίο είναι παράλληλο με το δάπεδο του αυτοκινήτου κα συγκεκριμένα το επίπεδο XY, στο οποίο γίνεται προβολή των εσωτερικών ακμών των υπό γωνία εκτεινόμενων δοκών με την εντολή Project (Εικόνα 30).

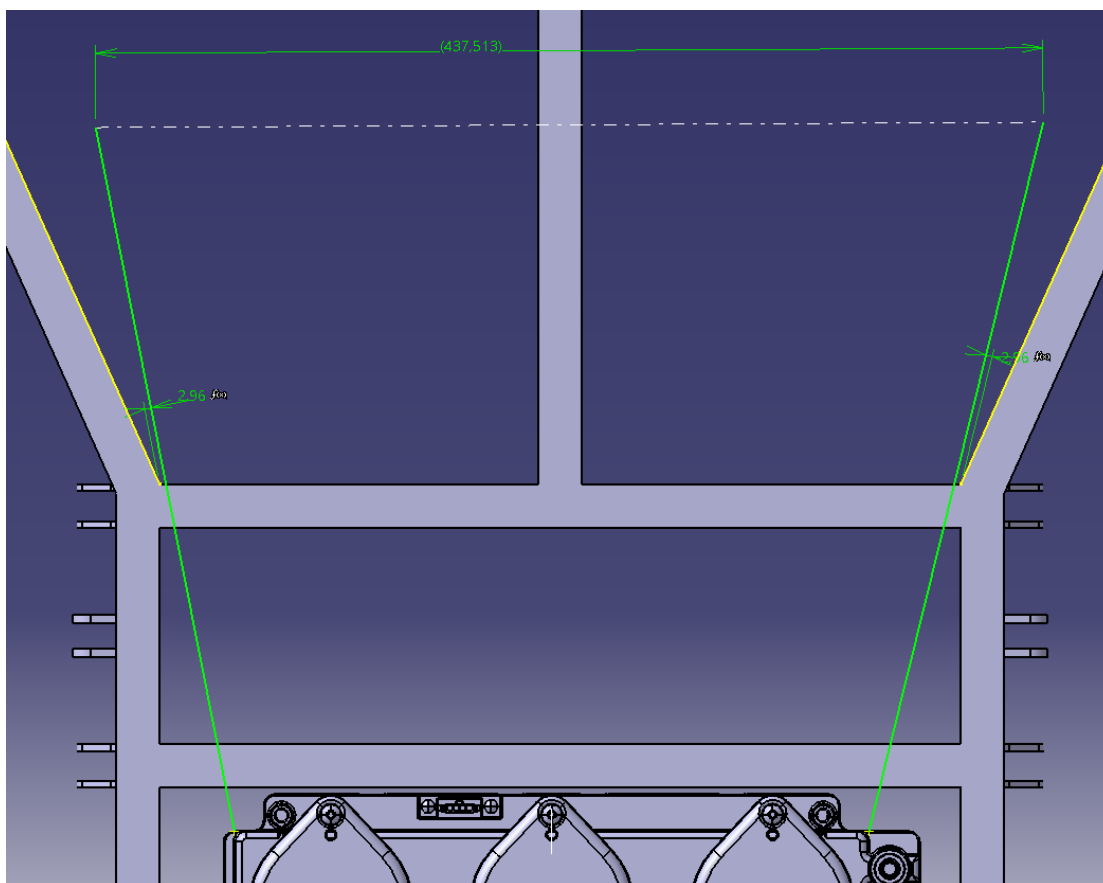


Εικόνα 30 Προβολή εσωτερικών ακμών των υπό γωνία δοκών

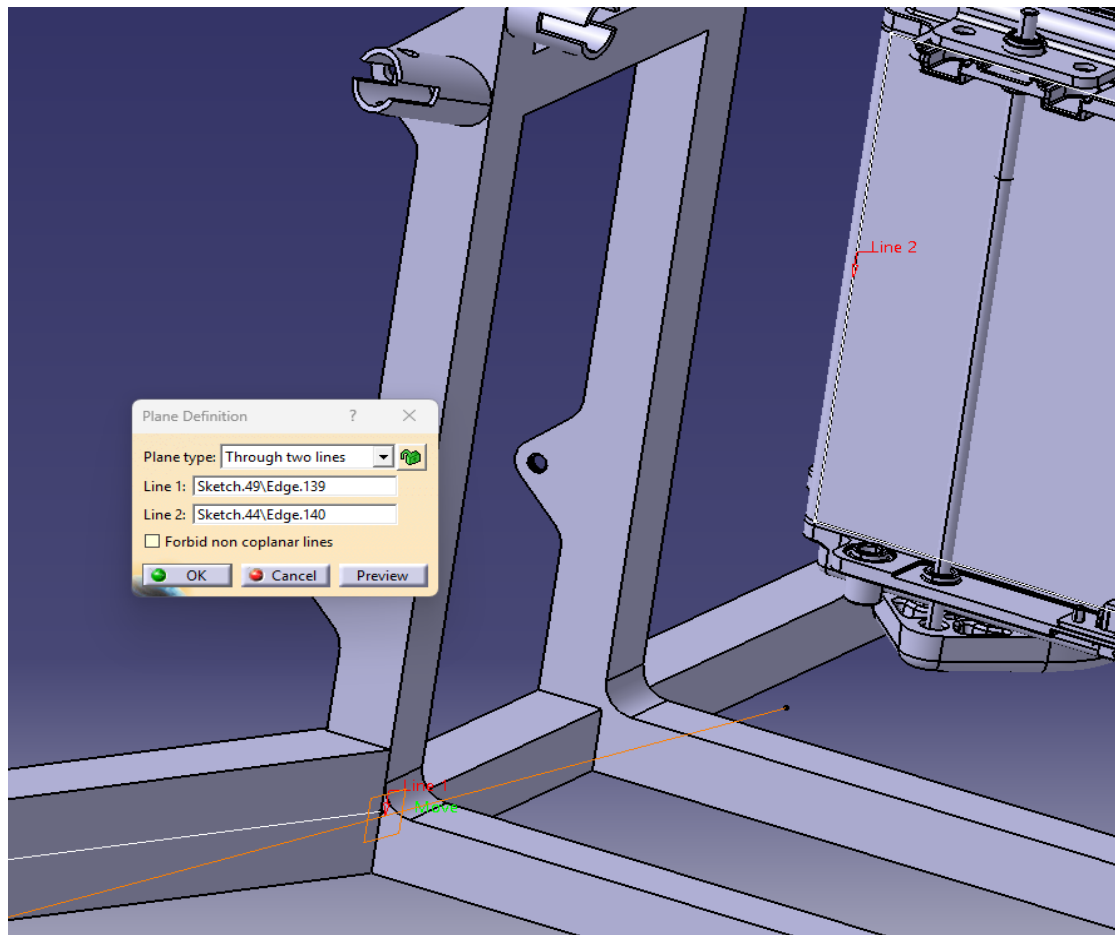
Οι προβολές αυτές που αναπαρίστανται ουσιαστικά με κίτρινο χρώμα αποτελούν και τα φυσικά όρια του προβλήματος. Απλούστερα τα οριζόντια τοιχώματα του αεραγωγού S-duct μπορούν να επεκταθούν έως εκεί. Για να γίνει παραμετρικά λειτουργική η διαδικασία για τον χρήστη για πιθανό έλεγχο ταχυτήτων, πιέσεων και συνεπώς θερμοκρασιών καθώς και των διαστάσεων των Naca duct, σχεδιάζονται ευθύγραμμα τμήματα τα οποία θα λειτουργούν ως όρια ασφαλείας των παραπάνω προβολών.

Αρχικά γίνεται προβολή των ευθειών των πλαϊνών ορίων της κυψέλης που αναπαρίστανται ως σημεία (κίτρινοι σταυροί). Σχεδιάζονται ευθύγραμμα τμήματα που περνούν από τα σημεία αυτά (coincidence) και ο απέχουν κάθετη απόσταση από τα σημεία των παραπάνω προβολών όπως φαίνεται στην Εικόνα 31. Η απόσταση αυτή ρυθμίζεται παραμετρικά μέσω της μεταβλητής “airways_thickness + offset_from_chassis”. Ουσιαστικά λαμβάνεται υπόψιν το πάχος της κατασκευής και η απόσταση ασφάλειας του αεραγωγού από το πλαίσιο του αυτοκινήτου.

Εφόσον δύο ευθείες ορίζουν ένα επίπεδο, σχεδιάζεται ένα επίπεδο (Εικόνα 32) για κάθε ευθύγραμμο τμήμα που σχεδιάστηκε (πράσινο χρώμα) με χρήση των κάθετων ορίων της επιφάνειας που απαρτίζουν τα κανάλια ροής της κυψέλης, δηλαδή αυτών που έγιναν προβολή ως σημεία παραπάνω.

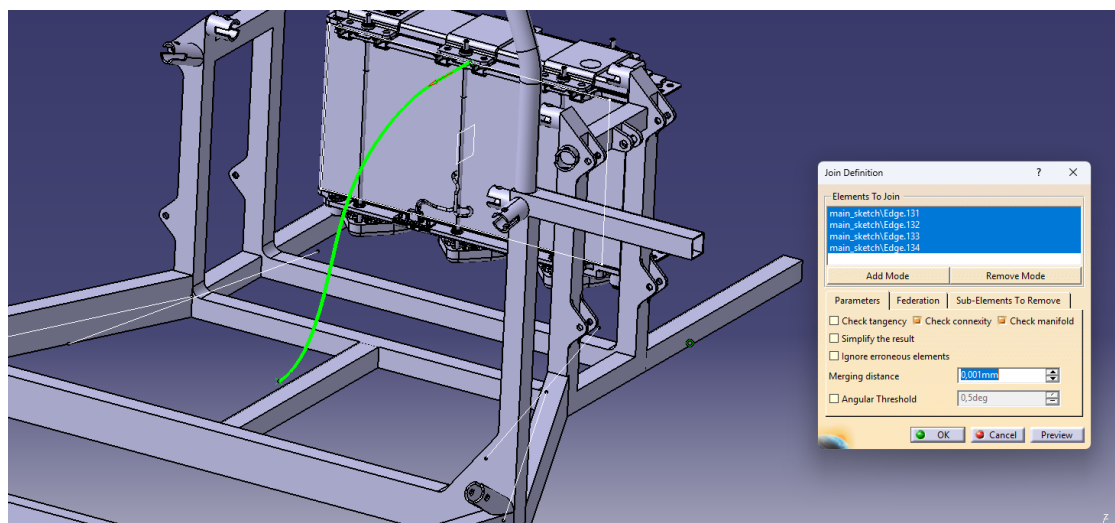


Εικόνα 31 Φυσικά όρια και όρια ασφαλείας

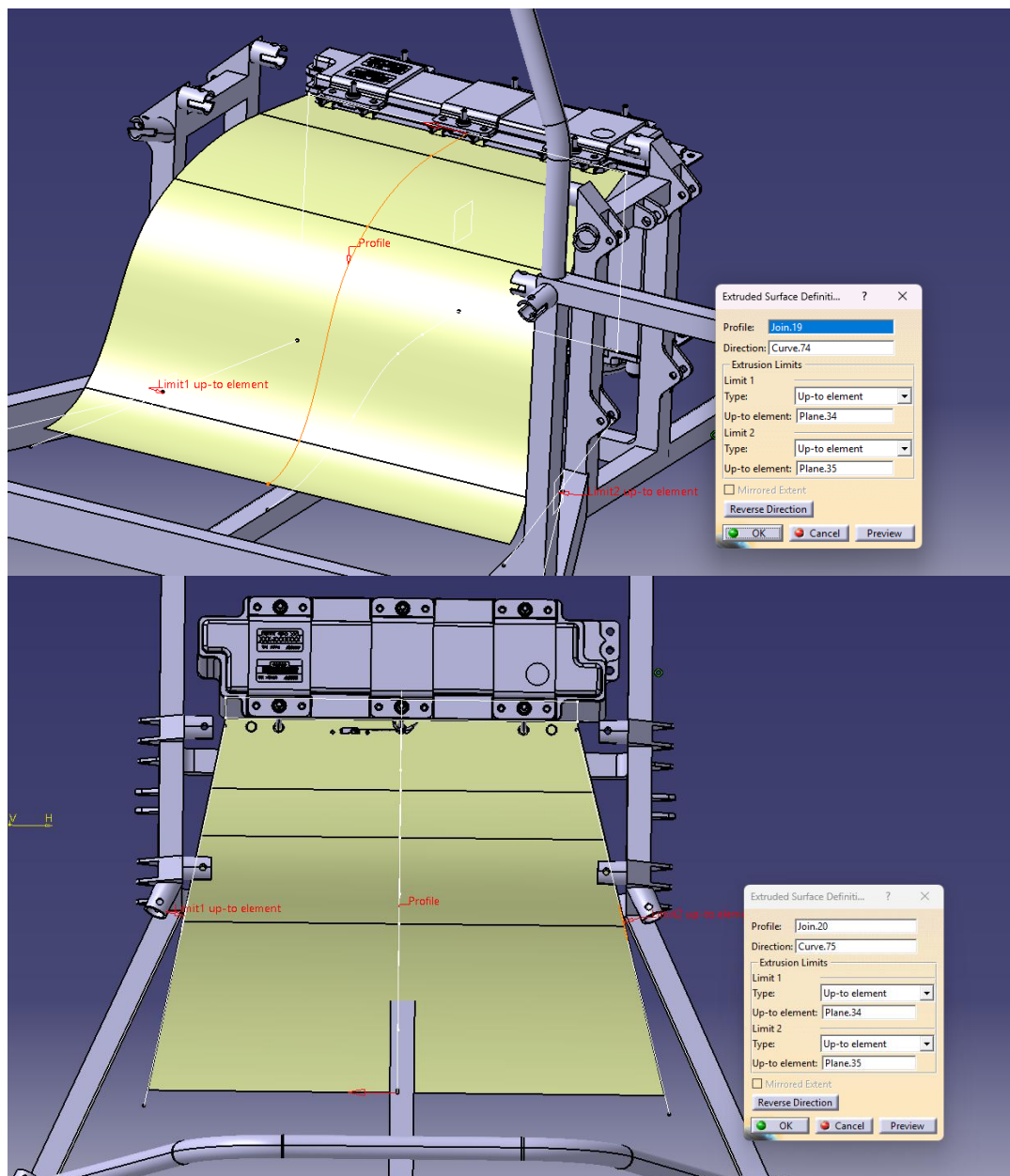


Εικόνα 32 Δημιουργία επιπέδου, χρήση πράσινου ευθύγραμμου τμήματος και κάθετου ορίου επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης. Αντίστοιχα γίνεται και από την άλλη πλευρά

Συνεχίζονται γίνεται ενοποίηση “join” των καμπυλών που δημιουργήθηκαν του άνω ορίου του S-duct (Εικόνα 18) , αντίστοιχα γίνεται και το κάτω. Έπειτα μέσω της εντολής *Extrude* γίνεται η εξώθηση προς τη διεύθυνση του κάθετου διανύσματος που ορίζει το επίπεδο όπου σχεδιάστηκε η καμπύλη. Επιλέγοντας να εξωθηθεί η καμπύλη ως επιφάνεια με όρια τα δύο επίπεδα που σχεδιάστηκαν παραπάνω.

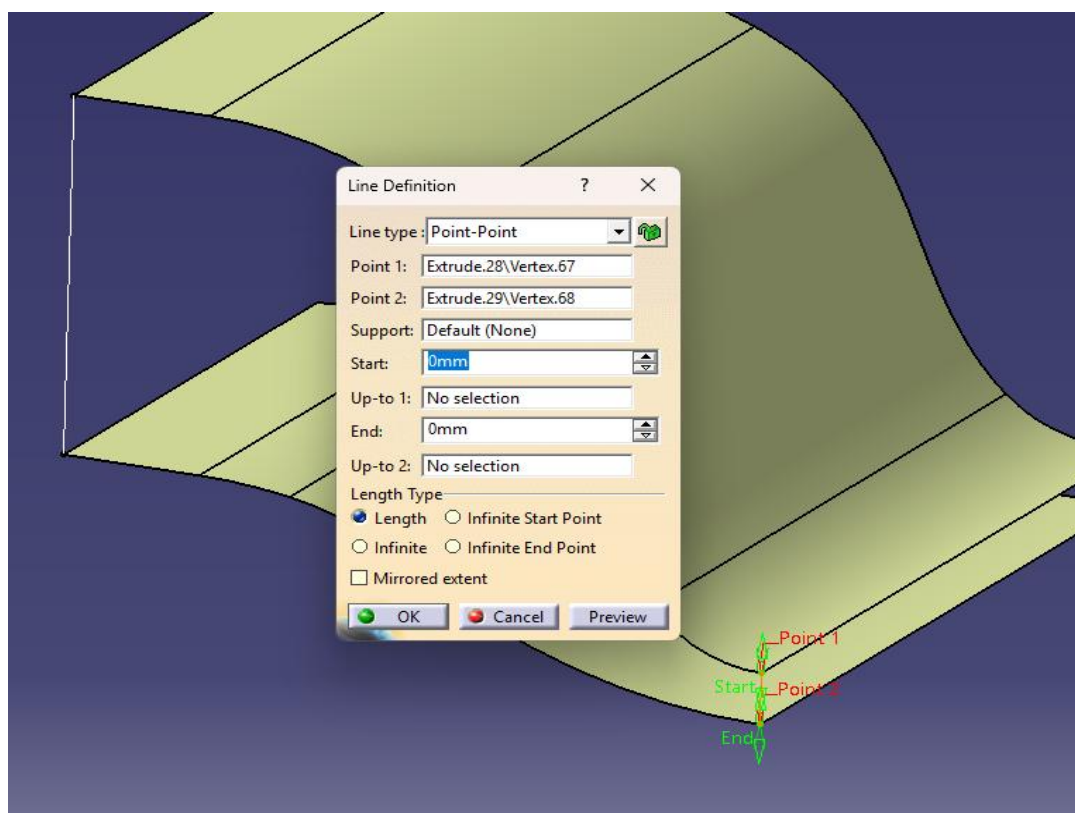
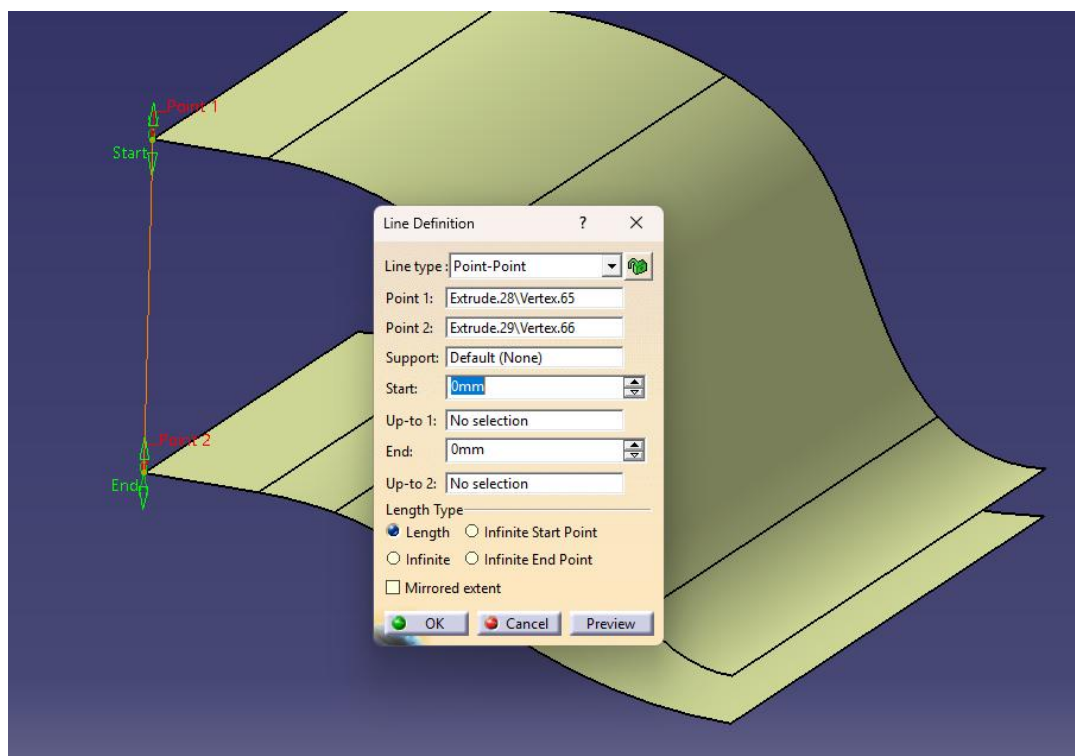


Εικόνα 33 Ενοποίηση Εξωτερικών τμημάτων

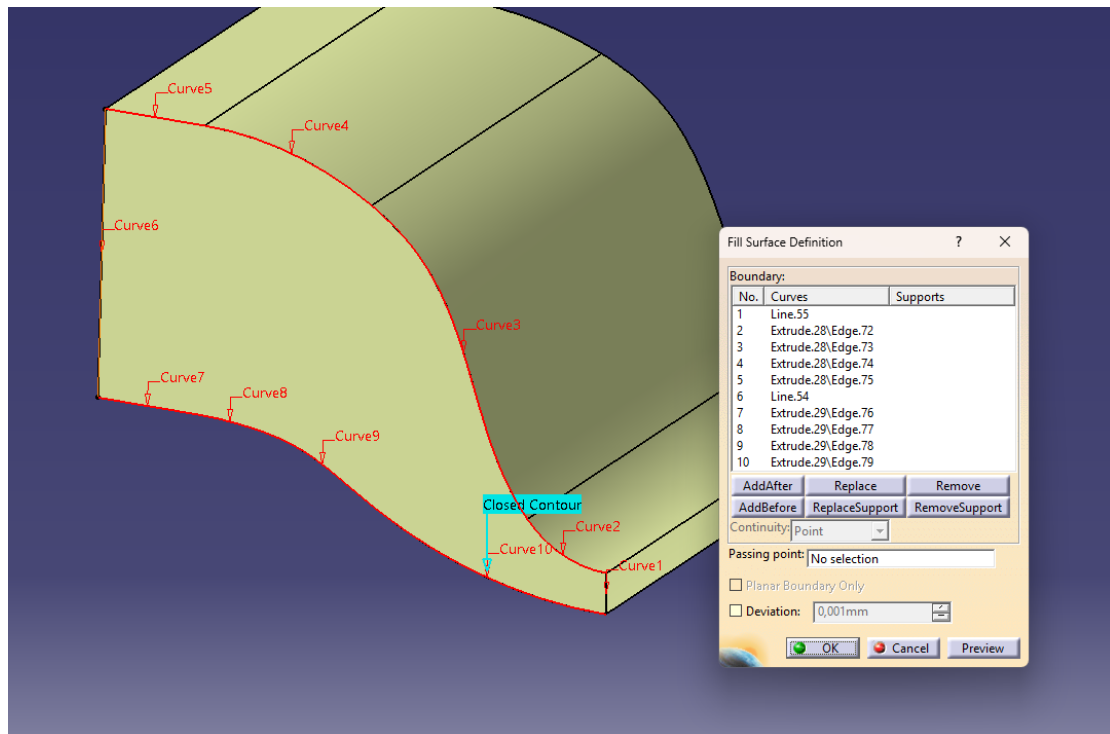


Εικόνα 34 Εντολή Extrude

Για την δημιουργία των πλάγιων επίπεδων επιφανειών θα χρησιμοποιηθεί η εντολή Fill. Η εντολή θα δημιουργήσει μια επιφάνεια με όρια τις ακμές που θα επιλέξουμε. Για να κλείσει και να οριστεί σωστά η περίμετρος είναι αναγκαία η δημιουργία ευθύγραμμων τμημάτων που θα χρησιμοποιηθούν ως ακμές. Επομένως επιλέχθηκε η εντολή Line definition και τα σημεία των πάνω και κάτω επιφανειών αντίστοιχα για όλες τις μεριές (Εικόνα 35). Τέλος, μέσω της εντολής Fill δημιουργούνται οι πλάγιες επιφάνειες, μία για την κάθε πλευρά (Εικόνα 36).

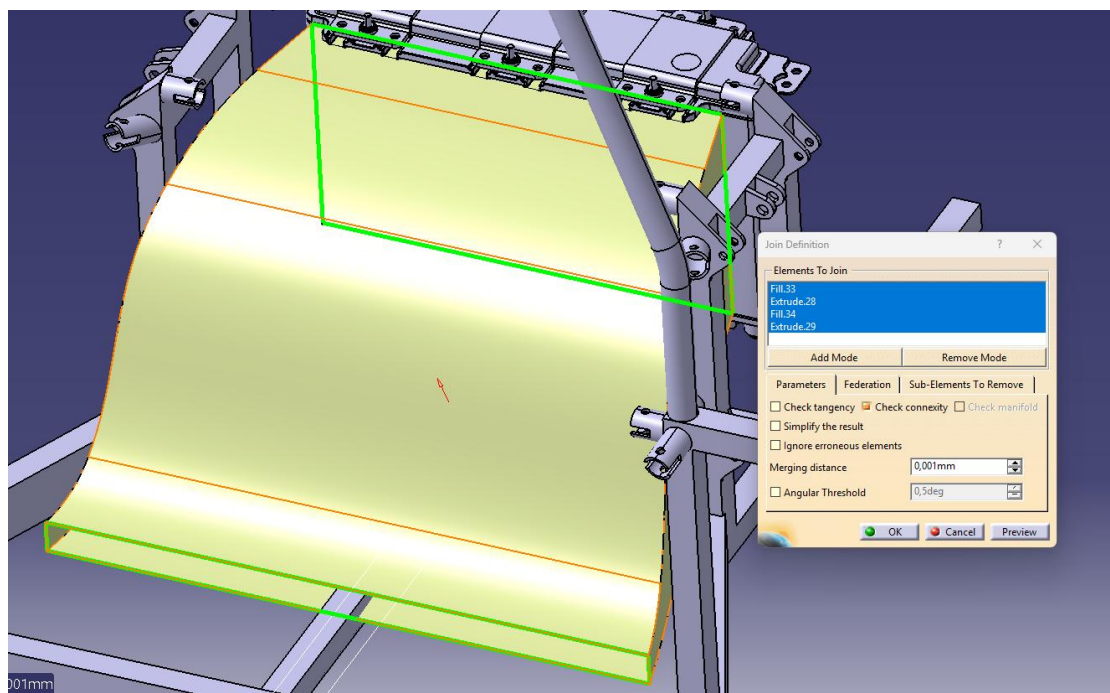


Εικόνα 35 Δημιουργία γραμμών για χρήση εντολής Fill



Εικόνα 36 Εντολή Fill, δημιουργία πλάγιας επιφάνειας

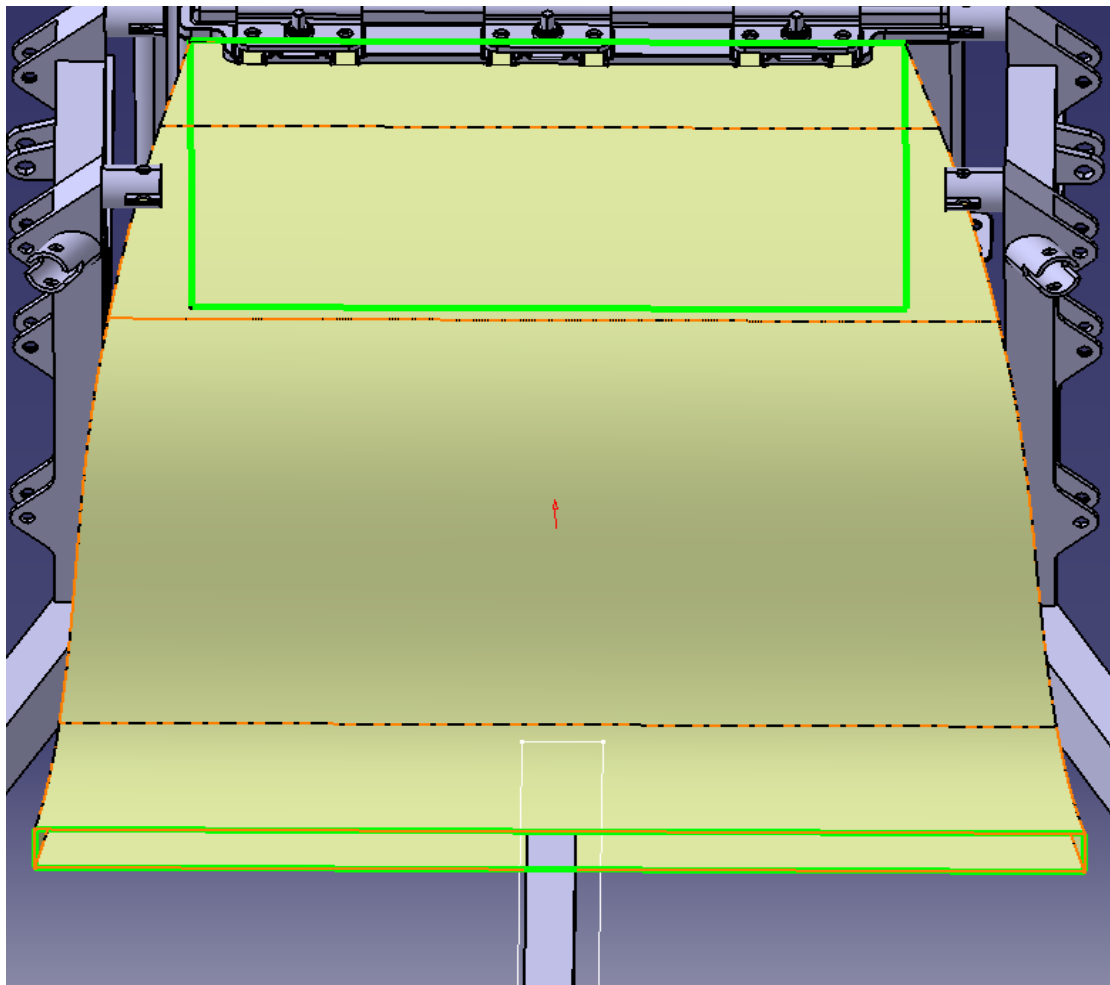
Τέλος για την ολοκλήρωση του τρισδιάστατου μοντέλου επιφανειών του S-duct δημιουργείται ενιαίο μοντέλο μέσω της εντολής “Join”.



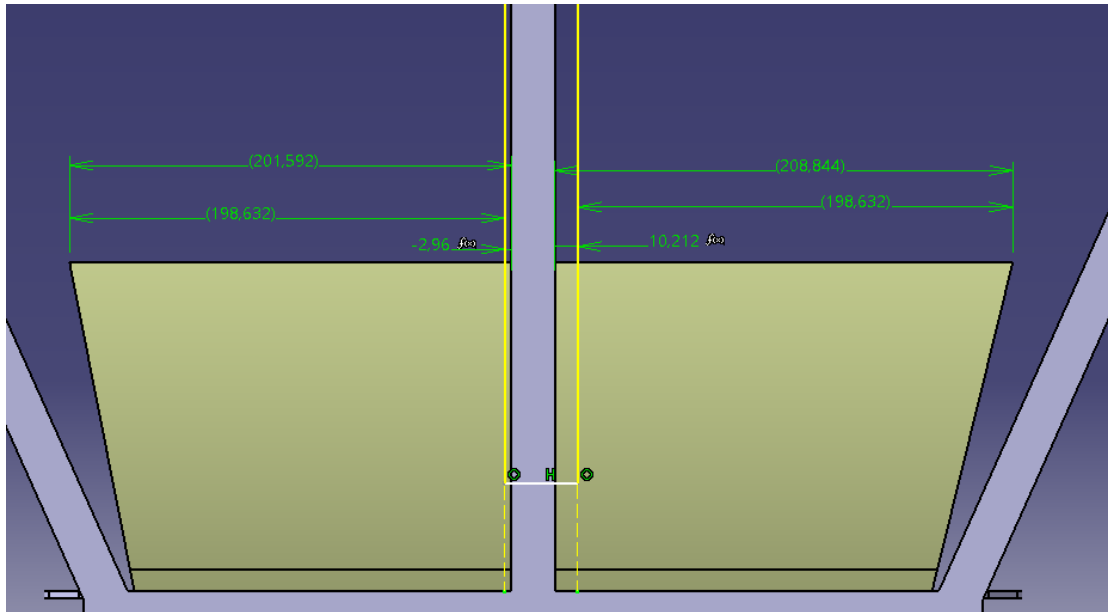
Εικόνα 37 Ενιαίος αγωγός S-duct, εντολή Join

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 22, υπάρχει δοκός στο πλαίσιο του αυτοκινήτου που τέμνει τον αεραγωγό. Επομένως κρίνεται απαραίτητο να δημιουργηθεί τομή στον αγωγό με διατομή όμοια της δοκού ώστε να εφαρμόζεται στο αυτοκίνητο. Δημιουργείται “Sketch” επί του επιπέδου XY και γίνεται προβολή των ακμών της δοκού (κίτρινο χρώμα) (Εικόνα 39). Ορίζονται ως αποστάσεις αναφοράς οι αποστάσεις των άκρων του αγωγού με τις αντίστοιχες

ακμές της δοκού αυτών. Συνεχίζοντας θα χρειαστεί να γίνει “offset” του περιγράμματος που απαρτίζουν οι ακμές της δοκού, διότι ο αεραγωγός όπως και στις κάθετες δοκούς θα χρειαστεί να έχει απόσταση ασφαλείας από το πλαίσιο συνυπολογίζοντας το πάχος του. Όμως επειδή ο άξονας συμμετρίας της δεν ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας του αυτοκινήτου θα χρειαστεί το “offset” να μην είναι ομοιόμορφο. Επομένως για να διατηρήσουμε τη συμμετρία στη είσοδο του αεραγωγού, θα χρειαστεί να γίνει “offset” της αριστερής ακμής κατά “ $-(\text{airways_thickness} + \text{offset_from_chassis}) = -2.96\text{mm}$ ” και της δεξιάς κατά τη νέα προκύπτουσα απόσταση του αριστερού καναλιού (198,632mm) μείον τη διαφορά από την αρχική (208,844mm) και μείον το άθροισμα “ $\text{airways_thickness} + \text{offset_from_chassis}$ ”. Επομένως, προκύπτουν ίσα μήκη καναλιών εισόδου του αεραγωγού S-duct και αντιστοίχως των συνολικών μηκών των εισόδων των Naca-duct.

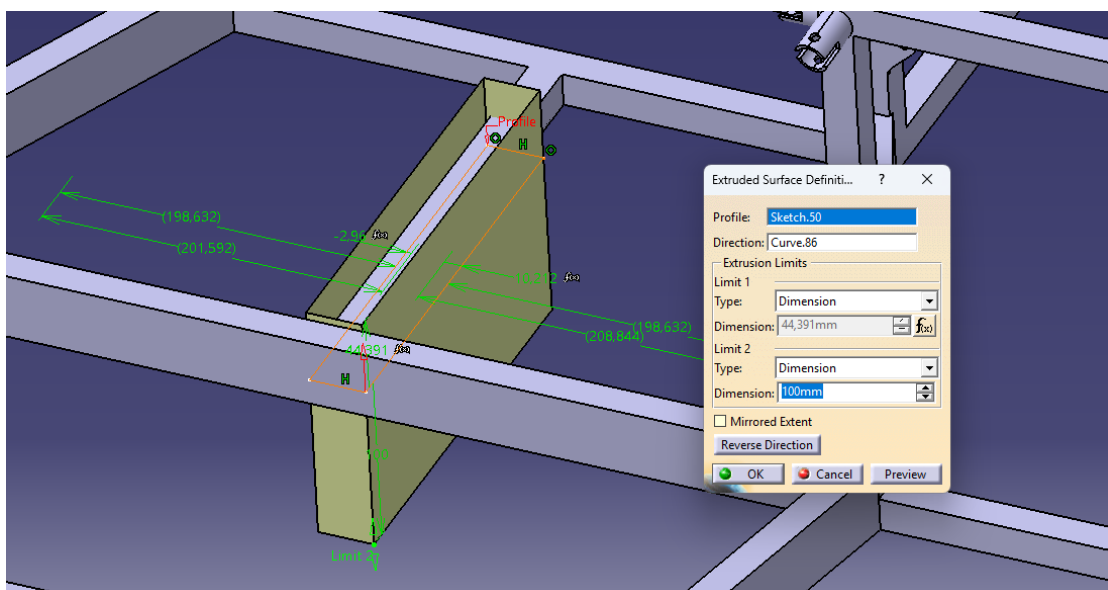


Εικόνα 38 Τομή δοκού πλαισίου



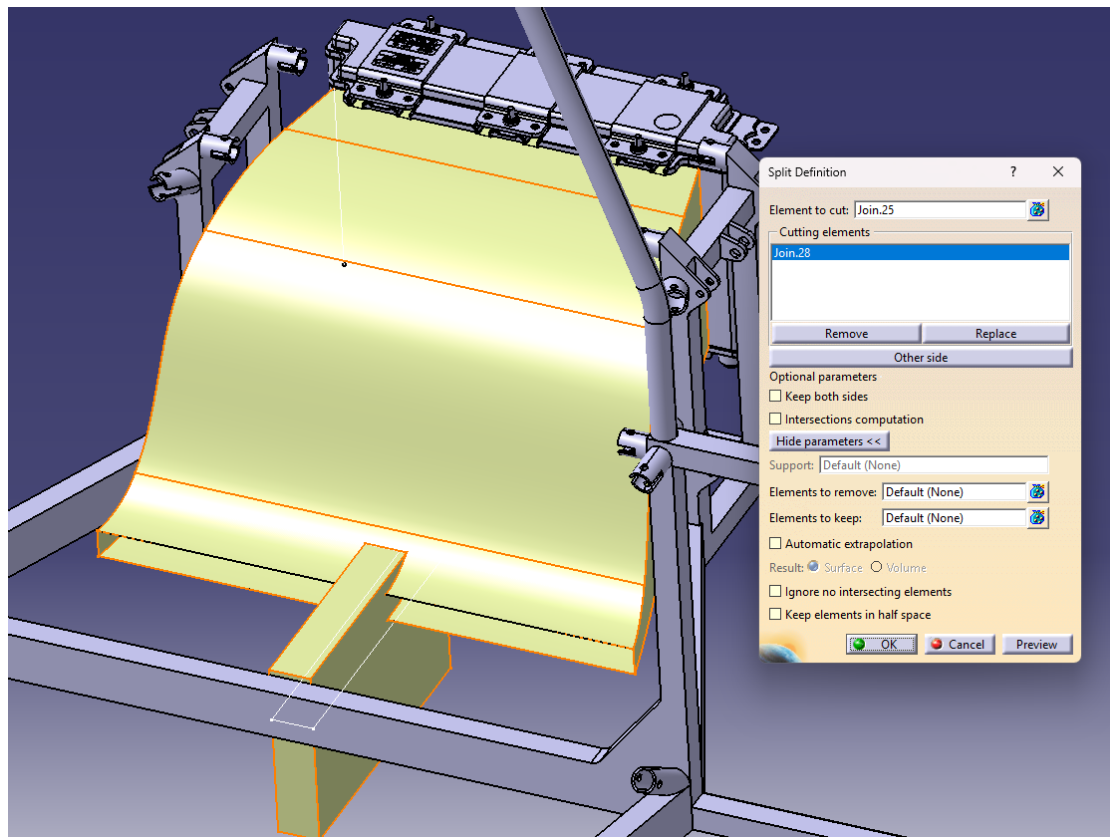
Εικόνα 39 Sketch τομής αγωγού

Στη συνέχεια γίνεται εξώθηση του περιγράμματος μέσω της εντολής “Extrude” όπως και παραπάνω με συνολικό ύψος προς τα πάνω (θετικά Z) ίσο με το άθροισμα “airways_thickness+lip_high+inlet_high+8mm” το οποίο θα δημιουργήσει τομή η οποία θα επιτρέπει την ομαλή κοπή του αεραγωγού περιμετρικά της δοκού καθώς και την μετέπειτα δημιουργία φιλέτων, η αντίθετη διεύθυνση ορίζεται στα 100mm.



Εικόνα 40 Εξώθηση Sketch δοκού

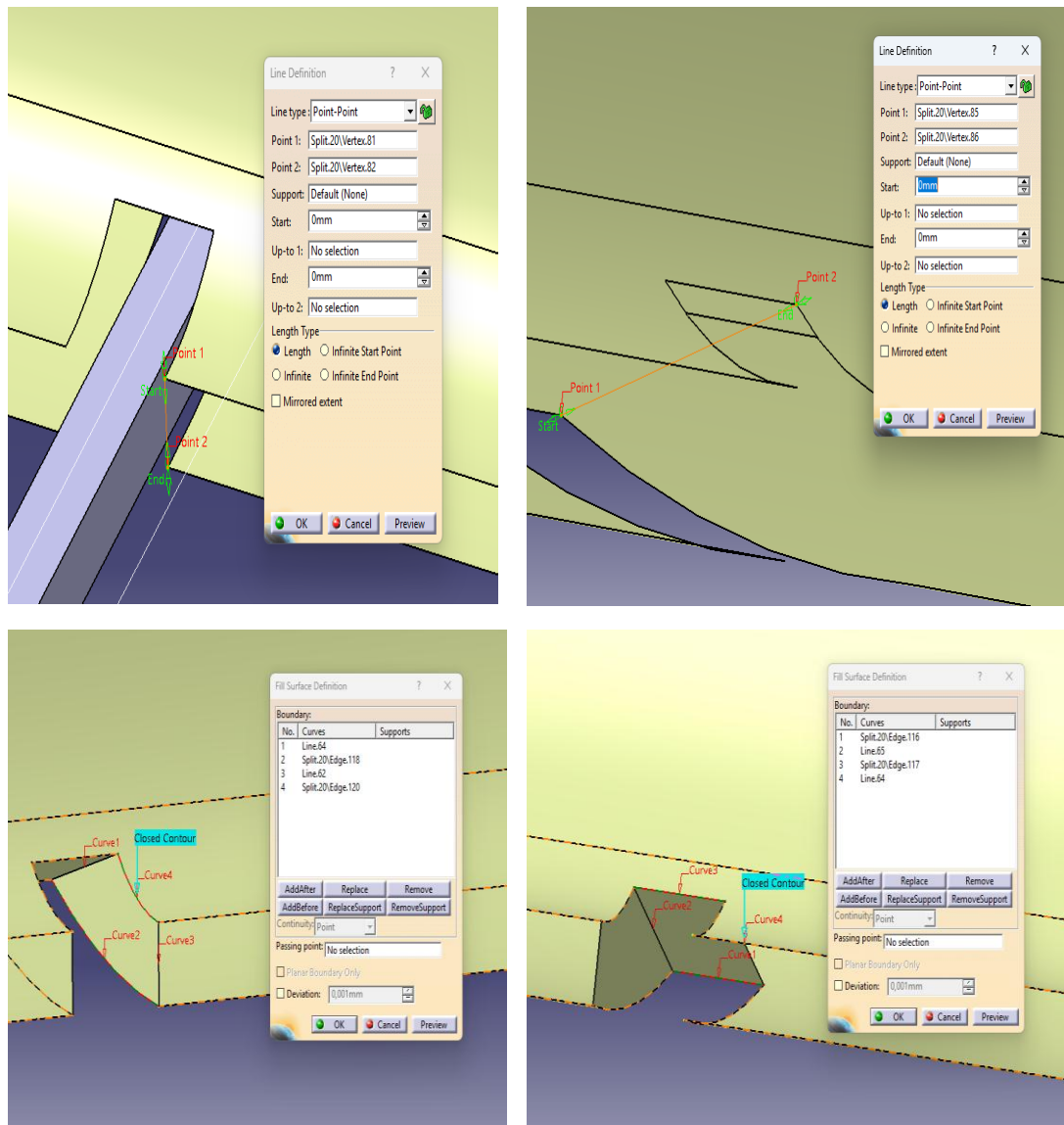
Η τομή στον αγωγό S-duct γίνεται μέσω της εντολής “Split”, επιλέγοντας ως το σώμα προς κοπή τον αγωγό S-duct και το σώμα που θα τέμνει τον αγωγό ως το παραπάνω εξωθημένο προφίλ (Εικόνα 41).



Εικόνα 41 Εντολή Split

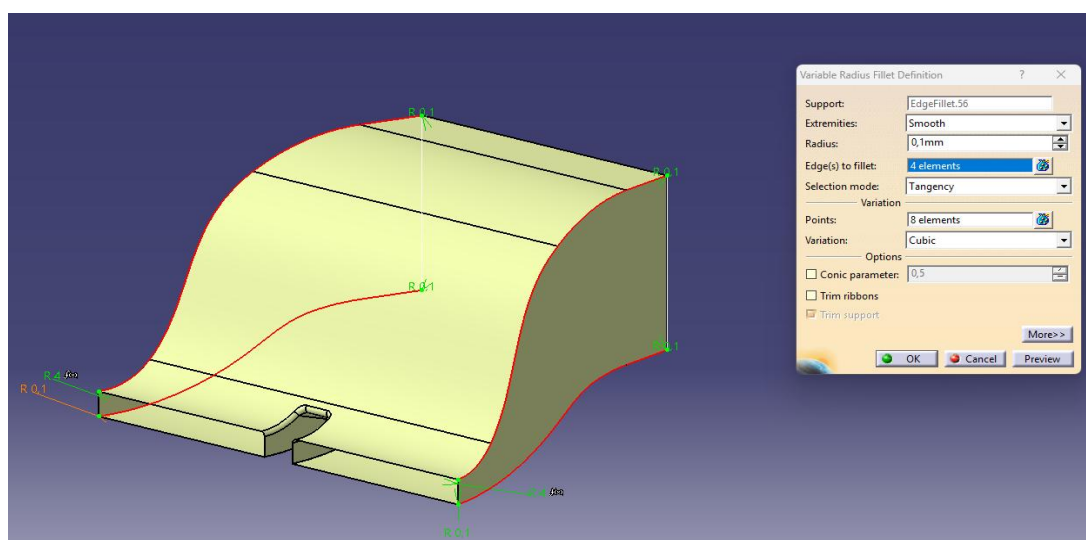
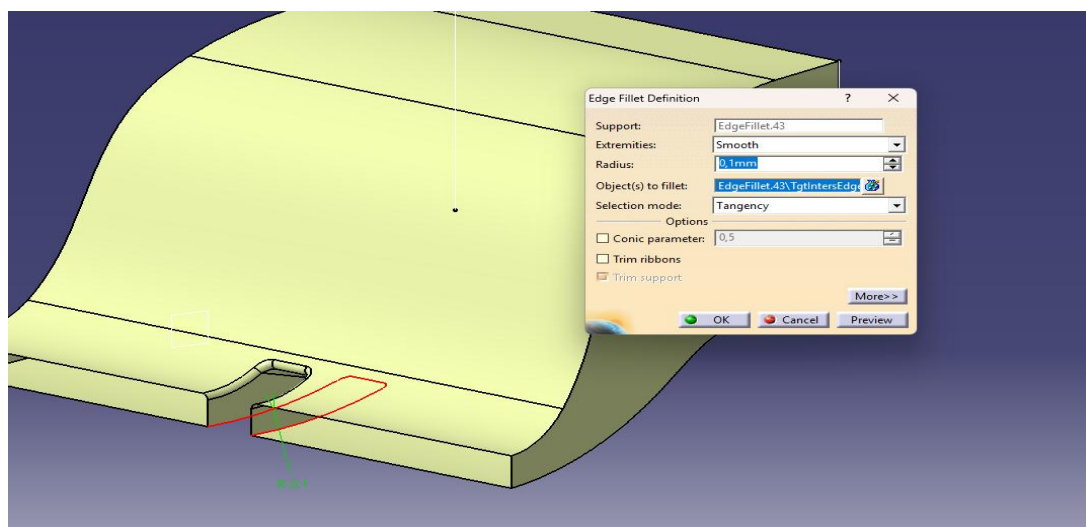
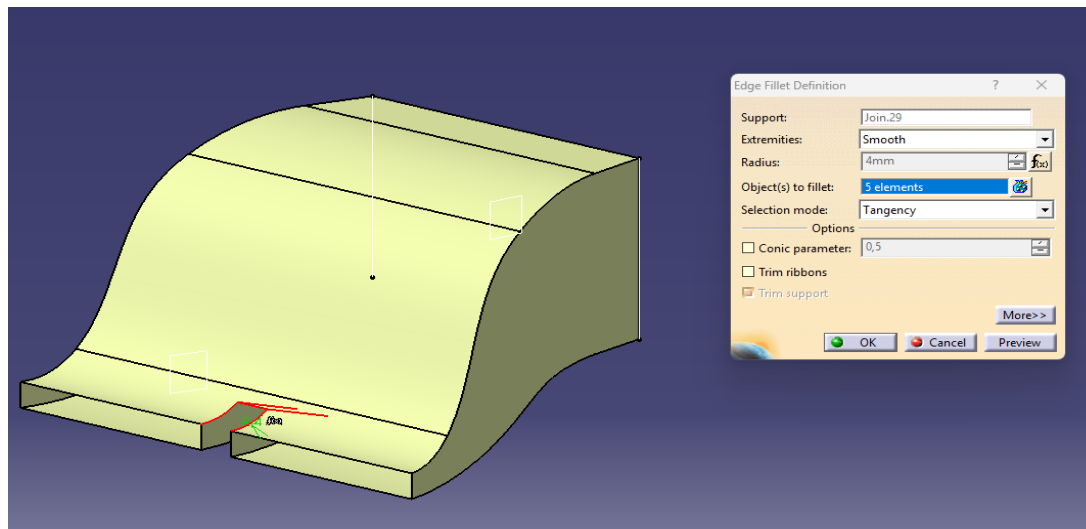
Συνεχίζοντας χρειάζεται να δημιουργηθούν επιφάνειες στα περιγράμματα που προέκυψαν από την τομή. Όπως, και προηγουμένως με τις πλάγιες επιφάνειες δημιουργούνται τέσσερα ευθύγραμμα τμήματα με άκρα τις τομές των ακμών που προέκυψαν από την κατάτμηση και έπειτα μέσω της εντολής “Fill” δημιουργούνται οι επιφάνειες που ουσιαστικά <<κλείνουν>> τον αεραγωγό περιμετρικά της δοκού (Εικόνα 42).

Αξίζει να σημειωθεί, ότι η παραμετρική μοντελοποίηση επηρεάζει και την τομή του αεραγωγού S-duct με το “Sketch” της δοκού. Ο τρόπος που γίνεται αυτό είναι μέσω των παραπάνω σημείων και ακμών που προκύπτουν, καθώς και τον ευθύγραμμων τμημάτων που δημιουργήθηκαν μέσω της εντολής “line” επομένως προκύπτει και η νέα τομή στον αγωγό S-duct.



Εικόνα 42 Διαδικασία δημιουργίας επιφανειών στα περιγράμματα της τομής.

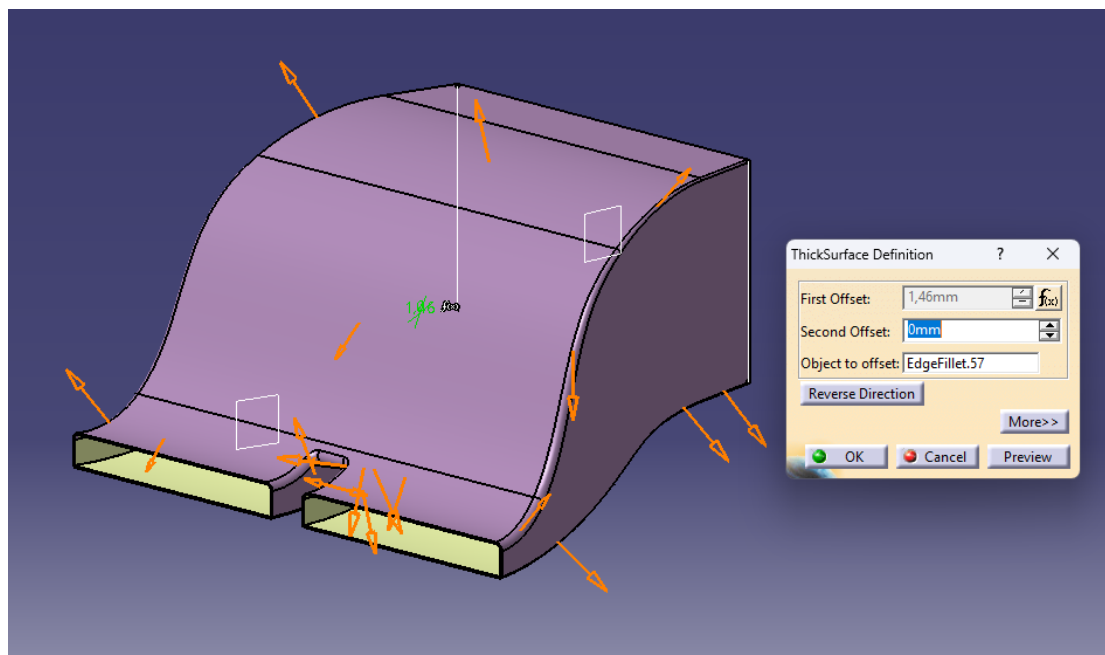
Για να ολοκληρωθεί η σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου επιφανειών του αεραγωγού, απαιτείται η δημιουργία φιλέτων στις ακμές του. Η διαδικασία αρχίζει με την εφαρμογή μεταβλητών φιλέτων “Variable fillets” στις ακμές που οδηγούν από την εισαγωγή του αεραγωγού στην κυψέλη καυσίμου. Ο λόγος που χρησιμοποιείται η παραπάνω εντολή είναι διότι θα πρέπει στην εισαγωγή να έχουμε διαφορετικό προφίλ όπου θα εισέρχεται ο αέρας από τα Naca ducts ενώ θα πρέπει να εξομαλύνονται όσο πλησιάζουν προς την κυψέλη. Επομένως επιλέγονται οι εξωτερικές ακμές και ορίζονται οι τέσσερις στρογγυλεύσεις της κυψέλης με ακτίνα 0.1mm όπως και οι κάτω γωνίες της εισαγωγής, ενώ οι πάνω ορίζονται παραμετρικά μέσω της μεταβλητής “fillet_radius_airways” η οποία και ορίζεται ίση με 4mm (Εικόνα 43γ), επίσης η μετάβαση μεταξύ των τιμών είναι κυβική, η μεταβολή επιλέγεται ως ομαλή και η δημιουργία των τόξων ως εφαπτόμενα οριζόμενη. Αντίστοιχα, μέσω της εντολής “Edge fillet” ορίζονται με την ίδια μεταβλητή και οι ανάντι ακμές που προέκυψαν από την τομή με τις επιφάνειες της δοκού, ο τύπος μετάβασης επιλέγεται ομαλός και η δημιουργία των τόξων ως εφαπτόμενα ορισμένη. Τέλος μέσω και πάλι της εντολής “Edge fillet” ορίζονται με 0.1 και οι υπόλοιπες ακμές της τομής (Εικόνα 43 α,β).



Εικόνα 43 Εικόνα 28 Δημιουργία φιλέτων μέσω εντολών α),β) "Edge fillets", γ) "Variable fillets"

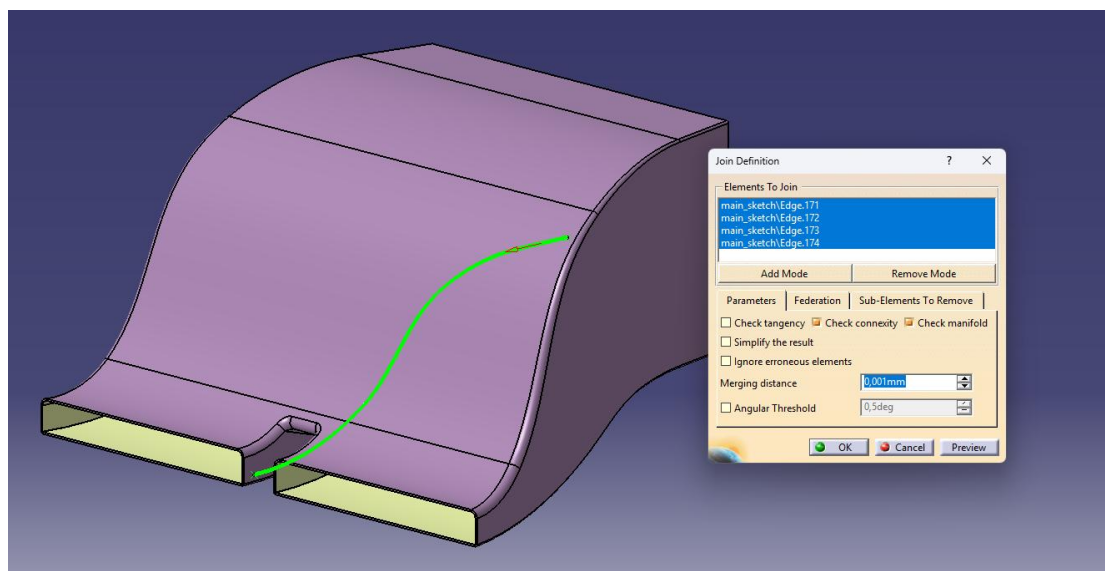
Εφόσον λοιπόν, έχει δημιουργηθεί το τελικό μοντέλο επιφάνειας του αεραγωγού S-duct, μέσω της εντολής "Thick surface" θα προστεθεί πάχος στην κατασκευή. Η εντολή προσδίδει πάχος στην κατασκευή που ορίζεται παραμετρικά μέσω της μεταβλητής "airways_thickness"

ενώ σημειώνεται πως κάθε επιφάνεια θα εξωθηθεί προς την εξωτερική διεύθυνση της κατασκευής, ακολουθώντας το κάθετο διάνυσμά της (Εικόνα 44).



Εικόνα 44 Ορισμός πάχους κατασκευής μέσω "Thick surface"

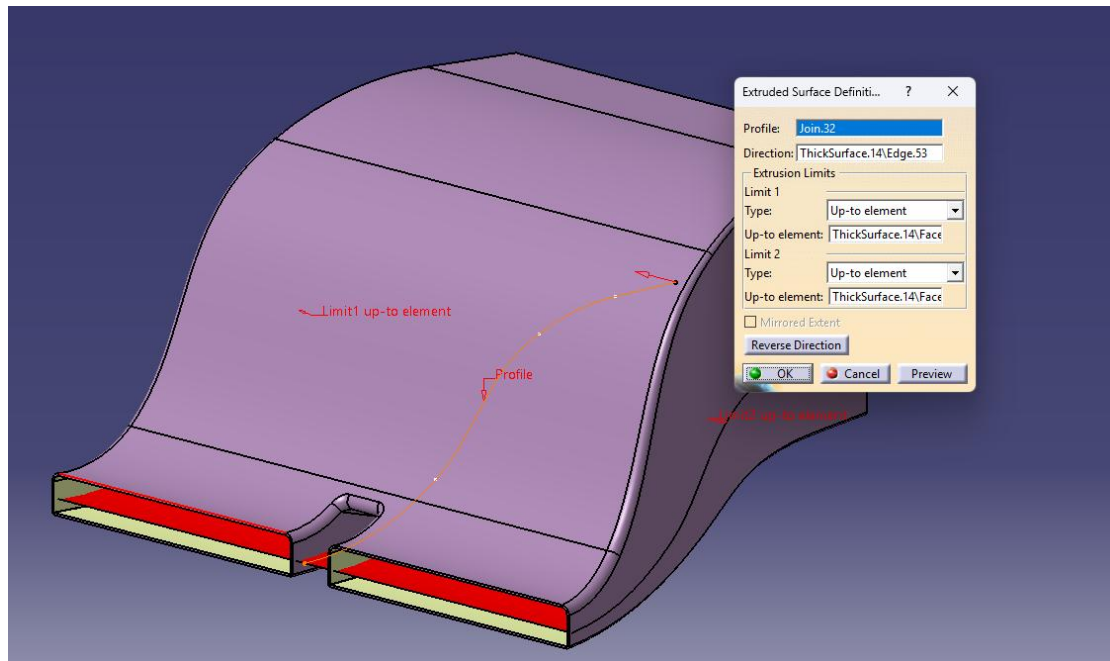
Έχοντας πλέον τον τρισδιάστατο αεραγωγό S-duct, η διαδικασία συνεχίζεται δημιουργώντας και τα τρισδιάστατα εσωτερικά οριζόντια περύγια. Με τη χρήση της εντολής "join" συνενώνονται οι καμπύλες που ορίζουν κάθε οριζόντιο περύγιο από το "main sketch" ώστε να εξωθηθούν ως προς το διάνυσμα που είναι κάθετο στο επίπεδο όπου σχεδιάστηκαν και με όρια τα εξωτερικά όρια του S-duct (Εικόνα 45).



Εικόνα 45 Εντολή "Join", συνένωση καμπυλών οριζόντιου περυγίου.

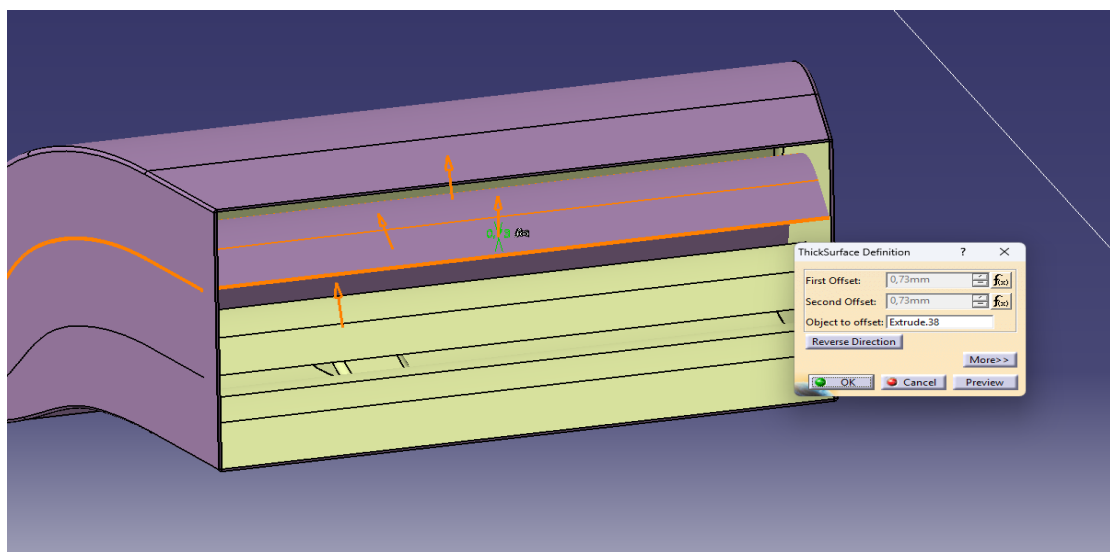
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 46, έχει επιλεγεί η οριζόντια ακμή της εξαγωγής του αεραγωγού όπου είναι παράλληλη με το διάνυσμα του επιπέδου όπου σχεδιάστηκαν οι καμπύλες των περυγίων. Επίσης, επιλέχθηκαν ως όρια οι εξωτερικές πλευρικές επίπεδες επιφάνειες που προέκυψαν από την εντολή "Thick surface". Ο λόγος που συνέβη αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικός καθώς χρειάζεται να έχουν καθαρή τομή τα περύγια με τον αγωγό ώστε να

εφαρμοστεί σωστά η μετέπειτα εντολή “Add” που θα παράξει το τελικό ενιαίο αντικείμενο. Ίδια διαδικασία ακολουθείται και για το άλλο οριζόντιο περύγιο.

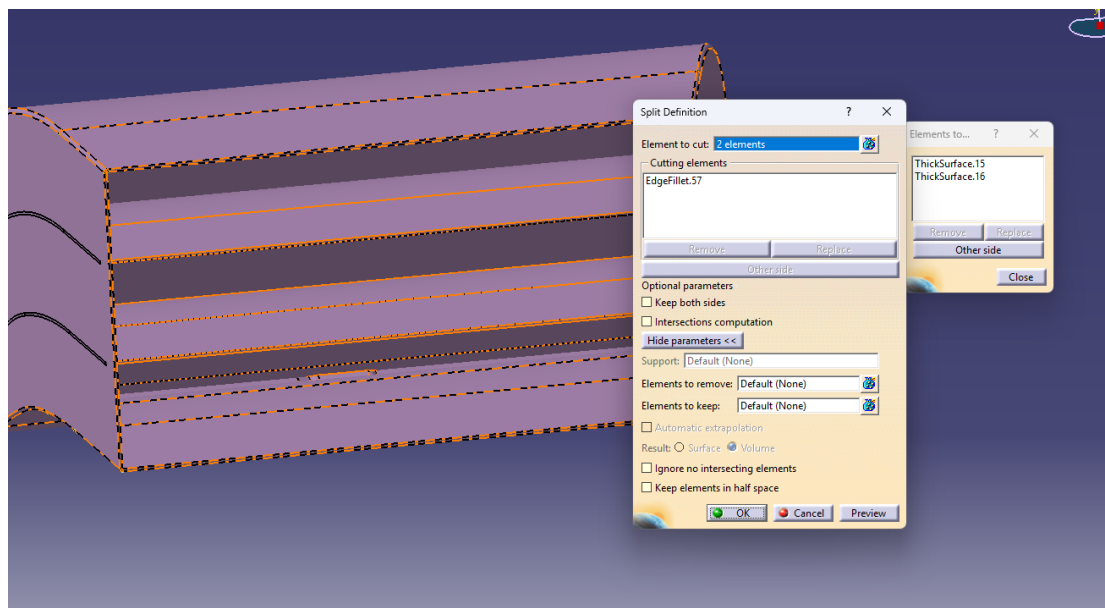


Εικόνα 46 Εντολή “Extrude surface”, εξώθηση επιφάνειας περυγίου

Ακολουθεί η προσθήκη πάχους στις επιφάνειες των περυγίων. Αντίστοιχα με τα παραπάνω, μέσω της εντολής “Thick surface” προσδίδεται πάχος και στις δύο κατευθύνσεις αυτή τη φορά, όπου η κάθε κατεύθυνση εξωθεί την επιφάνεια κατά το ήμισυ της μεταβλητής “*airways_thickness*”, έτσι ώστε να προκύψει συμμετρικό μοντέλο ως προς την επιφάνεια του περυγίου και να υπάρχει ακριβής διαίσθηση στη παραμετρική χρήση των αποστάσεων από το χρήστη (Εικόνα 47). Έπειτα θα χρειαστεί να γίνει τομή κάθε περυγίου με την περιοχή του αεραγωγού όπου περικλείει την δοκό. Μέσω της εντολής “Split definition”, επιλέγοντας και τα δύο αντικείμενα που απαρτίζουν τα περύγια και του αντικειμένου του αεραγωγού εφαρμόζεται η εντολή (Εικόνα 48). Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να μην επιλεγεί η επιφάνεια που προέκυψε από το Sketch της δοκού του αυτοκινήτου διότι δεν θα δημιουργηθεί σωστά η τομή των φιλέτων στα περύγια.

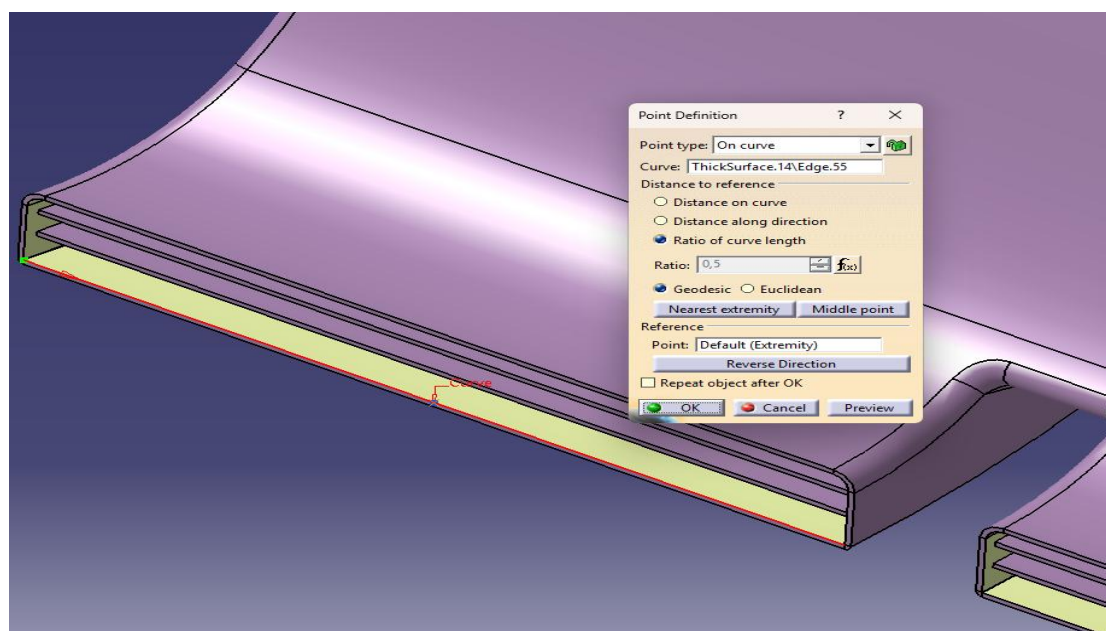


Εικόνα 47 Προσθήκη πάχους στα περύγια.



Εικόνα 48 Τομή περυγίων

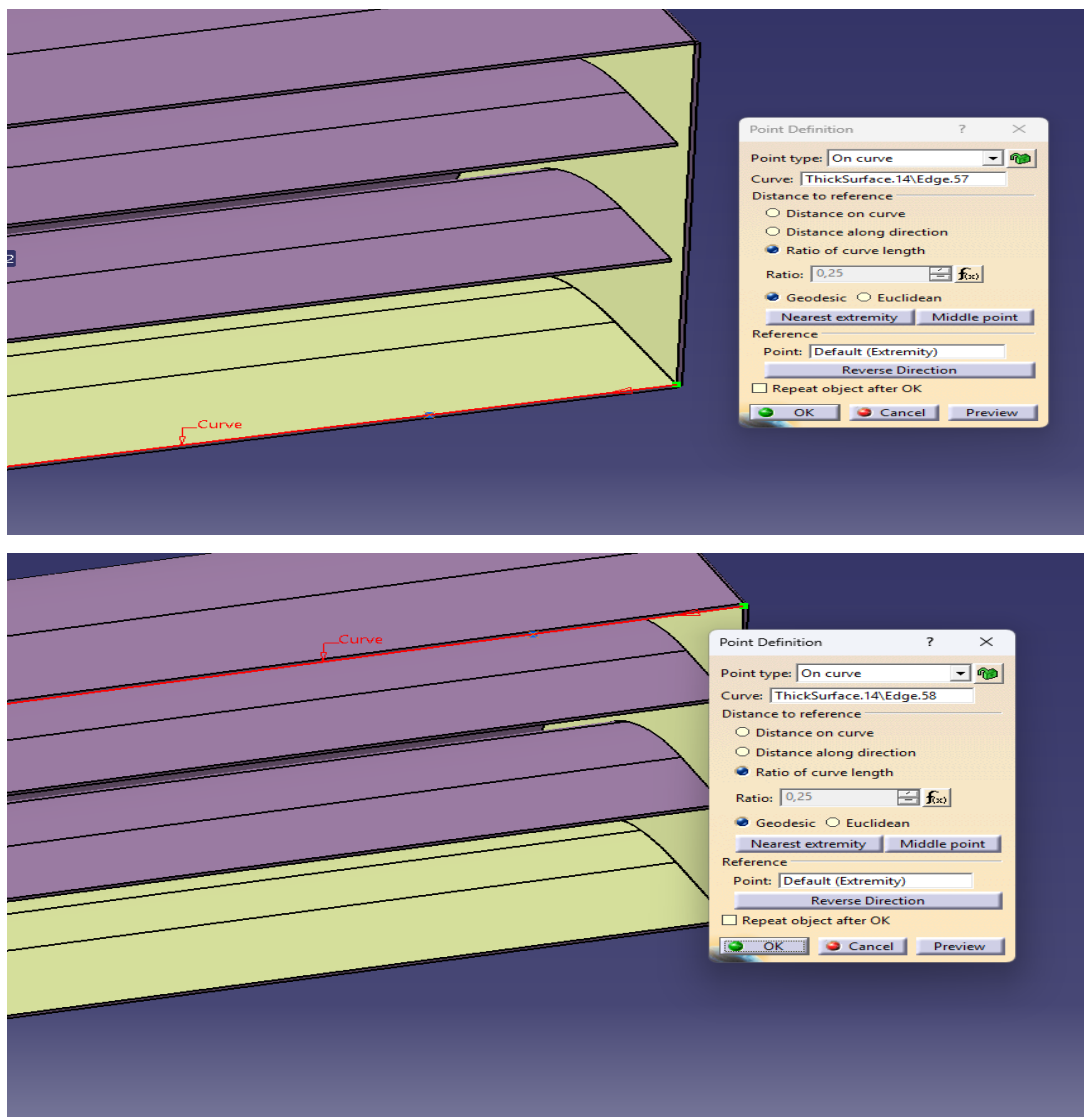
Έχοντας ολοκληρώσει και τη σχεδίαση των οριζόντιων περυγίων, σειρά παίρνουν τα κάθετα περύγια του αεραγωγού. Η φιλοσοφία σχεδίασής τους βασίζεται στην παραμετροποίηση του επιπέδου όπου θα σχεδιαστούν μέσω των τριών σημείων όπου θα τον ορίσουν. Επομένως ορίζονται τρία, δύο εκ των οποίων στις οριζόντιες ακμές του αεραγωγού στην μεριά εξαγωγής και ένα στην οριζόντια κάτω οριζόντια ακμή της εισόδου. Αναλυτικότερα, μέσω της εντολής ‘Point definition’ και επιλέγοντας τον τύπο ορισμού ‘on curve’ επιλέγεται η ακμή όπως φαίνεται στην Εικόνα 49. Μέσω της μεταβλητής ‘vertical_fin_inlet_ratio’ επιλέγοντας ως ποσοστό του μήκους της ακμής και διεύθυνση διανύσματος κάθετο προς το επίπεδο συμμετρίας και φορά ως προς αυτό, ορίζεται η παραμετροποίηση του.



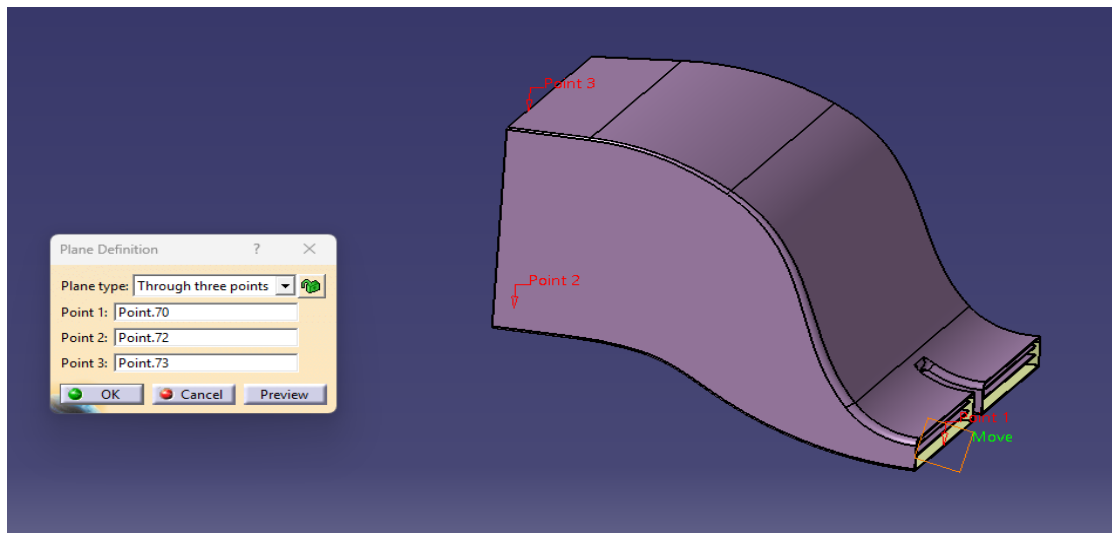
Εικόνα 49 Εισαγωγή σημείο επί της ακμής και παραμετροποίηση του.

Όμοια διαδικασία ακολουθείται και για τα σημεία της εισόδου του αεραγωγού. Επαναλαμβάνοντας της διαδικασία μέσω της εντολής “Point definition”, επιλέγοντας “ratio of curve length” και φορά αντίστοιχη με την παραπάνω ορίζονται ένα σημείο για την επάνω και ένα για την κάτω ακμή. Χρησιμοποιείται η μεταβλητή “vertical_fin_outlet_ratio” η οποία ορίζεται στο 25% του συνολικού μήκους της κάθε ακμής και ορίζει φυσικά την απόσταση του σημείου από την άκρη της ακμής και με θετική φορά αυτή του διανύσματος (Εικόνα 50).

Αντίστοιχη διαδικασία γίνεται και για την άλλη πλευρά του αεραγωγού με ιδιαίτερη προσοχή όμως στον ορισμό της φοράς του διανύσματος. Απαιτείται τα διανύσματα να είναι συμμετρικά ως προς αυτά των Εικόνων 35 και 34 έτσι ώστε να προκύπτει πάντα συμμετρική μετακίνηση και συμμετρικά κάθετα πτερύγια. Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία ορισμού των σημείων, σειρά παίρνει η δημιουργία των τριών επιπέδων. Μέσω της εντολής “Plane Definition” επιλέγονται τα τρία σημεία κάθε πλευράς και ορίζονται κατά σειρά δύο επίπεδα σχεδίασης (Εικόνα 51). Επομένως όπως αναφέρθηκε η διεύθυνση των επιπέδων ορίζεται έμμεσα παραμετρικά, μέσω των μεταβλητών που ορίζουν τις αποστάσεις ως ποσοστό επί του μήκους των ακμών των σημείων.

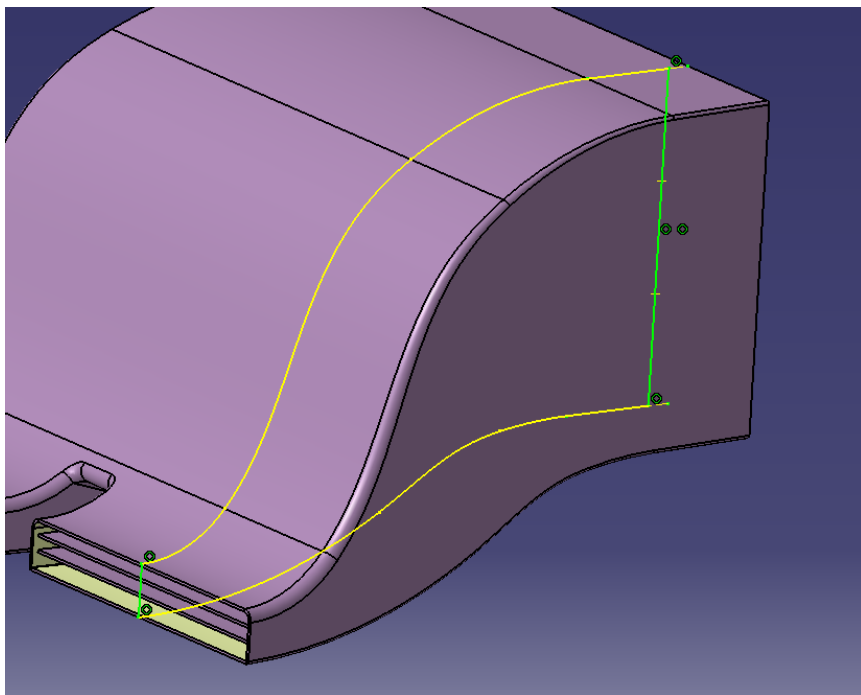


Εικόνα 50 Εισαγωγή σημείων στις ακμές εισόδου του αεραγωγού και παραμετροποίηση τους



Εικόνα 51 Ορισμός επιπέδων με χρήση των τριών σημείων

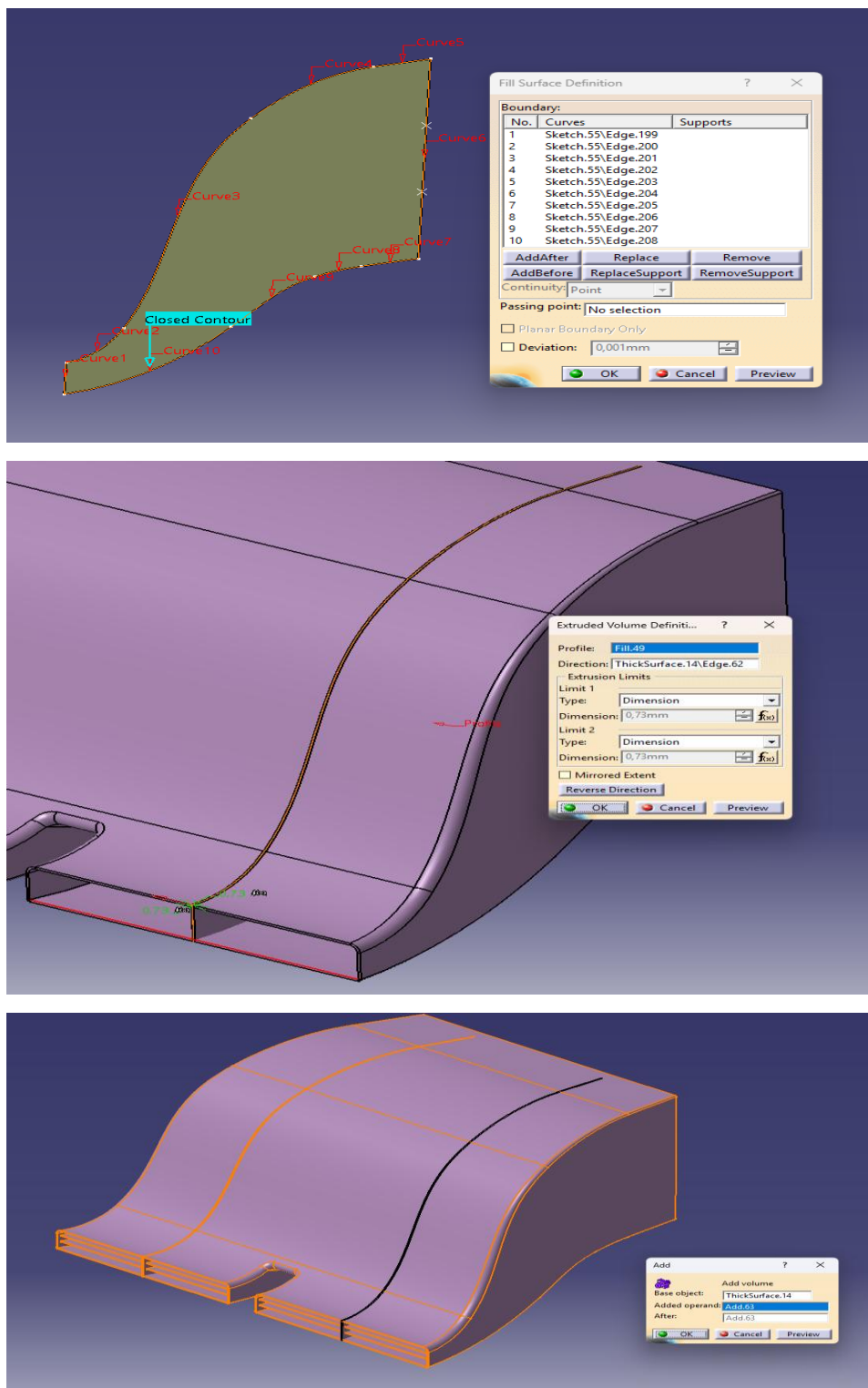
Επί του παραπάνω επιπέδου ορίζεται το “Sketch” του κάθετου πτερυγίου. Με τη χρήση της εντολής “Intersect 3d elements”, θα γίνει προβολή των τομών των τρισδιάστατων αντικειμένων που τέμνουν το επίπεδο αναφοράς (κίτρινες καμπύλες). Ειδικότερα της εξωτερικής γεωμετρίας του αεραγωγού καθώς και τον ακμών των επιφανειών των οριζόντιων πτερυγίων εξόδου (κίτρινα σημεία). Για να ολοκληρωθεί η γεωμετρία ακολουθεί η δημιουργία ευθύγραμμων τμημάτων τα οποία υπακούουν τον περιορισμό του πρώτου βαθμού συνέχειας με τις κίτρινες καμπύλες. Επιπρόσθετα, ορίζονται να περνούν από τα σημεία που αντιπροσωπεύουν τα οριζόντια πτερύγια (Εικόνα 52).



Εικόνα 52 Γεωμετρία κάθετου πτερυγίου

Στη συνέχεια μέσω της εντολής “Fill”, επιλέγοντας τις καμπύλες κατά σειρά που σχεδιάστηκαν παραπάνω δημιουργείται η επιφάνεια του πτερυγίου. Η εν λόγω επιφάνεια θα εξωθηθεί ως προς την τρίτη διάσταση ώστε να προκύψει το τρισδιάστατο πτερύγιο. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός πως η εξώθηση θα γίνει κατά το ήμισυ της μεταβλητής

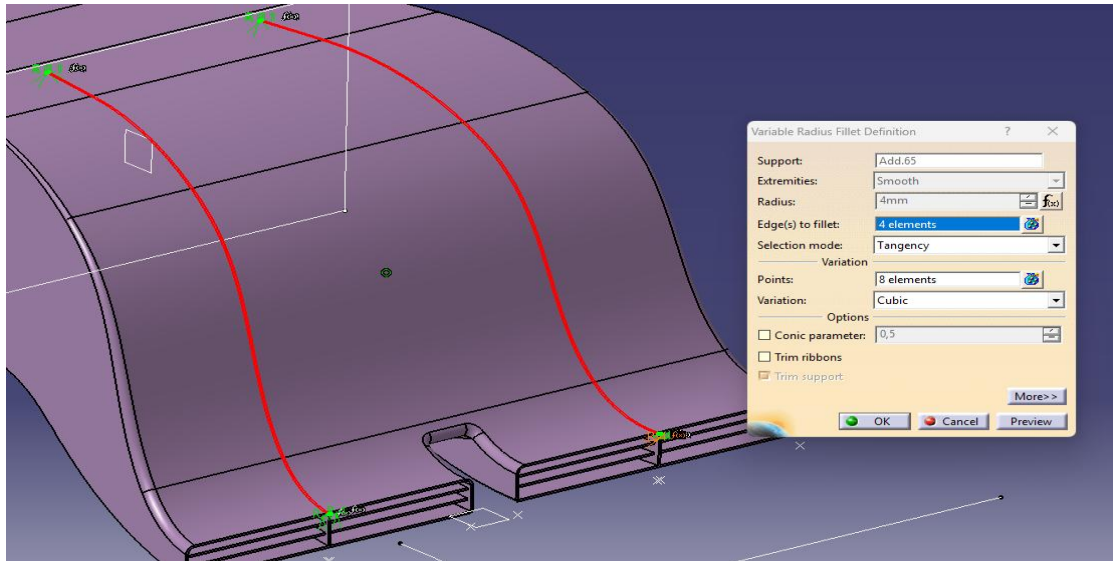
“airways_thickness” σε κάθε κατεύθυνση , ώστε η επιφάνεια να αποτελεί στοιχείο συμμετρίας ενώ η διεύθυνση εξώθησης ορίζεται ως η κάτω ακμή του της εισόδου του αεραγωγού όπως φαίνεται στην Εικόνα 53β. Τέλος με την εντολή “Add” ενοποιούνται όλα τα αντικείμενα που σχεδιάστηκαν αποδίδοντας το μοναδικό τρισδιάστατο μοντέλου S-duct (Εικόνα 53γ).



Εικόνα 53 α)Επιφάνεια κάθετου περυγίου, β) Εξώθηση τρισδιάστατο κάθετου περυγίου, γ) S-duct

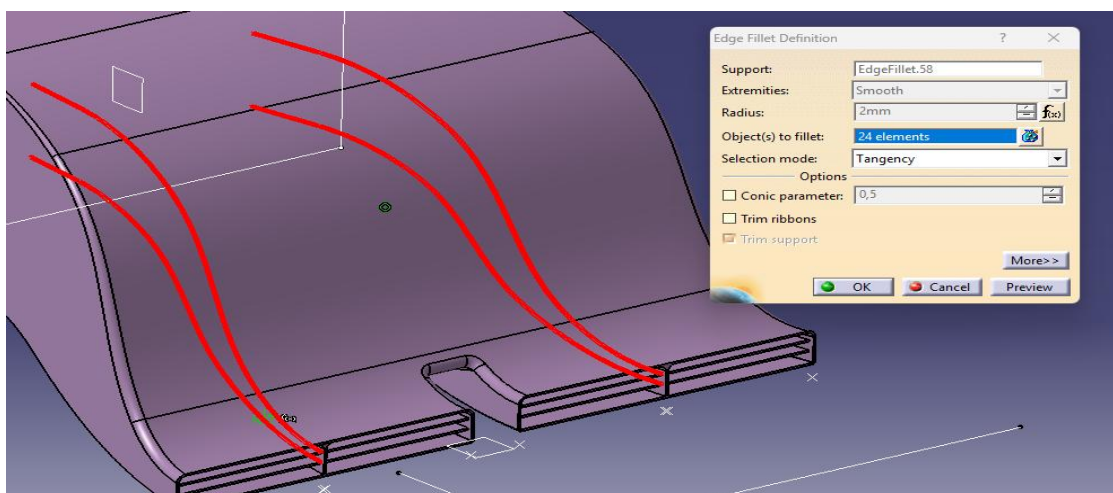
Για την ολοκλήρωση της σχεδίασης του αεραγωγού S-duct απαραίτητη είναι η δημιουργία φιλέτων στις γωνίες. Ο λόγος σχεδιάσής τους, έγκειται στο γεγονός ότι απότομες γωνίες οι οποίες δημιουργούνται στις τομές των πτερυγίων με τον αεραγωγό προκαλούν αποκολλήσεις του οριακού στρώματος και στροβιλισμούς. Η δημιουργία φιλέτων απαιτεί ιεράρχηση των γωνιών ώστε κατά τη παραμετροποίηση, δηλαδή αλλαγή τιμών των ακτινών των φιλέτων να μην προκαλούν προβλήματα σχεδίασης. Η σειρά που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

1. Χρήση της εντολής “Variable Fillet” για τη δημιουργία φιλέτων των πάνω ακμών των τομών των κάθετων πτερυγίων με τον αεραγωγό. Παραμετρικός ορισμός της ακτίνας των φιλέτων μέσω της μεταβλητής “*fillet_radius_airways*”, μετάβαση κυβική και επαφή εφαπτόμενη.



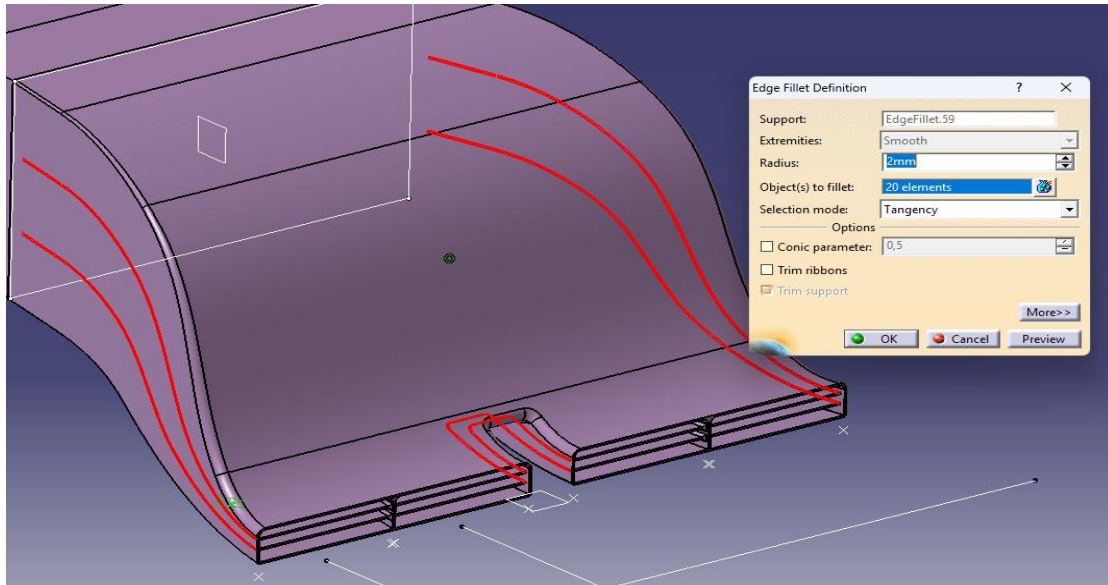
Εικόνα 54 Στρογγυλέψεις των πάνω ακμών των τομών κάθετων πτερυγίων- S-duct

2. Χρήση της εντολής “Edge Fillet” για τη δημιουργία φιλέτων των ακμών των τομών των κάθετων με των οριζόντιων πτερυγίων. Ορισμός ακτίνας παραμετρικά μέσω της μεταβλητής “*fillet_inlet_fins*”.



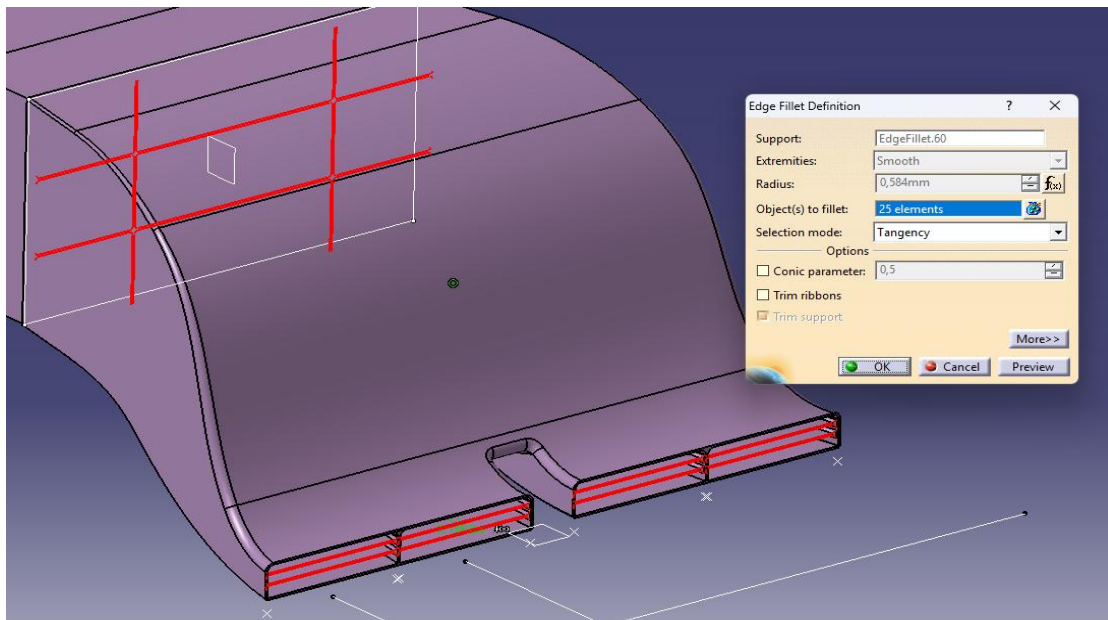
Εικόνα 55 Στρογγυλέψεις των ακμών των τομών των δύο τύπων πτερυγίων

3. Χρήση της εντολής “Edge Fillet” για τη δημιουργία φιλέτων των ακμών των τομών των οριζόντιων πτερυγίων με τον αεραγωγό . Ορισμός ακτίνας παραμετρικά μέσω της μεταβλητής “*fillet_inlet_fins*”.



Εικόνα 56 Ακμές των τομών των οριζόντιων πτερυγίων με τον αεραγωγό

4. Χρήση της εντολής “Edge fillet” για τις περιοχές εισόδου και εξόδου του αεραγωγού και ακτίνα των “fillets” παραμετρικά ορισμένη μέσω “*airways_thickness/2.5*” , ο συντελεστής 2.5 εισάγεται έτσι ώστε να συνδράμει στην αποφυγή επικαλύψεων των φιλέτων.

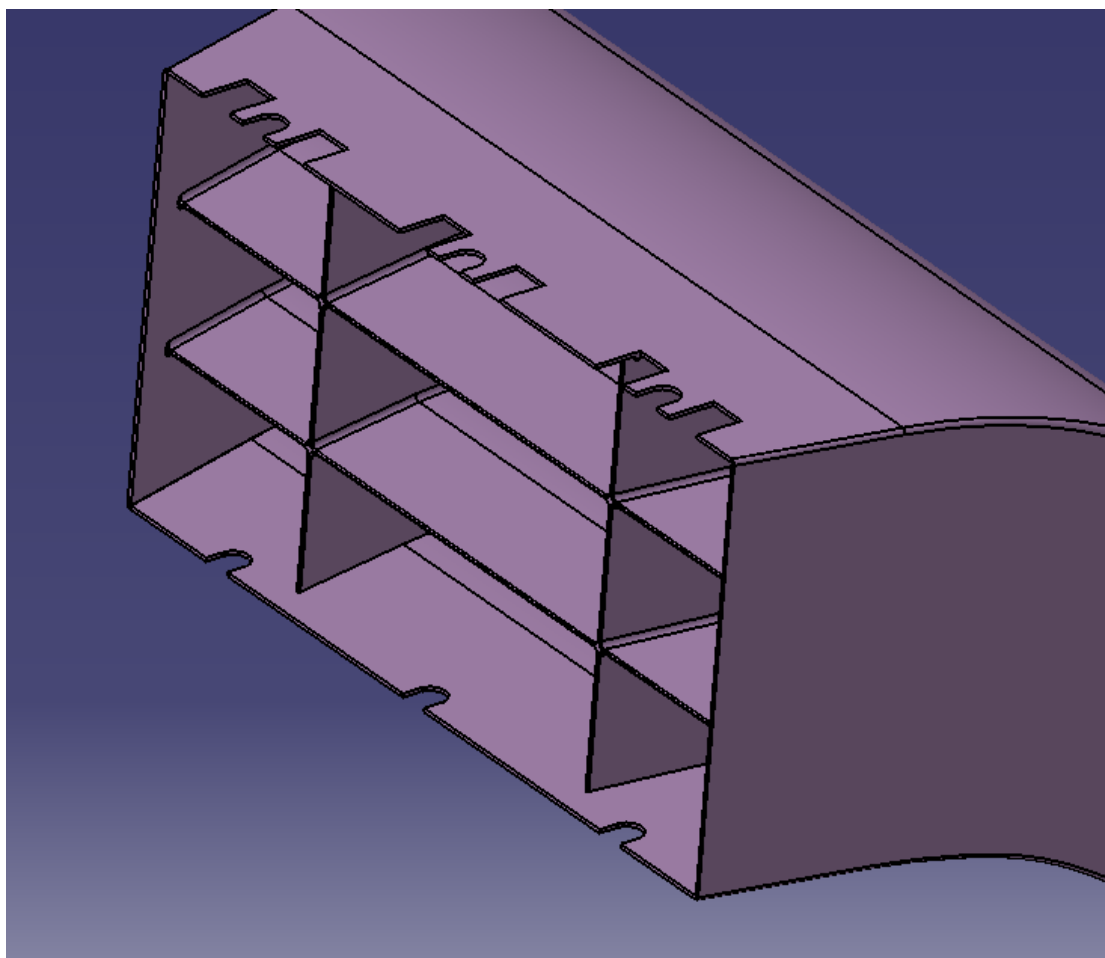


Εικόνα 57 Περιοχές εισόδου και εξόδου

Για να είναι το μοντέλο πλήρως κατασκευάσιμο και εφαρμόσιμο θα χρειαστεί να γίνουν κάποιες ακόμα παρεμβάσεις στη γεωμετρία επαφής με την κυψέλη καυσίμου στα σημεία όπου καταλήγουν οι άξονες σύσφιξης της. Επομένως σχεδιάζονται σε “Sketch” επί επιπέδου που εφάπτεται της άνω πλάκας συγκράτησης, και δημιουργούνται τα προφίλ των εξοχών της κυψέλης (Εικόνα 58). Έπειτα μέσω της εντολής “Extruded Volume Definition” εξωθούνται

[illegible]

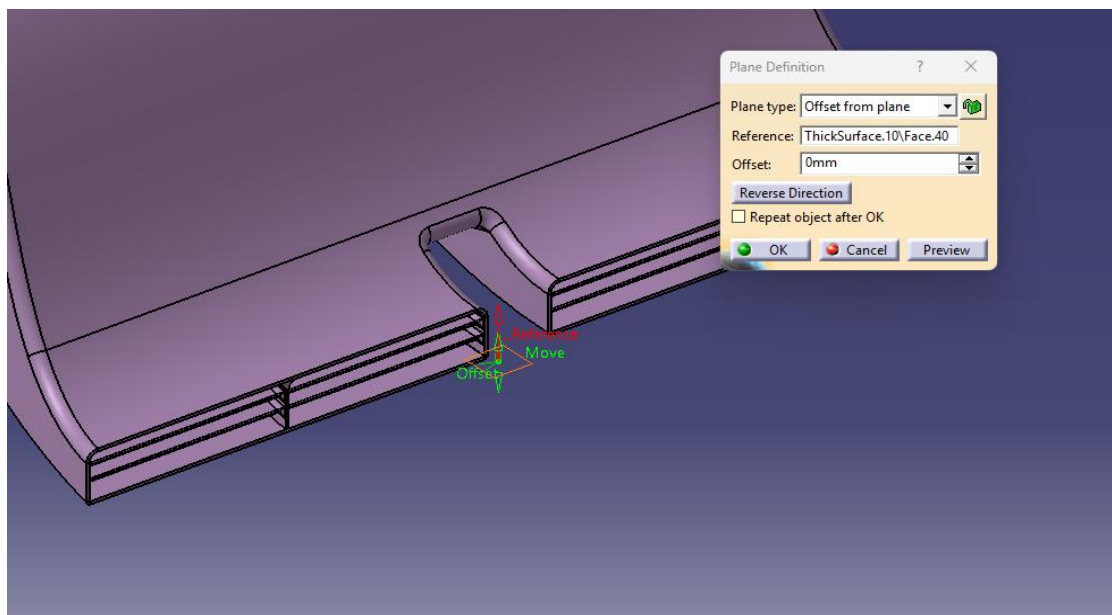
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης



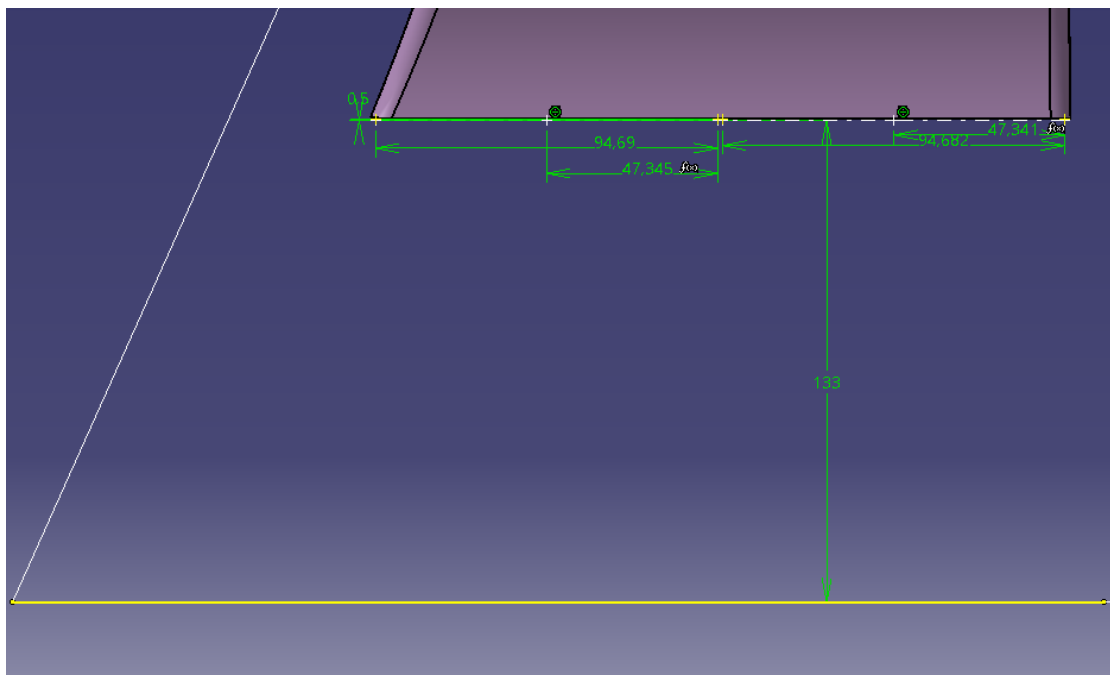
Εικόνα 60 Αποτέλεσμα αεραγωγού έπειτα από την αφαίρεση των εγχοπών για τη σωστή συναρμολόγηση στην κυψέλη

4.1.2 Σχεδιασμός εμφωλευμένων αεραγωγών τύπου Naca duct

Καταρχάς, ορίστηκε επίπεδο στο πάτωμα του αυτοκινήτου (Εικόνα 61). Επί του επιπέδου δημιουργήθηκε “Sketch” ώστε να τοπογραφηθεί ο διαθέσιμος χώρος για την ανάπτυξη των εμφωλευμένων αεραγωγών. Όπως διακρίνεται στην Εικόνα 62, έγινε προβολή της δοκού που βρίσκεται ανάντι της εισόδου του αεραγωγού και ουσιαστικά αποτελεί και το σύνορο του διαθέσιμου χώρου (κίτρινο χρώμα) . Επί της εισόδου ορίστηκαν σημεία σε απόσταση 0.5mm από την επιφάνεια εισόδου και τοποθετήθηκαν στο μέσο κάθε καναλιού, ώστε να χρησιμοποιηθούν αργότερα ως σημεία αναφοράς για τις καμπύλες των Naca ducts.

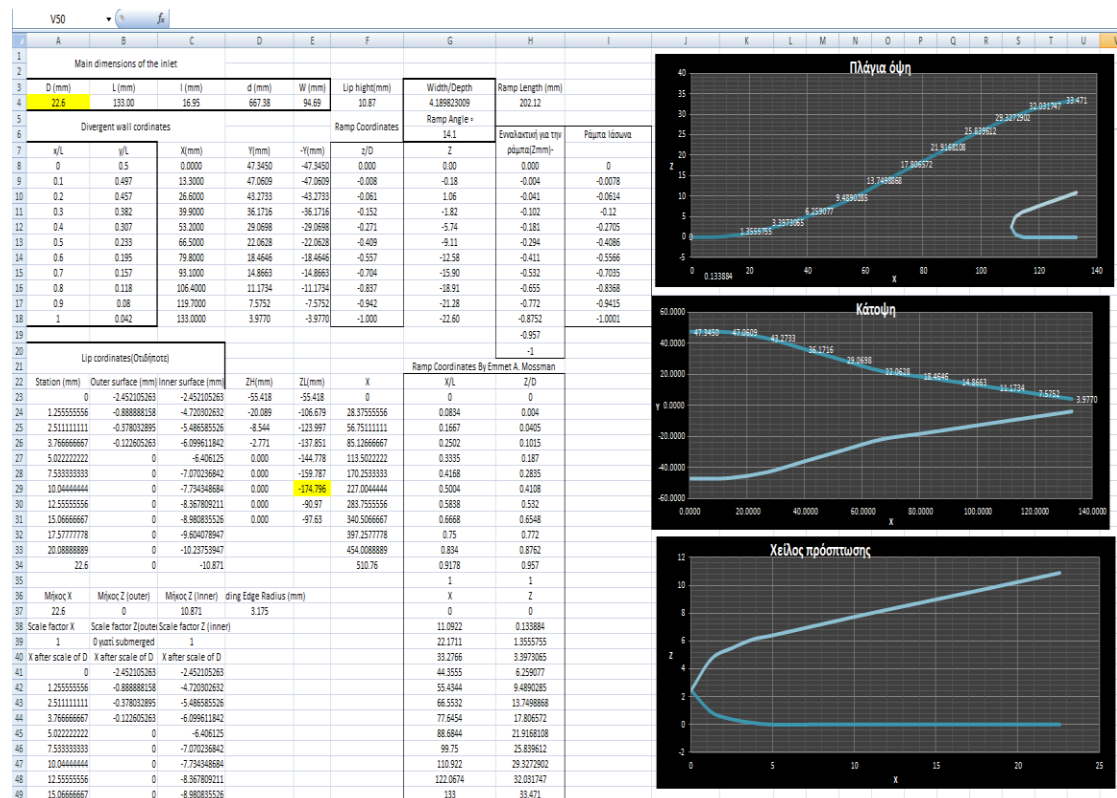


Εικόνα 61 Επίπεδο σχεδίασης Naca



Εικόνα 62 Διαστασιολόγηση διαθέσιμου χώρου για ανάπτυξη των Naca ducts

Μέσω της δυνατότητας που παρέχει το Catia V5R20 για την εισαγωγή συντεταγμένων για την δημιουργία σημείων στο χώρο και καμπυλών επί αυτών, εισήχθησαν πλήθος σημείων τα οποία πάρθηκαν από αρχείο Excel το οποίο δημιουργήθηκε με στόχο την παραμετροποίηση των καμπυλών των αεραγωγών μέσω των αναλογιών που εκφράζουν τη γεωμετρία των εμφωλευμένων αεραγωγών (Εικόνα 63).

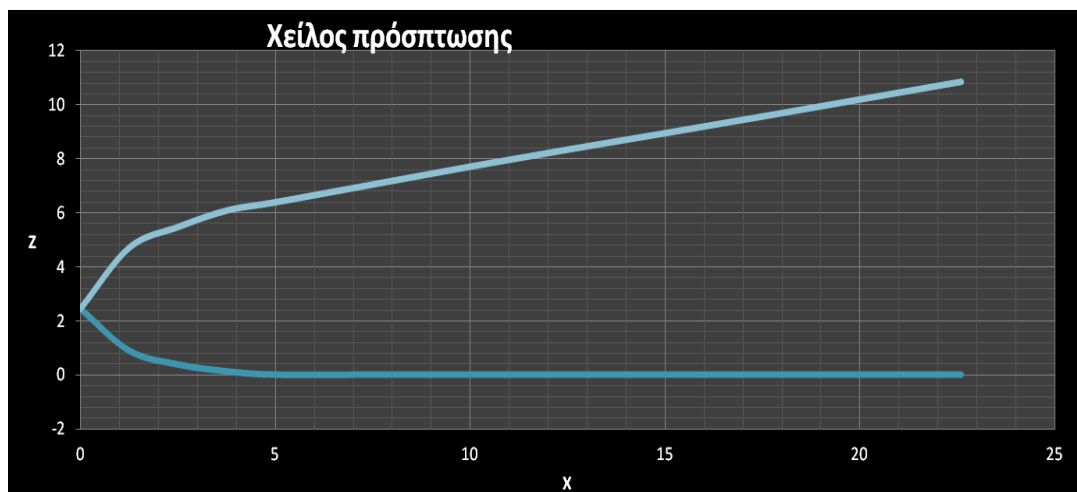
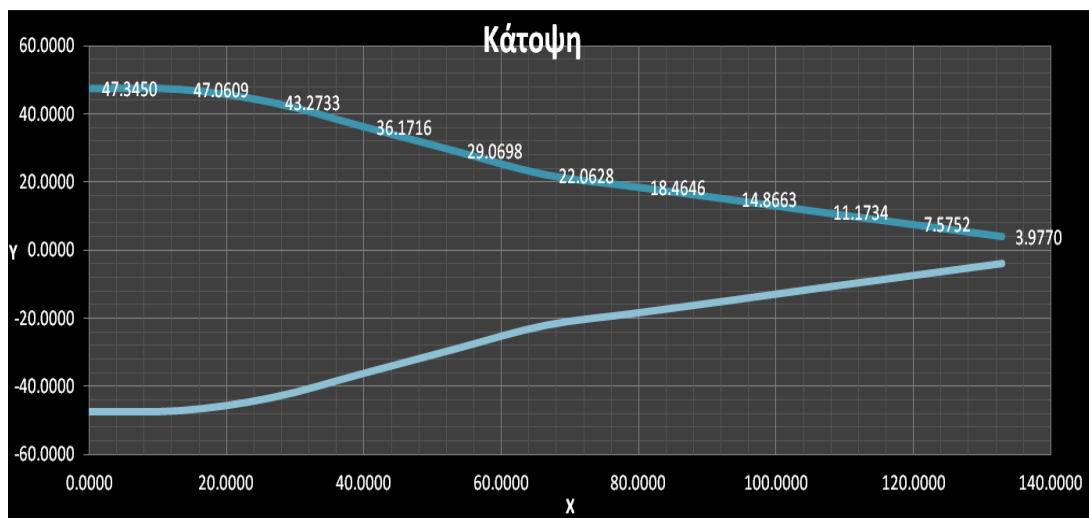
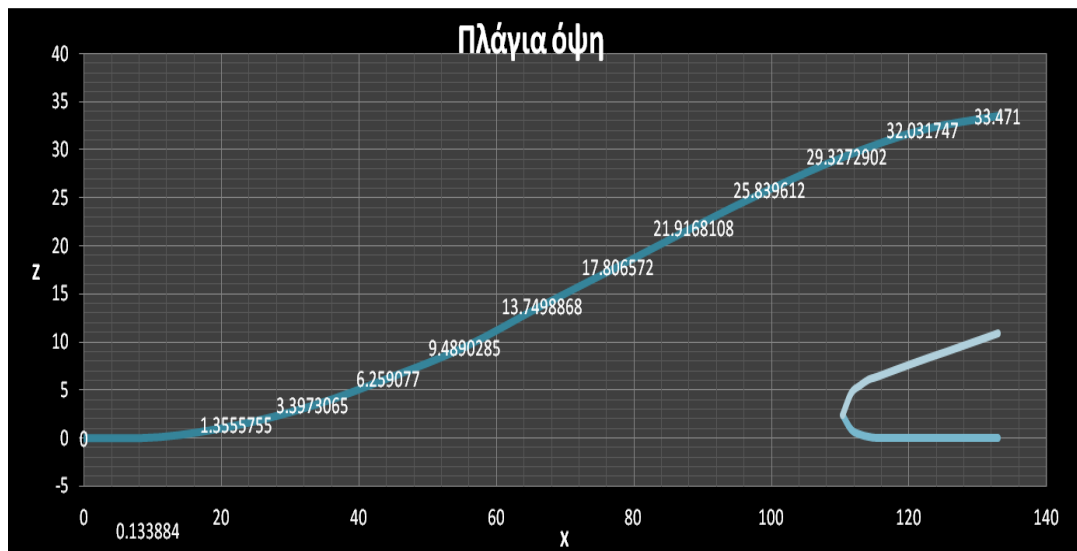


Εικόνα 63 Προεπισκόπηση αρχείου Exce

Πίνακας 2 Πίνακας αναλογιών Naca duct

D (mm)	L (mm)	l (mm)	d (mm)	W (mm)	Lip height (mm)	Width/Depth	Ramp Angle °
22.6	133.00	16.95	667.38	94.69	10.87	4.18	14.1

Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2, επιλέχθηκε ύψος εισόδου 22.6mm, μήκος αεραγωγού Naca 133mm ενώ το χείλος προσβολής έχει ύψος 10.87mm. Οι τιμές αυτές προσδίδουν πολύ καλές γεωμετρικές αναλογίες όπως λόγο πλάτους προς βάθος ίσο με 4.18 ενώ η γωνία ράμπας βρίσκεται στις 14.1°. Οι αναλογίες αυτές βρίσκονται πολύ κοντά στις τιμές που προτείνει η βιβλιογραφία (W.Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945). Το χείλος προσβολής θα αναλυθεί αργότερα.

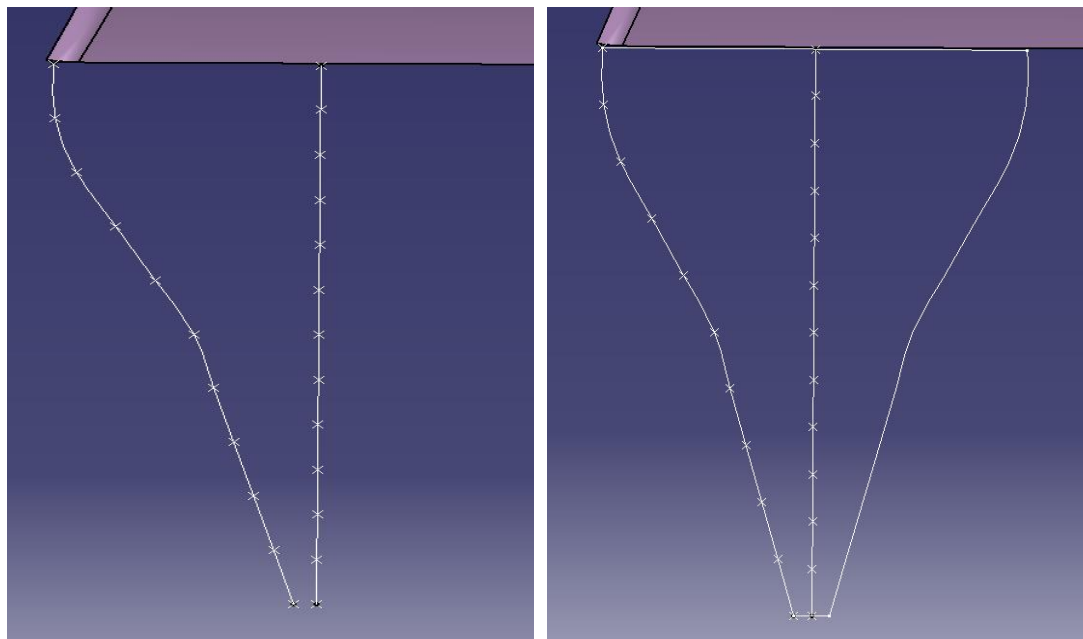


Γράφημα 1 α) πλάγια όψη Naca , β) κάτοψη Naca , γ) Χείλος πρόσπτωσης

Έπειτα μέσω του αρχείου “GSD_PointSplineLoftFromExcel” που προσφέρεται από το Catia V5R20, το οποίο περιέχει μακροεντολές για δημιουργία σημείων και καμπυλών, εισήχθησαν οι συντεταγμένες σημείων για τις καμπύλες της κάτοψης και της πλάγιας όψης του Naca duct (Εικόνα 64). Στη συνέχεια δημιουργήθηκε η συμμετρική καμπύλη και δύο ευθύγραμμα τμήματα τα οποία και έκλεισαν τη γεωμετρία της κάτοψης (Εικόνα 65).

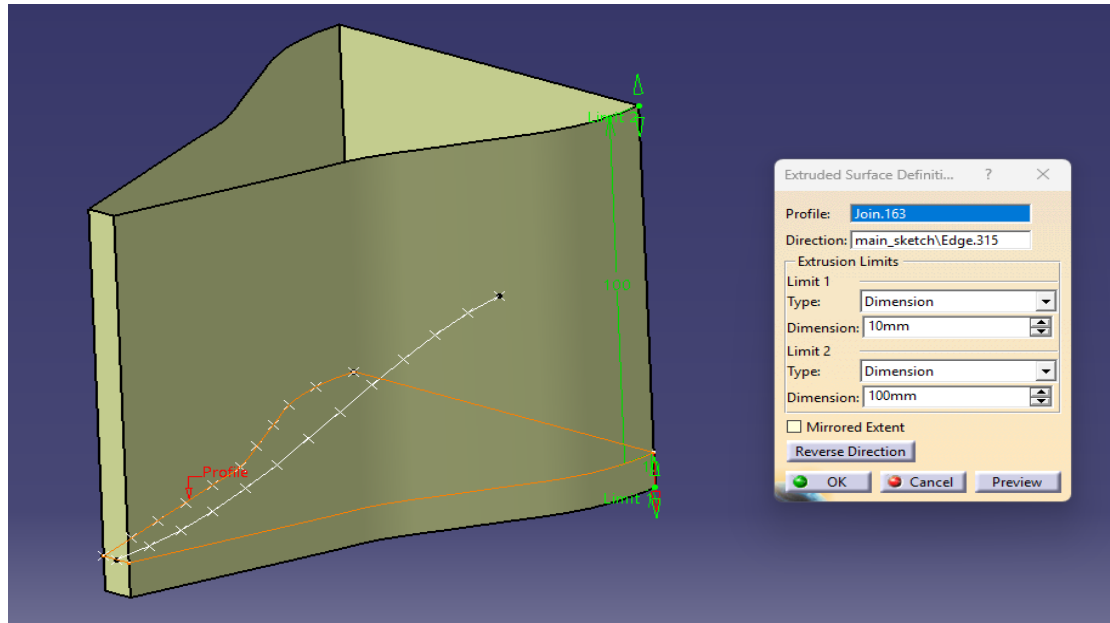
Origin Point				x,y,z_Transformation
0	0	0.000		
StartLoft				
StartCurve				
0.00	47.345	0		
13.3	47.06093	0		
26.6	43.27333	0		
39.9	36.17158	0		
53.200	29.06983	0		
66.500	22.06277	0		
79.800	18.46455	0		
93.100	14.86633	0		
106.400	11.17342	0		
119.700	7.5752	0		
133.000	3.97698	0		
		0		
EndCurve				
EndLoft				
StartLoft				
StartCurve				
0	0	0.00		
0	11.0922	0.13		
0	22.1711	1.36		
0	33.2766	3.40		
0	44.3555	6.26		
0	55.4344	9.49		
0	66.5532	13.7498868		
0	77.6454	17.806572		
0	88.6844	21.9168108		
0	99.75	25.839612		
0	110.922	29.3272902		
0	122.0674	32.031747		
0	1.33E+02	33.471		
EndLoft				
End				

Εικόνα 64 Αρχείο εισαγωγής συντεταγμένων Naca duct , κάτοψη και πλάγια όψη

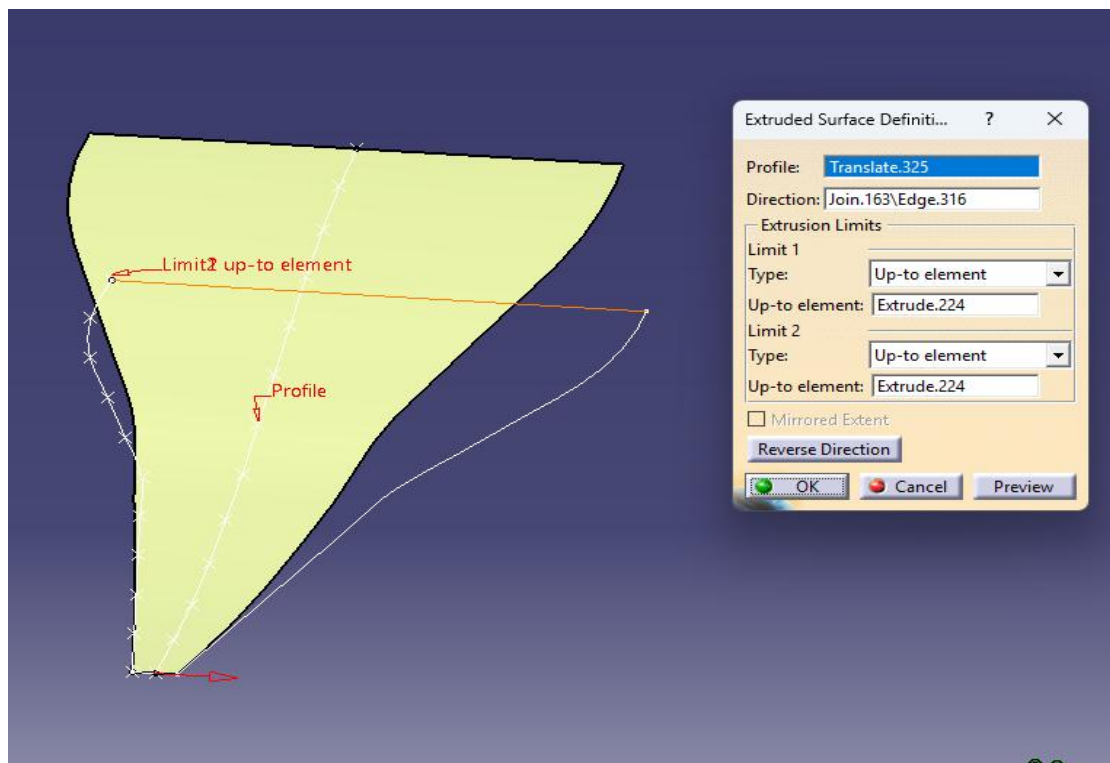


Εικόνα 65 Γεωμετρία κάτοψης

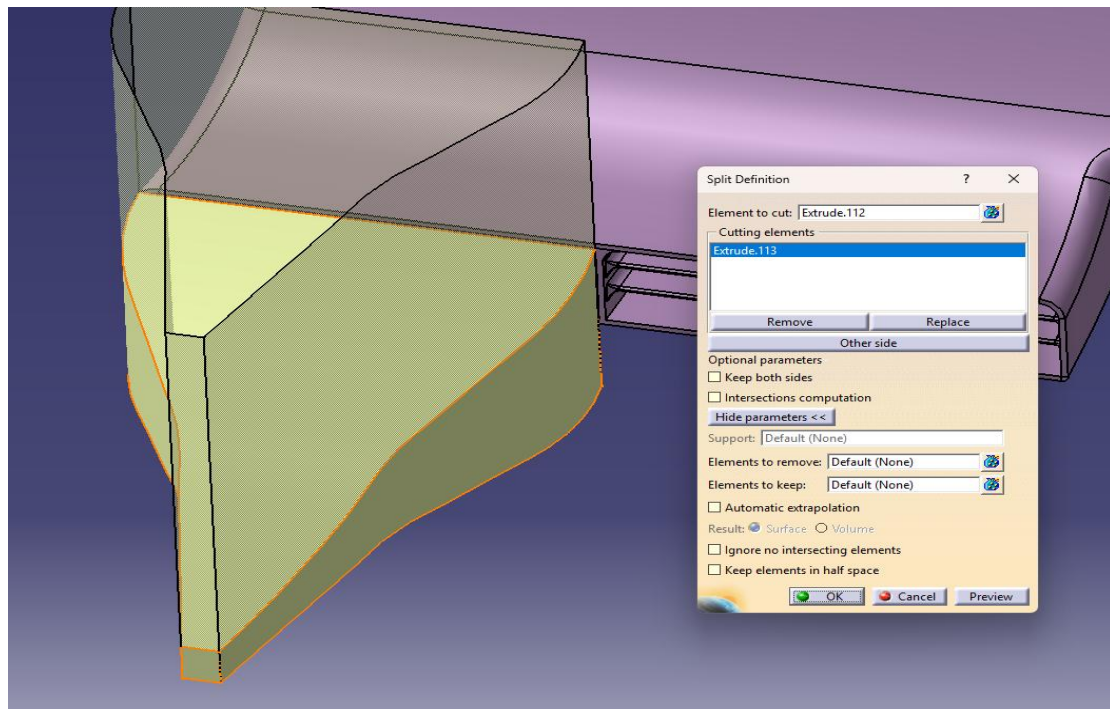
Η διαδικασία συνεχίζεται με την εξώθηση της γεωμετρίας της κάτοψης προς το κάθετο διάνυσμα του επιπέδου της για την δημιουργία επιφάνειας. Προς τα θετικό άξονα Z ορίζεται μεγάλη απόσταση ώστε να καλύψει το ύψος του Naca ενώ στην άλλη κατεύθυνση ορίζεται 10mm ώστε να δημιουργηθεί μετέπειτα “interface” το οποίο θα χρησιμεύσει στην προσομοίωση. Αντίστοιχα εξωθείται και η καμπύλη της πλάγιας όψης με σύνορα τα πλάγια καμπύλα τοιχώματα της παραπάνω επιφάνειας (Εικόνα 66-67). Έπειτα με την εντολή “Split” αποκόπτεται το περιττό τμήμα του αεραγωγού (Εικόνα 68) και με την εντολή “join” εννώνονται οι επιφάνειες.



Εικόνα 66 Εξώθηση προφίλ κάτοψης

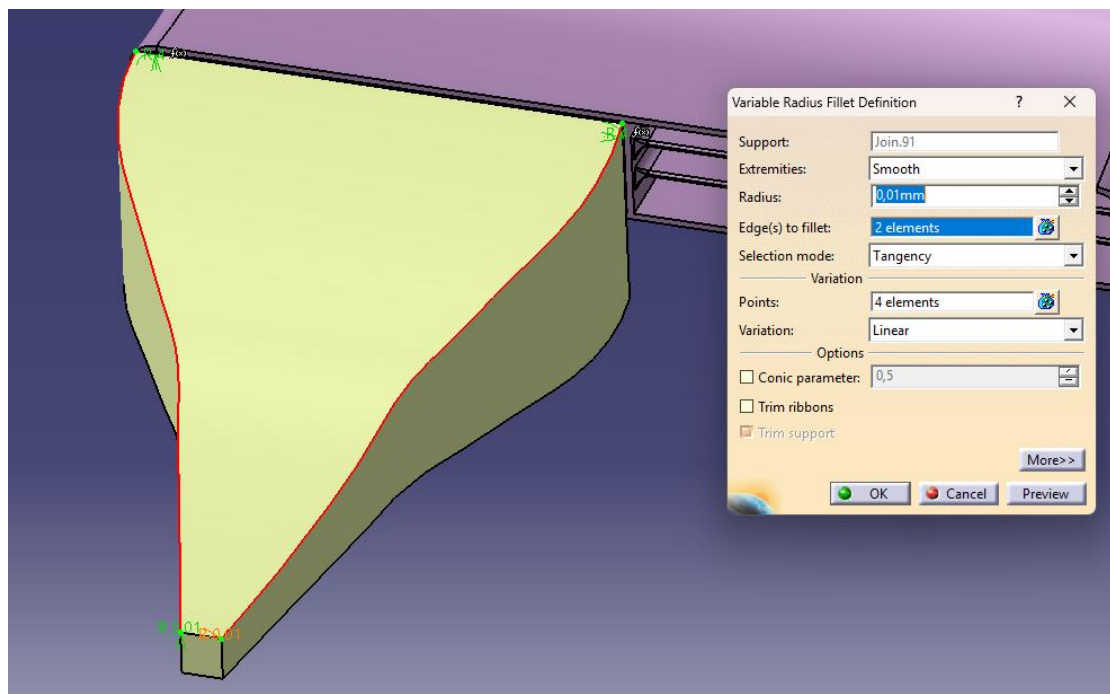


Εικόνα 67 Εξώθηση προφίλ πλάγιας όψης



Εικόνα 68 Αποκοπή περιττού τμήματος

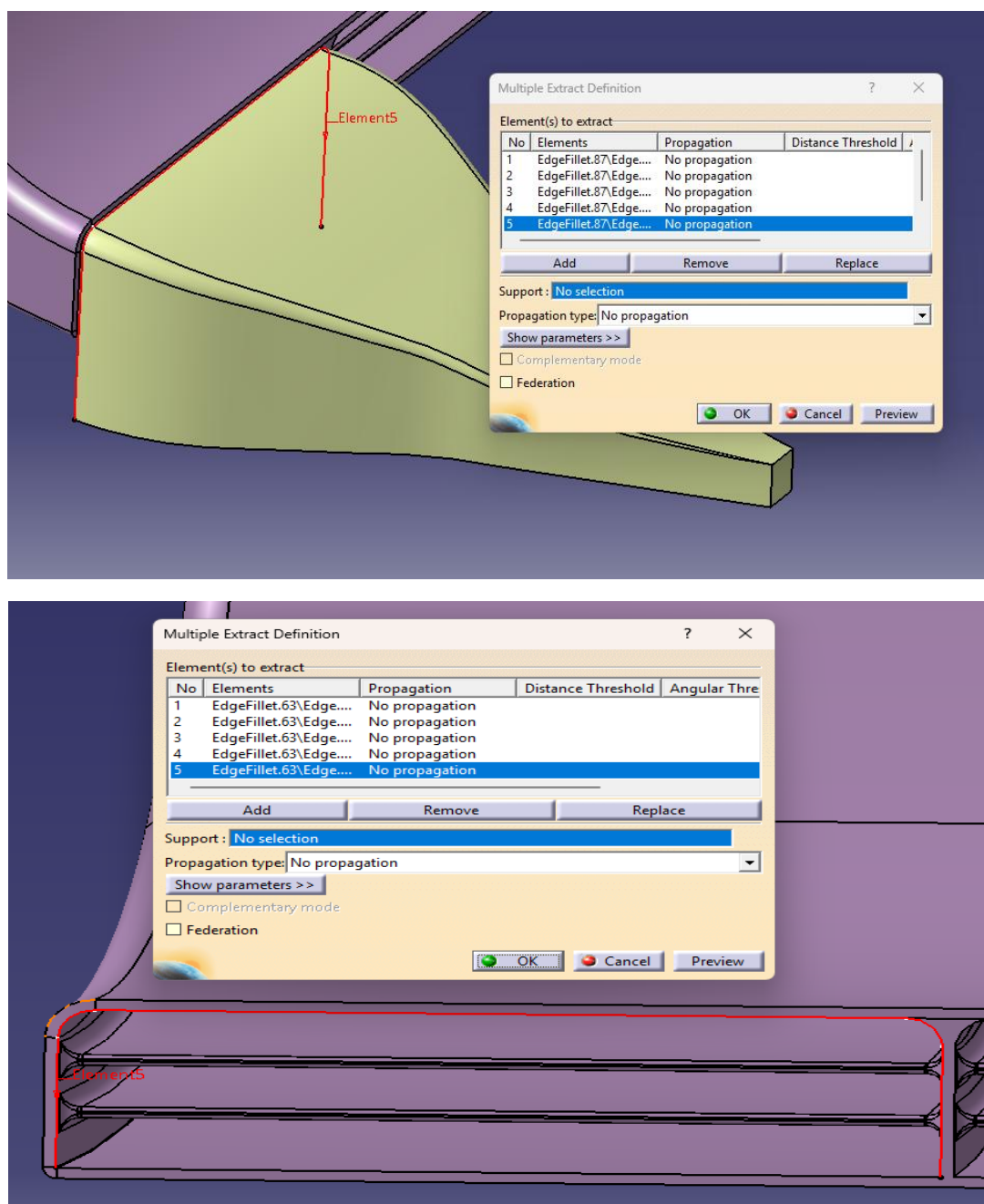
Στις ακμές του μοντέλου επιφανείας δημιουργούνται φιλέτα με μεταβλητή ακτίνα. Επομένως, με την εντολή “Variable fillet” ορίζονται φιλέτα με ακτίνα στην περιοχή εξόδου ίση με την μεταβλητή που όριζε την περιοχή εξόδου του S-duct “*fillet_radius_airways*” ενώ στην περιοχή εισόδου ίση και σταθερή με 0.1mm (Εικόνα 69).



Εικόνα 69 Δημιουργία φιλέτων στις ακμές

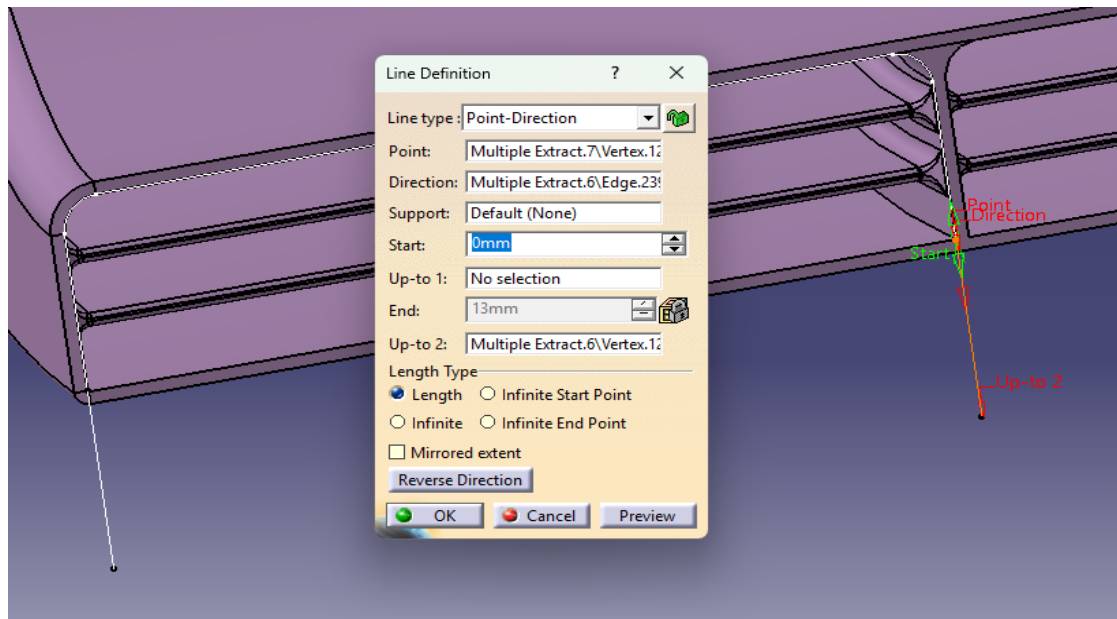
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να δημιουργηθεί μια φλάντζα, η οποία θα συνδέει την έξοδο του αεραγωγού Naca duct με της είσοδο του S-duct. Επομένως, με τη χρήση της εντολής “Multiple Extract” έγινε εξαγωγή του προφίλ εξόδου του αντικειμένου επιφανείας Naca duct.

Με αντίστοιχο τρόπο προέκυψε και το προφίλ της εισόδου του S-duct (Εικόνα 70 α,β). Επί των άκρων του τελευταίου προφίλ, δημιουργήθηκε ευθύγραμμο τμήμα με κατεύθυνση τα αρνητικά Z και σημείο τέλους στην ίδια συντεταγμένη Z με το άκρο του προφίλ του Naca duct (Εικόνα 71).

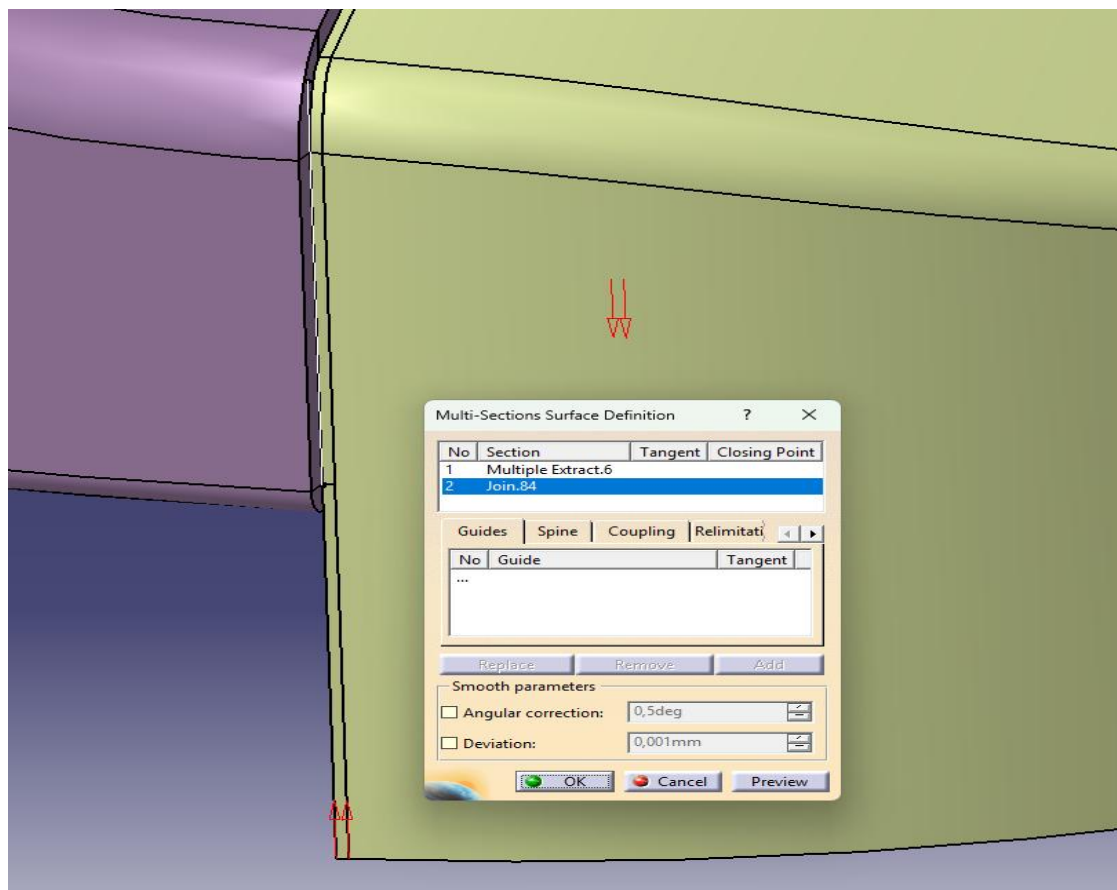


Εικόνα 70 Εντολή Multiple Extract για εξαγωγή προφίλ. α) Προφίλ εξόδου Naca β) προφίλ εισόδου S-duct

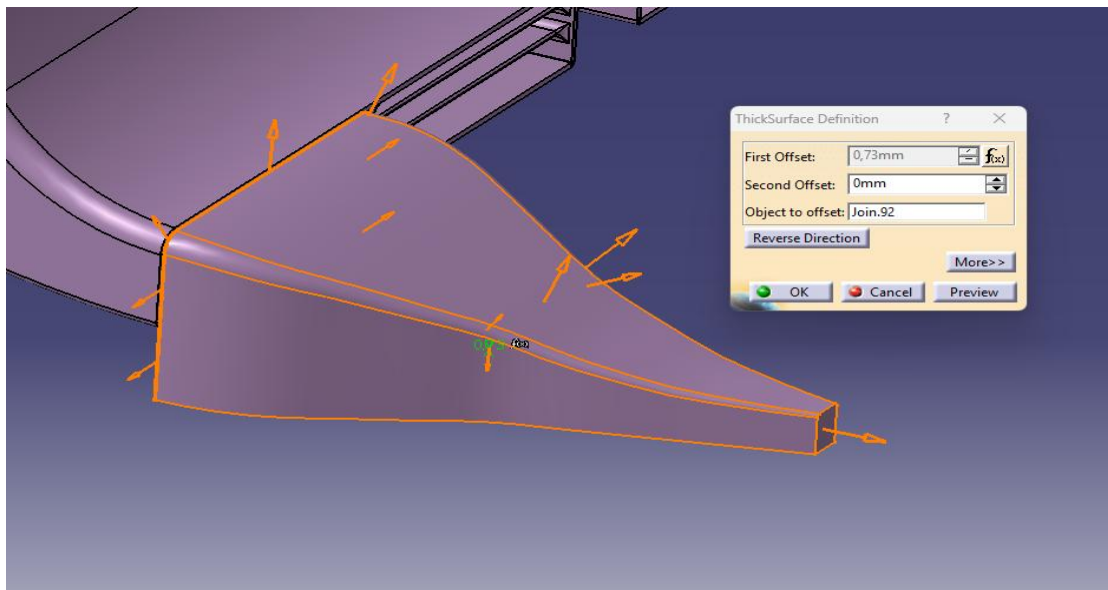
Έπειτα τα δύο προφίλ ενώθηκαν δημιουργώντας επιφάνεια που αποτελεί τη φλάντζα σύνδεσης. Η δημιουργία έγινε με την εντολή "Multi sections surface" επιλέγοντας τα προφίλ που δημιουργήθηκαν παραπάνω (Εικόνα 72). Στη συνέχεια μέσω της εντολής "Join" ενοποιήθηκαν οι επιφάνειες δημιουργώντας το τελικό μοντέλο επιφάνειας Naca duct, στο οποίο αποδόθηκε πάχος προς την εξωτερική φορά κάθε διανύσματος επιφανείας μέσω της εντολής "Thickness surface" και ίσο με το ήμισυ της μεταβλητής "airways_thickness" διότι θα πρέπει να υφίσταται με το Naca duct του διπλανού καναλιού (Εικόνα 73).



Εικόνα 71 Ευθύγραμμα τμήματα για ολοκλήρωση προφίλ εισόδου S-duct

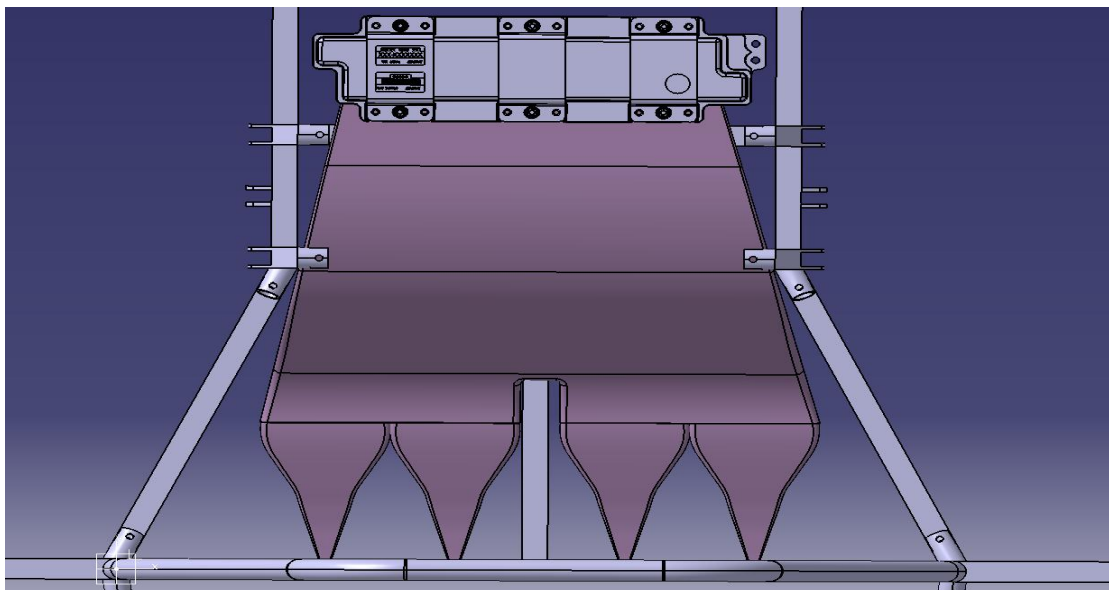


Εικόνα 72 Φλάντζα σύνδεσης S-duct - Naca-duct



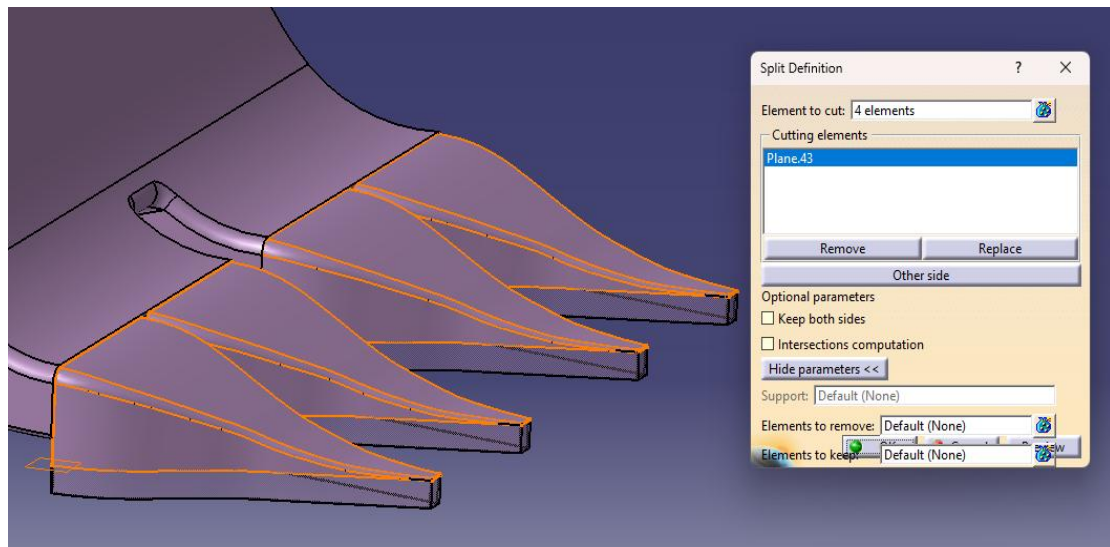
Εικόνα 73 Απόδοση πάχους

Για να ολοκληρωθεί και η εισαγωγή αεραγωγών Naca duct και στα υπόλοιπα κανάλια μέσω της εντολή "Translate" αντιγράφηκε το ήδη υπάρχον Naca duct με σημεία αναφοράς τα αντίστοιχα σημεία που βρίσκονται στο μέσο κάθε ακμής και σε απόσταση 0.5mm από την είσοδο του S-duct, αποδίδοντας το συνολικό σύστημα αεραγωγών της Εικόνας 74.



Εικόνα 74 Σύστημα αεραγωγών

Τέλος χρειάστηκε να αποκοπεί το τμήμα από το που εξωθήθηκε προηγουμένως κατά την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου επιφανείας, κατά 10 mm προς τα αρνητικά Z , ώστε το πραγματικό μοντέλο προς κατασκευή να εφάπτεται επί του δαπέδου του αυτοκινήτου. Η αποκοπή έγινε με τη χρήση επιπέδου που ορίστηκε από τρία σημεία, από το σύνολο των σημείων που εισήχθησαν για τη δημιουργία της κάτοψης του αεραγωγού (Εικόνα 75).



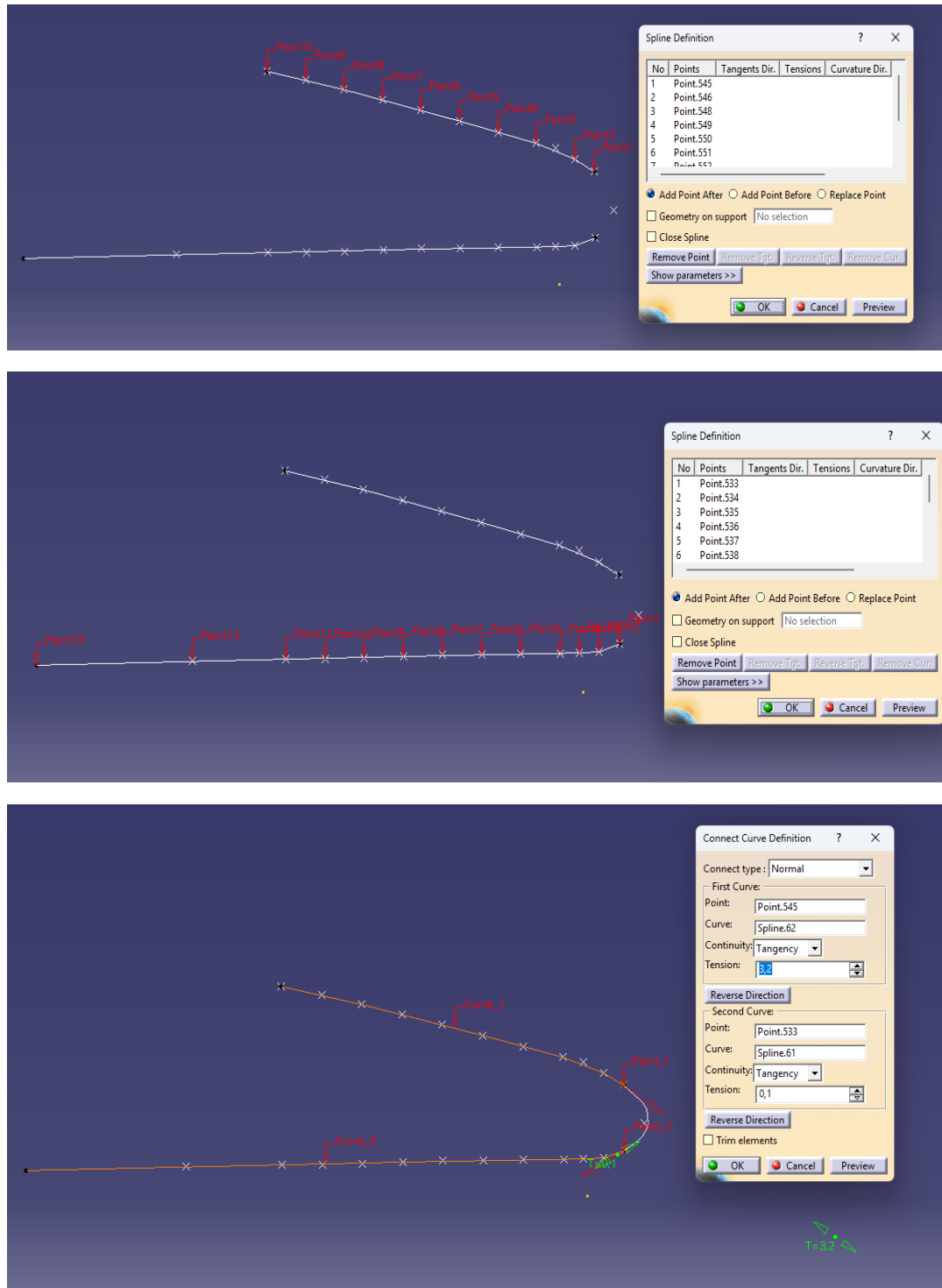
Εικόνα 75 Αποκοπή τμήματος που εξωθήθηκε κατά τα αρνητικά Z

Σειρά έχει η δημιουργία του χείλους πρόσπτωσης. Το νέο χείλος έχει πιο επιθετικό σχήμα καθώς βρίσκεται σε κλίση 15°. Οι συντεταγμένες του πάρθηκαν από την επιστημονική αναφορά (W.Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945) . Στον Πίνακα 2 αναφέρεται ότι έχει ύψος 10.87 mm. Αρχικά εισήχθησαν οι συντεταγμένες (Εικόνα 76) σύμφωνα με τα αρχικά σημεία και στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι καμπύλες εντός του περιβάλλοντος Catia.

Origin Point			
	0	0	0.000
StartLoft			x,y,z_Transformation
StartCurve			
0.00	0	2.45210526	
0.00	1.25555556	4.72030263	
0.00	2.51111111	5.48658553	
0.00	3.76666667	6.09961184	
0.00	5.02222222	6.406125	
0.00	7.53333333	7.07023684	
0.00	10.0444444	7.73434868	
0.00	12.5555556	8.36780921	
0.00	15.0666667	8.98083553	
0.00	17.5777778	9.60407895	
0.00	20.0888889	10.2375395	
0.00	22.6	10.871	
EndCurve			
EndLoft			
StartLoft			
StartCurve			
0	0	2.45	
0	1.25555556	0.89	
0	2.51111111	0.38	
0	3.76666667	0.12	
0	5.02222222	0.00	
0	7.53333333	0.00	
0	10.0444444	0	
0	12.5555556	0	
0	15.0666667	0	
0	17.5777778	0	
0	20.0888889	0	
0	22.6	0	
EndCurve			
EndLoft			
End			

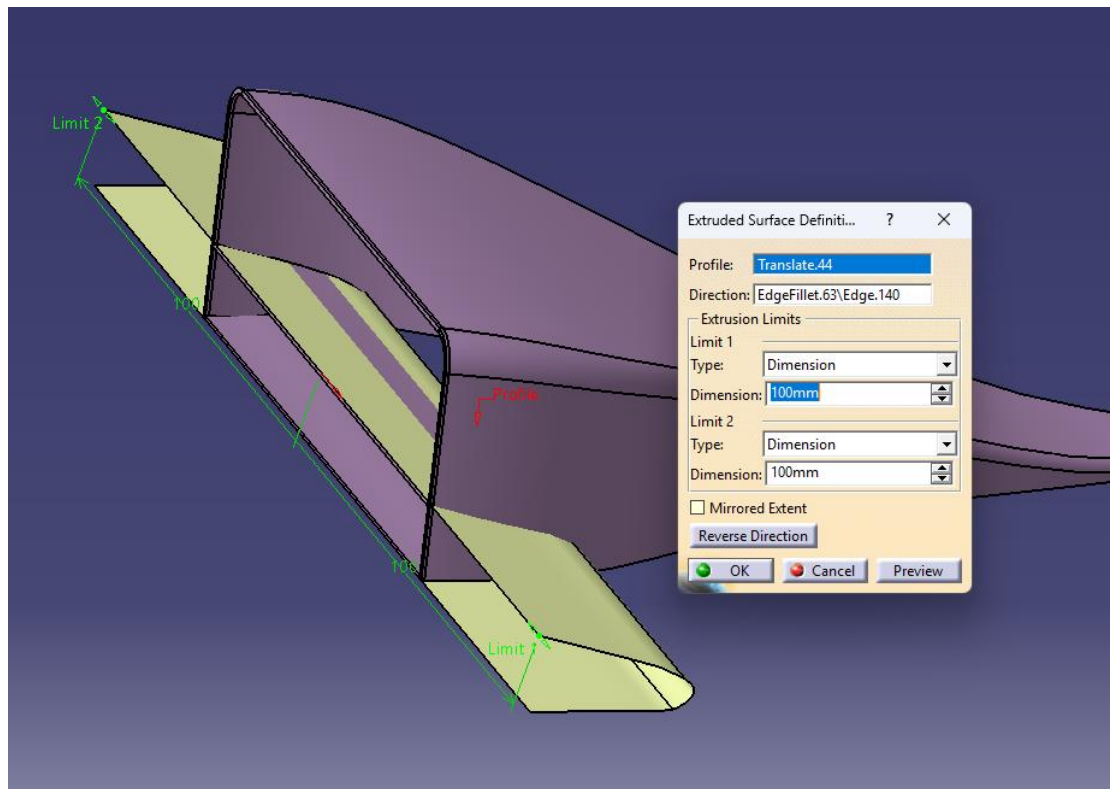
Εικόνα 76 Συντεταγμένες χείλους προσβολής

Για την καμπύλη που συνθέτουν τα επάνω σημεία δημιουργήθηκε “spline” έως και το σημείο πριν την κορυφή. Αντίστοιχα δημιουργήθηκε για τα κάτω σημεία. Έπειτα με την εντολή “Connect curve” ενώθηκαν οι δύο “Splines” ώστε να προκύψει καμπυλωμένη κορυφή. Η καμπύλη ένωσης υπόκειται στους περιορισμούς δευτέρου βαθμού συνέχειας ως προς τις άλλες δύο (tangency) στα σημεία σύνδεσής τους, ενώ η ένταση της σύνδεσης ορίζεται ως 3.2 για την επάνω καμπύλη ενώ 0.1 για την κάτω (Εικόνα 77).

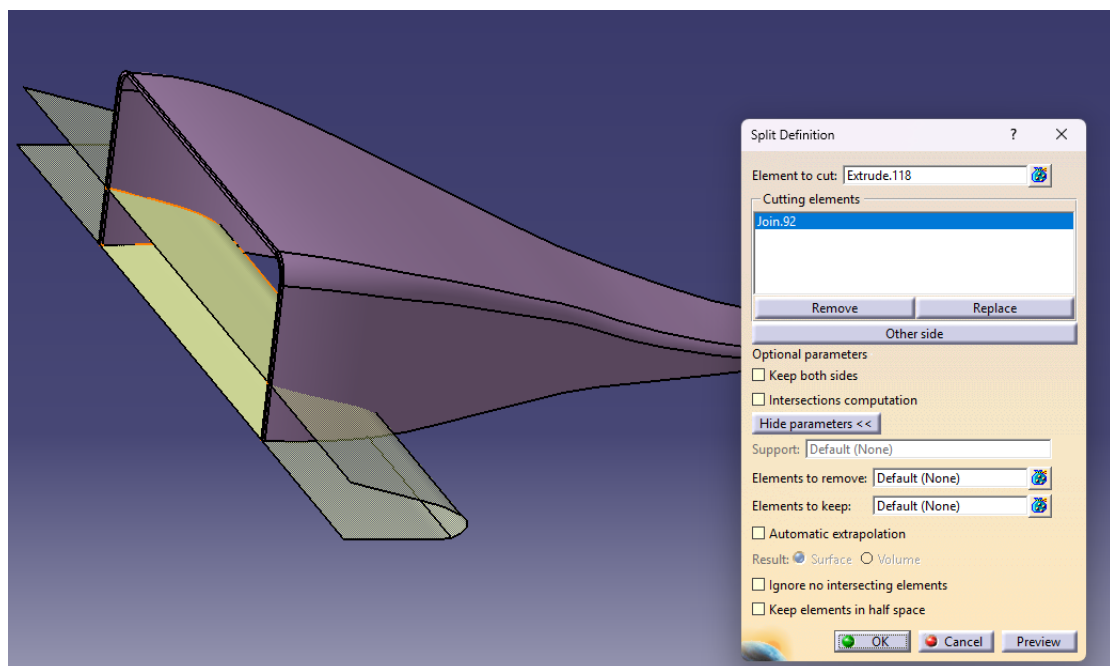


Εικόνα 77 Γεωμετρία χείλους πρόσπτωσης

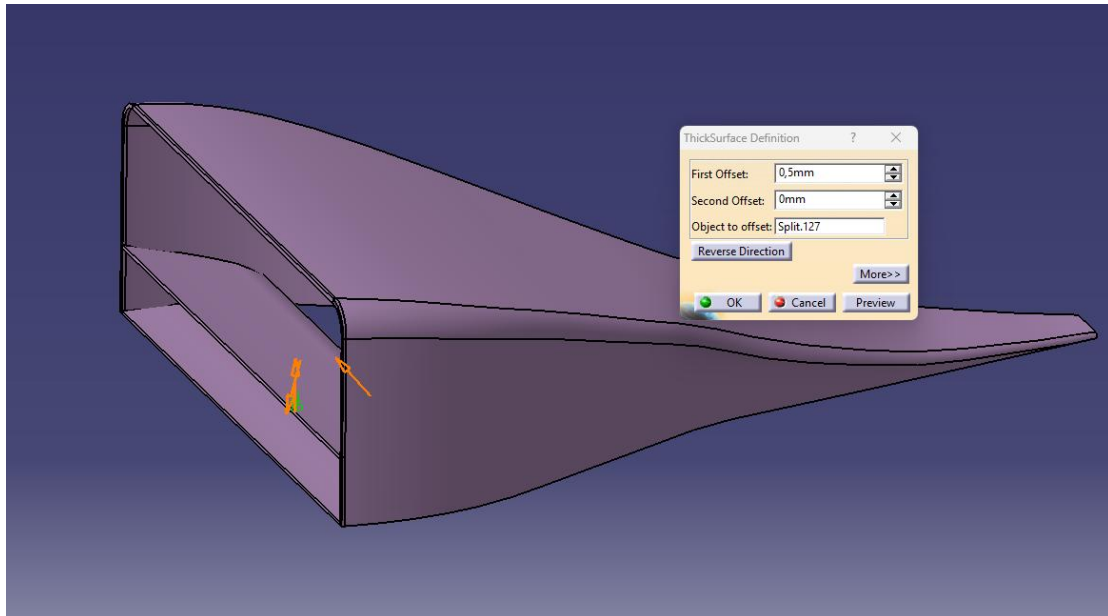
Αντίστοιχα με προηγούμενως, μέσω της εντολής “Translate” μεταφέρεται στο αντίστοιχο σημείο από όπου ξεκινάει ο αεραγωγός Naca. Στη συνέχεια εξωθείται το προφίλ (Εικόνα 78) δημιουργώντας επιφάνεια η οποία με χρήση της εντολής “Split” θα αποκοπεί από το αντικείμενο επιφάνειας του Naca duct και θα παραμείνει μόνο αυτή εντός της γεωμετρίας του εμφωλευμένου αεραγωγού (Εικόνα 79), η οποία μέσω της εντολής “Thick Surface” θα εξωθηθεί (Εικόνα 80) ώστε να προκύψει το τελικό μοντέλο Naca (Εικόνα 81).



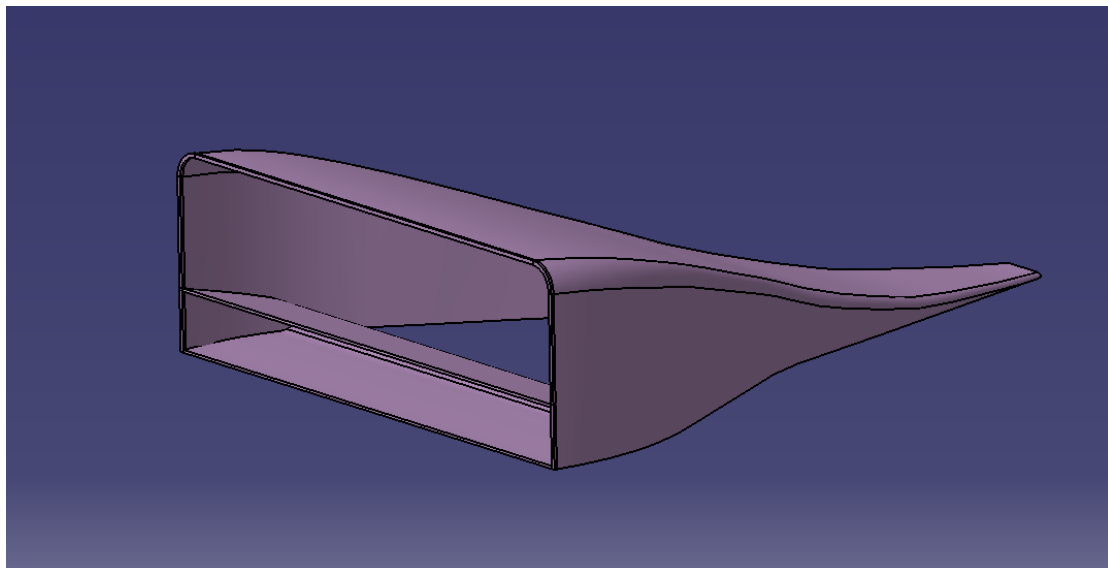
Εικόνα 78 Εξώθηση προφίλ χείλους προς την τρίτη διάσταση



Εικόνα 79 Αποκοπή και παραμονή της γεωμετρίας που ορίζεται από τα τοιχώματα του Naca duct



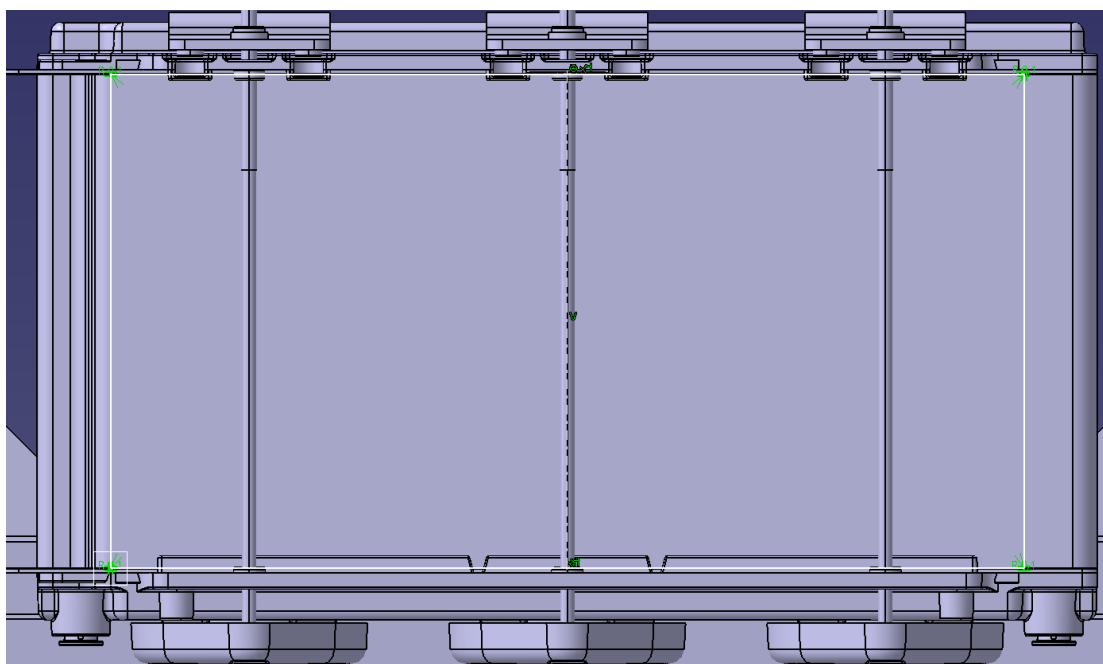
Εικόνα 80 Εντολής "Thick Surface" για απόδοση πάχους στο χείλος



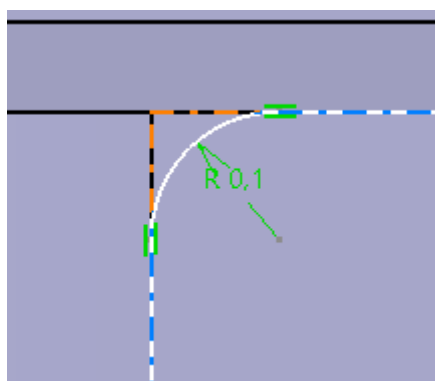
Εικόνα 81 Τελικό μοντέλο Naca duct

4.1.3 Σχεδιασμός διαχύτη (Diffuser)

Μεταξύ του ανεμιστήρα και της κυψέλης απαιτείται η δημιουργία διαχύτη, ο οποίος θα αναλαμβάνει να απάγει τον αέρα ο οποίος εισέρχεται στην κυψέλη από τον S-duct. Απαιτεί κρίσιμη κατασκευή με ιδιαίτερη προσοχή στην σχεδίαση του καθώς θα πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα κανάλια της κυψέλης όπου πραγματοποιούνται οι φυσικοχημικές διαδικασίες καθώς και να έχει ομοιόμορφη δομή με ομαλές καμπύλες ώστε να ελαχιστοποιείται η τύρβη και να προκαλεί ομοιόμορφη διαφορά πίεσης με την πλευρά εισόδου, γεγονός που θα διατηρεί τις απώλειες πίεσης σε χαμηλά επίπεδα. Επομένως για την κατασκευή του αρχικά θα δημιουργηθεί "Sketch" επί της επιφάνειας εξόδου της κυψέλης (Εικόνα 82). Δημιουργούνται ευθύγραμμα τμήματα αντίστοιχα της εισόδου του S-duct τα οποία περικλείουν την γεωμετρία της κυψέλης όπου περιέχονται τα κανάλια εισόδου. Στις γωνίες του ορθογωνίου, δημιουργούνται "corners" με ακτίνα 0.1mm (Εικόνα 83), γεγονός που θα γίνει κατανοητό στη συνέχεια.



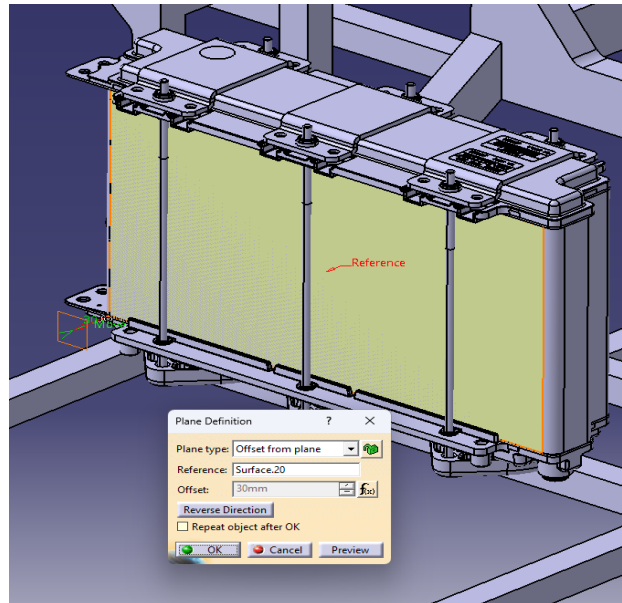
Εικόνα 82 Περίγραμμα γεωμετρίας καναλιών



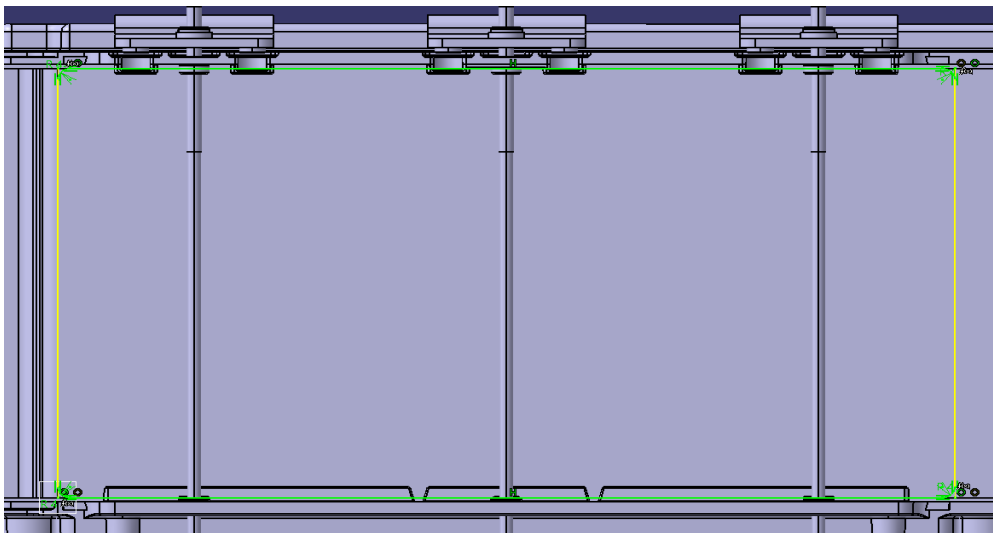
Εικόνα 83 "corner" ακτίνας 0.1mm στις γωνίες

Ύστερα, ορίζεται επίπεδο παράλληλο με την επιφάνεια εξόδου της κυψέλης και σε απόσταση η οποία ορίζεται παραμετρικά μέσω της μεταβλητής “ flange_length_of_outlet” , γεγονός που θα επιτρέπει στον σχεδιαστή να μεταβάλλει όπως και στη περίπτωση του S-duct τη φλάντζα που θα συνδέει τον διαχύτη με την κυψέλη (Εικόνα 84).

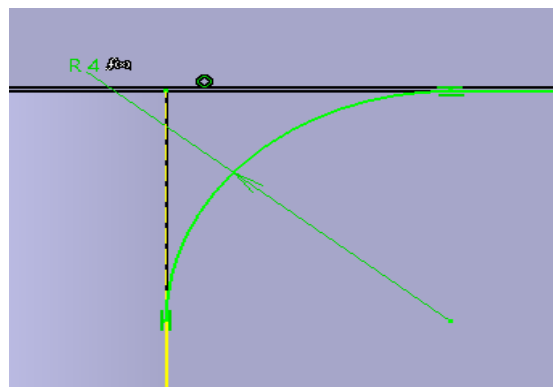
Επί του παραπάνω επιπέδου σχεδιάζεται και πάλι η γεωμετρία που περιέχει τα κανάλια της κυψέλης καυσίμου, με την ίδια διαδικασία όπως και παραπάνω (Εικόνα 85). Επί των γωνιών εφαρμόζονται και πάλι “corners” τα οποία παραμετροποιούνται με βάση την ακτίνα τους από την μεταβλητή “ fillet_radius_airways” (Εικόνα 86) .



Εικόνα 84 Ορισμός επιπέδου για δημιουργία φλάντζας

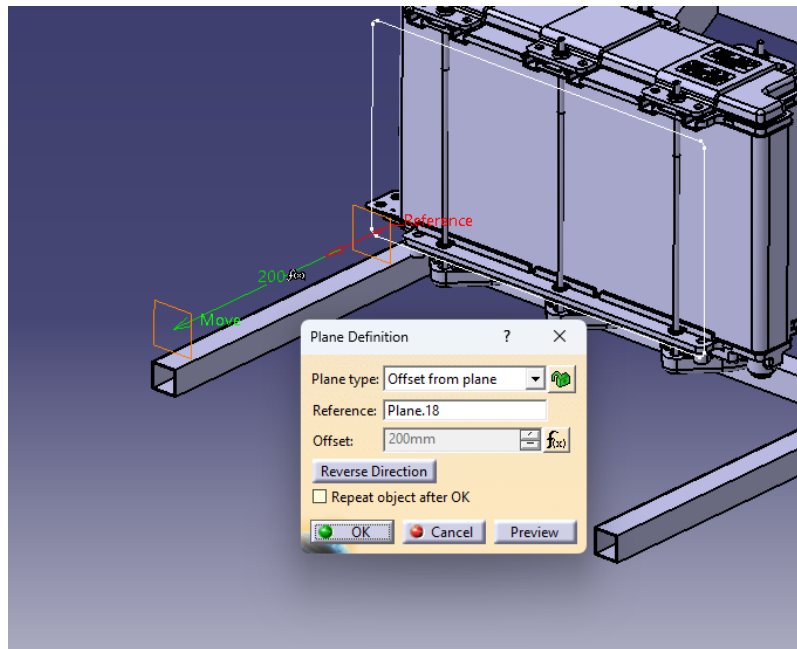


Εικόνα 85 Σχεδιασμός γεωμετρίας καναλιών στο νέο επίπεδο



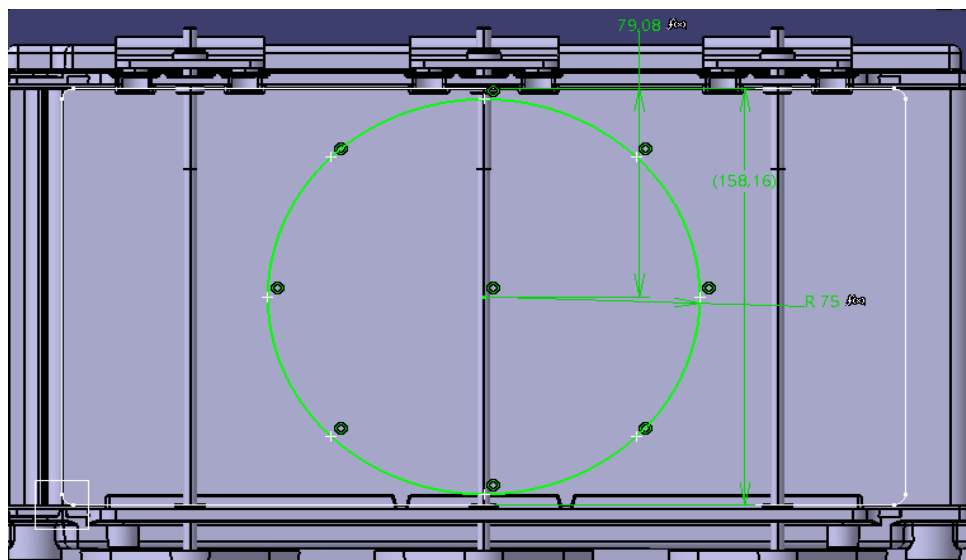
Εικόνα 86 "corner" της γεωμετρίας του επιπέδου φλάντζας

Στη συνέχεια ορίζεται και πάλι νέο επίπεδο (Εικόνα 87) το οποίο ουσιαστικά θα αντικατοπτρίζει την έξοδο του “diffuser” και την είσοδο του ανεμιστήρα. Ορίζεται με βάση το προηγούμενο επίπεδο ώστε η παραμετρική σχεδίαση του πρώτου να διατηρεί τη γεωμετρία του “diffuser” και να απομονώνει τη φλάντζα εξαγωγής σε περίπτωση μεταβολής της.



Εικόνα 87 Επίπεδο εξόδου diffuser

Επί του τελευταίου επιπέδου ορίζεται η γεωμετρία του ανεμιστήρα. Σχεδιάζεται κύκλος με ακτίνα παραμετρικά ορισμένη μέσω της μεταβλητής “fan_radius” η οποία προφανώς αποκτά την ακτίνα του ανεμιστήρα που θα εγκατασταθεί. Έπειτα το κέντρο του ορίζεται με πρώτο βαθμό συνέχειας ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας της γεωμετρίας των καναλιών. Το ύψος στο οποίο επιθυμείται η εγκατάσταση του ανεμιστήρα ορίζεται παραμετρικά μέσω της μεταβλητής “hight_fan”, αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίστηκε ως το ήμισυ του μήκους του κατακόρυφου άξονα συμμετρίας. Τέλος, ορίζονται οχτώ σημεία επί του κύκλου με πρώτο βαθμό συνέχειας επί αυτού, ανά 45° (Εικόνα 88).

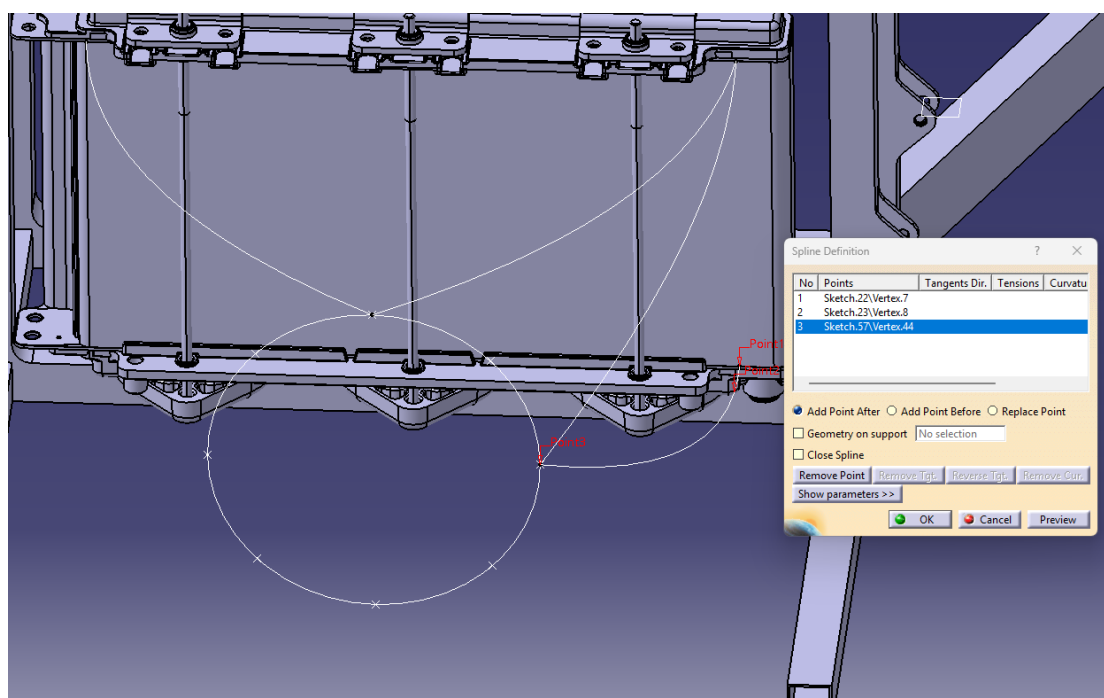


Εικόνα 88 Δισδιάστατη γεωμετρία ανεμιστήρα

Εφόσον έχουν ολοκληρωθεί τα προφίλ της επιθυμητής γεωμετρίας σειρά παίρνουν οι οδηγοί τους. Δημιουργούνται “Splines” κάθε μία από τις οποίες περιέχει τρία σημεία ελέγχου. Θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα των σημείων και οι υπόλοιπες ακολουθούν την αντίστοιχη επαγωγική σκέψη.

1. Πάνω δεξιά σημείο της Εικόνας 82
2. Πάνω δεξιά σημείο της Εικόνας 85
3. Σημείο επί του πάνω άκρου του κατακόρυφου άξονα συμμετρίας από όπου διέρχεται το κέντρο του ανεμιστήρα

Εικόνα 89 Δισδιάστατη γεωμετρία ανεμιστήρα

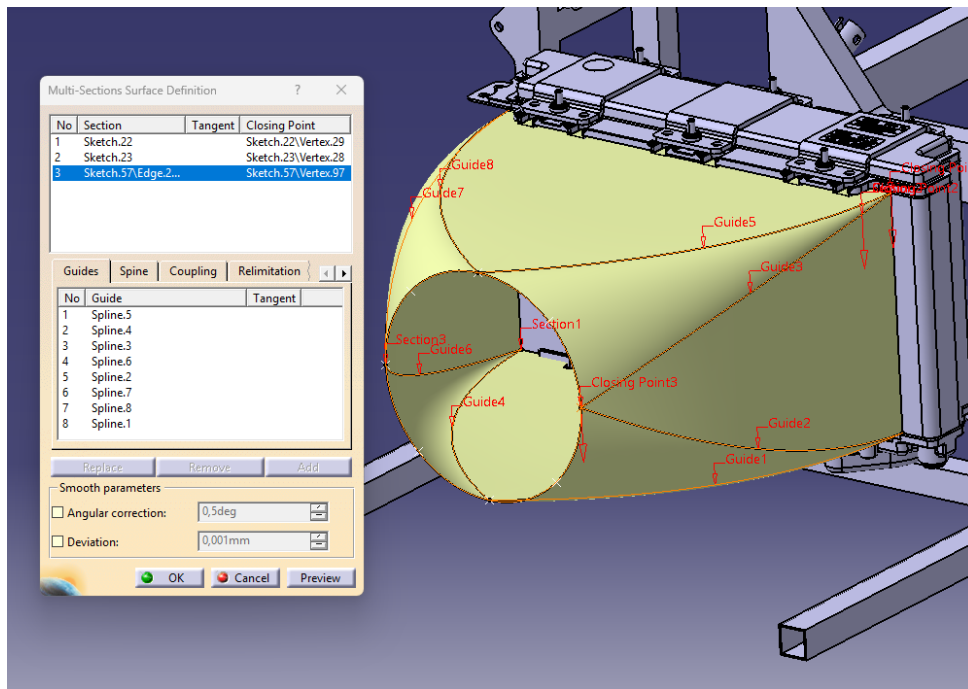


Εικόνα 90 Σχεδίαση οδηγών "splines"

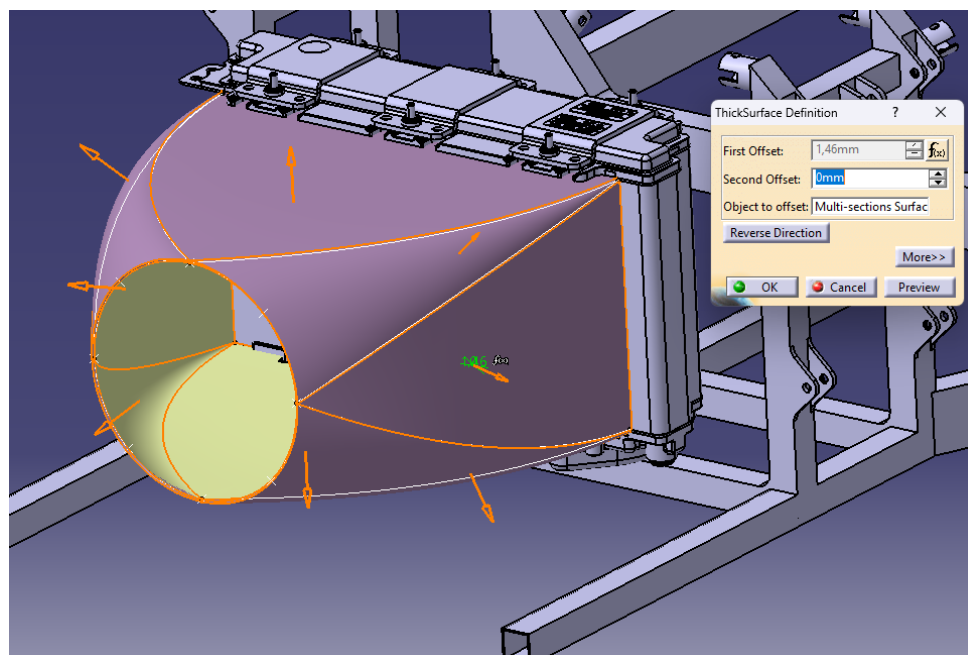
Η διαδικασία είναι έτοιμη να προχωρήσει στη κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου επιφανείας του διαχύτη. Μέσω της εντολής “Multi-Section Surface”, επιλέγονται τα τρία προφίλ όπου περιέχουν κατά σειρά (Εικόνα 91):

1. Προφίλ γεωμετρίας καναλιών κυψέλης, με διαμόρφωση “corner” στις γωνίες ακτίνας 0,1mm
2. Προφίλ γεωμετρίας καναλιών κυψέλης, με διαμόρφωση “corner” στις γωνίες ακτίνας 4mm
3. Προφίλ γεωμετρίας ανεμιστήρα

Έπειτα επιλέγονται ως οδηγοί των επιφανειών οι “splines” καθώς και τα σημεία όπου κλείνει το τρισδιάστατο μοντέλο επιφανείας. Επίσης τα διανύσματά τους ορίζονται ως παράλληλα και ως προς την ίδια φορά. Έπειτα προσδίδουμε πάχος ίσο με την μεταβλητή που δέπει το πάχος όλων των μερών “Airways_thickness” (Εικόνα 92).

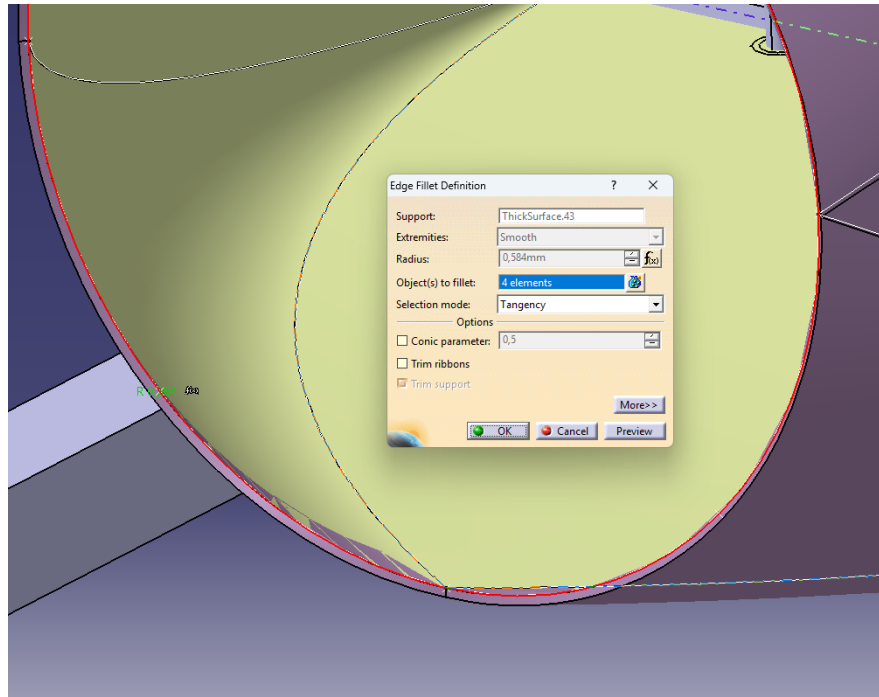


Εικόνα 91 Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου επιφανείας διαχύτη.



Εικόνα 92 Απόδοση πάχους

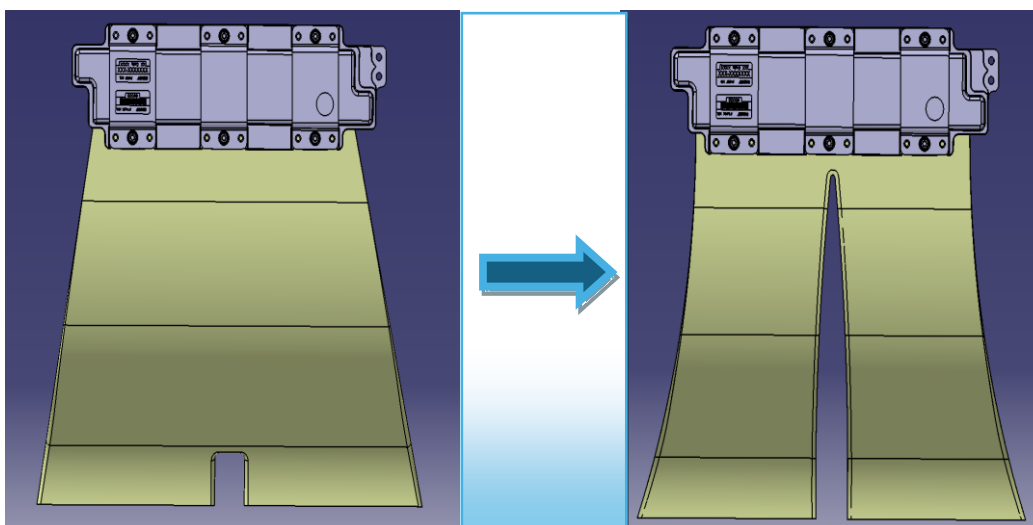
Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία, στην διατομή της εξόδου του διαχύτη στην εσωτερική κυκλική ακμή δημιουργείται φιλέτο ώστε να αποφευχθούν απότομες γωνίες που δημιουργούν απώλειες πίεσης, με παραμετρικό ορισμό της ακτίνας αυτών μέσω της μεταβλητής “*fillet_inlet_fins_faces*” (Εικόνα 93).



Εικόνα 93 Δημιουργία φιλέτου στην εσωτερική ακμή.

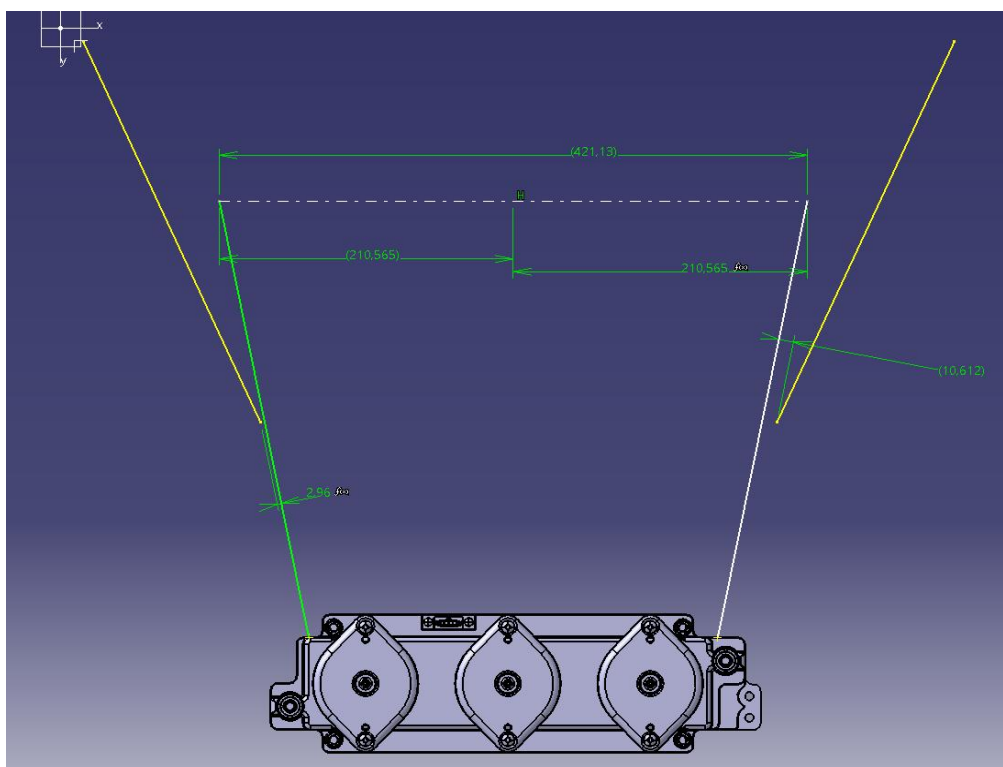
4.1.4 Σχεδιασμός μοντέλου εισαγωγής Naca-S_duct_2

Όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 2, σχεδιάστηκε και δεύτερο σύστημα αεραγωγών. Οι αλλαγές που έγιναν αφορούν τα πλάγια τοιχώματα του αεραγωγού S-duct τα οποία στο παραπάνω σχεδιάστηκαν επίπεδα παραμετρικά οριζόμενα με αμβλεία γωνία μεταξύ τους όπου αποτελούσαν τα όρια των οριζόντιων επιφανειών. Επιπρόσθετα, το προφίλ μέσω του οποίου έγινε αποκοπή του τμήματος του αεραγωγού που έτεμνε τη δοκό του αυτοκινήτου ήταν τετραγωνικής διατομής. Στο μοντέλο Naca-S_duct_2 έγινε προσπάθεια αλλαγής των επίπεδων τοιχωμάτων προκειμένου να αντικατασταθούν από καμπύλες επιφάνειες δημιουργώντας λιγότερες ή και καθόλου γωνίες με στόχο την ομαλότερη ροή.



Εικόνα 94 Κάτοψη αεραγωγών

Ξεκινώντας τη σχεδίαση κρίθηκε σκόπιμο να αλλαχθεί ο τρόπος προσέγγισης των φυσικών ορίων του αυτοκινήτου όπως έγινε προηγουμένως, με στόχο να οι άξονες συμμετρίας της τομής που θα δημιουργηθεί λόγω της δοκού και της κυψέλης να ταυτίζονται. Επομένως, η απόσταση του ευθύγραμμου τμήματος στα αριστερά του “Sketch” απέχει κατά τα γνωστά παραμετροποιημένη απόσταση, ενώ η αντίστοιχη από τα δεξιά παραμένει ως απόσταση αναφοράς. Επίσης οι αποστάσεις των άκρων από το συμμετρικό επίπεδο της, ορίζονται να είναι όπως στο σχέδιο Naca-Duct_S_1, με σκοπό να διατηρηθεί η γεωμετρία του Naca.

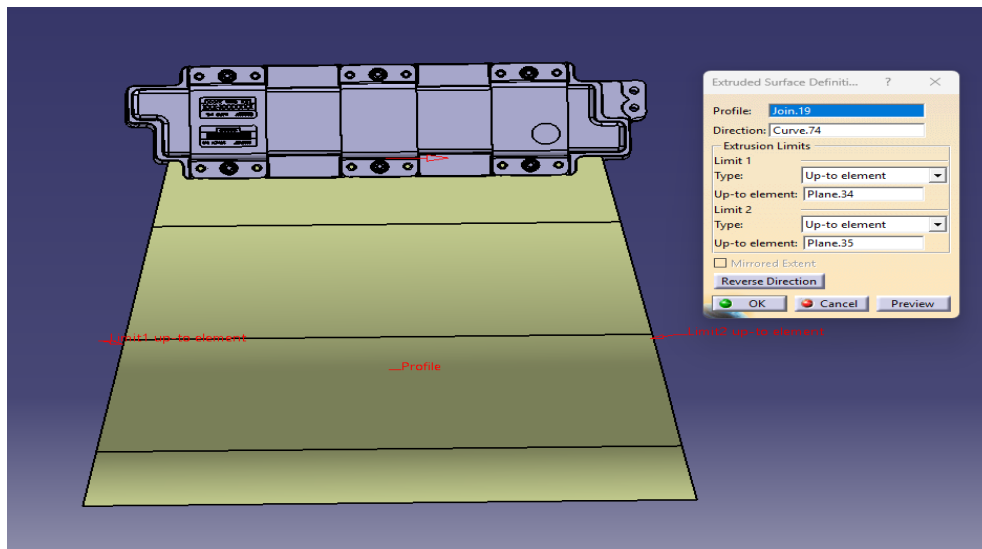


Εικόνα 95 Φυσικά όρια και διαστασιολόγηση

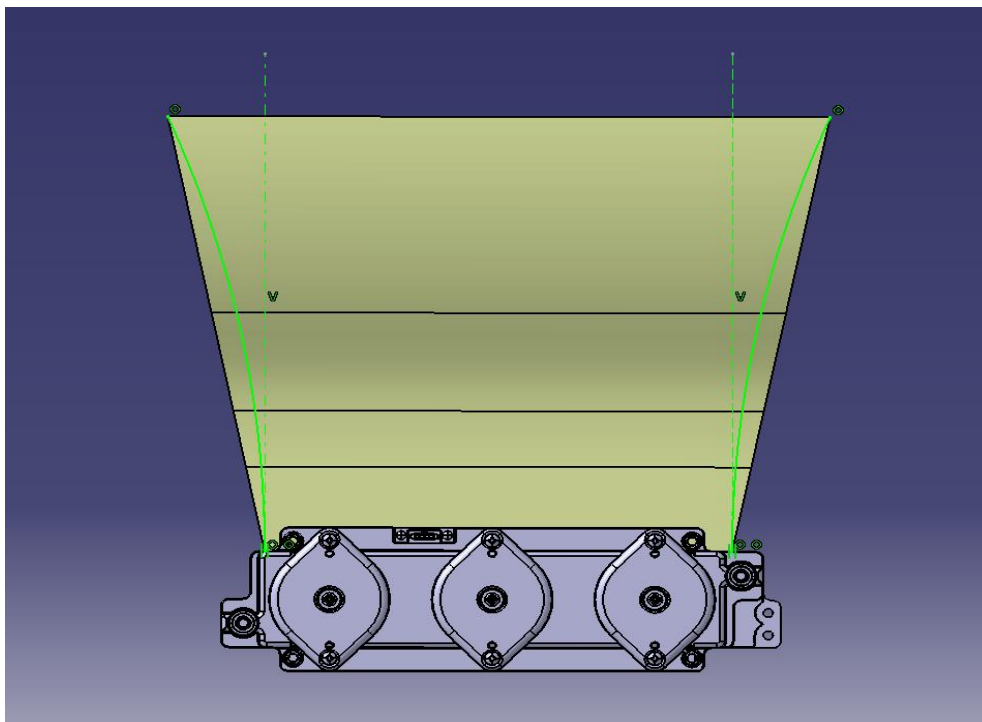
Όπως και στο πρώτο μοντέλο έγινε εξώθηση των εξωτερικών καμπυλών του αεραγωγού με όρια τα επίπεδα που ορίστηκαν αντίστοιχα από το “Sketch” της Εικόνας 96. Έπειτα στο επίπεδο X,Y ορίζεται “Scetch” το οποίο θα αποτελεί την κάτοψη των κάθετων επιφανειών του S-duct. Σχεδιάζεται κάθετο ευθύγραμμο τμήμα (διακεκομμένη ευθεία) το οποίο θα έχει πρώτο βαθμό συνέχειας (coincidence) με το σημείο τομής των δύο κάθετων μεταξύ του επιφανειών της κυψέλης. Σχεδιάζεται τόξο το οποίο θα έχει τους εξής περιορισμούς, αντίστοιχα και για το συμμετρικό τόξο της άλλης πλευράς (Εικόνα 97).

Περιορισμοί τόξου

- ✓ Το ένα σημείο με πρώτο βαθμό συνέχειας με το αντίστοιχο σημείο του παραπάνω ευθύγραμμου διακεκομμένου τμήματος.
- ✓ Περιορισμός δεύτερου βαθμού συνέχειας με το ευθύγραμμο διακεκομμένο τμήμα (tangency).
- ✓ Το άλλο σημείο με πρώτου βαθμού συνέχειας με το άκρο της οριζόντιας επιφάνειας στην περιοχή εισόδου.

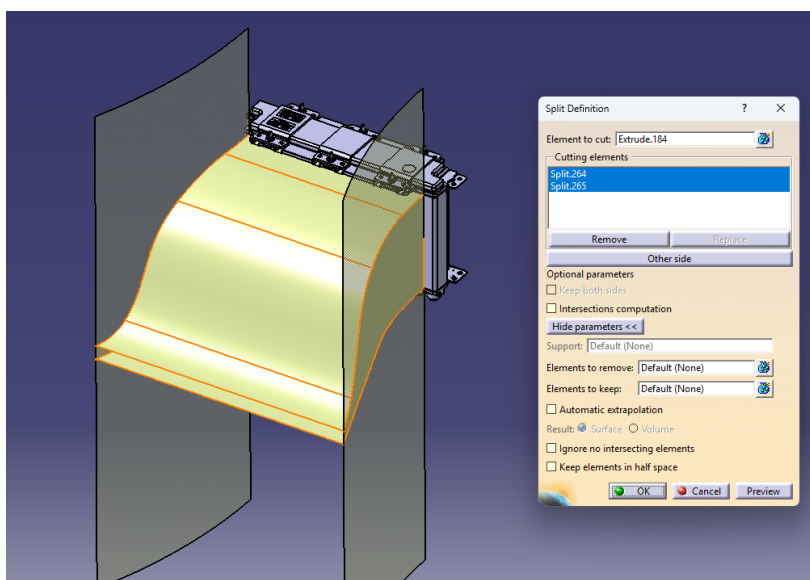
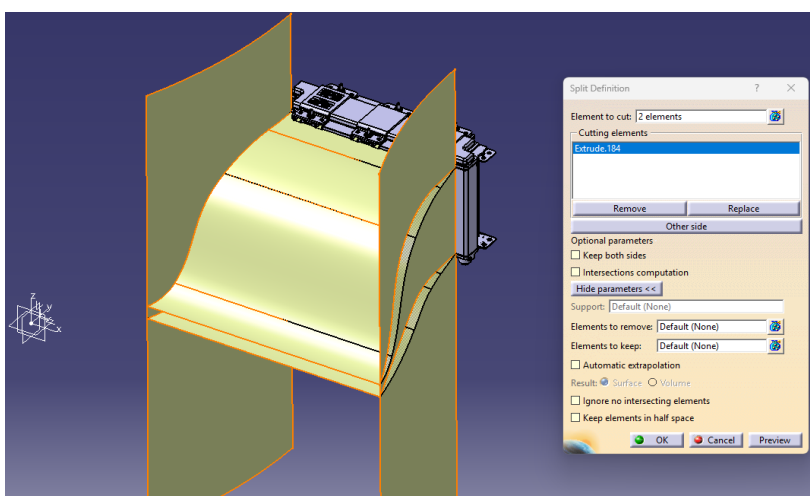
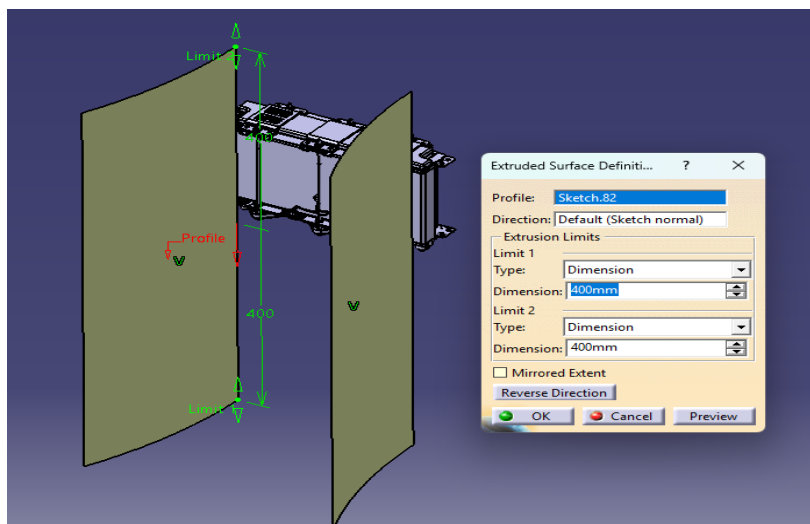


Εικόνα 96 Δημιουργία οριζόντιων επιφανειών αεραγωγού



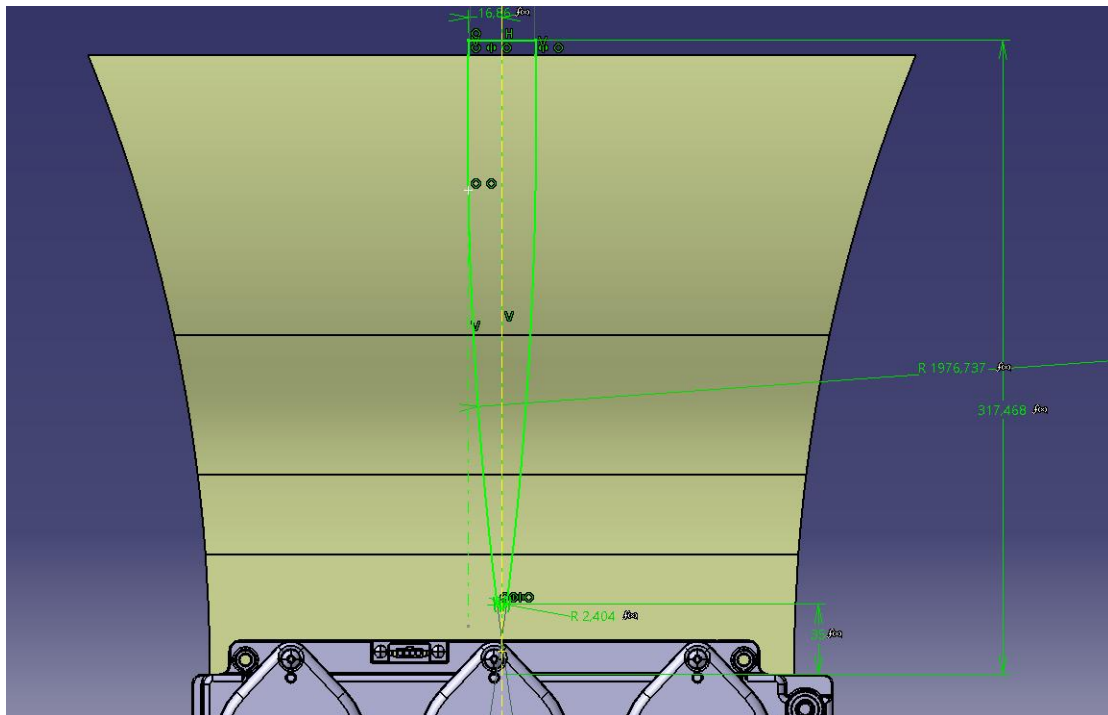
Εικόνα 97 Κάτοψη κάθετων πλευρικών επιφανειών

Στη συνέχεια τα προφίλ των κατόψεων εξωθήθηκαν ως προς την τρίτη διάσταση και προέκυψαν οι πλευρικές επιφάνειες ενώ με την εντολή “Split” έγινε αποκοπή των περιττών τμημάτων των οριζόντιων επιφανειών. Η διαδικασία συνεχίστηκε με την περικοπή και των περιττών τμημάτων κάθετων επιφανειών, ώστε τελικά να προκύψουν τέσσερις επιφάνειες που θα συνθέσουν και τον αεραγωγό S-duct μέσω της εντολής “Join” που θα επιτρέψει την ενοποίησή τους (Εικόνα 98).



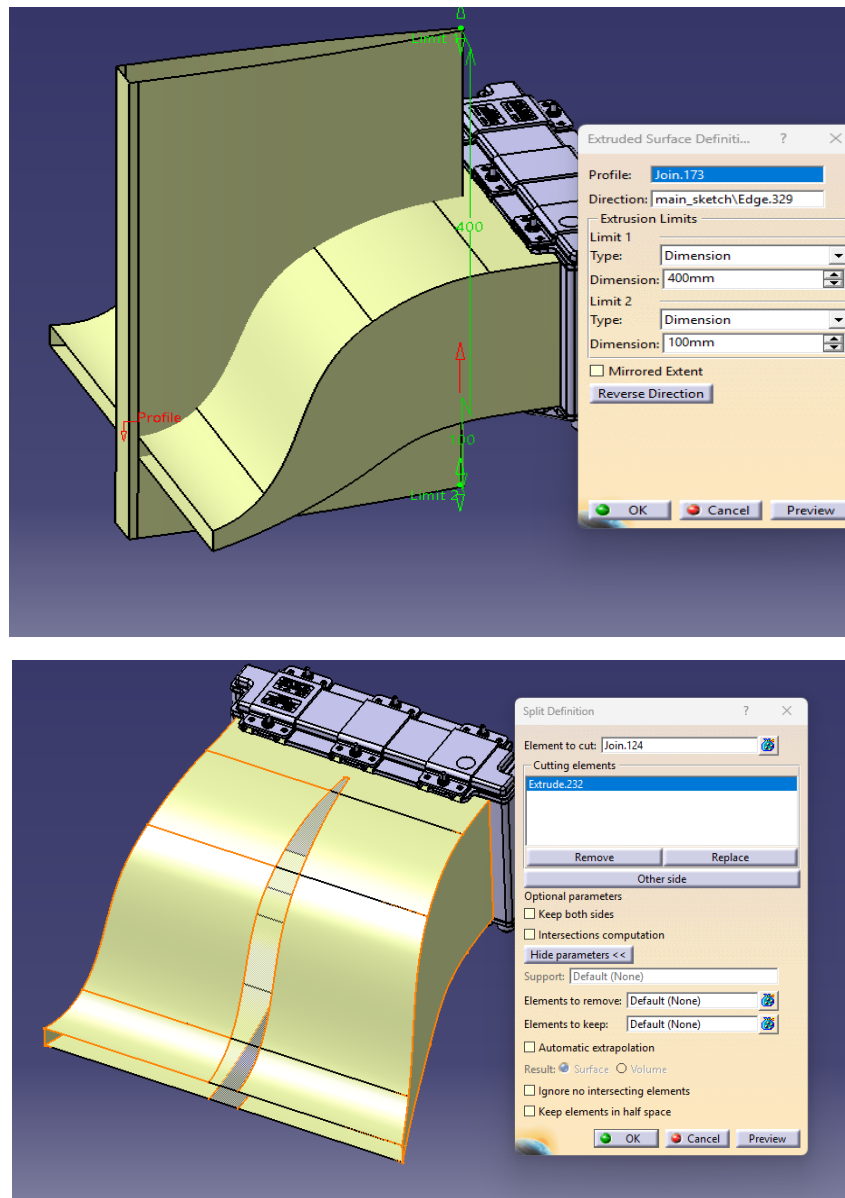
Εικόνα 98 α) Εξώθηση κάθετων επιφανειών, β), γ) Εντολή "split" για αποκοπή περιττών τμημάτων

Η επόμενη μετατροπή αφορά την αποκοπή του προφίλ της δοκού. Στόχος είναι να αφαιρεθούν οι επίπεδες επιφάνειες και να δημιουργηθεί ένα προφίλ σε σχήμα αεροτομής, που θα προσδίδει ομαλότερη κατανομή πίεσης με στόχο την ομαλότερη ροή του εισερχόμενου αέρα. Επομένως στο επίπεδο X,Y, ορίστηκε “Sketch” στο οποίο έχει προβολή της κάθετης ευθείας προς το επίπεδο, που ορίζει τη φλάντζα εισαγωγής (κίτρινο σημείο). Επίσης έγινε προβολή του άξονα συμμετρίας, όπου είναι παράλληλος στο επίπεδο τους “Sketch” και κάθετος στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης (κίτρινη διακεκομμένη). Συνεχίζοντας, κρατήθηκε το παράλληλο ευθύγραμμο τμήμα του αρχικού προφίλ και ορίστηκε η απόστασή του ενός άκρου του από τον άξονα συμμετρίας παραμετρικά με χρήση της μεταβλητής “airfoil_width” καθώς και απόσταση από την επιφάνεια της κυψέλης μέσω της μεταβλητής “airfoil_end”. Σχεδιάστηκε τόξο επί της ανάντι πλευράς, δηλαδή προς της εισαγωγή της κυψέλης, με δύο παραμέτρους. Η πρώτη αφορά την ακτίνα του μέσω της “arc_cutter” ενώ η δεύτερη της απόστασής του κέντρου του από την κάθετη επιφάνεια της κυψέλης μέσω της “Edge_distance”. Στα ελεύθερα άκρα των παραπάνω ορίστηκε να διέρχεται τόξο του οποίου τα άκρα περνούν από το ελεύθερο άκρου του ευθύγραμμου τμήματος και του τόξου της κορυφής. Η ακτίνα του ελέγχεται μέσω της μεταβλητής “arc_cutter” ενώ υπόκειται στην περιορισμό του δευτέρου βαθμού συνέχειας (tangency) με το άκρο του τόξου. Το υπόλοιπο προφίλ προκύπτει συμμετρικά (Εικόνα 99).



Εικόνα 99 "Sketch" προφίλ αποκοπής δοκού

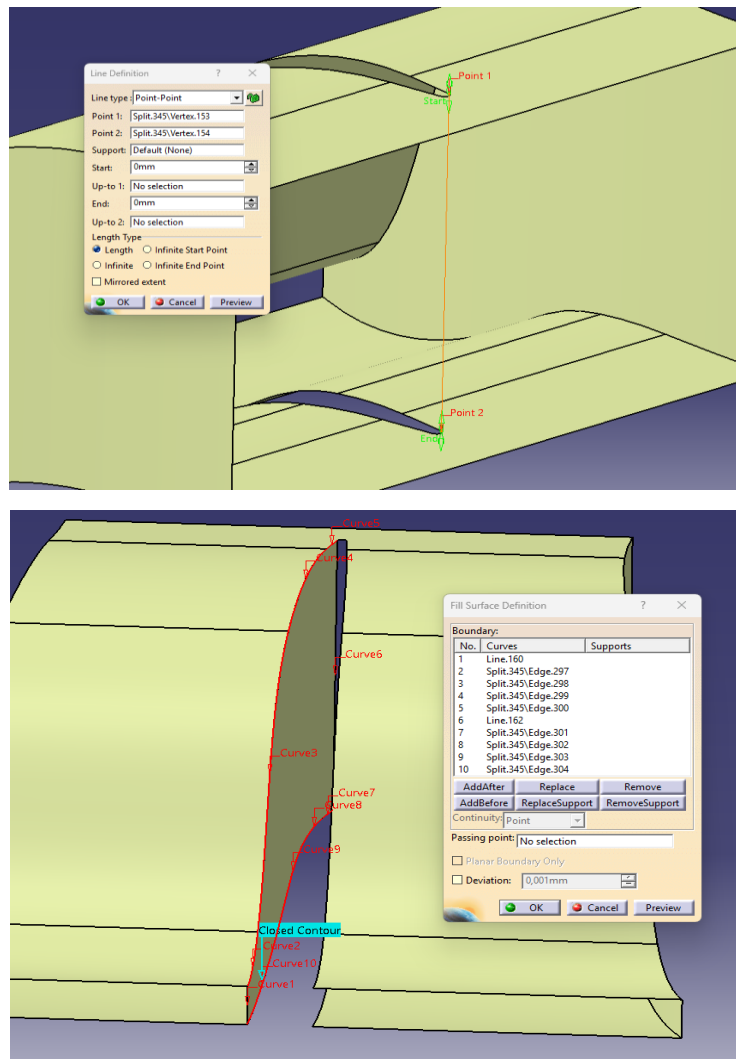
Εφόσον δημιουργήθηκε η κάτοψη, με την εντολή “Extruded surface” θα εξωθηθεί με σκοπό τη μετέπειτα αποκοπή των επιφανειών από το μοντέλου επιφανείας του αεραγωγού (Εικόνα 100). Στη συνέχεια μέσω της εντολής “Split” αποκόπτεται το περιττό τμήμα επιφανειών και προκύπτει η διαμόρφωση στον αεραγωγό.



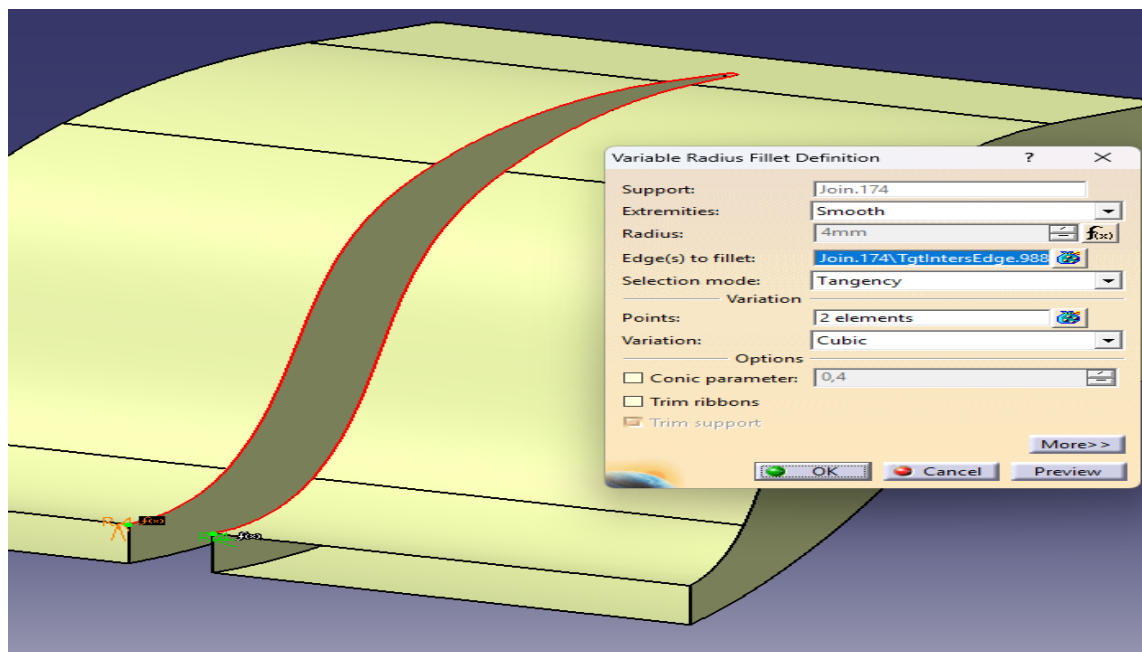
Εικόνα 100 α) Εξώθηση προφίλ β) Αποκοπή

Προχωρώντας, είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν επιφάνειες ώστε να κλείσει η γεωμετρία. Αντίστοιχα με το πρώτο μοντέλο, δημιουργούνται ευθύγραμμα τμήματα που θα αποτελέσουν βοηθητικές ακμές για την δημιουργία των επιφανειών. Σημειώνεται ότι μεταβολή των τιμών της γεωμετρίας του προφίλ, θα μετακινεί τα σημεία με αποτέλεσμα και την έμμεση παραμετροποίησή αυτών. Τέλος με την εντολή “Fill”, δημιουργούνται οι προαναφερθείσες επιφάνειες, με αποτέλεσμα και το “κλείσιμο” του αεραγωγού (Εικόνα 101). Έπειτα μέσω της εντολής “Join” ενώνονται όλες οι επιφάνειες με σκοπό τη δημιουργία ενός μεμονωμένου αεραγωγού.

Τέλος θα χρειαστεί να γίνουν φιλέτα όπως και στο αρχικό. Επομένως με την χρήση της εντολής “Variable fillet”, με παραμετροποίηση των ακτινών των φιλέτων μέσω της μεταβλητής “fillet_radius_airways” με μεταβολή κυβική και επαφή εφαπτομένη ορίζονται οι στρογγυλέψεις των ακμών (Εικόνα 102).

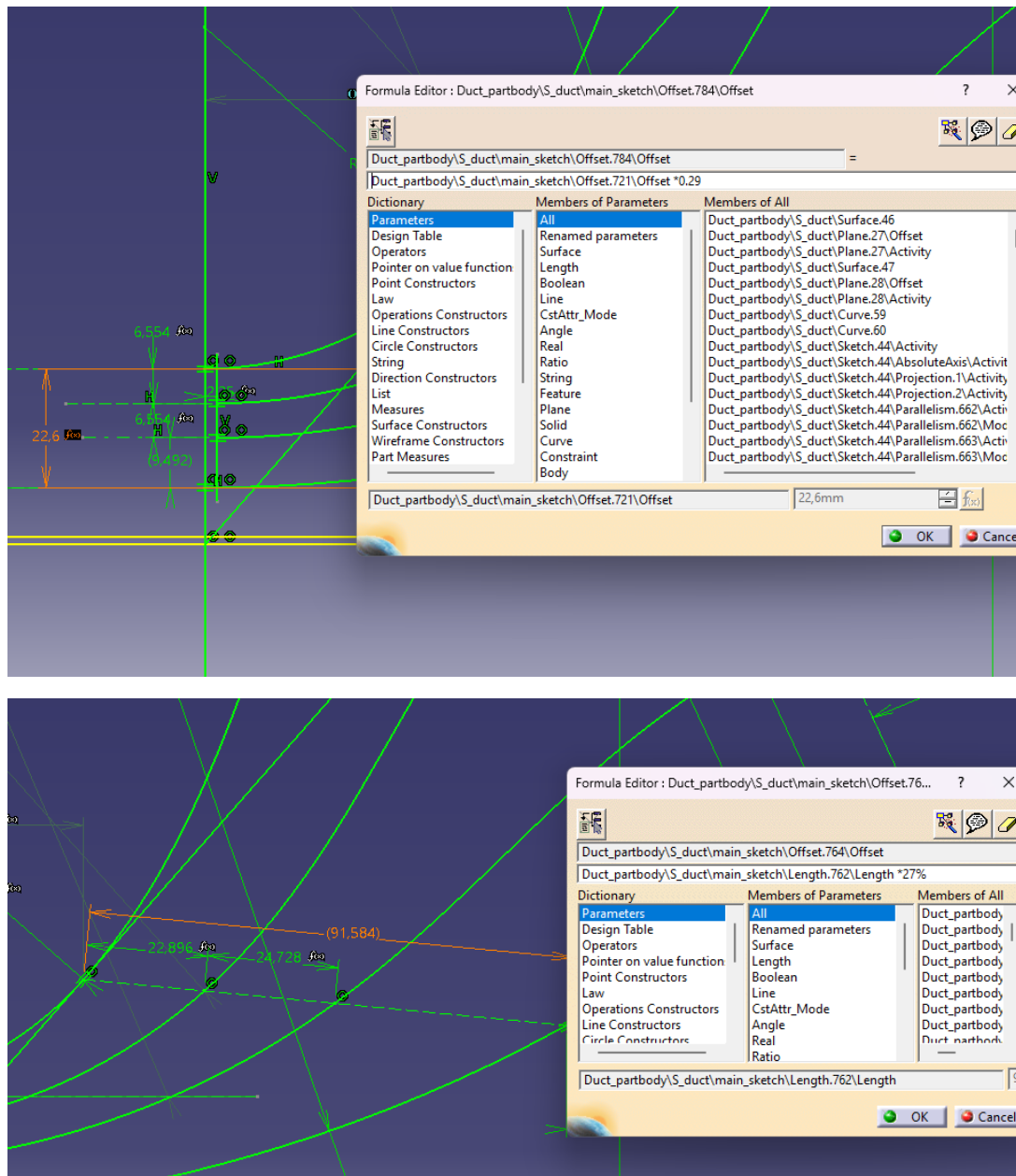


Εικόνα 101 α) Δημιουργία ευθύγραμμων τμημάτων, β) δημιουργία επιφανειών

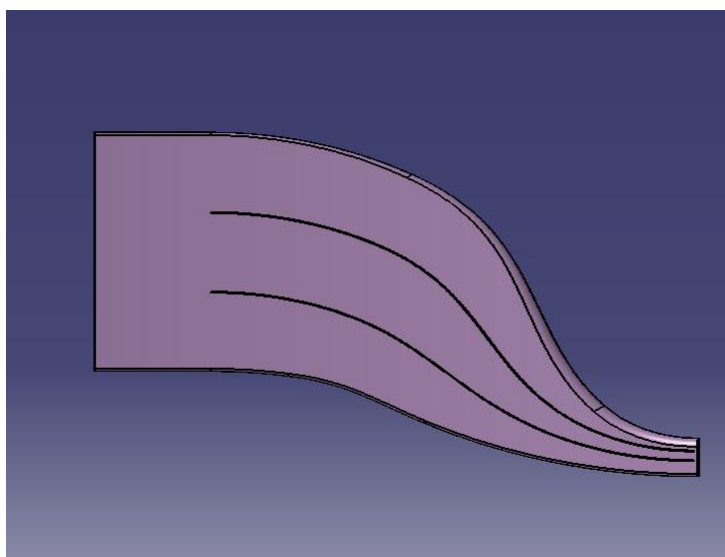
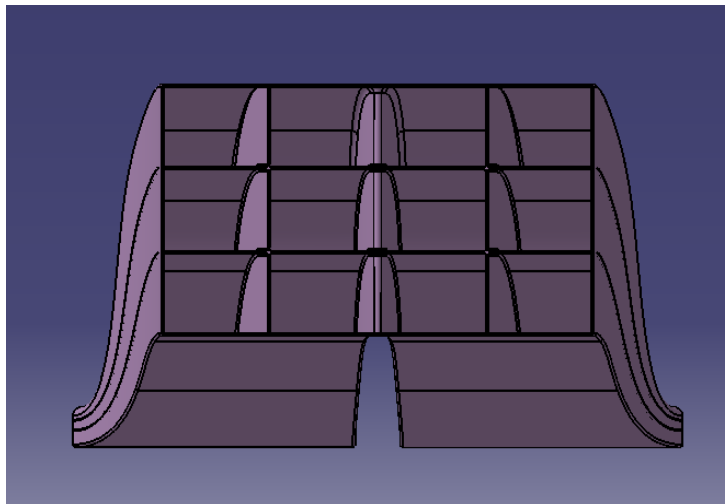
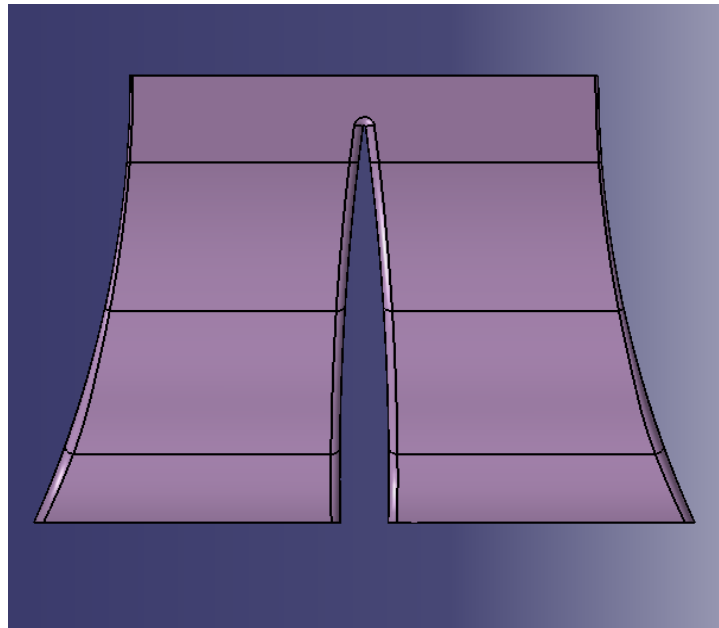


Εικόνα 102 Δημιουργία φιλέτων

Η επόμενη αλλαγή αφορά τη μετακίνηση των οριζόντιων περυγίων. Χρειάστηκε να μεταβληθούν τα ποσοστά των αποστάσεων προκειμένου τα δύο οριζόντια περύγια να μετατοπιστούν πιο πάνω με στόχο την διάνοιξη του κάτω καναλιού (Εικόνα 103).



Εικόνα 103 Μετακίνηση περυγίων



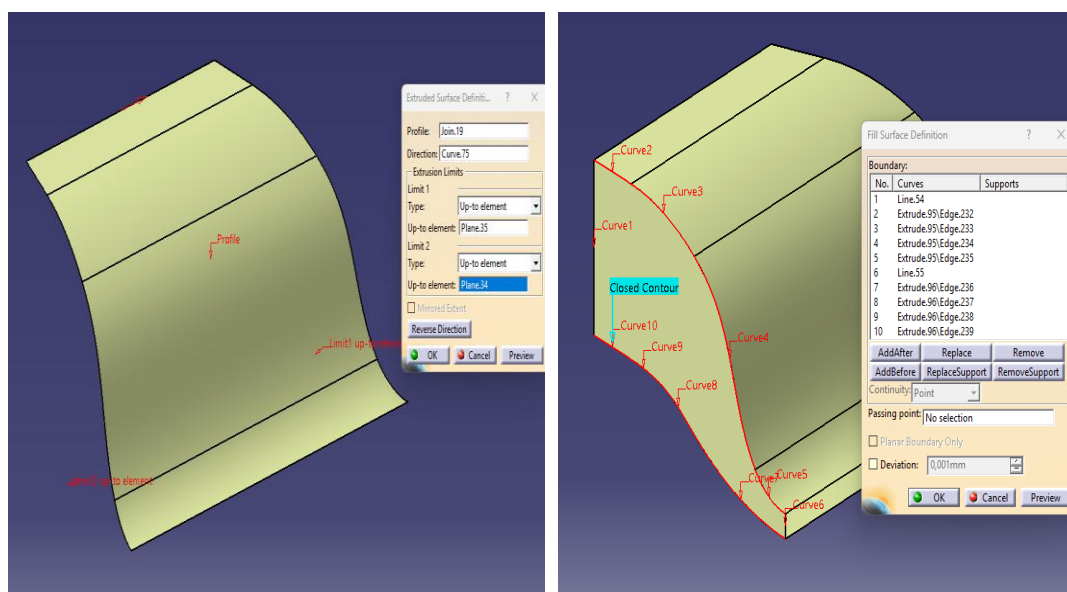
Εικόνα 104 S_duct_2

4.1.5 Σχεδιασμός Fluid domains

Στο σημείο αυτό θα δημιουργηθούν οι όγκοι των πεδίων ροής του ρευστού, οι οποίοι θα εισαχθούν σε μεταγενέστερο στάδιο στο Ansys CFX , για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης του συστήματος ψύξης. Αρχικά θα δημιουργηθούν ξεχωριστοί όγκοι για κάθε μεμονωμένο τρισδιάστατο αντικείμενο και έπειτα μέσω της εντολής “Join” , θα ενοποιηθούν σε ένα μοναδικό.

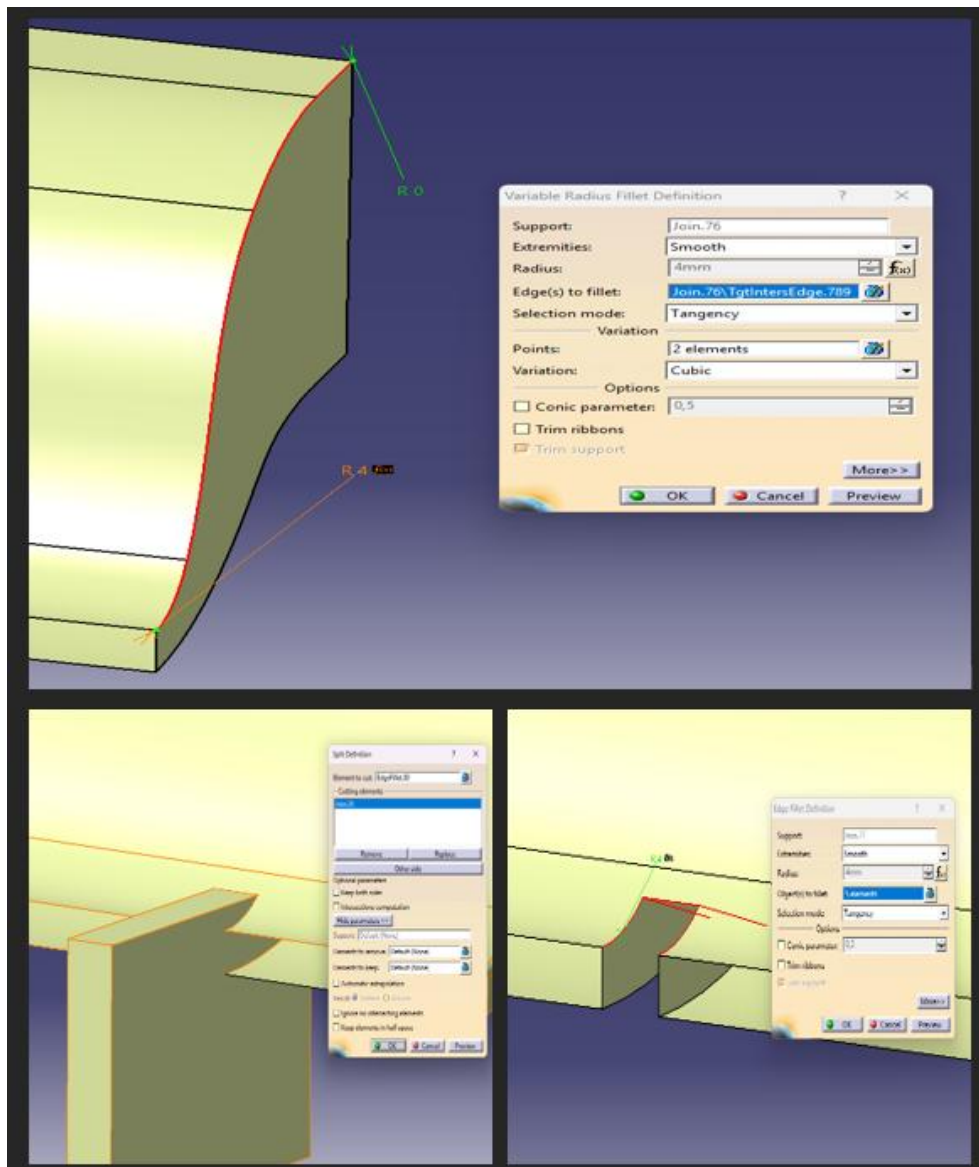
S-duct

Η διαδικασία ξεκινάει με τη επανασχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου επιφανειών του αεραγωγού με μερικές διαφοροποιήσεις ώστε να εξαχθεί ο σωστός όγκος. Μέσω του “Sketch” που παραμετροποιεί τον S-duct στο συμμετρικό επίπεδο, εξωθούνται οι εξωτερικές οριζόντιες επιφάνειες με όρια τα επίπεδα που προσχεδιάστηκαν και οριοθετούν το πλαίσιο του αυτοκινήτου. Μέσω της εντολής “Fill” δημιουργού και οι πλάγιες επιφάνειες με σκοπό την δημιουργία του κελύφους του αεραγωγού (Εικόνα 105).



Εικόνα 105 Δημιουργία εκ νέου του τρισδιάστατου μοντέλου επιφανειών του S-duct

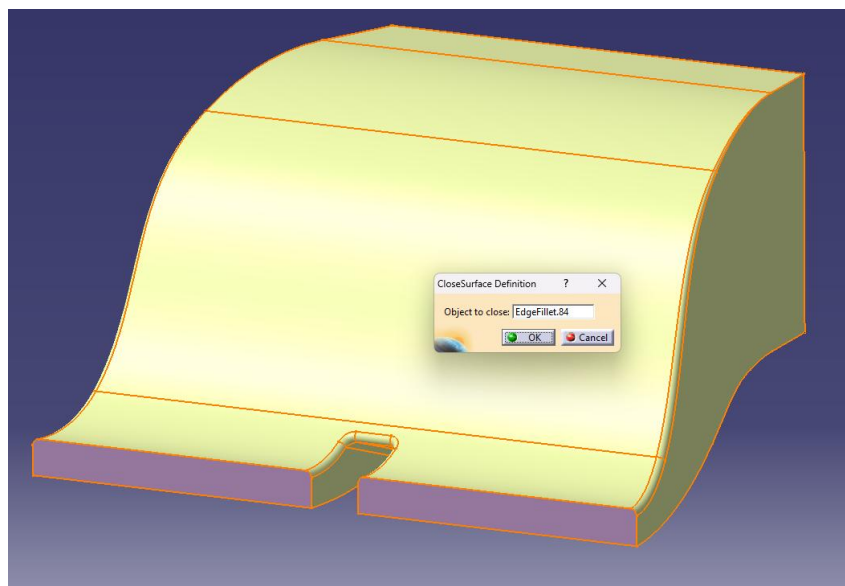
Η πρώτη διαφοροποίηση αφορά τα φιλέτα των ακμών. Μέσω της εντολής “Variable fillet” επιλέγονται οι πλαϊνές πάνω ακμές και ορίζονται οι ακτίνες 0mm για την περιοχή εξόδου και η περιοχή εισόδου μέσω της μεταβλητής και πάλι “fillet_radius_airways”. Η διαφοροποίηση στοχεύει στην ώστε να απλοποιηθεί το μοντέλο προσομοίωσης, δηλαδή στη μείωση των απαιτούμενων στοιχείων κατά την διακριτοποίηση του μοντέλου, καθώς και στη απαλοιφή των ακμών και στη ομοιότητα μεταξύ των όγκων που εφάπτονται στις επιφάνειες επαφής τους. Έπειτα, αποκόπτεται κατά τα γνωστά το προφίλ της δοκού από τον αεραγωγό και δημιουργούνται και τα απαραίτητα φιλέτα όπως και στο αρχικό (Εικόνα 106).



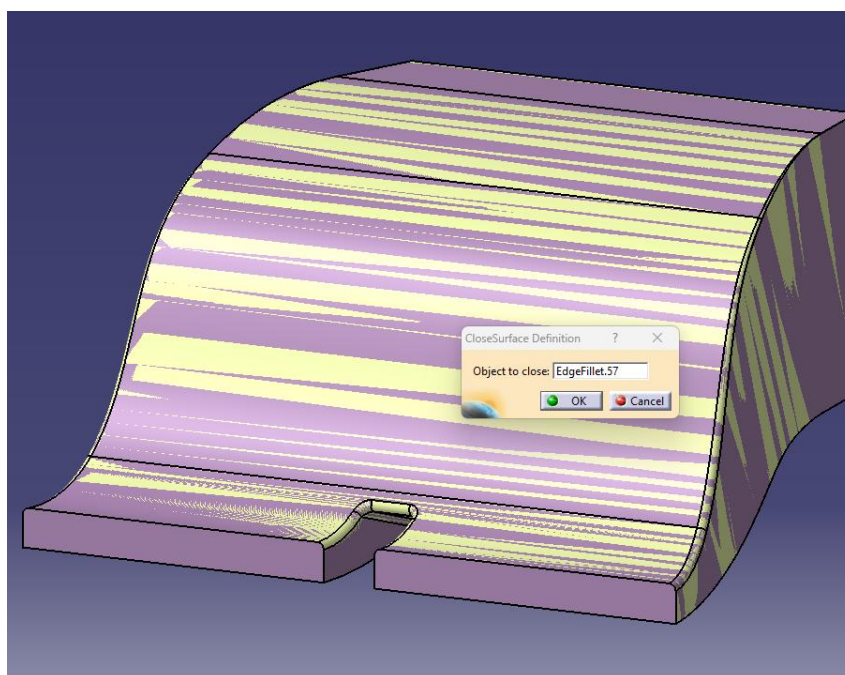
Εικόνα 106 α) Εισαγωγή φιλέτων πλαϊνών ακμών β) Αποκοπή προφίλ δοκού γ) Εισαγωγή φιλέτων στις ακμές της αποκοπής

Το μοντέλο S-duct είναι έτοιμο για την ανάκτηση του όγκου ροής του μέσω της παρακάτω διαδικασίας.

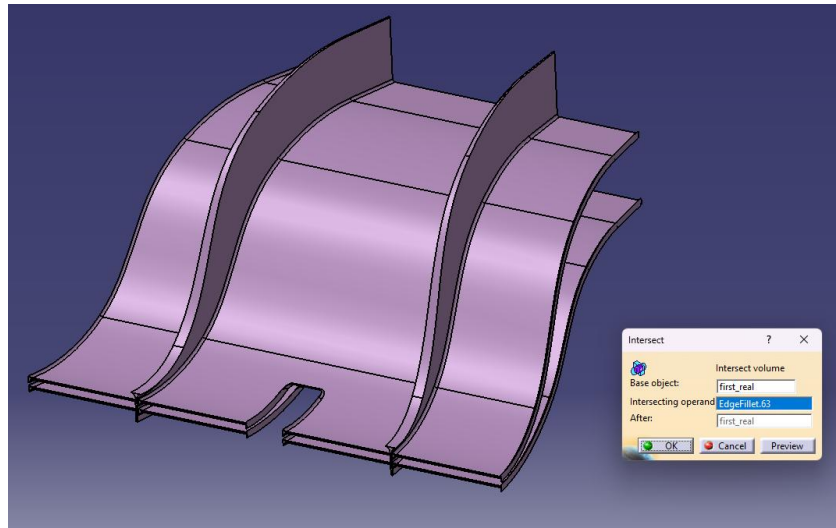
1. Εφαρμογή της εντολής “Close Surface” στο παραπάνω μοντέλο επιφανείας για την ανάκτηση του όγκου του ρευστού του κορμού εισαγωγής (Εικόνα 107).
2. Επαναληπτική χρήση της εντολής “Close Surface” στο πραγματικό μοντέλο επιφανείας του κορμού, το οποίο περιλαμβάνει φιλέτα ακτίνας 0.1 mm στα άκρα σύνδεσης με την επιφάνεια της κυνέλης (Εικόνα 108).
3. Εφαρμογή της εντολής “Intersect” (Εικόνα 109) για τη απόκτηση της τομής μεταξύ του πραγματικού κατασκευαστικού μοντέλου (με φιλέτα σε όλη τη γεωμετρία) και του μοντέλου προσομοίωσης, αποδίδοντας έτσι την εσωτερική γεωμετρία των περυγίων και φιλέτων, εξαιρώντας τη γεωμετρική διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων.
4. Αφαίρεση της παραπάνω τομής από τον όγκο του ρευστού, με χρήση της εντολής “Remove” (Εικόνα 111).



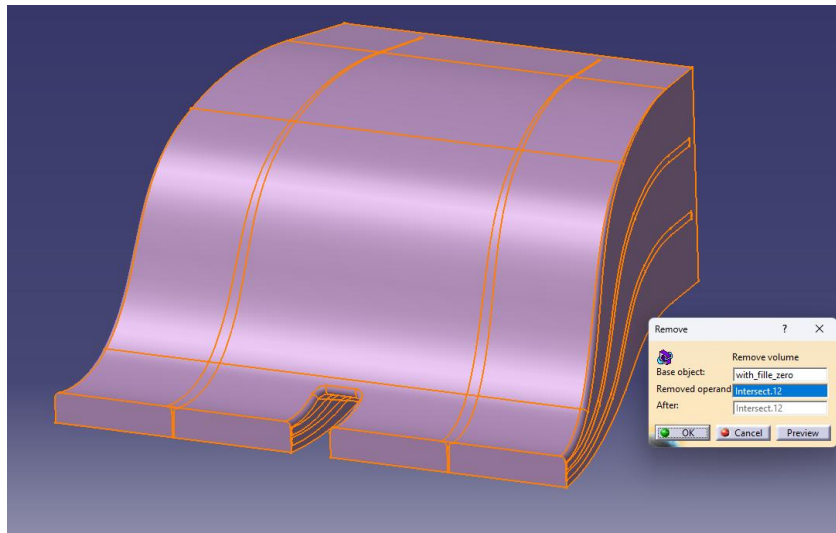
Εικόνα 107 Απόκτηση όγκου ρευστού του μοντέλου προσομοίωσης



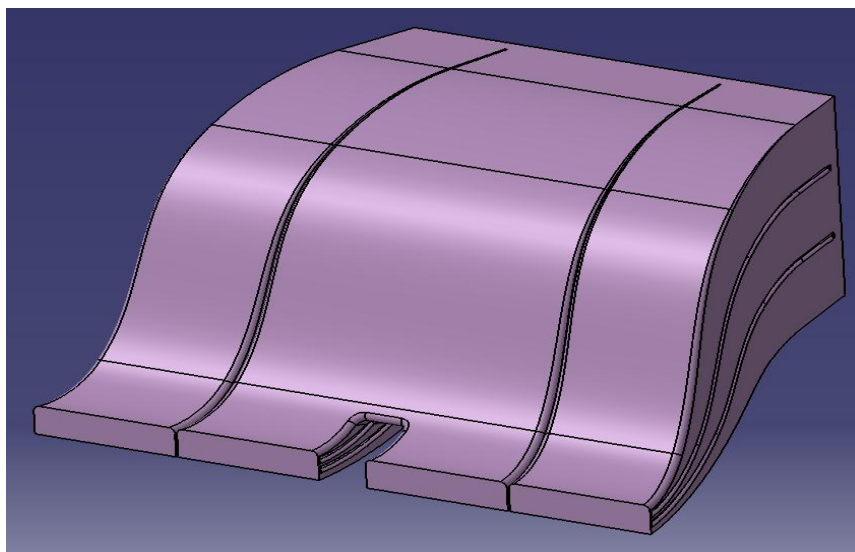
Εικόνα 108 Απόκτηση όγκου ρευστού του μοντέλου κατασκευής



Εικόνα 109 Εντολή "Intersect"



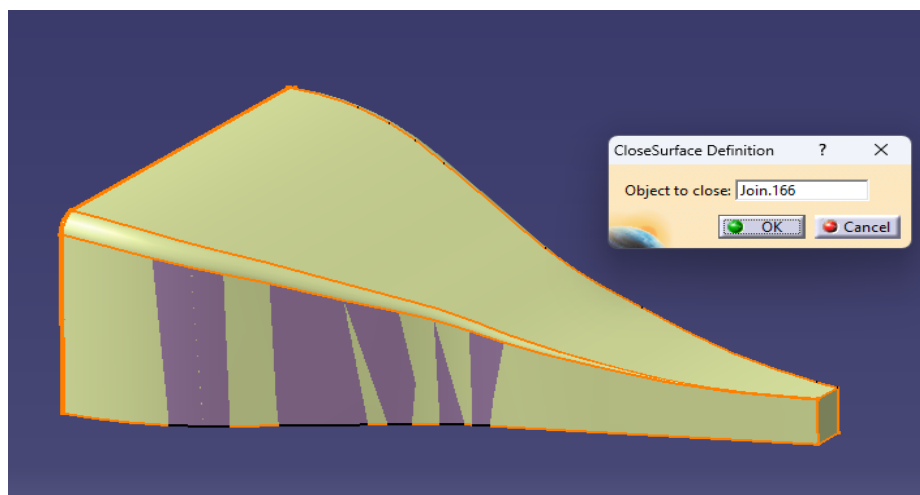
Εικόνα 110 Εντολή "Remove"



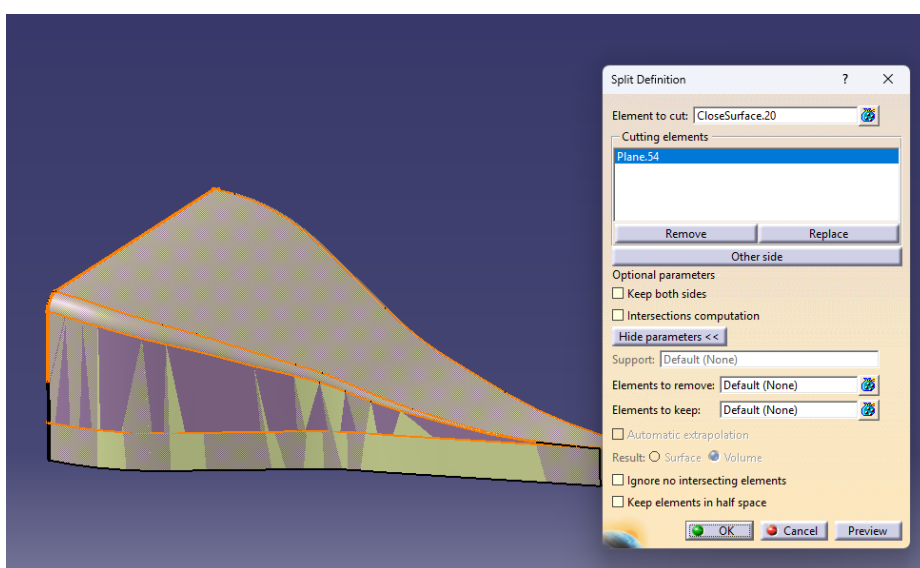
Εικόνα 111 Όγκος πεδίου ροής S-duct

Naca duct

Η διαδικασία παραγωγής των όγκων πεδίου ροής των αεραγωγών Naca duct αρχίζει με την εντολή “Close surface” για την ανάκτηση αυτών από το αρχικό μοντέλο επιφανείας τους (Εικόνα 112). Έπειτα αποκόπτεται το περιττό τμήμα των 10mm, η διαδικασία αφορά το ένα ζευγάρι αεραγωγών καθώς το μοντέλο είναι συμμετρικό (Εικόνα 113).

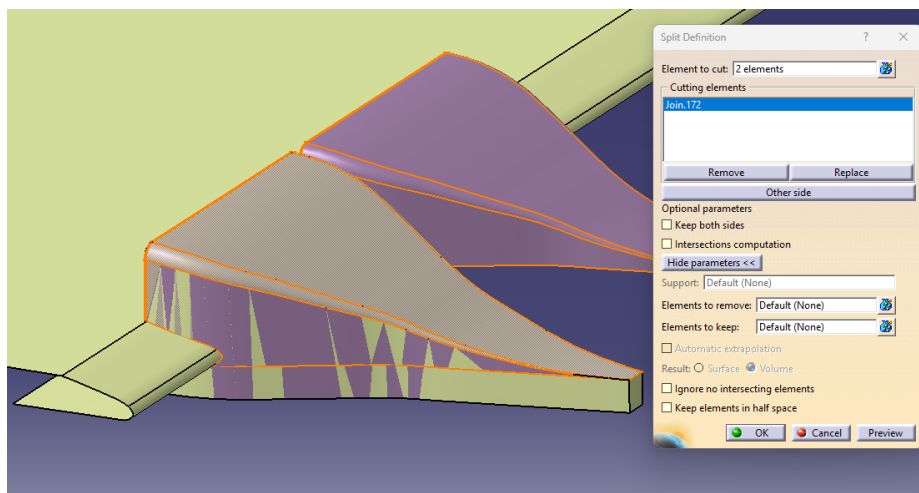


Εικόνα 112 Απόκτηση όγκων Naca duct

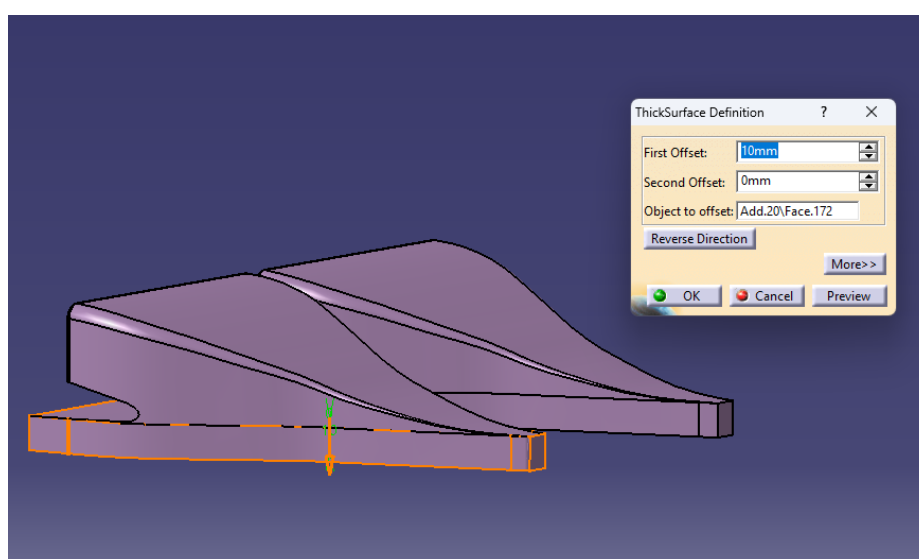


Εικόνα 113 Αποκοπή τμήματος 10mm

Αφού έχει γίνει η παραπάνω διαδικασία και για τα δύο μοντέλα, μέσω της εντολής “Split” αποκόπτεται και το χείλος προσβολής (Εικόνα 114), ενώ στη συνέχεια από τον όγκο πλέον ροής εξωθείται το τμήμα των 10mm (Εικόνα 115) εκ νέου το οποίο θα χρειαστεί στη συνέχεια για την δημιουργία των επιφανειών διεπαφής μεταξύ του Naca και του πεδίου ροής του περιβάλλοντος αέρα. Τέλος μέσω της εντολής “Add” ενοποιούνται οι δύο όγκοι.



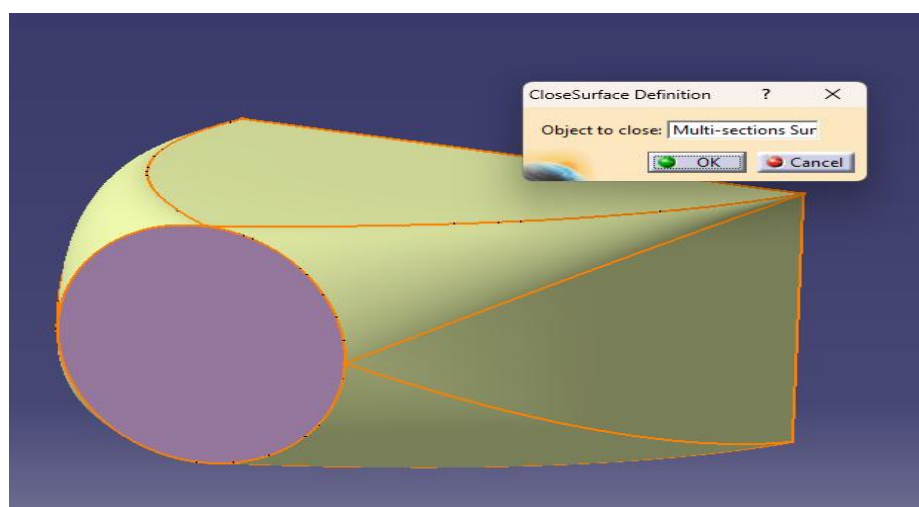
Εικόνα 114 Αποκοπή χείλους προβολής.



Εικόνα 115 Εξώθηση τμήματος 10mm από τον όγκο ροής.

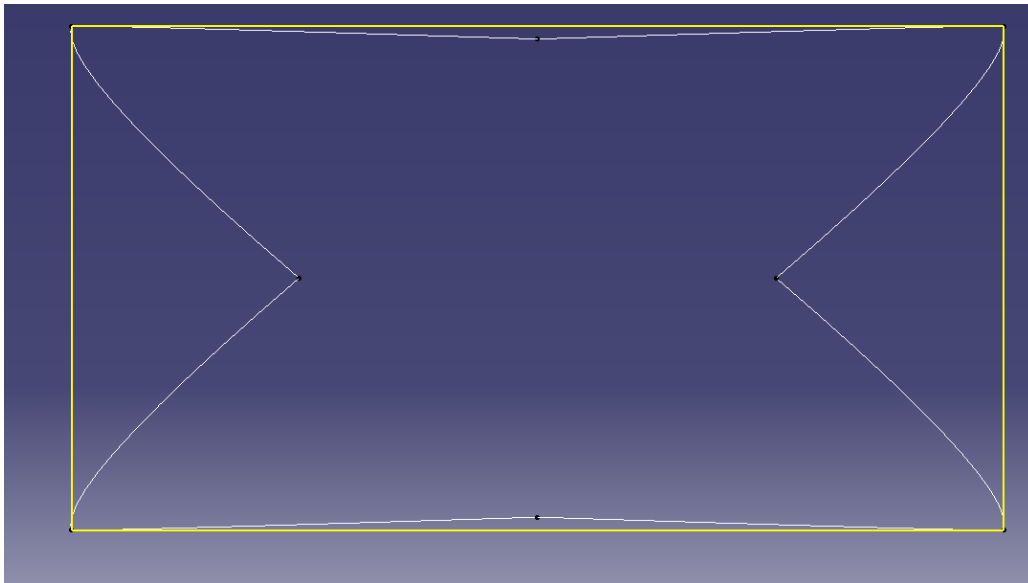
Diffuser

Αρχικά γίνεται απόκτηση του όγκου ροής του κατασκευαστικού μοντέλου (Εικόνα 116).

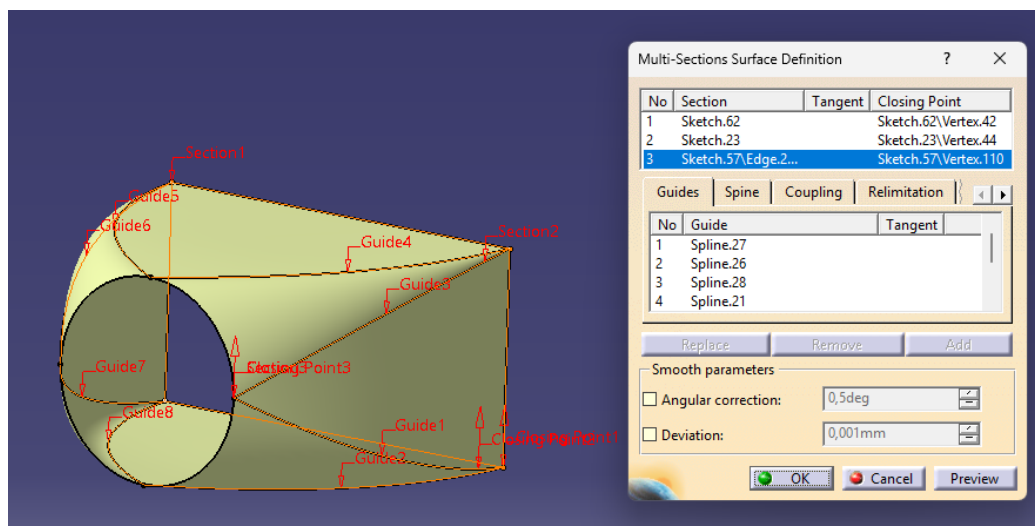


Εικόνα 116 Όγκος ροής κατασκευαστικού μοντέλου

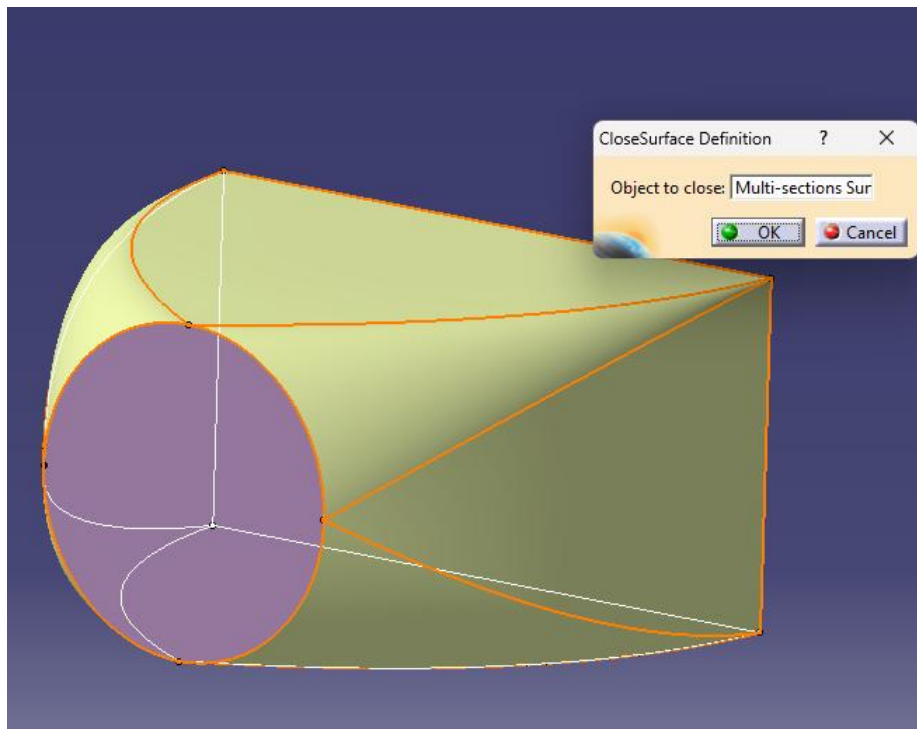
Στη συνέχεια θα χρειαστεί να διαφοροποιηθεί το "Sketch" που δημιουργήθηκε στην επιφάνεια εξόδου της κυψέλης, δηλαδή να αφαιρεθούν τα "corners" ώστε να προκύψει στη συνέχεια όμοια επιφάνεια με της κυψέλης χωρίς ακμές που θα εφάπτονται σωστά (Εικόνα 117). Έπειτα μέσω της εντολής "Multi section surface" δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο επιφανείας του διαχύτη της προσομοίωσης και γίνεται απόκτηση του όγκου ροής του (Εικόνα 118, Εικόνα 119). Τέλος, μέσω της εντολής "Intersect" αποκτάται ο όγκος ροής του διαχύτη με της άκρες του να εφάπτονται σωστά στην επιφάνεια της κυψέλης με βάση το μοντέλο προσομοίωσης και ως "intersecting operant" το μοντέλο κατασκευής. (Εικόνα 102).



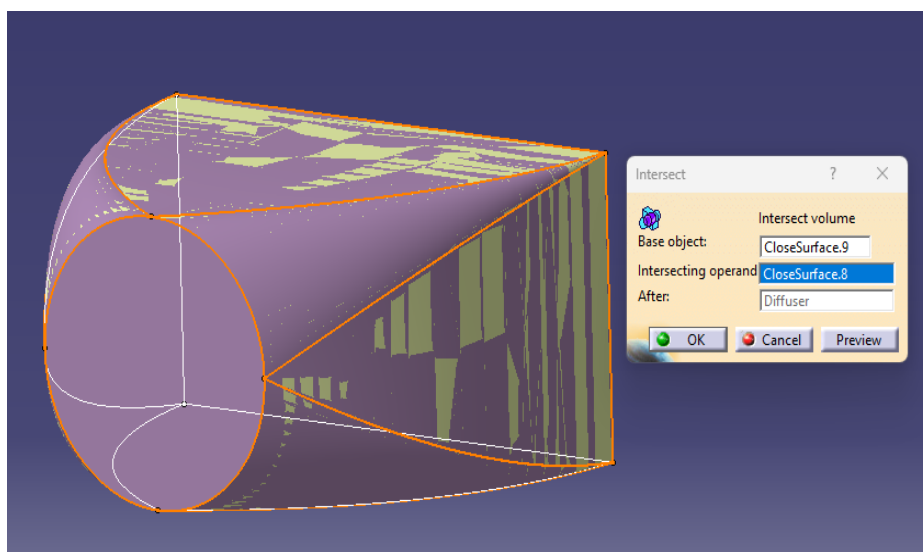
Εικόνα 117 Αφαίρεση "corners".



Εικόνα 118 Τρισδιάστατο μοντέλο επιφανείας διαχύτη προσομοίωσης



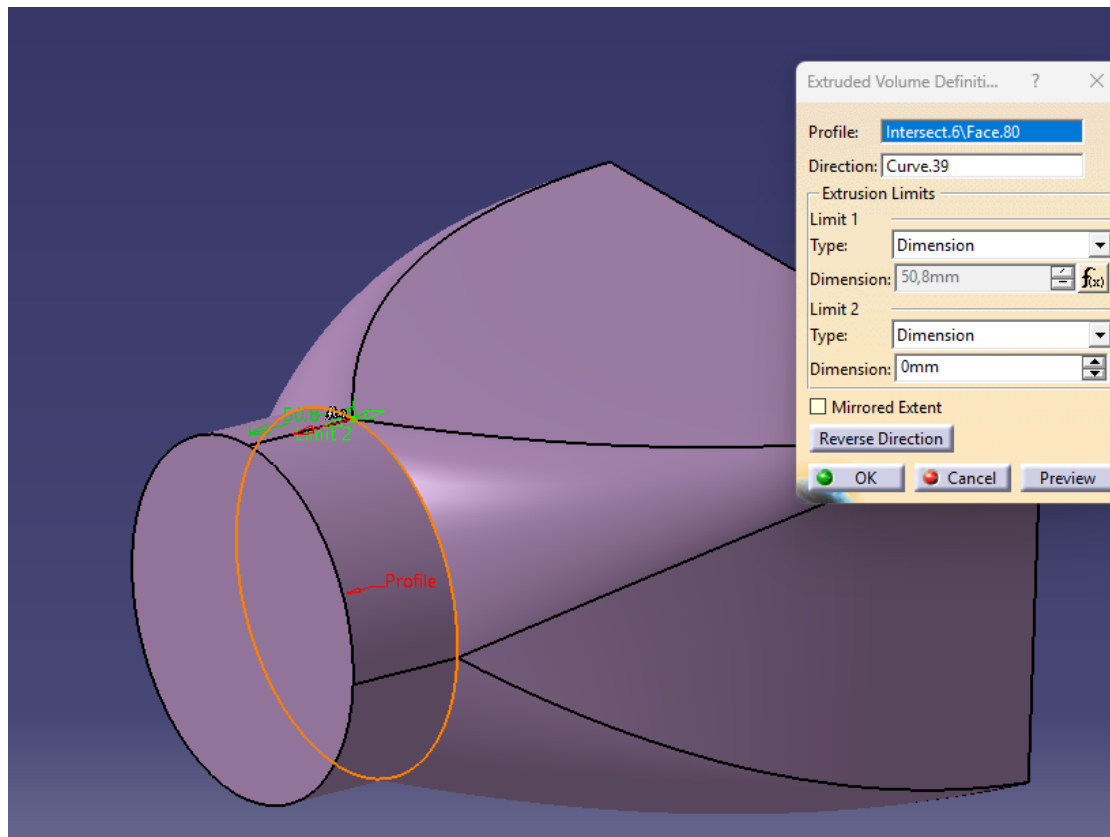
Εικόνα 119 Απόκτηση όγκου ροής μοντέλου προσομοίωσης.



Εικόνα 120 Εντολή "Intersect" μεταξύ των δύο όγκων ροής

Fan

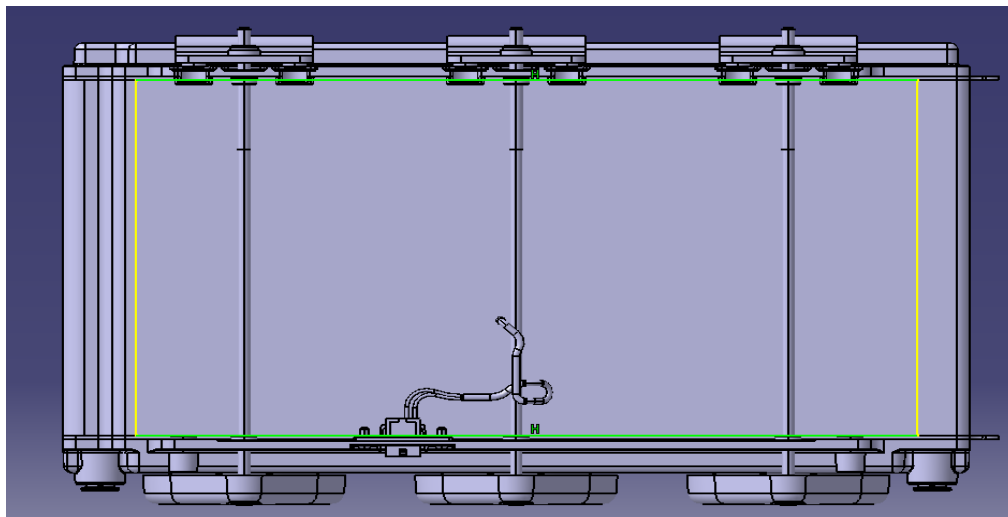
Η παραγωγή του όγκου ροής του ανεμιστήρα βασίζεται στον όγκο ροής του διαχύτη. Μέσω της εντολής "Extruded volume" εξωθείται κατά την τρίτη διάσταση το κυκλικό προφίλ του σε ύψος που ορίζεται παραμετρικά μέσω της μεταβλητής "fan_width" (Εικόνα 121).



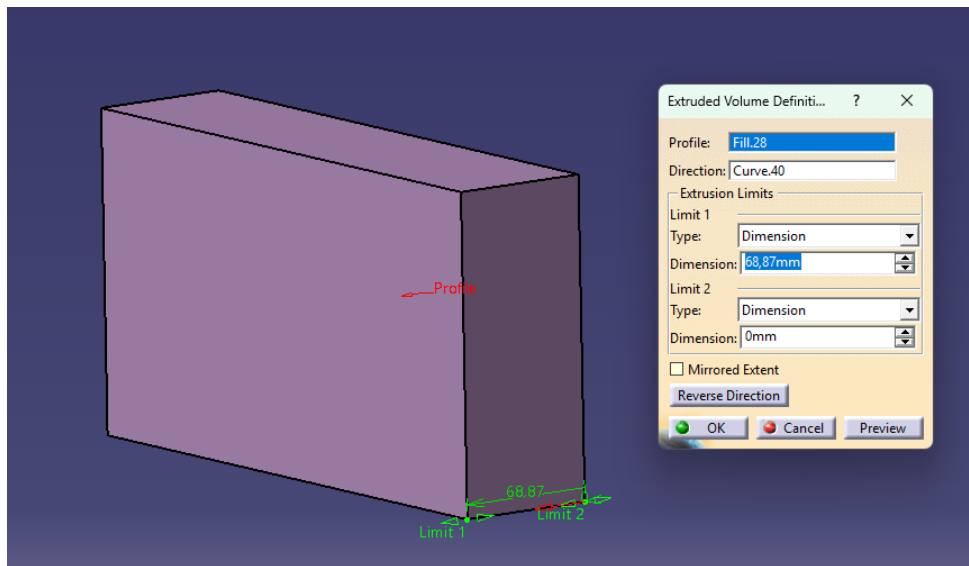
Εικόνα 121 Όγκος ροής ανεμιστήρα.

Κυψέλη καυσίμου

Η δημιουργία του όγκου ροής της κυψέλης βασίζεται στο πρωταρχικό "Sketch" που δημιουργήθηκε και την οριοθετεί (Εικόνα 122). Έπειτα μέσω της εντολής και πάλι "Extruded Volume" εξωθείται ο όγκος ροής της σε απόσταση όσο και το πλάτος της που είναι ίσο με 68.87mm (Εικόνα 123).



Εικόνα 122 "Sketch" κυψέλης καυσίμου



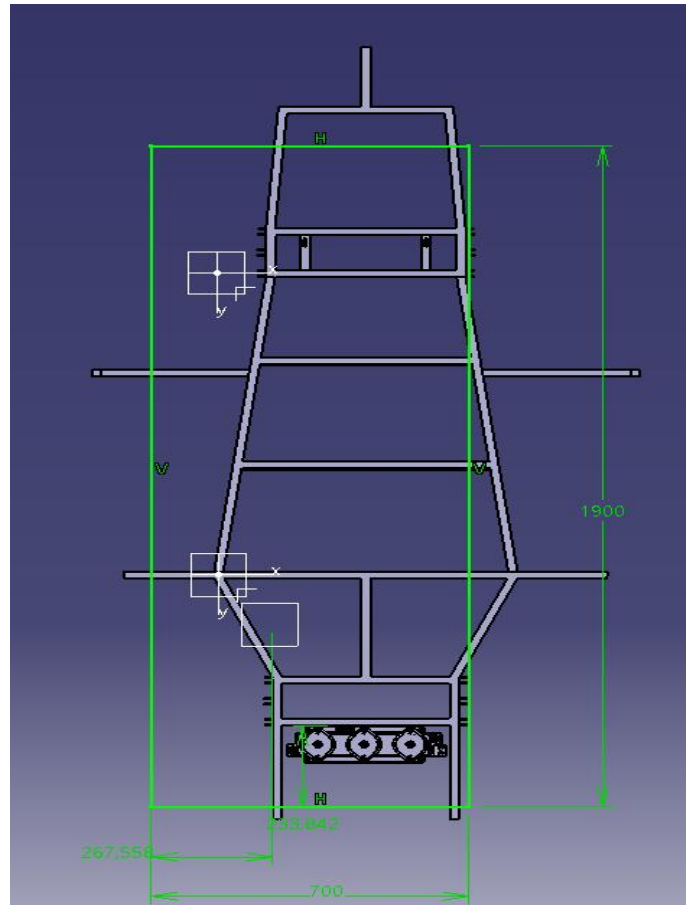
Εικόνα 123 Παραγωγή όγκου κυψέλης.

Όγκος πεδίου ροής περιβάλλοντος αέρα

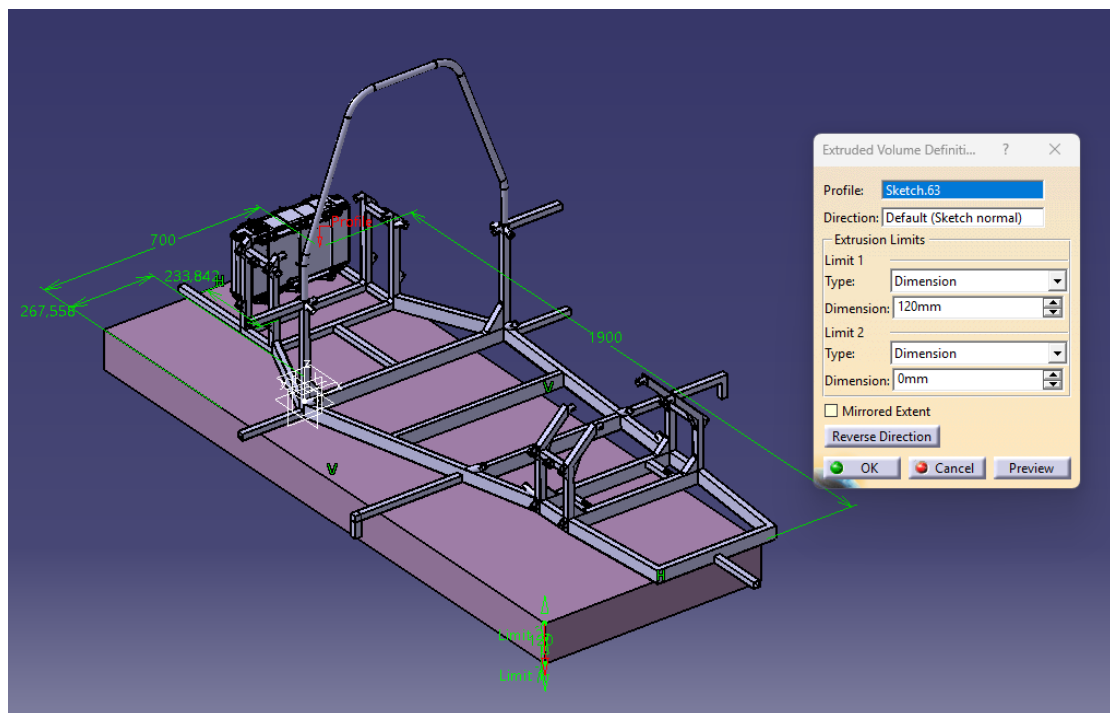
Ο όγκος του πεδίου ροής του περιβάλλοντος αέρα προσομοιώνεται από προφίλ ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, δηλαδή ο κενός χώρος που βρίσκεται κάτω από το δάπεδο του αυτοκινήτου. Επομένως δημιουργείται “Sketch” επί του επιπέδου X,Y στο ύψος του πατώματος του αυτοκινήτου και σχεδιάζεται ορθογώνιο το οποίο αποτελείται από τις διαστάσεις του άξονα του αυτοκινήτου και το μήκος του (Εικόνα 124) .

Έπειτα μέσω της εντολής “Extrude Volume” εξωθείται το παραπάνω προφίλ όσο το ύψος του κενού χώρου που βρίσκεται κάτω από το αυτοκίνητο και μεταξύ του οδοστρώματος (Εικόνα 125).

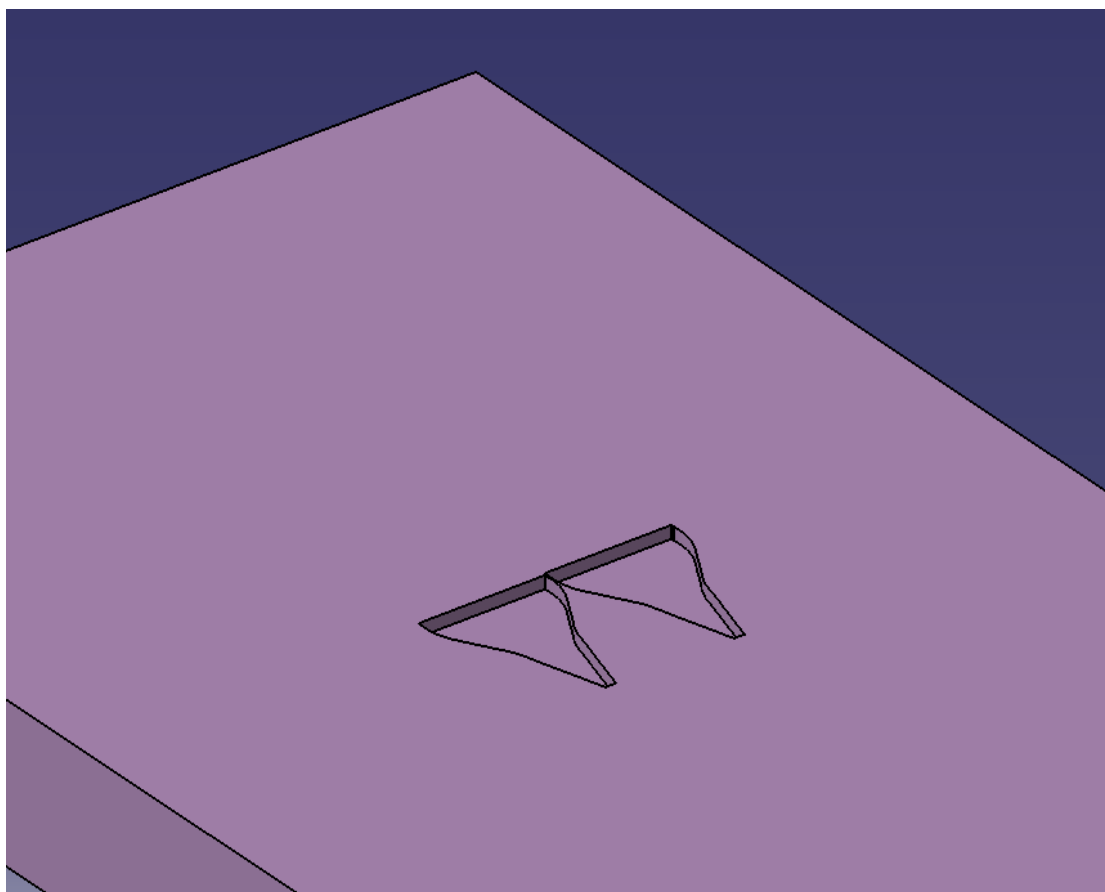
Η χρήση των τμημάτων που εξωθήθηκαν προς τα αρνητικά Z από τα Naca duct, θα χρησιμεύσει ώστε να γίνουν εσοχές στον παραπάνω όγκο μέσω της εντολής “Remove” (Εικόνα 126. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι στη διαδικασία διακριτοποίησης στο περιβάλλον του Ansys CFX , θα χρειαστεί στη περιοχή εκείνη η διακριτοποίηση (Mesh) να έχει ομαλή μετάβαση ώστε να υπολογιστεί σωστά η ροή του ρευστού κατά την είσοδο στον αεραγωγό Naca duct.



Εικόνα 124 Διαστασιολόγηση όγκου ροής περιβάλλοντος αέρα



Εικόνα 125 Παραγωγή όγκου ροής περιβάλλοντος αέρα.



Εικόνα 126 Αφαίρεση όγκων Naca duct

5 Υπολογιστική Ρευστοδυναμική

5.1 Γενικά

Υπολογιστική ρευστοδυναμική ή CFD (Computational Fluid Dynamics) είναι η ανάλυση συστημάτων που περιλαμβάνουν ροή ρευστού, μεταφορά θερμότητας και συσχετιζόμενων φαινομένων όπως χημικές αντιδράσεις, μέσω προσομοίωσης βασισμένης σε υπολογιστή. Η τεχνική αυτή είναι πολύ αποτελεσματική και καλύπτει ένα μεγάλο εύρος βιομηχανικών και μη πεδίων εφαρμογής.

Κατά την επίλυση προβλημάτων ροής, θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι η υποκείμενη φυσική είναι πολύπλοκη και τα αποτελέσματα που παράγονται από έναν κώδικα είναι στην καλύτερη περίπτωση τόσο καλά όσο η φυσική και η χημεία που εμπεριέχονται σε αυτόν και στη χειρότερη περίπτωση τόσο καλά όσο ο χρήστης του. Οι σωστές επιλογές προϋποθέτουν κατάλληλες δεξιότητες μοντελοποίησης, αφού σε όλα, ακόμη και στα απλούστερα προβλήματα, είναι απαραίτητη η υιοθέτηση παραδοχών, ώστε η πολυπλοκότητα να ελαττώνεται σε ένα διαχειρίσιμο επίπεδο ενώ διατηρούνται τα κύρια χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου προβλήματος.

Η εκτέλεση των υπολογισμών καθαυτή απαιτεί άλλου τύπου δεξιότητες. Ο προσδιορισμός της γεωμετρίας του χώρου και ο σχεδιασμός του πλέγματος αποτελούν τις κύριες εργασίες στο στάδιο εισαγωγής, ενώ μεταγενέστερα ο χρήστης θα πρέπει να καταλήγει σε ένα επιτυχημένο αποτέλεσμα προσομοίωσης. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα χαρακτηρίζεται από δύο όψεις : από τη σύγκληση και την ανεξαρτησία του πλέγματος. Ο αλγόριθμος επίλυσης είναι επαναληπτικός στη φύση του και σε μια συγκλίνουσα επίλυση τα λεγόμενα ‘‘υπόλοιπα-μέτρα’’ της συνολικής διατήρησης των ιδιοτήτων ροής είναι πολύ μικρά.

Στο τέλος κάθε προσομοίωσης, ο χρήστης θα πρέπει να κρίνει αν τα αποτελέσματα είναι αρκετά καλά. Είναι αδύνατη η εκτίμηση της ισχύος των μοντέλων φυσικής και χημείας που ενσωματώνονται σε ένα πρόγραμμα τόσο πολύπλοκο όσο ένας κώδικας CFD ή της ακρίβειας των τελικών του αποτελεσμάτων, με οποιοδήποτε άλλο μέσο εκτός τη σύγκριση με πειραματικές δοκιμές (Versteeg & Malalasekera, 2015).

5.2 Πως λειτουργεί ένας κώδικας CFD

Οι κώδικες CFD δομούνται γύρω από τους αριθμητικούς αλγορίθμους που μπορούν να επιλύσουν προβλήματα ροής ρευστών. Για ευκολότερη πρόσβαση στην ισχύ επίλυσης διαθέτουν, όλα τα εμπορικά πακέτα CFD περιλαμβάνουν υπερσύγχρονες διεπαφές χρηστών για την εισαγωγή των παραμέτρων του προβλήματος και την εξέταση των αποτελεσμάτων. Έτσι, όλοι οι κώδικες περιέχουν τρία κύρια στοιχεία (Versteeg & Malalasekera, 2015, σ. 17):

- Έναν προ-επεξεργαστή.
- Έναν επιλυτή.
- Έναν μετα-επεξεργαστή

5.2.1 Προ-επεξεργαστής

Η προ-επεξεργασία αποτελείται από την εισαγωγή ενός προβλήματος ροής σε ένα πρόγραμμα CFD μέσω μια φιλικής στο χρήστη διεπαφής και τον μετέπειτα μετασχηματισμό του εισαγόμενου προβλήματος σε μια μορφή κατάλληλη προς χρήση από τον επιλυτή. Οι ενέργειες που απαιτούνται από τον χρήστη είναι (Versteeg & Malalasekera, 2015, σσ. 17-18):

- Ορισμός γεωμετρίας της περιοχής ενδιαφέροντος, δηλαδή του υπολογιστικού χώρου.
- Παραγωγή πλέγματος, δηλαδή την υποδιαίρεση του χώρου σε έναν αριθμό μικρότερων, μη επικαλυπτόμενων υπο-χώρων που αποτελούν ένα πλέγμα (mesh) κελιών (ή όγκων ελέγχου).
- Επιλογή των φυσικών και χημικών φαινομένων που χρειάζεται να μοντελοποιηθούν.
- Ορισμό ιδιοτήτων των ρευστών.
- Προσδιορισμό κατάλληλων οριακών συνθηκών σε κελιά που συμπίπτουν ή είναι σε επαφή με το όριο του χωρίου.

5.2.2 Επιλυτής

Υπάρχουν τρεις βασικές κατευθύνσεις στις τεχνικές αριθμητικής επίλυσης: η τεχνική των πεπερασμένων διαφορών, η τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων και η τεχνική των φασματικών μεθόδων. Στο Ansys CFX χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων, μια ειδική διαμόρφωση των πεπερασμένων διαφορών. Γενικά, ο αριθμητικός αλγόριθμος των πεπερασμένων όγκων αποτελείται από τα παρακάτω βήματα (Versteeg & Malalasekera, 2015, σσ. 18-19):

- Ολοκλήρωση των εξισώσεων που κυβερνούν τη ροή ρευστού για το σύνολο των (πεπερασμένων) όγκων ελέγχου του χώρου.
- Διακριτοποίηση – μετατροπή των ολοκληρωτικών εξισώσεων που προκύπτουν σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων.
- Επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων με μια επαναληπτική μέθοδο.

5.2.3 Μετα-επεξεργαστής

Όπως και στον τομέα της προ-επεξεργασίας έτσι και εδώ οι πρόσφατες εξελίξεις είναι ραγδαίες. Τα κορυφαία CFD πακέτα είναι, πλέον, εξοπλισμένα με ευέλικτα εργαλεία οπτικοποίησης δεδομένων, μερικά από αυτά είναι (Versteeg & Malalasekera, 2015):

- Παρουσίαση υπολογιστικού χώρου και πλέγματος.
- Διανυσματικά γραφήματα.
- Διαγράμματα ισοϋψών.
- Προσομοίωση τροχιών σωματιδίων.

Πιο πρόσφατες δυνατότητες αποτελούν η κίνηση για παρουσίαση δυναμικού πλέγματος ενώ εκτός από τα γραφικά, όλοι οι κώδικες περιλαμβάνουν αξιόπιστη αλφαριθμητική απόδοση και διαθέτουν μονάδες εξαγωγής για περαιτέρω χειρισμό, εξωτερικά του κώδικα.

5.3 Κυβερνώντες μαθηματικές εξισώσεις – Εξισώσεις ANSYS-CFX

Το σύνολο των εξισώσεων που επιλύονται από το ANSYS CFX είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes μη μόνιμης ροής στην μορφή διατήρησης τους.

5.3.1 Εξίσωση συνέχειας

Η εξίσωση () είναι η μη μόνιμη, τρισδιάστατη εξίσωση διατήρησης της μάζας ή η εξίσωση συνέχειας σε ένα σημείο ενός συμπιεστού ρευστού. Ο πρώτος όρος στο αριστερό σκέλος είναι ο ρυθμός μεταβολής της πυκνότητας (ρ) στο χρόνο (μάζα ανά μονάδα όγκου). Ο δεύτερος όρος περιγράφει τη καθαρή ροή μάζας εκτός του στοιχείου, δια μέσου των ορίων του και ονομάζεται όρος συναγωγής (Versteeg & Malalasekera, 2015).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad \text{Εξίσωση 6}$$

5.3.2 Η διανυσματική εξίσωση της ορμής

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \times (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \tau + \vec{S}_M \quad \text{Εξίσωση 7}$$

όπου p τη στατική πίεση, τ ο τανυστής τάσης, $\vec{S}_M$ ο όρος πηγής, όπου ο τανυστής τάσης τ σχετίζεται με ρυθμό παραμόρφωσης ως (ANSYS CFX-Solver Theory Guide, November 2009):

$$\tau = \mu(\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T) - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{U} \quad \text{Εξίσωση 8}$$

5.3.3 Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

Η εξίσωση εκφράζει την εξίσωση της ενέργειας στη μορφή της ολικής ενθαλπίας (ANSYS, ANSYS CFX-Solver Theory Guide, November 2009).

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{U} \cdot h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{U} \cdot \tau) + \vec{U} \cdot \vec{S}_M + S_E \quad \text{Εξίσωση 9}$$

Όπου h_{tot} είναι η ολική ενθαλπία και σχετίζεται με τη στατική ενθαλπία $h(T, p)$ μέσω της εξίσωσης :

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} u^2 \quad \text{Εξίσωση 10}$$

Ο όρος $\nabla \cdot (\vec{U} \cdot \tau)$ αντιπροσωπεύει το έργο που οφείλεται σε ιξώδεις τάσεις και ονομάζεται όρος ιξώδους έργου.

Ο όρος $\vec{U} \cdot \vec{S}_M$ αντιπροσωπεύει το έργο που οφείλεται σε εξωτερικές πηγές ορμής.

5.3.4 Η εξίσωση της θερμικής ενέργειας

$$\frac{\partial(\rho \cdot h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{U} \cdot h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \vec{U} \cdot \nabla P + \tau : \nabla \vec{U} + \vec{S}_E \quad \text{Εξίσωση 11}$$

Ο όρος $\tau : \nabla \vec{U}$ είναι πάντα θετικός και ονομάζεται ιξώδης διάχυση. Ο όρος της ιξώδους διάχυσης μοντελοποιεί τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας (π.χ. κινητικής) σε θερμική ενέργεια μέσω ιξώδους τριβής μέσα στο ρευστό (ANSYS, ANSYS CFX-Solver Theory Guide, November 2009).

5.4 ANSYS-CFX

Η διαδικασία πραγματοποίηση μιας CFD ανάλυσης στο λογισμικό ANSYS-CFX ακολουθεί αποτελείται από τα ακόλουθα (ANSYS CFX Introduction, Ιανουάριος 2016) :

1. Δημιουργία γεωμετρίας και πλέγματος της.
2. Ορισμός φυσικού προβλήματος.
3. Επίλυση.
4. Παρουσίαση αποτελεσμάτων.

5.4.1 Δημιουργία γεωμετρίας και πλέγματος της

Στο πρώτο βήμα ο χρήστης απαιτείται να πραγματοποιήσει δύο κατά σειρά ενέργειες. Αρχικά να οριστεί η γεωμετρία του προβλήματος. Η γεωμετρία θα πρέπει να είναι ένα κλειστό γεωμετρικό στερεό το οποίο θα αποτελεί και το όγκο του πεδίου ροής (Flow Domain). Έπειτα, ορίζονται οι περιοχές ροή του ρευστού, οι περιοχές στερεών καθώς και αποδίδονται ονομασίες στις οριακές επιφάνειες, στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν για μετέπειτα επεξεργασία. Τέλος, με βάση τον όγκο του πεδίου ροής δημιουργείται το πλέγμα. Το πλέγμα διαμορφώνεται ανάλογα το πρόβλημα, τις ιδιότητες που θέτει ο χρήστης, καθώς και την υπολογιστική δυνατότητα.

Στο CFX, η γεωμετρία μπορεί να εισαχθεί από τα περισσότερα μεγάλα πακέτα CAD (όπως CATIA V5R20) ή να κατασκευαστεί στο περιβάλλον *Design Modeler* του ANSYS. Αντίστοιχα το πλέγμα μπορεί να εισαχθεί από άλλο λογισμικό δημιουργίας πλέγματος ή να δημιουργηθεί στο περιβάλλον *Mesh Generator* του ANSYS (ANSYS, ANSYS CFX Introduction, Ιανουάριος 2016) .

5.4.2 Ορισμός φυσικού προβλήματος

Τα αρχεία πλέγματος φορτώνονται στον προ-επεξεργαστή, CFX-Pre. Επιλέγονται τα φυσικά μοντέλα που θα συμπεριληφθούν στην προσομοίωση και καθορίζονται οι ιδιότητες των ρευστών και οι οριακές συνθήκες (ANSYS, ANSYS CFX Introduction, Ιανουάριος 2016).

5.4.3 Επίλυση

Η επίλυση ακολουθεί τα παρακάτω στάδια :

1. Ολοκλήρωση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που κυβερνούν τη ροή ρευστού για όλους του όγκους ελέγχου.
2. Διακριτοποίηση των ολοκληρωτικών εξισώσεων που προκύπτουν σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων.
3. Επίλυση μέσω επαναληπτικής μεθόδου.

Μια επαναληπτική προσέγγιση απαιτείται λόγω του ότι οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές. Καθώς η λύση προσεγγίζει την ακριβή λύση, λέγεται ότι συγκλίνει σε αυτή. Σε κάθε επανάληψη, παρουσιάζεται ένα σφάλμα, ως μέτρο της συνολικής διατήρησης των ιδιοτήτων ροής (ANSYS, ANSYS CFX Introduction, Ιανουάριος 2016).

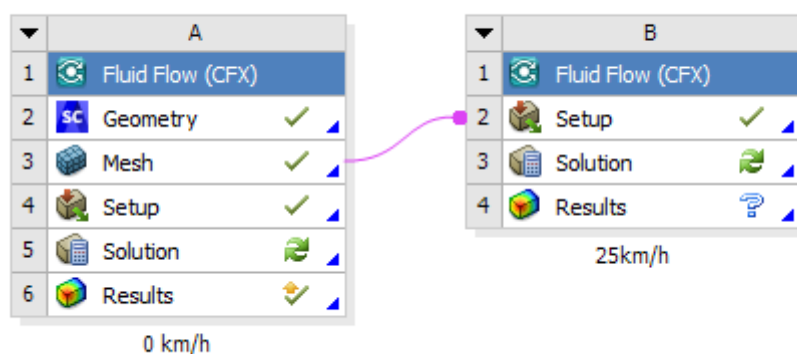
5.4.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων (post-processing)

Τέλος, ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Ο μετα-επεξεργαστής με βάση το αρχείο δεδομένων που εισήχθη από τον επιλυτή είναι σε θέση να αναλύσει, να απεικονίσει καθώς και να παρουσιάσει τα αποτελέσματα με τρόπο διαδραστικό. Μπορεί να απεικονίσει τιμές σημείων ακόμα και σύνθετες κινούμενες ακολουθίες (ANSYS, ANSYS CFX Introduction, Ιανουάριος 2016).

5.6 Εισαγωγή μοντέλου στο ANSYS Workbench και πραγματοποίηση προσομοίωσης

Το Ansys Workbench αποτελεί μια εφαρμογή οργάνωσης έργων. Αναλυτικότερα, δίνει την επιλογή του “Project Schematic” μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να διαχειριστεί τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος CFD. Η σειρά εργασιών που αναλύθηκε στην ενότητα 5.4, ομαδοποιείται καθώς διατάσσονται κατά σειρά τα αρχεία και οι διαθέσιμες ενέργειες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης (ANSYS, ANSYS CFX-Solver Theory Guide, November 2009).

Η παρούσα ενότητα θα επικεντρωθεί στο μοντέλο Naca_S-duct_2. Στην Εικόνα 127, παρουσιάζονται δύο έργα, όπως έχουν δημιουργηθεί στο περιβάλλον του ANSYS Workbench. Το πρώτο αφορά στάσιμο όχημα ενώ το δεύτερο κινούμενο με ταχύτητα 25 km/h. Όπως παρουσιάζεται με μπλε χρώμα έχει επιλεγεί ανάλυση ροών ρευστού με επιλυτή τον CFX. Στη συνέχεια αναπτύσσονται υποενότητες όπου κάθε μια θα ανταποκρίνεται κατά αντιστοιχία με την Εικόνα 127 που αφορά στη διαχείριση του έργου των προσομοιώσεων.



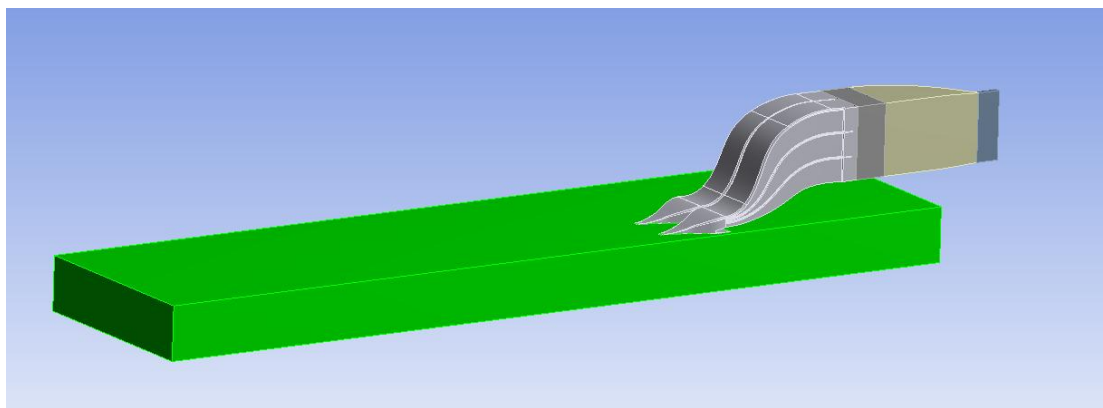
Εικόνα 127 ANSYS Workbench

5.6.1 Geometry

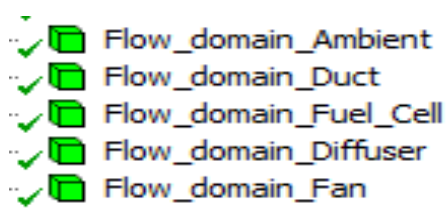
Το ANSYS Connection για την έκδοση του CATIA V5 R12 μπορεί να εισάγει αρχεία μοντέλων ή αρχεία συναρμολόγησης. Τα υποστηριζόμενα αρχεία γεωμετρίας έχουν την επέκταση αρχείου .CATPart ή .CATProduct. Στο συγκεκριμένο, λοιπόν κελί εισήχθη η γεωμετρία μέσω του προγράμματος Catia V5R12.

5.6.2 Mesh

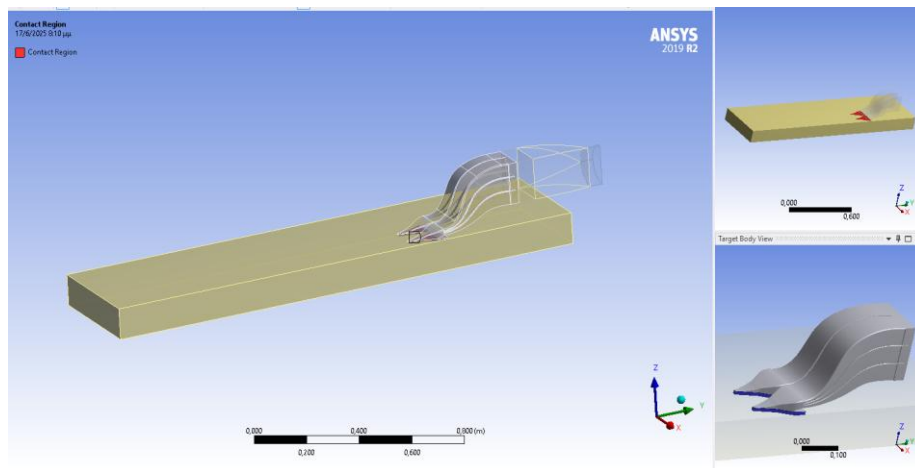
Στη συνέχεια επιλέγεται η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος (Εικόνα 128). Όπως αναλύθηκε και στην ενότητα του σχεδιασμού το μοντέλο αποτελείται από 5 αντικείμενα. Το περιβάλλον, το σύστημα αεραγωγών Naca_S-duct, την κυψέλη, τον διαχύτη και τον ανεμιστήρα. Για να γίνει ευκολότερη η διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος ορίστηκαν ‘Name Selections’ για τους όγκους (Εικόνα 129) καθώς ο καθένας ξεχωριστά χρειάζεται ειδική διαχείριση ως προς τη διαδικασία δημιουργίας του πλέγματος, καθώς υπάρχουν περιοχές υψηλού ενδιαφέροντος όπως για παράδειγμα η εισαγωγή των Naca Ducts, ενώ ο περιβάλλον αέρας μακριά από την εισαγωγή έχει χρήση λιγότερης προσοχής. Έπειτα ορίστηκαν οι επιφάνειες διεπαφής μεταξύ των εφαπτόμενων ‘Domains’ (Εικόνα 130-133). Σημειώνεται ότι το μοντέλο προσομοιώνεται συμμετρικά.



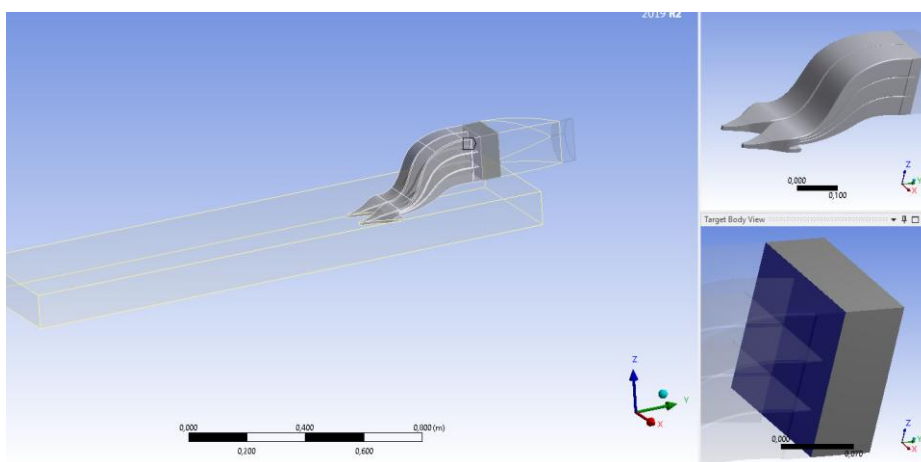
Εικόνα 128 Αντικείμενο στο περιβάλλον Meshing



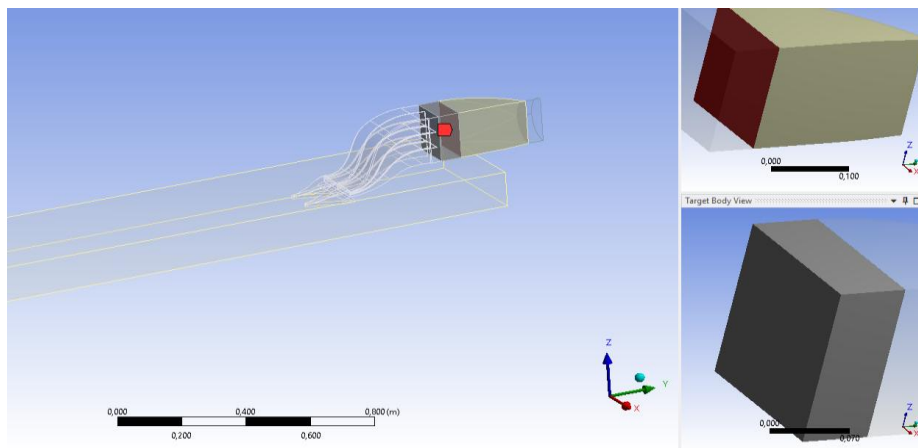
Εικόνα 129 Ορισμός Flow domains



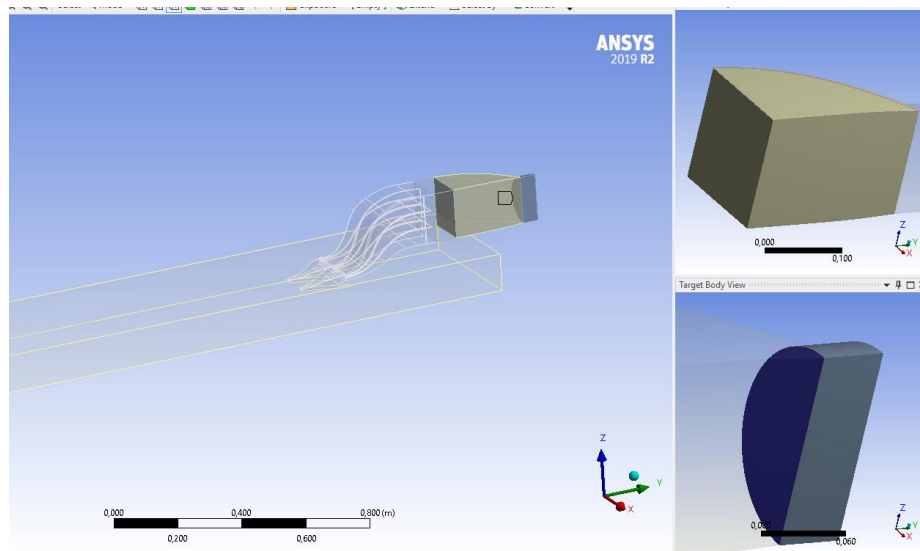
Εικόνα 130 Interface Naca_Ambient



Εικόνα 131 Interface S_duct_Fuelcell

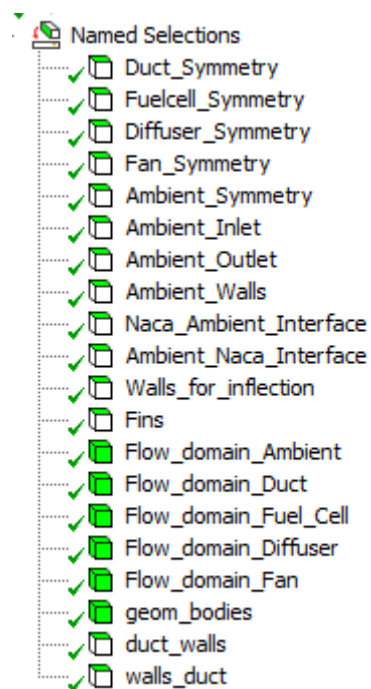


Εικόνα 132 Interface Fuelcell_Diffuser



Εικόνα 133 Interface Diffuser_Fan

Εφόσον έχουν οριστεί τα “domains” και τα “interfaces”, η διαδικασία προχωράει στον ορισμό και τον υπολοίπων “Name Selections” τα οποία θα χρησιμεύσουν στην ταχύτερη υλοποίηση του έργου. Παρακάτω στην Εικόνα 134 παρουσιάζονται όλα τα “Name Selections”. Μερικά από αυτά αφορούν τις επιφάνειες συμμετρίας των μοντέλων, εισαγωγή εξαγωγή, τα πτερύγια κ.α.



Εικόνα 134 Name Selections

Η διαδικασία συνεχίζει με τον ορισμό των μεταβλητών που διέπουν τη μορφή του πλέγματος. Μέσω της καρτέλας “Details View” όταν επιλέγεται η επιλογή από το δέντρο “Mesh”, γίνεται ο καθολικός χειρισμός του πλέγματος. Η καθολικές μεταβλητές κατηγοριοποιούνται στις ακόλουθες κατηγορίες (ANSYS, Ansys Meshing User's Guide, 2021, p. 94):

- Defaults Group
- Sizing Group
- Quality Group
- Inflation Group
- Assembly Meshing Group of Controls
- Batch Connections
- Advanced Group
- Statistics Group

Details of "Mesh"	
[-] Display	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Element Order	Linear
☐ Element Size	101,67 m
[-] Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
☐ Growth Rate	1,2
☐ Max Size	Default (203,34 m)
Mesh Defeaturing	Yes
☐ Defeature Size	Default (0,50835 m)
Capture Curvature	Yes
☐ Curvature Min...	Default (1,0167 m)
☐ Curvature Nor...	Default (18,°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Di...	2,1199 m
Average Surface ...	9,8564e-003 m²
Minimum Edge L...	1,0037e-004 m
[-] Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
☐ Target Skewn...	0,75
Smoothing	High
Mesh Metric	None
[+] Inflation	
[+] Advanced	
[+] Statistics	

[+] Display	
[+] Defaults	
[+] Sizing	
[+] Quality	
[-] Inflation	
Use Automatic In...	All Faces in Chosen Named Selection
Named Selection	Walls_for_inflation
Inflation Option	Smooth Transition
☐ Transition Ratio	0,7
☐ Maximum Lay...	14
☐ Growth Rate	1,2
Inflation Algorit...	Pre
View Advanced ...	Yes
Collision Avoida...	Stair Stepping
☐ Gap Factor	0,5
☐ Maximum Hei...	1
Growth Rate Type	Geometric
☐ Maximum An...	140,°
☐ Fillet Ratio	1
Use Post Smooth...	Yes
☐ Smoothing It...	5
[-] Advanced	
Number of CPUs ...	Program Controlled
Straight Sided El...	
Rigid Body Beha...	Dimensionally Reduced
Triangle Surface ...	Program Controlled
Topology Checki...	Yes
Pinch Tolerance	Default (0,91503 m)
Generate Pinch o...	No
[-] Statistics	
☐ Nodes	10110080
☐ Elements	29159287

Εικόνα 135 Καθολικός χειρισμός πλέγματος

Θα αναλυθούν οι επιλογές για κάθε κατηγορία με βάση την Εικόνα 120.

Defaults Group

- Στην υποκατηγορία Physics Preference επιλέγεται η επιλογή CFD καθώς το πλέγμα απαιτείται να δημιουργηθεί με βάση τον τύπο της ανάλυσης που εκτελείται.
- Επιλέγεται ως επιλυτής ο CFX. Με βάση την επιλογή αυτή ορίζονται ορισμένες προεπιλογές για τις μεταβλητές Aspect Ratio, Collision Avoidance, Transition Ratio οι οποίες ταιριάζουν καλύτερα στην επιλογή του επιλυτή.
- Στην επιλογή Element Order επιλέγεται “Linear” καθώς δεν επιθυμείται η δημιουργία ενδιάμεσων κόμβων στις πλευρές των στοιχείων.
- Η επιλογή Element Size επιτρέπει τον καθορισμό του μέγεθους των στοιχείων για ολόκληρο το μοντέλο. Παραμένει ως προεπιλογή καθώς το μέγεθος των στοιχείων θα διαφέρει για κάθε αντικείμενο (ANSYS, Ansys Meshing User's Guide, 2021).

Sizing Group

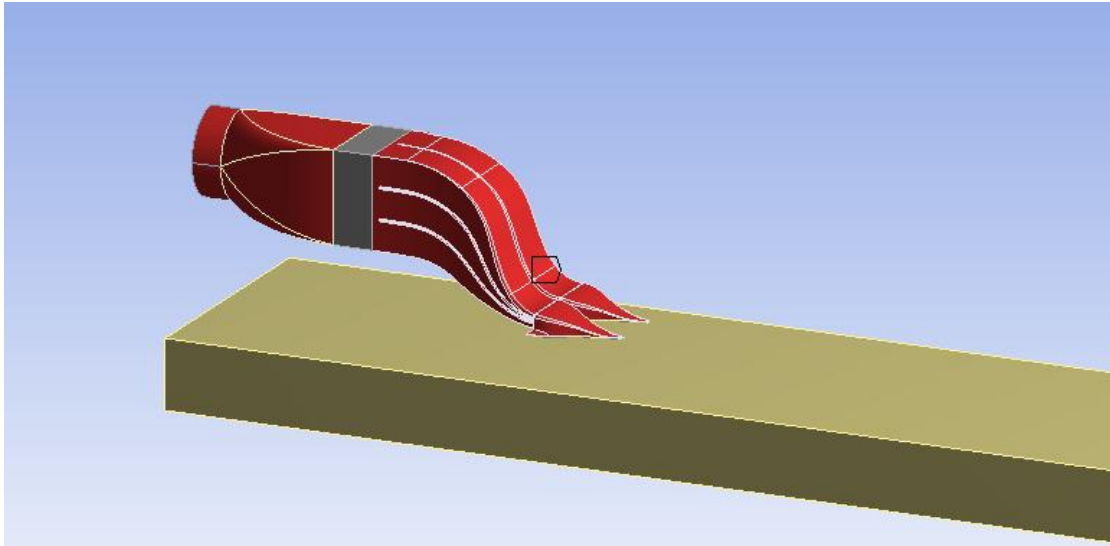
- Στην καρτέλα “Use Adaptive Sizing” επιλέγεται “No”.
- Η επιλογή “Growth Rate” αντιπροσωπεύει το ρυθμό ανάπτυξης του μήκους ακμής στοιχείου, σε κάθε επόμενη στρώση. Για παράδειγμα, ένας ρυθμός ανάπτυξης 1.2 έχει ως αποτέλεσμα αύξηση 20% στο μήκος ακμής στοιχείου σε κάθε στρώση. Επιλέγεται η τιμή 1.2.
- Η επιλογή “Max Size” αντιπροσωπεύει το μέγιστο μέγεθος στοιχείου που επιτρέπεται. Παραλείπεται καθώς θα η διαδικασία θα προχωρήσει σε ειδικότερο χειρισμό ανά όγκο.
- Η επιλογή “yes” στο “Mesh Defeaturing” επιτρέπει την αφαίρεση μικρών χαρακτηριστικών και προβληματικής γεωμετρίας.
- Στην επιλογή “Defeature μέγεθος των στοιχείων του μοντέλου τα οποία οδηγούν στις ενέργειες του ”Mesh Defeaturing”.
- Η επιλογή “Capture Curvature” είναι “Yes”, διότι επιθυμείτε το λογισμικό να λάβει υπόψιν του τη καμπυλότητα.
- Το “Curvature Min Size” ορίζει το ελάχιστο μέγεθος στοιχείου που επιτρέπεται στη προσέγγιση καμπυλότητας. Αφήνεται η προεπιλογή.
- Το “Curvature Normal Angle” είναι διαθέσιμο μόνο όταν επιλέγεται το “Capture Curvature” να είναι “Yes”. Ορίζει με τη σειρά του τη μέγιστη γωνία που επιτρέπεται να καλύψει μια πλευρά ενός στοιχείου για την προσέγγιση μια καμπύλης. Χαμηλές τιμές οδηγούν σε πιο λεπτομερές πλέγμα αντίθετα σε λιγότερο όταν επιλέγονται μεγάλες τιμές. Ορίζεται 18 μοίρες για να προσεγγιστούν λεπτομερώς οι καμπύλες.
- Το “Capture Proximity” είναι διαθέσιμο μόνο όταν επιλέγεται το “Capture Curvature” να είναι “Yes”. Δίνει τη δυνατότητα ελέγχου του μεγέθους στοιχείων που βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους (π.χ κενά, σχισμές ή στενά τοιχώματα). Επιλέγεται ως “No”.

Quality Group

- Η επιλογή “Check Mesh Quality” ορίζει τη συμπεριφορά του λογισμικού σε σχέση με τα όρια σφαλμάτων και προειδοποιήσεων. Επιλέγεται “Yes, Errors” προκειμένου να εμφανίζει μήνυμα σφάλματος σε περίπτωση αποτυχίας δημιουργίας πλέγματος που να ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς.
- Η τιμή “Target Skewness” επιτρέπει τον ορισμό τιμής παραμόρφωσης που θα πρέπει να ικανοποιεί το πλέγμα σε περίπτωση που υπάρχουν τετραεδρικά στοιχεία. Μια τιμή κοντά στο 1 σηματοδοτεί κακή ποιότητα ενώ κοντά στο 0 καλή. Ορίζεται 0.75.
- Η λειτουργία “Smoothing” προσπαθεί να βελτιώσει την ποιότητα του πλέγματος κουνώντας τους κόμβους σε σχέση με τα γειτονικά στοιχεία και κόμβους. Με την επιλογή “High” ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων εξομάλυνσης και το κατώτατο όριο ποιότητας. Με την επιλογή “High” γίνεται εξομάλυνση και των “Inflation Layers”.
- Η επιλογή “Mesh metric” επιτρέπει τη προβολή λεπτομερειών σχετικά με τα μετρικά του πλέγματος ούτως ώστε να αξιολογηθεί η ποιότητα. Επιλέγεται “None”

Inflation

- Στην επιλογή “Use Automatic Inflation” επιλέγουμε την επιλογή “All Faces in Chosen Named Selection” ούτως ώστε να γίνει προσθήκη “Inflation” στις επιφάνειες που επιλέγονται μέσω “Name selection”. Ουσιαστικά αποτελούν τα τοιχώματα της κατασκευής, χωρίς την κυψέλη καυσίμου καθώς θα προσομοιωθεί ως πορώδες μέσο.



Εικόνα 136 Επιφάνειες που χρειάζεται "Inflation" (κόκκινο χρώμα).

- Στην επιλογή "Inflation Option" καθορίζεται το ύψος των "Inflation Layers". Μέσω της επιλογής "Smooth Transition" χρησιμοποιείται το τοπικό μέγεθος των τετραεδρικών στοιχείων για να υπολογιστεί το τοπικό αρχικό ύψος και το συνολικό ύψος, ούτως ώστε να υπάρχει ομαλός ρυθμός μεταβολής του όγκου. Στόχος είναι το πλέγμα να έχει ομοιόμορφη και καλά ελεγχόμενη ανάπτυξη.
- Η επιλογή "Transition Ratio" ορίζει το ρυθμό με τον οποίο μεγαλώνουν τα γειτονικά στοιχεία. Μικρότερη τιμή σημαίνει πιο ομαλή και σταδιακή αύξηση, αντίστοιχα ισχύουν για το αντίθετο. Ορίζεται ως 0.6.
- Η επιλογή "Maximum Layers" ορίζει τον μέγιστο αριθμό των επιπέδων "Inflation" που θα πραγματοποιηθούν. Ορίζεται ως 14 επίπεδα.
- Η επιλογή "Growth Rate" ορίζει το ρυθμό πάχυνσης των επιπέδων "Inflation". Ορίζεται 1.2.
- Η επιλογή "Inflation Algorithm" ορίζει ποιος αλγόριθμος "Inflation" θα χρησιμοποιηθεί. Επιλέγεται "pre" με σκοπό να δημιουργηθούν πρώτα τα επίπεδα "Inflation" και μετά το υπόλοιπο πλέγμα.

Advanced Group

Το σύνολο αυτό δεν αλλάχθηκε στην παρούσα εργασία. Όμως για λόγους πληρότητας επεξηγείται. Το σύνολο επιτρέπει τον έλεγχο των εξής επιλογών :

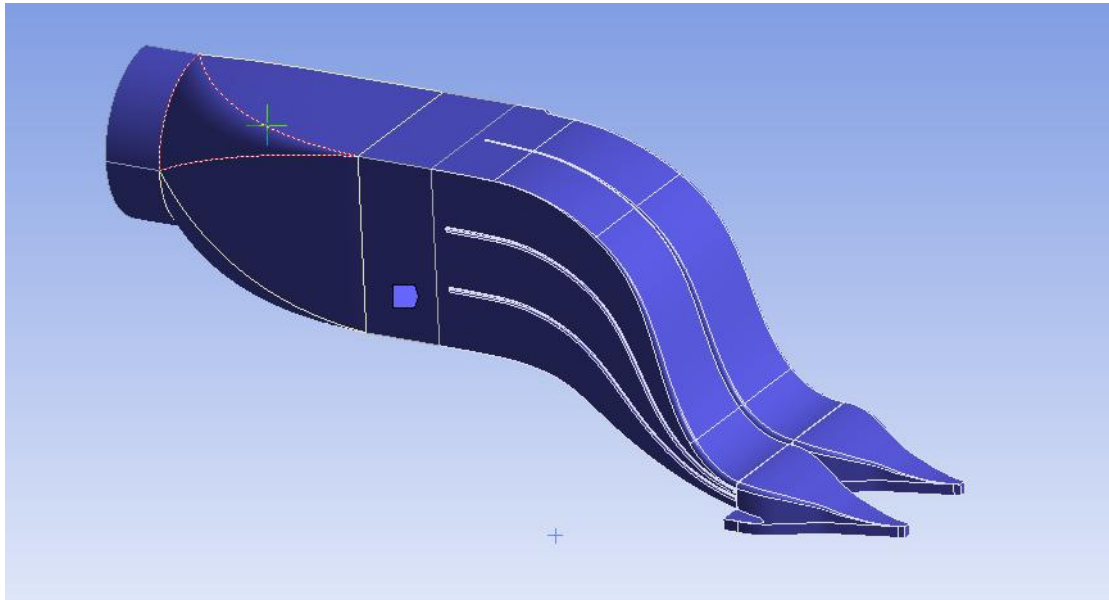
1. Αριθμό επεξεργαστών.
2. Επιλογή για ευθείες ή καμπύλες ακμές στοιχείων.
3. Συμπεριφορά άκαμπτου σώματος στη προσομοίωση.
4. Στρατηγική δημιουργίας τριγωνικού πλέγματος επιφανείας.
5. Έλεγχος προβληματικής γεωμετρίας που επιδέχεται εφαρμογή συνθηκών.
6. Διαχείριση μικρών γεωμετρικών χαρακτηριστικών.
7. Διαχείριση μικρών βρόχων.

Statistics Group

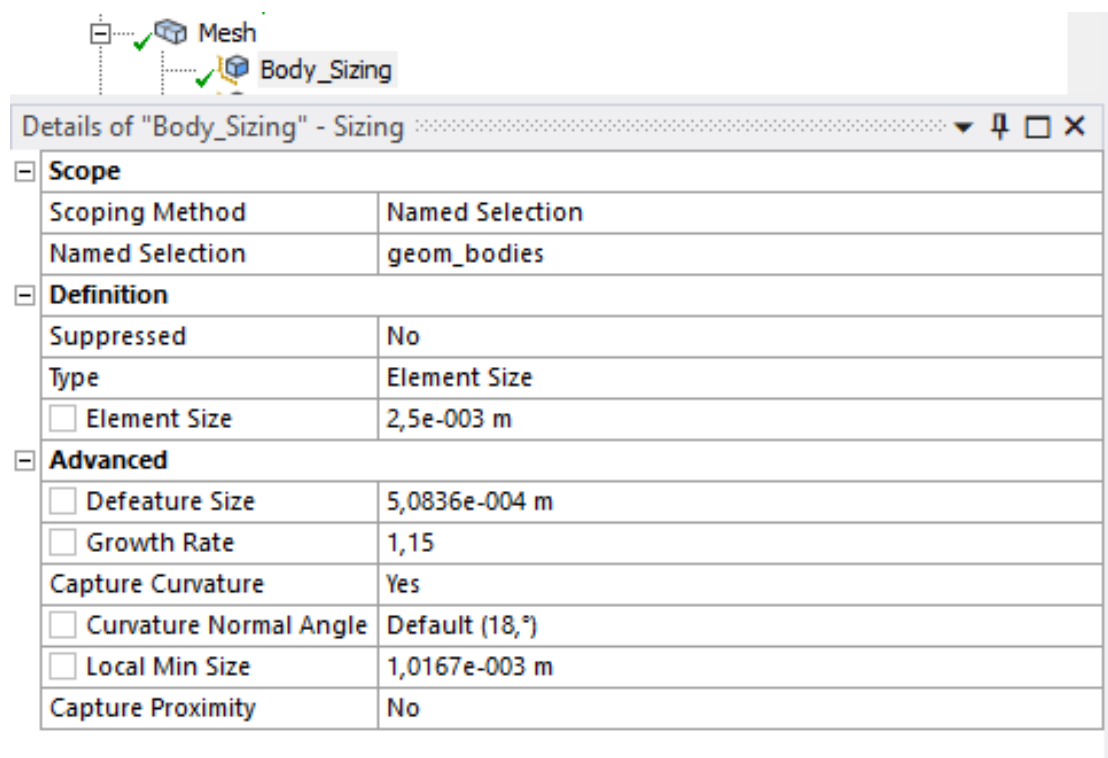
Το σύνολο αυτών των επιλογών επιτρέπει την προβολή πληροφοριών σχετικά με το πλέγμα. Αναλυτικότερα παρέχεται μια επισκόπηση του μεγέθους και την λεπτομέρειας του πλέγματος με βάση του κόμβους και τα στοιχεία.

geom_bodies

Η διαδικασία συνεχίστηκε με τον ορισμό πλέγματος με ειδικότερο τρόπο. Αρχικά μέσω της εντολής "Sizing" επιλέχθηκαν οι όγκοι κατασκευής μέσω του "Name selection" "geom_bodies". Λεπτομέρειες των επιλογών παρουσιάζονται στην Εικόνα 138.



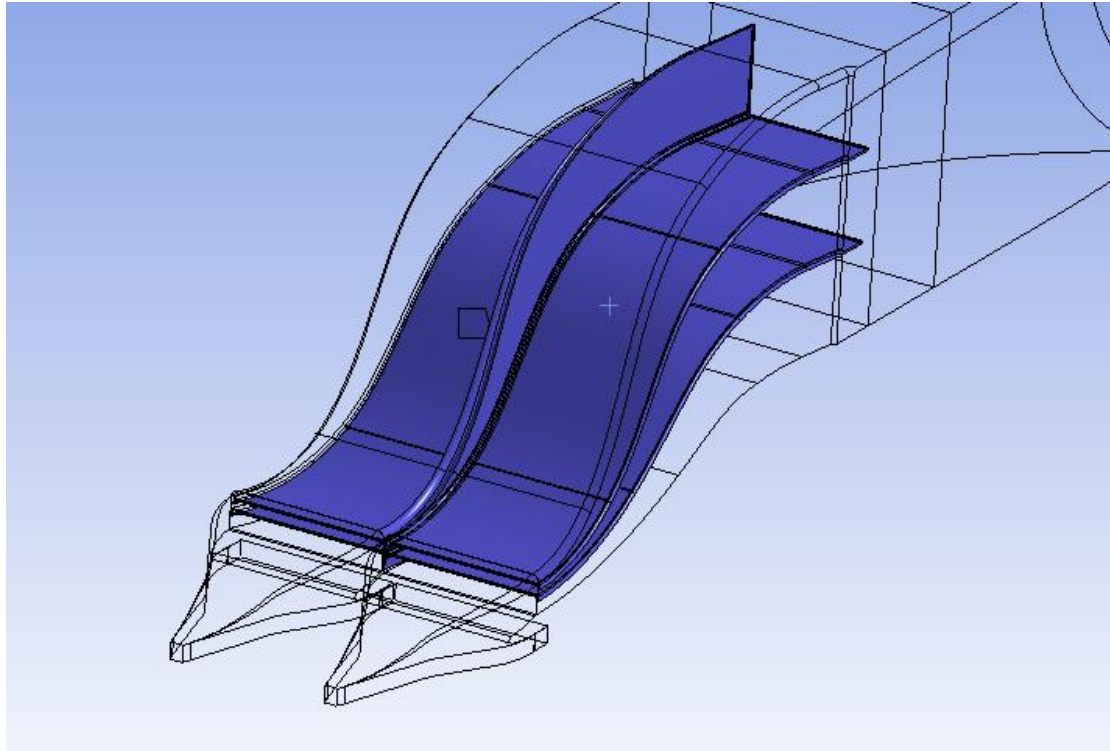
Εικόνα 137 geom_bodies



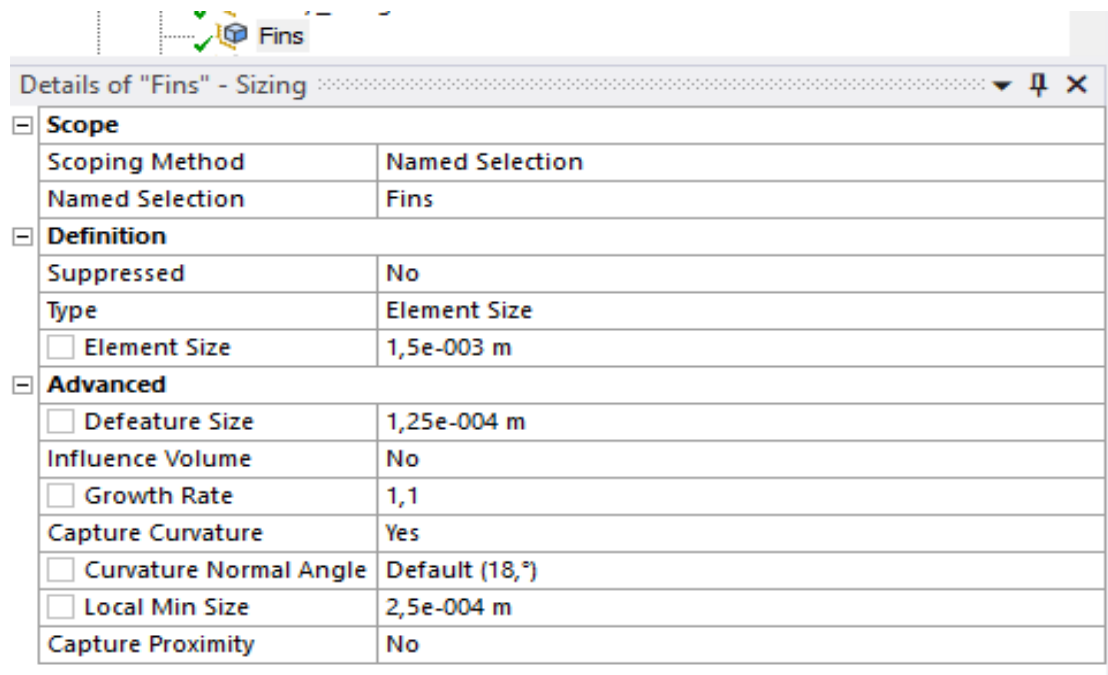
Εικόνα 138 Λεπτομέρειες επιλογών πλέγματος "geom_bodies"

Fins

Έχοντας επιλέξει ως "Name Selection" τα περύγια εφαρμόζεται πάλι τοπικός έλεγχος του πλέγματος. Τα περύγια αποτελούν μείζονος σημασίας κομμάτι της γεωμετρίας, επομένως απαιτείται πυκνότερο πλέγμα, με εφαρμογή στις καμπύλες που τα διέπουν καθώς και πύκνωσή του με στόχο την καλύτερη προσομοίωση. Στην Εικόνα 125 εμφανίζονται οι λεπτομέρειες των μεταβλητών.



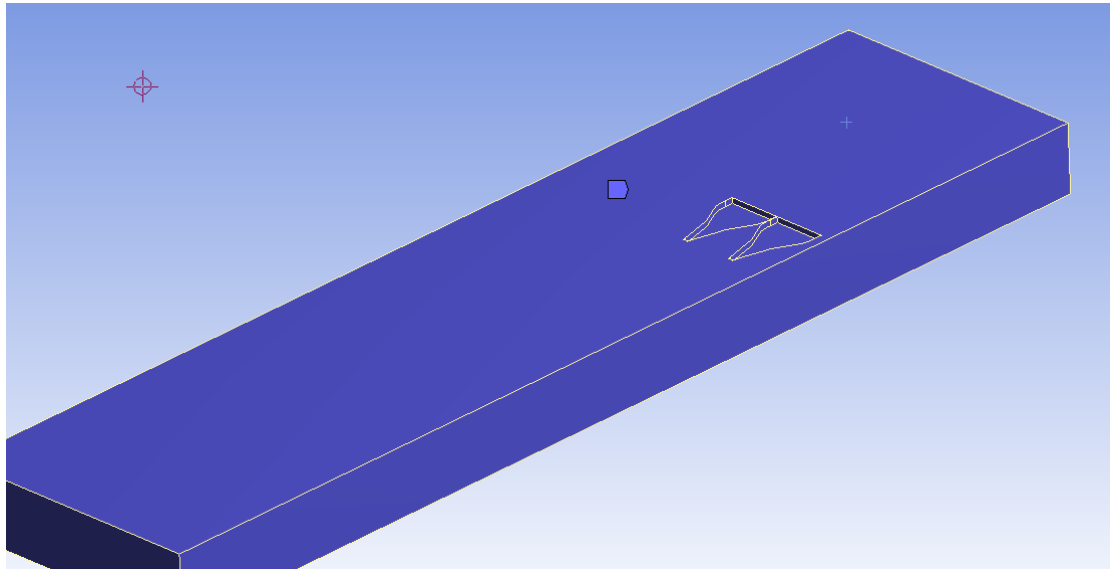
Εικόνα 139 "Fins"



Εικόνα 140 "Sizing" των "Fins"

Ambient

Το περιβάλλον θα χρειαστεί όχι τόσο πυκνό πλέγμα όσο τα υπόλοιπα στοιχεία. Απαιτείται Μεγαλύτερα στοιχεία στην είσοδο και πύκνωση αυτών όσο πλησιάζουν την εισαγωγή των Naca. Επομένως, ορίστηκε νέο "Sizing" περιλαμβάνοντας το "Ambient" και οι μεταβλητές παρουσιάζονται στην Εικόνα 142.



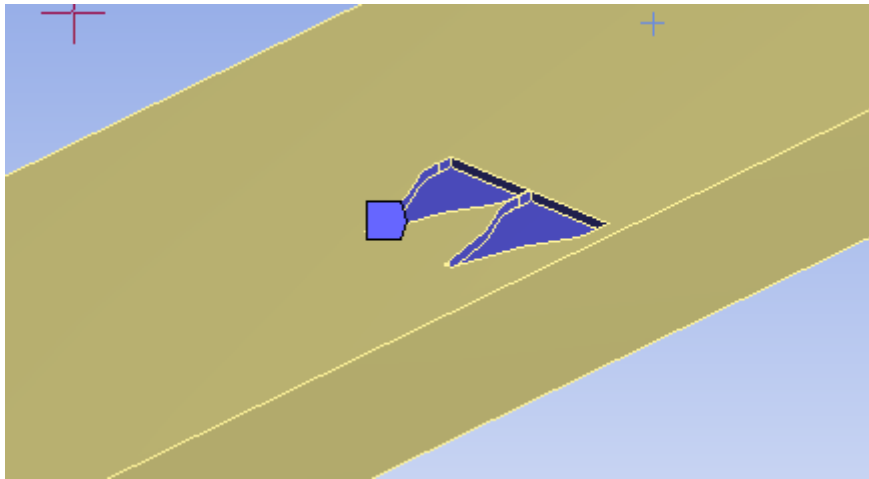
Εικόνα 141 "Ambient"

Details of "Ambient" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Flow_domain_Ambient
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
☐ Element Size	2,7e-002 m
[-] Advanced	
☐ Defeature Size	5,0836e-004 m
Behavior	Soft
☐ Growth Rate	1,2
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

Εικόνα 142 Μεταβλητές "Sizing" του "Ambient"

Naca interfaces

Για να επιτευχθεί σωστή σύγκλιση των στοιχείων που αναφέρθηκε παραπάνω, απαιτείται η επιλογή και ταξινόμηση των διεπαφών των αεραγωγών NACA με το περιβάλλον. Στόχος της σωστής σύγκλισης είναι η αποφυγή υπολογιστικών σφαλμάτων που σχετίζονται με το πλέγμα. Στην Εικόνα 144 παρουσιάζονται οι μεταβλητές.



Εικόνα 143 "Ambient_Naca interfaces"

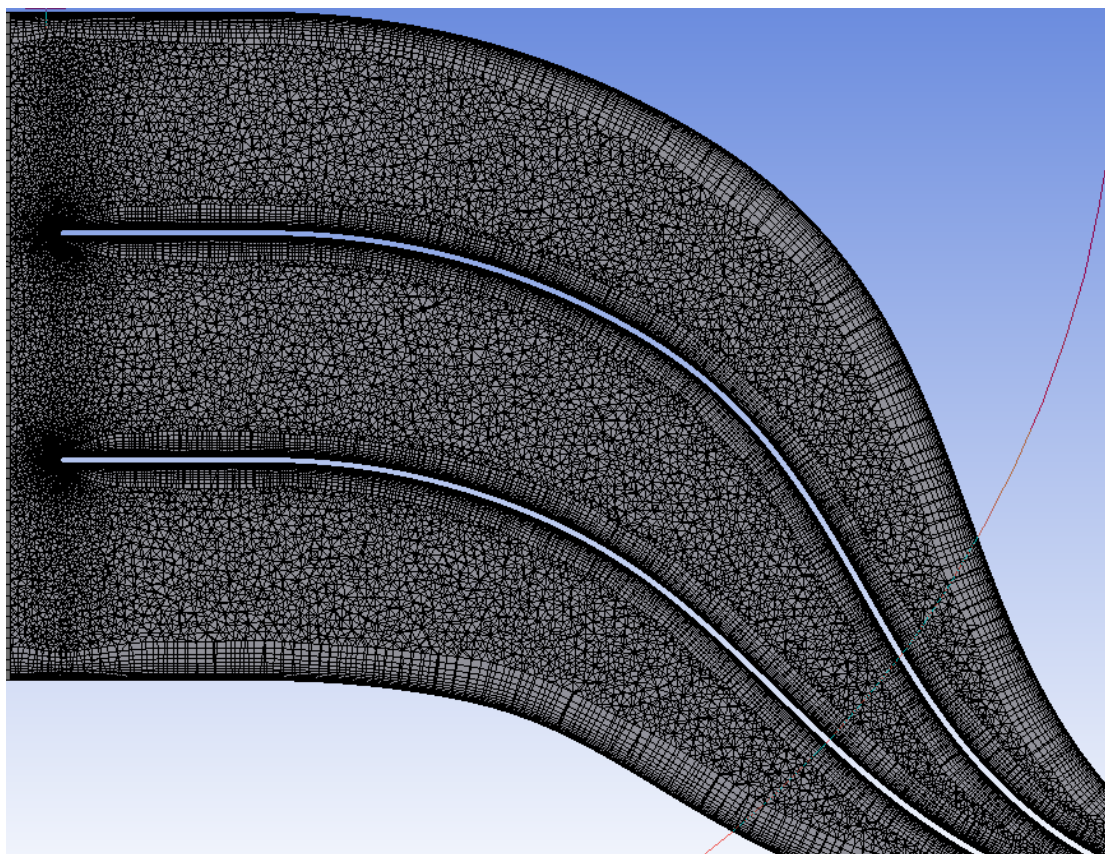
Details of "Interfaces" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Ambient_Naca_Interface
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
☐ Element Size	2,5e-003 m
[-] Advanced	
☐ Defeature Size	5,0836e-004 m
Influence Volume	No
☐ Growth Rate	1,02
Capture Curvature	Yes
☐ Curvature Normal Angle	Default (18,°)
☐ Local Min Size	1,0167e-003 m
Capture Proximity	No

Εικόνα 144 Μεταβλητές "Sizing" του "Ambient_Naca_Interface"

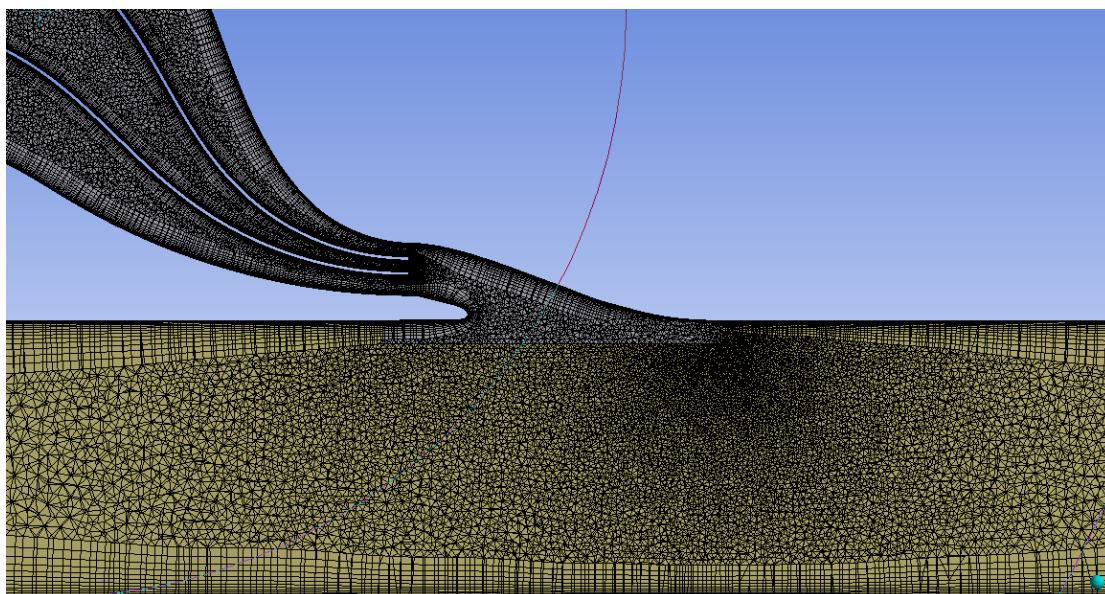
5.6.2.1 Αποτελέσματα πλεγμάτων μοντέλων

Τα αποτελέσματα των πλεγμάτων είναι παρόμοια και για τα δύο μοντέλα επομένως θα γίνει ανασκόπηση μόνο στο μοντέλο Naca_S_duct_2, στο οποίο ξεκίνησε και η ανάλυση στο περιβάλλον του ANSYS CFX.

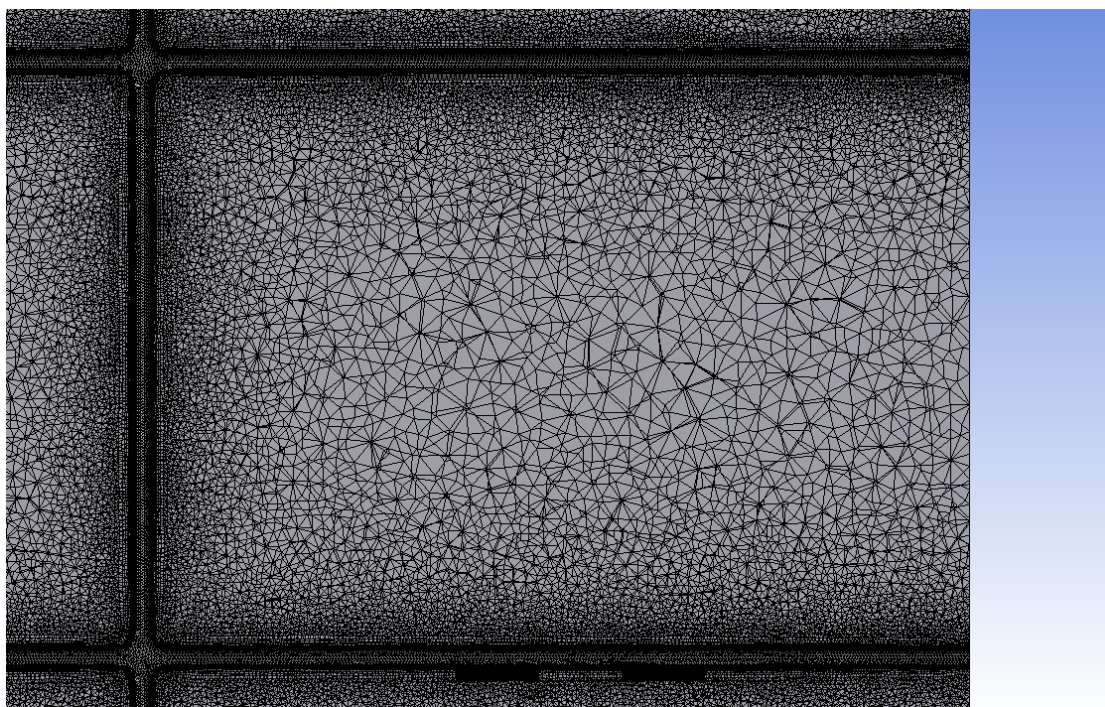
Στο πλέγμα του μοντέλου είναι εμφανή η προσθήκη "Inflation" στις επιφάνειες που αποτελούν τα τοιχώματα τις κατασκευής. Ιδιαίτερα ποιοτικό αποτελεί και στα πτερύγια της διάταξης του S-duct (Εικόνα 145,147). Φαίνεται επίσης η ομαλή πυκνωση όσο πλησιάζει στην εισαγωγή Naca duct, με εμφανείς λεπτομέρειες στην στην κάλυψη των καμπυλών του Naca, ενώ όσο απομακρύνεται στο domain Ambient γίνεται πιο αρεό. (Εικόνα 146). Τέλος η κυψέλη δεν έχει inflation λόγω του ότι προσομοιώνεται ως πορώδες μέσο, ενώ ο διαχύτης και ο ανεμιστήρας αποτελούνται από πυκνό πλέγμα με προσθήκη inflation, για τη σωστή προσομοίωση του οριακού στρώματος.



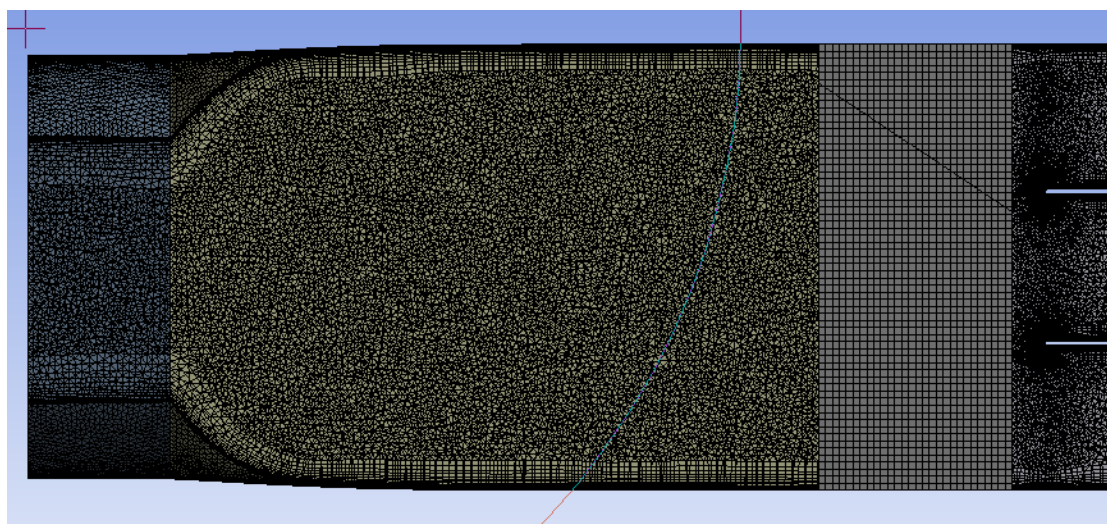
Εικόνα 145 Λεπτομέρεια πλέγματος S-duct



Εικόνα 146 Λεπτομέρεια πλέγματος Ambient, Naca, S-duct



Εικόνα 147 Λεπτομέρεια πλέγματος καναλιού



Εικόνα 148 Λεπτομέρεια πλέγματος κυψέλης, διαχύτη, ανεμιστήρα

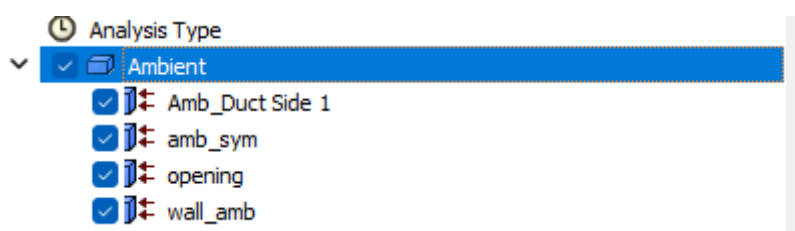
5.6.3 ANSYS CFX-Pre

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η διαδικασία στησίματος του προβλήματος. Θα στηθούν δύο προβλήματα για κάθε μοντέλο, ένα για στάσιμο όχημα και ένα για κινούμενο με 25 km/h. Επομένως, προσομοιώθηκαν τέσσερα φυσικά προβλήματα, όμως θα παρουσιαστούν μόνο τα δύο του Naca_S-duct_2. Όλες οι προσομοιώσεις αφορούν ("Steady State") μόνιμες καταστάσεις.

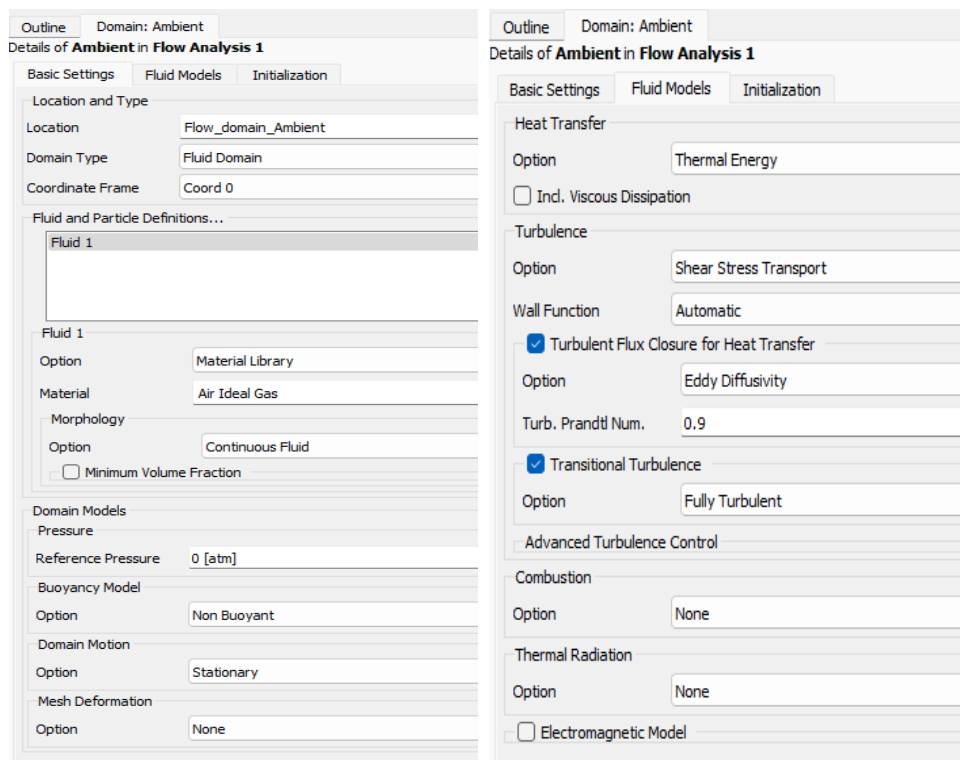
Στάσιμο όχημα

Ορισμός "Flow Domains"

Η διαδικασία ξεκινάει με τον ορισμό του περιβάλλοντος αέρα ως ένα "Domain" και ορίζονται οι οριακές επιφάνειες του. Ο ορισμός του περιβάλλοντος αέρα παρουσιάζεται στην Εικόνα 149. Αναλυτικότερα, επιλέγεται το "Name selection" του "Ambient" στην επιλογή "Location", το είδος του ως "Fluid Domain". Έπειτα επιλέγεται το ρευστό από το "Material" ως "Air Ideal Gas" με μορφολογία "Continuous Fluid", πίεση αναφοράς "0 atm", μη επίδραση της άνωσης "Non Buoyant", στατικό "Domain" και μη παραμορφώσιμο "Mesh Deformation= None". Σειρά παίρνει η καρτέλα "Fluid Models" και ορίζεται "Option" να είναι "Thermal Energy" καθώς επιθυμείτε η μεταφορά θερμότητας να λαμβάνεται υπόψιν μέσω θερμικής ενέργειας και μοντέλο στροβιλισμού "Shear Stress Transport", "Wall function" ως "Automatic" για αυτόματη επιλογή συναρτήσεων τοίχου, Η επιλογή "Eddy diffusivity" αναφέρεται στο πως η τυρβώδης ροή επηρεάζει τη μεταφορά θερμότητας στο ρευστό, επιθυμείται λοιπόν ο συνυπολογισμός της επιπλέον θερμικής διάχυσης λόγω τυρβωδών στροβιλισμών με "Prandtl number" ίσο με 0,9. Ενεργοποιείται το "Transition Turbulence" με παραδοχή "Fully Turbulent", τέλος δεν λαμβάνονται υπόψιν τα φαινόμενα καύσης και θερμικής ακτινοβολίας.

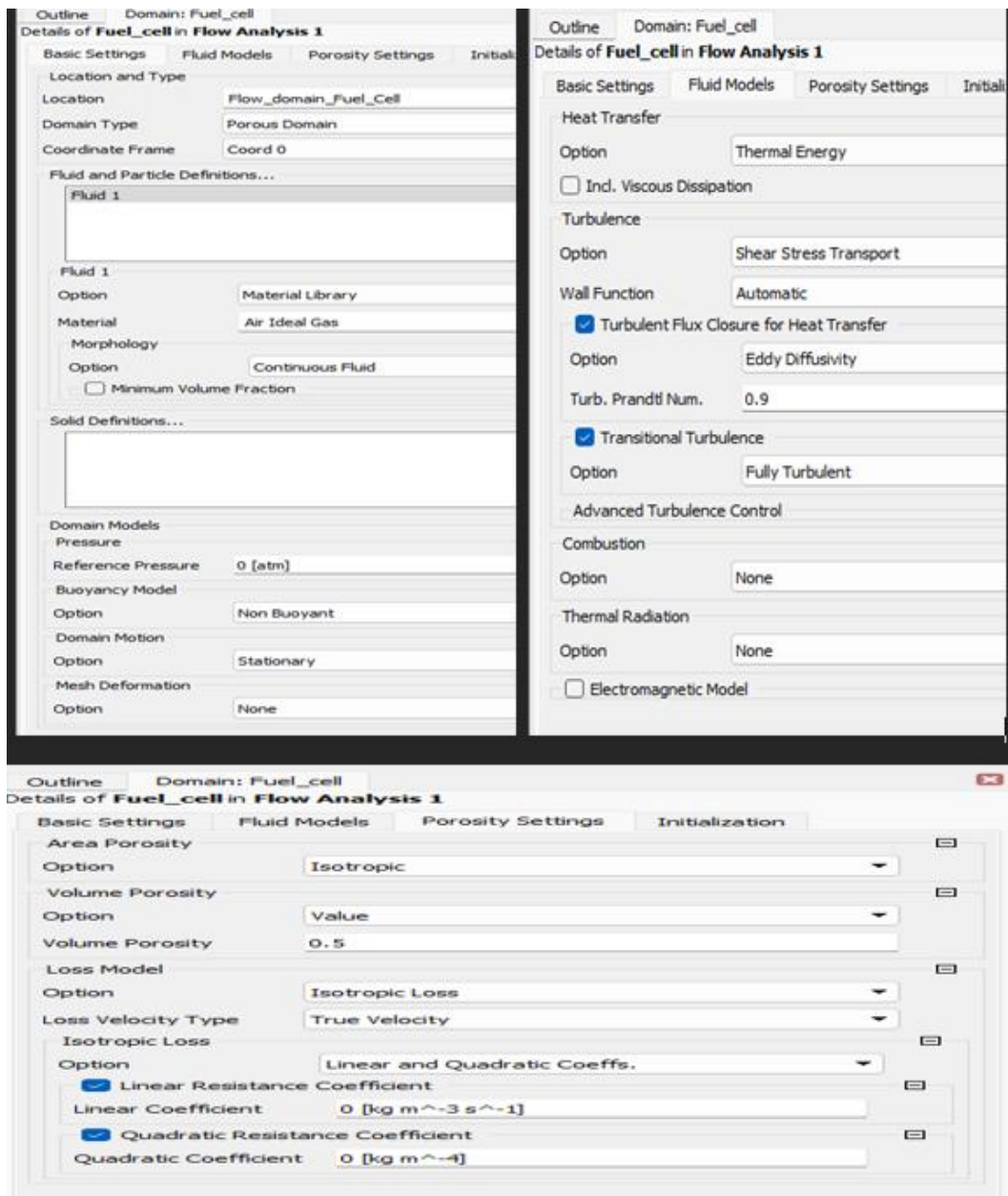


Εικόνα 149 "Domain Ambient"



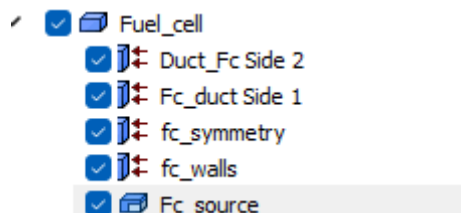
Εικόνα 150 Ορισμός ιδιοτήτων "Ambient Domain".

Σημειώνεται ότι οι ιδιότητες αυτές ορίζονται αυτούσιες και για τους όγκους πεδίων ροής των "Naca_S-duct", "Diffuser", "Fan". Η κυψέλη καυσίμου επιδέχεται διαφορετικό χειρισμό καθώς λαμβάνεται υπόψιν ως πορώδες μέσο. Επομένως, ορίζεται και πάλι "Domain" και εισάγονται οι ιδιότητες. Επιλέγεται το πεδίου "Fuel Cell" και ορίζεται ως πορώδες μέσω (Porous Domain). Το είδος του ρευστού διατηρεί τις επιλογές όπως αναλύθηκε παραπάνω καθώς και η καρτέλα "Fluid Models". Στην καρτέλα "Porosity Settings" διαμορφώνεται το μοντέλο του πορώδες μέσου. Εφαρμόζεται ισότροπο μοντέλο με συντελεστή 0.5 που σημαίνει ότι το 50% του συνολικού όγκου είναι διαθέσιμο για ροή. Μοντέλο απωλειών ορίστηκε ισότροπο με ταχύτητα "True Velocity". Τέλος, οι συντελεστές "Linear Coefficient" και "Quadratic Coefficient" αφήνονται στο 0 επομένως δεν υπάρχουν απώλειες πίεσης κατά τη διάσχιση εντός του πορώδες μέσου.

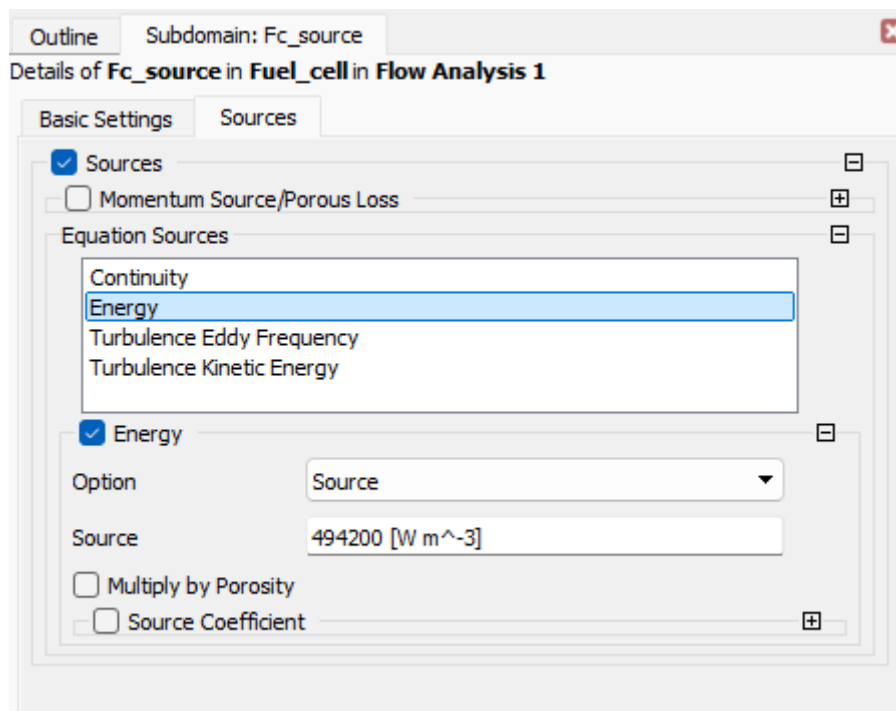


Εικόνα 151 Ορισμός ιδιοτήτων "Fuel cell Domain"

Στο στάδιο αυτό εφόσον έχει οριστεί το "Domain Fuel Cell", θα χρειαστεί να δημιουργηθεί ένα "Subdomain" ώστε να εφαρμοστεί η πηγή θερμότητας, δηλαδή να ληφθεί υπόψη η θερμότητα που παράγει η κυψέλη. Αναλυτικότερα, επιλέγεται το "Source" και έπειτα το "Energy" και εισάγεται το ποσό έκλυσης.



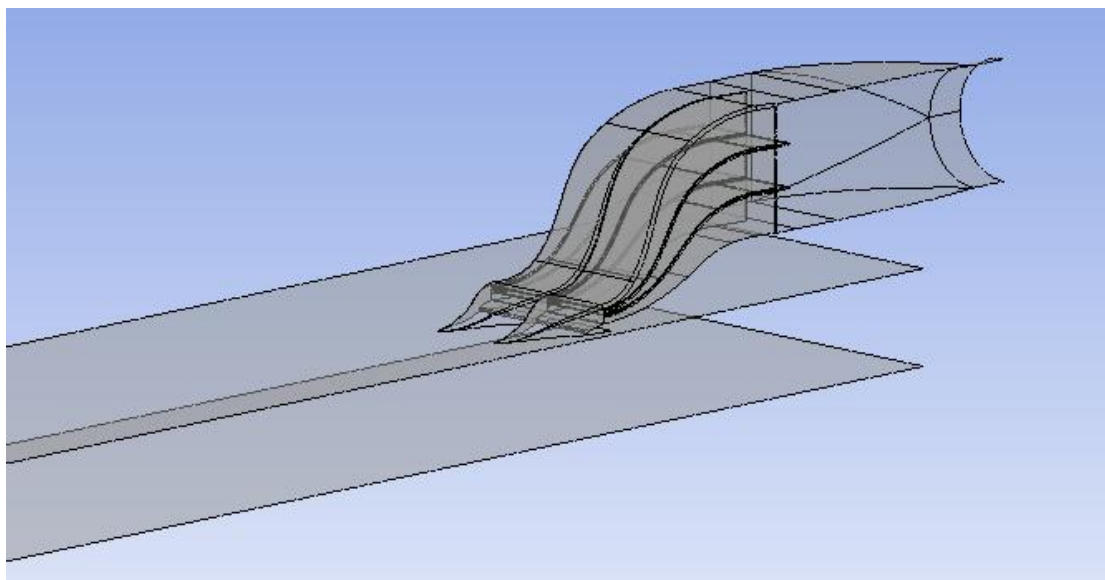
Εικόνα 152 Ορισμός "Domain" και "Subdomain"



Εικόνα 153 Εφαρμογή ιδιοτήτων για τη πηγή θερμότητας.

Ορισμός οριακών συνθηκών

Αρχικά ορίστηκαν τα τοιχώματα της κατασκευής. Στην Εικόνα 150 απομονώθηκαν ώστε να γίνουν ευκολότερα αντιληπτά από τον αναγνώστη. Εκτός των τοιχωμάτων των κατασκευάσιμων αντικειμένων ορίστηκε ως τοίχωμα το άνω και κάτω μέρος του περιβάλλοντος αέρα, εφόσον κατά τη προσομοίωση ορίζεται στάσιμο όχημα αυτά θεωρούνται σταθερά. Επομένως, έχουμε μηδενική ταχύτητα του ρευστού στο τοίχωμα ως “No slip wall” και “Adiabatic” καθώς δεν υπάρχει ροή θερμότητας δια μέσω αυτών (Εικόνα 154).

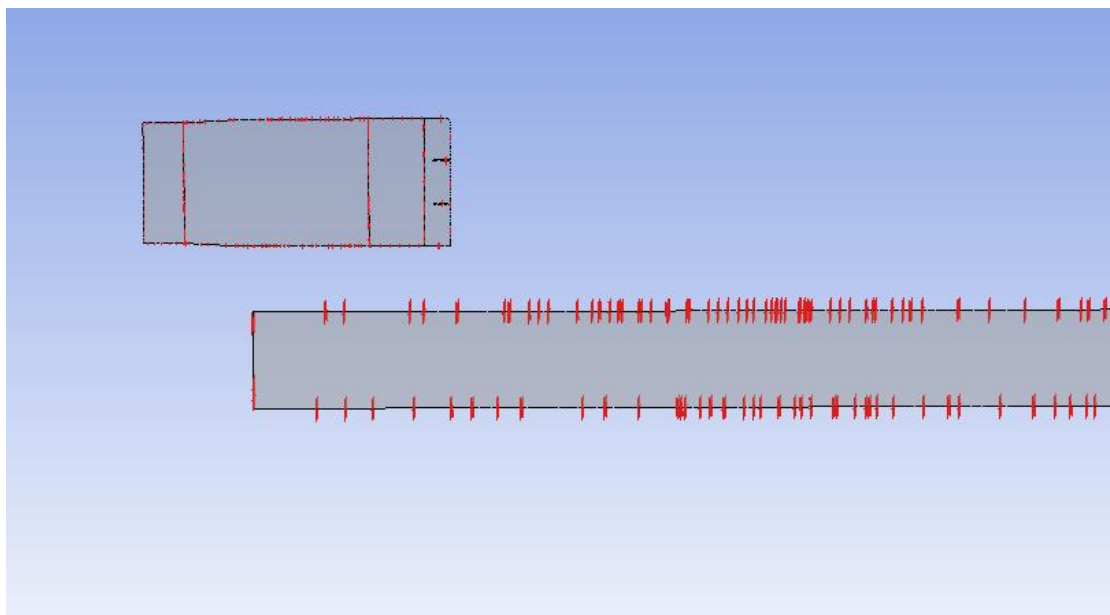


Εικόνα 154 Τοιχώματα κατασκευής



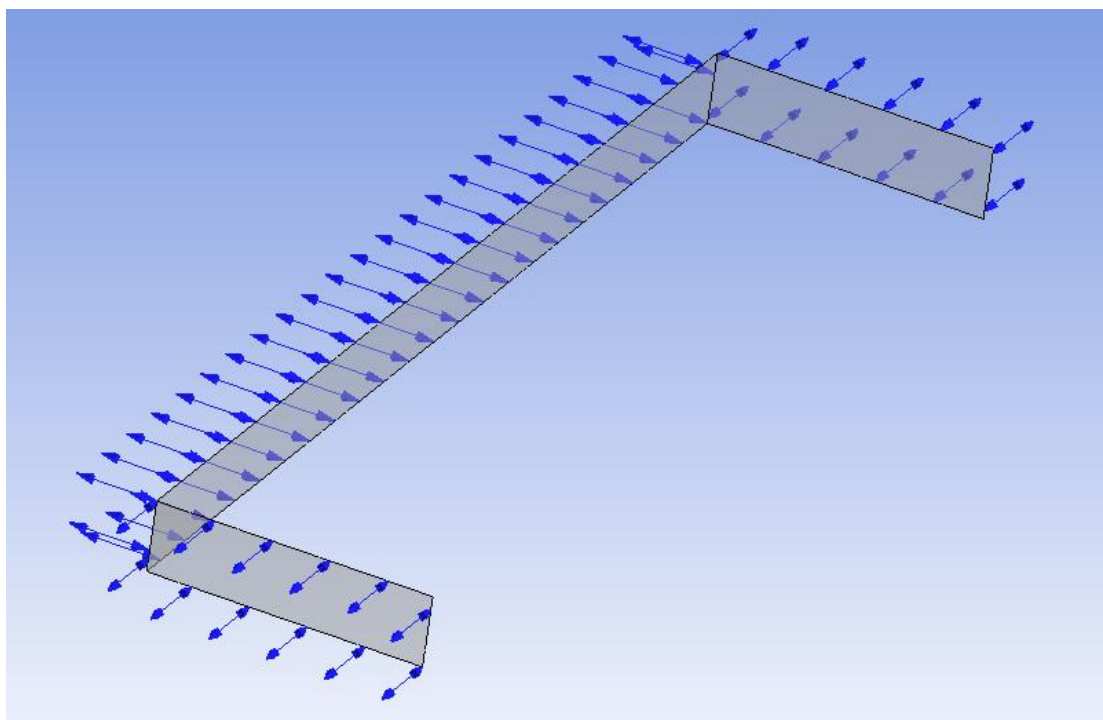
Εικόνα 155 Ιδιότητες τοιχωμάτων

Στη συνέχεια ορίζονται οι επιφάνειες που αποτελούν συμμετρικές (Εικόνα 156)

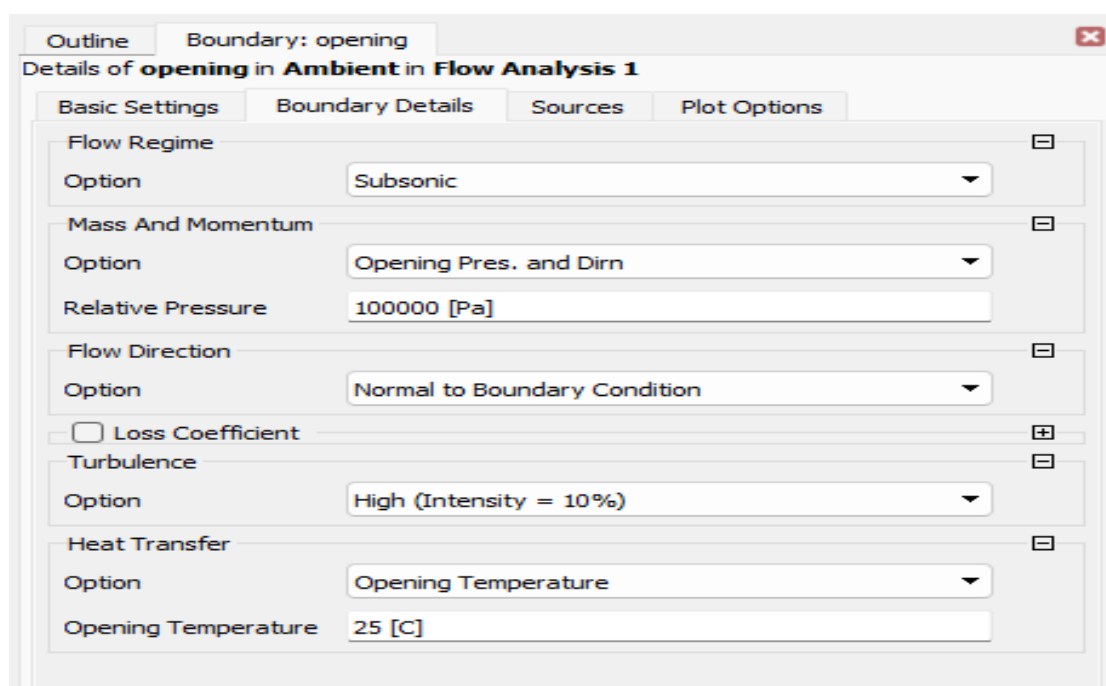


Εικόνα 156 Συμμετρικές επιφάνειες

Ορίζονται τα ανοίγματα από όπου μπορεί να περάσει αέρας είτε εισερχόμενος είτε εξερχόμενος από το περιβάλλον. Επομένως στην Εικόνα 157, φαίνονται ξεκάθαρα τα ανοίγματα καθώς το όχημα προσομοιώνεται ως ακίνητο. Επιλέγονται λοιπόν οι ιδιότητες, της υποηχητικής ροής, η σχετική πίεση να είναι 100000 Pa, με κατεύθυνση ροής κάθετη στην επιφάνεια, η θερμοκρασία ίση με 25 °C και ‘‘high density option’’ ίσο με 10%, επιλογή που σιγουρεύει αριθμητική σταθερότητα όπου παρουσιαστούν μεταβολές της πυκνότητας.

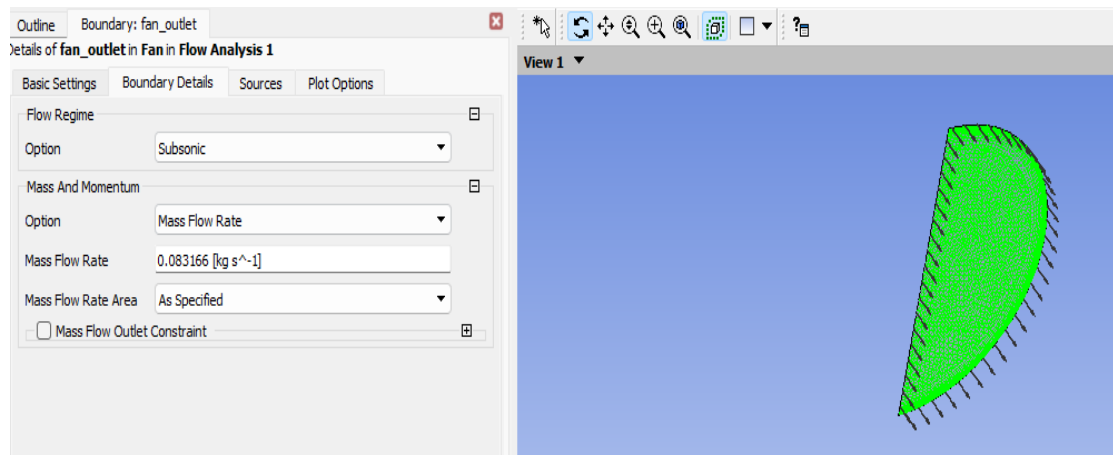


Εικόνα 157 Ανοίγματα περιβάλλοντος αέρα



Εικόνα 158 Ιδιότητες "Opening"

Τέλος ορίστηκε η επιφάνεια εξόδου του ανεμιστήρα ως "Outlet". Οι ιδιότητες που εφαρμόστηκαν είναι "Subsonic", με ρυθμό μάζας ανεμιστήρα 0,083166 kg/s.

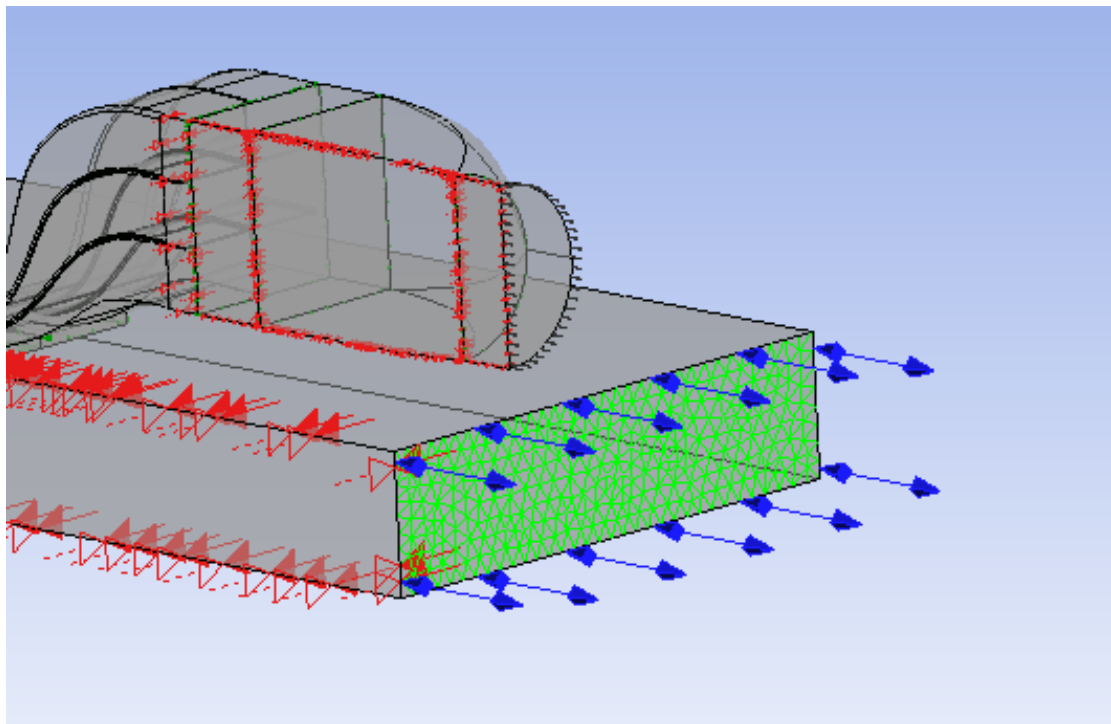


Εικόνα 159 "Outlet".

Κινούμενο όχημα

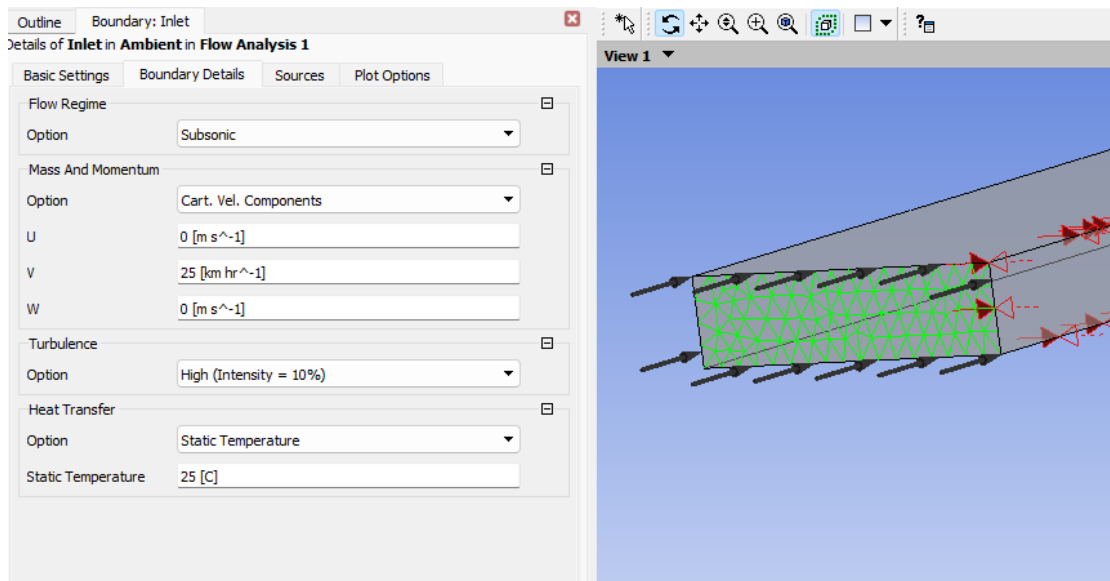
Στην περίπτωση που το αυτοκίνητο θεωρείται ότι κινείται, ο ορισμός του φυσικού προβλήματος διαφέρει ελαφρώς. Οι αλλαγές που προκύπτουν είναι οι εξής.

Ως "opening" αναδιατάσσονται οι επιφάνειες και ορίζεται μόνο αυτή της πίσω πλευράς του "Ambient", ενώ οι ιδιότητες παραμένουν ίδιες με παραπάνω (στάσιμο όχημα).



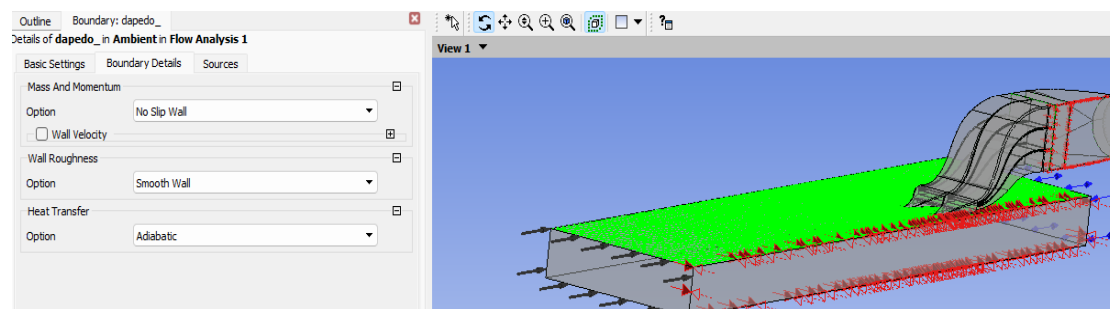
Εικόνα 160 "Opening" κινούμενου αυτοκινήτου

Έπειτα ορίζεται "Inlet". Η εξήγηση του ορισμού του προβλήματος με τον τρόπο αυτό είναι η μεθοδολογία που προσομοιώνει ουσιαστικά την εξωτερική ροή του περιβάλλοντος αέρα γύρω από ακίνητο όχημα. Επιλέγεται, λοιπόν, ροή "Subsonic" και ταχύτητα στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων κάθετα στην επιφάνεια εισαγωγής ίση με 25 km/h. Υψηλή ένταση της τύρβης "High (Intensity=10%) και η θερμοκρασία ως στατική και ίση με 25 °C .



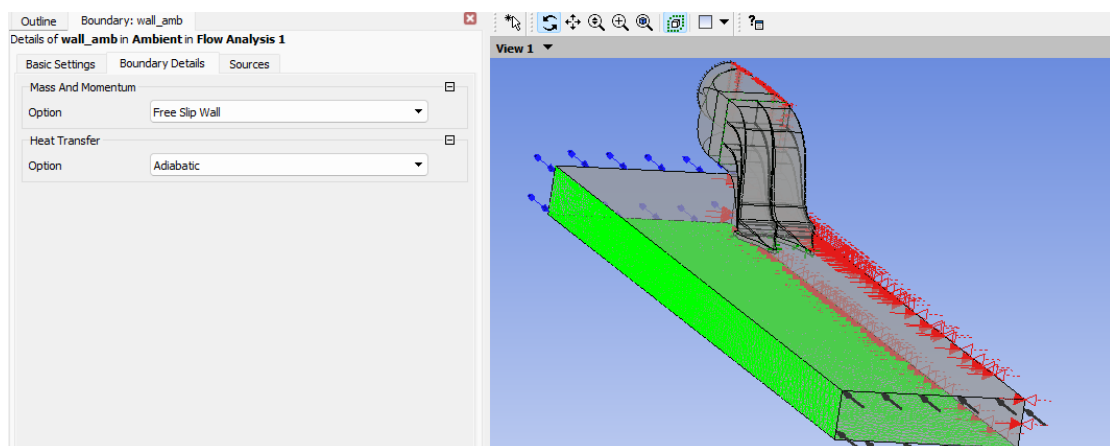
Εικόνα 161 " Inlet"

Το δάπεδο (Εικόνα 162) προσομοιώνεται ως "Wall" με επιλογή "No slip wall" δηλαδή το ρευστό "κολλάει" στο δάπεδο για τη σωστή αναπαράσταση του οριακού στρώματος, λεία επιφάνεια "Smooth Wall" και ως αδιαβατικό.



Εικόνα 162 Δάπεδο

Ενώ ως τοιχώματα "Wall" ορίζονται αυτά της Εικόνας 163 (πράσινο χρώμα). Επιλέγεται "Free Slip Wall" δηλαδή το ρευστό γλιστράει στο τοίχωμα χωρίς να χάνει κινητική ενέργεια και να μη δημιουργείται οριακό στρώμα και ως αδιαβατικά.

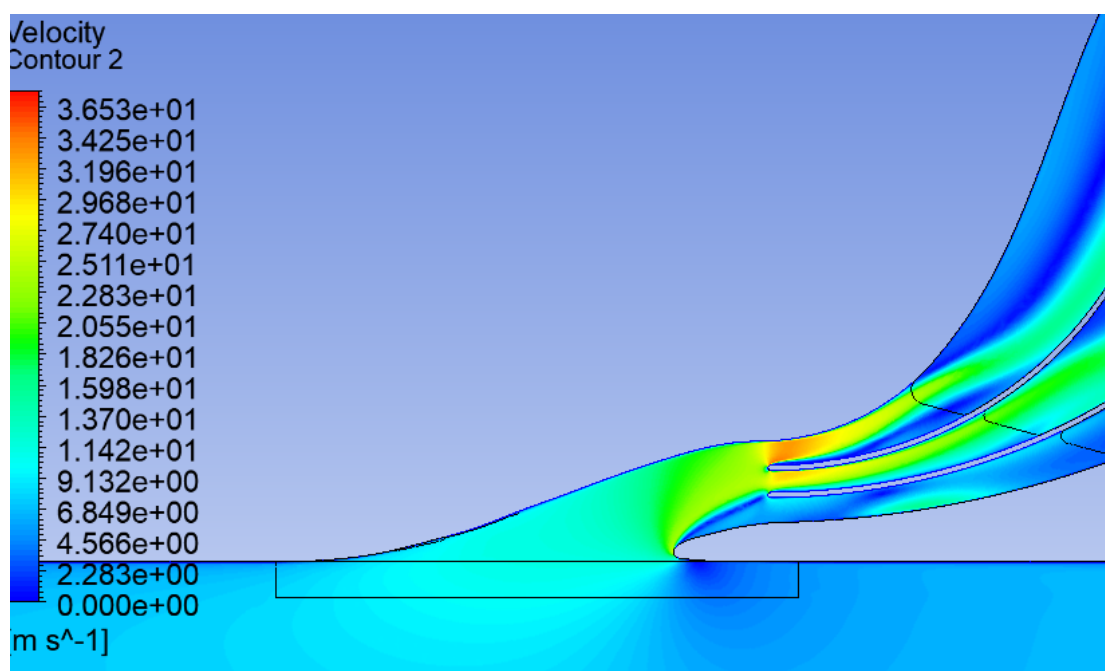


Εικόνα 163 Τοιχώματα "Ambient domain".

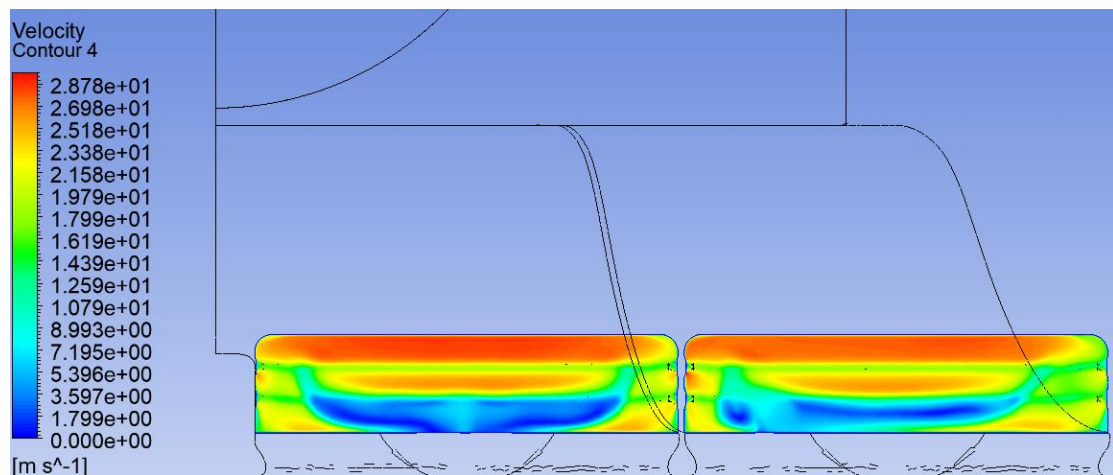
6 Αποτελέσματα

6.1 Naca-S_duct_1(στάσιμο όχημα)

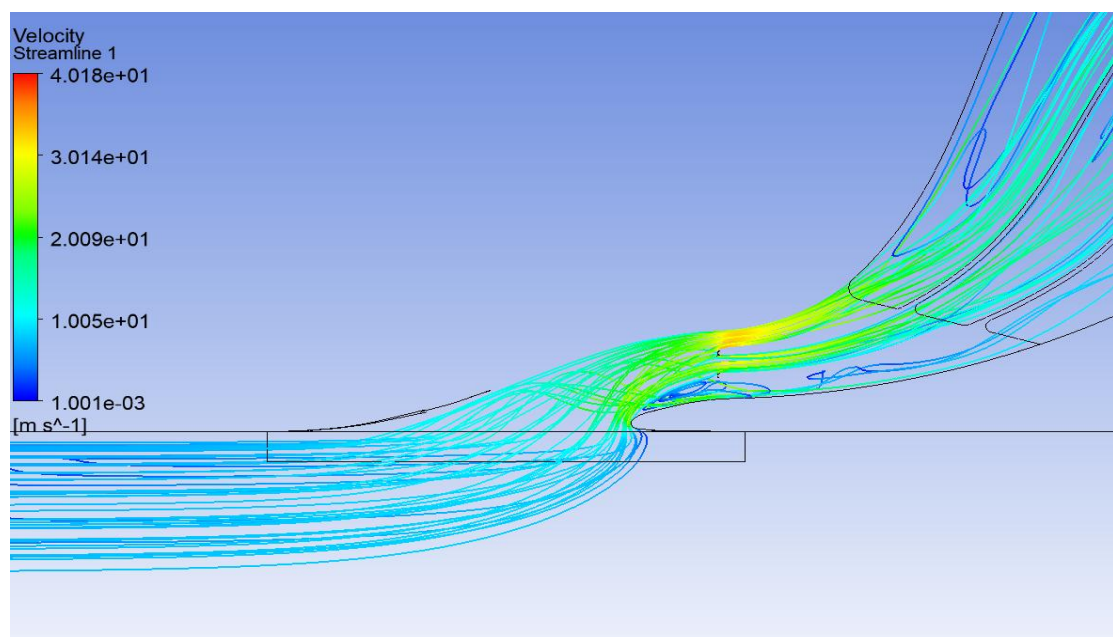
Το μοντέλο Naca-S_duct_1, έχει τροποποιηθεί σε σχέση με το B-2 NACA S DUCT (ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ-ΙΑΣΟΝΑΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ , Ιούλιος 2023) . Αρχικά, μετακινήθηκε η κυψέλη προσδίδοντας μεγαλύτερο χώρο στην ανάπτυξη του αεραγωγού S-duct καθώς και προστέθηκε νέο χείλος προσβολής, νέα γεωμετρία καμπυλών Naca duct καθώς και βελτιώθηκε ο αεραγωγός S-duct ως προς τις κύριες διαστάσεις του. Τα αποτελέσματα αυτά οδήγησαν σε σαφή βελτίωση αρχικά στη περιοχή εισόδου των αεραγωγών. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 164 αυξήθηκε η τοπική ταχύτητα εισόδου σε 36,5 m/s, αύξηση που αποτελεί 20% σε σχέση με το μοντέλο B-2 NACA S DUCT. Η εγκάρσια τομή της εισόδου, παρουσιάζει ανομοιογένεια στη ροή. Ενώ υπάρχει σχετική ομοιομορφία μεταξύ των προφίλ τοπικών ταχυτήτων των δύο αεραγωγών NACA, εμφανίζεται περιορισμένη τροφοδοσία στο κεντρικό τμήμα του κάτω καναλιού. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν περιοχές κοντά στις άκρες των αεραγωγών Naca του κάτω καναλιού που εξισορροπούν το πρόβλημα αυτό καθώς εμφανίζεται η ροή στις περιοχές αυτές με υψηλές ταχύτητες (Εικόνα 165). Επιπρόσθετα παρατηρείται βελτίωση ως προς την ομοιομορφία που παρουσιάζει η ροή σε κάθε ένα κανάλι ξεχωριστά και στους δύο αεραγωγούς NACA ενώ αυξήθηκε και η ταχύτητα κατά 2.5%.



Εικόνα 164 Τομή επιπέδου, τοπική ταχύτητα Naca-duct

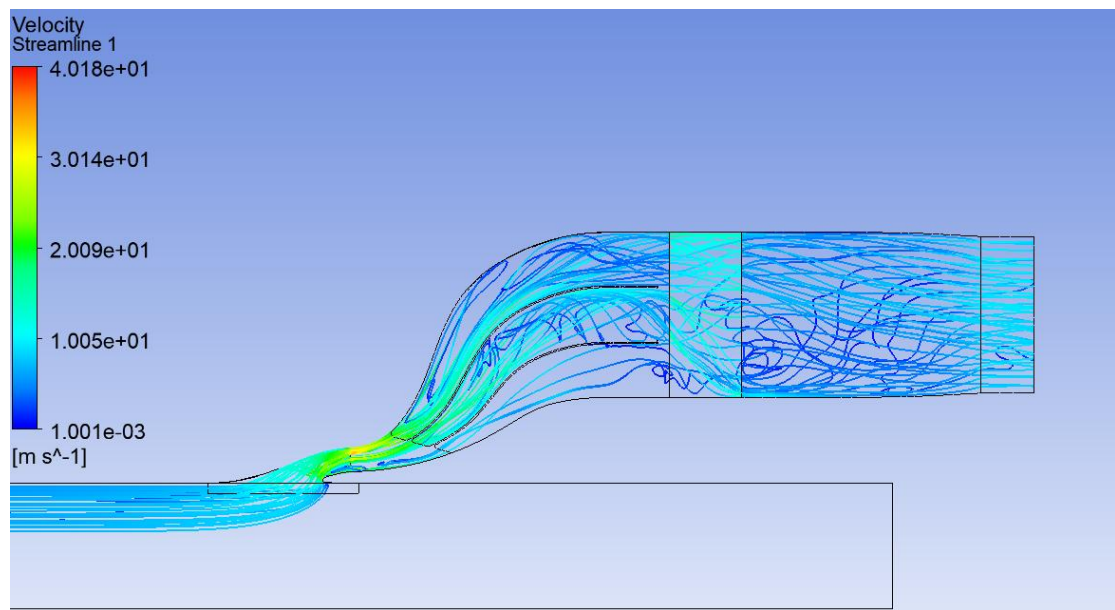


Εικόνα 165 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής αγωγού S-εξόδου Naca

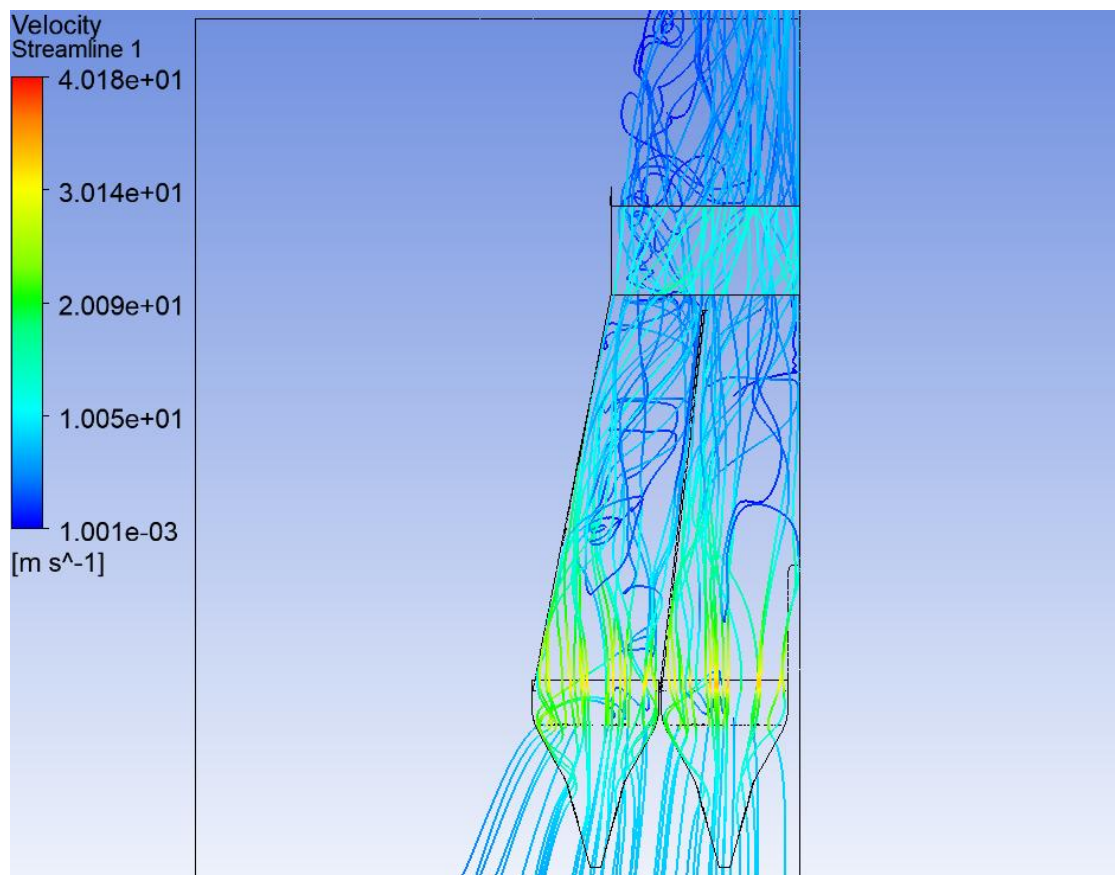


Εικόνα 166 Ποικές γραμμές , περιοχή Naca duct

Όσο αναφορά την επιμήκυνση του αεραγωγού S-duct, φαίνεται πως παρουσίασε καλά αποτελέσματα. Η ροή είναι ομαλή και σταθερή με σταδιακή επιτάχυνση, έχουν μειωθεί οι στρόβιλοι στα κανάλια του αεραγωγού, με εμφανή βελτίωση στο μεσαίο κανάλι. Το τρίτο κανάλι όμως συνεχίζει να παρουσιάζει μειωμένη τροφοδοσία γεγονός που δηλώνει υποεκμετάλλευση του όγκου του με συνέπεια πολλές νεκρές περιοχές. Επιπρόσθετα Εικόνα 168 εντοπίζονται δύο περιοχές όπου αποτυπώνεται αποκόλληση του οριακού στρώματος με επακόλουθο έντονους στροβιλισμούς της ροής. Το πρώτο είναι το τέλος της αποκοπής που έχει σχεδιαστεί στον αεραγωγό με σκοπό την αποφυγή της δοκού και το δεύτερο είναι η προσέγγιση του αεραγωγού S-duct στην κυψέλη από την αριστερή πλευρά, στην οποία δημιουργείται έντονη γωνία. Οι δύο παραπάνω περιοχές αποτελούν και σκοπό της δημιουργίας του δεύτερου μοντέλου Naca_S-duct_2.

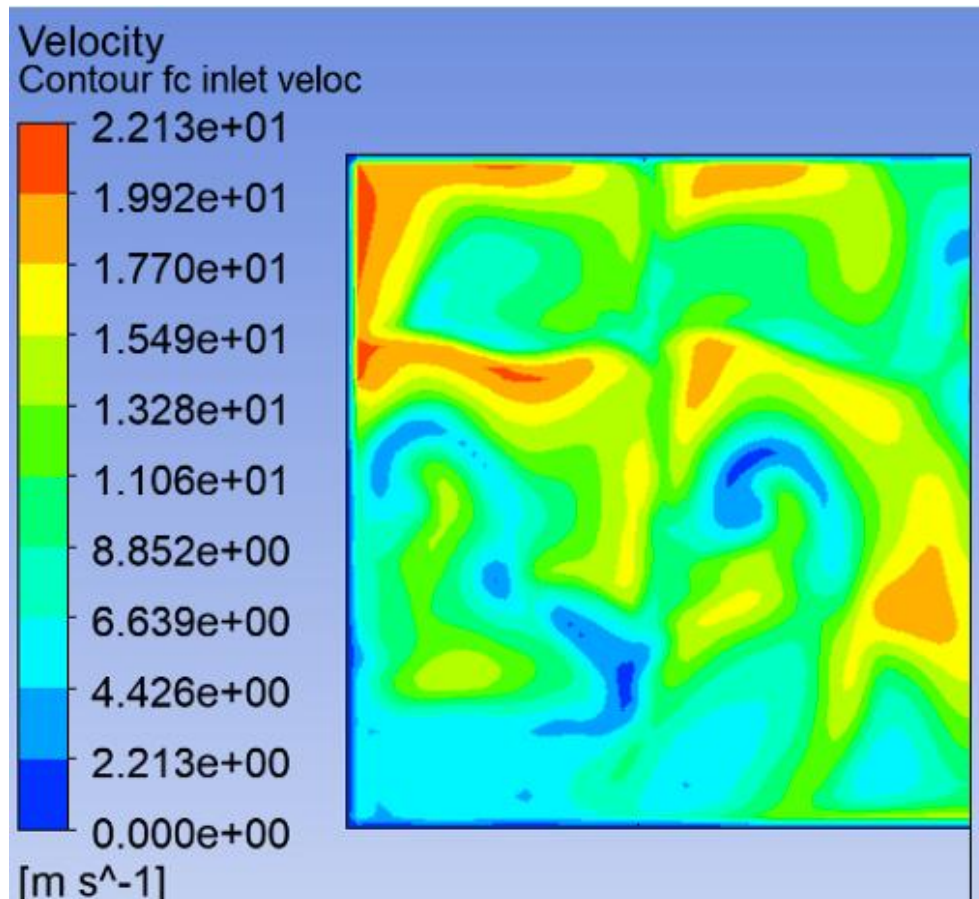


Εικόνα 167 Ροικές γραμμές

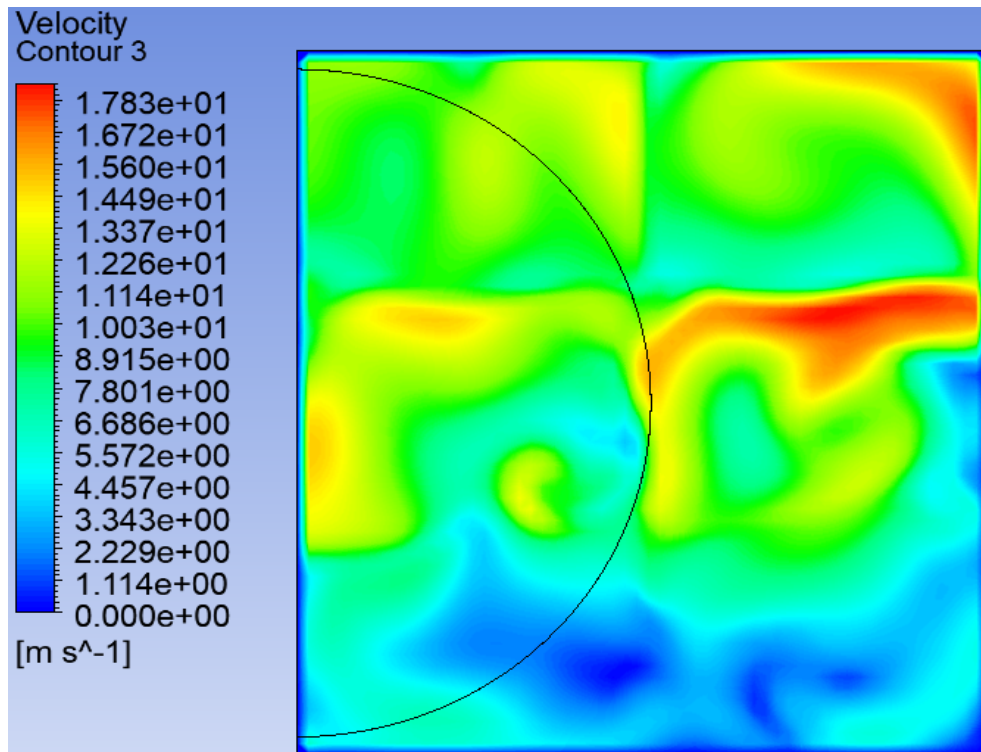


Εικόνα 168 Γραμμές ροή , κάτοψη

Τα φαινόμενα που σχολιάστηκαν παραπάνω οδηγούν στο προφίλ ταχύτητας στην είσοδο της κυψέλης της Εικόνας 169. Σε σχέση με το μοντέλο 2 NACA S DUCT(ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ-ΙΑΣΟΝΑΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ , Ιούλιος 2023) , η ροή είναι λιγότερο στροβιλώδης. Εμφανίζει μια καλύτερη ομοιομορφία στα δύο πάνω κανάλια, όμως συνεχίζει να παρουσιάζει άνιση κατανομή στον κατακόρυφο άξονα λόγω της περιορισμένης τροφοδοσίας του κάτω αεραγωγού.

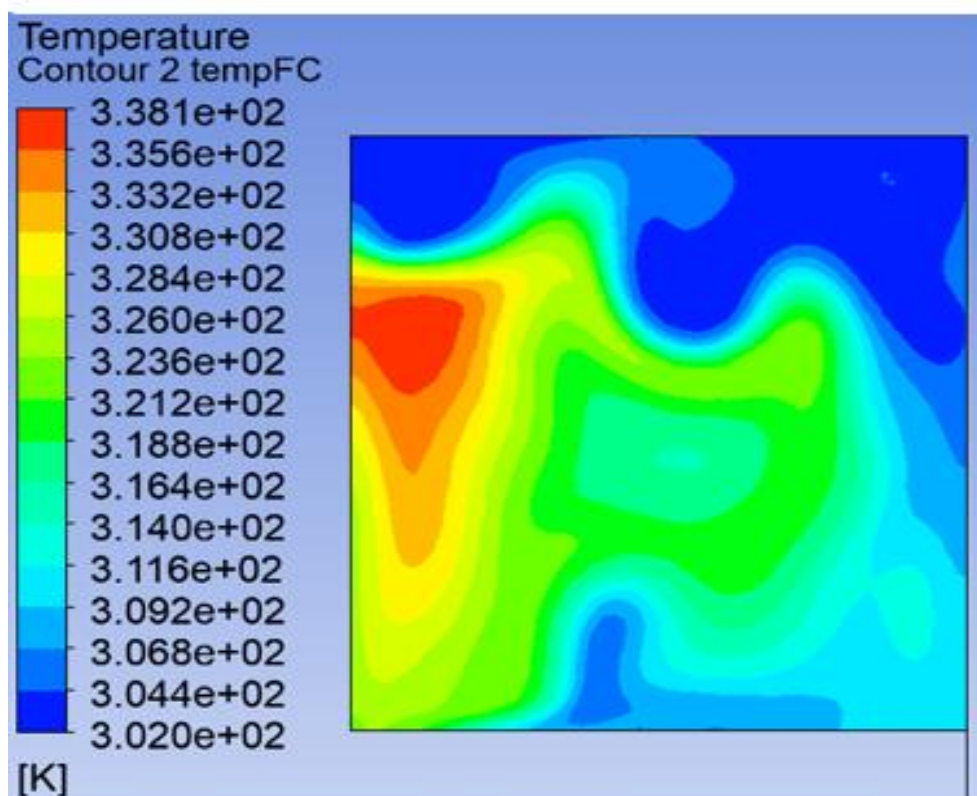


Εικόνα 169 Τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, μοντέλο 2 NACA S DUCT

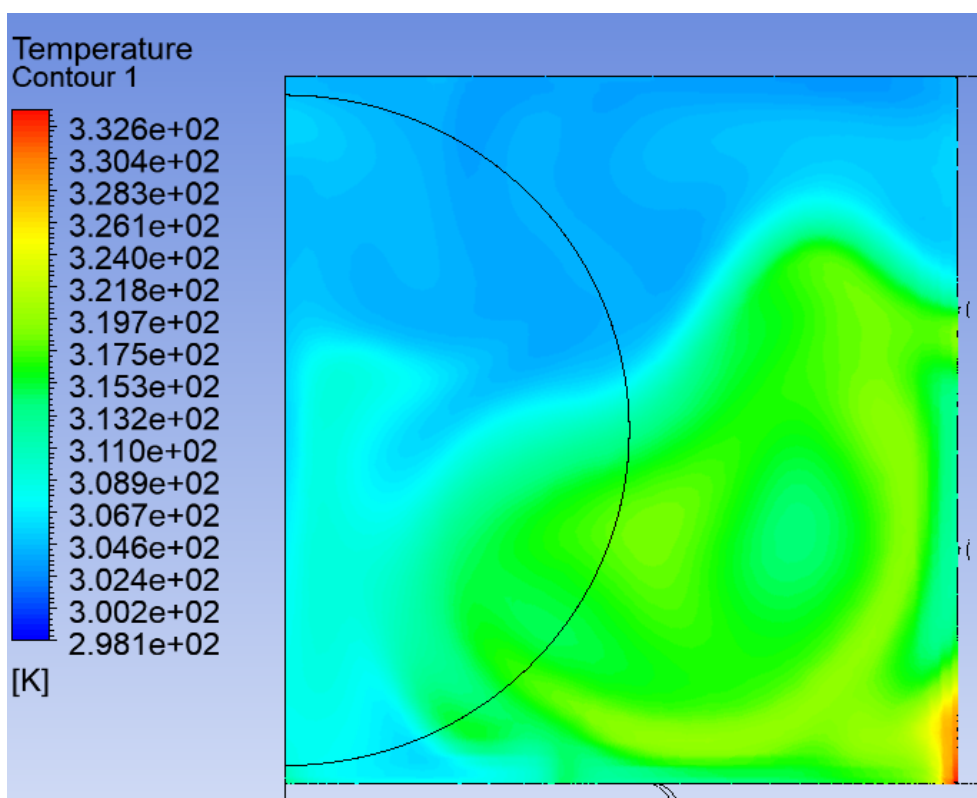


Εικόνα 170 Τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής, μοντέλο Naca_S-duct_1

Η επιμήκυνση του αεραγωγού S-duct, παρουσίασε βελτιώσεις στην ροή, γεγονός που φαίνεται και στην εξωτερική επιφάνεια της κυψέλης. Αναλυτικότερα ενώ δεν παρουσιάζεται σημαντική μεταβολή στην διαφορά των θερμοκρασιών τους (μόλις 2 βαθμοί Κελσίου), το νέο μοντέλο παρουσιάζει πιο ομαλή μετάβαση, ενώ έχει εξαφανιστεί η θερμή ζώνη που είχε αναπτυχθεί στο αριστερό μέρος όμως αναπτύχθηκε μια μικρότερη στο κάτω δεξιά, βελτιώνοντας όμως εν μέρη έτσι την απόδοση μεταφοράς θερμότητας (Εικόνα 172). Παρότι υπάρχει εμφανής βελτίωση στο θερμικό πεδίο του νέου μοντέλου είναι εκτός προδιαγραφών που ορίζει η εταιρία κατασκευής της κυψέλης (Ballard, 2015).



Εικόνα 171 Θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, μοντέλο2 NACA S DUCT



Εικόνα 172 Θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, μοντέλο Naca_S-duct_1

Σύμφωνα με τους κανονισμούς της εταιρίας η κυψέλη καυσίμου βρίσκεται εκτός προδιαγραφών (Πίνακας 3). Αρχικώς δεν καλύπτει το όριο των επιτρεπόμενων θερμοκρασιών λειτουργίας στη κατάσταση που λειτουργεί. Το μέγιστο σημείο βρέθηκε ίσο με 59,5°C ενώ η εταιρία ορίζει 74,75 °C ενώ για το ελάχιστο 25°C , η εταιρία ορίζει αντίστοιχα 49.92°C. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι υπερψύχεται. Παρόλα αυτά οι διαφορές θερμοκρασιών μεταξύ κέντρου και κάτω πλευράς είναι οριακά εντός προδιαγραφών ενώ πολύ κοντά είναι και το κέντρο με την πάνω. Το γεγονός τις μεγάλης διαφοράς μεταξύ αριστερά και δεξιά περιοχής δείχνει ασυμμετρία της ροής.

Πίνακας 3 Προδιαγραφές

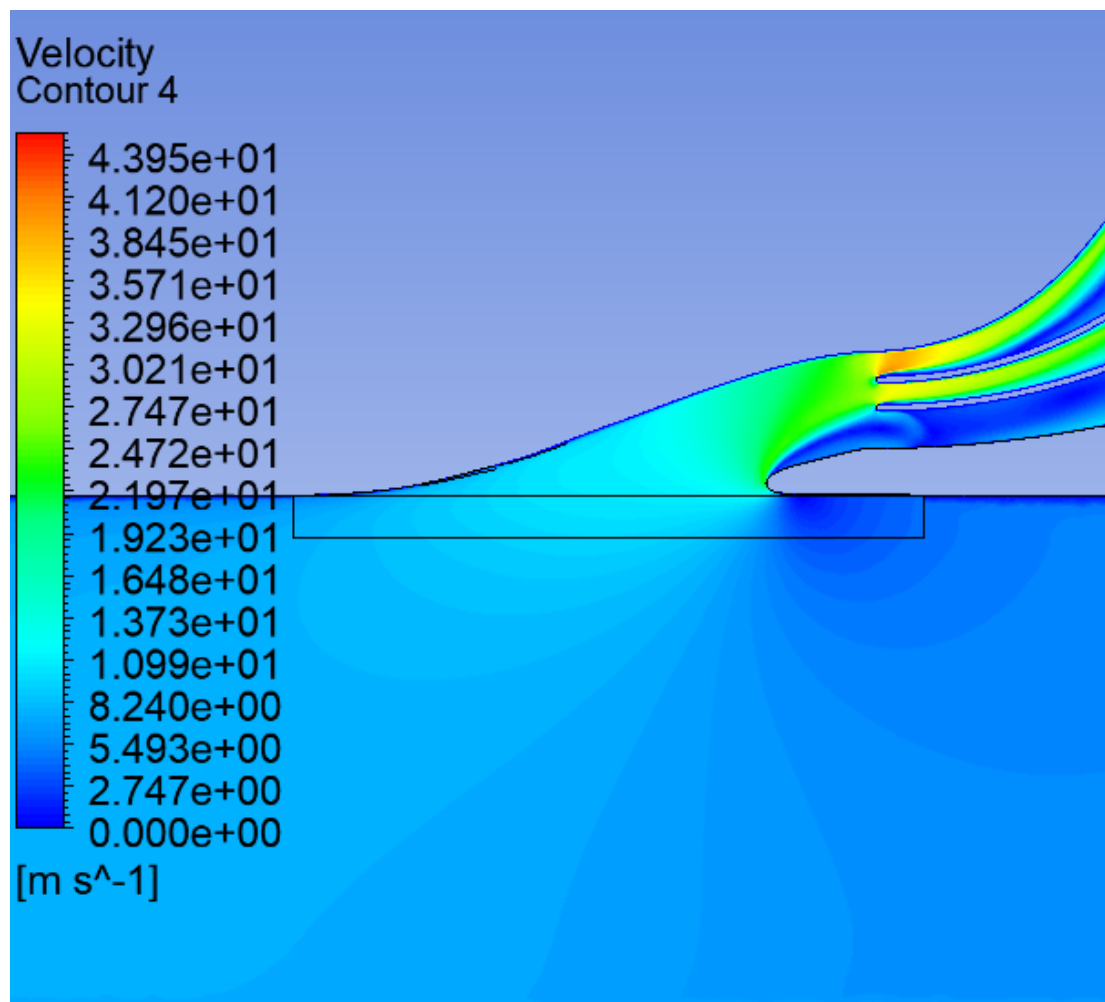
Κατεύθυνση	Περιγραφή	$\Delta T(^{\circ}C)$	Όριο Προδιαγραφής	Συμμόρφωση
Οριζόντια (Αριστερά → Δεξιά)	T_cell-max – T_cell-min σε κυψέλη	~10–12°C	< 6°C	☐ Όχι
Κέντρο → Πάνω	T_mid-cell – T_end-cell	~6–8°C	< 8°C	Οριακά
Κέντρο → Κάτω	T_mid-cell – T_end-cell	~6–7°C	< 8°C	☐ Ναι

Πίνακας 4 Σημεία λειτουργίας

Θερμοκρασίες λειτουργίας		Προδιαγραφή	Διαφορά	
T_κυψέλης	42,2°C	T_opt=65.76°C	23,76°C	☐ Όχι
T_κυψέλης_max	59.5 °C	T_max=74.75°C	15,25°C	☐ Όχι
T_κυψέλης_min	25°C	T_min=49.92°C	24,92°C	☐ Όχι

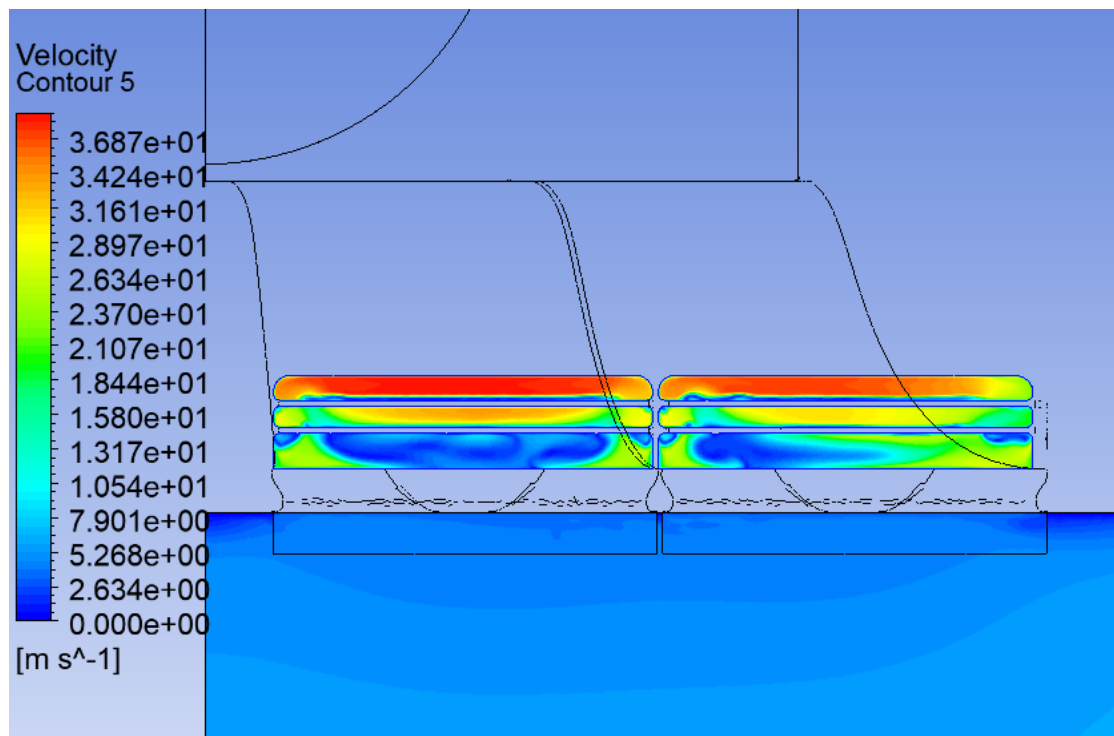
6.2 Naca-S_duct_2

Η παρακάτω προσομοίωση αφορά σε κίνηση του αυτοκινήτου με 25km/h. Το νέο Naca duct και το νέο χείλος προσβολής, αύξησαν την ταχύτητα από 30,5m/s στο παλιό μοντέλο σε 44m/s στο νέο, δηλαδή 44%. Το νέο χείλος βελτίωσε τη συλλογή ροής στο άνω μέρος του S-duct τροφοδοτώντας περισσότερο το μεσαίο και άνω κανάλι του S-duct. Παρόλα αυτά όμως εμφάνισε περιοχές αποκόλλησης με αποτέλεσμα την στέρηση ροής στο κάτω κανάλι.

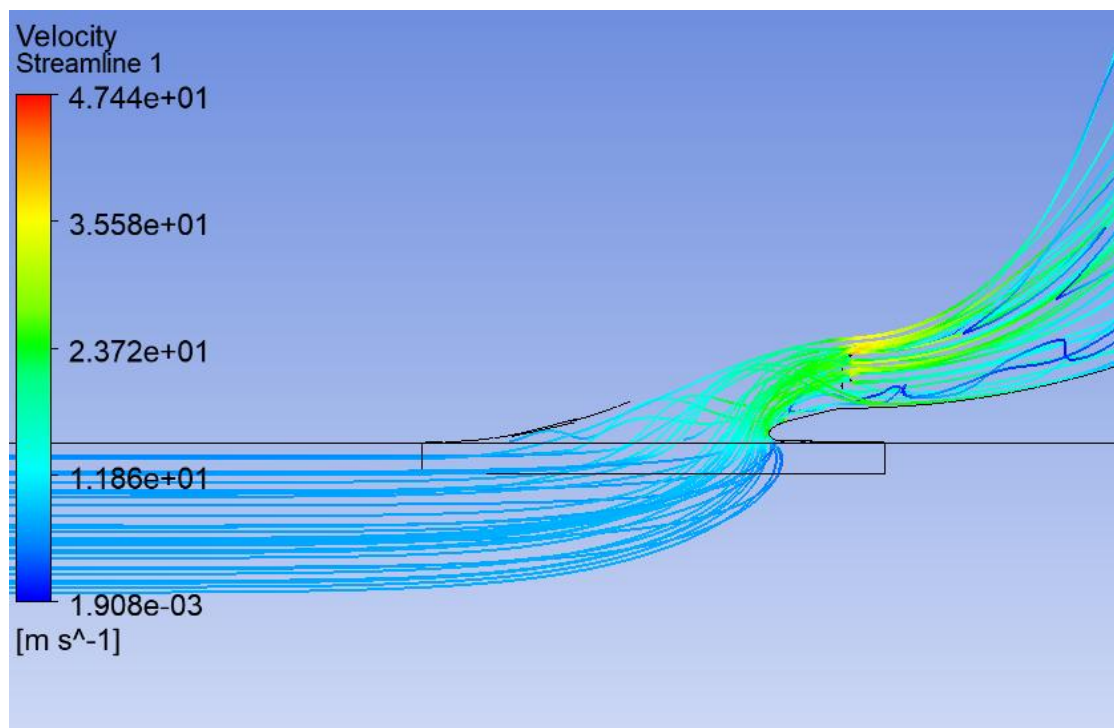


Εικόνα 173 Τομή επιπέδου, τοπική ταχύτητα Naca-duct

Σύμφωνα με την Εικόνα 175 παρατηρείται ενίσχυση της συμμετρίας της ροής μεταξύ των δύο αεραγωγών. Στο αρχικό μοντέλο υπήρχαν υψηλότερες ταχύτητες στον αριστερό αεραγωγό. Επίσης φαίνεται ότι ενισχύθηκε η ταχύτητα στο πάνω κανάλι και υπάρχει σχετική ομοιομορφία. Παρότι αυξήθηκε σε μεγάλο βαθμό η ταχύτητα, το κάτω κανάλι παραμένει υποτροφοδοτούμενο. Στην Εικόνα 176 φαίνεται όμως σύμφωνα με τις ροϊκές γραμμές το νέο χείλος να έχει πιο επιθετικό χαρακτήρα. Αναλυτικότερα, φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερη πρόσληψη ροής από το αρχικό, από την άλλη το αρχικό χείλος φαίνεται να μην συνδράμει σημαντικά στο γεγονός να ακολουθούν πλήρως το προφίλ οι ροϊκές γραμμές με αποτέλεσμα να παρακάμπτουν την είσοδο. Ενώ το νέο χείλος παρουσιάζει έντονη αποκόλληση όπως αναφέρθηκε και δεν καλύπτει πλήρως το κάτω κανάλι εμφανίζει πιο συγκεντρωμένη ροή.

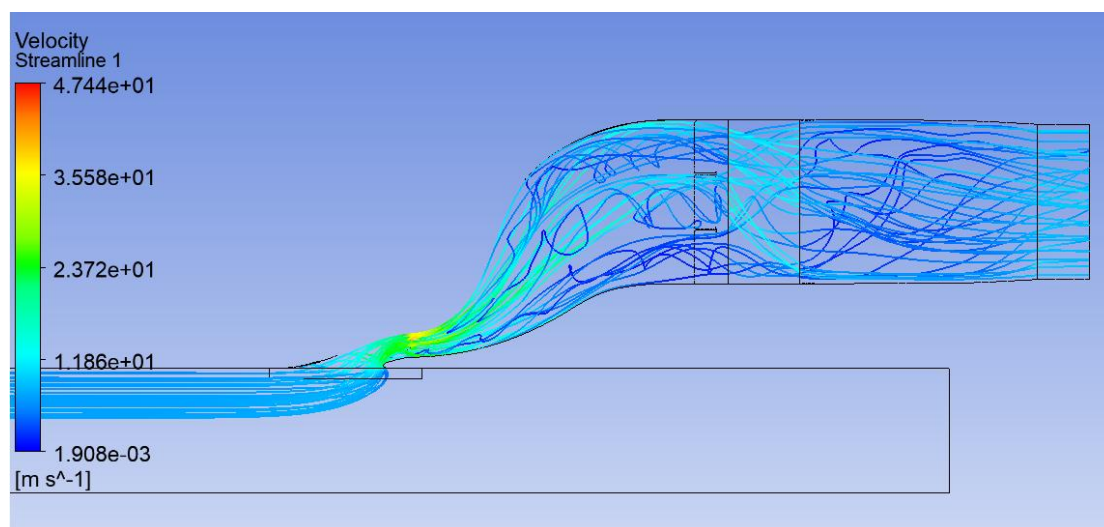


Εικόνα 174 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής αγωγού S-εξόδου Naca



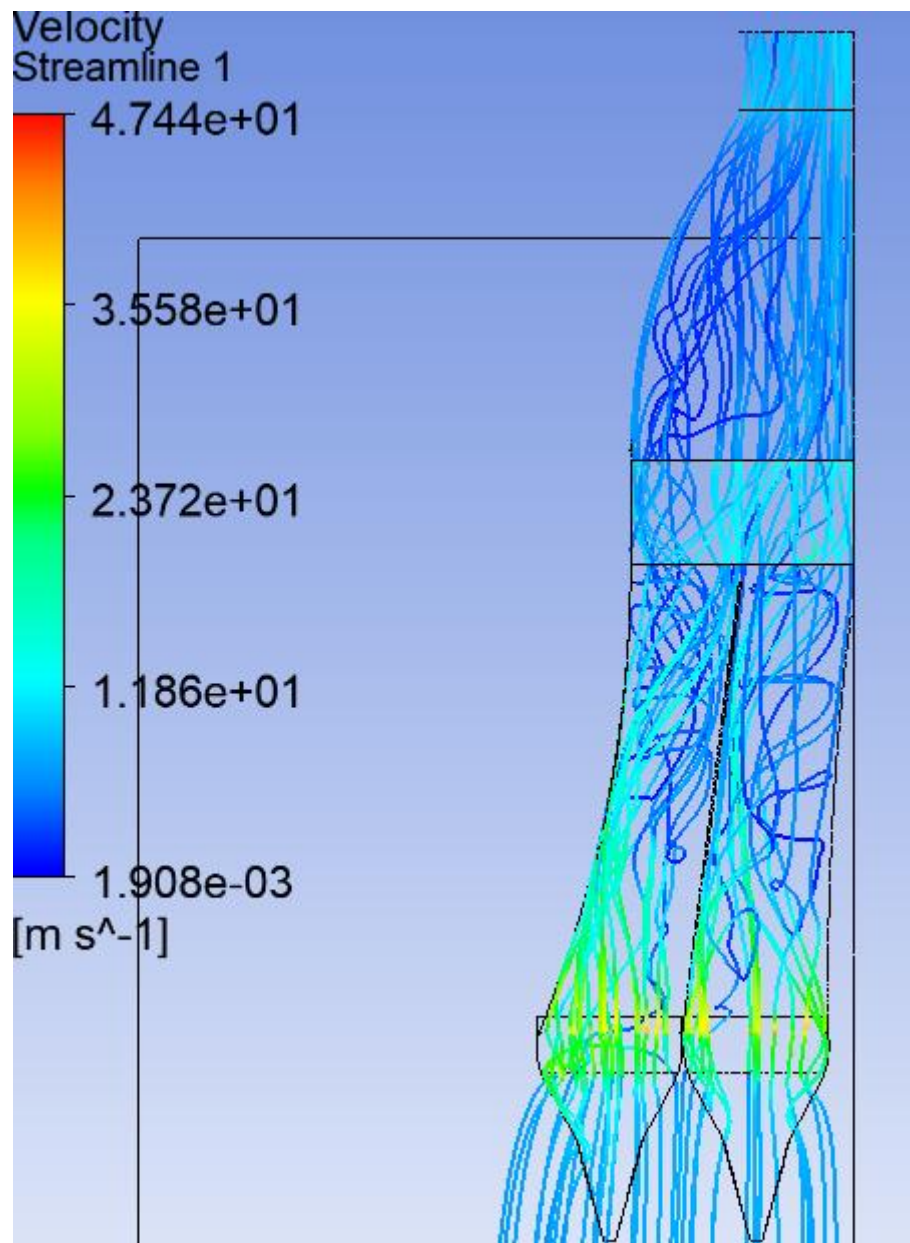
Εικόνα 175 Γραμμές ροής, λεπτομέρεια NACA με χείλος πρόσπτωσης

Το νέο μοντέλο φαίνεται να ελαχιστοποιεί τις δίνες των καναλιών. Ιδιαίτερη βελτίωση παρουσιάζεται στο μεσαίο κανάλι. Ιδιαίτερα σημαντική, επίσης, είναι η αύξηση της ταχύτητας στα 47,4 m/s, γεγονός που κάνει την ροή πιο ομοιόμορφη και συνεκτική και καταφέρνει να εκμεταλευνθεί σε καλύτερο βαθμό τα κανάλια.

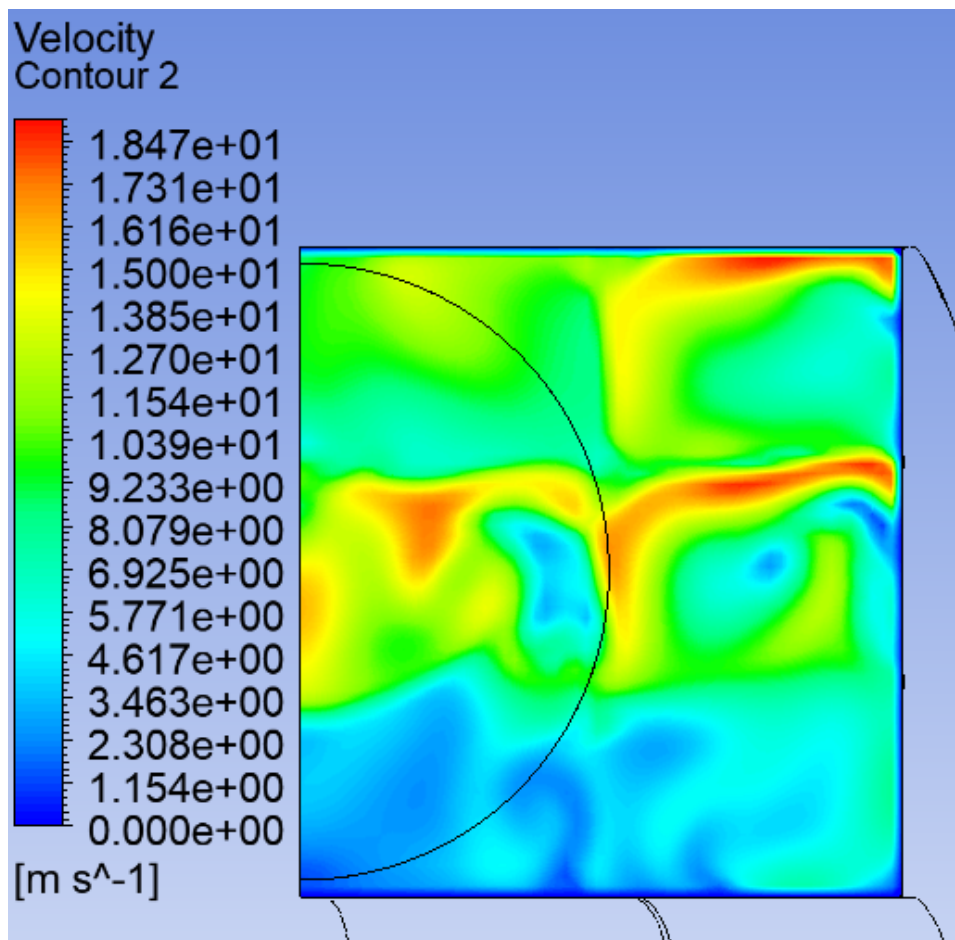


Εικόνα 176 Γραμμές ροής

Φαίνεται ότι ο σκοπός της αλλαγής της γεωμετρίας της κοπής και ο προσδιορισμός εφαπτωμενικά του αγωγού στην κυσέλη βελτίωσαν αισθητά τη ροή. Παρατηρείται πληρέστερη κάλυψη των καναλιών του S-duct, με τη ροή να εμφανίζεται πιο ευθυγραμμισμένη και ομοιόμορφη στα πλαϊνά τοιχώματα. Επίσης φαίνεται να έχουν μειωθεί οι αποκολλήσεις και οι στροβιλισμοί που δημιουργούνταν από τις απότομες γωνίες του αεραγωγού (Εικόνα 178). Στην επιφάνεια εισαγωγής της κυσέλης (Εικόνα 179) φαίνεται το πεδίο ταχυτήτων να είναι πιο ομοιόμορφο. Η ροή εμφανίζεται πιο καθοδηγούμενη με τις ταχύτητες να εμφανίζονται πιο ομαλά αποτυπωμένες στο χώρο. Έχουν μειωθεί οι κόκκινες και μπλέ περιοχές στα δύο άνω κανάλια παρουσιάζοντας ομοιομορφία με περισσότερο πράσινο χρώμα. Επίσης τα καμπύλα τοιχώματα δείχνουν να εξαλείφουν τις αποκολλήσεις με αποτέλεσμα την ενίσχυση των ταχυτήτων πλησίον των τοιχωμάτων. Παρότι δείχνει να έχει καλύτερα αποτελέσματα και ομοιομορφία ροής το νέο μοντέλο παραμένει έντονη η ασυμμετρία της ροής στο κάτω κανάλι όπου αφενός υπάρχει σχετική ομοιομορφία της ροής αφετέρου διαφέρει το πεδίο ταχυτήτων του σε σχέση με τα άλλα δύο κανάλια.



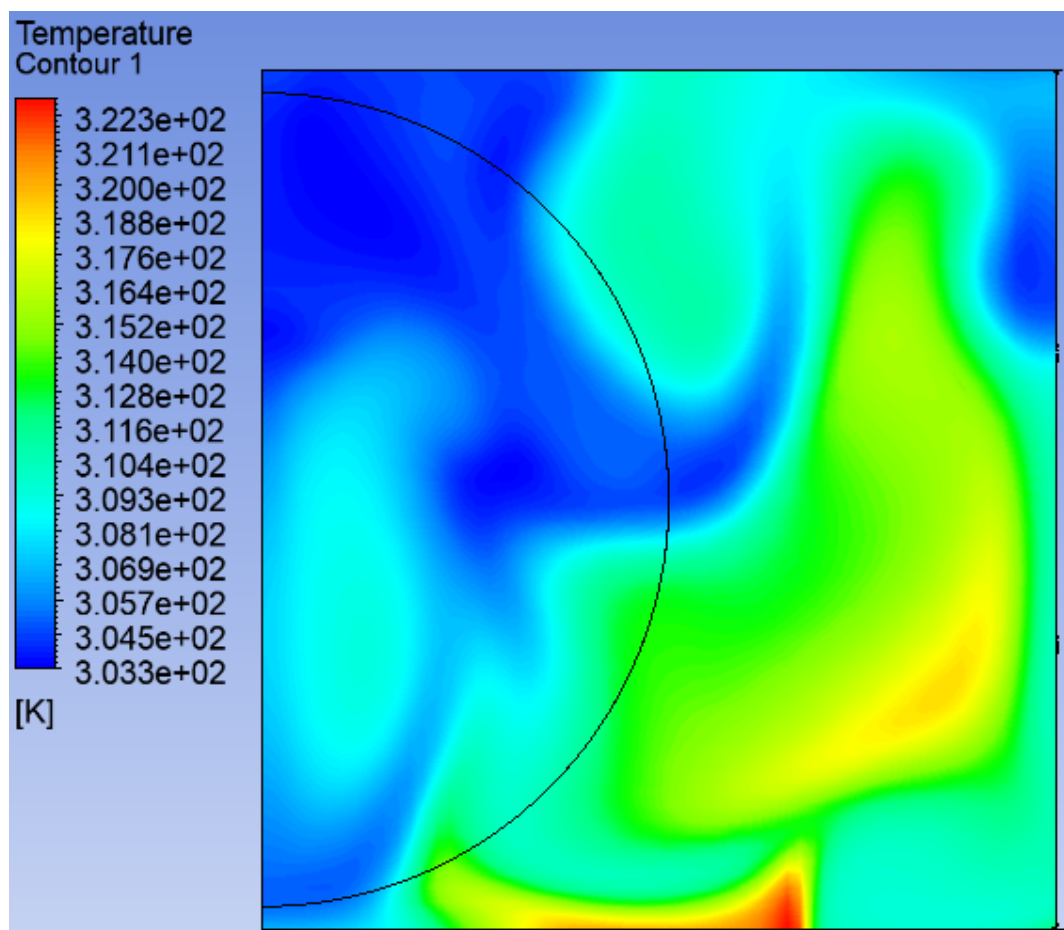
Εικόνα 177 Ροϊκές γραμμές σε κάτοψη μοντέλου



Εικόνα 178 Πεδίο ταχυτήτων στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης

Η σύγκριση των κατανομών των θερμοτήτων μεταξύ του μοντέλου της εργασίας και της παρούσας ενότητας αποκαλύπτουν έντονη βελτίωση όσον αφορά τη θερμική ομοιομορφία. Η επανασχεδίαση του νέου μοντέλου έφερε ως αποτέλεσμα μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας κατά 15,8 K αλλά και του εύρους μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης 18.5 °C (47,4%) απόρροια αυτού είναι η πιο ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας. Επιπρόσθετα φαίνεται ότι έχει επαλειφθεί η κόκκινη περιοχή με την αυξημένη θερμοκρασία ενώ στο νέο μοντέλο παρατηρείται μια πολύ μικρή στο κάτω μέρος. Σε σχέση με το μοντέλο *Naca_S-duct_1* μειώθηκε το εύρος από 34,5 K σε 18,5 K (μείωση 45%) γεγονός που δείχνει και πάλι καλύτερη ομοιομορφία.

Έντονη διακύμανση που δείχνει ασυμμετρία παρουσιάζεται μεταξύ αριστερής και δεξιάς πλευράς (Πίνακας 5). Η διακύμανση βρίσκεται μεταξύ 2-4 βαθμών μακριά από τα επιτρεπτά όρια, γεγονός που δείχνει ότι ο αεραγωγός βρίσκεται κοντά στην ικανοποίηση των περιορισμών. Όσον αναφορά το κέντρο μεταξύ των πάνω και κάτω άκρων, βρίσκεται σχετικώς εντός ορίων. Η απόκλιση όμως από τις θερμοκρασίες λειτουργίας που προτείνει η εταιρία είναι αρκετά μεγάλη και ταυτόχρονα μειωμένη γεγονός που δηλώνει ότι η κυψέλη υπερψύχεται συνολικά.



Εικόνα 179 Πεδίο θερμοκρασιών εξωτερική επιφάνειας κυψέλης

Πίνακας 5 Προδιαγραφές

Κατεύθυνση	Περιγραφή	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	Όριο Προδιαγραφής	Συμμόρφωση
Οριζόντια (Αριστερά $\rightarrow$ Δεξιά)	$T_{\text{cell-max}} - T_{\text{cell-min}}$ σε κυψέλη	$\sim 10-12^{\circ}\text{C}$	$< 6^{\circ}\text{C}$	☐ Όχι
Κέντρο $\rightarrow$ Πάνω	$T_{\text{mid-cell}} - T_{\text{end-cell}}$	$\sim 6-8^{\circ}\text{C}$	$< 8^{\circ}\text{C}$	Οριακά
Κέντρο $\rightarrow$ Κάτω	$T_{\text{mid-cell}} - T_{\text{end-cell}}$	$\sim 6-7^{\circ}\text{C}$	$< 8^{\circ}\text{C}$	☒ Ναι

Πίνακας 6 Σημεία λειτουργίας

Θερμοκρασίες λειτουργίας		Προδιαγραφή	Διαφορά	
$T_{\text{κυψέλης}}$	$31,63^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{opt}}=65.76^{\circ}\text{C}$	$34,12^{\circ}\text{C}$	☐ Όχι
$T_{\text{κυψέλης}_{\text{max}}}$	$49,15^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}=74.75^{\circ}\text{C}$	$25,60^{\circ}\text{C}$	☐ Όχι
$T_{\text{κυψέλης}_{\text{min}}}$	$30,15^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{min}}=49.92^{\circ}\text{C}$	$19,77^{\circ}\text{C}$	☐ Όχι

7 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί εξέλιξη της Μεταπτυχιακής Εργασίας (ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ-ΙΑΣΟΝΑΣ, ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ , Ιούλιος 2023). Τα αποτελέσματα των πεδίων θερμοκρασιών στην επιφάνεια εξόδου της κυψέλης δεν έδειξαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επομένως τέθηκε αναγκαία η επανασχεδίαση με σκοπό τη βελτιστοποίηση του συστήματος αεραγωγών. Αρχικά κρίθηκε αναγκαίο να μεταφερθεί η κυψέλη καυσίμου πιο πίσω στο αυτοκίνητο, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στον αεραγωγό S-duct να επιμηκυνθεί ενώ αλλάχθηκε και η βασική γεωμετρία του κάνοντας τις καμπύλες πιο ομαλές με λιγότερες απότομες κλίσεις. Επίσης, αλλάχθηκε η γεωμετρία των εμφωλευμένων αεραγωγών Naca duct, και προστέθηκε νέο χείλος προσβολής. Οι προσομοιώσεις ρευστοδυναμικής έδειξαν σημαντική βελτίωση στην κατανομή των ταχυτήτων και επομένως των θερμοκρασιών στην εξωτερική επιφάνεια της κυψέλης. Αρχικά παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας της ροής στην περιοχή εισόδου κατά 20%. Επίσης, σημειώθηκε ομοιομορφία μεταξύ των προφίλ ταχυτήτων των δύο αεραγωγών Naca, όμως παρουσιάστηκε μειωμένη τροφοδοσία του κάτω καναλιού, γεγονός που απορρέει από την εμφάνιση αποκολλήσεων του οριακού στρώματος στην περιοχή του χείλους. Η επιμήκυνση του αεραγωγού S-duct, σημείωσε σημαντικά αποτελέσματα όπως αναμενόταν. Η ροή παρουσιάζεται πιο ομαλή και σταθερή ενώ έχουν μειωθεί οι στρόβιλοι στα κανάλια, με σημαντική βελτίωση στο μεσαίο κανάλι. Παρόλα αυτά παρουσιάζει μειονεκτήματα όπως φαίνεται από τις ροϊκές γραμμές τις κάτοψης, με αποκολλήσεις του οριακού στρώματος στην περιοχή αποκοπής λόγω της δοκού καθώς και στην ένωση του S-duct με την κυψέλη, όπου υπάρχει γωνία. Τα αποτελέσματα αυτά αποτυπώνονται στο προφίλ ταχυτήτων της εισόδου της κυψέλης, η ροή είναι λιγότερο στροβιλώδης. Εμφανίζει μια καλύτερη ομοιομορφία στα δύο πάνω κανάλια, όμως συνεχίζει να παρουσιάζει άνιση κατανομή στον κατακόρυφο άξονα λόγω της περιορισμένης τροφοδοσίας του κάτω αεραγωγού. Όσο αναφορά την θερμοκρασία στην έξοδό της, το νέο μοντέλο παρουσιάζει πιο ομαλή μετάβαση, ενώ έχει εξαφανιστεί η θερμή ζώνη που είχε αναπτυχθεί στο αριστερό μέρος όμως αναπτύχθηκε μια μικρότερη στο κάτω δεξιά. Παρότι υπάρχει εμφανής βελτίωση στο θερμικό πεδίο του νέου μοντέλου είναι εκτός προδιαγραφών που ορίζει η εταιρία κατασκευής της κυψέλης.

Όσο αναφορά το μοντέλο Naca-S_{duct_2}, Το νέο Naca duct και το νέο χείλος προσβολής, αύξησαν την ταχύτητα από 30,5m/s στο παλιό μοντέλο σε 44m/s στο νέο, δηλαδή 44%. Το νέο χείλος βελτίωσε τη συλλογή ροής στο άνω μέρος του S duct τροφοδοτώντας περισσότερο το μεσαίο και άνω κανάλι του S-duct. Παρόλα αυτά όμως εμφάνισε περιοχές αποκόλλησης με αποτέλεσμα την στέρηση ροής στο κάτω κανάλι. Επίσης, φαίνεται να παρουσιάζει καλύτερη πρόσληψη ροής από το αρχικό, ενώ ταυτόχρονα το αρχικό χείλος φαίνεται να μην συνδράμει σημαντικά στο γεγονός να ακολουθούν πλήρως το προφίλ οι ροϊκές γραμμές με αποτέλεσμα να παρακάμπτουν την είσοδο. Ενώ το νέο χείλος παρουσιάζει έντονη αποκόλληση όπως αναφέρθηκε και δεν καλύπτει πλήρως το κάτω κανάλι εμφανίζει πιο συγκεντρωμένη ροή. Το νέο μοντέλο φαίνεται να ελαχιστοποιεί τις δίνες των καναλιών. Ιδιαίτερη βελτίωση παρουσιάζεται στο μεσαίο κανάλι. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η αύξηση της ταχύτητας στα 47,4 m/s, γεγονός που κάνει την ροή πιο ομοιόμορφη και συνεκτική και καταφέρνει να εκμεταλλευτεί σε καλύτερο βαθμό τα κανάλια. Οι νέες βαλτώσεις οι οποίες το διαφοροποιούν από το Naca-S_{duct_1}, έδειξαν σημαντική βελτίωση στο πεδίο ταχυτήτων της κυψέλης. Φαίνεται η ροή να εκμεταλλεύεται περισσότερο τη κάλυψη των καναλιών του S-duct, με τη ροή να εμφανίζεται πιο ευθυγραμμισμένη και ομοιόμορφη στα πλαϊνά τοιχώματα, ενώ έχουν μειωθεί οι αποκολλήσεις στις περιοχές αποκοπής της δοκού και της επαφής με την κυψέλη. Παρότι δείχνει να έχει καλύτερα αποτελέσματα και ομοιομορφία ροής το νέο μοντέλο παραμένει έντονη η ασυμμετρία της ροής στο κάτω κανάλι όπου αφενός υπάρχει σχετική ομοιομορφία της ροής αφετέρου διαφέρει το πεδίο ταχυτήτων του σε σχέση με τα άλλα δύο

κανάλια. Το μοντέλο νέο μοντέλο όμως, φαίνεται να βελτίωσε το προφίλ ταχυτήτων στην επιφάνεια εξόδου της κυψέλης. Αρχικά, σημειώνεται ότι μείωσε τη μέγιστη θερμοκρασίας κατά 15,8 K αλλά και του εύρους μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης 18.5 °C (47,4%) απόρροια αυτού είναι η πιο ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας. Όσον αφορά τις προδιαγραφές, φαίνεται να καλύπτει τους περιορισμούς του κέντρου μεταξύ των πάνω και κάτω άκρων. Το κέντρο βέβαια με την αριστερή και δεξιά πλευρά συνεχίζει να δείχνει ασυμμετρία της ροής, η διακύμανσή της βρίσκεται μεταξύ 2-4 βαθμών μακριά από τα επιτρεπτά όρια, όμως αυτό δείχνει ότι ο αεραγωγός βρίσκεται κοντά στην ικανοποίηση των περιορισμών. Η απόκλιση όμως από τις θερμοκρασίες λειτουργίας που προτείνει η εταιρία είναι αρκετά μεγάλη και ταυτόχρονα μειωμένη γεγονός που δηλώνει ότι η κυψέλη υπερψύχεται συνολικά.

Με βάση τη προσεχτική μελέτη των παραπάνω συμπερασμάτων προκύπτουν ορισμένες προτάσεις βελτίωσης. Αρχικά το μοντέλο Naca-S_duct_2, όπως αναφέρθηκε δείχνει να πλησιάζει τους περιορισμούς της κατασκευάστριας εταιρίας. Επομένως προτείνεται επί τούτου η μετακίνηση του κάθετου περυγίου κοντύτερα στο κάθετο επίπεδο συμμετρίας. Αυτό θα οδηγήσει στη δημιουργία δύο ξεχωριστών ζευγαριών Naca duct. Τα κανάλια που βρίσκονται στα πλαϊνά τοιχώματα της κατασκευής θα έχουν τη δυνατότητα αύξησης της παροχής αέρα με σκοπό την αντικατάσταση στην επιφάνεια εξόδου της κυψέλης της πράσινης περιοχής με πεδίο θερμοκρασιών που θα δείχνει πιο ομοιόμορφη κατανομή. Δηλαδή προτείνεται τα πλαϊνά κανάλια να ενισχύσουν την ψύξη τους μέσω αύξησης της παροχής μάζας του εισερχόμενου αέρα. Προτείνεται επίσης η μελέτη του ανεμιστήρα καθώς σημειώνονται αποκλίσεις από τις προτεινόμενες θερμοκρασίες της εταιρίας, αποκλίσεις που δείχνουν υπερψύξη της κυψέλης. Τέλος, προτείνεται να αναπτυχθεί πάγκος δοκιμής ώστε να χαρτογραφηθεί το πεδίο θερμοκρασιών της επιφάνειας εξόδου της κυψέλης μέσω της τεχνικής που προτείνει η εταιρία (Ballard, 2015, σ. 135) και να δοκιμαστούν οι υφιστάμενες διατάξεις αεραγωγών, προκειμένου η πειραματική διερεύνηση να αποκαλύψει την απόδοσή τους.

Βιβλιογραφία

- Agarwal, D., Robinson, T., Armstrong, C. G., & Kapellos, C. (2018). *Enhancing CAD-based shape optimisation by automatically updating the CAD model's parameterisation*.
- ANSYS, I. (2021). *Ansys Meshing User's Guide*. Southpointe: ANSYS, Inc.
- ANSYS, I. (November 2009). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Southpointe: ANSYS, Inc.
- ANSYS, I. (Ιανουάριος 2016). *ANSYS CFX Introduction*. Southpointe: ANSYS, Inc.
- Ballard. (2015). *Product Manual and Integration Guide*. Ballard.
- Larminie, J., & Dicks, A. (n.d.). *Fuel Cell Systems Explained*.
- Lipman, T. E., & Weber, A. Z. (2018). *Fuel Cells and Hydrogen Production*. Berkeley, CA, USA: Springer.
- Onalaja, O., Yinusa, A., & Lawal, T. (2024, January 2). *Review of Hydrogen Fuel Cell Technology and Its Application*.
- Pignier, N. J., O'Reilly, C. J., & Boi, S. (2016). *Aerodynamic and aeroacoustic analyses of a submerged air inlet in a*. Stockholm, Sweden.
- Qasem, N. A., & Abdulrahman, G. A. (2024). *A Recent Comprehensive Review of Fuel Cells: History, Types, and Applications*. Saudi Arabia.
- Sacks, B. A., & Spreiter, J. R. (1951). *THEORETICAL INVESTIGATION OF SUBMERGED INLETS AT LOW SPEEDS*. Washington, USA: NATIONAL ADVISORY COMMITTEE FOR AERONAUTICS.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2015). *Εισαγωγή στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική. Η μέθοδος των Πεπερασμένων Όγκων*. Τζιόλα.
- W.Frick, C., Davis, W. F., Randall, L. M., & Mossman, E. A. (1945). *AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF NACA SUBMERGED DUCT ENTRANCES*. WASHINGTON, USA: NACA.
- Στεφανούλης, Θ. (2023). *Σχεδίαση και ανάπτυξη πρωτότυπου πλαισίου ελαφρού οχήματος*. . Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ-ΙΑΣΟΝΑΣ, Β. (2023). *ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ*. Χανιά.