

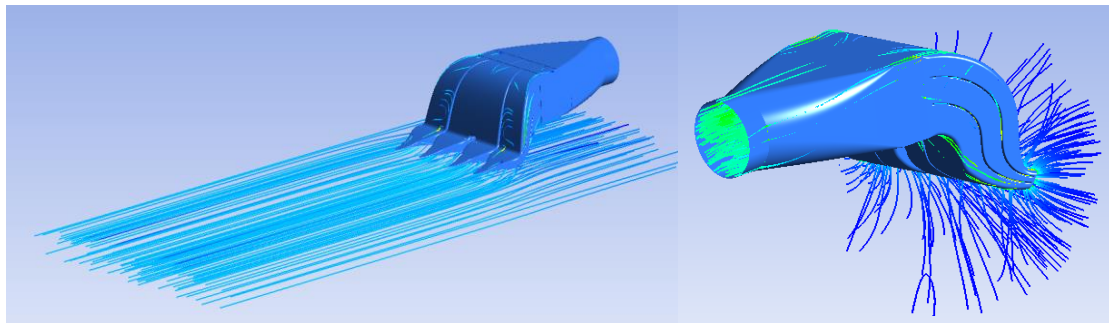


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
Εργαστήριο Στροβιλομηχανών & Ρευστοδυναμικής (TurboLab-TUC)

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΧΡΥΣΟΣΤΟΜΟΣ-ΙΑΣΟΝΑΣ

A. M. : 2020019003



Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός, Καθηγητής

Χανιά, Ιούλιος 2023

(Intentionally left blank)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
Εργαστήριο Στροβιλομηχανών & Ρευστοδυναμικής (TurboLab-TUC)

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΨΥΞΗΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή
ΤΟΥ
Βασιλείου Χρυσοστόμου-Ιάσονα

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Νικόλός Ιωάννης

.....
Τσουρβελούδης Νικόλαος

.....
Αραμπατζής Γεώργιος

Χανιά, Ιούλιος 2023

(Intentionally left blank)

(Υπογραφή)

.....

Βασιλείου Χρυσόστομος-Ιάσυνας

(Intentionally left blank)

Περίληψη

Η ομάδα TUCERS του Πολυτεχνείου Κρήτης κατασκευάζει και αναπτύσσει πρωτότυπα ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία αξιοποιούν την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου, λαμβάνοντας μέρος πάνω από δώδεκα φορές σε διαγωνισμούς εξοικονόμησης καυσίμου. Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία αφορά στο πρωτότυπο όχημα ER2022, το οποίο παρουσιάστηκε και έλαβε μέρος για πρώτη φορά το 2022 στον διαγωνισμό και χρησιμοποιεί μία κυψέλη καυσίμου υδρογόνου τύπου PEM, η οποία μετατρέπει μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης την ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρισμό, για την τροφοδοσία και την κίνησή του οχήματος. Το αντικείμενο που προσεγγίζεται, αφορά στην σχεδιομελέτη συστημάτων ψύξης της κυψέλης καυσίμου για την εξαγωγή συμπερασμάτων της ασφαλούς λειτουργίας και αύξησης της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου, δεδομένου ότι αυτή σχετίζεται άμεσα με τις θερμοκρασίες λειτουργίας της.

Αρχικά πραγματοποιείται μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των χαρακτηριστικών της κυψέλης καυσίμου εφαρμογής, καθώς και των γεωμετριών εισαγωγής του αέρα, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την προσέγγιση του ζητήματος. Με την χρήση του λογισμικού CATIA V5R20, μέσα από την φιλοσοφία του παραμετρικού σχεδιασμού, υλοποιείται σε περιβάλλον CAD ένα κύριο σύστημα εισαγωγής και εξαγωγής του ατμοσφαιρικού αέρα, για την παροχή οξειδωτικού και ψυκτικού μέσου στην κυψέλη, ενώ επίσης προβλέπεται η συναρμολόγηση αυτού στο σύνολο του οχήματος. Κατά τον σχεδιασμό λαμβάνονται υπόψη όλες οι φυσικές και θεωρητικές παράμετροι, καθώς και όλοι οι (ισχυροί) περιορισμοί που προκύπτουν από αυτές και περιορίζουν έντονα την σχεδίαση, μελετώντας τις δυνατότητες στο υφιστάμενο σύστημα του οχήματος. Από το κύριο παραμετρικό μοντέλο υλοποιούνται, σε περιβάλλον CAD, έξι γεωμετρικά μοντέλα, τα οποία διαφέρουν ως προς την τεχνική εισαγωγής και διαχείρισης της ροής, καθώς και οι αντίστοιχοι όγκοι που περιγράφουν τα πεδία ροής που προκύπτουν από αυτά. Τα μοντέλα εισαγωγής του αέρα αξιοποιούν τους τύπους αεραγωγών Scoop και NACA, σε συνεργασία με έναν αγωγό τύπου S. Η διαχείριση της ροής εξαγωγής, περιορίζεται σε ένα σταθερό γεωμετρικό μοντέλο διαχύτη (Diffuser). Τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν ακολούθησαν τα αποτελέσματα διδοχικών προσομοιώσεων, για την επίτευξη ομοιόμορφης ροής. Για την μελέτη των γεωμετριών, έγινε χρήση του λογισμικού ANSYS 2019R2 CFX, μέσα από την κατασκευή υπολογιστικών πλεγμάτων, ορισμού προβλημάτων και επίλυση αυτών. Τα μοντέλα και οι προσομοιώσεις αυτών, επικεντρώνονται στην μελέτη και προσέγγιση μίας ομοιόμορφης κατανομής ταχυτήτων ροής, η οποία δύναται να επιδρά αντίστοιχα στην απαγωγή θερμότητας από το σώμα της κυψέλης καυσίμου. Συγκεκριμένα, η αξιολόγηση της αποδοτικότητας των μοντέλων στο σύστημα, κρίνεται εκ του αποτελέσματος της κατανομής των ταχυτήτων ροής στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης και πώς αυτή επιδρά στην απαγωγή της θερμότητας, μέσα από την παρατήρηση της κατανομής των τοπικών θερμοκρασιών στην επιφάνεια εξαγωγής της κυψέλης καυσίμου. Τέλος, συγκρίνοντας και αξιολογώντας τα αποτελέσματα, γίνονται προτάσεις εν συνεχεία μελέτης του συστήματος ψύξης, οι οποίες στηρίζονται στα δεδομένα και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Λέξεις Κλειδιά: Αυτοκίνητο, Κυψέλη Καυσίμου, Υδρογόνο, Αεραγωγός, Παραμετρικός Σχεδιασμός, Scoop, CAD, CFD, CATIA, ANSYS CFX

Abstract

The TUCER's team of the Technical University of Crete develops prototype electric vehicles, which utilize fuel cell technology, taking part more than a dozen times in fuel saving competitions. This thesis concerns the ER2022 prototype vehicle, which was presented and took part for the first time in 2022 in the competition, and uses a PEM type hydrogen fuel cell, which converts hydrogen energy into electricity through an electrochemical reaction, for propulsion of the vehicle. The work concerns the design and study of cooling systems for the fuel cell, in order to draw conclusions on the safe operation and increase of the performance of the fuel cell, given that this is directly related to its operating temperatures.

Initially, a brief literature review-study of the characteristics of the fuel cell application, as well as the air intake geometries used to approach the issue, is carried out. Specifically, with the use of the CATIA V5R20 software, through the parametric design philosophy, an atmospheric air intake and exhaust system is designed in a CAD environment, for the supply of oxidant and coolant to the cell, as well as the assembly of this as a whole to the vehicle. During the design procedure, all physical and theoretical parameters are taken into account, as well as all the (strong) constraints that arise from them and strongly limit the design parameters. From the basic parametric model, six geometric models are implemented, in a CAD environment, which differ in terms of the flow input and management techniques, as well as the corresponding volumes that describe the flow domains resulting from them. Air intake models utilize Scoop and NACA air ducts in conjunction with an S-type duct. The management of the exhaust flow is limited to a fixed geometric diffuser model. The designed models are followed by the simulation results sequentially, to achieve a uniform flow. For the study of the geometries, the ANSYS 2019R2 CFX software was used, through the construction of computational grids, definition of boundary conditions and the corresponding solution. The models and their simulations focus on the study and approximation of a uniform distribution of flow velocities, which may have a corresponding positive effect on the heat removal from the body of the fuel cell. Specifically, the evaluation of the efficiency of the models in the system is assessed based on the result of the distribution of flow velocities on the inlet surface of the cell and how this affects the heat removal, through the distribution of local temperatures on the outlet surface of the fuel cell. Finally, by comparing and evaluating the results, proposals are made for further study of the cooling system, which are based on the results of the simulations.

Key Words: Automotive, Fuel Cell, Hydrogen, Air duct, Scoop, NACA, Parametric Design, CAD, CFD, CATIA, ANSYS CFX

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν στην περάτωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Ιωάννη Νικολό για την ευκαιρία που μου έδωσε, με την ανάθεση της παρούσας Εργασίας να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και ιδιαίτερο θέμα, την υποστήριξη, την πολύτιμη καθοδήγηση και την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την ομάδα TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης, που με βοήθησε παρέχοντάς μου πληροφορίες και δεδομένα απαραίτητα για την εκπόνηση της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας και ιδιαίτερα τον Δρ. Σάββα Πιπερίδη, τον κ. Κωνσταντίνο Σαχινίδη, τον κ. Θοδωρή Στεφανούλη και τον κ. Αλέξανδρο Σιούτη.

Ακόμα, ευχαριστώ την οικογένειά μου και ιδιαίτερα την μητέρα μου, για την στήριξη κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τη Σοφία και τον Ερμή για τη διαρκή αμέριστη συμπαράσταση και κατανόηση κατά την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα.....	10
Πίνακας Εικόνων	12
Πίνακες	18
Πίνακας Σχημάτων	19
1 Εισαγωγή.....	20
2 Όχημα - Εξοπλισμός Εφαρμογής.....	22
2.1 Όχημα Εφαρμογής ER2022	22
2.2 Εξοπλισμός Οχήματος	23
2.2.1 Κυψέλη Καυσίμου	23
2.2.1.1 Αρχή Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου PEM	23
2.2.1.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κυψέλης Καυσίμου Υδρογόνου τύπου PEM.....	26
2.2.1.2.1 Ηλεκτρικό Μοντέλο Κυψέλης Καυσίμου Εφαρμογής.....	27
2.2.1.2.2 Θερμικό Μοντέλο – Μοντέλο ροής - Μοντέλο Πτώσης Πίεσης	27
2.2.1.2.3 Απόδοση Θερμότητας-Ηλεκτρισμού Κυψέλης Καυσίμου	31
2.2.2 Ανεμιστήρας	31
3 Αεραγωγοί.....	33
3.1 Αεραγωγοί τύπου Scoop	33
3.2 Εμφωλευμένοι Αεραγωγοί.....	34
3.2.1 Αεραγωγοί τύπου NACA με καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα.....	34
3.3 Σύνομη Βιβλιογραφική Σύγκριση Αεραγωγών	41
4 Σχεδιασμός Μοντέλου	43
4.1 Γενικά.....	43
4.2 Απαιτήσεις - Τεχνικές Προδιαγραφές - Περιορισμοί Σχεδιασμού Μοντέλου	44
4.3 Παραμετρικός Σχεδιασμός	45
4.4 Υφιστάμενη Κατασκευή Οχήματος - Συναρμολόγηση Στοιχείων Οχήματος σε CAD 46	
4.5 Σχεδιασμός Μοντέλων	52
4.5.1 Σχεδιασμός Εισαγωγής Μοντέλων “A Scoop – S Duct”	53
4.5.1.1 Παραγωγή Όγκου Ροής Μοντέλων Εισαγωγής “A Scoop S-Duct”	89
4.5.2 Σχεδιασμός Εισαγωγής Μοντέλων “B NACA - S Duct”	94
4.5.2.1 Παραγωγή Όγκου Πεδίου Ροής Μοντέλων Εισαγωγής “B NACA - S Duct” 109	

4.5.3	Σχεδιασμός Γεωμετρίας Εξαγωγής Αέρα –“Diffuser”	112
4.5.3.1	Παραγωγή Όγκου Πεδίου Ροής Μοντέλου “Diffuser”	118
4.5.4	Δημιουργία Όγκου Πεδίου Ροής Κυψέλης Καυσίμου & Ανεμιστήρα Εφαρμογής	119
4.5.5	Συνολικό Συμμετρικό Πεδίο Ροής Μοντέλων	120
5	Υπολογιστική Ρευστομηχανική	123
5.1	Γενικά.....	123
5.2	Δομή Λειτουργίας Λογισμικού ASNYS-CFX	123
5.3	Βασικό Θεωρητικό Υπόβαθρο - Εξισώσεις ANSYS CFX	124
5.4	Περιγραφή Προβλήματος	125
5.5	Υπολογιστική Εφαρμογή ANSYS CFX.....	127
5.5.1	Γενικά.....	127
5.5.2	Εισαγωγή Μοντέλου	128
5.5.3	Mesh Generation – Meshing	129
5.5.4	ANSYS CFX-Pre	146
5.5.5	ANSYS CFX-Solver Manager.....	157
5.5.6	ANSYS CFX-Post	158
6	Αποτελέσματα	159
6.1	Προσομοίωση 1-Μοντέλο “A-1 Scoop S Duct”.....	159
6.2	Προσομοίωση 2-Μοντέλο “A-2 Scoop S Duct”	161
6.3	Προσομοίωση 3-Μοντέλο “A-3 Scoop S Duct”	164
6.4	Προσομοίωση 4-Μοντέλο “A-4 Scoop S Duct”	166
6.5	Προσομοίωση 5-Μοντέλο “B-1 NACA S Duct”	169
6.6	Προσομοίωση 6-Μοντέλο “B-2 NACA S Duct”	173
7	Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	177
	Βιβλιογραφία	180

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1 Όχημα ER2022 (https://www.tucer.tuc.gr/el/ochimata).	22
Εικόνα 2-2 Όχημα ER2022 (https://www.tucer.tuc.gr/en/news/single-news/shell-eco-marathon-europe-2022).	22
Εικόνα 2-3 Σχηματική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής κυψελών καυσίμου ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας (Timothy E. Lipman, 2018, p. 3).	24
Εικόνα 2-4 Αναπαράσταση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) (Abaspour, Parsa, & Sadeghi, 2014, p. 26).	25
Εικόνα 2-5 Στοιβα κυψελών καυσίμου, σύνδεση σε σειρά κυψελών καυσίμου (Larminie & Dicks, 2003, p. 8).	26
Εικόνα 2-6 Κυψέλη Καυσίμου, εισαγωγή και εξαγωγή προϊόντων (Larminie & Dicks, 2003, p. 26).	26
Εικόνα 2-7 Κάθοδος στοίβας: μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά θερμοκρασίας.	29
Εικόνα 2-8 Γενικά χαρακτηριστικά ανεμιστήρα εφαρμογής (ebmrapst, 2019, p. 3).	32
Εικόνα 3-1 Παράμετροι γεωμετρικού σχεδιασμού αεραγωγού Scoop (Rütten, Krenkel, & Freund, 2009, p. 4).	33
Εικόνα 3-2 Τύποι Εμφωλευμένων Αεραγωγών (Sacks & Speiter, 1951, p. 5).	34
Εικόνα 3-3 Λειτουργία αεραγωγού με αποκλίνοντα, καμπυλωμένα τοιχώματα (Denaly, 1948, p. 10).	35
Εικόνα 3-4 Δημιουργούμενες δίνες στις ακμές ράμπας αεραγωγών α)(αριστερά) επίπεδα αποκλίνοντα τοιχώματα, β) καμπυλωμένα αποκλίνοντα τοιχώματα (Sacks & Speiter, 1951, pp. 6,13).	35
Εικόνα 3-5 Γωνίες ράμπας για αεραγωγούς με αποκλίνοντα τοιχώματα (Mossman & Randall, 1948, p. 31).	37
Εικόνα 3-6 Καμπυλωμένο "δάπεδο" ράμπας (Mossman & Randall, 1948, p. 32).	38
Εικόνα 3-7 Προφίλ χείλους-αεροτομής εισόδου (Mossman & Randall, 1948, p. 34).	39
Εικόνα 3-8 Ζώνες ταχυτήτων στο επίπεδο της ράμπας (Sacks & Speiter, 1951, p. 8).	40
Εικόνα 3-9 Εκτροπείς (Deflectors) (από πάνω): κάθετοι ως προς τη ράμπα, (κάτω): κάθετοι και εκτεινόμενοι καθ' όλο το μήκος ράμπας και διατομές αυτών (Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945, σσ. 27, 34).	41
Εικόνα 4-1 Οπίσθιο τμήμα σκελετού & τροχοί οχήματος ER2022.	47
Εικόνα 4-2 Βάση στήριξης κυψέλης καυσίμου επί του σκελετού του οχήματος.	48
Εικόνα 4-3 Συναρμολόγησης σκελετού-βάσης κυψέλης καυσίμου-κυψέλης καυσίμου.	48
Εικόνα 4-4 Συναρμολόγησης σκελετού-βάσης κυψέλης καυσίμου-κυψέλης καυσίμου.	48
Εικόνα 4-5 Αεροδυναμικό κέλυφος οχήματος.	49
Εικόνα 4-6 Συναρμολόγηση σκελετού-τροχών-κυψέλης-κελύφους αμαξώματος.	49
Εικόνα 4-7 Συναρμολόγηση σκελετού-τροχών-κυψέλης-κελύφους αμαξώματος.	49
Εικόνα 4-8 Επιφάνεια αναπαράστασης (κίτρινο) καταλαμβανόμενου χώρου από ηλεκτρονικές διατάξεις-τελικός διαθέσιμος χώρος σχεδίασης διάταξης εισαγωγής.	50
Εικόνα 4-9 Επιφάνεια αναπαράστασης (κόκκινο) καταλαμβανόμενου χώρου από ηλεκτρονικές διατάξεις.	50
Εικόνα 4-10 Ορισμός επιφάνειας (κίτρινο) αναπαράστασης καταλαμβανόμενου χώρου από ηλεκτρονικές διατάξεις.	51
Εικόνα 4-11 Εντολή Projection, Προβολή ακμών προσδιορισμού επιφάνειας καναλιών ροής αέρα (κίτρινο), σύνδεση με ευθύγραμμα τμήματα (πράσινο), δημιουργία ευθύγραμμου τμήματος συμμετρίας επιφάνειας εισαγωγής (πορτοκαλί).	54
Εικόνα 4-12 Εντολή Plane, ορισμός δεύτερου παραμετρικού επιπέδου σχεδίασης και προβολή ευθύγραμμου τμήματος σε αυτό.	54
Εικόνα 4-13 Εντολή Projection, προβολή κάθετου άξονα συμμετρίας (κίτρινο) σε νέο παραμετρικά μεταβαλλόμενο επίπεδο.	54
Εικόνα 4-14 Εντολή Plane, Επίπεδο σχεδίασης κύριας γεωμετρίας (πορτοκαλί).	55
Εικόνα 4-15 Εντολή Project, Προβολές α) κάθετου άξονα συμμετρίας επιφάνειας κ.κ.(κίτρινη-συνεχής),β) μετατοπισμένου κάθετου άξονα συμμετρίας σύμφωνα με παράμετρο (κίτρινη	

διακεκομμένη), γ) ακρότατου σημείου δοκών συγκράτησης-σύσφιξης (μεσαία διακεκομμένη κίτρινη), οριζόντια ευθύγραμμα τμήματα σύνδεση (πορτοκαλί).	56
Εικόνα 4-16 Σχεδίαση τόξων διάταξης εισαγωγής, παράμετροι.	57
Εικόνα 4-17 Εντολή Project, προβολή κατώτατης ακμής δοκού σκελετού, κατώτατης ακμής δαπέδου και επιπέδου διδιάστατης επιφάνειας πυκνωτών, μετατόπιση αυτών, σχεδίαση ευθύγραμμου τμήματος διαμέσου τομής μετατοπιζόμενων ακμών-παράμετρος γωνίας κλίσης.	58
Εικόνα 4-18 Ορισμός καμπύλης σύνδεσης τόξων.	59
Εικόνα 4-19 α) συνολική άνω καμπύλη-παράμετροι, β) ανάλυση καμπυλότητας συνολικής άνω καμπύλης.	59
Εικόνα 4-20 α) συνολική καμπύλη-παράμετροι, β) ανάλυση καμπυλότητας συνολικής καμπύλης.	61
Εικόνα 4-21 Θέση εσωτερικών οριζόντιων πτερυγίων: μετρήσεις αναφοράς (πορτοκαλί) και συναρτήσεις αυτών (πράσινο), βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα (διακεκομμένη γκρι), βοηθητική προβολή κοχλίων συγκράτησης (ενδιάμεση κίτρινη διακεκομμένη).	62
Εικόνα 4-22 Σχεδιασμός τόξων οριζόντιων πτερυγίων εισαγωγής.	63
Εικόνα 4-23 Εντολή Connect, δημιουργία καμπυλών σύνδεσης οριζοντίων πτερυγίων.	63
Εικόνα 4-24 Διδιάστατη σχεδίαση εισαγωγής-οριζοντίων πτερυγίων.	64
Εικόνα 4-25 Γωνία μεταξύ (πορτοκαλί) δοκών.	65
Εικόνα 4-26 Εντολή Extrude με όρια της πλάγεις δοκούς και κατεύθυνση παράλληλη με την κυψέλη καυσίμου (κόκκινη γραμμή).	66
Εικόνα 4-27 Προβολές πλάγιων ακμών επιφανειών και ακμής μήκους κυψέλης καυσίμου (κίτρινες ακμές).	66
Εικόνα 4-28 Ορθογώνιο τρίγωνο υπολογισμού διαθέσιμης γωνίας για την ανάπτυξη της εισαγωγής προς πλάγεις κατευθύνσεις και μέτρηση αναφοράς (προοπτική απεικόνιση).	66
Εικόνα 4-29 Επιφάνειες (πορτοκαλί) οριοθέτησης ανάπτυξης αεραγωγού.	67
Εικόνα 4-30 Εντολή Extrude πάνω καμπύλης και δημιουργία επιφάνειας.	67
Εικόνα 4-31 Εντολή fill δημιουργία α) πλάγιας δεξιάς και β) πλάγιας αριστερής επιφάνειας εισαγωγής.	68
Εικόνα 4-32 Εντολή Join συνένωση τεσσάρων κύριων πλευρικών επιφανειών.	68
Εικόνα 4-33 παραβίαση δοκού σκελετού οχήματος.	68
Εικόνα 4-34 Δημιουργία sketch επί της δοκού σκελετού και παραμετροποίησή του.	69
Εικόνα 4-35 Δημιουργία βοηθητικού όγκου για την τροποποίηση της κατασκευής.	69
Εικόνα 4-36 Εντολή Split, κατάτμηση διάταξης εισαγωγής.	70
Εικόνα 4-37 α) (αριστερά) αποτέλεσμα εντολής Split, β) (δεξιά) δημιουργία ευθύγραμμων τμημάτων (πορτοκαλί).	71
Εικόνα 4-38 Εντολή Fill, δημιουργία εσωτερικών πλευρικών επιφανειών.	71
Εικόνα 4-39 Εντολή Join, δημιουργία συνολικής εσωτερικής γεωμετρίας.	72
Εικόνα 4-40 Εντολή Variable Fillet, φιλέτων εξωτερικών πλευρικών καμπυλών-ακμών.	73
Εικόνα 4-41 Εντολή Edge Fillet, δημιουργία εσωτερικών φιλέτων.	74
Εικόνα 4-42 α) Τελική γεωμετρία επιφανείας, β) Εντολή Thick Surface, παραγωγή τριδιάστατου κύριου κορμού εισαγωγής.	75
Εικόνα 4-43 Εντολή extrude, δημιουργία επιφανειών οριζόντιου ζεύγους πτερυγίων.	75
Εικόνα 4-44 Εντολή Split, κατάτμηση οριζόντιου ζεύγους πτερυγίων.	76
Εικόνα 4-45 Εντολή Thick Surface, Δημιουργία όγκων πτερυγίων.	76
Εικόνα 4-46 ορισμός επιπέδου σχεδίασης κάθετου πτερυγίου εισαγωγής.	77
Εικόνα 4-47 Εντολή Sketch, σχεδίαση profile κάθετου αριστερού πτερυγίου.	78
Εικόνα 4-48 α) Εντολή Fill, δημιουργία επιφανειών κάθετων πτερυγίων, β) Εντολή Volume Extrude, δημιουργία όγκων κάθετων πτερυγίων.	78
Εικόνα 4-49 Εντολή Add, αποτέλεσμα ενιαίου όγκου εισαγωγής.	79
Εικόνα 4-50 Εντολή Edge Fillet, δημιουργία φιλέτων στις ακμές συνδέσεων πτερυγίων και κύριου κορμού εισαγωγής.	79
Εικόνα 4-51 Εντολή Edge Fillet, δημιουργία φιλέτων στις ακμές προσώπων των πτερυγίων.	80
Εικόνα 4-52 Εντολή Edge Fillet, δημιουργία φιλέτων στις ακμές χείλους Scoop.	80
Εικόνα 4-53 Ενδεικτικό τμήμα γεωμετρίας μετά την εξομάλυνση (αεραγωγού Scoop).	81

Εικόνα 4-54 Μοντέλο κυψέλης καυσίμου, λεπτομέρειες	82
Εικόνα 4-55 Sketch επί της εξωτερικής επιφάνειας της γεωμετρίας εισαγωγής στο άνω και κάτω σημείο της φλάντζας.	82
Εικόνα 4-56 Τελική άποψη γεωμετρίας εισαγωγής τύπου Scoop.....	83
Εικόνα 4-57 Εντολή Volume Extrude, δημιουργία α) άνω βοηθητικών όγκων κοπής, β) κάτω βοηθητικών όγκων κοπής.....	83
Εικόνα 4-58 Τελική άποψη γεωμετρίας εισαγωγής τύπου Scoop επί της κυψέλης καυσίμου και του σκελετού του οχήματος.....	84
Εικόνα 4-59 Τελική άποψη γεωμετρίας εισαγωγής επί της συνολικής συναρμολόγησης του οχήματος.	84
Εικόνα 4-60 Μοντέλο A-1 Scoop S Duct, εσωτερικά μη συνεχή πτερύγια.	85
Εικόνα 4-61 A-2 Scoop S Duct, εσωτερικά συνεχή οριζόντια πτερύγια.	86
Εικόνα 4-62 Μοντέλο A-3 Scoop S Duct, εσωτερικά συνεχή οριζόντια πτερύγια.	87
Εικόνα 4-63 Μοντέλο A-4 Scoop S Duct, εσωτερικά συνεχή οριζόντια και κατακόρυφα πτερύγια.....	88
Εικόνα 4-64 Εντολή Variable Fillet, δημιουργία επιφανειακού μοντέλου κύριου κορμού εισαγωγής.	89
Εικόνα 4-65 α) Εντολή Close Surface, δημιουργία όγκου ρευστού κορμού, β) Εντολή Intersect, αποτέλεσμα τομής.....	90
Εικόνα 4-66 Εντολή Remove, αποτέλεσμα αφαίρεσης τομής από τον ενιαίο όγκο του κύριου κορμού.	90
Εικόνα 4-67 Sketch, δημιουργία ημικύκλιου παραγωγής όγκου ρευστού στην εισαγωγή.....	91
Εικόνα 4-68 Εντολή revolve, δημιουργία ημισφαιρίου.	91
Εικόνα 4-69 Εντολή Remove, αφαίρεση φιλέτων από τον όγκο του ημισφαιρίου.	92
Εικόνα 4-70 Αποτέλεσμα όγκων πεδίου ροής Μοντέλου Scoop S Duct.	92
Εικόνα 4-71 Παραγωγή Όγκου Χωρίου Ροής Μοντέλου α) (πάνω-αριστερά) “A-1 Scoop S Duct”, β) (πάνω-δεξιά) “A-2 Scoop S Duct”, γ) (κάτω-αριστερά) “A-3 Scoop S Duct”, δ) (κάτω-δεξιά) “A-4 Scoop S Duct”.....	93
Εικόνα 4-72 Εντολή Project 3D Element, προβολή άνω ακμής κεκλιμένης δοκού σκελετού.....	94
Εικόνα 4-73 Εντολή Sketch, α) τελικό σχέδιο μετά των μετατροπών αγωγού “S”, β) σχεδιασμός αεραγωγού Scoop.....	95
Εικόνα 4-74 Μετατροπή αγωγού “S” και μεταφορά εντός ορίων οχήματος (μέγιστες διαστάσεις ανάπτυξης).	95
Εικόνα 4-75 Προσδιορισμός σημείου αναφοράς για εισαγωγή συντεταγμένων, ευθύγραμμα τμήματα αναφοράς αεραγωγών.	97
Εικόνα 4-76 Excel αρχείο μακροεντολών εισαγωγής συντεταγμένων και δημιουργίας καμπυλών και επιφανειών.....	97
Εικόνα 4-77 Excel αρχείο μακροεντολών, όπως τροποποιήθηκε για τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων με βάση το επιθυμητό σημείο αναφοράς για την εισαγωγή καμπυλών NACA.	97
Εικόνα 4-78 Αποτέλεσμα εισαγωγής σημείων και δημιουργίας καμπυλών αρχείου μακροεντολών excel.....	98
Εικόνα 4-79 Εντολή Extrude, δημιουργία α) πλευρικών επιφανειών β) επιφάνεια ράμπας αεραγωγού.	98
Εικόνα 4-80 Εντολή α) Trim, β) Variable fillet.	99
Εικόνα 4-81 α) Εντολή Multisection, δημιουργία συνδέσμου αγωγού-αεραγωγού, β) Εντολή Join, ενοποίηση συνδέσμου αεραγωγού.....	99
Εικόνα 4-82 α) Μοντέλο επιφάνειας αεραγωγού NACA, β) Εντολή Thick Surface, μοντέλο όγκου ράμπας αεραγωγών.	100
Εικόνα 4-83 α) (πάνω-αριστερά) καμπύλες χείλους πρόσπτωσης, β) (κάτω-αριστερά) δημιουργία φιλέτου στο σημείο σύγκλισης των καμπυλών, γ) τοποθέτηση χείλους επί του αγωγού.	100
Εικόνα 4-84 Εντολή Extrude, α) δημιουργία αρχικού μοντέλου επιφανείας χείλους, β) δημιουργία βοηθητικής επιφάνειας.....	101
Εικόνα 4-85 Τελικό Μοντέλο εμφωλευμένου αεραγωγού με καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα.....	101

Εικόνα 4-86 α) Εντολή Split, τελικό μοντέλο επιφάνειας χείλους πρόσπτωσης, β) δημιουργία μοντέλου όγκου χείλους πρόσπτωσης.	101
Εικόνα 4-87 Άποψη συνολικής διάταξης αεραγωγών NACA- Αγωγού "S".....	101
Εικόνα 4-88 Συντεταγμένες καμπυλών αεραγωγού πρώτου μοντέλου "B-1 NACA S Duct"	102
Εικόνα 4-89 Αεραγωγός πρώτου μοντέλου "B-1 NACA S Duct", (από επάνω): πλάγια όψη, εμπρόσθια, οπίσθια, 3/4, σειρά αεραγωγών.	103
Εικόνα 4-90 Πρώτο μοντέλο "B-1 NACA S Duct".	103
Εικόνα 4-91 Πρώτο μοντέλο "B-1 S Duct", α) πρόσθια όψη, β) οπίσθια, γ) πλάγια.	104
Εικόνα 4-92 Συντεταγμένες καμπυλών αεραγωγού δεύτερου μοντέλου "B-2 NACA S Duct".	105
Εικόνα 4-93 Αεραγωγός μοντέλου "B-2 NACA S Duct", (από επάνω): πλάγια όψη, πρόσθια, οπίσθια, 3/4, σειρά αεραγωγών.	106
Εικόνα 4-94 Δεύτερο μοντέλο "B-2 S Duct", όψεις α) πρόσθια όψη, β) οπίσθια, γ) πλάγια.	107
Εικόνα 4-95 Συντεταγμένες χείλους πρόσπτωσης.	108
Εικόνα 4-96 Δεύτερο Μοντέλο "B-2 NACA S Duct".	108
Εικόνα 4-97 α) (αριστερά) δημιουργία όγκου, β) (πάνω δεξιά) αποκοπή χείλους πρόσπτωσης, γ) (κάτω δεξιά) αποκοπή περιττού όγκου.	109
Εικόνα 4-98 α) (πάνω) όγκος αεραγωγού β) (κάτω) αποτέλεσμα όγκου πεδίου ροής Μοντέλου NACA S Duct πριν την συμμετρική αποκοπή.....	110
Εικόνα 4-99 α) Sketch ορθογώνιο παραγωγής όγκου β) εντολή Extrude, παραγωγή όγκου περιβάλλοντος.....	110
Εικόνα 4-100 Τελικός όγκος προσομοίωσης αέρα περιβάλλοντος.	111
Εικόνα 4-101 Συνολικό χωρίο ροής εισαγωγής μοντέλου (από επάνω) α)"B-1 NACA S Duct" β) "B-2 NACA S Duct".	111
Εικόνα 4-102 Λεπτομέρειες εισαγωγής χωρίου ροής μοντέλου (από επάνω) α) "B-1 NACA S Duct" β) "B-2 NACA S Duct".	111
Εικόνα 4-103 Εντολή Plane, δημιουργία επιπέδου σχεδίασης εφαπτόμενο στην επιφάνεια εξαγωγής κυψέλης καυσίμου.	112
Εικόνα 4-104 Εφαρμογή εντολής Corner.....	112
Εικόνα 4-105 Εντολή Sketch, προβολή πραγματικής επιφάνειας κυψέλης καυσίμου.	113
Εικόνα 4-106 α) Εντολή Plane, δημιουργία παραμετρικής επιφάνειας φλάντζας εξαγωγής, β) Εντολή Sketch-Corner, προβολή πραγματικής επιφάνειας κ.κ., δημιουργία φιλέτων.....	113
Εικόνα 4-107 α) Εντολή Plane, δημιουργία παραμετρικού επιπέδου σχεδίασης ανεμιστήρα εξαγωγής, β) εντολή Sketch-break, δημιουργία κυκλικής διατομής εξαγωγής και επιμέρους στοιχείων.	114
Εικόνα 4-108 α) Σχεδιασμός (εξαρτώμενης) καμπύλης Spline επί σημείων προσχεδιασμένων διατομών, β) καμπύλες Spline επί των διατομών.	115
Εικόνα 4-109 Ανάλυση καμπυλότητας καμπυλών Spline.....	115
Εικόνα 4-110 Εντολή Multi-section Surface, δημιουργία επιφάνειας κελύφους γεωμετρίας εξαγωγής.	116
Εικόνα 4-111 Επιφάνεια κελύφους γεωμετρίας εξαγωγής.....	116
Εικόνα 4-112 Εντολή Thick Surface, δημιουργία όγκου εξαγωγής.....	117
Εικόνα 4-113 Εντολή Edge Fillet, δημιουργία φιλέτου εσωτερικής ακμής ανεμιστήρα.	117
Εικόνα 4-114 α) Αποκοπές τμημάτων για την προσαρμογή γεωμετρίας επί της κυψέλης, β) γεωμετρία εξαγωγής επί της κυψέλης.	117
Εικόνα 4-115 Εντολή Close Surface, παραγωγή όγκου χωρίου ροής.	118
Εικόνα 4-116 Όγκος χωρίου ροής εξαγωγής.	118
Εικόνα 4-117 Εντολή Extrude, δημιουργία όγκου πεδίου ροής ανεμιστήρα.	119
Εικόνα 4-118 Δημιουργία χωρίου ροής κυψέλης καυσίμου.	120
Εικόνα 4-119 Τελικό χωρίο ροής μοντέλου α) (πάνω αριστερά) A-1 Scoop S Duct, β) (πάνω δεξιά) A-2 Scoop S Duct γ) (κάτω αριστερά) A-3 Scoop S Duct δ) (κάτω δεξιά) A-4 Scoop S Duct.	121
Εικόνα 4-120 Τελικό χωρίο ροής μοντέλου α) (πάνω) B-1 NACA S Duct β) (κάτω) B-2 NACA S Duct... ..	122
Εικόνα 5-1 Εντολή Update From CAD, ANSYS.....	129
Εικόνα 5-2 Εισαγωγή όγκων στο ANSYS, Meshing.	130

Εικόνα 5-3 Interface, α) (αριστερά) ανεμιστήρα-εξαγωγής, β) (δεξιά) εξαγωγής-κυψέλης καυσίμου.	130
Εικόνα 5-4 interfaces: α) (αριστερά) κυψέλης καυσίμου-εισαγωγής, β) (δεξιά) εισαγωγής-περιβάλλοντος αέρα.	131
Εικόνα 5-5 Details of Mesh, (από αριστερά) α) Display, Defaults, Sizing β) Quality, Inflation, Advanced, Statistics.	132
Εικόνα 5-6 Body Sizing, όγκοι κατασκευής.	135
Εικόνα 5-7 Face Sizing, εσωτερικά πτερύγια εισαγωγής.	136
Εικόνα 5-8 Body Sizing, όγκοι περιβάλλοντος αέρα.	136
Εικόνα 5-9 Face Sizing, διεπαφής όγκων εισαγωγής-περιβάλλοντος αέρα.	137
Εικόνα 5-10 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου A-1 Scoop-S Duct.	138
Εικόνα 5-11 Λεπτομέρειες πλέγματος μοντέλου "A-1 Scoop-S Duct" α) (αριστερά) inflation, β) (δεξιά) inflation, σύγκλιση μεγέθους στοιχείων διαφορετικών όγκων.	138
Εικόνα 5-12 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου "A-2 Scoop-S Duct".	139
Εικόνα 5-13 Λεπτομέρειες πλέγματος μοντέλου "A-2 Scoop-S Duct" α) (αριστερά) inflation, β) (δεξιά) inflation, σύγκλιση μεγέθους στοιχείων διαφορετικών όγκων.	139
Εικόνα 5-14 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου A-3 Scoop-S Duct.	140
Εικόνα 5-15 Λεπτομέρειες πλέγματος μοντέλου "A-3 Scoop-S Duct" α) (αριστερά) inflation, β) (δεξιά) inflation, σύγκλιση μεγέθους στοιχείων διαφορετικών όγκων.	140
Εικόνα 5-16 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου A-4 Scoop-S Duct α) 2D όψη β) 3D όψη.	141
Εικόνα 5-17 Λεπτομέρειες πλέγματος μοντέλου "A-4 Scoop-S Duct" α) (αριστερά) inflation σε σημείο τομής εσωτερικών πτερυγίων, β) (δεξιά) inflation, σύγκλιση μεγέθους στοιχείων διαφορετικών όγκων.	142
Εικόνα 5-18 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου B-1 NACA S Duct.	143
Εικόνα 5-19 Λεπτομέρεια πλέγματος εισαγωγής περιβάλλοντος αέρα μοντέλου B-1 NACA S Duct.	143
Εικόνα 5-20 Τομή πλέγματος στην διεπαφή όγκων εισαγωγής - περιβάλλοντος αέρα.	143
Εικόνα 5-21 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου B-2 NACA S Duct.	144
Εικόνα 5-22 Λεπτομέρεια πλέγματος εισαγωγής περιβάλλοντος αέρα μοντέλου B-2 NACA S Duct.	144
Εικόνα 5-23 Τομή πλέγματος εισαγωγής, inflation τοιχωμάτων και εσωτερικών πτερυγίων.	145
Εικόνα 5-24 Τομή πλέγματος όγκων εισαγωγής-περιβάλλοντος αέρα.	145
Εικόνα 5-25 Ορισμός ιδιοτήτων πεδίου ροής Fluid μοντέλων: α) (αριστερά) Basic Settings, β) (δεξιά) Fluid Models.	147
Εικόνα 5-26 Ορισμός ιδιοτήτων πεδίου ροής Porous μοντέλου κυψέλης καυσίμου: α) (αριστερά) Basic Settings, β) (δεξιά) Fluid Models.	147
Εικόνα 5-27 Ορισμός πεδίου ροής Porous μοντέλων κυψέλης καυσίμου : Porosity Settings.	148
Εικόνα 5-28 Ορισμός πηγής θερμότητας κυψέλης καυσίμου Μοντέλων.	148
Εικόνα 5-29 Ορισμός interface Fluid-Fluid πεδίου ροής μοντέλων Scoop S Duct: α) (αριστερά) Basic Settings, β) (πάνω δεξιά) Additional Interface Models, γ) (κάτω δεξιά) Mesh Connection.	149
Εικόνα 5-30 Ορισμός interface Fluid-Porous πεδίων ροής μοντέλων.	149
Εικόνα 5-31 Ορισμός Interface Fluid-Fluid πεδίου ροής ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου-εισαγωγής, Μοντέλα "NACA S Duct".	150
Εικόνα 5-32 Οριακή συνθήκη τύπου Symmetry.	151
Εικόνα 5-33 Οριακή συνθήκη Outlet Μοντέλων (ενδεικτικό).	151
Εικόνα 5-34 Οριακή συνθήκη Opening: Μοντέλα με τεταρτοσφαίριο.	152
Εικόνα 5-35 Οριακή συνθήκη Wall- Free Slip Wall: Μοντέλα Scoop S Duct.	152
Εικόνα 5-36 Οριακή συνθήκη Wall-No slip Wall: Μοντέλα Scoop S Duct.	153
Εικόνα 5-37 Σύνολο οριακών συνθηκών μοντέλων Scoop S Duct.	153
Εικόνα 5-38 Οριακή συνθήκη Opening: Μοντέλο "B-1 NACA S Duct".	154
Εικόνα 5-39 Οριακή συνθήκη Wall-No Slip Wall: Μοντέλο "B-1 NACA S Duct".	154
Εικόνα 5-40 Σύνολο οριακών συνθηκών μοντέλου NACA S Duct.	155
Εικόνα 5-41 Οριακή συνθήκη Opening: Μοντέλο "B-2 NACA S Duct".	155
Εικόνα 5-42 Οριακή συνθήκη Inlet: Μοντέλο "B-2 NACA S Duct".	156
Εικόνα 5-43 Οριακή Συνθήκη Wall-Free Slip Wall: Μοντέλο "B-2 NACA S Duct".	156

Εικόνα 5-44 Οριακή Συνθήκη Wall-No Slip Wall: Μοντέλο “B-2 NACA S Duct”	156
Εικόνα 5-45 Ενδεικτικό περιβάλλον Solver Control	157
Εικόνα 6-1 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής Scoor, Προσομοίωση 1.....	159
Εικόνα 6-2 Γραμμές πεδίου ροής, Προσομοίωση 1.....	159
Εικόνα 6-3 α) (αριστερά) (εμπρόσθια οπτική μοντέλου) Τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) (οπίσθια οπτική μοντέλου) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 1	160
Εικόνα 6-4 Γραμμές Ροής - θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 1.	160
Εικόνα 6-5 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής Scoor, Προσομοίωση 2.....	161
Εικόνα 6-6 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 2.....	161
Εικόνα 6-7 α) (αριστερά)(εμπρόσθια οπτική μοντέλου) τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) (οπίσθια οπτική μοντέλου) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 2.....	162
Εικόνα 6-8 Καμπύλες Ροής-θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 2.....	162
Εικόνα 6-9 3D επιφάνειες αποτύπωσης ταχύτητας 7m/s, Προσομοίωση 2.	163
Εικόνα 6-10 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 2.....	163
Εικόνα 6-11 Τομή υπό κλίση συμμετρικού μοντέλου, Τοπική Ταχύτητα ροής εντός εισαγωγής, Προσομοίωση 2.....	163
Εικόνα 6-12 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής Scoor, Προσομοίωση 3.....	164
Εικόνα 6-13 Τομή υπό κλίση συμμετρικού μοντέλου, Τοπική Ταχύτητα ροής εντός εισαγωγής, Προσομοίωση 3.....	164
Εικόνα 6-14 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 3.....	165
Εικόνα 6-15 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 3.....	165
Εικόνα 6-16 α) (αριστερά) τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 3.....	165
Εικόνα 6-17 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής Scoor, Προσομοίωση 4.....	166
Εικόνα 6-18 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 4.....	167
Εικόνα 6-19 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 4.....	167
Εικόνα 6-20 Γραμμές ροής σε κάτοψη, Προσομοίωση 4.....	167
Εικόνα 6-21 α) (αριστερά) τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 4.....	168
Εικόνα 6-22 Τομή υπό κλίση, τοπικές ταχύτητες εισαγωγής.....	168
Εικόνα 6-23 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής αγωγού S, Προσομοίωση 5.....	169
Εικόνα 6-24 Τοπική ταχύτητα και διεύθυνση αυτής, διατομής εισαγωγής Scoor, Προσομοίωση 5.....	169
Εικόνα 6-25 Τοπική ταχύτητα εισόδου αεραγωγών, Προσομοίωση 5.....	170
Εικόνα 6-26 Τομή, τοπική ταχύτητα εισόδου αεραγωγού-αγωγού, Προσομοίωση 5.....	170
Εικόνα 6-27 Γραμμές ροής πεδίου, Προσομοίωση 5.....	171
Εικόνα 6-28 Γραμμές ροής πεδίου, Προσομοίωση 5.....	171
Εικόνα 6-29 Κάτοψη, Γραμμές ροής, Προσομοίωση 5.....	171
Εικόνα 6-30 α) (αριστερά) τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 5.....	172
Εικόνα 6-31 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής αγωγού S, Προσομοίωση 6.....	173
Εικόνα 6-32 Τοπική ταχύτητα εισόδου αεραγωγών, Προσομοίωση 6.....	173
Εικόνα 6-33 Τομή, τοπική ταχύτητα εισόδου αεραγωγού-αγωγού, Προσομοίωση 6.....	174
Εικόνα 6-34 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 6.....	174
Εικόνα 6-35 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 6.....	175
Εικόνα 6-36 Κάτοψη, Γραμμές ροής, Προσομοίωση 6.....	175
Εικόνα 6-37 Γραμμές ροής, λεπτομέρεια αεραγωγού NACA με χείλος πρόσπτωσης, Προσομοίωση 6.....	175
Εικόνα 6-38 α) (αριστερά) τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 6.....	176

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2-1 Θερμοκρασίες λειτουργίας κυψέλης καυσίμου, μέγιστες, ελάχιστες και βέλτιστες (BALLARD, 2015, p. 23).	28
Πίνακας 4-1 Παράμετροι σχεδίασης μοντέλων.....	52
Πίνακας 4-2 Κύριες διαστάσεις αεραγωγού πρώτου μοντέλου "B-1 NACA Duct".	102
Πίνακας 4-3 Κύριες διαστάσεις αεραγωγού μοντέλου "B-2 NACA S Duct".	105
Πίνακας 5-1 Κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης.....	128
Πίνακας 5-2 Στοιχεία πλεγμάτων ανά μοντέλο.	137
Πίνακας 5-3 κατηγοριοποίηση προσομοιώσεων.....	146

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά ανεμιστήρα εφαρμογής (ebmrapst, 2019, p. 9).	32
Σχήμα 4-1 Καμπύλες αεραγωγού πρώτου μοντέλου "B-1 NACA S Duct" (μαύρο: καμπύλη τοιχωμάτων, κόκκινο: καμπύλη αναπτύγματος μήκους, μπλε: καμπύλη ράμπας).	102
Σχήμα 4-2 Καμπύλες αεραγωγού δεύτερου μοντέλου "B-2 NACA S Duct", (μαύρο: καμπύλη τοιχωμάτων, κόκκινο: καμπύλη μήκους, μπλε: καμπύλη ράμπας).	106
Σχήμα 5-1 Δομή ANSYS CFX (ANSYS, 2016, p. 8).....	124
Σχήμα 5-2 Ενδεικτικό γράφημα εξέλιξης σφάλματος RMS εξισώσεων μάζας – ορμής.	158

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία αφορά στη σχεδιομελέτη συστήματος ψύξης κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, η οποία χρησιμοποιείται για την κίνηση ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο σχεδιάζεται και αναπτύσσεται σε ακαδημαϊκό επίπεδο. Συγκεκριμένα, μέσα από την χρήση του λογισμικού CATIA V5R20 και τις αρχές του παραμετρικού σχεδιασμού υλοποιείται ένα κύριο μοντέλο CAD, το οποίο χρησιμοποιείται για την διαδοχική παραγωγή έξι γεωμετριών, καθώς και των όγκων οι οποίοι περιγράφουν τα πεδία ροής τους, για την μελέτη τους σε δεύτερο στάδιο. Κατά τον σχεδιασμό λαμβάνονται υπόψη αναλυτικά όλες οι πραγματικές διατάξεις του οχήματος, καθώς και η χωροθέτηση του εξοπλισμού πλησίον της κυψέλης καυσίμου. Τα δεδομένα αυτά προκύπτουν τόσο από μοντέλα CAD τα οποία παρέχονται, καθώς και από φυσικές μετρήσεις επί του πρωτότυπου οχήματος. Η παραγωγή των μοντέλων, ακολουθεί την φιλοσοφία πρακτικά εφαρμόσιμων γεωμετρικών λύσεων, οι οποίες δύναται να συναρμολογηθούν επί του οχήματος, χωρίς τοπολογικές διαφοροποιήσεις (σε θεωρητικό επίπεδο), μέσα από την κατά το δυνατόν αναλυτικότερη μελέτη του διαθέσιμου χώρου. Τα έξι μοντέλα τα οποία σχεδιάζονται, αξιοποιούν για την συλλογή του αέρα τις ιδιότητες γνωστών γεωμετριών αεραγωγών. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτουν τέσσερα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν αεραγωγούς τύπου Scoop για την τροφοδοσία αγωγών S και δύο μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν εμφωλευμένους αεραγωγούς με αποκλίνοντα και καμπυλωμένα τοιχώματα τύπου NACA, ενώ μελετώνται βιβλιογραφικά τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών για τον καλύτερο σχεδιασμό των μοντέλων.

Η χρήση των κυψελών καυσίμου υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τροφοδοσίας ηλεκτροκινητήρων οχημάτων αφορά μία νέα τάση στην βιομηχανία, η οποία ενδεχομένως να γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια. Ωστόσο, η ασφαλής λειτουργία, η διάρκεια ζωής τους και η απόδοση αυτών των συστημάτων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την θερμοκρασία λειτουργίας τους. Οι κυψέλες υδρογόνου κατά την διαδικασία της ηλεκτροχημικής αντίδρασης, πέραν της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ταυτόχρονα εκλύουν μεγάλα ποσά θερμότητας, τα οποία πρέπει να απομακρύνονται. Η απομάκρυνση της θερμότητας συνήθως πραγματοποιείται με κάποιον ανεμιστήρα, ή άλλες μεθόδους διαχείρισης ροών. Οι μέθοδοι αυτοί διασφαλίζουν την εντός βέλτιστων συνθηκών λειτουργία των κυψελών καυσίμου, οι οποίες βέλτιστες συνθήκες ουσιαστικά πλαισιώνονται από τις κατάλληλες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας κατά τη περίοδο λειτουργίας τους. Ωστόσο, θα ήταν λάθος να ταυτιστεί η διασφάλιση των ιδανικών συνθηκών αποκλειστικά με την ψύξη, καθώς σημαντικός παράγοντας αποτελεί επίσης η υγρασία της μεμβράνης, καθώς και η ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας. Ωστόσο, η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην ψύξη, καθώς δεδομένων των συνθηκών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, η απομάκρυνση της θερμότητας είναι το κύριο ζητούμενο. Γενικεύοντας, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι, η βέλτιστη συνθήκη λειτουργίας μίας κυψέλης καυσίμου δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται και διαμορφώνεται από διάφορους παράγοντες, όπως αναλύεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο, και πρέπει να επιτυγχάνεται μέσα από ένα σύνολο διατάξεων, οι οποίες δύναται να διαμορφώνουν τους απαιτούμενους παράγοντες θερμοκρασίας και υγρασίας για τη λειτουργία εντός βέλτιστων συνθηκών της εν λόγω κυψέλης καυσίμου.

Η αξιολόγηση των μοντέλων που προσεγγίζουν το ζήτημα, πραγματοποιείται μέσα από την σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων, οι οποίες διεξάγονται με το λογισμικό ANSYS 2019R2 και συγκεκριμένα με τον επιλύτη CFX. Μετά την προσομοίωση κάθε μοντέλου, εξάγονται συμπεράσματα, τα οποία αξιοποιούνται για την επανασχεδίαση του επόμενου

στην σειρά μοντέλου, όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Η αξιολόγηση αφορά στην παρατήρηση της κατανομής των ταχυτήτων ροής που επιτυγχάνονται σε κάθε μοντέλο, στο επίπεδο εισαγωγής της κυψέλης καυσίμου, και τελικά στην επίδραση αυτών στην απαγωγή της θερμότητας μέσα από λήψεις της διακύμανσης της τοπικής θερμοκρασίας στην επιφάνεια εξαγωγής της κυψέλης.

Για την προσέγγιση του ζητήματος, πραγματοποιείται μία σύντομη βιβλιογραφική μελέτη πάνω στα συστήματα και τον τρόπο λειτουργίας των αεραγωγών που χρησιμοποιούνται, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της κυψέλης καυσίμου εφαρμογής, που χρησιμοποιείται στο όχημα που μελετάται, καθώς και των φυσικομαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των διάφορων φαινομένων.

2 ΌΧΗΜΑ - ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

2.1 ΌΧΗΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ER2022

Η ομάδα TUCER του Πολυτεχνείου Κρήτης από το 2007 σχεδιάζει, κατασκευάζει και αγωνίζεται με πρωτότυπα ηλεκτρικά οχήματα χαμηλής κατανάλωσης και μηδενικών ρύπων, που χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο, ενώ το 2017 στην ομάδα προστέθηκαν δύο επιπλέον ερευνητικές δραστηριότητες. Οι δραστηριότητες αφορούν στην ανάπτυξη ηλεκτροκίνητης μοτοσυκλέτας τριών τροχών, όπου εφαρμόζονται καινοτόμες τεχνολογίες, καθώς και πρωτότυπο ηλεκτροκίνητο όχημα χαμηλής κατανάλωσης, κατάλληλο για έρευνα και ανάπτυξη συστημάτων αυτόνομης πλοήγησης.

Η εφαρμογή την οποία πραγματεύεται αυτή η εργασία, αφορά στο πρότυπο ηλεκτρικό όχημα πόλης ER2022 (*Εικόνες 2-1, 2-2*) το οποίο χρησιμοποιεί κυψέλη καυσίμου υδρογόνου τύπου PEM για την κίνησή του, διαμέσου της μετατροπής χημικής ενέργειας που εμπεριέχεται στο υδρογόνο σε ηλεκτρική, ακολουθώντας μία διαδικασία αντίστροφης αυτής της ηλεκτρόλυσης. Το όχημα ER2022 έχει κατασκευαστεί και εξελίσσεται από την ομάδα “TUCer” του Πολυτεχνείου Κρήτης μέχρι και σήμερα, παίρνοντας μέρος πρώτη φορά στον διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου “Shell Eco-marathon Europe” το 2022 στο αυτοκινητοδρόμιο TT Circuit, στο Assen της Ολλανδίας. Αποτελεί στο σύνολό του μία πρωτότυπη διάταξη, όπου και έχουν αναπτυχθεί (σε σύγκριση με τα προηγούμενα οχήματα της ομάδας) σε μηχανολογικό επίπεδο νέο υβριδικό πλαίσιο αλουμινίου – ανθρακονημάτων, νέο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, διεύθυνσης και τροχών, ενώ σε ηλεκτρονικό και ηλεκτρολογικό επίπεδο έχει αναπτυχθεί νέο σύστημα υπερπυκνωτών αντί μπαταρίας καθώς και νέο ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου της κυψέλης καυσίμου.



Εικόνα 2-1 Όχημα ER2022 (<https://www.tucer.tuc.gr/el/ochimata>).



Εικόνα 2-2 Όχημα ER2022 (<https://www.tucer.tuc.gr/en/news/single-news/shell-eco-marathon-europe-2022>).

2.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Το εν λόγω όχημα αποτελείται από πλήθος ηλεκτρονικών, ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών διατάξεων. Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στο σύστημα ψύξης της κυψέλης υδρογόνου και επομένως στην συμπεριφορά της ροής αέρα, όσον αφορά στην επιφάνεια της κυψέλης και τελικά στη ροή που συμβάλει στην χημική αντίδραση και την ψύξη της, δεν αναλύεται το σύνολο των στοιχείων και ο τρόπος λειτουργίας του οχήματος ως προς την αεροδυναμική (Τζανάκης, 2012), ηλεκτρολογική/ηλεκτρονική (Κουτσούμπας, 2021) και μηχανολογική (Στεφανούλης, 2023) λειτουργία του, καθώς τα θέματα παρεκκλίνουν της παρούσης. Ωστόσο, μελετώνται τα στοιχεία τα οποία σχετίζονται άμεσα με την μελέτη και αφορούν στον ανεμιστήρα, ο οποίος έχει προεπιλεχθεί στην εν λόγω εγκατάσταση για την ρύθμιση της κυκλοφορίας αέρα μέσα στην κυψέλη, καθώς φυσικά και η κυψέλη καυσίμου, η οποία αποτελεί την “καρδιά” του υπό μελέτη συστήματος.

2.2.1 Κυψέλη Καυσίμου

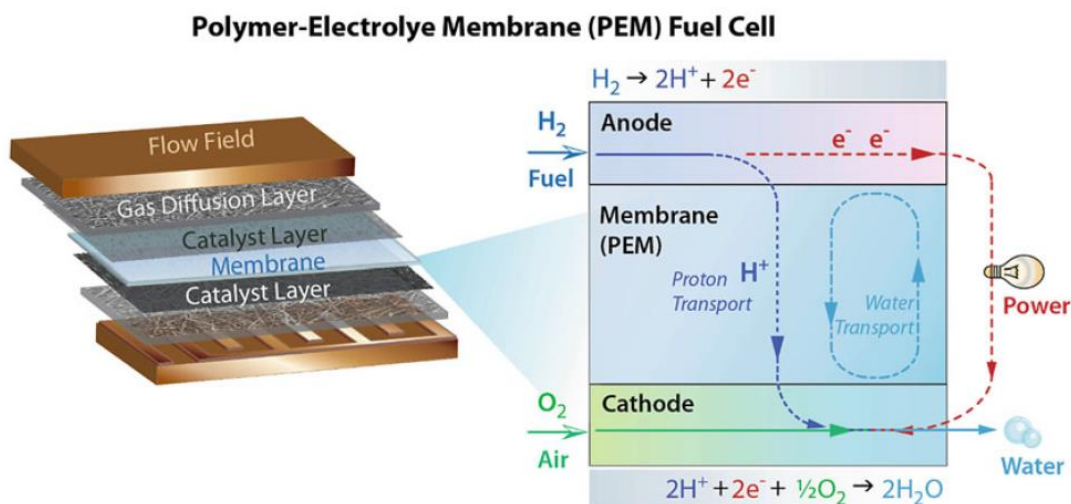
Οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές που μετατρέπουν ηλεκτροχημικά την χημική “ελεύθερη ενέργεια” (“free energy”) αέριων ή υγρών αντιδραστηρίων σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι βασικές έννοιες της χημείας των κυψελών καυσίμου είναι γνωστές εδώ και σχεδόν 200 χρόνια, όπου και προσδιορίστηκαν εννοιολογικά πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1830, όταν ο Christian Friedrich Schönbein αναγνώρισε και περιέγραψε την εμφάνιση της “αντίστροφης ηλεκτρόλυσης” λίγο πριν από τον Sir William Grove, ο οποίος και κατασκεύασε “μπαταρία βολταϊκού αερίου”, η οποία και ορίζεται ως πρώτο παράδειγμα πρώιμης συσκευής κυψελών καυσίμου. Ωστόσο, η βασική ιδέα για τις κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας χρονολογείται από τη δεκαετία του 1930, περίπου 100 χρόνια μετά την εφεύρεση των κυψελών καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας (Timothy E. Lipman, 2018, pp. 1-2).

Γενικά οι κυψέλες καυσίμου κατηγοριοποιούνται με δύο τρόπους, αφενός από το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας τους, αφετέρου με βάση τον τύπο ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, δηλαδή οι κυψέλες κατηγοριοποιούνται, σε κυψέλες με όξινο (acidic) ή αλκαλικό (alkaline) ηλεκτρολύτη (Timothy E. Lipman, 2018, pp. 91-92).

2.2.1.1 Αρχή Λειτουργίας Κυψέλης Καυσίμου PEM

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell-PEMFC) ή όπως ονομάζονται στερεού πολυμερούς (Solid Polymer Fuel Cell-SPFC), αναπτύχθηκαν πρώτη φορά από την General Electric στις Ηνωμένες Πολιτείες το 1960, για να χρησιμοποιηθούν από την NASA στα πρώτα επανδρωμένα διαστημικά οχήματα, όπου το πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να εκκινήσουν γρήγορα, δεδομένου ότι δύνανται να λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες (Larminie & Dicks, 2003, p. 67).

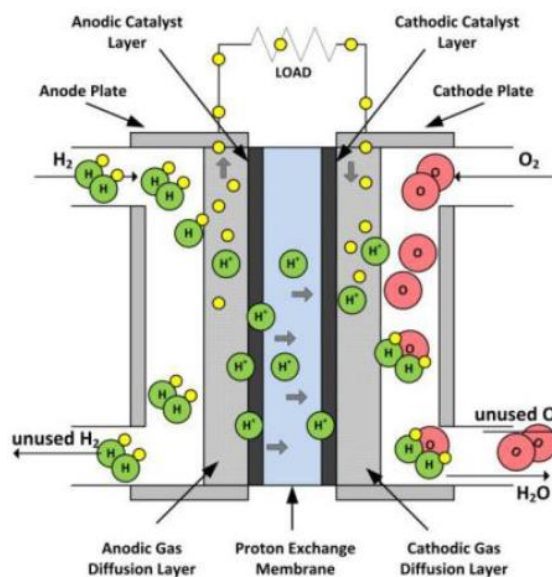
Η λειτουργία που ακολουθεί μία κυψέλη καυσίμου PEM βασίζεται στο ότι τα αντιδρώντα/προϊόντα διαχωρίζονται με έναν ηλεκτρολύτη, ο οποίος έρχεται σε επαφή με ηλεκτροκαταλυτικά ενεργές δομές πορώδων ηλεκτροδίων ([Εικόνα 2-3](#)).



Εικόνα 2-3 Σχηματική απεικόνιση της αρχιτεκτονικής κυψελών καυσίμου ηλεκτροχημικής μετατροπής ενέργειας (Timothy E. Lipman, 2018, p. 3).

Στην απλούστερη περίπτωση μιας κυψέλης καυσίμου, που λειτουργεί με υδρογόνο (καύσιμο) και οξυγόνο (από ατμοσφαιρικό αέρα) ως αντιδρώντα αέρια, ένα πρωτόνιο (ή υδροξείδιο), οδηγείται μέσω του ηλεκτρολύτη στα ηλεκτρόδια και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιείται για την εκτέλεση εργασιών (Εικόνα 2-3). Η λειτουργία μιας παρόμοιας συσκευής προς την αντίθετη κατεύθυνση (μέσω δηλαδή της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου, ενώ εάν μία συσκευή λειτουργεί με την έννοια της ηλεκτρόλυσης αλλά και ως κυψέλη καυσίμου, μπορεί να υλοποιεί ένα ενοποιημένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας.

Κατά τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου πολυμερούς-ηλεκτρολύτη, συμβαίνουν πολλά αλληλένδετα και πολύπλοκα φαινόμενα, τα οποία περιλαμβάνουν μεταφορά μάζας και θερμότητας, ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και μεταφορά ηλεκτρισμού. Η δομή του στρώματος της κυψέλης καυσίμου εμπεριέχει πολλά επίπεδα, συμπεριλαμβανομένων των μέσων διάχυσης, τα οποία είναι σύνθετες δομές που περιέχουν μακροπορώδη επίπεδα για την διάχυση των αερίων, μικροπορώδη επίπεδα τα οποία αποτελούν τα επίπεδα του καταλύτη, τα πεδία ροής των αντιδρώντων και μία μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Κατά την λειτουργία το καύσιμο διοχετεύεται στο πεδίο ροής ανόδου, διατρέχει την επιφάνεια διάχυσης και αντιδρά ηλεκτροχημικά στο επίπεδο του καταλύτη ανόδου για να σχηματίσει ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Από την άλλη το οξειδωτικό μέσω (οξυγόνο ατμοσφαιρικού αέρα), παρέχεται στο πεδίο ροής καθόδου, διατρέχει το επίπεδο διάχυσης και ανάγεται ηλεκτροχημικά στο επίπεδο του καταλύτη καθόδου σε συνδυασμό με τα παραχθέντα πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Στη συνέχεια το νερό, που παράγεται σε υγρή ή αέρια μορφή από την μείωση του οξυγόνου στην κάθοδο, εξέρχεται από την κυψέλη μέσω του πεδίου ροής της καθόδου (Timothy E. Lipman, 2018, pp. 2-3), ενώ τα ηλεκτρόνια διοχετεύονται με εξωτερικό κύκλωμα στο φορτίο και τελικά επανεισέρχονται στην κάθοδο κλείνοντας το κύκλωμα (Εικόνα 2-4).



Εικόνα 2-4 Αναπαράσταση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) (Abaspour, Parsa, & Sadeghi, 2014, p. 26).

Τα κινούμενα ιόντα τα οποία χρησιμοποιούνται στα πολυμερή είναι H^+ ιόντα ή πρωτόνια, ως εκ τούτου η βασική λειτουργία της κυψέλης ουσιαστικά είναι η ίδια με αυτή της κυψέλης οξέος ηλεκτρολύτη (acid electrolyte) (Larminie & Dicks, 2003, pp. 2,67). Ως εκ τούτου η συνολική αντίδραση που πραγματοποιείται στην κυψέλη καυσίμου PEMFC περιγράφεται ως εξής (Larminie & Dicks, 2003, p. 2), (BALLARD, 2015, p. 140) :



Στην άνοδο, το αέριο υδρογόνο ιονίζεται, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και δημιουργώντας ιόντα H^+ (ή πρωτόνια), όπου η χημική αντίδραση που πραγματοποιείται απελευθερώνει ενέργεια και περιγράφεται ως:



Ενώ στην χημική αντίδραση που πραγματοποιείται στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που λαμβάνονται από το ηλεκτρόδιο και τα ιόντα H^+ από τον ηλεκτρολύτη, σχηματίζοντας νερό. Η αντίδραση περιγράφεται ως:



Τα ηλεκτρόνια που παράγονται στην άνοδο διέρχονται από εξωτερικό κύκλωμα και αξιοποιούνται για την παραγωγή έργου πριν την κατανάλωσή τους στην κάθοδο. Μία κυψέλη ηλεκτρόλυσης είναι ουσιαστικά η ίδια, με την διαφορά ότι παρέχονται τα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα την αντιστροφή της διαδικασίας που περιεγράφηκε στα επίπεδα των καταλυτών, ενώ λόγω της εφαρμογής ηλεκτρικού ρεύματος, στην περίπτωση της κυψέλης ηλεκτρόλυσης συχνά διαφέρουν τα υλικά της κατασκευής, όπως αυτά των καταλυτών κ.ά.. Μια κυψέλη καυσίμου μετατρέπει δηλαδή την χημική ενέργεια ενός καυσίμου σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, ενώ ένας ηλεκτρολύτης παίρνει ηλεκτρική ενέργεια και την μετατρέπει σε χημική ενέργεια, δηλαδή πρόκειται για μετατροπή ενέργειας και στις δύο περιπτώσεις.

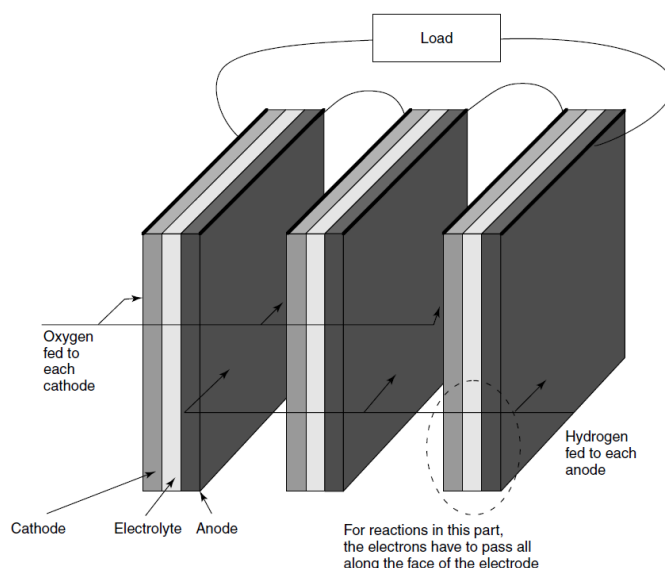
Από τον πρώτο Νόμο της θερμοδυναμικής ισχύει:

$$\Delta H = Q - W_s \quad (2.4)$$

όπου και συμπεραίνεται ότι η καθαρή έκλυση ενέργειας έχει τη μορφή θερμότητας (Q) και έργου (W_s). Το έργο που παράγει το σύστημα είναι στη μορφή ισχύος (P) όπως εκφράζεται με το ρεύμα (I) της κυψέλης πολλαπλασιασμένο με την τάση (V) λειτουργίας του (Timothy E. Lipman, 2018, pp. 2-3):

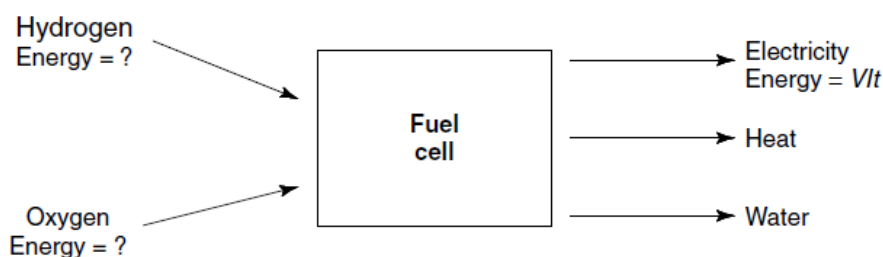
$$P = IV \quad (2.5)$$

Δεδομένου ότι η τάση που παράγεται είναι της τάξης του 0.7 V, για να παραχθεί αξιοποιήσιμη ισχύς, συνδέονται στην σειρά πολλές κυψέλες καυσίμου, δημιουργώντας μία στοίβα κυψέλης καυσίμου (Stack), η οποία δύναται να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερες πρακτικές εφαρμογές. Ο τρόπος σύνδεσης των κυψελών είναι η σύνδεση κάθε ανόδου κυψέλης με την κάθοδο της επόμενης (Εικόνα 2-5) (Larminie & Dicks, 2003, p. 6).



Εικόνα 2-5 Στοίβα κυψελών καυσίμου, σύνδεση σε σειρά κυψελών καυσίμου (Larminie & Dicks, 2003, p. 8).

Γενικά ισχύει ότι παρέχοντας σε μία κυψέλη καυσίμου συνδεδεμένη με ένα φορτίο, υδρογόνο και οξυγόνο, τα προϊόντα που προκύπτουν είναι ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό (Εικόνα 2-6), όπως προκύπτει από την ηλεκτροχημική αντίδραση και την απόδοση της κυψέλης.



Εικόνα 2-6 Κυψέλη Καυσίμου, εισαγωγή και εξαγωγή προϊόντων (Larminie & Dicks, 2003, p. 26).

2.2.1.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κυψέλης Καυσίμου Υδρογόνου τύπου PEM

Η παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε, επιχειρεί να προσεγγίσει μία συγκεκριμένη εφαρμογή, η οποία αφορά στη χρήση της κυψέλης καυσίμου μοντέλου 1020ACS της εταιρίας

Ballard για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως αυτή αξιοποιείται για την τροφοδοσία ηλεκτρικού κινητήρα, ο οποίος με τη σειρά του παρέχει κίνηση στο τετράτροχο. Το εν λόγω μοντέλο κυψέλης παράγεται σε διαφορετικές εκδόσεις, μεταξύ των οποίων η μελετώμενη, η οποία απαρτίζεται από 28 κελιά (cells). Στις επόμενες ενότητες γίνεται μία παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών αυτής, καθώς και των σχέσεων οι οποίες καθορίζουν το ηλεκτρικό μοντέλο, το θερμικό μοντέλο, τις απαιτήσεις ψύξης, καθώς και την πτώση πίεσης, η οποία προκύπτει από την λειτουργία της κυψέλης και πως οι παραπάνω σχέσεις αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους.

2.2.1.2.1 Ηλεκτρικό Μοντέλο Κυψέλης Καυσίμου Εφαρμογής

Το εύρος των τιμών του ρεύματος που δίνεται να παραχθεί από την κυψέλη καυσίμου κυμαίνεται από 0 έως 75A, ενώ το εύρος τιμών τάσης ανά κυψέλη κυμαίνεται από 0.5 έως 1V/cell. Η παραγόμενη τάση της στοίβας κυψελών ορίζεται με την σχέση:

$$V_{stack} = V_{cell} n \quad (2.6)$$

όπου V_{stack} η τάση στοίβας, V_{cell} η τάση κελιού και n ο αριθμός των κελιών της στοίβας

ενώ η ισχύς της στοίβας ορίζεται με την σχέση:

$$P_{stack} = V_{cell} * I_{stack} * n \quad (2.7)$$

όπου I_{stack} το ρεύμα στοίβας.

Τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής απόδοσης της κυψέλης, διαφοροποιούνται κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής της κυψέλης, καθώς τα τυπικά και μέσα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά απόδοσης της κυψέλης κατά την αρχή του κύκλου, διαφέρουν από αυτά στο τέλος του κύκλου ζωής λόγω της πτώσης της απόδοσης της κυψέλης.

Σημειώνεται, ότι η κατασκευάστρια εταιρία ορίζει το τέλος ζωής της κυψέλης, όταν το σημείο μέγιστης ισχύος επιτυγχάνεται για το μέγιστο ρεύμα στοίβας 0.5 V/cell στα 75 A. Ωστόσο, το σημείο αυτό διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή που εδραιώνει η κυψέλη καυσίμου. Δεδομένου ότι η κυψέλη γίνεται λιγότερο αποτελεσματική μετά από τον κύκλο εργασιών (και πιθανών φθορών που έχουν προκύψει), αυτό έχει ως αποτέλεσμα η παραγωγή θερμότητας να αυξάνεται, καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μειώνεται (BALLARD, 2015, pp. 75-80).

2.2.1.2.2 Θερμικό Μοντέλο – Μοντέλο ροής - Μοντέλο Πτώσης Πίεσης

Η κυψέλη καυσίμου η οποία μελετάται είναι ανοιχτού τύπου καθόδου και ως εκ τούτου απαιτεί ροή αέρα διαμέσου της στοίβας κυψελών. Η ροή απαιτείται για δύο λόγους:

- αφενός για να παρέχει το οξειδωτικό μέσω για να πραγματοποιηθεί η ηλεκτροχημική αντίδραση και να παραχθεί το ηλεκτρικό ρεύμα, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα,
- αφετέρου για την ψύξη της κυψέλης καυσίμου, καθώς κατά την λειτουργία της η κυψέλη παράγει θερμότητα, η οποία θα πρέπει να αφαιρεθεί, ώστε να διατηρείται η κυψέλη σε σωστή θερμοκρασία ανάλογα με το σημείο λειτουργίας της.

Ως εκ τούτου οι απαιτήσεις ροής χωρίζονται στις δύο παραπάνω κατηγορίες. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι απαιτήσεις για την ψύξη υπερκαλύπτουν τις απαιτήσεις παροχής οξειδωτικού μέσου για την αντίδραση.

Για τις απαιτήσεις οξείδωσης οι απαιτούμενες τιμές θερμοκρασίες έχουν εύρος από -20°C έως 52°C, με τις βέλτιστες να κυμαίνονται μεταξύ 10-40 °C. Σημειώνεται ότι, για χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, είναι πιθανόν ο ανεμιστήρας εργαζόμενος στις ελάχιστες στροφές να παρέχει πολύ μεγάλη ροή, με αποτέλεσμα να υπερ-ψύχεται η κυψέλη, ενώ για υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος ενδεχομένως ο ανεμιστήρας να μην μπορεί να παρέχει ικανοποιητική ροή για την ψύξη και διατήρηση της επιθυμητής θερμοκρασίας αυτής (BALLARD, 2015, pp. 49-50). Στην περίπτωση της εφαρμογής και δεδομένων του ευρωπαϊκού χώρου και του χρόνου κατά τους οποίους διεξάγονται οι διαγωνισμοί που το όχημα συμμετέχει, θεωρητικά η βαρύτητα του προβλήματος πέφτει στις υψηλές θερμοκρασίες, τις οποίες καλείται το σύστημα να διαχειριστεί.

Οι θερμοκρασίες στις οποίες δύναται να λειτουργεί η κυψέλη καυσίμου είναι συγκεκριμένες (Πίνακας 2-1), ενώ η βέλτιστη θερμοκρασία T_{opt} είναι συνάρτηση του ρεύματος (I) της στοίβας της κυψέλης και υπολογίζεται ως:

$$T_{opt} = 0.53I + 26.01 \quad (2.8)$$

Πίνακας 2-1 Θερμοκρασίες λειτουργίας κυψέλης καυσίμου, μέγιστες, ελάχιστες και βέλτιστες (BALLARD, 2015, p. 23).

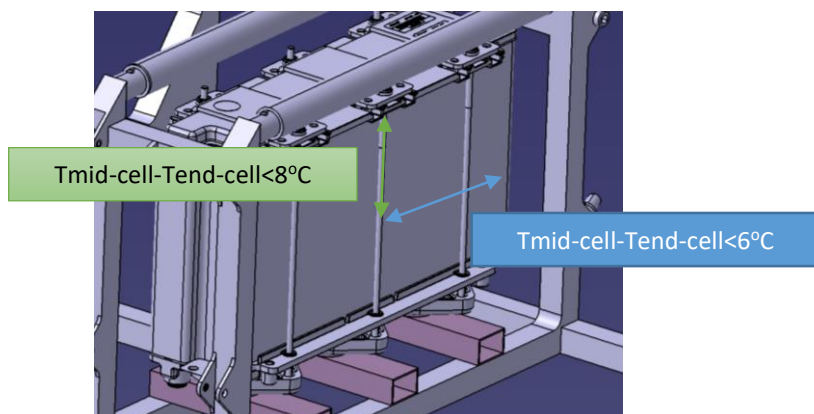
Stack Current(A)	0	7.3	14.5	29.0	51.7	65.3	77.0	87.1
Maximum(°C)	52	55	57	62	70	75	75	75
Optimum (°C)	26	30	34	41	53	61	67	72
Minimum (°C)	6	10	14	21	33	41	47	65
Required: greater than -10 °C								

Σημειώνεται ότι η βέλτιστη θερμοκρασία ανά σημείο λειτουργίας της κυψέλης μεταβάλλεται ελαφρώς επηρεαζόμενη από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και άλλες μεταβλητές. Για τη διατήρηση και ρύθμιση της επιθυμητής θερμοκρασίας ουσιαστικά ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα της εφαρμογής, η οποία ελέγχεται από ένα ηλεκτρονικό σύστημα, το οποίο συγκρίνει την θερμοκρασία της κυψέλης με τη θερμοκρασία που πρέπει να επιτευχθεί.

Η επιρροή της θερμοκρασίας στην ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης είναι κομβική, καθώς σχετίζεται με πολλές παραμέτρους που συμβάλουν στην απόδοση, όπως φαίνεται παρακάτω. Ισχύει ότι για δεδομένη τιμή ρεύματος, οι ανώτατες τιμές τάσης της κυψέλης επιτυγχάνονται κατά τη λειτουργία στη βέλτιστη αντίστοιχη θερμοκρασία. Επιπλέον, η παραγωγή του νερού, που προκύπτει από την ηλεκτροχημική αντίδραση που πραγματοποιείται, σχετίζεται με το ρεύμα της κυψέλης, καθώς όσο υψηλότερη η τιμή του τόσο μεγαλύτερη ποσότητα παράγεται αναλογικά. Η ποσότητα του νερού που παράγεται απομακρύνεται και αυτή με τη ροή του αέρα διαμέσου της στοίβας και ως εκ τούτου όσο υψηλότερη η θερμοκρασία του αέρα τόσο μεγαλύτερη ποσότητα νερού απομακρύνεται. Ωστόσο, εάν λαμβάνουν χώρα θερμοκρασίες υψηλότερες από την βέλτιστη ανά σημείο λειτουργίας, η διάταξη μεμβράνης (Membrane electrode assembly-MEA) αφυδατώνεται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντίστασή της, ενώ η απόδοσή της μειώνεται και πάλι.

Σημειώνεται ότι για ακραία υψηλές θερμοκρασίες η μεμβράνη μπορεί να καταστραφεί, δημιουργώντας μη αναστρέψιμη πτώση της απόδοσης. Από την άλλη, εάν η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασίες κατώτερες των βέλτιστων, αναπτύσσει υψηλότερο ποσοστό υγρασίας από το επιθυμητό, με αποτέλεσμα την διατήρηση νερού στα κελιά της στοιβάς. Η μεγάλη συγκέντρωση νερού στα κελιά οδηγεί σε “πλημμύρα” της ανόδου, με αποτέλεσμα να μην επιτρέπεται στο οξειδωτικό μέσο να αντιδράσει με τα επίπεδα του καταλύτη, περίπτωση η οποία μπορεί να προκαλέσει και πάλι μη αναστρέψιμη απώλεια στην απόδοση μέσω της τοπικής στέρσης καυσίμου, καθώς εμποδίζεται το αέριο υδρογόνο από το να διασπαστεί σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη ότι η απόδοση της στοιβάς είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, θα πρέπει να εξασφαλίζεται μία ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας κυψέλης σε όλες τις περιοχές της στοιβάς, ώστε να οδηγείται το σύστημα σε μία ομοιόμορφη απόδοση. Ωστόσο, λόγω της ψύξης του αέρα και της γεωμετρίας της στοιβάς, προκύπτουν πάντα διαβαθμίσεις θερμοκρασίας, αν και η στοιβά παράγει σταθερή ποσότητα θερμότητας σε όλο τον όγκο της. Έχει παρατηρηθεί ότι παρά το τελευταίο γεγονός, στις περισσότερες περιπτώσεις το κέντρο της επιφάνειας εξόδου βρίσκεται σε υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τις άκρες. Η μέγιστη διαφορά της τιμής της θερμοκρασίας στον κάθετο άξονα από την ακμή της κυψέλης έως το μέσο αυτής, δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τους 8°C , ενώ αυτή η διαφορά κατά τον οριζόντιο άξονα της κυψέλης από την πλάγια ακμή της κυψέλης έως το μέσο αυτής θα πρέπει να είναι μικρότερη από περίπου 6°C (Εικόνα 2-7). Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει ανομοιόμορφη κατανομή ροής αέρα και επομένως απαγωγής της εκλειώμενης θερμότητας. Σημειώνεται ότι η μέτρηση της θερμοκρασίας θα πρέπει να λαμβάνεται στην επιφάνεια εξόδου της κυψέλης (BALLARD, 2015, pp. 54-57)



Εικόνα 2-7 Κάθοδος στοιβάς: μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά θερμοκρασίας.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω πρέπει να εξασφαλίζεται μία ομοιόμορφη ροή επί της επιφάνειας της κυψέλης για την ασφαλή και βέλτιστη λειτουργία της. Συνεπώς, η ρύθμιση της θερμοκρασίας της κυψέλης κατέχει κύρια θέση στην τελική απόδοσή της για τους λόγους που προαναφέρθηκαν. Εδώ σημειώνεται ότι η παρούσα εργασία αφορά στις γεωμετρίες των αεραγωγών και στον τοπολογικό έλεγχο της ροής και όχι στη ρύθμιση της λειτουργίας του συστήματος ελέγχου θερμοκρασίας.

Θερμικό Μοντέλο Κυψέλης Καυσίμου

Η παραγωγή θερμότητας από τη κυψέλη είναι αποτέλεσμα απωλειών. Η μέγιστη παραγόμενη θερμότητα προκύπτει για την μέγιστη τιμή ρεύματος (I) και την ελάχιστη τιμή τάσης (V). Παρακάτω φαίνεται το μοντέλο υπολογισμού της παραγόμενης θερμότητας (BALLARD, 2015, p. 58):

$$q_{created} = n * (1.253 - V_{cell}) * I \quad (2.9)$$

όπου 1.253 είναι η ιδανική τάση που αναπτύσσει η κυψέλη καυσίμου (δίνεται από τον κατασκευαστή) και I = το ρεύμα της στοίβας (A).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου μεταβάλλονται κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής της κυψέλης, κάτι που επηρεάζει άμεσα την θερμότητα που εκλύεται κατά τη λειτουργία. Για το λόγω αυτό η κατασκευάστρια εταιρία προτείνει την χρήση παραμέτρων στο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της παραγόμενης θερμότητας (2.9), οι οποίες αντικατοπτρίζουν την κατάσταση της κυψέλης στο τέλος ζωής της, το οποίο και χρησιμοποιείται, καθώς μελετάται το χειρότερο σενάριο. Οι παράμετροι για το τέλος ζωής που χρησιμοποιούνται (όπως συνίσταται), αφορούν τιμή τάσης κελιού $V_{cell}=0.5V$ και ρεύματος στοίβας $I=75A$, όπου αφαιρώντας από την παραπάνω σχέση τη μεταβλητή του αριθμού των κελιών n , αποδίδεται θερμότητα $q_{created} = 56.48W/cell$.

Διαστασιολόγηση Απαιτούμενης Ροής Κυψέλης Καυσίμου

Για την απόρριψη της παραγόμενης θερμότητας απαιτείται συγκεκριμένη παροχή μάζας, που θα επιτυγχάνει ο ανεμιστήρας εφαρμογής, η οποία υπολογίζεται ως εξής (BALLARD, 2015, p. 58):

$$\dot{m} = \frac{q_{created}}{C_p * (T_{stack} - T_{amb} - 0.403 * q_{removed})} \quad (2.10)$$

όπου \dot{m} η παροχή μάζας αέρα (kg/s), C_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του αέρα υπό σταθερή πίεση (J/kgK), T_{stack} η θερμοκρασία στοίβας και T_{amb} η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Επίσης, ο υπολογισμός της μεταφερόμενης θερμότητας από την ροή δίνεται αντίστοιχα με τη σχέση:

$$Stack \ Heat \ Removed \ by \ Air = \frac{\dot{m} C_p * (T_{stack} - T_{amb})}{1 + 0.403 \dot{m} C_p} \quad (2.11)$$

Πτώση Πίεσης Κυψέλης Καυσίμου

Όταν ο αέρας ρέει μέσα από την στοίβα των κυψελών εμφανίζει πτώση πίεσης, που οφείλεται στην πορώδη δομή της κυψέλης καυσίμου. Η πτώση πίεσης υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (BALLARD, 2015, p. 59):

$$\Delta P = \frac{0.0592 * (T_{stack} + 273)^{1.5}}{T_{stack} + 393} * \frac{\dot{V}_{stack}}{(n+1)} \quad (2.12)$$

όπου $\dot{V}_{stack} = \dot{m}/\rho$ η παροχή όγκου αέρα στοίβας (L/min)

Στην παρούσα εργασία, η πτώση πίεσης υπολογίζεται κατά την διεξαγωγή των προσομοιώσεων, ορίζοντας ένα πορώδες μέσο για το σώμα της κυψέλης καυσίμου, όπως αναλύεται παρακάτω.

2.2.1.2.3 Απόδοση Θερμότητας-Ηλεκτρισμού Κυψέλης Καυσίμου

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια αναλύεται η ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με το κύκλο ζωής, καθώς και για τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Παρακάτω, παρουσιάζεται η απόδοση της κυψέλης καυσίμου σφαιρικότερα. Όπως έχει ειπωθεί, η χημική ενέργεια που αποθηκεύεται στο καύσιμο (H_2) μετατρέπεται από τη κυψέλη καυσίμου σε ηλεκτρική και σε θερμική ενέργεια, όπου η δεύτερη αποτελεί απώλεια του συστήματος και πρέπει να απομακρυνθεί. Οι παρακάτω σχέσεις περιγράφουν την ισορροπία μεταξύ των δύο προϊόντων ενέργειας, που προκύπτουν από την ηλεκτροχημική αντίδραση ως εξής:

$$Total\ Energy\ (W) = Electrical\ Energy + Heat\ Energy \quad (2.13)$$

Η παραπάνω σχέση ισοδυναμεί με την παρακάτω εξίσωση, αντικαθιστώντας με τις μαθηματικές σχέσεις το δεξί σκέλος της άνω εξίσωσης:

$$Total\ Energy\ (W) = V_{stack}I_{stack} + (1.23V - V_{stack})I_{stack} \quad (2.14)$$

Δεδομένου ότι, καθώς το ρεύμα αυξάνεται και η τάση μειώνεται παρατηρείται η αύξηση της παραγόμενης θερμότητας στο σύστημα, καθώς μειώνεται η απόδοση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (BALLARD, 2015, p. 82).

Συμπερασματικά, ισχύει ότι για την μεγιστοποίηση της απόδοσης της κυψέλης πρέπει να μεγιστοποιηθεί η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, μειώνοντας το ποσό έκλυσης θερμότητας του συστήματος.

2.2.2 Ανεμιστήρας

Απαραίτητη για την ρύθμιση της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου ως προς τις θερμοκρασίες λειτουργίας, αλλά και τον έλεγχο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ρύθμιση της ροής αέρα διαμέσου της στοίβας κυψελών, καθώς η ρύθμιση της θερμοκρασίας. Όπως αναλύθηκε παραπάνω εξασφαλίζει την ασφαλή και βέλτιστη λειτουργία της κυψέλης, ενώ η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παροχή καυσίμου (H_2) και του οξειδωτικού μέσου (οξυγόνο ατμοσφαιρικού αέρα). Ο έλεγχος της ροής επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση ενός ανεμιστήρα, του οποίου η τοποθέτηση για την επίτευξη ομοιόμορφης ροής προτείνεται στην έξοδο της κυψέλης καυσίμου (BALLARD, 2015, p. 49), όπως και υλοποιείται στην συγκεκριμένη εφαρμογή του τετράτροχου. Δεδομένου ότι ο ανεμιστήρας έχει προεπιλεγεί και εγκατασταθεί, παρακάτω παρατίθενται απλώς τα τεχνικά χαρακτηριστικά του. Τα παρακάτω δεδομένα αξιοποιούνται για την μοντελοποίηση της ροής στις προσομοιώσεις, καθώς επίσης και κατά τον σχεδιασμό της εξαγωγής του συστήματος, καθώς οι διαστάσεις αυτού αποτελούν παραμέτρους σχεδίασης.

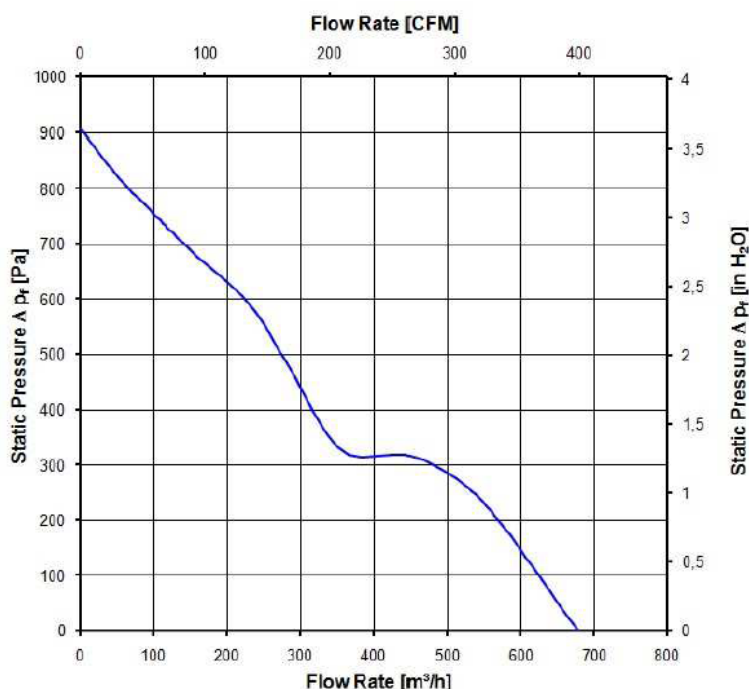
Ο ανεμιστήρας, ο οποίος έχει τοποθετηθεί στο όχημα, είναι της εταιρίας “ebmrapst” και συγκεκριμένα το μοντέλο 6314/2TDHHP. Τα γενικά χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 2-8).

Depth	51,0 mm
Diameter	172,0 mm
Mass	0,875 kg
Housing material	Metal
Impeller material	Plastic
Max. torque when mounted across both mounting flanges	Wire outlet corner: 600 Ncm Remaining corners: 600 Ncm
Screw size	ISO 4762 - M4 degreased, without an additional brace and without washer

Εικόνα 2-8 Γενικά χαρακτηριστικά ανεμιστήρα εφαρμογής (ebmrapst, 2019, p. 3).

Από τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του, που αφορούν στην στατική πίεση σε σχέση με την παροχή μάζας, συμπεραίνεται ότι με την αύξηση της παροχής μάζας η στατική πίεση μειώνεται μη γραμμικά, ενώ για την μέγιστη τιμή παροχής που επιτυγχάνεται, η στατική πίεση μηδενίζεται (Σχήμα 2-1).

Max. free-air flow ($\Delta p = 0 / \dot{V} = \max.$)	680 m ³ /h	
Max. static pressure ($\Delta p = \max. / \dot{V} = 0$)	910 Pa	



Σχήμα 2-1 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά ανεμιστήρα εφαρμογής (ebmrapst, 2019, p. 9).

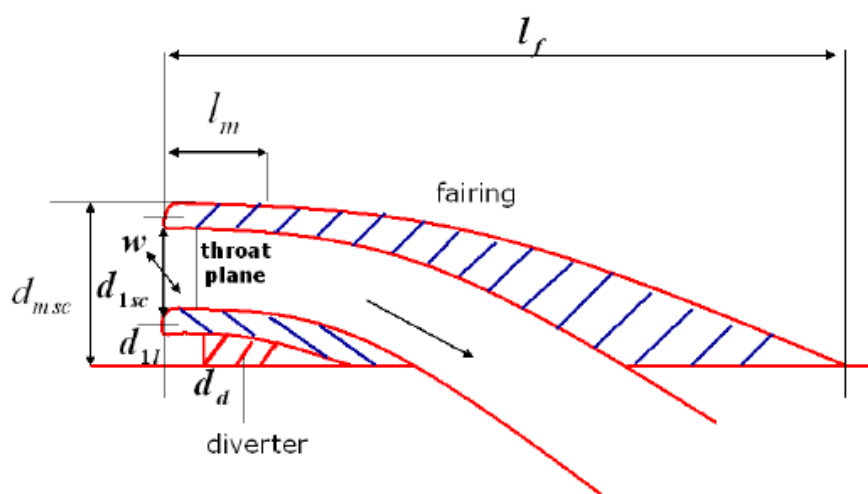
Σημειώνεται ότι κατά την πρακτική εφαρμογή για θερμοκρασίες εκτός των ορίων της κυψέλης καυσίμου, ο ανεμιστήρας δουλεύει στο μέγιστο των στροφών του, αποδίδοντας την μέγιστη τιμή παροχής μάζας για την επίτευξη της θερμοκρασιακής ισορροπίας, όπως και θεωρήθηκε κατά την παρούσα μελέτη.

3 ΑΕΡΑΓΩΓΟΙ

Στη παρούσα εργασία γίνεται η προσέγγιση του προβλήματος μέσα από δύο κύριους τύπους αεραγωγών εισαγωγής-λήψης του αέρα. Η πρώτη προσέγγιση αφορά στους αεραγωγούς τύπου Scoop. Η συγκεκριμένη προσέγγιση απαιτεί την εξαγωγή γεωμετρίας εκτός των ορίων του οχήματος. Η δεύτερη προσέγγιση αφορά στους εμφωλευμένους αεραγωγούς και πιο συγκεκριμένα τον τύπο αεραγωγού τύπου NACA, με την ιδιομορφία καμπυλωμένων και αποκλίνοντων τοιχωμάτων. Κατά την προσέγγιση αυτή δεν απαιτείται εξαγωγή της γεωμετρίας κάτω από το αυτοκίνητο, καθώς, όπως αναλύεται παρακάτω, διαφέρει ως προς τον τρόπο λειτουργίας και συλλογής του αέρα.

3.1 ΑΕΡΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ SCOOP

Η σχεδίαση ενός αεραγωγού τύπου Scoop μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μέρη, στη σχεδίαση του εσωτερικού αγωγού και στην εξωτερική του μορφή. Ο αεραγωγός τυπικά αποτελείται από την περιοχή εισόδου (entrance area), το τμήμα δηλαδή το οποίο τοποθετείται εκτός των ορίων του οχήματος για την συλλογή του αέρα, την περιοχή διαστολής (expansion region), την κύρια (working region) περιοχή και την περιοχή εξαγωγής (exhaust region). Για παράδειγμα, για έναν αγωγό καρμπυρατέρ, το ίδιο το καρμπυρατέρ αποτελεί την κύρια περιοχή, ενώ σε ένα τέτοιο σύστημα δεν ορίζεται περιοχή εξαγωγής. Στο παρον σύστημα αυτό, η κύρια περιοχή είναι αυτή στην οποία γίνεται η ψύξη, δηλαδή η περιοχή στην οποία τοποθετείται πιθανόν κάποια ψήκτρα λαδιού, ένα intercooler ή ο ίδιος ο αερόψυκτος κινητήρας (Naiman & Hill, 1941, p. 9). Η περιοχή εισόδου μπορεί να κατασκευαστεί από κυκλική, ημικυκλική ή ορθογώνια διατομή, ανάλογα με την επιφάνεια εφαρμογής και τις επιθυμητές ιδιότητες. Η σχεδίαση ενός αεραγωγού θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη παραμέτρους όπως τον συντελεστή οπισθέλκουσας, την ανάκτηση πίεσης, την παροχή μάζας, τη γεωμετρία εισαγωγής κ.ά. Για την σχεδίαση απαιτείται η γνώση της ελεύθερης αδιατάρακτης ροής και η αντίστοιχη ταχύτητα, η επιθυμητή παροχή μάζας αέρα, το πάχος του οριακού στρώματος κ.ά. Τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά για τον αεραγωγό είναι το πάχος του τοιχώματος, το μήκος του (l_f) και το ύψος του εκτροπέα οριακού στρώματος (d_d) (Εικόνα 3-1).

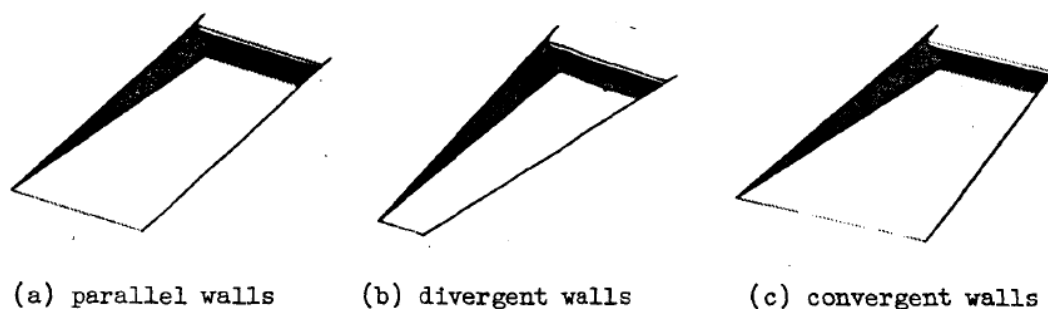


Εικόνα 3-1 Παράμετροι γεωμετρικού σχεδιασμού αεραγωγού Scoop (Rütten, Krenkel, & Freund, 2009, p. 4).

Η τελική παροχή μάζας εντός της εισαγωγής του αέρα εξαρτάται από το πάχος του οριακού στρώματος, το οποίο δημιουργεί τις ανάλογες απώλειες στην παροχή μάζας, ενώ με την διεύρυνση της περιοχής εισαγωγής αντισταθμίζονται οι απώλειες που προκύπτουν (Rütten, Krenkel, & Freund, 2009, p. 4).

3.2 ΕΜΦΩΛΕΥΜΕΝΟΙ ΑΕΡΑΓΩΓΟΙ

Οι εμφωλευμένοι αεραγωγοί χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, οι οποίες σχετίζονται με την γεωμετρία των τοιχωμάτων αυτών (Sacks & Speiter, 1951, p. 5) (*Εικόνα 3-2*).

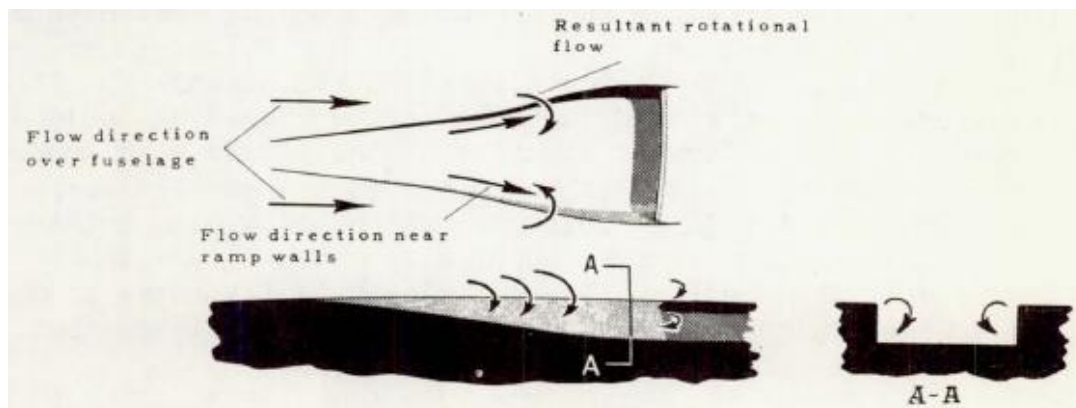


Εικόνα 3-2 Τύποι Εμφωλευμένων Αεραγωγών (Sacks & Speiter, 1951, p. 5).

Συγκεκριμένα, οι αεραγωγοί κατατάσσονται ανάλογα με το εάν τα τοιχώματά τους είναι παράλληλα, αποκλίνοντα ή συγκλίνοντα. Σημειώνεται, ότι δεν είναι κατάλληλοι για εφαρμογή ως είσοδος και συλλογή αέρα για όλους τους τύπους αγωγών μεταφοράς, αλλά έχουν χαρακτηριστικά που τους καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλους για συγκεκριμένες εφαρμογές αγωγών. Συγκεκριμένα δύναται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ψύξης και εξαρτημάτων τροφοδοσίας καυσίμου. Ακόμα, στην περίπτωση αντικατάστασης των αεραγωγών τύπου scoop από εμφωλευμένο αεραγωγό, η αεροδυναμική καθαρότητα του οχήματος δύναται να βελτιωθεί σημαντικά (Mossman & Randall, 1948, pp. 17-18).

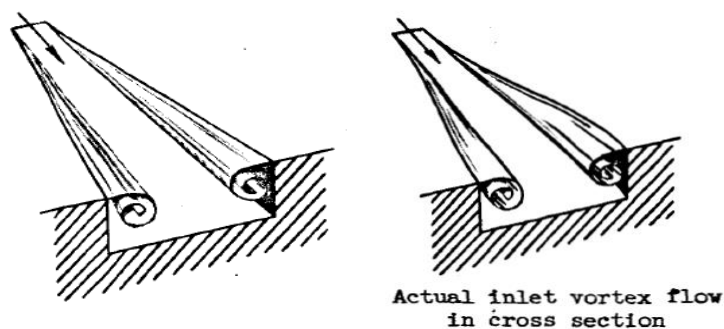
3.2.1 Αεραγωγοί τύπου NACA με καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα

Πλήθος δοκιμών έχουν οδηγήσει στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των αεραγωγών τύπου NACA. Οι δοκιμές αποδεικνύουν ότι η ροή του αέρα κατά μήκος της ράμπας ακολουθεί τα αποκλίνοντα τοιχώματα, ενώ η ροή η οποία λαμβάνει χώρα στην εξωτερική επιφάνεια αναφοράς (οι εν λόγω δοκιμές αφορούν αεροσκάφη), είναι σχεδόν παράλληλη με την ελεύθερη ροή (*Εικόνα 3-3*). Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα την απότομη αλλαγή κατεύθυνσης της ροής του αέρα στις ακμές της ράμπας η οποία οδηγεί σε περιστροφική ροή, δημιουργώντας δίνες (*Εικόνα 3-3, 3-4*) (Perez, Ferreira, da Silva, de Jesus, & Oliveira, 2007). Οι δίνες αυτές συμπαρασύρονται από την ροή πλησίον των τοιχωμάτων, τροφοδοτώντας την εισαγωγή.



Εικόνα 3-3 Λειτουργία αεραγωγού με αποκλίνοντα, καμπυλωμένα τοιχώματα (Denaly, 1948, p. 10).

Στην παρούσα εφαρμογή μελετάται μόνον ο τύπος αεραγωγού με καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα. Η ροή στους τρεις τύπους αγωγών όπως διακρίθηκαν παραπάνω διαφέρουν ως προς τη συμπεριφορά των ροών κατά τη λειτουργία τους και επομένως και ως προς τη μελέτη των φαινομένων τα οποία εκτυλίσσονται γύρω από αυτούς. Στην περίπτωση του μελετώμενου αεραγωγού απαιτείται ανάλυση τριών διαστάσεων, σε αντίθεση με την περίπτωση του αεραγωγού παράλληλων τοιχωμάτων, ο οποίος δύναται να αναλυθεί στις δύο διαστάσεις, καθώς υπάρχουν δύο κύριες διαφορές. Πρώτον, το οριακό στρώμα δεν αναμένεται να συμπεριφέρεται όπως αυτό σε μια διδιάστατη ροή, καθώς η ροή κοντά στο “δάπεδο” της ράμπας είναι αποκλίνουσα (ακολουθώντας τα τοιχώματα). Δεύτερον, η εξωτερική ροή, δεν είναι παράλληλη με τα τοιχώματα της ράμπας (όπως αυτή του αεραγωγού παράλληλων τοιχωμάτων), ενώ πρέπει να ρέει πάνω από την κορυφή των τοιχωμάτων στην εισαγωγή. Ακόμα, είναι δεδομένο ότι εάν η ταχύτητα σε γωνία, όπως οι ακμές των τοιχωμάτων, είναι πεπερασμένη, είναι απαραίτητος ο σχηματισμός ενός φύλλου στροβιλότητας, το οποίο εκτυλίσσεται κατά μήκος κάθε ακμής της εισαγωγής στα αποκλίνοντα τοιχώματα (Εικόνα 3-4β). Η μελέτη του πεδίου ροής σε μια τέτοια είσοδο, περιλαμβάνει εκτός από τη συμπεριφορά του οριακού στρώματος στο σημείο και τη συμπεριφορά των δινών. Οι δίνες οι οποίες δημιουργούνται στο τμήμα μπροστά στην είσοδο, ακολουθούν μία επίπεδη τροχιά των τοιχωμάτων της επιφάνειας αναφοράς. Υπολογιστικά τα “φύλλα” των ελεύθερων στροβίλων δεν μπορεί να παραμείνουν κατάντη της εισόδου, καθώς κάθε νήμα στροβιλισμού που αποτελεί το φύλλο, όντας ελεύθερο να κινείται, πρέπει να ακολουθεί τις ταχύτητες που υπάρχουν στο ρευστό. Κάτι αντίστοιχο ισχύει και κατά την μελέτη των αεραγωγών συγκλίνων τοιχωμάτων η οποία απαιτεί, όπως και στην παρούσα περίπτωση, τριδιάστατη ανάλυση της ροής (Sacks & Speiter, 1951, pp. 5-6).



Εικόνα 3-4 Δημιουργούμενες δίνες στις ακμές ράμπας αεραγωγών α) (αριστερά) επίπεδα αποκλίνοντα τοιχώματα, β) καμπυλωμένα αποκλίνοντα τοιχώματα (Sacks & Speiter, 1951, pp. 6,13).

Ο σχεδιασμός του αεραγωγού εξαρτάται από πλήθος γεωμετρικών παραμέτρων, οι οποίες έχουν καθοριστικό ρόλο στην ορθή λειτουργία του, όσον αφορά στις αναπτυσσόμενες ταχύτητες ροής, στην παροχή μάζας, στην ανάκτηση πίεσης κ.ά., όπως αυτές αναλύονται παρακάτω.

Διαμόρφωση Ράμπας

Γενικά, σύμφωνα με πειραματικές μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί φαίνεται ότι η διαμόρφωση της ράμπας με αποκλίνοντα τοιχώματα επιδρά περιορίζοντας το μέγεθος του οριακού στρώματος αέρα το οποίο ρέει κάτω από την ράμπα, αυξάνοντας την ανάκτηση πίεσης για όλους του λόγους πλάτους εισόδου. Πιο συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι η καλύτερη ανάκτηση πίεσης επιτυγχάνεται σε αεραγωγό λόγου πλάτους προς βάθος 4, με καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα. Ακόμα, παρατηρήθηκε ότι ενώ οι απώλειες πίεσης ήταν πολύ βελτιωμένες σε σχέση με την είσοδο στο σύνολό της, υψηλότερες απώλειες από αυτές που ελήφθησαν χωρίς αποκλίνοντα τοιχώματα βρέθηκαν σε μια μικρή περιοχή κοντά στα πλάγια στο πάνω μισό της εισαγωγής ακριβώς κάτω από το χείλος. Προσπάθειες που έγιναν για να βελτιωθεί αυτή η κατάσταση με στρογγυλοποίηση των άκρων των τοίχων οδήγησαν σε ακόμη μεγαλύτερες απώλειες. Ωστόσο, βελτίωση στο τοπικό φαινόμενο επέφερε η εφαρμογή εκτροπέων (deflectors) κατά μήκος των αποκλίνοντων τοιχωμάτων για λόγους ταχύτητας εισαγωγής μεγαλύτερους από 0.6. (Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945, pp. 5-6). Γενικά υπάρχει η υπόδειξη κατά την σχεδίαση της ράμπας να χρησιμοποιούνται αποκλίνοντα τοιχώματα, καθώς βελτιώνουν την ανάκτηση πίεσης σε τέτοιο βαθμό που το καθιστά βέλτιστο για όλες τις εγκαταστάσεις, ενώ τα καμπυλωμένα αποκλίνοντα τοιχώματα οδηγούν στα καλύτερα χαρακτηριστικά (Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945, pp. 14-15).

Λόγος πλάτους προς βάθος

Κατά τον καθορισμό της επίδρασης της αναλογίας εισόδου στα χαρακτηριστικά της ανάκτησης πίεσης, μέσω σύγκρισης αποτελεσμάτων μιας τετραγωνικής μορφής εισόδου αεραγωγού (2/2) σε σχέση με μία ορθογωνικής εισόδου μορφή αεραγωγού (1/4), προκύπτει ότι η απώλεια στην ανάκτηση πίεσης που προκύπτει από το οριακό στρώμα είναι μικρότερη για την τετραγωνική είσοδο. (Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945, p. 9).

Ακόμα, έχει αποδειχθεί ότι για ράμπα 7° παράλληλων τοιχωμάτων (μη αποκλίνοντα τοιχώματα), αλλάζοντας το λόγο πλάτους προς βάθος από 6 σε 1 αυξάνει τη μέγιστη ανάκτηση πίεσης μετά την διάχυση του αέρα. Το φαινόμενο προκύπτει διότι το μεγαλύτερο μέρος του οριακού στρώματος που αναπτύσσεται μπροστά από μια μη αποκλίνουσα ράμπα, ρέει εντός της εισόδου. Κατά συνέπεια, για τις βαθύτερες και στενότερες εισόδους (όπως αυτές προκύπτουν από μικρότερο λόγο πλάτους προς βάθος) ο αέρας χαμηλής ενέργειας είναι ποσοστιαία λιγότερος της συνολικής ποσότητας που εισχωρεί. Αυξάνοντας την απόκλιση των τοιχωμάτων της ράμπας το φαινόμενο δείχνει να περιορίζεται, καθώς μεγάλο μέρος του οριακού στρώματος εκτρέπεται γύρω από την εισαγωγή, μειώνοντας έτσι το θετικό αποτέλεσμα της μείωσης της αναλογίας πλάτους προς βάθος που προκύπτει από μια μη αποκλίνουσα ράμπα (παράλληλων τοιχωμάτων). Άρα η αναλογία πλάτους προς βάθος που απαιτείται για την ανάκτηση της μέγιστης πίεσης αυξάνεται επίσης, καθώς αυξάνεται η απόκλιση των τοιχωμάτων της ράμπας (Mossman & Randall, 1948, p. 7).

Γωνία Ράμπας

Στις περισσότερες περιπτώσεις η χρήση μίας δεδομένης γωνίας ράμπας προκύπτει από το διαθέσιμο μήκος μπροστά από την εισαγωγή του εκάστοτε αγωγού (Mossman & Randall,

1948, p. 9). Μέσα από μελέτες έχει προκύψει ότι η αύξηση της γωνίας ράμπας οδηγεί σε μείωση της ανάκτησης πίεσης. Αυτό το φαινόμενο δημιουργείται καθώς η αύξηση της γωνίας αυτομάτως οδηγεί σε αύξηση της γωνίας μεταξύ των τοιχωμάτων της ράμπας, κάτι το οποίο οδηγεί σε πιθανή αποκόλληση της ροής. Ακόμα, έχει δειχθεί ότι όσο η απόκλιση των τοιχωμάτων αυξάνεται, η επίδραση της γωνίας αυξάνεται μαζί (Mossman & Randall, 1948, p. 8). Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι για αεραγωγούς με αποκλίνοντα τοιχώματα και για γωνίες ράμπας έως και 10° , η χρήση αποκλίνοντων τοιχωμάτων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών πίεσης, ενώ για γωνία 15° σημειώθηκε μεγάλη απώλεια στην ανάκτηση πίεσης. Τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι όσο η γωνία ράμπας αυξάνει, η απόκλιση των τοιχωμάτων θα πρέπει να μειώνεται (Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945, pp. 6-7). Κατά την σχεδίαση σημειώνεται ότι η γωνία της ράμπας μπορεί να ποικίλει έως και 10° με την πτώση πίεσης να είναι ελαφρώς αυξημένη σε σχέση με μικρότερες τιμές γωνίας, ενώ κατά την χρήση μίας ράμπας μεγαλύτερων μοιρών η απόκλιση των τοιχωμάτων θα πρέπει να μειώνεται αντίστοιχα (Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945, p. 15). Ωστόσο, μελέτες εφαρμογών έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι για αεραγωγούς με αποκλίνοντα και καμπυλωμένα τοιχώματα, ο συνδυασμός γωνίας ράμπας $5-7^\circ$ και λόγου πλάτους προς βάθος από 3 έως 5 οδηγεί στην βέλτιστη απόδοση του αγωγού ως προς την ανάκτηση πίεσης.

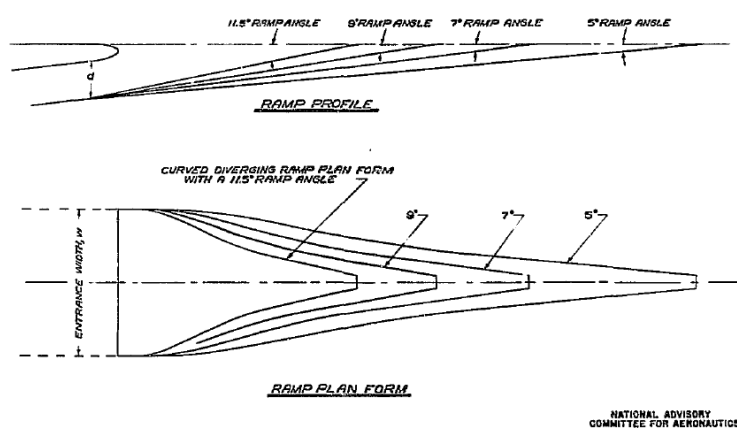


FIGURE 4. - THE GEOMETRIC CHANGE OF THE RAMP WITH RAMP ANGLE; CURVED DIVERGENCE, $w/b = 40$.

Εικόνα 3-5 Γωνίες ράμπας για αεραγωγούς με αποκλίνοντα τοιχώματα (Mossman & Randall, 1948, p. 31).

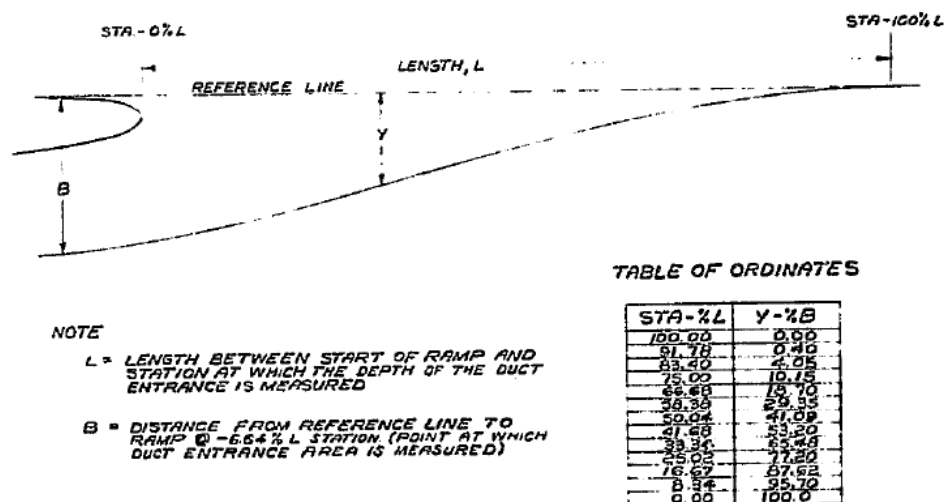
Μήκος Ράμπας

Το μήκος της ράμπας και επομένως της συνολικής γεωμετρίας του αεραγωγού, όπως προαναφέρθηκε, σχετίζεται άμεσα με την γωνία της ράμπας σε σχέση με την επιφάνεια αναφοράς. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται απολύτως από την θέση τοποθέτησης του αεραγωγού, κάτι το οποίο στην παρούσα μελέτη είναι δεδομένο, σύμφωνα με τους πρακτικούς περιορισμούς που προκύπτουν από την χωροθέτηση του εξοπλισμού των ηλεκτρονικών διατάξεων και τη γεωμετρία του σκελετού του οχήματος.

Καμπύλη Ράμπας

Μέσα από σύγκριση της ανάκτησης πίεσης μεταξύ επίπεδου και καμπυλωμένου “δαπέδου” της ράμπας οδηγείται στο συμπέρασμα ότι προκύπτει μία ελαφρά βελτίωση της τάξης του 2% για το καμπυλωμένο επίπεδο της ράμπας. Επομένως η παράμετρος είναι δευτερεύουσας σημασίας ως προς την βελτίωση της ανάκτησης υψηλής πίεσης λόγω της μικρής επίδρασής

της (Mossman & Randall, 1948, p. 6). Στην παρούσα εργασία η παράμετρος έχει συμπεριληφθεί.



Εικόνα 3-6 Καμπυλωμένο "δάπεδο" ράμπας (Mossman & Randall, 1948, p. 32).

Γεωμετρία χείλους-αεροτομής

Κατά την εφαρμογή αυτής της παραμέτρου υπάρχουν δύο κύρια σημεία τα οποία απαιτούν προσοχή. Αφενός, το χείλος απαιτεί σχήμα τέτοιο ώστε να παρέχει μία υψηλή κρίσιμη ταχύτητα σε χαμηλούς λόγους ταχύτητας εισόδου και αφετέρου το χείλος θα πρέπει να διασφαλίζει ότι στάσιμα σημεία της εσωτερικής ροής δεν θα εμφανίζονται σε υψηλούς λόγους ταχύτητας εισόδου ή ακόμα και σε λόγους ταχύτητας εισόδου που προκύπτουν από την στάσιμη λειτουργία του οχήματος στο έδαφος (Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945, p. 7). Τα παραπάνω δεν έχουν εφαρμογή στην παρούσα εργασία, καθώς οι ταχύτητες λειτουργίας διαφέρουν σοβαρά, ωστόσο παρατίθενται βιβλιογραφικά, για λόγους πληρότητας. Ως προς την κατανομή της πίεσης και τον κρίσιμο αριθμό Mach (κάτι το οποίο παρεκκλίνει από την παρούσα εφαρμογή, καθώς βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε υπερηχητικές ταχύτητες), τα χαρακτηριστικά της κρίσιμης ταχύτητας του χείλους εξαρτώνται από την γωνία πρόσπτωσης της ροής στο χείλος. Μείωση στην κλίση της ροής ορίζεται ως μια γωνιακή αλλαγή της ροής, η οποία προκαλεί το σημείο ανακοπής να κινηθεί προς την εξωτερική επιφάνεια του χείλους, μειώνοντας την ταχύτητα επί της εξωτερικής επιφάνειας του χείλους και αντιστρόφως για την εσωτερική επιφάνεια αυτού (Mossman & Randall, 1948, p. 12). Πιο συγκεκριμένα, έχει μελετηθεί και προκύπτει ότι για διάφορες διαμορφώσεις τα χαρακτηριστικά της κρίσιμης ταχύτητας επί του χείλους προσβολής βελτιώνονται, δίνοντας αρνητικές τιμές γωνίας προσβολής, η οποία γενικά δύναται να κυμανθεί από -5° έως 5°. Ακόμα, φαίνεται ότι για αποκλίνοντα τοιχώματα, δίνοντας μία αρνητικότερη γωνία προσβολής κοντά στην ακμή της εισόδου, αντισταθμίζεται η ανεπιθύμητη αλλαγή γωνίας ροής κατά μήκος της εισόδου (Mossman & Randall, 1948, p. 13). Κατά την σχεδίαση προτείνεται ότι κατά την αύξηση της γωνίας ράμπας θα πρέπει να μειώνεται η γωνία πρόσπτωσης του χείλους (Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945, p. 15). Ως προς το σχήμα του χείλους έχουν προταθεί διάφορα σχήματα, ωστόσο στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η αεροτομή που προτείνεται στην αναφορά των (Mossman & Randall, 1948) ανασχεδιασμένη -όπως παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο- σύμφωνα με τις

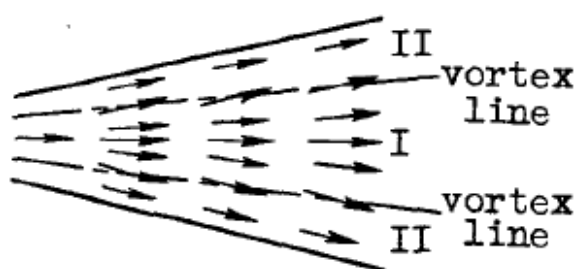
Σημειώνεται ότι το βάθος της εισόδου του αεραγωγού δεν είναι το συνολικό βάθος της ράμπας, καθώς παρεμβάλλεται το χείλος. Συγκεκριμένα, το βάθος εισόδου μετράται από την εφαιπτόμενη πλευρά του χείλους στον αγωγό (εσωτερικά) στο ποσοστό του 75% της καμπύλης του χείλους, κάθετα στο ανώτατο σημείο της εισαγωγής. Το σημείο αυτό αναφέρεται ως σημείο περιστροφής (point of rotation) (Εικόνα 3-7) (Mossman & Randall, 1948, p. 34). Επομένως, το συνολικό βάθος της ράμπας διαφέρει από το άνοιγμα της εισαγωγής που τροφοδοτεί τελικά με αέρα τον αγωγό.



Η θέση τοποθέτησης των αεραγωγών εξαρτάται άμεσα από το μήκος της ράμπας, όπως αυτό προκύπτει σε συνδυασμό με τη γωνία κλίσης της. Συνήθως εξετάζονται οι περιοχές στις οποίες κατά την κίνηση των οχημάτων προκύπτει καλής ποιότητας ροή. Ωστόσο, όπως αναλύεται παρακάτω, στην συγκεκριμένη εφαρμογή η θέση τοποθέτησης των αεραγωγών είναι μοναδική, δεδομένων των στενών περιορισμών της κατασκευής.

Το οριακό στρώμα ενδιαφέροντος στους εμφωλευμένους αεραγωγούς αναπτύσσεται στο δάπεδο της ράμπας καθώς και στα τοιχώματα αυτής. Το οριακό στρώμα στα τοιχώματα της ράμπας είναι περιορισμένο σε μικρή περιοχή και δεν αναμένεται γενικά να προκαλεί απώλειες στην είσοδο, εκτός και εάν προκύπτει έντονη απόκλιση των τοιχωμάτων η οποία οδηγεί σε αποκόλληση της ροής από τα τοιχώματα (Sacks & Speiter, 1951, p. 7) (αποκόλληση). Έχει αποδειχθεί ότι η τάξη μεγέθους της απώλειας του οριακού στρώματος των τοιχωμάτων της ράμπας είναι 5-10% αυτής που οφείλεται στο οριακό στρώμα του δαπέδου της (Sydney, 1938). Αντιθέτως, το οριακό στρώμα του δαπέδου της ράμπας αναπτύσσεται έντονα, καλύπτοντας μεγαλύτερη επιφάνεια και για το λόγο αυτό μελετάται εκτενέστερα σε αρκετές αναφορές. Ο ρυθμός ανάπτυξης του οριακού στρώματος δαπέδου αποδεικνύεται ότι εξαρτάται από την κατανομή της πίεσης και από την απόκλιση (ή τη

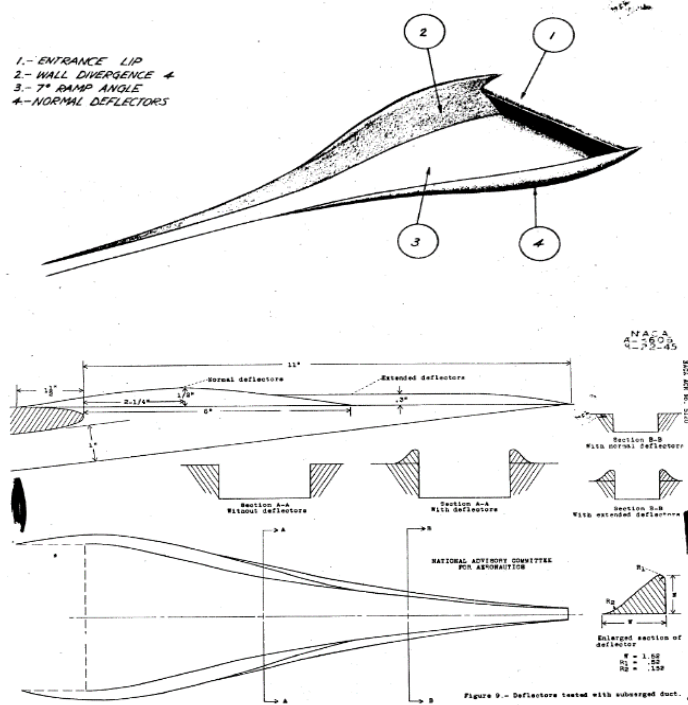
σύγκλιση) της ροής. Η κατανομή της πίεσης, με τη σειρά της, καθορίζεται από τη γεωμετρία εισόδου και από τον λόγο ροής-μάζας, ενώ η απόκλιση της ροής επηρεάζεται κυρίως από τις καμπύλες των τοιχωμάτων της εισόδου και από τις ταχύτητες λόγω των δινών που προκαλούνται. Στην επιφάνεια του δαπέδου της αποκλίνουσας ράμπας, οι ταχύτητες που προκαλούνται από τις δίνες είναι σε κατευθύνσεις μακριά από την γραμμή συμμετρίας της ράμπας, με μέγιστη επιρροή κάτω από το κέντρο των δινών. Δεδομένου ότι η ράμπα έχει δύο τοιχώματα, η ροή κατά μήκος της ράμπας μπορεί να χωριστεί σε τρεις ζώνες, δύο τύπων (Εικόνα 3-8). Έχει παρατηρηθεί ότι οι δίνες στις περιοχές πλησίον των τοιχωμάτων μειώνουν την απόκλιση της ροής, ενώ στην μεσαία περιοχή την αυξάνουν. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι το οριακό στρώμα στο δάπεδο αποκλίνουσας ράμπας θα είναι λεπτότερο κοντά στον άξονα συμμετρίας, ενώ προς τα τοιχώματα της ράμπας θα αυξάνεται το πάχος του (Sacks & Speiter, 1951, pp. 7-8).



Εικόνα 3-8 Ζώνες ταχυτήτων στο επίπεδο της ράμπας (Sacks & Speiter, 1951, p. 8).

Εκτροπείς (Deflectors)

Οι εκτροπείς αυξάνουν την ανάκτηση πίεσης, βοηθώντας τη ροή που λαμβάνει χώρα εκτός της ράμπας να ακολουθήσει τις καμπύλες των αποκλίνοντων τοιχωμάτων. Αυτό εμποδίζει μεγάλο μέρος της ροής πάνω από τις ακμές των τοιχωμάτων της ράμπας, ενώ βοηθά στην εκτροπή μεγαλύτερου μέρους του οριακού στρώματος γύρω από την είσοδο. Επιπροσθέτως φαίνεται ότι οι εκτροπείς προκαλούν αύξηση των ταχυτήτων στο επίπεδο της ράμπας. Συγκεκριμένα, μετρήσεις χαρακτηριστικών κρίσιμης ταχύτητας στο χείλος της ράμπας με αποκλίνοντα και καμπυλωμένα άκρα έχουν δείξει ότι η προσθήκη εκτροπέων αυξάνει τον κρίσιμο αριθμό Mach για την ροή πάνω στην εξωτερική επιφάνεια στο κέντρο της διατομής εισόδου, ενώ μειώνει τη ροή αυτή πλησίον των ακμών της εισόδου. Για το λόγο αυτό υποδεικνύεται η χρήση μεγαλύτερης διακύμανσης της γωνίας ροής κατά το μήκος εισόδου για τους εκτροπείς. Ωστόσο, σημειώνεται ότι αποτελέσματα άλλης αναφοράς υποδηλώνουν ότι η ανάγκη για τοποθέτηση εκτροπέων εξαρτάται από την θέση της εισαγωγής. Συγκεκριμένα έχει βρεθεί ότι όταν η είσοδος τοποθετείται σε περιοχή λεπτού οριακού στρώματος, αυξάνοντας το μήκος των εκτροπέων από 50% σε 100% του μήκους της ράμπας προκαλείται μείωση της ανάκτησης πίεσης. Επομένως, έχει επικρατήσει η ιδέα ότι πιθανόν οι εκτροπείς οι οποίοι εκτείνονται καθ' όλο το μήκος της ράμπας θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις μεγάλου πάχους οριακού στρώματος. Ακόμα, ισχύει ότι αυξάνοντας το μέγεθος των εκτροπέων (μήκος και ύψος) αυξάνεται η οπισθέλκουσα στο όχημα (Mossman & Randall, 1948, pp. 16-17). Στην παρούσα εργασία δεν εξετάζεται η χρήση εκτροπέων.



Εικόνα 3-9 Εκτροπείς (Deflectors) (από πάνω): κάθετοι ως προς τη ράμπα, (κάτω): κάθετοι και εκτεινόμενοι καθ' όλο το μήκος ράμπας και διατομές αυτών (Frick, Davis, Randall, & Mossman, 1945, σσ. 27, 34).

Γεννήτριες δινών (Vortex Generators)

Για την βελτίωση της απόδοσης των εμφωλευμένων αεραγωγών εκτός από του εκτροπείς έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί επίσης οι γεννήτριες δινών. Ωστόσο καμία από τις δύο τεχνικές δεν έχει δείξει σημαντικά προτερήματα σε σχέση με την άλλη, κατά την διερεύνησή τους. Η μέθοδος αυτή οδηγεί στην ανάμειξη της ελεύθερης ροής με το οριακό στρώμα, το οποίο αναπτύσσεται εντός του αεραγωγού, στοχεύοντας στην αύξηση της απόδοσης του αεραγωγού κατά την μείωση του πάχους του οριακού στρώματος. Αποτελέσματα υπολογιστικών μελετών για τις γεννήτριες δινών, για εφαρμογές σε εμφωλευμένους αεραγωγούς τύπου NACA, έχουν δείξει ότι για πολλές διαμορφώσεις, η γεννήτριας δινών προκαλεί σημαντικές μειώσεις στο πάχος του οριακού στρώματος και επομένως στην απόδοση του αεραγωγού. Σημειώνεται ότι προκύπτουν βελτιώσεις συγκρίνοντας μία συμβατική εισαγωγή NACA με αυτή με προσθήκη γεννήτριας ως προς την ανάκτηση πίεσης έως και 58% καθώς και για την παροχή μάζας έως και 21%, ενώ η οπισθέλκουσα του συνόλου που προκύπτει από την προσθήκη της γεννήτριας είναι της τάξης του 10% (Perez, Ferreira, da Silva, de Jesus, & Oliveira, 2007). Στην παρούσα εργασία δεν εξετάζεται η χρήση γεννητριών δινών.

3.3 ΣΥΝΤΟΜΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΕΡΑΓΩΓΩΝ

Γενικά, προκύπτει ότι η ικανότητα ανάκτησης πίεσης των αεραγωγών τύπου NACA φαίνεται να είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση τους αεραγωγούς τύπου Scoop, ωστόσο όμως είναι βέβαιο ότι υπερτερούν ως προς την δημιουργούμενη οπισθέλκουσα δύναμη, χαρακτηριστικό το οποίο είναι το κύριο μειονέκτημα των εισαγωγών τύπου Scoop (Rütten,

Krenkel, & Freund, 2009, p. 3). Συγκρίνοντας τους δύο τύπους μέσα από πειραματικές μελέτες για ταχύτητες με αριθμό Mach εύρους από 0.79 έως 1.12, γωνία πρόσπτωσης εύρους 0° έως 9° και εύρος λόγου ροής-μάζας από 0 έως 0.92 συμπεραίνεται ότι (Frank & Taylor, 1951, p. 10):

- Για λόγους παροχής μάζας κάτω από 0.50, ο λόγος ανάκτηση πίεσης (για τον κινητήρα αεροσκάφους) μετρούμενος στην είσοδο αεραγωγού τύπου NACA ήταν υψηλότερος από τον αεραγωγό τύπου Scoop (χωρίς έλεγχο του οριακού στρώματος) για όλες τις γωνίες προσβολής και τις ταχύτητες, ενώ για τη μέγιστη τιμή του λόγου ροής-μάζας και γωνία πρόσπτωσης 0° η ανάκτηση πίεσης των δύο αεραγωγών ήταν ίση.
- Αυξάνοντας την γωνία πρόσπτωσης, επηρεάζεται δυσμενέστερα ως προς την ανάκτηση πίεσης ο εμφωλευμένος αεραγωγός παρά ο αεραγωγός Scoop. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει στον εμφωλευμένο αγωγό και καθώς μειώνεται η γωνία πρόσπτωσης παράλληλα με την αύξηση της ταχύτητας.
- Η αύξηση της εξωτερικής οπισθέλκουσας είναι μεγαλύτερη για τον αεραγωγό τύπο Scoop σε σχέση με τον NACA μέχρι 1.08 Mach με 0° πρόσπτωση και μέχρι τον μέγιστο 1.10 Mach για γωνία πρόσπτωσης 6° .

Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι η βιβλιογραφία που παρουσιάζεται όπως είναι προφανές αφορά εφαρμογές αεροσκαφών και ως εκ τούτου εξειδικεύεται σε σχετικά πεδία. Ωστόσο, δίνει μια γενική εικόνα λειτουργίας των αντίστοιχων αεραγωγών και συμπεράσματα πρακτικών εφαρμογών, τα οποία είναι χρήσιμα για την κατεύθυνση και την αρχή σχεδιάσής τους.

4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η μελέτη του συστήματος ψύξης της κυψέλης προσεγγίζεται μέσα από δύο τύπους εισαγωγής του ατμοσφαιρικού αέρα, ενώ και στις δύο περιπτώσεις ο τελικός διαχύτης του αέρα ο οποίος λειτουργεί για την εξαγωγή παραμένει αμετάβλητος. Δεδομένου ότι μελετώνται διάφορες γεωμετρίες ως προς την αποδοτικότητά τους, απαιτείται η κατασκευή πολλαπλών μοντέλων CAD. Για τον λόγο αυτό το αρχικό μοντέλο σχεδιάστηκε παραμετρικά, με τρόπο τέτοιο ώστε να δύναται να τροποποιηθεί εύκολα και γρήγορα ως προς τις διαστάσεις του. Οι τύποι εισαγωγής οι οποίοι μελετώνται μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη τύπος αφορά στην μέθοδο συλλογής του αέρα μέσω ενός αεραγωγού τύπου Scoop, ο οποίος παρέχει αέρα σε ένα αγωγό τύπου “S” και είναι εξοπλισμένος με εσωτερικά οριζόντια και κάθετα πτερύγια για τον έλεγχο και την κατεύθυνση της ροής. Για τον πρώτο τύπο κατασκευάστηκαν τρία μοντέλα, τα οποία διαφέρουν ως προς τις θέσεις των οριζόντιων εσωτερικών πτερυγίων, ενώ το τελευταίο μοντέλο εξοπλίζεται επιπλέον με κάθετα πτερύγια. Ο δεύτερος τύπος εισαγωγής αφορά στην μέθοδο εισαγωγής του αέρα μέσω αεραγωγών τύπου NACA, οι οποίοι τροφοδοτούν και πάλι τον κύριο αγωγό τύπου “S” με αέρα. Ο αγωγός σε αυτή την περίπτωση διατηρεί τη δομή των εσωτερικών οριζόντιων και κάθετων πτερυγίων για τον έλεγχο της ροής, ενώ σε αυτόν συνδέονται τέσσερις αεραγωγοί NACA με αποκλίνοντα καμπυλωμένα τοιχώματα. Για τον τύπο αυτό, κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα, τα οποία διαφέρουν ως προς τους αεραγωγούς NACA, καθώς το δεύτερο μοντέλο εφοδιάζεται με επιπλέον χείλος πρόσπτωσης της ροής σε κάθε έναν αεραγωγό εκ των τεσσάρων, για την κατεύθυνση της ροής.

Για την σχεδίαση χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πακέτο “CATIA V5R20” της εταιρίας “Dassault Systemes”, το οποίο δίνει την δυνατότητα τρισδιάστατης σχεδίασης (3D modeling) καθώς και εικονικής συναρμολόγησης (Assembly). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το πακέτο της συναρμολόγησης για τη συσχέτιση των τμημάτων του οχήματος, τα οποία προέρχονται από προγενέστερους σχεδιασμούς, τα οποία εν συνεχεία μετατράπηκαν σε ένα ενιαίο μοντέλο για την αποδοτικότερη σχεδίαση, όπως αυτή προκύπτει από την χρήση όλης της περιβάλλουσας γεωμετρικής πληροφορίας, κάτι το οποίο ήταν απαραίτητο για τον ορισμό των περιορισμών κατά την παραμετρική σχεδίαση. Η σχεδίαση του μητρικού μοντέλου έγινε στο περιβάλλον “Generative Shape Design”, το οποίο διατίθεται στην εργαλειοθήκη του CATIA. Το περιβάλλον του “Generative Shape Design” παρέχει όλες τις δυνατότητες σχεδίασης δύο και τριών διαστάσεων, επιφανειών και στερεών, καθιστώντας δυνατή οποιαδήποτε επιθυμητή μορφοποίηση, ενώ η φιλοσοφία σχεδίασης ακολουθεί τις πρακτικές της ιεραρχικής σχεδίασης μέσα από δέντρα σχεδίασης. Τα δέντρα σχεδίασης δύναται να απαρτίζονται από διάφορους τύπους κατηγοριοποίησης, ανάλογα το είδος του μοντέλου, όπως τα στοιχεία “Body” και τα στοιχεία “Geometrical Set”, με τα οποία μπορεί κανείς να κατηγοριοποιήσει και να ιεραρχήσει το μοντέλο.

Για τη σχεδίαση λαμβάνονται υπόψη τόσο οι γεωμετρικοί περιορισμοί όσο και οι κανονισμοί του διαγωνισμού, στον οποίο το όχημα λαμβάνει τακτικά μέρος, όπως αναλυτικά περιγράφονται παρακάτω.

4.2 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ - ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ - ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το σύστημα ψύξης της κυψέλης υδρογόνου αποτελείται από τον αεραγωγό εισαγωγής του αυτοκινήτου, ο οποίος οδηγεί τον αέρα του περιβάλλοντος στην επιφάνεια της κυψέλης και τον αεραγωγό απαγωγής του αέρα από την οπίσθια επιφάνεια της κυψέλης. Μεταξύ αυτών παρεμβάλλεται η κυψέλη υδρογόνου, την οποία ο ατμοσφαιρικός αέρας διαπερνά, ενώ ο αεραγωγός απαγωγής ακολουθείται από την διάταξη του ανεμιστήρα, ο οποίος αναλαμβάνει το έργο της ρύθμισης της εξαναγκασμένης ροής, ανάλογα με τις απαιτήσεις, όπως αναλύθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Κατά την σχεδίασης λαμβάνεται υπόψη πληθώρα παραμέτρων. Αξιολογείται η υφιστάμενη τοπολογία και οι λοιπές διατάξεις λειτουργίας του οχήματος, οι οποίες επιδρούν καθοριστικά στον διαθέσιμο χώρο σχεδίασης του συνολικού συστήματος, καθιστώντας ιδιαίτερα στενά τα όρια της σχεδίασης (όπως αναλύεται παραπάνω), με τις επιπτώσεις αυτού να αναλύονται και να επεξηγούνται στο τελικό κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη οι κανονισμοί και οι περιορισμοί του διαγωνισμού, στον οποίο το όχημα συμμετέχει. Οι περιορισμοί, αφορούν στην κατηγορία οχήματος πόλης «Urban Concept Class». Κατά τους κανονισμούς καθορίζονται αυστηρές προϋποθέσεις, μεταξύ αυτών και οι διαστάσεις των οχημάτων που λαμβάνουν μέρος στον διαγωνισμό, όπως περιγράφονται παρακάτω (Zheng, 2023, pp. 22-23):

- Ολικό ύψος οχήματος μεταξύ 1000mm και 1300mm.
- Ολικό πλάτος οχήματος, εξαιρουμένων των καθρεπτών οπίσθιας θέασης, μεταξύ 1200mm και 1300mm.
 - Πλάτος οχήματος μετρούμενο στον εμπρόσθιο άξονα 1000mm κατ' ελάχιστο .
 - πλάτος οχήματος μετρούμενο στον οπίσθιο άξονα 800mm κατ' ελάχιστο , μετρούμενα μεταξύ των μέσων των ελαστικών όπου αυτά αγγίζουν το οδόστρωμα.
- Ολικό μήκος οχήματος μεταξύ 2200mm και 3500mm.
- Μήκος μεταξονίου 1200mm κατ' ελάχιστο.
- Ύψος χώρου οδήγησης 880mm και 700mm στους ώμους του οδηγού κατ' ελάχιστο.
- Η απόσταση του αμαξώματος και του πλαισίου του από το έδαφος πρέπει να είναι τουλάχιστον 100 mm με τον οδηγό (και το απαραίτητο φορτίο) στο όχημα.
- Μέγιστο βάρος (χωρίς οδηγό) 225kg.
- Οι παραπάνω διαστάσεις δεν πρέπει να επιτυγχάνονται με πρόσθετες προεκτάσεις ή κοψίματα επί του οχήματος.

Οι λοιπές προϋποθέσεις και κανονισμοί του διαγωνισμού ξεφεύγουν από τις ανάγκες της παρούσας εργασίας και ως εκ τούτου δεν περιγράφονται.

Η σχεδίαση, η οποία αφορά το σύστημα ψύξης, επηρεάζεται έμμεσα από τις περισσότερες από τις παραπάνω συνθήκες, οι οποίες καθορίζουν τα λοιπά συστήματα κυρίως, και άμεσα από την έκτη και την έβδομη παρατήρηση, οι οποίες αφορούν το βάρος του οχήματος και την απόσταση αυτού από το οδόστρωμα. Είναι σαφές λοιπόν ότι το σύστημα ψύξης θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ελαφρύτερο, κάτι το οποίο σχετίζεται με το υλικό

κατασκευής του και εξαρτάται από τον όγκο και επομένως από την μάζα του. Αυτό, πέραν της απαίτησης του κανονισμού, αποτελεί και σημαντικό κριτήριο για την ελαχιστοποίηση του συνολικού βάρους και επομένως την βελτίωση της απόδοσης του οχήματος. Ο κύριος περιορισμός του διαγωνισμού, ο οποίο επιδρά σημαντικά στην σχεδίαση, είναι αυτός της ελάχιστης απόστασης του οχήματος από το έδαφος, καθώς θέτει ισχυρό περιορισμό στον ένα εκ των δύο τύπων σχεδιασμού της εισαγωγής. Ο τύπος ο οποίος επηρεάζεται, είναι αυτός ο οποίος χρησιμοποιεί για την συλλογή αέρα αεραγωγό τύπου Scoop. Ο εν λόγω αεραγωγός, δεν δύναται να βρει έξοδο από άλλο τμήμα του οχήματος, όπως προκύπτει παρακάτω, δεδομένου της γεωμετρίας του κελύφους, του σκελετού του οχήματος, καθώς και των λοιπών ηλεκτρολογικών διατάξεων, καθιστώντας την έξοδο από το δάπεδο του οχήματος μόνη πιθανή πρόταση προς μελέτη (για τη δεδομένη γεωμετρία του οχήματος).

4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Προσδιορίζοντάς τον εννοιολογικά, ο παραμετρικός σχεδιασμός είναι μία διαδικασία που επιτρέπει την έκφραση παραμέτρων οι οποίες όταν συνδυαστούν ορίζουν, κωδικοποιούν και ξεκαθαρίζουν την σχέση μεταξύ σχεδιαστικής πρόθεσης και σχεδιαστικής απόκρισης. Ο όρος “παραμετρικός” προέρχεται από τον μαθηματικό όρο της “παραμετρικής εξίσωσης”, όπου μέσα από την χρήση και αλλαγή των τιμών ορισμένων παραμέτρων ή μεταβλητών δύναται να αλλαχθεί ή να διαφοροποιηθεί το τελικό αποτέλεσμα μίας εξίσωσης (Βαμβακίδης, 2017, p. 28). Ο παραμετρικός σχεδιασμός βασίζεται σε αλγοριθμικό τρόπο σκέψης και επιτρέπει την έκφραση των παραμέτρων για τον προσδιορισμό των σχέσεων μεταξύ των στοιχείων σχεδίασης, προκειμένου να οριστεί ένα σύνολο πολλαπλών λύσεων (Αραρακοπούλος, 2019, p. 14). Στην πράξη ο στόχος του παραμετρικού σχεδιασμού στο περιβάλλον CAD είναι να δημιουργήσει τριδιάστατες αναπαραστάσεις, ευέλικτες και αρκετά σύνθετες. Ένα παραμετρικό μοντέλο συνοδεύεται από τη μαθηματική περιγραφή, τις παραμέτρους, τους περιορισμούς, που δίνουν την δυνατότητα να τροποποιηθεί σε οποιαδήποτε φάση μοντελοποίησης, δοκιμαζόμενο με διάφορους τρόπους, γεγονός το οποίο καθιστά ισχυρό πλεονέκτημα (Ghionea, Cukovic, & Devedzic, 2014) .

Σε αυτή την εργασία, τα μοντέλα τα οποία σχεδιάζονται ακολουθούν πιστά την μέθοδο του παραμετρικού σχεδιασμού. Η εφαρμογή ξεκίνησε από τη σχεδίαση των βασικών μοντέλων εντός του επιτρεπόμενου χώρου σχεδίασης – όπως αυτός μελετάται εκτενώς παρακάτω - διαισθητικά, όντας όμως εξαρτημένα στενά τα μοντέλα, ως προς όλα τους τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με εξωτερικές παραμέτρους σχεδίασης, οι οποίες περιορίζονται από εύρη τιμών τέτοια ούτως ώστε να μην παραβιάζεται ο επιτρεπτός όγκος. Οι παράμετροι των μοντέλων είναι στενά και άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους, ακολουθώντας μία ιεραρχική σχεδίαση, γεγονός το οποίο καθιστά τα μοντέλα σχεδίασης δυναμικά, που αλληλοεπιδρούν “έξυπνα”, οδηγώντας σε ένα ευσταθές, με απόλυτο σεβασμό ως προς τους περιορισμούς, μοντέλο. Κατά την εφαρμογή κάθε στοιχείου της σχεδίασης, είτε πρόκειται για βοηθητικό στοιχείο όπως καμπύλες, προβολές στοιχείων τριών ή και δύο διαστάσεων, επιφάνειες και επίπεδα σχεδίασης τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία τελικών μοντέλων, είτε πρόκειται για τα τελικά στερεά μοντέλα, αυτά ελέγχονται και μεταβάλλονται από τον πίνακα εξισώσεων μέσω μεταβλητών άμεσα, ή έμμεσα με την βοήθεια αλληλεξαρτώμενων περιορισμών και σχέσεων. Η βαρύτητα της ιεραρχικής σχεδίασης είναι μεγάλη, καθώς ο συλλογισμός ακολουθεί την σειρά της κατασκευής όπου χρειάζεται με συγκεκριμένη ιεραρχία, ενώ όταν πρόκειται για ανεξάρτητα μοντέλα (στην συγκεκριμένη περίπτωση τα μοντέλα είναι πάνω του ενός) αυτά μεταβάλλονται παράλληλα και ανεξάρτητα μεταξύ τους, χρησιμοποιώντας τους κοινούς περιορισμούς, εξισώσεις και μεταβλητές. Οι γενικοί

παράμετροι, μεταβλητές και σχέσεις των μοντέλων παρατίθενται στον [Πίνακα 4-1](#), ομαδοποιημένες ως προς τη φιλοσοφία τους (σχέση-τιμή μεταβλητής), καθώς και ως προς το πεδίο εφαρμογής. Από τον παραπάνω τρόπο δημιουργίας του αρχικού μοντέλου δημιουργείται πλήθος εναλλακτικών γεωμετρικών μοντέλων, τα οποία υπόκεινται στις απαιτήσεις βελτίωσης, ανάλογα με τα αποτελέσματα των υπολογιστικών προσεγγίσεων που πραγματοποιούνται, καθιστώντας έτσι γρηγορότερη και ευκολότερη την παραγωγή τους, εξοικονομώντας χρόνο, και διασφαλίζοντας την συνέχεια μεταξύ τους ως προς τις μεταβολές στις οποίες υπόκεινται. Σε αντίθετη περίπτωση θα απαιτούνταν πολύ περισσότερος χρόνος και ενέργεια για την επανασχεδίαση κάθε πακέτου μοντέλων.

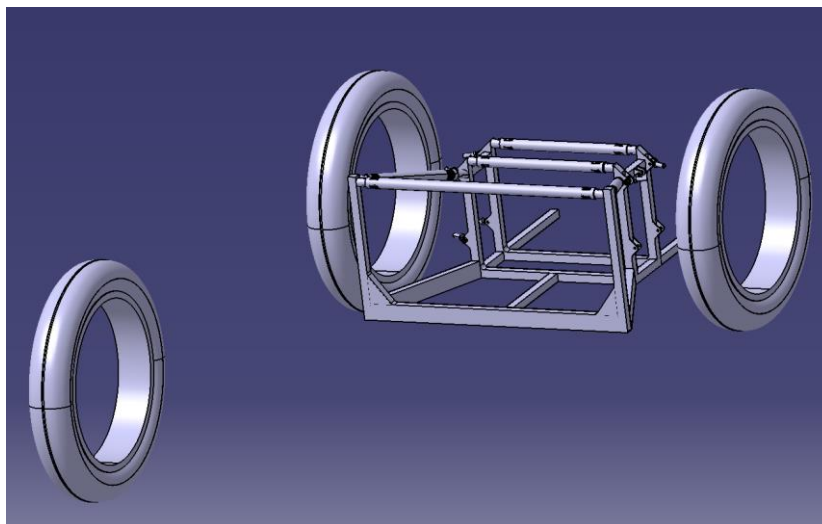
Σημειώνεται, ότι παρά την δυνατότητα που δίνεται από το παραμετρικό μοντέλο, αυτό δεν αλληλοεπιδρά με το σύστημα προσομοιώσεων, καθώς τα μοντέλα λόγω της φύσης της παρούσας μελέτης αποτελούνται από πλήθος μεταβλητών και ελάχιστων σταθερών, γεγονός το οποίο καθιστά ιδιαίτερα σύνθετη την διαδικασία αυτοματοποιημένης σχεδίασης.

4.4 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ - ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΕ CAD

Για τον ακριβή προσδιορισμό του διαθέσιμου όγκου που εναπομένει για τον σχεδιασμό του συνολικού μοντέλου ψύξης/οξείδωσης της κυψέλης καυσίμου, καθίσταται απαραίτητη η λεπτομερής αποτύπωση της συνολικής υφιστάμενης - και συνεχώς εξελισσόμενης - διάταξης των επιμέρους μηχανολογικών στοιχείων (απαραίτητα για την ολοκληρωμένη λειτουργία του οχήματος), τα οποία συνθέτουν έναν ιδιόμορφο περιβάλλον γύρω από την κυψέλη καυσίμου. Για να προκύψει ο διαθέσιμος χώρος για τον σχεδιασμό έγινε προσεκτική εξέταση της υφιστάμενης κατασκευής, με στόχο την συλλογή των δεδομένων που απαιτούνται για τον προσδιορισμό του. Ο διαθέσιμος όγκος προσδιορίζεται από την ίδια την κυψέλη, τις πρόσθετες βάσεις στήριξης αυτής στον σκελετό, τον σκελετό του οχήματος, την ηλεκτρική διάταξη των υπερ-πυκνωτών, την απόσταση του οχήματος από το έδαφος και το αεροδυναμικό κέλυφος του οχήματος. Ουσιαστικά, επρόκειτο για την συναρμολόγηση των επιγραμματικά προαναφερθέντων διατάξεων στο χώρο, όπως αυτές θα αναλυθούν διεξοδικότερα παρακάτω. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον συναρμολόγησης (Assembly Design) του Catia V5R20, δημιουργώντας ένα αρχείο .CATProduct, το οποίο αποτελείται από επιμέρους αρχεία .CATPart για κάθε ένα στοιχείο που έλαβε μέρος στη συναρμολόγηση. Εν συνεχεία η συνολική συναρμολόγηση μετατράπηκε σε ένα αρχείο .CATPart όπου κάθε στοιχείο μετατρέπεται με τη σειρά του σε μοντέλο (Body), ώστε κατά τη σχεδίαση να είναι ευκολότερα ορατά τα ενδιαφερόμενα στοιχεία και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση (όπως λόγου χάρη η λήψη μετρήσεων μεταξύ των αντικειμένων και η χρήση τους ως δομικά στοιχεία μέσω των προβολικών εργαλείων). Επιπλέον, συμβάλει στην οπτική αντίληψη του τρισδιάστατου χώρου, καθιστώντας απλούστερη τη σχεδίαση για το χρήστη, εκμεταλλευόμενος ευκολότερα όλα τα δεδομένα.

Το οπίσθιο τμήμα της συνολικής διάταξης του σκελετού του οχήματος, στο εσωτερικό του οποίου εδράζεται η κυψέλη καυσίμου (όπως θα αναλυθεί παρακάτω), καθώς και τροχοί αυτού, λήφθηκαν από την νεότερη υπάρχουσα μελέτη σχεδίασης, η οποία έχει υλοποιηθεί στο όχημα ER2022 (Στεφανούλης, 2023) ([Εικόνα 4-1](#)). Το τμήμα λήφθηκε σε μορφή αρχείου .step, το οποίο εισήχθη με τρόπο τέτοιο ώστε να είναι λειτουργικότερο κατά την σχεδίαση στο CATIA, δεδομένου ότι είχε σχεδιαστεί σε άλλο λογισμικό CAD. Ο σκελετός του οχήματος

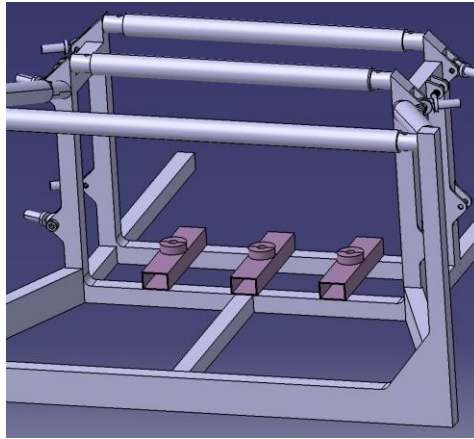
αποτελεί το βασικό σημείο αναφοράς, βάση του οποίου πραγματοποιούνται οι μεταγενέστερες συναρμολογήσεις. Έχοντας ολοκληρωθεί η εισαγωγή και ψηφιοποίηση των απαιτούμενων γεωμετριών, για το σύνολο των στοιχείων τα οποία αφορούν στον σκελετό του οχήματος, δημιουργήθηκε ένα νέο «Body», στο οποίο εντάχθηκε το σύνολο των στοιχείων για την ευκολότερη διαχείρισή τους.



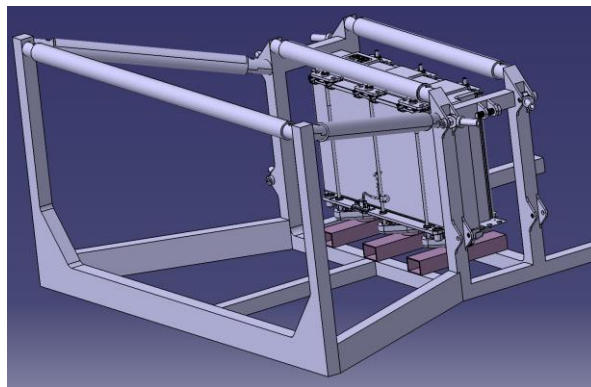
Εικόνα 4-1 Οπίσθιο τμήμα σκελετού & τροχοί οχήματος ER2022.

Κατά το δεύτερο στάδιο της συναρμολόγησης στο CAD έπρεπε να τοποθετηθεί η κυψέλη καυσίμου επί του σκελετού. Για να ολοκληρωθεί αυτή απαραίτητη ήταν η λήψη φυσικών μετρήσεων επί του πρωτότυπου οχήματος για την σχεδίαση της βάσης στήριξης της κυψέλης καυσίμου. Κατά την μελέτη του πρωτότυπου παρατηρήθηκε η απουσία (σε σχέση με το παραπάνω σχέδιο του σκελετού) τριών δοκών, οι οποίοι εδράζονται επί αυτού, ενώ εντοπίστηκαν και τρεις κυλινδρικές βάσεις, οι οποίες με την σειρά τους εδράζονται επί των τριών δοκών. Τα παραπάνω μετρήθηκαν ως προς τα φυσικά τους χαρακτηριστικά και ως προς την πραγματική τους θέση στο σκελετό του αμαξώματος, σχεδιάστηκαν και προστέθηκαν στην συναρμολόγηση, ολοκληρώνοντας με αυτό τον τρόπο την βάση έδρασης της κυψέλης καυσίμου (Εικόνα 4-2).

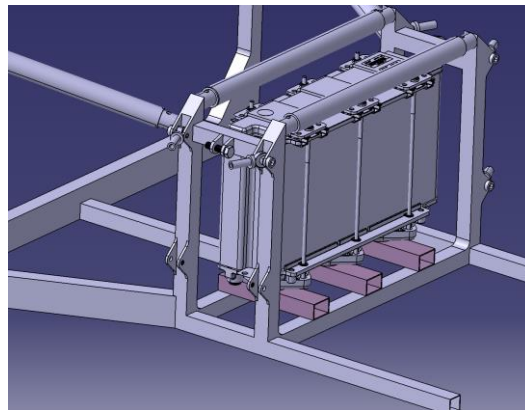
Έπειτα από την ολοκλήρωση συναρμολόγησης της βάσης της κυψέλης επί του σκελετού, τοποθετήθηκε η συνολική γεωμετρία αυτής, σχετιζόμενη με την βάση της (Εικόνες 4-3, 4-4). Το τριδιάστατο μοντέλο της κυψέλης καυσίμου ζητήθηκε και δόθηκε από την κατασκευάστρια εταιρία, καθώς επρόκειτο για ιδιαίτερα σύνθετη γεωμετρία, η διαθεσιμότητα της οποίας απαιτείται σε κάθε περίπτωση για την λεπτομερή και ακριβή σχεδίαση των διατάξεων εισαγωγής και εξαγωγής αέρα, όπως αυτές αναλύονται παρακάτω. Τα παραπάνω είναι απαραίτητα, διότι επρόκειτο για πρωτότυπες διατάξεις, οι οποίες δύναται να υλοποιηθούν για να συμβάλουν στην ομαλότερη λειτουργία του οχήματος. Ως εκ τούτου, απ' αρχής σχεδίασης, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην πιστή αναπαράσταση των γεωμετριών και των μεταξύ τους σχέσεων, ώστε να αποφευχθούν πιθανές γεωμετρικές ασυμφωνίες που θα σχετίζονται με ελλείψεις στην συναρμολόγηση. Εδώ είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η πραγματική γεωμετρία των καναλιών διόδου, από τα οποία διέρχεται ο αέρας με στόχο την οξείδωση και ψύξη της κυψέλης, όπως περιγράφεται σε προηγούμενο πεδίο, δεν υφίσταται στο μοντέλο, αλλά απεικονίζονται με δύο διδιάστατες επιφάνειες εκατέρωθεν των πλευρών εισαγωγής/εξαγωγής.



Εικόνα 4-2 Βάση στήριξης κυψέλης καυσίμου επί του σκελετού του οχήματος.

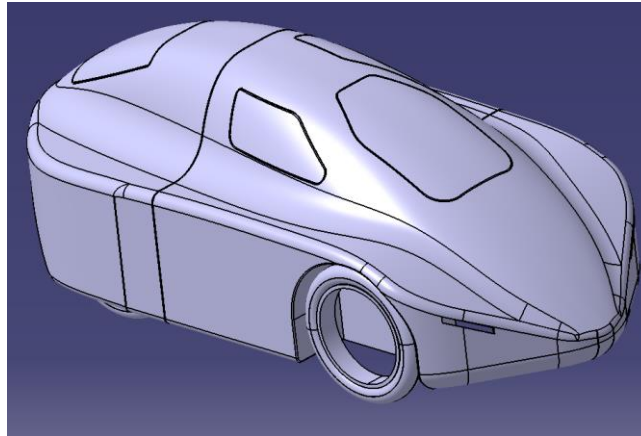


Εικόνα 4-3 Συναρμολόγησης σκελετού-βάσης κυψέλης καυσίμου-κυψέλης καυσίμου.

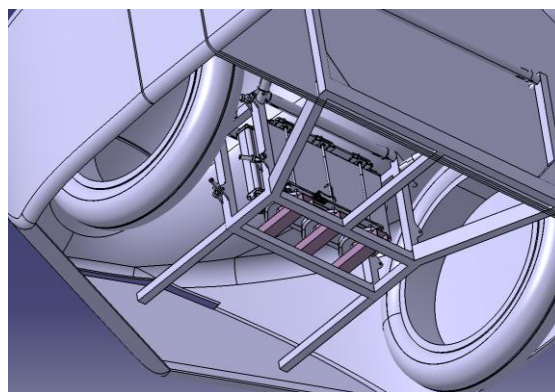


Εικόνα 4-4 Συναρμολόγησης σκελετού-βάσης κυψέλης καυσίμου-κυψέλης καυσίμου.

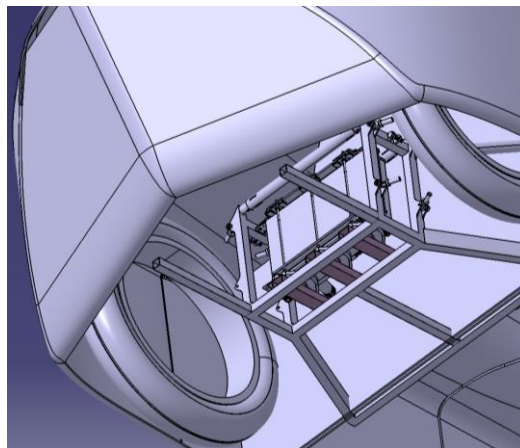
Έπειτα από την ολοκλήρωση συναρμολόγησης σκελετού-κυψέλης καυσίμου προστέθηκε και το αεροδυναμικό κέλυφος του οχήματος, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά το έτος 2022, όπως αυτό δόθηκε σε μοντέλο CAD μορφής .step αρχείου (Εικόνα 4-5). Το κέλυφος, το οποίο παρουσιάζεται όπως έχει προαναφερθεί, στηρίζεται σε μελέτη αεροδυναμικού σχεδιασμού (Τζανάκης, 2012). Σημειώνεται, ότι δεν υφίσταται διαθέσιμος αεραγωγός παροχής αέρα προς το πίσω εσωτερικό τμήμα του οχήματος, για την αξιοποίησή του.



Εικόνα 4-5 Αεροδυναμικό κέλυφος οχήματος.



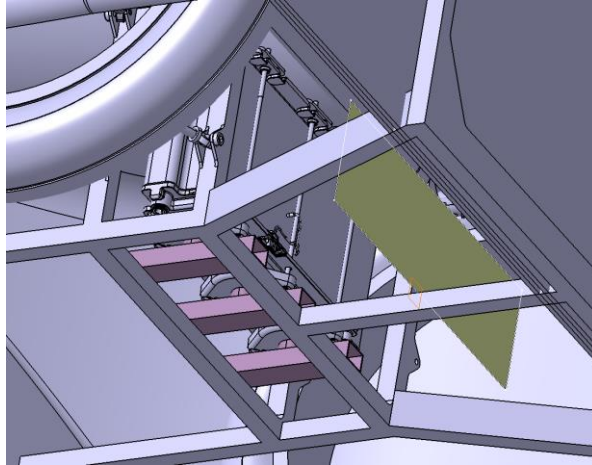
Εικόνα 4-6 Συναρμολόγηση σκελετού-τροχών-κυψέλης-κελύφους αμαξώματος.



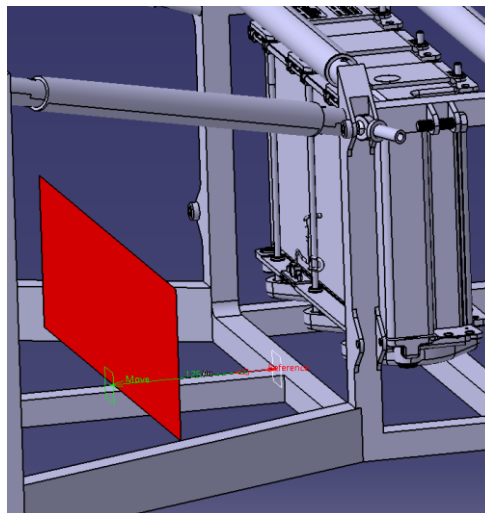
Εικόνα 4-7 Συναρμολόγηση σκελετού-τροχών-κυψέλης-κελύφους αμαξώματος.

Τέλος, για τον προσδιορισμό του διαθέσιμου χώρου σχεδίασης, λήφθηκαν υπόψη οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις του συστήματος ελέγχου της κυψέλης καυσίμου. Το σύστημα ελέγχου της κυψέλης καυσίμου αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε σε πρωτότυπη μορφή με βάση μελέτη (Κουτσούμπας, 2021), λαμβάνοντας μέρος επίσης σε σειρά διαγωνισμών. Ο κύριος όγκος του συστήματος αυτού αφορά σειρά υπερ-πυκνωτών, οι οποίοι εδράζονται επί του σκελετού, ηλεκτρονικές πλακέτες ελέγχου, καθώς και τις συνδεσμολογίες αυτών. Δεδομένου ότι το εν λόγω σύστημα μεταβάλλεται και αναπτύσσεται κατά τη σύνταξη της παρούσας εργασίας, καθώς και ο όγκος ο οποίος καταλαμβάνουν αυξομειώνεται, δεν έγινε πιστή αναπαράσταση των στοιχείων αλλά προσομοιώθηκε με τη

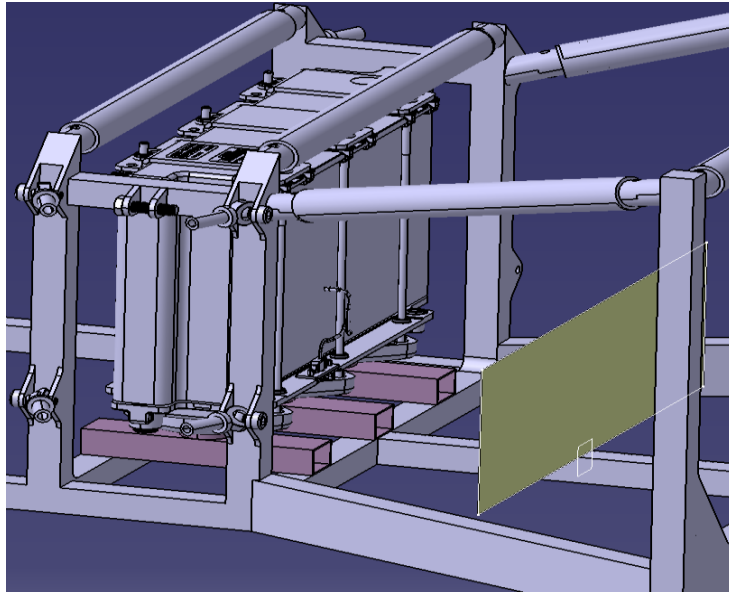
χρήση διδιάστατης επιφάνειας, αντιπροσωπεύοντας τον χώρο τον οποίο καταλαμβάνουν (Εικόνες 4-8, 4-9, 4-10). Σημειώνεται ότι η αντιπροσωπευτική επιφάνεια έχει δημιουργηθεί επί δυναμικά μεταβαλλόμενου επιπέδου, ως προς την θέση του, σε σχέση με ορισμένο σημείο αναφοράς, του οποίου η τιμή έχει παραμετροποιηθεί και ορίζεται από τον χρήστη ανάλογα με την πραγματική μέτρηση της υφιστάμενης κατάστασης, μέσω της μεταβλητής “max_dist_chassis”, δηλαδή της ευθείας απόστασης που προκύπτει από τμήμα του σκελετού πλησίον της κυψέλης έως το πλησιέστερο ακρότατο όριο των υπερ-πυκνωτών. Η επιρροή της εν λόγω απόστασης στην γεωμετρία εισαγωγής θα γίνει κατανοητή σε επόμενο στάδιο περιγραφής της γεωμετρίας εισαγωγής.



Εικόνα 4-8 Επιφάνεια αναπαράστασης (κίτρινο) καταλαμβανόμενου χώρου από ηλεκτρονικές διατάξεις-τελικός διαθέσιμος χώρος σχεδίασης διάταξης εισαγωγής.



Εικόνα 4-9 Επιφάνεια αναπαράστασης (κόκκινο) καταλαμβανόμενου χώρου από ηλεκτρονικές διατάξεις.



Εικόνα 4-10 Ορισμός επιφάνειας (κίτρινο) αναπαράστασης καταλαμβανόμενου χώρου από ηλεκτρονικές διατάξεις.

Δεδομένης της συνολικής υφιστάμενης διάταξης, όπως έχει παρουσιαστεί αναλυτικά παραπάνω, η τροφοδοσία αέρα προς την κυψέλη καθίσταται πρακτικά εφικτή μόνο από το δάπεδο του οχήματος, όπως και επιχειρείται. Συγκεκριμένα, η λήψη αέρα δύναται να γίνει από το πεδίο μεταξύ του κάτω άκρου του δαπέδου του αμαξώματος έως την επιφάνεια κύλισης του οχήματος (οδόστρωμα), δείχνοντας απόλυτο σεβασμό στην υφιστάμενη κατασκευή.

Σε αυτό το σημείο σημειώνεται ότι η μετατροπή του οχήματος δεν συμμετάσχει ως μεταβλητή, για τους λόγους που έχουν συζητηθεί παραπάνω, με αποτέλεσμα ο χώρος σχεδίασης να περιγράφεται από ισχυρούς και ιδιαίτερα στενούς περιορισμούς. Το γεγονός αυτό αναμενόμενα οδηγεί σε μία πολύ συντηρητική και περιορισμένη προσέγγιση του ζητήματος. Ωστόσο, επιχειρείται με την παρούσα εργασία μία ολοκληρωμένη προσέγγιση και μελέτη του συστήματος ψύξης, διατηρώντας τις σταθερές αυτές. Επιπροσθέτως, παρατηρούνται και οι γεωμετρικές ιδιομορφίες της κυψέλης καυσίμου, οι οποίες επίσης περιορίζουν τον τρόπο συναρμογής των πιθανών λύσεων εισαγωγής και εξαγωγής με αυτή, όπως και θα αναλυθεί σε επόμενο στάδιο. Συνοψίζοντας, όπως είναι εμφανές ([Εικόνα 4-8](#)), ο διαθέσιμος χώρος στον οποίο είναι επιτρεπτή η σχεδίαση της διάταξης του αεραγωγού εισαγωγής του αέρα περιορίζεται στενά από το σκελετό του οχήματος, το αντιπροσωπευτικό επίπεδο των ηλεκτρονικών διατάξεων, την θέση της κυψέλης ως προς το ύψος τοποθέτησής της από το δάπεδο του οχήματος, καθώς και η απώλεια υφιστάμενων αεραγωγών προς αξιοποίηση επί του κελύφους. Τα δεδομένα αυτά προφανώς οδηγούν την σχεδίαση του αγωγού “S”, σε μία μη τυπική και μη συνιστώμενη γεωμετρία, καθώς ο λόγος μήκους-ύψους είναι αξιοσημείωτα μικρός. Ο αγωγός δηλαδή αναμένεται να έχει ιδιαίτερα απότομη κλίση, γεωμετρία η οποία αναμένεται να προκαλέσει δυσκολίες στην ροή ως προς την ομαλότητα και τις πιθανές αποκολλήσεις. Τα θέματα αυτά αναπτύσσονται παρακάτω.

4.5 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω ξεκίνησε η διαδικασία της σχεδίασης των γεωμετρικών διατάξεων εισαγωγής-εξαγωγής αέρα προς-από την κυψέλη καυσίμου, καθώς επίσης η δημιουργία των απαραίτητων όγκων πεδίου ροής για την μελέτη του συστήματος ψύξης, με στόχο την μελέτη του συστήματος και παράλληλα την δημιουργία στερεών μοντέλων πιθανών κατασκευών, με βάση τα δεδομένα και τους περιορισμούς. Χρησιμοποιείται αφενός μία αρχική διαισθητική σχεδίαση, η οποία μεταβάλλεται χειροκίνητα με βάση τα αποτελέσματα προσομοιώσεων, δίχως την χρήση-παρεμβολή αλγόριθμου βελτιστοποίησης.

Πίνακας 4-1 Παράμετροι σχεδίασης μοντέλων

Παράμετρος	επιρροή μεταβλητής άμεση = ↓ έμμεση = ↔	Μοντέλο εφαρμογής Εισαγωγή = ○ Εξαγωγή = →
offset_from_chassis	↓	○→
airways_thickness	↓	○→
flange_length	↔	○→
radius_up_inlet	↓	○
input_dwn_fc_radius	↓	○
input_dwn_fc_radius_length	↓	○
max_dist_chassis	↓	○
Angle_tang	↓	○
bellmouth_radius	↓	○
radius_up_inlet	↓	○
bellmouth_length_horizontal	↓	○
input_airway_radius_length_ fc_base	↓	○
input_airway_radius	↓	○
length_under_boddy	↓	○
fin_inlet_up_radius	↓	○
fin_inlet_dwn_radius	↓	○
Angle_left_inlet_airway	↔	○
Angle_right_inlet_airway	↔	○
Measurement length * Horizontal_fin_inlet_ratio	↔	○
Measurement length * Horizontal_fin_inlet_ratio_2	↔	○
vertical_fin_outlet_ratio	↓	○
vertical_fin_inlet_ratio	↓	○
Horizontal_fin_inlet_ratio	↓	○
Horizontal_fin_inlet_ratio_2	↓	○
fillet_radius_airways	↓	○→
fillet_inlet_fins	↓	○→
fillet_inlet_fins_faces	↔	○
air_mass_radius	↔	→
fan_radius	↓	→
fan_width	↓	→

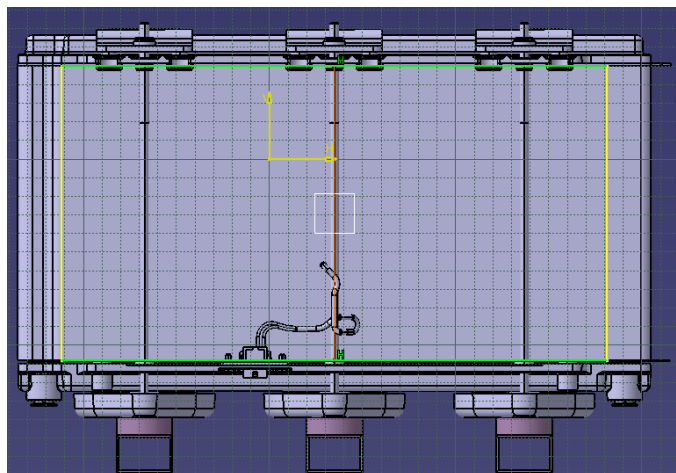
Δεδομένης της παραμετρικής σχεδίασης που ακολουθήθηκε, στο σημείο αυτό αναφέρονται επιγραμματικά οι παράμετροι οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν αρχικά κατά τον σχεδιασμό και σε δεύτερο χρόνο, για την συνεχή τροποποίηση του μοντέλου μέσω των μεταβολών των τιμών τους (*Πίνακας 4-1*).

Σημειώνεται ότι η γενική παράμετρος “offset_from_chassis” αφορά στο σύνολο των σχεδιαζόμενων μερών. Η παράμετρος έχει μορφή μεταβλητής και χρησιμοποιείται κατά την προσπάθεια μοντελοποίησης της απαιτούμενης απόστασης της υπό μελέτη κατασκευής από τα περιβάλλοντα μέρη του αμαξώματος, ώστε να είναι δυνατή η φυσική συναρμολότητα, καθώς και οι τυχόν αναμενόμενες μετακινήσεις λόγω κραδασμών και της λειτουργίας των αναρτήσεων του αυτοκινήτου.

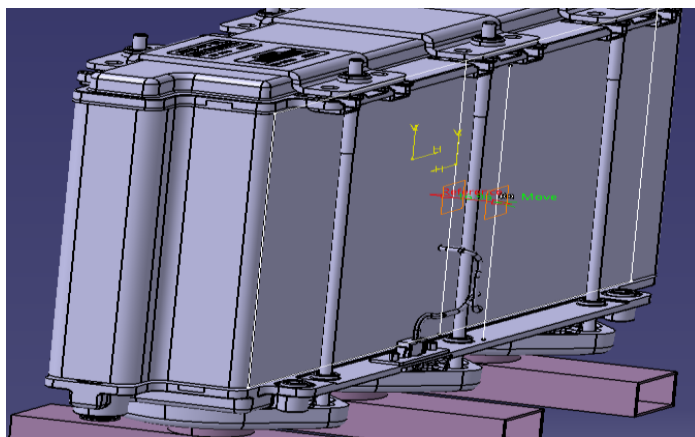
Εν συνεχεία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του κύριου παραμετρικού μοντέλου, το οποίο χρησιμοποιείται για την δημιουργία όλων των υπολοίπων συνολικά έξι μοντέλων, με μικρές διαφοροποιήσεις, όπως αυτές επισημαίνονται. Η σχεδίαση αφορά δύο τύπους μοντέλων. Ο πρώτος τύπος εισαγωγής σχετίζεται με την σύνδεση αεραγωγών “Scoop” και αγωγού “S”, ενώ ο δεύτερος τύπος εισαγωγής αφορά στην τροφοδοσία του αγωγού “S” μέσω συνολικά τεσσάρων εμφωλευμένων αεραγωγών με αποκλίνοντα και καμπυλωμένα τοιχώματα (τύπος NACA). Τα μοντέλα του πρώτου τύπου εισαγωγής ονομάζονται “A Scoop – S Duct”, ενώ τα μοντέλα του δεύτερου τύπου ονομάζονται “B NACA – S Duct”. Για την εξαγωγή σχεδιάζεται ένας μοναδικός τύπος μοντέλου που ονομάζεται “Diffuser”.

4.5.1 Σχεδιασμός Εισαγωγής Μοντέλων “A Scoop – S Duct”

Το παρόν υπο-κεφάλαιο επικεντρώνεται στην πρώτη περίπτωση σχεδιασμού αεραγωγού τύπου Scoop, ο οποίος δύναται να συλλέγει απευθείας τον αέρα κάτω από το όχημα και να τροφοδοτεί μέσω ενός αγωγού “S” την επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης καυσίμου. Ξεκινώντας την σχεδίαση, απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο προσδιορισμός της επιφάνειας κυψέλης καυσίμου εντός της οποίας υφίστανται τα κανάλια διόδου του αέρα για την πραγματοποίηση της οξειδωτικής διαδικασίας και ψύξης της. Δεδομένου ότι επρόκειτο για μία συμμετρική επιφάνεια, εισήχθησαν με προβολή (εντολή project 3D elements) εντός ενός διδιάστατου sketch, επί επιπέδου ορισμένο εφαπτομενικά στην επιφάνεια εισαγωγής αέρα της κυψέλης (αρχικό επίπεδο αναφοράς μοντέλου εισαγωγής), οι δύο ακραίες ακμές, οι οποίες καθορίζουν το πεδίο εντός του οποίου υφίστανται στην πραγματικότητα τα κανάλια ροής του αέρα και εν συνεχεία συνδέθηκαν μεταξύ τους με δύο ευθύγραμμα τμήματα. Στο μέσο των δύο οριζόντιων τμημάτων, τα οποία σχεδιάστηκαν, σχεδιάζεται επιπλέον βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα, το οποίο ουσιαστικά ορίζει τον κάθετο συμμετρικό άξονα της επιφάνειας εισαγωγής-εξαγωγής, όπως και αξιοποιείται καθ’ όλη τη σχεδίαση (*Εικόνα 4-11*). Στην συνέχεια ορίστηκε δεύτερο επίπεδο σχεδίασης, του οποίου η θέση εξαρτάται από το πρώτο σε απόσταση ορισμένη παραμετρικά με την μεταβλητή “flange_length”, η τιμή της οποίας προκύπτει από μέτρηση σε ευθεία γραμμή, κάθετη προς την επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης με το παράλληλο επίπεδο της κάτω πλάκας, στην οποία βρίσκεται τοποθετημένος αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας (την οποία διαπερνούν μεταλλικές ράβδοι, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την συνολική σύσφιξη της κυψέλης). Επί του δεύτερου επιπέδου έγινε προβολή του βοηθητικού ευθυγράμμου τμήματος συμμετρίας, που σχεδιάστηκε προηγουμένως, σε απόσταση η οποία θα μπορεί σε κάθε περίπτωση να μεταβληθεί από τον χρήστη, καθιστώντας με τον τρόπο αυτό πάντα δυνατή την τροποποίηση του μοντέλου ως προς το μήκος της φλάντζας προσαρμογής στην κυψέλη, δημιουργώντας συνέχεια στην σχεδίαση μεταξύ των τμημάτων που ορίζονται σε επόμενα στάδια (*Εικόνα 4-12*).

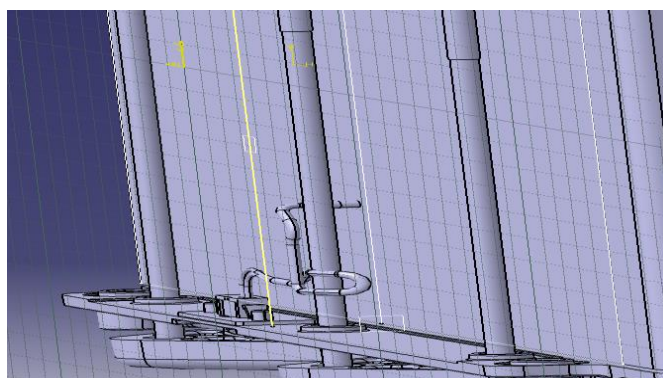


Εικόνα 4-11 Εντολή Projection, Προβολή ακμών προσδιορισμού επιφάνειας καναλιών ροής αέρα (κίτρινο), σύνδεση με ευθύγραμμο τμήματα (πράσινο), δημιουργία ευθύγραμμου τμήματος συμμετρίας επιφάνειας εισαγωγής (πορτοκαλί).

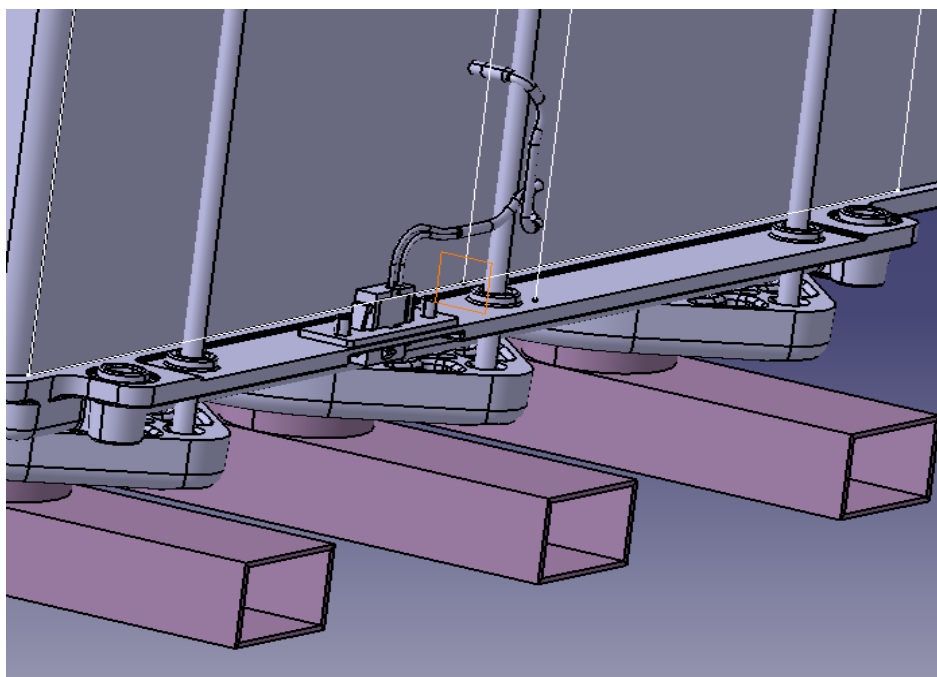


Εικόνα 4-12 Εντολή Plane, ορισμός δεύτερου παραμετρικού επιπέδου σχεδίασης και προβολή ευθύγραμμου τμήματος σε αυτό.

Πριν την σχεδίαση του κύριου μέρους εισαγωγής, όπως αναλύεται παρακάτω, έγινε προβολή του κάθετου άξονα συμμετρίας της κυψέλης σε νέο επίπεδο (η απόσταση του οποίου ορίζεται ομοίως από την μεταβλητή “flange_length”), το οποίο ορίζεται στο ακρότατο σημείο των εξοχών, όπως έχει προκύψει από την αντίστοιχη μέτρηση απόστασης, στις οποίες η φλάντζα θα προσαρμοστεί ώστε να υπάρχει ως ανεξάρτητο στοιχείο.



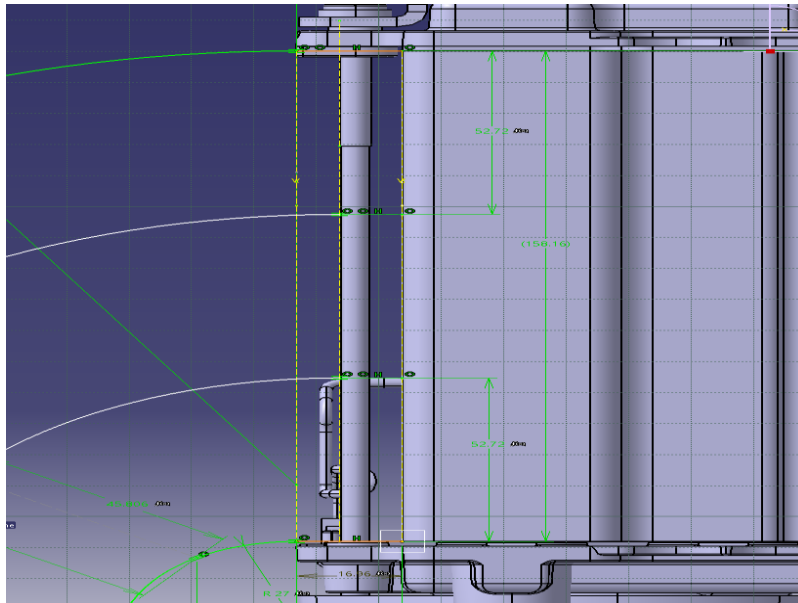
Εικόνα 4-13 Εντολή Projection, προβολή κάθετου άξονα συμμετρίας (κίτρινο) σε νέο παραμετρικά μεταβαλλόμενο επίπεδο.



Εικόνα 4-14 Εντολή Plane, Επίπεδο σχεδίασης κύριας γεωμετρίας (πορτοκαλί).

Έπειτα δημιουργήθηκε νέο επίπεδο σχεδίασης, με διεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια της κυψέλης, ώστε να δημιουργηθεί νέο sketch, στο οποίο θα περιγράφονται τα διαστάσιμα στοιχεία δημιουργίας της εισαγωγής (Εικόνα 4-14). Ξεκινώντας την σχεδίαση, πρώτα έγινε και πάλι προβολή εντός του επιπέδου του sketch του άξονα συμμετρίας της επιφάνειας της κυψέλης, ο οποίος ορίζει το σημείο εκκίνησης του σχεδιασμού. Ακόμα έγινε προβολή του ακρότατου σημείου των κυλινδρικών δοκών σύσφιξης και συγκράτησης της κυψέλης, ώστε να υπάρχει η πληροφορία κατά την σχεδίαση των εσωτερικών πτερυγίων καθοδήγησης του αέρα, κάτι το οποίο αναλύεται παρακάτω. Τέλος, έγινε προβολή του μετατοπισμένου άξονα ως προς την απόσταση της φλάντζας προσαρμογής, όπως επεξηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Έχοντας όλες τις οριακές και εντός της περιοχής κυψέλης πληροφορίες, σχεδιάστηκαν ευθύγραμμα τμήματα σύνδεσης των δύο οριακών αξόνων (επί της επιφάνειας κ.κ. και στην απαιτούμενη απόσταση από αυτή για την δημιουργία φλάντζας) με περιορισμό συνέχειας (coincidence) και παραλληλότητας ως προς των άξονα y , το μήκος των οποίων προσδιορίζεται ακολούθως των προηγούμενων περιορισμών έμμεσα από την παράμετρο “flange_length”. Καθαυτή τη σχέση με την αλλαγή της μεταβλητής όλη η φλάντζα αναπροσαρμόζεται αναλόγως (Εικόνα 4-15).

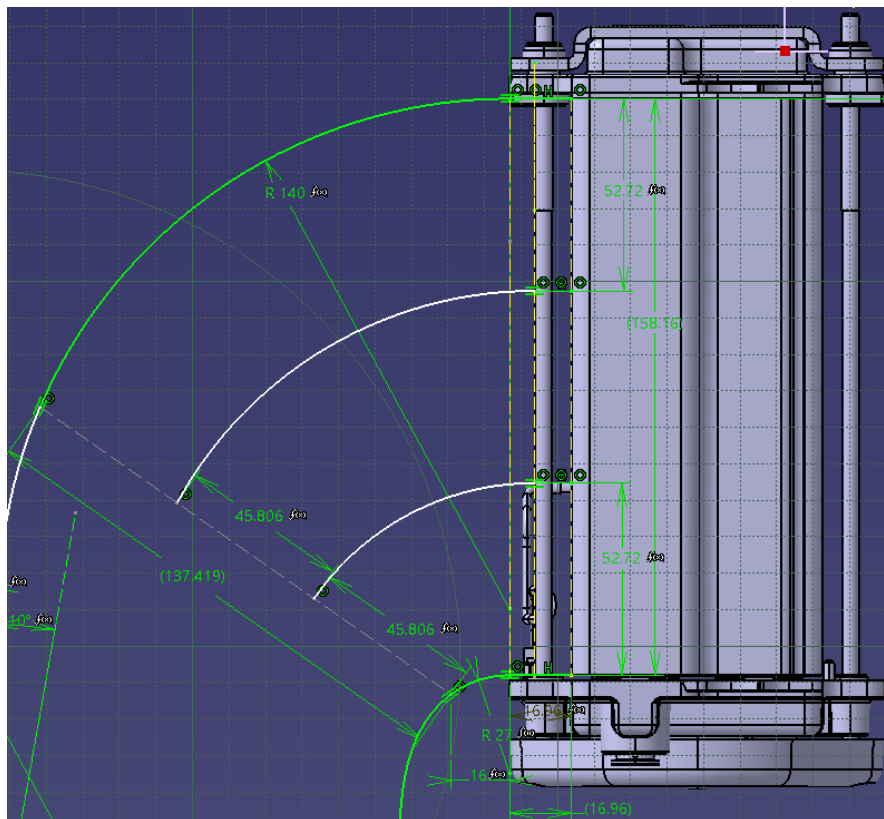
Απαραίτητη είναι η εξ’ αρχής πρόβλεψη και συμπερίληψη του πάχους των κατασκευών, καθώς η συνολική σχεδίαση ακολουθεί τα εσωτερικά τοιχώματα αυτών. Σύμφωνα με αυτό μελετήθηκε ο περιβάλλον χώρος σχεδίασης και εντοπίστηκε το σημείο το οποίο περιορίζει το πάχος της κατασκευής. Το σημείο αυτό βρίσκεται μεταξύ των ελασμάτων συγκράτησης της κυψέλης καυσίμου και της επιφάνειάς της, απόσταση η οποία μετρήθηκε και ορίστηκε με τη μεταβλητή “airways_thickness”. Η εν λόγω μεταβλητή έχει ανώτατη επιτρεπτή τιμή την μέτρηση αυτή, και κατώτερη το μηδέν. Η παράμετρος χρησιμοποιείται σε αρκετά στάδια, όπως θα φανεί, ενώ δίνει αυτομάτως την δυνατότητα μεταβολής της κατασκευής ανάλογα με το πάχος το οποίο επιλέγεται από τον σχεδιαστή.



Εικόνα 4-15 Εντολή Project, Προβολές α) κάθετου άξονα συμμετρίας επιφάνειας κ.κ.(κίτρινη-συνεχής), β) μετατοπισμένου κάθετου άξονα συμμετρίας σύμφωνα με παράμετρο (κίτρινη διακεκομμένη), γ) ακρότατου σημείου δοκών συγκράτησης-σύσφιξης (μεσαία διακεκομμένη κίτρινη), οριζόντια ευθύγραμμο τμήματα σύνδεση (πορτοκαλί).

Στην συνέχεια δημιουργείται τόξο, το οποίο ουσιαστικά οδηγεί από το επάνω μέρος της εισαγωγής της κυψέλης προς το δάπεδο του αυτοκινήτου για την συλλογή αέρα. Το τόξο ορίζεται ως εξής (Εικόνα 4-16):

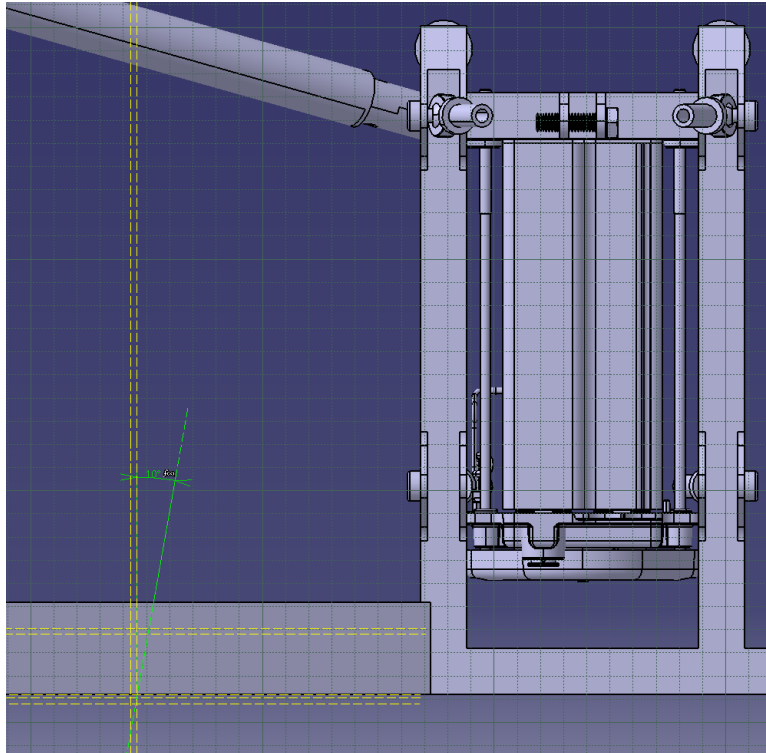
- Η επάνω άκρη με τον περιορισμό πρώτου βαθμού συνέχειας (coincidence) ως προς το αντίστοιχο ευθύγραμμο τμήμα, το οποίο οδηγεί εκτός της γεωμετρίας κυψέλης (το οποίο δημιουργεί αργότερα την φλάντζα προσαρμογής), καθώς επίσης είναι εφαπτόμενο σε αυτό (tangency), ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία ακμής, η οποία ενδεχομένως να δημιουργεί κατά την προσομοίωση φαινόμενα αποκόλλησης των οριακών στρωμάτων, καθώς επίσης και για την διατήρηση της συνέχειας καμπυλότητας μεταξύ των στοιχείων.
- Το κέντρο του τόξου είναι δυνατόν να ολισθαίνει επάνω στον μετατοπιζόμενο (σύμφωνα με την παράμετρο “flange_length”- όπως αυτός δημιουργήθηκε προηγουμένως) προβαλλόμενο άξονα συμμετρίας, δηλαδή μονοδιάστατα ως προς τον άξονα z του σχεδίου, αλλά να μην μπορεί να κινηθεί ως προς τον άξονα y και z, ώστε τα αποτελέσματα κατά την ύστερη παραμετροποίηση να είναι πρακτικά εφαρμόσιμα.
- Το τόξο λαμβάνει την παράμετρο “radius_up_inlet” για τον ορισμό της ακτίνας, ώστε να μεταβάλλεται από τον σχεδιαστή ανάλογα με τις απαιτήσεις, επιτυγχάνοντας πάντα την επιθυμητή τιμή ακτίνας και συνέχειας αυτής, σε σχέση με τα συνεργαζόμενα μέρη, δηλαδή σε σχέση με μία spline σύνδεσης (όπως αναλύεται παρακάτω).



Εικόνα 4-16 Σχεδίαση τόξων διάταξης εισαγωγής, παράμετροι.

Έπειτα, δεδομένου του ορισμένου πλέον πεδίου που δύναται να γίνει εξαγωγή της διάταξης του αγωγού μεταφοράς αέρα, ξεκίνησε η σχεδίαση του δεύτερου σκέλους αυτής, η οποία αποτελεί ουσιαστικά το κωδωνοειδές-χοανοειδές στόμιο (bell-mouth), το οποίο χρησιμοποιείται για την απευθείας συλλογή του αέρα, μεταξύ δαπέδου αμαξώματος-οδοστρώματος, ο ρόλος του οποίου είναι κομβικός και σχηματοποιεί τον αεραγωγό Scoop.

Για την αρχή της σχεδίασης έγινε προβολή εντός του sketch της κατώτατης ακμής του δοκού του σκελετού, της κατώτατης ακμής επιφάνειας του δαπέδου και του επιπέδου της διδιάστατης επιφάνειας μοντελοποίησης των πυκνωτών, οριζόμενες ως βοηθητικά στοιχεία (διακεκομμένα τμήματα). Έπειτα, οι εν λόγω βοηθητικές ακμές μετατοπίστηκαν με την εντολή “offset”, με τιμή η οποία προκύπτει συναρτήσει δύο μεταβλητών (με την έννοια της πρόσθεσης) και λαμβάνοντας θετικό ή αρνητικό πρόσημο φοράς μετατόπισης “airways_thickness + offset_from_chassis”. Συνεπώς, η θέση των ακμών εξαρτάται και αναπαράγεται κάθε φορά, ανάλογα με τις επιμέρους άμεσα επηρεαζόμενες μεταβλητές από το χρήστη του πάχους κατασκευής και της απαιτούμενης απόστασης ανοχής από το σκελετό. Στην τομή των δύο μετατοπιζόμενων ακμών διέρχεται ένα ευθύγραμμο βοηθητικό τμήμα, το οποίο δύναται να περιστρέφεται, διερχόμενο πάντα από το σημείο τομής, με εφαρμογή του αντίστοιχου περιορισμού. Η κλίση του σε σχέση με την ακμή του επιπέδου της διδιάστατης επιφάνειας μοντελοποίησης των πυκνωτών (δηλαδή ως προς τον άξονα z) ορίζεται με την παράμετρο μεταβλητής “Angle_tang” (Εικόνα 4-17). Η χρήση της εν λόγω μεταβλητής γίνεται κατανοητή παρακάτω.

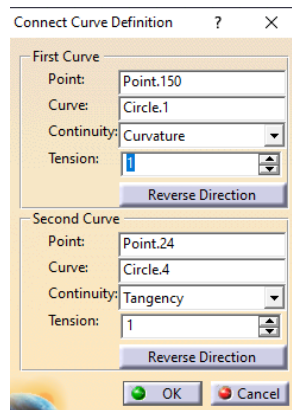


Εικόνα 4-17 Εντολή Project, προβολή κατώτατης ακμής δοκού σκελετού, κατώτατης ακμής δαπέδου και επιπέδου διδιάστατης επιφάνειας πυκνωτών, μετατόπιση αυτών, σχεδίαση ευθύγραμμου τμήματος διαμέσου τομής μετατοπιζόμενων ακμών-παράμετρος γωνίας κλίσης.

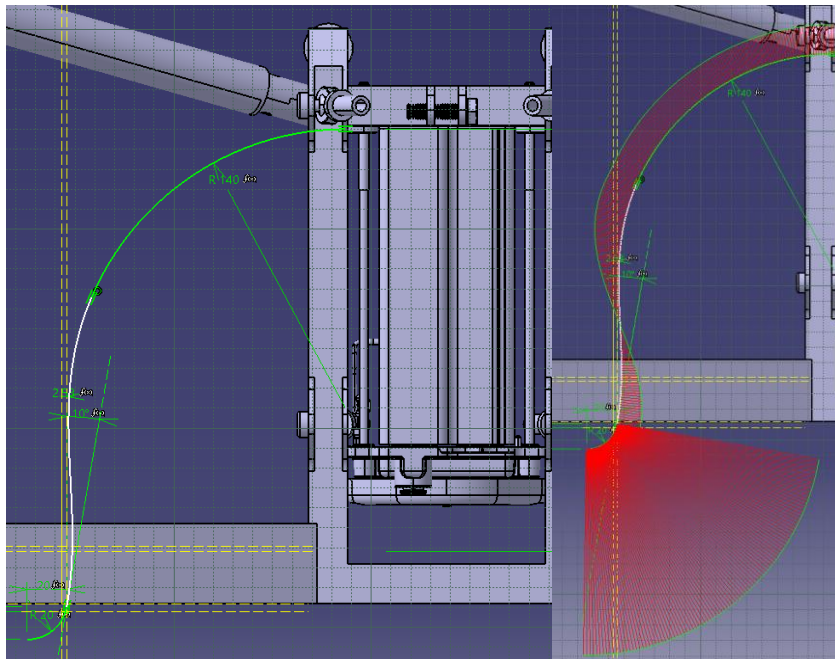
Έχοντας παραμετροποιήσει τις αποστάσεις από το περιβάλλον της κατασκευής, σχεδιάζεται τόξο το οποίο θα δημιουργεί την άνω επιφάνεια του bellmouth της κατασκευής, του οποίου οι περιορισμοί περιγράφονται ακολούθως:

- η μία άκρη του είναι προσκολλημένη στο σημείο τομής των δύο παραπάνω αναλυτικά περιγεγραμμένων ακμών,
- το τόξο λαμβάνει περιορισμό ως εφαπτόμενο (tangency) με το βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα, το οποίο διέρχεται από το σημείο τομής των δύο βοηθητικών μετατοπισμένων ακμών και το οποίο περιστρέφεται με την παράμετρο “Angle_tang”,
- η ακτίνα του ορίζεται με τη μεταβλητή παράμετρο “bellmouth_radius”,
- η δεύτερη άκρη του ορίζεται με τη μεταβλητή παράμετρο “bellmouth_length_horizontal_radius_up_inlet”, η οποία ορίζει την οριζόντια απόσταση αυτής από την μετατοπισμένη ακμή του επιπέδου της διδιάστατης επιφάνειας μοντελοποίησης των πυκνωτών, λαμβάνοντας με αυτό τον τρόπο το μέγεθος τόξου που απαιτείται από τον χρήστη, δεδομένης της ακτίνας του τόξου, δημιουργώντας πρακτικά το μήκος του Scoop.

Στο σημείο αυτό, έχοντας σχεδιάσει τα δύο επάνω τμήματα της διάταξης εισαγωγής, αυτά καλούνται να συνδεθούν μεταξύ τους. Η σύνδεσή τους έγινε με τη χρήση τους εργαλείου «connect», το οποίο κατασκευάζει μία καμπύλη (Εικόνα 4-18). Επομένως επιλέχθηκε η σύνδεση μεταξύ του ελεύθερου άκρου του τόξου, το οποίο ξεκινά από την ακμή φλάντζας και του άκρου του bellmouth, το οποίο είναι προσκολλημένο στην τομή των βοηθητικών ακμών. Ως βαθμός συνέχειας μεταξύ των συνδέσεων επιλέχθηκε η τρίτου βαθμού συνέχεια «curvature». Ως αποτέλεσμα των παραπάνω προκύπτει μία ενιαία καμπύλη (Εικόνα 4-19α).



Εικόνα 4-18 Ορισμός καμπύλης σύνδεσης τόξων.



Εικόνα 4-19 α) συνολική άνω καμπύλη-παράμετροι, β) ανάλυση καμπυλότητας συνολικής άνω καμπύλης.

Δεδομένου ότι η ενιαία καμπύλη αποτελείται από τρία τμήματα (δύο τόξα-καμπύλη Spline) τα οποία λόγω των απαιτήσεων της εφαρμογής έχουν διαφορετικά κύλα και κυρτά σημεία, θα πρέπει να γίνεται μία ομαλή μετάβαση από τα μεν στα δε. Ως εκ τούτου πραγματοποιείται μια εξαρτώμενη από τις γεωμετρικές μεταβολές ανάλυση καμπυλότητας, ώστε να οπτικοποιούνται οι μεταβάσεις και ο σχεδιαστής να έχει μία πρότερη εικόνα της σχεδίασης πέραν της διαισθητικής (Εικόνα 4-19β).

Η καμπυλότητα ρυθμίζεται μέσα από τις μεταβλητές ακτίνες των τόξων, την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος, την οποία ακολουθεί εφαπτομενικά το τόξο του bellmouth, που διατηρείται από τους σταθερούς περιορισμούς εφαπτομενικότητας στα άκρα των τόξων.

Ολοκληρώνοντας την καμπύλη του επάνω μέρους της εισαγωγής, σειρά έχει η σχεδίαση της καμπύλης του κάτω τμήματος αυτής. Το τόξο του κάτω μέρους, ορίζεται ως εξής (Εικόνα 4-20α):

- Η επάνω άκρη με τον περιορισμό πρώτου βαθμού συνέχειας (coincidence) ως προς το αντίστοιχο ευθύγραμμο τμήμα, το οποίο οδηγεί εκτός της γεωμετρίας κυψέλης

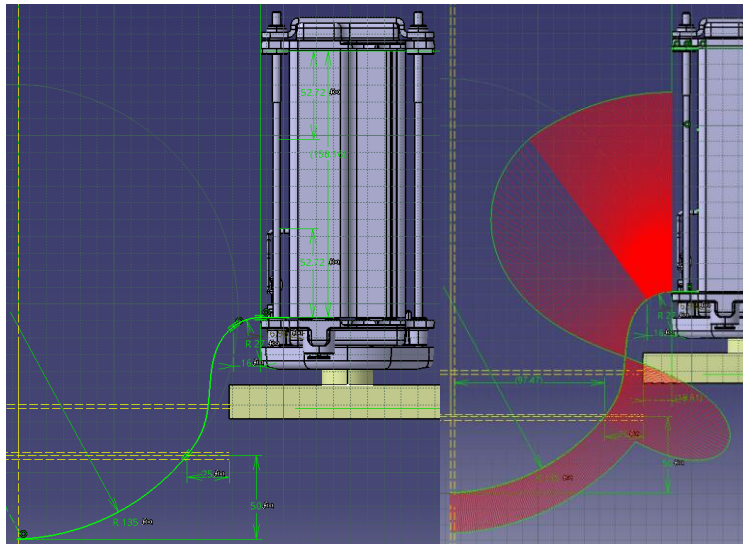
(το οποίο δημιουργεί αργότερα την φλάντζα προσαρμογής), καθώς επίσης είναι εφαπτόμενο με αυτό (tangency), ομοίως με το άνω τόξο.

- Το κέντρο του τόξου είναι δυνατόν να ολισθαίνει επάνω στον μετατοπιζόμενο προβαλλόμενο άξονα συμμετρίας, δηλαδή μονοδιάστατα ως προς τον άξονα z του σχεδίου, ομοίως με το άνω τόξο.
- Το τόξο λαμβάνει την παράμετρο “input_dwn_fc_radius” για τον ορισμό της ακτίνας του, ενώ λαμβάνει επίσης την παράμετρο “input_dwn_fc_radius_length”, η οποία αφορά στην απόσταση της δεύτερης (κάτω) άκρης αυτού (η οποία συνενώνεται με μία spline και πάλι) σε σχέση με τον μετατοπιζόμενο-προβαλλόμενο άξονα συμμετρίας, ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της γεωμετρίας κατασκευής σε σχέση με τον σκελετό του οχήματος, ο οποίος διαθέτει πλησίον της περιοχής σχεδίασης δοκό, η ακμή του οποίου είναι επιτακτικό να αποφευχθεί (*Εικόνα 4-20α*).

Επομένως, έχοντας ήδη παραμετροποιήσει τις αποστάσεις από το περιβάλλον της κατασκευής σε προηγούμενο στάδιο, δημιουργείται νέο τόξο, το οποίο θα δημιουργεί την κάτω επιφάνεια του bellmouth της κατασκευής του οποίου οι περιορισμοί περιγράφονται ως εξής:

- Το άνω άκρο αυτού είναι ελεύθερο να κινηθεί κατά τον άξονα y επάνω στην ακμή του δαπέδου του αμαξώματος.
- Η θέση του άκρου ως προς την οριζόντια θέση πάνω στην ακμή περιγράφεται από την παραμετρική μεταβλητή “input_airway_radius_length_fc_base”, η οποία ορίζει την οριζόντια απόσταση του άκρου από τις δοκούς στήριξης της κυψέλης (και άρα το μήκος του Scoop), ώστε να μπορεί να διασφαλιστεί ότι η διάταξη που προκύπτει δεν θα παραβιάζει τους περιορισμούς του περιβάλλοντος.
- Η κάτω άκρη του τόξου είναι ελεύθερη να κινηθεί επάνω στην προβολή του επιπέδου της διδιάστατης επιφάνειας μοντελοποίησης των πυκνωτών, δηλαδή ως προς την διεύθυνση του z άξονα και μόνο, ώστε να διατηρείται σε κάθε ύστερη μοντελοποίηση η γεωμετρία του bellmouth, τιμή η οποία ορίζεται από την παράμετρο “length_under_boddy”, μεταβλητή απαραίτητη για τον έλεγχο της προεξοχής της διάταξης από το όχημα και επομένως το βάθος του Scoop.
- Τέλος, το τόξο λαμβάνει την παραμετρική μεταβλητή “input_airway_radius”, η οποία αφορά την ακτίνα του τόξου.

Ολοκληρώνοντας τα δύο κάτω τμήματα της διάταξης εισαγωγής, αυτά συνδέονται ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση με το εργαλείο «connect» με μία καμπύλη επιλέγοντας το κάτω άκρο του πάνω τόξου, του οποίου η θέση προκύπτει όπως αναλύθηκε, και το άνω μέρος του κάτω τόξου το οποίο κινείται επάνω στην προβολή του δαπέδου. Ως βαθμός συνέχειας μεταξύ των συνδέσεων επιλέχθηκε η τρίτου βαθμού συνέχεια «curvature», ομοίως με την καμπύλη του άνω μέρους. Κατά την διαδικασία προκύπτει και η συνολική καμπύλη (*Εικόνα 4-20α*) επί της οποίας πραγματοποιείται και πάλι μια εξαρτώμενη από τις γεωμετρικές μεταβολές ανάλυση καμπυλότητας για τους λόγους που προαναφέρθηκαν (*Εικόνα 4-20β*). Η καμπυλότητα και η ομοιόμορφη μεταβολή από τα κυρτά στα κύλα της συνολικής καμπύλης ρυθμίζεται από τον σχεδιαστή μέσα από τις μεταβλητές ακτίνας των τόξων, τα οποία η καμπύλη ένωσης spline ακολουθεί με την προκαθορισμένη συνέχεια στα σημεία σύνδεσης, και διατηρείται από τους σταθερούς περιορισμούς εφαπτομενικότητας στα άκρα των τόξων.



Εικόνα 4-20 α) συνολική καμπύλη-παράμετροι, β) ανάλυση καμπυλότητας συνολικής καμπύλης.

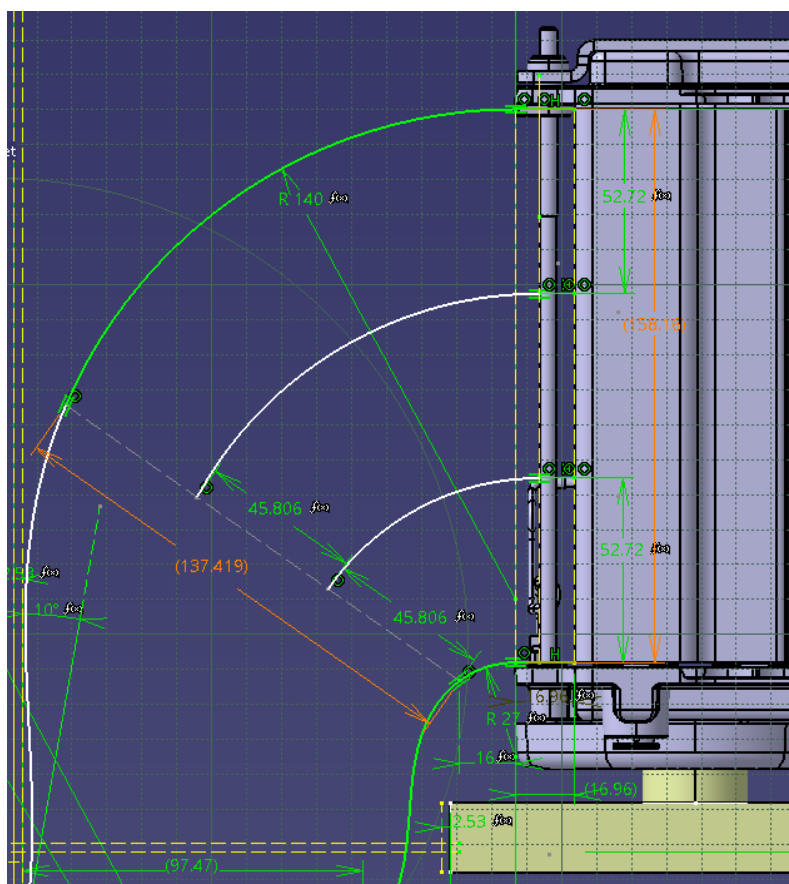
Έπειτα από την ολοκλήρωση σχεδίασης του περιβλήματος της διάταξης εισαγωγής η σχεδίαση επεκτάθηκε στις εσωτερικές διατάξεις αυτού. Ως εσωτερικές διατάξεις νοούνται τα πτερύγια ελέγχου του εισερχόμενου αέρα, ώστε να καταστεί αφενός εφικτή η καθοδήγηση της ροής στην επιφάνεια της κυψέλης, με κατά το δυνατόν καλής ποιότητας ρευστό και αφετέρου για τον έλεγχο της διεύθυνσης, της ταχύτητας και της πίεσης εξόδου του ρευστού από τον αγωγό, στοχεύοντας σε μία ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων επί της επιφάνειας εισαγωγής της κυψέλης. Για τους λόγους αυτούς σχεδιάστηκαν δύο ζευγάρια πτερυγίων, συνολικά τέσσερα πτερύγια. Το πρώτο ζευγάρι αφορά τα κατά οριζόντια έκταση πτερύγια, ενώ το δεύτερο ζευγάρι τα κατακόρυφα πτερύγια.

Το πρώτο ζευγάρι των οριζοντίων πτερυγίων, προσδιορίζεται ενδιάμεσα από τα τόξα τα οποία καταλήγουν στην φλάντζα και από τα τόξα τα οποία δημιουργούν το Scoop. Για τον έλεγχο της κατανομής του αέρα κατά την διάρκεια της μεταβολής της διάταξης με στόχο την βελτίωση της, εξετάζοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, κρίθηκε σκόπιμο τα ζευγάρια να έχουν την δυνατότητα μεταβολής της θέσης τους.

Δεδομένου ότι τα μεγέθη των τόξων μεταβάλλονται ανάλογα με τις παραμέτρους, για την λήψη σε κάθε περίπτωση αξιόλογου γεωμετρικού αποτελέσματος ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Το κάθε οριζόντιο πτερύγιο αποτελείται από δύο τόξα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με καμπύλη «Spline» με την εντολή «Connect».

Για τα άνω τόξα του ζευγαριού ελήφθησαν δύο μετρήσεις μήκους μεταξύ των άκρων των δύο τόξων περιβλήματος στα σημεία ένωσής τους με την φλάντζα και μεταξύ των δύο άκρων που συνδέονται με τις καμπύλες Splines, οι οποίες λειτουργούν ως απλές αναφορές και όχι ως κύριες διαστάσεις, για την αποφυγή υπερ-διαστασιολόγησης του σχεδίου και επομένως τις πιθανές συγχύσεις. Επιπλέον δημιουργήθηκε βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα ένωσης των δύο άκρων των τόξων, τα οποία συνδέονται με τις καμπύλες Splines, καθώς και προβολή των κοχλιών συγκράτησης-σύσφιξης της δέσμης των κυψελών, ώστε να χρησιμοποιηθούν για τους περιορισμούς του σχεδιασμού του άνω ζευγαριού πτερυγίων. Η προβολή των κοχλιών συγκράτησης-σύσφιξης της δέσμης με την εντολή «offset» χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία νέου ευθύγραμμου τμήματος, μετατοπίζοντας την προβολή προς αντίθετη κατεύθυνση της κυψέλης και με τιμή διπλάσια αυτής της παραμέτρου “offset_from_chassis”,

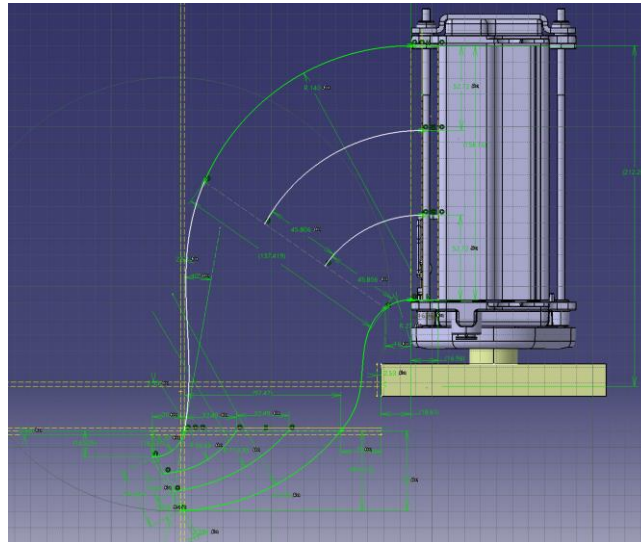
ώστε να υπάρχει απόσταση ανοχής από τους κοχλίες συγκράτησης. Έπειτα, δημιουργήθηκαν δύο τόξα, οι δύο άκρες των οποίων δύναται να κινούνται κατά τον άξονα z πάντα συνδεδεμένες με την μετατόπιση της προβολής των κοχλιών συγκράτησης. Για να προσδιοριστεί η θέση των άκρων επί της μετατοπιζόμενης προβολής δημιουργήθηκαν δύο όμοιες παραμετρικές συναρτήσεις “μέτρηση αναφοράς * συντελεστή ποσοστού (%) μήκος” (οριζόμενο από τον χρήστη), οι οποίες χρησιμοποιούν την μέτρηση αναφοράς μεταξύ των άκρων των τόξων πολλαπλασιασμένη με το οριζόμενο από τον χρήστη ποσοστό της απόστασης, διαιρώντας έτσι την συνολική απόσταση και τοποθετώντας το κάθε άκρο τόξου στην απαιτούμενη θέση. Επίσης, τα σημεία των τόξων τα οποία καταλήγουν πλησίον της επιφάνειας κυψέλης ορίζονται ως επαπτόμενα με βοηθητικές παράλληλες μετατοπίσεις των ευθυγράμμων τμημάτων της φλάντζας, ώστε να καταλήγει ομαλά η ροή στην επιφάνεια αυτής. Για τα δύο άλλα άκρα των τόξων επιβλήθηκε περιορισμός κίνησής τους επί του ευθύγραμμου τμήματος που προκατασκευάστηκε και μόνον. Για να προσδιοριστεί η ακριβής θέση των άκρων, ομοίως δημιουργήθηκαν δύο παραμετρικές συναρτήσεις, βασισμένες στην αντίστοιχη μέτρηση αναφοράς, η οποία πολλαπλασιάζεται ομοίως με το αντίστοιχο ποσοστό της απόστασης και θέτει στην κατάλληλη θέση, με βάση τις μεταβαλλόμενες παραμέτρους, την άκρη του εκάστοτε τόξου (Εικόνα 4-21).



Εικόνα 4-21 Θέση εσωτερικών οριζόντιων πτερυγίων: μετρήσεις αναφοράς (πορτοκαλί) και συναρτήσεις αυτών (πράσινο), βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα (διακεκομμένη γκρι), βοηθητική προβολή κοχλιών συγκράτησης (ενδιάμεση κίτρινη διακεκομμένη).

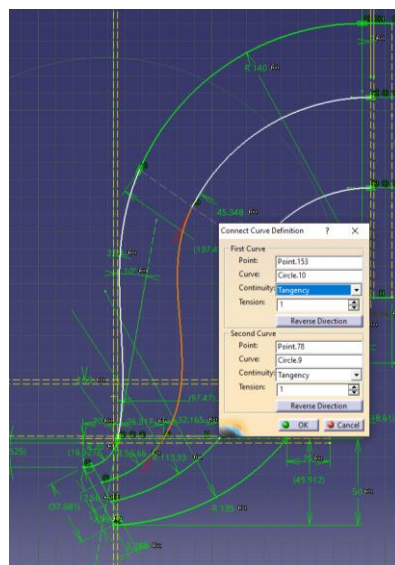
Ομοίως με τα άνω τόξα, τα τόξα τα οποία κατασκευάζονται στην περιοχή του Scoop λαμβάνονται δύο μετρήσεις αναφοράς μεταξύ των άνω άκρων, των κάτω τόξων και των άκρων χείλους αυτών. Με όμοιο τρόπο δημιουργούνται συναρτήσεις των μετρήσεων αναφοράς και τοποθετούνται τα νέα δημιουργούμενα τόξα σε θέση τέτοια, ώστε ο

εισερχόμενος αέρας να διαμοιράζεται κατάλληλα. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή τα τόξα λαμβάνουν επιπλέον μεταβλητές (“fin_inlet_up_radius” & “fin_inlet_dwn_radius”) ελέγχου των ακτίνων τους, καθώς δύναται να χρησιμοποιηθούν για τροποποιήσεις στις καμπυλότητες αυτών. Επιπροσθέτως, για τον ορισμό της κατάληξης των δύο τόξων στην πλευρά της εισαγωγής αέρα, δημιουργείται βοηθητικό ευθύγραμμο τμήμα σε απόσταση παράλληλα ορισμένη με την συνάρτηση “fillet_inlet_fins_faces * (αδιάστατο συντελεστή-1)+offset_from_chassis” ώστε να αποφεύγεται η επικάλυψη των μετέπειτα δημιουργούμενων φιλέτων στο στόμιο του Scoop, καθώς και των φιλέτων προσώπων (Εικόνα 4-22).



Εικόνα 4-22 Σχεδιασμός τόξων οριζόντιων πτερυγίων εισαγωγής.

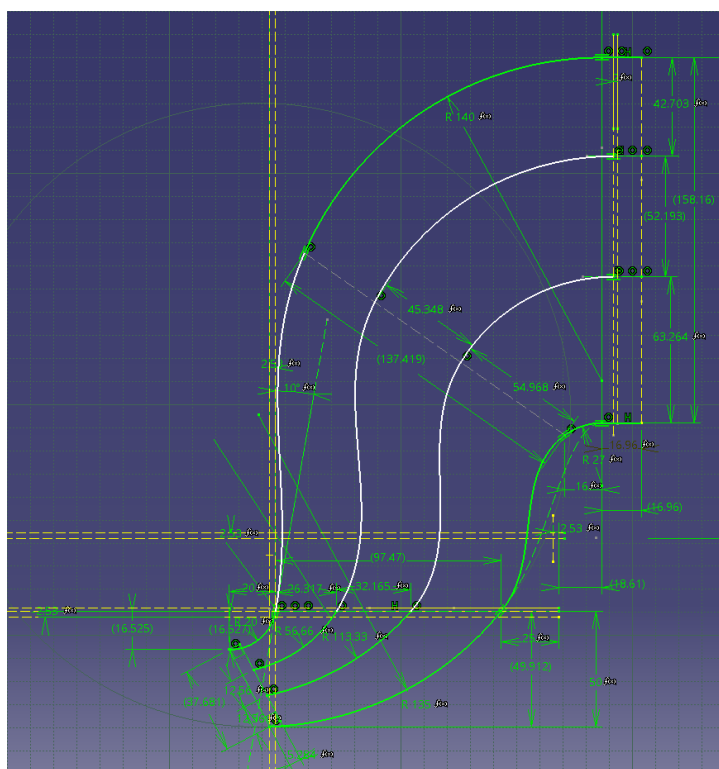
Έχοντας ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός των τόξων, αυτά ενώνονται με την βοήθεια δύο καμπυλών «Spline» με την χρήση της εντολής «Connect», δημιουργώντας δύο συνεχείς καμπύλες. Τα σημεία επαφής των τόξων με την κάθε καμπύλη ορίζονται με συνέχεια εφαπτομενική και στις δύο πλευρές με βάρος «tension» ίσο με 1 (Εικόνα 4-23).



Εικόνα 4-23 Εντολή Connect, δημιουργία καμπυλών σύνδεσης οριζοντίων πτερυγίων.

Ως προς το τελευταίο βήμα συνένωσης των οριζοντίων πτερυγίων με καμπύλες Spline για την ενοποιημένη μορφοποίησή τους, επισημαίνεται ότι οι καμπύλες Spline κατά το πρώτο μοντέλο δεν είχαν δομικό ρόλο, με αποτέλεσμα την παραγωγή τεσσάρων οριζοντίων πτερυγίων στο άνω και κάτω μέρος του αγωγού, όπως συμπεραίνεται και από το τελικό μοντέλο 1 (Εικόνα 4-22). Σε όλα τα επόμενα μοντέλα τα πτερύγια είναι ενοποιημένα.

Με την ολοκλήρωση των πτερυγίων ουσιαστικά ολοκληρώνεται και η διδιάστατη σχεδίαση της διάταξης αγωγού “S”, Scoop και των οριζοντίων πτερυγίων, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη της τριδιάστατης γεωμετρίας (Εικόνα 4-24). Σημειώνεται ότι στο ζεύγος των οριζοντίων πτερυγίων πραγματοποιείται ανάλυση καμπυλότητας για την εκτίμηση της σχεδιάσής τους.

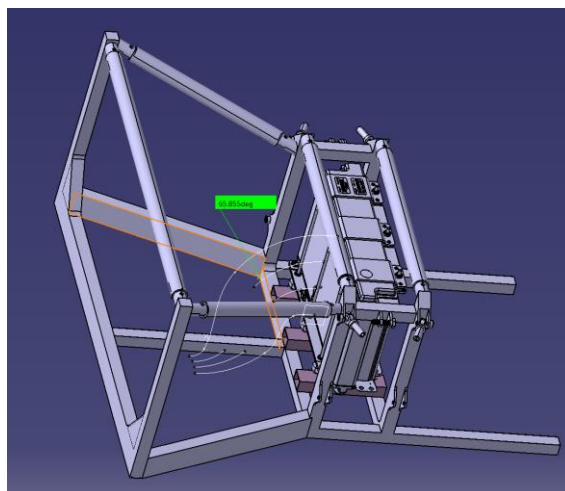


Εικόνα 4-24 Διδιάστατη σχεδίαση εισαγωγής-οριζοντίων πτερυγίων.

Έχοντας προσδιορίσει το διδιάστατο έως τώρα χωρίο, βάση του οποίου έγινε το κύριο «sketch» όπως αυτό περιεγράφηκε αναλυτικά παραπάνω, η μελέτη αυτού επεκτάθηκε και ως προς την τρίτη διάσταση, ώστε να αξιοποιηθεί ο χώρος όπως αυτός προκύπτει με βάση τη διάταξη του σκελετού. Μελετώντας τη διάταξη του σκελετού, παρατηρούνται αμβλείες γωνίες μεταξύ του δοκού που εκτείνεται παράλληλα με την κυψέλη και των δοκών, οι οποίοι κατευθύνονται στο εμπρόσθιο τμήμα του οχήματος (Εικόνα 4-25), οι οποίες δύναται να αξιοποιηθούν για την διόγκωση της διάταξης εισαγωγής προς τις πλάγιες πλευρές του σκελετού. Για την εύρεση της εν λόγω ακριβούς γωνίας, πραγματοποιείται η ακόλουθη δυναμική διαδικασία.

Δεδομένου ότι έχει δημιουργηθεί το κύριο «sketch» της διάταξης εισαγωγής, πραγματοποιείται η δημιουργία επιφανειών -οι οποίες σε προβολή κάτωψης παράγουν το μέγιστο ανάπτυγμα μήκους της γεωμετρίας- με την εντολή «extrude», με όρια εντολής τους δύο πλάγιους αμβλείας γωνίας δοκούς και κατεύθυνση παράλληλη με αυτή της κυψέλης καυσίμου (Εικόνα 4-26). Έπειτα δημιουργείται νέο «sketch» σε νέο επίπεδο σχεδίασης. Εντός

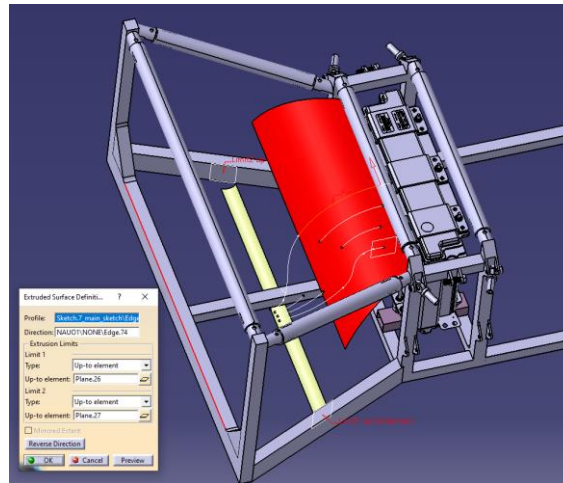
του νέου σχεδίου γίνεται προβολή των ακμών των επιφανειών που προ-δημιουργήθηκαν (*Εικόνα 4-27*), οι οποίες εφάπτονται με τους πλάγιους δοκούς, καθώς και της ακμής μήκους επιφάνειας κυψέλης. Στη συνέχεια δημιουργούνται ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία συνδέουν τις πλάγιες προβολές με την ακμή επιφάνειας κυψέλης.



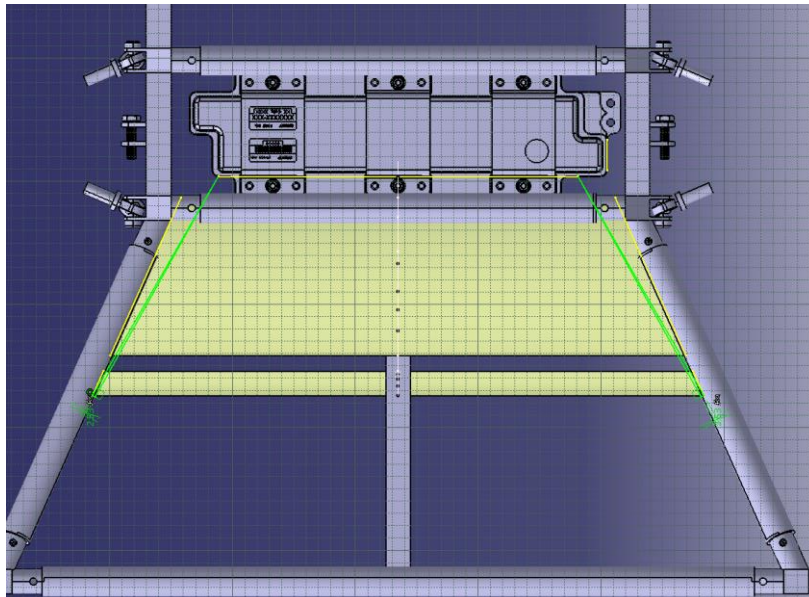
Εικόνα 4-25 Γωνία μεταξύ (πορτοκαλί) δοκών.

Κατ’ αυτό τον τρόπο είναι γνωστές πλέον η μέγιστες γωνίες κατά τις οποίες οι διάταξη θα μπορούσε να αμβλυνθεί. Για τον υπολογισμό όμως και της ανοχής εφαρμογής κατά τη συναρμολόγηση, καθώς και το πάχος το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα την απαιτήσεως, προστέθηκαν ευθύγραμμα τμήματα, με περιορισμό ορθής γωνίας μεταξύ αυτών και των ευθυγράμμων τμημάτων τα οποία προσχεδιάστηκαν, των οποίων το μήκος ορίζεται συναρτήσει των παραμετρικών μεταβλητών πάχους κατασκευής και ανοχής μεταξύ κατασκευής και σκελετού με την διαδικασία της πρόσθεσης (“airways_thickness + offset_from_chassis”). Επί των παραμετρικά οριζόμενων ακμών σχεδιάζονται και τα τελικά ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία συνδέουν την ακμή επιφάνειας κυψέλης με τα τμήματα τα οποία υπολογίζουν την απαραίτητη απόσταση από τον σκελετό. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία δύο ορθογώνιων τριγώνων όπου, μεταξύ των τελευταίων συνδέσεων, πραγματοποιούνται μετρήσεις αναφοράς (και όχι κύριες) (*Εικόνα 4-28*). Σε δεύτερο χρόνο οι μετρήσεις των μέγιστων γωνιών, μετά της συμπερίληψης πάχους κατασκευής, χρησιμοποιούνται για την στρέψη των επιπέδων τα οποία αναφέρονται παρακάτω. Με τον τρόπο αυτό η συνολική σχεδίαση δεν υπερβαίνει σε καμία περίπτωση τα όρια του σκελετού, χωρίς να απαιτείται από τον σχεδιαστή ο συνεχής οπτικός έλεγχος αυτών κατά την εφαρμογή των παραμέτρων.

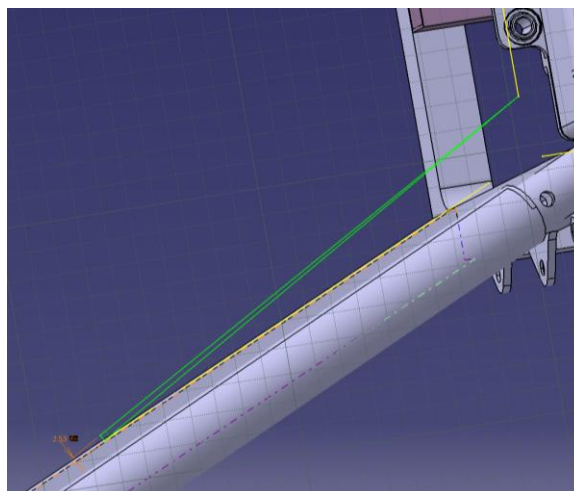
Γνωρίζοντας πλέον και τις διαστάσεις προς αξιοποίηση του πλάτους, δημιουργούνται δύο νέα επίπεδα σχεδίασης με άξονα περιστροφής τις κάθετες ακμές της επιφάνειας, η οποία εμπεριέχει τα κελιά διόδου αέρα. Με την εντολή «extrude» δημιουργούνται επιφάνειες κάθετες προς τα επίπεδα (*Εικόνα 4-29*). Η τιμή γωνίας περιστροφής των επιπέδων σχεδίασης εξαρτάται και είναι άμεσα και δυναμικά συνδεδεμένη με την διαδικασία που αναλυθηκε παραπάνω, μέσω νέων μεταβλητών “Angle_left_inlet_airway” & “Angle_right_inlet_airway”, οι οποίες λαμβάνουν την τιμή τους από μετρήσεις αναφοράς.



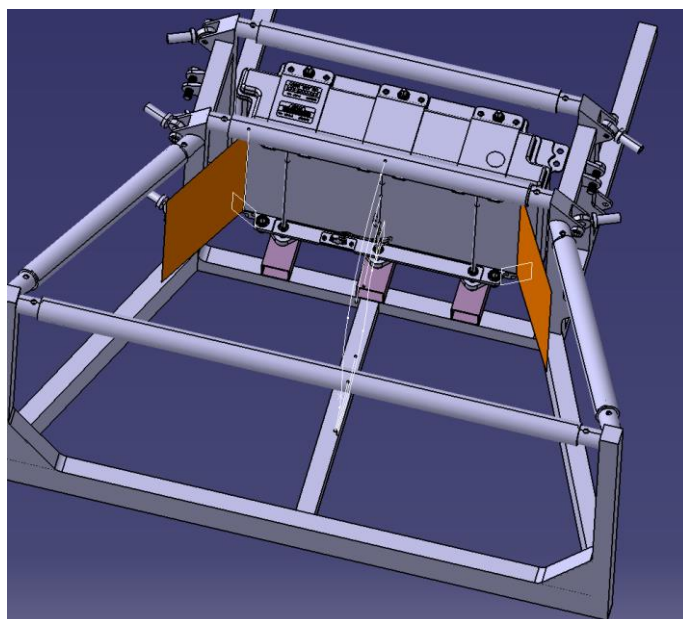
Εικόνα 4-26 Εντολή Extrude με όρια της πλάγιας δοκού και κατεύθυνση παράλληλη με την κυψέλη καυσίμου (κόκκινη γραμμή).



Εικόνα 4-27 Προβολές πλάγιων ακμών επιφανειών και ακμής μήκους κυψέλης καυσίμου (κίτρινες ακμές).

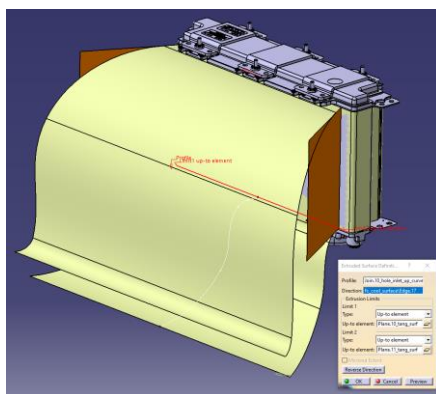


Εικόνα 4-28 Ορθογώνιο τρίγωνο υπολογισμού διαθέσιμης γωνίας για την ανάπτυξη της εισαγωγής προς πλάγιας κατευθύνσεις και μέτρηση αναφοράς (προοπτική απεικόνιση).

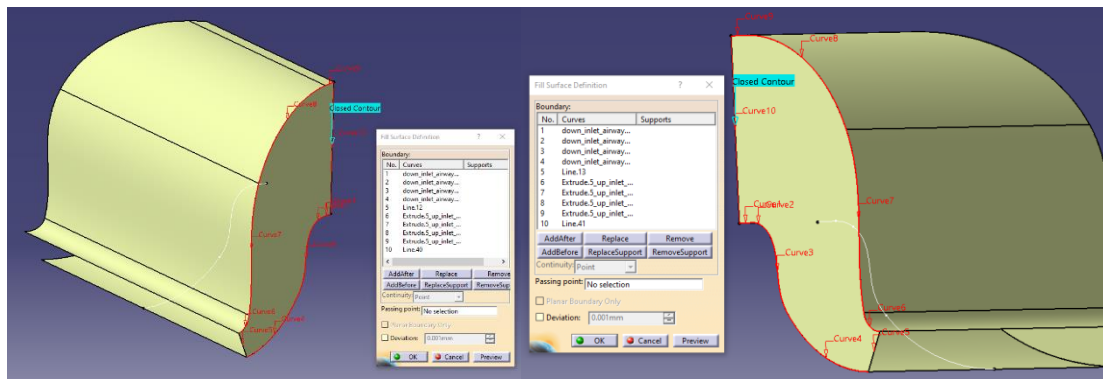


Εικόνα 4-29 Επιφάνειες (πορτοκαλί) οριοθέτησης ανάπτυξης αεραγωγού.

Έχοντας πλέον όλη την απαιτούμενη πληροφορία, η διαδικασία σχεδίασης επικεντρώνεται στην δημιουργία των όγκων κατασκευής. Πρώτα πραγματοποιείται με την εντολή «Join» η ένωση των καμπυλών που έχουν σχεδιαστεί στο κύριο «Sketch» πρώτα για την κάτω καμπύλη και έπειτα για την πάνω. Στην συνέχεια με την εντολή «extrude» διαδοχικά για την κάθε καμπύλη δημιουργούνται οι κάτω και άνω επιφάνειες, με όρια τα επίπεδα τα οποία δημιουργούνται παραπάνω (Εικόνα 4-30). Σε δεύτερο χρόνο με την εντολή «fill» δημιουργούνται δύο νέες επιφάνειες για τις πλάγιες πλευρές της εισαγωγής. Κατά την χρήση της εντολής ο σχεδιαστής καλείται να δημιουργήσει ένα κλειστό περίγραμμα, εντός του οποίου θα δημιουργηθεί η επιφάνεια. Κατά την χρήση της εν λόγω εντολής επιλέγονται με την σειρά οι ακμές των επιφανειών, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί σε προηγούμενο στάδιο και, όπου δεν υφίσταται ακμή, δύναται μέσω της εντολής η δημιουργία ακμής ένωσης τυχόν κενών, βοηθώντας στο κλείσιμο του περιγράμματος όπως και πραγματοποιήθηκε. Για να είναι δυναμικά μεταβαλλόμενες οι επιφάνειες κατά τις μεταβολές των παραμέτρων, τα σημεία των δημιουργούμενων για το σκοπό αυτό ακμών θα πρέπει να ταυτίζονται με τις ακμές των επιφανειών, ώστε να εξαρτώνται από αυτές και επομένως να μεταβάλλονται ανάλογα, ακολουθώντας τις τροποποιήσεις των οριζόντιων επιφανειών (Εικόνα 4-31). Μετά την δημιουργία των επιφανειών με την εντολή «Join» δημιουργείται μία ενιαία επιφάνεια από την συνένωση των τεσσάρων προηγούμενων επιφανειών (Εικόνα 4-32).

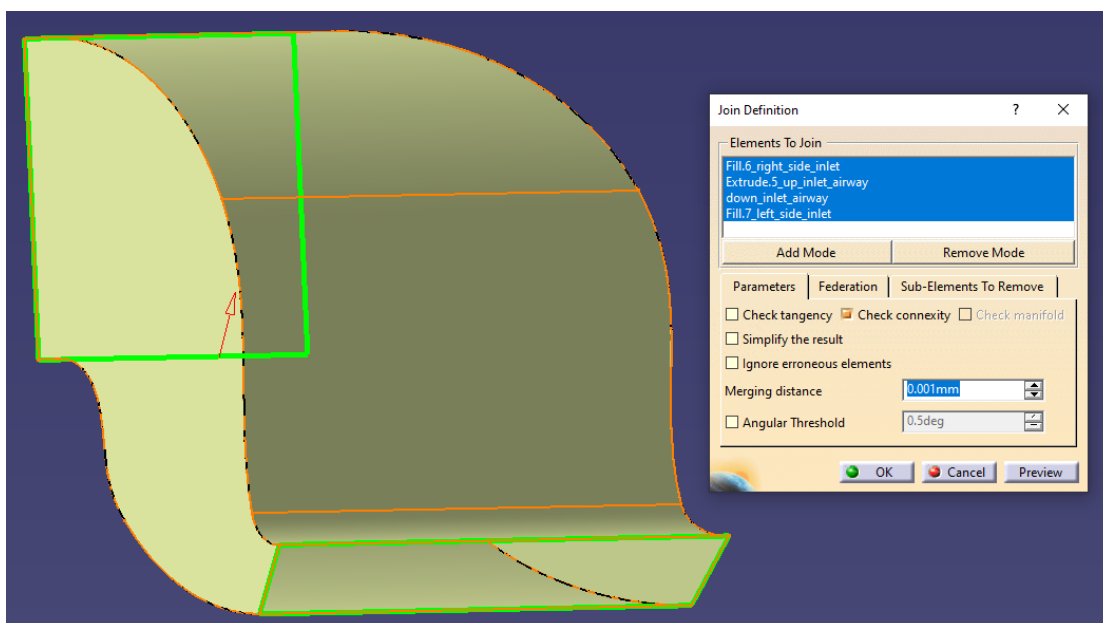


Εικόνα 4-30 Εντολή Extrude πάνω καμπύλης και δημιουργία επιφάνειας.

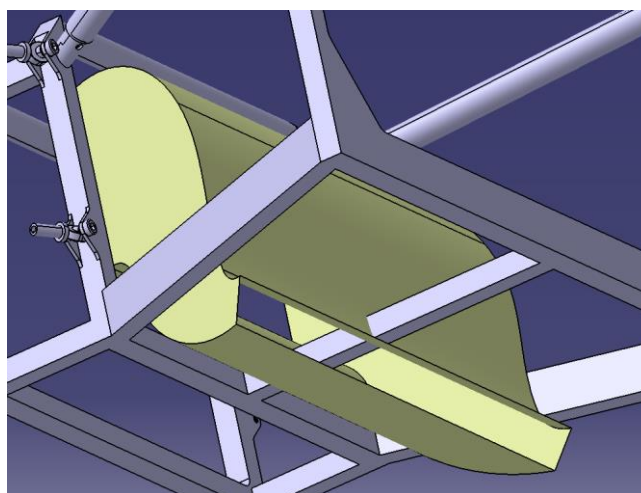


Εικόνα 4-31 Εντολή fill δημιουργία α) πλάγιας δεξιάς και β) πλάγιας αριστερής επιφάνειας εισαγωγής.

Έπειτα από ολοκλήρωση του βασικού (εσωτερικού) κελύφους της γεωμετρίας θα πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να μην παραβιάζει την γεωμετρία του σκελετού, καθώς υφίσταται δοκός η οποία διέρχεται από την περιοχή (Εικόνα 4-33). Για τον λόγο αυτό δημιουργείται νέο «sketch» επί της άνω επιφάνειας της εν λόγω δοκού. Εντός του «sketch» γίνεται προβολή

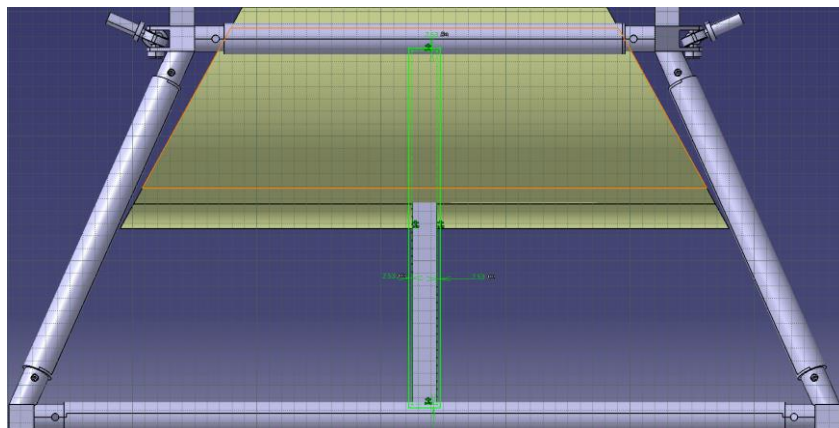


Εικόνα 4-32 Εντολή Join συνένωση τεσσάρων κύριων πλευρικών επιφανειών.



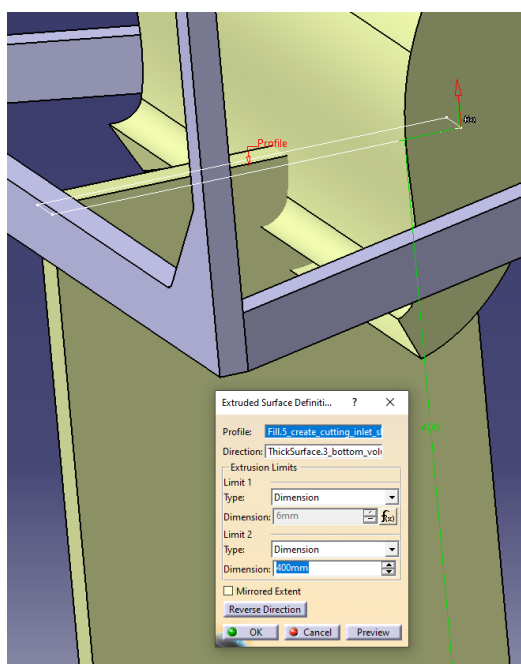
Εικόνα 4-33 παραβίαση δοκού σκελετού οχήματος.

των ακμών της άνω επιφάνειας της δοκού, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως βοηθητικές, καθώς από αυτές με την εντολή «Offset» αυξάνεται το περίγραμμα (το οποίο και θα χρησιμοποιηθεί) της εν λόγω επιφάνειας σε μέγεθος το οποίο προκύπτει από πρόσθεση των μεταβλητών πάχους της κατασκευής και της απόστασης ανοχής από το σκελετό του οχήματος ($\text{airways_thickness} + \text{offset_from_chassis}$) (Εικόνα 4-34).



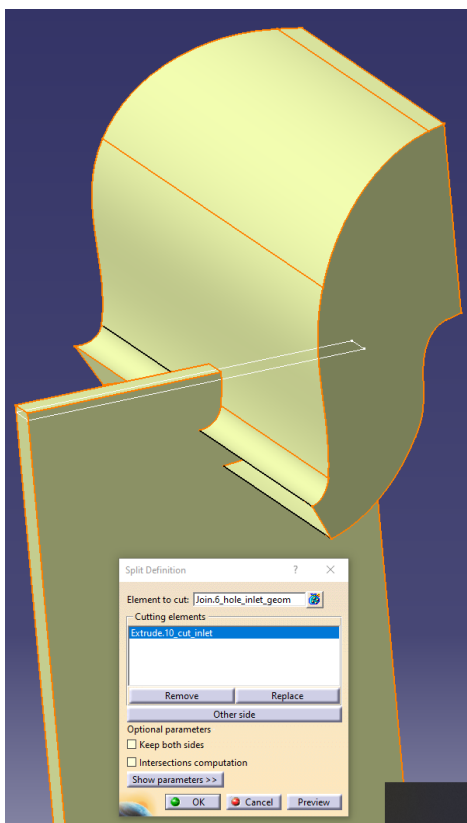
Εικόνα 4-34 Δημιουργία sketch επί της δοκού σκελετού και παραμετροποίησή του.

Έπειτα δημιουργείται διδιάστατη επιφάνεια από το περίγραμμα με την εντολή «Fill», επί της οποίας γίνεται εφαρμογή της εντολής «extrude» για την παραγωγή βοηθητικού όγκου. Ο παραγόμενος όγκος δημιουργείται κάθετα προς την επιφάνεια και προς τις δύο κατευθύνσεις (Εικόνα 4-35). Η διεύθυνση προς την κατασκευή παίρνει τιμή η οποία υπολογίζεται από το άθροισμα δύο μεταβλητών, της μεταβλητής η οποία χρησιμοποιείται αργότερα για τα φιλέτα των ακμών της κατασκευής και της απόστασης ανοχής από το σκελετό του οχήματος και πάλι ($\text{fillet_radius_airways} + \text{offset_from_chassis}$), ώστε να προκύπτει πάντα παραμετρικά οριζόμενη η απόσταση από το σκελετό, “αγκαλιάζοντας” την δοκό.



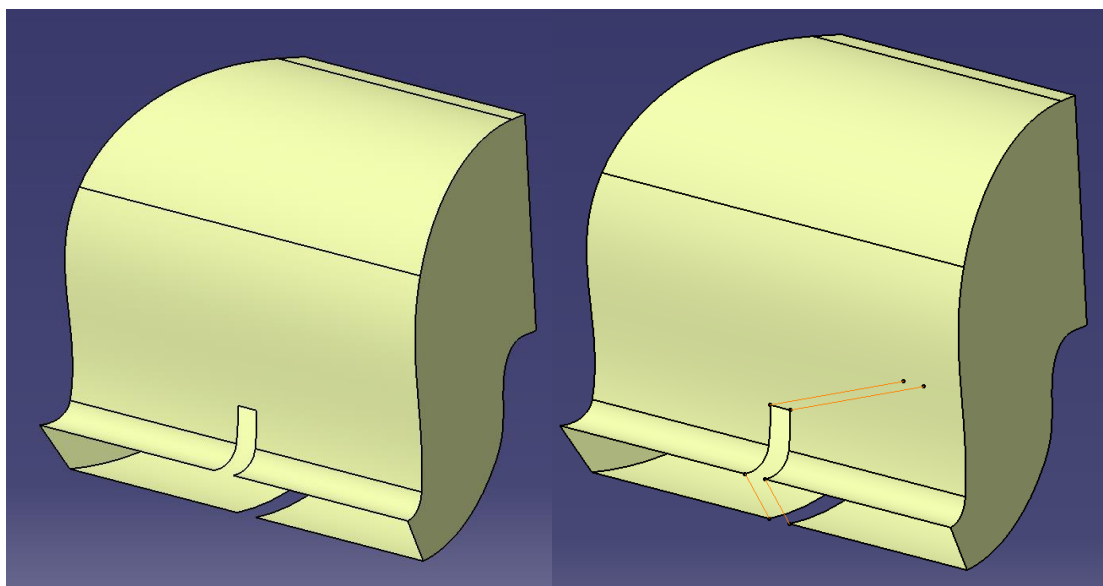
Εικόνα 4-35 Δημιουργία βοηθητικού όγκου για την τροποποίηση της κατασκευής.

Κατά την φορά κατάντι της κατασκευής η τιμή για την παραγωγή του όγκου λαμβάνει μία σταθερή τιμή, η οποία απαιτείται όπως φαίνεται παρακάτω. Ο βοηθητικός αυτός όγκος χρησιμοποιείται για την κατάτμηση της διάταξης της εισαγωγής στο σημείο το οποίο διέρχεται η δοκός του σκελετού. Για την κατάτμησή του χρησιμοποιείται η εντολή «Split», όπου ως αντικείμενο προς κοπή επιλέγεται η γεωμετρία επιφάνειας του (εσωτερικού) κελύφους, ενώ σαν εργαλείο κοπής ο βοηθητικός όγκος ο οποίος αναφέρθηκε προηγουμένως (*Εικόνα 4-36*).

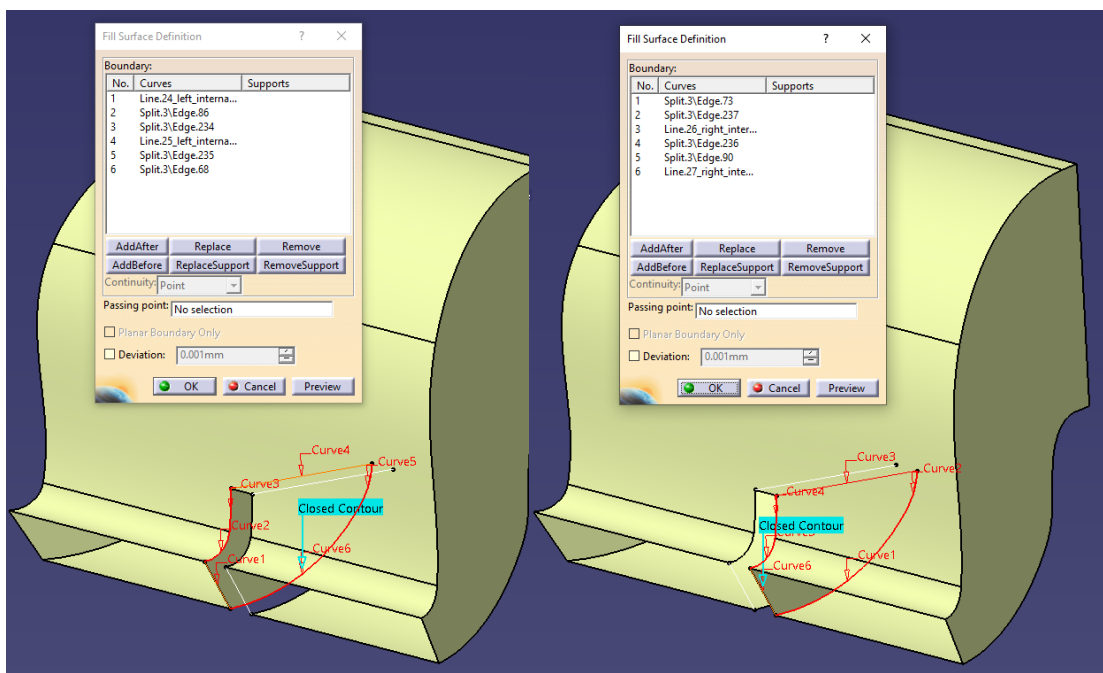


Εικόνα 4-36 Εντολή Split, κατάτμηση διάταξης εισαγωγής.

Έπειτα από την κατάτμηση της γεωμετρίας προκύπτουν κενά, τα οποία απαιτείται να κλείσουν (*Εικόνα 4-37α*). Για το κλείσιμο αυτών δημιουργούνται με την εντολή «Fill» τρεις επιφάνειες, ομοίως με την περίπτωση των εξωτερικών πλευρικών επιφανειών σε προηγούμενο στάδιο. Αναλυτικότερα, σε πρώτο στάδιο δημιουργούνται ευθύγραμμα τμήματα «Line», τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία κλειστού περιγράμματος, το οποίο απαιτείται κατά την εφαρμογή της εντολής «Fill» (*Εικόνα 4-37β*). Σημειώνεται ότι τα σημεία τα οποία δημιουργούν τα ευθύγραμμα τμήματα ταυτίζονται με τα σημεία των ακμών της υπάρχουσας γεωμετρίας, για την αλληλένδετη μεταβολή μεταξύ των τμημάτων της μετέπειτα συνολικής γεωμετρίας. Σύμφωνα με τα παραπάνω, δημιουργούνται οι τρεις εσωτερικές πλευρικές επιφάνειες οι οποίες απαιτούνται (*Εικόνα 4-38*). Μετά την δημιουργία των τριών εσωτερικών πλευρικών επιφανειών αυτές, μαζί με την γεωμετρία η οποία έχει καταταμηθεί, ενώνονται με την εντολή «Join» (*Εικόνα 4-39*).



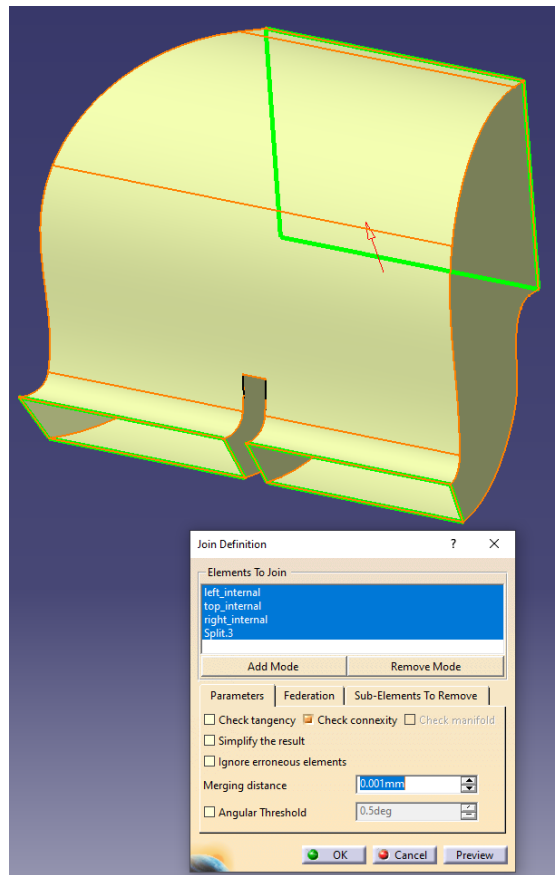
Εικόνα 4-37 α) (αριστερά) αποτέλεσμα εντολής Split, β) (δεξιά) δημιουργία ευθύγραμμων τμημάτων (πορτοκαλί).



Εικόνα 4-38 Εντολή Fill, δημιουργία εσωτερικών πλευρικών επιφανειών.

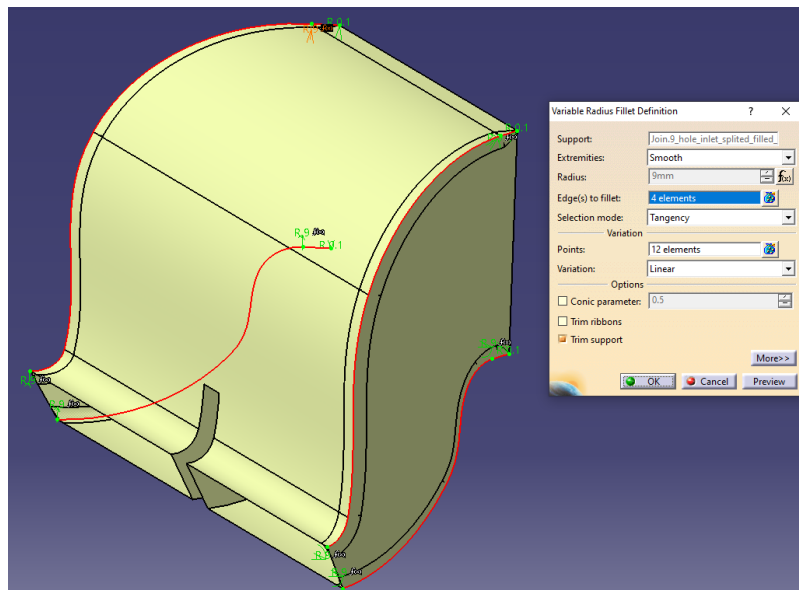
Τέλος, για την ολοκλήρωση της γεωμετρίας επιφανείας πραγματοποιούνται οι απαιτούμενες στρογγυλεύσεις των ακμών της. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε δύο στάδια, καθώς οι απαιτήσεις για την κάθε ακμή είναι διαφορετικές, ενώ επίσης διασφαλίζεται η ομαλή διεξαγωγή της εντολής από το σύστημα CAD, δίχως επιπλοκές, ή αποτυχία πραγματοποίησης, λόγω αλληλοεπικάλυψης διαδοχικών φιλέτων ταυτοχρόνως. Συγκεκριμένα, κατά το πρώτο στάδιο επιλέχθηκε η εντολή «Variable Fillet», η οποία παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας φιλέτων σε ενιαίες καμπύλες-ακμές με διαδοχικές αυξομειώσεις τιμής ακτίνας σε επιλεγόμενα από το χρήστη σημεία της ακμής. Κατά την εφαρμογή της επιλέχθηκαν οι τέσσερις εξωτερικές-πλευρικές ακμές της συνολικής

γεωμετρίας επιφάνειας (η οποία δημιουργείται σε προηγούμενο στάδιο), οι οποίες οδηγούν από την κυψέλη καυσίμου στο κωδωνοειδές στόμιο της εισαγωγής (bell-mouth).



Εικόνα 4-39 Εντολή Join, δημιουργία συνολικής εσωτερικής γεωμετρίας.

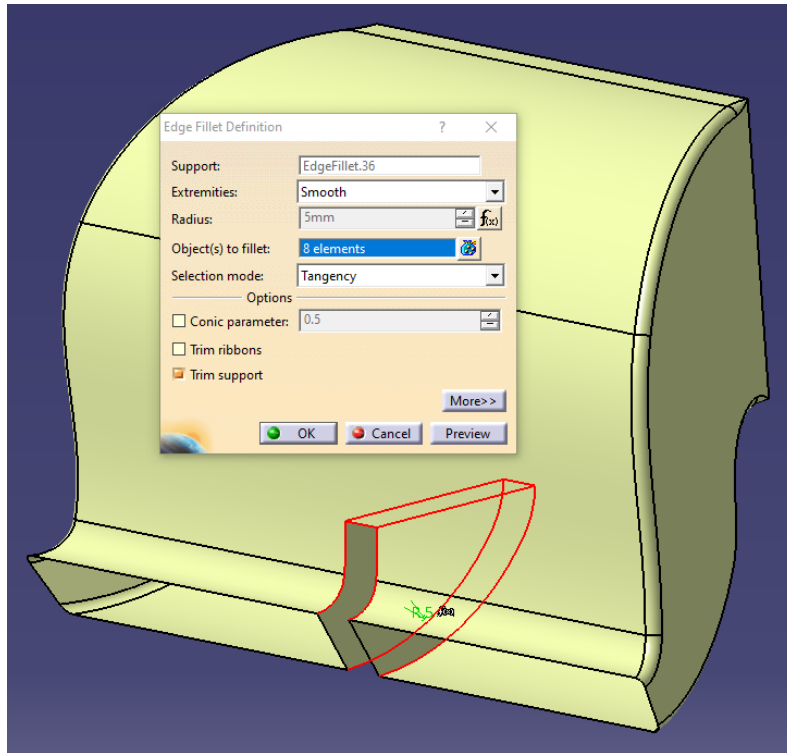
Έπειτα επιλέχθηκαν τα σημεία των καμπυλών, τα οποία ξεκινούν από την επιφάνεια της κυψέλης καυσίμου και ορίστηκε στο σημείο αυτό η τιμή της ακτίνας ίση με ένα δέκατο του χιλιοστού (0,1mm). Εν συνεχεία επιλέχθηκαν τα σημεία όπου καταλήγει η φλάντζα προσαρμογής, καθώς και τα τελικά άκρα των καμπυλών (από τα οποία διέρχονται και οι καμπύλες), ενώ ορίστηκε η τιμή της εκάστοτε ακτίνας με την χρήση της μεταβλητής “fillet_radius_airways”. Η μετάβαση μεταξύ των τιμών είναι γραμμική, η μεταβολή επιλέγεται ως ομαλή και η δημιουργία των τόξων ως εφαιπτομενικά οριζόμενη (Εικόνα 4-40).



Εικόνα 4-40 Εντολή Variable Fillet, φιλέτων εξωτερικών πλευρικών καμπυλών-ακμών.

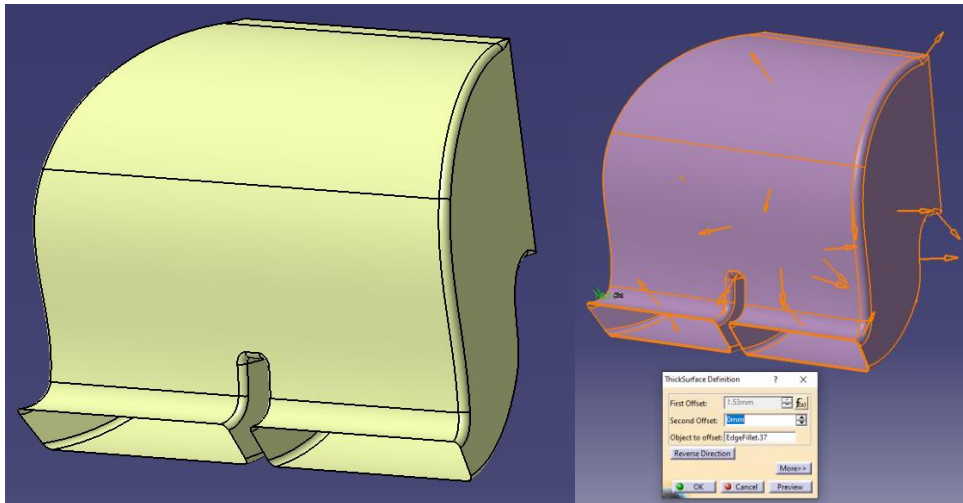
Ο λόγος, για τον οποίο πραγματοποιείται η εν λόγω μεταβολή της ακτίνας φιλέτων, είναι αφενός ότι απαιτούνται οι στρογγυλεύσεις κατά το δυνατόν για την αποφυγή προβλημάτων κατά την ροή, αφετέρου όμως απαιτείται και η κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσαρμογή της εισαγωγής επί της ορθογωνικής επιφάνειας της κυψέλης, ώστε όλα τα κανάλια ροής οξυγόνου των κελιών να εμπεριέχονται εντός της εισαγωγής. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς η ανομοιόμορφη παροχή αέρα και επομένως οξυγόνου στα κελιά της κυψέλης οδηγεί και στην ανομοιόμορφη λειτουργία των κελιών και των τμημάτων καθενός εξ' αυτών, με αποτέλεσμα την τοπική “γήρανση” των κελιών. Αυτό συμβαίνει καθώς εάν υφίσταται μία ανομοιόμορφη παροχή αέρα κατά την λειτουργία της κυψέλης ορισμένες περιοχές έχουν πλούσιο μείγμα σε αέρα-οξυγόνο και επομένως δύναται να παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα ρεύματος, ενώ άλλες είναι φτωχότερες σε οξυγόνο, με αποτέλεσμα η διαδικασία οξειδωσης να μην μπορεί να ολοκληρωθεί για τη παρεχόμενη ποσότητα (κατά περίπτωση) καυσίμου. Κατά την κατάσταση αυτή, για την κάλυψη της ζήτησης ενέργειας, τα κελιά τα οποία έχουν πλουσιότερο μείγμα αέρα-οξυγόνου “υπερ-εργάζονται”, με αποτέλεσμα την γρηγορότερη “γήρανσή” τους. Συνεπώς, εάν η ανομοιόμορφη παροχή οφείλεται σε γεωμετρία, θα οδηγεί σε μόνιμη ανομοιόμορφη λειτουργία και άρα ανομοιόμορφη φθορά της κυψέλης καυσίμου. Το πρόβλημα επεκτείνεται και στην ψύξη, πέραν της παροχής οξειδωτικού μέσου, γεγονός το οποίο δύναται να οδηγεί αφενός σε τοπική “πλημμύρα” καναλιών διόδου, από την αδυναμία απομάκρυνσης υγρασίας μέσω του αέρα και αφετέρου σε τοπική υπερθέρμανση. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να προκληθεί μόνιμη καταστροφή κελιών και μόνιμη μείωση της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου (βλ. κεφ. 2.2.1)

Στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιείται η εντολή «Edge Fillet», όπου και επιλέγονται οι λοιπές ακμές των εσωτερικών επιφανιών, τα οποία και λαμβάνουν ομοίως την μεταβλητή “fillet_radius_airways”, ο τύπος μετάβασης επιλέγεται ομαλός και η δημιουργίας των τόξων ως εφαιπτομενικά ορισμένα (Εικόνα 4-41) .



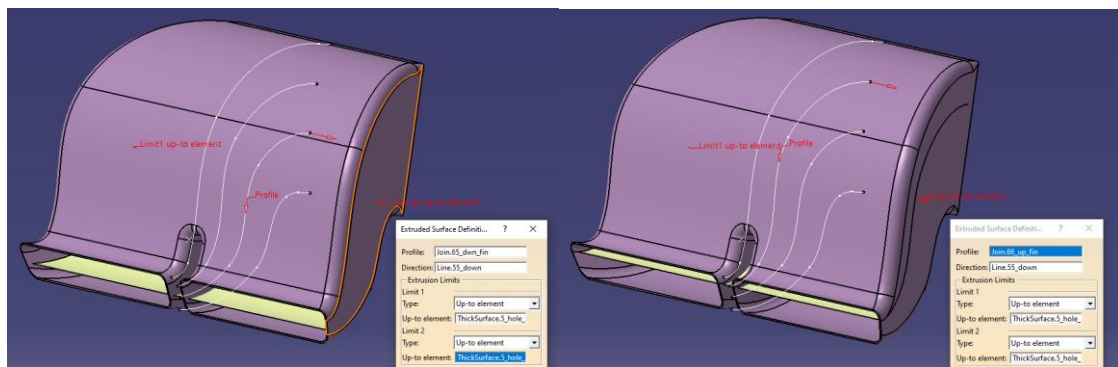
Εικόνα 4-41 Εντολή Edge Fillet, δημιουργία εσωτερικών φιλέτων.

Η τελική γεωμετρία επιφανείας μετά την εφαρμογή των fillets (Εικόνα 4-42α), χρησιμοποιείται για την παραγωγή του τριδιάστατου μοντέλου του κύριου κορμού της γεωμετρίας εισαγωγής (Εικόνα 4-42β), η οποία πραγματοποιείται με την εντολή «Thick Surface» και ορίζεται τιμή μέσω της μεταβλητής, η οποία προσδιορίζει το πάχος της κατασκευής (airways_thickness), με διάνυσμα κάθετο προς τις επιφάνειες και με φορά εξωτερική.



Εικόνα 4-42 α) Τελική γεωμετρία επιφανείας, β) Εντολή Thick Surface, παραγωγή τριδιάστατου κύριου κορμού εισαγωγής.

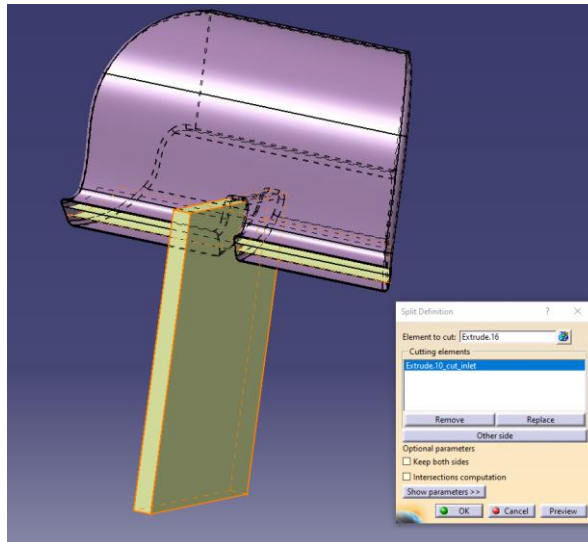
Έπειτα από την ολοκλήρωση του τριδιάστατου μοντέλου του κύριου κορμού της εισαγωγής και του συνόλου των διδιάστατων διατομών της, δημιουργούνται τα εσωτερικά πτερύγια ελέγχου της ροής. Όπως αναφέρθηκε, τα εσωτερικά πτερύγια έχουν προσχεδιαστεί στο κύριο «sketch» της σχεδίασης και χρησιμοποιούνται διαδοχικά οι καμπύλες (οι οποίες έχουν συγχωνευθεί με εντολές «Join» ανά περίπτωση), με την βοήθεια της εντολής «extrude» για την δημιουργία αρχικών επιφανειών των πτερυγίων. Η διαδικασία που πραγματοποιείται είναι ίδια για τα δύο οριζόντια πτερύγια. Επιλέγεται η αντίστοιχη καμπύλη και εφαρμόζεται η εντολή «extrude» με φορά παράλληλη με αυτή του μήκους της επιφάνειας κυψέλης. Ως όρια της εντολής και προς τις δύο κατευθύνσεις επιλέγονται οι εξωτερικές πλευρικές επιφάνειες του τριδιάστατου μοντέλου κύριου κορμού της εισαγωγής, οι οποίες προηγούνται της δημιουργίας των επιφανειών των πτερυγίων, διασφαλίζοντας σε κάθε περίπτωση την ομαλή μεταβολή της γεωμετρίας, σύμφωνα με τα προηγούμενα στάδια μοντελοποίησης (Εικόνα 4-43).



Εικόνα 4-43 Εντολή extrude, δημιουργία επιφανειών οριζόντιου ζεύγους πτερυγίων.

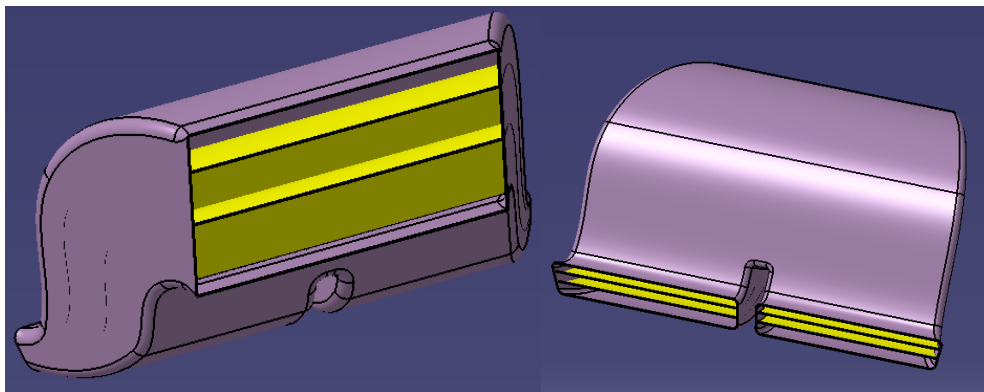
Για την κατάτμηση των πτερυγίων χρησιμοποιείται η εντολή «Split», επιλέγοντας διαδοχικά τις επιφάνειες χρησιμοποιώντας ως όγκο κοπής αυτών τον όγκο που βασίζεται στη δοκό του σκελετού. Κατ' αυτό τον τρόπο οι πτερυγώσεις περιορίζονται εντός του κύριου κορμού της εισαγωγής (Εικόνα 4-44).

Μετά την δημιουργία των επιφανειών των πτερυγίων σειρά λαμβάνει η δημιουργία όγκων βασιζόμενων σε αυτές, με την εντολή «Thick Surface», με εισαγωγή στην τιμή του πάχους την παράμετρο του πάχους της κατασκευής (airways_thickness) (Εικόνα 4-45).



Εικόνα 4-44 Εντολή Split, κατάτμηση οριζόντιου ζεύγους περυγίων.

Όντας πλέον γνωστές οι διαστάσεις του κύριου κορμού της διάταξης εισαγωγής καθώς και των οριζόντιων περυγίων, δημιουργείται το ζεύγος των κάθετων περυγίων της εισαγωγής. Η διαδικασία για καθένα από αυτά είναι όμοια.

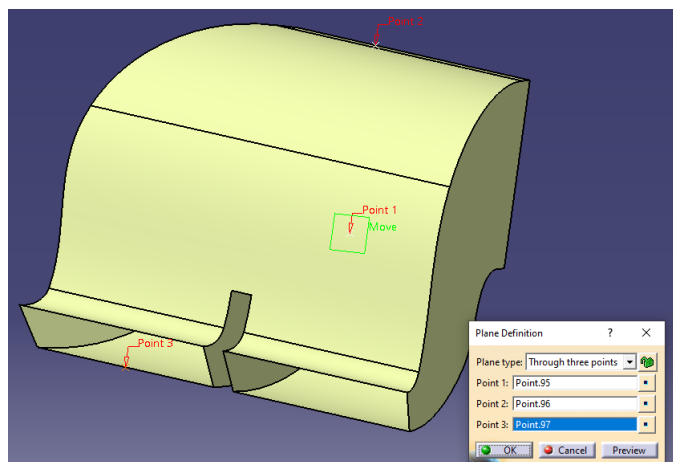


Εικόνα 4-45 Εντολή Thick Surface, Δημιουργία όγκων περυγίων.

Για τον σχεδιασμό του αριστερού περυγίου δημιουργείται νέο παραμετρικά οριζόμενο επίπεδο σχεδίαση «Plane», το οποίο ορίζεται με την βοήθεια τριών σημείων «Through three point» (Εικόνα 4-46).

Το πρώτο σημείο ορίζεται επί του κάτω ευθύγραμμου τμήματος της πραγματικής επιφάνειας της κυψέλης «on Curve», με ορισμό της ακριβούς του θέσης με ποσοστό επί αυτού, με τη χρήση ενός λόγου «Ratio», του οποίου η τιμή ορίζεται με την μεταβλητή “vertical_fin_outlet_ratio”, ώστε να μεταβάλλεται βάση αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Το δεύτερο σημείο ορίζεται ομοίως με το πρώτο, με την διαφορά ότι ορίζεται επί του άνω ευθύγραμμου τμήματος της πραγματικής επιφάνειας της κυψέλης, με τιμή μεταβλητής την ίδια όπως και προηγουμένως, ώστε το περυγίο να σχεδιάζεται στις δύο διαστάσεις για λόγους ευκολίας κατά την κατασκευή. Το τρίτο σημείο για τον ορισμό του επιπέδου σχεδίασης, ορίζεται επί του της ακμής του κάτω αντίστοιχου άκρου του Scoop «on Curve» με προσδιορισμό της ακριβούς του θέσης επί της ακμής με την χρήση λόγου, ο οποίος ορίζεται με την χρήση της μεταβλητής “vertical_fin_inlet_ratio”. Τα διανύσματα φοράς και στις τρεις περιπτώσεις των καμπυλών ορίζονται από τα αριστερά προς τα δεξιά, κάτι το οποίο έχει σημασία για την σωστή λειτουργία των σχετιζόμενων μεταβλητών σχεδίασης. Κατά τον τρόπο

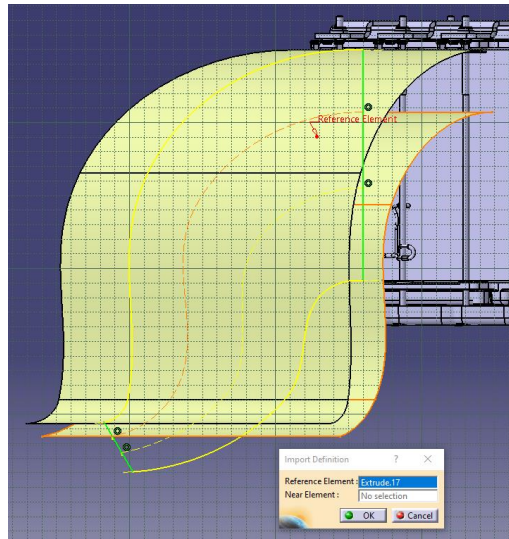
αυτό το επίπεδο και επομένως και το «Sketch» επί αυτού το οποίο αναφέρεται παρακάτω, μεταφέρεται τόσο ανάλογα με τις διαστάσεις του κεντρικού κορμού εισαγωγής όσο και από τις επιθυμίες του σχεδιαστή.



Εικόνα 4-46 ορισμός επιπέδου σχεδίασης κάθετου πτερυγίου εισαγωγής.

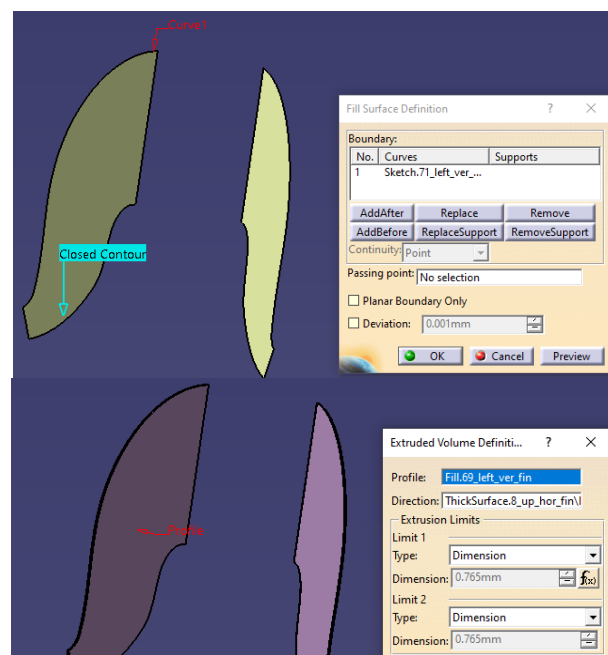
Το δεύτερο κάθετο πτερύγιο σχεδιάζεται ομοίως, με την διαφοροποίηση του ορισμού διεύθυνσης του διανύσματος (αντίθετο) για τον ορισμό τους, ώστε να προκύπτει πάντα συμμετρικό μοντέλο.

Έπειτα δημιουργείται νέο «Sketch» επί του αντίστοιχου επιπέδου, εντός του οποίου πραγματοποιείται εισαγωγή των καμπυλών των άνω και κάτω μητρικών επιφανειών σχεδίασης του κελύφους, καθώς και των καμπυλών των μητρικών επιφανειών των πτερυγίων στο σημείο τομής τους με την επιφάνεια (Plane) του «Sketch» με την εντολή «Intersect 3D Elements» (Εικόνα 4-47). Οι δύο εξωτερικές καμπύλες του κορμού συνδέονται με ευθύγραμμα τμήματα, με τα τμήματα στο μέρος εισαγωγής του αέρα να διέρχονται από τα σημεία προβολής των καμπυλών των επιφανειών των πτερυγίων με τον περιορισμό «Coincidence», δημιουργώντας κλειστά profiles. Ο λόγος για τον οποίο διέρχεται από τα εν λόγω σημεία το κάτω ευθύγραμμο τμήμα αποσκοπεί στην σωστή λειτουργία των φιλέτων (fillets) σε επόμενο στάδιο μεταξύ των οριζόντιων και κάθετων πτερυγίων. Σημειώνεται ότι οι εν λόγω προβολές είναι δυναμικές, με αποτέλεσμα την συνέχεια της παραμετρικής σχεδίασης.



Εικόνα 4-47 Εντολή Sketch, σχεδίαση profile κάθετου αριστερού περυγίου.

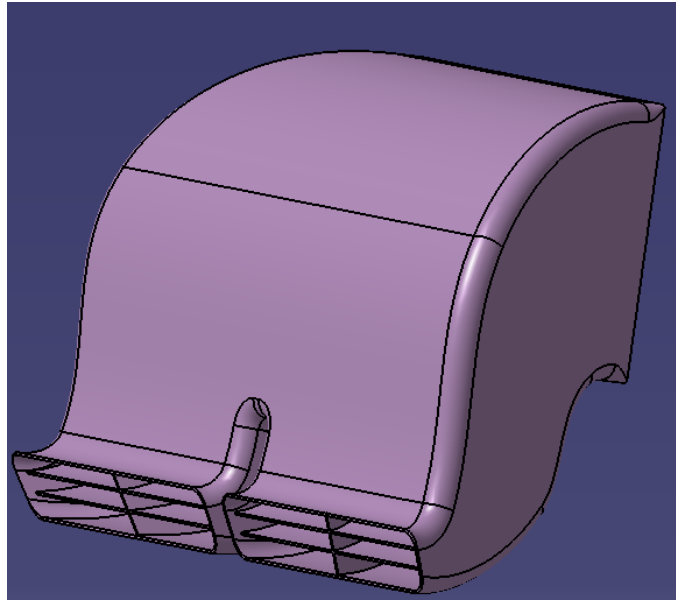
Στην συνέχεια, για το ζεύγος των κάθετων περυγίων δημιουργούνται με εντολής «Fill» δύο επιφάνειες βασισμένες στα περιγράμματα των «Sketch» (Εικόνα 4-48α). Στην συνέχεια με



Εικόνα 4-48 α) Εντολή Fill, δημιουργία επιφανειών κάθετων περυγίων, β) Εντολή Volume Extrude, δημιουργία όγκων κάθετων περυγίων.

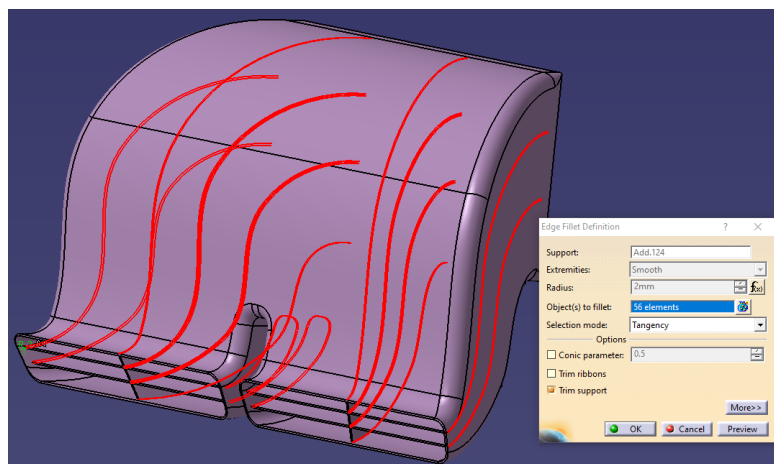
την εντολή « Volume Extrude» δημιουργούνται οι όγκοι των κάθετων περυγίων με τιμή ίση με την παράμετρο “airways_thickness”(Εικόνα 4-48β).

Στη συνέχεια, οι όγκοι των περυγίων και ο κύριος όγκος της γεωμετρίας εισαγωγής ενώνονται διαδοχικά για την δημιουργία ενός ενιαίου όγκου με την λειτουργία «Add» της σειράς λειτουργιών “Boolean”(Εικόνα 4-49).



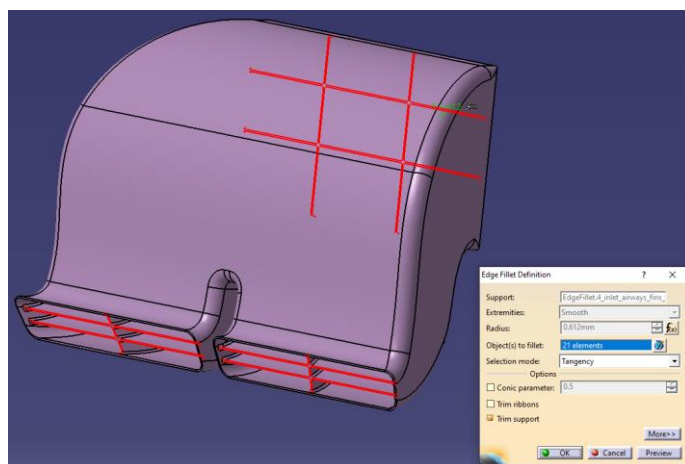
Εικόνα 4-49 Εντολή Add, αποτέλεσμα ενιαίου όγκου εισαγωγής.

Έχοντας ολοκληρωθεί η ενοποίηση των τμημάτων της εισαγωγής, απαιτείται η εξομάλυνση των δημιουργούμενων ακμών των πτερυγώσεων στις ενώσεις τους με τον κύριο κορμό, στις ενώσεις μεταξύ των πτερυγίων και στα πρόσωπα τους, καθώς και των ακμών, οι οποίες βρίσκονται έμπροσθεν του κωδωνοειδούς στομίου (bell mouth), (για την περίπτωση της εισαγωγής τύπου scoop). Για την επίτευξη της εξομάλυνσης των ακμών χρησιμοποιείται η εντολή «Edge Fillet». Δεδομένου ότι ο αριθμός των ακμών προς εξομάλυνση είναι μεγάλος, καθώς επίσης τυγχάνουν συνεχούς αλληλοεπικάλυψης ορισμένα φιλέτα εξ' αυτών, η διαδικασία πραγματοποιείται σε τρία στάδια, ομαδοποιώντας τις ακμές αναλόγως της θέσης τους. Σύμφωνα με αυτή τη ταξινόμηση λαμβάνουν σειρά στην διαδικασία με την πρώτη εντολή οι ακμές των πτερυγίων, οι οποίες βρίσκονται στις ενώσεις με τον κύριο κορμό της κατασκευής, καθώς και στις ενώσεις των κάθετων-οριζόντιων πτερυγίων, ο τύπος της διαδικασίας ορίζεται ως εφαπτομενικός (Tangency), ενώ το μέγεθος της ακτίνας του τόξου καμπυλότητας προσδιορίζεται μέσω της μεταβλητής “fillet_inlet_fins”, ώστε να μεταβάλλεται ανάλογα (Εικόνα 4-50).

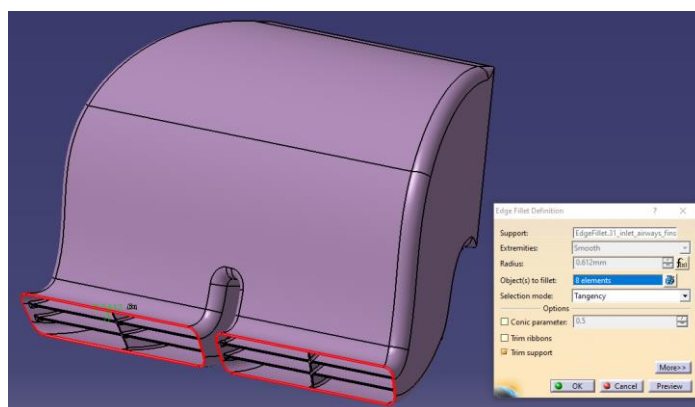


Εικόνα 4-50 Εντολή Edge Fillet, δημιουργία φιλέτων στις ακμές συνδέσεων πτερυγίων και κύριου κορμού εισαγωγής.

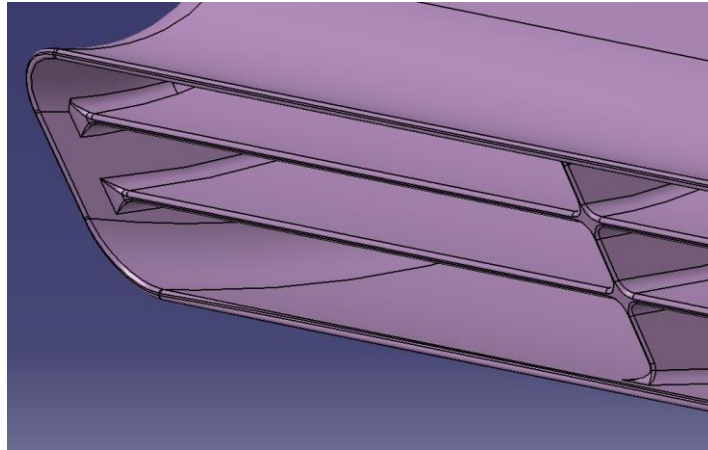
Στην δεύτερη εντολή «Edge Fillet» λαμβάνουν μέρος οι ακμές των προσώπων των πτερυγίων, ο τύπος της διαδικασίας ορίζεται και πάλι ως εφαπτομενικός (Tangency), ενώ το μέγεθος της ακτίνας του τόξου καμπυλότητας σε αυτή την περίπτωση προσδιορίζεται μέσω της μεταβλητής “fillet_inlet_fins_faces”. Η παράμετρος αυτή δεν είναι άμεσα ελεγχόμενη από τον σχεδιαστή (για λόγους απλούστευσης και διασφάλισης της ορθής λειτουργίας της εντολής) αλλά προκύπτει με γνώμονα την πραγματοποίηση φιλέτων στις άνω και κάτω ακμές των προσώπων των πτερυγίων χωρίς αυτά να αλληλεπικαλύπτονται. Έτσι προκύπτει από την μεταβλητή του πάχους της κατασκευής, καθώς αυτή διαιρείται με την αδιάστατη τιμή 2.5 (“airways_thickness/2.5”), διασφαλίζοντας την κατά το δυνατόν μέγιστη εξομάλυνση των ακμών, δημιουργώντας πάντα ένα ασφαλές αποτέλεσμα, αποφεύγοντας αλληλεπικαλύψεις κατά την ύστερη παραμετροποίηση (Εικόνα 4-51). Στο τρίτο στάδιο γίνεται η εξομάλυνση των ακμών χείλους του Scoop, με την εφαρμογή τρίτης εντολής «Edge Fillet», ομοίως με το δεύτερο στάδιο (Εικόνα 4-52). Σημειώνεται ότι η εν λόγω εντολή λαμβάνει χώρα μόνο στον τύπο εισαγωγής Scoop, καθώς στην δεύτερη περίπτωση εξαλείφεται. Στα παραπάνω στάδια ολοκληρώνεται η διαδικασία εξομάλυνσης των ακμών της εισαγωγής (Εικόνα 4-53).



Εικόνα 4-51 Εντολή Edge Fillet, δημιουργία φιλέτων στις ακμές προσώπων των πτερυγίων.



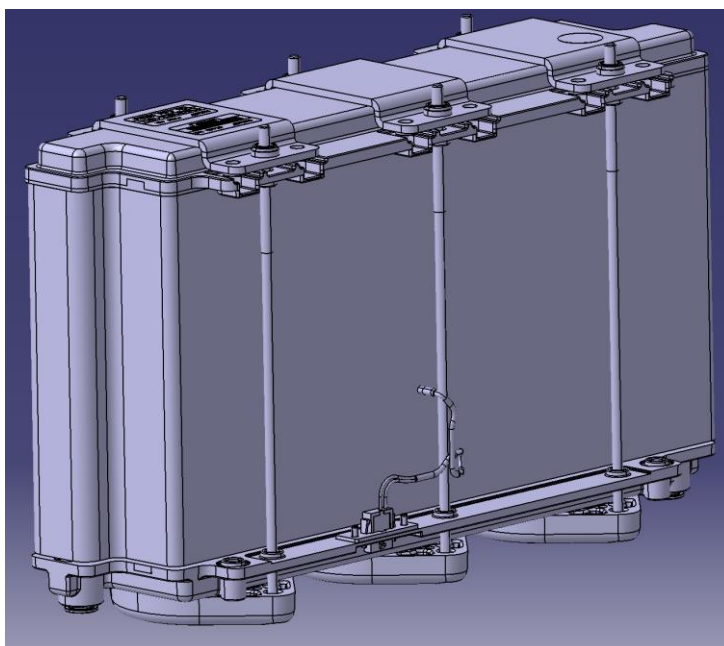
Εικόνα 4-52 Εντολή Edge Fillet, δημιουργία φιλέτων στις ακμές χείλους Scoop.



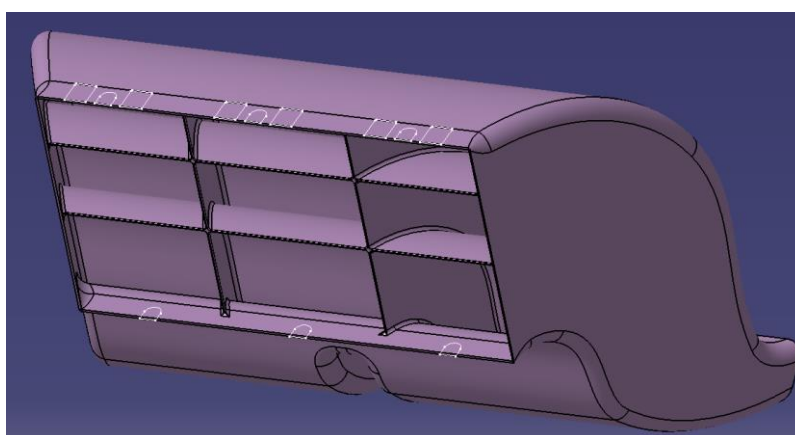
Εικόνα 4-53 Ενδεικτικό τμήμα γεωμετρίας μετά την εξομάλυνση (αεραγωγού Scoop).

Τέλος, απαιτούνται μικρές επεμβάσεις επί της γεωμετρίας της εισαγωγής ώστε αυτή να είναι συμβατή κατά την συναρμολόγηση με την κυψέλη καυσίμου. Για να επιτευχθεί αυτό μελετήθηκαν οι λεπτομέρειες πλησίον της επιφάνειας της κυψέλης, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την προσαρμογή της εισαγωγής. Όπως φαίνεται (*Εικόνα 4-54*), η διάταξη γύρω από τους κοχλίες σύσφιξης - συγκράτησης της δέσμης των κυψελίδων, καθώς και οι ίδιοι οι κοχλίες, απαιτούν τη δημιουργία εγκοπών, για την κατάλληλη εφαρμογή της εισαγωγής. Έτσι δημιουργήθηκαν «sketch» επί της εξωτερικής επιφάνειας εισαγωγής στο τμήμα της φλάντζας προσαρμογής, εντός των οποίων έγινε η προβολή των εν λόγω στοιχείων, ενώ τα στοιχεία αυτά τροποποιήθηκαν έτσι ώστε να είναι δυνατή η φυσική συναρμολόγηση. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν δύο «sketch» στο άνω και κάτω μέρος της γεωμετρίας, όπου απαιτείται (*Εικόνα 4-55*). Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν με την χρήση της εντολής «Volume Extrude» δύο βοηθητικοί όγκοι (*Εικόνα 4-56α, 4-55β*) με διεύθυνση προς την εσωτερική επιφάνεια της γεωμετρίας, όπου το πάχος της εντολής είναι σχετιζόμενο με το πάχος της κατασκευής πολλαπλασιασμένο επί δύο ($\text{airways_thickness} * 2$), ώστε να γίνεται σωστά η κοπή (η οποία γίνεται σε επόμενο βήμα) της γεωμετρίας ανάλογα με το εκάστοτε πάχος κατασκευής, χωρίς να προκύπτουν αδιάστατες επιφάνειες από την λειτουργία. Έπειτα χρησιμοποιούνται οι εν λόγω βοηθητικοί όγκοι με χρήση της εντολής «Remove» του πακέτου λειτουργίας Boolean σε δύο διαδοχικές εφαρμογές, επιλέγοντας τον αντίστοιχο όγκο ως εργαλείο κοπής και ως αντικείμενο προς κοπή την εισαγωγή μετά των εξομαλύνσεων, όπως αναλύθηκε προηγουμένως.

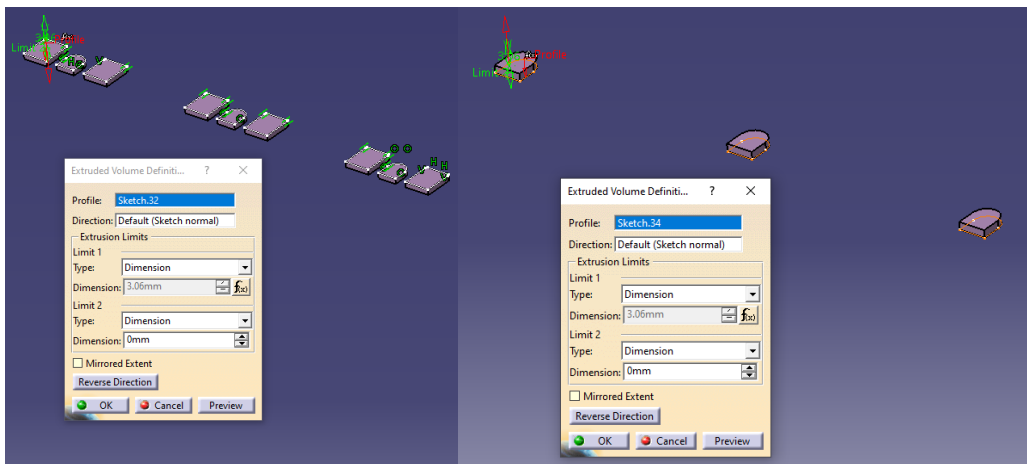
Με τις παραπάνω λεπτομέρειες ολοκληρώνεται το τριδιάστατο μοντέλο της εισαγωγής και δύναται να αναπαραχθεί το τελικά απαιτούμενο μοντέλο προς κατασκευή, όπως αυτό προκύψει ως προϊόν των προσομοιώσεων της ροής (*Εικόνα 4-57, 4-58, 4-59*).



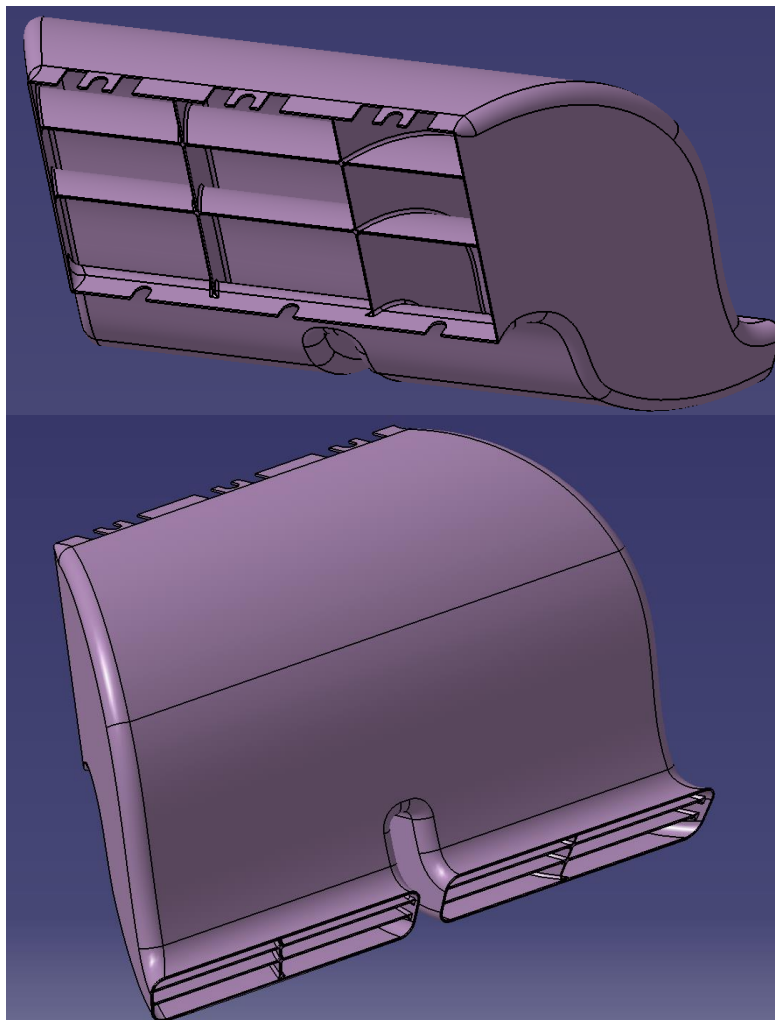
Εικόνα 4-54 Μοντέλο κυψέλης καυσίμου, λεπτομέρειες.



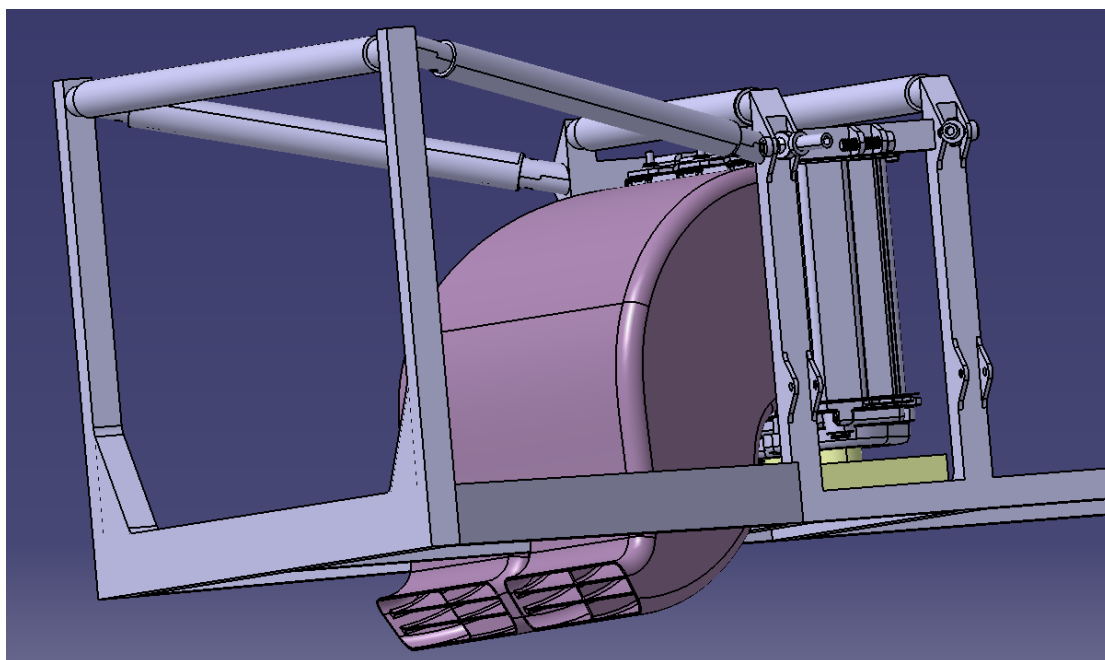
Εικόνα 4-55 Sketch επί της εξωτερικής επιφάνειας της γεωμετρίας εισαγωγής στο άνω και κάτω σημείο της φλάντζας.



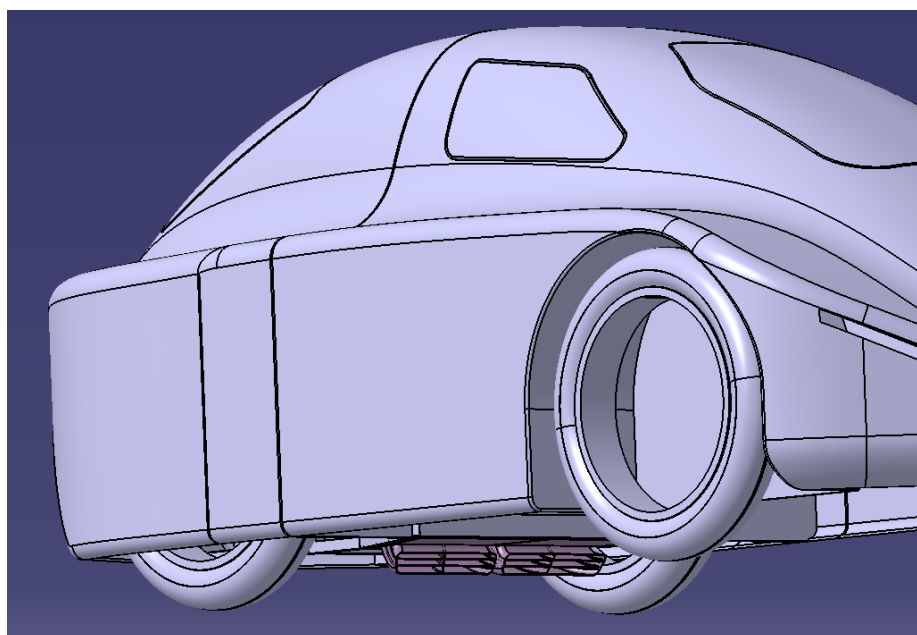
Εικόνα 4-57 Εντολή Volume Extrude, δημιουργία α) άνω βοηθητικών όγκων κοπής, β) κάτω βοηθητικών όγκων κοπής.



Εικόνα 4-56 Τελική άποψη γεωμετρίας εισαγωγής τύπου Scoop.



Εικόνα 4-58 Τελική άποψη γεωμετρίας εισαγωγής τύπου Scoop επί της κυψέλης καυσίμου και του σκελετού του οχήματος.

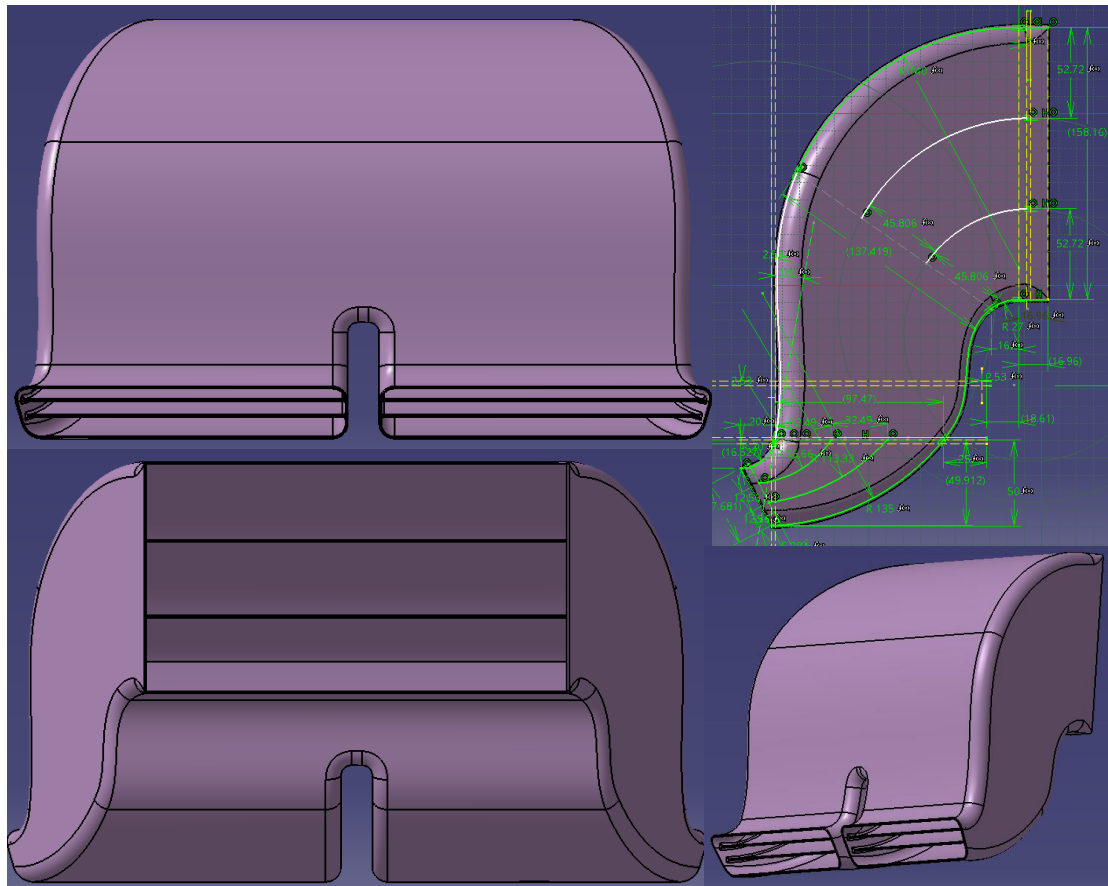


Εικόνα 4-59 Τελική άποψη γεωμετρίας εισαγωγής επί της συνολικής συναρμολόγησης του οχήματος.

Όπως έχει αναλυθεί διεξοδικά παραπάνω, έχει κατασκευαστεί ένα αρχικό μοντέλο, το οποίο, μέσα από τον έλεγχο των παραμέτρων που έχουν τεθεί, δύναται να παράγει τα επιθυμητά μοντέλα για την μελέτη του συστήματος εισαγωγής τύπου “Scoop S Duct”. Παρακάτω παρουσιάζονται τα τέσσερα μοντέλα, τα οποία μελετήθηκαν και αφορούν τον εν λόγω τύπο. Οι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν οφείλονται μόνο σε μεταβολές των τιμών των μεταβλητών, ενώ η φιλοσοφία σχεδιάσής τους ακολουθεί απολύτως το παραπάνω κεφάλαιο.

Πρώτο Μοντέλο “A-1 Scoop S Duct”

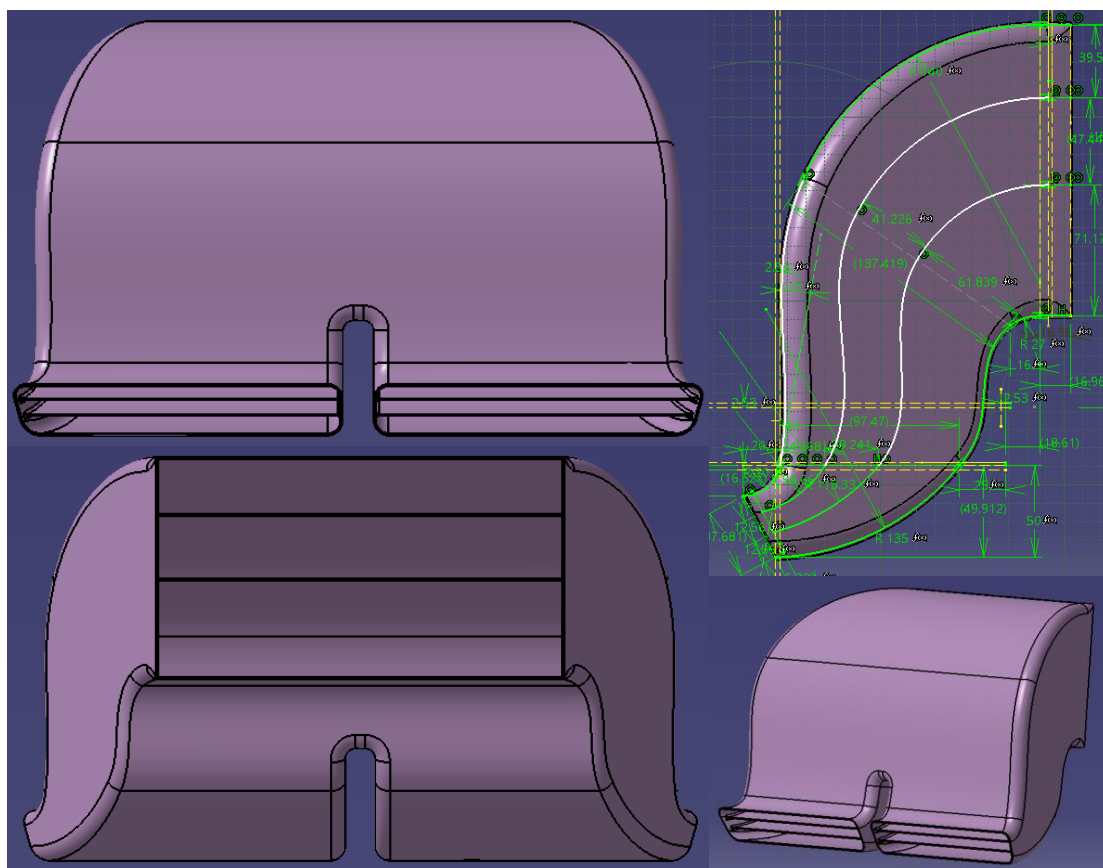
Το μοντέλο “A-1 Scoop S Duct” αποτέλεσε το πρώτο μοντέλο, το οποίο αποτελείται από δύο ζευγάρια εσωτερικών πτερυγίων, ένα στο άνω μέρος του αγωγού και ένα στο κάτω μέρος του αγωγού και εντός του Scoop (Εικόνα 4-60). Το συγκεκριμένο μοντέλο ξεκίνησε με τα εσωτερικά πτερύγια να διαιρούν οριζοντίως σε τρία ίσα μέρη την εισαγωγή. Συγκεκριμένα, η παράμετρος που συμμετέχει στον διαμοιρασμό του μήκος μεταξύ των τόξων κατασκευής των εξωτερικών τοιχωμάτων είχε τιμή συντελεστή ίσο με 0.33 σε όλες τις εφαρμογές του, δημιουργώντας το αρχικό μοντέλο για την πρώτη μελέτη της ροής του συστήματος.



Εικόνα 4-60 Μοντέλο A-1 Scoop S Duct, εσωτερικά μη συνεχή πτερύγια.

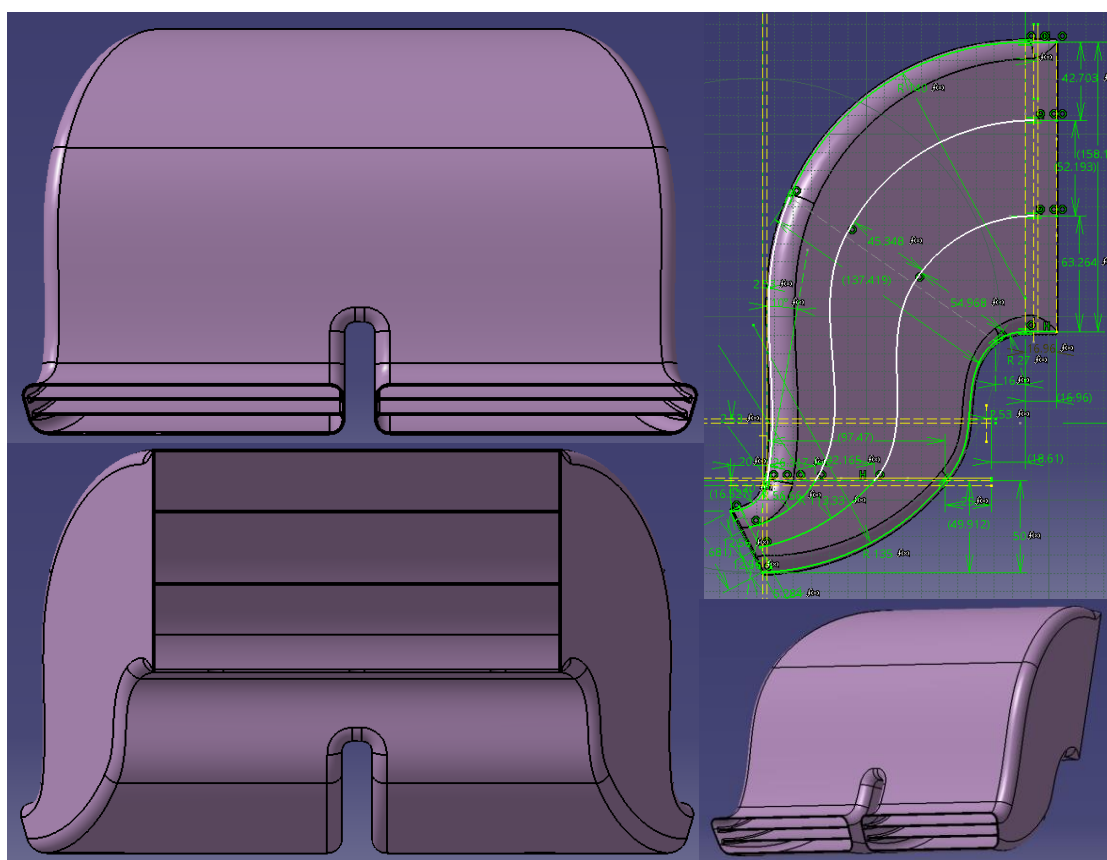
Δεύτερο Μοντέλο “A-2 Scoop S Duct”

Το μοντέλο “A-2 Scoop S Duct”, αποτελείται από ένα ζεύγος πτερυγίων. Ουσιαστικά ενοποιούνται τα δύο ζεύγη του πρώτου μοντέλου, παράγοντας μία διάταξη η οποία ξεχωρίζει τον κύριο αγωγό σε τρία επιμέρους τμήματα, για τον καλύτερο έλεγχο της ροής. Σε σχέση με το πρώτο μοντέλο, διαφέρει ως προς τον διαμοιρασμό των αποστάσεων τοποθέτησης των οριζόντιων πτερυγίων. Συγκεκριμένα, το άνω πτερύγιο τοποθετείται σε ποσοστό 75%, ενώ το κάτω πτερύγιο τοποθετείται σε ποσοστό 45% των αποστάσεων στα σημεία αναφοράς διατομών του αγωγού, διατηρώντας σταθερά μοιρασμένες τις αποστάσεις των πτερυγίων στο ρύγχος τους Scoop στο 33.33% της απόστασης, όπως και στο πρώτο μοντέλο. Με την εν λόγω αναδιάταξη, επιτυγχάνεται μία αισθητή στένωση στο κανάλι ροής, το οποίο διαμορφώνεται μεταξύ του άνω τοιχώματος και του άνω πτερυγίου, μία έντονη αύξηση διατομής του κάτω καναλιού, ενώ η διατομή του ενδιάμεσου καναλιού (μεταξύ των πτερυγίων) μειώνεται συντηρητικά (Εικόνα 4-61).



Τρίτο Μοντέλο “A-3 Scoop S Duct”

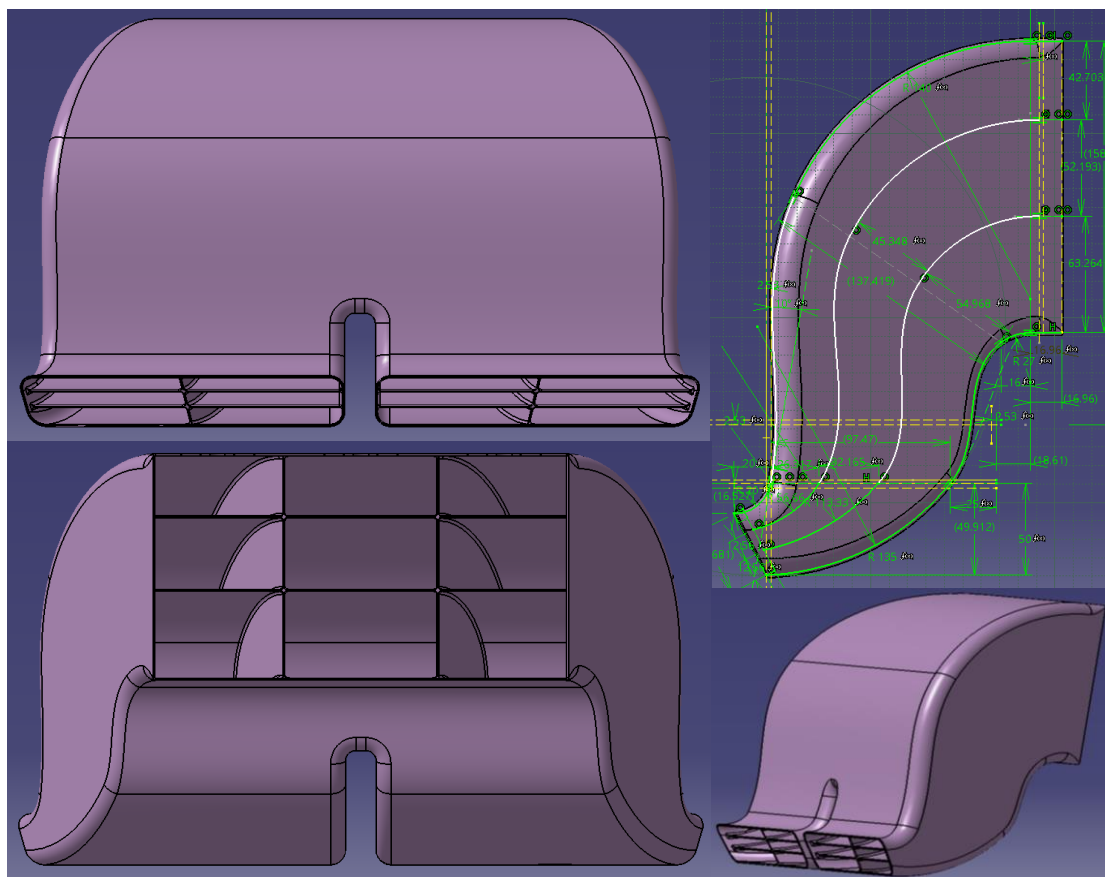
Το τρίτο μοντέλο “A-3 Scoop S Duct” διατηρεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο μοντέλο, αναδιανέμοντας τις αποστάσεις μεταξύ των εσωτερικών πτερυγίων. Συγκεκριμένα μειώνεται η διατομή του κάτω καναλιού με τη μεταβολή του συντελεστή κάτω πτερυγίου από 0.45 σε 0.40, καλύπτοντας το 40% του μήκους στα σημεία αναφοράς, δίνοντας χώρο στα δύο άλλα κανάλια να αναπτυχθούν ως προς τις διατομές τους. Συγκεκριμένα, για το κανάλι ροής το οποίο βρίσκεται ενδιάμεσα των πτερυγίων προκύπτει αύξηση των διατομών του, καθώς ο συντελεστής του άνω πτερυγίου λαμβάνει τιμή ίση με 0.73 σε σχέση με την τιμή του 0.75 του προηγούμενου μοντέλου, ενώ το κάτω κανάλι ροής γνωρίζει μία αντίστοιχη αύξηση μεγέθους. Η θέση των πτερυγίων στο ρύγχος εισαγωγής του Scoop παραμένει σταθερή, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις διατηρώντας σε τρία ίσα μέρη την απόσταση των οριζόντιων πτερυγίων (Εικόνα 4-62).



Εικόνα 4-62 Μοντέλο A-3 Scoop S Duct, εσωτερικά συνεχή οριζόντια πτερύγια.

Τέταρτο Μοντέλο “A-4 Scoop S Duct”

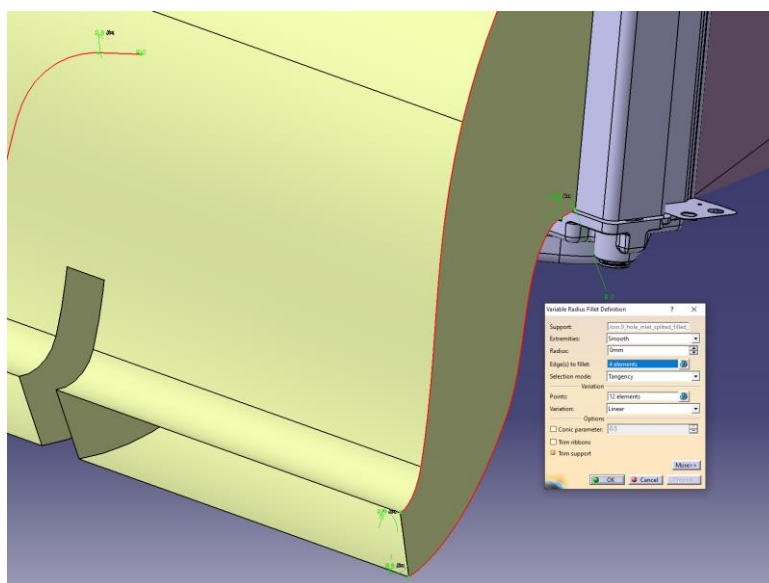
Το μοντέλο “A-4 Scoop S Duct” διαφοροποιείται σημαντικά ως προς τα προηγούμενα μοντέλα, με την προσθήκη δύο κατακόρυφων πτερυγίων, για τον έλεγχο της ροής ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Τα κατακόρυφα πτερύγια τοποθετούνται συμμετρικά, μοιράζοντας τα δύο ρύγχη του Scoop σε ίσα μέρη, ενώ κατά μήκος της επιφάνειας της κυψέλης καθένα από αυτά τοποθετείται μοιράζοντας την απόσταση σε ίσα μέρη. Κατά τον τρόπο αυτό οι διατομές των απολήξεων καναλιών ροής πλησίον της επιφάνειας της κυψέλης καυσίμου είναι ίσες σε μέγεθος. Η θέση των οριζόντιων πτερυγίων παραμένει ίδια με το προηγούμενο μοντέλο (Εικόνα 4-63).



Εικόνα 4-63 Μοντέλο A-4 Scoop S Duct, εσωτερικά συνεχή οριζόντια και κατακόρυφα πτερύγια.

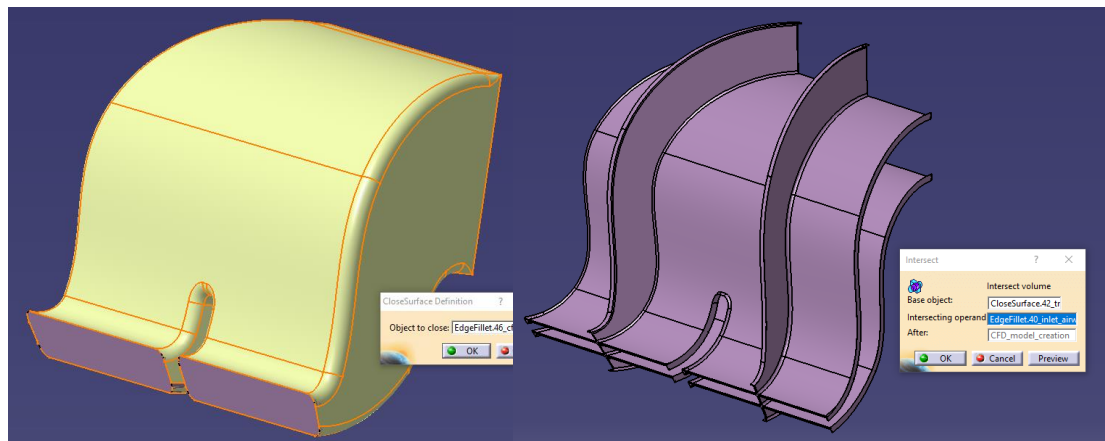
4.5.1.1 Παραγωγή Όγκου Ροής Μοντέλων Εισαγωγής "A Scoop S-Duct"

Για την δημιουργία του όγκου ροής στην περίπτωση της εισαγωγής Scoop ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα. Αρχικά δημιουργείται εκ νέου ένα μοντέλο επιφάνειας του κύριου κορμού της κυψέλης με την εντολή «Variable Fillet», το οποίο είναι πανομοιότυπο με αυτό του βασικού μοντέλου, με την διαφορά ότι κατά την δημιουργία των fillets το άκρο της γεωμετρίας το οποίο εφάπτεται με την κυψέλη αντί της τιμής 0.1mm η οποία ορίστηκε στο κύριο γεωμετρικό μοντέλο ορίζεται ως 0, ενώ οι λοιπές τιμές παραμένουν ίδιες (Εικόνα 4-64). Η διαφοροποίηση αυτή αποσκοπεί στην απλούστευση του μοντέλου προσομοίωσης και στη μείωση των απαιτούμενων στοιχείων κατά την διακριτοποίηση (mesh) του μοντέλου, ενώ ακόμα διασφαλίζει την συνέχεια και ταύτιση μεταξύ των διαφόρων όγκων στις επιφάνειες επαφής τους.

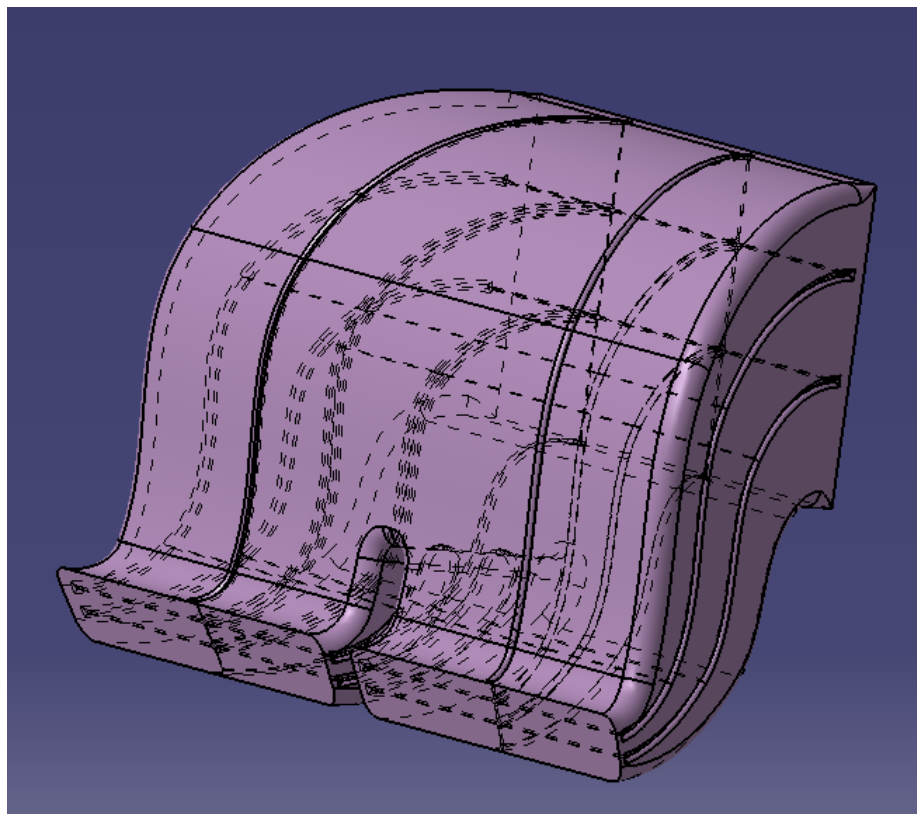


Εικόνα 4-64 Εντολή Variable Fillet, δημιουργία επιφανειακού μοντέλου κύριου κορμού εισαγωγής.

Στη συνέχεια, με την εντολή «Edge Fillet» δημιουργούνται και τα λοιπά φιλέτα των υπολοίπων ακμών ομοίως με το πραγματικό μοντέλο κατασκευής. Επομένως προκύπτει ένα μοντέλο επιφάνειας του κύριου κορμού της εισαγωγής όμοιο με το πραγματικό με την διαφοροποίηση των ακμών στα σημεία επαφής του με την κυψέλη. Επί του μοντέλου επιφάνειας εφαρμόζεται η εντολή «Close Surface» (Εικόνα 4-65α) ανακτώντας τον όγκο του ρευστού του κορμού εισαγωγής. Έπειτα και πάλι με την εντολή «Close Surface» γίνεται η ανάκτηση του όγκου αυτή την φορά από το πραγματικό μοντέλο επιφάνειας του κορμού (με τα φιλέτα 0.1mm στα άκρα συνδέσεων με την επιφάνεια κυψέλης). Ακολουθεί η εφαρμογή της εντολής «Intersect» για την λήψη της τομής μεταξύ του πραγματικού και του μελετώμενου κορμού εισαγωγής (μετά των φιλέτων επί του συνόλου της γεωμετρίας), αποδίδοντας όλη την εσωτερική γεωμετρία των πτερυγίων και των φιλέτων, αποκλείοντας την διαφορά μεταξύ του μοντέλου προσομοίωσης και του πραγματικού μοντέλου κατασκευής η οποία σημειώθηκε παραπάνω (Εικόνα 4-65β). Τελικά, γίνεται η αφαίρεση της παραπάνω τομής από τον όγκο του ρευστού με την εντολή «Remove» (Εικόνα 4-66).



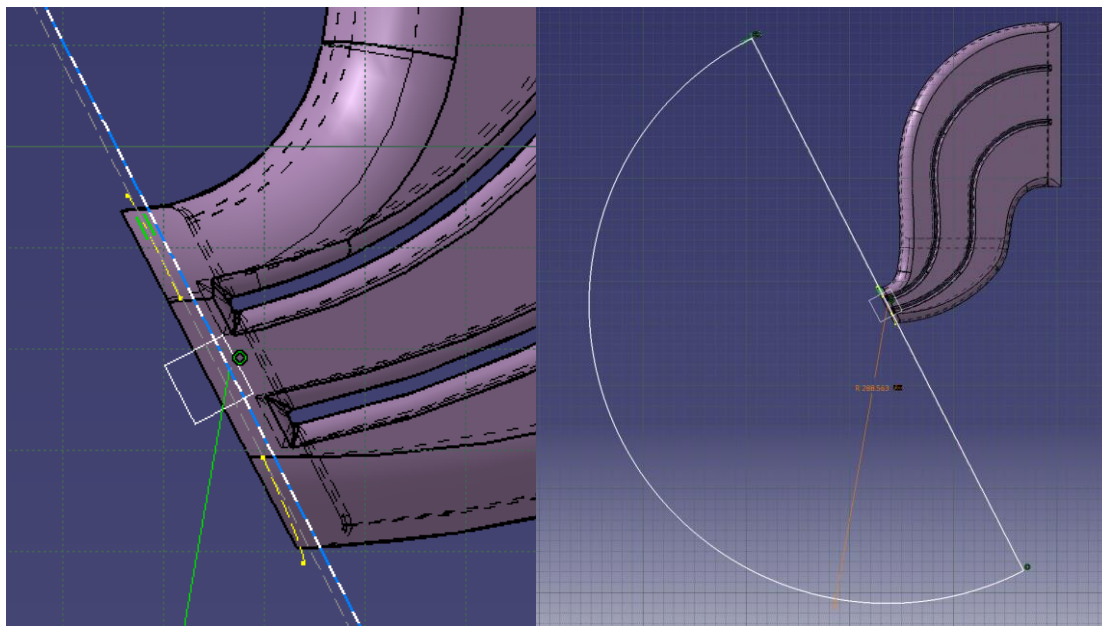
Εικόνα 4-65 α) Εντολή Close Surface, δημιουργία όγκου ρευστού κορμού, β) Εντολή Intersect, αποτέλεσμα τομής.



Εικόνα 4-66 Εντολή Remove, αποτέλεσμα αφαίρεσης τομής από τον ενιαίο όγκο του κύριου κορμού.

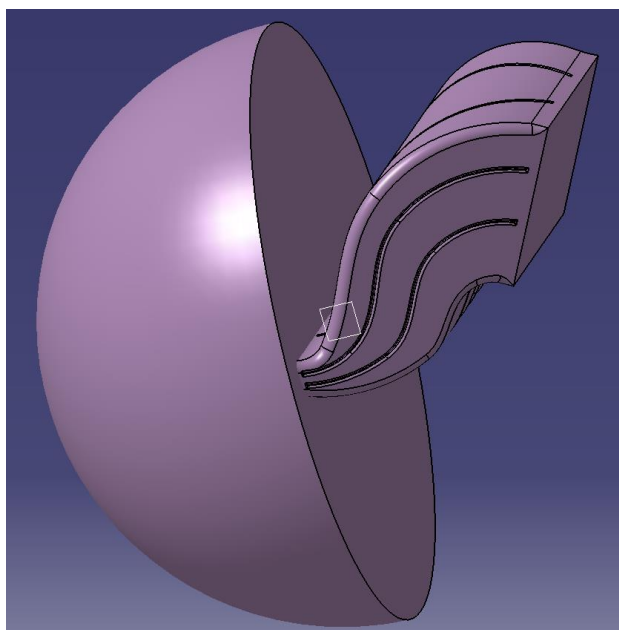
Έχοντας κατασκευάσει την γεωμετρία κορμού σειρά έχει η κατασκευή του χωρίου ροής έμπροσθεν της εισαγωγής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το χωρίο ροής περιγράφεται από ένα ημισφαίριο. Για την δημιουργία του ορίζεται επίπεδο σχεδίασης στο μέσον των δύο στομιών της εισαγωγής, επί του οποίου δημιουργείται «Sketch» και εντός αυτού δημιουργείται τόξο, η διάμετρος του οποίου ορίζεται με την μεταβλητή “air_mass_radius”. Η εν λόγω μεταβλητή εξαρτάται από την μέτρηση της μέγιστης απόστασης των στομιών εισαγωγής του αέρα πολλαπλασιασμένη με αδιάστατο συντελεστή, ώστε να αυξομειώνεται η τιμή ανάλογα με το μέγεθος της εισαγωγής και της επιθυμίας του όγκου. Ακόμα σχεδιάζεται ευθύγραμμο τμήμα παράλληλο ως προς την επιφάνεια εισαγωγής, ενώ το κέντρο του τόξου ταυτίζεται με το ευθύγραμμο τμήμα, το οποίο συνδέεται με τα σημεία του τόξου,

δημιουργώντας ένα ημικύκλιο (Εικόνα 4-67). Σημειώνεται ότι υπάρχει αλληλοεπικάλυψη με τον όγκο του κύριου κορμού εισαγωγής.



Εικόνα 4-67 Sketch, δημιουργία ημικύκλιου παραγωγής όγκου ρευστού στην εισαγωγή.

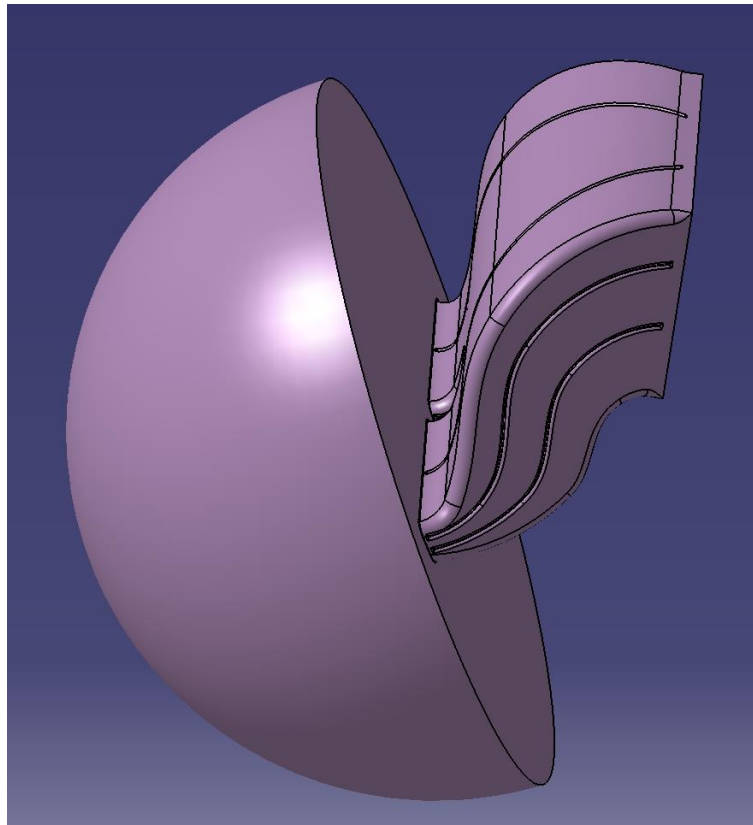
Στην συνέχεια με την εντολή «Revolve» δημιουργείται το ημισφαίριο (Εικόνα 4-68). Έπειτα, για την περιγραφή της γεωμετρίας των φιλέτων επί της εισαγωγής γίνεται η αφαίρεση της γεωμετρίας του πραγματικού μοντέλου από το ημισφαίριο με την εντολή «Remove» (Εικόνα 4-69). Ακόμα, οι δύο όγκοι συνενώνονται με την εντολή “Add” και τέλος τέμνονται με την εντολή «Split» με την βοήθεια ενός επιπέδου το οποίο ορίζεται επί του επιπέδου του ημισφαιρίου, δημιουργώντας δύο ξεχωριστούς όγκους γεωμετρίας (Εικόνα 4-70). Ο λόγος διαχωρισμού των όγκων είναι η δυνατότητα διαφορετικής διακριτοποίησης των όγκων με μεγαλύτερο έλεγχο για τον περιορισμό των μη ωφέλιμων μικρού μεγέθους στοιχείων και επομένως μείωσης των απαιτούμενων υπολογιστικών πόρων.



Εικόνα 4-68 Εντολή revolve, δημιουργία ημισφαιρίου.



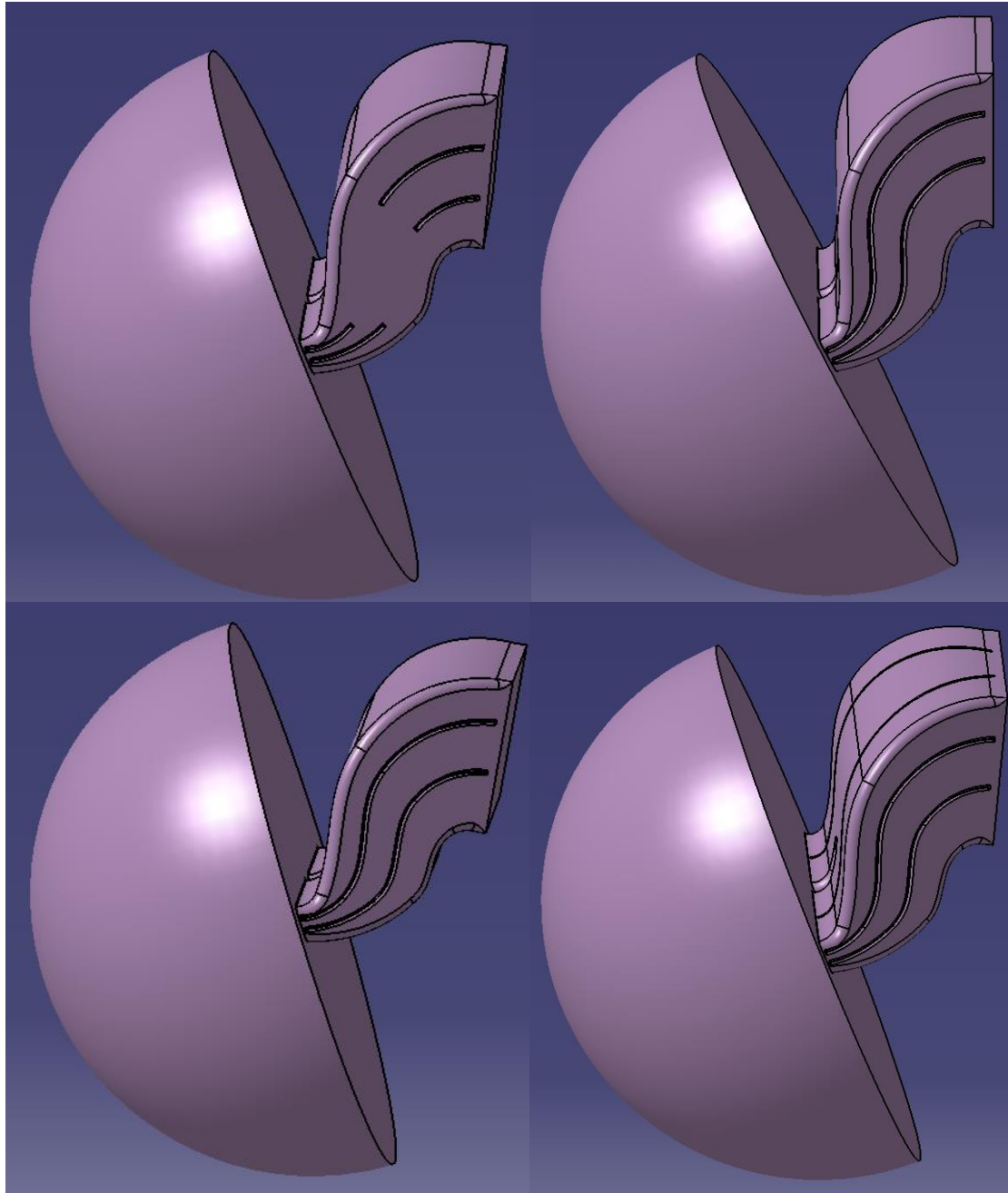
Εικόνα 4-69 Εντολή Remove, αφαίρεση φιλέτων από τον όγκο του ημισφαιρίου.



Εικόνα 4-70 Αποτέλεσμα όγκων πεδίου ροής Μοντέλου Scoop S Duct.

Παραγωγή Όγκου Χωρίου Ροής Μοντέλων

Δεδομένου του πλήθους των διαφοροποιημένων μοντέλων προκύπτουν και τα αντίστοιχα χωρία ροής, σύμφωνα με τις αντίστοιχες γεωμετρίες, όπως παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 4-71).

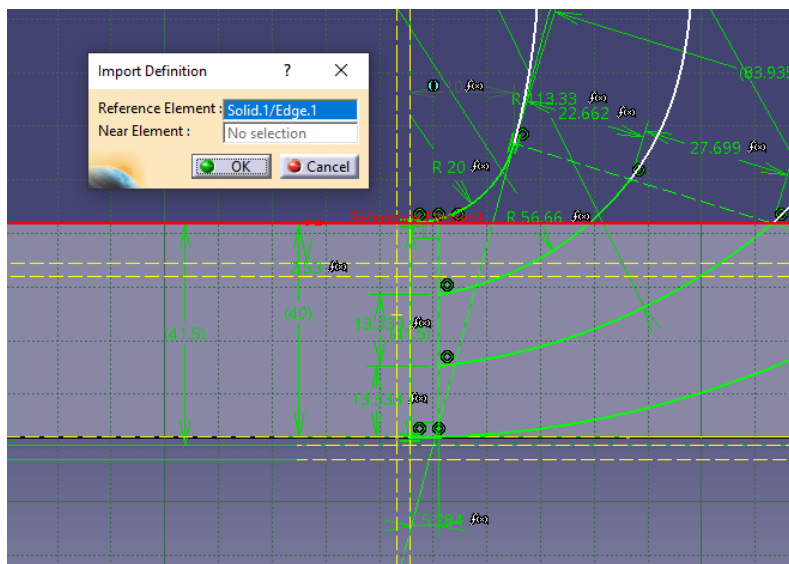


Εικόνα 4-71 Παραγωγή Όγκου Χωρίου Ροής Μοντέλου α) (πάνω-αριστερά) “A-1 Scoop S Duct”, β) (πάνω-δεξιά) “A-2 Scoop S Duct”, γ) (κάτω-αριστερά) “A-3 Scoop S Duct”, δ) (κάτω-δεξιά) “A-4 Scoop S Duct”.

4.5.2 Σχεδιασμός Εισαγωγής Μοντέλων “B NACA - S Duct”

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, στην παρούσα εργασία πέραν της γεωμετρίας εισαγωγής τύπου scoop, εξετάζεται και μία επιπλέον εναλλακτική, η οποία αντί της προηγούμενης φιλοσοφίας συλλογής του αέρα απευθείας με τη μέθοδο της διάταξης Scoop κάτω από το όχημα, διατηρεί την γεωμετρία του αγωγού τύπου «S», η οποία χωροθετείται εντός των ορίων του αυτοκινήτου, ενώ για την συλλογή του αέρα από τον περιβάλλον χρησιμοποιούνται αεραγωγοί τύπου NACA (Flush inlet). Μελετώνται δύο περιπτώσεις εμφωλευμένου αγωγού με αποκλίνοντα και καμπυλωμένα τοιχώματα, οι οποίες διαφέρουν ως προς τις διαστάσεις τους, ενώ στη δεύτερη περίπτωση προστίθεται χείλος πρόσπτωσης στην είσοδο του αγωγού.

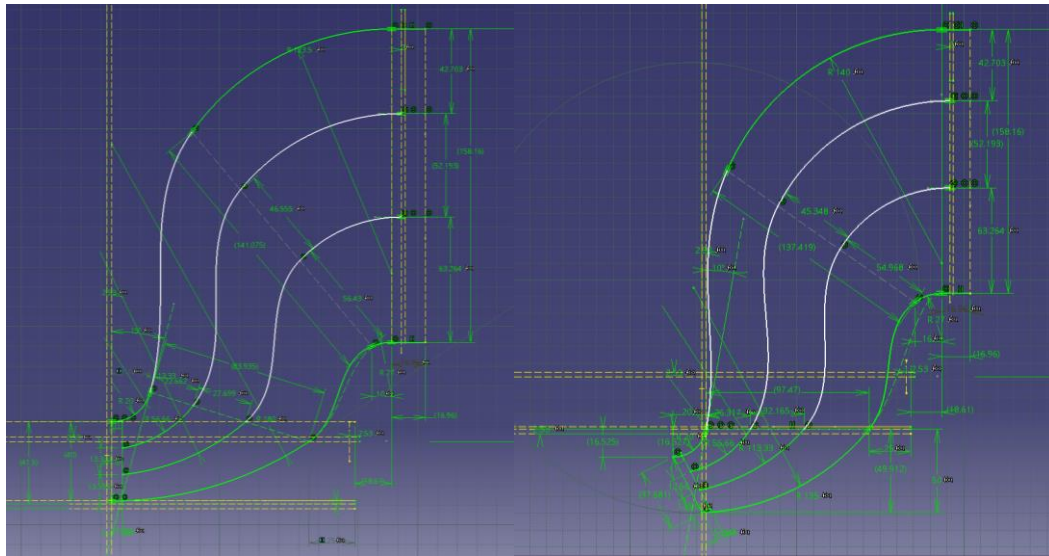
Αρχικά, με βάση τον προηγούμενο σχεδιασμό, γίνονται τροποποιήσεις ώστε να μεταφερθεί ο αεραγωγός τύπου «S» εντός του οχήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την μεταβολή του αρχικού «Sketch» ως ακολούθως. Εντός του «Sketch» δημιουργείται νέα προβολή του άνω άκρου της κεκλιμένης δοκού του σκελετού, που έχει πλάτος 40 mm, η οποία αποτελεί ορόσημο για τον περιορισμό καθ' ύψος του χώρου σχεδίασης των αεραγωγών NACA (Εικόνα 4-72). Η καμπύλη του άνω τμήματος του αεραγωγού μεταφέρεται επί της προβολής με τον περιορισμό «Tangency», διατηρώντας τους λοιπούς περιορισμούς της προηγούμενης σχεδίασης, μετατοπίζοντας την καμπύλη μόνο ως προς το ύψος (άξονας z). Κατά τον τρόπο αυτό ο αεραγωγός δεν παραβιάζει τις χωρικές διατάξεις, οι οποίες έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο και μένει εκτός του χώρου έδρασης των ηλεκτρονικών στοιχείων του οχήματος. Έπειτα, η κάτω καμπύλη μεταφέρεται ομοίως στην εσωτερική επιφάνεια του δαπέδου του αμαξώματος, με τον περιορισμό «Tangency» ως προς αυτό. Τα λοιπά στοιχεία, δεδομένου ότι σχετίζονται με τις καμπύλες του περιβλήματος, όπως αναλυτικά περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ακολουθούν τις εν λόγω μεταβολές αβίαστα.



Εικόνα 4-72 Εντολή Project 3D Element, προβολή άνω ακμής κεκλιμένης δοκού σκελετού.

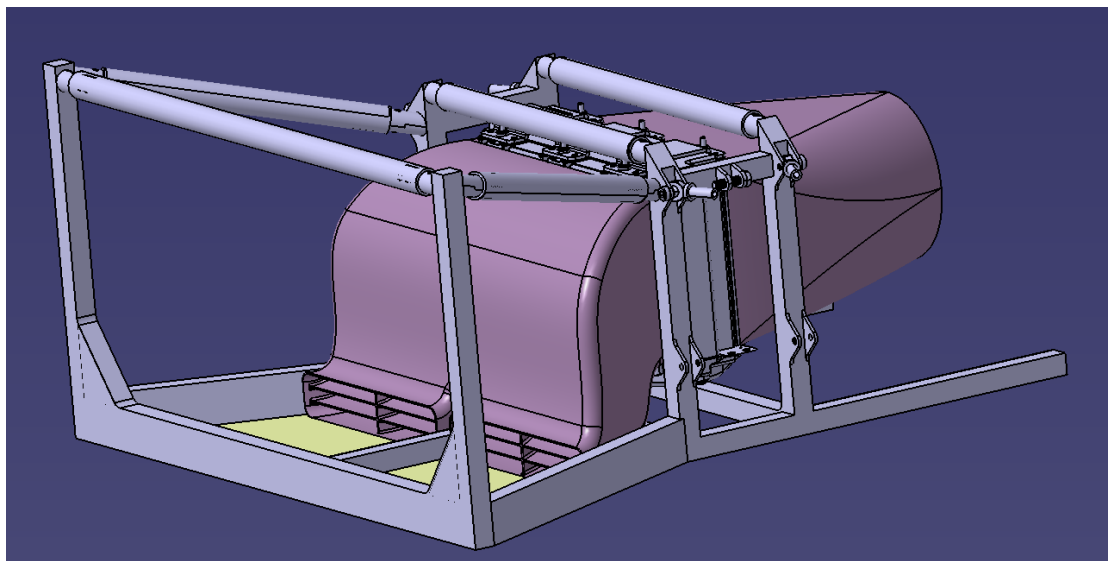
Ο αγωγός περιορίζεται καθ' ύψος στο πάχος της δοκού του σκελετού, καθώς οι ηλεκτρονικές διατάξεις εδράζονται επί αυτών, ενώ η διαθεσιμότητα για την ανάπτυξη του μήκους αγωγού παραμένει ίδια, σύμφωνα με τον καταλαμβανόμενο χώρο και τη χωροθέτηση που έχει αναλυθεί προηγουμένως. Τα παραπάνω αφορούν στα μέγιστα όρια. Σημειώνεται ότι οι δύο εφαρμογές εμφωλευμένων αεραγωγών διαφέρουν ως προς τις αναλογίες και την σύνδεση με τον αγωγό “S”, ως εκ τούτου στο σημείο αυτό περιγράφεται η φιλοσοφία τροποποίησης

της εισαγωγής από Scoop σε απλό αγωγό "S", για τη συσχέτιση αυτού με τους αεραγωγούς NACA. Επιπλέον τροποποίηση πραγματοποιείται στα πτερύγια, όπου στα κάθετα πτερύγια επιτρέπεται η ανάπτυξη των μητρικών καμπυλών έως το άκρο του αγωγού, για την απόλυτη απομόνωση των επιμέρους καναλιών ροής, ενώ τα οριζόντια πτερύγια περιορίζονται ελαφρώς ως προς την ανάπτυξή τους προς την εισαγωγή του αγωγού, ώστε να μην προκύπτουν προβλήματα σύνδεσης με τους αεραγωγούς. Επιπλέον διαφορά αποτελεί η αλλαγή της τιμής των φιλέτων στην είσοδο των καναλιών ροής, καθώς απαιτείται η συμβατότητα μεταξύ αγωγού-αεραγωγού NACA. Έτσι, τα φιλέτα στις άνω ακμές των καναλιών λαμβάνουν την μεταβλητή "fillet_radius_airways" ενώ οι κάτω ακμές λαμβάνουν μηδενική τιμή μέσα από την εφαρμογή της αντίστοιχης εντολής μεταβαλλόμενου φιλέτου. Τα παραπάνω υφίστανται, όπως έχει αναλυθεί, ως δυνατότητες στο πρωτότυπο μητρικό μοντέλο.



Εικόνα 4-73 Εντολή Sketch, α) τελικό σχέδιο μετά των μετατροπών αγωγού "S", β) σχεδιασμός αεραγωγού Scoop.

Οι παραπάνω τροποποιήσεις οδηγούν σε μία συνολική μετατόπιση του τριδιάστατου μοντέλου εισαγωγής εντός του χώρου του αυτοκινήτου (Εικόνες 4-73, 4-74).



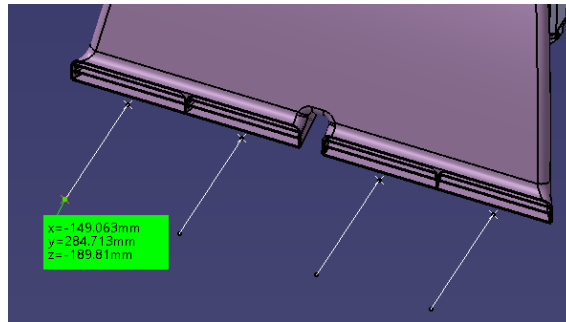
Εικόνα 4-74 Μετατροπή αγωγού "S" και μεταφορά εντός ορίων οχήματος (μέγιστες διαστάσεις ανάπτυξης).

Έχοντας ολοκληρώσει την τροποποίηση του αγωγού, απαιτείται ο σχεδιασμός των εισαγωγών αέρα, καθώς και η σύνδεσή τους με την υφιστάμενη διάταξη. Ως εισαγωγή επιλέγεται η κατηγορία εμφωλευμένων αεραγωγών με καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση απαιτούνται τέσσερις εισαγωγές, δύο για κάθε ακροφύσιο του αεραγωγού «S». Ο χώρος που διατίθεται για τον σχεδιασμό τους περιορίζεται από το πλάτος των κεκλιμένων πλάγιων δοκών του σκελετού, ενώ το μήκος τους δεν μπορεί να υπερβαίνει την απόσταση μεταξύ του υφιστάμενου αγωγού “S” και της δοκού επί της οποίας τέμνονται οι πλευρικοί δοκοί.

Ως αρχή ακολουθούνται ιεραρχικά προτεινόμενοι κανόνες σχεδίασης, όπως προκύπτουν από τη βιβλιογραφία (Κεφάλαιο 3.2). Καταρχάς, επιθυμείται η μέγιστη δυνατή ανάπτυξη του μήκους αγωγού (όπως και στην προηγούμενη κατηγορία αεραγωγών), για τον “βέλτιστο” δυνατό λόγο μήκους-πλάτους του αγωγού, ενώ ακολουθεί η διατήρηση μίας αξιόλογης αναλογίας του λόγου πλάτους-βάθους των αεραγωγών NACA, ο οποίος επιφέρει αριθμό πλεονεκτημάτων. Ακολουθώντας, δεδομένου του περιορισμού μήκους που υφίσταται λόγω του σκελετού του αυτοκινήτου (ο οποίος δεν επιτρέπει την ανάπτυξη του επιθυμητού μήκους, το οποίο αναλογεί στον λόγο πλάτους-βάθους), ο σχεδιασμός οδηγείται σε μία μεγάλη τιμή της γωνίας κλίσης της καμπύλης ράμπας άνω του επιθυμητού. Το βάθος των ακροφυσίων του αγωγού ακολουθεί τον λόγο πλάτους-βάθους του εμφωλευμένου αεραγωγού, ενώ το πλάτος τους αναπτύσσεται στο μέγιστο δυνατόν. Σημειώνεται ότι ως περιοχή συλλογής αέρα των αεραγωγών NACA λογίζεται η επιφάνεια η οποία εφάπτεται με το δάπεδο αυτοκινήτου. Ως εκ τούτου, γίνεται προσπάθεια δημιουργίας μέγιστης επιφάνειας εισαγωγής του αεραγωγού και κατ’ επέκταση του συνόλου των αεραγωγών (καθώς πρόκειται για ταυτόσημους αεραγωγούς), ώστε το άθροισμά τους να αντιστοιχεί στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης καυσίμου. Το παραπάνω αποδεικνύεται αδύνατον με τους περιορισμούς που υφίστανται, καθώς όπως αναλύθηκε η επιφάνεια εισαγωγής των αεραγωγών προκύπτει από το μήκος, το πλάτος, ενώ την συνδιαμορφώνει και η καμπυλότητα των τοιχωμάτων της ράμπας. Σε κάθε περίπτωση, η παράμετρος συνυπολογίζεται κατά την σχεδίαση, επιτυγχάνοντας τη μέγιστη δυνατή επιφάνεια ανά αεραγωγό. Με το παραπάνω σκεπτικό, η σχεδίαση των αεραγωγών ακολουθεί τον διαθέσιμο χώρο με στενούς περιορισμούς, ενώ ακολούθως περιγράφονται τα δύο μοντέλα.

Λόγω του ότι κατασκευάζονται δύο περιπτώσεις εισαγωγής, παρουσιάζεται η πιο σύνθετη περίπτωση με το χείλος πρόσπτωσης, καθώς δεν διαφέρει ο τρόπος σχεδίασης. Και στις δύο περιπτώσεις ο αεραγωγός εδράζεται στο κάτω μέρος του δαπέδου του αυτοκινήτου. Στην περίπτωση του αεραγωγού με χείλος πρόσπτωσης, δεδομένου ότι αυτό εμπεριέχεται στον αεραγωγό, υπολογίζεται και σχεδιάζεται μεγαλύτερη ράμπα, ενώ η εισαγωγή του αγωγού μετατοπίζεται ψηλότερα, καθώς το ύψος εξαγωγής του αεραγωγού υπολογίζεται επί του χείλους με το άνω σημείο ράμπας (Κεφ. 3.2.1).

Έπειτα από τον υπολογισμό των καμπυλών, οι οποίες θα αποτελέσουν τη βάση σχεδίασης των αεραγωγών, αυτές καλούνται να εισαχθούν στο λογισμικό CATIA. Για να εισαχθούν οι καμπύλες χρησιμοποιήθηκε το αρχείο EXCEL «GSD_PointSplineLoftFromExcel», το οποίο βρίσκεται στο φάκελο εγκατάστασης του CATIA (Εικόνα 4-76). Το αρχείο αυτό δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής συντεταγμένων μέσω μακροεντολών, με βάση το σημείο αναφοράς x,y,z,-0,0,0. Δεδομένου ότι το σημείο αναφοράς δεν συμπίπτει με την επιθυμητή θέση στο αρχείο CATIA της συνολικής διάταξης, εντοπίστηκε το επιθυμητό σημείο αναφοράς (και οι συντεταγμένες αυτού), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον μετασχηματισμό των εισαγόμενων συντεταγμένων έτσι ώστε το σημείο εισαγωγής να είναι το επιθυμητό (Εικόνα 4-75, 4-77).



Εικόνα 4-75 Προσδιορισμός σημείου αναφοράς για εισαγωγή συντεταγμένων, ευθύγραμμα τμήματα αναφοράς αεραγωγών.

	A	B	C	D
1	StartLoft			
2	StartCurve			
3	0	-90	10	
4	0	-30	60	
5	0	50	60	
6	0	110	20	
7	EndCurve			
8	StartCurve			
9	50	-60	0	
10	50	-10	40	
11	50	50	40	
12	50	70	0	
13	EndCurve			
14	StartCurve			
15	100	-100	-10	
16	100	-40	35	
17	100	0	50	
18	100	75	40	
19	100	140	0	
20	EndCurve			
21	EndLoft			
22	End			
23				

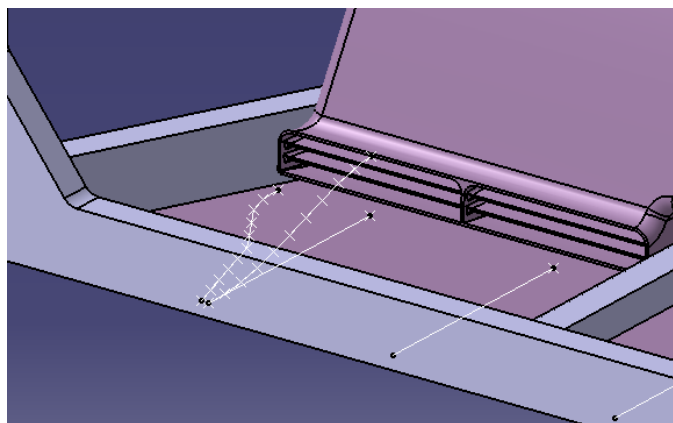
Εικόνα 4-76 Excel αρχείο μακροεντολών εισαγωγής συντεταγμένων και δημιουργίας καμπυλών και επιφανειών.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	OriginPoint										
2	-87.729	284.713	-189.81	X,Y,Z_TRANSFORMATION						width of duct from centerline front (units)	
3	StartLoft									EXCEL_DIAGRAMM_DUCT_PROFIL	
4	StartCurve								x	y	z
5	-96.994	284.713	-189.810						0.00	9.285	0
6	-105.461	299.641	-189.810						14.93	17.732	0
7	-113.929	314.569	-189.810						29.86	26.200	0
8	-122.397	329.498	-189.810						44.78	34.668	0
9	-130.865	344.426	-189.810						59.71	43.136	0
10	-139.317	359.354	-189.810						74.64	51.588	0
11	-155.600	374.282	-189.810						89.57	67.951	0
12	-172.291	389.210	-189.810						104.50	84.552	0
13	-188.881	404.139	-189.810						119.43	101.152	0
14	-197.735	419.067	-189.810						134.35	110.006	0
15	-198.399	433.995	-189.810						149.28	110.670	0
16	EndCurve										
17											
18											
19										length of Optimal duct from Depth of front (units)	Duct
20	StartCurve								x	y	z
21	-87.729	284.713	-189.810						0.00	0.000	0
22	-87.729	299.641	-189.497						14.93	-0.313	0
23	-87.729	314.569	-187.355						29.86	-2.455	0
24	-87.729	329.498	-183.738						44.78	-5.072	0
25	-87.729	344.426	-178.991						59.71	-10.819	0
26	-87.729	359.354	-173.465						74.64	-16.345	0
27	-87.729	374.282	-167.546						89.57	-22.264	0
28	-87.729	389.210	-161.669						104.50	-28.141	0
29	-87.729	404.139	-156.337						119.43	-33.473	0
30	-87.729	419.067	-152.149						134.35	-37.661	0
31	-87.729	433.995	-149.807						149.28	-40.003	0
32	EndCurve										
33	EndLoft										
34	End										

Εικόνα 4-77 Excel αρχείο μακροεντολών, όπως τροποποιήθηκε για τον μετασχηματισμό των συντεταγμένων με βάση το επιθυμητό σημείο αναφοράς για την εισαγωγή καμπυλών NACA.

Κατά την διαδικασία δίνεται η δυνατότητα πέραν της απλής εισαγωγής των σημείων, η δημιουργία καμπυλών και επιφανειών στο CATIA. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε

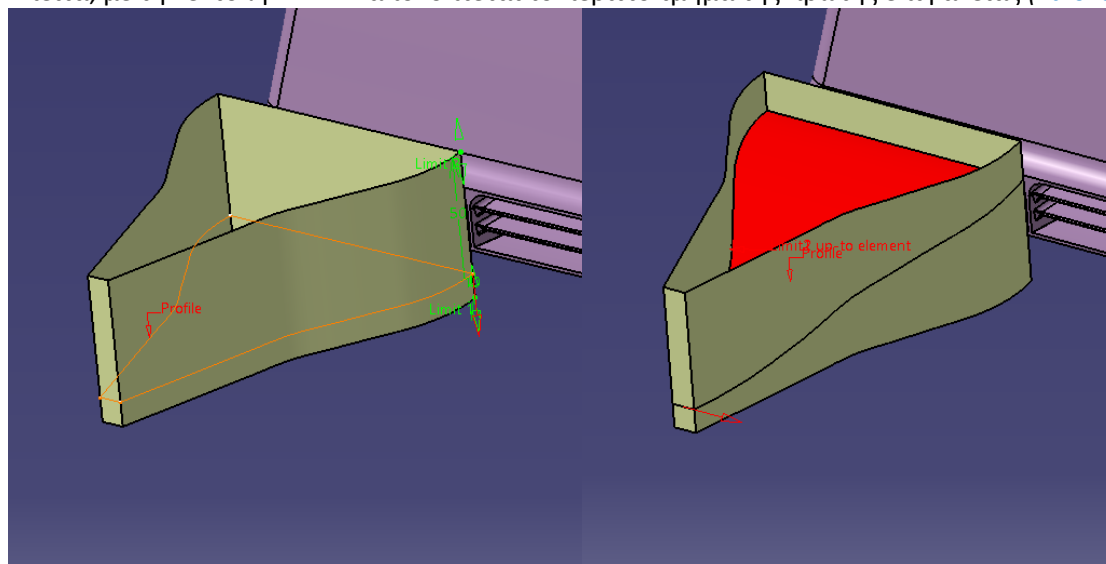
μόνον η δημιουργία καμπυλών και ολοκληρώθηκε η εισαγωγή (Εικόνα 4-78). Στην συνέχεια ορίστηκε νέο επίπεδο με την εντολή «Normal to curve», ως καμπύλη επιλέχθηκε αυτή της κάτω επιφάνειας του δαπέδου του οχήματος (παράλληλη ως προς το στόμιο) και ως σημείο το σημείο αναφοράς, το οποίο εντοπίστηκε σε προηγούμενο στάδιο. Έπειτα χρησιμοποιήθηκε η αρχική καμπύλη τοιχώματος ράμπας που εισήχθη με την εντολή «Symmetry».



Εικόνα 4-78 Αποτέλεσμα εισαγωγής σημείων και δημιουργίας καμπυλών αρχείου μακροεντολών excel.

Στην συνέχεια δημιουργείται ένα κλειστό προφίλ, με την βοήθεια της εντολής «Join» και την σχεδίαση ευθύγραμμων τμημάτων στις άκρες των καμπυλών, το οποίο αξιοποιείται με την εντολή «Extrude» για τη δημιουργία επιφάνειας κατά τον άξονα z με μεγάλη θετική τιμή, ενώ κατά την αρνητική φορά δίνεται τιμή η οποία αποσκοπεί σε δεύτερο χρόνο στην δημιουργία interface των όγκων ρευστού, όπως απαιτείται για την προσομοίωση (Εικόνα 4-79α). Με την εντολή «Extrude» χρησιμοποιείται η δεύτερη καμπύλη για την δημιουργία του δαπέδου της ράμπας, με διεύθυνση κατά τον άξονα x, ενώ ως όρια προς τις δύο κατευθύνσεις ορίζεται η επιφάνεια που δημιουργήθηκε με το κλειστό προφίλ προσομοίωση (Εικόνα 5-79β).

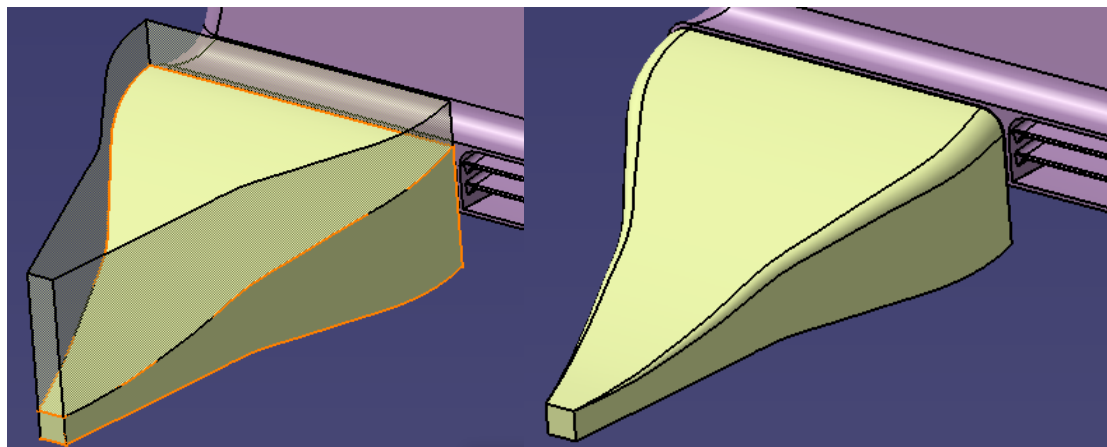
Έπειτα, με την εντολή «Trim» αποκόπτεται το περιττό τμήμα της πρώτης επιφάνειας (Εικόνα



Εικόνα 4-79 Εντολή Extrude, δημιουργία α) πλευρικών επιφανειών β) επιφάνεια ράμπας αεραγωγού.

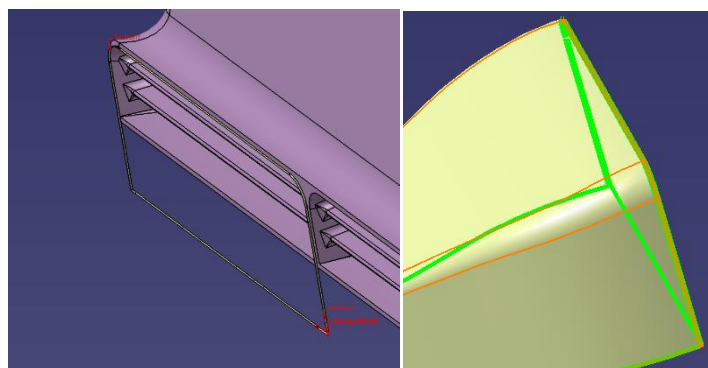
4-80α), ενώ εφαρμόζεται μετά η εντολή «Variable Fillet», για την εφαρμογή ακτίνας καμπυλότητας επί των άνω ακμών του αεραγωγού (Εικόνα 4-80β), η τιμή του οποίου πλησίον του αγωγού λαμβάνει την μεταβλητή “fillet_radius_airways”, ώστε να υπάρχει συμβατότητα

με τις απολήξεις του αγωγού, όπου υφίστανται όμοιες εξομαλύνσεις. Στα κάτω άκρα των καμπυλών λαμβάνει μηδενική τιμή, η εφαρμογή των φιλέτων είναι εφαπτομενική και η μετάβαση των τιμών κατά μήκος των καμπυλών γραμμική.



Εικόνα 4-80 Εντολή α) Trim, β) Variable fillet.

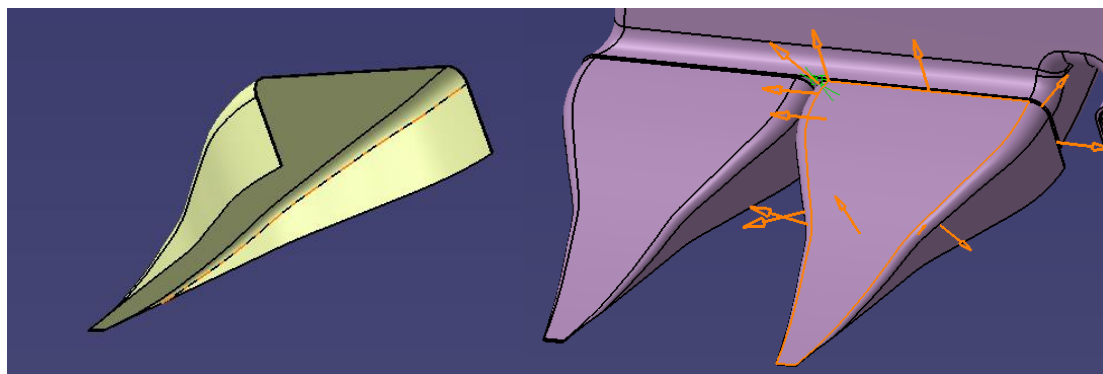
Στην συνέχεια εξάγονται από το στερεό του αγωγού και την επιφάνεια του αεραγωγού οι διατομές για τις οποίες απαιτείται να δημιουργηθεί μία “φλάντζα” σύνδεσης των μοντέλων αγωγού-αεραγωγού με την εντολή «Multiple Extract». Στην συνέχεια, με την εντολή «Multi Section» δημιουργείται με βάση τις διατομές η βοηθητική διάταξη (επιφάνεια) στεγανοποίησης των δύο τμημάτων (Εικόνα 4-81α), η οποία στη συνέχεια με την εντολή «Join» ενοποιείται με τον αεραγωγό (Εικόνα 4-81β).



Εικόνα 4-81 α) Εντολή Multisection, δημιουργία συνδέσμου αγωγού-αεραγωγού, β) Εντολή Join, ενοποίηση συνδέσμου αεραγωγού.

Μετά με την εντολή «Split» γίνεται η διάνοιξη της επιφάνειας εξαγωγής του αεραγωγού και δημιουργία νέας επιφάνειας με την εντολή «Fill» στο σημείο εξαγωγής του συνδέσμου, ώστε με την εντολή «Join» να δημιουργηθεί μοντέλο επιφάνειας για να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία του όγκου ρευστού. Στην συνέχεια, με την εντολή «Split» παραμένει η επιφάνεια του αεραγωγού από την κάτω επιφάνεια του δαπέδου και πάνω, ενώ η περίσσεια αφαιρείται. Το τμήμα που απαλείφεται είχε δημιουργηθεί για την σωστή περαίωση της εντολής «Variable Fillet». Έχοντας πλέον προετοιμάσει το μοντέλο επιφάνειας αεραγωγού (Εικόνα 4-82α), με την εντολή «Thick Surface» δημιουργείται το μοντέλο όγκου με φορά διανύσματος εξωτερικό ως προς το μοντέλο επιφάνειας, ενώ η τιμή που ορίζεται για τον προσδιορισμό πάχους της κατασκευής είναι συνάρτηση της μεταβλητής “airways_thickness” διαιρεμένη με συντελεστή 2.5, καθώς δεν πρέπει να επιτυγχάνεται αλληλοεπικάλυψη των

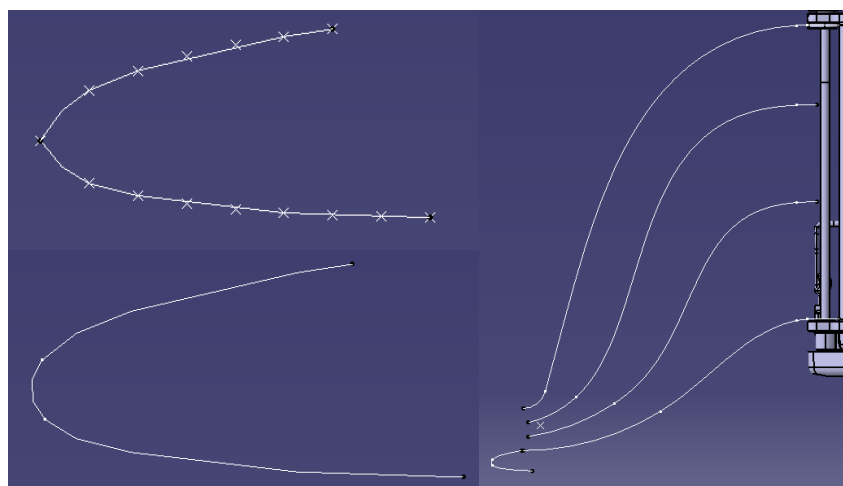
μοντέλων όγκου των αεραγωγών, δεδομένου ότι και τα δύο εδράζονται γειτονικά συνδεόμενα με κοινή πλευρά επί του κάθετου εσωτερικού πτερυγίου. Η εν λόγω



Εικόνα 4-82 α) Μοντέλο επιφάνειας αεραγωγού NACA, β) Εντολή Thick Surface, μοντέλο όγκου ράμπας αεραγωγών.

παρατήρηση διασφαλίζει την ρεαλιστική κατασκευή τους (Εικόνα 4-82β).

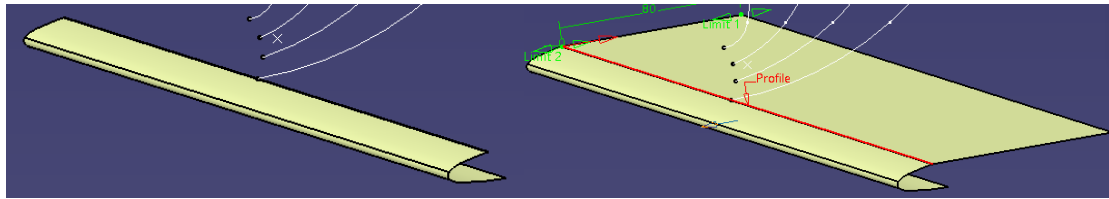
Έπειτα από την δημιουργία της ράμπας αεραγωγού NACA, όσον αφορά στο δεύτερο μοντέλο της περίπτωσης αυτής, δημιουργείται χείλος πρόσπτωσης (αεροτομή), η οποία τοποθετείται εντός της ράμπας, η γεωμετρία του οποίου προκύπτει από την βιβλιογραφία. Μετά τον υπολογισμό των καμπυλών χείλους, οι συντεταγμένες και οι καμπύλες εισάγονται στο CATIA και πάλι με την χρήση του υπολογιστικού φύλλου μακροεντολών (Εικόνα 4-83α), ενώ τροποποιείται το σημείο στο οποίο οι δύο καμπύλες συγκλίνουν με την εντολή «Corner», δημιουργώντας καμπυλότητα στο σημείο αυτό όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς (Εικόνα 4-83β). Στην συνέχεια με την εντολή «Translate» το προφίλ τοποθετείται στην απόφυση του αγωγού (Εικόνα 4-83γ).



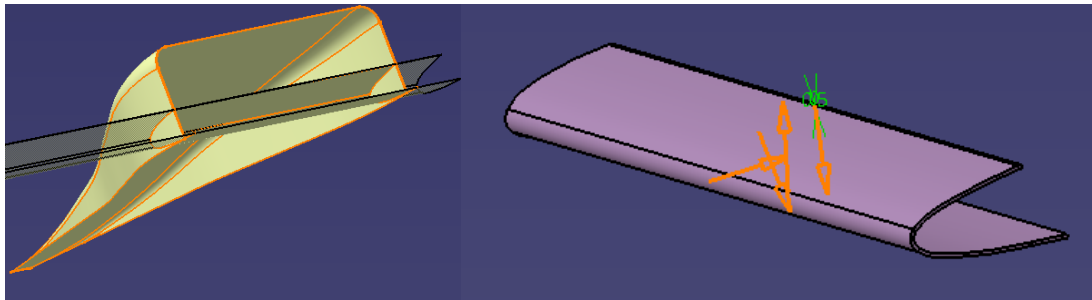
Εικόνα 4-83 α) (πάνω-αριστερά) καμπύλες χείλους πρόσπτωσης, β) (κάτω-αριστερά) δημιουργία φιλέτου στο σημείο σύγκλισης των καμπυλών, γ) τοποθέτηση χείλους επί του αγωγού.

Ακολουθεί η κατασκευή επιφάνειας για το χείλος πρόσπτωσης με την εντολή «Extrude» με θεωρητικές μεγάλες τιμές προς τις δύο κατευθύνσεις και άξονα κατεύθυνσης x (Εικόνα 4-84α). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την δημιουργία βοηθητικής επιφάνειας, η οποία χρησιμοποιείται για τον όγκο του πεδίου ροής, με την ενοποίηση της μαζί με το χείλος (Εικόνα 4-84β). Η επιφάνεια του χείλους με την εντολή «Split» περιορίζεται εντός της γεωμετρίας ράμπας (Εικόνα 4-86α) και έπειτα με την εντολή «Thick Surface» δημιουργείται το μοντέλο

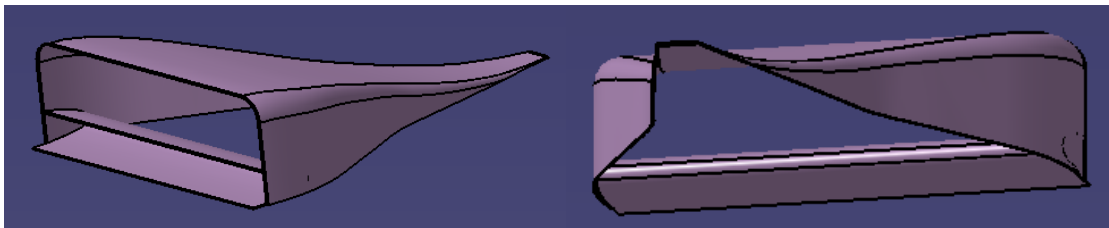
όγκου της με φορά προς το εσωτερικό των καμπυλών (Εικόνα 4-86β). Το μοντέλο όγκου του χείλους και της ράμπας με την εντολή «Add» δημιουργούν το τελικό μοντέλο (Εικόνα 4-85).



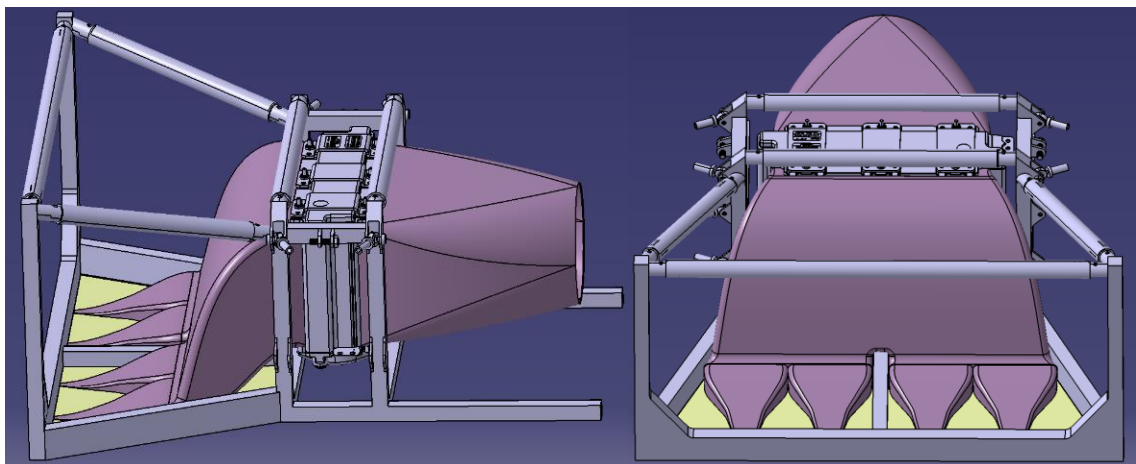
Εικόνα 4-84 Εντολή Extrude, α) δημιουργία αρχικού μοντέλου επιφάνειας χείλους, β) δημιουργία βοηθητικής επιφάνειας.



Εικόνα 4-86 α) Εντολή Split, τελικό μοντέλο επιφάνειας χείλους πρόσπτωσης, β) δημιουργία μοντέλου όγκου χείλους πρόσπτωσης.



Εικόνα 4-85 Τελικό Μοντέλο εμφωλευμένου αεραγωγού με καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα.



Εικόνα 4-87 Αποψη συνολικής διάταξης αεραγωγών NACA- Αγωγού “S”.

Οι λοιποί αεραγωγοί είναι πανομοιότυποι και ως εκ τούτου με την εντολή «Translate» αντιγράφονται στα υπόλοιπα κανάλια του αγωγού, δημιουργώντας συνολικά τέσσερις αεραγωγούς οι οποίοι θα τροφοδοτούν τον αγωγό “S” (Εικόνα 4-87).

Ο τρόπος κατασκευής που περιγράφηκε είναι πανομοιότυπος και για το μοντέλο χωρίς χείλος με τις ανάλογες τροποποιήσεις. Και τα δύο συστήματα τροφοδοτούν τον αγωγό με τέσσερις

αεραγωγούς με καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τις διαστάσεις τους, οδηγώντας τον αγωγό να ακολουθήσει την εξαγωγή τους, ενώ στο δεύτερο σύστημα προστίθεται σε κάθε αεραγωγό ένα χείλος πρόσπτωσης.

Πρώτο Μοντέλο "B-1 NACA S Duct"

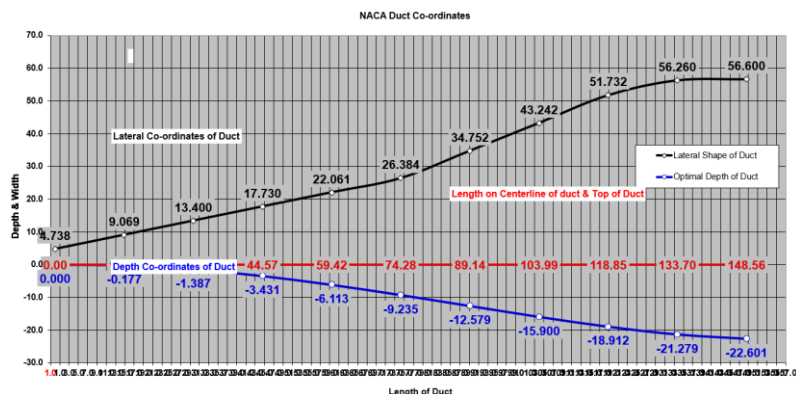
Το πρώτο μοντέλο εισαγωγής "B-1 NACA S Duct" ορίζεται ως εξής. Οι διαστάσεις του αεραγωγού ορίζονται με οριζόντιο μήκος ίσο με 148.56 mm, το οποίο προκύπτει από μία κλίση ράμπας ίση με 8.65°. Το ολικό πλάτος του είναι ίσο με 113.20 mm ενώ το βάθος του 22.6 mm, οδηγώντας σε έναν λόγο πλάτους προς βάθος ίσο με 5 (*Πίνακας 4-2*). Οι συντεταγμένες (*Εικόνα 4-88*), οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τις κύριες διαστάσεις για καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα, δημιουργούν και τις καμπύλες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την σχεδίαση. Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες προφίλ των τοιχωμάτων (κάτοψη) και της ράμπας (όψη) σε σχέση με το μήκος που προκύπτει (*Σχήμα 4-1*). Η μοντελοποίηση των στοιχείων οδηγεί στην κατασκευή του αεραγωγού όπως παρουσιάζεται στην *Εικόνα 4-89*.

Πίνακας 4-2 Κύριες διαστάσεις αεραγωγού πρώτου μοντέλου "B-1 NACA Duct".

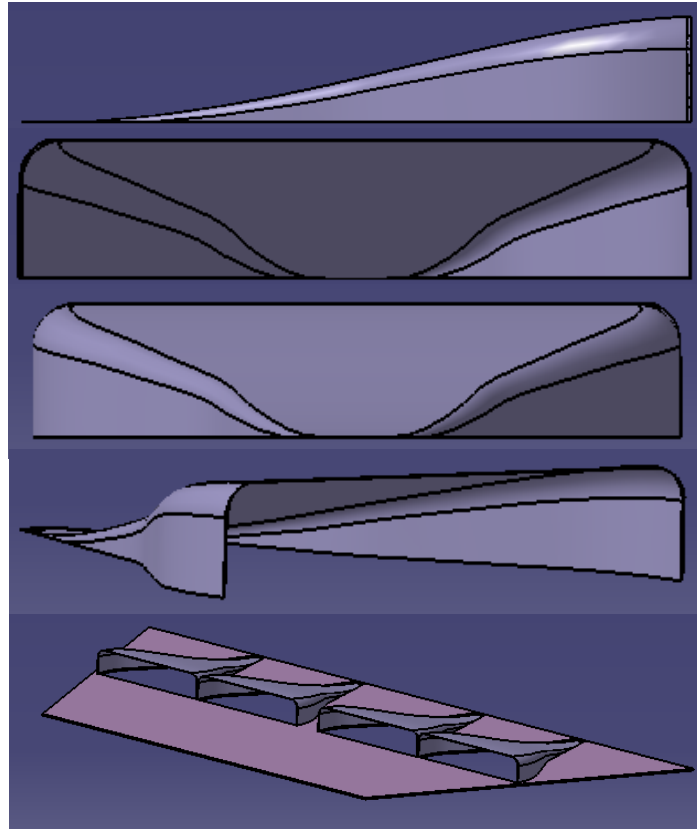
Κύριες διαστάσεις μοντέλου αεραγωγού "B-1 NACA S Duct"	
Ολικό πλάτος	113.20
Βάθος ράμπας	22.60
Ύψος εισόδου αεραγωγού	22.60
Γωνία ράμπας	8.65
Μήκος	148.56

All measurements are mm											
% length of duct from rear	curve fit of optimal floor	duct length from front (non dimensional)	length of duct from front (units)	width of duct from centerline front (units)	Optimal Depth of Duct	base line	Curve fit for curved part	fit for linear			Opposite Curve fit for drawing full duct
100	0.00	0	0.00	4.738	0.000	0.0		0.419	0.419		-4.738
90	0.78	0.1	14.86	9.069	-0.177	0.0		0.801	0.801		-9.069
80	6.14	0.2	29.71	13.400	-1.387	0.0		1.184	1.184		-13.400
70	15.18	0.3	44.57	17.730	-3.431	0.0		1.566	1.566		-17.730
60	27.05	0.4	59.42	22.061	-6.113	0.0		1.949	1.949		-22.061
50	40.66	0.5	74.28	26.384	-9.235	0.0	2.330	2.331	2.331		-26.384
40	55.66	0.6	89.14	34.752	-12.579	0.0	3.070	3.070	3.070		-34.752
30	70.35	0.7	103.99	43.242	-15.900	0.0	3.820	3.820	3.820		-43.242
20	83.68	0.8	118.85	51.732	-18.912	0.0	4.570	4.570	4.570		-51.732
10	94.15	0.9	133.70	56.260	-21.279	0.0	4.970	4.970	4.970		-56.260
0	100.01	1	148.56	56.600	-22.601	0.0	5.000	5.000	5.000		-56.600

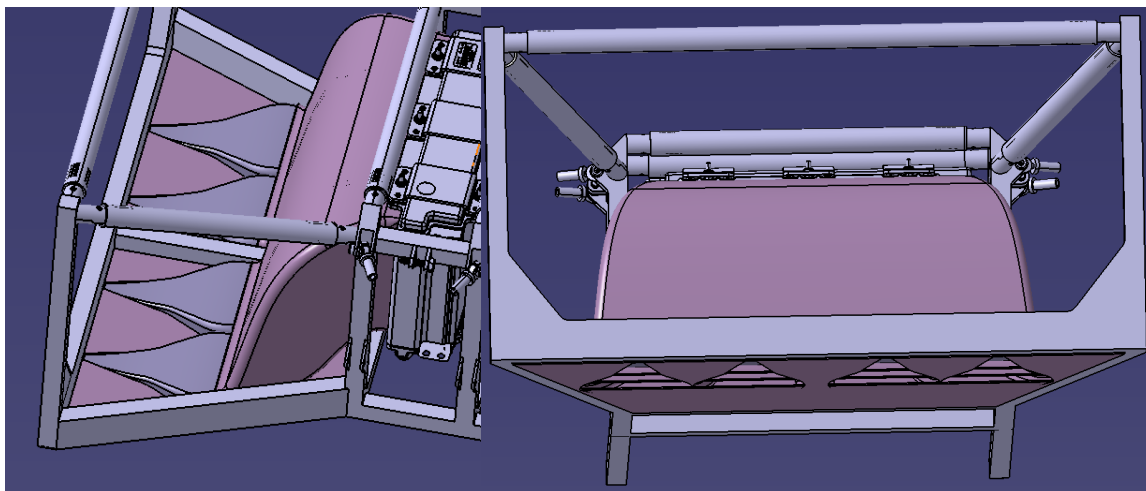
Εικόνα 4-88 Συντεταγμένες καμπυλών αεραγωγού πρώτου μοντέλου "B-1 NACA S Duct"



Σχήμα 4-1 Καμπύλες αεραγωγού πρώτου μοντέλου "B-1 NACA S Duct" (μαύρο: καμπύλη τοιχωμάτων, κόκκινο: καμπύλη αναπτύγματος μήκους, μπλε: καμπύλη ράμπας).

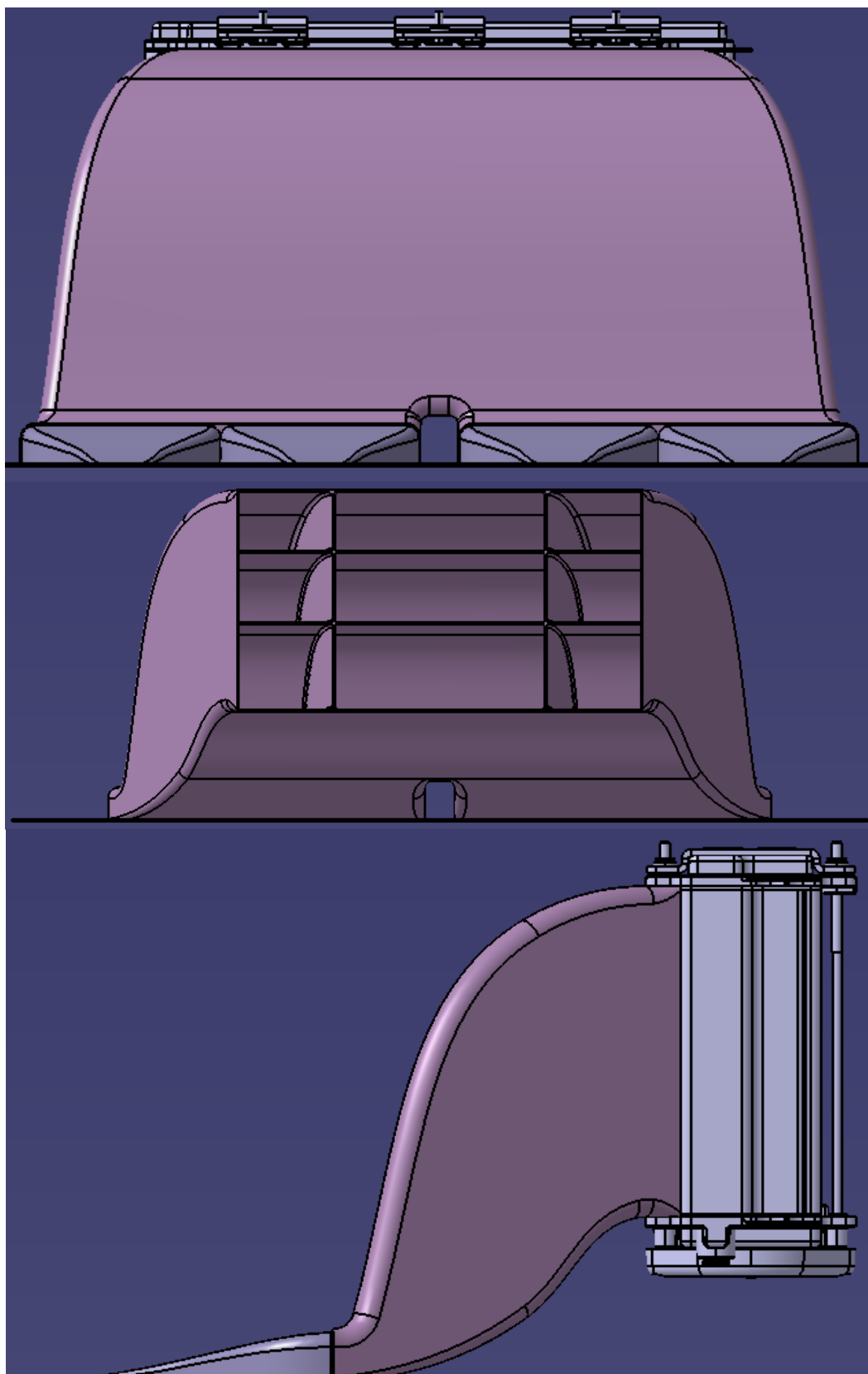


Εικόνα 4-89 Αεραγωγός πρώτου μοντέλου "B-1 NACA S Duct", (από επάνω): πλάγια όψη, εμπρόσθια, οπίσθια, 3/4, σειρά αεραγωγών.



Εικόνα 4-90 Πρώτο μοντέλο "B-1 NACA S Duct".

Στο μοντέλο αυτό ο αγωγός "S" εφάπτεται με το δάπεδο του αυτοκινήτου ([Εικόνα 4-91γ](#)), καθώς στο βάθος του αεραγωγού δεν παρεμβάλλεται χείλος πρόσπτωσης και επομένως ταυτίζεται το βάθος της ράμπας με το ύψος εισαγωγής αεραγωγού, ενώ η διατομή εισαγωγής του αγωγού ακολουθεί τις διαστάσεις διατομής εξόδου του αεραγωγού. Ακόμα, οι θέσεις των εσωτερικών οριζόντιων πτερυγίων παραμένουν σταθερές, ενώ των κάθετων πτερυγίων τροποποιούνται, λαμβάνοντας συντελεστή μήκους 0.25, οδηγώντας σε στένωση των πλάγιων καναλιών ροής ([Εικόνα 4-91β](#)). Η τελική διάταξη παρουσιάζεται παραπάνω ([Εικόνα 4-90](#)).



Εικόνα 4-91 Πρώτο μοντέλο "B-1 S Duct", α) πρόσθια όψη, β) οπίσθια, γ) πλάγια.

Ο λόγος των διατομών εισαγωγής αέρα στο σύστημα (τέσσερις επιφάνειες πρόσληψης αεραγωγών) προς την επιφάνεια εξαγωγής του αγωγού (επιφάνεια κυψέλης) που προκύπτει είναι ίσος με 0.783.

Δεύτερο Μοντέλο “B-2 NACA S Duct”

Το δεύτερο μοντέλο “B-2 NACA S Duct” διαφέρει από το πρώτο, καθώς γίνεται προσθήκη χείλους πρόσπτωσης για τον έλεγχο της ροής. Η ενσωμάτωση του χείλους εντός του αεραγωγού προϋποθέτει την διαφοροποίησή του ως προς το βάθος. Για να επιτευχθεί η τροποποίηση, δεδομένης της διάστασης του χείλους η οποία είναι ανάλογη με το επιθυμητό ύψος εισαγωγής, η σχεδίαση της ράμπας οδηγείται σε μία μεγάλη αύξηση της τιμής γωνίας ράμπας για την διατήρηση του μέγιστου επιτρεπόμενου μήκους της. Το ολικό πλάτος παραμένει σταθερό, δηλαδή το μέγιστο επιτρεπτό αφενός του αγωγού, αφετέρου και της ράμπας, ενώ επιτυγχάνεται ομοίως με το προηγούμενο μοντέλο λόγος πλάτους προς βάθος ίσος με 5. Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση προσθήκης του χείλους, το ύψος εισαγωγής υπολογίζεται σε ποσοστό 75% της καμπύλης χείλους κάθετα προς το δάπεδο της ράμπας (Κεφ. 3.2.1). Συγκεκριμένα, το δεύτερο μοντέλο αεραγωγού ορίζεται ως ακολούθως. Οι διαστάσεις του αεραγωγού ορίζονται με οριζόντιο μήκος ίσο με 148.52 mm, το οποίο προκύπτει από μία κλίση ράμπας ίση με 12.7°. Το ολικό πλάτος του είναι ίσο με 113.20 mm, ενώ το βάθος της ράμπας είναι 33.47 mm (Πίνακας 4-3), διατηρώντας το ύψος εισόδου του αεραγωγού ίσο με 22.60 mm. Οι συντεταγμένες (Εικόνα 4-92) οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τις κύριες διαστάσεις για καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα ομοίως, δημιουργούν και τις καμπύλες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν κατά την σχεδίαση. Παρακάτω φαίνονται οι καμπύλες προφίλ των τοιχωμάτων (κάτοψη) και της ράμπας (όψη) σε σχέση με το μήκος που προκύπτει (Σχήμα 4-2).

Πίνακας 4-3 Κύριες διαστάσεις αεραγωγού μοντέλου “B-2 NACA S Duct”.

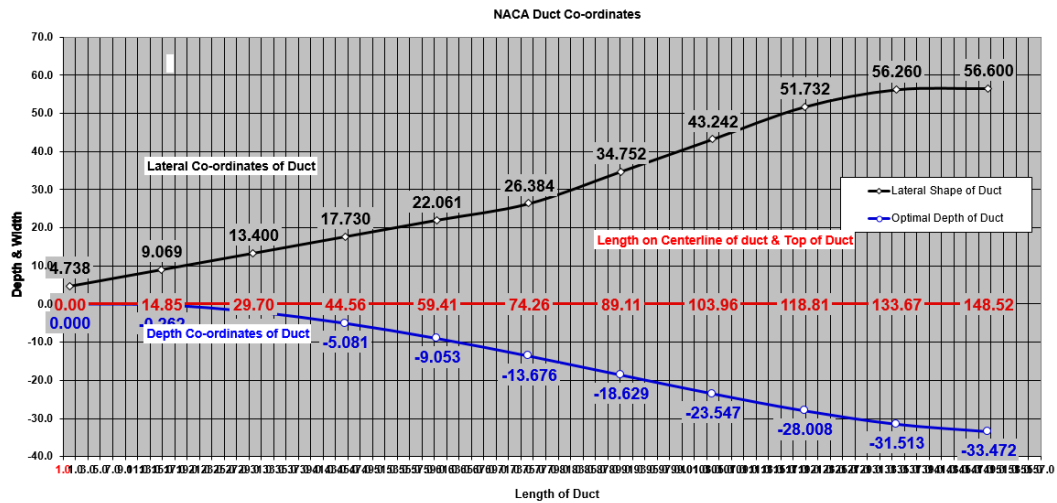
Κύριες διαστάσεις μοντέλου αεραγωγού “B-2 NACA S Duct”	
Ολικό πλάτος	113.20
Βάθος ράμπας	33.47
Ύψος εισόδου αεραγωγού	22.6
Γωνία ράμπας	12.7
Μήκος	148.52

All measurements are mm												
	curve fit of optimal floor		duct length from front (non dimensional)	length of duct from front (units)	width of duct from centerline (units)		Optimal Depth of Duct	base line	Curve fit for curved part	fit for linear	Opposite Curve fit for drawing full duct	
% length of duct from rear	0.00		0	0.00	4.738		0.000	0.0		0.419	0.419	-4.738
100	0.78		0.1	14.85	9.069		-0.262	0.0		0.801	0.801	-9.069
90	6.14		0.2	29.70	13.400		-2.054	0.0		1.184	1.184	-13.400
80	15.18		0.3	44.56	17.730		-5.081	0.0		1.566	1.566	-17.730
70	27.05		0.4	59.41	22.061		-9.053	0.0		1.949	1.949	-22.061
60	40.86		0.5	74.26	26.384		-13.676	0.0	2.330	2.331	2.331	-26.384
50	55.66		0.6	89.11	34.752		-18.629	0.0	3.070		3.070	-34.752
40	70.35		0.7	103.96	43.242		-23.547	0.0	3.820		3.820	-43.242
30	83.68		0.8	118.81	51.732		-28.008	0.0	4.570		4.570	-51.732
20	94.15		0.9	133.67	56.260		-31.513	0.0	4.970		4.970	-56.260
10	100.01		1	148.52	56.600		-33.472	0.0	5.000		5.000	-56.600

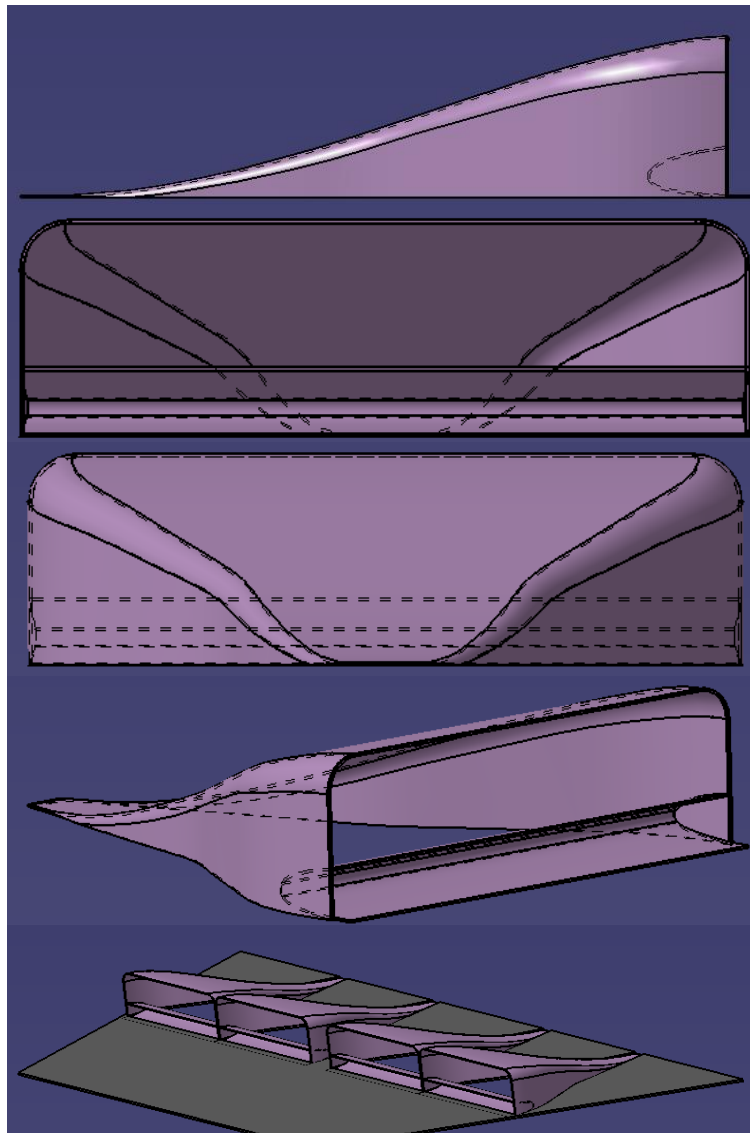
Εικόνα 4-92 Συντεταγμένες καμπυλών αεραγωγού δεύτερου μοντέλου “B-2 NACA S Duct”.

Στην περίπτωση αυτή ο αγωγός “S” διαφέρει σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο, καθώς δεν εφάπτεται στο δάπεδο του αυτοκινήτου, αλλά η διατομή εισόδου του ανυψώνεται με τιμή ίση με το πλάτος του χείλους πρόσπτωσης ξεπερνώντας το, ώστε να βρίσκεται στο σημείο εξαγωγής του αεραγωγού (Εικόνα 4-94γ). Οι θέσεις των εσωτερικών πτερυγίων είναι ίδιες με το προηγούμενο μοντέλο.

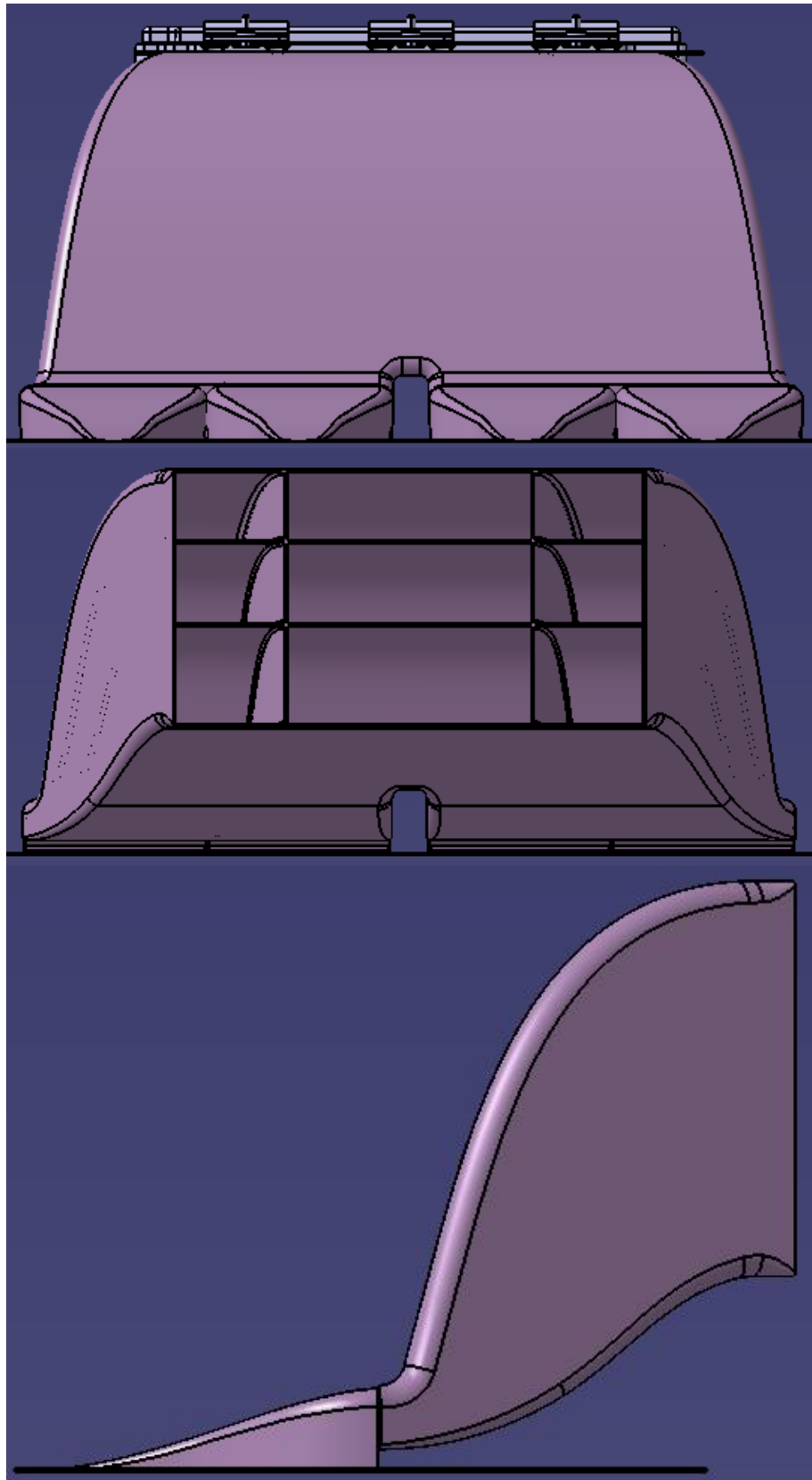
Ο λόγος των διατομών εισαγωγής αέρα στο σύστημα (τέσσερις επιφάνειες πρόσληψης αεραγωγών) προς την επιφάνεια εξαγωγής του αγωγού (επιφάνεια κυψέλης) που προκύπτει είναι ίσος με 0.87.



Σχήμα 4-2 Καμπύλες αεραγωγού δεύτερου μοντέλου "B-2 NACA S Duct", (μαύρο: καμπύλη τοιχωμάτων, κόκκινο: καμπύλη μήκους, μπλε: καμπύλη ράμπας).



Εικόνα 4-93 Αεραγωγός μοντέλου "B-2 NACA S Duct", (από επάνω): πλάγια όψη, πρόσθια, οπίσθια, 3/4, σειρά αεραγωγών.



Εικόνα 4-94 Δεύτερο μοντέλο "B-2 S Duct", όψεις α) πρόσθια όψη, β) οπίσθια, γ) πλάγια.

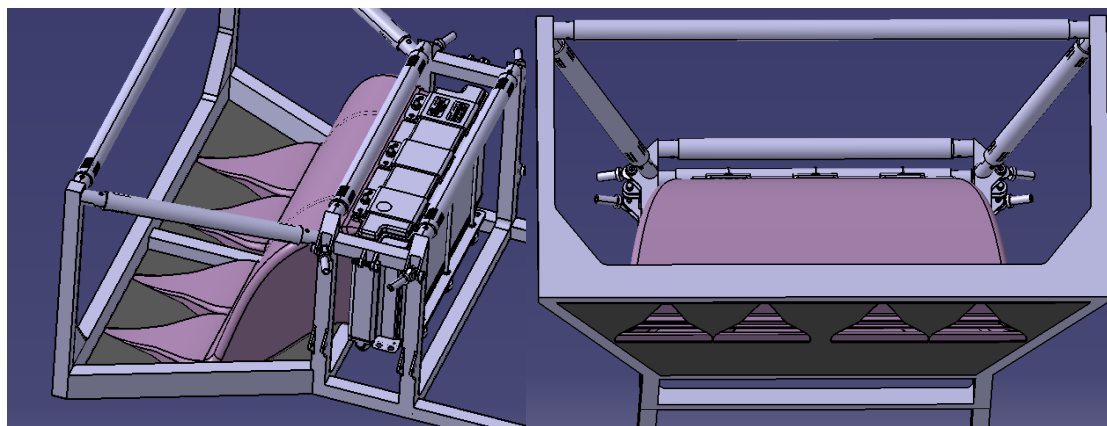
Για το χείλος πρόσπτωσης χρησιμοποιείται προφίλ ([Εικόνα 4-95](#)) το οποίο στηρίζεται σε πειραματικές εφαρμογές, ανασχεδιασμένο με διαστάσεις τέτοιες ώστε να αντιστοιχούν στο επιθυμητό ύψος της εισαγωγής του αεραγωγού, καθώς οι συντεταγμένες των καμπυλών

χείλους είναι συνάρτηση του ύψους εισόδου. Συγκεκριμένα, οι προτεινόμενες συντεταγμένες σχεδίασης καμπυλών του χείλους και η εξομάλυνση που πραγματοποιείται στην κορυφή του χείλους τροποποιούνται, πολλαπλασιάζοντάς τες ανάλογα για το ύψος εισαγωγής του αεραγωγού, αναδιαμορφώνοντας με αυτό το τρόπο της καμπύλες σχεδιασμού (Κεφ. 3.2.1) (Εικόνα 4-83). Στην συνέχεια ταυτίζεται το άνω τμήμα της καμπύλης με την είσοδο του αγωγού για την συνέχεια της ροής. Σημειώνεται ότι η εσωτερική καμπύλη στο παρόν χείλος σταματά στο 75% του μήκους της εξωτερικής καμπύλης, καθώς υφίσταται ήδη η διαμόρφωση του αγωγού, η οποία και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής. Ωστόσο προτείνονται διάφορες διαμορφώσεις, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, οι οποίες αφορούν αποκλίνουσα ή συγκλίνουσα διαμόρφωση της εσωτερικής καμπύλης του χείλους για τον έλεγχο της ροής, κάτι το οποίο δεν μελετάται στην παρούσα εργασία.

mm	entrance height	outlet curve	inlet curve
	0	4.4522	4.4522
	2.825	1.9662	7.345
	5.65	1.2656	8.475
	8.475	0.8136	9.3112
	11.3	0.4746	9.944
	14.125	0.2712	10.4412
	16.95	0.1356	10.8706
	19.775	0.0452	
	22.6	0	
leading edge of airfoil r=		2.1244	

Εικόνα 4-95 Συντεταγμένες χείλους πρόσπτωσης.

Το σύνολο του δεύτερου συστήματος παρουσιάζεται παρακάτω σε σχέση με το σκελετό και το δάπεδο του οχήματος, καθώς και την συναρμογή επί της κυψέλης (Εικόνα 4-96).

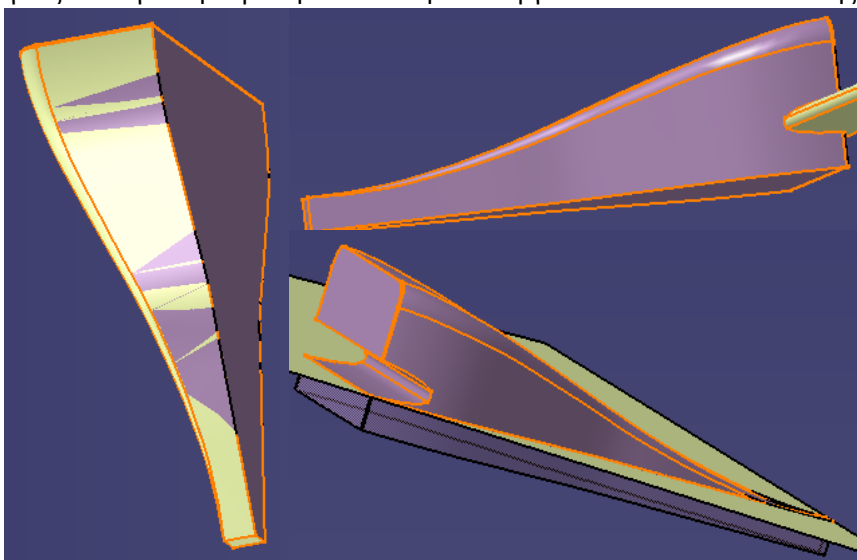


Εικόνα 4-96 Δεύτερο Μοντέλο "B-2 NACA S Duct".

4.5.2.1 Παραγωγή Όγκου Πεδίου Ροής Μοντέλων Εισαγωγής “B NACA - S Duct”

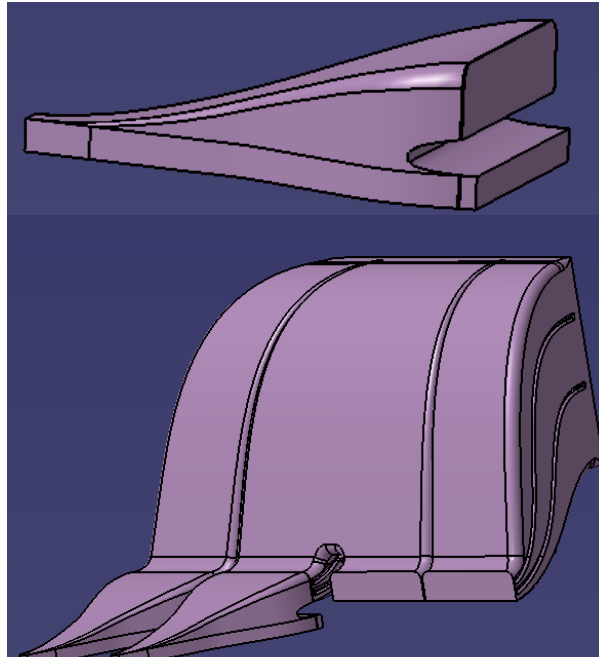
Στη συνέχεια πραγματοποιείται η σχεδίαση των όγκων του πεδίου ροής. Ο τρόπος δημιουργίας των όγκων για τα δύο μοντέλα των αεραγωγών είναι πανομοιότυπος, με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόστηκε και στην περίπτωση της πρώτης περίπτωσης του συστήματος εισαγωγής Scoop. Προφανώς η μετατροπή του συστήματος από “Scoop S Duct” σε απλό αγωγό “S” του μοντέλου ακολουθείται από την δημιουργία των όγκων ροής. Ο όγκος προσομοίωσης του αέρα περιβάλλοντος στην προκειμένη περίπτωση αντιπροσωπεύεται από ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, το οποίο προκύπτει από το ύψος του οχήματος σε σχέση με το οδόστρωμα και το μήκος άξονα του οχήματος.

Για την δημιουργία του όγκου του αεραγωγού χρησιμοποιείται το επιφανειακό μοντέλο που δημιουργήθηκε νωρίτερα και αντιπροσωπεύει τον αεραγωγό, καθώς και τον σύνδεσμο στεγανοποίησης και σύνδεσης των αεραγωγών με τα ακροφύσια του αγωγού “S”. Σύμφωνα με αυτό με την εντολή «Thick Surface» γίνεται η ανάκτηση του όγκου (Εικόνα 4-97α). Στην συνέχεια στην περίπτωση του δεύτερου μοντέλου αφαιρείται με την εντολή «Split» η διάταξη του χείλους πρόσπτωσης από τον όγκο (Εικόνα 4-98β), ενώ τέλος αποκόπτεται στο κάτω επίπεδο του δαπέδου του αυτοκινήτου ο ωφέλιμος όγκος του αεραγωγού από τον περιττό, δημιουργώντας έτσι τον όγκο του αεραγωγού (Εικόνα 4-98γ). Ο λόγος που δημιουργήθηκε περιττός όγκος είναι για την ομαλή και σωστή λειτουργία των εντολών αποκοπής.



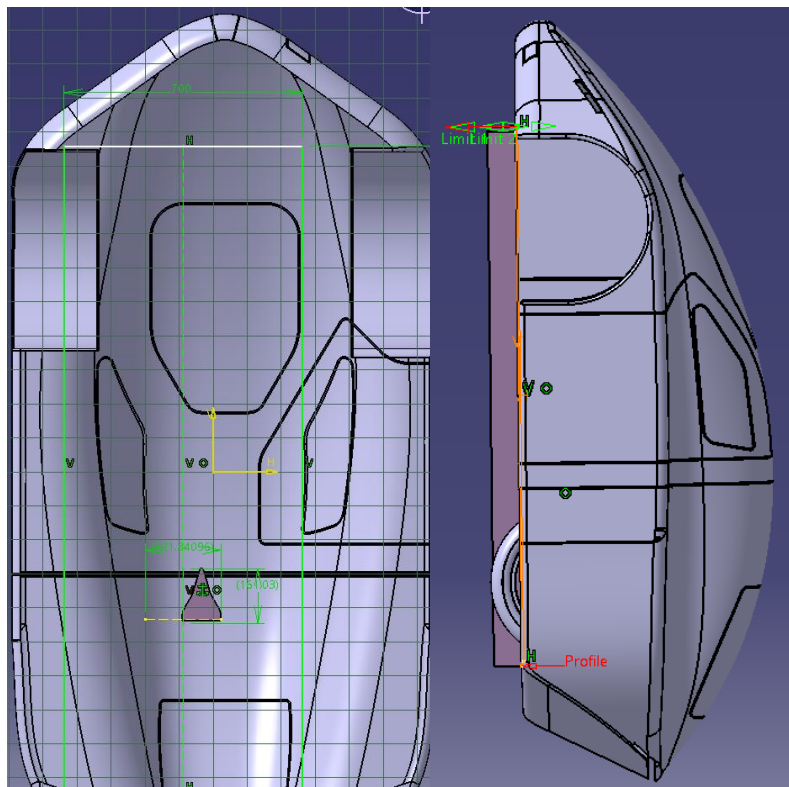
Εικόνα 4-97 α) (αριστερά) δημιουργία όγκου, β) (πάνω δεξιά) αποκοπή χείλους πρόσπτωσης, γ) (κάτω δεξιά) αποκοπή περιττού όγκου.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τον δεύτερο γειτονικό αεραγωγό (παραλείποντας τους άλλους δύο, καθώς το μοντέλο προσομοιώνεται συμμετρικά). Στην συνέχεια με την εντολή «Extrude» επιλέγονται οι επιφάνειες εισαγωγής των αεραγωγών και δημιουργούνται όγκοι 10 mm με φορά αρνητική του άξονα z. Στην συνέχεια, με την εντολή «Add» συνενώνονται οι πλάκες που δημιουργήθηκαν με τους αεραγωγούς (Εικόνα 4-98α) και τελικά με τον όγκο του αγωγού, δημιουργώντας ενιαίο όγκο που περιγράφει το σύνολο του συστήματος (Εικόνα 4-98β). Ο λόγος για τον οποίο δημιουργούνται οι πρόσθετες πλάκες κάτω από τους αεραγωγούς είναι για να αφαιρεθούν από τον όγκο του ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου, δημιουργώντας έτσι επιφάνεια η οποία παραλείπει την εισαγωγή των αεραγωγών, κάτι το οποίο απαιτείται όπως θα φανεί σε επόμενο κεφάλαιο για τον ορισμό των συνθηκών του προβλήματος.



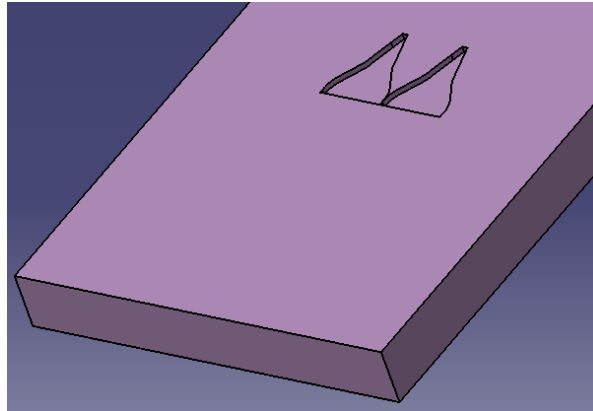
Εικόνα 4-98 α) (πάνω) όγκος αεραγωγού β) (κάτω)
αποτέλεσμα όγκου πεδίου ροής Μοντέλου NACA S Duct πριν
την συμμετρική αποκοπή.

Στην συνέχεια δημιουργείται επί του επιπέδου εισαγωγής του αεραγωγού «Sketch», στο οποίο σχεδιάζεται ορθογώνιο σε διαστάσεις του άξονα του οχήματος και μήκος του αυτοκινήτου (Εικόνα 4-99α). Το σχέδιο χρησιμοποιείται για την δημιουργία του όγκου περιβάλλοντος αέρα με την εντολή «Extrude», η οποία λαμβάνει διεύθυνση αρνητική z και τιμή ίση με την απόσταση του αυτοκινήτου από το έδαφος (περί των 12 mm) (Εικόνα 4-99β).



Εικόνα 4-99 α) Sketch ορθογώνιο παραγωγής όγκου β) εντολή Extrude,
παραγωγή όγκου περιβάλλοντος.

Από το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο αφαιρείται με την εντολή «Remove» ο όγκος των βοηθητικών πλακιδίων κάτω από τους αεραγωγούς, δίνοντας το τελικό αποτέλεσμα του όγκου περιβάλλοντος (Εικόνα 4-100).



Εικόνα 4-100 Τελικός όγκος προσομοίωσης αέρα περιβάλλοντος.

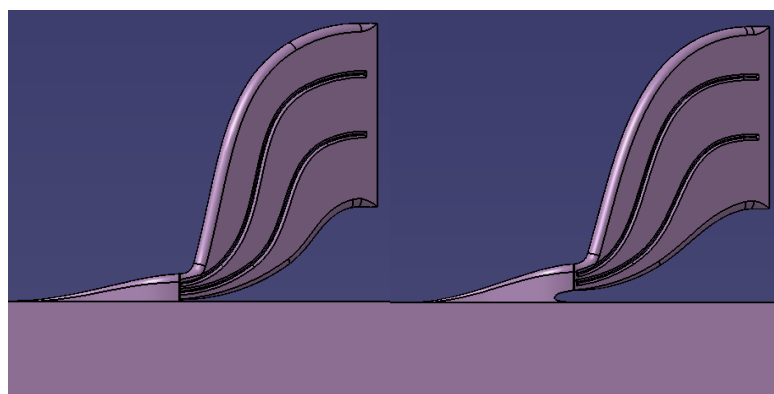
Τελικά στην περίπτωση του “NACA S Duct” μοντέλου και στις δύο περιπτώσεις η εισαγωγή αποτελείται από δύο όγκους όπως περιεγράφηκαν παραπάνω.

Παραγωγή Όγκου Πεδίου Ροής Μοντέλων

Δεδομένου των διαφοροποιημένων των δύο μοντέλων προκύπτουν και τα αντίστοιχα χωρία ροής, σύμφωνα με τις αντίστοιχες γεωμετρίες, όπως παρουσιάζονται παρακάτω, για το συνολικό χωρίο ροής (Εικόνα 4-101) και των λεπτομερειών αυτών (Εικόνα 4-102).



Εικόνα 4-101 Συνολικό χωρίο ροής εισαγωγής μοντέλου (από επάνω) α) “B-1 NACA S Duct” β) “B-2 NACA S Duct”.

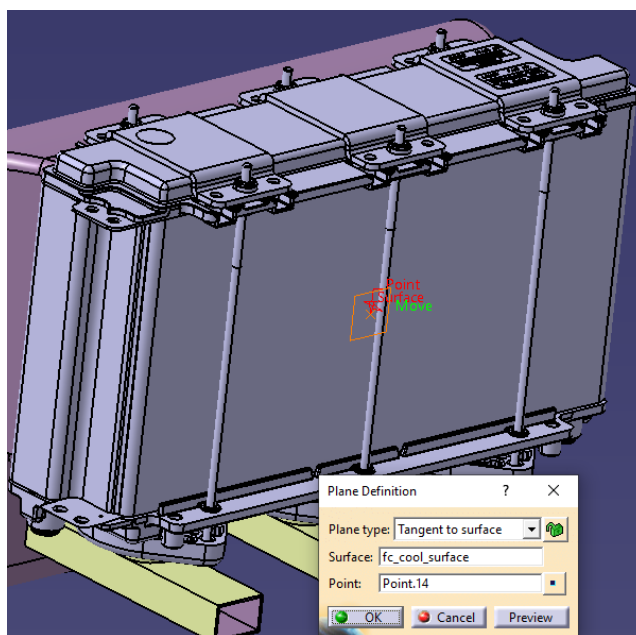


Εικόνα 4-102 Λεπτομέρειες εισαγωγής χωρίου ροής μοντέλου (από επάνω) α) “B-1 NACA S Duct” β) “B-2 NACA S Duct”.

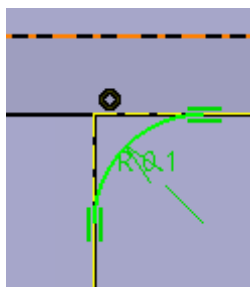
4.5.3 Σχεδιασμός Γεωμετρίας Εξαγωγής Αέρα – “Diffuser”

Εκτός του σχεδιασμού της γεωμετρίας εισαγωγής και κατεύθυνσης του αέρα προς την κυψέλη, απαραίτητος είναι και ο σχεδιασμός της διάταξης εξαγωγής/απαγωγής του εισερχόμενου αέρα από το σώμα της κυψέλης. Η διάταξη κρίνεται απαραίτητη για την ομαλή ροή μέσα από το σώμα της κυψέλης καυσίμου. Η διάταξη συνδέει την επιφάνεια εξόδου της κυψέλης με τον ανεμιστήρα, δημιουργώντας μία κωνοειδούς μορφής γεωμετρία επιθυμητών διαστάσεων.

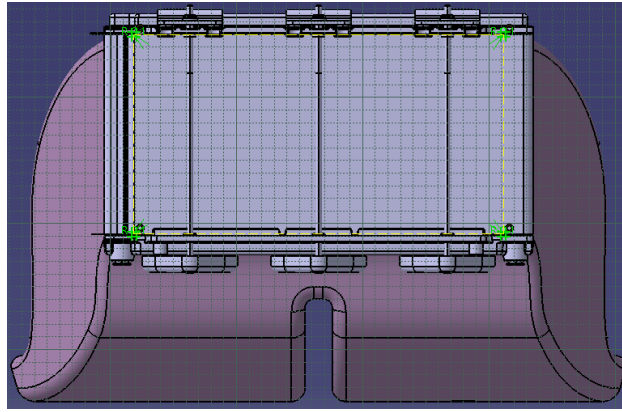
Για την αρχή της σχεδίασης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της επιφάνειας, εντός της οποίας περικλείονται τα κανάλια διόδου του αέρα ομοίως με την αρχή σχεδίασης της εισαγωγής. Επομένως, δημιουργείται με την εντολή «Plane» νέα επιφάνεια σχεδίασης εφαπτόμενη της θεωρητικής επιφάνειας εξαγωγής της κυψέλης (Εικόνα 4-103). Με βάση αυτό το επίπεδο δημιουργείται νέο «Sketch», εντός του οποίου γίνεται προβολή του περιγράμματος της πραγματικής επιφάνειας της κυψέλης (Εικόνα 4-105). Στη συνέχεια εφαρμόζονται με την εντολή «Corner» στις γωνίες του προβεβλημένου ορθογωνίου της επιφάνειας “fillets”, τα οποία έχουν τιμή -ομοίως με την περίπτωση της εισαγωγής- ένα δέκατο του χιλιοστού (0.1 mm) (Εικόνα 4-104). Η εν λόγω τροποποίηση αποσκοπεί στην λειτουργικότητα της εντολής «Thick Surface», ώστε να είναι δυνατή η παραγωγή όγκου και να μην δημιουργούνται γωνίες στα άκρα της γεωμετρίας. Το παραπάνω Sketch αποτελεί την πρώτη διατομή της δημιουργούμενης σε επόμενο στάδιο γεωμετρίας.



Εικόνα 4-103 Εντολή Plane, δημιουργία επιπέδου σχεδίασης εφαπτόμενο στην επιφάνεια εξαγωγής κυψέλης καυσίμου.

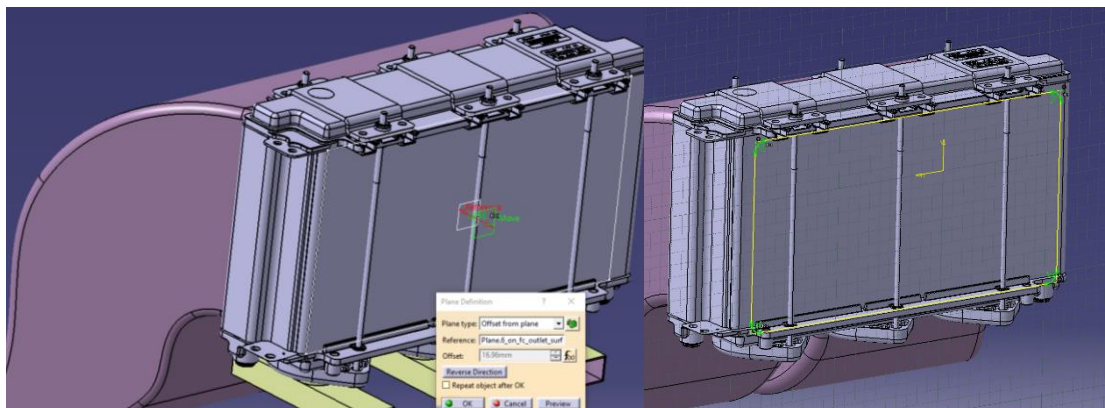


Εικόνα 4-104 Εφαρμογή εντολής Corner.



Εικόνα 4-105 Εντολή Sketch, προβολή πραγματικής επιφάνειας κυψέλης καυσίμου.

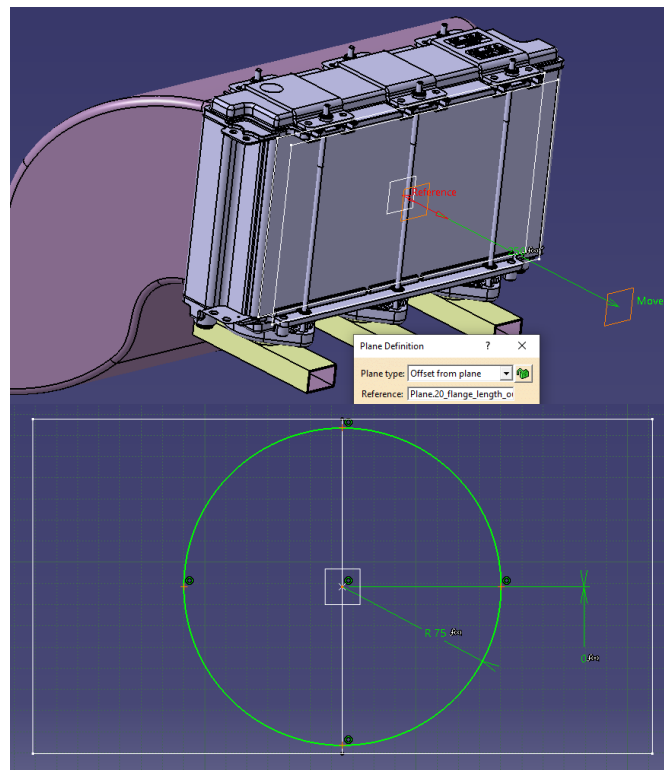
Στη συνέχεια δημιουργείται νέο επίπεδο σχεδίασης με την εντολή «Plane», όπου ως τύπος επιλέγεται «Offset from plane», δηλαδή σε απόσταση από επίπεδο. Ως επίπεδο αναφοράς επιλέγεται αυτό το οποίο δημιουργήθηκε επί της επιφάνειας εξόδου της κυψέλης με διεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια κυψέλης και φορά διανύσματος αντίθετη από αυτή. Η τιμή της απόστασης ορίζεται με την μεταβλητή “flange_length” (Εικόνα 4-106α), ομοίως με την φλάντζα προσαρμογής της εισαγωγής, καθώς η γεωμετρική διάταξη στην περιοχή εξόδου αέρα της κυψέλης είναι όμοια και ίδια ως προς τις διαστάσεις με την περιοχή της εισόδου. Έτσι, με μία μεταβλητή επιτυγχάνεται διπλός έλεγχος, απλουστεύοντας την παραμετρική διαδικασία.



Εικόνα 4-106 α) Εντολή Plane, δημιουργία παραμετρικής επιφάνειας φλάντζας εξαγωγής, β) Εντολή Sketch-Corner, προβολή πραγματικής επιφάνειας κ.κ., δημιουργία φιλέτων.

Στη συνέχεια δημιουργείται νέο «Sketch», εντός του οποίου γίνεται και πάλι προβολή του περιγράμματος της πραγματικής επιφάνειας της κυψέλης, η οποίας αντιπροσωπεύει το μήκος της φλάντζας, ενώ στις γωνίες εφαρμόζεται και πάλι η εντολή «Corner», με τιμή για την ακτίνα των τεσσάρων Fillets την παράμετρο “fillet_radius_airways” (Εικόνα 4-106β).

Κατά το τρίτο στάδιο σχεδίασης δημιουργείται με την εντολή «Plane» και πάλι νέο επίπεδο τύπου «Offset from plane», όπου ως επίπεδο αναφοράς επιλέγεται αυτό που ορίζεται από το μήκος της φλάντζας με διάνυσμα κάθετο σε αυτό και διεύθυνση όμοια με του προηγούμενου επιπέδου σχεδίασης (Εικόνα 4-107α). Η τιμή του μήκους ορίζεται από την μεταβλητή “cone_dist”, η οποία ορίζεται από τον σχεδιαστή.

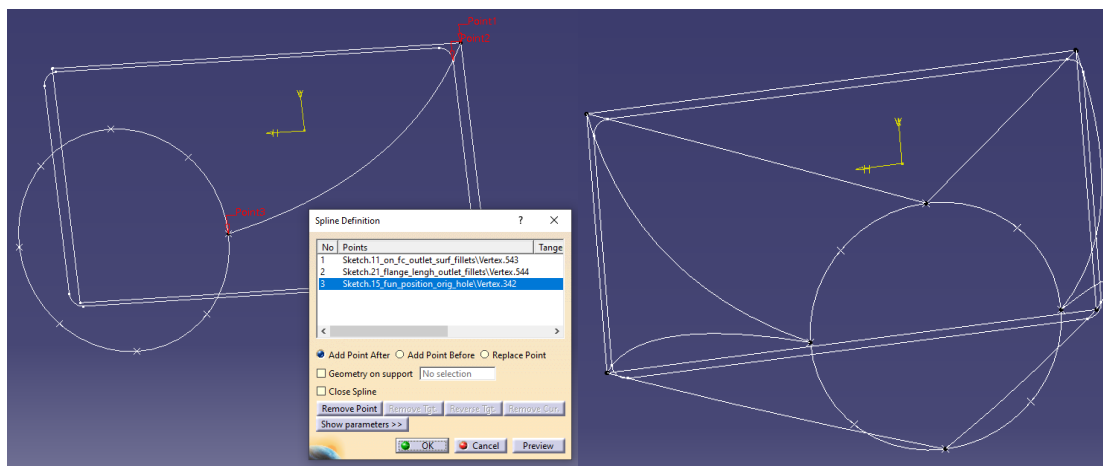


Εικόνα 4-107 α) Εντολή Plane, δημιουργία παραμετρικού επιπέδου σχεδίασης ανεμιστήρα εξαγωγής, β) εντολή Sketch-break, δημιουργία κυκλικής διατομής εξαγωγής και επιμέρους στοιχείων.

Επί του τρίτου επιπέδου γίνεται δημιουργία νέου «Sketch», εντός του οποίου δημιουργείται κύκλος. Η ακτίνα του κύκλου περιγράφεται από την μεταβλητή “fan_radius”, η οποία και δύναται να τροποποιηθεί από τον σχεδιαστή, ωστόσο ορίζεται ίση με αυτή του ανεμιστήρα της εφαρμογής. Έπειτα, με βάση το κέντρο του, ο κύκλος τοποθετείται στο μέσο του οριζόντιου άξονα συμμετρίας της πραγματικής επιφάνειας της κυψέλης ελεύθερος να κινείται επάνω στον κάθετο άξονα συμμετρίας με τον περιορισμό «Coincidence». Επιπλέον, δημιουργείται νέος περιορισμός, όπου ορίζεται το κέντρο του κύκλου σε σχέση με το μέσο του κάθετου άξονα συμμετρίας της επιφάνειας κυψέλης μέσω διάστασης μήκους, εισάγοντας στην τιμή του μήκους τη μεταβλητή “outlet_fun_position” για τον έλεγχο της θέσης του κύκλου ως προς το ύψος τοποθέτησής του. Παρά την τελευταία δυνατότητα, το κέντρο του κύκλου τοποθετείται ουσιαστικά στην τομή του οριζόντιου και κάθετου άξονα συμμετρίας. Έπειτα, με την χρήση της εντολής «Equidistant Points» (εντός του Sketch) δημιουργούνται επάνω στην περίμετρο του κύκλου οκτώ σημεία στον διδιάστατο χώρο, τα οποία απέχουν μεταξύ τους ίση απόσταση (επί της περιμέτρου του κύκλου), “μοιράζοντας” τον κύκλο σε οκτώ τόξα. Από αυτά επιλέγονται τα σημεία τα οποία προκύπτουν στις 0, 90, 180 και 270 μοίρες του κύκλου και εφαρμόζεται περιορισμός («Coincidence») ώστε να κινούνται (ανάλογα με το πλήθος των ζητούμενων σημείων), επάνω στην περίμετρο του και όχι εκτός αυτής (σε περίπτωση αντιπαράθεσης τρίτου περιορισμού) (Εικόνα 4-107β).

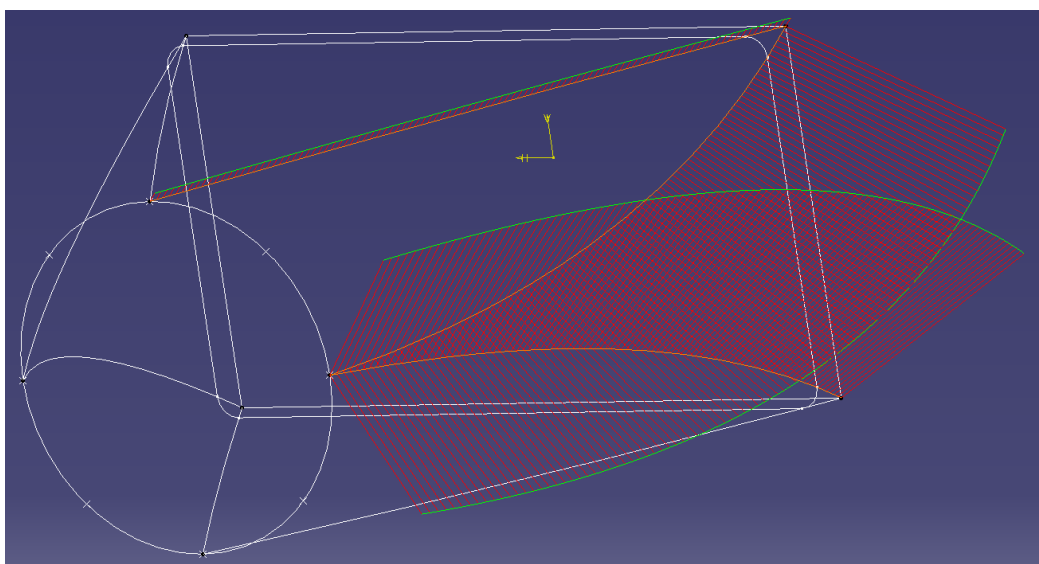
Στη συνέχεια σχεδιάζονται τέσσερα ζεύγη καμπυλών «Spline», όπου κάθε μία εξ’ αυτών αποτελείται από τρία σημεία ελέγχου, διερχόμενα όπως περιγράφονται ακολούθως. Το πρώτο σημείο ταυτίζεται με το άκρο του τόξου το οποίο δημιουργήθηκε κατά τις στρογγυλεύσεις στο πρώτο επίπεδο σχεδίασης (επί της κυψέλης), το δεύτερο διέρχεται από το αντίστοιχο ανά την περίπτωση άκρο τόξου, το οποίο δημιουργήθηκε κατά τις

στρογγυλεύσεις στο δεύτερο επίπεδο σχεδίασης (στο μήκος της φλάντζας) και το τρίτο σημείο της καμπύλης σε άκρο τεταρτημόριου του τρίτου επιπέδου σχεδίασης (θέση ανεμιστήρα) (Εικόνα 4-108α). Καθ' αυτό τον τρόπο, μεταβάλλοντας ο σχεδιαστής τις διαθέσιμες παραμέτρους, οι καμπύλες ακολουθούν την μεταβολή των σημείων και αναμορφώνονται αναλόγως. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία σχεδίασης ακολουθείται ομοίως για τις οκτώ καμπύλες (Εικόνα 4-108β).



Εικόνα 4-108 α) Σχεδιασμός (εξαρτώμενης) καμπύλης Spline επί σημείων προσχεδιασμένων διατομών, β) καμπύλες Spline επί των διατομών.

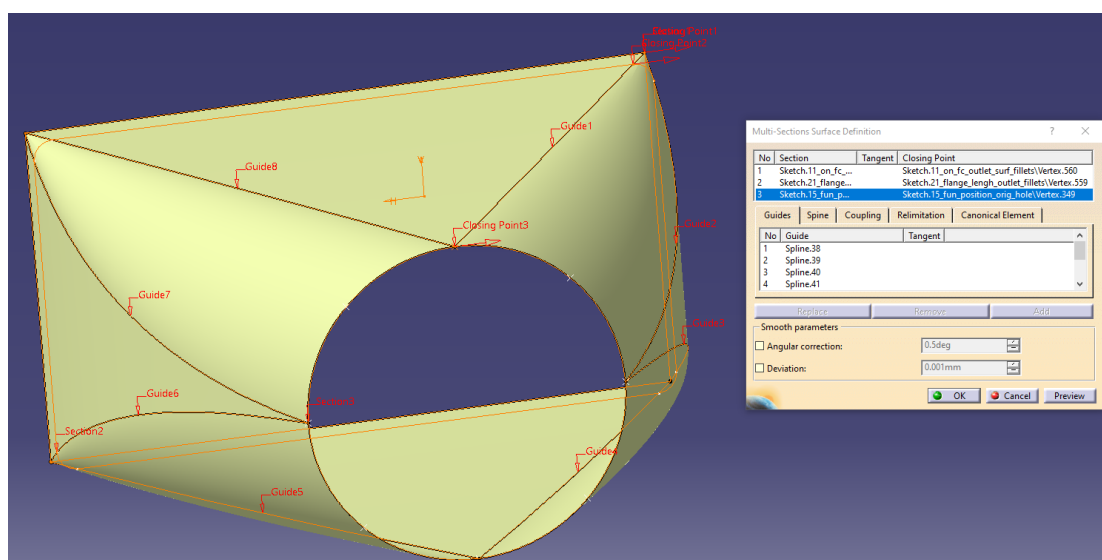
Ολοκληρώνοντας την διαδικασία σχεδίασης πραγματοποιείται ανάλυση καμπυλότητας για τον έλεγχο των κυρτών και κοίλων των σημείων καμπής (Εικόνα 4-109). Από την διαδικασία προκύπτει ότι δεν υπάρχει μεταβολή των καμπυλών από κυρτή σε κοίλη, καθώς επίσης η κυρτότητα ακολουθεί συγκεκριμένη διεύθυνση.



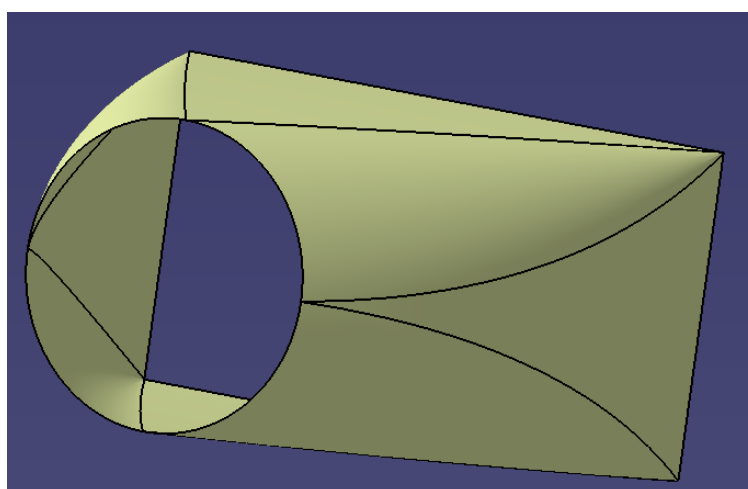
Εικόνα 4-109 Ανάλυση καμπυλότητας καμπυλών Spline.

Έχοντας πλέον τις τρεις επιθυμητές διατομές στην θέση που ορίζει ο χρήστης, καθώς και τις οκτώ καμπύλες «Spline», οι οποίες ακολουθούν τις μεταβολές των διατομών ως προς τη θέση τους και ως προς τα μεγέθη τους, και είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με αυτές, σειρά έχει η δημιουργία της συνολικής επιφάνειας κατασκευής με την εντολή «Multi-Section Surface». Κατά την εφαρμογή της εντολής επιλέγονται με την σειρά η διατομή επί της επιφάνειας

κυψέλης (πρώτο Sketch), η επιφάνεια η οποία ορίζεται επί του οριζόμενου μήκους φλάντζας (δεύτερο Sketch) και η διατομή η οποία προσδιορίζει τη διάμετρο του ανεμιστήρα καθώς και τα σημεία επί αυτής. Έπειτα, μεταξύ των δυνατοτήτων που είναι διαθέσιμες, επιλέγεται αυτή κατά την οποία είναι δυνατό να οριστούν “οδηγοί” «Guides» για τον έλεγχο του τρόπου πραγματοποίησης της εντολής και επιλέγονται οι οκτώ καμπύλες, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί. Ακόμα ορίστηκαν τα τρία σημεία (όσα και οι διατομές) στα οποία “κλείνει” η επιφάνεια μέσω των «Closing Points», ενώ ευθυγραμμίστηκε και η φορά αυτών. Σύμφωνα με τα παραπάνω δημιουργείται η επιφάνεια του κελύφους, η οποία διέρχεται από τις διατομές, ακολουθώντας τις καμπύλες, καθιστώντας δυνατό τον απόλυτο έλεγχο και προσδιορισμό της (Εικόνα 4-110). Για την δημιουργία δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην επίτευξη γεωμετρικών αποτελεσμάτων τα οποία να απαιτούν κοινές μεθόδους για την παραγωγή τελικού προϊόντος.



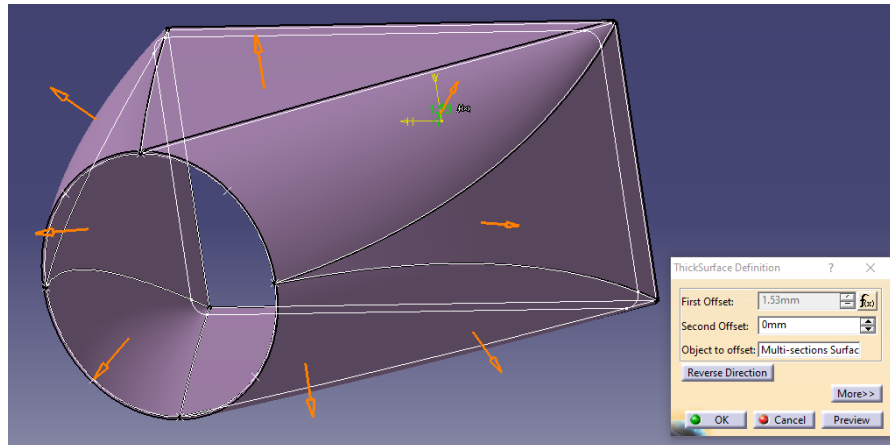
Εικόνα 4-110 Εντολή Multi-section Surface, δημιουργία επιφάνειας κελύφους γεωμετρίας εξαγωγής.



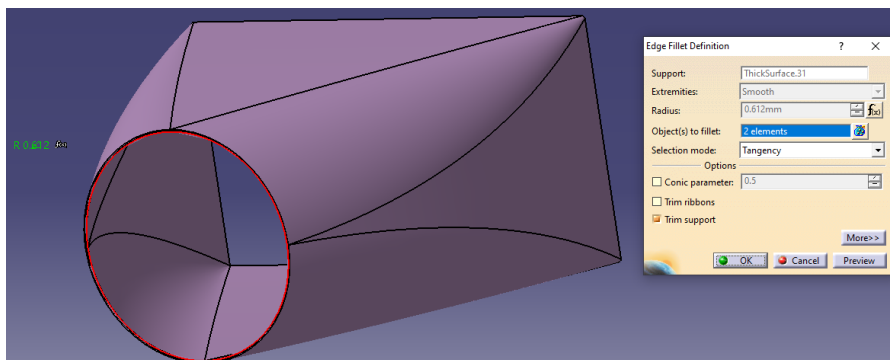
Εικόνα 4-111 Επιφάνεια κελύφους γεωμετρίας εξαγωγής.

Μετά την ολοκλήρωση της επιφάνειας με την εντολή «Thick Surface» δημιουργείται ο όγκος της γεωμετρίας με τιμή πάχους ίση με τη μεταβλητή “airways_thickness” (Εικόνα 4-112). Έπειτα, με την εντολή «Edge Fillet» δημιουργείται φιλέτο εφαπτομενικά της εσωτερικής ακμής του ανεμιστήρα με τιμή ίση με την μεταβλητή “fillet_inlet_fins_faces” όπως αυτή

προκύπτει από την διαίρεση του πάχους κατασκευής ($\text{airways_thickness}/2.5$) (Εικόνα 4-113). Για την εφαρμογή της γεωμετρίας επί της κυψέλης, απαιτείται η προσαρμογή της βάση των διατάξεων, οι οποίες περιβάλλουν την επιφάνεια εξαγωγής του αέρα. Έτσι δημιουργούνται sketch στο άνω και κάτω μέρος, προβάλλοντας τις διατάξεις εντός αυτών. Τα Sketch αυτά χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή δύο διαδοχικών εντολών «Extrude», με τιμή η οποία ισούται με το διπλάσιο του πάχους κατασκευής με έκταση προς τις δύο κατευθύνσεις κάθετα στο Sketch.

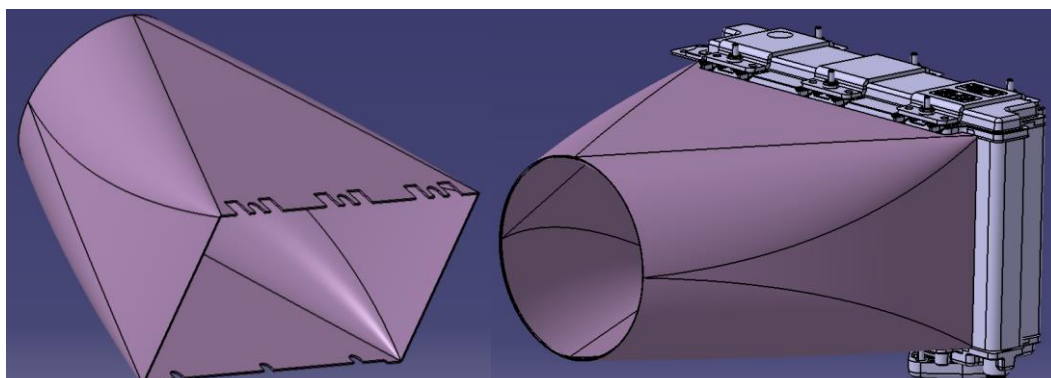


Εικόνα 4-112 Εντολή Thick Surface, δημιουργία όγκου εξαγωγής.



Εικόνα 4-113 Εντολή Edge Fillet, δημιουργία φιλέτου εσωτερικής ακμής ανεμιστήρα.

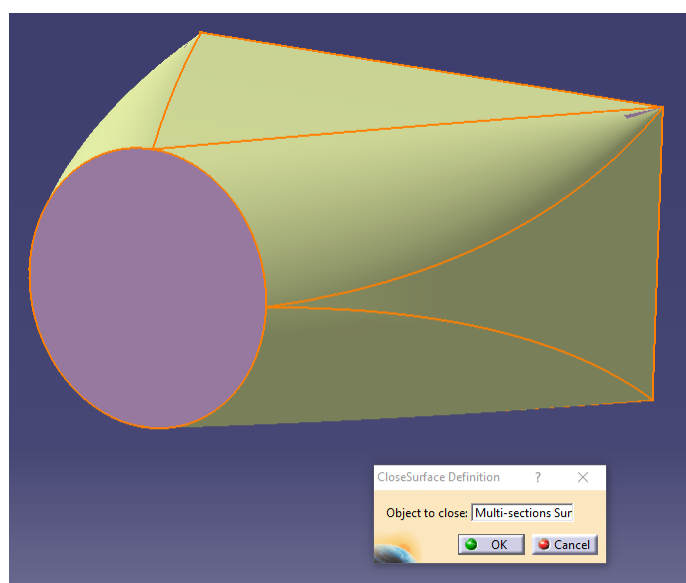
Στη συνέχεια, με εφαρμογή της εντολής «Remove» δύο φορές διαδοχικά για το άνω και κάτω μέρος, αποκόπτονται από την γεωμετρία τα απαραίτητα τμήματα, ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή, δίνοντας το τελικό αποτέλεσμα (Εικόνα 4-114).



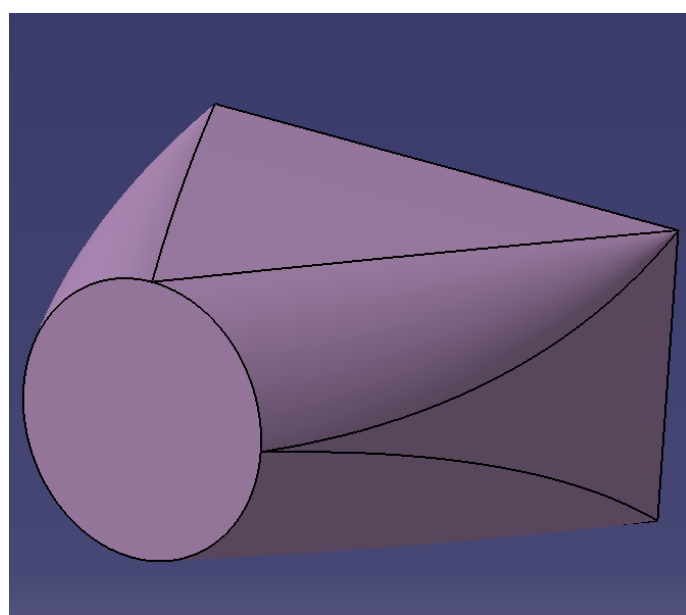
Εικόνα 4-114 α) Αποκοπές τμημάτων για την προσαρμογή γεωμετρίας επί της κυψέλης, β) γεωμετρία εξαγωγής επί της κυψέλης.

4.5.3.1 Παραγωγή Όγκου Πεδίου Ροής Μοντέλου “Diffuser”

Στο στάδιο αυτό δημιουργείται το κύριο ζητούμενο της παρούσας εργασίας, ο όγκος ο οποίος χρησιμοποιείται κατά την μελέτη του συστήματος και αποτελεί το χωρίο ροής. Η δημιουργία του όγκου πραγματοποιείται με την εντολή «Close Surface» ([Εικόνα 4-115](#)). Η εντολή ουσιαστικά δημιουργεί έναν όγκο εντός μίας επιφάνειας, η οποία δύναται να σφραγίζει με χρήση επιπέδων δύο διαστάσεων, τα οποία χρησιμοποιεί η εντολή κατά την λειτουργία της. Έτσι, κατά την εφαρμογή της επιλέγεται η επιφάνεια, η οποία έχει υλοποιηθεί σε προηγούμενο στάδιο με την εντολή «Multi-Section Surface», αλλά διαφοροποιείται από το φυσικό μοντέλο ως προς την απόληξη των φιλέτων επί της κυψέλης, τα οποία εξαλείφονται, παράγοντας τελικά τον όγκο του χωρίου ροής ([Εικόνα 4-116](#)). Σημειώνεται ότι η διαδικασία είναι απολύτως δυναμική, διότι η εντολή βασίζεται στην επιφάνεια του κελύφους εξαγωγής, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιαστή, παράγοντας πάντα τον αντίστοιχο όγκο όπως αυτός προκύπτει από τις τυχόν μεταβολές τις επιφάνειας.



Εικόνα 4-115 Εντολή Close Surface, παραγωγή όγκου χωρίου ροής.

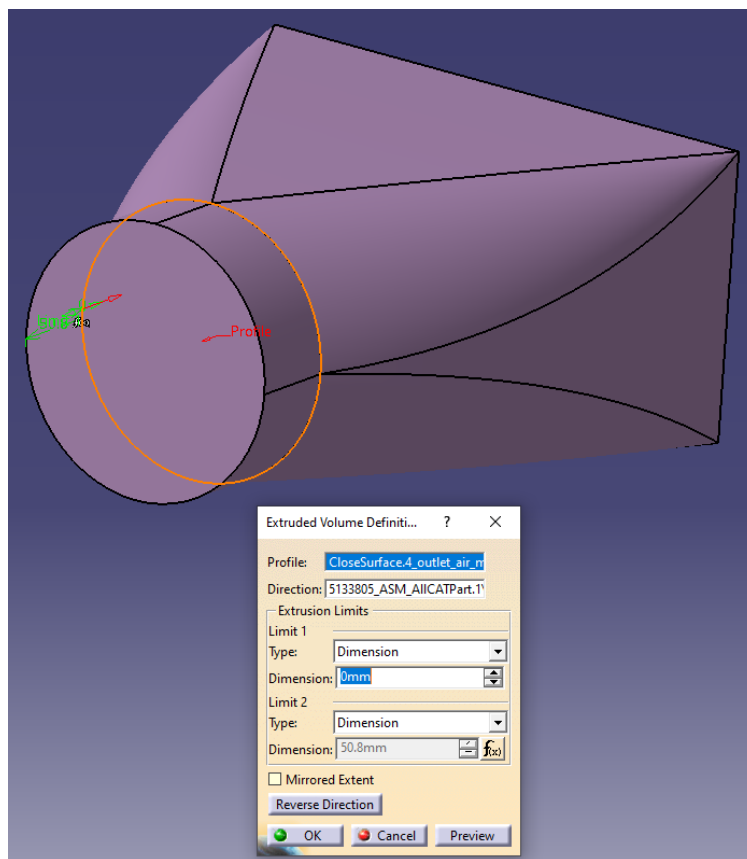


Εικόνα 4-116 Όγκος χωρίου ροής εξαγωγής.

4.5.4 Δημιουργία Όγκου Πεδίου Ροής Κυψέλης Καυσίμου & Ανεμιστήρα Εφαρμογής

Το συνολικό χωρίο ροής αποτελείται από πέντε ανεξάρτητους όγκους. Οι δύο πρώτοι, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα, εκφράζουν το χωρίο εντός της γεωμετρίας εισαγωγής, καθώς και του ατμοσφαιρικού αέρα. Ο τρίτος όγκος περιγράφει την διάταξη εξαγωγής και δημιουργείται με βάση την επιφάνεια του κελύφους αυτής, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα. Οι λοιποί δύο όγκοι του χωρίου περιγράφουν τον διερχόμενο αέρα της κυψέλης καυσίμου, καθώς και τον όγκο του αέρα του ανεμιστήρα. Σημειώνεται ότι οι όγκοι είναι μεν ανεξάρτητοι, άλλα οι μεταξύ τους επιφάνειες διεπαφής ταυτίζονται. Ο λόγος της δημιουργίας ξεχωριστών όγκων έγκειται στην απαίτηση ορισμού διαφορετικών οριακών συνθηκών, ενώ οι συνθήκες μετάβασης του ρευστού ορίζεται επί των κοινών επιφανειών διεπαφής (interfaces), όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

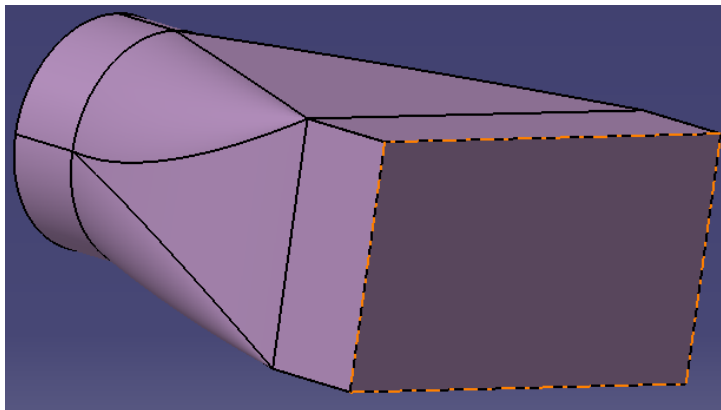
Για την μοντελοποίηση του πεδίου ροής του ανεμιστήρα χρησιμοποιούνται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, καθώς στην παρούσα εργασία δεν έχει σχεδιαστεί η γεωμετρία του. Η διάμετρος του έχει προσδιοριστεί μέσω μεταβλητής κατά τον σχεδιασμό του αεραγωγού εξαγωγής και δεδομένου ότι αυτός τοποθετείται ακριβώς στην έξοδο της, αξιοποιείται για την δημιουργία του όγκου του ο προκατασκευασμένος όγκος της εξαγωγής. Με την εντολή «Extrude» επιλέγεται η κυκλική επιφάνεια του όγκου της εξαγωγής και ορίζεται φορά αντίθετη από αυτή της κυψέλης, με διάνυσμα κάθετο προς την επιφάνεια, ενώ η τιμή για την λειτουργία της εντολής ορίζεται με την μεταβλητή “fan_width” και η τιμή της προσδιορίζεται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά (Εικόνα 4-117).



Εικόνα 4-117 Εντολή Extrude, δημιουργία όγκου πεδίου ροής ανεμιστήρα.

Η παραπάνω ακολουθία εντολών οδηγεί και πάλι σε μία δυναμική σχεδίαση, καθώς ο όγκος παράγεται ακολουθώντας την τελική μεταβαλλόμενη επιφάνεια του όγκου της εξαγωγής. Έτσι σε κάθε περίπτωση οι κοινές επιφάνειες ταυτίζονται.

Ακολούθως, μοντελοποιείται το πεδίο ροής της κυψέλης καυσίμου. Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιούνται τα δύο Sketch στην επιφάνεια εισαγωγής και εξαγωγής της κυψέλης τα οποία ορίζουν την πραγματική της επιφάνεια τα οποία μέσω της εντολής «Multi-Section Volume» δημιουργούν τον αρχικό όγκο (Εικόνα 4-118).



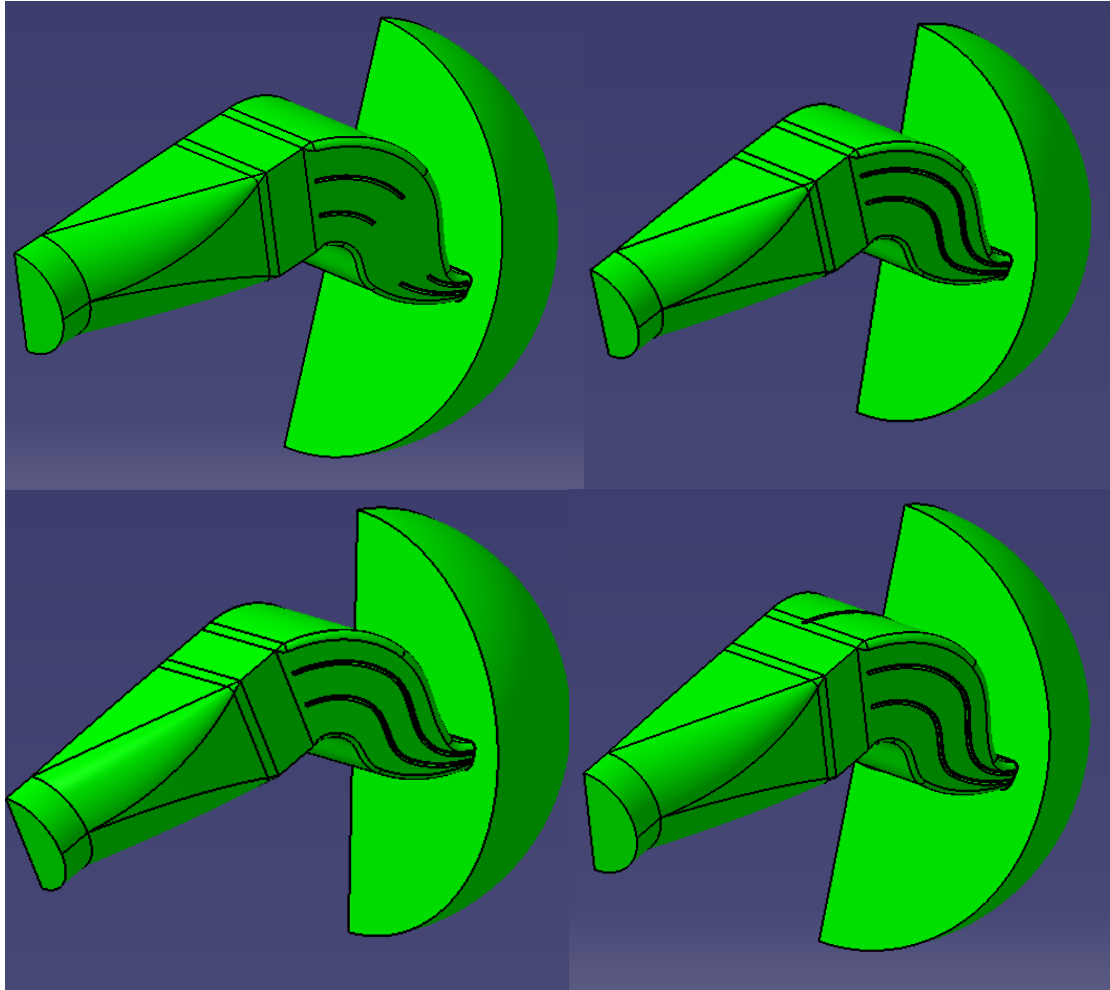
Εικόνα 4-118 Δημιουργία χωρίου ροής κυψέλης καυσίμου.

Σημειώνεται ότι ο όγκος ο οποίος δημιουργείται δεν συμπεριλαμβάνει τις πραγματικές διατάξεις της κυψέλης καυσίμου, όπως τα κανάλια διόδου και τις στοίβες των κυψελών, καθώς μία τέτοια πρακτική αυξάνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας, καθώς και την πολυπλοκότητα του μοντέλου και επομένως των προσομοιώσεων ροής. Αντ' αυτού επί του συμπαγούς όγκου κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων, η παράληψη αυτή προσεγγίζεται με την έννοια του πορώδους μέσου (porous media), όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

4.5.5 Συνολικό Συμμετρικό Πεδίο Ροής Μοντέλων

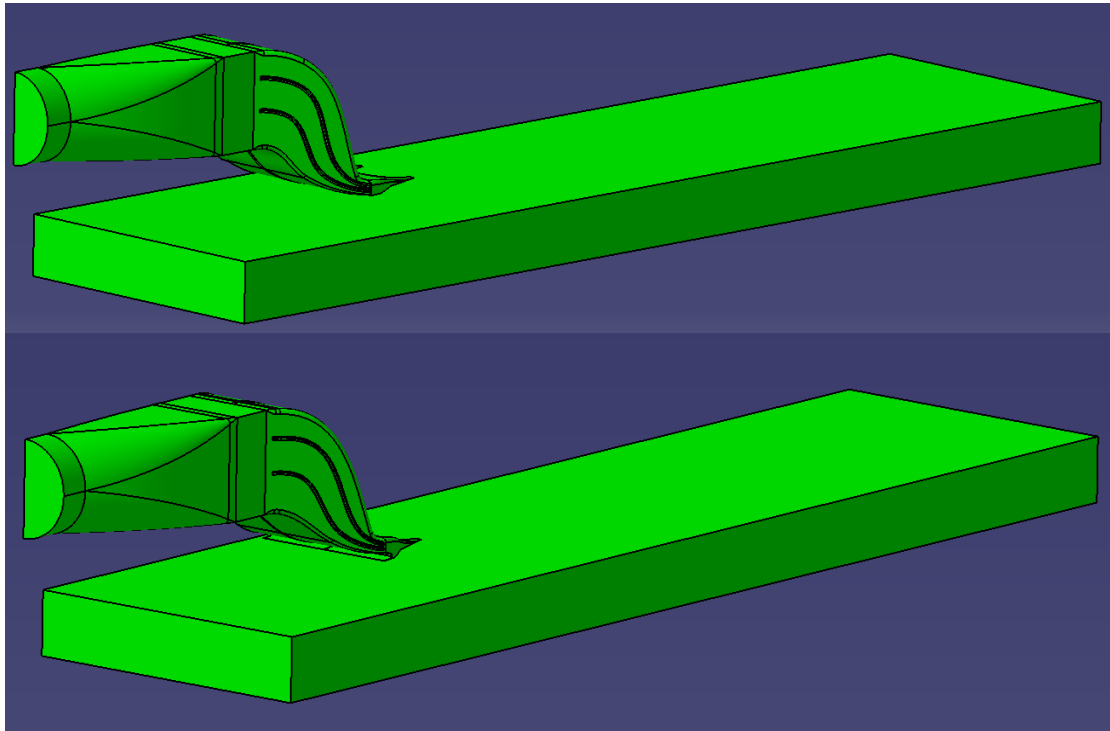
Έχοντας ολοκληρωθεί η παραγωγή των πέντε όγκων που περιγράφουν το χωρίο ροής της μελέτης, θεωρείται σκόπιμη η αξιοποίηση της συμμετρίας αυτών για λόγους μείωσης υπολογιστικών πόρων. Για τον λόγο αυτό δημιουργείται βοηθητικός όγκος, ο οποίος τοποθετείται στον κάθετο άξονα συμμετρίας της κυψέλης και υπερκαλύπτει το ήμισυ του συνολικού μοντέλου. Έπειτα, με την χρήση της εντολής «Remove» αποκόπτεται από κάθε όγκο το μισό, δίνοντας ως αποτέλεσμα το μισό μοντέλο των πέντε όγκων ανά περίπτωση, το οποίο και χρησιμοποιείται τελικά για την αντίστοιχη προσομοίωση (Εικόνα 4-119, 4-120).

Συνολικό Συμμετρικό Πεδίο Ροής μοντέλων Scoop-S Duct



Εικόνα 4-119 Τελικό χωρίο ροής μοντέλου α) (πάνω αριστερά) A-1 Scoop S Duct, β) (πάνω δεξιά) A-2 Scoop S Duct γ) (κάτω αριστερά) A-3 Scoop S Duct δ) (κάτω δεξιά) A-4 Scoop S Duct.

Συνολικό Συμμετρικό Πεδίο Ροής μοντέλων NACA-S Duct



Εικόνα 4-120 Τελικό χωρίο ροής μοντέλου α) (πάνω) B-1 NACA S Duct β) (κάτω) B-2 NACA S Duct.

5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η υπολογιστική ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics-CFD) είναι ένα εργαλείο βασισμένο στη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, για την προσομοίωση της συμπεριφοράς συστημάτων τα οποία σχετίζονται με ροή ρευστών, την μετάδοση θερμότητας και άλλα σχετικά φυσικά φαινόμενα. Λειτουργεί επιλύοντας τις εξισώσεις ροής του ρευστού στην περιοχή ενδιαφέροντος, δεδομένων και προκαθορισμένων οριακών συνθηκών επί της περιοχής.

Ιστορία της υπολογιστικής ρευστομηχανικής

Οι υπολογιστές χρησιμοποιούνται για αρκετά χρόνια για την επίλυση προβλημάτων ροής ρευστών. Ωστόσο, από τα μέσα της δεκαετίας του 1970 και έπειτα, τα περίπλοκα μαθηματικά τα οποία απαιτούνται για την γενίκευση και δημιουργία των αλγορίθμων επίλυσης άρχισαν να γίνονται κατανοητά και ως αποτέλεσμα αναπτύχθηκαν επιλύτες CFD γενικής χρήσης και όχι μόνον εξατομικευμένων εφαρμογών. Κατά την τότε χρονική περίοδο (αρχές του 1980), όταν άρχισαν να αναπτύσσονται οι εν λόγω επιλύτες, απαιτούσαν αφενός πολύ ισχυρούς υπολογιστές, αφετέρου μία βαθιά γνώση της μηχανικής των ρευστών, με αποτέλεσμα τις υψηλές απαιτήσεις σε χρόνο και πόρους για την δημιουργία προσομοιώσεων, κάτι το οποίο καθόριζε την Υπολογιστική Ρευστοδυναμική ως ένα εργαλείο αποκλειστικά για έρευνα. Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη των υπολογιστών ως προς την ισχύ, τα γραφικά και τον διαδραστικό χειρισμό των τριδιάστατων μοντέλων, έχουν οδηγήσει σε μείωση του χρόνου, των πόρων και του κόστους των προσομοιώσεων, μέσω προηγμένων επιλυτών, οι οποίοι με την χρήση εξειδικευμένων αλγορίθμων οδηγούν σε αξιόλογες λύσεις σε μικρό χρονικό διάστημα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ένταξη της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ως εργαλείο βιομηχανικού σχεδιασμού, το οποίο αξιοποιείται για την μείωση των χρόνων σχεδίασης, βελτιώνοντας την ποιότητα των αποτελεσμάτων (ANSYS I. , ANSYS CFX Introduction, 2016, p. 1).

5.2 ΔΟΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ANSYS-CFX

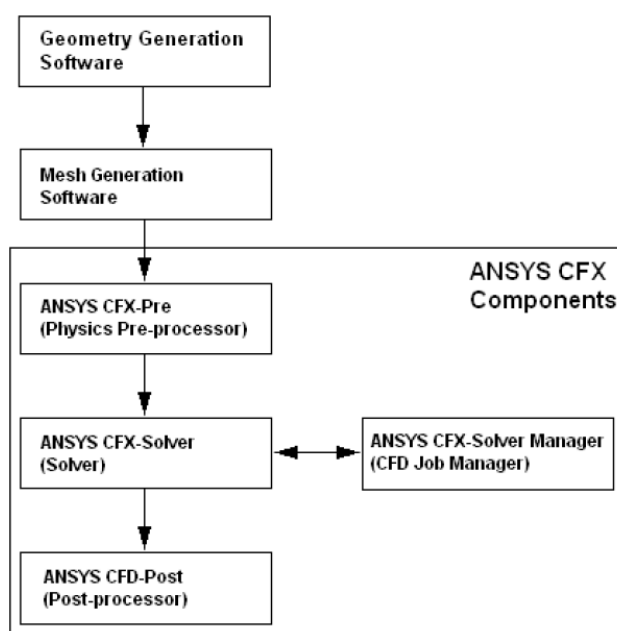
Η μεθοδολογία προσομοίωσης, η οποία ακολουθείται στο λογισμικό CFX, αποτελείται από τέσσερις βασικούς άξονες:

- Κατασκευή γεωμετρίας και πλέγματος (Design Modeler & mesh generator-Meshing)
- Ορισμός φυσικού προβλήματος (CFX-Pre)
- Επίλυση προβλήματος (CFX-Solver & CFX-Solver Manager)
- Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων (CFD-Post)

Κατά το πρώτο στάδιο της κατασκευής γεωμετρίας και πλέγματος ο χρήστης καλείται να δημιουργήσει μία κλειστού τύπου στερεή γεωμετρία, η οποία ορίζει το χωρίο ροής ενδιαφέροντος (flow domain). Η γεωμετρία μπορεί να αποτελείται από ενιαίο ή επιμέρους όγκους όταν αυτό απαιτείται, καθώς και ονομασίες επιφανειών, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά τα επόμενα στάδια. Η γεωμετρία αξιοποιείται για την δημιουργία του πλέγματος, όπως αυτό δημιουργείται ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος και τις υπολογιστικές δυνατότητες του εργαλείου που χρησιμοποιείται. Το πλέγμα με τη σειρά του χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση των προς επίλυση διαφορικών εξισώσεων της ροής. Κατά το στάδιο

ορισμού του προβλήματος, προσδιορίζονται οι οριακές συνθήκες (boundary conditions) και οι ιδιότητες των ρευστών. Έχοντας ορίσει το πρόβλημα, στο τρίτο στάδιο χρησιμοποιείται ο οριζόμενος κατά περίπτωση επιλύτης για την επίλυση του προβλήματος. Το πρόβλημα επιλύεται διακριτοποιώντας τις μερικές διαφορικές εξισώσεις της ροής σε όλους τους όγκους ελέγχου στην περιοχή ενδιαφέροντος, μετατρέποντας αυτές σε έναν πολύ μεγάλο αριθμό αλγεβρικών εξισώσεων (σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων), που επιλύονται με επαναληπτική διαδικασία. Η ακρίβεια της τελικής λύσης σε σχέση με την ακριβή λύση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος και το σχήμα του πεδίου ροής, το μοντέλο τύρβης, η ποιότητα και το μέγεθος του πλέγματος, κ.ά. Τέλος, τα αποτελέσματα της διαδικασίας οπτικοποιούνται και αναλύονται για να αξιολογηθούν (ANSYS I. , ANSYS CFX Introduction, 2016, pp. 4-5).

Στην παρούσα εργασία για την μελέτη χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS-CFX. Το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα για μία ολοκληρωμένη διαχείριση του προβλήματος, ενώ αποτελείται από τέσσερα επιμέρους λογισμικά. Κατά την χρήση του δίνεται επίσης η δυνατότητα τόσο της σχεδίασης εντός του λογισμικού όσο και της επεξεργασίας εξωτερικά εισαγόμενου μοντέλου. Στην παρούσα εργασία ο σχεδιασμός έχει πραγματοποιηθεί σε εξωτερικό λογισμικό (CATIA). Επίσης, σημειώνεται ότι παρέχεται και η δυνατότητα εισαγωγής έτοιμου πλέγματος από εξωτερικό λογισμικό, στην περίπτωση που ο χρήστης το επιθυμεί. Συγκεκριμένα, ο βασικός κορμός του πακέτου αποτελείται από τα λογισμικά που παρουσιάζονται στο [Σχήμα 5-1](#).



Σχήμα 5-1 Δομή ANSYS CFX (ANSYS, 2016, p. 8).

5.3 ΒΑΣΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ - ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ANSYS CFX

Το σύνολο των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται από το ANSYS CFX είναι οι χρονικά μη-μόνιμες διαφορικές εξισώσεις Navier-Stokes, στη συντηρητική τους μορφή. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς μάζας (εξίσωση συνέχειας), ορμής και διατήρησης της ενέργειας στην συντηρητική τους μορφή.

Η εξίσωση της συνέχειας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \times (\rho \vec{U}) = 0 \quad (5.1)$$

όπου ρ η πυκνότητα και \vec{U} το διάνυσμα της ταχύτητας σε Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Η διανυσματική εξίσωση της ορμής

μία για κάθε συνιστώσα της ορμής (τρεις εξισώσεις)

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla \times (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \tau + \vec{S}_M \quad (5.2)$$

όπου p τη στατική πίεση, τ ο τανυστής τάσης, S_M ο όρος πηγής,

όπου ο τανυστής τάσης τ σχετίζεται με ρυθμό παραμόρφωσης ως:

$$\tau = \mu (\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T) - \frac{2}{3} \delta \nabla \vec{U} \quad (5.3)$$

όπου μ το μοριακό ιξώδες, T η στατική θερμοκρασία και δ ο μοναδιαίος πίνακας.

Η εξίσωση διατήρησης της ενέργειας

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{U} h_{tot}) = \nabla (\lambda \nabla T) + \nabla (\vec{U} \tau) + \vec{U} S_M + S_E \quad (5.4)$$

όπου S_E ο όρος πηγής, λ η θερμική αγωγιμότητα, h_{tot} είναι η ειδική ολική ενθαλπία, σχετιζόμενη με την στατική ενθαλπία $h(T,p)$ ως:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \vec{U}^2 \quad (5.5)$$

όπου h η ειδική στατική ενθαλπία και $\nabla (\vec{U} \tau)$ αντιπροσωπεύει το έργο που παράγεται από τις διατμητικές τάσεις και $\vec{U} S_M$ αντιπροσωπεύει το παραγόμενο έργο από τις εξωτερικές πηγές ορμής.

Η εξίσωση της θερμικής ενέργειας

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{U} h) = \nabla (\lambda \nabla T) + \vec{U} \nabla p + \tau : \nabla \vec{U} + \vec{S}_E \quad (5.6)$$

Όπου ο όρος $\tau : \nabla \vec{U}$ είναι πάντα θετικός, ονομάζεται ιξώδης διάχυση (*viscous dissipation*) και μοντελοποιεί την εσωτερική θέρμανση με βάση το ιξώδες στο ρευστό (ANSYS I. , Ansys CFX-Solver Theory Guide, 2021, pp. 42-43).

5.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα, το οποίο είναι αντικείμενο της παρούσας εργασίας, αφορά στη διαχείριση της ροής διαμέσου της σχεδίασης αεραγωγών με στόχο τον έλεγχο μιας ομοιόμορφης κατανομής θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου, συνυπολογίζοντας την υφιστάμενη κατασκευή του οχήματος και τους περιορισμούς που τίθενται. Όπως έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στην αρχή της εργασίας, η θερμότητα, την οποία εκλύει η κυψέλη καυσίμου, ποικίλει ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή αλλαγή των αναγκών της ταχύτητας ροής αέρα εντός των καναλιών της κυψέλης, τόσο για την εκτέλεση της διαδικασίας οξείδωσης, η οποία απαιτεί συγκεκριμένη ποσότητα οξυγόνου για την πραγματοποίηση ολοκληρωμένης αντίδρασης, όπως αυτή οδηγεί στην παραγωγή του

ηλεκτρισμού, όσο και για την κομβική λειτουργία της ρύθμισης της θερμοκρασίας, η οποία αφορά την ψύξη, ενώ προσοχή απαιτεί να μην επέλθουν συνθήκες υπερψύξης. Η θερμότητα θα πρέπει να κατανέμεται ομοιόμορφα, ώστε κατά την λειτουργία το σώμα της κυψέλης να βρίσκεται εντός συνθηκών βέλτιστης θερμοκρασίας, ανάλογα με το ρυθμό λειτουργίας της όπου αυτό είναι εφικτό, ενώ σε καμία περίπτωση να μην παραβιάζονται οι ακραίες επιτρεπτές τιμές, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε μη αναστρέψιμα καταστροφικά αποτελέσματα για την κυψέλη καυσίμου. Ο έλεγχος της ροής πραγματοποιείται από έναν ανεμιστήρα, ο οποίος έχει εγκατασταθεί στο όχημα και λαμβάνει εντολές από ένα ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτρονικού ελέγχου. Το σύστημα ρυθμίζει, βάση μετρήσεων τιμών θερμοκρασίας, την ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα για την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου. Στην εργασία αυτή θεωρείται δεδομένο και ως εκ τούτου δεν μελετάται η αντικατάστασή του. Προφανώς, η απαγωγή θερμότητας από την κυψέλη σχετίζεται άμεσα με την ταχύτητα ροής που επιτυγχάνεται από το σύστημα, ενώ εξίσου σημαντική είναι η κατανομή αυτής επί της επιφάνειας εισαγωγής της κυψέλης, ενώ επίσης επιβάλλονται ακρότατα όρια διαφοράς θερμοκρασίας επί της επιφάνειας εξαγωγής, όπως περιγράφεται (Παρ. 2.2.1.2.2), για την ομοιόμορφη λειτουργία του συστήματος. Οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν άμεσα τόσο την στιγμιαία απόδοση όσο και τον χρόνο ζωής της κυψέλης καυσίμου. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται πώς τα δύο τελευταία, δηλαδή η ταχύτητα ροής επί της επιφάνειας εισαγωγής της κυψέλης καυσίμου και το αποτέλεσμα αυτής στην θερμοκρασία της επιφάνειας εξαγωγής της κυψέλης, αναπτύσσονται στο σύστημα, υπό την επιρροή έξι διαφορετικών διατάξεων εισαγωγής και μία διάταξη εξαγωγής της ροής, όπως έχουν αναλυθεί παραπάνω. Στόχος είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη βελτίωση του συστήματος τροφοδοσίας αέρα, δηλαδή την επίτευξη μίας ομοιόμορφης απαγωγής θερμότητας από την κυψέλη καυσίμου διαμέσου της ροής που επιτυγχάνεται στα συστήματα που έχουν σχεδιαστεί. Η συνθήκες για τις οποίες πραγματοποιείται η μελέτη αφορούν την χειρίστη περίπτωση που δύναται να βρεθεί το όχημα και στην οποία το σύστημα καλείται να ανταποκριθεί.

Οι συνθήκες των προσομοιώσεων αφορούν την στατική κατάσταση του οχήματος μετά από μία έντονη ζήτηση ισχύος από την κυψέλη, η οποία έχει αναπτύξει την ανώτατη επιτρεπτή θερμοκρασία και εκλύει την μέγιστη ποσότητα θερμότητας, καθώς το σύστημα ελέγχου έχει θέσει στο μέγιστο τη λειτουργία του ανεμιστήρα για την απομάκρυνση της θερμότητας. Σημειώνεται ότι, οι τιμές παραγωγής θερμότητας αφορούν κυψέλη η οποία βρίσκεται στο τέλος χρόνου ζωής της, όπως προτείνεται και από τους κατασκευαστές για τη μελέτη και διαστασιολόγηση του συστήματος ψύξης.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή της κυψέλης και την σχέση υπολογισμού παραγωγής θερμότητας (2.9) η παραγόμενη θερμότητα ισούται 56.48W/cell. Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, η κυψέλη εφαρμογής διαθέτει $n=28$ κελιά, επομένως η παραγόμενη θερμότητα ισούται με 1581,44W για το σύνολο του όγκου της κυψέλης. Δεδομένου του όγκου αυτής γίνεται η αναγωγή της τιμής θερμότητας για το συμμετρικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται στην προσομοίωση, θωρώντας την τιμή έκλυσης θερμότητας από το ήμισυ του όγκου της κυψέλης καυσίμου. Επίσης, δεδομένου ότι έχει ήδη προεπιλεχθεί ο ανεμιστήρας της εφαρμογής, και δεδομένου ότι ο ανεμιστήρας θεωρείται ότι τίθεται από το σύστημα στο μέγιστο της λειτουργίας των στροφών του, προκύπτει η μέγιστη παροχή μάζας στο σύστημα.

Επιπλέον του σεναρίου ψύξης για στατική κατάσταση οχήματος, πραγματοποιήθηκε μέσα στην μελέτη και μία προσομοίωση για κινούμενο όχημα με μέση ταχύτητα ίση με 20km/h,

για τιμές έκλυσης θερμότητας και παροχής μάζας ίδιες με την περίπτωση του οχήματος σε στατική κατάσταση.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες αφορούν τους 25 °C θερμοκρασίας ατμοσφαιρικού αέρα, ως ρευστό χρησιμοποιείται ο αέρας ως ιδανικό αέριο, ενώ η ατμοσφαιρική πίεση θεωρείται ίση με 100.000 Pa. Το σύστημα θεωρείται αδιαβατικό, ενώ δεν λαμβάνεται υπόψη η θερμική ακτινοβολία.

5.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ANSYS CFX

5.5.1 Γενικά

Κατά την μελέτη του συστήματος ψύξης προσομοιώθηκαν έξι μοντέλα (*Πίνακας 5-1*), τα οποία θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες. Το μοντέλο με σύστημα εισαγωγής τύπου Scoop και αυτό το οποίο χρησιμοποιεί αεραγωγό τύπου NACA.

Στην πρώτη περίπτωση του Scoop, μελετήθηκε η εισαγωγή ως προς την τοπολογία και γεωμετρία των πτερυγίων. Συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση μελετήθηκαν δύο ζεύγη οριζόντιων διακοπτόμενων πτερυγίων, όπου στη συνέχεια βάση των αποτελεσμάτων τα ζεύγη πτερυγίων ενοποιήθηκαν, δημιουργώντας έτσι δύο ενιαία οριζόντια πτερύγια τα οποία διατρέχουν όλο τον αεραγωγό. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση όπου εξετάζεται η επίδραση της θέσης των πτερυγίων στην κατανομή της ταχύτητας ροής επί της επιφάνειας εισαγωγής της κυψέλης. Τέλος, για την πρώτη περίπτωση, εισήχθησαν επιπλέον κάθετα πτερύγια, τα οποία εκτείνονται καθ' όλο το μήκος του αεραγωγού για τον επιπλέον έλεγχο και κατεύθυνση της ροής, δημιουργώντας μικρότερα εσωτερικά κανάλια ροής στον αγωγό. Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για το όχημα σε στάσιμη κατάσταση.

Στην δεύτερη περίπτωση, το σύστημα εισαγωγής του αέρα τροποποιήθηκε, μειώνοντας το κάθετο ύψος του αγωγού τύπου "S", ώστε να μην εξέρχεται από τα όρια του αυτοκινήτου, ενώ για την τροφοδοσία του κατασκευάστηκαν αεραγωγοί τύπου NACA. Όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως, την προσπάθεια σχεδίασης κατά το δυνατόν αποδοτικότερων εμφωλευμένων αεραγωγών, ακολούθησαν τα ακροφύσια του αγωγού "S" με διαστάσεις τέτοιες ώστε να υπάρχει η ομαλότερη ροή από τους αεραγωγούς εντός του αγωγού "S". Κατά τις προσομοιώσεις της περίπτωσης των αεραγωγών τύπου NACA διατηρούνται τα χαρακτηριστικά εσωτερικών πτερυγίων με ελαφριά τροποποίηση των κάθετων πτερυγίων ως προς την οριζόντια θέση έδράσής τους, σύμφωνα με τις προσομοιώσεις της πρώτης κατηγορίας. Στην περίπτωση αυτή κατασκευάστηκαν για κάθε ακροφύσιο δύο εισαγωγές τύπου NACA, χωρίς και με χείλος πρόσπτωσης. Η πρώτη των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε για στάσιμο όχημα, ενώ η δεύτερη για σταθερή ταχύτητα του οχήματος.

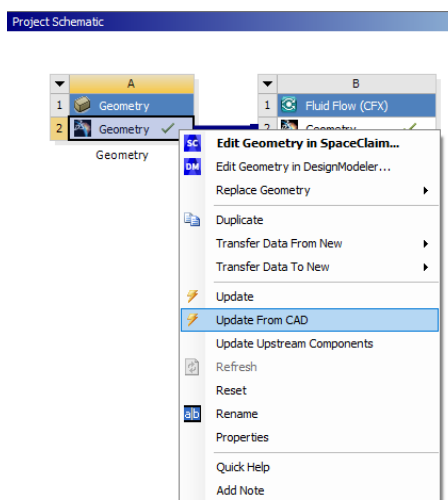
Πίνακας 5-1 Κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης.

Τύπος Εισαγωγής	A/A Μοντέλου	Μοντέλο	Εσωτερικά Πτερύγια	Χαρακτηριστικά Scoop/NACA
A Scoop-S Duct	1	A-1 Scoop-S Duct	διαχωρισμένα, οριζόντια	σταθερά
	2	A-2 Scoop-S Duct	ενοποιημένα, οριζόντια	σταθερά
	3	A-3 Scoop-S Duct	ενοποιημένα, οριζόντια	σταθερά
	4	A-4 Scoop-S Duct	ενοποιημένα, οριζόντια & κάθετα	σταθερά
B NACA-S Duct	5	B-1 NACA-S Duct	ενοποιημένα, οριζόντια & κάθετα	χωρίς χείλος
	6	B-2 NACA-S Duct	ενοποιημένα, οριζόντια & κάθετα	προσθήκη χείλους

5.5.2 Εισαγωγή Μοντέλου

Σε όλες τις περιπτώσεις (έξι προσομοιώσεις) χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα τα οποία σχεδιάστηκαν στο CATIA απευθείας χωρίς ενδιάμεσο τύπο εξαγωγής (π.χ. STEP, STL, IGES κ.ά.). Η δυνατότητα αυτή δίνεται από το ANSYS μέσω μεταφραστών (Geometry interfaces) που παρέχονται, οι οποίοι αναγνωρίζουν τις επιφάνειες και τα στερεά τα οποία κατά την εισαγωγή είναι εμφανή στο χώρο σχεδίασης του προγράμματος σχεδίασης, ενώ ο χρήστης καλείται να ρυθμίσει τα είδη των αντικειμένων τα οποία θα περνούν στο περιβάλλον του ANSYS, απορρίπτοντας για παράδειγμα στοιχεία ακμών, καμπυλών, κ.ά (Line Bodies). Εισάγοντας τα μοντέλα καθ' αυτό τον τρόπο παρουσιάζονται στο ANSYS μόνο οι οντότητες στερεών σωμάτων και επιφανειών. Οι επιφάνειες, καθώς και τα στερεά μοντέλα κατά την εισαγωγή τους διατηρούν τις ονομασίες που τους έχουν δοθεί στο σχεδιαστικό πρόγραμμα (CATIA). Η διαδικασία της απευθείας μεταφόρτωσης του μοντέλου δίνει τη δυνατότητα της απευθείας ανανέωσής του μέσα από το ANSYS («Update From CAD») (*Εικόνα 5-1*), στην περίπτωση που γίνει αντιληπτή κάποια απαραίτητη τροποποίηση εντός του ANSYS και πραγματοποιηθεί η τροποποίησή του στο σχεδιαστικό πρόγραμμα (CATIA). Με την διαδικασία αυτή δεν απαιτείται η παρεμβολή των σχεδιαστικών εργαλείων του ANSYS και ως εκ τούτου οποιαδήποτε μεταβολή του μοντέλου βρίσκεται εντός του αρχικού αρχείου CATIA. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα που δίνεται είναι ότι την ανανέωση του μοντέλου μέσα από το ANSYS την ακολουθούν αυτόματα τα συνδεδεμένα με αυτό μέρη, όπως το πρόγραμμα διακριτοποίησης (Meshing), το πρόγραμμα ορισμού του προβλήματος (Pre) κ.λπ., χωρίς να απαιτείται εκ νέου ορισμός στα στάδια της προσομοίωσης. Αυτό συμβαίνει καθώς σε κάθε ανάλογο πρόγραμμα ορίζονται οι παράμετροι μέσω «Name Selection», τα οποία σχετίζονται με στερεά ή επιφάνειες του μοντέλου εισαγωγής. Συνεπώς, η τροποποίηση του μοντέλου CAD, μέσω της ανανέωσής του στο ANSYS, αναγνωρίζεται μέσα από την αντιστοίχιση των δομικών στοιχείων του μοντέλου με το εργαλείο «Name Selection», γεγονός το οποίο οδηγεί σε μία δυναμική διαδικασία εξοικονόμησης χρόνου. Για παράδειγμα, η τροποποίηση των θέσεων των εσωτερικών πτερυγίων μέσω μεταβλητής στο CATIA, η οποία δεν συστήνει νέες ή καταργεί υφιστάμενες επιφάνειες, αλλά απλά τις μετακινεί στο χώρο του μοντέλου, αναγνωρίζεται από το σύστημα, το οποίο διατηρεί τα προκαθορισμένα «Name Selection» για την αντίστοιχη οντότητα. Δεδομένης της παραπάνω δυνατότητας εκτυλίσσεται κανονικά η ανανέωση με βάση τις αλλαγές που έχουν επέλθει, όπως για παράδειγμα μία εκ νέου

διακριτοποίηση (remeshing) του μοντέλου. Το «Name Selection» δεν είναι άλλο από τη ονοματοδοσία επιφανειών και στερεών εντός του ANSYS, για τη ευκολότερη διαχείρισή τους κατά τη διαδικασία ρύθμισης μίας προσομοίωσης, όπως γίνεται αντιληπτό και παρακάτω. Σημειώνεται ότι εκτός από την δυνατότητα αναγνώρισης των μοντέλων, που παρέχεται μέσω μεταφραστών, σε νεότερες εκδόσεις του ANSYS δίνεται και η δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας (Bidirectional) σχεδιαστικού προγράμματος-ANSYS, με τη δυνατότητα αναγνώρισης και τροποποίησης των μεταβλητών στο περιβάλλον του ANSYS, κατά την λήξη μίας προσομοίωσης. Ωστόσο δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 5-1 Εντολή Update From CAD, ANSYS.

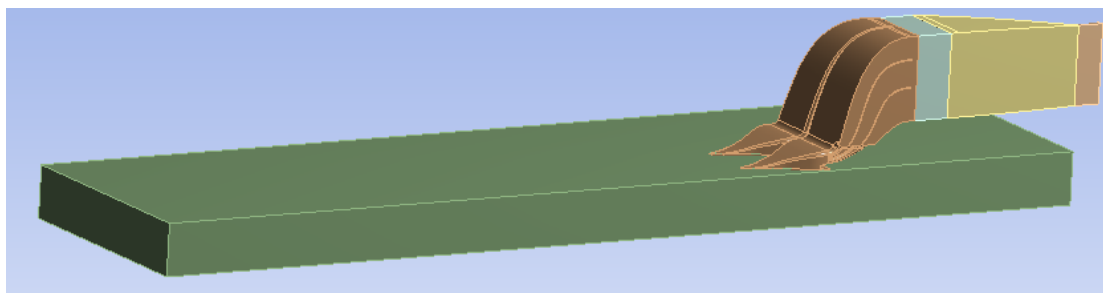
5.5.3 Mesh Generation – Meshing

Η λογική που ακολουθείται κατά την κατασκευή των αριθμητικών πλεγμάτων διακριτοποίησης (Meshes) όλων των μοντέλων είναι η ίδια και για το λόγο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος κατασκευής ως παράδειγμα για ένα μοντέλο, ενώ τελικά παρουσιάζονται τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν και οι λεπτομέρειές τους. Κύριος περιορισμός κατά την διαδικασία που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η δυνατότητες του Η/Υ που χρησιμοποιείται, με έμφαση στην διαθέσιμη μνήμη RAM και στους επεξεργαστές που διατίθενται για την προσομοίωση. Κατά τη δημιουργία του πλέγματος, δεδομένων των ιδιοτήτων του διαθέσιμου Η/Υ που χρησιμοποιήθηκε, δύναται έμφαση να μην ξεπεραστούν τα 40,000,000 στοιχεία (elements), τα οποία όπως αποδείχθηκε οριακά διαχειρίστηκε ο Η/Υ και ως εκ τούτου στα επόμενα μοντέλα μειώθηκαν στο μισό τα στοιχεία.

Η παρούσα μελέτη σε κάθε περίπτωση προσομοίωσης, χρησιμοποιεί πέντε διαφορετικούς όγκους για να προσεγγίσει το μοντέλο. Το συνολικό μοντέλο αποτελείται από τον όγκο του αέρα του περιβάλλοντος και τους όγκους ρευστού που διατρέχουν την εισαγωγή, την κυψέλη καυσίμου, την εξαγωγή και τον ανεμιστήρα. Η πρακτική αυτή ακολουθείται, καθώς υπάρχει η απαίτηση εξατομικευμένης διακριτοποίησης ανάλογα με την περιοχή του μοντέλου, διότι υπάρχουν περιοχές υψηλού ενδιαφέροντος και περιοχές οι οποίες δεν καθιστούν κομβική την λεπτομερή διακριτοποίηση τους. Δεδομένων των υπολογιστικών πόρων που διατίθενται κατά την εφαρμογή, επιλέγεται όπως θα φανεί παρακάτω για τις περιοχές υψηλότερου ενδιαφέροντος πυκνότερο και λεπτομερέστερο πλέγμα, το οποίο περιγράφει σε ικανοποιητικό βαθμό την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας, σε αντίθεση με την περιοχή η οποία αντιπροσωπεύει τον αέρα περιβάλλοντος, εξοικονομώντας πόρους. Κατά τις εφαρμογές σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευάζονται μη δομημένα πλέγματα τα οποία

αποτελούνται από τετράεδρα και εξάεδρα στοιχεία, ανάλογα με την γεωμετρία του όγκου διακριτοποίησης.

Στις εφαρμογές, όπως σημειώθηκε παραπάνω, ακολουθείται η ίδια μέθοδος και λογική δημιουργίας των πλεγμάτων, με μικρές διαφορές ανάλογα με τις περιπτώσεις. Για το λόγο αυτό παρουσιάζεται ο κύριος άξονας κατασκευής των πλεγμάτων. Μετά την εισαγωγή του μοντέλου CAD (*Εικόνα 5-2*), ξεκινά η επεξεργασία του στο λογισμικό «Meshing». Το πρώτο στάδιο είναι ο ορισμός «Name Selections», ώστε να καθίσταται εύκολη η διαχείριση του μοντέλου, καθώς και η δυναμική διαχείριση των ορισμών, σε σχέση με τις επόμενες τροποποιήσεις.

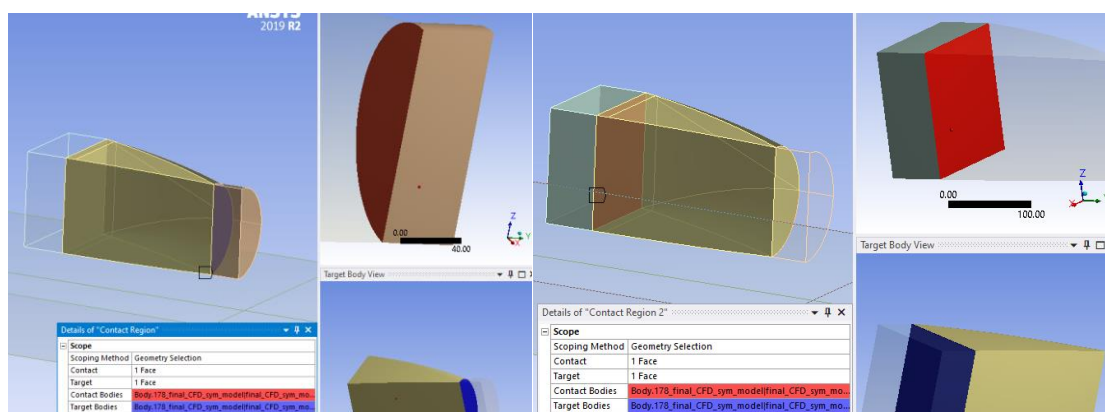


Εικόνα 5-2 Εισαγωγή όγκων στο ANSYS, Meshing.

Έτσι, επιλέγονται διαδοχικά οι επιφάνειες και τα στερεά που χρησιμοποιούνται με ειδικότερο τρόπο, τόσο για τη δημιουργία του πλέγματος όσο και για τον ορισμό σε επόμενο στάδιο των οριακών συνθηκών, ενώ επίσης ομαδοποιούνται ανάλογα με τον όγκο που ανήκουν. Επιγραμματικά αναφέρεται για παράδειγμα ότι ορίζονται με όνομα οι περιοχές εισόδου και εξόδου του ρευστού από τους όγκους, οι επιφάνειες συμμετρίας του μοντέλου, οι επιφάνειες οι οποίες είναι τα τοιχώματα της κατασκευής κ.ά. Έχοντας ορίσει με «Name Selection» τις επιφάνειες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν με ειδικότερο τρόπο και μεταφέρονται και στο στάδιο ορισμού του προβλήματος, η διαδικασία προχωρά στον ορισμό των επιφανειών διεπαφής (interface) των όγκων, καθώς το μοντέλο όπως αναφέρθηκε αποτελείται από πέντε επιμέρους όγκους.

Interfaces

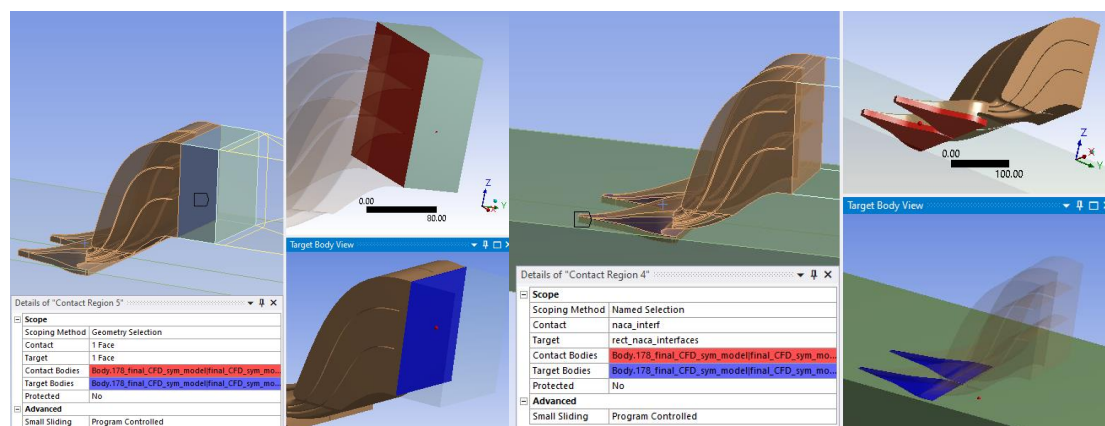
Για το συσχετισμό των όγκων τόσο για τη χρήση κατά την διακριτοποίηση όσο και για την χρήση ορισμού των οριακών συνθηκών σε επόμενο στάδιο απαιτείται ο ορισμός στα σημεία διεπαφής των πεδίων ροής “interfaces”, όπου πρακτικά οι επιφάνειες των μοντέλων



Εικόνα 5-3 Interface, α) (αριστερά) ανεμιστήρα-εξαγωγής, β) (δεξιά) εξαγωγής-κυψέλης καυσίμου.

τοπολογικά ταυτίζονται. Έτσι στο περιβάλλον του mesh ορίζονται τα τέσσερα “interfaces” των όγκων που κατασκευάστηκαν.

Ορίστηκε ένα interface για την διεπαφή ανεμιστήρα-εξαγωγή (Εικόνα 5-3α), ένα στο επίπεδο κυψέλης εξαγωγής-κυψέλης καυσίμου (Εικόνα 5-3β), ένα για το επίπεδο κυψέλης καυσίμου-εισαγωγής (Εικόνα 5-4α) και ένα για τα επίπεδα επαφής εισαγωγής-περιβάλλοντος αέρα (Εικόνα 5-4β).



Εικόνα 5-4 interfaces: α) (αριστερά) κυψέλης καυσίμου-εισαγωγής, β) (δεξιά) εισαγωγής-περιβάλλοντος αέρα.

Έχοντας ολοκληρωθεί ο ορισμός, η διαδικασία προχωρά στην κατασκευή του πλέγματος.

Καταρχάς, ορίζεται το βασικό μενού «Details of Mesh», το οποίο αφορά στο σύνολο του μοντέλου το οποίο έχει ως πρώτη υποκατηγορία αυτή του “Display” και αφορά στον τρόπο προβολής του πλέγματος, ο οποίος επιλέγεται ως “Use Geometry Setting”, για την οπτικοποίηση του πλέγματος.

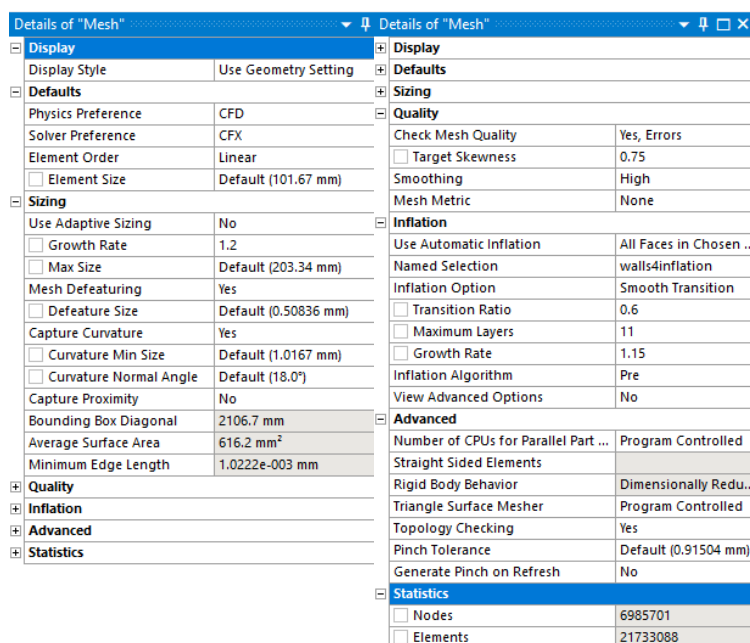
- Default Group (Εικόνα 5-5α)

Στην συνέχεια η επόμενη κατηγορία “Default” σχετίζεται με διάφορες μεθόδους για τη δημιουργία πλέγματος, οι οποίες σχετίζονται και με τον τύπο δημιουργίας του πλέγματος. Η αντίστοιχη μέθοδος ορίζεται ανάλογα με το φυσικό πρόβλημα το οποίο καλείται το σύστημα να επιλύσει, εάν και κατά την επιλογή του τύπου προβλήματος δύναται να επιλεγούν και διάφορες άλλες μέθοδοι στο πεδίο “Physics Preference”. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι οι:

- Mechanical
- Electromagnetics
- Explicit Dynamics
- CFD

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος CFD, η οποία είναι και η προεπιλογή. Ακολουθώντας της επιλογής CFD, στο πεδίο “Solver Preference”, δεδομένου ότι η προηγούμενη επιλογή αφορά πρόβλημα ρευστομηχανικής, δίνονται οι επιλογές που σχετίζονται με τον τύπο του προβλήματος, ώστε να επιλεγεί ο επιλύτης που θα χρησιμοποιηθεί για το φυσικό πρόβλημα, καθώς η κατασκευή του πλέγματος σχετίζεται με αυτόν, ενώ κατά την επιλογή του επιλύτη ορίζονται προεπιλογές που θα οδηγήσουν σε ένα πλέγμα που είναι ευνοϊκόκετρο για τον αντίστοιχο επιλύτη. Στην παρούσα επιλέγεται ο επιλύτης CFX. Ο ορισμός του μεγέθους των στοιχείων (Element Size), αφορά στο μέγεθος πλευράς στοιχείου και αφορά στο σύνολο του μοντέλου (ANSYS, Ansys Meshing User's Guide, 2021, pp. 93-98).

Η τιμή προεπιλογής δεν τροποποιείται, καθώς σε επόμενο στάδιο τα μεγέθη ορίζονται αναλυτικά και εξατομικευμένα για κάθε όγκο και επιφάνεια.



Εικόνα 5-5 Details of Mesh, (από αριστερά) α) Display, Defaults, Sizing β) Quality, Inflation, Advanced, Statistics.

- **Sizing Group** (Εικόνα 5-5α)

Use Adaptive Sizing Function

Η επιλογή αυτή παρέχει μεγαλύτερο έλεγχο σε σχέση με το μέγεθος των στοιχείων. Συγκεκριμένα, δίνει τη δυνατότητα ελέγχου των γωνιών μεταξύ των στοιχείων, της ανάλυσης τους, μέσης επιφάνειας και ελάχιστης ακμής στοιχείων κ.ά. Ωστόσο, η επιλογή δεν χρησιμοποιείται (No), καθώς αποκλείει δυνατότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται σε επόμενο στάδιο.

Growth Rate

Η επιλογή δίνει την δυνατότητα ορισμού του ρυθμού κατά τον οποίο προκύπτει η αύξηση στο μήκος των ακμών του στοιχείου (element) σε κάθε επόμενο στρώμα στοιχείων. Για παράδειγμα, ένας ρυθμός ανάπτυξης 1.2 έχει ως αποτέλεσμα μια αύξηση 20% στο μήκος της ακμής του στοιχείου με κάθε επόμενο στρώμα στοιχείων. Δεδομένου ότι πρόκειται για το συνολικό μοντέλο και για να μην τεθεί περιορισμός ως προς τους στη συνέχεια οριζόμενους σε επιμέρους τμήματα του μοντέλου “Growth Rate” ρυθμού, ορίζεται ένας έντονος ρυθμός αύξησης με τιμή 1.2 ο οποίος είναι και η προεπιλογή.

Max Size

Η επιλογή αυτή θέτει το μέγιστο μέγεθος που θα επιτρέπεται να λάβουν τα στοιχεία ελέγχου στο πλέγμα. Επιλέγεται η τιμή προεπιλογής για την αποφυγή περιορισμών, καθώς ειδικότερα θα τεθούν ανά όγκο και επιφάνεια συγκεκριμένα μεγέθη.

Mesh Defeaturing

Με την επιλογή “Yes” επιτρέπεται στην εφαρμογή να καταργεί αυτόματα μικρά χαρακτηριστικά και προβληματική γεωμετρία, σύμφωνα με το μέγεθος “Defeature Size” που καθορίζεται παρακάτω.

Defeature Size

Στην επιλογή αυτή ορίζεται με θετική τιμή το μέγεθος των στοιχείων του μοντέλου τα οποία δύναται να απαλειφθούν για την απλοποίηση και βελτίωση του μοντέλου. Ομοίως με τους προηγούμενους ορισμούς, διατηρείται η τιμή προεπιλογής του προγράμματος.

Capture Curvature

Όταν ενεργοποιείται η επιλογή, όπως και πραγματοποιήθηκε στις προσομοιώσεις, ο αλγόριθμος εξετάζει την καμπυλότητα στα άκρα και τις όψεις του μοντέλου και υπολογίζει τα μεγέθη στοιχείων, έτσι ώστε το μέγεθος να μην παραβιάζει το μέγιστο μέγεθος (Maximum Size) ή την κάθετη γωνία (Normal Angle) καμπυλότητας, τα οποία είτε υπολογίζονται αυτόματα από το πλέγμα είτε καθορίζονται από τον χρήστη.

Curvature Min Size

Στο πεδίο αυτό ορίζεται το ελάχιστο μέγεθος καμπυλότητας το οποίο ο αλγόριθμος καλείται να προσεγγίσει με στοιχεία. Διατηρείται η τιμή προεπιλογής για το γενικό ορισμό του πλέγματος, όπως και παραπάνω.

Curvature Normal Angle

Η τιμή που ορίζεται σε αυτό το πεδίο αντιπροσωπεύει τη μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία που εκτείνεται ένα άκρο στοιχείου δεδομένης της συγκεκριμένης καμπυλότητας γεωμετρίας. Το πεδίο μπορεί να λάβει τιμές από 0-180°. Στις εφαρμογές ορίζεται τιμή ίση με 18°.

Capture Proximity

Το πεδίο αυτό εάν ενεργοποιηθεί δίνει την δυνατότητα να καθοριστεί ο ελάχιστος αριθμός δημιουργίας επιπέδων (layers) στοιχείων (elements) σε περιοχές που αποτελούν κενά στη γεωμετρία. Στην παρούσα εργασία δεν χρησιμοποιείται (ANSYS, Ansys Meshing User's Guide, 2021, pp. 98-117)

- Quality Group (Εικόνα 5-58)

Check Mesh Quality

Το πεδίο αυτό καθορίζει πώς συμπεριφέρεται το λογισμικό σε σχέση με τα όρια σφάλματος και προειδοποίησης. Το πεδίο ορίζεται ως “Yes, Errors” όπου εάν ο αλγόριθμος πλέγματος δεν μπορεί να δημιουργήσει ένα πλέγμα που να υπερβαίνει όλα τα όρια σφάλματος, εκτυπώνεται ένα μήνυμα σφάλματος και το πλέγμα αποτυγχάνει, ενώ η τιμή αποτελεί προεπιλογή του συστήματος.

Target Skewness

Η τιμή του πεδίου οδηγεί σε βελτιώσεις των τετραεδρικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται, διορθώνοντας τη λοξότητα των στοιχείων. Ο έλεγχος της τιμής προτείνεται όταν εκτελείται προσομοίωση που είναι ευαίσθητη στην ποιότητα του πλέγματος. Το εύρος τιμών κυμαίνεται από 0 (υψηλότερη ποιότητα) έως 1 (χαμηλότερη ποιότητα), ενώ στην παρούσα χρησιμοποιήθηκε μία τιμή ίση με 0.75.

Smoothing

Η δυνατότητα αυτή επιχειρεί να βελτιώσει (εξομαλύνει) την ποιότητα των στοιχείων, μετακινώντας τις θέσεις των κόμβων σε σχέση με τους περιβάλλοντες κόμβους και στοιχεία. Η επιλογή “Low”, “Medium” ή “High” ελέγχει τον αριθμό των επαναλήψεων εξομάλυνσης, όπου χρησιμοποιήθηκε η επιλογή “High” όπως τίθεται και ως προεπιλογή (ANSYS, Ansys Meshing User's Guide, 2021, pp. 117-144).

- Inflation (Εικόνα 5-56)

Use Automatic Inflation

Σε αυτό το πεδίο ορίζονται οι επιφάνειες στις οποίες είναι επιθυμητή η προσθήκη “inflation” για την λεπτομερέστερη μελέτη του οριακού στρώματος του μοντέλου. Μέσα από διάφορες επιλογές εφαρμόζεται αυτή του “All Faces in Chosen Named Selection”, ενώ έχει προηγηθεί η ομαδοποίηση όλων των τοιχωμάτων της κατασκευής εκτός του όγκου της κυψέλης υδρογόνου (καθώς προσομοιώνεται ως πορώδες μέσο). Κατ’ αυτό τον τρόπο ορίστηκαν οι επιφάνειες που είναι επιθυμητό να προστεθεί “inflation”.

Inflation Option

Η επιλογή αυτή καθορίζει τον τρόπο ορισμού του ύψους των layer του inflation. Μεταξύ άλλων ορίζεται η επιλογή “Smooth Transition” η οποία είναι και προεπιλογή του συστήματος. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιεί το μέγεθος των τοπικών τετράεδρων στοιχείων για να υπολογίσει τοπικά το αρχικό και το συνολικό ύψος του inflation, ώστε ο ρυθμός μεταβολής των στρωμάτων να είναι ομαλός. Κάθε τρίγωνο που διογκώνεται θα έχει ένα αρχικό ύψος που υπολογίζεται σε σχέση με το εμβαδόν του, που υπολογίζεται κατά μέσο όρο στους κόμβους.

Transition Ratio

Η τιμή του πεδίου αυτού ορίζει τον ρυθμό με τον οποίο αναπτύσσονται τα γειτονικά στοιχεία. Στην παρούσα εργασία ορίστηκε ως 0.6.

Maximum Layers

Η τιμή του πεδίου ορίζει το μέγιστο αριθμό των επιπέδων του στρώματος του “inflation”. Στην παρούσα εργασία ορίστηκαν 11 επίπεδα.

Growth Rate

Ο έλεγχος Growth Rate καθορίζει το σχετικό πάχος των παρακείμενων επιπέδων του “inflation” και ορίζεται ως 1.15.

Inflation Algorithm

Με την παράμετρο αυτή ορίζεται ποιος αλγόριθμος για την κατασκευή του “inflation” χρησιμοποιείται, ενώ επιλέχθηκε η προεπιλογή “Pre”.

- Advanced Group (Εικόνα 5-56)

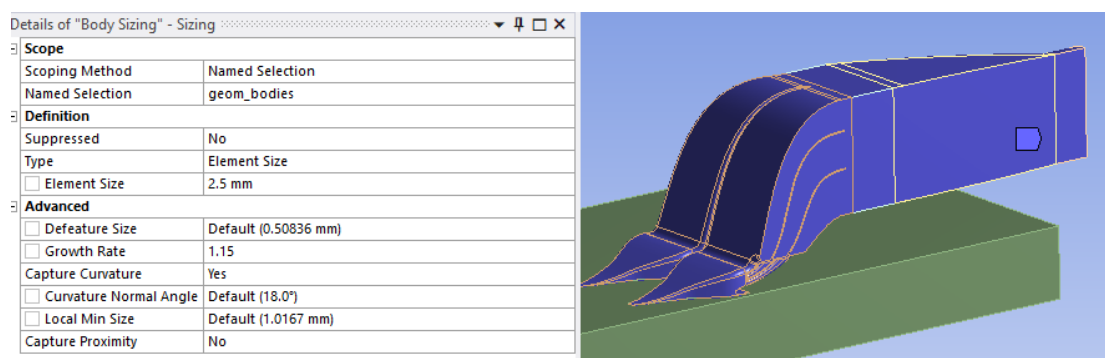
Το συγκεκριμένο Group δίνει την δυνατότητα ελέγχου των CPU που θα χρησιμοποιηθούν, της εφαρμογής καμπυλότητας στις ακμές των στοιχείων που περιγράφουν καμπύλα τμήματα της γεωμετρίας, την στρατηγική που ακολουθεί το πλέγμα επιφάνειας των πρισμάτων, τον τοπολογικό έλεγχο του πλέγματος, την απαλοιφή μικρών σε μέγεθος χαρακτηριστικών του

επιπέδου του πλέγματος και άλλα χαρακτηριστικά, τα οποία στην παρούσα δεν χρησιμοποιήθηκαν ή εφαρμόστηκαν οι προεπιλεγμένες από το σύστημα τιμές για την απλοποίηση της διαδικασίας. (ANSYS, Ansys Meshing User's Guide, 2021, p. 175)

- Statistics Group (Εικόνα 5-5b)

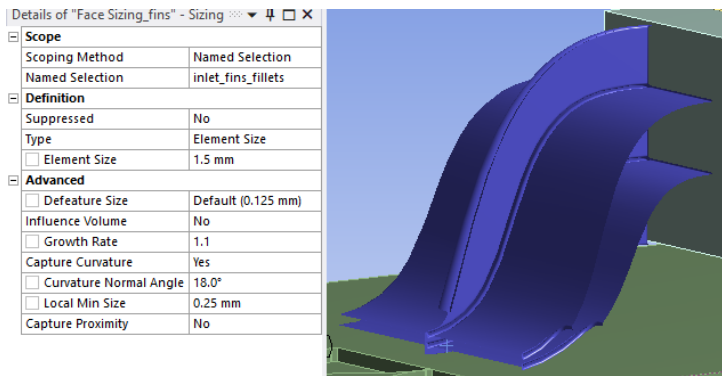
Στο πεδίο αυτό παρέχεται η πληροφορία μεγέθους του πλέγματος για το σύνολο του μοντέλου μέσα από τον προσδιορισμό του αριθμού των κόμβων και των στοιχείων από τα οποία αποτελείται το πλέγμα. (ANSYS, Ansys Meshing User's Guide, 2021, p. 193)

Στην συνέχεια επιλέχθηκαν οι όγκοι που ορίζουν την γεωμετρία της κατασκευής μέσα από ορισμένο “Name Selection” και με την εντολή “Sizing” πραγματοποιείται μεγαλύτερος έλεγχος του ορισμού πλέγματος για τα σχετιζόμενα πεδία (“Body Sizing”). Συγκεκριμένα ορίζεται το μέγεθος των στοιχείων για τους όγκους αυτούς με την τιμή 2.5 mm ενώ ο ρυθμός ανάπτυξης των στοιχείων ορίστηκε ίσος με 1.15. Η κάθετη γωνία προσέγγισης (Curvature Normal Angle) των καμπύλων τμημάτων της γεωμετρίας ορίζεται, ομοίως με το κύριο ως άνω περιγραφόμενο κομμάτι του Mesh που αφορά όλο το μοντέλο, ίση με 18°, ενώ η τιμή “Curvature Min Size” παίρνει την προεπιλεγμένη τιμή (Εικόνα 5-6).



Εικόνα 5-6 Body Sizing, όγκοι κατασκευής.

Στην συνέχεια ορίστηκε ειδικός έλεγχος του πλέγματος “Face Sizing” για τα εσωτερικά περυσία της διάταξης εισαγωγής, επιλέγοντας το αντίστοιχο “Name Selection”, καθώς διαφέρουν σημαντικά σε μέγεθος από τον υπόλοιπο όγκο. Το μέγεθος των στοιχείων (Element Size) ορίστηκε με τιμή 1.5 mm ενώ ο ρυθμός ανάπτυξης (Growth Rate) των στοιχείων προς το εσωτερικό της γεωμετρίας ίσος με 1.1, για την ομαλότερη μετάβαση και τελικά την αναλυτικότερη λύση του προβλήματος πλησίον αυτών, καθώς αποτελούν κομβικό σημείο της γεωμετρίας. Ακολούθως χρησιμοποιήθηκε τιμή ίση με 18° για την προσέγγιση της καμπυλότητας των περυγίων από τα στοιχεία του πλέγματος με την παράμετρο “Curvature Normal Angle”, επιτρέποντας την απαλοιφή χαρακτηριστικών των περυγίων με την παράμετρο “Defeature Size” που έχουν μέγεθος μικρότερο από 0.125 mm, ενώ η γεωμετρία δύναται να προσεγγιστεί με ελάχιστη τιμή ακμής στοιχείου “Local Min Size” ίση με 0.25 (Εικόνα 5-7).



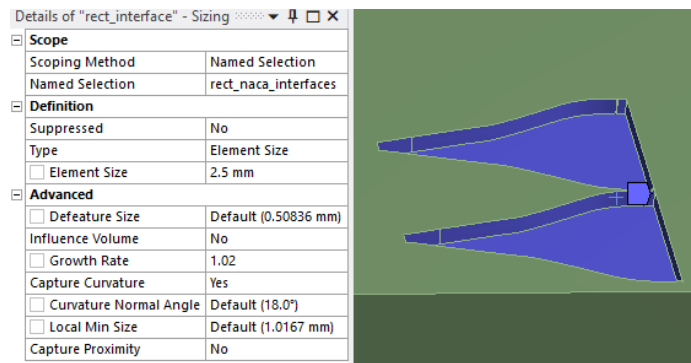
Εικόνα 5-7 Face Sizing, εσωτερικά περύγια εισαγωγής.

Για την προσέγγιση του ατμοσφαιρικού αέρα από το πλέγμα και στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε το τεταρτοσφαίριο για τα μοντέλα του Scoor και στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο για τα μοντέλα NACA, ορίστηκαν διαφορετικές παράμετροι πλέγματος για την μείωση των στοιχείων αυτού. Συγκεκριμένα, για το σύνολο του κάθε όγκου εισήχθη νέο "Body Sizing", όπου χρησιμοποιήθηκε τιμή για το μέγεθος των στοιχείων για την παράμετρο "Element Size" ίση με 27.0 mm ενώ ο ρυθμός ανάπτυξης "Growth Rate" ορίστηκε ίσος με 1.2 (Εικόνα 5-8). Επιπλέον, προστέθηκε "Face Sizing" το οποίο σχετίζεται με την διεπαφή (interface) των μοντέλων εισαγωγής και όγκου αντιπροσώπευσης περιβάλλοντος αέρα, καθώς απαιτείται η σύγκλιση του μεγέθους των στοιχείων των γεωμετριών για την αποφυγή υπολογιστικών σφαλμάτων που σχετίζονται με το πλέγμα. Κατά τον ορισμό του "Face Sizing" επιλέχθηκαν οι επιφάνειες διεπαφής των μοντέλων, όπου και ορίστηκαν τιμές στις παραμέτρους για το μέγεθος των στοιχείων, ίση με την αντίστοιχη παράμετρο του όγκου εισαγωγής, 2.5 mm, ενώ ο ρυθμός ανάπτυξης "Growth Rate" των στοιχείων από τις επιφάνειες αυτές προς το εσωτερικό του όγκου περιβάλλοντος αέρα ίση με 1.02, ώστε να επιτευχθεί μικρή ποσοστιαία αύξηση των στοιχείων προς το εσωτερικό, εξασφαλίζοντας ένα πυκνό πλέγμα γύρω από την διεπαφή μεταφοράς του αέρα προς την εισαγωγή συμβατό με το πλέγμα της εισαγωγής. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η εξομάλυνση των στοιχείων μεταξύ των δύο όγκων (Εικόνα 5-9).



Εικόνα 5-8 Body Sizing, όγκου περιβάλλοντος αέρα.

Έχοντας ορίσει τις παραμέτρους κατασκευής των πλεγμάτων, προστίθεται η διαδικασία "Merge Nodes". Η διαδικασία "Merge Nodes" είναι ένα εργαλείο επεξεργασίας πλέγματος το οποίο δίνει τη δυνατότητα συγχώνευσης των κόμβων του πλέγματος στερεών και επιφανειών, εντός καθορισμένης ανοχής, καθιστώντας το πλέγμα σύμμορφο ανάμεσα σε διαφορετικά σώματα (ANSYS, Ansys Meshing User's Guide, 2021, p. 467). Με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μεγάλος αριθμός ταύτισης των κόμβων μεταξύ των επιπέδων διεπαφής του μοντέλου.



Εικόνα 5-9 Face Sizing, διεπαφής όγκων εισαγωγής-περιβάλλοντος αέρα.

Σημειώνεται ότι ο επιλύτης CFX χρησιμοποιεί την μέθοδο GGI (General Grid Interface), η οποία καθορίζει τη συνδεσιμότητα μεταξύ των πλεγμάτων και στις δύο πλευρές της διεπαφής χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο τομής. Γενικά, παρέχονται δύο μέθοδοι διασταύρωσης, η μέθοδος “Bitmap Intersection” και η μέθοδος “Direct Intersection” οι ανάλυση των οποίων ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας (ANSYS, Ansys CFX-Pre User's Guide, 2021, pp. 304-305). Ωστόσο, αναφέρεται ότι κάθε σύνδεση GGI οδηγεί σε περίπου 5% περισσότερο χρόνος και μνήμη CPU, ενώ το ποσοστό αυτό ενδεχομένως να διαφέρει κατά πολύ, καθώς είναι συνάρτηση του αριθμού των κόμβων που εμπλέκονται σε μια σύνδεση GGI, σε σύγκριση με τον αριθμό των κόμβων που δεν εμπλέκονται στη σύνδεση GGI. Επίσης εξαρτάται από τη γεωμετρική πολυπλοκότητα της σύνδεσης (ANSYS, Ansys CFX-Solver Manager User's Guide, 2021, p. 181).

Πλέγματα μοντέλων

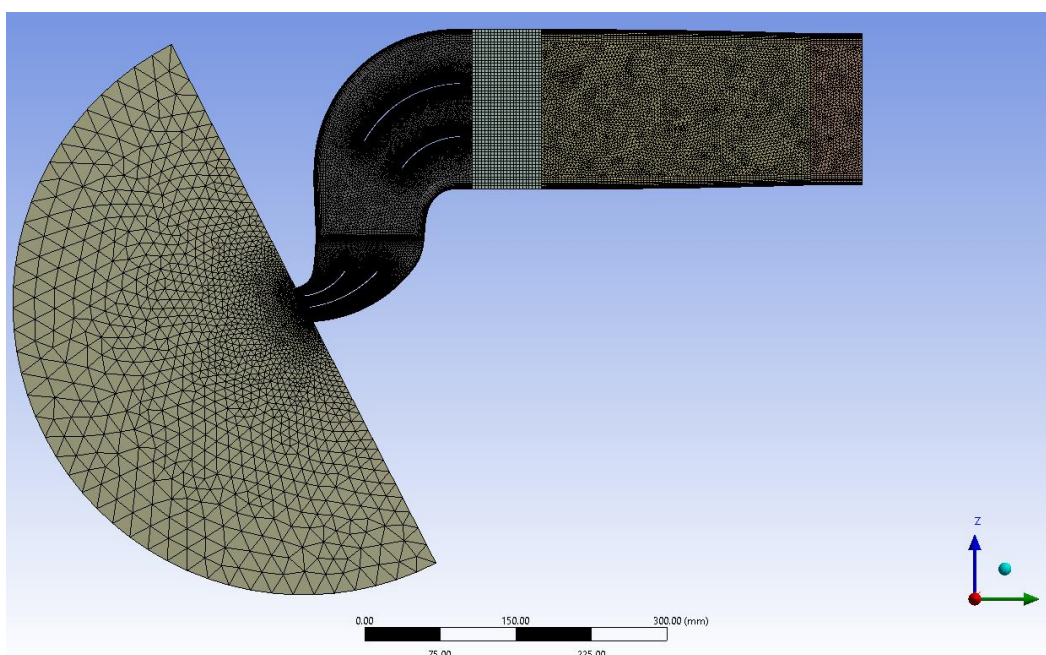
Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων για κάθε μοντέλο καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά μεγέθους αυτών (Πίνακας 5-2).

Πίνακας 5-2 Στοιχεία πλεγμάτων ανά μοντέλο.

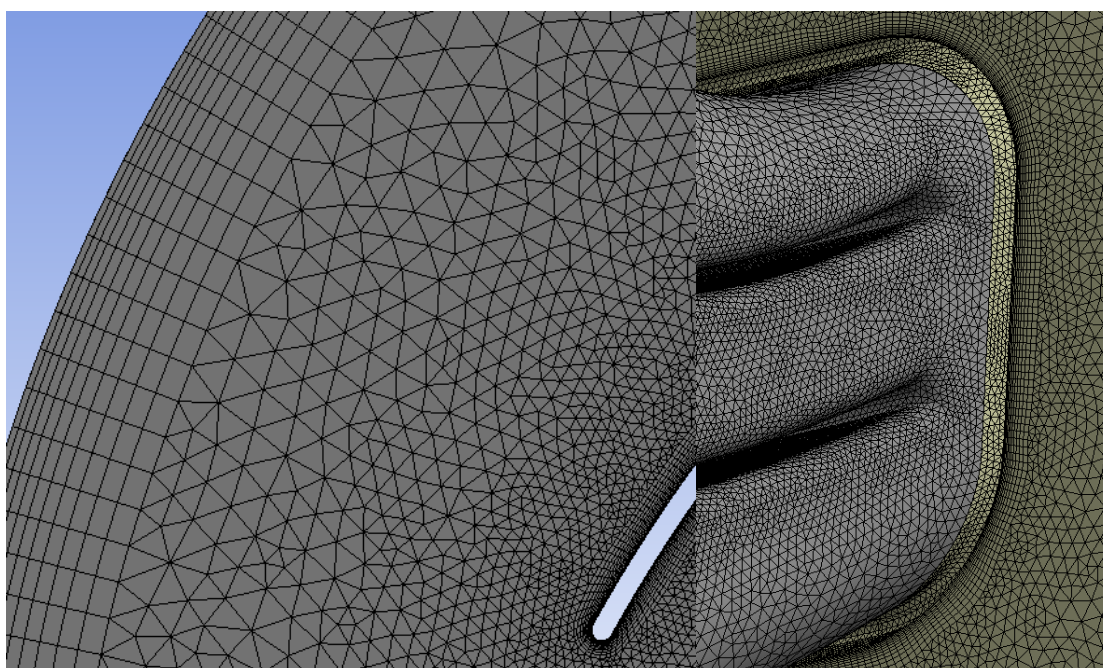
Τύπος Εισαγωγής	A/A Μοντέλου	A/A προσομοίωσης	Μοντέλο	Αριθμός Κόμβων (Nodes)	Αριθμός στοιχείων (Elements)
A Scoop-S Duct	1	1	A-1 Scoop-S Duct	12131790	40142359
	2	2	A-2 Scoop-S Duct	5710426	16719145
	3	3	A-3 Scoop-S Duct	6032376	18155727
	4	4	A-4 Scoop-S Duct	7565264	21853697
B NACA-S Duct	5	5	B-1 NACA-S Duct	7474047	25141685
	6	6	B-2 NACA-S Duct	6985701	21733088

Μοντέλο A-1 Scoop S Duct

Παρακάτω φαίνεται το συνολικό πλέγμα για τους όγκους του μοντέλου “A-1 Scoop-S Duct”, καθώς και η διαφορά πυκνωσης των στοιχείων που την περιγράφουν κοντά στα πτερύγια, ενώ εμφανής είναι και η διαφορά μεγέθους των στοιχείων του τεταρτοσφαίριου μακριά από τον όγκο εισαγωγής, τα οποία πυκνώνουν καθώς πλησιάζουν τη γεωμετρία του Scoop (Εικόνα 5-10). Ακόμα φαίνεται η δημιουργία «inflation» στο τοίχωμα της γεωμετρίας, καθώς και σε εσωτερικό πτερύγιο του αγωγού “S” (Εικόνα 5-11α). Τέλος παρατηρείται η σύγκλιση του μεγέθους στοιχείων στη διεπαφή των όγκων (Εικόνα 5-11β).



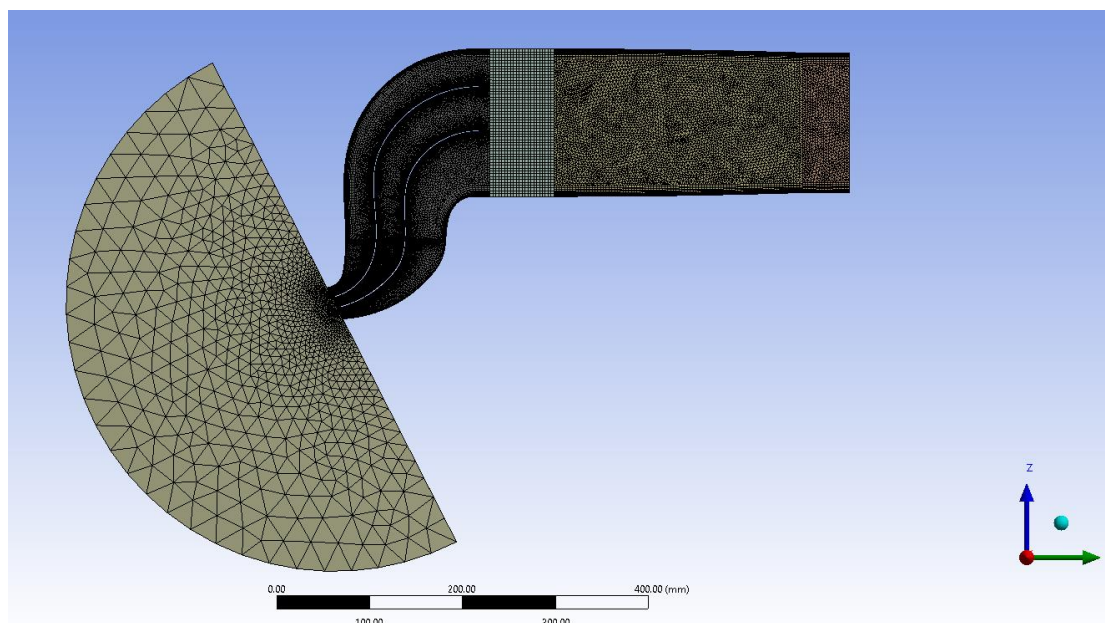
Εικόνα 5-10 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου A-1 Scoop-S Duct.



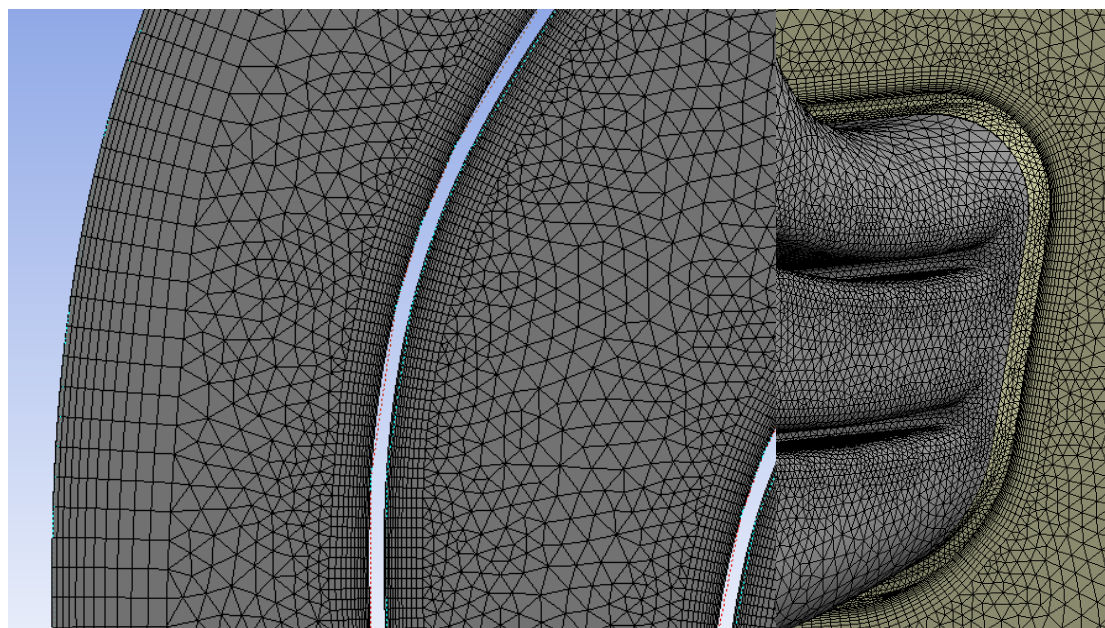
Εικόνα 5-11 Λεπτομέρειες πλέγματος μοντέλου “A-1 Scoop-S Duct” α) (αριστερά) inflation, β) (δεξιά) inflation, σύγκλιση μεγέθους στοιχείων διαφορετικών όγκων.

Μοντέλο A-2 Scoop S Duct

Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση παρακάτω παρουσιάζεται το συνολικό πλέγμα για τους όγκους του μοντέλου “A-2 Scoop-S Duct”, καθώς και η διαφορά πυκνωσης των στοιχείων που την περιγράφουν κοντά στα πτερύγια, ενώ εμφανής είναι και η διαφορά μεγέθους των στοιχείων του τεταρτοσφαίριου μακριά από τον όγκο εισαγωγής, τα οποία πυκνώνουν καθώς πλησιάζουν τη γεωμετρία του Scoop (Εικόνα 5-12). Ακόμα φαίνεται η δημιουργία «inflation» στο τοίχωμα της γεωμετρίας, καθώς και σε εσωτερικά πτερύγια του αγωγού “S” (Εικόνα 5-13α). Τέλος, παρατηρείται η σύγκλιση του μεγέθους στοιχείων σε σημείο διεπαφής των όγκων (Εικόνα 5-13β).



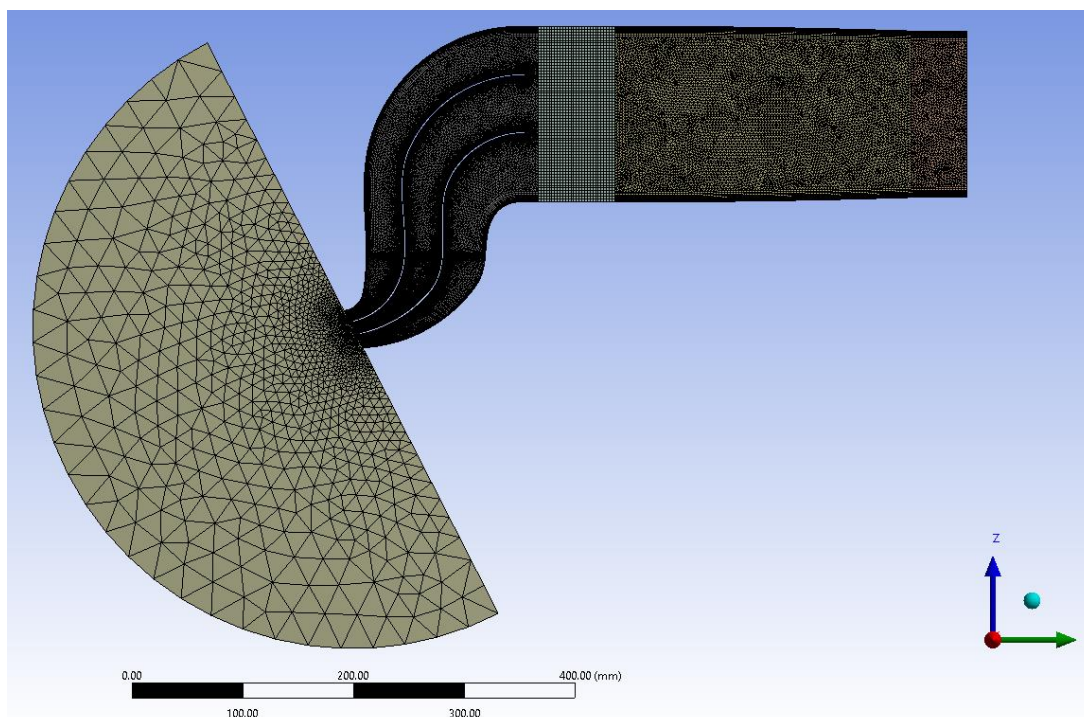
Εικόνα 5-12 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου “A-2 Scoop-S Duct”.



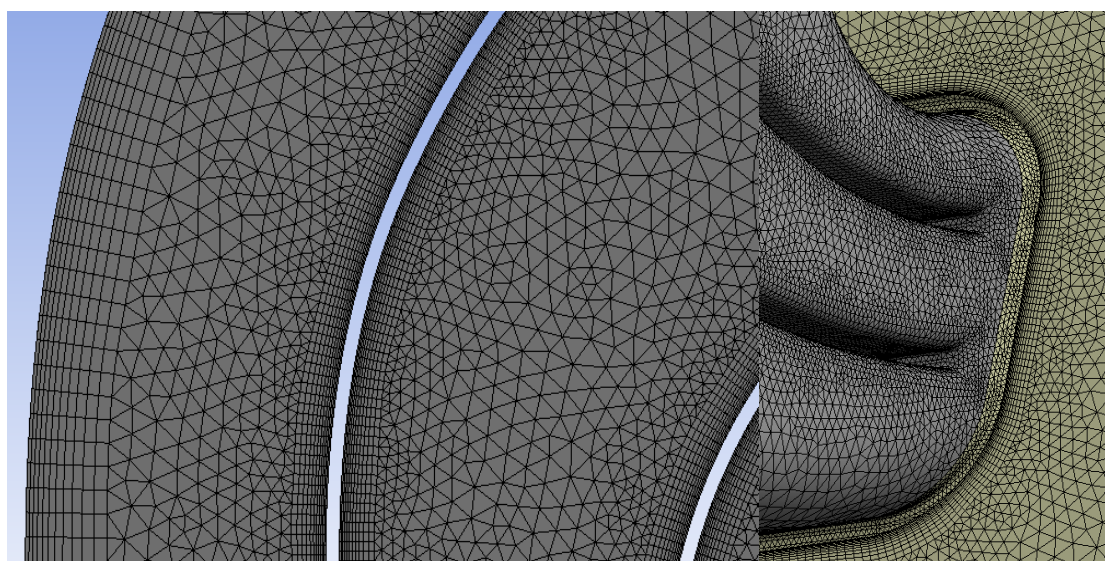
Εικόνα 5-13 Λεπτομέρειες πλέγματος μοντέλου “A-2 Scoop-S Duct” α) (αριστερά) inflation, β) (δεξιά) inflation, σύγκλιση μεγέθους στοιχείων διαφορετικών όγκων.

Μοντέλο A-3 Scoop S Duct

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις παρουσιάζεται το πλέγμα για τους όγκους του μοντέλου “A-3 Scoop-S Duct”. Η διαφορά πυκνωσης των στοιχείων που περιγράφουν την γεωμετρία κοντά στα πτερύγια είναι εύκολα αντιληπτή, ενώ εμφανής είναι και η διαφορά μεγέθους των στοιχείων του τεταρτοσφαίριου μακριά από τον όγκο εισαγωγής, τα οποία πυκνώνουν καθώς πλησιάζουν τη γεωμετρία του Scoop (Εικόνα 5-14). Ακόμα φαίνεται η δημιουργία «inflation» στο τοίχωμα της γεωμετρίας, καθώς και σε εσωτερικό πτερύγιο Scoop (Εικόνα 5-15α). Τέλος, παρατηρείται η σύγκληση των στοιχείων σε σημείο διεπαφής των όγκων καθώς και οι ταύτιση των κόμβων του πλέγματος στο σημείο (Εικόνα 5-15β).

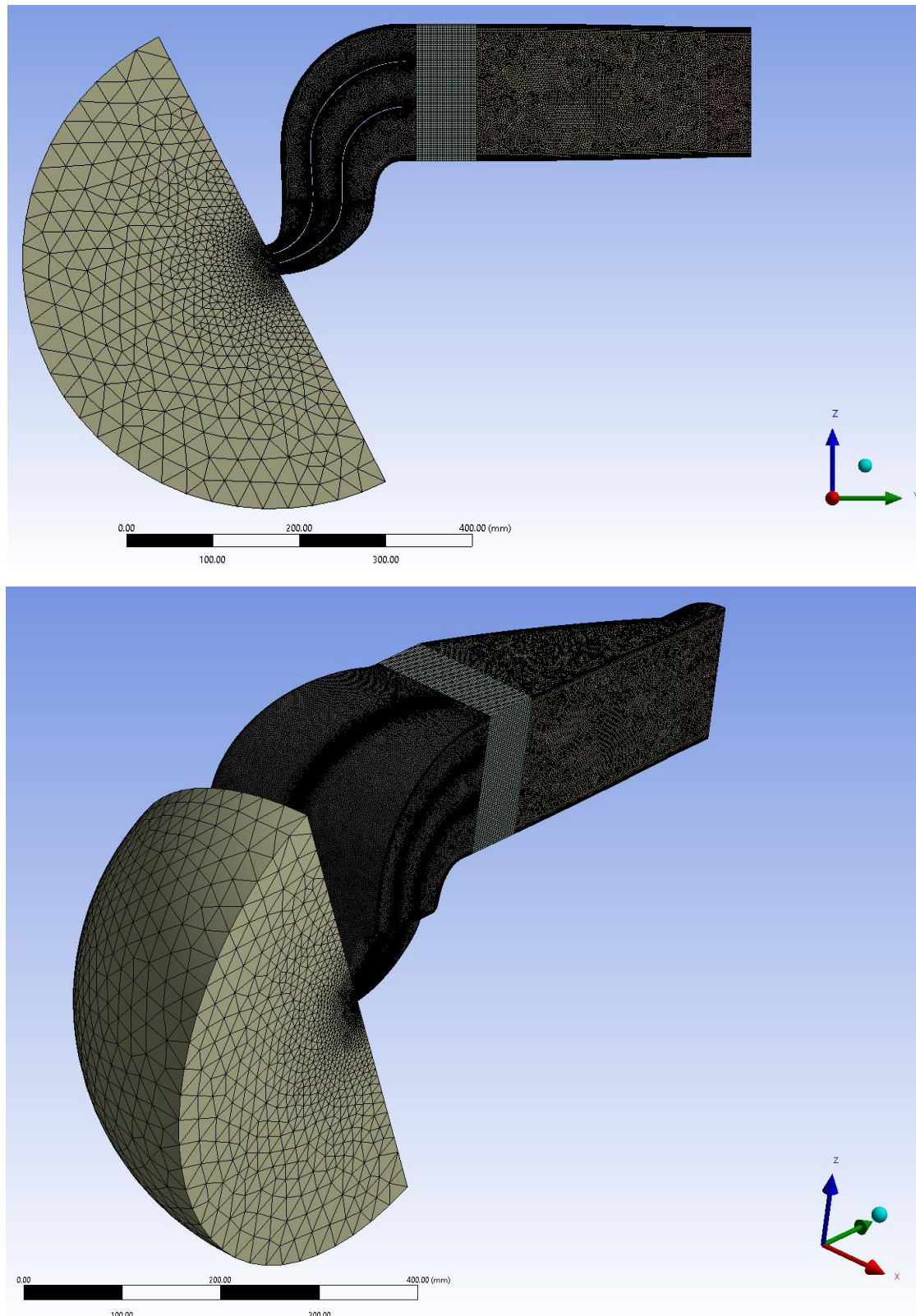


Εικόνα 5-14 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου A-3 Scoop-S Duct.



Εικόνα 5-15 Λεπτομέρειες πλέγματος μοντέλου “A-3 Scoop-S Duct” α) (αριστερά) inflation, β) (δεξιά) inflation, σύγκληση μεγέθους στοιχείων διαφορετικών όγκων.

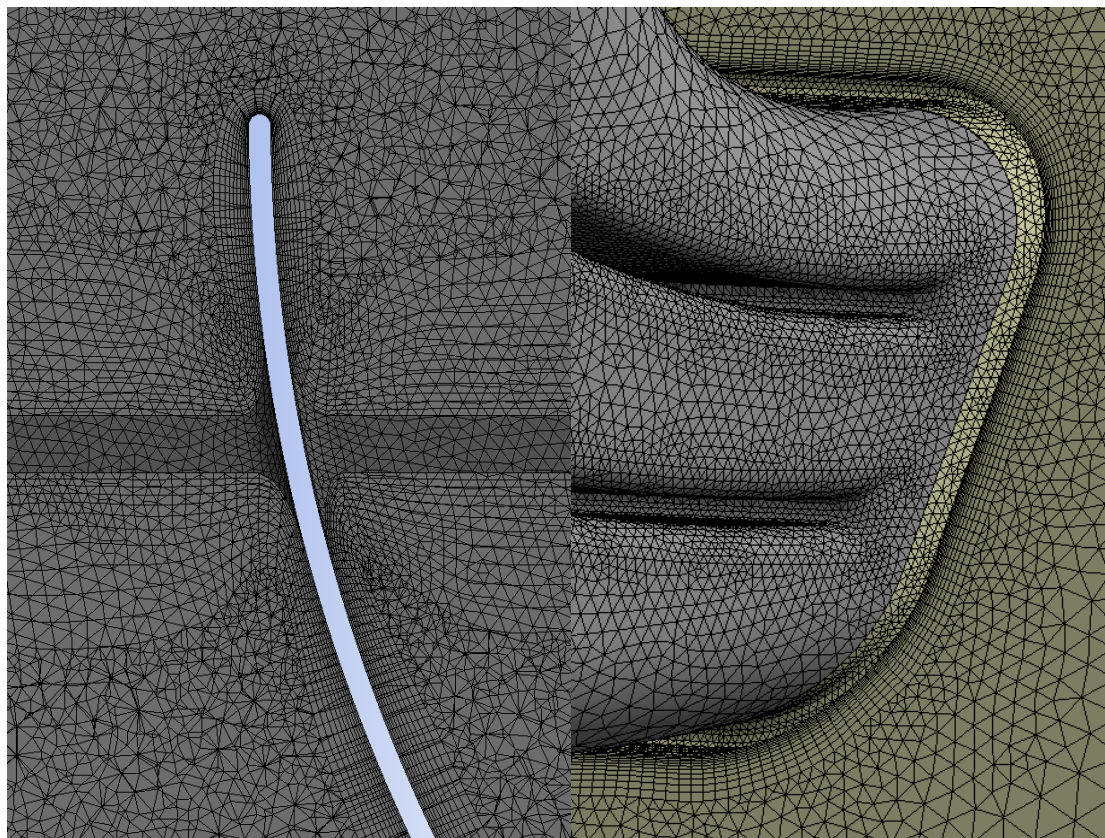
Μοντέλο A-4 Scoop S Duct



Εικόνα 5-16 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου A-4 Scoop-S Duct α) 2D όψη β) 3D όψη.

Παραπάνω, φαίνεται το πλέγμα των όγκων για το μοντέλο “A-4 Scoop-S Duct”. Ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις παρατηρείται πύκνωση κοντά στα οριζόντια και κάθετα πτερύγια, ενώ εμφανής είναι και η διαφορά μεγέθους των στοιχείων του τεταρτοσφαίριου

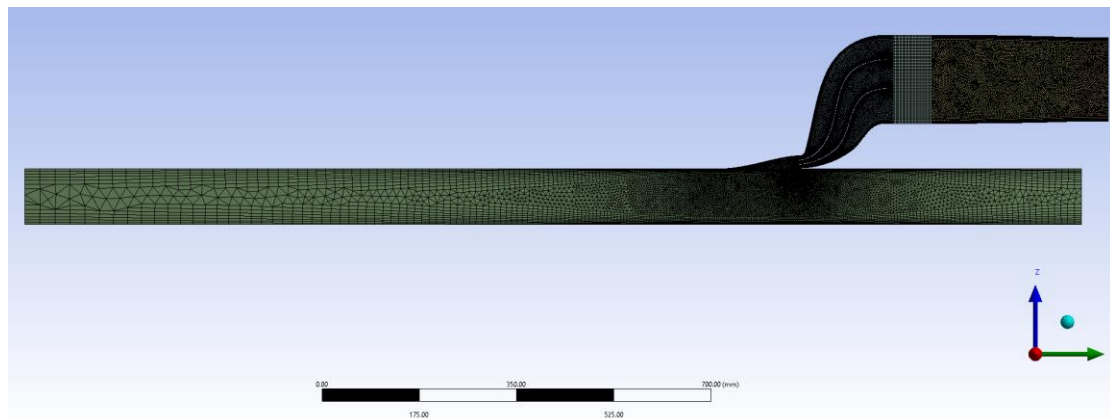
μακριά από τον όγκο εισαγωγής, τα οποία πυκνώνουν καθώς πλησιάζουν τη γεωμετρία του Scoop (Εικόνα 5-16α, 5-16β). Επίσης παρατηρείται η δημιουργία «inflation» σε τοιχώματα εσωτερικών πτερυγίων (εικόνα 5-17α), καθώς και η σύγκλιση του μεγέθους των στοιχείων διακριτοποίησης σε σημείο διεπαφής (εικόνα 5-17β).



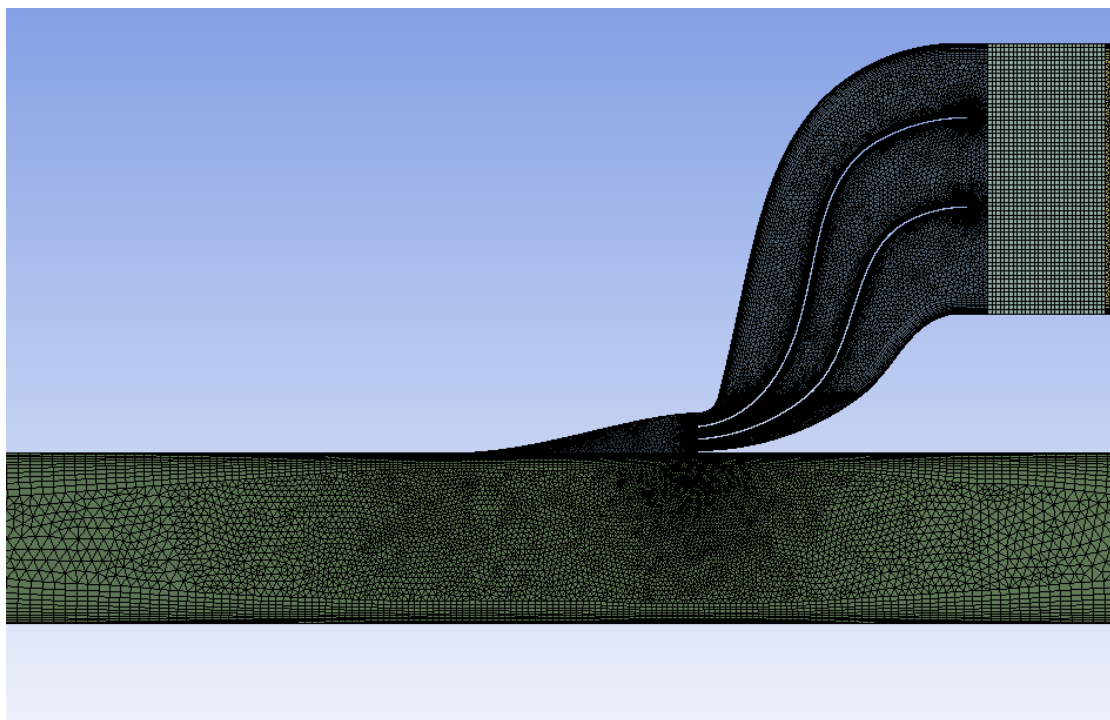
Εικόνα 5-17 Λεπτομέρειες πλέγματος μοντέλου “A-4 Scoop-S Duct” α) (αριστερά) inflation σε σημείο τομής εσωτερικών πτερυγίων, β) (δεξιά) inflation, σύγκλιση μεγέθους στοιχείων διαφορετικών όγκων.

Μοντέλο B-1 NACA S Duct

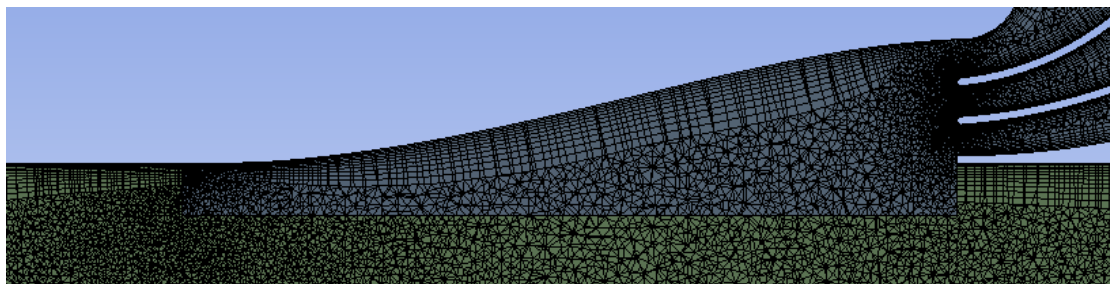
Εδώ παρουσιάζεται το πλέγμα της συνολικής γεωμετρίας του μοντέλου “B-1 NACA S Duct”, το οποίο (όπως και το επόμενο) διαφέρει ως προς τον τρόπο συλλογής του αέρα, όπως έχει αναλυτικά παρουσιαστεί κατά την σχεδίαση. Εκτός της γεωμετρίας εισαγωγής διαφέρει και ως προς τον όγκο αναπαράστασης του περιβάλλοντος αέρα, ο οποίος σε αντίθεση με τα προηγούμενα μοντέλα προσομοιώνεται με ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Είναι εμφανές ότι το πλέγμα αραιώνει καθώς απομακρύνεται από την εισαγωγή, σύμφωνα με τα «Face Sizing» που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ενώ το μέγεθος του πλέγματος στους υπόλοιπους όγκους είναι παρόμοιου μεγέθους (Εικόνα 5-18). Επιπλέον, παρατηρείται η πύκνωση, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις του πλέγματος, πλησίον των εσωτερικών πτερυγίων και τοιχωμάτων (Εικόνα 5-19, 5-20).



Εικόνα 5-18 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου B-1 NACA S Duct.



Εικόνα 5-19 Λεπτομέρεια πλέγματος εισαγωγής περιβάλλοντος αέρα μοντέλου B-1 NACA S Duct.

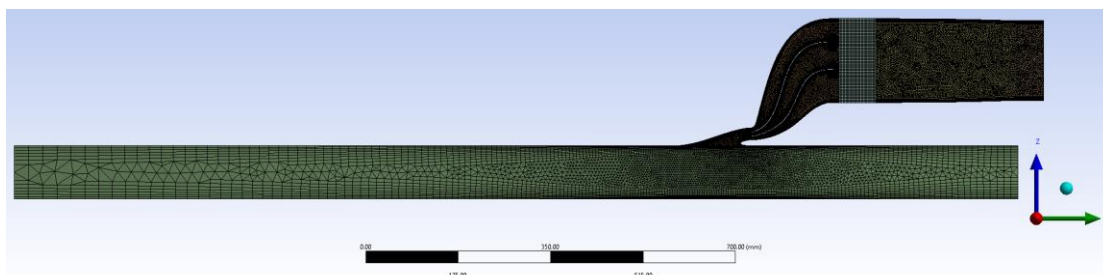


Εικόνα 5-20 Τομή πλέγματος στην διεπαφή όγκων εισαγωγής - περιβάλλοντος αέρα.

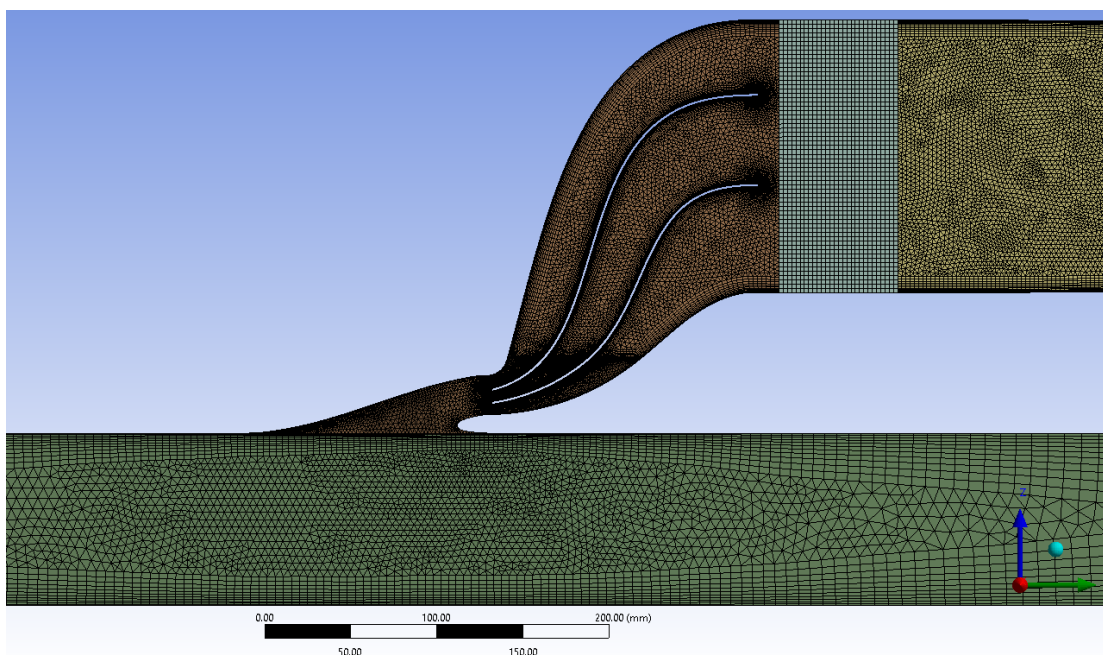
Στην περιοχή διεπαφής εισαγωγής-περιβάλλοντος αέρα παρατηρείται η ταύτιση του μεγέθους των στοιχείων, καθώς είναι εμφανής και η δημιουργία «inflation» στα τοιχώματα των όγκων (Εικόνα 5-20).

Μοντέλο B-2 NACA S Duct

Ακολουθώντας, παρουσιάζεται το έκτο πλέγμα διακριτοποίησης του μοντέλου “B-2 NACA S Duct”. Παρακάτω φαίνεται το συνολικό πλέγμα του μοντέλου, όπου και παρατηρείται ομοίως με τα προηγούμενα μοντέλα η ελάττωση της πυκνότητας των στοιχείων του πλέγματος κατά την απομάκρυνση από τους όγκους μελέτης στον όγκο αέρα (Εικόνα 5-21).

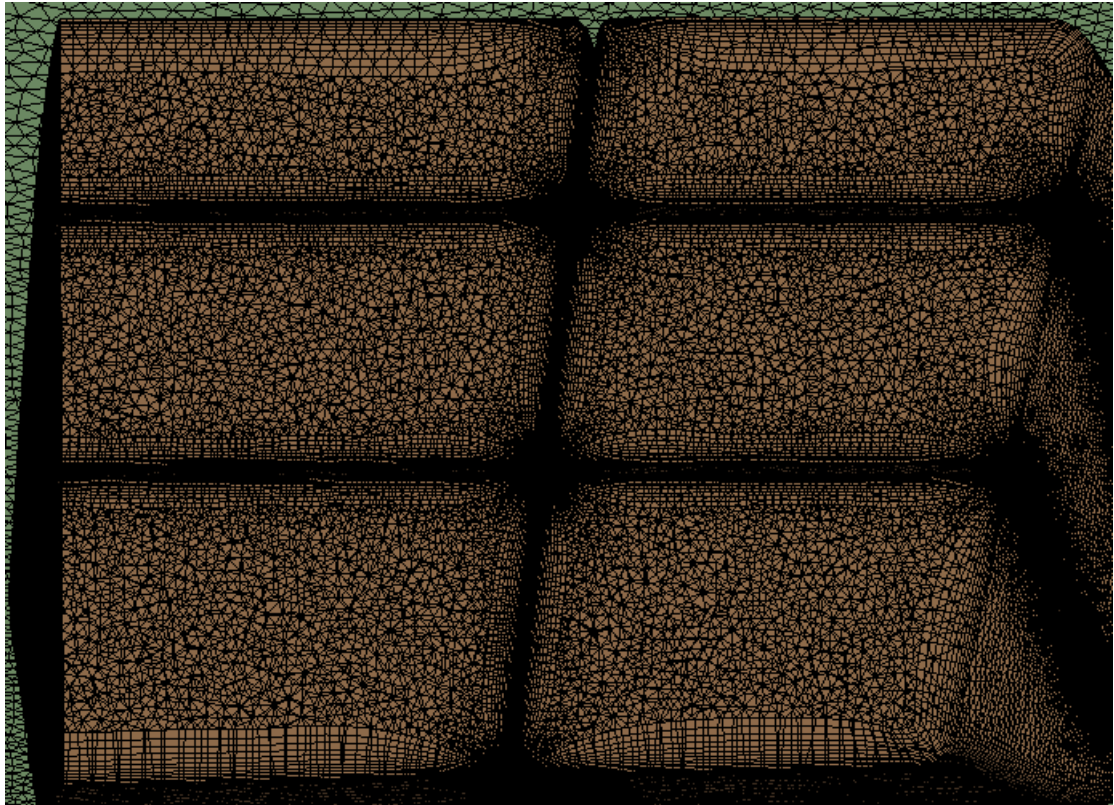


Εικόνα 5-21 Πλέγμα συνολικής γεωμετρίας μοντέλου B-2 NACA S Duct.

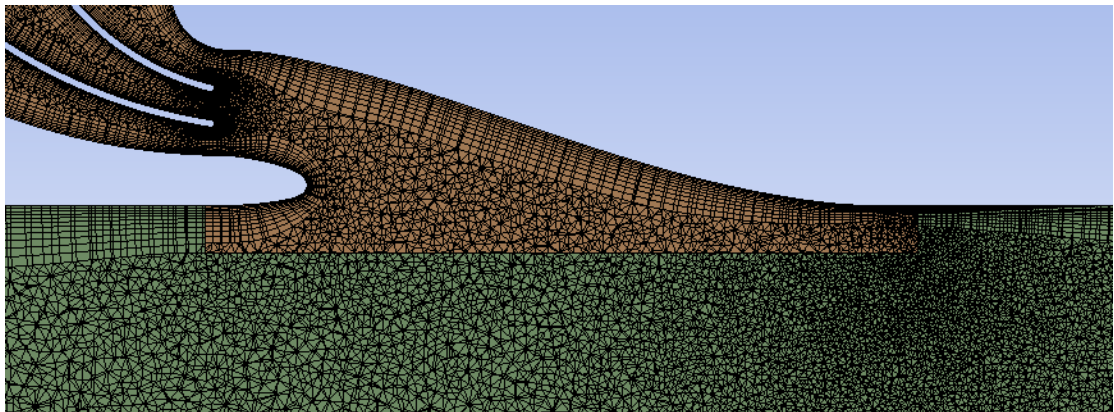


Εικόνα 5-22 Λεπτομέρεια πλέγματος εισαγωγής περιβάλλοντος αέρα μοντέλου B-2 NACA S Duct.

Εμφανής είναι η πυκνωση γύρω των εσωτερικών πτερυγίων εισαγωγής (Εικόνα 5-22, 5-23), καθώς και η δημιουργία «inflation» στα τοιχώματα της κατασκευής (Εικόνα 5-23, 5-24), ενώ επίσης φαίνεται η σύγκλιση του μεγέθους των στοιχείων σε σημείο διεπαφής (Εικόνα 5-23).



Εικόνα 5-23 Τομή πλέγματος εισαγωγής, inflation τοιχωμάτων και εσωτερικών πτερυγίων.



Εικόνα 5-24 Τομή πλέγματος όγκων εισαγωγής-περιβάλλοντος αέρα.

5.5.4 ANSYS CFX-Pre

Μετά την ολοκλήρωση των πλεγμάτων, σειρά έχει ο ορισμός του φυσικού προβλήματος για κάθε προσομοίωση. Για όλα τα μοντέλα, εκτός του μοντέλου “B-2 NACA-S Duct”, πραγματοποιείται επίλυση υπό τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή για στάσιμο όχημα. Το τελευταίο μοντέλο διαφέρει ως προς τον ορισμό του φυσικού προβλήματος, καθώς θεωρείται ότι κινείται με σταθερή ταχύτητα. Παρακάτω παρουσιάζεται ο ορισμός των οριακών συνθηκών και των πεδίων ροής για τα μοντέλα Scoop, καθώς και οι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν για τα δύο τελευταία μοντέλα κατηγορίας NACA. Παρακάτω, παρουσιάζονται ομαδοποιημένες οι συνθήκες των προσομοιώσεων για κάθε μοντέλο (Πίνακας 5-3).

Πίνακας 5-3 κατηγοριοποίηση προσομοιώσεων.

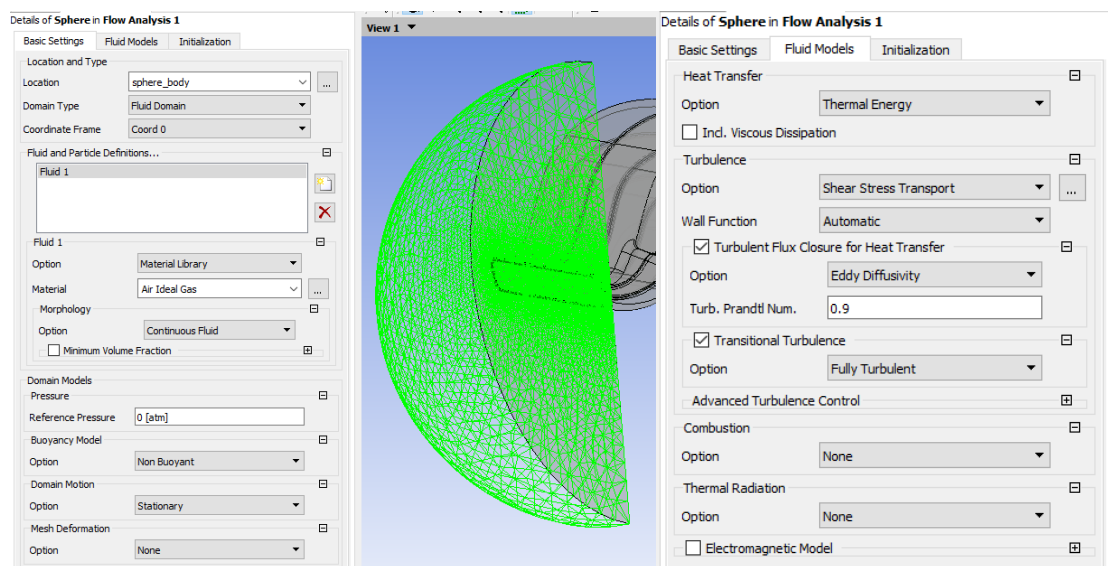
Τύπος Εισαγωγής	Μοντέλο	A/A	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	Στατική πίεση	Παροχή μάζας	Θερμική ισχύς κυψέλης	Κατάσταση οχήματος
A Scoop-S Duct	A-1 Scoop-S Duct	1	25°C	1 Atm	Fan maximum	494200 W/m ³	Στατικό
	A-2 Scoop-S Duct	2					
	A-3 Scoop-S Duct	3					
	A-4 Scoop-S Duct	4					
B NACA-S Duct	B-1 NACA-S Duct	5					20 km/h
	B-2 NACA-S Duct	6					

Ορισμός Χωρίων Ροής (Flow Domains)

Στην αρχή του ορισμού του προβλήματος ορίζεται ότι πρόκειται για ένα τύπο ανάλυσης μόνιμης ροής “Steady State”. Ο ορισμός του πεδίου ροής είναι ίδιος για όλες τις έξι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται.

Στην συνέχεια ορίζονται τα χαρακτηριστικά των όγκων που προσομοιώνουν το πεδίο ροής. Ξεκινώντας από τον βασικό ορισμό “Basic Settings” (Εικόνα 5-25α) επιλέγεται ο επιθυμητός όγκος του από το πεδίο “Location” και ως τύπος πεδίου ροής στην επιλογή “Domain Type” ορίζεται ως “Fluid Domain”, καθώς πρόκειται για τον ατμοσφαιρικό αέρα. Στην συνέχεια, ως ρευστό από την βιβλιοθήκη ορίζεται ο αέρας ως ιδανικό αέριο “Air Ideal Gas” στην επιλογή “Material”, ενώ η μορφολογία της ροής ως συνεχής “Continuous Fluid” στην επιλογή “Morphology Option”. Η πίεση αναφοράς ορίζεται ίση με 0 ατμόσφαιρες (Atm), ενώ στο πεδίο “Buoyancy Model” ορίζεται η τιμή “Non Buoyant” θεωρώντας ότι δεν υπάρχει επίδραση της βαρύτητας στο ρευστό. Η επιλογή “Domain Motion” ορίζεται ως “Stationary”, καθώς το μοντέλο δεν περιστρέφεται και η επιλογή “Mesh Deformation” ορίζεται ως “None”.

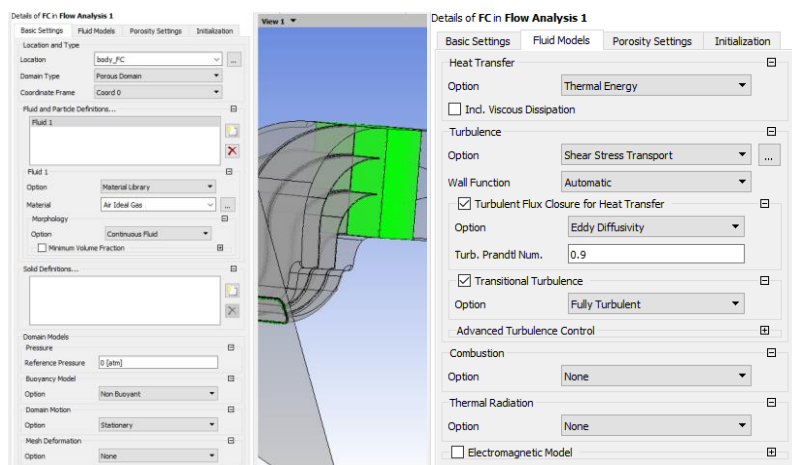
Εν συνεχεία, στη δεύτερη φάση ορισμού του πεδίου ροής “Fluid Model” (Εικόνα 5-25β), επιλέγεται στο πεδίο “Heat Transfer” η κατηγορία “Thermal Energy”, καθώς το πρόβλημα που καλείται να λύσει ο επιλύτης αφορά σε ασυμπίεστο ρευστό με μεταβολή όμως της θερμοκρασίας.



Εικόνα 5-25 Ορισμός ιδιοτήτων πεδίου ροής Fluid μοντέλων: α) (αριστερά) Basic Settings, β) (δεξιά) Fluid Models.

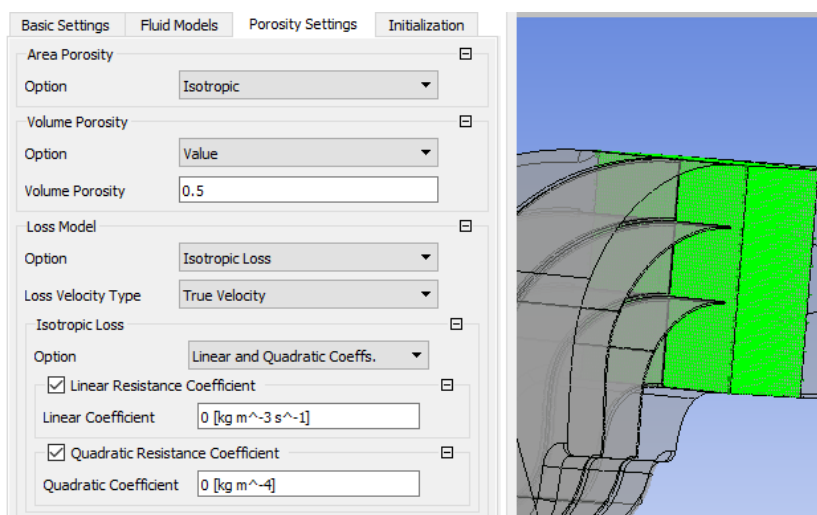
Όσον αφορά στην τυρβώδη ροή, ορίζεται το μοντέλο τύρβης “Shear Stress Transport” που θα εφαρμοστεί στην επίλυση και η συνάρτηση “Wall Function” στα τοιχώματα ως “Automatic”. Επιπλέον, ενεργοποιείται “Turbulence Flux Closure for Heat Transfer” με την επιλογή του μοντέλου “Eddy Diffusivity” στην εξίσωση μεταφοράς ενέργειας από την τυρβώδη ανάμειξη του ρευστού και η τιμή για το πεδίο “Turb. Prandtl Num.” τίθεται ίση με 0.9. Ακόμα ενεργοποιείται η επιλογή “Transitional Turbulence” και επιλέγεται η μέθοδος “Fully Turbulent” (Εικόνα 5-25β). Για τους όγκους που προσεγγίζουν τα πεδία ροής γεωμετρίας εισαγωγής, εξαγωγής και ανεμιστήρα, ο ορισμός είναι ταυτόσημος με αυτόν που περιεγράφηκε παραπάνω για όλα τα μοντέλα.

Ωστόσο, το πεδίο ροής εντός της κυψέλης διαφέρει λόγω του πορώδους μοντέλου που εφαρμόζεται. Συγκεκριμένα, κατά τον ορισμό του πρώτου μέρους των βασικών ορισμών “Basic Settings” επιλέγοντας τον όγκο της κυψέλης, ορίζεται στον τύπο του πεδίου αντί για ρευστό, πορώδες πεδίο ροής “Porous Domain” (Εικόνα 5-26α), ενώ οι λοιποί παράμετροι ορίζονται ομοίως με το πεδίο ροής Fluid για την καρτέλα “Basic Settings”, καθώς και για την καρτέλα “Fluid Models” (Εικόνα 5-26β).



Εικόνα 5-26 Ορισμός ιδιοτήτων πεδίου ροής Porous μοντέλου κυψέλης καυσίμου: α) (αριστερά) Basic Settings, β) (δεξιά) Fluid Models.

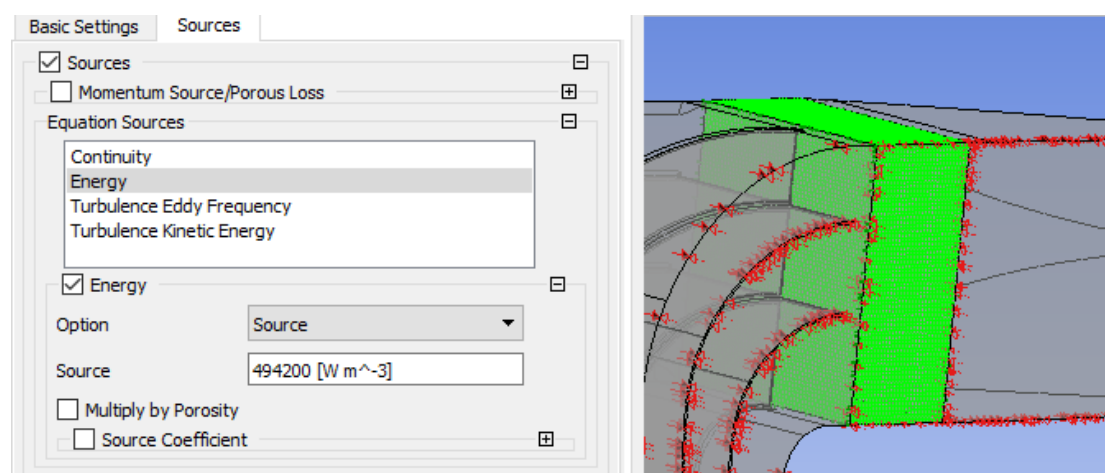
Λόγω της φύσης του πεδίου ροής προκύπτει μία τρίτη καρτέλα “Porosity Settings” (Εικόνα 5-27) στην οποία ορίζονται οι ιδιότητες του πορώδους μοντέλου. Συγκεκριμένα ορίζεται ως ιστροπικό το πορώδες επιφανείας, ενώ το πορώδες του όγκου ορίζεται με τιμή ίση με 0.5. Επιπλέον, στο μοντέλο απωλειών, οι απώλειες ορίζονται ως ιστροπικές “Isotropic”, ενώ στις απώλειες ταχύτητας επιλέγεται ο τύπος “True Velocity”. Οι συντελεστές ιστροπικών απωλειών μηδενίζονται.



Εικόνα 5-27 Ορισμός πεδίου ροής Porous μοντέλων κυψέλης καυσίμου : Porosity Settings.

Thermal Source

Στην συνέχεια, ορίζεται με την χρήση “sub domain” η πηγή θερμότητας για τον όγκο κυψέλης καυσίμου. Ενεργοποιείται η επιλογή “Source” και επιλέγεται η εξίσωση της ενέργειας στην οποία ορίζεται το ποσό έκλυσης θερμότητας, όπως αυτό προκύπτει για τις συνθήκες που αναλύθηκαν (Εικόνα 5-28). Η συνθήκη ορίζεται με τον ίδιο τρόπο σε κάθε προσομοίωση.

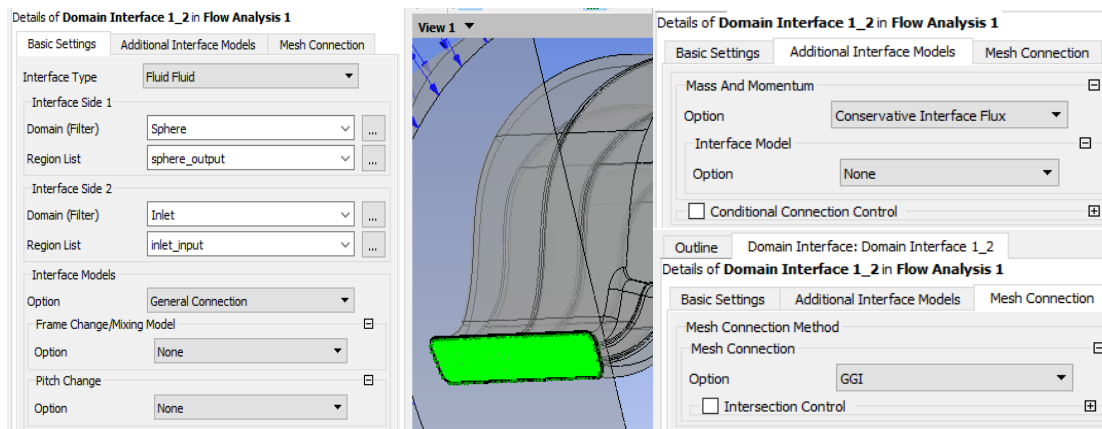


Εικόνα 5-28 Ορισμός πηγής θερμότητας κυψέλης καυσίμου Μοντέλων.

Ο ορισμός των χαρακτηριστικών των πεδίων ροής και της πηγής ενέργειας ορίζονται με τον ίδιο τρόπο για όλες τις προσομοιώσεις μοντέλων.

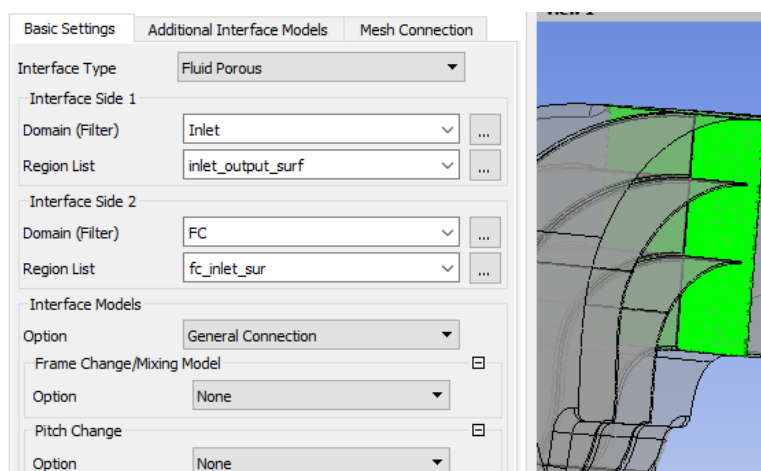
Ορισμός Διεπαφών Γεωμετρίας (Interfaces)

Στην συνέχεια ορίζονται οι διεπαφές “interfaces” μεταξύ των όγκων του μοντέλου και οι ιδιότητές τους. Η διαδικασία διευκολύνεται με την βοήθεια των “Name Selection” που έχουν δημιουργηθεί σε προηγούμενο στάδιο. Στο πρώτο στάδιο “Basic Setting” (Εικόνα 5-29α) από το “Domain (Filter)” επιλέγεται ο όγκος στον οποίο ανήκει η επιφάνεια, ενώ στο πεδίο “Region List” επιλέγεται η επιφάνεια που έχει οριστεί με τη διαδικασία των “Name Selection”. Στο πεδίο “Interface Type” ορίζεται η σχέση μεταξύ των πεδίων, όπου για τα



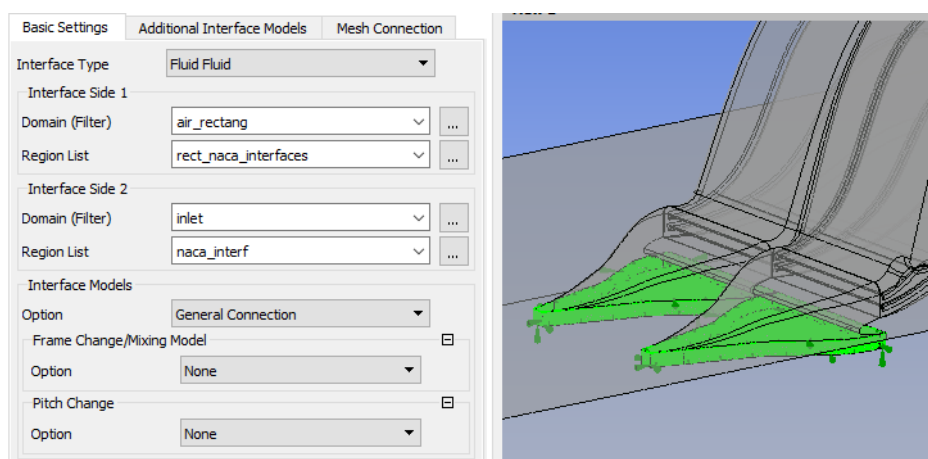
Εικόνα 5-29 Ορισμός interface Fluid-Fluid πεδίου ροής μοντέλων Scoop S Duct: α) (αριστερά) Basic Settings, β) (πάνω δεξιά) Additional Interface Models, γ) (κάτω δεξιά) Mesh Connection.

interfaces μεταξύ: αέρα περιβάλλοντος-εισαγωγής, εξαγωγής-ανεμιστήρα επιλέγεται “Fluid-Fluid”, καθώς τα πεδία ροής προσομοιώνουν καθαρό ρευστό. Στο δεύτερο στάδιο “Additional Interface Models” (Εικόνα 5-29β) για την μάζα και την ορμή επιλέγεται το μοντέλο “Conservative Interface Flux”. Τέλος, στο τρίτο στάδιο “Mesh Connection” η σύνδεση μεταξύ των πλεγμάτων πραγματοποιείται με την μέθοδο General Grid Interface (GGI) (Εικόνα 5-29γ). Τα υπόλοιπα δύο interface αφορούν στην επαφή της εισαγωγής-κυψέλης καυσίμου και κυψέλης καυσίμου-εξαγωγής, ενώ η διαφορά τους αφορά στον τύπο του interface, ο οποίος και ορίζεται ως “Fluid-Porous” (Εικόνα 5-30), καθώς το ρευστό θα εξέρχεται από το πεδίο ροής ρευστού και θα εισέρχεται στο πορώδες, ενώ στην συνέχεια θα συμβαίνει το αντίστροφο. Οι λοιποί παράμετροι είναι ταυτόσημοι με τα interface “Fluid-Fluid”.



Εικόνα 5-30 Ορισμός interface Fluid-Porous πεδίων ροής μοντέλων.

Οι παραπάνω ιδιότητες των πεδίων ροής και των διεπαφών τους ισχύουν σε όλες τις προσομοιώσεις, με τις όποιες γεωμετρικές διαφοροποιήσεις των όγκων που προκύπτουν, κυρίως στην δεύτερη περίπτωση των μοντέλων εισαγωγής τύπου NACA για το ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο σε σχέση με το τεταρτοσφαίριο. Ειδικότερα, όπως αναλύθηκε στο στάδιο της σχεδίασης και παρουσιάστηκε και στη φάση της διακριτοποίησης, ο όγκος της εισαγωγής (απολήξεις NACA) εισέρχονται στο ορθογώνιο, το οποίο με την αφαίρεση διαδικασίας Boolean, υπολείπεται του αντίστοιχου στερεού τμήματος. Ως εκ τούτου, για την περίπτωση των μοντέλων αυτών προκύπτουν τα interfaces των δύο όγκων, ενώ επίσης η άνω επιφάνεια του ορθογωνίου έχει τις απαραίτητες σπές για τον σωστό ορισμό σε δεύτερο στάδιο οριακής συνθήκη Wall (Εικόνα 5-31). Η διαφορά των interface εισαγωγής-αέρα περιβάλλοντος των μοντέλων Scoop και NACA διαφέρουν μόνο ως προς τη γεωμετρία, ενώ οι ιδιότητες είναι οι ίδιες όπως ορίζονται παραπάνω για τα μοντέλα που χρησιμοποιείται τεταρτοσφαίριο.



Εικόνα 5-31 Ορισμός Interface Fluid-Fluid πεδίου ροής ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου-εισαγωγής, Μοντέλα “NACA S Duct”.

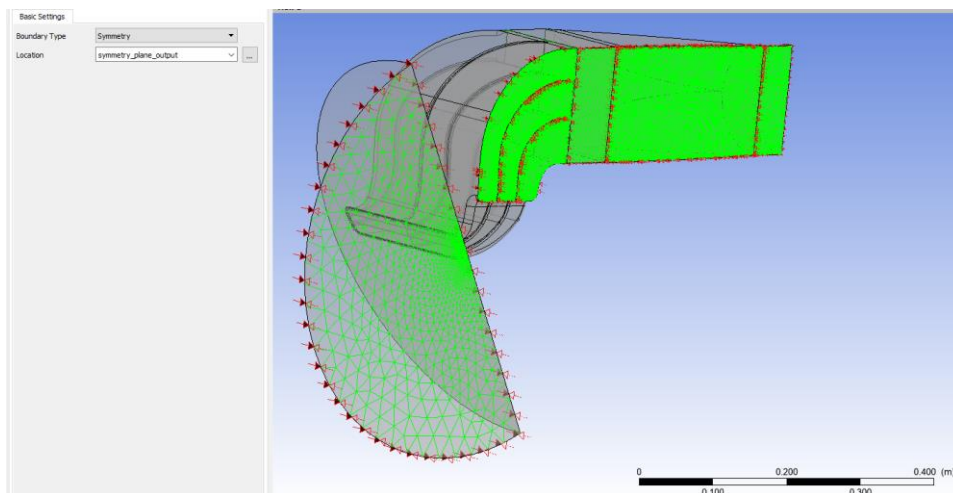
Ορισμός Οριακών συνθηκών

Έχοντας ορίσει τις ιδιότητες του πεδίου ροής και την σχέση μεταξύ των όγκων που το αποτελούν, ορίζονται οι οριακές συνθήκες του προβλήματος. Τα μοντέλα “Scoop S Duct” προσομοιώνονται υπό της ίδιες συνθήκες, καθώς επίσης δεν υφίστανται έντονες γεωμετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ τους, ως εκ τούτου ο ορισμός των προβλημάτων είναι ταυτόσημος. Σε αντίθετη περίπτωση για τα μοντέλα “B NACA S Duct” προκύπτει τόσο η γεωμετρική διαφοροποίηση του όγκου προσομοίωσης του περιβάλλοντος αέρα με αποτέλεσμα την διαφοροποίηση των επιφανειών εφαρμογής οριακών συνθηκών, ενώ επίσης στην περίπτωση της προσομοίωσης του μοντέλου “B-1 NACA S Duct” διαφοροποιείται το φυσικό πρόβλημα το οποίο προσομοιώνεται, καθώς το όχημα θεωρείται ότι κινείται με σταθερή ταχύτητα.

- **Μοντέλα “A-(1-4) Scoop S Duct”**

Symmetry

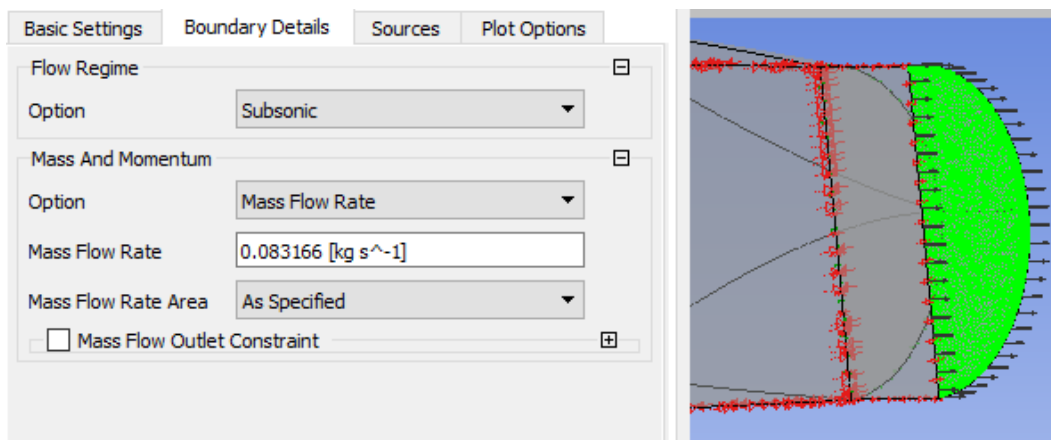
Στην αρχή ορίζεται το επίπεδο συμμετρίας της γεωμετρίας, καθώς όπως έχει αναφερθεί η προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για το ήμισυ των μοντέλων. Η οριακή συνθήκη εφαρμόζεται για κάθε πεδίο ροής, επιλέγοντας την αντίστοιχη επιφάνεια και ισχύει για κάθε προσομοίωση (Εικόνα 5-32).



Εικόνα 5-32 Οριακή συνθήκη τύπου Symmetry.

Outlet

Στην συνέχεια, ορίζεται η έξοδος του συστήματος, η οποία τίθεται στην εξωτερική επιφάνεια του πεδίου ροής του ανεμιστήρα. Το καθεστώς ροής της εξαγωγής ορίζεται ως “Subsonic”, ενώ για την μάζα και την ορμή επιλέγεται ο ορισμός μέσω της παροχής μάζας, όπου και ορίζεται η παροχή μάζας μέγιστων στροφών του ανεμιστήρα (Εικόνα 5-33). Δεδομένων των συνθηκών του προβλήματος, ο περιορισμός ορίζεται με τον ίδιο τρόπο σε κάθε προσομοίωση.



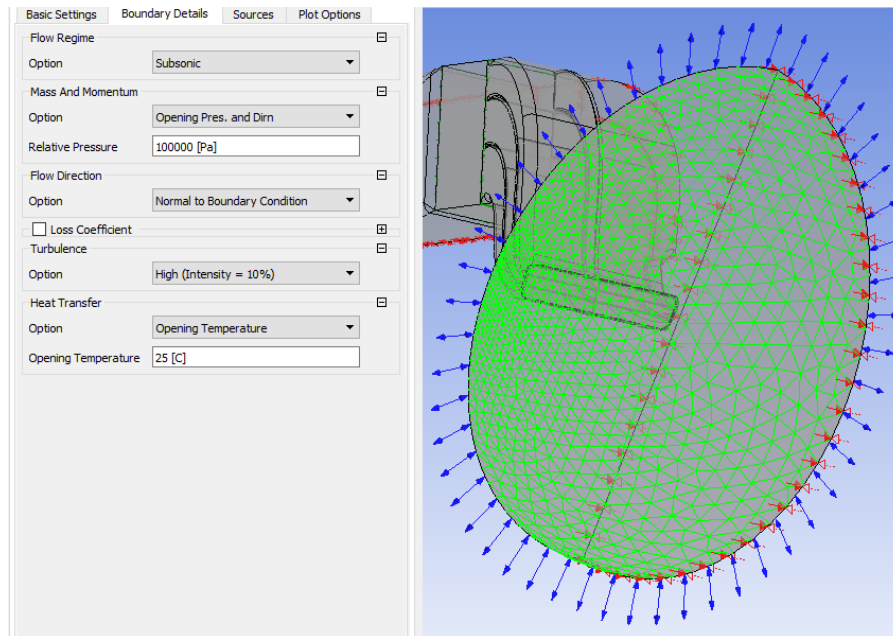
Εικόνα 5-33 Οριακή συνθήκη Outlet Μοντέλων (ενδεικτικό).

Opening

Η εφαρμογή της οριακής συνθήκης Opening διαφέρει ως προς την επιφάνεια εφαρμογής για τις προσομοιώσεις, λόγω γεωμετρικής διαφοροποίησης των μοντέλων, καθώς και των συνθηκών του τελευταίου μοντέλου, ενώ οι λοιπές παράμετροι παραμένουν ίδιες. Σε κάθε περίπτωση η συνθήκη εφαρμόζεται στις επιφάνειες που θεωρείται ότι δύναται να υπάρχει ταυτόχρονα είσοδος και έξοδος ρευστού, κάτι το οποίο το προσδιορίζει ο επιλύτης κατά την διαδικασία επίλυσης.

Για τα τέσσερα μοντέλα της πρώτης περίπτωσης Scoop που χρησιμοποιείται τεταρτοσφαίριο για την προσομοίωση του αέρα περιβάλλοντος, επιλέγεται η κυρτή επιφάνεια αυτού και εφαρμόζεται η συγκεκριμένη οριακή συνθήκη. Το καθεστώς ροής ορίζεται “Subsonic”. Ο

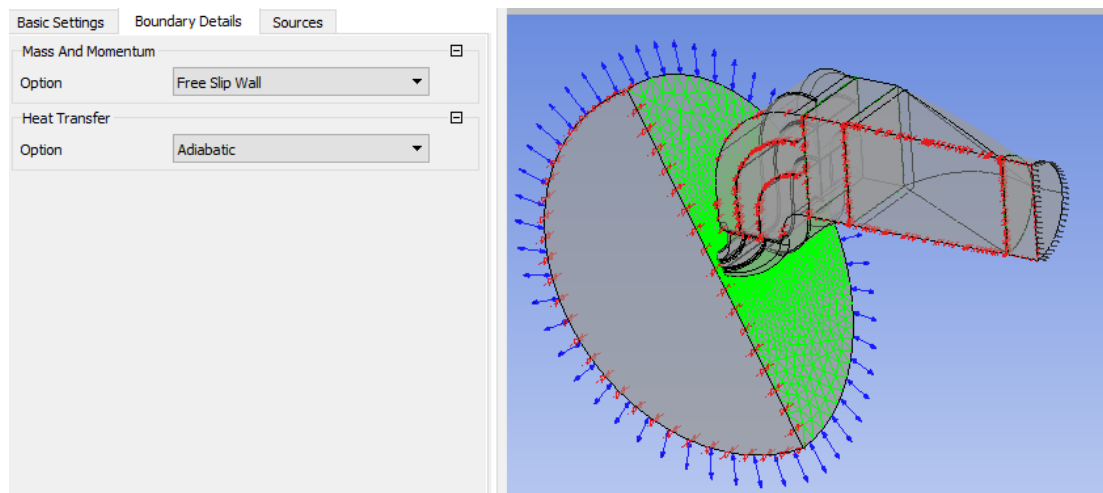
τύπος μάζας και ορμής ορίζεται “Opening Press. and Dirn”, ενώ ορίζεται και η τιμή σχετικής πίεσης (100000 Pa). Η κατεύθυνση ροής ορίζεται κάθετη στην επιφάνεια επιλογής εφαρμογής της συνθήκης, ενώ η ένταση τύρβης ορίζεται ως υψηλή “High (intensity = 10%)”. Τέλος, για την μετάδοση της θερμότητας ορίζεται η επιλογή “Opening Temperature”, ενώ προσδιορίζεται και η θερμοκρασία περιβάλλοντος του αέρα (25 °C) (Εικόνα 5-34).



Εικόνα 5-34 Οριακή συνθήκη Opening: Μοντέλα με τεταρτοσφαίριο.

Wall

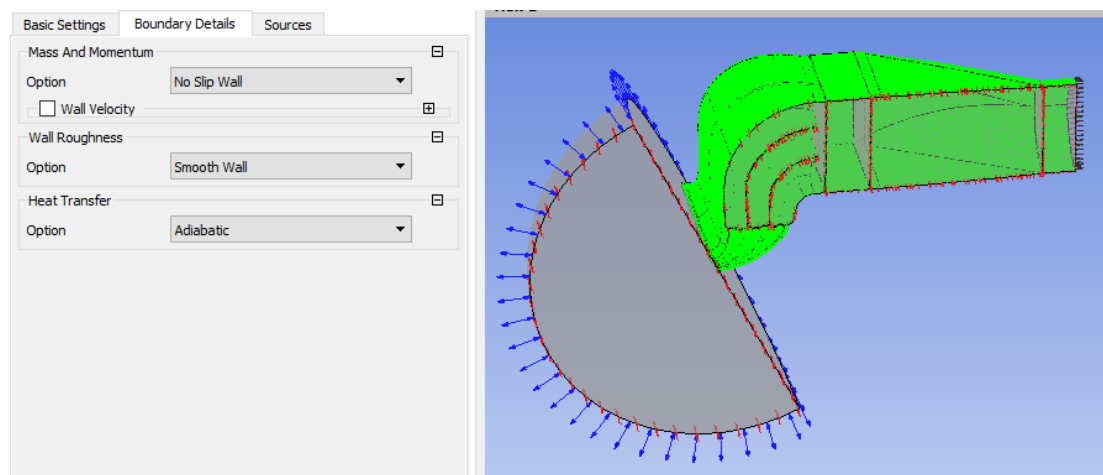
Στην περίπτωση των μοντέλων που χρησιμοποιείται τεταρτοσφαίριο για την προσέγγιση του αέρα περιβάλλοντος, επιβάλλεται οριακή συνθήκη Wall στην εναπομένονσα επιφάνεια του τεταρτοσφαιρίου, ενώ ο τύπος τοιχώματος ορίζεται ως “Free Slip Wall” και αδιαβατικό “Adiabatic” ως προς την μετάδοση θερμότητας (Εικόνα 5-35).



Εικόνα 5-35 Οριακή συνθήκη Wall- Free Slip Wall: Μοντέλα Scoop S Duct.

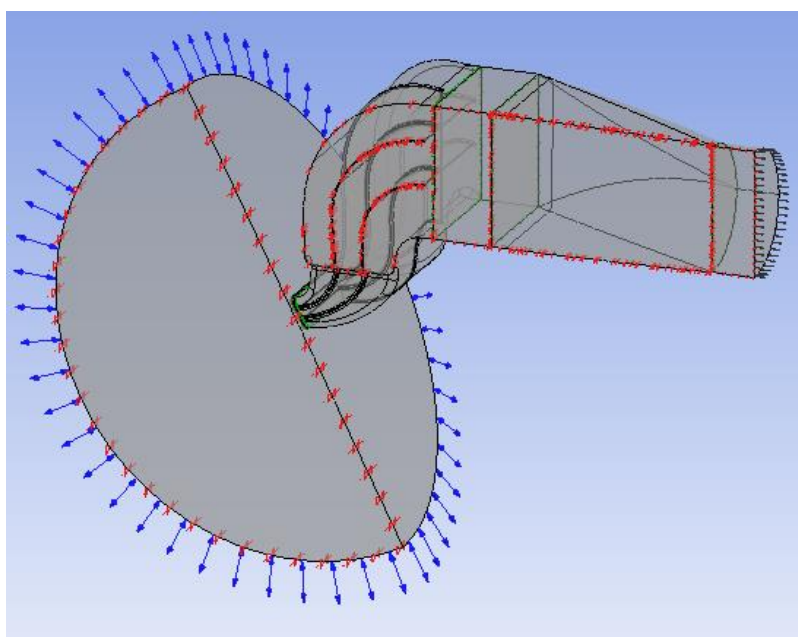
Στις λοιπές επιφάνειες, οι οποίες αποτελούν και τα φυσικά τοιχώματα των μοντέλων, επιβάλλεται οριακή συνθήκη Wall, ενώ ως τύπος ορίζεται “No Slip Wall”, καθώς τα τοιχώματα

δεν ολισθαίνουν σε σχέση με το ρευστό, ενώ επίσης θεωρούνται λεία “Smooth Wall” και αδιαβατικά “Adiabatic” ως προς την μετάδοση θερμότητας (Εικόνα 5-36).



Εικόνα 5-36 Οριακή συνθήκη Wall-No slip Wall: Μοντέλα Scoop S Duct.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ορίζονται οι πρώτες τέσσερις προσομοιώσεις που αφορούν τα μοντέλα “Scoop S Duct” (Εικόνα 5-37).



Εικόνα 5-37 Σύνολο οριακών συνθηκών μοντέλων Scoop S Duct.

Μοντέλα “B NACA S Duct”

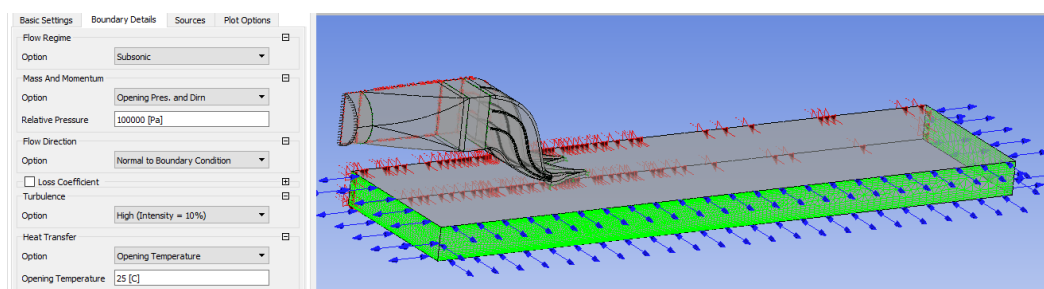
Δεδομένων των όμοιων συνθηκών της περιστροφής του ανεμιστήρα και της συμμετρίας για τα μοντέλα με αεραγωγό NACA, οι συνθήκες Symmetry και Outlet ορίζονται ομοίως με τις περιπτώσεις των μοντέλων “A Scoop S Duct”, όπως αναλύεται παραπάνω. Ωστόσο, διαφέρουν ως προς την γεωμετρική προσέγγιση του πεδίου ροής, το οποίο σε αντίθεση με τα προηγούμενα μοντέλα, προσεγγίζεται με ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Ακόμα, κατά τη προσομοίωση που αφορά το μοντέλο “B-2 NACA S Duct” το όχημα θεωρείται ότι κινείται με σταθερή ταχύτητα. Για τους λόγους αυτούς διαφοροποιείται η εφαρμογή των οριακών συνθηκών Opening και Wall. Για την προσέγγιση της κίνησης του οχήματος, ορίζεται η κίνηση

των επιφανειών του πεδίου ροής με την οριακή συνθήκη Wall, καθώς επίσης προστίθεται η οριακή συνθήκη Inlet, η οποία εφαρμόζεται στην εμπρόσθια επιφάνεια του ορθογωνίου και ορίζει την ταχύτητα της ροής στην επιφάνεια αυτή ίση με την ταχύτητα του οχήματος το οποίο κινείται προς τα μπροστά.

- Μοντέλο “B-1 NACA S Duct”

Opening

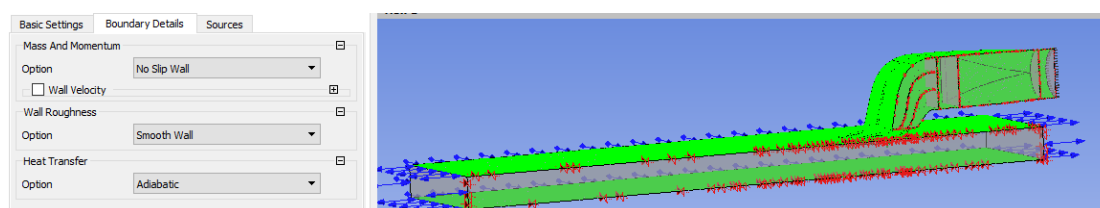
Για το μοντέλο “B-1 NACA S Duct”, όπου ο αέρας περιβάλλοντος αναπαρίσταται με το ορθογώνιο, δεδομένης της στατικής κατάστασης του οχήματος, η οριακή συνθήκη εφαρμόζεται στις πλευρικές επιφάνειες αυτού, ενώ οι παράμετροι που αφορούν τις συνθήκες περιβάλλοντος ορίζονται ομοίως με τα μοντέλα “Scoop S Duct” (Εικόνα 5-38).



Εικόνα 5-38 Οριακή συνθήκη Opening: Μοντέλο “B-1 NACA S Duct”.

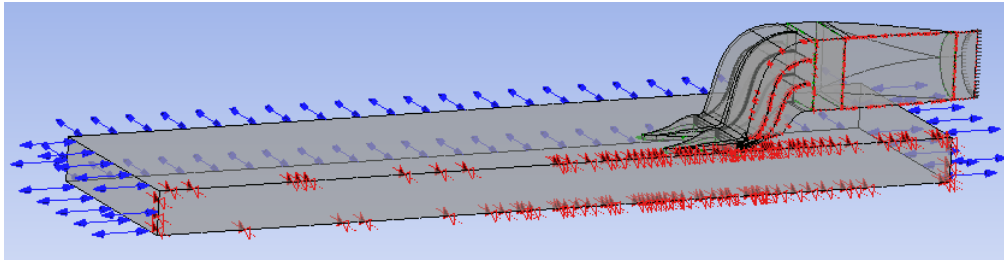
Wall

Δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή θεωρείται, ομοίως με προηγούμενες τέσσερις, στατική η κατάσταση του οχήματος, το σύνολο των τοιχωμάτων του μοντέλου αποτελείται αφενός από τα τοιχώματα της κατασκευής και αφετέρου από την άνω και κάτω επιφάνειες του ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου, οι οποίες αντιπροσωπεύουν το δάπεδο του αυτοκινήτου και το οδόστρωμα αντίστοιχα. Στο σύνολο των στερεών τοιχωμάτων εφαρμόζεται η οριακή συνθήκη Wall, ενώ ως τύπος τοιχωμάτων ορίζεται “No Slip Wall”, (καθώς το όχημα θεωρείται ακίνητο) και αδιαβατικά “Adiabatic” ως προς την μετάδοση θερμότητας (Εικόνα 5-39).



Εικόνα 5-39 Οριακή συνθήκη Wall-No Slip Wall: Μοντέλο “B-1 NACA S Duct”.

Οι οριακές συνθήκες Outlet και Symmetry ορίζονται ομοίως με τα μοντέλα “A Scoop S Duct”, καθώς και οι ιδιότητες των πεδίων ροής και των interfaces. Σύμφωνα με τα παραπάνω ορίζεται το πρόβλημα της πέμπτης προσομοίωσης για το μοντέλο “B-1 NACA S Duct” (Εικόνα 5-40).



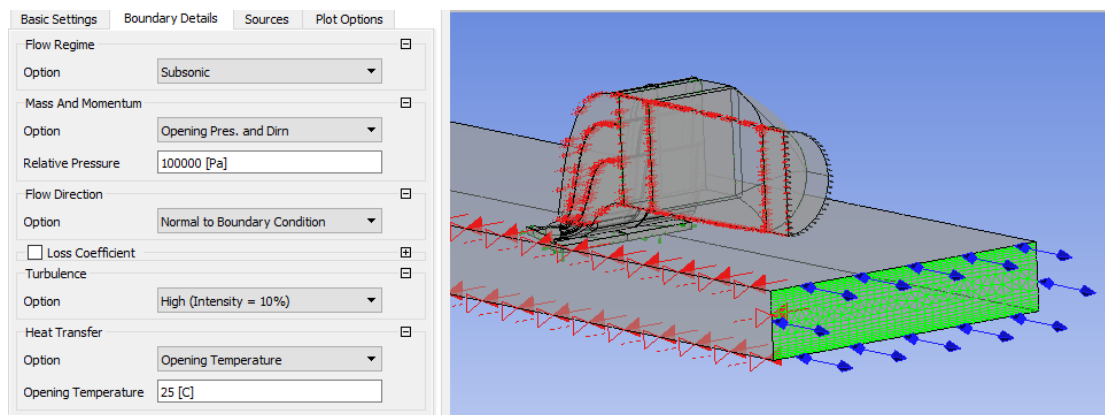
Εικόνα 5-40 Σύνολο οριακών συνθηκών μοντέλου NACA S Duct.

- Μοντέλο “B-2 NACA S Duct”

Για το έκτο μοντέλο “B-2 NACA S Duct”, δεδομένου ότι διαφοροποιούνται οι συνθήκες του προβλήματος λόγω της κίνησης του οχήματος, επιβάλλονται οι οριακές συνθήκες ως εξής.

Opening

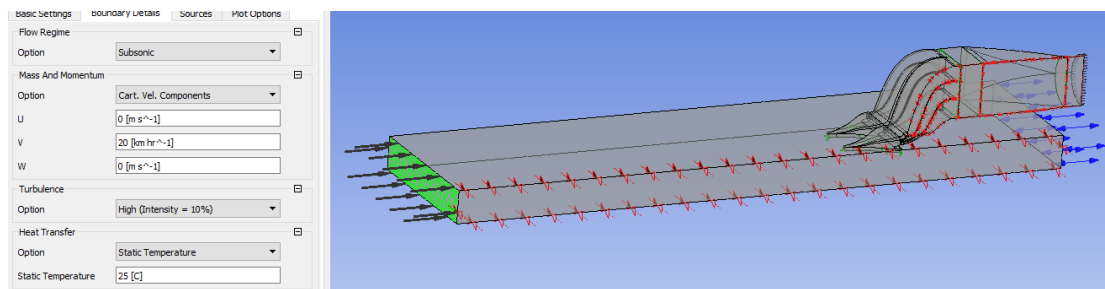
Η οριακή συνθήκη εφαρμόζεται μόνο στην πίσω πλευρά του ορθογωνίου για να προκύψει κατά την επίλυση η συμπεριφορά του ρευστού από την επιφάνεια, ενώ οι παράμετροι συνθηκών περιβάλλοντος και τύρβης ορίζονται ομοίως με τα μοντέλα “A Scoop S Duct” (Εικόνα 5-41).



Εικόνα 5-41 Οριακή συνθήκη Opening: Μοντέλο “B-2 NACA S Duct”.

Inlet

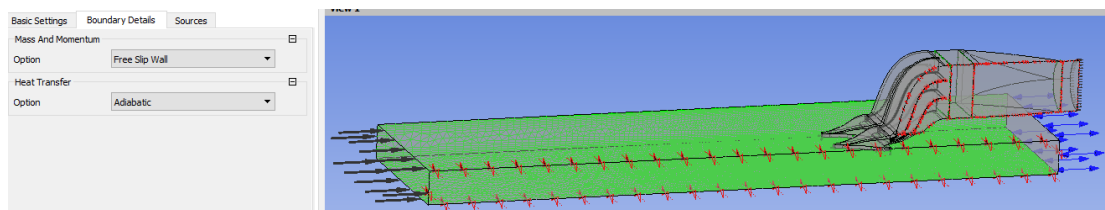
Για την προσέγγιση της κίνησης του οχήματος εφαρμόζεται η συνθήκη Inlet στην εμπρός επιφάνεια του ορθογωνίου. Ως καθεστώς ροής επιλέγεται “Subsonic” και η ταχύτητα εισόδου της ροής ορίζεται σύμφωνα με το καρτεσιανό σύστημα, με τιμή ίση με την ταχύτητα κίνησης του οχήματος (20km/h) ως προς την συνιστώσα V και φορά προς το εσωτερικό του ορθογωνίου, ενώ οι συνιστώσες U και W μηδενίζονται. Η ένταση τύρβης ορίζεται υψηλή “High (Intensity = 10%)”, ενώ ως προς τη μετάδοση θερμότητας ορίζεται στατική θερμοκρασία “Static Temperature” με τιμή όμοια με αυτή που ορίζεται στην οριακή συνθήκη Opening (25°C) (Εικόνα 5-42).



Εικόνα 5-42 Οριακή συνθήκη Inlet: Μοντέλο "B-2 NACA S Duct".

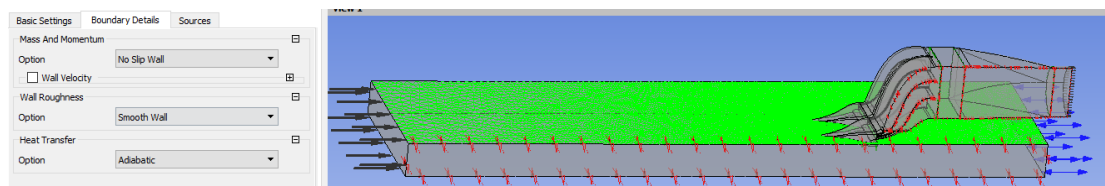
Wall

Δεδομένης της κίνησης του οχήματος που προσεγγίζεται, διαφοροποιούνται τα χαρακτηριστικά των τοιχωμάτων ως ακολούθως από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Για την άνω και πλάγια επιφάνεια επιβάλλεται η οριακή συνθήκη Wall με τύπο "Free Slip Wall", καθώς θεωρείται ότι παράλληλα στα τοιχώματα η ταχύτητα της ροής έχει τιμή η οποία υπολογίζεται κατά την επίλυση, ενώ η τιμή αυτής κάθετα στα τοιχώματα είναι ίση με μηδέν. Ως προς τη μετάδοση θερμότητας οι επιφάνειες θεωρούνται αδιαβατικές "Adiabatic" (Εικόνα 5-43).



Εικόνα 5-43 Οριακή Συνθήκη Wall-Free Slip Wall: Μοντέλο "B-2 NACA S Duct".

Για την επιφάνεια η οποία αντιπροσωπεύει το δάπεδο του οχήματος επιβάλλεται η συνθήκη Wall με τύπο "No Slip Wall" καθώς θεωρείται ότι δεν ολισθαίνει, ενώ επίσης θεωρείται λεία "Smooth Wall" και αδιαβατική "Adiabatic" (Εικόνα 5-44).

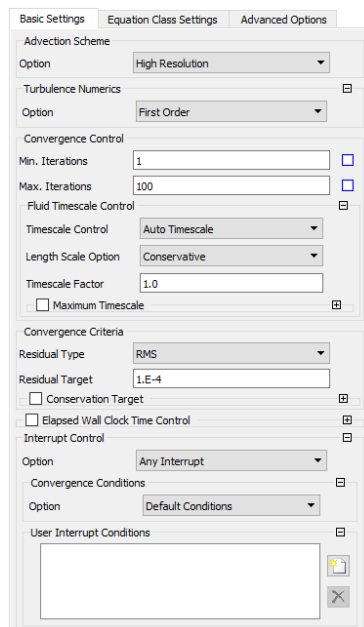


Εικόνα 5-44 Οριακή Συνθήκη Wall-No Slip Wall: Μοντέλο "B-2 NACA S Duct".

Οι οριακές συνθήκες Outlet και Symmetry ορίζονται ομοίως με τα μοντέλα "Scoop S Duct", καθώς και οι ιδιότητες των πεδίων ροής και των interfaces, όπως αναλύονται παραπάνω.

Τέλος, ορίζονται παράμετροι που αφορούν τον επιλύτη. Προσδιορίζονται οι ελάχιστες και οι μέγιστες επαναλήψεις που θα πραγματοποιηθούν για την σύγκλιση του προβλήματος, το ο στόχος ελάχιστου σφάλματος τον οποίο προσπαθεί ο επιλύτης να επιτύχει, ο έλεγχος timescale κ.ά.

Δεδομένου ότι πρόκειται για ιδιόμορφες γεωμετρίες, οι οποίες αναμένεται να οδηγήσουν σε δυσκολία της σύγκλισης του προβλήματος, ο αριθμός των μέγιστων επαναλήψεων ορίζεται ίσος με 1000. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το περιβάλλον του “Solver Control” (Εικόνα 5-45).

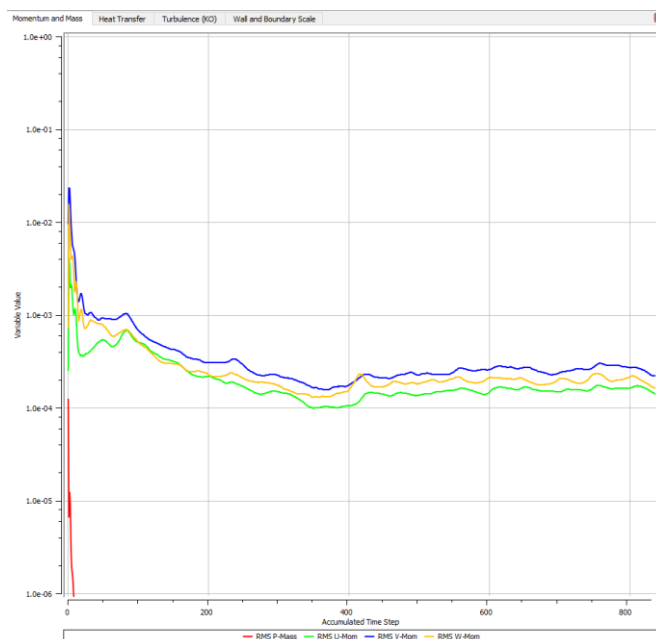


Εικόνα 5-45 Ενδεικτικό περιβάλλον Solver Control.

5.5.5 ANSYS CFX-Solver Manager

Ο Solver Manager αποτελεί ένα εργαλείο ελέγχου του επιλύτη σε σχέση με την κατανομή των υπολογιστικών πόρων που χρησιμοποιούνται, καθώς επίσης δύναται μέσα από το εργαλείο αυτό να τροποποιηθούν δεδομένα κατά την διάρκεια της επίλυσης. Πιο συγκεκριμένα ρυθμίζεται ο αριθμός των επεξεργασιών που διατίθενται από τον Η/Υ που χρησιμοποιείται, καθώς και η μέθοδος που ακολουθείται για την διαχείρισή τους κατά την επίλυση, ο τύπος προβλήματος εάν δηλαδή πρόκειται για μεγάλο πρόβλημα (Large Problem) –κάτι το οποίο ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Ακόμα ρυθμίζεται η διαθέσιμη μνήμη RAM καθώς και η κατανομή της για την επίλυση του προβλήματος. Οι ρυθμίσεις σχετίζονται με το διαθέσιμο ηλεκτρονικό υπολογιστή και προσαρμόζονται αναλόγως. Επιπλέον, στο περιβάλλον αυτό αποτυπώνονται σε μορφή γραφήματος και σε μορφή αναφοράς, τα σφάλματα RMS των τριών εξισώσεων ορμής κατά την επίλυση U,V,W Momentum, της εξίσωσης μάζας P-Mass, της εξίσωσης μεταφοράς θερμότητας H-Energy, των εξισώσεων τυρβώδους ροής K-TurbKE και O-TurbFreq και της εξίσωσης τοιχωμάτων και ορίων του πεδίου ροής για κάθε επανάληψη που πραγματοποιείται, ενημερώνοντας τον χρήστη για την σύγκλιση του αλγορίθμου επίλυσης. Εδώ αναφέρεται ότι για να θεωρούνται ακριβή τα αποτελέσματα θα πρέπει να προκύπτει πτώση τριών τάξεων μεγέθους του μέσου σφάλματος κάθε εξίσωσης. Ωστόσο, όπως αποδείχθηκε, τα προβλήματα τα οποία προσομοιώθηκαν δεν είναι δυνατόν

να συγκλίνουν σε αυτό το βαθμό, καθώς παρατηρείται αστάθεια (unsteadiness). Για την εναλλακτική επίλυση του προβλήματος ως μη μόνιμου προβλήματος ροής απαιτεί πολύ μεγαλύτερο χρόνο. Δεόμενων των διαθέσιμων υπολογιστικών εργαλείων και του χρόνου, αυτό καθίσταται αδύνατον στην παρούσα μελέτη.



Σχήμα 5-2 Ενδεικτικό γράφημα εξέλιξης σφάλματος RMS εξισώσεων μάζας – ορμής.

5.5.6 ANSYS CFX-Post

Με το εργαλείο CFX-Post όπως προαναφέρθηκε γίνεται η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ροής και της ταχύτητας αυτής, καθώς και επιρροής τους στην θερμοκρασία της κυψέλης, επί επιπέδων σε τομές του συστήματος ψύξης και επί της επιφάνειας εισαγωγής και εξαγωγής της κυψέλης. Επιπλέον, δημιουργούνται ροϊκές γραμμές τριών διαστάσεων για την κατανόηση της ροής. Τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο και γίνεται η σύγκρισή των γεωμετριών ως προς τα αποτελέσματα που αποφέρουν στο σύστημα.

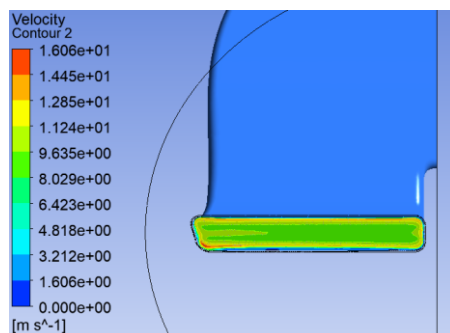
6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, στο περιβάλλον CFX-Post, των έξι προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, για κάθε μοντέλο αντίστοιχα. Τα μοντέλα τροποποιούνται ως προς τη γεωμετρία εισαγωγής, ενώ η γεωμετρία εξαγωγής παραμένει σταθερή. Οι πρώτες πέντε προσεγγίσεις αφορούν την δυσμενέστερη περίπτωση που αφορά στο όχημα σε στατική κατάσταση, ενώ στην τελευταία προσομοίωση το όχημα θεωρείται ότι κινείται με σταθερή ταχύτητα. Οι συνθήκες προσομοιώσεων περιγράφονται αναλυτικότερα στο προηγούμενο κεφάλαιο.

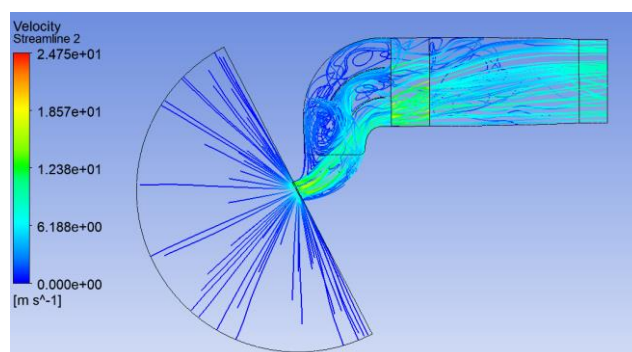
6.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 1-ΜΟΝΤΕΛΟ “A-1 SCOOP S DUCT”

Η πρώτη προσομοίωση αφορά στο μοντέλο με τα μη συνεχή οριζόντια εσωτερικά πτερύγια, τα οποία ισομοιάζουν τον αεραγωγό εισαγωγής, και αποτέλεσε την πρώτη προσέγγιση του προβλήματος για την αξιολόγηση του συστήματος σε πρώτο στάδιο. Υπενθυμίζεται ότι πρόκειται για προσομοίωση όπου το όχημα θεωρείται στάσιμο, ενώ βρίσκεται σε κατάσταση υπερθέρμανσης, την οποία καλείται ο ανεμιστήρας να διαχειριστεί απομακρύνοντας την παραγόμενη θερμότητα.

Αποτυπώνοντας τις γραμμές ροής στο σύνολο του πεδίου (Εικόνα 6-2), παρατηρείται ότι η ροή, παρά την σχετικά ομοιόμορφη κατανομή της τοπικής ταχύτητας στην είσοδο του Scoop (Εικόνα 6-1), δεν ακολουθεί τις γεωμετρίες του άνω ζεύγους οριζόντιων πτερυγίων, με αποτέλεσμα την συγκέντρωση υψηλών ταχυτήτων στο κάτω μέρος του αγωγού, ενώ στα άνω επίπεδα, στο κανάλι που σχηματίζεται μεταξύ των πτερυγίων προκύπτει χαμηλότερη ταχύτητα, ενώ στο ανώτατο κανάλι πρακτικά η ταχύτητα είναι σχεδόν μηδενική και στροβιλώδης. Επιπλέον παρατηρείται έντονη ανακυκλοφορία ανάμεσα στο άνω ζεύγος των πτερυγίων (Εικόνα 6-2).

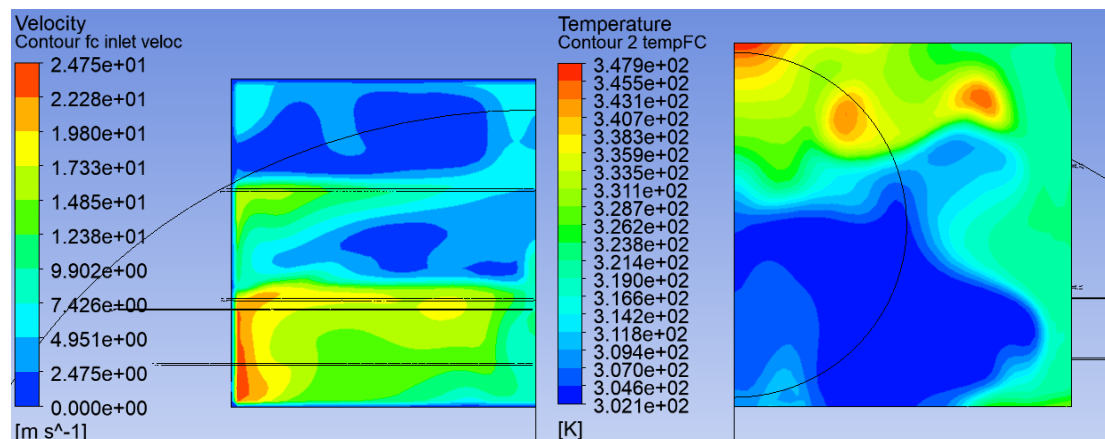


Εικόνα 6-1 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής Scoop, Προσομοίωση 1.



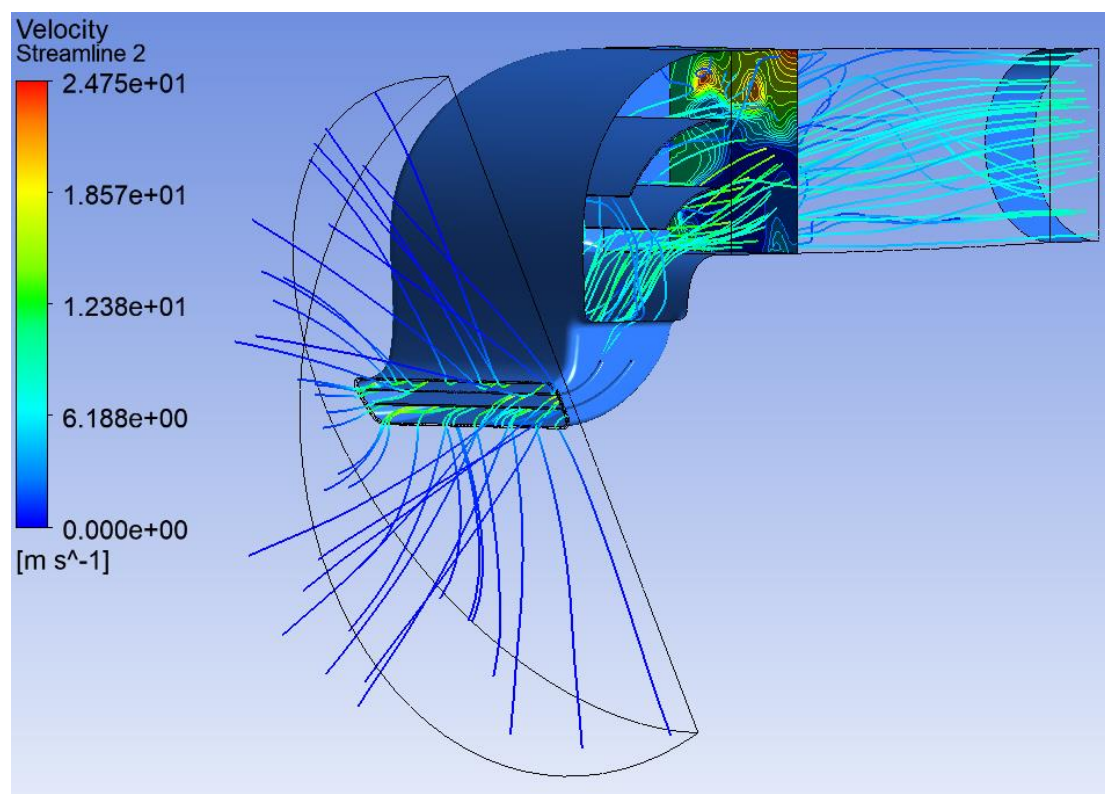
Εικόνα 6-2 Γραμμές πεδίου ροής, Προσομοίωση 1.

Τα αποτελέσματα της τοπικής ταχύτητας στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης, τελικά αποτυπώνουν μία έντονα ανομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων της ροής (*Εικόνα 6-3α*), η οποία οδηγεί αντίστοιχα στην ανομοιόμορφη απαγωγή της θερμότητας όπως επιβεβαιώνεται στην επιφάνεια εξαγωγής της κυψέλης (*Εικόνα 6-3β*), όπου σημειώνεται ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία 29-74.8°C διαφορά η οποία είναι εκτός ορίων ανοχής.



Εικόνα 6-3 α) (αριστερά) (εμπρόσθια οπτική μοντέλου) Τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) (οπίσθια οπτική μοντέλου) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 1.

Η επιρροή της ροής στην θερμοκρασία της κυψέλης αποτυπώνεται παρακάτω (*Εικόνα 6-4*).



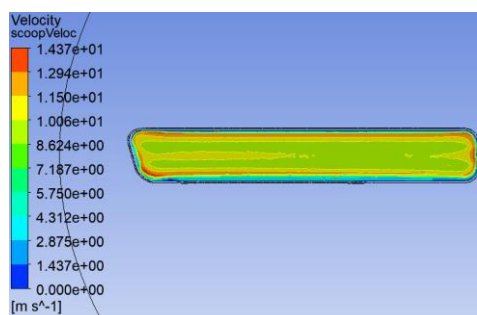
Εικόνα 6-4 Γραμμές Ροής - θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 1.

Τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούν στην επανασχεδίαση του συστήματος τροποποιώντας τα πτερύγια σε συνεχή, καθώς και τις θέσεις αυτών εντός του αγωγού για επίτευξη ομαλότερης κατανομής της ροής. Ο αεραγωγός Scoop παραμένει ίδιος, καθώς η επιρροή του στην συλλογή του αέρα είναι ικανοποιητική, καθώς και η γεωμετρία εξαγωγής.

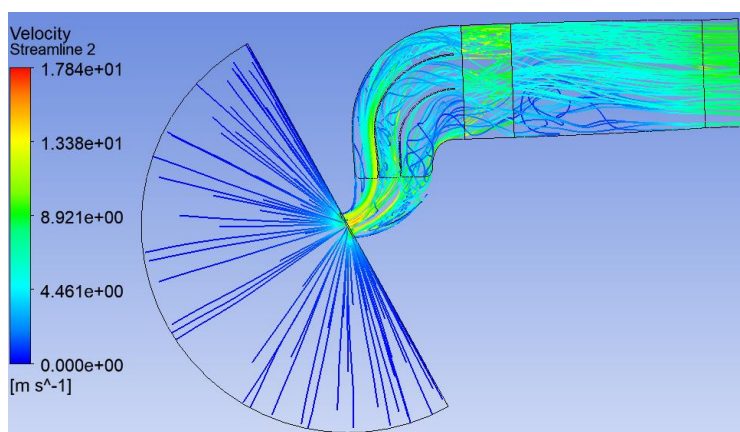
6.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 2-ΜΟΝΤΕΛΟ “A-2 SCOOP S DUCT”

Το μοντέλο της δεύτερης προσομοίωσης τροποποιείται σύμφωνα με τα αποτελέσματα της πρώτης, δημιουργώντας ενιαία εσωτερικά οριζόντια πτερύγια, μετακινώντας τα ως προς την θέση τους εντός του αγωγού S. Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό μήκους ανά τις διατομές στο εσωτερικό του αγωγού, στο οποίο τοποθετείται το κάτω πτερύγιο ορίζεται ίσο με 45%, ενώ το άνω πτερύγιο τοποθετείται σε ποσοστό 75% του μήκους, διαμορφώνοντας το ποσοστό του άνω καναλιού ροής ίσο με 25% του ύψους, όπως αναλυτικά περιγράφεται στο κεφάλαιο που αφορά στον σχεδιασμό του συγκεκριμένου μοντέλου. Σημειώνεται ότι η θέση των πτερυγίων στη διατομή εισαγωγής του Scoop παραμένουν ίδιες, δηλαδή μοιράζουν την διατομή εισαγωγής σε ίσα μέρη. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται εσωτερικά κανάλια στον αγωγό, διαφορετικών όγκων. Το όχημα θεωρείται και πάλι στάσιμο, ενώ βρισκόμενο σε κατάσταση υπερθέρμανσης με τον ανεμιστήρας να λειτουργεί στο μέγιστο για την απομάκρυνση της παραγόμενης θερμικής ισχύος.

Αποτυπώνοντας την κατανομή ταχύτητας στο επίπεδο εισαγωγής του Scoop παρατηρείται μία ομοιόμορφη κατανομή της τοπικής ταχύτητας, ενώ οι μικρές αυξήσεις των τιμών στο κέντρο που παρατηρούνται οφείλονται στην ύπαρξη των εσωτερικών πτερυγίων (Εικόνα 6-5). Σχεδιάζοντας τις γραμμές ροής εντός του πεδίου, παρατηρείται ότι η ροή εξαναγκάζεται να ακολουθήσει τις γεωμετρίες των πτερυγίων, γεγονός το οποίο προκύπτει από την ενιαία μορφοποίηση τους. Επίσης, σημειώνεται αύξηση της ταχύτητας ροής στο άνω κανάλι, λόγω της μείωσης του όγκου του καναλιού, ενώ προκύπτουν περιοχές που παρατηρείται ανακυκλοφορία του αέρα, μία στροβιλώδης ροή στο μέσο κανάλι, ενώ μία χαμηλότερης ταχύτητας ροή έντονα στροβιλώδης σε σχέση με τα ανώτερα κανάλια, παρατηρείται στο κατώτερο κανάλι, λόγω της έντονης αύξησης του όγκου του συγκεκριμένου καναλιού (Εικόνες 6-6, 6-10, 6-11).

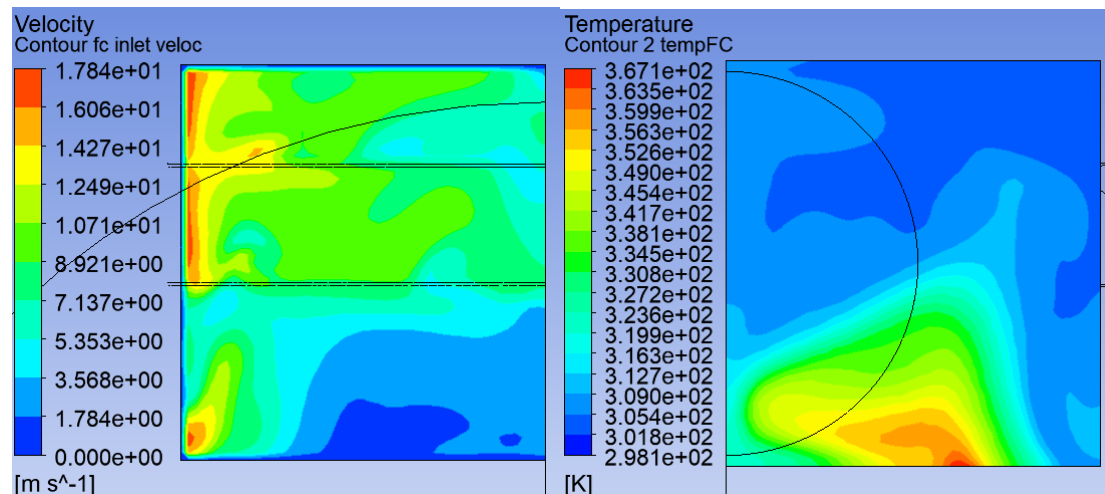


Εικόνα 6-5 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής Scoop, Προσομοίωση 2.



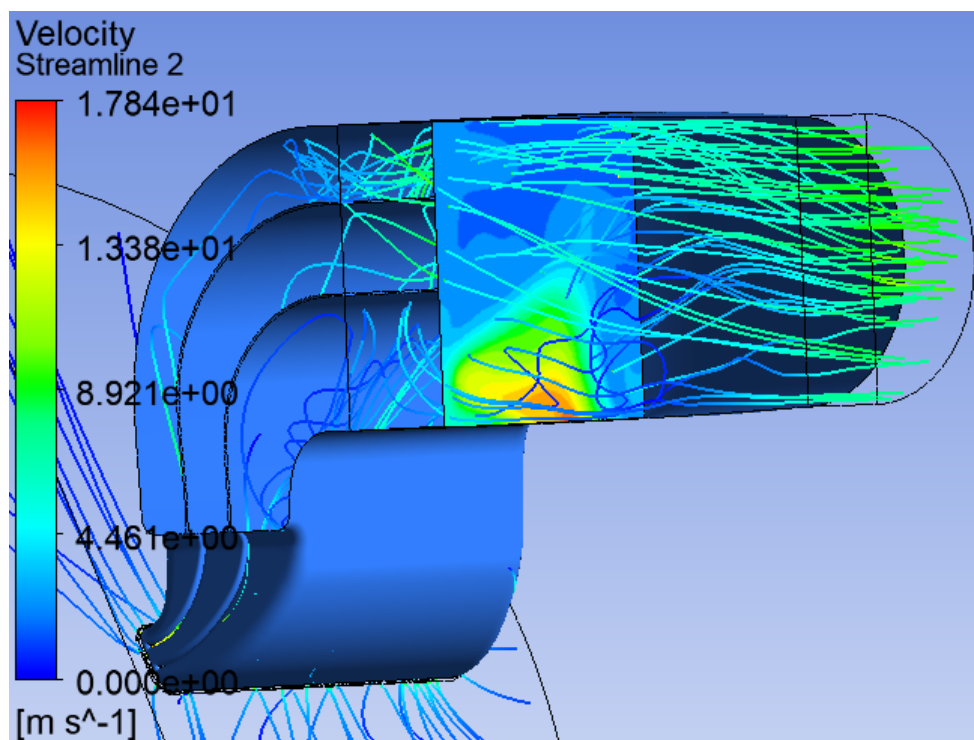
Εικόνα 6-6 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 2.

Η τοπική ταχύτητα της ροής στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης καυσίμου σημειώνει έντονη ανομοιομορφία, με ελάχιστη και μέγιστη τιμή από 0 έως 17.84m/s, όπως αντίστοιχα επιδρά στην μεταφορά της θερμότητας από την κυψέλη, αποτυπώνοντας στην επιφάνεια εξαγωγής της κυψέλης μέγιστη και ελάχιστη τιμή τοπικής θερμοκρασίας 25 έως 94°C αντίστοιχα, διαφορά θερμοκρασίας η οποία προφανώς βρίσκεται εκτός επιτρεπτής ανοχής, ενώ επίσης είναι αυξημένη σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση (Εικόνα 6-7). Σημειώνεται ότι η ταχύτητα πλησίον των τοιχωμάτων του αγωγού παίρνει μηδενικές ταχύτητες λόγω του οριακού στρώματος που αναπτύσσεται.

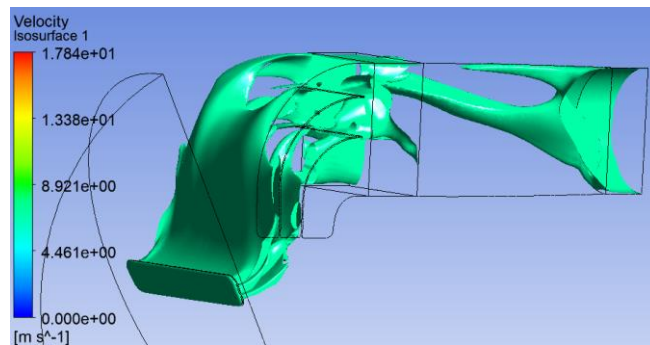


Εικόνα 6-7 α) (αριστερά)(εμπρόσθια οπτική μοντέλου) τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά)(οπίσθια οπτική μοντέλου) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 2.

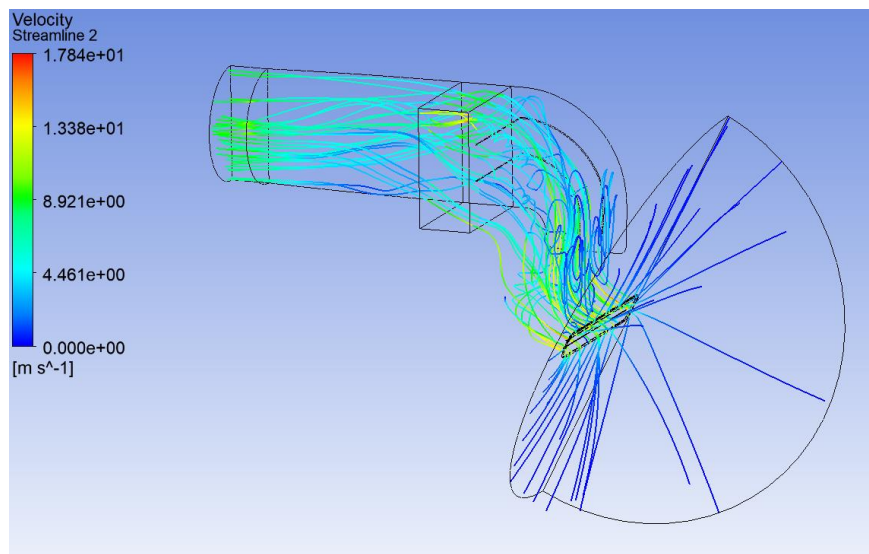
Η επιρροή της ταχύτητας ροής στην επιφάνεια εξαγωγής της κυψέλης (Εικόνα 6-8) και η κατανομή της ταχύτητας τιμής 7m/s (Εικόνα 6-9), φαίνονται παρακάτω.



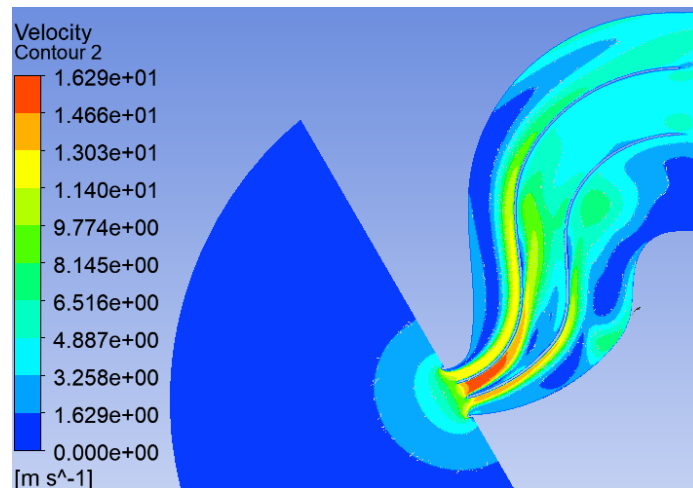
Εικόνα 6-8 Καμπύλες Ροής-θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 2.



Εικόνα 6-9 3D επιφάνειες αποτύπωσης ταχύτητας 7m/s, Προσομοίωση 2.



Εικόνα 6-10 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 2.



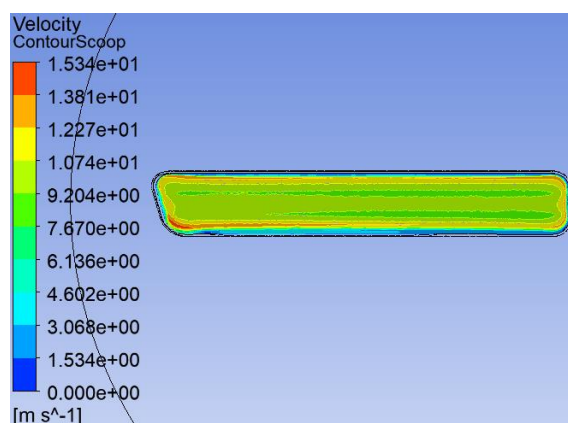
Εικόνα 6-11 Τομή υπό κλίση συμμετρικού μοντέλου, Τοπική Ταχύτητα ροής εντός εισαγωγής, Προσομοίωση 2.

Γενικά, παρατηρείται ανομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας ροής επί της επιφάνειας εισαγωγής της κυψέλης, ωστόσο παρατηρείται σχετική ομοιομορφία αυτής για τα δύο άνω κανάλια κατά την ροή μέσα στον αγωγό (Εικόνα 6-11). Τα παραπάνω αποτελέσματα καθοδηγούν την επανασχεδίαση του τρίτου μοντέλου, ως προς την θέση των πτερυγίων για την προσέγγιση της ομοιομορφίας ταχυτήτων.

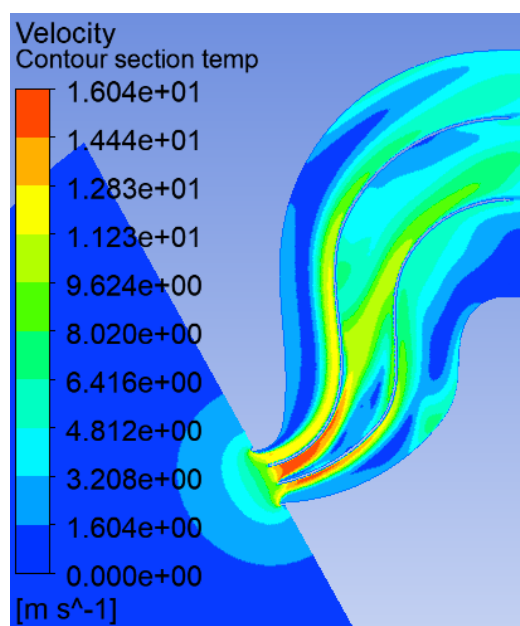
6.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 3-ΜΟΝΤΕΛΟ “A-3 SCOOP S DUCT”

Το μοντέλο της τρίτης προσομοιώσεως τροποποιείται μόνο ως προς τις θέσεις των πτερυγίων, για την τροποποίηση του όγκου των εσωτερικών καναλιών του αγωγού. Συγκεκριμένα το κατώτερο πτερύγιο τοποθετείται σε ποσοστό του ύψους 40% (μειωμένο σε σχέση με το προηγούμενο ποσοστό), το άνω πτερύγιο σε ποσοστό 73% (προσπαθώντας να διατηρηθεί η κατανομή μεταξύ των άνω καναλιών), αναδιανέμοντας τον όγκο στα εσωτερικά κανάλια ροής, με το άνω κανάλι να λαμβάνει το υπολειπόμενο ποσοστό του μήκους ίσο με 27%. Σημειώνεται ότι, η θέση των πτερυγίων στην διατομή εισαγωγής του Scoop παραμένουν ίδιες, μοιράζοντας την διατομή σε ίσα μέρη. Οι λοιπές συνθήκες παραμένουν ίδιες για στάσιμο όχημα, εκπομπή θερμότητας και παροχή μάζας.

Στην διατομή εισαγωγής του Scoop, η ροή κατανέμεται ομοιόμορφα με τις διακύμανσης της ταχύτητας κεντρικά αυτής να οφείλονται στην γεωμετρία των εσωτερικών πτερυγίων (Εικόνα 6-12). Ωστόσο, παρά το γεγονός αυτό, η αποτύπωση των αποτελεσμάτων στην κατά μήκος τομή της εισαγωγής, δείχνει την ανομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων και πάλι, όπου διατηρούνται οι τιμές χαμηλότερης ταχύτητας στο κατώτερο κανάλι του αγωγού παρά την μείωση του όγκου του σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο (Εικόνα 6-13).

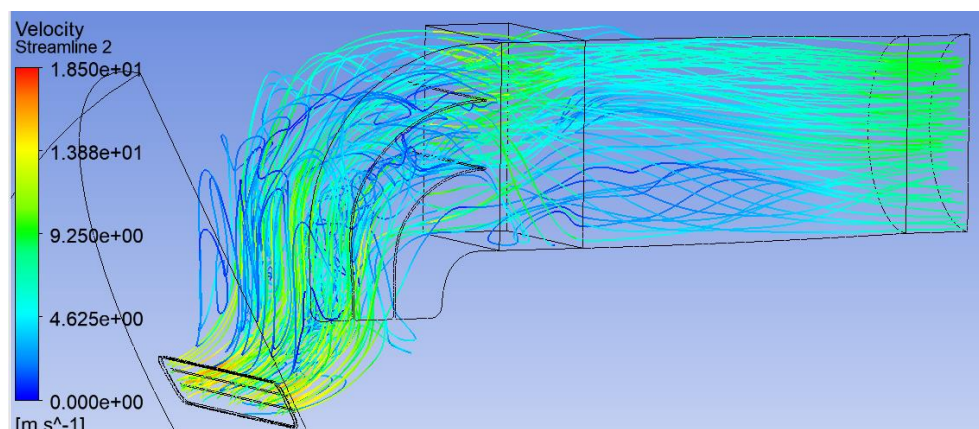


Εικόνα 6-12 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής Scoop, Προσομοίωση 3.

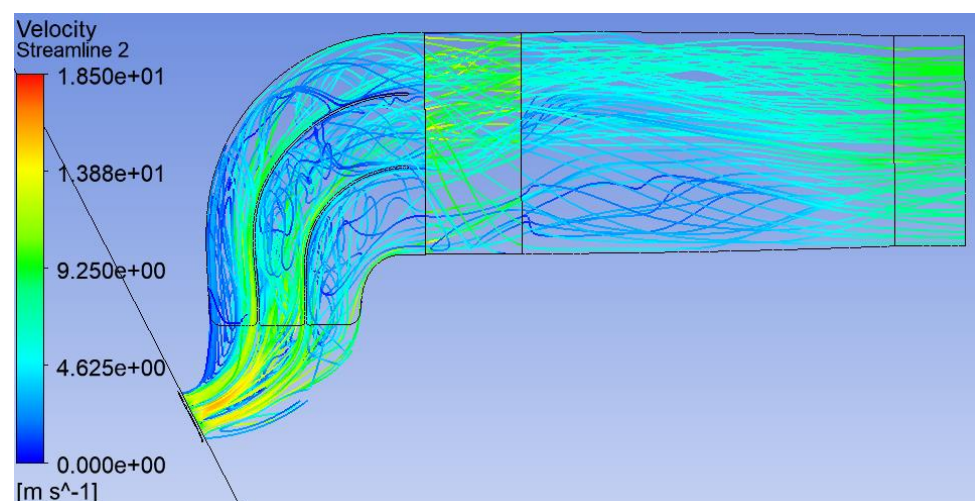


Εικόνα 6-13 Τομή υπό κλίση συμμετρικού μοντέλου, Τοπική Ταχύτητα ροής εντός εισαγωγής, Προσομοίωση 3.

Κατά την σχεδίασης των γραμμών ροής, παρατηρείται στροβιλιζόμενη ροή σε όλη την εισαγωγή, ενώ παρατηρείται χαμηλότερη ταχύτητα στο κατώτερο κανάλι του αεραγωγού (Εικόνα 6-14, 6-15).

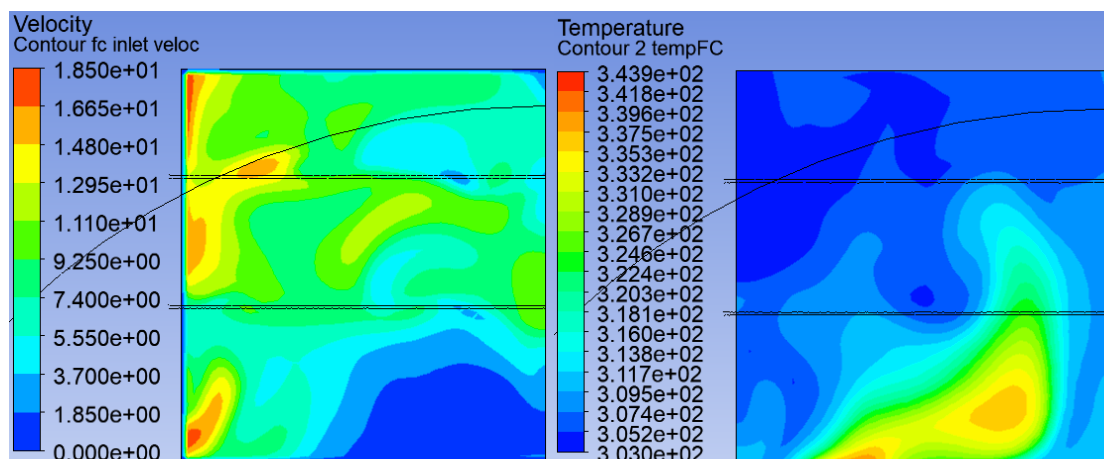


Εικόνα 6-14 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 3.



Εικόνα 6-15 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 3.

Τα αποτελέσματα ταχυτήτων ροής στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης καυσίμου δείχνουν αντίστοιχα μία ανομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας, η οποία μεταφράζεται αναλόγως στην απαγωγή της θερμότητας από το σώμα της κυψέλης.



Εικόνα 6-16 α) (αριστερά) τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 3.

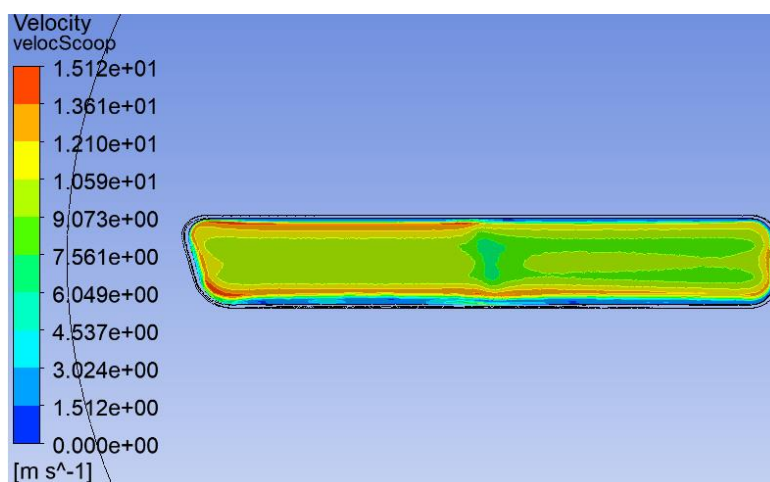
Η ελάχιστη και η μέγιστη ταχύτητα στην επιφάνεια της κυψέλης κυμαίνεται από 0 έως 18.5m/s (*Εικόνα 6-16α*), ενώ η διακύμανση στις τοπικές θερμοκρασίες της επιφάνειας εξαγωγής της κυψέλης λαμβάνει τιμές 29.9 έως 70.80°C, εύρος το οποίο δεν είναι αποδεκτό, ωστόσο η διακύμανση παρουσιάζει βελτίωση σε σχέση με τις προηγούμενες δύο προσομοιώσεις (*Εικόνα 6-16β*).

Η ροή θεωρείται ανομοιομορφή, ωστόσο παρουσιάζει βελτίωση με τη τροποποίηση των πτερυγίων, ενώ επίσης περιορίζεται η περιοχή των χαμηλών ταχυτήτων ροής, όπως και η περιοχή υψηλών θερμοκρασιών στην επιφάνεια της κυψέλης. Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα πραγματοποιείται επανασχεδιασμός της εισαγωγής, ο οποίος αφορά στην προσθήκη κατακόρυφων πτερυγίων.

6.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 4-MΟΝΤΕΛΟ “A-4 SCOOP S DUCT”

Στο προηγούμενο μοντέλο προστίθενται κατακόρυφα πτερύγια για τον έλεγχο της ροής, ενώ οι θέσεις των οριζόντιων πτερυγίων διατηρούνται σταθερές, για την κατανόηση της επιρροής των καθέτων πτερυγίων στα ροϊκά φαινόμενα. Συγκεκριμένα, τα κατακόρυφα πτερύγια τοποθετούνται κατά το μήκος της κυψέλης, σε ποσοστό του μήκος 33% έκαστο, μοιράζοντας ισόποσα την επιφάνεια της κυψέλης, ενώ ως προς την εισαγωγή τους τοποθετούνται στο μέσο κάθε ακροφυσίου Scoop, διαιρώντας την διατομή σε δύο ίσα μέρη, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο της σχεδίασης. Ουσιαστικά, με την διάταξη αυτή δημιουργούνται έξι κανάλια για κάθε ακροφύσιο Scoop. Οι συνθήκες προσομοίωσης είναι όμοιες με τις προηγούμενες.

Η εφαρμογή των κατακόρυφων πτερυγίων αποτυπώνεται στα αποτελέσματα της ταχύτητας τοπικά, για τη διατομή εισαγωγής του Scoop παρακάτω, όπου οι διαφοροποιήσεις των τιμών, οφείλονται στις διατάξεις πτερυγίων (*Εικόνα 6-17*).

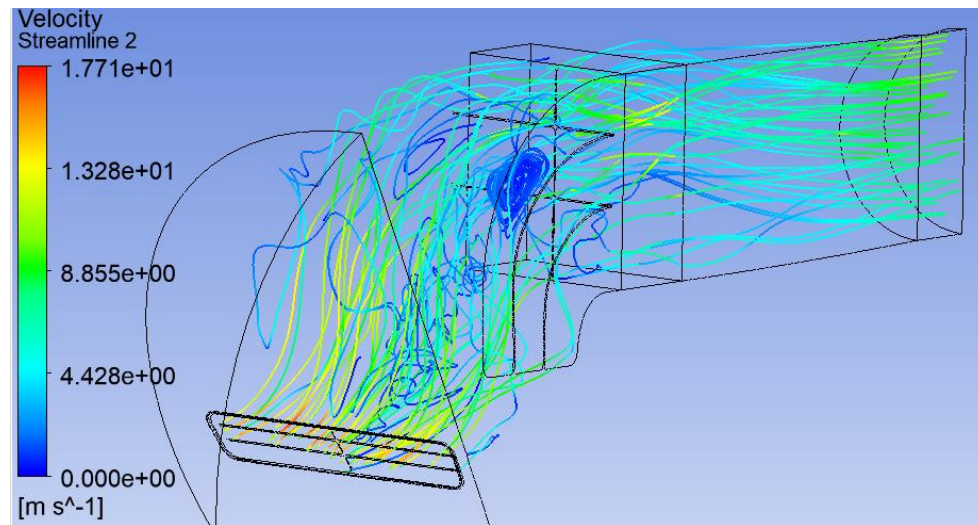


Εικόνα 6-17 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής Scoop, Προσομοίωση 4.

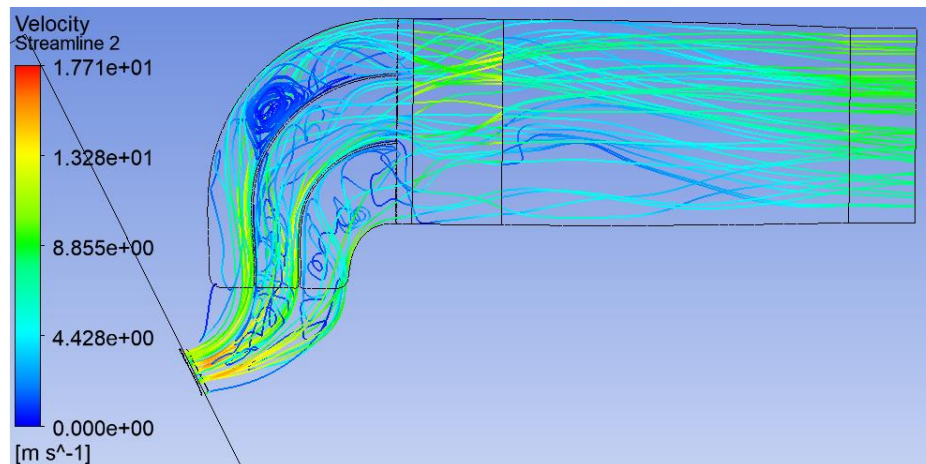
Η σχεδίαση των γραμμών ροής φαίνεται παρακάτω (*Εικόνες 6-18, 6-19, 6-20*) όπου, ομοίως με τις προηγούμενες προσομοιώσεις, παρατηρείται ανακυκλοφορία σε διάφορες περιοχές, καθώς και έντονα στροβιλιζόμενη ροή στα ανώτερα εσωτερικά κανάλια.

Η ταχύτητα της ροής τοπικά, η οποία αποτυπώνεται στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης καυσίμου, έχει εύρος τιμών 0 έως 17.72 m/s (*Εικόνα 6-21α*), ενώ η επιρροή της στην τοπική θερμοκρασία, όπως αποτυπώνεται στην επιφάνεια εξαγωγής της κυψέλης καυσίμου, έχει εύρος τιμών 30 έως 50.82°C. Παρατηρείται η μεγαλύτερη μείωση διαφοράς της

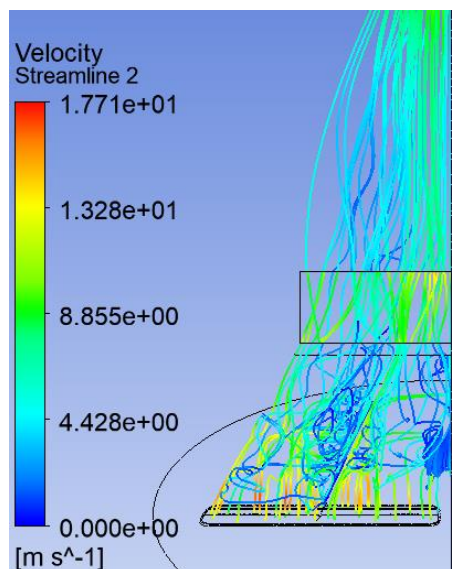
θερμοκρασίας στην επιφάνεια εξαγωγής κυψέλη καυσίμου, ωστόσο παραμένει εκτός επιτρεπτής ανοχής (Εικόνα 6-21β).



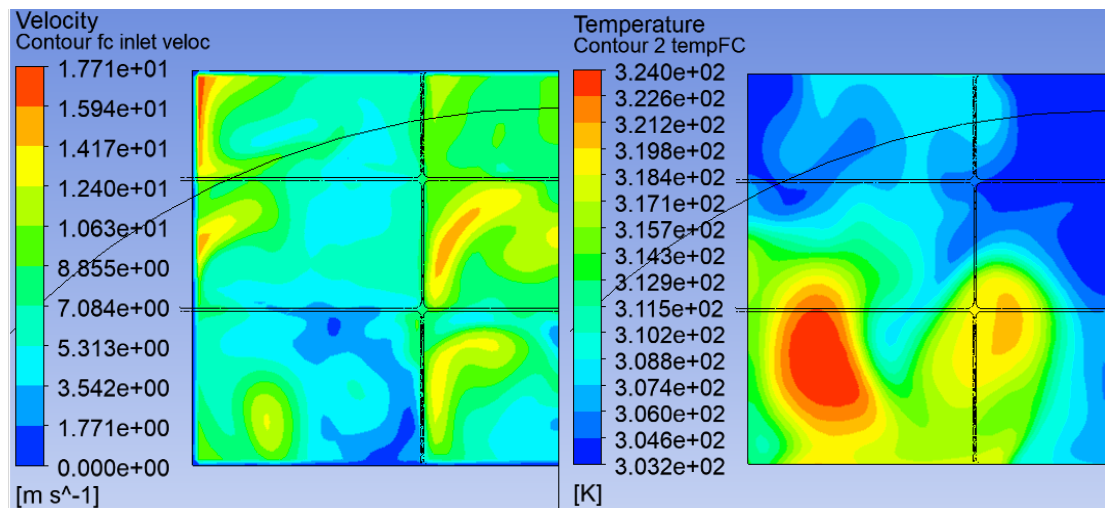
Εικόνα 6-18 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 4.



Εικόνα 6-19 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 4.

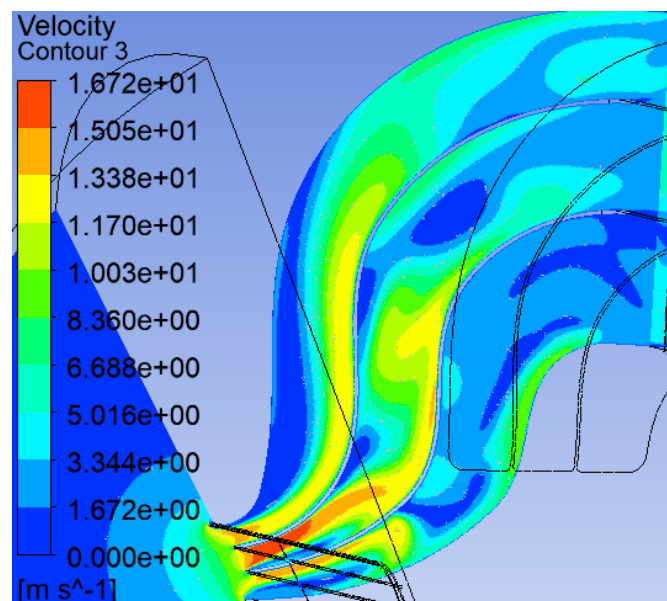


Εικόνα 6-20 Γραμμές ροής σε κάτοψη, Προσομοίωση 4.



Εικόνα 6-21 α) (αριστερά) τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 4.

Παρατηρείται αυξημένη ταχύτητα στην επιφάνεια εισαγωγής κυψέλης καυσίμου, η οποία προέρχεται από τη ροή των εσωτερικών καναλιών που βρίσκονται πλησίον του επιπέδου συμμετρίας της κυψέλης, σε σχέση με αυτά τα οποία βρίσκονται κοντά στα εξωτερικά τοιχώματα του μοντέλου. Παρακάτω φαίνεται η ταχύτητα της ροής για επίπεδο τομής της εισαγωγής (Εικόνα 6-22).



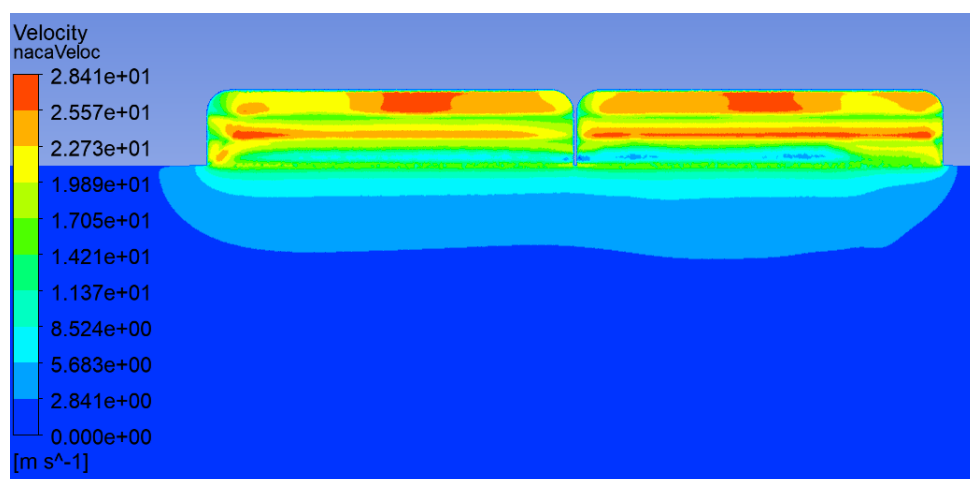
Εικόνα 6-22 Τομή υπό κλίση, τοπικές ταχύτητες εισαγωγής.

Συνέχεια της άνω προσομοίωσης θα μπορούσε να αποτελέσει μία νέα προσομοίωση με αναδιάταξη των εσωτερικών περυγίων (οριζοντίων-καθέτων) για την περαιτέρω εξομάλυνση των ταχυτήτων ροής, ωστόσο η παρούσα εργασία δεν επεκτείνεται περαιτέρω σε αυτόν τον τύπο εισαγωγής, καθώς στην συνέχεια μελετάται εισαγωγή με χρήση αεραγωγών τύπου NACA. Τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης ως προς τη συμπεριφορά των περυγίων χρησιμοποιούνται για την επανασχεδίασης του μοντέλου της επόμενης προσομοίωσης.

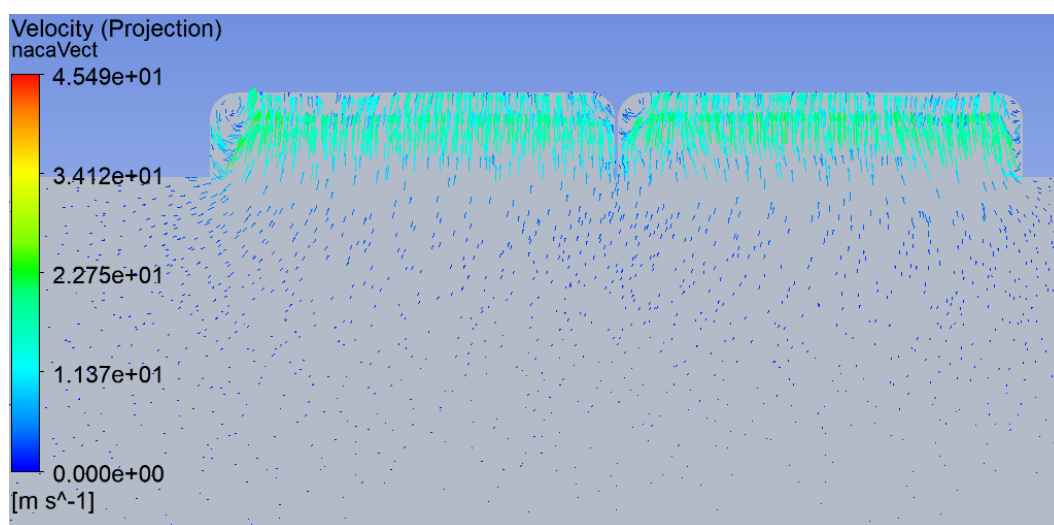
6.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 5-ΜΟΝΤΕΛΟ “B-1 NACA S DUCT”

Το μοντέλο που μελετάται στην παρούσα προσομοίωση, διαφέρει από τα προηγούμενα, καθώς ως τύπο αεραγωγού για τη συλλογή του αέρα χρησιμοποιεί αεραγωγούς τύπου NACA. Σημειώνεται ότι, το μοντέλο της παρούσας προσομοίωσης δεν διαθέτει χείλος πρόσπτωσης, κάτι το οποίο προστίθεται στο επόμενο μοντέλο. Το συγκεκριμένο μοντέλο αξιοποιεί τα αποτελέσματα της Προσομοίωσης 4, για τον ανασχεδιασμό των εσωτερικών πτερυγίων. Συγκεκριμένα, τα κατακόρυφα πτερύγια τοποθετούνται σε ποσοστό του μήκους της κυψέλης ίσο με 25%, διακριτοποιώντας (νοητά) κάθετα σε τρία μη ίσα τμήματα την επιφάνεια της κυψέλης, μειώνοντας των όγκο των καναλιών ροής που βρίσκονται πλησίον των εξωτερικών τοιχωμάτων του αγωγού. Σημειώνεται ότι η διαίρεση των διατομών εισαγωγής του αγωγού ισχύει όπως πριν σε δύο ίσα μέρη σε σχέση με τα κάθετα πτερύγια, όπως αναλυτικά περιγράφεται στο κεφάλαιο του σχεδιασμού. Οι συνθήκες προσομοίωσης είναι όμοιες με των προηγούμενων.

Η αποτύπωση της ταχύτητας ροής στην διατομή εισόδου του αγωγού “S”, δείχνει ανομοιομορφία (Εικόνα 6-23, 6-24), καθώς παρατηρείται μειωμένη ταχύτητα στο κατώτερο μέρος της εισαγωγής σε αντίθεση με το ανώτερο στρώμα της, με αποτέλεσμα την άνιση τροφοδοσία του αγωγού “S”.

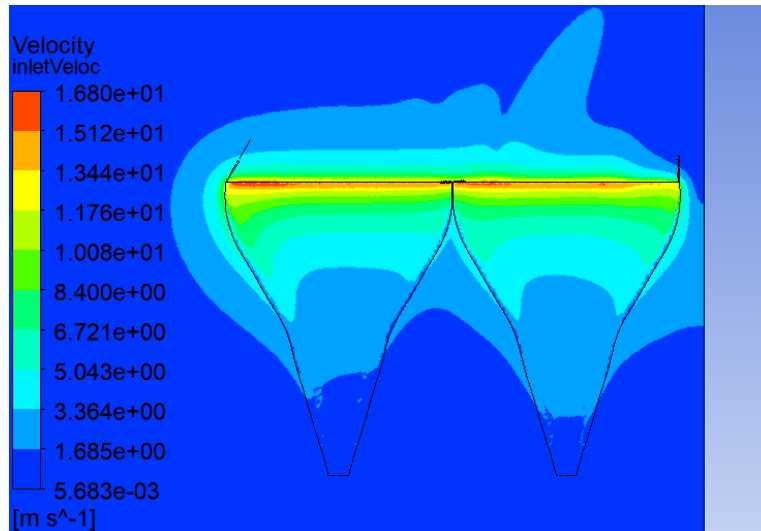


Εικόνα 6-23 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής αγωγού S, Προσομοίωση 5.

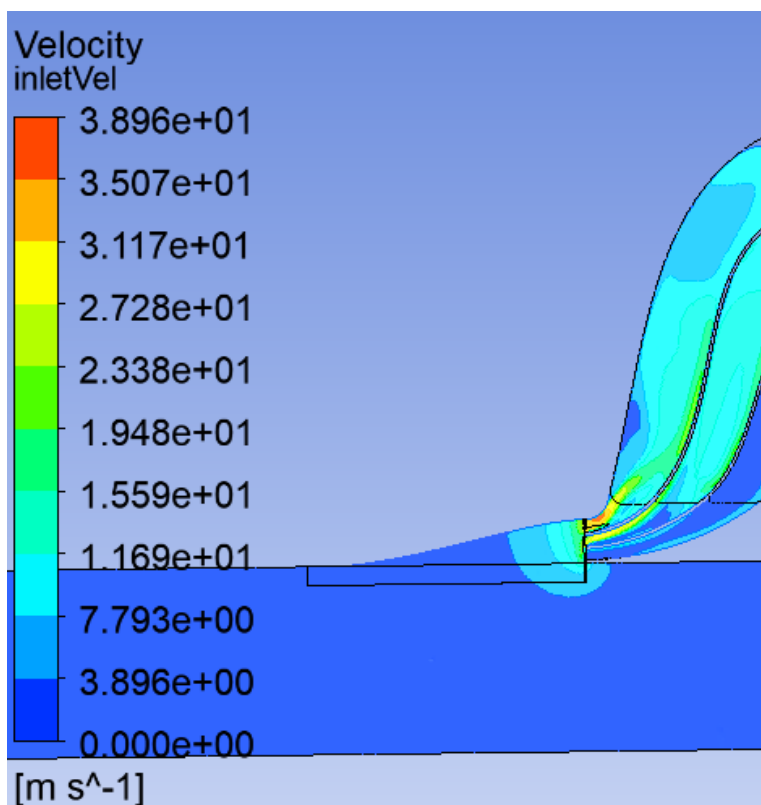


Εικόνα 6-24 Τοπική ταχύτητα και διεύθυνση αυτής, διατομής εισαγωγής Scoop, Προσομοίωση 5.

Το γεγονός αυτό οφείλεται στην τροφοδοσία του αγωγού από τους αεραγωγούς. Η ταχύτητα εισαγωγής τους φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 6-25). Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η ροή στους αεραγωγούς κοντά στο σημείο του αγωγού, υπερπηδά το μεγαλύτερο μέρος των κατώτερων εσωτερικών καναλιών, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της τοπικής ταχύτητας στην διατομή εισαγωγής του αγωγού (Εικόνα 6-26).

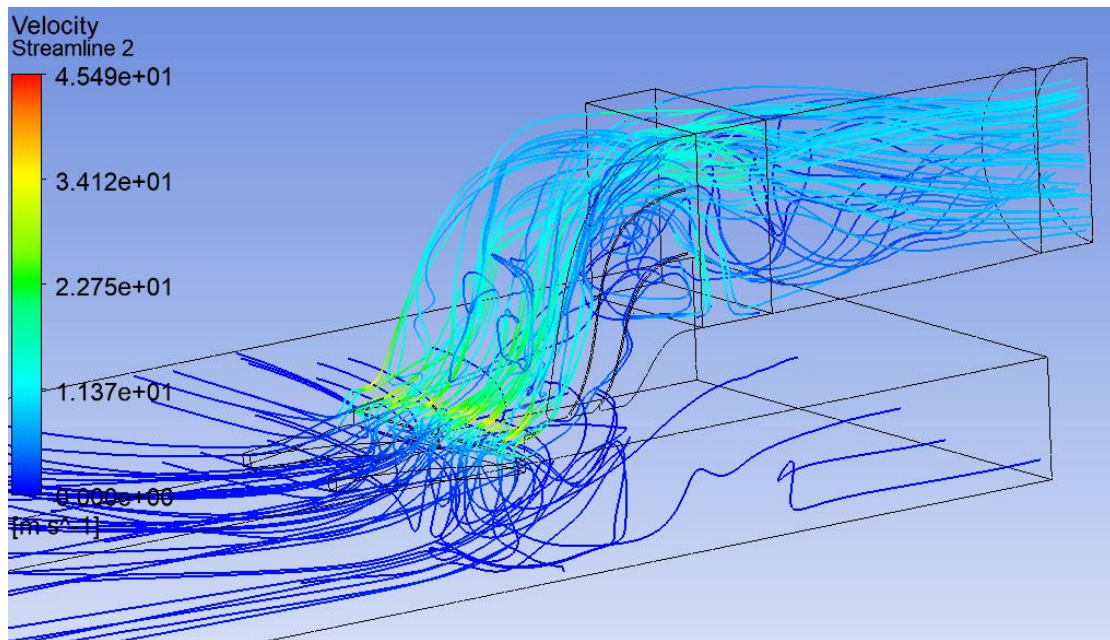


Εικόνα 6-25 Τοπική ταχύτητα εισόδου αεραγωγών, Προσομοίωση 5.

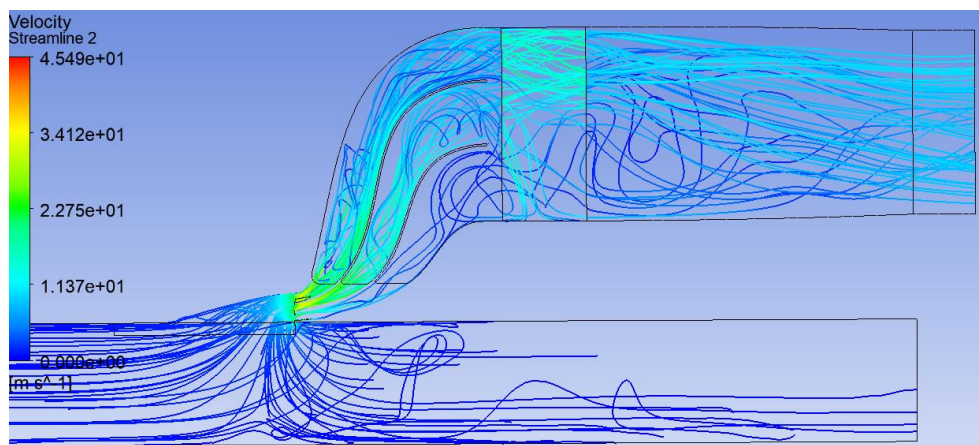


Εικόνα 6-26 Τομή, τοπική ταχύτητα εισόδου αεραγωγού-αγωγού, Προσομοίωση 5.

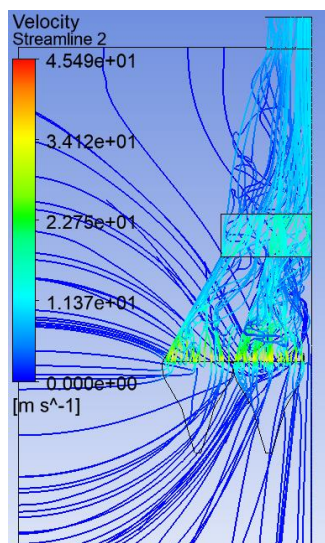
Παρακάτω, παρουσιάζονται οι ροϊκές καμπύλες του πεδίου (Εικόνα 6-27, 6-28). Η ροή παρουσιάζει ανακυκλοφορία σε όλο τον αγωγό, ενώ στα κατώτερα κανάλια (ως ακόλουθο της μη ομαλής τροφοδοσίας του αγωγού) υφίσταται μεγάλη διαφοροποίηση σε σχέση με τα ανάντι κανάλια ροής.



Εικόνα 6-27 Γραμές ροής πεδίου, Προσομοίωση 5.

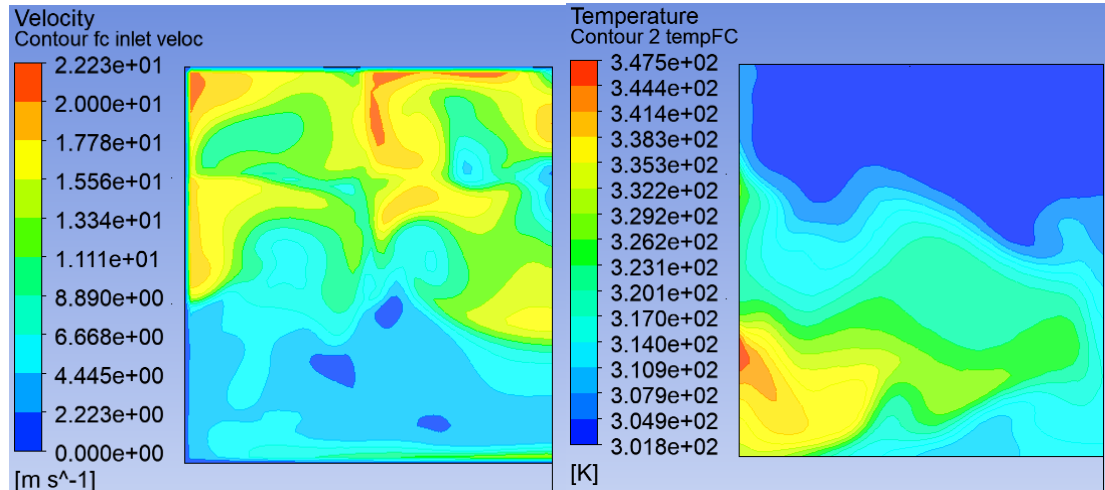


Εικόνα 6-28 Γραμές ροής πεδίου, Προσομοίωση 5.



Εικόνα 6-29 Κάτοψη, Γραμές ροής, Προσομοίωση 5.

Η ανομοιόμορφη κατανομή των ταχυτήτων ροής στην είσοδο αποτυπώνεται αντίστοιχα στις τοπικές ταχύτητες επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, όπου σημειώνεται ελάχιστη και μέγιστη ταχύτητα 0 έως 22.23m/s (*Εικόνα 6-30α*), με έντονη απόκλιση ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Ωστόσο, παρατηρείται ως προς το κατακόρυφο επίπεδο σχετικά πιο ομοιόμορφη ροή, που προέκυψε ως αποτέλεσμα της μετακίνησης των κατακόρυφων πτερυγίων.



Εικόνα 6-30 α) (αριστερά) τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 5.

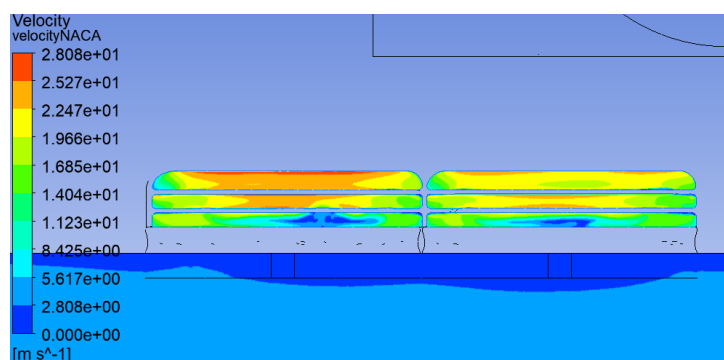
Το αποτέλεσμα της ανομοιόμορφης ροής έχει ως αποτέλεσμα την ανομοιομορφία της κατανομής της τοπικής θερμοκρασίας στην επιφάνεια εξαγωγής της κυψέλης (*Εικόνα 6-30β*), όπου σημειώνεται ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία 28,67 έως 74,3 °C, διακύμανση η οποία είναι εκτός ανοχής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα ανασχεδιάζεται η γεωμετρία εισαγωγής.

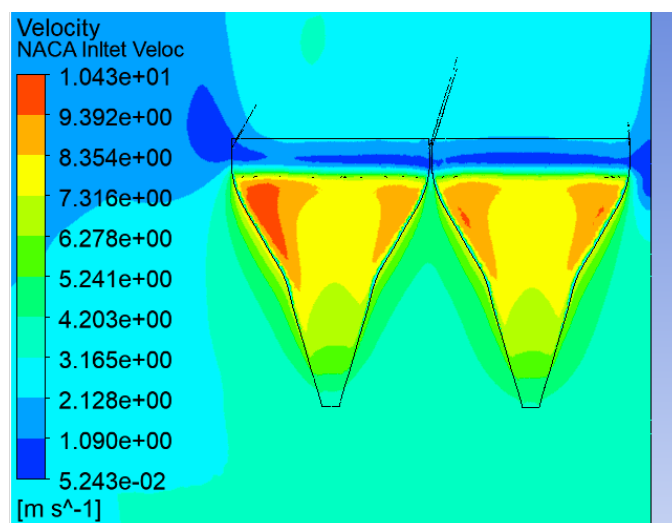
6.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 6-ΜΟΝΤΕΛΟ “B-2 NACA S DUCT”

Το μοντέλο στην παρούσα προσομοίωση διαφοροποιείται σε σχέση με το μοντέλο “B-1 NACA S Duct”, καθώς προστίθεται χείλος πρόσπτωσης στους αεραγωγούς NACA, η διατομή εισόδου του αγωγού παραμένει σταθερή ως προς τις διαστάσεις της, καθώς επίσης ο αγωγός “S” ανασηκώνεται σε υψηλότερη θέση, ακολουθώντας τους αεραγωγούς. Επιπλέον, δεδομένης της λειτουργίας των συγκεκριμένων αεραγωγών οι οποίοι χρησιμοποιούνται για υψηλές ταχύτητες, κρίνεται σκόπιμη η μελέτη του συστήματος για σταθερή ταχύτητα οχήματος ίση με 20 km/h. Οι λοιπές συνθήκες θερμικής ισχύος και παροχής μάζας παραμένουν σταθερές, όπως και στις προηγούμενες προσομοιώσεις 1 έως 5.

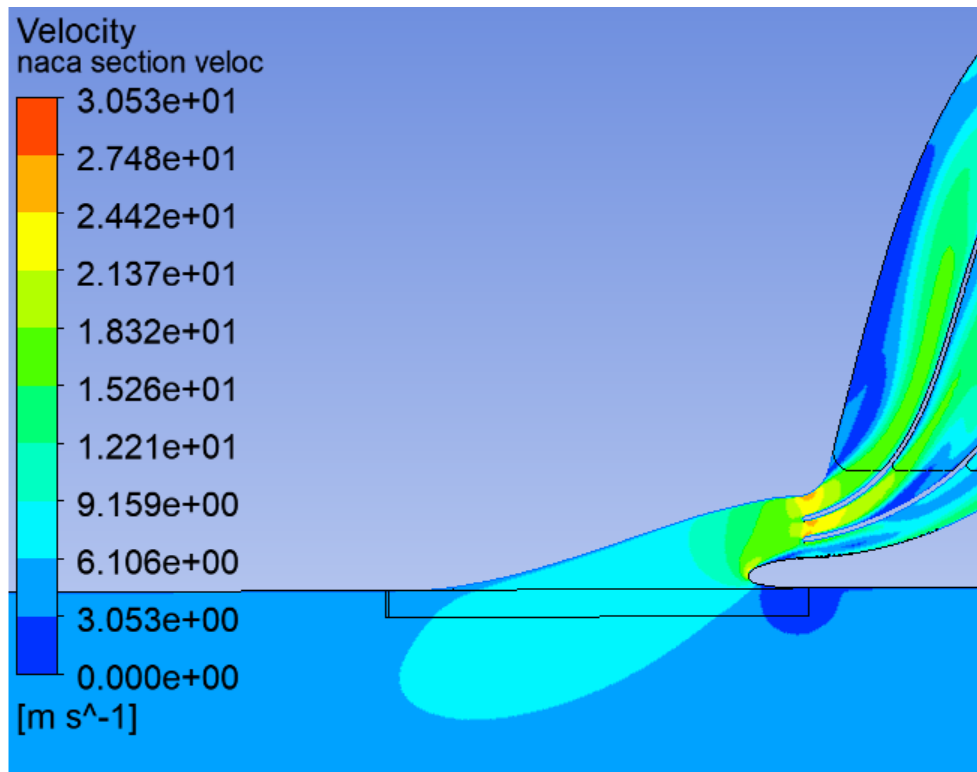
Τα αποτελέσματα για την ταχύτητα της ροής στην διατομή εισαγωγή του αγωγού “S”, δείχνουν βελτίωση σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση, ωστόσο παρουσιάζει και πάλι έντονες ανομοιομορφίες στα εσωτερικά κανάλια ροής, τόσο καθ’ ύψος, όσο και συγκρίνοντας τα κανάλια που διαχωρίζονται από τα κάθετα πτερύγια (Εικόνα 6-31). Η παρατήρηση οφείλεται ομοίως με την προηγούμενη προσομοίωση στην τροφοδοσία από τον αεραγωγό. Οι τοπικές ταχύτητες στις διατομές εισαγωγής των αεραγωγών φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 6-32), όπου και παρατηρούνται αυξημένες τιμές πλησίον των καμπυλωμένων τοιχωμάτων των αεραγωγών, κάτι που οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας τους. Ωστόσο, παρατηρείται ότι με την εφαρμογή της κίνησης του οχήματος οι αεραγωγοί NACA λειτουργούν σαφώς αποδοτικότερα, ενώ η ροή λαμβάνει ταχύτητες καθ’ όλο το μήκος τους.



Εικόνα 6-31 Τοπική ταχύτητα διατομής εισαγωγής αγωγού S, Προσομοίωση 6.

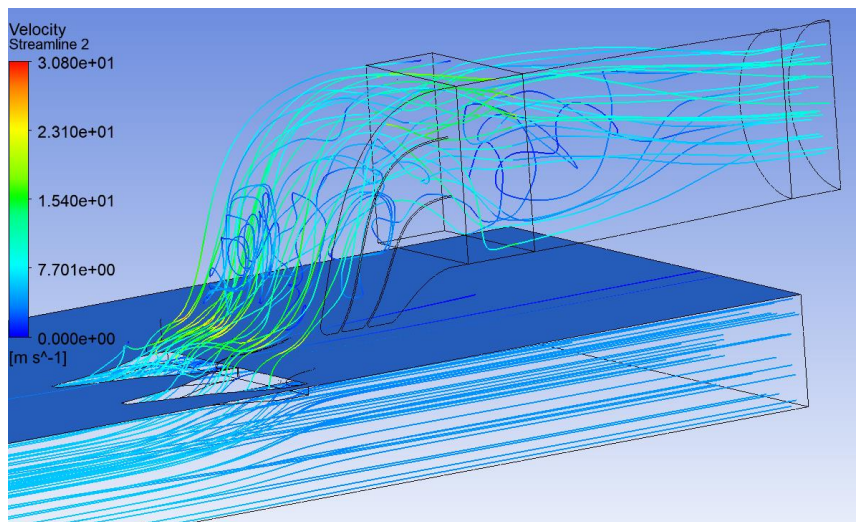


Εικόνα 6-32 Τοπική ταχύτητα εισόδου αεραγωγών, Προσομοίωση 6.

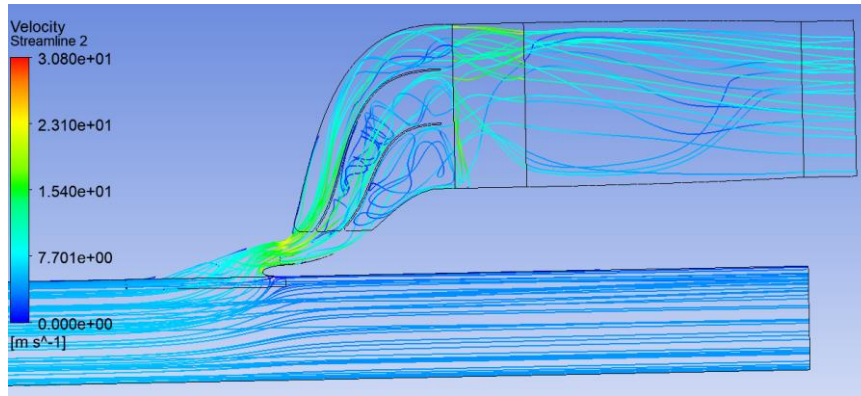


Εικόνα 6-33 Τομή, τοπική ταχύτητα εισόδου αεραγωγού-αγωγού, Προσομοίωση 6.

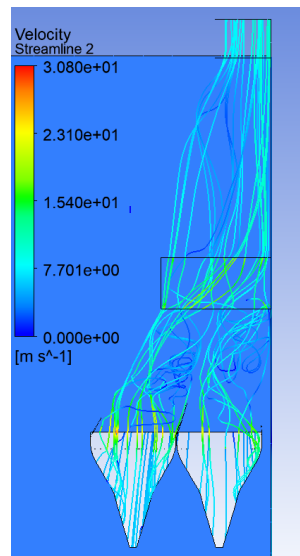
Παρατηρείται η αύξηση της ταχύτητας στα κατώτερα εσωτερικά κανάλια όπως προαναφέρθηκε, καθώς και η βελτίωση της λειτουργίας των αεραγωγών με το χείλος πρόσπτωσης, ενώ επίσης παρατηρείται και η επιρροή αυτού στην κατεύθυνση της ροής (Εικόνα 6-33, 6-37). Οι γραμμές ροής του πεδίου παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 6-34, 6-35, 6-36).



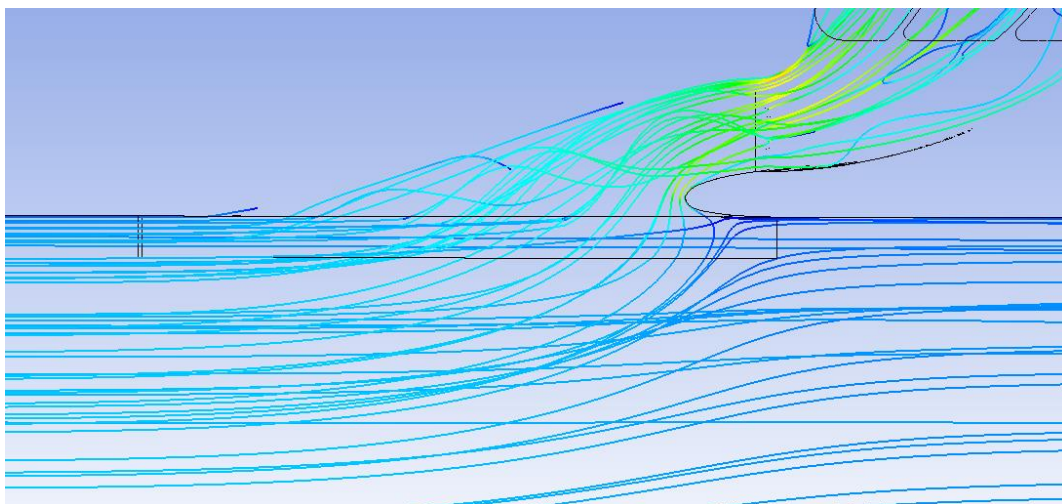
Εικόνα 6-34 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 6.



Εικόνα 6-35 Γραμμές ροής, Προσομοίωση 6.

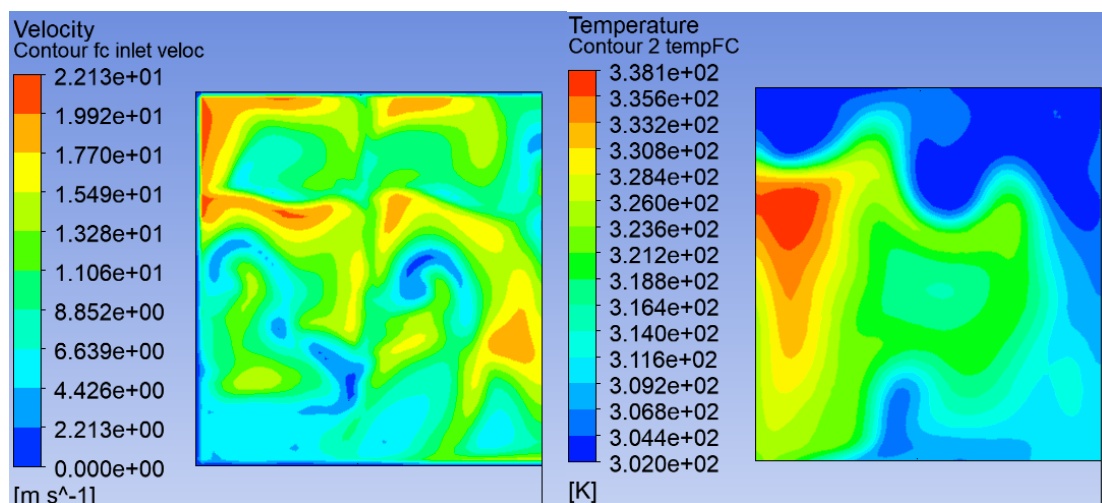


Εικόνα 6-36 Κάτοψη, Γραμμές ροής, Προσομοίωση 6.



Εικόνα 6-37 Γραμμές ροής, λεπτομέρεια αεραγωγού NACA με χείλος πρόσπτωσης, Προσομοίωση 6.

Η ροή είναι στροβιλώδης και κατανέμεται άνισα στο αγωγό “S”. Το αποτέλεσμα των τοπικών ταχυτήτων στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης όπως αποτυπώνεται (*Εικόνα 6-38α*), υποδηλώνει μία κυρίως καθ’ ύψος ανομοιομορφία όπως είναι αναμενόμενο από την ελλειπή τροφοδοσία του αγωγού “S”, ενώ το εύρος τιμών κυμαίνεται από 0 έως 22.13 m/s. Τα αποτελέσματα της ταχύτητας στην απαγωγή της θερμότητας, αποτυπώνονται στις τοπικές θερμοκρασίες της επιφάνειας εξαγωγής της κυψέλης καυσίμου, όπου παρατηρείται εύρος τιμών 28.85 έως 64.9°C, το οποίο βρίσκεται εκτός της επιτρεπτής απόκλισης, αλλά παρουσιάζει βελτίωση της διαφοράς σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση (*Εικόνα 6-38β*).



Εικόνα 6-38 α) (αριστερά) τοπική ταχύτητα επιφάνειας εισαγωγής κυψέλης, β) (δεξιά) τοπική θερμοκρασία επιφάνειας εξαγωγής κυψέλης, Προσομοίωση 6.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Βασικός στόχος στην παρούσα Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασία, αποτέλεσε η σχεδίαση και μελέτη διατάξεων εισαγωγής και εξαγωγής του ατμοσφαιρικού αέρα, για την παροχή ομοιόμορφης ροής στην επιφάνεια εισαγωγής κυψέλης καυσίμου. Η παρούσα Διπλωματική Εργασία προσέγγισε το ζήτημα της ψύξης κυψέλης καυσίμου μέσα από δύο τύπους εισαγωγής, ενώ σχεδιάστηκε ένα τύπος εξαγωγής της ροής, ο οποίος παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης.

Ο πρώτος τύπος εισαγωγής αφορά σε μία διάταξη η οποία για να καθοδηγήσει την ροή στην επιφάνεια της κυψέλης, χρησιμοποιεί έναν αγωγό τύπου *S* συνδεδεμένο με αεραγωγούς *Scoop*. Το μοντέλο αυτό ξεκίνησε από δύο εσωτερικά οριζόντια διακοπτόμενα ζεύγη εσωτερικών πτερυγίων και μέσα από την διαδικασία των προσομοιώσεων και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων, εξελίχθηκε η εσωτερική δομή του. Η εξέλιξη της εσωτερικής διάταξης του συστήματος εισαγωγής αφορά στην ενιαία μορφοποίηση των οριζοντίων πτερυγίων, καθώς και την μελέτη διάφορων θέσεων αυτών, για τον καλύτερο έλεγχο της ροής ως προς το κατακόρυφο επίπεδο. Επιπλέον, προστέθηκαν δύο κάθετα πτερύγια, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της ροής στο οριζόντιο επίπεδο, τα οποία μέσα από τις προσομοιώσεις εξελίχθηκαν επίσης ως προς τις θέσεις τοποθέτησής τους, για τον καλύτερο έλεγχο της ροής. Συμπεραίνεται ότι το σύνολο των εσωτερικών πτερυγίων της εισαγωγής διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο για τον έλεγχο της, όπως φάνηκε μέσα από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, κατά τις τροποποιήσεις τους. Συγκεκριμένα, προκύπτει ότι το μοντέλο "*A-4 Scoop S Duct*" απέδωσε την καλύτερη κατανομή θερμοκρασίας επί της επιφάνειας εξαγωγής της κυψέλης καυσίμου, η οποία όμως δυστυχώς βρίσκεται εκτός αποδεκτής ανοχής. Σύμφωνα με την υφιστάμενη κατάσταση του οχήματος, το συγκεκριμένο μοντέλο δύναται να εξελιχθεί περαιτέρω, μέσα από την μετατόπιση των κάθετων πτερυγίων σε θέσεις ομοίως με τα επόμενα μοντέλα "*B NACA S Duct*", καθώς και με την μετατόπιση των οριζοντίων πτερυγίων, αναδιατάσσοντας τους όγκους των καναλιών και τελικά μειώνοντας τους όγκους των κατώτερων καναλιών ροής που δημιουργούνται. Μέσα από αυτές τις τροποποιήσεις αναμένεται η λήψη πιο ομοιόμορφης κατανομής των ταχυτήτων στην επιφάνεια της κυψέλης, η οποία επιδρά καθοριστικά στην εξισορρόπηση της θερμοκρασίας της κυψέλης καυσίμου. Ωστόσο, σε όλα τα μοντέλα "*A Scoop S Duct*", παρατηρείται έντονη τυρβώδης ροή και σε ορισμένες περιπτώσεις ανακυκλοφορίες της ροής, αποτέλεσμα το οποίο οφείλεται στο σχεδιασμό του αγωγού "*S*" σύνδεσης των *Scoop* αεραγωγών με την κυψέλη, ο οποίος αναπτύσσεται με πολύ έντονη κλίση. Ωστόσο σημειώνεται επίσης ότι το εν λόγω μοντέλο με την υφιστάμενη κατάσταση του οχήματος δεν πληροί τις προϋποθέσεις του διαγωνισμού στον οποίο λαμβάνει μέρος, καθώς, λόγω της εξοχής του *Scoop* από το δάπεδο του οχήματος κατά 50mm, παραβιάζεται το ελάχιστο ύψος που απαιτείται από το χαμηλότερο σημείο του οχήματος έως το οδόστρωμα. Η εξωτερική απόδοση του *Scoop* ως προς την συλλογή του αέρα δεν κρίθηκε ότι χρήζει τροποποίησης. Ωστόσο, σημειώνεται ότι δεν μελετήθηκε η επίδρασή του στην οπισθέλκουσα δύναμη του οχήματος και γενικότερα ως προς την αεροδυναμική απόδοσή του, καθώς η μελέτη επικεντρώνεται στην τροφοδοσία της κυψέλης.

Ο δεύτερος τύπος εισαγωγής, αφορά ομοίως έναν αγωγό "*S*", ο οποίος όμως συνδέει την επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης με τέσσερις εμφωλευμένους αεραγωγούς τύπου *NACA* με καμπυλωμένα και αποκλίνοντα τοιχώματα, οι οποίοι διοχετεύουν στο σύστημα ατμοσφαιρικό αέρα. Για τον εν λόγω τύπο αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα, τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τις διαστάσεις των αεραγωγών - κυρίως ως προς την κλίση της ράμπας- καθώς επίσης το δεύτερο μοντέλο (το οποίο είναι και το επικρατέστερο) διαθέτει στους αεραγωγούς χείλος προσβολής. Το δεύτερο μοντέλο "*B-2 NACA S Duct*" αποδίδει

καλύτερα ως προς την κατανομή των ταχυτήτων και επομένως προκύπτει μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας στην επιφάνεια εξαγωγής της κυψέλης καυσίμου, η οποία ωστόσο δεν είναι εντός των αποδεκτών ορίων διακύμανσης της τοπικής θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Σημειώνεται ότι τα μοντέλα προσομοιώθηκαν υπό διαφορετικές συνθήκες, καθώς το πρώτο θεωρείται στάσιμο, σε αντίθεση με το δεύτερο το οποίο κινείται με σταθερή μέση ταχύτητα 20 km/h. Παρόλα αυτά, για το δεύτερο μοντέλο, οι αεραγωγοί με χείλος πρόσπτωσης δείχνουν να συμπεριφέρονται γενικότερα καλύτερα, καθώς είναι ευκολότερος ο έλεγχος της ροής σε αυτούς. Ακόμα υπενθυμίζεται ότι ο σχεδιασμός των αεραγωγών ακολούθησε κατά το δυνατόν της βέλτιστης αναλογίας, διότι δεδομένων των περιορισμών που τίθεται από το σκελετό του οχήματος, δεν είναι εφικτή η ανάπτυξη τους κατά το επιθυμητό μήκος, οδηγώντας σε μεγάλες κλίσεις ράμπας, οι οποίες φαίνεται με τη σειρά τους να οδηγούν σε μερικό διαχωρισμό της ροής, εν μέρει αναμενόμενο. Το κύριο πρόβλημα το οποίο παρατηρήθηκε στους αεραγωγούς, αφορά στην άνιση κατανομή της ροής στα εσωτερικά κανάλια ροής του αγωγού "S". Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε η φτωχότερη τροφοδοσία των κατώτερων καναλιών, γεγονός το οποίο οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας τους, καθώς η συλλογή αέρα συνοδεύεται από την δημιουργία δινών στις ακμές ράμπας, οι οποίες συμπαρασύρονται από την κατά μήκος εισερχόμενη ροή. Στο φαινόμενο αυτό, ενδεχομένως, συμβάλει και η αυξημένη κλίση της ράμπας, που σχετίζεται με το περιορισμένο μήκος που διατίθεται για την τοποθέτησή τους, διότι η έλλειψη μήκους δεν επιτρέπει την ανάπτυξη της ευθύγραμμης ροής υψηλής ταχύτητας εσωτερικά των αεραγωγών. Για την βελτίωση της κατάστασης αυτής και την επίτευξη της ομοιόμορφης κατανομής των ταχυτήτων στις διατομές εισόδου του αγωγού "S" προτείνεται η μελέτη δύο περιπτώσεων, δεδομένης της κατασκευής του οχήματος, καθώς και του ότι εξαντλήθηκε το μήκος που διατίθεται για τη σχεδίαση των αεραγωγών. Πρώτον, η τροποποίηση του χείλους πρόσπτωσης, δίνοντάς του μία πιο αρνητική γωνία κλίσης, ώστε να λαμβάνεται ροή υψηλότερων ταχυτήτων, η οποία θα οδηγείται στα κατώτερα εσωτερικά κανάλια, εκτρέποντας τη ροή χαμηλότερων ταχυτήτων έξω από τη διατομή αγωγού, καθώς και πιθανές διάφορες μορφοποιήσεις του υφιστάμενου χείλους, οι οποίες θα επιδράσουν θετικότερα. Δεύτερον, προτείνεται η μελέτη των αεραγωγών με την προσθήκη εκτροπέων (Deflectors) κατά μήκος των τοιχωμάτων ράμπας ή Γεννητριών Δινών (Vortex Generators), ώστε να εμπλουτίζεται η ροή εντός της ράμπας με υψηλής ενέργειας ροή, η οποία δύναται να εισέρχεται στην διατομή του αγωγού "S". Το δεύτερο τμήμα αυτού του τύπου εισαγωγής αφορά τον αγωγό "S". Ομοίως με το προηγούμενο τύπο εισαγωγής, παρατηρείται έντονη τυρβώδης ροή, η οποία απαιτεί τον σχεδιασμό της διάταξης των εσωτερικών πτερυγίων που χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτή τη περίπτωση για τον έλεγχο της ροής. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται ομοίως στην απότομη κλίση που προκύπτει από τους περιορισμούς σχεδίασης.

Όπως αναφέρθηκε και στις δύο περιπτώσεις μοντέλων, ο σχεδιασμός του αγωγού περιγράφεται από μία ιδιαίτερα απότομη κλίση αλλαγής κατεύθυνσης, η οποία οδηγεί στα παραπάνω φαινόμενα που έχουν αναφερθεί. Για την τροποποίηση της σχεδίασής του απαιτείται διαθέσιμος χώρος, ο οποίος δύναται να προκύψει σε πρώτη φάση από την μετακίνηση των ηλεκτρονικών διατάξεων που βρίσκονται μπροστά από το σύστημα ψύξης. Οι εν λόγω διατάξεις προτείνεται να τοποθετηθούν σε διαφορετική θέση, ώστε να προκύψει διαθέσιμος χώρος για την ανάπτυξη του μήκους του αγωγού. Ο διαθέσιμος χώρος που αναμένεται να προκύψει για το ανάπτυγμα του μήκους του αγωγού είναι σημαντικός και αφορά σε μήκος περίπου 160mm, μέγεθος κρίσιμο στη συγκεκριμένη περίπτωση. Μία επιπλέον πρόταση προς διερεύνηση, που μπορεί να οδηγήσει στην μείωση της κλίσης σχεδιασμού του αγωγού "S", είναι η τοποθέτηση της κυψέλης καυσίμου σε χαμηλότερο επίπεδο από αυτό που βρίσκεται τώρα, διατηρώντας την θέση της. Η πρόταση αυτή αφορά στην τοποθέτηση της κυψέλης ανάμεσα στο σκελετό, χωρίς τις βάσεις πάνω στις οποίες εδράζεται σήμερα και μπορεί να μειώσει το ύψος της θέσης της κατά περίπου 50mm,

σύμφωνα με την υφιστάμενη συναρμολόγηση, οδηγώντας σε μία ομαλότερη κλίση. Για την περίπτωση του πρώτου μοντέλου *“A-4 Scoop S Duct”* ο συνδυασμός των δύο παραπάνω προτάσεων, θα οδηγήσει σε μία μείωση της κλίσης του αγωγού, η οποία αναμένεται να οδηγήσει σε ομαλότερη ροή, αποτελεσματικότερα και ευκολότερα διαχειρίσιμη, οδηγώντας τελικά σε μία πιο ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων στην επιφάνεια εισαγωγής της κυψέλης.

Για την περίπτωση του μοντέλου *“B-2 NACA S Duct”*, δεδομένου ότι οι αεραγωγοί δεν έχουν χώρο να τοποθετηθούν πιο πίσω στο όχημα λόγω του περιορισμού του σκελετού, το κατά μήκος ανάπτυγμα του αγωγού δεν μπορεί εφαρμοστεί. Ωστόσο, η μείωση του ύψους της κυψέλης θα οδηγήσει σε μία σχετικά ομαλότερη κλίση του αγωγού *“S”*, η οποία αναμένεται να επιφέρει σχετική βελτίωση, σε συνδυασμό με τον ανασχεδιασμό του χείλους πρόσπτωσης και πιθανών εφαρμογών εκτροπών ή γεννήτριας δινών.

Συγκρίνοντας τα δύο *“επικρατέστερα”* μοντέλα *“A-4 Scoop S Duct”* και *“B-2 NACA S Duct”*, δεδομένων των αποτελεσμάτων η πρώτη επιλογή οδηγεί σε μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας επί της επιφάνειας της κυψέλης. Ωστόσο, μία τέτοια σύγκριση είναι ανούσια, διότι αφενός κανένα από τα δύο μοντέλα δεν επιτυγχάνει τα επιθυμητά αποτελέσματα, αφετέρου και τα δύο μοντέλα χρήζουν βελτίωσης, καθώς έχουν εντοπιστεί οι αδυναμίες του συστήματος και οι πιθανές λύσεις που προτείνονται παραπάνω.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abaspour, A., Parsa, N. T., & Sadeghi, M. (2014, July). A New Feedback Linearization-NSGA-II based Control Design for PEM Fuel Cell. *International Journal of Computer Applications*, vol.97, no.10, pp. 25-32.
- ANSYS. (2021). *Ansys CFX-Pre User's Guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc.
- ANSYS. (2021). *Ansys CFX-Solver Manager User's Guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc.
- ANSYS. (2021). *Ansys Meshing User's Guide*. Canonsburg: ANSYS, Inc.
- ANSYS, I. (2016). *ANSYS CFX Introduction*. Canonsburg: ANSYS.
- ANSYS, I. (2021). *Ansys CFX-Solver Theory Guide*. Canonburg: ANSYS.
- Arapakopoulos, A. (2019). *Diploma Thesis: Parametric Design of a Marine Propeller Using T-Splines*. Athens: National Technical University of Athens, School of Naval Architecture & Marine Engineering, Department of Ship Design & Maritime Transport.
- BALLARD. (2015). *Product Manual and Integration Guide*. BALLARD.
- Denaly, D. K. (1948). *An Investigation of Submerged Air Inlets On 1/4-Scale Model of a Typical Fighter-Type Airplane*. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.
- ebmpapst. (2019). *Product Data Sheet 9295420026 VWS0148XULDS 6314/2TDHHP*. ebmpapst.
- Frank, J. L., & Taylor, R. A. (1951). *Comparison of Drag, Pressure Recovery, and Surface Pressure of a Scoop-Type Inlet and an NACA Submerged Inlet at Transonic Speeds*. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.
- Frick, C. W., Davis, W. F., Randall, L. M., & Mossman, E. A. (1945). *An Experimental Investigation of NACA Submerged-Duct Entrances*. Washington: National Advisory Committee for Aerinautics.
- Ghionea, I., Cukovic, S., & Devedzic, G. (2014). *Parametric Modeling of Surface using CATIA V5 Environment*. Research Gate.
- Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained Second Edition*. Chichester, West Sussex: J. Wiley.
- Mossman, E. A., & Gault, D. E. (1947). *Development of NACA Submerged Inlets and a Comparison with Leading-Edge Inlets for a 1/4-Scale Model of a Fighter Airplane*. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.
- Mossman, E. A., & Randall, L. M. (1948). *An Experimental Investigation of the Design Variables for Naca Submerged Duct Entrances*. Washington: National Advisory Committee for Aerinautics.
- Naiman, I., & Hill, P. R. (1941). *The Effect of External Shape Upon the Drag of a Scoop*. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.

- Perez, C. C., Ferreira, S. B., da Silva, L. F., de Jesus, A. B., & Oliveira, G. L. (2007). Computational Study of Submerged Air Inlet. *25th International Congress of the Aeronautical Sciences*, (pp. 1574-1587). Hamburg.
- Rütten, M., Krenkel, L., & Freund, M. (2009). Parametric Design, Comparison and Evaluation of Air Intake Types for Bleedless Aircraft. *39th Fluid Dynamics Conference* (pp. 2009-3902). San Antonio, Texas: AIAA Fluid Dynamics Conference.
- Sacks, A. H., & Speiter, J. R. (1951). "Theoretical Investigation of Submerged Inlets at Low Speeds." *Technical Note No.2323. Ames Aeronautical Laboratory, Moffett Field*. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.
- Sydney, G. (1938). *Modern Developments in Fluid Dynamics Vol.1*. Oxford: The Clarendon Press .
- Timothy E. Lipman, A. Z. (2018). *Fuel Cells and Hydrogen Production, A Volume in the Encyclopedia of Sustainable Science and Technology, Second Edition*. Berkeley, CA, USA: Springer.
- Zheng, B. (2023). *Shell Eco-marathon 2023 Official Rules Chapter I*.
- Βαμβακίδης, Γ. Α. (2017). "ΓΕΝΕΣΙΟΥΡΓΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ: Η ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΟ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ" Διδακτορική διατριβή . Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών.
- Κουτσούμπας, Λ. (2021). *Ανάπτυξη συστήματος ελέγχου κυψέλης καυσίμου για ηλεκτρικά οχήματα*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.
- Στεφανούλης, Θ. (2023). *Σχεδίαση και ανάπτυξη πρωτότυπου πλαισίου ελαφρού οχήματος*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης.
- Τζανάκης, Α. (2012). *Conceptual and Aerodynamic Design of an Urban Vehicle*. Chania: Technical University of Crete, School of Production Engineering and Management.

Ιστοσελίδες (Webpages)

<https://www.shellecomarathon.com/about/global-rules.html>

[Πρόσβαση 18 Ιουλίου 2023]

<https://www.tucer.tuc.gr/en/news/single-news/shell-eco-marathon-europe-2022>

[Πρόσβαση 18 Ιουλίου 2023]

<https://www.tucer.tuc.gr/el/ochimata>

[Πρόσβαση 18 Ιουλίου 2023]