



Σχεδιασμός και θερμική ανάλυση
συστήματος ψύξης του
συσσωρευτή ενέργειας
ηλεκτρικού αυτοκινήτου τύπου
Formula SAE

Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Χρήστος Τζιβανίδης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2024

Ευχαριστίες:

Πολλές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Χρήστο Τζιβανίδη, για την συνεχή υποστήριξη, την υπομονή και την ευχάριστη συνεργασία μας σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ένα μεγάλο ευχαριστώ και στην φοιτητική ομάδα PROM Racing NTUA FSAE Team που πέρα από υπέροχες αναμνήσεις, μου έδωσε το κίνητρο και το υπόβαθρο για την διπλωματική αυτή εργασία. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που με στηρίζει σε κάθε μου βήμα και τους δικούς μου ανθρώπους που πάντα πιστεύουν σε εμένα.

Ιωάννης Σκρέκας

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ιωάννης Σκρέκας

Περίληψη:

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάζει το σύστημα ψύξης ενός συσσωρευτή ενέργειας ή αλλιώς ενός κουτιού μπαταριών σε ένα αγωνιστικό μονοθέσιο τύπου Formula Student. Στόχος είναι ο σχεδιασμός και η θερμική ανάλυση ενός ψυκτικού συστήματος το οποίο θα καλύπτει τις ανάγκες του συσσωρευτή ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα θα πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές που τίθενται, με απώτερο σκοπό την ενσωμάτωση του στο αγωνιστικό μονοθέσιο της ομάδας PROM Racing NTUA FSAE Team.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού πραγματοποιήθηκε μια προκαταρκτική θεωρητική μελέτη του συστήματος, τα πορίσματα της οποίας αποτέλεσαν γνώμονα για τον σχεδιασμό της ψύξης. Η θερμική ανάλυση του συστήματος έγινε μέσω προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής συμπεριλαμβάνοντας την εξίσωση της ενέργειας στο λογισμικό ANSYS Fluent. Συνεπώς, κρίθηκε απαραίτητο, ο σχεδιασμός τόσο του συσσωρευτή ενέργειας όσο και του συστήματος ψύξης του, να αποτυπωθούν από ένα λογισμικό σχεδιασμού και συγκεκριμένα το λογισμικό SolidWorks. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κατέδειξαν την ορθή και ασφαλή λειτουργία του τελικού σχεδιαζόμενου συστήματος ψύξης και είναι ικανά για την μελλοντική πειραματική επαλήθευσή τους από τα μέλη της ομάδας PROM Racing με σκοπό την κατασκευή του εξεταζόμενου συστήματος και την ενσωμάτωσή του στο επόμενο αγωνιστικό μονοθέσιο.

Abstract:

This thesis examines the cooling system of an energy accumulator or otherwise a battery box in a Formula Student racing car. The aim is the design and thermal analysis of a cooling system that will meet the needs of the energy accumulator, while at the same time will meet the necessary specifications, with the ultimate goal of integrating it into the racing car of the PROM Racing NTUA FSAE Team.

To achieve this goal, a preliminary theoretical study of the system was carried out, the findings of which guided the design of the cooling system. The thermal analysis of the system was carried out through computational fluid dynamics simulations including the energy equation in ANSYS Fluent software. Therefore, it was deemed necessary that the design of both the energy accumulator and its cooling system be captured by a design software, namely SolidWorks software. The results of the simulations demonstrated the correct and safe operation of the final designed cooling system and are suitable for future experimental verification by the members of the PROM Racing team in order to build the tested system and integrate it into the next racing car.

ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ-ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ:

AC	Accumulator Container
AC	Alternating Current
AIR	Accumulator Insulation Resistance
AMS	Accumulator Management System
BMS	Battery Management System
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CFD	Computational Fluid Dynamics
DC	Direct Current
DC	Driverless Cup
FS	Formula Student
FSAE	Formula SAE
FSC	Formula Student Combustion
FSG	Formula Student Germany
FSE	Formula Student Electric
HV	High Voltage
IMD	Insulation Monitoring Device
LES	Large Eddy Simulation
LV	Low Voltage
NS	Navier Stokes
NTUA	National Technical University of Athens
PCB	Printed Circuit Board
PCM	Phase Changing Materials
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
SST	Shear Stress Transport

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	10
1.1	Ηλεκτροκίνηση.....	10
1.2	Συστήματα Ψύξης Συσσωρευτών στην Ηλεκτροκίνηση	12
1.3	Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	15
1.4	Κίνητρο.....	16
1.5	Formula Student Event: Γενική Επισκόπηση	17
1.5.1	Static Events.....	19
1.5.2	Dynamic Events.....	20
1.6	Λογισμικά.....	21
1.6.1	Λογισμικό SolidWorks	21
1.6.2	Λογισμικό ANSYS Fluent	22
1.7	Δομή της Εργασίας	23
2.	Περιγραφή Ψυχόμενου Συστήματος & Εξαγωγή Προδιαγραφών.....	24
2.1	Συσσωρευτής Ενέργειας (Accumulator Container).....	24
2.1.1	Κελιά Μπαταριών Li-Po	25
2.1.2	Γλωττίδες (Tabs)	25
2.1.3	Ράβδοι Διακλάδωσης (Busbars)	26
2.1.4	Πλακέτα Σύνδεσης Γλωττίδων.....	27
2.1.5	Μετατροπέας Ρεύματος DC-DC.....	27
2.1.6	Πλακέτα AMS.....	28
2.1.7	Πλακέτα Συσσωρευτή.....	29
2.1.8	Πλακέτα IMD	30
2.1.9	Αισθητήρας Ρεύματος	30
2.1.10	AIR (Positive & Negative).....	31
2.1.11	Συγκεντρωτικός Πίνακας Εξαρτημάτων	32
2.2	Γενικές Προδιαγραφές	34
2.2.1	Προδιαγραφές Διαχείρισης Θερμοκρασίας.....	34
2.2.2	Προδιαγραφές Χώρου	35
2.2.3	Προδιαγραφές Βάρους.....	35
2.2.4	Ηλεκτρικές Προδιαγραφές	36
2.2.5	Συγκεντρωτικός Πίνακας Προδιαγραφών	36
2.3	Επιλογή Τύπου Συστήματος Ψύξης.....	37
3.	Αρχές Σχεδίασης Συστημάτων Ψύξης	39
3.1	Μέθοδος Ψύξης με Εξαναγκασμένο Αέρα.....	39
3.2	Κατεύθυνση Ροής για Ανεμιστήρες.....	39
3.3	Στατική και Δυναμική Πίεση.....	42
3.4	Απώλειες Εκφρασμένες σαν Δυναμικά Ύψη	45
3.5	Καθορισμός Καμπύλης Αντίστασης Ροής για Ηλεκτρονικά Κουτιά.....	45
3.6	Ανεμιστήρες Ψύξης για Ηλεκτρονικό Εξοπλισμό	48
3.7	Πίνακες και Γραφήματα Απωλειών Στατικής Πίεσης.....	51

3.8	Εναλλάκτες Θερμότητας με Πτερύγια.....	53
3.9	Απώλειες Πίεσης σε Εναλλάκτες Θερμότητας	56
3.10	Βαθμός Απόδοσης Πτερυγίων.....	58
3.11	Ανεπιθύμητες Ανακυκλοφορίες Ροής	60
4.	Εφαρμογή Αρχών Σχεδίασης Συστημάτων Ψύξης στον Συσσωρευτή Ενέργειας ...	63
4.1	Χάραξη Καμπύλης Αντίστασης Ροής - Κουτί Χαμηλής Τάσης.....	63
4.1.1	Άνοδος Θερμοκρασίας από τον Κινητήρα του Ανεμιστήρα	64
4.1.2	Άνοδος Θερμοκρασίας από τον Μετατροπέα DC-DC	65
4.1.3	Καμπύλη Αντίστασης Ροής και Πτώση Πίεσης.....	69
4.2	Χάραξη Καμπύλης Αντίστασης Ροής - Κουτί Υψηλής Τάσης.....	74
4.3	Εναλλάκτες Θερμότητας με Πτερύγια.....	76
4.3.1	Κουτί Χαμηλής Τάσης	76
4.3.2	Κουτί Υψηλής Τάσης.....	80
4.4	Επιλογή Ανεμιστήρων.....	81
5.	Προσομοίωση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής.....	84
5.1	Πλέγμα	85
5.1.1	Πλέγμα Οριακού Στρώματος	85
5.1.2	Έλεγχος Μεγέθους των Στοιχείων του Πλέγματος.....	86
5.1.3	Τετραεδρικά και Εξαεδρικά Στοιχεία Πλέγματος.....	87
5.1.4	Παράγοντες Ποιότητας Πλέγματος	88
5.2	Ρύθμιση Προσομοίωσης	89
5.2.1	Ρυθμίσεις Επιλύτη	89
5.2.2	Μοντέλα Τύρβης.....	89
5.2.3	Κριτήρια Σύγκλισης.....	90
5.2.4	Οριακές Συνθήκες.....	91
5.2.5	Ρύθμιση Dynamic Mesh	92
6.	Σχεδιασμός Συσσωρευτή Ενέργειας στο Λογισμικό SolidWorks	93
6.1	Σχεδιασμός Συστάδων Μπαταριών (Segments)	93
6.2	Σχεδιασμός Εξαρτημάτων Χαμηλής Τάσης	99
6.3	Σχεδιασμός Πλαισίου	104
6.4	Σχεδιασμός Ψυκτικών Συσκευών	108
6.5	Συναρμολόγηση (Assembly).....	111
7.	Πλεγματοποίηση στο Λογισμικό ANSYS.....	114
7.1	Παραδοχές.....	114
7.2	Προετοιμασία Γεωμετριών στο Design Modeler	118
7.3	Πλεγματοποίηση στον Χώρο Χαμηλής Τάσης.....	123
7.4	Πλεγματοποίηση στον Χώρο Υψηλής Τάσης	130
8.	Προσομοίωση στο Λογισμικό ANSYS Fluent	139
9.	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	150
9.1	Χώρος Χαμηλής Τάσης – Steady State Simulation	150
9.1.1	Θερμοκρασία	151

9.1.2	Ταχύτητα.....	156
9.2	Χώρος Χαμηλής Τάσης – Transient Simulation	158
9.2.1	Θερμοκρασία	160
9.2.2	Ταχύτητα.....	174
9.3	Χώρος Υψηλής Τάσης – Steady State Simulation	177
9.3.1	Θερμοκρασία	178
9.3.2	Ταχύτητα.....	184
9.4	Χώρος Υψηλής Τάσης – Transient Simulation	187
9.4.1	Θερμοκρασία	188
9.4.2	Ταχύτητα.....	210
10.	Συμπεράσματα	213
11.	Βιβλιογραφία – Κατάλογος Αναφορών.....	215
12.	Κατάλογος Διαγραμμάτων	217
13.	Κατάλογος Εικόνων	218
14.	Κατάλογος Πινάκων.....	225
15.	Κατάλογος Σχημάτων	226

1. Εισαγωγή

1.1 Ηλεκτροκίνηση

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι ολοένα και εντεινόμενες συνέπειες της χρήσης ορυκτών καυσίμων στην κλιματική αλλαγή, σε συνδυασμό και με τη ραγδαία αύξηση του κόστους αυτών λόγω της σταδιακής εξάντλησης των διαθέσιμων αποθεμάτων τους, έχει ωθήσει τις κυβερνήσεις ανά τον κόσμο να προωθήσουν την γενικότερη απεξάρτηση του ανθρωπίνου είδους από αυτά και την μετάβαση σε «καθαρότερες», δηλαδή περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις, τόσο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προς κατανάλωση, όσο και για την αυτοκίνηση. Ειδικότερα στον τομέα της αυτοκίνησης, οι βιομηχανίες πλέον εστιάζουν έντονα στην προσαρμογή της παραγωγής τους στην νέα «ηλεκτρική», όπως λέγεται, εποχή, αφιερώνοντας μεγάλο τμήμα πόρων και δυναμικού στην έρευνα και ανάπτυξη υβριδικών και αμιγώς ηλεκτροκίνητων οχημάτων, προσπαθώντας να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο ανταγωνιστικές.

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, που αποτελούν το αποκορύφωμα των βιώσιμων μεταφορών, ενσωματώνουν μια επαναστατική στροφή της αυτοκινητοβιομηχανίας προς λύσεις φιλικές προς το περιβάλλον και ενεργειακά αποδοτικές λύσεις μετακίνησης. Τα οχήματα αυτά βασίζονται σε ηλεκτρικά συστήματα κίνησης που τροφοδοτούνται από επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, διαφορετικά από τους παραδοσιακούς κινητήρες εσωτερικής καύσης, μειώνοντας έτσι σημαντικά την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και μετριάζοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Στην καρδιά ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου βρίσκεται μια συστοιχία μπαταριών μεγάλης χωρητικότητας, η οποία συνήθως αποτελείται από κυψέλες ιόντων λιθίου, σχεδιασμένες να αποθηκεύουν και να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε έναν ηλεκτροκινητήρα. Έτσι, την πηγή ενέργειας αποτελεί ο συσσωρευτής ενέργειας που περιέχει τα κελιά μπαταριών, τα οποία συνδεδεμένα σε μεγάλες συστοιχίες εν σειρά και παράλληλα, τροφοδοτούν με ηλεκτρική ισχύ το σύστημα κίνησης. Ο ηλεκτροκινητήρας, μέσω της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική, κινεί το όχημα, προσφέροντας μια ομαλή, αθόρυβη και αποτελεσματική εμπειρία οδήγησης.

Η υιοθέτηση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων έχει προωθηθεί από τις εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών, που ενισχύουν την ενεργειακή πυκνότητα και την αυτονομία οδήγησης, μειώνοντας παράλληλα τους χρόνους φόρτισης. Οι βελτιώσεις αυτές έχουν αμβλύνει τις ανησυχίες σχετικά με την περιορισμένη εμβέλεια των πρώτων ηλεκτρικών οχημάτων, προωθώντας τη μεγαλύτερη αποδοχή και υιοθέτηση από τους καταναλωτές. Επιπλέον, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα διαθέτουν εγγενή πλεονεκτήματα πέραν της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Παρουσιάζουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση σε σύγκριση με τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, λόγω της ανώτερης απόδοσης των ηλεκτροκινητήρων και της ικανότητας ανάκτησης ενέργειας μέσω των συστημάτων αναγεννητικής πέδησης, τα οποία μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική κατά την επιβράδυνση.

Η εξάπλωση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων έχει καταλύσει ένα αναπτυσσόμενο οικοσύστημα, το οποίο περιλαμβάνει την επέκταση των υποδομών φόρτισης, την ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων και τεχνολογικές καινοτομίες, όπως οι δυνατότητες αυτόνομης οδήγησης και η ενισχυμένη συνδεσιμότητα. Οι κυβερνήσεις, οι βιομηχανίες και οι ενδιαφερόμενοι φορείς παγκοσμίως επενδύουν όλο και περισσότερο στις υποδομές ηλεκτρικών οχημάτων, δίνοντας κίνητρα για την υιοθέτηση και προωθώντας την έρευνα και την ανάπτυξη.

Η μετάβαση στην νέα «ηλεκτρική» εποχή, πέρα από τα αδιαμφισβήτητα οφέλη προς το περιβάλλον και την ανθρωπότητα, ενέχει τεχνολογικές προκλήσεις και δυσκολίες. Η κυριότερη από αυτές είναι ο περιορισμός της εμβέλειας οδήγησης σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα, σε συνδυασμό με τον χρόνο που απαιτείται για την επαναφόρτιση. Παρόλο που οι εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών έχουν επεκτείνει την εμβέλεια και έχουν μειώσει τους χρόνους φόρτισης, οι παράγοντες αυτοί εξακολουθούν να προβληματίζουν τους καταναλωτές, ιδίως κατά τη διάρκεια μακρινών ταξιδιών. Συνεπώς, καθίσταται επιτακτική η ύπαρξη και η ορθή λειτουργία των συστημάτων ψύξης των μπαταριών.

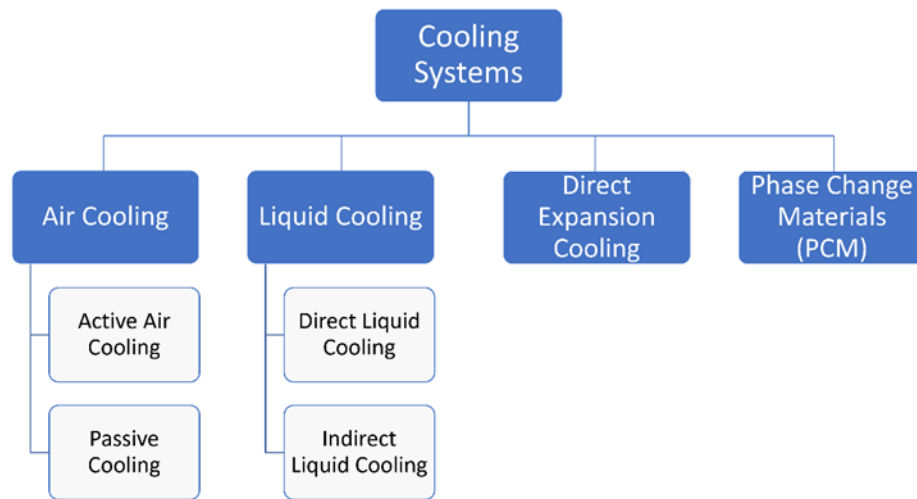
Τα συστήματα ψύξης των μπαταριών των ηλεκτρικών αυτοκινήτων διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της απόδοσης, της μακροζωίας και της ασφάλειας της αποθήκευσης ενέργειας του οχήματος. Τα συστήματα αυτά διαχειρίζονται αποτελεσματικά τις θερμοκρασίες λειτουργίας της συστοιχίας μπαταριών, που είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της υγείας της μπαταρίας και την ενίσχυση της συνολικής απόδοσης. Διατηρώντας τις βέλτιστες θερμοκρασίες, συνήθως μέσω μεθόδων ψύξης με υγρό ή αέρα, τα συστήματα αυτά μετρίζουν τη θερμική καταπόνηση των κελιών της μπαταρίας, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής τους. Επιπλέον, οι ελεγχόμενες θερμοκρασίες εντός της συστοιχίας μπαταριών βελτιώνουν τους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης, εξασφαλίζοντας ταχύτερους χρόνους φόρτισης και σταθερή παροχή ισχύος. Επιπλέον, η αποτελεσματική θερμική διαχείριση μειώνει τον κίνδυνο υπερθέρμανσης, ο οποίος μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια και την απόδοση της μπαταρίας. Η εφαρμογή προηγμένων συστημάτων ψύξης στα ηλεκτρικά οχήματα υπογραμμίζει την τεχνολογική πολυπλοκότητα και την αφοσίωσή τους στη διασφάλιση της αξιοπιστίας, της ασφάλειας και της μεγιστοποίησης των λειτουργικών δυνατοτήτων της μπαταρίας.

Προφανώς, η σχεδίαση του ιδανικού συστήματος ψύξης για το κάθε αυτοκίνητο εξαρτάται από πάρα πολλές ελεύθερες μεταβλητές και απαιτείται ενδελεχής μοντελοποίηση όλων των εμπλεκόμενων μερών προκειμένου να επιτευχθεί ο αρχικός στόχος (μέγιστη επίδοση, μέγιστη απόδοση, αξιοπιστία, ελάχιστο κόστος, ελάχιστο βάρος, ασφάλεια). Ένα από τα δυσκολότερα σημεία στην όλη σχεδιαστική πορεία, καταλήγει να είναι η επιλογή της «βέλτιστης» λύσης μέσα από ένα σύνολο συμβιβαστικών λύσεων για την ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλαπλών κριτηρίων για την εκάστοτε εφαρμογή.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται η προσπάθεια να εντοπιστούν και να αντιμετωπιστούν όλες οι προκλήσεις/προβλήματα που αναφέρθηκαν μέσω του σχεδιασμού ενός συστήματος ψύξης για ένα ηλεκτρικό μονοθέσιο προδιαγραφών Formula Student, με κριτήρια που απορρέουν τόσο από τους περιορισμούς των κανονισμών που πρέπει αυτό να υπακούει, αλλά και από τις προδιαγραφές των υπόλοιπων υποσυστημάτων που χρησιμοποιεί η ομάδα PROM Racing NTUA FSAE Team.

1.2 Συστήματα Ψύξης Συσσωρευτών στην Ηλεκτροκίνηση

Όπως είναι κατανοητό λοιπόν, ο σχεδιασμός και η επιλογή του κατάλληλου συστήματος ψύξης για συγκεκριμένη εφαρμογή στην ηλεκτροκίνηση είναι ζωτικής σημασίας, καθώς όπως θα δούμε στην συνέχεια, η πληθώρα τύπων συστημάτων ψύξης αλλά και οι εκάστοτε παράμετροι σχεδιασμού παρέχουν πολλές επιλογές με κάθε μια να παρουσιάζει ανάλογα πλεονεκτήματα ή μειονεκτήματα. Παρακάτω φαίνονται οι τεχνολογίες των συστημάτων αυτών με την μεγαλύτερη διαφοροποίηση να γίνεται με βάση των τύπο τους αλλά και τον τρόπο εφαρμογής τους.



Σχήμα 1: Τύποι συστημάτων ψύξης στην ηλεκτροκίνηση

Ένας από τους βασικότερους τύπους ψυκτικού συστήματος είναι η αερόψυξη (air-cooling). Πρόκειται για έναν οικονομικά αποδοτικό, ελαφρύ και σχετικά εύκολο σε συντήρηση σύστημα, το οποίο χρησιμοποιεί την φυσική ροή του αέρα και ανεμιστήρες για την απαγωγή της θερμότητας που παράγεται από τα θερμικά «κρίσιμα» εξαρτήματα. Η ψύξη με αέρα χρησιμοποιεί την αρχή της συναγωγής για να μεταφέρει τη θερμότητα μακριά από τη συστοιχία μπαταριών. Καθώς ο αέρας περνάει πάνω από την επιφάνεια,

μεταφέρει τη θερμότητα που εκπέμπεται από τον συσσωρευτή. Η αερόψυξη χωρίζεται σε δύο επιμέρους κατηγορίες, στην παθητική αερόψυξη (Passive Air Cooling) και στην ενεργή (Active Air Cooling). Η παθητική στρατηγική ψύξης είναι η πιο απλή προσέγγιση, η οποία εκμεταλλεύεται την αγωγιμότητα μέσω των βάσεων και των βραχιόνων, καθώς και τη φυσική συναγωγή με τον αέρα στο δοχείο συσσωρευτών, για να μεταφέρει τη θερμότητα που παράγεται στο εσωτερικό του συσσωρευτή στο περιβάλλον χωρίς πρόσθετο υλικό για την αύξηση της μεταφοράς θερμότητας. Η παθητική ψύξη είναι χαμηλού κόστους και "ενεργειακά αποδοτική", καθώς δεν απαιτεί ενέργεια από το αυτοκίνητο. Ωστόσο, παρόλο που είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος ψύξης που παρατηρείται σήμερα, δεν μπορεί να διατηρήσει ένα πακέτο μπαταριών εντός των βέλτιστων θερμοκρασιών ψύξης για εφαρμογές υψηλών επιδόσεων και οδήγηση μεγάλων αποστάσεων με πολλαπλές γρήγορες φορτίσεις. Αυτή η μέθοδος χάνει την εύνοια της, καθώς οι εταιρείες αναζητούν στρατηγικές θερμικής διαχείρισης που περιορίζουν στο ελάχιστο τις αξιώσεις εγγύησης και επεκτείνουν τη χρησιμότητα. Η στρατηγική ενεργού αερόψυξης χρησιμοποιεί ανεμιστήρες και αγωγούς εισόδου με εξαναγκασμένο αέρα που περνάει πάνω από τις μπαταρίες για την απομάκρυνση της θερμότητας. Αυτή η στρατηγική παρατείνει τη διάρκεια ζωής της συστοιχίας μπαταριών σε σύγκριση με την παθητική ψύξη, καθώς διατηρεί τις μπαταρίες σε πιο σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας. Είναι φθηνότερη και ελαφρύτερη από την υγρή ψύξη και είναι πιο εύχρηστη στο σχεδιασμό επειδή δεν χρειάζεται να διασυνδεθεί με τα άλλα δίκτυα ψύξης στο όχημα. Ωστόσο, η διάταξη των συσσωρευτών και η τοποθέτηση των μπαταριών για τη ροή του αέρα μπορεί να αποτελέσει πρόκληση. Τα εξαρτήματα του κουτιού των μπαταριών μπορούν να εμποδίσουν τη ροή του αέρα καθιστώντας δύσκολο να διανεμηθεί κατά τέτοιον τρόπο ώστε να διατηρηθεί μια ομοιόμορφη θερμοκρασία. Η χρήση τεχνικών μοντελοποίησης όπως η υπολογιστική δυναμική ρευστών (CFD) ή τα δίκτυα κομβικών ρευστών βοηθά τους μηχανικούς να επιλύσουν αυτά τα προβλήματα, αλλά μπορεί να είναι δύσκολο να ξεπεραστούν δεδομένων των περιορισμών μεγέθους και βάρους που σχετίζονται με το σχεδιασμό ενός οχήματος.

Η υγρή ψύξη είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την απομάκρυνση της θερμότητας από τη συστοιχία μπαταριών. Είναι επίσης καλύτερη από την ενεργή αερόψυξη στη διατήρηση των μπαταριών εντός των βέλτιστων θερμοκρασιών λειτουργίας. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος που ψύχει ομοιόμορφα όλες τις μπαταρίες οδηγεί σε καλύτερη απόδοση και διάρκεια ζωής των μπαταριών. Η υγρή ψύξη επιτρέπει επίσης τη λειτουργία της συστοιχίας μπαταριών με υψηλότερα φορτία μέγιστης ισχύος, επειδή αποβάλλει περισσότερη θερμότητα από άλλες μεθόδους ψύξης. Υπάρχουν τρεις κύριες προσεγγίσεις για την υγρή ψύξη: σωλήνες ψύξης σε σχήμα σερπαντίνας, πλάκες ψύξης με κανάλια ψύξης στο εσωτερικό τους και άμεση/διεισδυτική ψύξη. Η προσέγγιση των σωλήνων ψύξης είναι η πιο αποτελεσματική για τη διατήρηση ομοιόμορφων θερμοκρασιών κυψελών, αλλά είναι πιο δύσκολη στην κατασκευή και μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερες πτώσεις πίεσης. Η προσέγγιση των πλακών ψύξης είναι αρκετά απλή στην εφαρμογή, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες κλίσεις θερμοκρασίας σε μεμονωμένες μπαταρίες. Η προσέγγιση άμεσης ψύξης μπορεί να αποτελέσει το πιο αποτελεσματικό μέσο απομάκρυνσης της

θερμότητας, αλλά είναι σχετικά νέα και απαιτεί ακριβώς διηλεκτρικά ψυκτικά μέσα αντί για συμβατικά ψυκτικά υγρά. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος με υγρή ψύξη μπορεί να είναι πιο δύσκολος επειδή πρέπει να ενσωματωθεί με άλλα ηλεκτρικά και ρευστά συστήματα στο όχημα. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η πιθανότητα διαρροής υγρού, διότι μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα. Τα συστήματα υγρής ψύξης είναι γενικά βαρύτερα, ακριβότερα και πιο περίπλοκα στην επισκευή. Ωστόσο, οι συμβιβασμοί μπορεί να αξίζουν τον κόπο, επειδή τα συστήματα υγρής ψύξης παρέχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και υψηλότερες επιδόσεις από τα αερόψυκτα και παθητικά ψυχόμενα πακέτα του ίδιου μεγέθους. Τα υγρά ψυκτικά μέσα έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα (ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας με τη μορφή ενέργειας στους δεσμούς τους) από τον αέρα, και ως εκ τούτου αποδίδουν πολύ αποτελεσματικά και διαθέτουν πλεονεκτήματα όπως η συμπαγής δομή και η ευκολία διάταξης. Από αυτές τις επιλογές, τα υγρά ψυκτικά μέσα θα προσφέρουν την καλύτερη απόδοση για τη διατήρηση μιας συστοιχίας μπαταριών στο σωστό εύρος θερμοκρασίας και ομοιομορφίας.

Στα συστήματα υγρής ψύξης, υπάρχει ένας άλλος διαχωρισμός μεταξύ άμεσης και έμμεσης ψύξης. Εάν, δηλαδή, τα κελιά της μπαταρίας είναι βυθισμένα στο υγρό ή εάν το υγρό αντλείται μέσω σωλήνων. Τα συστήματα άμεσης ψύξης τοποθετούν τα κελιά της μπαταρίας σε άμεση επαφή με το ψυκτικό υγρό. Αυτά τα συστήματα θερμικής διαχείρισης βρίσκονται επί του παρόντος στο στάδιο της έρευνας και της ανάπτυξης, χωρίς να κυκλοφορούν στην αγορά αυτοκίνητα που να χρησιμοποιούν αυτό το σύστημα. Η άμεση ψύξη είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί, λόγω του γεγονότος ότι απαιτείται ένας νέος τύπος ψυκτικού υγρού. Επειδή η μπαταρία βρίσκεται σε επαφή με το υγρό, το ψυκτικό υγρό πρέπει να έχει χαμηλή έως μηδενική αγωγιμότητα. Τα συστήματα έμμεσης ψύξης είναι παρόμοια με τα συστήματα ψύξης εσωτερικής καύσης στο ότι και τα δύο κυκλοφορούν ψυκτικό υγρό μέσω μιας σειράς μεταλλικών σωλήνων. Ωστόσο, η κατασκευή του συστήματος ψύξης θα είναι πολύ διαφορετική στα ηλεκτρικά οχήματα. Η δομή του συστήματος ψύξης που επιτυγχάνει τη μέγιστη ομοιομορφία θερμοκρασίας εξαρτάται από την δομή της συστοιχίας μπαταριών και θα μοιάζει διαφορετική για κάθε κατασκευαστή αυτοκινήτων.

Τελευταίες κατηγορίες αποτελούν η ψύξη άμεσης επέκτασης και η ψύξη με χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM). Πρόκειται για δύο λιγότερο διαδεδομένες μεθόδους με ελάχιστες εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία. Κατά την ψύξη άμεσης επέκτασης χρησιμοποιούνται ψυκτικά μέσα, παρόμοια με εκείνα των συστημάτων κλιματισμού. Παρατηρείται υψηλή απόδοση στη διαχείριση της θερμότητας, ενώ ταυτόχρονα παρέχεται δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της θερμοκρασίας. Ωστόσο, εγείρονται ερωτήματα και ανησυχίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των ψυκτικών μέσων. Τα PCM απορροφούν και απελευθερώνουν θερμότητα κατά τις μεταβάσεις φάσης, διατηρώντας σταθερές θερμοκρασίες. Επιτρέπουν αποτελεσματική διαχείριση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και χάρη στον συμπαγή σχεδιασμό τους προσφέρουν την δυνατότητα εύκολης ενσωμάτωσης στη δομή του οχήματος. Πάραυτα, έχουν περιορισμένη ικανότητα

διαχείρισης υψηλών θερμικών φορτίων, ενώ ενδέχεται να απαιτούνται πρόσθετες μέθοδοι ψύξης για καταστάσεις υψηλής ζήτησης.

1.3 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στην επίτευξη διαφόρων βασικών στόχων, τους οποίους οι μηχανικοί καλούνται να πετύχουν κατά την ανάπτυξη ενός ηλεκτρικού αγωνιστικού μονοθεσίου τύπου Formula Student. Πρωτίστως, κυρίαρχο σκοπό αποτελεί ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός ενός ψυκτικού συστήματος συσσωρευτών και ως προέκταση ο σχεδιασμός της δομής και της συστοιχίας των μπαταριών σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο τύπου formula, με τέτοιο τρόπο που να μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα, οι αποδόσεις και η ασφάλεια. Παράλληλα, πρέπει να πληροί τους αυστηρούς περιορισμούς βάρους και χώρου που είναι εγγενείς στα μονοθέσια αγωνιστικά αυτοκίνητα. Ταυτόχρονα, πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι κανονισμοί του εκάστοτε διαγωνισμού και οι φυσικοί περιορισμοί κατά τον ορισμό των σχεδιαστικών στόχων. Προφανώς, η επιλογή του κατάλληλου τύπου ψυκτικού συστήματος από τους προαναφερόμενους και η απόφαση του τελικού σχεδίου του συστήματος αυτού δεν θα ήταν εφικτό να πραγματοποιηθούν χωρίς την θερμική ανάλυση του συστήματος.

Συνεπώς, εξίσου σημαντική είναι η διεξαγωγή ολοκληρωμένης θερμικής ανάλυσης και προσομοίωσης του συστήματος ψύξης και των συσσωρευτών του μονοθεσίου. Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει την μελέτη της παραγωγής και της διάχυσης θερμότητας στο εσωτερικό του κουτιού των μπαταριών κατά την διάρκεια διαφόρων συνθηκών λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των αγώνων υψηλής ταχύτητας και των ταχέων κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης.

Ακολουθεί η βελτίωση των επιδόσεων, δηλαδή, ο προσδιορισμός στρατηγικών και τροποποιήσεων σχεδιασμού που βελτιώνουν την θερμική διαχείριση του δοχείου συσσωρευτή. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη διερεύνηση διαφορετικών υλικών, συστημάτων ψύξης, μεθόδων μόνωσης ή δομικών διαμορφώσεων για την ρύθμιση της θερμοκρασίας και την αποτροπή της υπερθέρμανσης των κελιών της μπαταρίας.

Έχοντας διασφαλίσει την βελτίωση των επιδόσεων του συστήματος, σειρά έχει ο έλεγχος ασφαλείας. Πρέπει να εξασφαλιστεί ότι ο σχεδιασμός πληροί ή υπερβαίνει τα πρότυπα ασφαλείας και μετριάξει τους πιθανούς κινδύνους που σχετίζονται με θερμικά ζητήματα στο δοχείο των συσσωρευτών. Τα ζητήματα ασφαλείας περιλαμβάνουν την πρόληψη της θερμικής διαφυγής, την ελαχιστοποίηση κινδύνου πυρκαγιάς ή βλάβης και τη διατήρηση σταθερών θερμοκρασιών λειτουργίας εντός των συσσωρευτών.

Καταλήγοντας, τελικός σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η επαλήθευση των μελετώμενων σχεδιαστικών βελτιώσεων και των στρατηγικών θερμικής διαχείρισης και η εξαγωγή συμπερασμάτων. Η επαλήθευση γίνεται μέσω προσομοιώσεων και δοκιμών. Με βάση τα ευρήματα καθορίζονται οι κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό και τον

Θερμικό έλεγχο των συσσωρευτών σε μονοθέσια αυτοκίνητα υψηλών επιδόσεων τύπου Formula Student.

Συμπερασματικά, απώτερος σκοπός είναι η αντιμετώπιση προβλημάτων και η εύρεση λύσεων στις προκλήσεις που εγείρονται κατά την διάρκεια της ανάπτυξης ενός αξιόπιστου και ασφαλούς αγωνιστικού οχήματος μέσα σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον. Στόχος είναι η τελική ενσωμάτωση του μελετώμενου συστήματος στο μονοθέσιο της ομάδας PROM Racing NTUA FSAE Team, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

1.4 Κίνητρο

Βασικό ερέθισμα για την ενασχόληση του συγγραφέα με την μελέτη και τον σχεδιασμό του συστήματος ψύξης ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος αποτέλεσε η συμμετοχή του στην ερευνητική φοιτητική ομάδα PROM Racing NTUA FSAE Team (γνωστή ως PROM). Η Prom Racing ιδρύθηκε το 2008 από 5 φοιτητές μηχανολόγους μηχανικούς, με πυξίδα την αγάπη τους προς το μηχανοκίνητο αθλητισμό. Πλέον η ομάδα αριθμεί πάνω από 50 άτομα. Μέχρι και το 2019 κατασκεύασε επιτυχημένα 5 θερμικά μονοθέσια τα οποία και παρουσίασε τις εκάστοτε χρονιές στους διεθνείς διαγωνισμούς Formula Student. Η χρονιά 2019-2020 ήταν μια πολύ ιδιαίτερη χρονιά. Μετά την άκρως επιτυχημένη πορεία της ομάδας στην θερμική κατηγορία του διαγωνισμού, για τα ελληνικά δεδομένα, αποφασίστηκε να μεταβεί στην ηλεκτρική κατηγορία σχεδιάζοντας το πρώτο ηλεκτρικό μονοθέσιο έως τα τέλη του 2021, σημειώνοντας την πιο επιτυχημένη χρονιά της ομάδας, διασφαλίζοντας την θέση της σε μία από τις 5 κορυφαίες ομάδες παγκοσμίως. Ακολούθησαν άλλα δύο ηλεκτρικά μονοθέσια μέχρι σήμερα, με το δεύτερο να διαθέτει λειτουργία αυτόματης οδήγησης, χωρίς οδηγό με την χρήση καμερών.



Εικόνα 1: Το αγωνιστικό μονοθέσιο P22 της ομάδας PROM Racing

Πέρα όμως από τη συμμετοχή στην Prom Racing, μεγάλο κίνητρο για την ανάληψη του παρόντος θέματος πηγάζει από το ενδιαφέρον για την σχεδίαση Ψυκτικών Συστημάτων και την διαχείριση της θερμικής ενέργειας που αποτελεί έναν κλάδο της επιστήμης του Μηχανολόγου Μηχανικού αρκετά απαιτητικό, καθώς απαιτεί από τον σχεδιαστή να συνδυάζει γνώσεις από πολλά επιστημονικά πεδία προκειμένου να μοντελοποιήσει, όσο το δυνατόν καλύτερα, ένα πλήθος από φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε ένα σύστημα ψύξης.

Επίσης, η αυξανόμενη έλευση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην καθημερινότητα μας, οδήγησε την αυτοκινητοβιομηχανία σε νέες σχεδιαστικές τάσεις, πέρα από τις κλασσικές που προϋπήρχαν, με αποκορύφωμα την τελευταία δεκαετία, όπου ίσως ένα από τα σοβαρότερα μειονεκτήματα προς αντιμετώπιση της ηλεκτροκίνησης είναι η εμβέλεια του οχήματος και οι χρόνοι φόρτισης, με αποτέλεσμα οι σχεδιαστές να ωθούνται στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και τοπολογιών στα ψυκτικά συστήματα των μπαταριών.

1.5 Formula Student Event: Γενική Επισκόπηση

Οι διαγωνισμοί Formula Student αποτελούν δυναμικές πλατφόρμες όπου οι φοιτητές μηχανικοί σε παγκόσμιο επίπεδο παρουσιάζουν την καινοτομία, τη σχεδιαστική τους ικανότητα και το πνεύμα συνεργασίας στο χώρο της μηχανικής αυτοκινήτων. Αυτοί οι διαγωνισμοί αναθέτουν στις ομάδες των φοιτητών τη σύλληψη, το σχεδιασμό, την κατασκευή και, τελικά, την αγωνιστική συμμετοχή σε αυτοκίνητα τύπου formula. Πέρα από το συναρπαστικό αγωνιστικό στοιχείο, οι αγώνες περιλαμβάνουν διάφορες στατικές και δυναμικές προκλήσεις, όπως παρουσιάσεις σχεδιασμού, ανάλυση κόστους και δοκιμές επιδόσεων. Οι διαγωνισμοί δεν δίνουν μόνο έμφαση στην ταχύτητα και τις επιδόσεις, αλλά εστιάζουν επίσης σε παράγοντες όπως η βιωσιμότητα, η αποδοτικότητα και η μηχανική οξυδέρκεια. Οι εκδηλώσεις Formula Student χρησιμεύουν ως χωνευτήρια για βιωματική μάθηση, καλλιεργώντας δεξιότητες στη διαχείριση έργων, την ομαδική εργασία και την επίλυση προβλημάτων. Προσφέρουν μια καθηλωτική εμπειρία, όπου οι συμμετέχοντες εφαρμόζουν τις θεωρητικές γνώσεις σε σενάρια του πραγματικού κόσμου, προετοιμάζοντάς τους για μελλοντική σταδιοδρομία στην αυτοκινητοβιομηχανία, ενώ παράλληλα προωθούν την καινοτομία και διευρύνουν τα όρια της μηχανικής αριστείας.

Οι διαγωνισμοί Formula Student μαγνητίζουν τους φοιτητές μηχανικούς σε όλο τον κόσμο, καλλιεργώντας την κουλτούρα της καινοτομίας και του ανταγωνιστικού πνεύματος σε διάφορες ηπείρους. Η Formula Student της Γερμανίας, από τις πιο γνωστές, προσελκύει ομάδες από διάφορα έθνη για να επιδείξουν τις ικανότητές τους στη μηχανική και την εφευρετικότητα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η εκδήλωση αυτή, η οποία διεξάγεται στο Hockenheimring, χρησιμεύει ως κόμβος για τους επίδοξους μηχανικούς που παρουσιάζουν τα σχολαστικά σχεδιασμένα, κατασκευασμένα και δοκιμασμένα αυτοκίνητα τύπου formula. Επιπλέον, οι διοργανώσεις της Formula Student επεκτείνονται πέρα από τη Γερμανία, με επαναλήψεις που λαμβάνουν χώρα σε χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, το

Ηνωμένο Βασίλειο, η Αυστρία, η Ουγγαρία, η Τσεχία, η Ολλανδία, η Ιταλία, η Ισπανία, η Ελβετία, η Αυστραλία και η Ιαπωνία, προσφέροντας κάθε μία από αυτές μια μοναδική πλατφόρμα για τους φοιτητές να εφαρμόσουν τις γνώσεις τους, να συνεργαστούν μεταξύ διαφορετικών κλάδων και να διεκδικούν τα όρια της καινοτομίας στην αυτοκινητοβιομηχανία σε παγκόσμια κλίμακα. Η Formula Student Germany (FSG) είναι ένας διεθνής διαγωνισμός σχεδιασμού για φοιτητές που διοργανώνεται κάθε χρόνο από το 2006 από την Formula Student Germany e. V. υπό την αιγίδα της Verein Deutscher Ingenieure e. V. σύμφωνα με κανόνες παρόμοιους με εκείνους της Formula SAE. Αποτελεί τον κεντρικό διαγωνισμό της Ευρώπης και κάθε χρόνο θέτει το βήμα για τους υπόλοιπους διαγωνισμούς τύπου FSAE. Ως εκ τούτου η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τους κανονισμούς και τους περιορισμούς (Formula Student Rules 2024 & Formula Student Germany Handbook 2024) που θέτονται από την διοργανωτική επιτροπή του Formula Student Germany (FSG).



Εικόνα 2: Φωτογραφία από τον διαγωνισμό Formula Student Germany

Κάθε φοιτητική ομάδα έχει τη δυνατότητα να διαγωνιστεί είτε στην κατηγορία Formula Student Combustion (FSC) όπου κάθε μονοθέσιο αγωνίζεται με την χρήση ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης (με την δυνατότητα χρήσης υβριδικού κινητήρα, Combustion Hybrid) , είτε στην κατηγορία Formula Student Electric (FSE) όπου τα μονοθέσια είναι αμιγώς ηλεκτρικά. Και στις δυο κατηγορίες κάθε ομάδα έχει τη δυνατότητα να συμμετέχει και στο Driverless Cup (DC), κατά το οποίο βαθμολογείται η ικανότητα κάθε ομάδας να αναπτύξει

ένα αυτόνομο μονοθέσιο το οποίο είναι πλήρως λειτουργικό χωρίς την φυσική παρουσία του οδηγού. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αφορά την κατηγορία Formula Student Electric (FSE).

Η αξιολόγηση κάθε ομάδας εξαρτάται από τις επιδόσεις της σε διάφορες προκλήσεις, οι οποίες χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Αυτές είναι τα Static Events και τα Dynamic Events. Τα Static Events με την σειρά τους απαρτίζονται από το Engineering Design Event, το Cost and Manufacturing Event και το Business Presentation, ενώ τα Dynamic Events περιλαμβάνουν το Acceleration, το Skid Pad, το Autocross, το Endurance, το Efficiency και το Track Drive εάν το μονοθέσιο συμμετέχει στο Driverless Cup. Η συνολική βαθμολογία προκύπτει από την άθροιση των επιμέρους βαθμολογιών σε όλα τα Events (Statics & Dynamics), ενώ η παγκόσμια κατάταξη διαμορφώνεται με βάση όλες τις βαθμολογίες που έχει συγκεντρώσει η ομάδα σε διάφορους διαγωνισμούς Formula Student.

1.5.1 Static Events

Κατά την έναρξη του Engineering Design Event, οι φοιτητές πρέπει να παραδώσουν μια οκτασέλιδη τεχνική περιγραφή του αυτοκινήτου τους. Οι ομάδες που θα συμμετέχουν στο Driverless Cup πρέπει επιπλέον να υποβάλουν μια περιγραφή πέντε σελίδων το πολύ για το αυτόνομο σύστημα. Τα έγγραφα πρέπει να παρουσιάζουν τόσο τον σχεδιασμό τους, όσο και τον τρόπο με τον οποίο ο σχεδιασμός αυτός θα εφαρμοστεί στην κατασκευή που επέλεξαν. Με βάση αυτά τα έγγραφα, τα μέλη της κριτικής επιτροπής θα αξιολογήσουν τη διάταξη, τον τεχνικό σχεδιασμό, την κατασκευή και την εφαρμογή της παραγωγής του πραγματικού οχήματος. Στη συνέχεια, θα ακολουθήσει συζήτηση όπου οι ομάδες θα ερωτηθούν από τους κριτές. Οι συζητήσεις αυτές επικεντρώνονται στην αποσαφήνιση τεχνικών λεπτομερειών, στη διερεύνηση της σκέψης πίσω από τον επιλεγμένο σχεδιασμό, καθώς και στην αντίστοιχη τεχνική κατανόηση των φοιτητών. Δεν θα αξιολογηθεί μόνο η ποιότητα της εν λόγω τεχνικής λύσης, αλλά και οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτήν.

Το κόστος αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το σχεδιασμό κάθε προϊόντος. Στο Cost and Manufacturing Event, οι ομάδες πρέπει να ασχοληθούν με το υπολογιστικό μέγεθος του οχήματος, των εξαρτημάτων του και των απαραίτητων βημάτων κατασκευής και να τα καταγράψουν όλα αυτά σε μια γραπτή έκθεση κόστους. Οι φοιτητές πρέπει στη συνέχεια να απαντήσουν σε ερωτήσεις των κριτών σχετικά με την έκθεση κόστους για το πρωτότυπό τους. Εκτός από την εξέταση της πληρότητας της γραπτής έκθεσης, θα αξιολογηθεί η κατανόηση της διαδικασίας κατασκευής και του υπολογισμού του συνολικού κόστους από τους φοιτητές.

Κατά το Business Presentation Event κάθε ομάδα παρουσιάζει το επιχειρηματικό της σχέδιο για το κατασκευασμένο πρωτότυπο σε μια φανταστική εταιρεία που εκπροσωπείται από κριτές. Κατά τη διάρκεια μιας δεκάλεπτης παρουσίασης, η ομάδα πρέπει να αποδείξει γιατί το σχέδιό της ανταποκρίνεται καλύτερα στις απαιτήσεις της ομάδας-στόχου και να

δείξει πώς το σχέδιό της μπορεί να προωθηθεί με επιτυχία στην αγορά. Μετά την παρουσίαση θα ακολουθήσει πεντάλεπτη συζήτηση και γύρος ερωτήσεων με τους κριτές. Στην εκδήλωση αυτή θα αξιολογηθεί το περιεχόμενο, η δομή και η επεξεργασία της παρουσίασης, καθώς και η απόδοση της ομάδας κατά την παρουσίασή της, μαζί με τις απαντήσεις τους στις ερωτήσεις της επιτροπής.

1.5.2 Dynamic Events

Πρώτο αγώνισμα αποτελεί το Acceleration Event. Η επιτάχυνση του οχήματος από στάση μετράται σε ευθεία 75 μέτρων. Εκτός από την ιχνηλασιμότητα, ο σωστός σχεδιασμός του κινητήρα είναι ιδιαίτερα σημαντικός, είτε για μεγαλύτερη ισχύ είτε για την υψηλότερη δυνατή ροπή. Τα ταχύτερα αυτοκίνητα διασχίζουν τη γραμμή σε λιγότερο από τέσσερα δευτερόλεπτα και μπορούν να φτάσουν ταχύτητες άνω των 100 km/h στο τέλος της διαδρομής.

Κατά τη διάρκεια του Skid Pad, τα αυτοκίνητα πρέπει να οδηγήσουν σε μια διαδρομή σχήματος 8 διαμορφωμένη με κώνους, κάνοντας δύο γύρους σε κάθε κύκλο. Σε κάθε περίπτωση, θα μετράται ο δεύτερος γύρος. Ο χρόνος του γύρου δίνει μια συγκριτική τιμή για τη μέγιστη δυνατή πλευρική επιτάχυνση του αυτοκινήτου. Τα περισσότερα από τα αυτοκίνητα χρησιμοποιούν αεροδυναμική για να αυξήσουν την πίεση επαφής και έτσι να αυξήσουν την πλευρική επιτάχυνση. Όπως συμβαίνει σε όλα τα δυναμικά αγωνίσματα, το χτύπημα οποιουδήποτε κώνου συνεπάγεται ποινή χρόνου.

Στο αγώνισμα Autocross, τα αυτοκίνητα FSE διασχίζουν μια πίστα χιλιομέτρων με οδηγό και μια πίστα 500 μέτρων χωρίς οδηγό, που περιλαμβάνει ευθείες, στροφές και σικάνες. Ένας γρήγορος χρόνος γύρου είναι ένδειξη υψηλής δυναμικής οδήγησης, ακριβούς χειρισμού και καλής ικανότητας επιτάχυνσης και πέδησης. Για άλλη μια φορά, υπάρχουν ποινές χρόνου για όσους χτυπήσουν οποιουδήποτε κώνους. Η κατάταξη στο Autocross καθορίζει τις θέσεις εκκίνησης για το Endurance Event.

Παρέχοντας τον υψηλότερο αριθμό πόντων, το Endurance Event είναι το κύριο αγώνισμα. Σε μια απόσταση 22 χιλιομέτρων τα αυτοκίνητα πρέπει να αποδείξουν την αντοχή τους σε συνθήκες μακράς διάρκειας. Επιτάχυνση, ταχύτητα, χειρισμός, δυναμική, οικονομία καυσίμου, αξιοπιστία - τα αυτοκίνητα πρέπει να τα αποδείξουν όλα. Το Endurance Event απαιτεί επίσης ικανότητες χειρισμού από τον οδηγό, επειδή στην πίστα μπορεί να υπάρχουν έως και τέσσερα αυτοκίνητα ταυτόχρονα. Κάθε ομάδα έχει μόνο μία προσπάθεια, ενώ οι οδηγοί αλλάζουν μετά από 11 χιλιόμετρα.

Κατά τη διάρκεια του Endurance Event καταγράφεται με ακρίβεια η κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, η απόλυτη κατανάλωση ενέργειας δεν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της βαθμολογίας απόδοσης, αλλά η κατανάλωση σε σχέση με την ταχύτητα. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο οι ομάδες να οδηγούν ιδιαίτερα αργά στον αγώνα αντοχής προκειμένου να συγκεντρώσουν όσο το δυνατόν υψηλότερη βαθμολογία στο Efficiency Event.

Τέλος, για τις ομάδες που θα συμμετέχουν στο Driverless Cup, παρέχοντας τον υψηλότερο αριθμό δυναμικών σημείων, πραγματοποιείται το Track Drive. Σε μια απόσταση 10 γύρων τα αυτοκίνητα πρέπει να αποδείξουν την αντοχή τους χωρίς οδηγό σε συνθήκες μακράς διάρκειας. Τα αυτοκίνητα πρέπει να διανύσουν την απόσταση σε μία διαδρομή. Οι κώνοι δεν επανατοποθετούνται.

1.6 Λογισμικά

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση των λογισμικών CAD και CAE. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SolidWorks για τις σχεδιαστικές απαιτήσεις της εργασίας, ενώ το λογισμικό ANSYS και πιο ιδιαίτερα το ANSYS Fluent (With Fluent Meshing) για την μοντελοποίηση και την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

1.6.1 Λογισμικό SolidWorks

Το SolidWorks είναι ένα κορυφαίο λογισμικό ειδικά σχεδιασμένο για τη βιομηχανία, προσφέροντας μια ισχυρή πλατφόρμα για μηχανικούς και σχεδιαστές για τη δημιουργία περίπλοκων και καινοτόμων τρισδιάστατων μοντέλων. Η διαισθητική διεπαφή και τα εργαλεία παραμετρικής μοντελοποίησης επιτρέπουν την ταχεία ανάπτυξη λεπτομερών εξαρτημάτων και συναρμολογιών. Μέσω μιας σειράς χαρακτηριστικών, όπως η προηγμένη μοντελοποίηση επιφανειών, η διαχείριση συναρμολογήσεων και οι δυνατότητες προσομοίωσης, το SolidWorks δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να απεικονίζουν και να επαναλαμβάνουν σχέδια με ακρίβεια, διασφαλίζοντας ότι ανταποκρίνονται στις λειτουργικές και αισθητικές απαιτήσεις. Η ενσωμάτωσή του με διάφορες κατασκευαστικές διαδικασίες απλοποιεί τη μετάβαση από το σχεδιασμό στην παραγωγή, προωθώντας αποτελεσματικές ροές εργασίας. Το SolidWorks χρησιμεύει ως μια ολοκληρωμένη λύση, επιτρέποντας τη δημιουργία σύνθετων σχεδίων, ενώ δίνει προτεραιότητα στην ευκολία χρήσης, την ακρίβεια και την ευελιξία στην εξερεύνηση και την ανάπτυξη του σχεδιασμού.



Εικόνα 3: Λογότυπο του λογισμικού SolidWorks

1.6.2 Λογισμικό ANSYS Fluent

Το ANSYS Fluent είναι ένα κορυφαίο λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) που φημίζεται για τις ισχυρές δυνατότητες προσομοίωσής του στην ανάλυση ροής, μεταφοράς θερμότητας και συναφών φαινομένων σε διάφορους κλάδους. Προσφέροντας μια εξελιγμένη σειρά εργαλείων και επιλυτών, το Fluent επιτρέπει στους μηχανικούς και τους ερευνητές να μοντελοποιούν πολύπλοκες συμπεριφορές ρευστών με εξαιρετική ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Τα προηγμένα μοντέλα τύρβης, οι προσομοιώσεις πολυφασικής ροής και οι δυνατότητες μεταφοράς ειδών δίνουν στους χρήστες τη δυνατότητα να εμβαθύνουν σε περίπλοκα σενάρια ροής, όπως τυρβώδεις, στρωτές ή μεταβατικές ροές, επιτρέποντας τη γνώση της συμπεριφοράς των ρευστών σε διάφορα περιβάλλοντα. Με τη διαισθητική διεπαφή και τα εκτεταμένα εργαλεία μετεπεξεργασίας, το Fluent διευκολύνει την οπτικοποίηση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, βοηθώντας στη βελτιστοποίηση των σχεδίων και την πρόβλεψη των επιδόσεων σε ένα ευρύ φάσμα μηχανολογικών εφαρμογών.

Το ANSYS Meshing χρησιμεύει ως ένα ισχυρό εργαλείο προεπεξεργασίας που αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας μοντελοποίησης, προσφέροντας προηγμένες δυνατότητες δημιουργίας πλέγματος για προσομοιώσεις. Παρέχει ένα φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον για τη δημιουργία πλεγμάτων υψηλής ποιότητας, ζωτικής σημασίας για ακριβείς και αποτελεσματικές αριθμητικές προσομοιώσεις. Με μια σειρά μεθόδων πλέγματος, όπως τετραεδρικές, εξαεδρικές και πολυεδρικές, το ANSYS Meshing προσαρμόζεται σε ποικίλες γεωμετρίες και πολυπλοκότητες, εξασφαλίζοντας την ακριβή αναπαράσταση των φυσικών χαρακτηριστικών του μοντέλου. Οι αυτοματοποιημένοι αλγόριθμοι πλέγματος και τα διαγνωστικά πλέγματος βελτιστοποιούν τη διαδικασία πλέγματος, επιτρέποντας στους χρήστες να βελτιώσουν και να βελτιστοποιήσουν την ποιότητα του πλέγματος, όπως το μέγεθος των στοιχείων και τις αναλογίες διαστάσεων, εξασφαλίζοντας αριθμητική ακρίβεια και σύγκλιση για προσομοιώσεις που διεξάγονται στο ANSYS Fluent και σε άλλους ANSYS επιλύτες. Η ευρωστία και η ευελιξία του ANSYS Meshing το καθιστούν θεμελιώδες συστατικό για την επίτευξη αξιόπιστων και ακριβών αποτελεσμάτων προσομοίωσης σε διάφορους κλάδους της μηχανικής.



Εικόνα 4: Λογότυπο του λογισμικού ANSYS

1.7 Δομή της Εργασίας

Σε πρώτο στάδιο, θεωρήθηκε απαραίτητο να μελετηθεί σε υψηλό επίπεδο το δοχείο συσσωρευτών και τα εξαρτήματά του, ενός ηλεκτροκίνητου μονοθέσιου FS, έτσι ώστε να προκύψουν όλες οι απαραίτητες προδιαγραφές που πρέπει να πληροί ένα ψυκτικό σύστημα γι' αυτήν την εφαρμογή. Με βάση αυτές, αλλά και την συνοπτική περιγραφή των διαφόρων τύπων ψυκτικών συστημάτων που έγινε παραπάνω, εξηγείται και η επιλογή τόσο του τύπου συστήματος που θα μελετηθεί, όσο και της συγκεκριμένης τοπολογίας των ψυκτικών εξαρτημάτων.

Εν συνεχεία παρουσιάζεται πλήρως όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για τη σχεδίαση ενός ψυκτικού συστήματος. Με αφετηρία βασικές γνώσεις μεταφοράς θερμότητας και θερμοδυναμικής και τη χρήση βοηθητικών μεγεθών που ορίζονται αντίστοιχα, γίνεται ο προσδιορισμός των σχέσεων που εμπλέκουν τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Επιπλέον, αναφέρεται η επαναληπτική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή του τελικού σχεδίου.

Έπειτα, εξηγείται ο τρόπος μοντελοποίησης και δίνονται πληροφορίες στα πλαίσια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής όσον αφορά το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε, τα στοιχεία του πλέγματος, η μέθοδος επίλυσης και οι οριακές συνθήκες. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης του τελικού σχεδίου, τα οποία και σχολιάζονται.

2. Περιγραφή Ψυχόμενου Συστήματος & Εξαγωγή Προδιαγραφών

2.1 Συσσωρευτής Ενέργειας (Accumulator Container)

Ο συσσωρευτής ενέργειας ή δοχείο συσσωρευτών ή αλλιώς το κουτί μπαταριών αποτελεί ένα από τα πολυπλοκότερα συστήματα ενός ηλεκτρικού μονοθεσίου Formula Student, καθώς αποτελεί την πηγή της ενέργειας του, τόσο για τις αγωνιστικές επιδόσεις του όσο και για τις λειτουργικές ανάγκες των υπόλοιπων συστημάτων του οχήματος. Χωρίζεται σε δύο τμήματα, το τμήμα υψηλής τάσης - High Voltage Section, στο οποίο τοποθετείται η συστοιχία των μπαταριών αλλά και τα απαραίτητα εξαρτήματα για την λειτουργία τους και το τμήμα χαμηλής τάσης - Low Voltage Section, στο οποίο εμπεριέχονται όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα χαμηλής τάσης και ο μετατροπέας συνεχούς ρεύματος DC-DC.

Ο Συσσωρευτής Ενέργειας ή αλλιώς Tractive System Accumulator Container, αποτελείται από 288 κελιά διαμοιρασμένα σε 8 συστάδες (segments), με την καθεμιά να περιέχει 36 κελιά. Όπως είναι σαφές, η τάση ακροδεκτών του κάθε στοιχειώδους κελιού εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης, άρα είναι αναμενόμενο να δημιουργείται ένα εύρος τάσης λειτουργίας με βάση το οποίο προκύπτουν οι σχεδιαστικές προδιαγραφές. Θεωρητικά λοιπόν, από το φυλλάδιο του κατασκευαστή για το κελί μπαταρίας Melasta SLPBB042126 προκύπτει ότι η μέγιστη τάση ανέρχεται στα 4.2V, η ονομαστική στα 3.7V ενώ η ελάχιστη επιτρεπτή στα 3V. Συνολικά, η μέγιστη τάση του συσσωρευτή ενέργειας είναι 604.8V, η ονομαστική ενέργεια 8.1kWh και η ονομαστική τιμή εκφόρτισης 15C. Στα υποκεφάλαια που ακολουθούν γίνεται αναφορά στα βασικά εξαρτήματα που συνθέτουν τον συσσωρευτή ενέργειας.



Εικόνα 5: Συσσωρευτής ενέργειας της ομάδας PROM Racing για το μονοθέσιο P22

2.1.1 Κελιά Μπαταριών Li-Po

Τα κελιά Li-Po της Melasta έχουν γίνει μια όλο και πιο δημοφιλής επιλογή για δοχεία συσσωρευτών σε αυτοκίνητα Formula SAE (FSAE) λόγω της εξαιρετικής αναλογίας ισχύος/βάρους και της αξιόπιστης απόδοσής τους. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητά τους επιτρέπει στις ομάδες να μεγιστοποιήσουν την απόδοση ισχύος, διατηρώντας παράλληλα το συνολικό βάρος του συστήματος συσσωρευτών σχετικά χαμηλό. Τα κελιά αυτά παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια για τα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης, προσφέροντας γρήγορους ρυθμούς εκφόρτισης και σταθερή απόδοση σε όλους τους αγώνες. Επιπλέον, η έμφαση που δίνει η Melasta στα χαρακτηριστικά ασφαλείας των κυψελών Li-Po συμμορφώνεται με τους αυστηρούς κανονισμούς ασφαλείας των διαγωνισμών FSAE, εξασφαλίζοντας μια αξιόπιστη και ασφαλή πηγή ενέργειας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το κελί Melasta SLPBB042126.



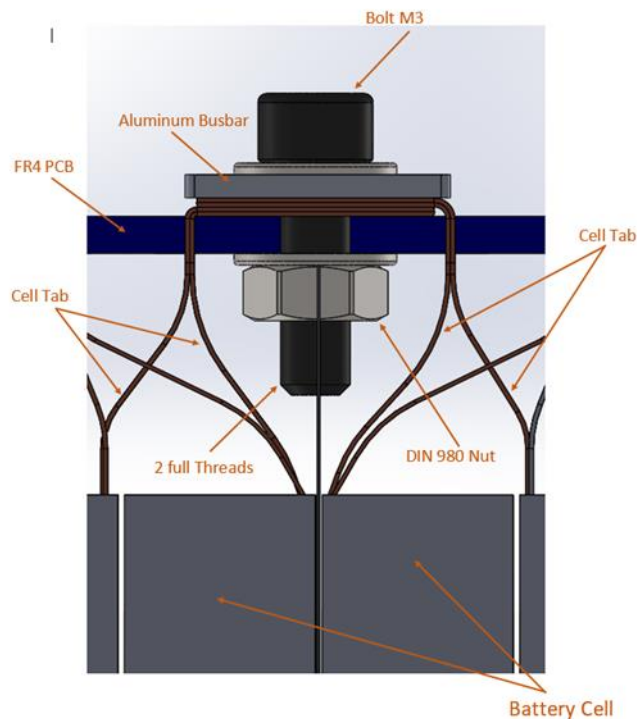
Εικόνα 6: Κελί Melasta SLPBB042126

2.1.2 Γλωττίδες (Tabs)

Τα tabs που χρησιμοποιούνται στο δοχείο συσσωρευτή παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαχείριση της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα μπαταρίας. Αυτές οι γλωττίδες, συνήθως κατασκευασμένες από αγώγιμα υλικά όπως ο χαλκός ή το αλουμίνιο, χρησιμεύουν ως σημεία σύνδεσης μεταξύ μεμονωμένων κυψελών ή μονάδων εντός της συστοιχίας μπαταριών. Η κύρια λειτουργία τους είναι να διευκολύνουν τη μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των κυψελών, εξασφαλίζοντας την ομοιόμορφη κατανομή της ισχύος σε όλο το πακέτο. Οι γλωττίδες λειτουργούν ως αγωγοί, επιτρέποντας τις σειριακές και παράλληλες συνδέσεις που είναι απαραίτητες για την επίτευξη των επιθυμητών διαμορφώσεων τάσης και χωρητικότητας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την ηλεκτρική αντίσταση.

2.1.3 Ράβδοι Διακλάδωσης (Busbars)

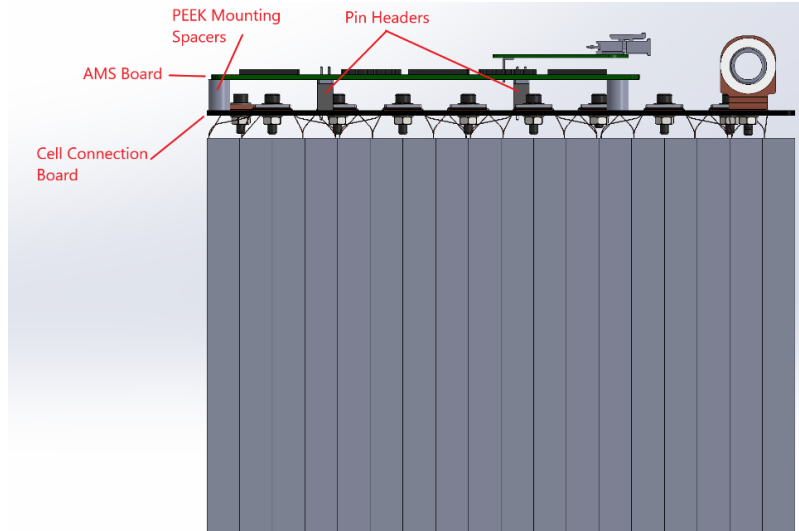
Οι ράβδοι διακλάδωσης στο δοχείο συσσωρευτών χρησιμεύουν ως ισχυρές αγώγιμες διαδρομές που διανέμουν αποτελεσματικά την ηλεκτρική ισχύ μεταξύ των κυψελών της μπαταρίας. Συνήθως κατασκευασμένες από ιδιαίτερα αγώγιμα υλικά όπως χαλκό ή αλουμίνιο, αυτές οι ράβδοι συνδέουν μεταξύ τους συστάδες κυψελών μέσα στη συστοιχία μπαταριών. Ο πρωταρχικός τους ρόλος είναι να διαχειρίζονται την υψηλή ροή ρεύματος μεταξύ αυτών των στοιχείων, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή και ελαχιστοποιώντας την ηλεκτρική αντίσταση. Οι ράβδοι διακλάδωσης συμβάλλουν επίσης στη δομική ακεραιότητα του δοχείου συσσωρευτή, συχνά ενσωματωμένες στο σχεδιασμό για να παρέχουν τόσο ηλεκτρική συνδεσιμότητα όσο και μηχανική υποστήριξη. Η στρατηγική τοποθέτηση και ο σχεδιασμός τους παίζουν καθοριστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης και ασφάλειας του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης, καθώς επιτρέπουν την αποτελεσματική μεταφορά ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα ένα ασφαλές και αξιόπιστο ηλεκτρικό δίκτυο.



Εικόνα 7: Σύνδεση γλωττίδων κελιών μπαταριών και ράβδου διακλάδωσης

2.1.4 Πλακέτα Σύνδεσης Γλωττίδων

Η πλακέτα σύνδεσης γλωττίδων στο δοχείο συσσωρευτών χρησιμεύει ως κρίσιμη ενδιάμεση διεπαφή μεταξύ των κελιών και του συνολικού ηλεκτρικού συστήματος. Αυτή η εξειδικευμένη πλακέτα διαθέτει μια διάταξη συνδέσμων, συνήθως σχεδιασμένη με γνώμονα την ακρίβεια και την αξιοπιστία, διευκολύνοντας τις ασφαλείς και αποτελεσματικές συνδέσεις μεταξύ των μεμονωμένων γλωττίδων των κελιών ή των ράβδων μεταφοράς. Ο ρόλος της είναι να διασφαλίζει τη σωστή ευθυγράμμιση και επαφή μεταξύ των γλωττίδων κάθε κελιού, δημιουργώντας σειριακές και παράλληλες συνδέσεις σύμφωνα με την επιθυμητή διαμόρφωση της μπαταρίας. Ο ακριβής σχεδιασμός και η υλοποίηση αυτής της πλακέτας είναι απαραίτητες για τη διατήρηση ηλεκτρικών διαδρομών χαμηλής αντίστασης, βελτιστοποιώντας την απόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος μπαταρίας εντός του Formula Student Car.



Εικόνα 8: Πλαϊνή όψη μιας συστάδας (segment) κελιών μπαταριών.

2.1.5 Μετατροπέας Ρεύματος DC-DC

Ο μετατροπέας DC-DC παίζει καθοριστικό ρόλο στο δοχείο συσσωρευτών ενός Formula Student Car, καθώς αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη διαχείριση και ρύθμιση των επιπέδων τάσης στο ηλεκτρικό σύστημα. Η κύρια λειτουργία του περιλαμβάνει τη μετατροπή της υψηλής τάσης εξόδου από τη συστοιχία μπαταριών σε χαμηλότερα, πιο εύχρηστα επίπεδα τάσης που απαιτούνται από διάφορα συστήματα επί του οχήματος, όπως τα συστήματα ελέγχου του οχήματος, οι αισθητήρες και τα βοηθητικά εξαρτήματα. Αυτός ο μετατροπέας εξασφαλίζει σταθερή και συνεπή παροχή ισχύος σε αυτά τα υποσυστήματα, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της τάσης της μπαταρίας λόγω εκφόρτισης ή αλλαγών στο φορτίο. Η

αποδοτικότητα και η αξιοπιστία του στη διατήρηση των βέλτιστων επιπέδων τάσης συμβάλλουν σημαντικά στη συνολική απόδοση, λειτουργικότητα και ασφάλεια του μονοθεσίου, επιτρέποντας την ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών εξαρτημάτων και συστημάτων καθ' όλη τη διάρκεια των απαιτητικών αγωνιστικών σεναρίων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η πλακέτα VICOR DCM3414x50M13C2yzz.



Εικόνα 9: Μετατροπέας ρεύματος DC-DC VICOR DCM3414x50M13C2yzz

2.1.6 Πλακέτα AMS

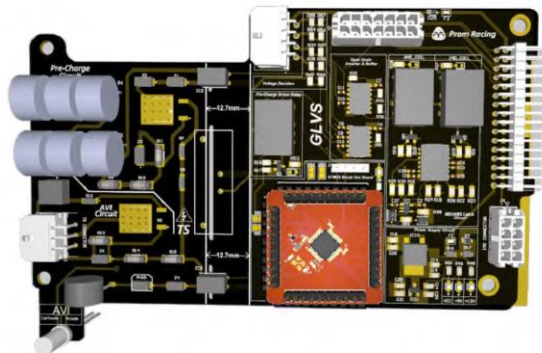
Η πλακέτα AMS (Accumulator Management System) μέσα στο δοχείο συσσωρευτών ενός Formula Student Car χρησιμεύει ως το έξυπνο κέντρο ελέγχου για την παρακολούθηση και τη διαχείριση μιας συστάδας μπαταριών. Αυτή η εξειδικευμένη ηλεκτρονική πλακέτα είναι εξοπλισμένη με αισθητήρες, κυκλώματα παρακολούθησης και χαρακτηριστικά ασφαλείας που έχουν σχεδιαστεί για να επιβλέπουν κρίσιμες παραμέτρους όπως η τάση, το ρεύμα, η θερμοκρασία και η εξισορρόπηση των κελιών εντός του συσσωρευτή. Ο ρόλος της είναι πολύπλευρος: διασφαλίζει την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία του συσσωρευτή συλλέγοντας συνεχώς δεδομένα και λαμβάνοντας αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο για την προστασία από υπερφόρτιση, υπερεκφόρτιση, υπερθέρμανση ή οποιοσδήποτε δυνητικά επικίνδυνες συνθήκες. Η πλακέτα AMS παίζει καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της μακροζωίας, της απόδοσης και, κυρίως, της ασφάλειας του συστήματος συσσωρευτών, συμβάλλοντας σημαντικά στη συνολική αξιοπιστία και ανταγωνιστικότητα του ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης.



Εικόνα 10: Πλακέτα AMS

2.1.7 Πλακέτα Συσσωρευτή

Η πλακέτα συσσωρευτή χρησιμεύει ως κεντρική μονάδα ελέγχου και παρακολούθησης για ολόκληρο το σύστημα μπαταριών. Αυτή η εξειδικευμένη πλακέτα ενσωματώνει διάφορες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης της τάσης, της εξισορρόπησης των κελιών και των χαρακτηριστικών ασφαλείας που είναι ζωτικής σημασίας για τη σωστή διαχείριση της συστοιχίας μπαταριών. Ο ρόλος της περιλαμβάνει την εποπτεία της κατάστασης φόρτισης των μεμονωμένων κελιών ή μονάδων, τη διασφάλιση της λειτουργίας τους εντός των ασφαλών ορίων τάσης και θερμοκρασίας και την εξισορρόπηση των ενεργειακών επιπέδων τους για τη διατήρηση της ομοιομορφίας σε όλο το πακέτο. Επιπλέον, η πλακέτα συσσωρευτή συχνά ενσωματώνει διεπαφές επικοινωνίας για τη διαβίβαση κρίσιμων δεδομένων στα συστήματα ελέγχου του οχήματος, επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την ταχεία αντίδραση σε τυχόν προβλήματα.



Εικόνα 11: Πλακέτα συσσωρευτή

2.1.8 Πλακέτα IMD

Η πλακέτα IMD (Insulation Monitoring Device) παίζει κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας και της ακεραιότητας του ηλεκτρικού συστήματος εντός του δοχείου συσσωρευτών ενός Formula Student Car. Αυτή η εξειδικευμένη πλακέτα παρακολουθεί συνεχώς την αντίσταση μόνωσης μεταξύ των εξαρτημάτων υψηλής τάσης και του πλαισίου ή της γείωσης. Η κύρια λειτουργία της είναι να ανιχνεύει τυχόν σφάλματα ή διαρροές μόνωσης που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ηλεκτρικά βραχυκυκλώματα ή επικίνδυνες καταστάσεις. Με τη συνεχή αξιολόγηση των επιπέδων μόνωσης, η πλακέτα IMD μπορεί να εντοπίσει γρήγορα πιθανά σφάλματα, ενεργοποιώντας τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας ή απομονώνοντας τα επηρεαζόμενα τμήματα για την αποφυγή κινδύνων ασφαλείας.



Εικόνα 12: Πλακέτα IMD

2.1.9 Αισθητήρας Ρεύματος

Ο αισθητήρας ρεύματος χρησιμεύει για την ακριβή μέτρηση και παρακολούθηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος εντός του συστήματος. Αυτός ο εξειδικευμένος αισθητήρας έχει σχεδιαστεί για να ανιχνεύει και να ποσοτικοποιεί την ποσότητα του ρεύματος που διέρχεται από συγκεκριμένα σημεία του κυκλώματος. Ο πρωταρχικός του ρόλος περιστρέφεται γύρω από την παροχή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τα επίπεδα ρεύματος, επιτρέποντας στα συστήματα ελέγχου του οχήματος να διαχειρίζονται με ακρίβεια τη διανομή ισχύος, να παρακολουθούν τη ροή ενέργειας και να διασφαλίζουν ότι το σύστημα λειτουργεί εντός ασφαλών ορίων λειτουργίας. Με τη συνεχή παρακολούθηση του ρεύματος, ο αισθητήρας παίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της απόδοσης, της αποδοτικότητας και της ασφάλειας, διευκολύνοντας τον αποτελεσματικό έλεγχο και τη διαχείριση της χρήσης ενέργειας κατά τη διάρκεια απαιτητικών αγωνιστικών συνθηκών.



Εικόνα 13: Αισθητήρας ρεύματος

2.1.10 AIR (Positive & Negative)

Στο πλαίσιο των δοχείων συσσωρευτών, το AIR σημαίνει Accumulator Insulation Resistance (αντίσταση μόνωσης συσσωρευτή), που περιλαμβάνει τόσο την αρνητική όσο και τη θετική αντίσταση μόνωσης. Αυτή η παράμετρος μετρά την ακεραιότητα της μόνωσης μεταξύ των στοιχείων υψηλής τάσης στο σύστημα μπαταρίας και του πλαισίου ή της γείωσης. Η αρνητική αντίσταση μόνωσης είναι η μέτρηση μεταξύ των στοιχείων υψηλής τάσης και του πλαισίου ή της γείωσης, ενώ η θετική αντίσταση μόνωσης δείχνει την αντίσταση μεταξύ των ίδιων των στοιχείων υψηλής τάσης. Η διατήρηση επαρκών επιπέδων αντίστασης μόνωσης είναι ζωτικής σημασίας, καθώς διασφαλίζει την ασφάλεια και την αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος, συμβάλλοντας στην αποφυγή ηλεκτρικών διαρροών ή σφαλμάτων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε βραχυκυκλώματα ή επικίνδυνες καταστάσεις. Η τακτική παρακολούθηση τόσο των αρνητικών όσο και των θετικών τιμών AIR είναι απαραίτητη για την έγκαιρη ανίχνευση πιθανών προβλημάτων μόνωσης, επιτρέποντας την άμεση λήψη διορθωτικών μέτρων και διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφαλείας στο απαιτητικό και υψηλών επιδόσεων περιβάλλον των αγώνων Formula Student.



Εικόνα 14: Αντίσταση μόνωσης συσσωρευτή

2.1.11 Συγκεντρωτικός Πίνακας Εξαρτημάτων

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν αναλυτικά τα κυριότερα εξαρτήματα που απαρτίζουν τον συσσωρευτή ενέργειας ενός ηλεκτρικού μονοθεσίου. Ωστόσο, για λόγους πληρότητας ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας όλων των εξαρτημάτων που συνθέτουν το εν λόγω σύστημα.

Accumulator
Battery Cells
HV Fuse
BMS Master
LV Signal Connector PCB
Accumulator Board
IMD Board
Negative AIR
Positive AIR
HV Connector Receptacle
Busbar (Maintenance Plug - Fuse)
Busbar (Fuse - AIR)
HV Wires
DC-DC Converter
Busbar (Maintenance Plug - Current Sensor)

Busbar (Current Sensor - AIR Busbar)
AIR Attachment Upper Top Hat
AIR Attachment Lower Top Hat
Current Sensor Mounting
Current Sensor
Positive DC Choke
Negative DC Choke
LV Fuse Holder
LV System Fuse
LV Supply Connector
Accumulator & IMD Board Mounts
BMS Master Mounts
Maintenance Plug Receptacle
Segment Mount
AMS Board
Tabs
Tab Aluminum Clamp Plate
Receptacle Spacer
Maintenance Plug Busbars
Can Bus Group Module
Group Module Spacer
Cells Connection Board
Maintenance Plug Power Pins
Maintenance Plug Insultion
Maintenance Plug Floating
Accumulator Container
Structual Foam
Fasteners

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικός πίνακας εξαρτημάτων συσσωρευτή ενέργειας

2.2 Γενικές Προδιαγραφές

Όπως έχει γίνει ήδη κατανοητό, η εφαρμογή την οποία μελετούμε είναι ικανά ορισμένη, έτσι ώστε ορισμένες γενικότερες σχεδιαστικές επιλογές να αποτελούν σχεδόν «μονόδρομο» έναντι άλλων. Όσο πιο κοντά πλησιάζουμε σε μία ρεαλιστική υλοποίηση, τόσο καθαρότερα φαίνονται και κάποιοι από τους φυσικούς περιορισμούς που ορίζουν τα σχεδιαστικά μας όρια, με αποτέλεσμα να μπορούμε να θέσουμε ήδη κάποιες αρκετά γενικές προδιαγραφές για τον κινητήρα μας.

2.2.1 Προδιαγραφές Διαχείρισης Θερμοκρασίας

Προτού ξεκινήσει η φάση της σχεδίασης και της προσέγγισης του προβλήματος είναι απαραίτητο να εντοπιστούν τα θερμικά κρίσιμα εξαρτήματα, δηλαδή τα πιο αδύναμα αντικείμενα για την διαχείριση της θερμοκρασίας, τα οποία θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστοχίες, θέτοντας σε κίνδυνο την αξιοπιστία και την ακεραιότητα του οχήματος.

Αρχικά, την μακροπρόθεσμη αστοχία συνθέτει η ανομοιόμορφη διαχείριση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του δοχείου συσσωρευτών, ιδιαίτερα των κελιών μπαταριών, και η στιγμιαία υπερθέρμανσή τους επηρεάζοντας την απόδοση του μονοθεσίου. Συνεπώς, η διατήρηση της κατάστασης υγείας της συστοιχίας των μπαταριών στα ορισμένα πλαίσια του κατασκευαστή είναι πρωταρχικός σκοπός. Συγκεκριμένα, για τα κελία Li-Po της Melasta SLPBB042126 το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας που ορίζονται από τον κατασκευαστή για την εύρυθμη λειτουργία τους εκτείνεται από τους -20°C έως τους 60°C , ορίζοντας κατά αυτόν τον τρόπο τα άνω και κάτω όρια των ψυκτικών αναγκών του συστήματος. Ιδιαίτερης σημασίας είναι το άνω όριο των 60°C , καθώς οι αγώνες Formula Student λαμβάνουν χώρα τους εαρινούς μήνες κάθε έτους, όπου η μέση τιμή της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος της Γερμανίας ανέρχεται στους 23°C , με βάση τα δεδομένα του έτους 2023.

Όσον αφορά την βραχυπρόθεσμη αστοχία του συστήματος, η υπερθέρμανση του μετατροπέα DC-DC αλλά και των υπόλοιπων πλακετών του συσσωρευτή ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ισχύος ή αποτυχία του συστήματος. Συγκεκριμένα, ο μετατροπέας DC-DC αποτελεί ένα από τα πιο κρίσιμα θερμικά εξαρτήματα του κουτιού μπαταριών, καθώς η πυκνότητα ισχύος του ανέρχεται στα 183 W/in^3 εντείνοντας την απαγωγή θερμότητας προς το περιβάλλον. Υπερθέρμανση του DC-DC συνεπάγεται μείωση της ισχύος εξόδου του ή διακοπή λειτουργίας του, προκαλώντας την απώλεια ηλεκτρικής ισχύος στα χαμηλής τάσης συστήματα του αυτοκινήτου όπως οι αισθητήρες, οι μονάδες ελέγχου και τα ηλεκτρονικά συστήματα. Σε κάθε περίπτωση η υπερθέρμανση μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον ίδιο τον μετατροπέα, οδηγώντας ενδεχομένως σε μειωμένη διάρκεια ζωής του εξαρτήματος. Ιδιαίτερα, ο μετατροπέας DC-DC VICOR DCM3414x50M13C2yzz που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη εφαρμογή, έχει εύρος λειτουργίας από -20°C έως 100°C .

2.2.2 Προδιαγραφές Χώρου

Όπως ορίζεται από τους επίσημους κανονισμούς του διαγωνισμού Formula Student, ο συσσωρευτής ενέργειας τοποθετείται εσωτερικά του αμαξώματος σε συγκεκριμένο τμήμα - χώρο του οχήματος, πλήρως μονωμένο, πίσω από την θέση του οδηγού. Ο χώρος αυτός καλύπτεται από πυρίμαχα τείχη προστασίας για την εξασφάλιση της ασφάλειας του οδηγού. Ο χώρος αυτός περιέχει και άλλα εξαρτήματα του μονοθεσίου όπως ο κινητήρας (σε κάποιες περιπτώσεις), ο inverter και το διαφορικό και συχνά αναφέρεται ως χώρος του κινητήρα (engine bay). Ο χώρος του κινητήρα διαθέτει κάποια ανοίγματα στο πίσω μέρος του αμαξώματος, πρωτίστως για την συντήρηση και την εκτέλεση εργασιών στον χώρο αλλά και διευκολύνοντας έτσι την διαχείριση των θερμοκρασιών. Ταυτόχρονα, προβλέπεται η ύπαρξη αντίστοιχων ανοιγμάτων στο μπροστινό μέρος του χώρου του κινητήρα για την χρήση αγωγών εισόδου αέρα για τις ανάγκες της ψύξης, με την προϋπόθεση ότι το τείχος προστασίας θα μονώνει και θα διαχωρίζει ξεκάθαρα το engine bay από την θέση του οδηγού. Είναι εύκολα αντιληπτό πως ο χώρος σχεδίασης του ψυκτικού συστήματος είναι αρκετά περιορισμένος και άμεσα εξαρτώμενος από τις υπόλοιπες σχεδιαστικές επιλογές των υπόλοιπων συστημάτων, περιορίζοντας έτσι τις γενικότερες επιλογές των σχεδιαστικών τύπων του συστήματος. Συνεπώς, δευτερεύων στόχος πέρα από την διασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος κατά την διαχείριση των θερμικών φορτίων είναι η ελαχιστοποίηση των διαστάσεων του συνολικού συστήματος.

2.2.3 Προδιαγραφές Βάρους

Η μείωση του βάρους στον μηχανοκίνητο αθλητισμό είναι μια κρίσιμη επιδίωξη που υπερβαίνει την απλή βελτίωση των επιδόσεων. Είναι μια επιστήμη και μια στρατηγική που καθορίζει το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Η μείωση του βάρους δεν έχει να κάνει μόνο με την ελάφρυνση του φορτίου, αλλά και με τη μεγιστοποίηση της ταχύτητας, της ευελιξίας και του χειρισμού. Κάθε γραμμάριο που αφαιρείται από μια αγωνιστική μηχανή μεταφράζεται σε ταχύτερη επιτάχυνση, βελτιωμένη στροφή και βελτιωμένη συνολική απόδοση. Οι μηχανικοί εντρυφούν σε έναν σχολαστικό κύκλο επιλογής υλικών, βελτιστοποίησης του σχεδιασμού και τεχνολογικής καινοτομίας για να μειώσουν το υπερβολικό βάρος χωρίς να διακυβεύσουν τη δομική ακεραιότητα ή την ασφάλεια.

Στο πνεύμα αυτό, χωρίς να τίθεται μια ξεκάθαρη προδιαγραφή αλλά ένας ακόμα σχεδιαστικός στόχος η ελαχιστοποίηση του βάρους κατά τον σχεδιασμό του συστήματος της ψύξης του συσσωρευτή ενέργειας, με την παράλληλη εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του είναι βαρύνουσας σημασίας. Πρόκειται για την συμμετοχή του μονοθεσίου σε έναν αγώνα επιδόσεων υψηλών ταχυτήτων με σκοπό την καταγραφή των χαμηλότερων χρόνων σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον. Συνεπώς στην τελική επιλογή του συστήματος ψύξης θα συνυπολογισθεί και το βάρος του.

2.2.4 Ηλεκτρικές Προδιαγραφές

Οι ηλεκτρικές προδιαγραφές του συστήματος της ψύξης απορρέουν, κυρίως, εξαιτίας της ανάγκης ενσωμάτωσης του σε ένα αγωνιστικό μονοθέσιο που ήδη έχει δοκιμαστεί και λειτουργεί με ένα δεδομένο σύστημα υψηλής και χαμηλής τάσης. Κρίνεται λοιπόν ζωτικής σημασίας, να σχεδιαστεί με γνώμονα την καλύτερη δυνατή ενσωμάτωση του στο υπάρχον ηλεκτρικό μονοθέσιο και τονίζεται ότι σε περίπτωση αλλαγής των παραπάνω υποσυστημάτων, θα πρέπει ανάλογα να προσαρμοστεί και ο σχεδιασμός του ψυκτικού συστήματος. Ο λόγος περί ηλεκτρικών προδιαγραφών γίνεται για πιθανή χρήση ανεμιστήρων, αντλιών ή άλλων ηλεκτρικών συσκευών που είναι πιθανό να χρησιμοποιηθούν μέσα σε ένα ψυκτικό σύστημα.

Αρχικά, η ισχύς που μπορεί να αποδώσει μία ηλεκτρική συσκευή εξαρτάται κυρίως από τρία βασικά χαρακτηριστικά, καθώς και από άλλα δευτερεύουσας σημασίας. Τα βασικά μεγέθη είναι η τάση λειτουργίας, το μέγιστο ρεύμα με το οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί και η συχνότητα λειτουργίας. Εφόσον η εφαρμογή μας πρόκειται να είναι ένα ηλεκτροκίνητο μονοθέσιο, ο συσσωρευτής ενέργειας καθορίζει τα όρια τάσης και συγκεκριμένα ο DC-DC μετατροπέας για τα βοηθητικά αυτά συστήματα ενώ τα όρια ρεύματος και την μέγιστη συχνότητα που μπορεί να διαμορφώσουν στην έξοδο τους, καθορίζει το εκάστοτε χειριστήριο (controller) των βοηθητικών συστημάτων. Συγκεκριμένα για τον μετατροπέα DC-DC VICOR DCM3414x50M13C2yzz η τάση εξόδου V_{out} ανέρχεται στα 12V (7.2 V - 13.2 V Trim). Επομένως, οι ηλεκτρικές συσκευές που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να έχουν την αντίστοιχη τάση εισόδου. Τέλος, είναι προφανές πως στόχος είναι η χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων ηλεκτρικών συσκευών μεγάλης ισχύος για τον περιορισμό της κατανάλωσης και την αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος.

2.2.5 Συγκεντρωτικός Πίνακας Προδιαγραφών

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας προδιαγραφών του συστήματος ψύξης του συσσωρευτή ενέργειας που εξήχθησαν παραπάνω.

Γενικές Προδιαγραφές	
Θερμικές Προδιαγραφές	
Μέγιστη Θερμοκρασία Κελιών	60°C
Μέγιστη Θερμοκρασία Μετατροπέα	100°C
Προδιαγραφές Χώρου	
Τοποθέτηση	Εσωτερικά του Engine Bay

Προδιαγραφές Βάρους	
Συνολικό Βάρος	Ελάχιστο
Ηλεκτρικές Προδιαγραφές	
Τάση Λειτουργίας Ψυκτικών Μέσων	12V
Κατανάλωση	Ελάχιστη

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικός πίνακας προδιαγραφών

2.3 Επιλογή Τύπου Συστήματος Ψύξης

Όπως αναλύθηκαν και παραπάνω, υπάρχουν τέσσερις κύριοι τρόποι ψύξης, καθένας από τους οποίους έχει παραλλαγές, ενώ ταυτόχρονα είναι εφικτός και ο συνδυασμός τους. Αυτοί είναι η ψύξη με αέρα (αερόψυξη / air-cooling), η υγρή ψύξη (liquid-cooling), η ψύξη άμεσης επέκτασης (Direct Expansion Cooling) και η χρήση υλικών αλλαγής φάσης (PCM). Με βάση τις προδιαγραφές που τέθηκαν και την χρήση της αφαιρετικής μεθόδου προέκυψε ο τύπος ψύξης που θα χρησιμοποιηθεί.

Αρχικά, γρήγορα απαλείφθηκαν η μέθοδος ψύξης άμεσης επέκτασης και η χρήση υλικών αλλαγής φάσης, καθώς η πρώτη, παρά την υψηλή απόδοση στην διαχείριση των θερμοκρασιών που παρουσιάζει, χρησιμοποιεί ψυκτικά μέσα πέραν του απιονισμένου νερού, γεγονός που αποκλείουν οι κανονισμοί των διαγωνισμών FSAE. Τα PCM επιτρέπουν αποτελεσματική διαχείριση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και χάρη στον συμπαγή σχεδιασμό τους προσφέρουν την δυνατότητα εύκολης ενσωμάτωσης στη δομή του οχήματος. Πάραυτα, έχουν περιορισμένη ικανότητα διαχείρισης υψηλών θερμικών φορτίων, ενώ ενδέχεται να απαιτούνται πρόσθετες μέθοδοι ψύξης για καταστάσεις υψηλής ζήτησης, γεγονός που δυσχεραίνει την επιλογή τους ως βασικό ψυκτικό μέσο σε ένα μονοθέσιο υψηλών επιδόσεων.

Αδιαμφισβήτητα, η υγρή ψύξη είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την απομάκρυνση της θερμότητας από τη συστοιχία μπαταριών. Είναι επίσης καλύτερη από την ενεργή αερόψυξη στη διατήρηση των μπαταριών εντός των βέλτιστων θερμοκρασιών λειτουργίας. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη η πιθανότητα διαρροής υγρού, διότι μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα, μέχρι και οριστική βλάβη του συσσωρευτή ενέργειας. Επίσης, τα συστήματα υγρής ψύξης είναι γενικά βαρύτερα, ακριβότερα και πιο περίπλοκα στην επισκευή. Ακόμη, έχουν μεγαλύτερες (συνήθως) απαιτήσεις ισχύος από τα αντίστοιχα αερόψυκτα συστήματα καθώς επιβάλλουν την χρήση και αντλιών και

ανεμιστήρων. Για τους λόγους αυτούς η μέθοδος της ψύξης με αέρα αποτέλεσε μονόδρομο στην σχεδιαστική πορεία.

Συνολικά, λοιπόν, αποφασίστηκε η χρήση της μεθόδου ψύξης με αέρα και ιδιαίτερα η ενεργή αερόψυξη, αποτελούμενη από αγωγούς εισόδου, υπεύθυνους για την παροχή αέρα στο εσωτερικό του δοχείου συσσωρευτών, και από ανεμιστήρες, υπεύθυνους για την διακίνηση του παρεχόμενου αέρα στην συστοιχία των κελιών μπαταριών και έπειτα την απομάκρυνσή του από το εσωτερικό του συσσωρευτή στο περιβάλλον. Ο αριθμός των ψυκτικών συσκευών που θα χρησιμοποιηθούν, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και η τοπολογία τους θα παρουσιαστούν αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας.

3. Αρχές Σχεδίασης Συστημάτων Ψύξης

3.1 Μέθοδος Ψύξης με Εξαναγκασμένο Αέρα

Η μεταφορά θερμότητας με εξαναγκασμένη συναγωγή γενικά απαιτεί τη χρήση ανεμιστήρα, φυσητήρα ή αντλίας για την παροχή ρευστού (αέρα ή υγρού) υψηλής ταχύτητας σε μια θερμαινόμενη επιφάνεια. Η υψηλή ταχύτητα του ρευστού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμικής αντίστασης στο οριακό στρώμα από το ρευστό στη θερμαινόμενη επιφάνεια. Το γεγονός αυτό, με τη σειρά του, αυξάνει την ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται από το ρευστό.

Τα συστήματα εξαναγκασμένου αέρα μπορούν να παρέχουν ποσοστά μεταφοράς θερμότητας σε ηλεκτρονικά συστήματα που είναι 10 φορές μεγαλύτερα από εκείνα που είναι διαθέσιμα με φυσική συναγωγή και ακτινοβολία. Η ποινή για την αυξημένη ψύξη είναι αυξημένο κόστος, ισχύς, θόρυβος και πολυπλοκότητα. Δεδομένου ότι ένα απλό σύστημα είναι γενικά ένα πιο αξιόπιστο σύστημα, θα πρέπει να χρησιμοποιείται, όπου είναι δυνατόν, η μεταφορά θερμότητας με φυσική συναγωγή και ακτινοβολία.

Τα οφέλη των τεχνικών ψύξης με εξαναγκασμένη συναγωγή είναι γενικά μειωμένο μέγεθος για τα αερόψυκτα συστήματα και υψηλότερες πυκνότητες εξαρτημάτων, με χαμηλότερες θερμοκρασίες κρίσιμων σημείων. Αυτό αυξάνει την αξιοπιστία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, αλλά απαιτεί πρόσθετη συντήρηση για τους επιπλέον ανεμιστήρες ή αντλίες.

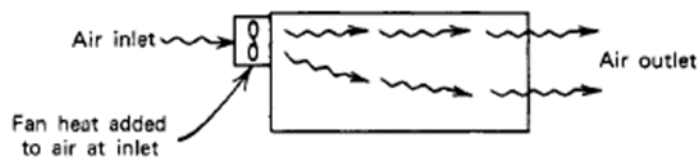
Συνθήκες στρωτής ροής καθώς και συνθήκες τυρβώδους ροής μπορούν να υπάρξουν στην εξαναγκασμένη συναγωγή με αέρα. Οι συνθήκες τυρβώδους ροής είναι πολύ πιο επιθυμητές, επειδή επιτρέπουν την απομάκρυνση περισσότερης θερμότητας. Ωστόσο, η τυρβώδης ροή οδηγεί συνήθως σε υψηλότερη πτώση πίεσης στο σύστημα, η οποία απαιτεί μεγαλύτερες αντλίες και ανεμιστήρες με μεγαλύτερη ισχύ για να ξεπεραστεί η πρόσθετη αντίσταση.

3.2 Κατεύθυνση Ροής για Ανεμιστήρες

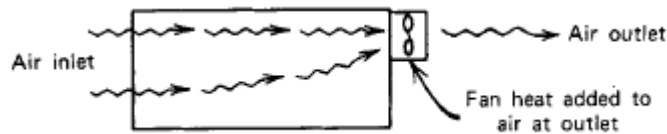
Όταν ένας ανεμιστήρας χρησιμοποιείται για την ψύξη ηλεκτρονικού εξοπλισμού, η κατεύθυνση της ροής του αέρα μπορεί να είναι αρκετά σημαντική. Ο ανεμιστήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τραβήξει αέρα μέσα από ένα κουτί ή για να φυσήσει αέρα μέσα από ένα κουτί. Ένα σύστημα ανεμιστήρα εμφύσησης θα αυξήσει την εσωτερική πίεση του αέρα μέσα στο κουτί, γεγονός που θα βοηθήσει να κρατήσει τη σκόνη και τη βρωμιά έξω από ένα κουτί που δεν είναι καλά σφραγισμένο. Ένα σύστημα εμφύσησης θα παράγει επίσης ελαφρώς μεγαλύτερη τύρβη, η οποία θα βελτιώσει τα χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό του κιβωτίου. Ωστόσο, όταν ένας ανεμιστήρας αξονικής ροής χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα εμφύσησης, ο αέρας μπορεί να αναγκαστεί να περάσει

πάνω από τον καυτό κινητήρα του ανεμιστήρα, ο οποίος θα τείνει να θερμαίνει τον αέρα καθώς εισέρχεται στο ηλεκτρονικό κουτί.

Ένα σύστημα ανεμιστήρα εξαγωγής, το οποίο αντλεί αέρα μέσω ενός ηλεκτρονικού κιβωτίου, θα μειώσει την εσωτερική πίεση του αέρα μέσα στο κουτί. Εάν το κουτί βρίσκεται σε σκονισμένο ή βρώμικο χώρο, η σκόνη και η βρωμιά θα τραβηχτούν μέσα στο κουτί εάν το κουτί δεν είναι σφραγισμένο. Σε ένα σύστημα εξαγωγής, ο αέρας ψύξης περνάει μέσα από ένα ανεμιστήρα αξονικής ροής καθώς ο αέρας εξέρχεται από το κιβώτιο. Ο ψυκτικός αέρας που εισέρχεται στο ηλεκτρονικό κιβώτιο είναι επομένως πιο ψυχρός.



Σχήμα 2: Ανεμιστήρας αξονικής ροής παρέχει αέρα στο κουτί

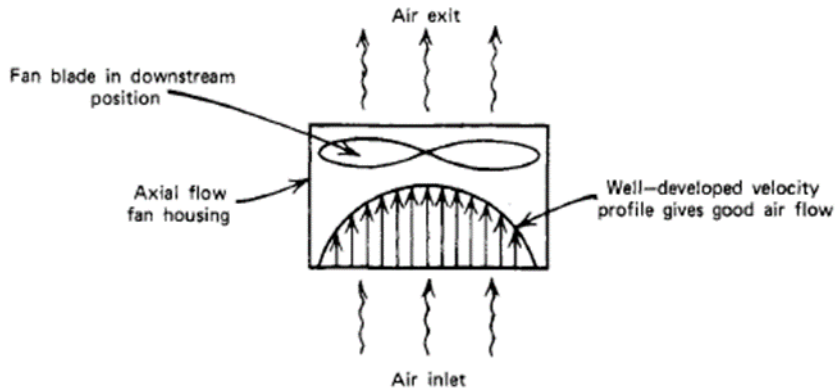


Σχήμα 3: Ανεμιστήρας αξονικής ροής εξάγει αέρα από το κουτί

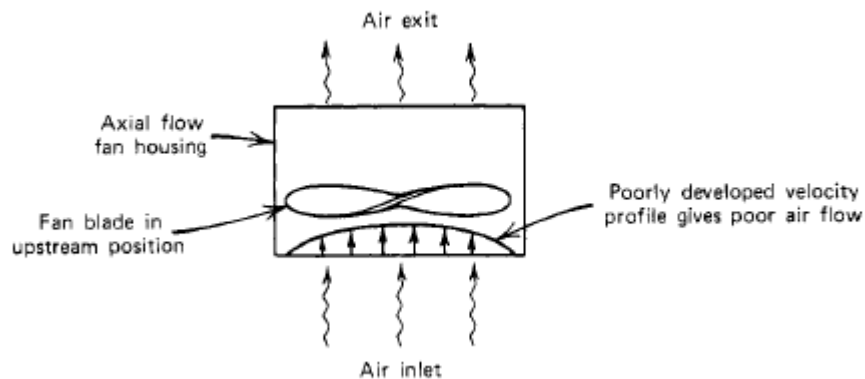
Η θέση της πτερωτής του ανεμιστήρα εντός του περιβλήματος ενός ανεμιστήρα αξονικής ροής μπορεί να είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τον καθορισμό της απόδοσης ενός ανεμιστήρα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε ανεμιστήρες υψηλής ταχύτητας που έχουν ταχύτητες μεγαλύτερες από περίπου 8000 στροφές ανά λεπτό.

Η εξέταση των περισσότερων ανεμιστήρων αξονικής ροής υψηλής ταχύτητας θα δείξει ότι η πτερωτή του ανεμιστήρα δεν βρίσκεται στο κέντρο του σωληνοειδούς περιβλήματος αλλά κοντά στο ένα άκρο. Όταν ο ανεμιστήρας βρίσκεται δίπλα σε μια περιορισμένη περιοχή, όπως μια στροφή 90 μοιρών, η πτερωτή πρέπει να τοποθετείται έτσι ώστε να βρίσκεται στο κατάντη άκρο του περιβλήματος, για την καλύτερη απόδοση. Ο αέρας έχει βάρος και κινητική ενέργεια, οπότε η ταχύτητα του αέρα πρέπει να μπορεί να αναπτυχθεί για να ξεπεραστεί αποτελεσματικά η αντίσταση της ροής. Όταν η πτερωτή βρίσκεται στο κατάντη άκρο του περιβλήματος του ανεμιστήρα, ο αέρας έχει ελαφρώς μεγαλύτερη διαδρομή ροής. Αυτό βελτιώνει το προφίλ ταχύτητας. Δεν έχει καμία διαφορά αν

χρησιμοποιείται σύστημα ανεμιστήρα εμφύσησης ή εξαερισμού. Το προφίλ της ταχύτητας πρέπει να έχει την ευκαιρία να αναπτυχθεί για να παρέχει ένα αποτελεσματικό σύστημα παροχής αέρα.

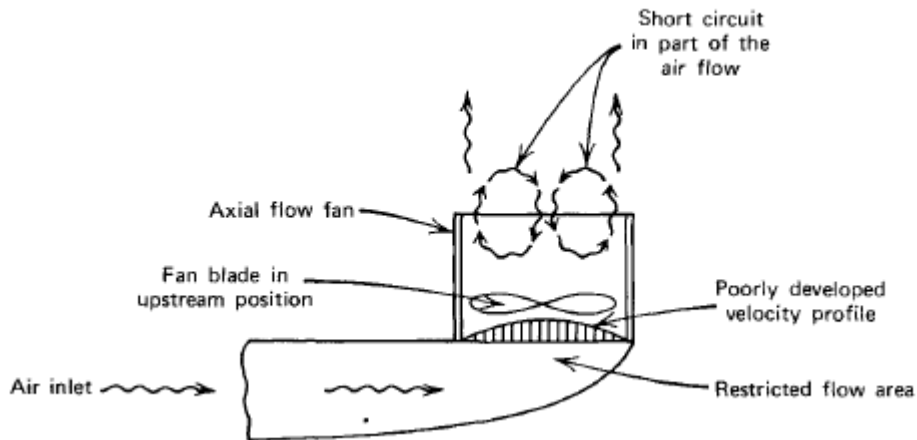


Σχήμα 4: Καλά διαμορφωμένο προφίλ ταχύτητας ανεμιστήρα αξονικής ροής



Σχήμα 5: Ανεπαρκώς διαμορφωμένο προφίλ ταχύτητας ανεμιστήρα αξονικής ροής

Πειραματικά δεδομένα σε αυτούς τους τύπους εγκαταστάσεων έχουν δείξει ότι η παροχή αέρα ψύξης μπορεί να υπερδιπλασιαστεί αποκλειστικά και μόνο με τον κατάλληλο προσανατολισμό της θέσης της πτερωτής του ανεμιστήρα εντός του περιβλήματός του, όταν ο ανεμιστήρας βρίσκεται δίπλα σε μια περιοχή που περιορίζει την ελεύθερη ανάπτυξη της ροής.



Σχήμα 6: Περιορισμός ελεύθερης ανάπτυξης ροής λόγω τοποθεσίας του ανεμιστήρα

3.3 Στατική και Δυναμική Πίεση

Η ροή του αέρα μέσα από ένα ηλεκτρονικό κουτί οφείλεται σε μια διαφορά πίεσης μεταξύ δύο σημείων, με τον αέρα να ρέει από την περιοχή υψηλής πίεσης προς την περιοχή χαμηλής πίεσης. Η ροή του αέρα θα έχει ως αποτέλεσμα μια στατική πίεση και μια δυναμική πίεση.

Η στατική πίεση είναι η πίεση που ασκείται στα τοιχώματα του δοχείου ή του ηλεκτρονικού κουτιού, ακόμη και όταν δεν υπάρχει ροή αέρα, δηλαδή είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα του αέρα. Η στατική πίεση μπορεί να είναι θετική ή αρνητική, ανάλογα με το αν είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την εξωτερική πίεση περιβάλλοντος.

Η δυναμική πίεση είναι η πίεση που αναγκάζει τον αέρα να κινηθεί μέσω του ηλεκτρονικού κουτιού με ορισμένη ταχύτητα. Η δυναμική πίεση εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα και δρα πάντα προς την κατεύθυνση της ροής του αέρα.

Η ποσότητα του αέρα ψύξης που ρέει μέσα από ένα ηλεκτρονικό κουτί θα καθορίσει συνήθως την ποσότητα θερμότητας που απομακρύνεται από αυτό. Εάν περισσότερος αέρας ρέει μέσα από το κουτί, θα απομακρυνθεί περισσότερη θερμότητα. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η ροή του αέρα, απαιτείται ακόμη μεγαλύτερη πίεση για να εξαναγκαστεί ο αέρας να περάσει.

Οι στατικές πιέσεις και οι δυναμικές πιέσεις μπορούν να εκφραστούν σε g/cm^2 . Ωστόσο, αυτές οι τιμές είναι συνήθως πολύ μικρές, έτσι είναι συχνά πιο βολικό να εκφράζονται σε μέτρα στήλης ύδατος mSY. Η πίεση σε μέτρα στήλης ύδατος mSY ονομάζεται "ύψος" και εμφανίζεται ως H_s , για το στατικό ύψος και ως H_v , για το δυναμικό ύψος.

Το δυναμικό ύψος (H_v) είναι μια βολική αναφορά που χρησιμοποιείται συχνά για τον προσδιορισμό της πτώσης πίεσης κατά μήκος ηλεκτρονικών κουτιών. Το δυναμικό ύψος μπορεί να συσχετιστεί με την ταχύτητα ροής του αέρα με τη χρήση της εξίσωσης:

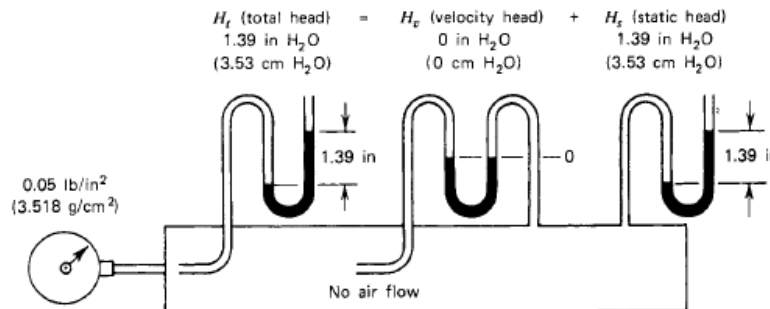
$$V = \sqrt{2gH} \quad \text{(Εξίσωση 1)}$$

Όπου: V = ταχύτητα = m/sec

g = επιτάχυνση της βαρύτητας = m/sec²

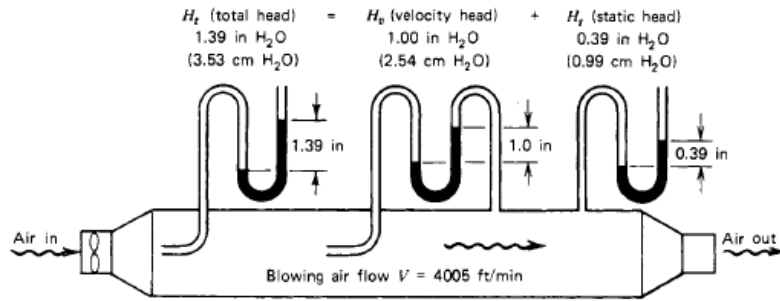
H = ύψος = m

Ένα σφραγισμένο ηλεκτρονικό κουτί με πίεση μανομέτρου 3.518 g/cm² χωρίς παροχή αέρα θα έχει πίεση ίση με τη στατική πίεση. Εάν διανοιχθούν μικρές οπές στους τοίχους και αν χρησιμοποιηθούν μανόμετρα γεμάτα με νερό για τη μέτρηση των διαφόρων υψών πίεσης, τα αποτελέσματα θα εμφανιστούν όπως φαίνεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7: Σφραγισμένο ηλεκτρονικό κουτί χωρίς παροχή αέρα

Όταν ένας ανεμιστήρας διοχετεύει αέρα μέσω του ηλεκτρονικού κιβωτίου, η πίεση εντός του κιβωτίου θα είναι ελαφρώς υψηλότερη από την εξωτερική πίεση του αέρα. Ένα δυναμικό ύψος θα αναπτυχθεί σε αυτήν την περίπτωση όπως φαίνεται στο σχήμα 8.

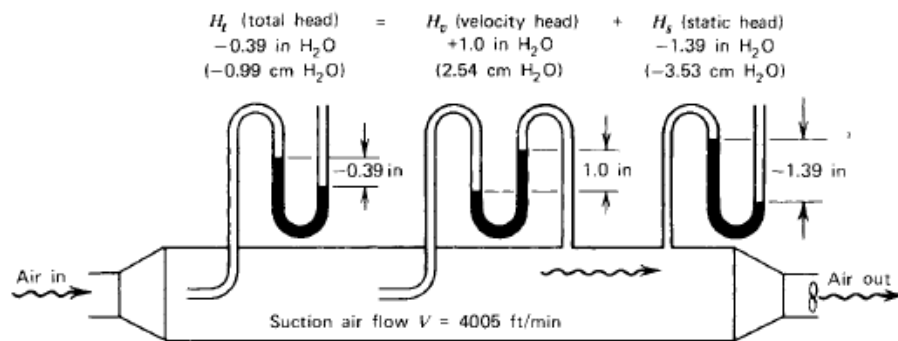


Σχήμα 8: Δυναμικά ύψη πίεσης όταν ο ανεμιστήρας παρέχει ροή στο κουτί

Το συνολικό ύψος θα είναι το άθροισμα του δυναμικού ύψους και του στατικού ύψους, όπως φαίνεται από την εξίσωση:

$$H_t = H_v + H_s \quad \text{(Εξίσωση 2)}$$

Όταν χρησιμοποιείται ανεμιστήρας εξαγωγής και ο αέρας αναρροφάται διαμέσου του κιβωτίου, η πίεση εντός του κιβωτίου θα είναι ελαφρώς χαμηλότερη από την εξωτερική πίεση του αέρα και τα χαρακτηριστικά ύψη θα εμφανίζονται όπως φαίνεται στο σχήμα 9. Το συνολικό ύψος εξακολουθεί να εκφράζεται από την παραπάνω εξίσωση 2.



Σχήμα 9: Δυναμικά ύψη πίεσης όταν ο ανεμιστήρας εξάγει ροή από το κουτί

3.4 Απώλειες Εκφρασμένες σαν Δυναμικά Ύψη

Καθώς ο αέρας ψύξης ρέει μέσα στο ηλεκτρονικό κουτί, θα αντιμετωπίσει τριβές και δυναμικές απώλειες. Υπάρχουν πολλοί τρόποι έκφρασης αυτών των απωλειών. Μία βολική μέθοδος είναι η έκφραση των απωλειών στατικής πίεσης ως προς το δυναμικό ύψος για τον αέρα σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο. Για παράδειγμα, θα υπάρχουν απώλειες τριβής και δυναμικές απώλειες στις εισόδους των ανεμιστήρων. Αυτές οι απώλειες μπορούν να εκφραστούν ως κάποιος λόγος του δυναμικού ύψους στην είσοδο του ανεμιστήρα. Εάν οι απώλειες κριθούν ότι είναι ίσες με ένα δυναμικό ύψος, ή ίσως με δύο δυναμικά ύψη για μια περιορισμένη περιοχή της ροής, η παρακάτω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της πραγματικής απώλειας πίεσης σε mSY, με βάση την ταχύτητα της ροής του αέρα σε αυτό το τμήμα.

$$V = 1277 \sqrt{H_v} = \frac{m}{sec} \quad \text{(Εξίσωση 3)}$$

Οι απώλειες σε μια γωνία 90 μοιρών μπορούν να εκφραστούν ως κάποιος λόγος του δυναμικού ύψους σε αυτήν την γωνία, το οποίο σχετίζεται με την ταχύτητα του αέρα. Οι απώλειες σε μια ξαφνική διαστολή εκφράζονται ως λόγος του δυναμικού ύψους λίγο πριν από την διαστολή. Μια τυπική ξαφνική διαστολή θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ενός δυναμικού ύψους, επειδή η ταχύτητα του αέρα στη διαστολή μειώνεται απότομα. Το μεγαλύτερο μέρος της της ενέργειας που απαιτείται για την επίτευξη αυτής της ταχύτητας στο σημείο ακριβώς πριν από τη διαστολή χάνεται. Η ενέργεια αυτή αρχικά παρεχόταν από τον ανεμιστήρα. Εάν χαθεί περισσότερη ενέργεια, ένας μεγαλύτερος ανεμιστήρας απαιτείται για την παροχή αυτής της ενέργειας. Εάν οι απώλειες σε ένα σύστημα ροής μπορούν να μειωθούν, αποφεύγοντας πράγματα όπως απότομες στροφές και ξαφνικές διαστολές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μικρότερος ανεμιστήρας.

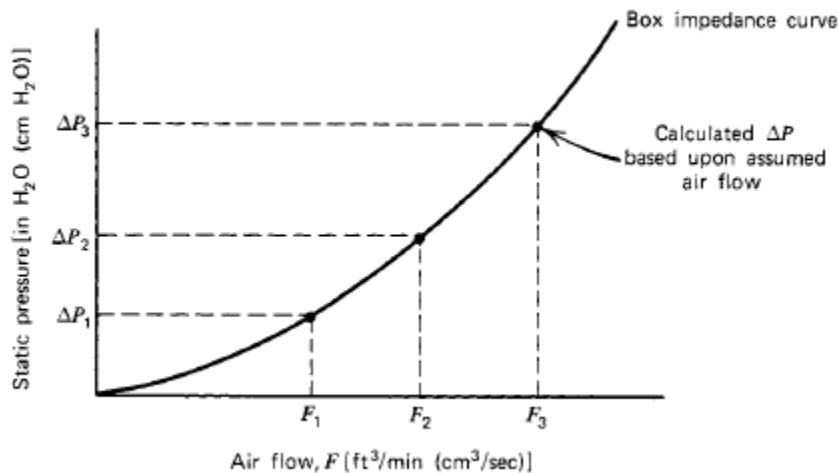
Οι ταχύτητες του αέρα πρέπει να διατηρούνται χαμηλές για να αποφεύγονται μεγάλες απώλειες. Οι υψηλές ταχύτητες αέρα έχουν ως αποτέλεσμα υψηλές απώλειες. Ένα σύστημα με υψηλές απώλειες απαιτεί έναν ανεμιστήρα ή φυσητήρα που μπορεί να παρέχει τον απαιτούμενο αέρα ψύξης σε υψηλότερη πίεση. Αυτό έχει συνήθως ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο και βαρύτερο ανεμιστήρα ή φυσητήρα, με μεγαλύτερες απαιτήσεις ισχύος και υψηλότερο κόστος.

3.5 Καθορισμός Καμπύλης Αντίστασης Ροής για Ηλεκτρονικά Κουτιά

Τα ηλεκτρονικά κουτιά που ψύχονται με τη χρήση ανεμιστήρων πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά, για να διασφαλιστεί ότι ο ανεμιστήρας θα παρέχει την κατάλληλη παροχή ψυκτικού αέρα. Εάν ο ανεμιστήρας είναι πολύ μικρός για το κουτί, το

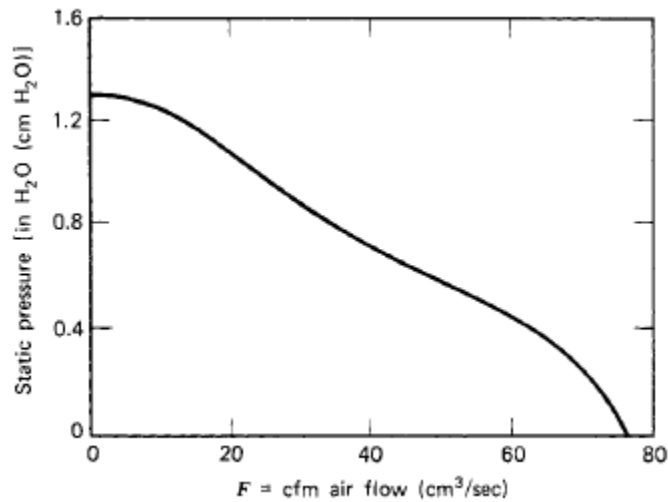
ηλεκτρονικό σύστημα μπορεί να υπερθερμανθεί και να αποτύχει. Εάν ο ανεμιστήρας είναι πολύ μεγάλος για το κουτί, η ψύξη θα είναι επαρκής, αλλά ο μεγαλύτερος ανεμιστήρας θα είναι ακριβότερος, βαρύτερος, και θα καταναλώνει περισσότερη ενέργεια.

Ο αέρας που ρέει μέσω του ηλεκτρονικού κουτιού θα συναντήσει αντίσταση καθώς εισέρχεται σε διαφορετικούς θαλάμους και αναγκάζεται να κάνει πολλές στροφές. Αυτή η αντίσταση ροής είναι περίπου ανάλογη προς το τετράγωνο της ταχύτητας, έτσι ώστε να είναι περίπου ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας ροής σε κυβικά πόδια ανά λεπτό (cfm). Όταν η στατική πίεση της ροής του αέρα μέσα από ένα κουτί απεικονίζεται συναρτήσει της ροής του αέρα σε cfm το αποτέλεσμα θα είναι μια παραβολική καμπύλη. Η καμπύλη αυτή μπορεί να δημιουργηθεί θεωρώντας τις διάφορες αντιστάσεις ροής που θα συναντήσει ο κινούμενος αέρας. Η μέθοδος ανάλυσης είναι να υποθέσουμε διάφορους ρυθμούς ροής σε cfm και στη συνέχεια να υπολογιστεί μια στατική πτώση πίεσης κατά μήκος του κουτιού για κάθε ρυθμό ροής. Το αποτέλεσμα θα είναι μια καμπύλη παρόμοια με το σχήμα 10.



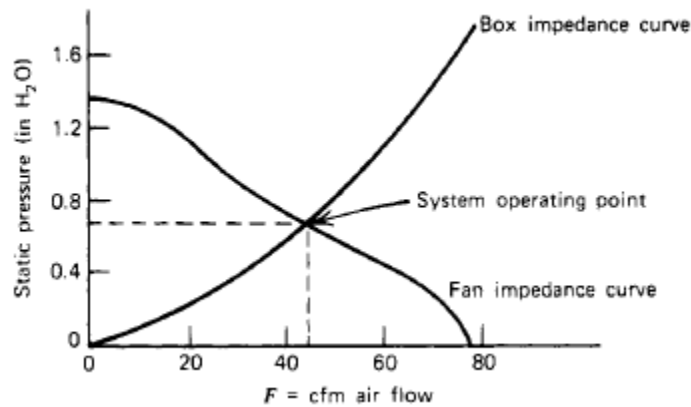
Σχήμα 10: Τυπική καμπύλη αντίστασης ροής για ηλεκτρονικά κουτιά

Αφού αναπτυχθεί η καμπύλη αντίστασης ροής του κουτιού, είναι απαραίτητο να εξεταστούν διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες ανεμιστήρων για να διαπιστωθεί πόσο καλά οι ανεμιστήρες θα ταιριάζουν με το κιβώτιο. Μια τυπική χαρακτηριστική καμπύλη ανεμιστήρα παρουσιάζεται στο σχήμα 11.



Σχήμα 11: Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη ανεμιστήρα

Εάν η καμπύλη σύνθετης αντίστασης για το κουτί τοποθετηθεί πάνω στην χαρακτηριστική καμπύλη του ανεμιστήρα, θα τέμνονται. Το σημείο τομής αντιπροσωπεύει το σημείο λειτουργίας του συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 12. Η μέθοδος ανάλυσης της πτώσης πίεσης που μόλις περιεγράφηκε μπορεί να αποδειχτεί θεωρώντας ένα τυπικό ηλεκτρονικό κουτί με ψύξη από ανεμιστήρα.



Σχήμα 12: Τομή καμπύλης αντίστασης ροής ηλεκτρονικού κουτιού και χαρακτηριστικής καμπύλης ανεμιστήρα

3.6 Ανεμιστήρες Ψύξης για Ηλεκτρονικό Εξοπλισμό

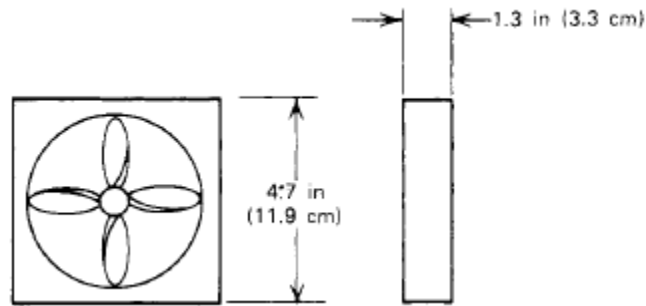
Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι ανεμιστήρων για την ψύξη ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Αυτοί μπορούν γενικά να χωριστούν σε τέσσερις κύριους τύπους: ελικοφόρος ανεμιστήρας, αξονικός ανεμιστήρας αγωγού, αξονικός ανεμιστήρας με ρυθμιστικά πτερύγια και φυγοκεντρικός ανεμιστήρας. Αυτοί οι ανεμιστήρες μπορεί να είναι μονοφασικοί, τριφασικοί, 60 κύκλων, 400 κύκλων, 800 κύκλων AC/DC, σταθερής ταχύτητας, μεταβλητής ταχύτητας και μεταβλητής παροχής από 1 cfm έως αρκετές χιλιάδες cfm.

Οι ελικοφόροι ανεμιστήρες μπορούν να ληφθούν σε μεγάλη ποικιλία μεγεθών, με διαφορετικά σχέδια πτερωτής και διατάξεις. Οι μεγάλοι ελικοφόροι ανεμιστήρες μπορεί να κινούνται με ιμάντα από ηλεκτρικό κινητήρα, ενώ οι μικροί ανεμιστήρες μπορεί να έχουν τον ελικοφόρο ανεμιστήρα συνδεδεμένο απευθείας με τον ηλεκτρικό κινητήρα. Αυτός ο τύπος ανεμιστήρα μπορεί κανονικά να παρέχει μια στατική πίεση περίπου 0,76 cmΣΥ σε 0 cfm, ή καμία παροχή. Οι ελικοφόροι ανεμιστήρες είναι κατάλληλοι για εργασίες που απαιτούν μεγάλες ποσότητες αέρα σε σχετικά χαμηλές στατικές πιέσεις.



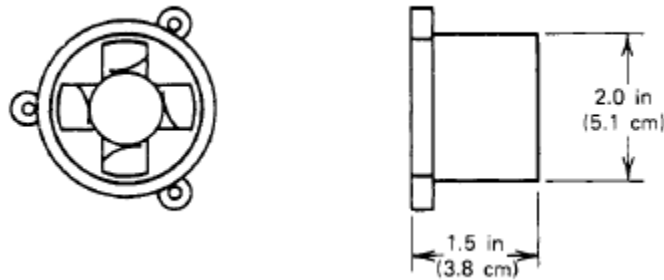
Σχήμα 13: Τυπικός μικρός ελικοφόρος ανεμιστήρας

Οι αξονικοί ανεμιστήρες αγωγού έχουν τους κινητήρες τους τοποθετημένους στην πλήμνη του ανεμιστήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έναν ανεμιστήρα με αξονικό βάθος που είναι πολύ μικρότερο από έναν ελικοφόρο ανεμιστήρα, ο οποίος όμως έχει μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής στατικής πίεσης από έναν ελικοφόρο ανεμιστήρα της ίδιας διαμέτρου. Αυτός ο τύπος ανεμιστήρα, χρησιμοποιείται συνήθως όταν ο χαμηλός θόρυβος, η μεγάλη διάρκεια ζωής και το χαμηλό κόστος είναι σημαντικά.



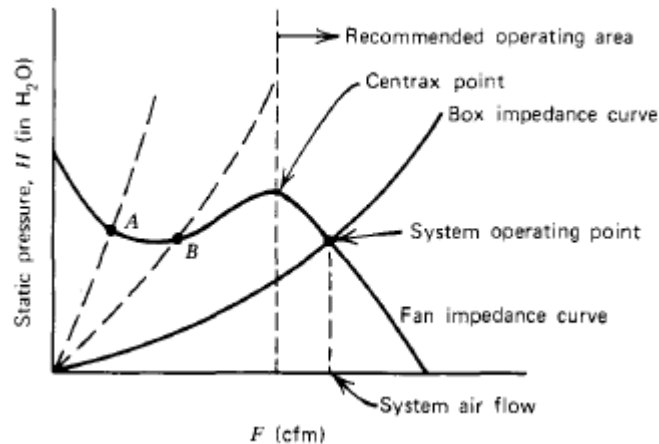
Σχήμα 14: Τυπικός αξονικός ανεμιστήρας αγωγού

Στο σχήμα 15 απεικονίζεται ένας μικρός αξονικός ανεμιστήρας με πτερύγια ρύθμισης, ο οποίος λειτουργεί σε υψηλή περιστροφική ταχύτητα και παρέχει στατικές πιέσεις άνω των 10,16 cmΣΥ σε μηδενική παροχή. Ανεμιστήρες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται συνήθως για την ψύξη ηλεκτρονικών συγκροτημάτων με υψηλές πυκνότητες θερμότητας, τα οποία πρέπει να λειτουργούν σε αυστηρά θερμικά περιβάλλοντα και περιβάλλοντα δονήσεων. Λειτουργούν γενικά σε υψηλή συχνότητα (400 Hz) και διατίθενται με κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας, οι οποίοι επιταχύνουν σε μεγάλα υψόμετρα για να παρέχουν επιπλέον ψύξη με αέρα χαμηλής πυκνότητας.



Σχήμα 15: Αξονικός ανεμιστήρας με πτερύγια ρύθμισης υψηλής ταχύτητας

Τα χαρακτηριστικά πίεσης της ροής αυτών των ανεμιστήρων αξονικής ροής, με υψηλές γωνίες πτερυγίων, παράγουν μια περιοχή ασυνέχειας που αντιστοιχεί σε κατάσταση αποκόλλησης του πτερυγίου. Γενικά δεν συνιστάται η λειτουργία ανεμιστήρων στην περιοχή αυτή (η οποία ονομάζεται μερικές φορές σημείο centrax) ή σε χαμηλότερους όγκους ροής, όπως φαίνεται στο σχήμα 16. Η λειτουργία πρέπει να πραγματοποιείται στην περιοχή στα δεξιά του σημείου centrax.



Σχήμα 16: Προτεινόμενη περιοχή λειτουργίας αξονικών ανεμιστήρων

Όταν το σύστημα-λειτουργεί στα αριστερά του σημείου centrax, ξαφνικές αυξήσεις πίεσης μπορεί να προκύψουν. Για παράδειγμα, η στατική πίεση στα σημεία A και B στο σχήμα είναι ίδιες, αλλά οι συνθήκες ροής cfm δεν είναι ίδιες. Επομένως, οι συνθήκες ροής διαμέσου του κιβωτίου μπορεί να εναλλάσσονται μεταξύ των σημείων A και B. Εάν απαιτείται η υψηλότερη ροή στο σημείο B, η μειωμένη ροή στο σημείο A μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση στα ηλεκτρονικά συστήματα.

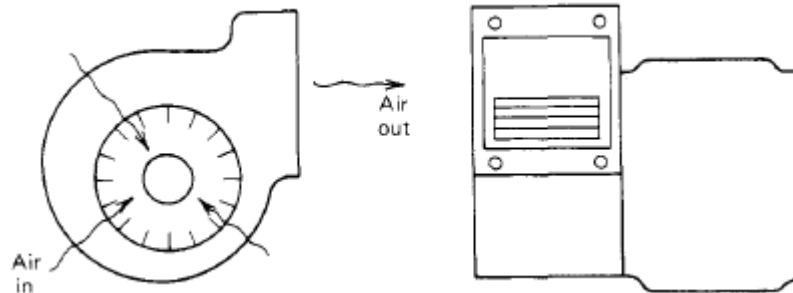
Εάν η καμπύλη σύνθετης αντίστασης του κουτιού πέφτει στα αριστερά του σημείου centrax, είναι συνήθως δυνατή η εκτόνωση του αέρα από τον ανεμιστήρα με παρεμβύσματα ή οπές. Αυτό θα μετακινήσει την καμπύλη σύνθετης αντίστασης του κουτιού προς τα δεξιά του σημείου centrax.

Ο ανεμιστήρας θα αποδίδει τότε υπερβολική παροχή σε cfm, έτσι ώστε μέρος του αέρα να απορρίπτεται. Δεδομένου ότι ο ανεμιστήρας θα λειτουργεί προς τη δεξιά πλευρά του centrax σημείου, η λειτουργία του θα είναι σταθερή και δεν θα υπόκειται σε αυξήσεις πίεσης. Δοκιμές θα πρέπει να εκτελούνται για να διασφαλιστεί ότι η κατάλληλη ποσότητα αέρα εξακολουθεί να ρέει μέσω του κουτιού για τις ανάγκες της ψύξης.

Υψηλές στατικές πιέσεις και υψηλές παροχές αέρα μπορούν να επιτευχθούν με χαμηλή περιστροφική ταχύτητα με τη χρήση φυγοκεντρικών φυσητήρων. Τρεις τύποι πτερυγίων χρησιμοποιούνται συνήθως: οπισθοκλινή, ακτινικά και εμπροσθοκλινή.

Οι υψηλότερες πιέσεις για μια δεδομένη διάμετρο έλικας και η ταχύτητα αναπτύσσονται συνήθως από τους εμπροσθοκλινείς ανεμιστήρες. Ωστόσο, μια σχετικά μικρή αύξηση της παροχής όγκου μπορεί να προκαλέσει σημαντική αύξηση της απαιτούμενης ισχύος.

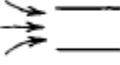
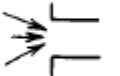

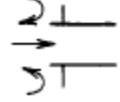
Οι οπισθοκλινείς ανεμιστήρες επιτυγχάνουν αποδόσεις πολύ πάνω από 80%. Αυτοί οι ανεμιστήρες αναφέρονται συχνά ως ανεμιστήρες χωρίς υπερφόρτωση, επειδή λειτουργούν καλά σε μεγάλο εύρος παροχής όγκου.



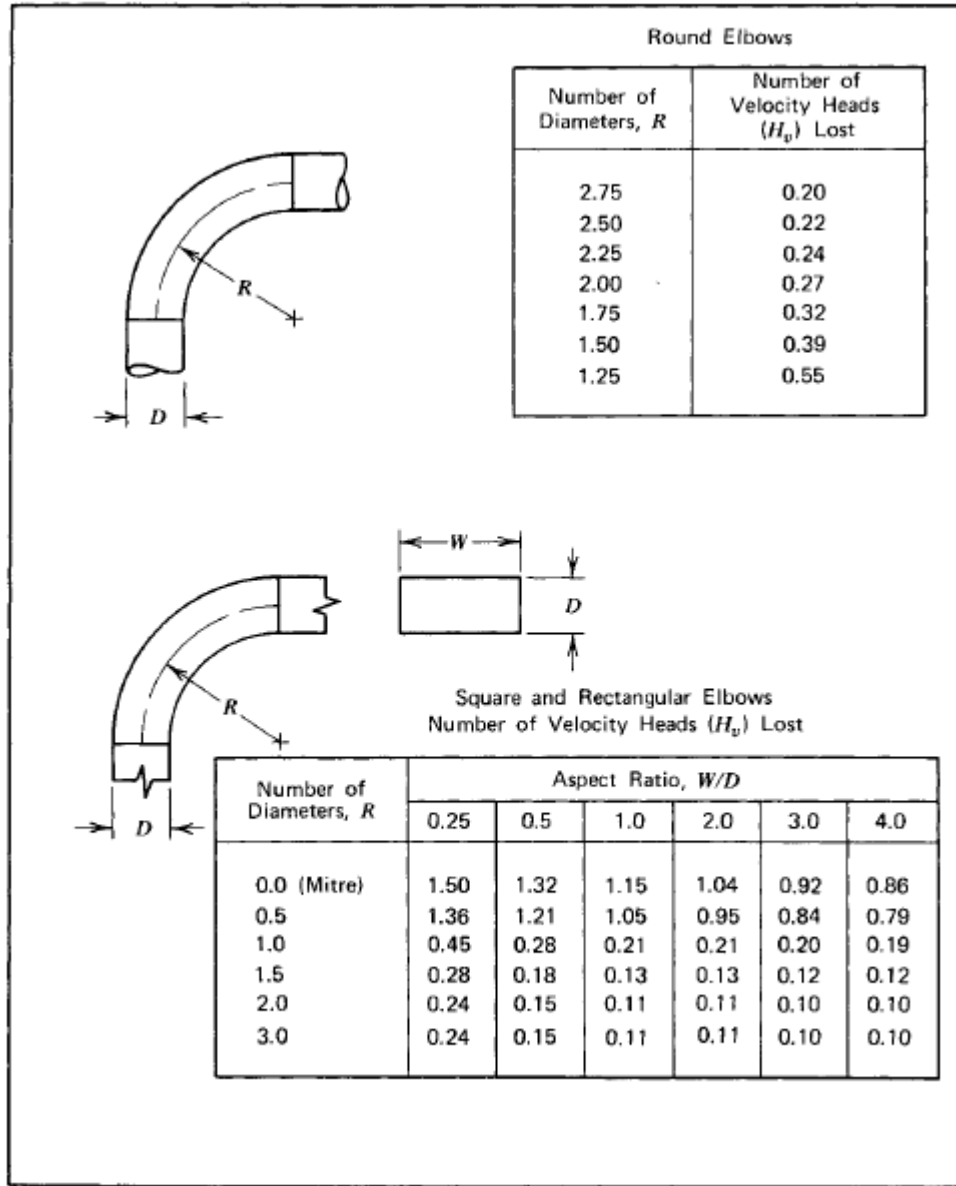
Σχήμα 17: Τυπικός φυγοκεντρικός ανεμιστήρας

3.7 Πίνακες και Γραφήματα Απωλειών Στατικής Πίεσης

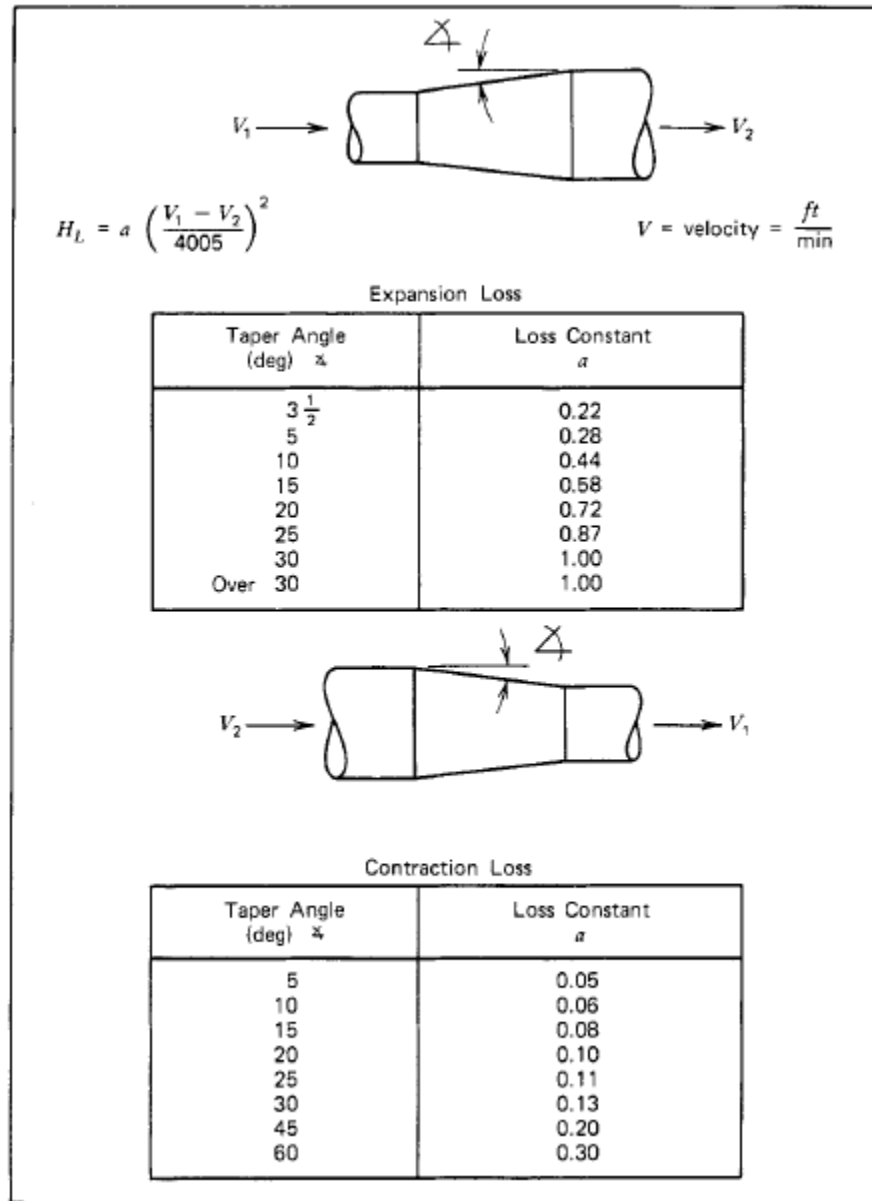
Οι απώλειες στατικής πίεσης για διάφορες σχέσεις ροής και γεωμετρίας, αλλά και για διαφορετικές δομές και συνθήκες του συστήματος, υπό την μορφή δυναμικού ύψους H_v , παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Type of Opening	Description	Number of Velocity Heads (H_v) Lost
	Plain duct end	0.93
	Flanged duct end	0.49
	Well-rounded entry	0.04
	Protruding entry	2.70

Πίνακας 3: Απώλειες εισόδου για διαφορετικές διατομές



Πίνακας 4: Απώλειες σε διακλαδώσεις



Πίνακας 5: Απώλειες διαστολής και συστολής της διατομής

3.8 Εναλλάκτες Θερμότητας με Πτερύγια

Οι ψυχρές πλάκες και οι εναλλάκτες θερμότητας κατασκευάζονται συχνά από αλουμίνιο, με πολλά λεπτά πτερύγια σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Όταν τα πτερύγια βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, υπάρχει μεγάλη αύξηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (h) κατά την εξαναγκασμένη συναγωγή και μεγάλη αύξηση της

επιφάνειας (A) που είναι διαθέσιμη για τη μεταφορά θερμότητας. Το γινόμενο $h \times A$ αυξάνεται επομένως πολύ γρήγορα, γεγονός που βελτιώνει τη θερμική απόδοση του σχεδιασμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη μέγιστη θερμοκρασία των κρίσιμων εξαρτημάτων, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται η αξιοπιστία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Υπάρχει ένα πρακτικό όριο στον αριθμό των λεπτών πτερυγίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η αύξηση του αριθμού των πτερυγίων θα αυξήσει την πτώση της πίεσης κατά μήκος του κουτιού, γεγονός που μπορεί να μειώσει απότομα την παροχή του αέρα ψύξης και μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση των ηλεκτρονικών.

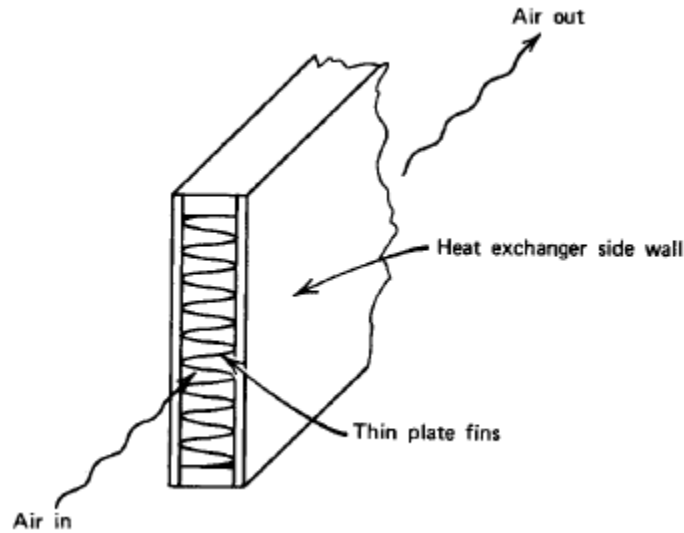
Πειραματικά δεδομένα και αναλύσεις έχουν δείξει ότι κατά την εξαναγκασμένη συναγωγή ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για τύπους ψυκτικών πλακών και εναλλακτών θερμότητας με πολλαπλά πτερύγια μπορεί να προσδιοριστεί από την παρακάτω εξίσωση.

$$h_c = J C_p G \left(\frac{c_p \mu}{K} \right)^{-2/3} \quad \text{(Εξίσωση 4)}$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας J μπορεί να προσδιοριστεί από τον αριθμό Reynolds (N_R). Για συνθήκες στρωτής ροής, με N_R μεταξύ περίπου 400 και 1500, η προσεγγιστική τιμή του J για ψυχρές πλάκες με πτερύγια και εναλλάκτες θερμότητας παρουσιάζεται από την εξίσωση:

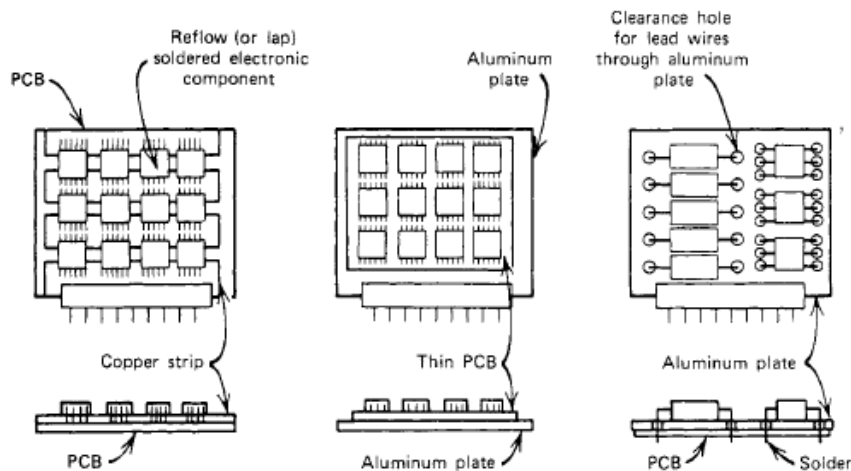
$$J = \frac{0.72}{(N_R)^{0.7}} \quad \text{(Εξίσωση 5)}$$

Η τυπική διατομή μέσω μιας ψυχρής πλάκας πολλαπλών πτερυγίων ή μέσω εναλλακτών θερμότητας φαίνεται στο σχήμα 18.



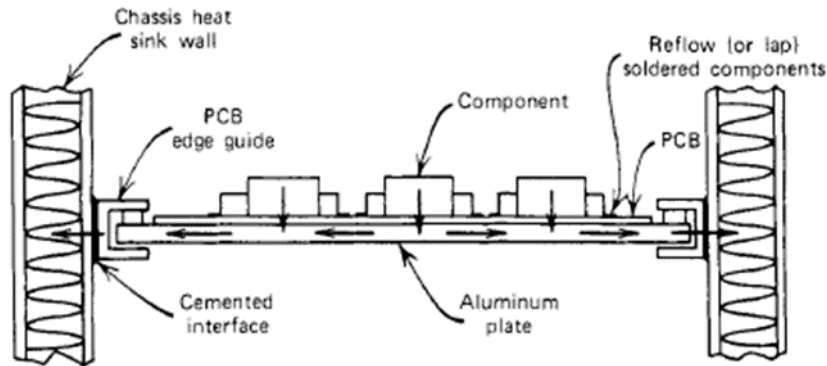
Σχήμα 18: Τυπικός Εναλλάκτης Θερμότητας

Η δομή της ψυχρής πλάκας ή του εναλλάκτη θερμότητας χρησιμοποιείται συχνά για τα πλευρικά τοιχώματα των ηλεκτρονικών κουτιών. Οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) στηρίζονται στη συνέχεια μεταξύ των τοιχωμάτων αυτών. Τα φύλλα χαλκού ή αλουμινίου συχνά τοποθετούνται σε στρώματα στις πλακέτες PCB για να παρέχουν μια καλή διαδρομή της ροής θερμικής αγωγιμότητας κατά μήκος των PCB, όπως φαίνεται στο σχήμα 19.



Σχήμα 19: Τοποθέτηση φύλλων αλουμινίου στις πλακέτες PCB

Η θερμότητα μπορεί στη συνέχεια να ρέει κατά μήκος των PCBs προς τα αερόψυκτα πλευρικά τοιχώματα του πλαισίου, τα οποία περιέχουν εναλλάκτες θερμότητας πολλαπλών πτερυγίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 20.



Σχήμα 20: Ροή θερμότητας από την πλακέτα PCB προς τους εναλλάκτες θερμότητας

Δεδομένου ότι το μέσο ψύξης που χρησιμοποιείται είναι ο αέρας, είναι σημαντικό να οδηγείται ο αέρας ψύξης όσο το δυνατόν πιο κοντά στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Αυτό θα μειώσει την αύξηση της θερμοκρασίας και θα βελτιώσει την θερμική απόδοση. Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, που φαίνεται από τις εξισώσεις παραπάνω, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των θερμικών χαρακτηριστικών των μελετώμενων συστημάτων.

3.9 Απώλειες Πίεσης σε Εναλλάκτες Θερμότητας

Οι εναλλάκτες θερμότητας πολλαπλών πτερυγίων και οι ψυχρές πλάκες απαιτούν σημαντική ποσότητα ενέργειας για να ξεπεραστεί η τριβή που αντιστέκεται στη ροή του ψυκτικού αέρα μέσω αυτών των μονάδων. Όταν η πυκνότητα των πτερυγίων είναι υψηλή ή όταν το φινίρισμα της επιφάνειας στα πτερύγια είναι πολύ τραχύ, απαιτείται ακόμη περισσότερη ενέργεια για να εξαναγκαστεί ο αέρας να περάσει μέσα από τους μακριούς, στενούς σωλήνες που σχηματίζονται από τα πτερύγια του εναλλάκτη θερμότητας.

Είναι βολικό να εκφράζονται οι απώλειες τριβής ως προς το ύψος μιας στήλης νερού H_L σε εκατοστά, επειδή τα μεγέθη των αριθμών που εκφράζονται σε γραμμάρια ανά τετραγωνικό εκατοστό είναι πολύ μικρά. Οι απώλειες τριβής αυξάνονται πολύ γρήγορα καθώς αυξάνεται η ταχύτητα της ροής του αέρα ψύξης. Ωστόσο, οι απώλειες φαίνεται να είναι γραμμικές σε σχέση με το μήκος της ροής μέσω του εναλλάκτη θερμότητας.

Η απώλεια στατικού ύψους λόγω τριβής που προκύπτει από τη ροή μέσω των πολλαπλών σωλήνων του εναλλάκτη θερμότητας παρουσιάζεται στην εξίσωση. Απώλειες

λόγω της αντίστασης εισόδου, των στροφών, των διαστολών και των συστολών δεν περιλαμβάνονται σε αυτή την εξίσωση. Αυτές οι απώλειες πρέπει να εκτιμηθούν χωριστά και στη συνέχεια να προστεθούν στην εξίσωση για να προκύψει η πλήρης απώλεια στατικού ύψους για το ηλεκτρονικό κουτί. Αυτή η εξίσωση είναι γνωστή ως εξίσωση Darcy. Η εξίσωση αυτή εφαρμόζεται για συνθήκες στρωτής και τυρβώδους ροής.

$$H_L = 4f \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{V^2}{2g}\right) \quad \text{(Εξίσωση 6)}$$

Όπου: V = ταχύτητα ροής

L = μήκος της διαδρομής της ροής

D = υδραυλική διάμετρος ενός αγωγού





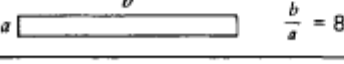

g = επιτάχυνση της βαρύτητας

f = παράγοντας της τριβής = $16/N_R$ για στρωτή ροή σε κυκλικούς αγωγούς

Η παραπάνω εξίσωση θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια στατικής πίεσης μεταφρασμένη σε ύψος στήλης αέρα. Η εξίσωση αυτή μερικές φορές εμπεριέχει και την πυκνότητα (ρ), όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση. Όταν εμπεριέχεται η πυκνότητα οι μονάδες μέτρησης των απωλειών αλλάζουν από ύψη σε πιέσεις g/cm^3 .

$$\Delta P_L = 4f \left(\frac{L}{D}\right) \left(\frac{\rho V^2}{2g}\right) \quad \text{(Εξίσωση 7)}$$

Ο συντελεστής τριβής f καθορίζεται από πειραματικά δεδομένα για στρωτή και τυρβώδη ροή και για διαφορετικές τραχύτητες επιφανειών. Όταν έχουμε στρωτή ροή και για λείες επιφάνειες, ο συντελεστής τριβής μπορεί γενικά να συσχετιστεί με τον αριθμό Reynolds N_R . Ο πίνακας που ακολουθεί απεικονίζει κάποιες τυπικές τιμές του συντελεστή τριβής f για διαφορετικές διατομές με λεία τοιχώματα.

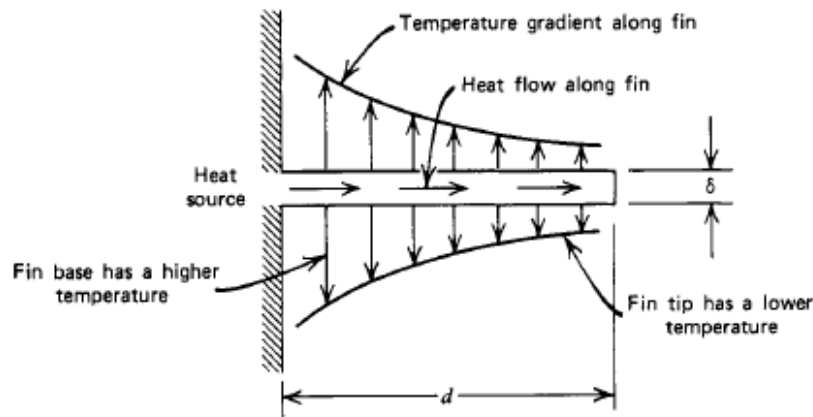
Geometry	Friction Factor
	$f = \frac{13.3}{N_R}$
 $\frac{b}{a} = 1$	$f = \frac{14.2}{N_R}$
	$f = \frac{16}{N_R}$
 $\frac{b}{a} = 4$	$f = \frac{18.3}{N_R}$
 $\frac{b}{a} = 8$	$f = \frac{20.5}{N_R}$
 $\frac{b}{a} = \infty$	$f = \frac{24}{N_R}$

Πίνακας 6: Τιμές συντελεστή τριβής f για στρωτή ροή για διαφορετικές διατομές με λεία τοιχώματα

3.10 Βαθμός Απόδοσης Πτερυγίων

Τα πτερύγια ψύξης χρησιμοποιούνται εκτενώς με την μέθοδο της εξαναγκασμένης συναγωγής στα συστήματα ψύξης, με σκοπό την αύξηση της απόδοσης του συνολικού συστήματος. Με την εφαρμογή τους, αυξάνεται η συνολική επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας, διευκολύνοντας έτσι το έργο της μεταφοράς θερμότητας. Ένας από τους καθοριστικούς παράγοντες που επηρεάζει την απόδοση του συστήματος είναι η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ του ψυκτικού αέρα και της επιφάνειας των πτερυγίων. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διαφορά, τόσο περισσότερη θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί στον ψυκτικό αέρα.

Συχνά τα πτερύγια είναι σχετικά μεγάλου μήκους, έτσι ώστε να σχηματίζεται μια διαβάθμιση θερμοκρασιών κατά μήκος του πτερυγίου. Η βάση του είναι ουσιαστικά θερμότερη από την άκρη του, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 21.



Σχήμα 21: Ροή θερμότητας σε ένα πτερυγίο ψύξης

Για την μεταφορά της μέγιστης ποσότητας θερμότητας, η άκρη του πτερυγίου θα πρέπει να είναι σχεδόν ίσης θερμοκρασίας με την βάση του. Το γεγονός αυτό προϋποθέτει μεγάλο πάχος πτερυγίου δ , μικρό μήκος d και μεγάλη θερμική αγωγιμότητα K για να περιοριστεί η διαβάθμιση των θερμοκρασιών κατά μήκος του πτερυγίου.

Για την αντιστάθμιση της διαφοράς στην ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται από ένα πτερυγίο με ανομοιόμορφη θερμοκρασία, χρησιμοποιείται ένας συντελεστής απόδοσης πτερυγίου (η). Ορίζεται ως ο λόγος της θερμότητας που μεταφέρεται πραγματικά από το πτερυγίο προς τη θερμότητα που θα μεταφερόταν στη μέγιστη ομοιόμορφη θερμοκρασία, όπου το άκρο του πτερυγίου έχει την ίδια θερμοκρασία με τη βάση. Ο συντελεστής απόδοσης πτερυγίου εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\eta = \frac{\tanh md}{md} \quad \text{(Εξίσωση 8)}$$

Όπου: \tanh = υπερβολική εφαπτομένη

$$m = \sqrt{2h_c/K\delta}$$

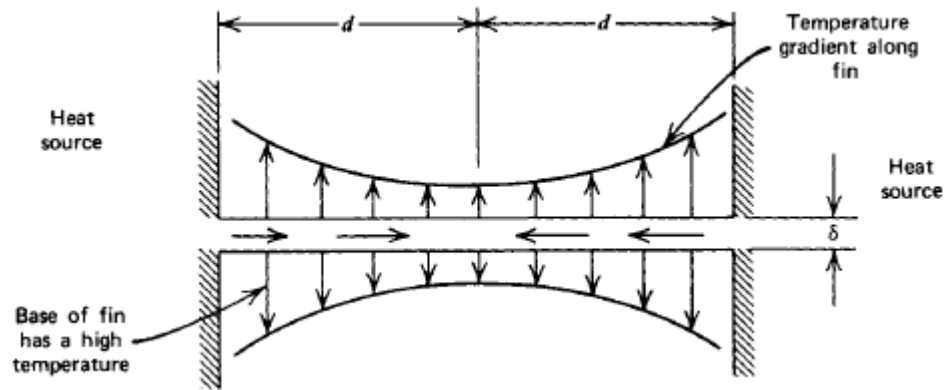
h_c = συντελεστής συναγωγής

K = θερμική αγωγιμότητα πτερυγίου

δ = πάχος πτερυγίου

d = πραγματικό ύψος πτερυγίου από την βάση

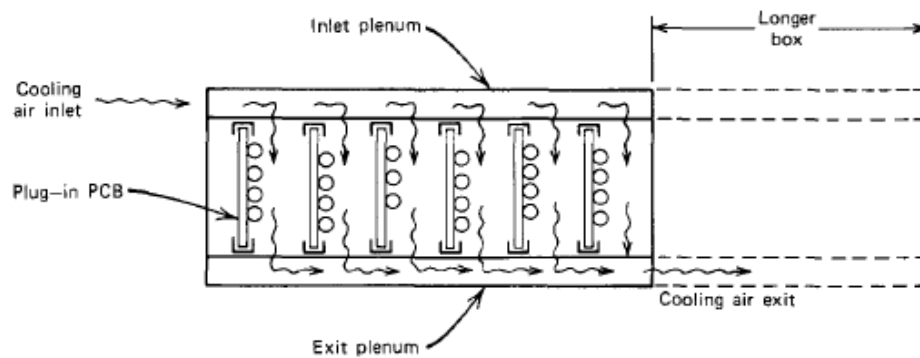
Πολύ συχνά ένα πτερύγιο εκτείνεται μεταξύ δύο επιφανειών που αποτελούν πηγή θερμότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις το ύψος του πτερυγίου από την βάση του είναι το μισό του συνολικού ύψους.



Σχήμα 22: Πτερύγιο ψύξης με δυο πηγές θερμότητας στα άκρα του

3.11 Ανεπιθύμητες Ανακυκλοφορίες Ροής

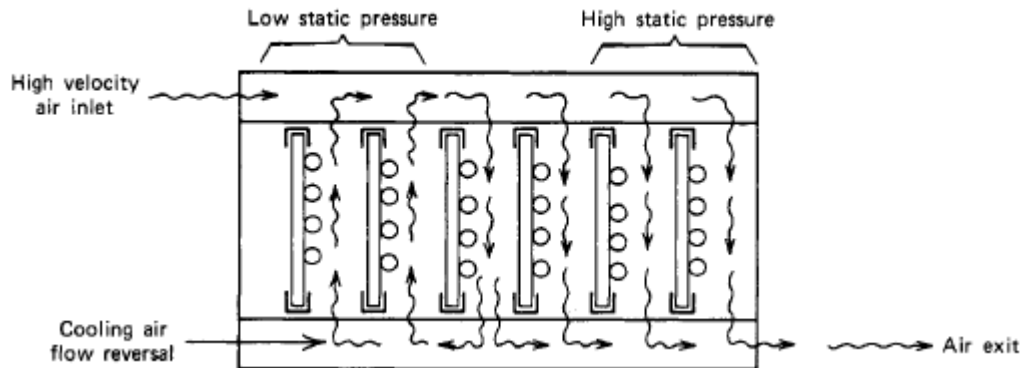
Κάτω από ορισμένες συνθήκες είναι δυνατόν ο αέρας σε ένα σύστημα εξαναγκασμένης συναγωγής να αντιστρέψει την κατεύθυνση της ροής του. Εάν συμβεί αυτό, η απόδοση της ψύξης μπορεί να μειωθεί απότομα και μπορεί να προκληθεί υπερθέρμανση των ηλεκτρονικών συσκευών. Αυτού του είδους η κατάσταση μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα σύστημα ψύξης παράλληλης ροής το οποίο ενσωματώνει ένα ακροφύσιο διανομής αέρα ψύξης, όπως φαίνεται στο σχήμα 23.



Σχήμα 23: Σύστημα ψύξης παράλληλης ροής με ακροφύσια εισαγωγής και εξόδου

Ο σκοπός ενός ακροφυσίου διανομής αέρα εισόδου είναι να παρέχει ομοιόμορφη ροή αέρα στα PCB του συστήματος. Ιδανικά, η στατική πίεση θα είναι υψηλή και η ταχύτητα θα είναι χαμηλή. Μια υψηλή στατική πίεση θα διανέμει τον αέρα ομοιόμορφα σε όλες τις PCB. Μια χαμηλή δυναμική πίεση σημαίνει χαμηλή ταχύτητα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μικρές απώλειες εισόδου και στροφής.

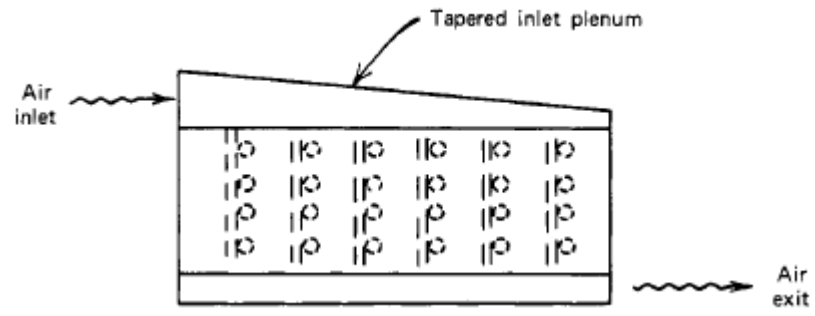
Εάν αυξηθεί το μήκος του ακροφυσίου και αυξηθεί ο αριθμός των PCB στο σύστημα, ή εάν η απώλεια ισχύος στο σύστημα αυξηθεί σημαντικά, θα πρέπει να ληφθεί επιπλέον παροχή αέρα ψύξης. Εάν δεν αυξηθεί το εμβαδόν του ακροφυσίου εισόδου του αέρα, η ταχύτητα της ροής του αέρα ψύξης πρέπει να αυξηθεί για την παροχή του πρόσθετου αέρα. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, η στατική πίεση θα μειωθεί. Μια υψηλή ταχύτητα αέρα μπορεί να οδηγήσει σε τόσο χαμηλή στατική πίεση στην είσοδο αέρα που είναι πολύ χαμηλότερη από την εξωτερική ατμοσφαιρική πίεση. Όταν συμβαίνει αυτό, προκύπτει το φαινόμενο της ανακυκλοφορίας της ροής. Ο αέρας θα εισέλθει τότε από το ακροφύσιο εξόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 24.



Σχήμα 24: Ανακυκλοφορία ροής

Για να αποφευχθεί η ανακυκλοφορία της ροής, η επιφάνεια διατομής του ακροφυσίου αέρα εισόδου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα όλων των επιμέρους θυρών εισόδου της πλακέτας που χρησιμοποιούνται για την παροχή ψυκτικού αέρα στις πλακέτες PCB.

Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ένα κωνικό ακροφύσιο εισόδου για τον αέρα ψύξης, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η κωνικότητα θα πρέπει να είναι σταδιακή, έτσι ώστε το εμβαδόν της διατομής του ακροφυσίου στο κάθε σημείο να είναι μεγαλύτερη από τη συνολική επιφάνεια διατομής της κατάντη εισόδου του αέρα των θυρών εισόδου προς τα PCBs.



Σχήμα 25: Κωνικό ακροφύσιο εισόδου

4. Εφαρμογή Αρχών Σχεδίασης Συστημάτων Ψύξης στον Συσσωρευτή Ενέργειας

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι αρχές σχεδίασης συστημάτων ψύξης σε ηλεκτρονικές εφαρμογές και συγκεκριμένα με την μέθοδο της εξαναγκασμένης συναγωγής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε ψυκτικά συστήματα ενεργής αερόψυξης και περιγράφει το υπό μελέτη πρόβλημα. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η υπολογιστική πορεία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των σχεδιαστικών αποφάσεων.

Αξίζει να τονιστεί πως για λόγους ευκολίας αλλά κυρίως για τον περιορισμό του υπολογιστικού κόστους κατά την μοντελοποίηση του προβλήματος που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια, το δοχείο των συσσωρευτών χωρίστηκε σε δυο ανεξάρτητα κουτιά – δωμάτια, τον χώρο υψηλής τάσης (HV com) και τον χώρο χαμηλής τάσης (LV room), όπως αυτοί παρουσιάστηκαν κατά την περιγραφή του συστήματος. Ταυτόχρονα, λόγω συμμετρίας ο χώρος υψηλής τάσης χωρίστηκε σε δύο συμμετρικά μέρη. Αποφασίστηκε να αμεληθεί η μετάδοση θερμότητας με αγωγή μεταξύ των τριών αυτών χώρων, αφενός εξαιτίας της χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού των τοιχωμάτων (Nomex-Aramid) και αφετέρου εξαιτίας του τεράστιου υπολογιστικού κόστους που απαιτούνταν. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε πως κατά την σχεδίαση θα ληφθούν μεγαλύτεροι συντελεστές ασφαλείας για την εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του συσσωρευτή ενέργειας.

Τα δύο προβλήματα που ορίζονται λοιπόν είναι ο σχεδιασμός του ψυκτικού συστήματος για τον χώρο χαμηλής τάσης και αντίστοιχα για τον χώρο υψηλής τάσης. Τα θερμικά κρίσιμα εξαρτήματα του χώρου χαμηλής τάσης είναι ο μετατροπέας DC-DC, ενώ του χώρου υψηλής τάσης τα κελιά μπαταριών. Και στα δυο προβλήματα θα υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά πτώσης πίεσης στον εκάστοτε χώρο, θα επιλεγθεί το μέγεθος του / των ανεμιστήρων που χρειάζονται για την παροχή ψυκτικού αέρα και θα εξετασθεί η ενσωμάτωση εναλλακτών θερμότητας σε κάθε περίπτωση.

4.1 Χάραξη Καμπύλης Αντίστασης Ροής - Κουτί Χαμηλής Τάσης

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα γίνει, σε πρώτη φάση, ένας προκαταρκτικός θερμικός σχεδιασμός του κουτιού χαμηλής τάσης με σκοπό την εξαγωγή της απαιτούμενης παροχής ψυκτικού αέρα, άρα και μεγέθους ανεμιστήρα. Σε δεύτερη φάση θα υπολογιστούν τα σημεία με τις μεγαλύτερες πτώσεις στατικής πίεσης και θα χαραχθεί η καμπύλη αντίστασης του LV κουτιού, το σημείο τομής της οποίας με την χαρακτηριστική καμπύλη του ανεμιστήρα θα αναδείξει το σημείο λειτουργίας του συστήματος.

Το σύστημα πρέπει να είναι ικανό για συνεχή λειτουργία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{op} = 35^{\circ}\text{C}$, ενώ ταυτόχρονα δεν πρέπει να ξεπεραστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του DC-DC μετατροπέα $T_{max} = 100^{\circ}\text{C}$. Ο DC-DC μήκους $a =$

111mm, πλάτους $b = 36\text{mm}$ και πάχους $t = 9.5\text{mm}$, απάγει θερμότητα 320W , χωρίς να περιλαμβάνεται η απαγωγή των ανεμιστήρων.

Η μέγιστη επιτρεπτή άνοδος της θερμοκρασίας από την εισαγωγή στην επιφάνεια του μετατροπέα ισούται με:

$$\Delta T_{allowable} = T_{max} - T_{op} = 65^{\circ}\text{C} \quad (\text{Εξίσωση 9})$$

Υπάρχουν δυο παράγοντες που συνεισφέρουν στην άνοδο της θερμοκρασίας. Αρχικά προκύπτει άνοδος εξαιτίας της μεταφοράς θερμότητας του ανεμιστήρα και ιδιαίτερα του κινητήρα του προς τον ψυκτικό αέρα. Ο δεύτερος παράγοντας αφορά την θερμική αντίσταση του «φίλμ» συναγωγής από τον ψυκτικό αέρα προς την επιφάνεια του μετατροπέα. Αυτοί οι παράγοντες θα αναλυθούν λεπτομερώς για να εκτιμηθεί η συνεισφορά τους στην συνολική άνοδο της θερμοκρασίας.

4.1.1 Άνοδος Θερμοκρασίας από τον Κινητήρα του Ανεμιστήρα

Η θερμότητα που παράγεται από τον κινητήρα του ανεμιστήρα συνήθως απομακρύνεται με συναγωγή από τον ψυκτικό αέρα. Εάν ο ανεμιστήρας είναι βιδωμένος σε μια μεγάλη ψύκτρα μακριά από το ηλεκτρονικό κουτί, ένα μεγάλο μέρος της θερμότητας από το μοτέρ του ανεμιστήρα μπορεί να απομακρυνθεί με άμεση αγωγή και ακτινοβολία από το περίβλημα του ανεμιστήρα προς την ψύκτρα.

Όταν ο ανεμιστήρας είναι βιδωμένος απευθείας στο κουτί που στεγάζει τα ηλεκτρονικά, τα τοιχώματα του κουτιού μπορεί να είναι αρκετά θερμά, οπότε σχετικά λίγη θερμότητα του ανεμιστήρα μπορεί να μεταφερθεί προς αυτά. Ως εκ τούτου, είναι καλή πρακτική να είμαστε ελαφρώς συντηρητικοί και να υποθέσουμε ότι όλη η ισχύς του ανεμιστήρα θα απορροφηθεί από τον αέρα ψύξης καθώς περνάει μέσα από τον ανεμιστήρα και το πλαίσιο του.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική θερμική απόδοση εάν ο αέρας που εξέρχεται από το κουτί των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων δεν ξεπερνά τους 71°C . Συνεπώς, η μέγιστη επιτρεπτή άνοδος της θερμοκρασίας προκύπτει:

$$\Delta T_A = 71^{\circ}\text{C} - T_{op} = 36^{\circ}\text{C} \quad (\text{Εξίσωση 10})$$

Η απαιτούμενη παροχή αέρα μπορεί να προσδιοριστεί από την γενική εξίσωση παροχής:

$$W = \frac{Q}{\Delta T C_p} \quad \text{(Εξίσωση 11)}$$

Όπου: Q = θερμότητα = cal/sec
 ΔT = άνοδος θερμοκρασίας = °C
 C_p = ειδική θερμοχωρητικότητα = cal/(g °C)
 W = παροχή = g/sec

Θεωρώντας έναν αξονικό ανεμιστήρα απαγωγής 25W περιστρεφόμενο με ταχύτητα 10000 rpm, η συνολική θερμότητα που απάγεται στο κουτί προκύπτει:

$$Q = 320 + 25 = 345 \text{ Watts} \times 0.239 \frac{\text{cal/sec}}{\text{Watts}} = 82.455 \frac{\text{cal}}{\text{sec}} \quad \text{(Εξίσωση 12)}$$

$$\Delta T = 71 - 35 = 36^\circ\text{C} \quad \text{(Εξίσωση 13)}$$

$$C_p = 0.24 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \quad \text{(Εξίσωση 14)}$$

Η παροχή ψυκτικού αέρα υπολογίζεται ως:

$$W = \frac{82.455 \text{ cal/sec}}{(36^\circ\text{C})(0.24 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}})} = 9.54 \frac{\text{g}}{\text{sec}} \quad \text{(Εξίσωση 15)}$$

4.1.2 Άνοδος Θερμοκρασίας από τον Μετατροπέα DC-DC

Η αύξηση αυτή μπορεί να περιγραφεί από την σχέση της συναγωγής που παρουσιάζεται από την εξίσωση:

$$\Delta T = \frac{Q}{A h_c} \quad \text{(Εξίσωση 16)}$$

Ο συντελεστής συναγωγής h_c εξαρτάται από την γεωμετρία του καναλιού αέρα που δημιουργείται από το κενό μεταξύ της επιφάνειας του μετατροπέα και του τοιχώματος του χώρου χαμηλής τάσης. Ορίζεται ως:

$$h_c = J C_p G \left(\mu \frac{C_p}{K} \right)^{-2/3} \quad \text{(Εξίσωση 17)}$$

Όπου:

- J = παράγοντας Colburn
- C_p = ειδική θερμοχωρητικότητα ρευστού
- G = παροχή ρευστού μέσω του καναλιού
- μ = ιξώδες του ρευστού
- K = θερμική αγωγιμότητα του ρευστού

Ο παράγοντας Colburn J εξαρτάται από την τιμή του αριθμού Reynolds (N_R). Ο αριθμός Reynolds για το κανάλι που σχηματίζεται υπολογίζεται ως:

$$N_R = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{GD}{\mu} \quad \text{(Εξίσωση 18)}$$

Όπου D η υδραυλική διάμετρος:

$$D = \frac{4 \times \text{area}}{\text{perimeter}} = \frac{4ad}{2(a+d)} = \frac{2ad}{a+d} \quad \text{(Εξίσωση 19)}$$

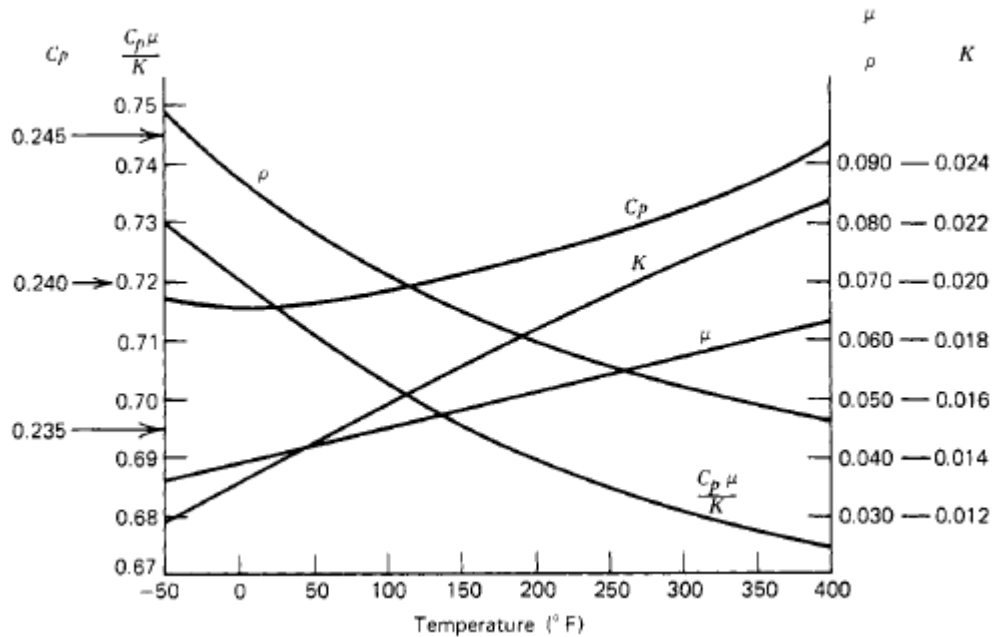
$$D = \frac{2(2.81)(3.6)}{2.81+3.6} = 3.156 \text{ cm}$$

Η παροχή G μέσω του καναλιού προκύπτει:

$$G = \frac{W}{A} \quad \text{(Εξίσωση 20)}$$

$$G = \frac{9.54 \text{ g/sec}}{(2.81)(3.6) \text{ cm}^2} = 0.943 \frac{\text{g}}{\text{sec cm}^2}$$

Η τιμή του συντελεστή ιξώδους μ και η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας K προκύπτουν από το διάγραμμα για θερμοκρασία ίση με 35°C .



Σχήμα 26: Διάγραμμα ιδιοτήτων νερού

$$\mu = 0.000185 \frac{\text{g}}{\text{cm sec}} \quad \text{(Εξίσωση 21)}$$

$$K = 0.000062 \frac{\text{cal}}{\text{sec cm } ^\circ\text{C}} \quad \text{(Εξίσωση 22)}$$

Συνεπώς, προκύπτει ο αδιάστατος αριθμός Reynolds:

$$N_R = \frac{(0.943)(3.156)}{0.000185} = 16087$$

Για πλήρως τυρβώδεις ροές, όπου ο αριθμός Reynolds είναι μεταξύ 10000 και 120000 ο συντελεστής Colburn J υπολογίζεται από την προσεγγιστική εξίσωση:

$$J = \frac{0.023}{N_R^{0.2}} = 0.0033 \quad \text{(Εξίσωση 23)}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση του συντελεστή συναγωγής προκύπτει:

$$h_c = (0.0033)(0.24)(0.943) \left[\frac{(0.24)(0.000185)}{0.000062} \right]^{-2/3} = 0.000933 \frac{\text{cal}}{\text{sec cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί τώρα να υπολογιστεί.

$$\Delta T_B = \frac{(320)(0.239)}{[(111)(36)+(2)(111)(9.5)+(2)(36)(9.5)](0.000933)} = 12.07^\circ\text{C}$$

Η αναμενόμενη μέγιστη θερμοκρασία της επιφάνειας του μετατροπέα DC-DC υπολογίζεται ως:

$$t_s = T_{op} + \Delta T_A + \Delta T_B = 35 + 36 + 12.07 = 83.07^\circ\text{C} \quad \text{(Εξίσωση 24)}$$

Παρατηρούμε πως η μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία της επιφάνειας του μετατροπέα είναι μικρότερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία $T_{max} = 100^\circ\text{C}$, επομένως ο αξονικός ανεμιστήρας που υποτέθηκε αποτελεί ικανοποιητική λύση.

4.1.3 Καμπύλη Αντίστασης Ροής και Πτώση Πίεσης

Οι συνθήκες της ροής εξετάζονται σε 4 σημεία του χώρου χαμηλής τάσης, όπου και αναμένονται οι μεγαλύτερες πτώσεις στατικής πίεσης. Τα σημεία αυτά είναι η εισαγωγή του αέρα στον ανεμιστήρα, είσοδος στον κανάλι ψύξης, ροή μέσα από το κανάλι ψύξης, έξοδος από το κανάλι ψύξης.

Αρχικά, όσον αφορά την εισαγωγή του αέρα στον ανεμιστήρα, αυτή είναι παρόμοια με ένα απλό αγωγό όπως φαίνεται στον πίνακα. Οι αγωγοί αυτού του τύπου εμφανίζουν πτώση στατικής πίεσης ίση με 0.93 του δυναμικού ύψους. Η πτώση αυτή στρογγυλοποιείται στο 1.0 του δυναμικού ύψους.

$$H_1 = 1.0 H_{v1} \quad \text{(Εξίσωση 25)}$$

Κατά την είσοδο του αέρα στο κανάλι ψύξης, η ροή πρέπει να κάνει μια απότομη στροφή 90° συναντώντας τον μετατροπέα DC-DC, με αποτέλεσμα πτώση πίεσης ίση με 1.0 του δυναμικού ύψους. Εξαιτίας της τυρβώδους φύσης της ροής η πτώση πίεσης είναι ίση με 0.49 του δυναμικού ύψους. Συνολικά και με στρογγυλοποίηση προκύπτει:

$$H_2 = 1.5 H_{v2} \quad \text{(Εξίσωση 26)}$$

Στην περίπτωση της ροής μέσω του καναλιού ψύξης, επειδή η επιφάνεια του μετατροπέα έχει εκτεθειμένες τις άκρες ηλεκτρικών εξαρτημάτων και καλωδίων, παρά την μεγάλη διατομή του καναλιού εμφανίζονται απώλειες πίεσης. Οι απώλειες αυτές, ωστόσο, μπορούν να εκφραστούν όπως οι απώλειες αγωγού τετραγωνικής διατομής του πίνακα.

$$H_3 = 0.5 H_{v3} \quad \text{(Εξίσωση 27)}$$

Τέλος, κατά την έξοδο του αέρα από το κανάλι ψύξης η ενεργός διατομή της ροής θα διασταλεί απότομα οπότε θα χάσει πλήρως την ταχύτητά της.

$$H_4 = 1.0 H_{v4} \quad \text{(Εξίσωση 28)}$$

Όλες οι πληροφορίες είναι τώρα διαθέσιμες για τον υπολογισμό της κατά προσέγγιση πτώσης πίεσης μέσω του κουτιού με βάση τη γεωμετρία της διαδρομής της ροής του αέρα. Τρεις διαφορετικές παροχές θα χρησιμοποιηθούν μετρημένες σε cfm: 100 cfm, 200 cfm και 300 cfm.

4.1.3.1 Εισαγωγή Ροής στον Ανεμιστήρα

Ξεκινώντας με υποτιθέμενη παροχή αέρα 100 cfm υπολογίζουμε το δυναμικό ύψος, από το οποίο θα προκύψουν και οι απώλειες στατικής πίεσης.

$$A_1 = \frac{\pi D_{fan}}{4} = 36\pi \text{ cm}^2 \quad \text{(Εξίσωση 29)}$$

$$V_1 = \frac{F}{A_1} = \frac{47194.745}{36\pi} = 417 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \quad \text{(Εξίσωση 30)}$$

$$H_{v1} = \left(\frac{V_1}{1277} \right)^2 = 0.107 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 31)}$$

100 cfm:

$$H_1 = (1.0)(0.107) = 0.107 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 32)}$$

200 cfm:

$$H_1 = \left(\frac{20}{10} \right)^2 (0.107) = 0.428 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 33)}$$

300 cfm:

$$H_1 = \left(\frac{30}{10} \right)^2 (0.107) = 0.963 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 34)}$$

4.1.3.2 Εισαγωγή Ροής στο Κανάλι Ψύξης

Ακολουθώντας αντίστοιχα την παραπάνω διαδικασία για την νέα πλέον διατομή προκύπτει:

$$A_2 = 172.08 \text{ cm}^2 \quad \text{(Εξίσωση 35)}$$

$$V_2 = \frac{F}{A_2} = \frac{47194.745}{172.08} = 274 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \quad \text{(Εξίσωση 36)}$$

$$H_{v2} = \left(\frac{V_2}{1277} \right)^2 = 0.046 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 37)}$$

100 cfm:

$$H_2 = (1.5)(0.046) = 0.069 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 38)}$$

200 cfm:

$$H_2 = \left(\frac{20}{10} \right)^2 (0.069) = 0.276 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 39)}$$

300 cfm:

$$H_2 = \left(\frac{30}{10} \right)^2 (0.069) = 0.621 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 40)}$$

4.1.3.3 Ροή Μέσω του Καναλιού Ψύξης

Ακολουθώντας αντίστοιχα την παραπάνω διαδικασία για την νέα πλέον διατομή του καναλιού ψύξης προκύπτει:

$$A_3 = 37.935 \text{ cm}^2 \quad \text{(Εξίσωση 41)}$$

$$V_3 = \frac{F}{A_3} = \frac{47194.745}{37.935} = 1244 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \quad \text{(Εξίσωση 42)}$$

$$H_{v3} = \left(\frac{V_3}{1277} \right)^2 = 0.949 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 43)}$$

100 cfm:

$$H_3 = (0.5)(0.949) = 0.4745 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 44)}$$

200 cfm:

$$H_3 = \left(\frac{20}{10} \right)^2 (0.4745) = 1.898 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 45)}$$

300 cfm:

$$H_3 = \left(\frac{30}{10} \right)^2 (0.4745) = 4.2705 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 46)}$$

4.1.3.4 Έξοδος από το Κανάλι Ψύξης

Ακολουθώντας αντίστοιχα την παραπάνω διαδικασία για την νέα πλέον διατομή προκύπτει:

$$A_4 = 172.08 \text{ cm}^2 \quad \text{(Εξίσωση 47)}$$

$$V_4 = \frac{F}{A_4} = \frac{47194.745}{172.08} = 274 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \quad \text{(Εξίσωση 48)}$$

$$H_{v4} = \left(\frac{V_4}{1277}\right)^2 = 0.046 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 49)}$$

100 cfm:

$$H_4 = (1.0)(0.046) = 0.046 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 50)}$$

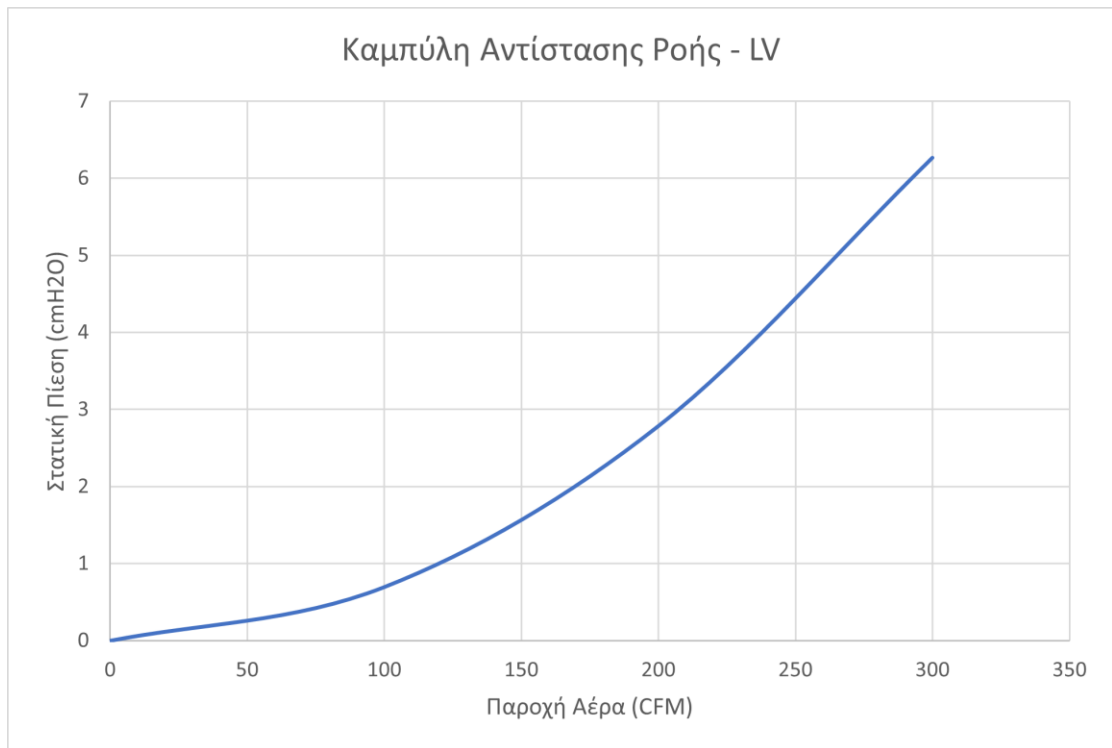
200 cfm:

$$H_4 = \left(\frac{20}{10}\right)^2(0.046) = 0.184 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 51)}$$

300 cfm:

$$H_4 = \left(\frac{30}{10}\right)^2(0.046) = 0.414 \text{ cmH}_2\text{O} \quad \text{(Εξίσωση 52)}$$

Προσθέτοντας κατά μέλη τις απώλειες στατικής πίεσης για συγκεκριμένη παροχή, προκύπτει η καμπύλη αντίστασης ροής του χώρου χαμηλής τάσης που απεικονίζεται παρακάτω.



4.2 Χάραξη Καμπύλης Αντίστασης Ροής - Κουτί Υψηλής Τάσης

Στο υποκεφάλαιο αυτό, όπως ακριβώς και στο υποκεφάλαιο 4.1, θα γίνει, σε πρώτη φάση, ένας προκαταρκτικός θερμικός σχεδιασμός του κουτιού υψηλής τάσης με σκοπό την εξαγωγή της απαιτούμενης παροχής ψυκτικού αέρα, άρα και μεγέθους ανεμιστήρα. Σε δεύτερη φάση θα υπολογιστούν τα σημεία με τις μεγαλύτερες πτώσεις στατικής πίεσης και θα χαραχθεί η καμπύλη αντίστασης του HV κουτιού, το σημείο τομής της οποίας με την χαρακτηριστική καμπύλη του ανεμιστήρα θα αναδείξει το σημείο λειτουργίας του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως η υπολογιστική διαδικασία είναι πανομοιότυπη για τα δυο συμμετρικά τμήματα του χώρου υψηλής τάσης, οπότε θα καταλήξουμε σε μια καμπύλη αντίστασης ροής που περιγράφει εξίσου και τα δυο αυτά τμήματα.

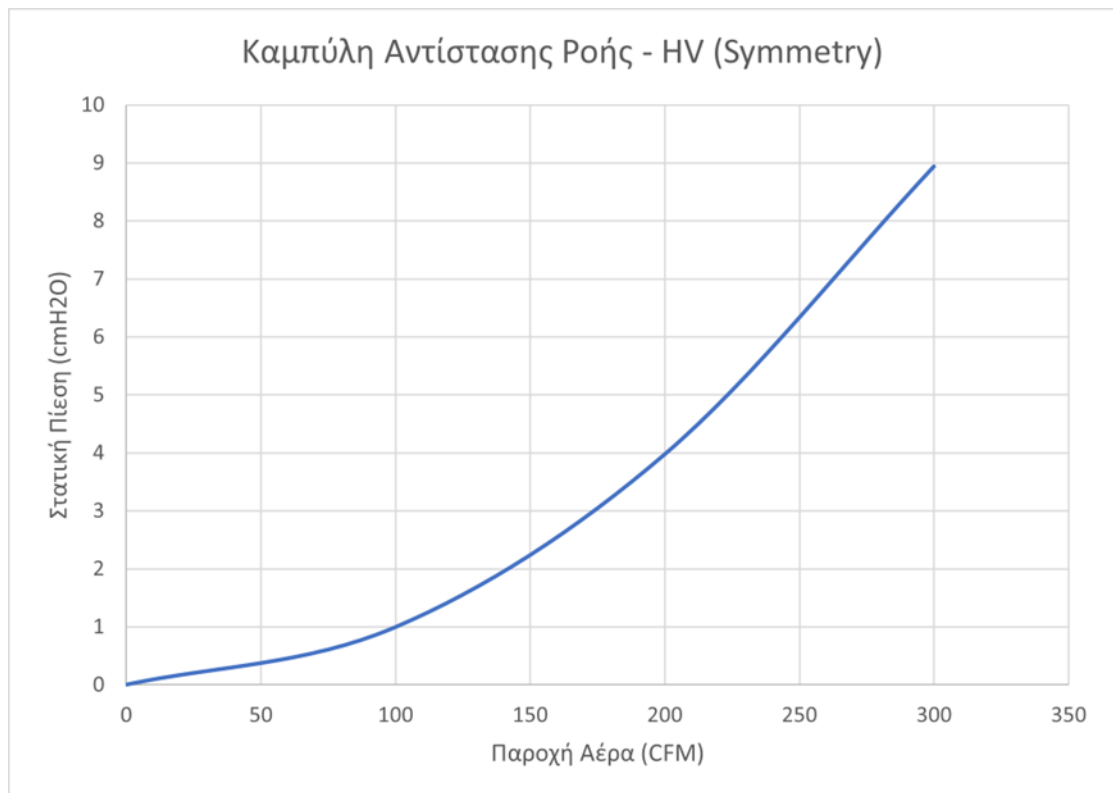
Το σύστημα πρέπει να είναι ικανό για συνεχή λειτουργία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{op} = 30^{\circ}\text{C}$, ενώ ταυτόχρονα δεν πρέπει να ξεπεραστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία των κελιών μπαταριών $T_{max} = 60^{\circ}\text{C}$. Κάθε μπαταρία μήκους $a = 32.43\text{mm}$, πλάτους $b = 128\text{mm}$ και πάχους $t = 10.81\text{mm}$, απάγει θερμότητα 25W . Κάθε συμμετρικό κουτί αποτελείται από 144 κελιά μπαταριών με συνολική απαγωγή θερμότητας 3600W , χωρίς να περιλαμβάνεται η απαγωγή των ανεμιστήρων. Για την ευκολία των υπολογισμών και εξαιτίας της δομής της συστοιχίας των μπαταριών υποτέθηκαν 48 3-άδες μπαταριών με απαγωγή θερμότητας 75W .

Η μέγιστη επιτρεπτή άνοδος της θερμοκρασίας από την εισαγωγή στην επιφάνεια των μπαταριών ισούται με:

$$\Delta T_{allowable} = T_{max} - T_{op} = 30^{\circ}\text{C} \quad \text{(Εξίσωση 53)}$$

Ακολουθώντας την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε στο υποκεφάλαιο 4.1, καταλήγουμε αντίστοιχα στην καμπύλη αντίστασης ροής κάθε συμμετρικού χώρου υψηλής τάσης, όπως απεικονίζεται παρακάτω. Η αναμενόμενη μέγιστη θερμοκρασία της επιφάνειας των κελιών μπαταριών προκύπτει μικρότερη της μέγιστης αναμενόμενης (60°C):

$$t_s = 53.28^{\circ}\text{C} \quad \text{(Εξίσωση 54)}$$



4.3 Εναλλάκτες Θερμότητας με Πτερύγια

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου αυτού, λόγω των παραδοχών που υιοθετήθηκαν κατά τον σχεδιασμό του συστήματος ψύξης, παρά την επάρκεια που παρουσιάζεται στην διαχείριση των θερμικών φορτίων αποφασίστηκε η χρήση εναλλακτών θερμότητας και στους δυο χώρους για την εξασφάλιση της ομαλής και αποδοτικής λειτουργίας του συστήματος.

Είναι απαραίτητο να γίνει μια νέα θερμική ανάλυση πάνω στις ήδη προ υπάρχουσες λαμβάνοντας υπόψιν τη νέα γεωμετρία που εμφανίζεται σε κάθε σύστημα, με σκοπό την εύρεση της νέας αναμενόμενης μέγιστης θερμοκρασίας των επιφανειών των θερμικά κρίσιμων εξαρτημάτων αλλά και την εκ νέου χάραξη των καμπυλών αντίστασης ροής για την ορθή επιλογή του ανεμιστήρα.

4.3.1 Κουτί Χαμηλής Τάσης

Ο εναλλάκτης θερμότητας του κουτιού χαμηλής τάσης διαθέτει 8 πτερύγια πάχους $\delta = 1.52\text{mm}$, σε απόσταση $d = 2.72\text{mm}$ μεταξύ τους. Τα πτερύγια είναι μήκους $\alpha = 85.13\text{mm}$ και πλάτους $\beta = 26.1\text{mm}$. Από το υποκεφάλαιο 4.1 προέκυψαν:

$$Q = 320W \times 0.239 \frac{\text{cal/sec}}{\text{Watts}} = 76.48 \frac{\text{cal}}{\text{sec}} \quad (\text{Εξίσωση 55})$$

$$C_p = 0.24 \frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{C}} \quad (\text{Εξίσωση 56})$$

$$\Delta T = 71 - 35 = 36 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Εξίσωση 57})$$

$$W_{min} = 9.54 \frac{\text{g}}{\text{sec}} \quad (\text{Εξίσωση 58})$$

Θα επαναληφθεί η διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή εξαναγκασμένης συναγωγής h_c .

$$\text{number of ducts} = 7 \quad (\text{Εξίσωση 59})$$

Η παροχή δια μέσω ενός αγωγού υπολογίζεται ως:

$$W = \frac{W_{min}}{\text{number of ducts}} = \frac{9.54}{7} = 1.363 \frac{g}{sec} \quad \text{(Εξίσωση 60)}$$

Υδραυλική διάμετρος και διατομή κάθε αγωγού:

$$D = \frac{2\beta d}{\beta + \delta} = 0.493 \text{ cm} \quad \text{(Εξίσωση 61)}$$

$$A = \beta d = 0.70992 \text{ cm}^2 \quad \text{(Εξίσωση 62)}$$

Επομένως:

$$G = \frac{1.363}{0.70992} = 1.92 \frac{g}{sec \text{ cm}^2} \quad \text{(Εξίσωση 63)}$$

Η μέση τιμή της θερμοκρασίας του ψυκτικού αέρα υπολογίζεται:

$$t_{av} = \frac{t_{in} + t_{out}}{2} = \frac{35 + 71}{2} = 53 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{(Εξίσωση 64)}$$

Οι φυσικές ιδιότητες του αέρα προκύπτουν από το διάγραμμα του σχήματος 26.

Επομένως έχουμε:

$$K = 0.0000703 \frac{cal}{sec \text{ cm } ^\circ\text{C}} \quad \text{(Εξίσωση 65)}$$

$$\mu = 0.000194 \frac{g}{cm \text{ sec}} \quad \text{(Εξίσωση 66)}$$

$$\rho = 0.00112 \frac{g}{cm^3} \quad \text{(Εξίσωση 67)}$$

Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτει ο αριθμός Reynolds, εν συνεχεία ο παράγοντας J Colburn και τελικά ο συντελεστής h_c .

$$N_R = \frac{(1.92)(0.493)}{0.000194} = 4879$$

$$J = \frac{0.023}{4879^{0.2}} = 0.0042$$

$$h_c = (0.0042)(0.24)(1.92) \left[\frac{(0.24)(0.000194)}{0.0000703} \right]^{-2/3} = 0.00255 \frac{cal}{sec \text{ cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Ο συντελεστής εξαναγκασμένης συναγωγής θα είναι ελαφρώς υψηλότερος στην είσοδο του αέρα ψύξης του εναλλάκτη θερμότητας λόγω των επιπλέον στροβιλισμών που αναπτύσσονται. Αυτή η μικρή αύξηση αγνοείται συντηρητικά εδώ. Ο συντελεστής απόδοσης των πτερυγίων πρέπει να ληφθεί υπόψη επειδή θα δημιουργηθεί κλίση θερμοκρασίας κατά μήκος των πτερυγίων του εναλλάκτη θερμότητας.

$$m = \sqrt{\frac{2(0.00255)}{0.409(0.152)}} = 0.286 \quad \text{(Εξίσωση 68)}$$

$$md = (0.286)(0.272) = 0.077792 \quad \text{(Εξίσωση 69)}$$

$$\eta = \frac{\tanh 0.077792}{0.077792} = 99.8\% \quad \text{(Εξίσωση 70)}$$

Διορθωμένη τιμή του συντελεστή εξαναγκασμένης συναγωγής h_c :

$$h_c = 0.00255(0.998) = 0.0025449 \frac{\text{cal}}{\text{sec cm}^2\text{°C}} \quad \text{(Εξίσωση 71)}$$

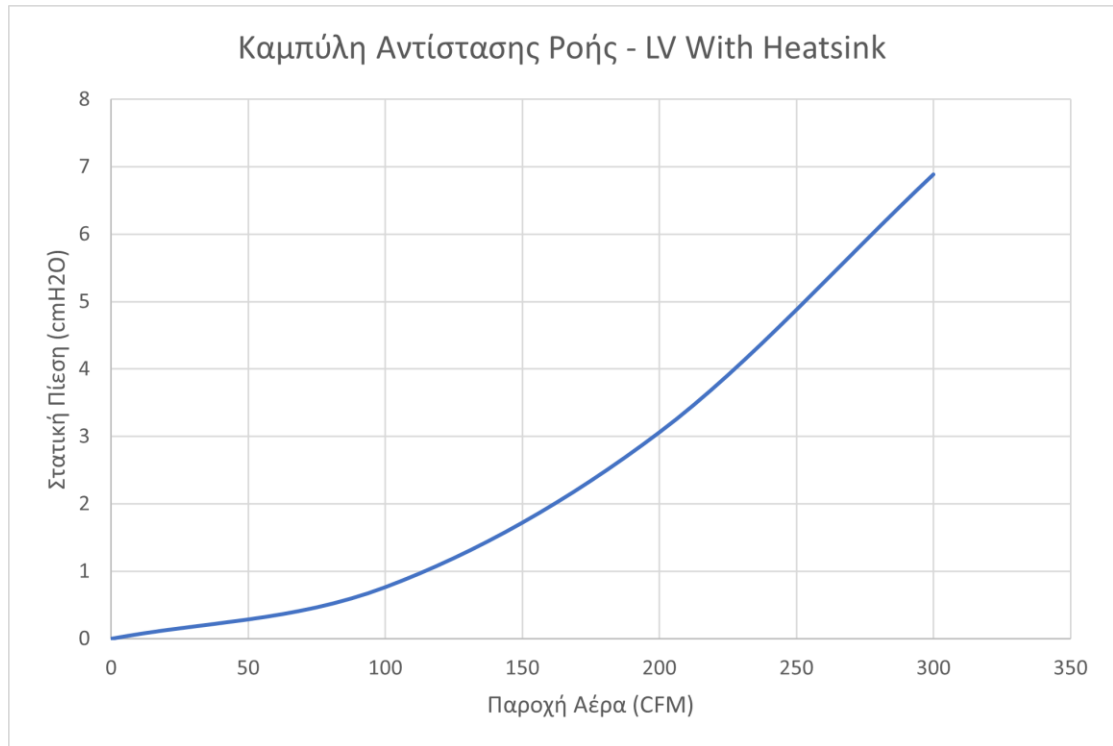
Η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί τώρα να υπολογιστεί.

$$\Delta T_B = \frac{(320)(0.239)}{[(111)(36)+(2)(111)(9.5)+(2)(36)(9.5)](0.0025449)} = 4.43\text{°C}$$

Η μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία της επιφάνειας του μετατροπέα υπολογίζεται:

$$t_s = T_{op} + \Delta T_A + \Delta T_B = 35 + 36 + 4.43 = 75.43\text{°C} \quad \text{(Εξίσωση 72)}$$

Παρατηρείται μείωση 7.64°C στην επιφάνεια του μετατροπέα DC-DC με την χρήση εναλλάκτη θερμότητας με πτερύγια, επιβεβαιώνοντας την σχεδιαστική μας επιλογή. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία υπολογισμού των νέων πτώσεων στατικής πίεσης είμαστε σε θέση να χαράξουμε το νέο διάγραμμα αντίστασης ροής του χώρου χαμηλής τάσης, το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω.



4.3.2 Κουτί Υψηλής Τάσης

Οι εναλλάκτες θερμότητας του χώρου υψηλής τάσης είναι 20 πανομοιότυποι μεταλλάκτες. Κάθε ένας σχηματίζει 13 αγωγούς μήκους $\alpha = 5.24$ mm και πλάτους $\beta = 9$ mm. Τα πτερύγια είναι πάχους $\delta = 1$ mm. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία προκύπτουν τα εξής χαρακτηριστικά:

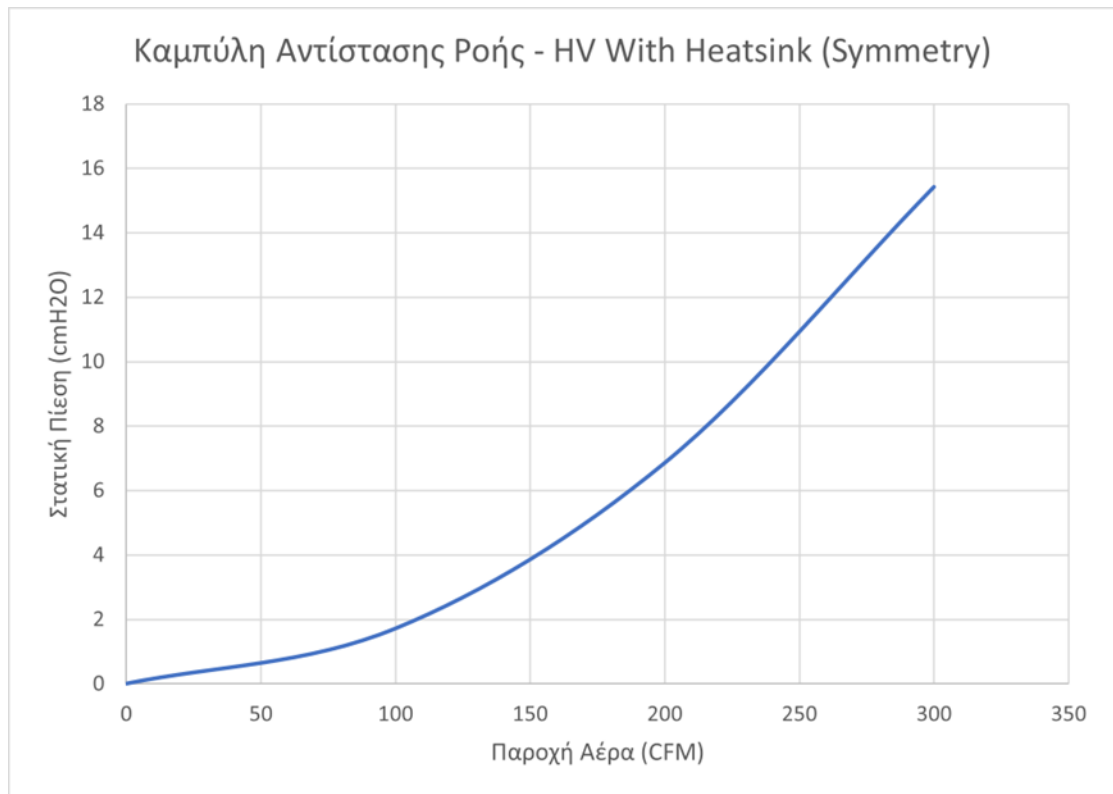
$$\eta = 96.01\% \quad (\text{Εξίσωση 73})$$

$$h_c = 0.0305 \frac{\text{cal}}{\text{sec cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \quad (\text{Εξίσωση 74})$$

$$\Delta T_B = 6^\circ\text{C} \quad (\text{Εξίσωση 75})$$

$$t_s = T_{op} + \Delta T_A + \Delta T_B = 30 + 5 + 6 = 41^\circ\text{C} \quad (\text{Εξίσωση 76})$$

Παρατηρείται μείωση 12.28°C στην επιφάνεια του κελιών μπαταριών με την χρήση εναλλακτών θερμότητας με πτερύγια, επιβεβαιώνοντας την σχεδιαστική μας επιλογή. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία υπολογισμού των νέων πτώσεων στατικής πίεσης είμαστε σε θέση να χαράξουμε το νέο διάγραμμα αντίστασης ροής του χώρου υψηλής τάσης, το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω.



4.4 Επιλογή Ανεμιστήρων

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο της εφαρμογής των αρχών σχεδιασμού συστημάτων ψύξης με εξαναγκασμένη συναγωγή για τον συσσωρευτή ενέργειας, είμαστε σε θέση να επιλέξουμε τους ανεμιστήρες που θα χρησιμοποιηθούν για την ψύξη των χώρων υψηλής και χαμηλής τάσης, λαμβάνοντας υπόψη τις καμπύλες αντίστασης ροής του κάθε χώρου και των προδιαγραφών που τέθηκαν στο κεφάλαιο 2.

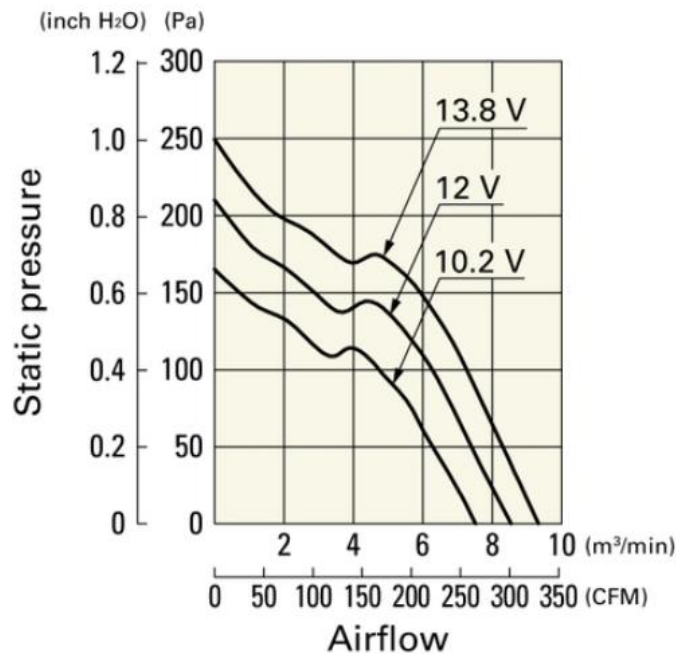
Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την καμπύλη λειτουργίας του κάθε ανεμιστήρα, όπως αυτή δίνεται από τον εκάστοτε κατασκευαστή, και τις καμπύλες αντίστασης της ροής μπορούμε να βρούμε το σημείο λειτουργίας του ανεμιστήρα για κάθε εφαρμογή. Πρόκειται για το σημείο στο οποίο τέμνονται οι δυο καμπύλες. Στο σημείο αυτό επιβάλλεται η παροχή

του ψυκτικού αέρα να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη ικανή παροχή για την διαχείριση των θερμικών φορτίων που υπολογίστηκε παραπάνω. Έπειτα, ελέγχεται το βάρος του κάθε ανεμιστήρα με στόχο την ελαχιστοποίησή του, αλλά και η κατανάλωση του για λόγους αποδοτικότητας. Είναι προφανές πως δοκιμάστηκαν αποκλειστικά ανεμιστήρες που συμβαδίζουν με τις ηλεκτρικές προδιαγραφές του κεφαλαίου 2.

Τελικά, για τις ψυκτικές ανάγκες του χώρου υψηλής τάσης επιλέχθηκαν 2 ανεμιστήρες 9GV1512H501 της εταιρίας SANYO DENKI διαστάσεων 150×150×50 mm, ένας για κάθε συμμετρικό χώρο, ενώ για τον χώρο χαμηλής τάσης επιλέχθηκαν 2 ανεμιστήρες 9GV1212P1J01 της εταιρίας SANYO DENKI, διαστάσεων 120×120×38 mm ένας στην είσοδο (δεξιά) και ένας στην έξοδο (αριστερά) του κουτιού. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας τους παρουσιάζονται παρακάτω.

9GV1512H501 With pulse sensor

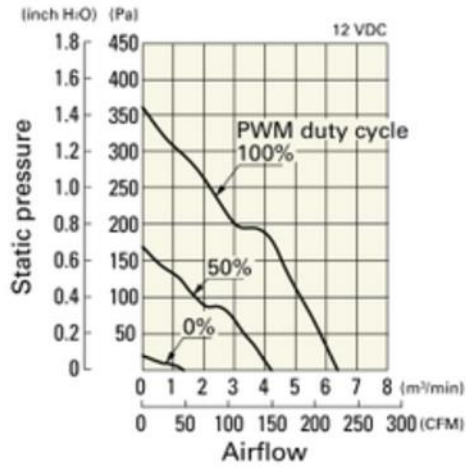
Operating voltage range



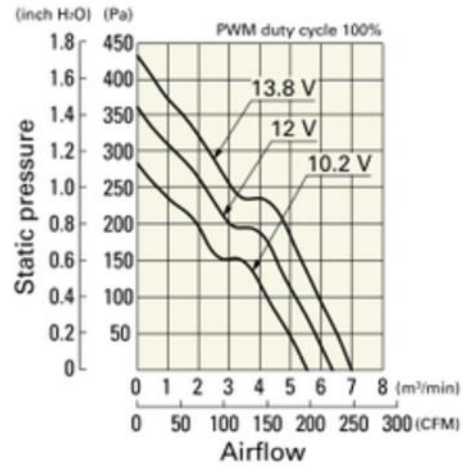
Σχήμα 27: Χαρακτηριστική καμπύλη ανεμιστήρα 9GV1512H501

9GV1212P1J01 With pulse sensor with PWM control

PWM duty cycle



Operating voltage range



Σχήμα 28: Χαρακτηριστική καμπύλη ανεμιστήρα 9GV1212P1J01

5. Προσομοίωση Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής

Στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση κρίσιμων εξαρτημάτων, όπως το σύστημα ψύξης ενός συσσωρευτή ενέργειας απαιτούν μια ολοκληρωμένη κατανόηση της δυναμικής των ρευστών και της θερμικής διαχείρισης. Καθώς η ζήτηση για οχήματα υψηλών επιδόσεων και αποδόσεων συνεχίζει να αυξάνεται, οι ακριβείς προσομοιώσεις έχουν αποκτήσει ύψιστη σημασία στη διαδικασία σχεδιασμού. Ένα απαραίτητο εργαλείο που έχει αποδειχθεί καθοριστικό από την άποψη αυτή είναι το ANSYS Fluent, ένα ισχυρό λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Οι παραδοσιακές μέθοδοι σχεδιασμού συστημάτων ψύξης συχνά δεν παρέχουν το επίπεδο ακρίβειας που απαιτείται για αυτές τις εξαιρετικά εξειδικευμένες εφαρμογές.

Το ANSYS Fluent, με τις προηγμένες δυνατότητες CFD, προσφέρει στους μηχανικούς ένα εικονικό εργαστήριο όπου μπορούν να προσομοιώσουν και να αναλύσουν σύνθετα φαινόμενα της ροής και της μεταφοράς θερμότητας. Το λογισμικό επιτρέπει τη λεπτομερή εξέταση της θερμικής συμπεριφοράς στο εσωτερικό του δοχείου του συσσωρευτή, επιτρέποντας στους μηχανικούς να αξιολογούν την αποτελεσματικότητα των διαφόρων στρατηγικών ψύξης και να επαναλαμβάνουν γρήγορα τα σχέδια με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να διερευνηθούν μια πληθώρα επιλογών σχεδιασμού, να προβλεφθούν τα αποτελέσματα των επιδόσεων και να ρυθμιστούν οι στρατηγικές ψύξης με πρωτοφανή ακρίβεια.

Η ανάγκη για προσομοίωση προκύπτει από την περίπλοκη αλληλεπίδραση πολλαπλών παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος ψύξης. Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν τη γεωμετρική διαμόρφωση του δοχείου του συσσωρευτή, τη θέση και το σχεδιασμό των καναλιών ψύξης, των εναλλακτών θερμότητας και τη δυναμική φύση της ροής του ρευστού γύρω από τα εξαρτήματα. Το ANSYS Fluent διευκολύνει τη δημιουργία προσομοιώσεων υψηλής ακρίβειας που αποτυπώνουν αυτές τις πολυπλοκότητες, βοηθώντας στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε κάθε στάδιο της διαδικασίας σχεδιασμού.

Επιπλέον, ο διαγωνισμός Formula Student, που χαρακτηρίζεται από αυστηρούς κανονισμούς και στενούς περιορισμούς επιδόσεων, απαιτεί μια σχολαστική προσέγγιση στο σχεδιασμό. Το ANSYS Fluent επιτρέπει στους μηχανικούς να αξιολογούν εικονικά διάφορα σενάρια σχεδιασμού και παραμέτρους απόδοσης, διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τους κανόνες του διαγωνισμού και βελτιστοποιώντας παράλληλα το σύστημα ψύξης για μέγιστη απόδοση και αξιοπιστία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε για την επιβεβαίωση των επιδόσεων του υπό εξέταση ψυκτικού συστήματος αλλά και για την οπτικοποίηση αποτελεσμάτων που δεν μπορούσαν να υπολογιστούν στην φάση του σχεδιασμού, όπως η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας αλλά και για την βελτιστοποίησή του

συστήματος. Προφανώς εξαιτίας της περίπλοκης γεωμετρίας και των περιορισμένων υπολογιστικών μέσων, το σχέδιο του συσσωρευτή ενέργειας απλοποιήθηκε σε έναν βαθμό.

5.1 Πλέγμα

Το πλέγμα, στο πλαίσιο της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD), είναι ένα θεμελιώδες βήμα στη διαδικασία αριθμητικής προσομοίωσης που περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου σε μικρότερα, διασυνδεδεμένα στοιχεία ή κελιά. Το πλέγμα χρησιμεύει ως υπολογιστικό δίκτυωμα στο οποίο επιλύονται οι μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν τη ροή ρευστών, τη μεταφορά θερμότητας και άλλα φυσικά φαινόμενα. Η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του πλέγματος παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια, την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία των προσομοιώσεων CFD.

Ένας πρωταρχικός ρόλος του πλέγματος στο CFD είναι η ακριβής αναπαράσταση της πολύπλοκης γεωμετρίας του φυσικού συστήματος που προσομοιώνεται. Είτε πρόκειται για μια πτέρυγα αεροσκάφους, έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης ή ένα σύστημα ψύξης για ένα ηλεκτρικό όχημα, το πλέγμα πρέπει να αποτυπώνει πιστά τις περίπλοκες λεπτομέρειες των εξαρτημάτων και των αλληλεπιδράσεών τους. Η ανάλυση του πλέγματος, η οποία επιτυγχάνεται μέσω στοιχείων κατάλληλου μεγέθους, είναι κρίσιμη σε περιοχές ενδιαφέροντος όπως τα οριακά στρώματα, οι κραδασμοί και οι περιοχές με ταχείες αλλαγές στη ροή ή τη θερμοκρασία.

Επιπλέον, το πλέγμα επηρεάζει το υπολογιστικό κόστος της προσομοίωσης. Ένα καλά δομημένο πλέγμα, με βέλτιστη ισορροπία μεταξύ του μεγέθους των στοιχείων και της ανάλυσης του δικτύωματος, εξασφαλίζει υπολογιστική αποδοτικότητα. Από την άλλη πλευρά, ένα κακοσχεδιασμένο πλέγμα μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις, εμποδίζοντας ενδεχομένως τη σκοπιμότητα της προσομοίωσης. Η επιλογή μεταξύ διαφορετικών τύπων στοιχείων, όπως τετραεδρικά ή εξαεδρικά, επηρεάζει επίσης την αριθμητική σταθερότητα και τη σύγκλιση της προσομοίωσης. Συνολικά, το πλέγμα είναι μια κρίσιμη πτυχή του CFD που επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια και την υπολογιστική αποδοτικότητα των προσομοιώσεων, καθιστώντας το αναπόσπαστο βήμα στη διαδικασία απόκτησης πληροφοριών σχετικά με τα φαινόμενα ροής ρευστών και μεταφοράς θερμότητας.

5.1.1 Πλέγμα Οριακού Στρώματος

Το πλέγμα οριακού στρώματος είναι μια εξειδικευμένη πτυχή της δημιουργίας πλέγματος στην Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) που επικεντρώνεται στην αποτύπωση των ιδιαιτεροτήτων του οριακού στρώματος - ένα λεπτό στρώμα ρευστού δίπλα σε μια στερεή επιφάνεια όπου η ροή παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις ταχύτητας. Το οριακό στρώμα παίζει καθοριστικό ρόλο σε διάφορα φαινόμενα ρευστοδυναμικής, ιδίως σε εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας, όπως αυτές που συναντώνται στο σχεδιασμό συστημάτων ψύξης για οχήματα. Η ακριβής αναπαράσταση του οριακού στρώματος είναι

απαραίτητη για την αποτύπωση των κλίσεων θερμοκρασίας, των ιξωδών φαινομένων και άλλων θερμικών συμπεριφορών κοντά σε στερεές επιφάνειες.

Στο πλέγμα οριακού στρώματος, το πλέγμα βελτιώνεται κοντά στα τοιχώματα για να εξασφαλιστεί υψηλότερη ανάλυση εντός του οριακού στρώματος. Αυτή η βελτίωση είναι απαραίτητη επειδή το οριακό στρώμα χαρακτηρίζεται από ταχείες μεταβολές της ταχύτητας και της θερμοκρασίας και απαιτείται λεπτομερές πλέγμα για την ακριβή αποτύπωση αυτών των διακυμάνσεων. Το Ansys Fluent, μεταξύ άλλων λογισμικών CFD, παρέχει εργαλεία για αυτόματη ή καθορισμένη από τον χρήστη πλεγματοποίηση του οριακού στρώματος, επιτρέποντας στους μηχανικούς να ελέγχουν την πυκνότητα του πλέγματος με βάση τη φυσική του προβλήματος και το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας.

Η αποτελεσματική πλεγματοποίηση οριακών στρωμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική στις θερμικές αναλύσεις, καθώς επιτρέπει την ακριβή μοντελοποίηση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του ρευστού και των στερεών επιφανειών. Στο πλαίσιο του σχεδιασμού ενός συστήματος ψύξης για το δοχείο συσσωρευτών ενός αυτοκινήτου Formula Student, ένα αποτελεσματικό πλέγμα οριακού στρώματος εξασφαλίζει ότι η προσομοίωση προβλέπει με ακρίβεια την κατανομή της θερμοκρασίας εντός των καναλιών ψύξης και κατά μήκος των επιφανειών του δοχείου. Αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος ψύξης, την πρόληψη της υπερθέρμανσης και την ενίσχυση της συνολικής αξιοπιστίας του ηλεκτρικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και πρόωσης.

Η διαδικασία βελτίωσης του πλέγματος περιλαμβάνει την αύξηση της πυκνότητάς του κοντά στα τοιχώματα, ώστε να αποτυπωθούν οι ταχείες μεταβολές της ταχύτητας και της θερμοκρασίας που χαρακτηρίζουν το οριακό στρώμα. Παράμετροι όπως το ύψος του πρώτου κελιού ή ο αριθμός των στρωμάτων πρίσματος μπορούν να καθοριστούν από τους χρήστες για τον έλεγχο της πυκνότητας του πλέγματος κοντά στις στερεές επιφάνειες.

5.1.2 Έλεγχος Μεγέθους των Στοιχείων του Πλέγματος

Ο έλεγχος του μεγέθους των στοιχείων είναι μια κρίσιμη πτυχή της πλεγματοποίησης που επιτρέπει στους μηχανικούς να έχουν ακρίβεια και έλεγχο της ανάλυσης του πλέγματος σε όλο το υπολογιστικό πεδίο. Το μέγεθος των στοιχείων, ή το μέγεθος των μεμονωμένων κελιών που αποτελούν το πλέγμα, είναι μια βασική παράμετρος που επηρεάζει την υπολογιστική απόδοση της προσομοίωσης. Στο πλαίσιο του σχεδιασμού ενός συστήματος ψύξης για το δοχείο συσσωρευτών ενός αυτοκινήτου Formula Student, ο προσεκτικός έλεγχος του μεγέθους των στοιχείων καθίσταται υψίστης σημασίας για την αποτύπωση περίπλοκων λεπτομερειών σε περιοχές ενδιαφέροντος, όπως τα κανάλια ψύξης και οι εναλλάκτες θερμότητας.

Το Ansys Fluent, μεταξύ άλλων προηγμένων εργαλείων πλέγματος, παρέχει τη δυνατότητα εκλέπτυνσης ή χονδροποίησης του πλέγματος με βάση τα γεωμετρικά

χαρακτηριστικά και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της προσομοίωσης. Ο έλεγχος του μεγέθους των στοιχείων επιτρέπει στους χρήστες να ορίζουν περιοχές όπου είναι επιθυμητό ένα λεπτότερο ή χονδρότερο πλέγμα, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των μοτίβων ροής, την παρουσία γεωμετρικών λεπτομερειών ή την ύπαρξη περιοχών όπου υψηλότερα επίπεδα ανάλυσης είναι κρίσιμα.

Για τη θερμική ανάλυση στο δοχείο του συσσωρευτή, ο έλεγχος του μεγέθους των στοιχείων είναι αναπόσπαστο στοιχείο για την αποτελεσματική αποτύπωση των κλίσεων θερμοκρασίας. Το λεπτό πλέγμα σε περιοχές με σημαντική μεταφορά θερμότητας, όπως οι επιφάνειες των κελιών μπαταριών, η επιφάνεια του μετατροπέα DC-DC, γύρω από πτερύγια ψύξης ή μέσα σε περίπλοκα περάσματα ροής, διασφαλίζει ότι η προσομοίωση προβλέπει με ακρίβεια τη θερμική συμπεριφορά. Από την άλλη πλευρά, το χονδρότερο πλέγμα σε λιγότερο κρίσιμες περιοχές συμβάλλει στη βελτιστοποίηση των υπολογιστικών πόρων χωρίς να θυσιάζεται η συνολική ακρίβεια. Ο έλεγχος του μεγέθους των στοιχείων, επομένως, δίνει τη δυνατότητα επίτευξης μιας ισορροπίας μεταξύ της υπολογιστικής απόδοσης και της ακρίβειας της λύσης.

5.1.3 Τετραεδρικά και Εξαεδρικά Στοιχεία Πλέγματος

Η επιλογή μεταξύ τετραεδρικών και εξαεδρικών στοιχείων πλέγματος είναι μια κρίσιμη απόφαση στη διαδικασία της πλεγματοποίησης, καθένα από τα οποία προσφέρει ξεχωριστά πλεονεκτήματα και εκτιμήσεις. Τα τετραεδρικά στοιχεία είναι γεωμετρικά απλούστερα και πιο ευέλικτα, καθιστώντας τα κατάλληλα για πολύπλοκες γεωμετρίες και ακανόνιστα σχήματα. Η ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε περίπλοκες δομές παρέχει σημαντικό πλεονέκτημα στην αποτύπωση μικρών λεπτομερειών, όπως αυτές που βρίσκονται στα κανάλια ψύξης και γύρω από πολύπλοκα εξαρτήματα μέσα στο δοχείο συσσωρευτών ενός αυτοκινήτου Formula Student. Ωστόσο, τα τετραεδρικά στοιχεία μπορούν να εισάγουν αριθμητικές προκλήσεις, καθώς μπορεί να οδηγήσουν σε λιγότερο σταθερές προσομοιώσεις που απαιτούν πλέγματα υψηλότερης ανάλυσης για την επίτευξη ακρίβειας.

Από την άλλη πλευρά, τα εξαεδρικά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το κανονικό τους σχήμα, το οποίο ενισχύει την αριθμητική σταθερότητα και τη σύγκλιση στις προσομοιώσεις. Η δομημένη φύση των εξαεδρικών πλεγμάτων επιτρέπει καλύτερο έλεγχο της ποιότητας του πλέγματος και συχνά οδηγεί σε πιο αποδοτικούς υπολογισμούς. Στο πλαίσιο του σχεδιασμού ενός συστήματος ψύξης, τα εξαεδρικά στοιχεία μπορεί να είναι πλεονεκτικά σε περιοχές όπου είναι επιθυμητό ένα ομαλό, κανονικό πλέγμα, όπως σε μεγάλες, ομοιόμορφες περιοχές με σχετικά μοτίβα - φαινόμενα ροής.

Η επιλογή μεταξύ τετραεδρικών και εξαεδρικών στοιχείων επηρεάζεται συχνά από ένα συμβιβασμό μεταξύ γεωμετρικής ευελιξίας και αριθμητικής σταθερότητας. Για περίπλοκες γεωμετρίες ή περιοχές που απαιτούν λεπτομερή ανάλυση, μπορεί να προτιμώνται τετραεδρικά στοιχεία. Αντίθετα, σε μεγαλύτερες, πιο συνηθισμένες περιοχές,

όπου η σταθερότητα και η υπολογιστική αποδοτικότητα είναι υψίστης σημασίας, τα εξαεδρικά στοιχεία μπορεί να είναι καταλληλότερα. Στην παρούσα διπλωματική έγινε μια υβριδική προσέγγιση, αξιοποιώντας και τους δύο τύπους στοιχείων σε μια ενιαία προσομοίωση, επιτυγχάνοντας την ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικού κόστους.

5.1.4 Παράγοντες Ποιότητας Πλέγματος

Οι παράγοντες ποιότητας του πλέγματος διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των προσομοιώσεων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Οι δύο βασικοί παράγοντες ποιότητας πλέγματος στους οποίους εστίασαμε κατά την φάση της πλεγματοποίησης είναι η «λοξότητα» (skewness) και η ορθογωνική ποιότητα (orthogonal quality).

Η λοξότητα είναι ένα μέτρο του πόσο κοντά βρίσκεται ένα μεμονωμένο στοιχείο πλέγματος σε ένα ιδανικό σχήμα, με χαμηλές τιμές λοξότητας να υποδηλώνουν ένα πιο κανονικό και καλά διαμορφωμένο στοιχείο. Στις προσομοιώσεις CFD, ιδίως σε εκείνες που περιλαμβάνουν θερμικές αναλύσεις, η διατήρηση χαμηλής λοξότητας είναι απαραίτητη. Η υψηλή λοξότητα μπορεί να οδηγήσει σε ανακρίβειες στις προβλέψεις ροής και μεταφοράς θερμότητας, καθώς τα παραμορφωμένα στοιχεία μπορούν να εισάγουν αριθμητικά σφάλματα και να επηρεάσουν αρνητικά τη σταθερότητα της προσομοίωσης. Τα εργαλεία πλέγματος, όπως το Ansys Fluent, παρέχουν στους μηχανικούς τη δυνατότητα απεικόνισης και ελέγχου της λοξότητας, επιτρέποντας προσαρμογές στο πλέγμα για την ενίσχυση της ακρίβειας της προσομοίωσης.

Η ορθογωνική ποιότητα, ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας, αξιολογεί την ευθυγράμμιση των γειτονικών στοιχείων του πλέγματος. Η υψηλή ορθογωνική ποιότητα δείχνει ότι τα γειτονικά στοιχεία είναι καλά ευθυγραμμισμένα, ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα παρεμβολής και ενισχύοντας την αριθμητική σταθερότητα. Όπως και η χαμηλή λοξότητα η διατήρηση καλής ορθογωνικής ποιότητας είναι απαραίτητη για την ακριβή πρόβλεψη της μεταφοράς θερμότητας και της ροής ρευστών. Μια καλή ορθογωνική ποιότητα διασφαλίζει ότι το πλέγμα διευκολύνει αξιόπιστες προσομοιώσεις ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα που σχετίζονται με την παρεμβολή των μεταβλητών σε γειτονικά στοιχεία.

Σύμφωνα με την Ansys, το πλέγμα διαβαθμίζεται από άριστο έως μη αποδεκτό ανάλογα με τις τιμές των δυο αυτών συντελεστών. Συγκεκριμένα, για τιμή Skewness 0 έως 0.25 πρόκειται για άριστο πλέγμα, από 0.25 έως 0.5 πολύ καλό, από 0.5 έως 0.8 καλό, από 0.8 έως 0.94 αποδεκτό, από 0.95 έως 0.97 κακό και από 0.98 έως 1.0 μη αποδεκτό. Αντίστοιχα για τιμή orthogonal quality από 0 έως 0.001 πρόκειται για μη αποδεκτό πλέγμα, από 0.001 έως 0.14 κακό, από 0.15 έως 0.20 αποδεκτό, από 0.20 έως 0.69 καλό, από 0.7 έως 0.95 πολύ καλό και από 0.95 έως 1.0 άριστο. Το πλέγμα για το σύστημα που μελετάται στην παρούσα εργασία θα πρέπει να συμμορφώνεται με τις τιμές που προβλέπονται από

την Ansys για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων. Παρακάτω απεικονίζονται τα δυο πλέγματα που προέκυψαν με τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών ποιότητάς τους, ένα για τον χώρο χαμηλής τάσης και ένα για τον συμμετρικό χώρο υψηλής τάσης.

5.2 Ρύθμιση Προσομοίωσης

Έχοντας ορίσει ένα υψηλής ποιότητας πλέγμα το οποίο αναπαριστά με ακρίβεια την γεωμετρία του συσσωρευτή ενέργειας, επόμενο βήμα, αποτελεί η ρύθμιση της προσομοίωσης κατά τέτοιον τρόπο που να αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Αποτελεί μια εκτενή και πολύπλευρη προσεγγιστική διαδικασία, απαραίτητη για την εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα για ένα πολυπαραγοντικό πρόβλημα όπως το σύστημα ψύξης ενός δοχείου συσσωρευτών. Σκοπός είναι να προσδιοριστούν οι συνθήκες λειτουργίας του συστήματος όπως ακριβώς ορίζονται και στην πραγματικότητα, ενώ ταυτόχρονα απαραίτητη είναι η επιλογή των κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων επίλυσης και των φυσικών ιδιοτήτων που διέπουν το σύστημα.

5.2.1 Ρυθμίσεις Επιλύτη

Το ANSYS Fluent χρησιμοποιεί έναν συζευγμένο επιλύτη που επιλύει ταυτόχρονα τις εξισώσεις Navier-Stokes για τη ροή και την εξίσωση ενέργειας για τη μεταφορά θερμότητας. Οι εξισώσεις Navier-Stokes διέπουν τη διατήρηση της μάζας και της ορμής, ενώ η εξίσωση ενέργειας λαμβάνει υπόψη τις θερμικές επιδράσεις, καθιστώντας το ιδανικό εργαλείο για την ανάλυση της θερμικής συμπεριφοράς του συστήματος ψύξης του δοχείου του συσσωρευτή. Ο συζευγμένος χαρακτήρας του επιλύτη επιτρέπει την ολοκληρωμένη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων της δυναμικής των ρευστών και της μεταφοράς θερμότητας εντός του συστήματος.

5.2.2 Μοντέλα Τύρβης

Η επιλογή ενός κατάλληλου μοντέλου τύρβης είναι ζωτικής σημασίας για την ακριβή αποτύπωση των πολύπλοκων φαινομένων ροής που υπάρχουν σε διάφορες μηχανολογικές εφαρμογές. Τα μοντέλα τύρβης είναι μαθηματικές διατυπώσεις που περιγράφουν την τυρβώδη συμπεριφορά της ροής των ρευστών, βοηθώντας στην προσομοίωση των επιδράσεων της τύρβης σε μεταβλητές όπως η ταχύτητα και η πίεση. Το ANSYS Fluent παρέχει μια σειρά μοντέλων τύρβης, καθένα από τα οποία έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζει συγκεκριμένες συνθήκες ροής και πολυπλοκότητες.

Ένα συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο τύρβης είναι το μοντέλο k-epsilon. Αυτό το μοντέλο δύο εξισώσεων υπολογίζει την τυρβώδη κινητική ενέργεια (k) και τον ρυθμό διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (epsilon). Το μοντέλο k-epsilon είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την προσομοίωση ροών με μέτριο έως υψηλό αριθμό Reynolds και χρησιμοποιείται συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές. Η απλότητα και η υπολογιστική του

αποτελεσματικότητα το καθιστούν δημοφιλή επιλογή, αλλά μπορεί να δυσκολεύεται στην ακριβή πρόβλεψη πολύπλοκων ροών με έντονη στροβιλισμό ή περιστροφή.

Τα μοντέλα Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), συμπεριλαμβανομένου του k - ω SST (Shear-Stress Transport), προσφέρουν μια πιο προηγμένη προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταφορά των τυρβωδών διατμητικών τάσεων. Το μοντέλο k - ω SST συνδυάζει στοιχεία των μοντέλων k - \epsilonpsilon και k - ω , παρέχοντας ακρίβεια σε ένα ευρύτερο φάσμα συνθηκών ροής. Είναι γνωστό για την καλή του απόδοση σε περιοχές με δυσμενείς κλίσεις πίεσης, καθιστώντας το κατάλληλο για την προσομοίωση ροών πάνω από αεροτομές ή γύρω από πολύπλοκες γεωμετρίες. Ωστόσο, οι υπολογιστικές απαιτήσεις του μπορεί να είναι υψηλότερες σε σύγκριση με το απλούστερο μοντέλο k - \epsilonpsilon .

Το μοντέλο Large Eddy Simulation (LES) είναι μια άλλη κατηγορία μοντέλων τύρβης που είναι διαθέσιμα στο ANSYS Fluent, παρέχοντας μια πιο άμεση προσέγγιση για την επίλυση τυρβωδών δομών. Το LES είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό για την αποτύπωση ασταθών, μεγάλης κλίμακας τυρβωδών κινήσεων σε ροές με διακριτό διαχωρισμό και πολύπλοκες γεωμετρίες. Ωστόσο, το υπολογιστικό κόστος του LES είναι σημαντικά υψηλότερο από τα μοντέλα RANS, καθιστώντας το καταλληλότερο για προσομοιώσεις σε υπολογιστικούς πόρους υψηλής απόδοσης.

Η επιλογή του μοντέλου τύρβης εξαρτάται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της ροής που προσομοιώνεται και τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους. Για τον λόγο αυτό στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε το μοντέλο k - \epsilonpsilon .

5.2.3 Κριτήρια Σύγκλισης

Τα κριτήρια σύγκλισης, ιδίως τα υπολειμματικά (residuals), παίζουν ζωτικό ρόλο στον προσδιορισμό του πότε μια προσομοίωση έχει συγκλίνει σε μια σταθερή και ακριβή λύση. Τα υπολειμματικά αντιπροσωπεύουν τη διαφορά μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων της λύσης των κυρίαρχων εξισώσεων, όπως οι εξισώσεις Navier-Stokes για τη ροή ρευστών και η εξίσωση ενέργειας για τη μεταφορά θερμότητας. Η σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν αυτά τα υπολειμματικά πέφτουν κάτω από ένα καθορισμένο όριο, υποδεικνύοντας ότι οι περαιτέρω επαναλήψεις δεν μεταβάλλουν σημαντικά τη λύση. Ο καθορισμός κατάλληλων κριτηρίων σύγκλισης είναι απαραίτητος για την εξισορρόπηση της ανάγκης για ακρίβεια με την υπολογιστική αποδοτικότητα.

Τα υπολειμματικά που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν συνήθως εκείνα για τη συνέχεια, την ορμή, την ενέργεια και άλλες σχετικές μεταβλητές. Οι μηχανικοί παρακολουθούν αυτά τα υπολειμματικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας προσομοίωσης και θέτουν κριτήρια σύγκλισης με βάση τα αποδεκτά επίπεδα για κάθε μεταβλητή. Η επιλογή των ορίων σύγκλισης εξαρτάται από τις ειδικές απαιτήσεις της προσομοίωσης, την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων και τους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους. Η εξεύρεση της σωστής ισορροπίας είναι ζωτικής σημασίας- τα υπερβολικά αυστηρά κριτήρια

μπορεί να οδηγήσουν σε περιττά υπολογιστικά έξοδα, ενώ τα υπερβολικά χαλαρά κριτήρια μπορεί να οδηγήσουν σε ανακριβείς ή μη συγκλίνουσες λύσεις. Στην παρούσα διπλωματική εργασία τέθηκαν τα υπολειμματικά στην τιμή $1 \cdot 10^{-7}$ καθώς η απλοποίηση της γεωμετρίας έχει προηγηθεί ενώ έγινε η επιλογή του υπολογιστικά οικονομικότερου μοντέλου τύρβης, με αποτέλεσμα να αμελείται το επιπλέον υπολογιστικό κόστος που προκύπτει από την επιλογή αρκετά χαμηλών κριτηρίων σύγκλισης εις βάρος της ακρίβειας.

5.2.4 Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες είναι βασικά στοιχεία στις προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), καθορίζοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ του ρευστού εντός του υπολογιστικού πεδίου και του περιβάλλοντός του. Ο ακριβής προσδιορισμός των οριακών συνθηκών είναι κρίσιμος για τη λήψη ρεαλιστικών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων, ιδίως σε εφαρμογές όπως η δικιά μας.

Σε κάθε προσομοίωση, οι οριακές συνθήκες εφαρμόζονται στις επιφάνειες που ορίζουν το υπολογιστικό πεδίο. Για το σύστημα ψύξης, οι συνθήκες εισόδου παίζουν καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό του τρόπου εισόδου του ψυκτικού μέσου στο πεδίο. Οι συνθήκες αυτές συνήθως περιλαμβάνουν τον καθορισμό παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα και μερικές φορές οι ιδιότητες τύρβης, αντικατοπτρίζοντας τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος ψύξης. Οι ακριβείς συνθήκες εισόδου είναι θεμελιώδους σημασίας για την αποτύπωση της αρχικής κατάστασης του ρευστού και της επακόλουθης συμπεριφοράς του εντός του συστήματος.

Οι συνθήκες εξόδου αντιπροσωπεύουν το σημείο όπου το ρευστό εξέρχεται από το πεδίο. Οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο διαχέεται η θερμότητα στο σύστημα. Στο πλαίσιο της θερμικής ανάλυσης, ο προσδιορισμός των συνθηκών εξόδου είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση του συνολικού ενεργειακού ισοζυγίου και της κατανομής της θερμοκρασίας εντός του δοχείου του συσσωρευτή. Οι αναντιστοιχίες ή οι ανακριβείς συνθήκες εξόδου μπορούν να οδηγήσουν σε μη φυσικά αποτελέσματα και να θέσουν σε κίνδυνο την αξιοπιστία της προσομοίωσης.

Τα συζευγμένα τοιχώματα είναι μια άλλη κρίσιμη πτυχή των οριακών συνθηκών, επιτρέποντας την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ του ρευστού και των στερεών συστατικών, όπως τα τοιχώματα του δοχείου του συσσωρευτή. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την αποτύπωση των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας εντός του συστήματος. Ο ορισμός των ιδιοτήτων των υλικών, των ρυθμών παραγωγής θερμότητας εντός των εξαρτημάτων και άλλων παραμέτρων στα όρια βελτιώνει περαιτέρω τη ρύθμιση της προσομοίωσης. Η ακρίβεια με την οποία καθορίζονται αυτές οι οριακές συνθήκες επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια των προβλέψεων, διασφαλίζοντας ότι η προσομοίωση CFD παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη δυναμική των ρευστών και τη θερμική συμπεριφορά που είναι κρίσιμες για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του συστήματος ψύξης.

Οι συνθήκες εισόδου κατά την προσομοίωση του χώρου υψηλής τάσης είναι velocity inlet με ταχύτητα εισόδου της ροής στους αγωγούς 15 m/s, η μέση δηλαδή ταχύτητα που αναπτύσσει το ηλεκτρικό μονοθέσιο κατά την διάρκεια του Endurance, του πιο σημαντικού αγωνίσματος των διαγωνισμών, και θερμοκρασία του ψυκτικού αέρα 30°C, αρκετά υψηλότερη από την μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος στην Γερμανία κατά τους εαρινούς μήνες. Αντίστοιχα, οι συνθήκες εισόδου κατά την προσομοίωση του χώρου χαμηλής τάσης είναι velocity inlet με θερμοκρασία ψυκτικού αέρα 35 °C, καθώς δεν έχουμε αγωγούς εισόδου αλλά ανεμιστήρες που διακινούν το ρευστό εσωτερικά του engine bay. Όσον αφορά τις συνθήκες εξόδου έχουμε και στις δυο περιπτώσεις pressure outlet.

5.2.5 Ρύθμιση Dynamic Mesh

Οι δυναμικές ρυθμίσεις πλέγματος στο ANSYS Fluent είναι ένα ισχυρό εργαλείο που επιτρέπει την προσομοίωση της ροής ρευστών γύρω από περιστρεφόμενες ή παραμορφούμενες δομές, όπως η περιστρεφόμενη περιοχή ενός ανεμιστήρα στο πλαίσιο του συστήματος ψύξης. Αυτές οι ρυθμίσεις επιτρέπουν στους μηχανικούς να μοντελοποιήσουν την κίνηση των ορίων εντός του υπολογιστικού πεδίου, παρέχοντας μια πιο ακριβή αναπαράσταση των πραγματικών σεναρίων.

Για τον περιστρεφόμενο τομέα ενός ανεμιστήρα, οι δυναμικές ρυθμίσεις πλέγματος παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποτύπωση των επιδράσεων της περιστροφής του ανεμιστήρα στο περιβάλλον ρευστό. Το δυναμικό μοντέλο πλέγματος λαμβάνει υπόψη τις αλλαγές στη γεωμετρία, την τοπολογία του πλέγματος και τις οριακές συνθήκες κατά τη διάρκεια κάθε χρονικού βήματος προσομοίωσης, επιτρέποντας την ακριβή αναπαράσταση της δυναμικής κίνησης. Με άλλα λόγια πρόκειται για ένα περιστρεφόμενο με την ταχύτητα των ανεμιστήρων χωρίο, για την μοντελοποίηση του οποίου σε κάθε επανάληψη της επίλυσης υπολογίζεται εκ νέου το πλέγμα του, αποθηκεύοντας ταυτόχρονα τα δεδομένα της προηγούμενης θέσης του. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου εξαρτήματα όπως οι ανεμιστήρες ή οι πτερωτές είναι αναπόσπαστο μέρος της λειτουργικότητας του συστήματος.

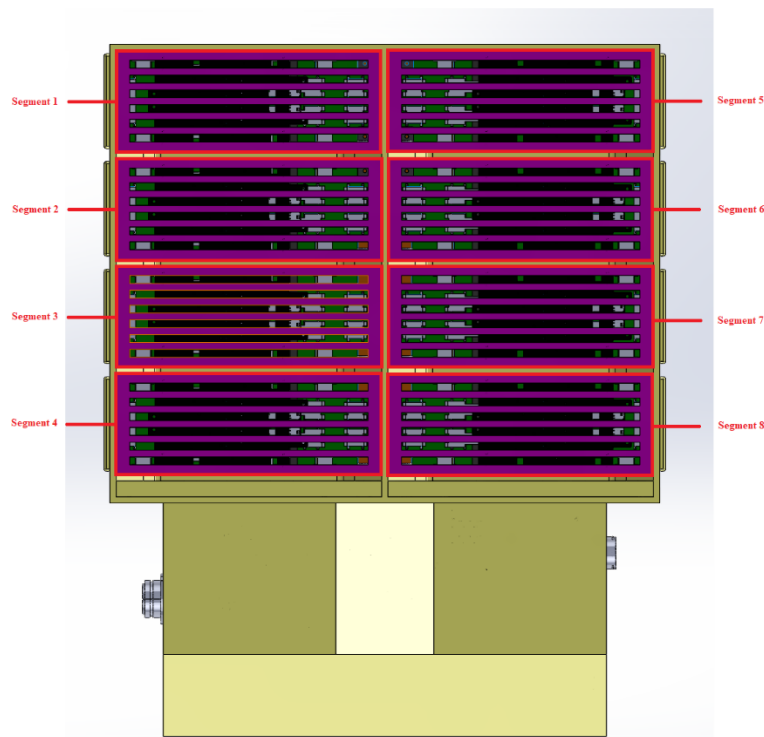
Οι μηχανικοί μπορούν να ορίσουν την περιστροφή των πτερυγίων του ανεμιστήρα, καθορίζοντας τις ταχύτητες περιστροφής και τον άξονα περιστροφής, μέσα στις ρυθμίσεις δυναμικού πλέγματος του ANSYS Fluent. Στη συνέχεια, το λογισμικό προσαρμόζει αυτόματα το πλέγμα ώστε να προσαρμόζεται στην μεταβαλλόμενη γεωμετρία, διασφαλίζοντας ότι η προσομοίωση αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τη δυναμική συμπεριφορά του περιστρεφόμενου ανεμιστήρα. Οι σωστά διαμορφωμένες ρυθμίσεις δυναμικού πλέγματος είναι ζωτικής σημασίας για την αποτύπωση σύνθετων μοτίβων ροής, κατανομών πίεσης και κλίσεων θερμοκρασίας που προκαλούνται από τον περιστρεφόμενο ανεμιστήρα στο πλαίσιο του συστήματος ψύξης του δοχείου του συσσωρευτή, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Η ρύθμιση αυτή χρησιμοποιήθηκε και στο υπό εξέταση πρόβλημα για την μοντελοποίηση των ανεμιστήρων του συστήματος.

6. Σχεδιασμός Συσσωρευτή Ενέργειας στο Λογισμικό SolidWorks

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η αναλυτική διαδικασία σχεδιασμού, στο λογισμικό SolidWorks, του συσσωρευτή ενέργειας αλλά και του συστήματος ψύξης του, όπως αυτό προέκυψε κατά την διάρκεια της υπολογιστικής εφαρμογής των αρχών σχεδίασης συστημάτων ψύξης στο κεφάλαιο 4. Πρόκειται, για ένα πολύπλοκο σύστημα αποτελούμενο από μια πληθώρα ηλεκτρικών, ψυκτικών και δομικών εξαρτημάτων. Για τον λόγο αυτό η σχεδιαστική διαδικασία χωρίστηκε σε τρεις φάσεις, στον σχεδιασμό του χώρου υψηλής τάσης (συμπεριλαμβανομένων και των εναλλακτών θερμότητας), στον σχεδιασμό του χώρου χαμηλής τάσης (συμπεριλαμβανομένου και του εναλλάκτη θερμότητας) και στον σχεδιασμό των υπόλοιπων ψυκτικών εξαρτημάτων του συσσωρευτή και την δημιουργία του τελικού συναρμολογήματος (assembly).

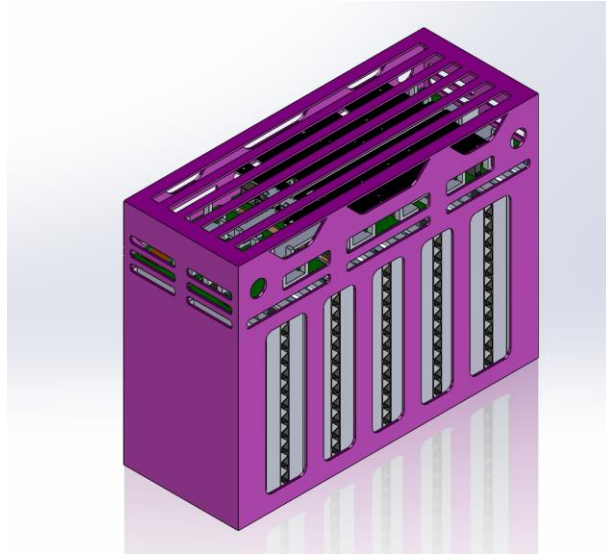
6.1 Σχεδιασμός Συστάδων Μπαταριών (Segments)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο συσσωρευτής ενέργειας αποτελείται από 288 κελιά διαμοιρασμένα σε 8 συστάδες (segments), με την καθεμιά να περιέχει 36 κελιά. Η πρώτη φάση σχεδιασμού του χώρου υψηλής τάσης ξεκινάει με τον σχεδιασμό των 8 αυτών πανομοιότυπων segments που στην ουσία αποτελούν την «καρδιά» του συσσωρευτή.



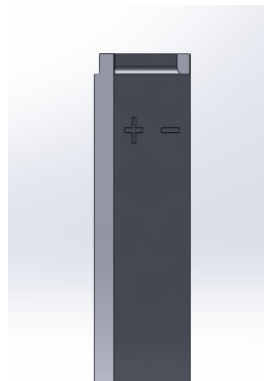
Εικόνα 15: Οι 8 συστάδες του συσσωρευτή ενέργειας

Κάθε συστάδα αποτελείται από τα 36 κελία μπαταριών, τις γλωττίδες σύνδεσής τους, την πλακέτα σύνδεσης γλωττίδων, τις ράβδους διακλάδωσης, την πλακέτα AMS, την σύνδεση με τα άλλα segments, 5 εναλλάκτες θερμότητας αλλά και το πλαίσιο που τα συγκρατεί με τα απαραίτητα δομικά εξαρτήματα.



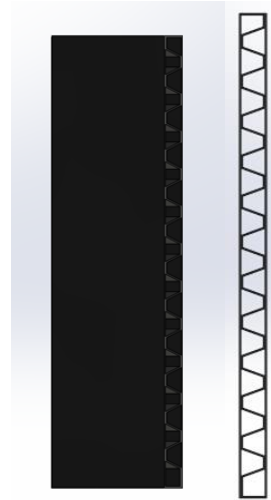
Εικόνα 16: Συστάδα κελιών μπαταριών

Αρχικά, με απλές εντολές Extruded Boss/Base, Cut Extrude και Fillet σχεδιάστηκε ένα κελί μπαταριών με βάση τις διαστάσεις του κατασκευαστή.



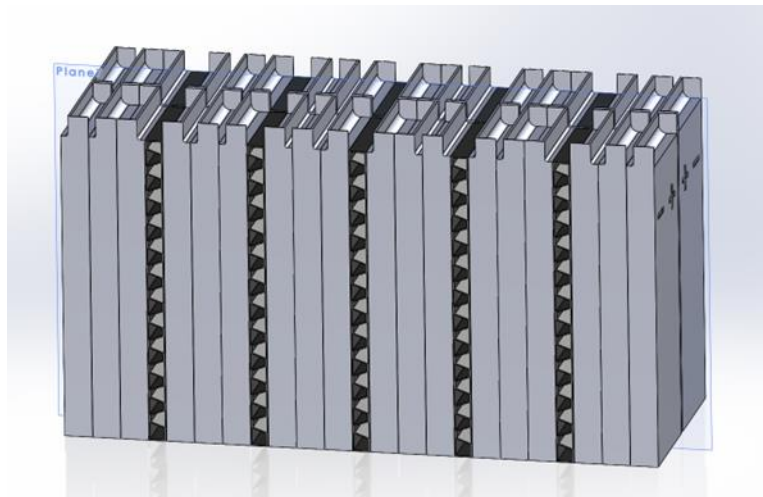
Εικόνα 17: Κελί μπαταρίας

Με τον ίδιο τρόπο και με την εντολή Linear Pattern για τον σχηματισμό των πτερυγίων ψύξης σχεδιάστηκε και ένας εναλλάκτης θερμότητας.



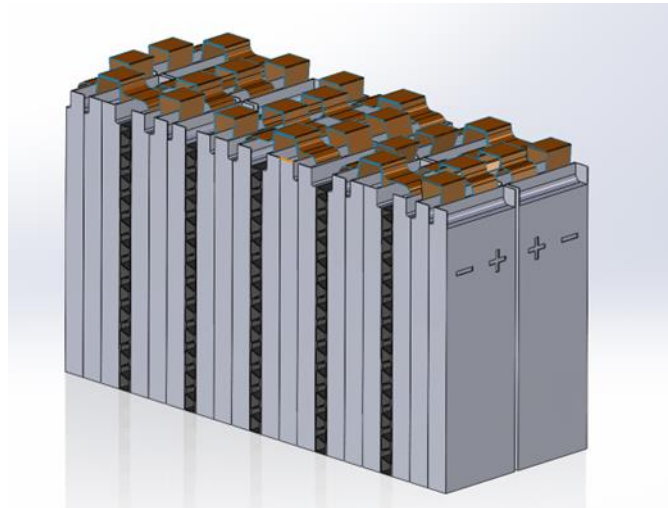
Εικόνα 18: Εναλλάκτης θερμότητας και η γεωμετρία των πτερυγίων του

Με την χρήση ενός βοηθητικού Plane και με τις εντολές Linear Pattern και Mirror προκύπτει η διαμόρφωση των κελιών μπαταριών και των εναλλακτών θερμότητας.



Εικόνα 19: Διαμόρφωση κελιών μπαταριών και εναλλακτών θερμότητας εντός μιας συστάδας

Ακολουθεί ο σχεδιασμός των γλωττίδων ένωσης των κελιών μπαταριών. Αρχικά, στο πάνω τμήμα των κελιών μπαταριών δημιουργήθηκαν sketches τα οποία θα αποτελούν την έναρξη για τις γλωττίδες χαλκού. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα ακόμα βοηθητικό Plane στο ύψος ένωσης των γλωττίδων με τα αντίστοιχα sketches που θα αποτελούν το τελικό σημείο των γλωττίδων. Τέλος, για ακόμη μια φορά σε ένα βοηθητικό Plane δημιουργήθηκαν τα sketches που θα αποτελούν τον οδηγό για τις γλωττίδες. Κατά αυτόν τον τρόπο με τις εντολές Surface Sweep, Mirror και Thicken μπορούν να σχεδιαστούν τα tabs.

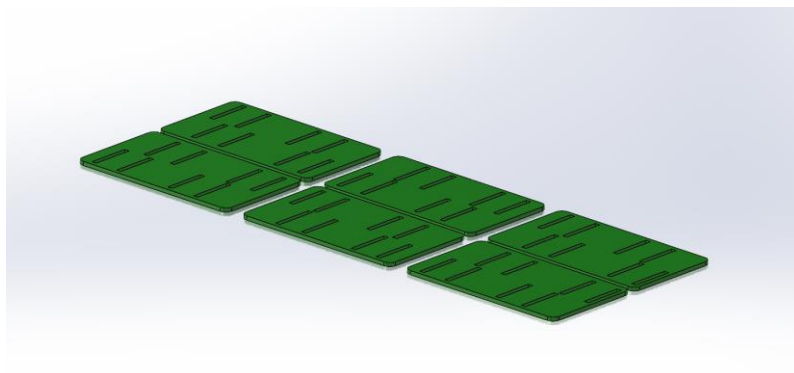


Εικόνα 20: Γλωττίδες ένωσης των κελιών μπαταριών

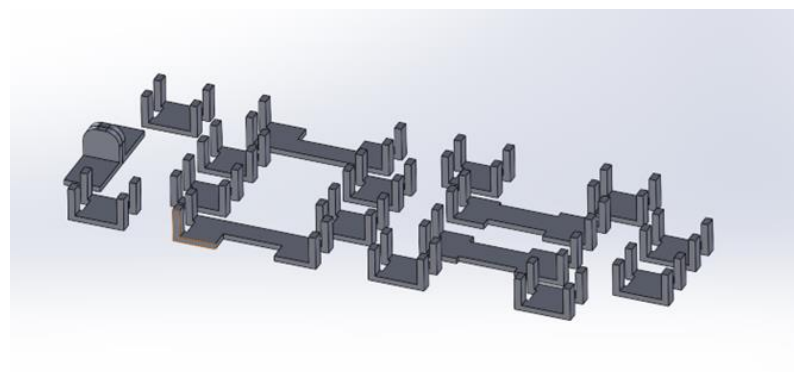


Εικόνα 21: Πλάγια όψη των sketches των γλωττίδων

Στη συνέχεια σχεδιάστηκαν με απλές εντολές Extruded Boss/Base, Cut Extrude και Fillet οι πλακέτες σύνδεσης γλωττίδων με τις κατάλληλες υποδοχές/εγκοπές γλωττίδων καθώς και οι ράβδοι διακλάδωσης που τοποθετούνται επάνω στα tabs. Σημειώνεται πως οι πλακέτες σύνδεσης γλωττίδων δεν έχουν σχεδιαστεί με τον ηλεκτρονικά εξαρτήματα που διαθέτουν πάνω τους καθώς η παρούσα διπλωματική εστιάζει στην θερμική ανάλυση του συσσωρευτή ενέργειας, όπου το υπολογιστικό κόστος είναι υψηλό.

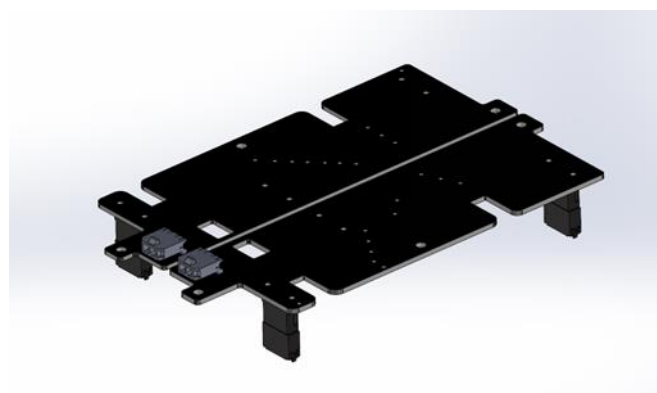


Εικόνα 22: Πλακέτες σύνδεσης γλωττίδων

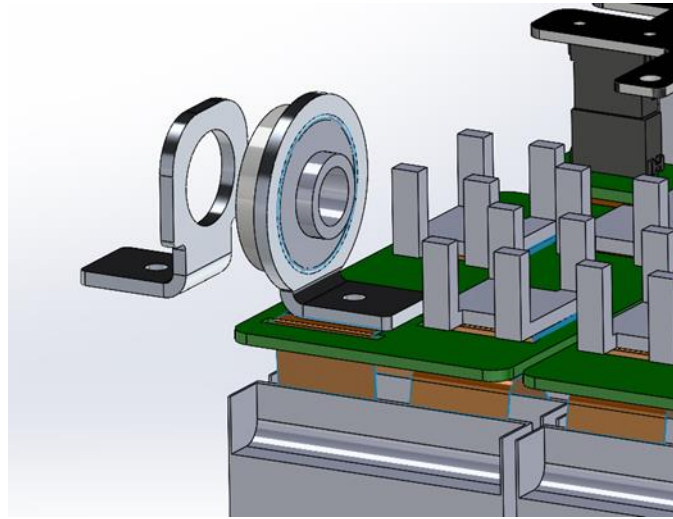


Εικόνα 23: Ράβδοι Διακλάδωσης

Αντίστοιχα σχεδιάζεται η πλακέτα AMS και η σύνδεση με τα άλλα segments.

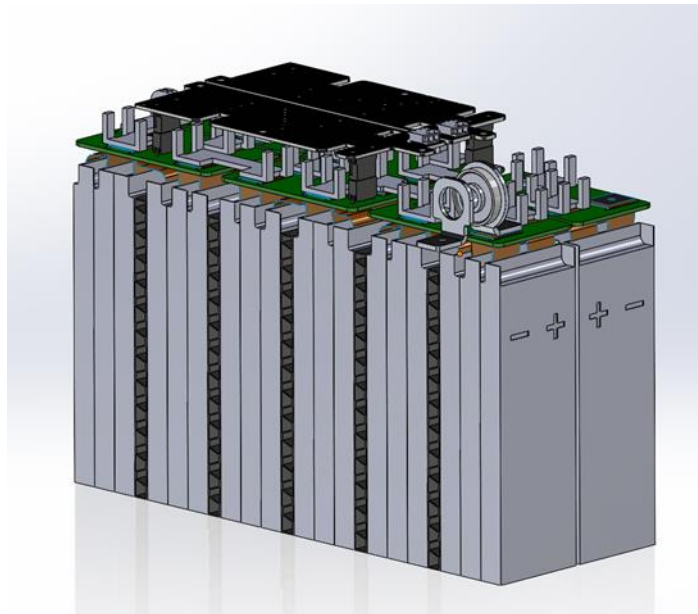


Εικόνα 24: Πλακέτα AMS



Εικόνα 25: Σύνδεση με υπόλοιπες συστάδες

Η μορφή του segments μέχρι στιγμής παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, αν και για την συναρμολόγηση όλων των εξαρτημάτων θα γίνει λόγος σε παρακάτω υποκεφάλαιο.



Εικόνα 26: Ηλεκτρονικά εξαρτήματα συστάδας

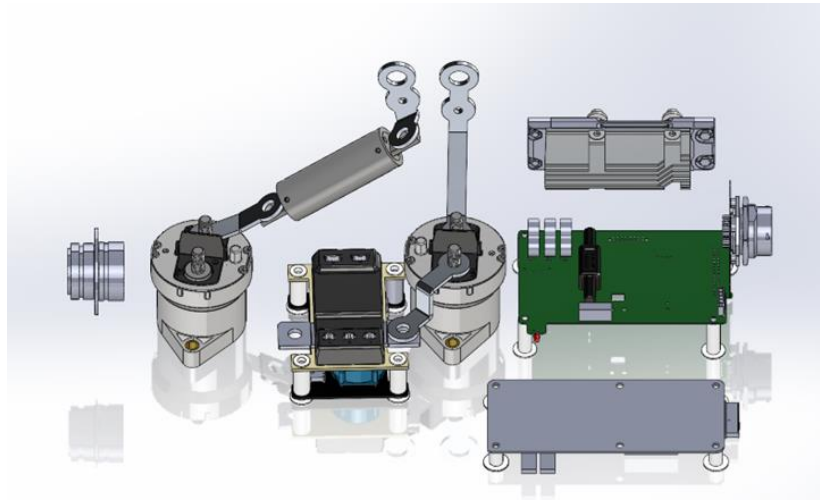
Τέλος, με τις ίδιες εντολές σχεδιάστηκαν το πλαίσιο του segment, ο κατασκευαστικός αφρός υποστήριξης των κελιών μπαταριών και ο αφρός αποτροπής κραδασμών κάτω από το πλαίσιο του segments, ολοκληρώνοντας το υποσυναρμολόγημα του συσσωρευτή ενέργειας.



Εικόνα 27: Τελικό συναρμολόγημα συστάδας

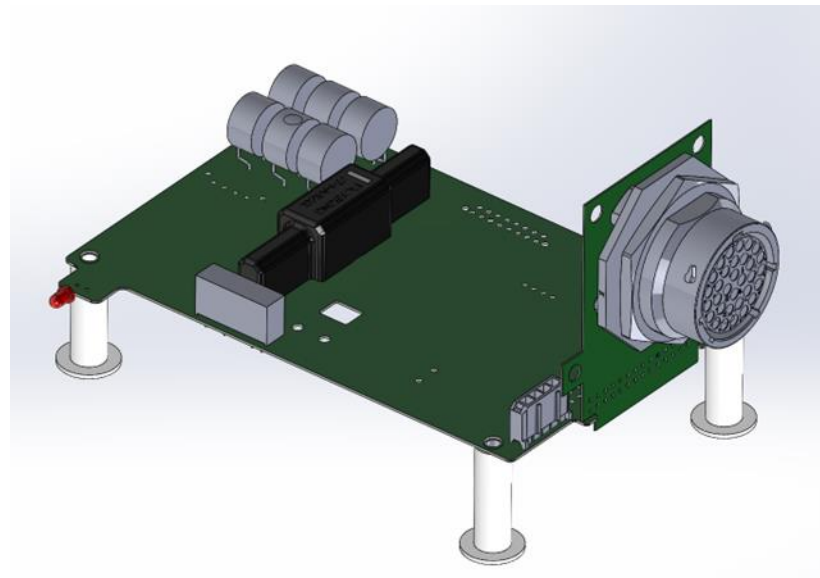
6.2 Σχεδιασμός Εξαρτημάτων Χαμηλής Τάσης

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο σχεδιάστηκαν τα 8 segments που απαρτίζουν τον χώρο υψηλής τάσης και το σημαντικότερο μέρος του συσσωρευτή ενέργειας. Τα υπόλοιπα στοιχεία που συνθέτουν το δοχείο των συσσωρευτών είναι τα εξαρτήματα χαμηλής τάσης.

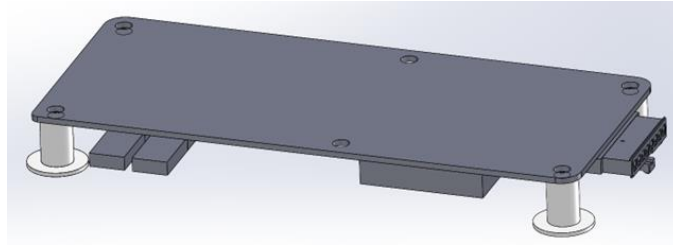


Εικόνα 28: Εξαρτήματα χαμηλής τάσης

Αρχικά, με τις εντολές Extruded Boss/Base, Cut Extrude, Fillet, Revolved Boss/Base, Swept Boss/Base, Linear και Circular Pattern καθώς και με βοηθητικά Planes και την εργαλειοθήκη του SolidWorks σχεδιάστηκε η πλακέτα συσσωρευτή και η πλακέτα IMD.

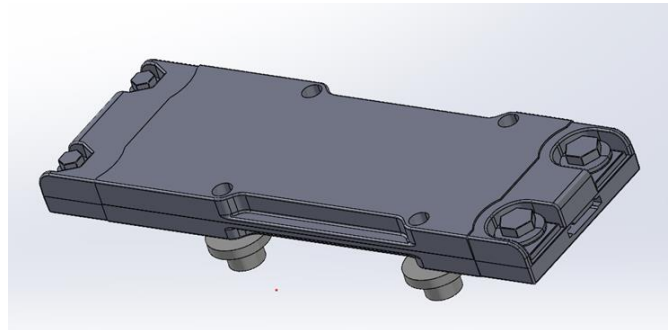


Εικόνα 29: Πλακέτα συσσωρευτή

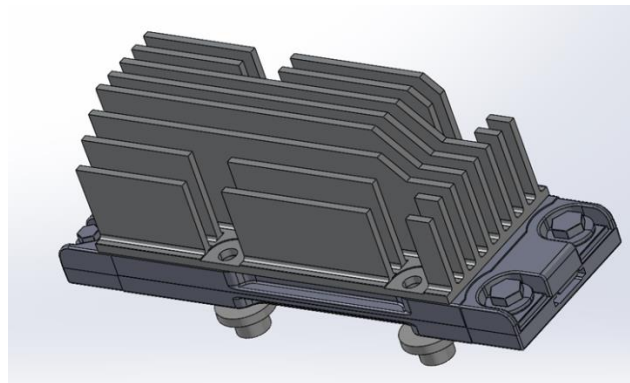


Εικόνα 30: Πλακέτα IMD

Ακολουθεί ο μετατροπέας DC-DC, ο οποίος εισήχθη στο SolidWorks από την σελίδα του κατασκευαστή. Μετατράπηκε από αρχείο τύπου STL σε αρχείο SLDPRT. Στην επιφάνεια του μετατροπέα σε δεύτερη φάση σχεδιάστηκε ο εναλλάκτης θερμότητας με τα πτερύγιά του με εντολές Extruded Boss/Base και Linear Pattern και με την χρήση της εργαλειοθήκης του SolidWorks.

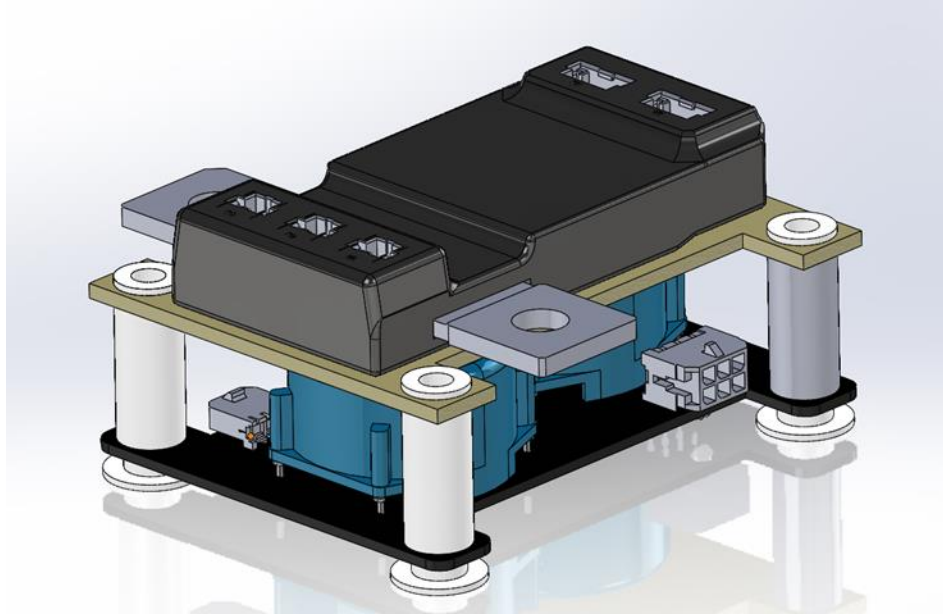


Εικόνα 31: Μετατροπέας ρεύματος DC-DC

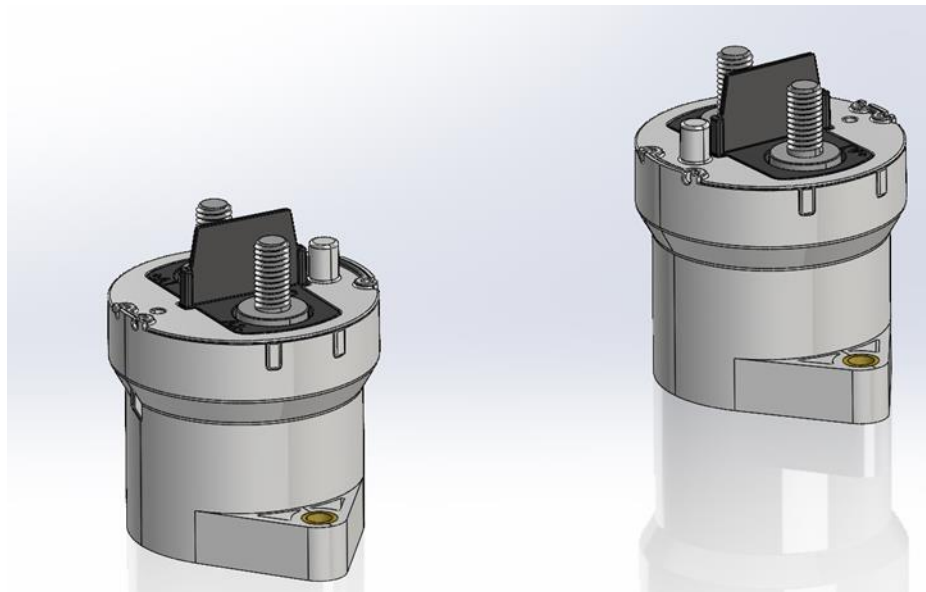


Εικόνα 32: Εναλλάκτης θερμότητας του χώρου χαμηλής τάσης

Αντίστοιχα εισήχθησαν στο SolidWorks από τις σελίδες των κατασκευαστών και ο αισθητήρας ρεύματος με την μονάδα ελέγχου του και το θετικό και αρνητικό AIR.

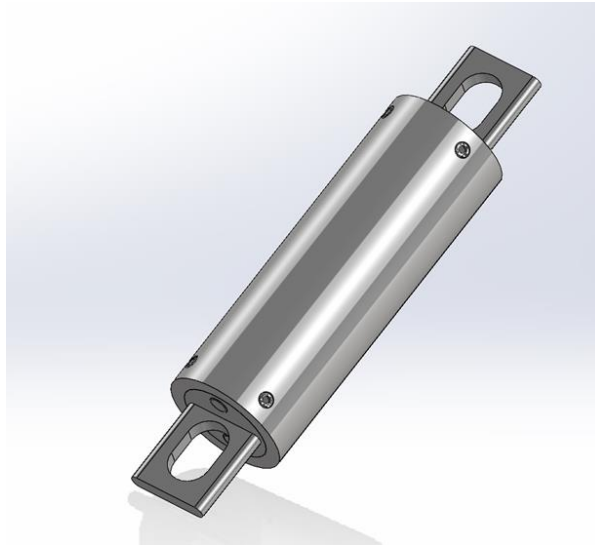


Εικόνα 33: Αισθητήρας ρεύματος

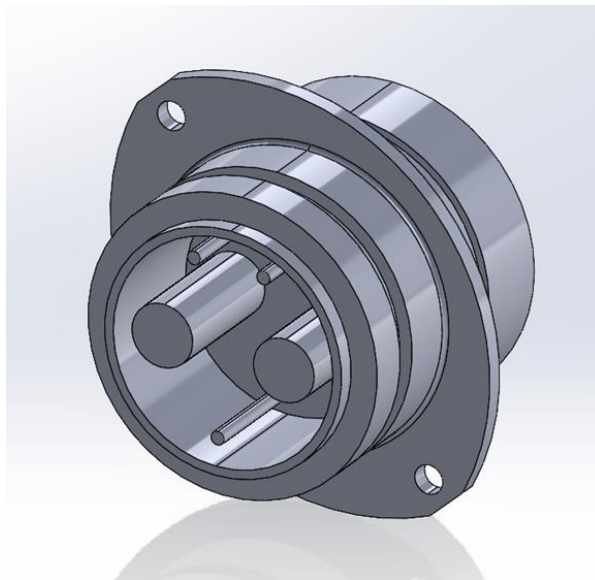


Εικόνα 34: Θετική και αρνητική αντίσταση μόνωσης συσσωρευτή

Στη συνέχεια σχεδιάστηκαν με απλές εντολές Extruded Boss/Base, Cut Extrude, Swept Boss/Base, Fillet και την εργαλειοθήκη του SolidWorks η φύσα χαμηλής τάσης και το Deutsch Connector για την συνδεσμολογία των καλωδίων υψηλής τάσης.



Εικόνα 35: Φύσα χαμηλής τάσης



Εικόνα 36: Deutsch connector

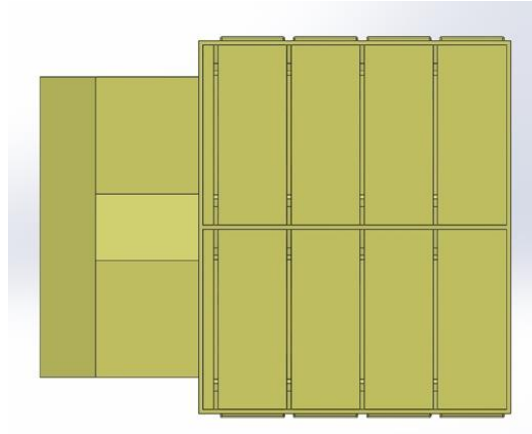
Τέλος, σχεδιάστηκαν με τις ίδιες εντολές και οι ράβδοι διακλάδωσης του χώρου χαμηλής τάσης.



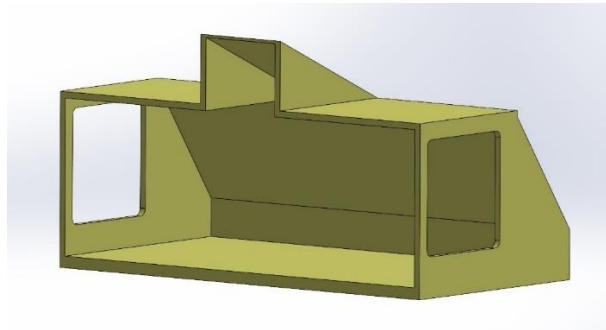
Εικόνα 37: Ράβδοι διακλάδωσης

6.3 Σχεδιασμός Πλαισίου

Το πλαίσιο ή αλλιώς το κουτί του συσσωρευτή ενέργειας περιλαμβάνει και τον χώρο υψηλής τάσης και τον χώρο χαμηλής τάσης. Ο HV χώρος περιλαμβάνει τα segments και ο LV χώρος τα εξαρτήματα του προηγούμενου υποκεφαλαίου. Σε πρώτη φάση με απλές εντολές Extruded Boss/Base, Cut Extrude, Fillet και Linear Pattern δημιουργήθηκαν τα τοιχώματα των δύο αυτών χώρων καθώς και τα εσωτερικά διαμερίσματα που θα στεγάζουν τα segments στον χώρο υψηλής τάσης. Τα εσωτερικά τοιχώματα είναι ειδικά σχεδιασμένα κατά τέτοιον τρόπο ώστε να διευκολύνουν την παροχή του αέρα δια μέσω των εναλλακτών θερμότητας αλλά και την συνδεσμολογία με τα υπόλοιπα διαμερίσματα και τον χώρο χαμηλής τάσης.



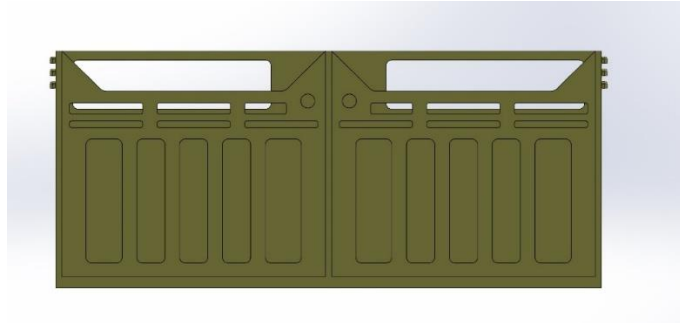
Εικόνα 38: Κάτοψη χώρου υψηλής τάσης



Εικόνα 39: Πλαίσιο χώρου χαμηλής τάσης

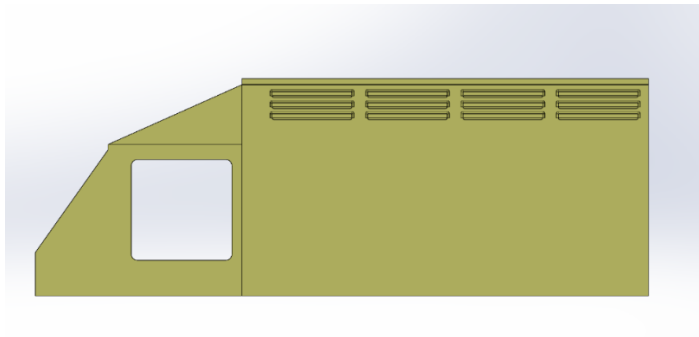


Εικόνα 40: Πλαίσιο χώρου υψηλής τάσης

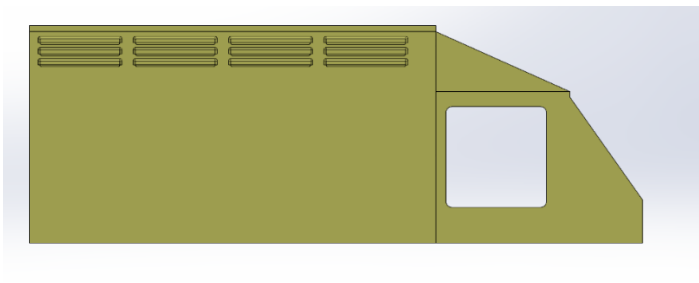


Εικόνα 41: Εσωτερική διαμόρφωση τοιχωμάτων του χώρου υψηλής τάσης

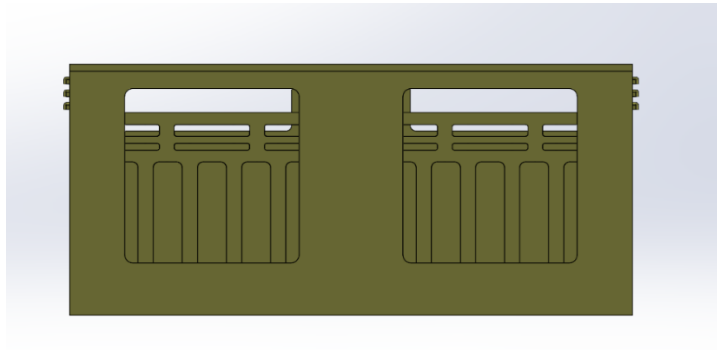
Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες, στα τοιχώματα του πλαισίου υπάρχουν κάποια ανοίγματα τα οποία σχεδιάστηκαν εσκεμμένα για τις ψυκτικές ανάγκες του συστήματος, Στα ανοίγματα αυτά, τα οποία δημιουργήθηκαν με την εντολή Cut Extrude, θα τοποθετηθούν οι ανεμιστήρες και οι αγωγοί εισόδου.



Εικόνα 42: Πλάγια όψη από τα αριστερά του πλαισίου του συσσωρευτή ενέργειας

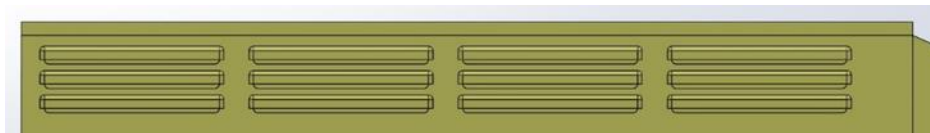


Εικόνα 43: Πλάγια όψη από τα δεξιά του πλαισίου του συσσωρευτή ενέργειας



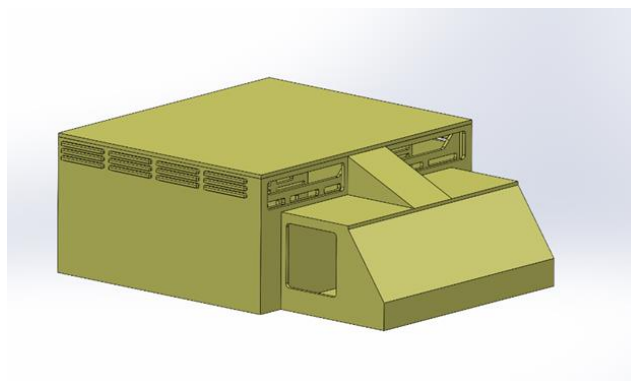
Εικόνα 44: Πίσω όψη του πλαισίου του συσσωρευτή ενέργειας

Αξιοσημείωτα, είναι και τα ανοίγματα στις πλαϊνές όψεις του πλαισίου, τα οποία ονομάζονται pressure openings και αποσκοπούν στην αποφυγή της τοπικής αύξησης της πίεσης στο εσωτερικό του κουτιού. Τα ανοίγματα αυτά έγιναν με τις εντολές Extruded Boss/Base, Cut Extrude, Fillet και Linear Pattern.



Εικόνα 45: Πλάγια όψη από τα δεξιά των ανοιγμάτων πίεσης

Το τελικό σχέδιο του πλαισίου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

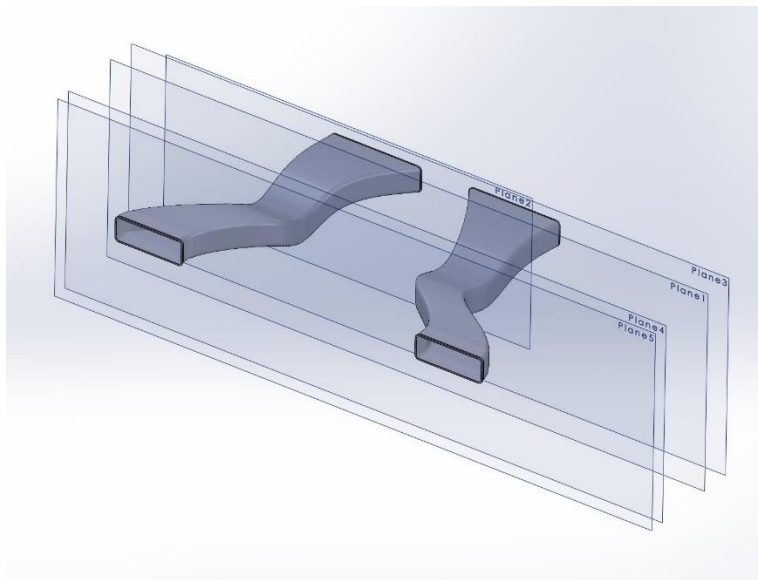


Εικόνα 46: Πλαίσιο του συσσωρευτή ενέργειας

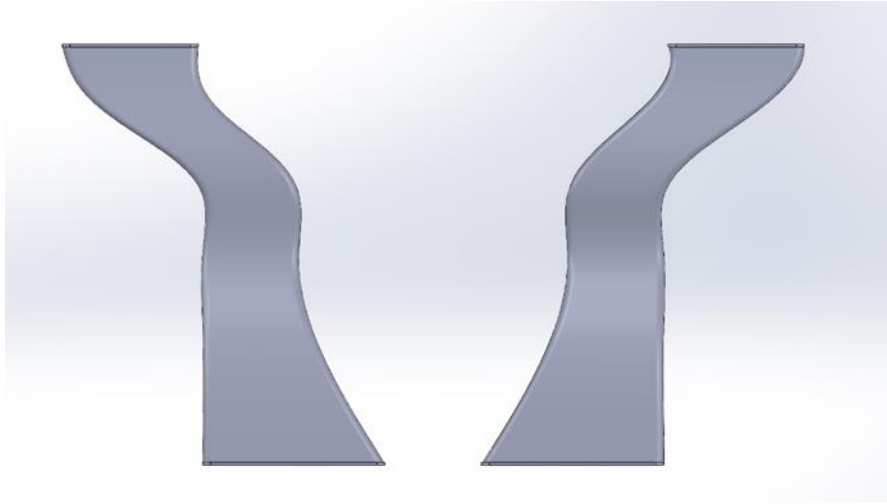
6.4 Σχεδιασμός Ψυκτικών Συσκευών

Έχοντας ολοκληρώσει τις δυο πρώτες φάσεις του σχεδιασμού του συσσωρευτή ενέργειας, είμαστε σε θέση να ξεκινήσουμε τον σχεδιασμό των εξαρτημάτων του ψυκτικού συστήματος. Αυτά είναι οι αγωγοί εισόδου και οι ανεμιστήρες, και τα δυο υπεύθυνα για την παροχή ψυκτικού αέρα στο εσωτερικό του συσσωρευτή.

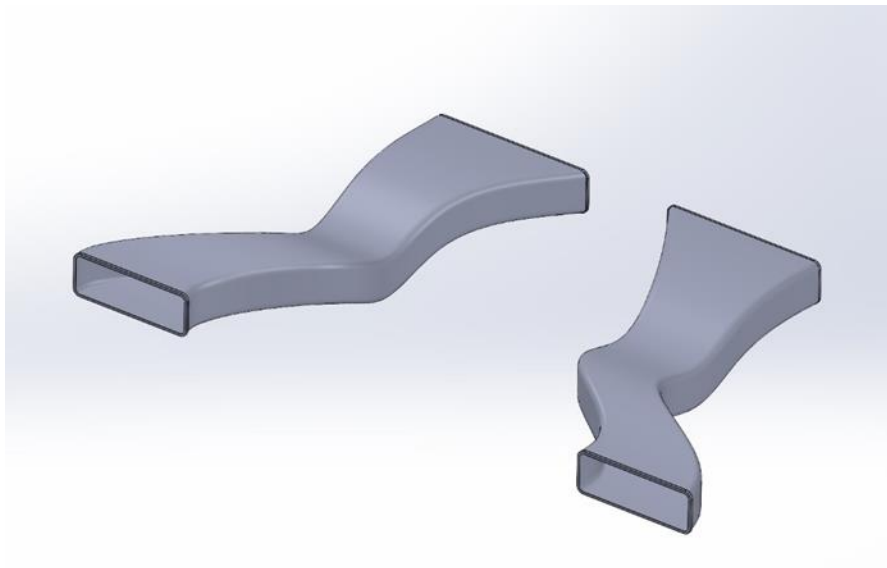
Ιδιαίτερα περίπλοκος ήταν ο σχεδιασμός των αγωγών εισόδου, καθώς ο χώρος εσωτερικά του engine bay είναι περιορισμένος. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν 5 βοηθητικά Planes. Επίσης, είναι σημαντικό να σχηματίζεται μια καμπύλη κατά τον y (κατακόρυφο) άξονα στο ελάχιστο σημείο της οποίας θα ανοιχθεί μια μικρή τρύπα για την αποφυγή εισόδου νερού στο εσωτερικό του συσσωρευτή. Ταυτόχρονα στην είσοδο των αγωγών θα υπάρχει ειδικά διαμορφωμένο πλέγμα (honeycomb) για την αποφυγή εισόδου σκόνης και στερεών υπολειμμάτων, το οποίο εδώ δεν παρουσιάζεται για χάρη απλότητας και εξοικονόμησης υπολογιστικών πόρων. Με τα βοηθητικά αυτά Planes, λοιπόν, και με τις εντολές Surface-Loft, Surface Plane, Surface-Knit και Thicken προκύπτει το τελικό σχέδιο των αγωγών εισόδου.



Εικόνα 47: Αγωγοί εισόδου με τα βοηθητικά Planes

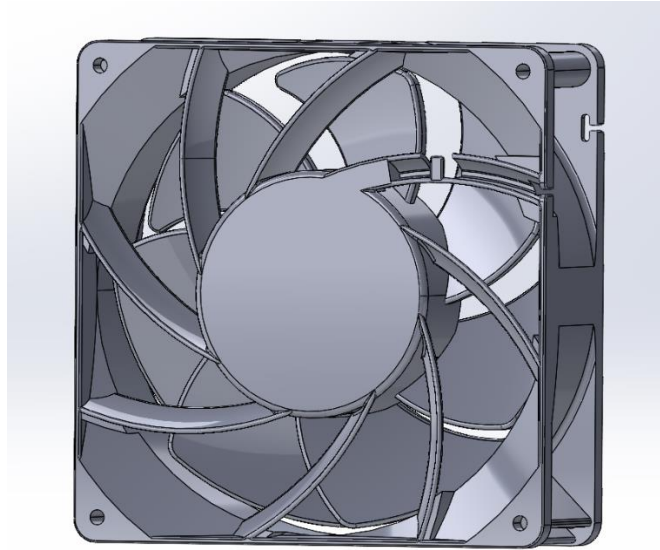


Εικόνα 48: Κάτοψη αγωγών εισόδου

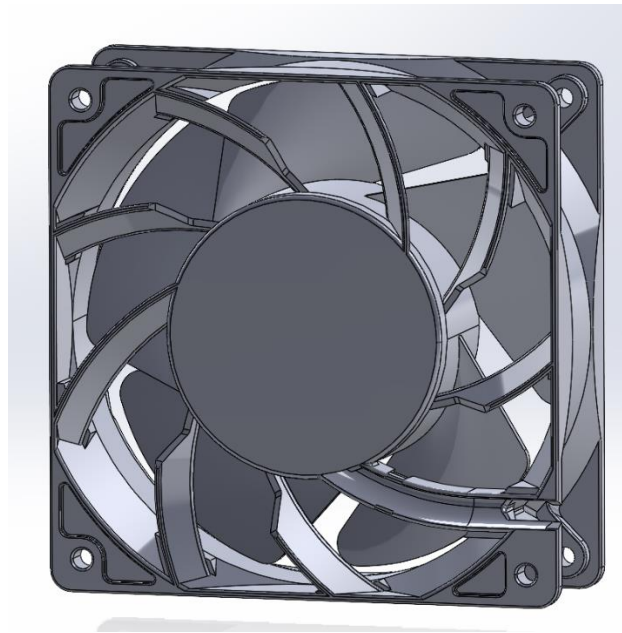


Εικόνα 49: Αγωγοί εισόδου

Όσον αφορά τους ανεμιστήρες, για να πετύχουμε την επιθυμητή ακρίβεια του προφίλ της ταχύτητας κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκαν τα σχέδια που παρέχονται από τον κατασκευαστή. Συγκεκριμένα, εισήχθησαν τα αρχεία STEP των ανεμιστήρων, τα οποία εν συνεχεία μετατράπηκαν σε SLDPRT. Τα σχέδια στο SolidWorks παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



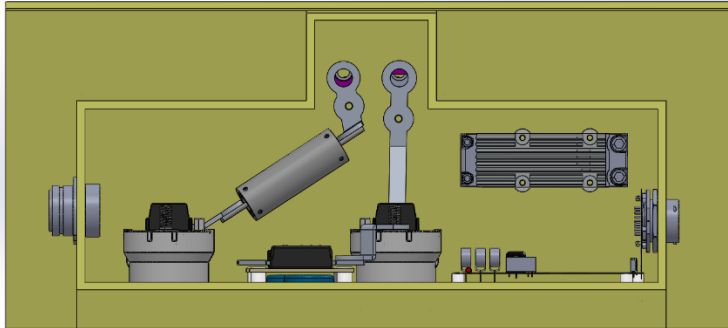
Εικόνα 50: Ανεμιστήρας χώρου υψηλής τάσης



Εικόνα 51: Ανεμιστήρας χώρου χαμηλής τάσης

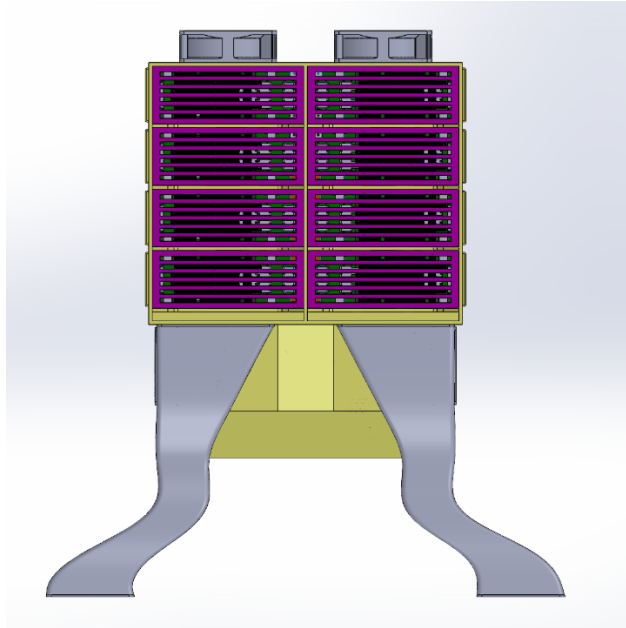
6.5 Συναρμολόγηση (Assembly)

Αρχικά, για την διαμόρφωση του τελικού συναρμολογήματος, εισήχθησαν τα σχεδιασμένα εξαρτήματα που απαρτίζουν ένα segment. Με την εντολή Mate συνδυάζοντας κάθε φορά δυο parts προκύπτει το sub-assembly των κελιών μπαταριών όπως φαίνεται στα προηγούμενα υποκεφάλαια. Χρησιμοποιώντας την ίδια εντολή και εισάγοντας το πλαίσιο του συσσωρευτή τοποθετούμε το segment στο ειδικά διαμορφωμένο δωμάτιο. Έπειτα, με την εντολή Linear Pattern και στη συνέχεια Mirror περί τον άξονα συμμετρίας του συσσωρευτή προκύπτουν τα 8 segments κάθε ένα στο εκάστοτε δωμάτιο. Σειρά έχουν τα εξαρτήματα χαμηλής τάσης τα οποία πάλι με την εντολή Mate τοποθετούνται στον χώρο χαμηλής τάσης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

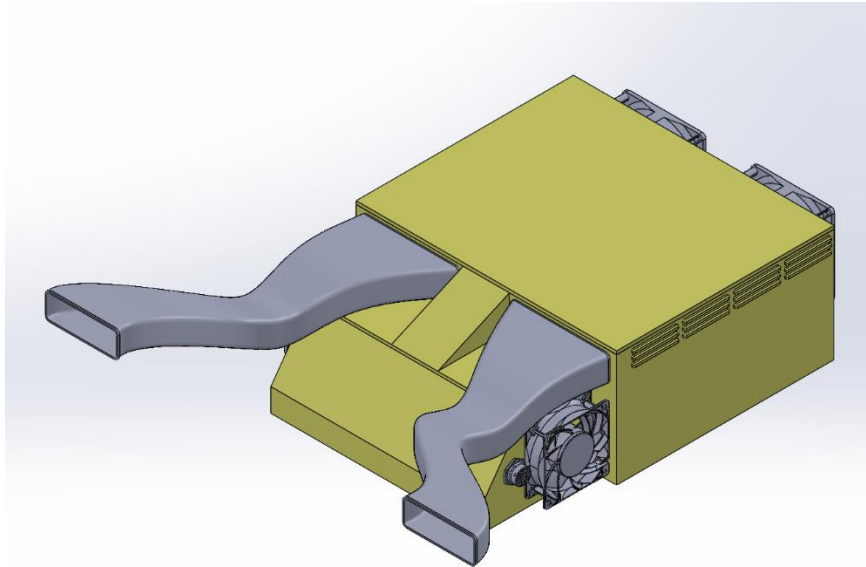


Εικόνα 52: Τοποθέτηση εξαρτημάτων χαμηλής τάσης

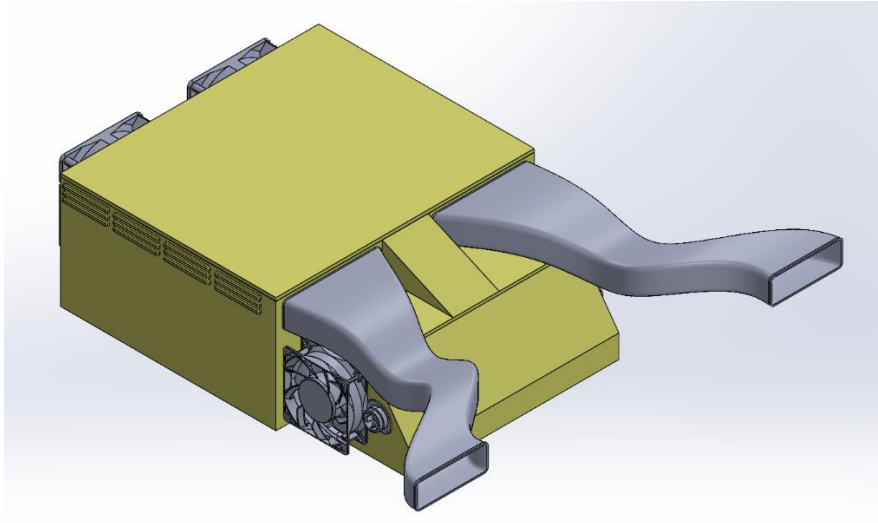
Τέλος, εισάγονται στο συναρμολόγημα οι ψυκτικές συσκευές του συστήματος και τοποθετούνται στις προκαθορισμένες θέσεις τους. Προκύπτει το λεπτομερές τελικό σχέδιο του συσσωρευτή ενέργειας το οποίο θα χρησιμοποιηθεί κατά την φάση της προσομοίωσης. Σημειώνεται πως το σχέδιο αυτό θα επεξεργαστεί μετέπειτα και θα απλοποιηθεί λόγω του υπολογιστικού κόστους. Ωστόσο, θα ακολουθήσει λεπτομερής ανάλυση των παραδοχών και της απλοποίησης αυτής στα κεφάλαια που ακολουθούν. Παρακάτω απεικονίζεται η τελική μορφή του συσσωρευτή ενέργειας έτσι όπως αυτός σχεδιάστηκε στο λογισμικό SolidWorks.



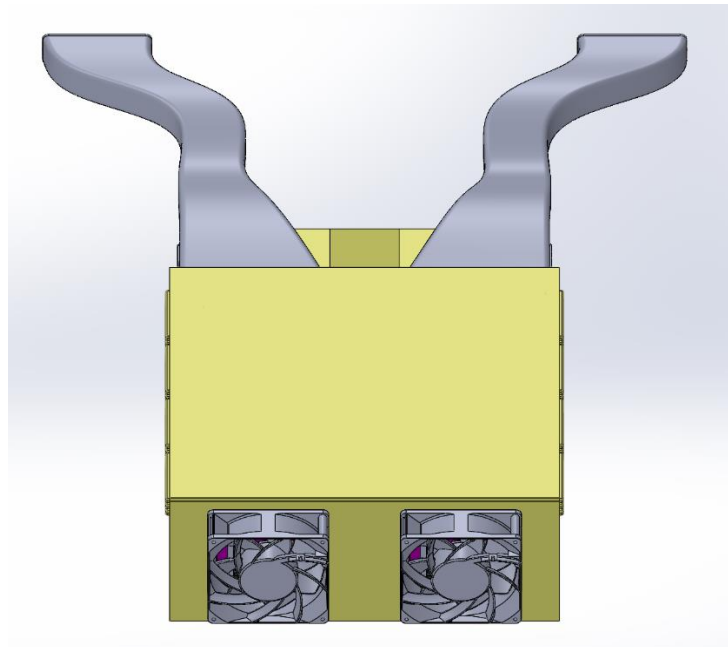
Εικόνα 53: Κάτοψη του συναρμολογημένου χώρου υψηλής τάσης



Εικόνα 54: Ισομετρική όψη εκ των αριστερά του συσσωρευτή ενέργειας



Εικόνα 55: Ισομετρική όψη εκ των δεξιά του συσσωρευτή ενέργειας



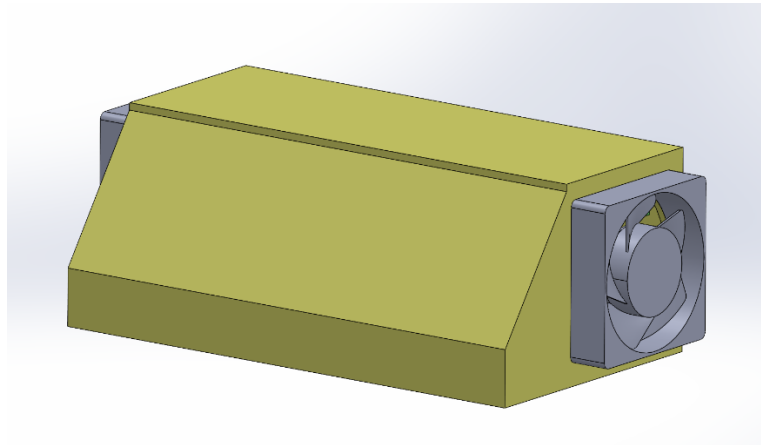
Εικόνα 56: Πίσω όψη του συσσωρευτή ενέργειας

7. Πλεγματοποίηση στο Λογισμικό ANSYS

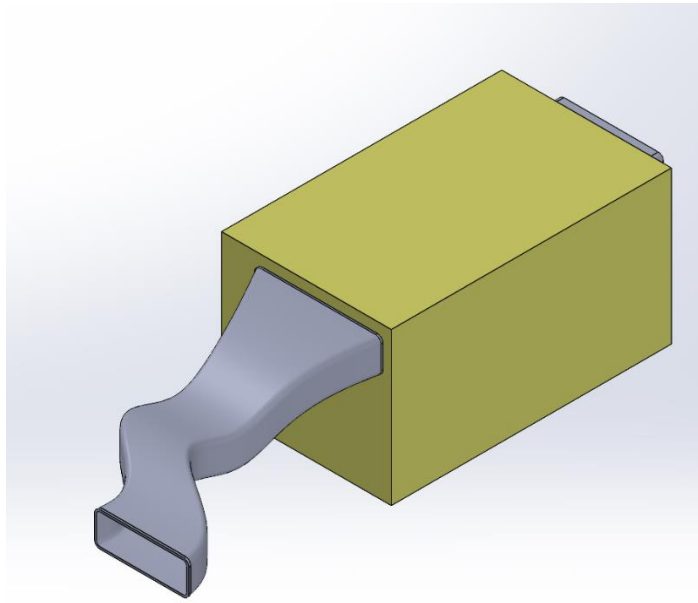
Στο προηγούμενο κεφάλαιο σχεδιάστηκε στο λογισμικό SolidWorks το δοχείο των συσσωρευτών καθώς και το σύστημα ψύξης του. Ακολουθεί η προσομοίωση του συστήματος ψύξης, η οποία αποτελείται από δύο στάδια. Την προετοιμασία της γεωμετρίας και την πλεγματοποίηση στο λογισμικό ANSYS αλλά και την ρύθμιση της επίλυσης για την τελική εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί το πρώτο στάδιο της προετοιμασίας της προσομοίωσης και ιδιαίτερα η φάση της μοντελοποίησης.

7.1 Παραδοχές

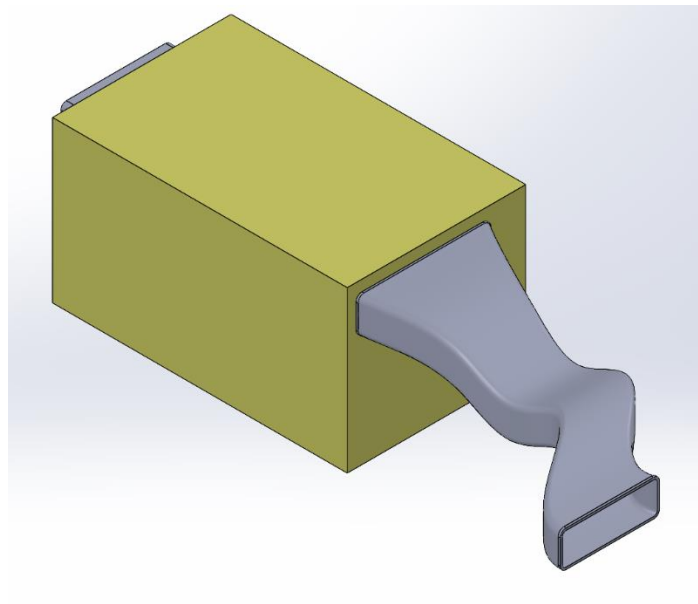
Όπως είναι εύκολα αντιληπτό, το εξεταζόμενο σύστημα είναι εξαιρετικά πολύπλοκο και υψηλού υπολογιστικού κόστους, με αποτέλεσμα να κρίνονται απαραίτητες οι παραδοχές και οι προσεγγιστικές μέθοδοι. Ήδη από τα προηγούμενα κεφάλαια έχει καταστεί σαφές πως η γεωμετρία του συσσωρευτή ενέργειας θα χωριστεί σε τρία υποσυστήματα, τον χώρο χαμηλής τάσης και τους δυο συμμετρικούς υποχώρους υψηλής τάσης κάθε ένας με τις εκάστοτε ψυκτικές συσκευές. Επιπρόσθετα οι ανεμιστήρες υποβλήθηκαν σε επεξεργασία, διατηρώντας απaráλλακτο το σχέδιο της πτερωτής για την εξασφάλιση της ορθής αποτύπωσης του προφίλ ταχύτητας της ροής, αλλά απλοποιώντας το περίπλοκο κέλυφός τους καθώς το ίδιο δεν θα χρησιμοποιηθεί κατά την προσομοίωση όπως θα αναλυθεί και παρακάτω.



Εικόνα 57: Χώρος χαμηλής τάσης στο SolidWorks

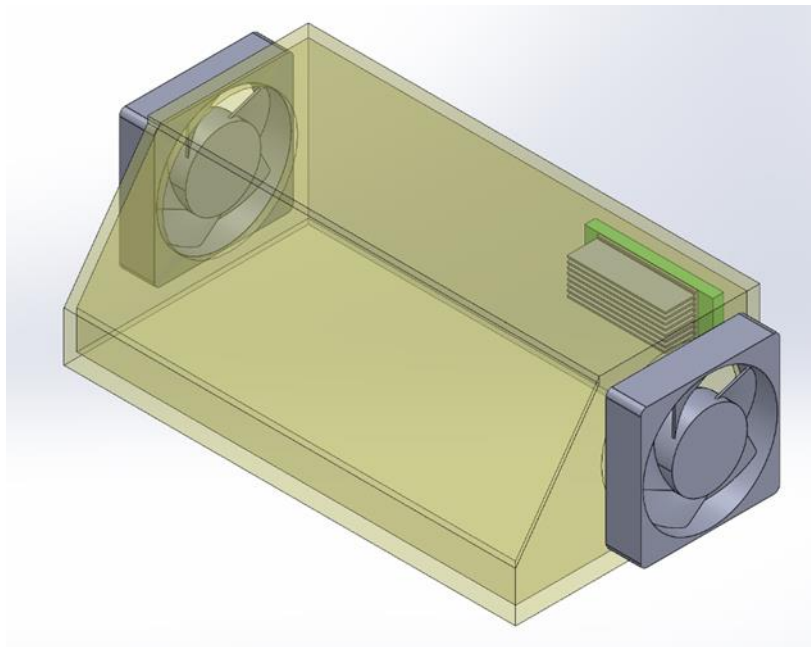


Εικόνα 58: Συμμετρικός χώρος (δεξί τμήμα) υψηλής τάσης στο SolidWorks



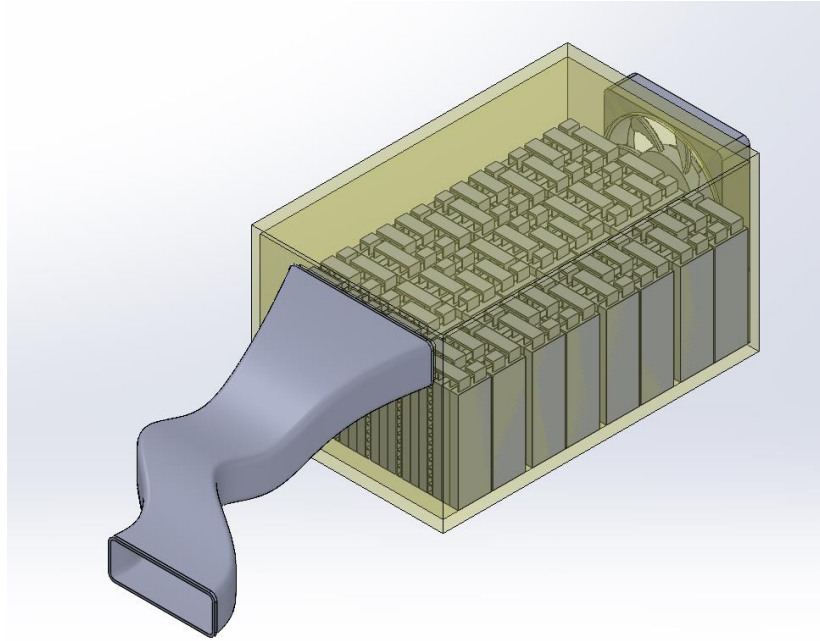
Εικόνα 59: Συμμετρικός χώρος (αριστερό τμήμα) υψηλής τάσης στο SolidWorks

Όσον αφορά τον χώρο χαμηλής τάσης, το επάνω τριγωνικό τμήμα του πλαισίου αφαιρέθηκε, καθώς η μόνη χρησιμότητά του ήταν η κάλυψη των καλωδίων υψηλής τάσης που εξέρχονταν από τον HV χώρο, ενώ η επιρροή του στην ροή του ψυκτικού αέρα είναι αμελητέα. Επίσης, αποφασίστηκε να αμεληθούν όλα τα εξαρτήματα χαμηλής τάσης εκτός από τον μετατροπέα DC-DC, καθώς έχουν μηδαμινή απαγωγή θερμότητας, ενώ ταυτόχρονα είναι αρκετά περίπλοκα. Ωστόσο, η απόφαση αυτή είναι προβληματική για την αποτύπωση των φαινομένων της ροής. Όμως λόγω των περιορισμένων υπολογιστικών πόρων, γίνεται αυτή η παραδοχή από την στιγμή που έχει αποφασιστεί υπερδιαστασιολόγηση των ανεμιστήρων για την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας του συστήματος. Το τελικό σχέδιο του χώρου χαμηλής τάσης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

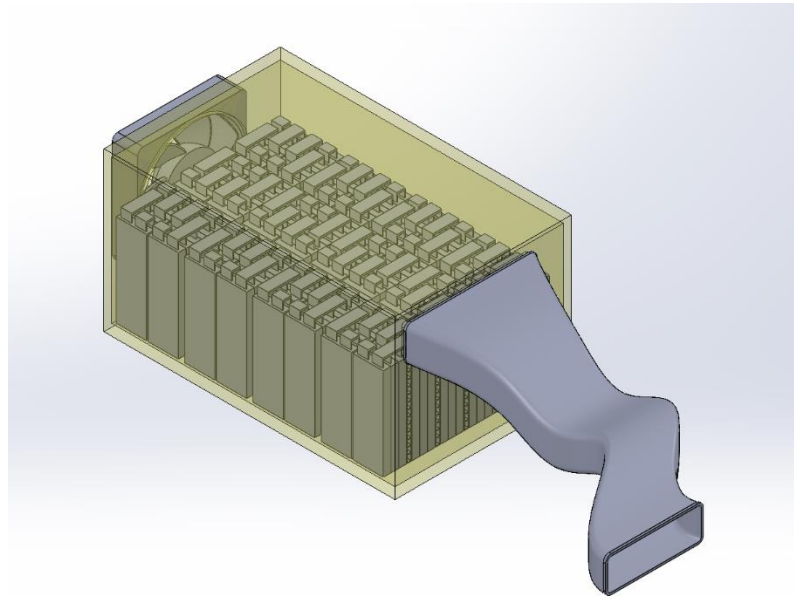


Εικόνα 60: Απλοποιημένος χώρος χαμηλής τάσης στο SolidWorks

Αντίστοιχες παραδοχές έγιναν και στους συμμετρικούς υποχώρους ψηλής τάσης. Αρχικά η γεωμετρία των γλωττίδων σύνδεσης και συγκεκριμένα η διαδρομή από το επάνω μέρος των κελιών έως το σημείο σύνδεσης από καμπυλοειδής έγινε ορθογώνια για την αύξηση της ποιότητας του πλέγματος, ενώ παραλήφθηκαν οι πλακέτες AMS και σύνδεσης γλωττίδων. Τέλος τα κελιά των μπαταριών ομαδοποιήθηκαν ανά 3 αθροίζοντας την συνολική απαγωγή θερμότητας για την εξοικονόμηση υπολογιστικών πόρων. Το τελικό σχέδιο των τμημάτων υψηλής τάσης παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



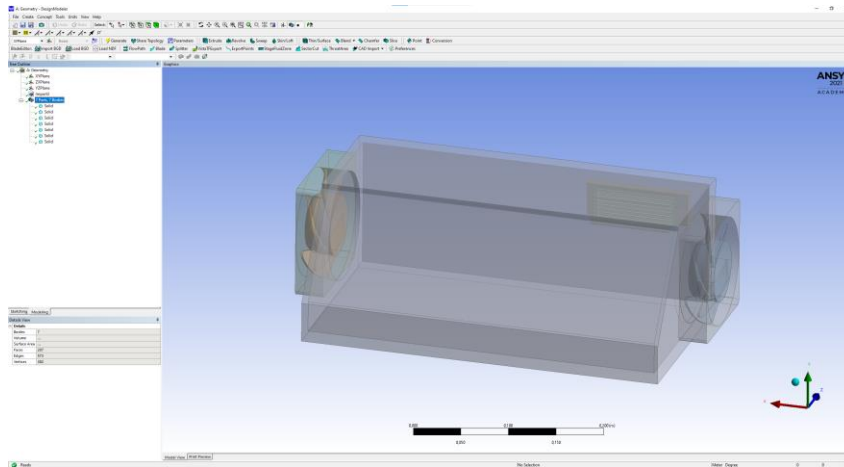
Εικόνα 61: Απλοποιημένος συμμετρικός χώρος (δεξί τμήμα) υψηλής τάσης στο SolidWorks



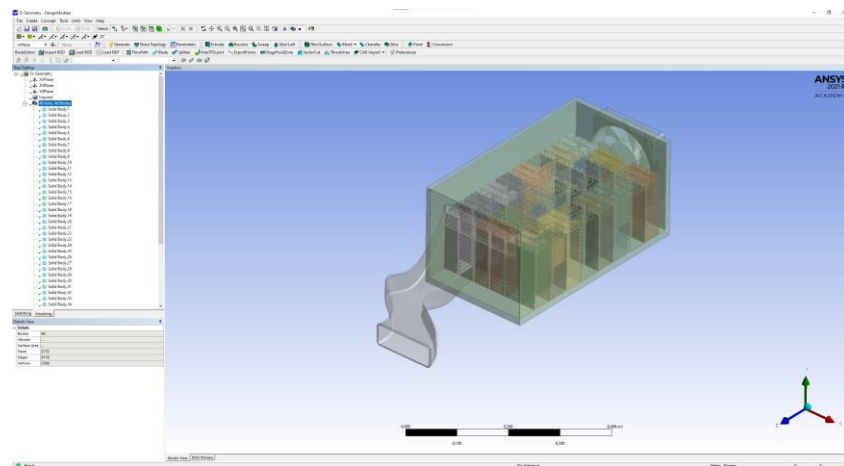
Εικόνα 62: Απλοποιημένος συμμετρικός χώρος (αριστερό τμήμα) υψηλής τάσης στο SolidWorks

7.2 Προετοιμασία Γεωμετριών στο Design Modeler

Τα συναρμολογήματα των εικόνων του προηγούμενου υποκεφαλαίου αποθηκεύτηκαν σε μορφή IGES και εισήχθησαν στο Design Modeler του ANSYS Workbench με σκοπό την προετοιμασία τους για την έναρξη της φάσης της πλεγματοποίησης και έπειτα της επίλυσης.



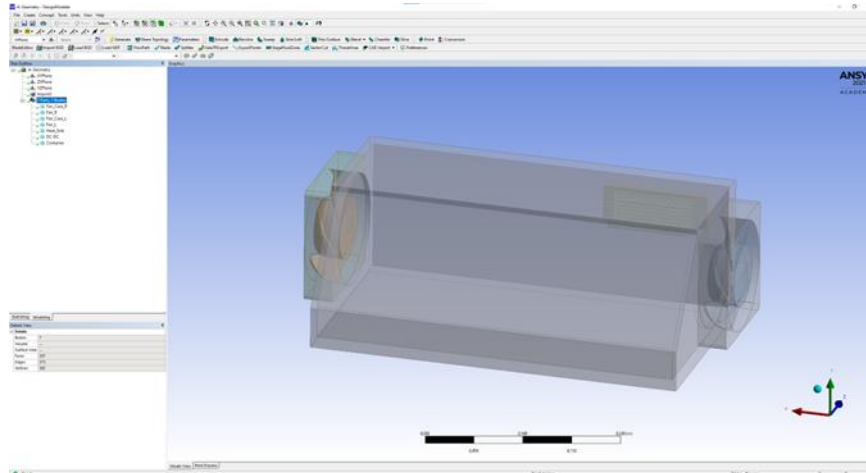
Εικόνα 63: Χώρος χαμηλής τάσης στο Design Modeler



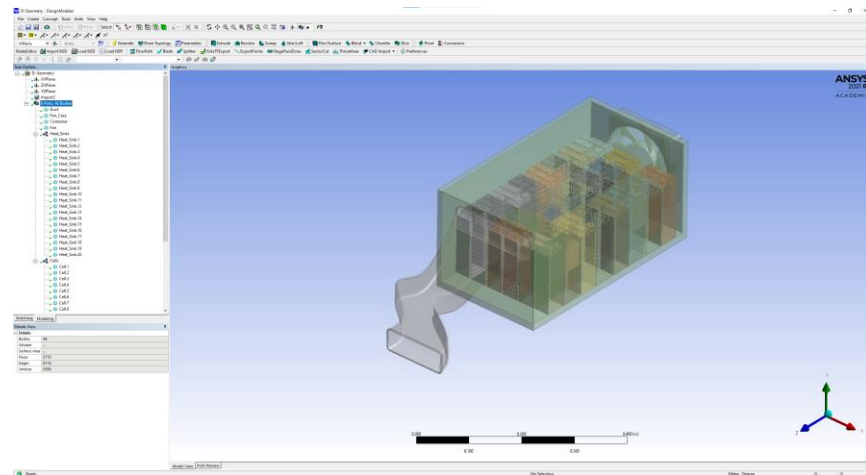
Εικόνα 64: Συμμετρικός χώρος υψηλής τάσης στο Design Modeler

Αρχικά μετονομάστηκαν τα στερεά σώματα του συναρμολογήματος με σκοπό την ευκολότερη ταυτοποίησή τους στις επόμενες φάσεις της προσομοίωσης και στην

περίπτωση του χώρου υψηλής τάσης σχηματίστηκαν ομάδες στερεών σωμάτων (Form New Part) με παρόμοιες ιδιότητες όπως για παράδειγμα όλα τα κελιά μπαταριών.



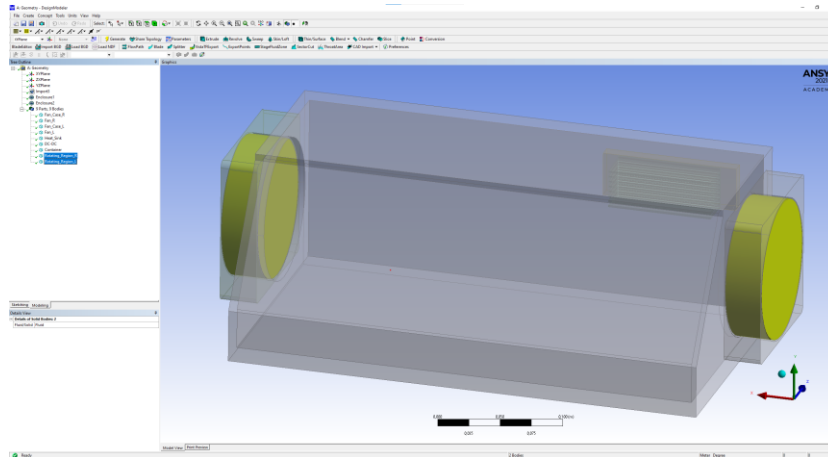
Εικόνα 65: Μετονομασία στερεών σωμάτων χώρου χαμηλής τάσης



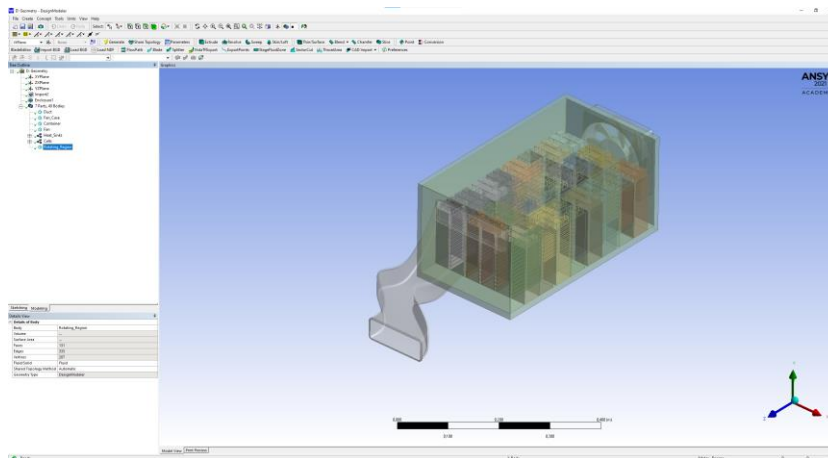
Εικόνα 66: Μετονομασία στερεών σωμάτων και ομαδοποίησή τους στον χώρο υψηλής τάσης

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η εντολή Enclosure για κάθε ανεμιστήρα, δημιουργώντας έτσι το περιστρεφόμενο κυλινδρικό χωρίο με την γεωμετρία της πτερωτής. Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται αφενός επειδή πρέπει να σχεδιασθούν τα χωρία στο οποία υπάρχει ροή και να χαρακτηριστούν ως Fluids και αφετέρου επειδή ακολούθως θα τεθούν

περιστρεφόμενα με δυναμικό επαναληπτικό υπολογισμό του πλέγματος κατά την φάση της επίλυσης. Κατά αυτόν τον τρόπο θα προσομοιωθούν οι ανεμιστήρες του συστήματος. Ταυτόχρονα γίνεται και η αντίστοιχη μετονομασία κάθε χωρίου όπως και προηγουμένως.

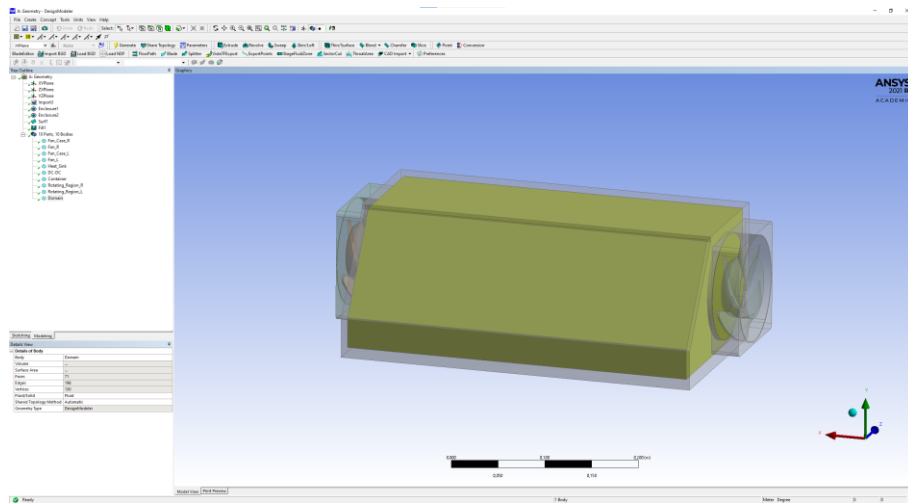


Εικόνα 67: Δημιουργία rotating regions στον χώρο χαμηλής τάσης

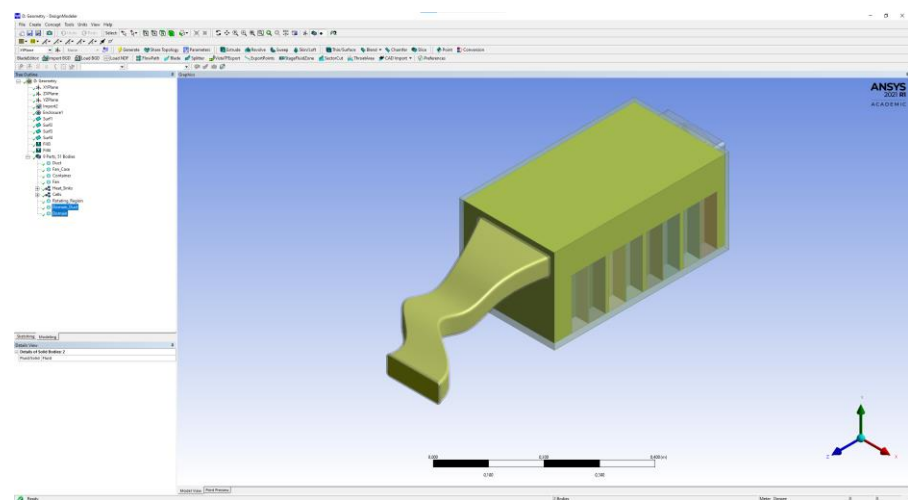


Εικόνα 68: Δημιουργία rotating region στο χώρο υψηλής τάσης

Έπειτα, για την διαμόρφωση του υπολογιστικού χωρίου κάθε φορά εσωτερικά του εκάστοτε χώρου, επιλέγονται οι κατάλληλες άκρες και με την εντολή Surfaces from Edges δημιουργούνται οι επιφάνειες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην εντολή Fill (Fill by Caps). Προκύπτει το Fluid Domain στο οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί του επιλύτη.



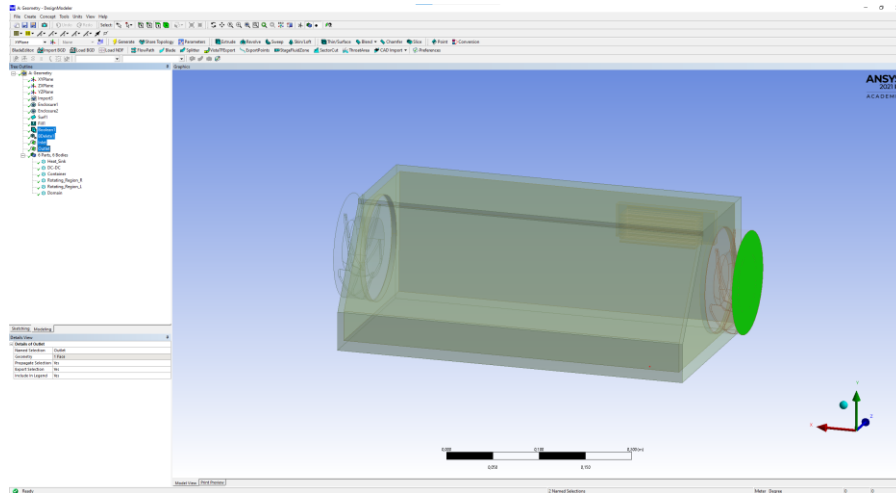
Εικόνα 69: Δημιουργία υπολογιστικού χωρίου στον χώρο χαμηλής τάσης



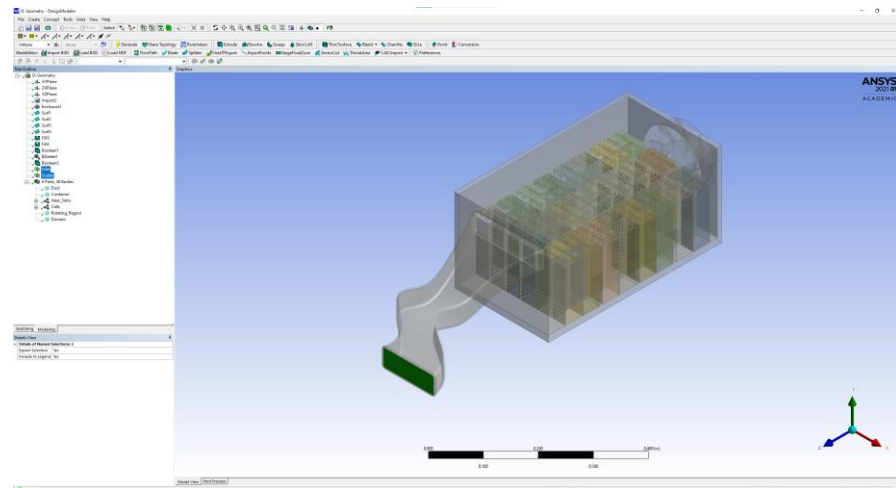
Εικόνα 70: Δημιουργία υπολογιστικού χωρίου στον χώρο υψηλής τάσης

Τέλος, με την χρήση της εντολής Boolean Subtract και Boolean Unite διαχωρίζονται τα περιστρεφόμενα χωρία των ανεμιστήρων από το κύριο υπολογιστικό χωρίο και στην περίπτωση του χώρου υψηλής τάσης ενώνονται τα δυο χωρία που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Επιπλέον διαγράφουμε τους ανεμιστήρες και τα κελύφη τους καθώς το μόνο που χρειάζεται είναι το περιστρεφόμενο χωρίο το οποίο έχει κρατήσει την γεωμετρία της πτερωτής, όπως και τον αγωγό εισόδου στον χώρο υψηλής τάσης καθώς το υπολογιστικό χωρίο έχει διατηρήσει την εσωτερική γεωμετρία του. Ιδιαίτερα σημαντικό πριν προχωρήσουμε στην φάση της πλεγματοποίησης είναι η χρήση της εντολής Named

Selection για τον καθορισμό των διατομών εισόδου και εξόδου του ρευστού, καθώς μεταφέρονται αυτόματα στην καρτέλα των οριακών συνθηκών κατά την φάση της ρύθμισης της επίλυσης.



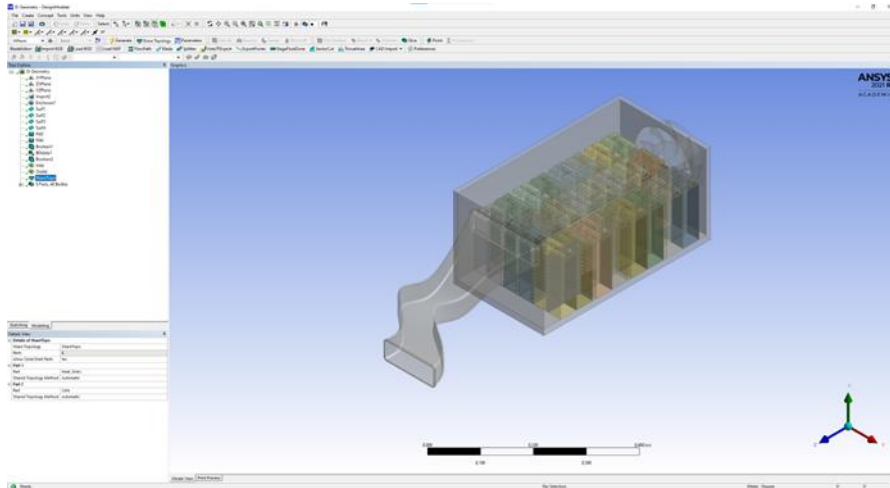
Εικόνα 71: Δημιουργία Named Selections στον χώρο χαμηλής τάσης



Εικόνα 72: Δημιουργία Named Selections στον χώρο υψηλής τάσης

Συγκεκριμένα στην περίπτωση του πιο περίπλοκου χώρου υψηλής τάσης χρησιμοποιείται και η εντολή Shared Topology, η οποία θα χρησιμεύσει κατά την διάρκεια της πλεγματοποίησης στην αυτόματη προσαρμογή των Contacts χωρίς την δημιουργία

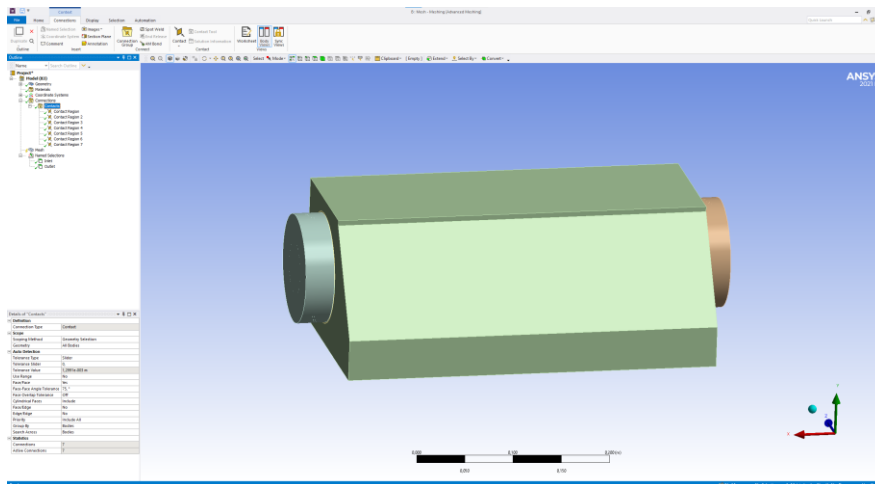
Cyclic Dependencies σε Overlapping Contact Regions, κάτι που θα απέτρεπε το ANSYS Fluent να πραγματοποιήσει την επίλυση.



Εικόνα 73: Χρήση της εντολής Shared Topology στον χώρο υψηλής τάσης

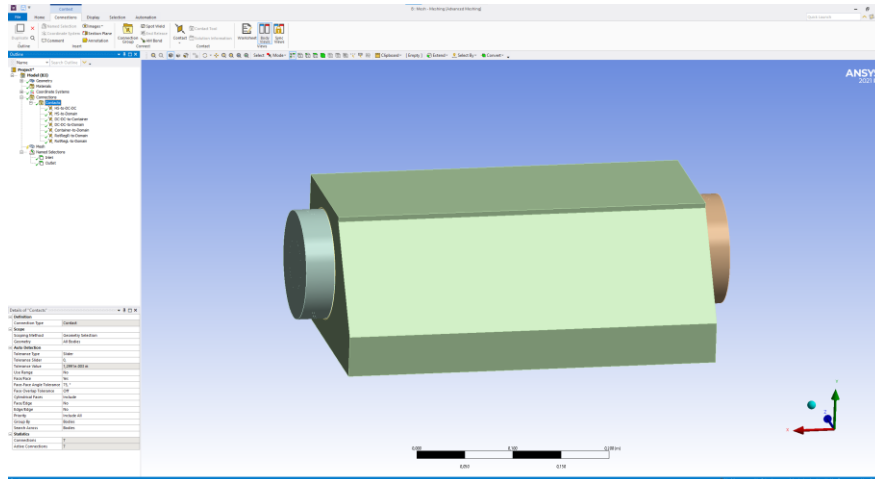
7.3 Πλεγματοποίηση στον Χώρο Χαμηλής Τάσης

Η πλεγματοποίηση της εκάστοτε γεωμετρίας μπορούσε να πραγματοποιηθεί είτε στο ANSYS Meshing είτε χρησιμοποιώντας το ANSYS Fluent (With Fluent Meshing). Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το ANSYS Meshing και στη συνέχεια να εξαχθεί το πλέγμα στο ANSYS Fluent. Εισάγοντας την γεωμετρία του χώρου χαμηλής τάσης στο Meshing, πρωταρχικό μέλημα ήταν ο έλεγχος των Contacts στην καρτέλα Connections. Πρέπει να εμφανίζονται όλες οι επαφές των εξαρτημάτων του συναρμολογήματος και να ελεγχθούν για Overlapping Contact Regions.



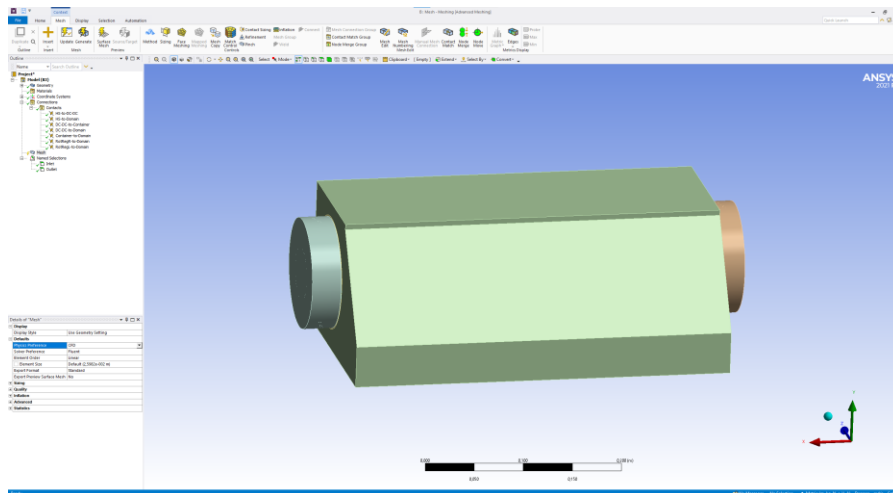
Εικόνα 74: Έλεγχος των Contacts στην καρτέλα Connections

Έχοντας ολοκληρώσει τον έλεγχο διαπιστώνοντας την ορθότητα των Contacts, ακολουθεί η μετονομασία τους για την ευκολότερη ταυτοποίηση τους κατά την φάση της επίλυσης στο Fluent.



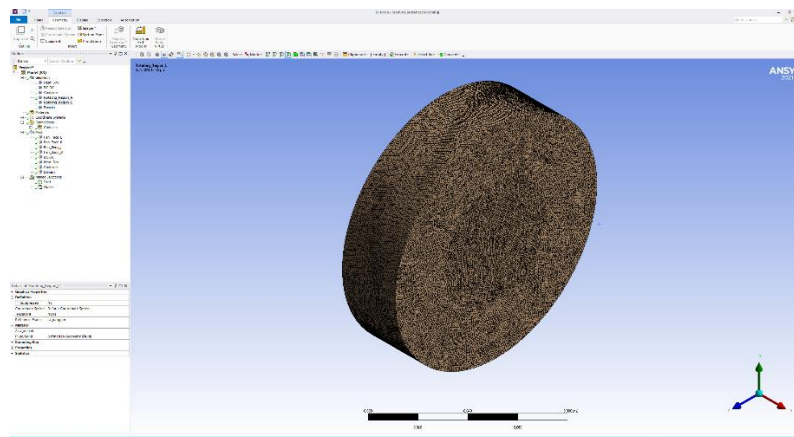
Εικόνα 75: Μετονομασία των Contacts

Ξεκινώντας την διαδικασία πλεγματοποίησης στην καρτέλα Mesh (Defaults) τέθηκε το Physics Preference στο CFD και το Solver Preference στο Fluent.

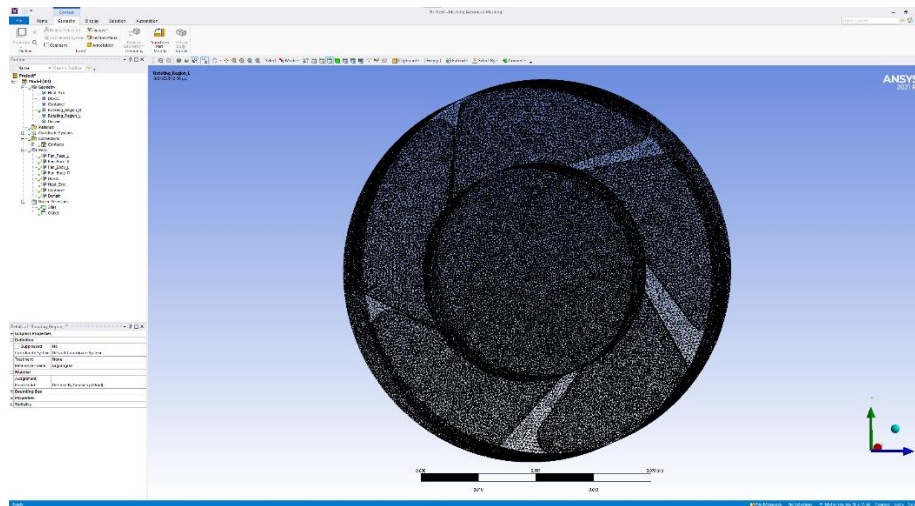


Εικόνα 76: Ρυθμίσεις Mesh

Έπειτα με την εντολή Insert Sizing (Face Sizing & Body Sizing) ρυθμίστηκε το μέγεθος των στοιχείων σε όλα τα εξαρτήματα του συναρμολογήματος. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε το υβριδικό default σύστημα του ANSYS Meshing για CFD τετραεδρικών και εξαεδρικών στοιχείων. Συγκεκριμένα για τα Rotating Regions των ανεμιστήρων χρησιμοποιήθηκε ένα Face Sizing στις αντίστοιχες επιφάνειες Inlet και Outlet με μέγεθος στοιχείων 1mm και ένα Body Sizing με μέγεθος στοιχείων 1mm και τις εντολές Capture Curvature και Capture Proximity ενεργές, με minimum curvature size το default που εντόπιζε το Meshing και minimum proximity size 0.7mm. Το πλέγμα που διαμορφώθηκε στα Rotating Regions απεικονίζεται παρακάτω.

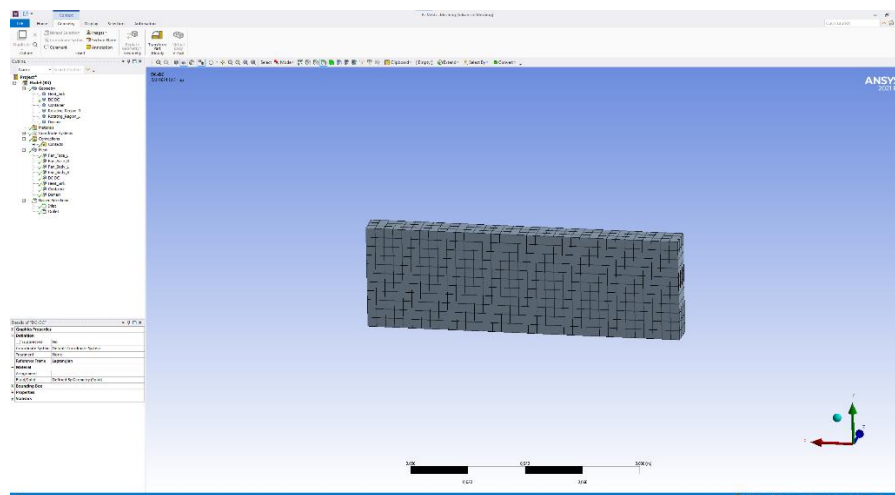


Εικόνα 77: Πλέγμα rotating region

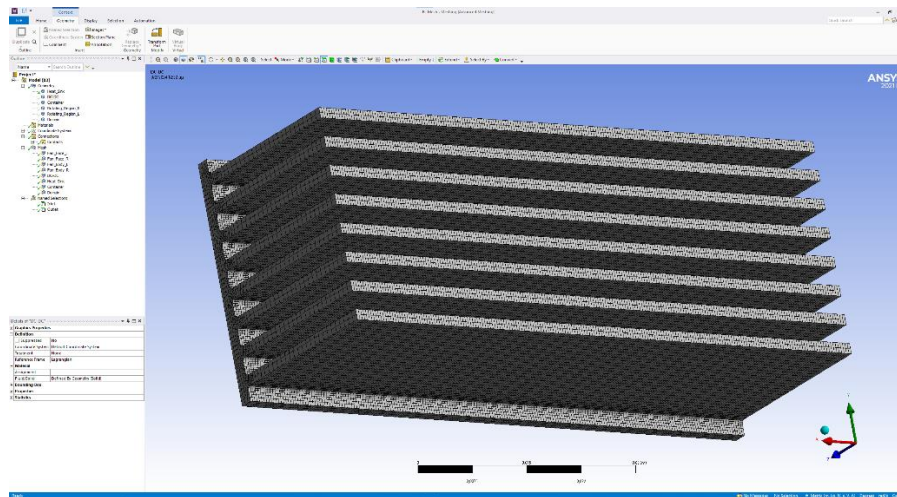


Εικόνα 78: Πλέγμα rotating region (2)

Σειρά είχαν ο μετατροπέας DC-DC και ο εναλλάκτης θερμότητας. Για τον μετατροπέα χρησιμοποιήθηκε ένα Face Sizing με μέγεθος στοιχείων 5mm και την εντολή Capture Proximity ενεργή με minimum proximity size 1mm. Για τον εναλλάκτη χρησιμοποιήθηκε και εδώ ένα Face Sizing με μέγεθος στοιχείων 5mm και τις εντολές Capture Proximity και Capture Curvature ενεργές, με minimum proximity size 1mm και minimum curvature size το default που αναγνώριζε το Meshing.

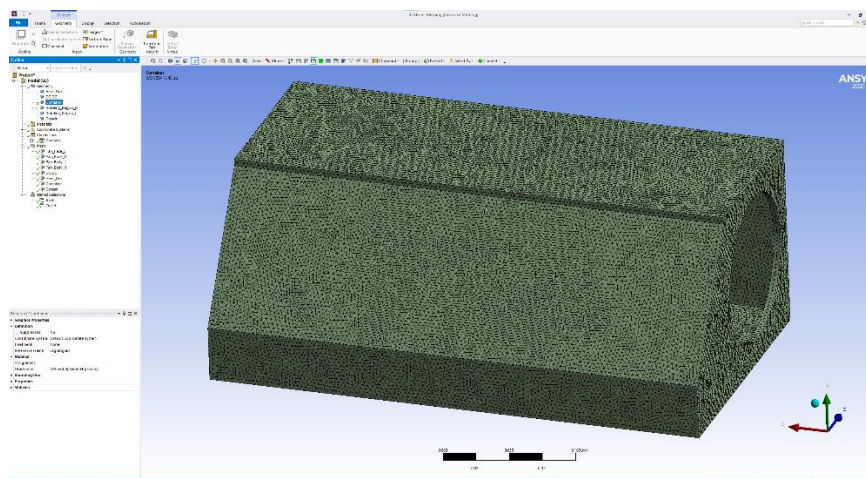


Εικόνα 79: Πλέγμα μετατροπέα DC-DC

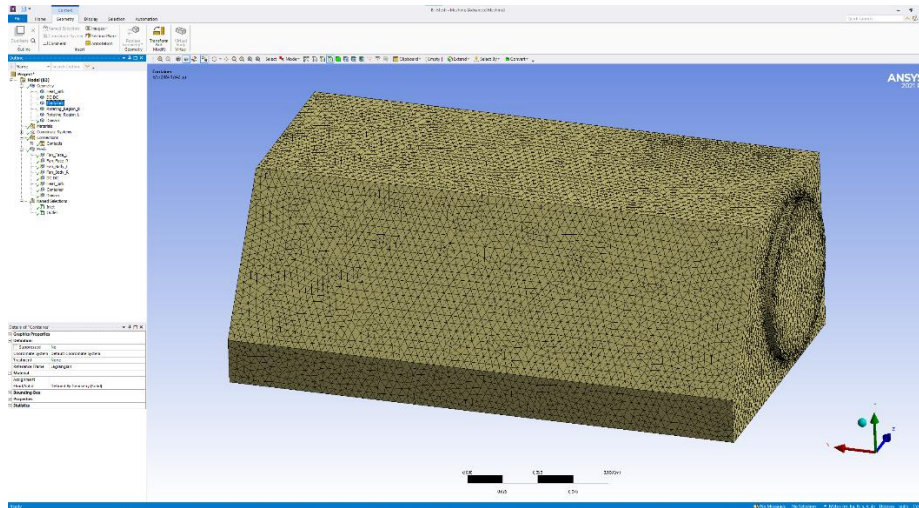


Εικόνα 80: Πλέγμα εναλλάκτη θερμότητας

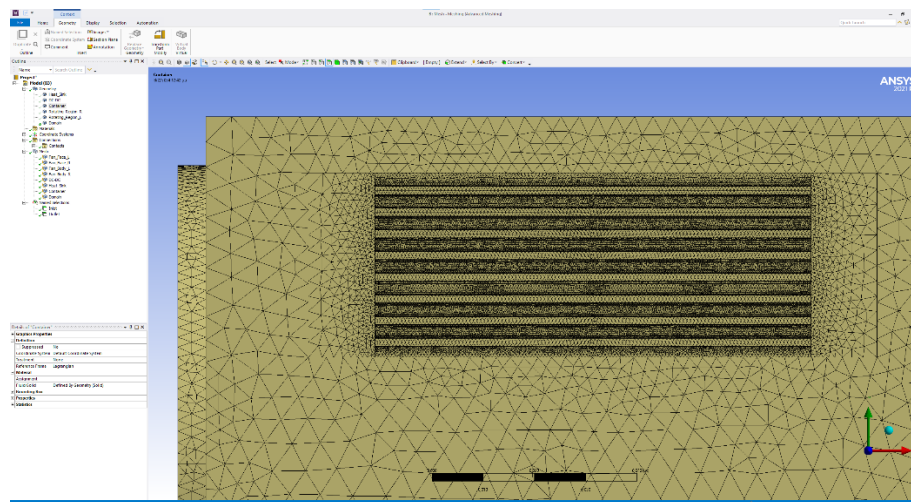
Τέλος ρυθμίστηκε το μέγεθος των στοιχείων του πλαισίου (Container) και του υπολογιστικού χωρίου (Domain). Για το πλαίσιο χρησιμοποιήθηκε ένα Body Sizing με μέγεθος στοιχείων 5mm και ένα Face Sizing για τις εγκοπές των ανεμιστήρων με μέγεθος στοιχείων 3mm. Για το υπολογιστικό χωρίο χρησιμοποιήθηκε και εδώ ένα Body Sizing με μέγεθος στοιχείων 5mm και τις εντολές Capture Proximity και Capture Curvature ενεργές, με minimum proximity size 0.7mm και minimum curvature size το default που αναγνώριζε το Meshing και ένα Face Sizing για τα κυλινδρικά άκρα του που εισέρχονται στις εγκοπές των ανεμιστήρων με μέγεθος στοιχείων 3mm.



Εικόνα 81: Πλέγμα πλαισίου χαμηλής τάσης

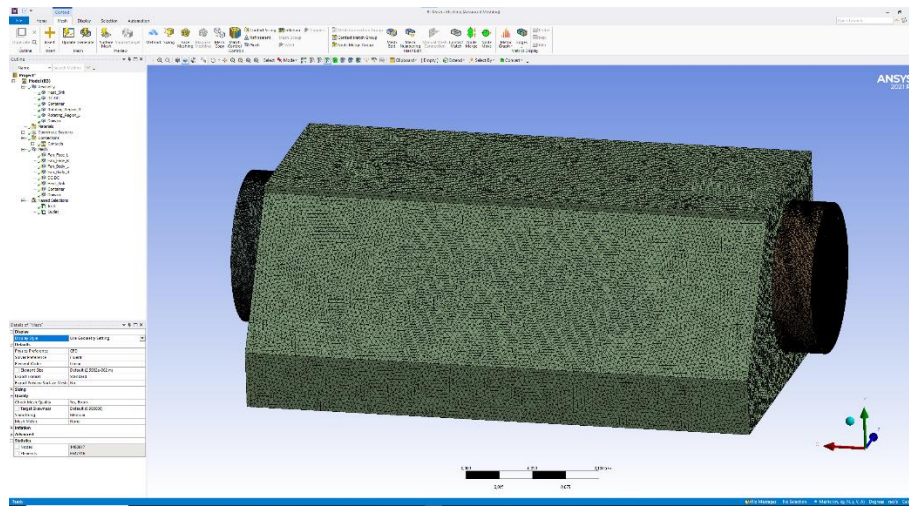


Εικόνα 82: Πλέγμα υπολογιστικού χωρίου



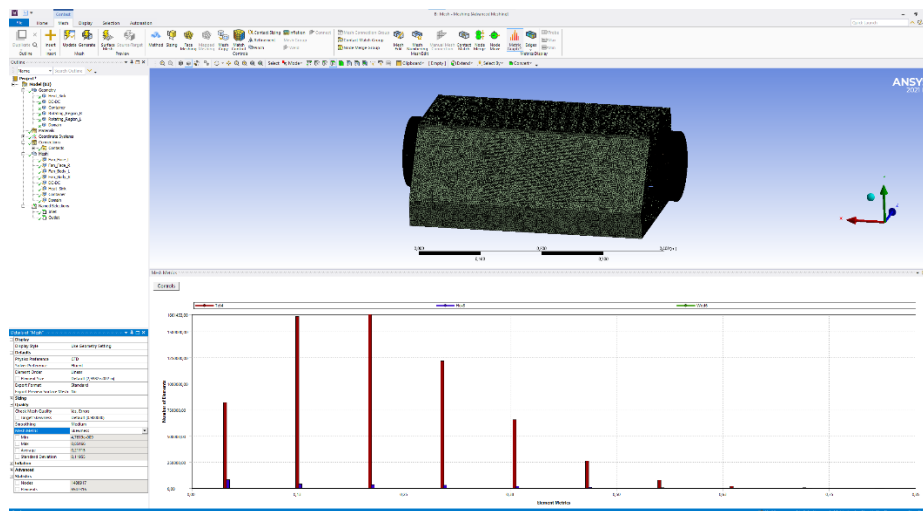
Εικόνα 83: Πλέγμα υπολογιστικού χωρίου κοντά την περιοχή του μετατροπέα DC-DC και του εναλλάκτη θερμότητας

Το πλέγμα του συνολικού συναρμολογήματος προκύπτει με την χρήση της εντολής Update Mesh ή Generate Mesh και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

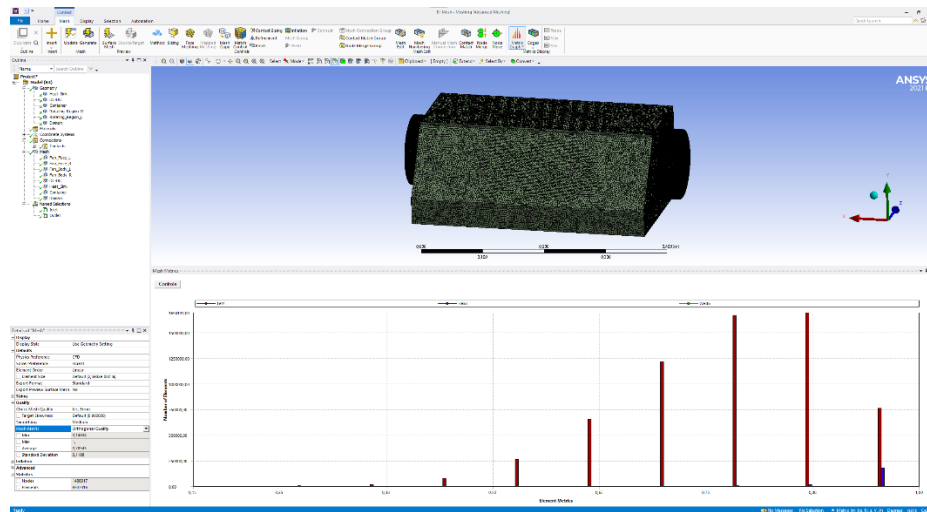


Εικόνα 84: Πλέγμα συνολικού συναρμολογήματος χώρου χαμηλής τάσης

Προφανώς τα νούμερα που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω για το μέγεθος των στοιχείων είναι προϊόν μιας εκτενούς επαναληπτικής διαδικασίας δοκιμών και επαλήθευσης με τους παράγοντες ποιότητας του πλέγματος (Skewness & Orthogonal Quality). Για το τελικό πλέγμα παρουσιάζονται οι δυο αυτοί παράγοντες και οι τιμές τους. Παρατηρείται ότι η ποιότητα του πλέγματος βρίσκεται εντός των επιθυμητών και αποδεκτών από την ANSYS ορίων (όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 5.1.4) για την εκκίνηση της δεύτερης φάσης της προσομοίωσης, δηλαδή την προετοιμασία της επίλυσης στο Fluent.



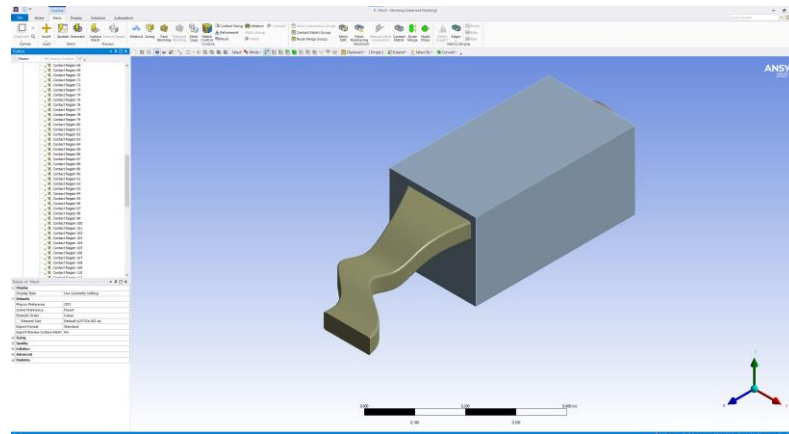
Εικόνα 85: Παράγοντας ποιότητας πλέγματος skewness



Εικόνα 86: Παράγοντας ποιότητας πλέγματος orthogonal quality

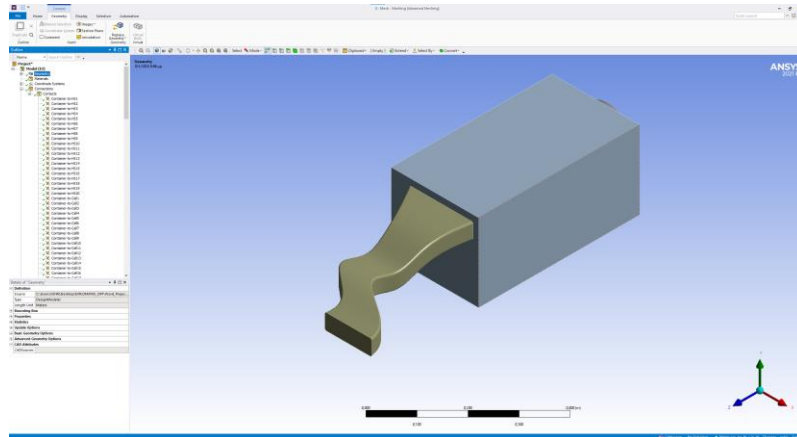
7.4 Πλεγματοποίηση στον Χώρο Υψηλής Τάσης

Η ίδια διαδικασία με το προηγούμενο υποκεφάλαιο ακολουθείται και για τον χώρο υψηλής τάσης. Αρχικά εισήχθη η γεωμετρία του χώρου υψηλής τάσης στο ANSYS Meshing και ελέγχθηκαν τα Contacts στην καρτέλα Connections.



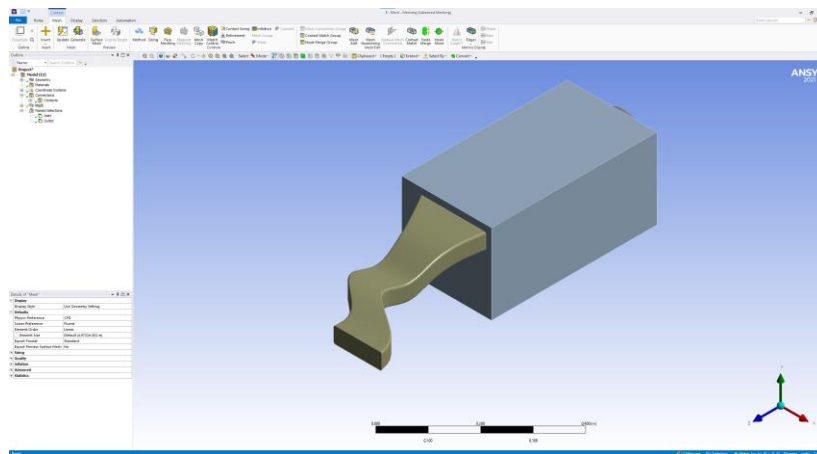
Εικόνα 87: Έλεγχος των Contacts στην καρτέλα Connections

Έχοντας ολοκληρώσει τον έλεγχο διαπιστώνοντας την ορθότητα των Contacts, ακολουθεί η μετονομασία τους για την ευκολότερη ταυτοποίηση τους κατά την φάση της επίλυσης στο Fluent.



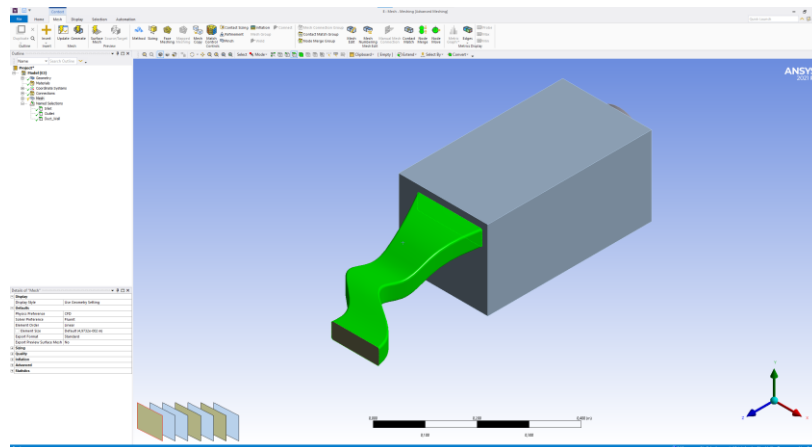
Εικόνα 88: Μετονομασία των Contacts

Ξεκινώντας την διαδικασία πλεγματοποίησης στην καρτέλα Mesh (Defaults) τέθηκε το Physics Preference στο CFD και το Solver Preference στο Fluent.



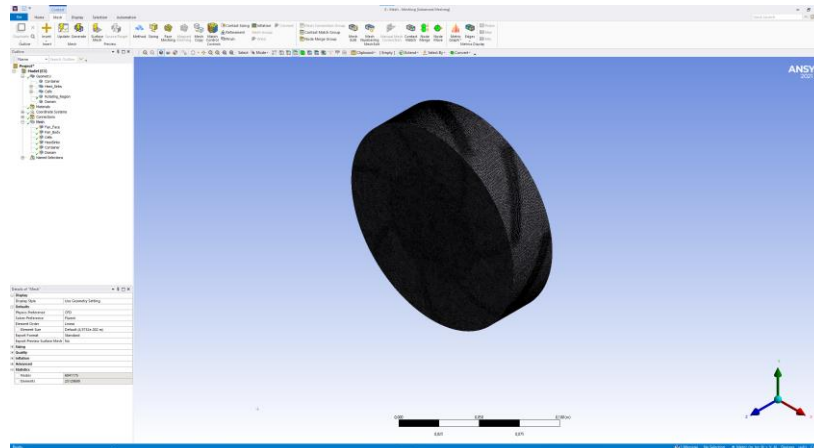
Εικόνα 89: Ρυθμίσεις Mesh

Στην περίπτωση του HV χώρου, επειδή κατά την επεξεργασία της γεωμετρίας στο Design Modeler διαγράφηκε ο αγωγός εισόδου, στην καρτέλα Named Selections προστέθηκε η εξωτερική επιφάνεια του υπολογιστικού χωρίου που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και τέθηκε ως Wall, για να αναγνωριστεί από το Fluent στην διάρκεια της προετοιμασίας της επίλυσης.

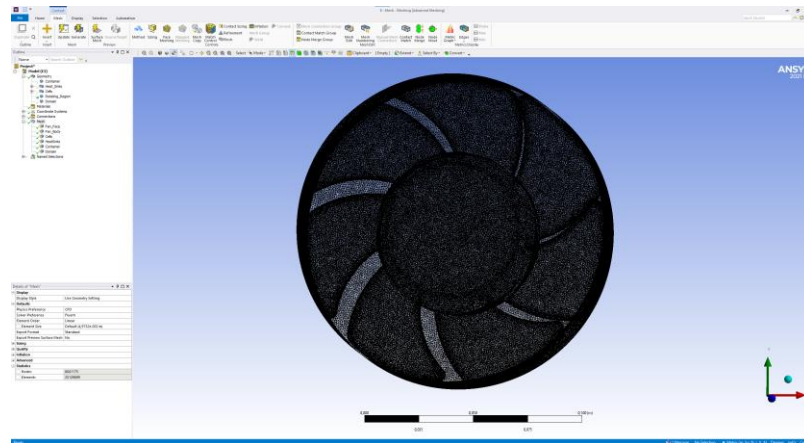


Εικόνα 90: Δημιουργία Wall Named Selection

Έπειτα με την εντολή Insert Sizing (Face Sizing & Body Sizing) ρυθμίστηκε το μέγεθος των στοιχείων σε όλα τα εξαρτήματα του συναρμολογήματος. Να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε το υβριδικό default σύστημα του ANSYS Meshing για CFD τετραεδρικών και εξαεδρικών στοιχείων. Συγκεκριμένα για το Rotating Region χρησιμοποιήθηκε ένα Face Sizing στην διατομή εξόδου (outlet) με μέγεθος στοιχείων 1mm και ένα Body Sizing με μέγεθος στοιχείων 1mm και τις εντολές Capture Curvature και Capture Proximity ενεργές, με minimum curvature size το default που εντόπιζε το Meshing και minimum proximity size 0.7mm.

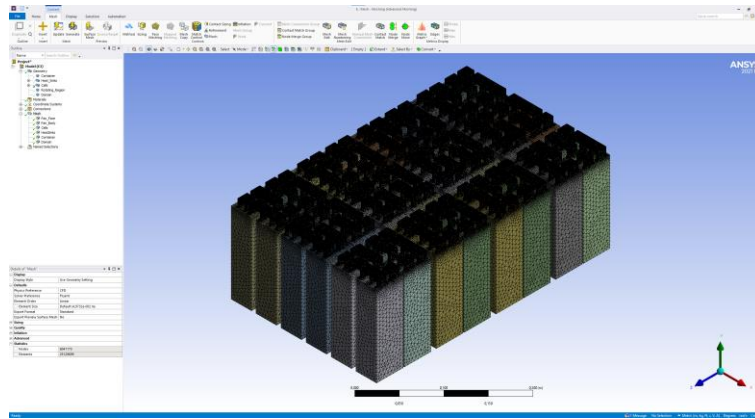


Εικόνα 91: Πλέγμα rotating region

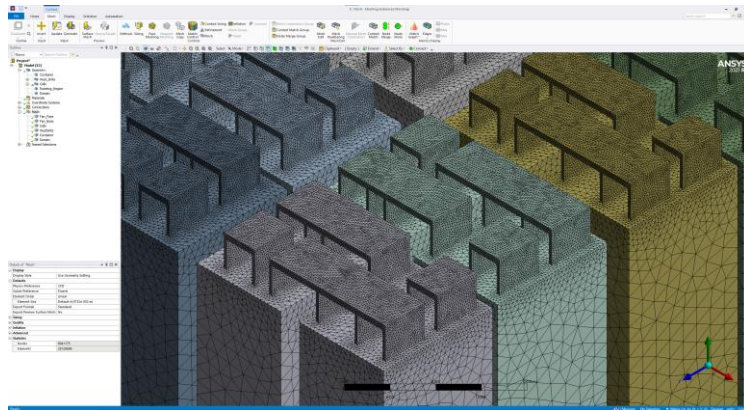


Εικόνα 92: Πλέγμα rotating region (2)

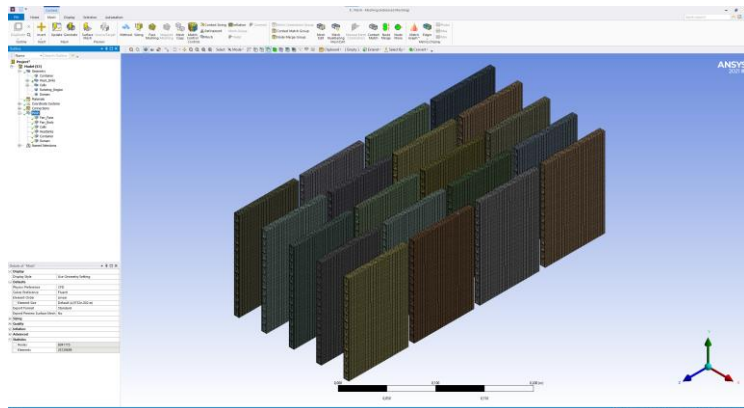
Ακολούθησαν τα κελιά των μπαταριών με τις γλωπτίδες σύνδεσής τους και οι εναλλάκτες θερμότητας. Για τα κελιά χρησιμοποιήθηκε ένα Face Sizing με μέγεθος στοιχείων 5mm και την εντολή Capture Proximity ενεργή με minimum proximity size 0.7mm. Για τους εναλλάκτες χρησιμοποιήθηκε και εδώ ένα Face Sizing με μέγεθος στοιχείων 1mm.



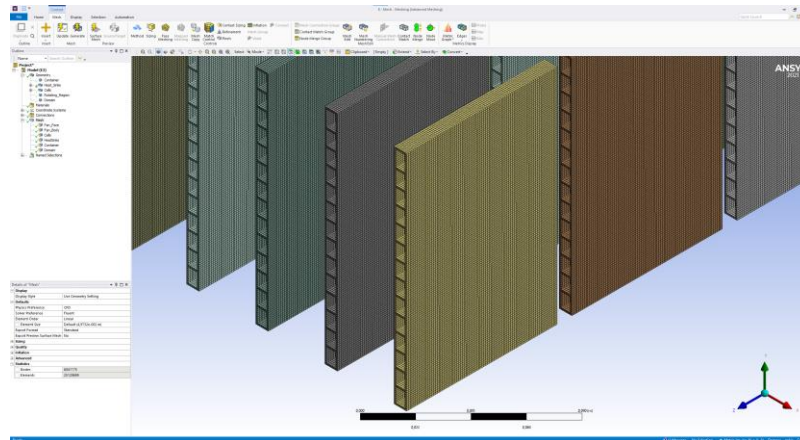
Εικόνα 93: Πλέγμα κελιών μπαταριών και γλωττίδων σύνδεσης



Εικόνα 94: Πλέγμα κελιών μπαταριών και γλωττίδων σύνδεσης (2)

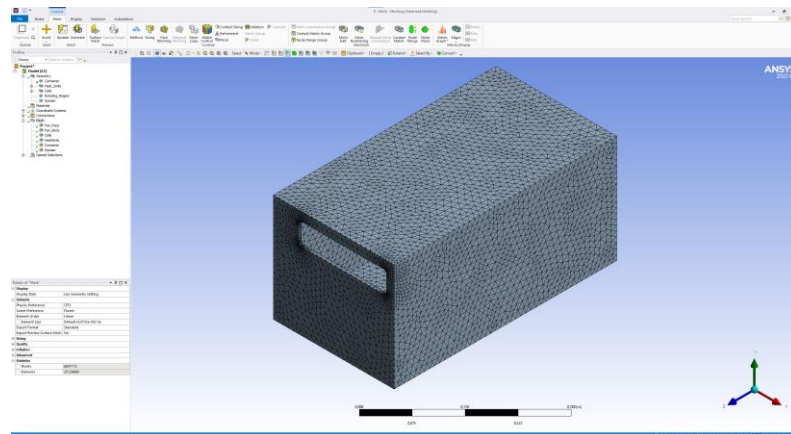


Εικόνα 95: Πλέγμα εναλλακτών θερμότητας

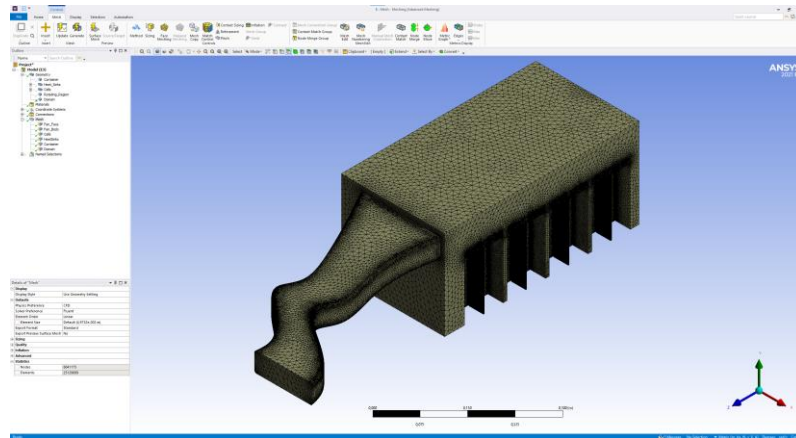


Εικόνα 96: Πλέγμα εναλλακτών θερμότητας (2)

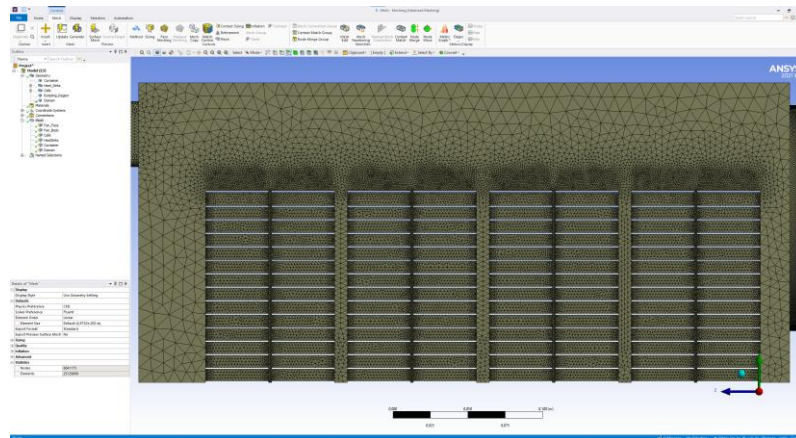
Τέλος ρυθμίστηκε το μέγεθος των στοιχείων του πλαισίου (Container) και του υπολογιστικού χωρίου (Domain). Για το πλαίσιο χρησιμοποιήθηκε ένα Face Sizing με μέγεθος στοιχείων 10mm και την εντολή Capture Curvature ενεργή με minimum curvature size το default που εντόπιζε το Meshing. Για το υπολογιστικό χωρίο χρησιμοποιήθηκε και εδώ ένα Face Sizing με μέγεθος στοιχείων 10mm και τις εντολές Capture Proximity και Capture Curvature ενεργές, με minimum proximity size 0.7mm και minimum curvature size το default που αναγνώριζε το Meshing.



Εικόνα 97: Πλέγμα πλαισίου υψηλής τάσης

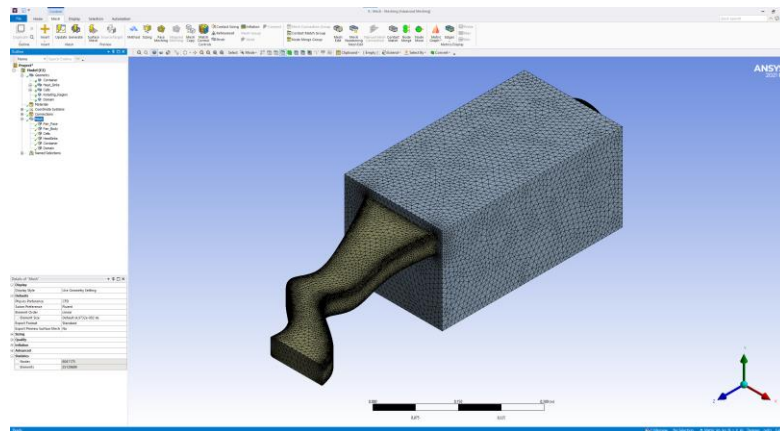


Εικόνα 98: Πλέγμα υπολογιστικού χωρίου



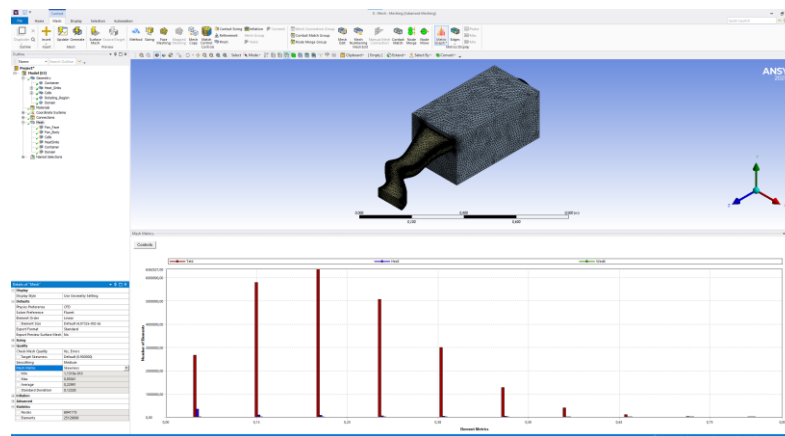
Εικόνα 99: Πλέγμα υπολογιστικού χωρίου κοντά στην περιοχή των κελιών και των εναλλακτών θερμότητας

Το πλέγμα του συνολικού συναρμολογήματος προκύπτει με την χρήση της εντολής Update Mesh ή Generate Mesh και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

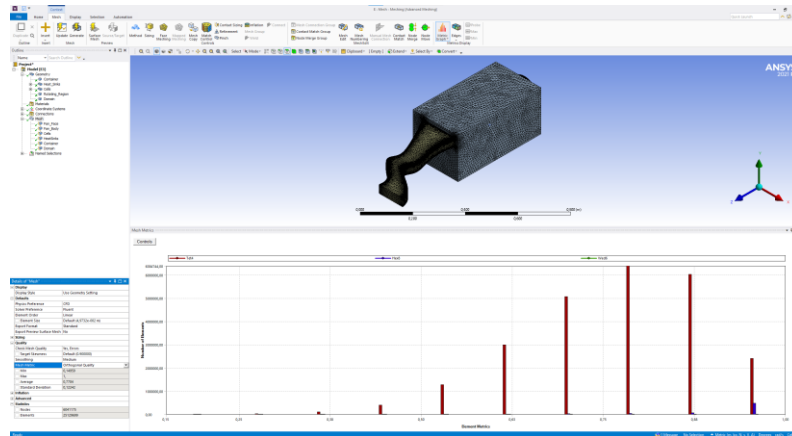


Εικόνα 100: Πλέγμα συνολικού συναρμολογήματος χώρου υψηλής τάσης

Αντίστοιχα με το προηγούμενο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράγοντες ποιότητας skewness και orthogonal quality του τελικού πλέγματος. Παρατηρείται ότι η ποιότητα του πλέγματος βρίσκεται εντός των επιθυμητών και αποδεκτών από την ANSYS ορίων (όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο υποκεφάλαιο 5.1.4) για την εκκίνηση της δεύτερης φάσης της προσομοίωσης, δηλαδή την προετοιμασία της επίλυσης στο Fluent.



Εικόνα 101: Παράγοντας ποιότητας πλέγματος skewness



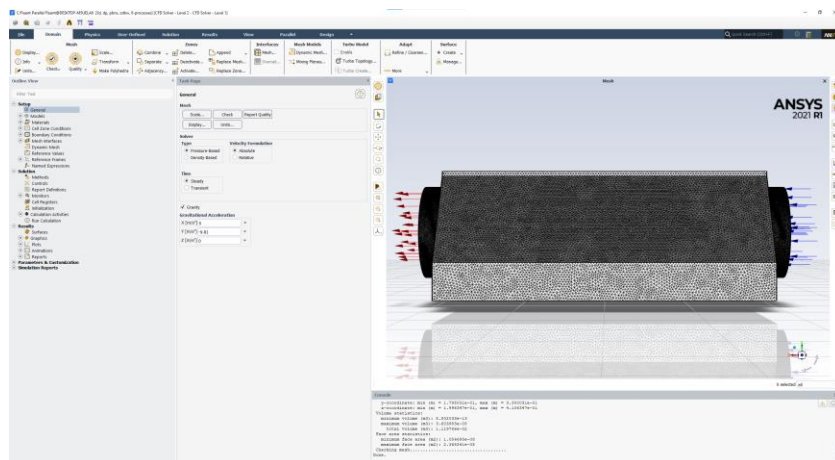
Εικόνα 102: Παράγοντας ποιότητας πλέγματος orthogonal quality

8. Προσομοίωση στο Λογισμικό ANSYS Fluent

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η αναλυτική διαδικασία ρύθμισης της επίλυσης της προσομοίωσης, τόσο για τον χώρο χαμηλής τάσης όσο και για τον χώρο υψηλής τάσης. Και στις δυο περιπτώσεις αρχικά προετοιμάστηκε η steady state προσομοίωση του συστήματος και εν συνεχεία μετά την επίλυση αυτή ακολουθεί μια transient προσομοίωση. Η διαδικασία είναι πανομοιότυπη και για τις δυο γεωμετρίες με μικρές διαφορές, για τον λόγο αυτό θα αναλυθεί η προσομοίωση για έναν από τους δυο χώρους. Προφανώς οι επιλογές που έγιναν αποτελούν προϊόν πολυάριθμων δοκιμών και επαναλήψεων της διαδικασίας ρύθμισης της προσομοίωσης μέχρι να καταλήξουμε σε ένα ακριβές αλλά ταυτόχρονα οικονομικό από πλευράς υπολογιστικών πόρων μοντέλο. Η ακρίβεια του μοντέλου ελέγχθηκε με βάση τα δεδομένα της τηλεμετρίας κατά την συμμετοχή του μονοθεσίου P20 της ομάδας PROM Racing NTUA FSAE Team στο αγώνισμα endurance του διαγωνισμού Formula Student Germany και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συσσωρευτή ενέργειας του ίδιου μονοθεσίου.

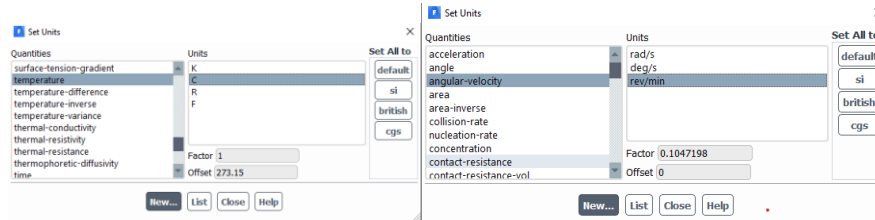
Η ρύθμιση της επίλυσης ξεκινάει εισάγοντας την εκάστοτε γεωμετρία με το αντίστοιχο πλέγμα της στο λογισμικό ANSYS Fluent και ελέγχοντας την σωστή μεταφορά του πλέγματος από την καρτέλα General και έπειτα Mesh Check. Σε περίπτωση σφάλματος, θα εμφανιζόταν το αντίστοιχο μήνυμα στο παράθυρο Console.

Επιλέγονται ο pressure-based τύπος επιλύτη, σταθερός χρόνος για την steady state προσομοίωση και ενεργοποιείται ο υπολογισμός της βαρύτητας με την αντίστοιχη τιμή της.



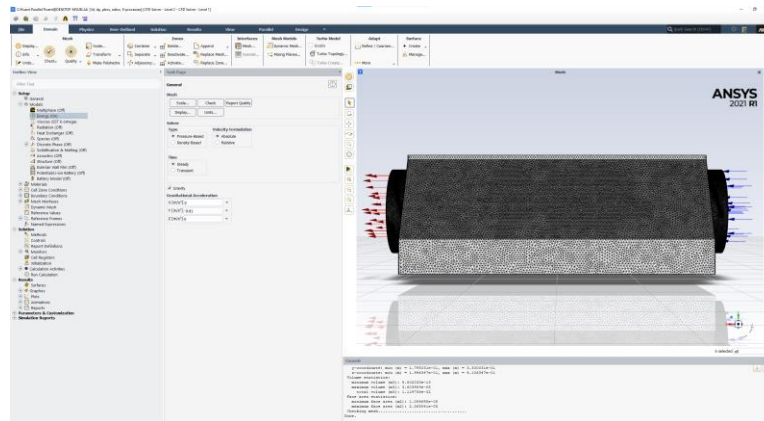
Εικόνα 103: Γενικές επιλογές και έλεγχος πλέγματος

Ταυτόχρονα, προσαρμόζονται οι σωστές μονάδες μέτρησης της θερμοκρασίας σε °C και της γωνιακής ταχύτητας σε rev/min (RPM).



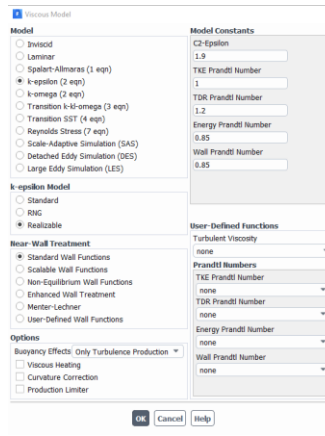
Εικόνα 104: Προσαρμογή μονάδων μέτρησης

Κάτω από την καρτέλα Setup και συγκεκριμένα Models ενεργοποιείται η εξίσωση της ενέργειας για την θερμική ανάλυση του συστήματος.



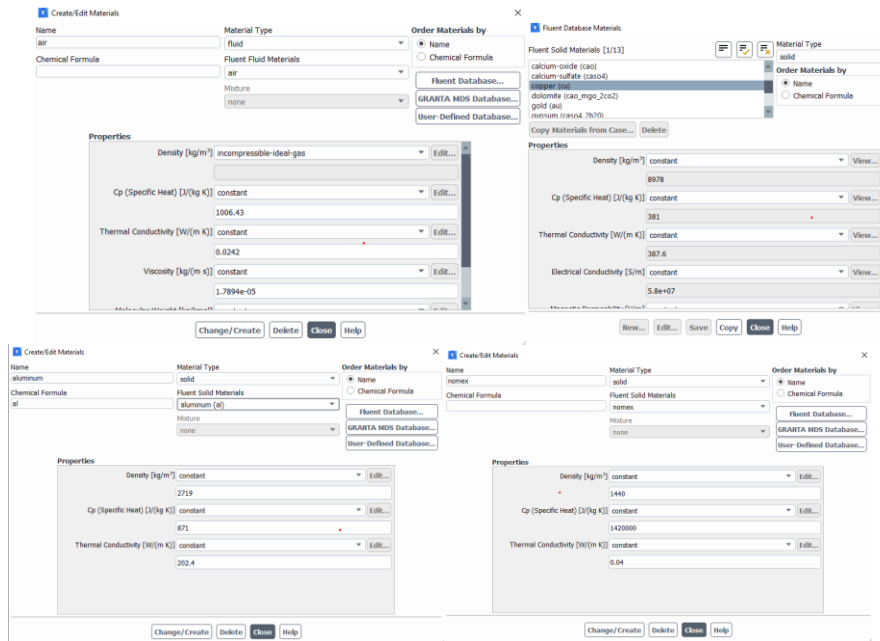
Εικόνα 105: Ενεργοποίηση εξίσωσης ενέργειας

Ακολουθεί η επιλογή του μοντέλου τύρβης στο παράθυρο Viscous. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 5.2.2 το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε είναι το k-epsilon και συγκεκριμένα το Realizable k-epsilon.



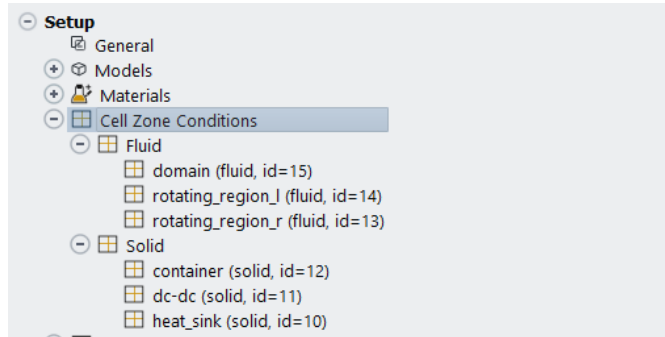
Εικόνα 106: Επιλογή μοντέλου τύρβης

Στη συνέχεια ορίστηκαν τα υλικά τόσο για το ρευστό όσο και για τα στερεά από τα οποία αποτελείται το εκάστοτε συναρμολόγημα. Για το ρευστό χρησιμοποιήθηκε ιδανικός ασυμπίεστος αέρας για την διευκόλυνση της επίλυσης, ενώ από την βάση δεδομένων του Fluent εισήχθησαν ο χαλκός και το αλουμίνιο. Τέλος προστέθηκε το υλικό του πλαισίου nomex χειροκίνητα. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα χαρακτηριστικά κάθε υλικού που χρησιμοποιήθηκε.

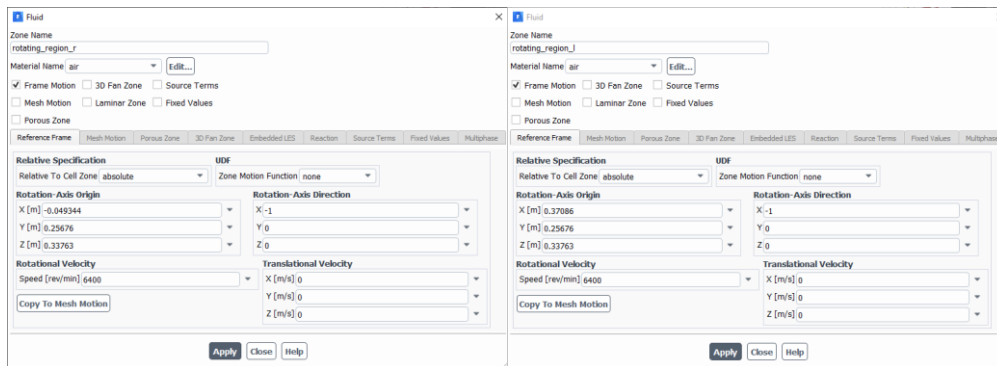


Εικόνα 107: Ορισμός υλικών

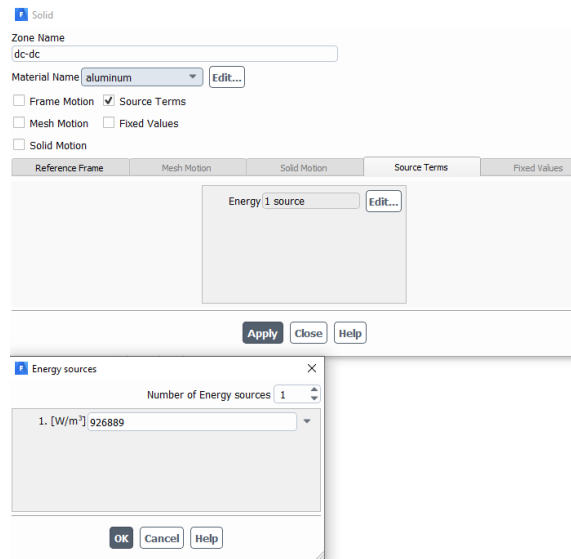
Έπειτα στην καρτέλα Cell Zone Conditions ορίστηκαν τα υλικά κάθε εξαρτήματος του συναρμολογήματος, αλλά και η απαγωγή θερμότητας του μετατροπέα DC-DC σαν σταθερή ποσότητα σε W/m^3 και η ταχύτητα περιστροφής κάθε ανεμιστήρα (δηλαδή του rotating region). Το υπολογιστικό και τα περιστρεφόμενα χωρία των ανεμιστήρων ορίζονται ως αέρας, ο μετατροπέας ως Αλουμίνιο, ο εναλλάκτης θερμότητας ως χαλκός και το πλαίσιο ως Nomex.



Εικόνα 108: Cell Zone Conditions

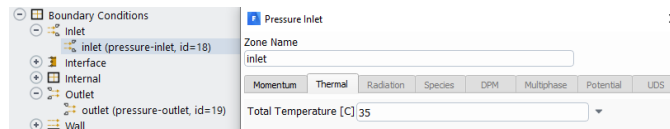


Εικόνα 109: Ορισμός ταχύτητας περιστροφής των rotating regions

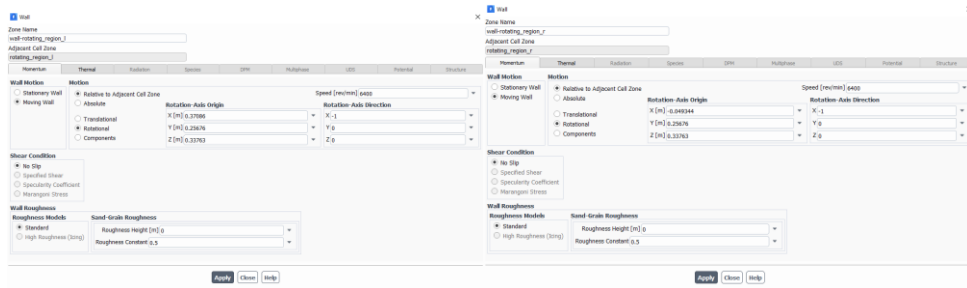


Εικόνα 110: Ορισμός απαγωγής θερμότητας μετατροπέα DC-DC

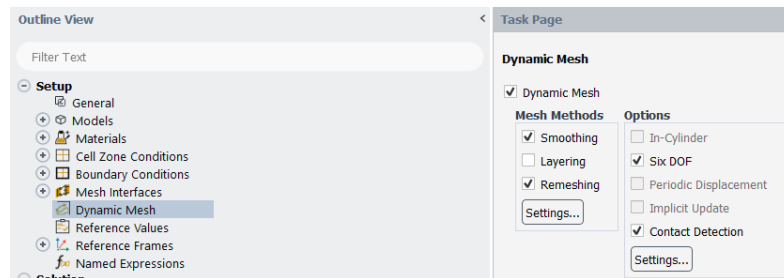
Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες αυτές τέθηκαν ως pressure-inlet με θερμοκρασία ρευστού 35°C, όσο δηλαδή και η μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος και pressure outlet. Ταυτόχρονα στην καρτέλα Wall τέθηκαν περιστρεφόμενα τα χωρία των ανεμιστήρων και ενεργοποιήθηκε για αυτά η λειτουργία Dynamic Mesh. Τέλος, στην καρτέλα Mesh Interfaces τέθηκαν Coupled Walls όλα τα ανιχνευόμενα τείχη εκτός από αυτά των περιστρεφόμενων χωρίων.



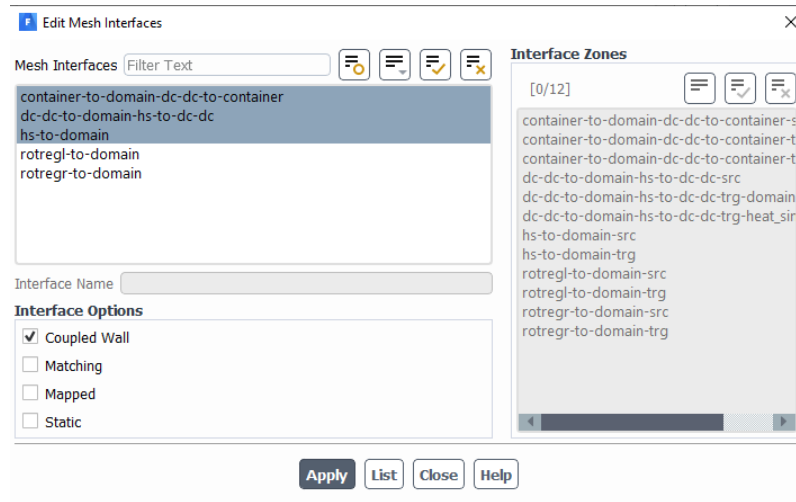
Εικόνα 111: Οριακή συνθήκη εισόδου



Εικόνα 112: Ορισμός περιστρεφόμενων χωρίων

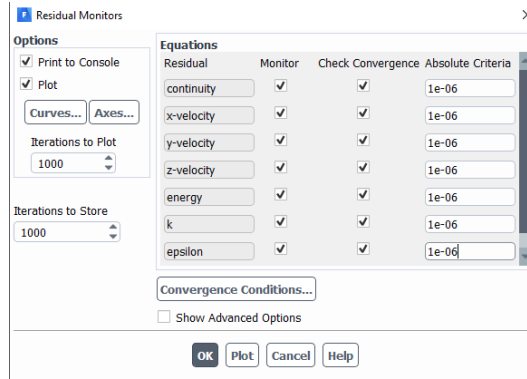


Εικόνα 113: Ορισμός δυναμικού πλέγματος

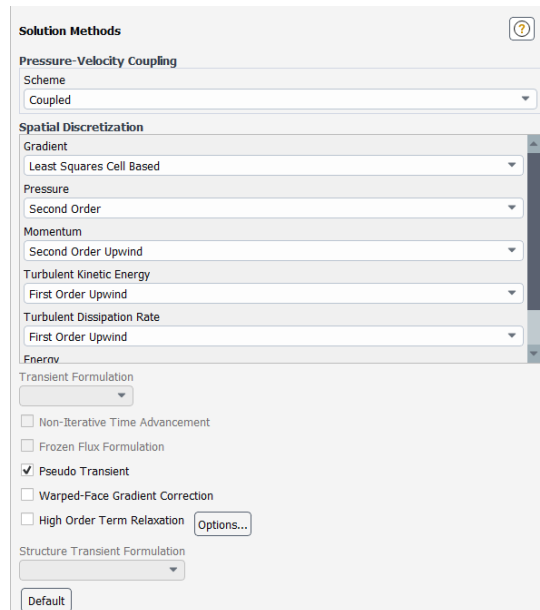


Εικόνα 114: Ορισμός coupled walls

Επόμενο βήμα αποτελεί η ρύθμιση της μεθόδου επίλυσης, τα χαρακτηριστικά της οποίας παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα, και η ρύθμιση της επιθυμούμενης τιμής των υπολειμματικών.



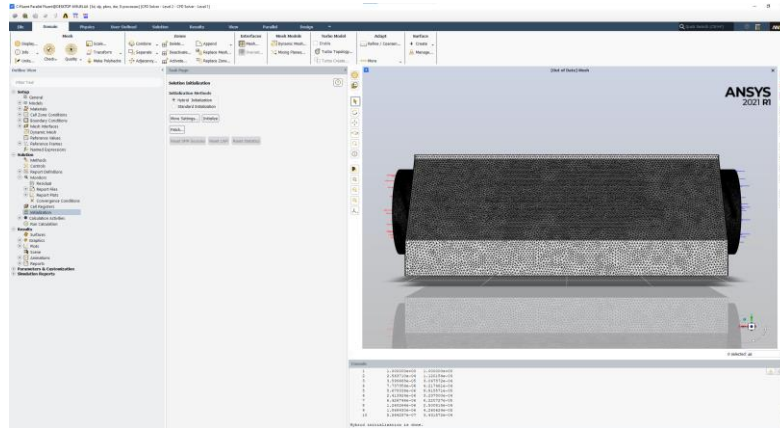
Εικόνα 115: Ορισμός υπολειμματικών (residuals)



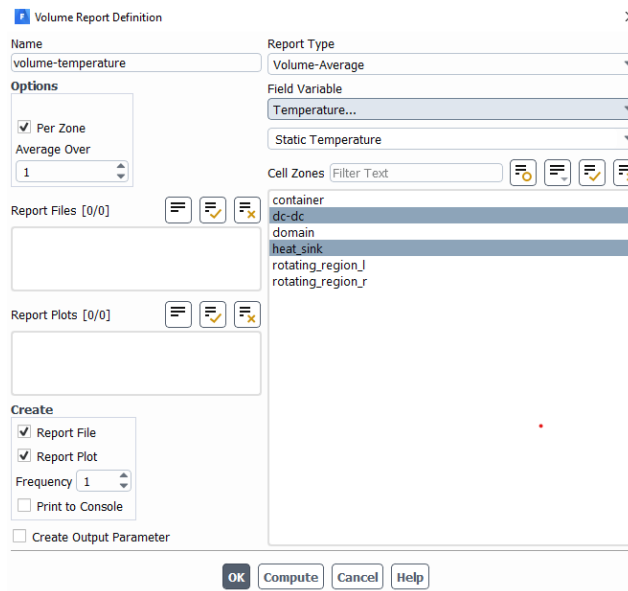
Εικόνα 116: Ορισμός μεθόδου επίλυσης

Κατά αυτόν τον τρόπο ολοκληρώθηκε η ρύθμιση της προσομοίωσης. Πριν την εκκίνηση της προσομοίωσης σημαντικό ήταν να γίνει αρχικοποίηση του προβλήματος, όπου και επιλέχθηκε υβριδική αρχικοποίηση, ενώ εξίσου σημαντικό ήταν να ορισθεί ένα

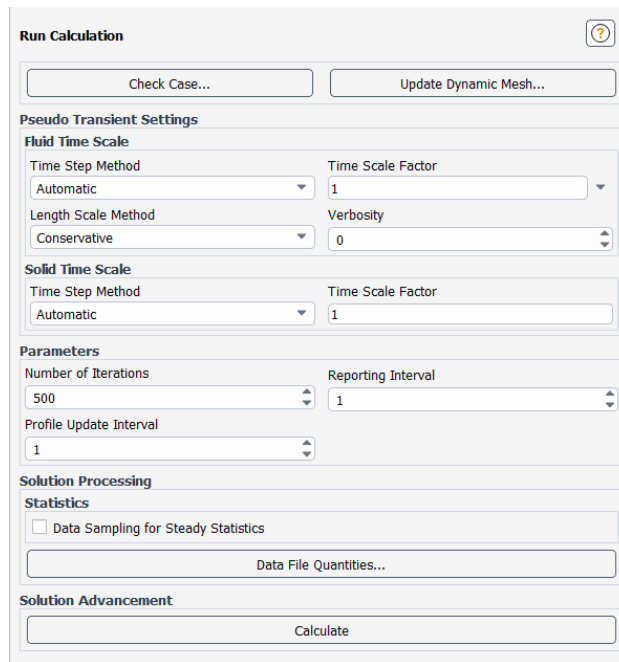
διάγραμμα επισκόπησης των τιμών της θερμοκρασίας των θερμικά κρίσιμων εξαρτημάτων κατά την διάρκεια της επίλυσης. Τελικά, ορίσθηκε η τιμή των 500 επαναλήψεων με δυνατότητα προσθήκης επαναλήψεων μέχρι την σύγκλιση και ξεκίνησε η διαδικασία της επίλυσης.



Εικόνα 117: Υβριδική αρχικοποίηση της επίλυσης

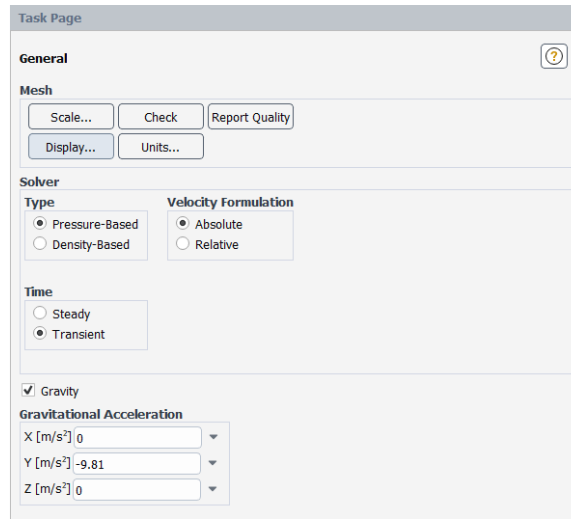


Εικόνα 118: Δημιουργία διαγράμματος επισκόπησης

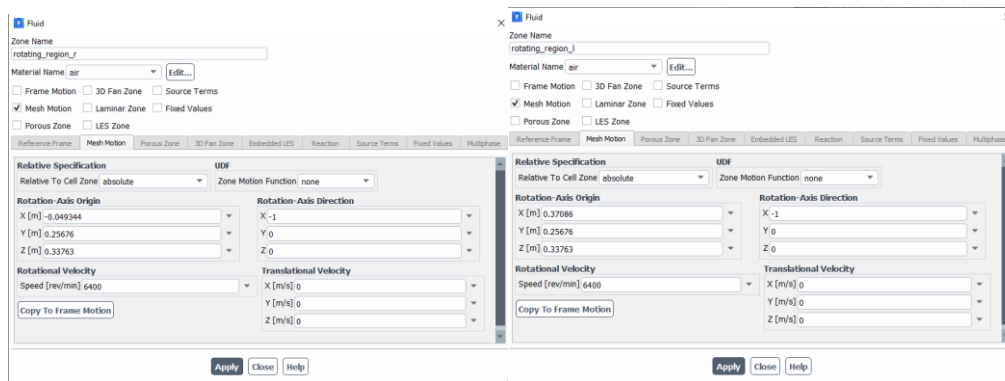


Εικόνα 119: Ορισμός επαναλήψεων επίλυσης

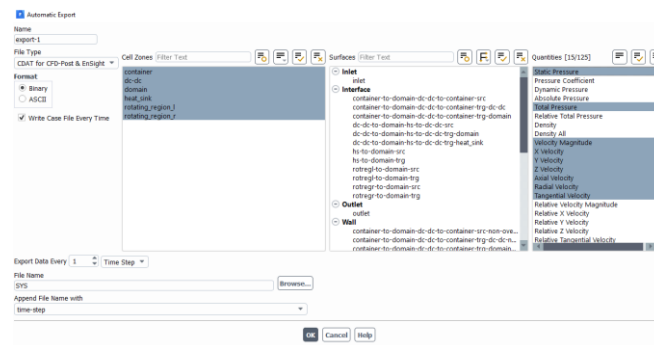
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας. Μετά το πέρας της επίλυσης της steady state προσομοίωσης ακολουθεί το transient μοντέλο. Επιλέγεται ο transient τύπος προσομοίωσης στην γενική καρτέλα και ακολουθεί η ίδια ακριβώς διαδικασία με την steady state προσομοίωση, με την διαφορά ότι στην καρτέλα Cell Zone Conditions για τα περιστρεφόμενα χωρία επιλέγεται το Mesh Motion και όχι το Frame Motion. Επιπλέον, στην καρτέλα Calculation Activities ορίζεται η εξαγωγή των δεδομένων των βασικών μεγεθών όπως η θερμοκρασία, η πίεση και οι ταχύτητες για κάθε χρονικό βήμα για ευκολότερη οπτικοποίηση στην φάση της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Τέλος τέθηκε κάθε χρονικό βήμα να υπολογίζεται από 30 επαναλήψεις (μετά την σύγκλιση της επίλυσης της steady state προσομοίωσης) για συνολικά 300 χρονικά βήματα του 1 δευτερολέπτου. Ισοδυναμεί σε χρόνο 5 λεπτών σε πλήρως αγωνιστικές συνθήκες με την μεγαλύτερη απαγωγή θερμότητας, χρόνος που υπερβαίνει το μέσο όρο με βάση τα δεδομένα των διαγωνισμών Formula Student.



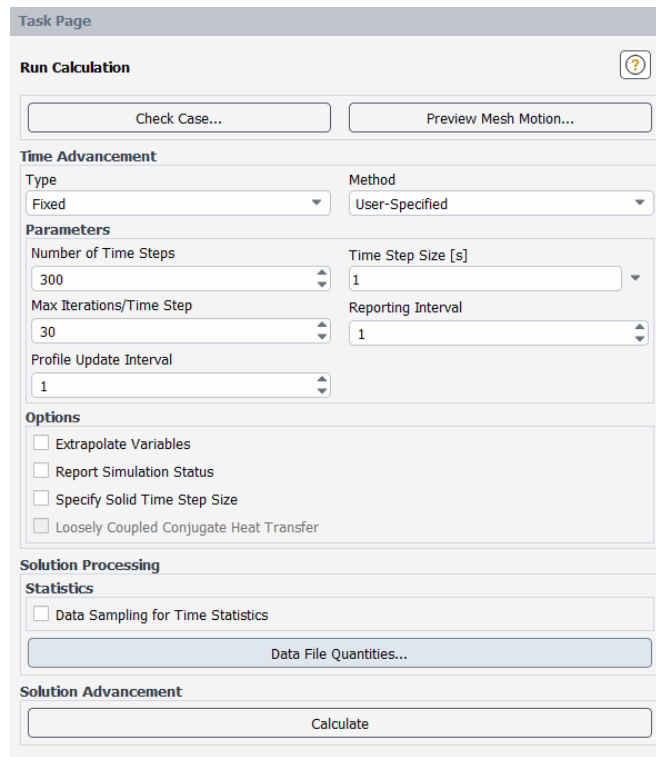
Εικόνα 120: Ορισμός transient προσομοίωσης



Εικόνα 121: Επιλογή Mesh Motion



Εικόνα 122: Εξαγωγή δεδομένων



Εικόνα 123: Ορισμός επαναλήψεων επίλυσης

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο για τον χώρο υψηλής τάσης. Η διαφορά είναι η προσθήκη του υλικού των μπαταριών με τις ιδιότητές του, η διαφορετική απαγωγή θερμότητας που τίθεται σε κάθε κελί (25W) αντί για τον μετατροπέα DC-DC και η οριακή συνθήκη εισόδου από pressure inlet ορίζεται ως velocity inlet με ταχύτητα 15m/s καθώς προκύπτει από αγωγούς εισόδου ρευστού.

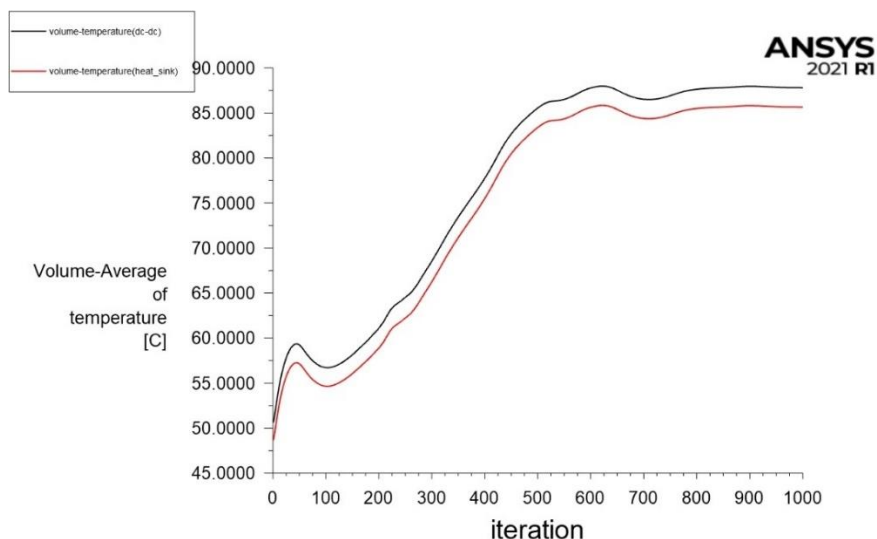
9. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Το κεφάλαιο αυτό αφορά την εξαγωγή και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων τόσο του χώρου χαμηλής τάσης όσο και του HV χώρου. Πρόκειται για την φάση της μετεπεξεργασίας ή αλλιώς Post-Processing των αποτελεσμάτων του επιλύτη του ANSYS Fluent. Τα κύρια σημεία ενδιαφέροντος είναι η κατανομή των θερμοκρασιών εσωτερικά του εκάστοτε χώρου, η τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται, η ταχύτητα του ψυκτικού μέσου αλλά και τα φαινόμενα της ροής κατά την διέλευση του ψυκτικού μέσου από τον κάθε χώρο.

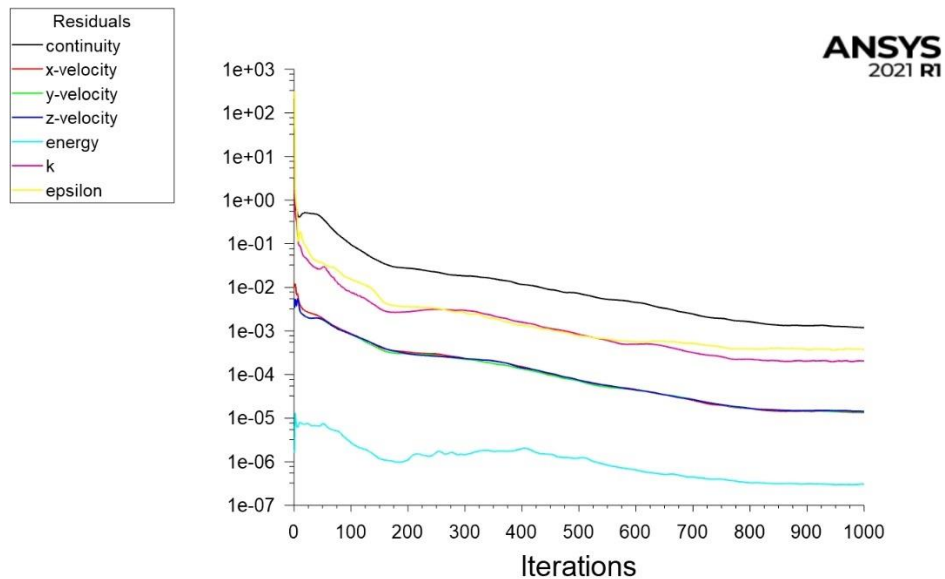
9.1 Χώρος Χαμηλής Τάσης – Steady State Simulation

Στην περίπτωση της Steady State προσομοίωσης του χώρου χαμηλής τάσης, τα θερμικά κρίσιμα εξαρτήματα τέθηκαν στην μέγιστη δυνατή τιμή απαγωγής θερμότητας, με σκοπό την διαπίστωση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται εσωτερικά του κουτιού και ιδιαίτερα στον όγκο του μετατροπέα όπου και αναμένεται.

Αρχικά, μετά το πέρας της επίλυσης ελέγχθηκε το διάγραμμα επισκόπησης της προσομοίωσης που τέθηκε (Εικόνα 118), καθώς και το διάγραμμα των υπολειμματικών για την εξακρίβωση της σύγκλισης της προσομοίωσης και τον έλεγχο της τιμής της μέσης θερμοκρασίας του μετατροπέα DC-DC και του εναλλάκτη θερμότητας.



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα επισκόπησης μέσης θερμοκρασίας LV χώρου (Steady State)

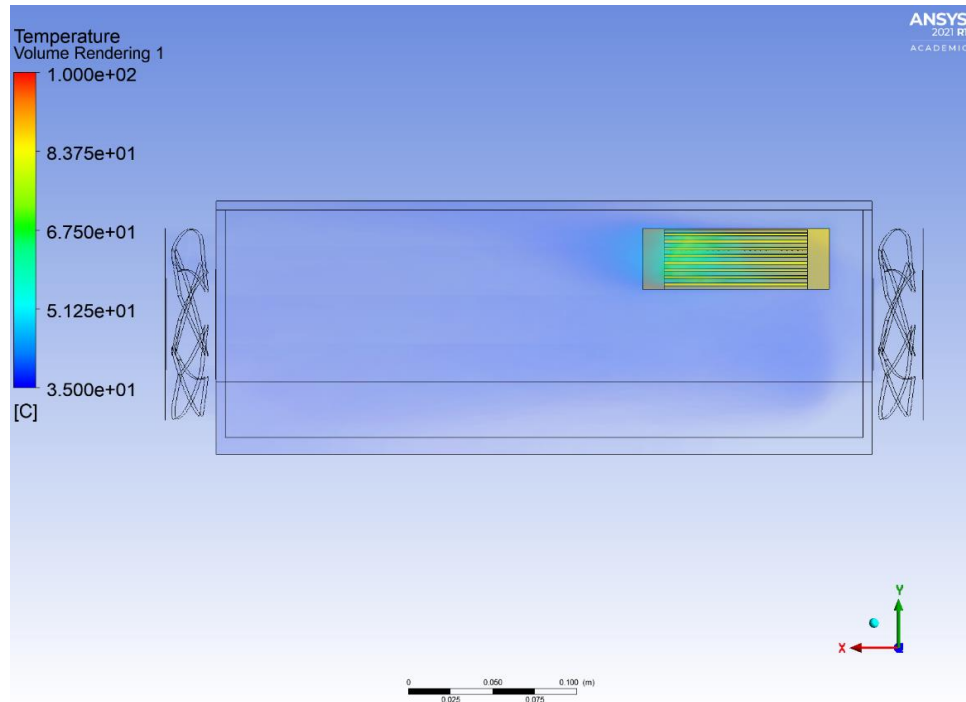


Διάγραμμα 2: Διάγραμμα υπολειμματικών LV χώρου (Steady State)

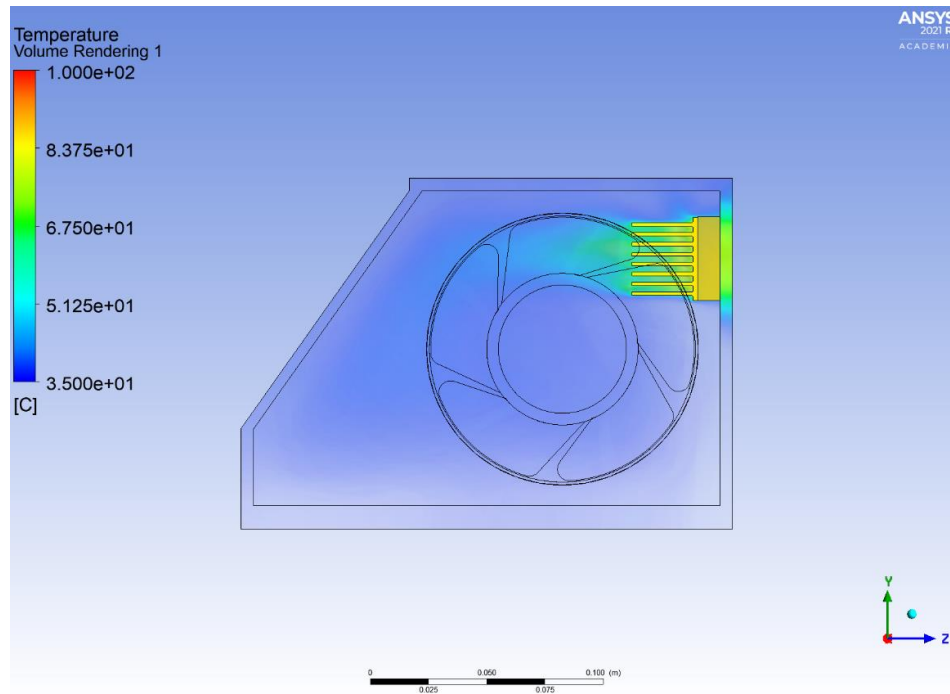
Όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1 η μέση τιμή της θερμοκρασίας του μετατροπέα ρεύματος DC-DC συνέκλινε στους 87°C μετά από 750 επαναλήψεις, η οποία είναι εντός των θερμικών προδιαγραφών του συστήματος. Πρέπει να σημειωθεί πως παρά το γεγονός ότι η εικόνα των υπολειμματικών είναι προβληματική εκ πρώτης όψης καθώς το υπολειμματικό της συνέχειας είναι της τάξης του 0.01, στην πραγματικότητα η σύγκλιση της προσομοίωσης δεν μπορεί να διαπιστωθεί αποκλειστικά από το διάγραμμα αυτό καθώς τα υπολειμματικά στο ANSYS Fluent κλιμακώνονται με βάση την αρχική εκτίμησή τους που έγινε κατά την διάρκεια της ρύθμισης της προσομοίωσης (Εικόνα 115). Στην ουσία αποτελούν οδηγό για την αξιολόγηση της σύγκλισης, πρέπει να είναι είτε αρκετά μικρά είτε να μειώνονται με την πάροδο των επαναλήψεων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, λοιπόν, η σύγκλιση της προσομοίωσης είναι απόλυτα ικανοποιητική και επαληθεύεται και από την σύγκλιση της μέσης θερμοκρασίας.

9.1.1 Θερμοκρασία

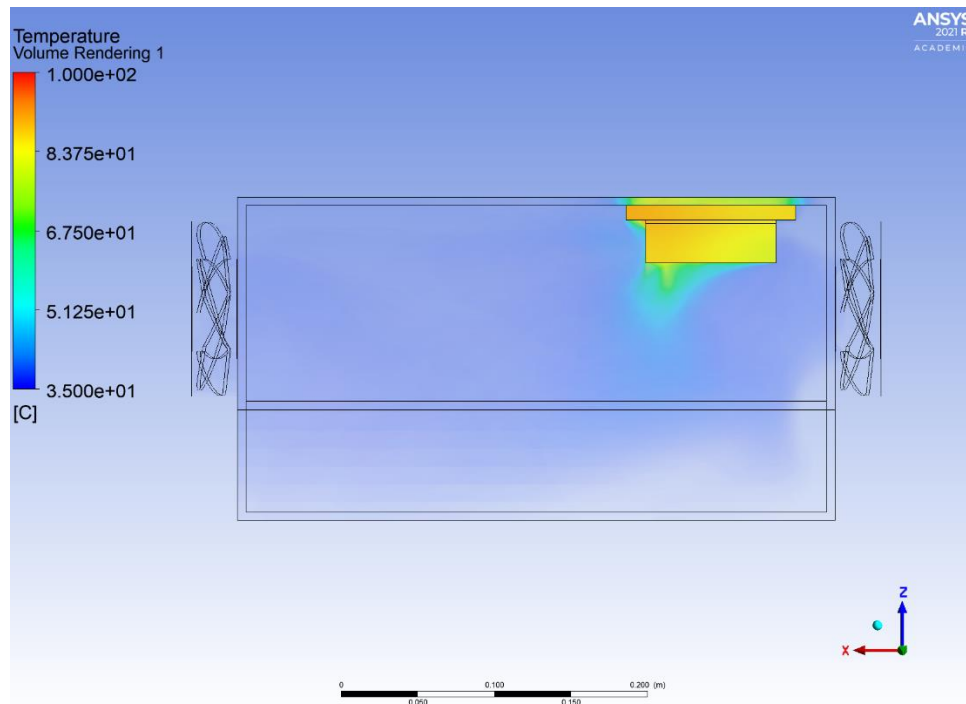
Σε πρώτο στάδιο παρατηρήθηκε η κατανομή των θερμοκρασιών εσωτερικά του χώρου χαμηλής τάσης. Συγκεκριμένα, με την χρήση της εντολής Volume Rendering απεικονίστηκαν οι θερμοκρασίες σε όλα τα επιμέρους τμήματα του LV χώρου.



Εικόνα 124: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 1



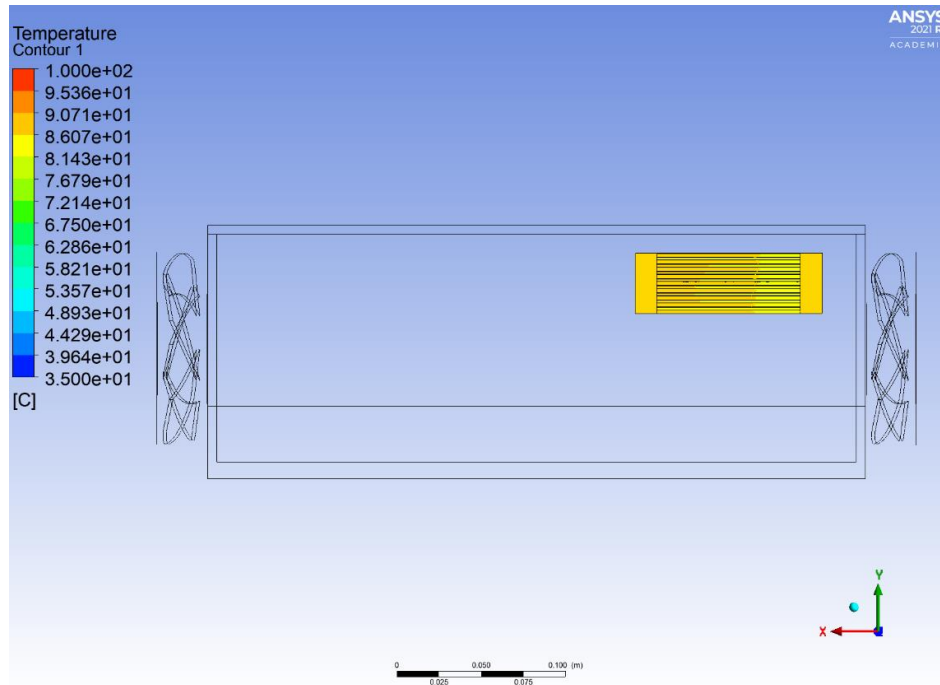
Εικόνα 125: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 2



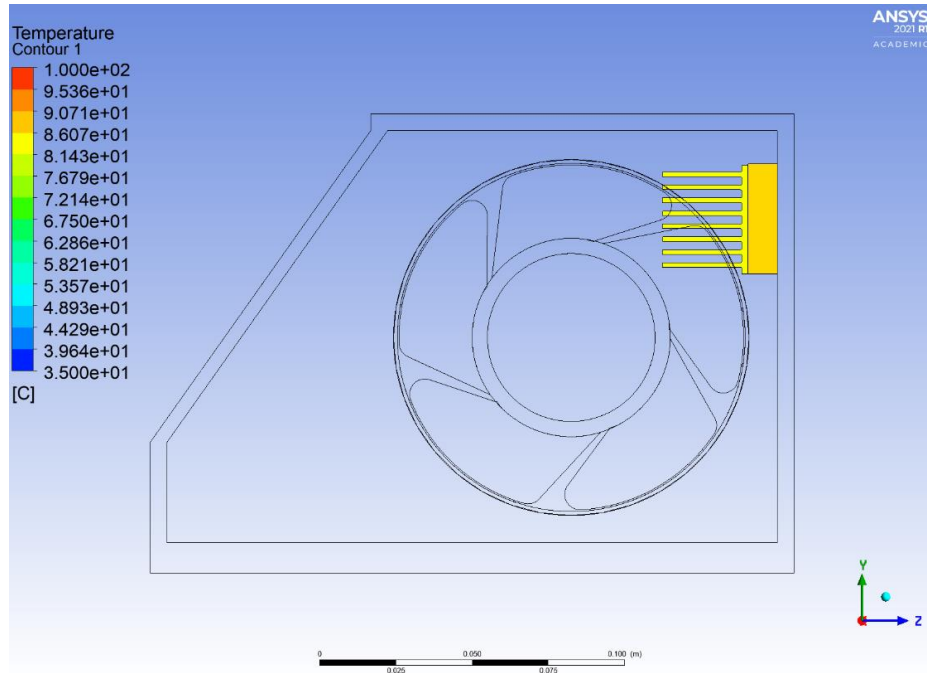
Εικόνα 126: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 3

Παρατηρούμε πως οι θερμοκρασίες των θερμικά κρίσιμων εξαρτημάτων, εδώ του μετατροπέα DC-DC και του εναλλάκτη θερμότητας, κυμαίνονται από τους 78°C έως τους 88°C με αυτές, όπως είναι αναμενόμενο, να αυξάνονται όσο απομακρυνόμαστε από τον ανεμιστήρα εισόδου (προς τα αριστερά) και με τον μετατροπέα να είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερης ή ίσης θερμοκρασίας του εναλλάκτη. Ταυτόχρονα, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως οι θερμοκρασίες του ψυκτικού μέσου που βρίσκεται κοντά στην περιοχή των θερμικά κρίσιμων εξαρτημάτων παρουσιάζουν μια άνοδο σχετικά με τις θερμοκρασίες του υπόλοιπου ψυκτικού μέσου, ιδιαίτερα όσο απομακρυνόμαστε από τον ανεμιστήρα εισόδου.

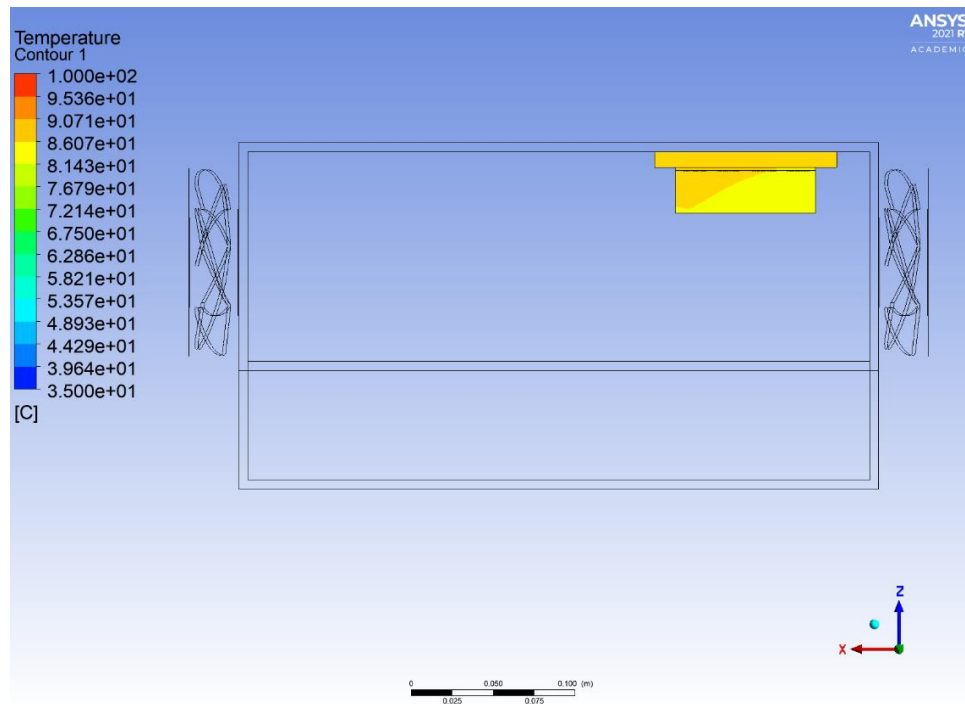
Επόμενο βήμα αποτελεί η λεπτομερής θερμοκρασιακή σκιαγράφηση των θερμικά κρίσιμων εξαρτημάτων. Με την χρήση της εντολής Contour διευκολύνεται η διαδικασία απεικόνισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.



Εικόνα 127: Temperature Contour LV χώρου (Steady State) - 1



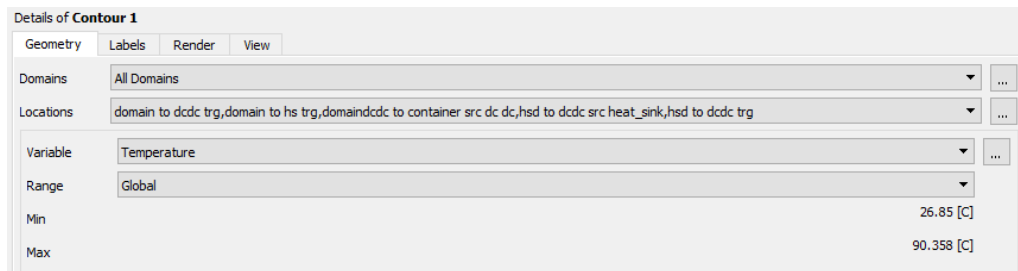
Εικόνα 128: Temperature Contour LV χώρου (Steady State) - 2



Εικόνα 129: Temperature Contour LV χώρου (Steady State) - 3

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρατηρείται αύξηση θερμοκρασιών κατά τον άξονα x, δηλαδή όσο απομακρυνόμαστε από τον ανεμιστήρα εισόδου και κατά τον άξονα z, δηλαδή όσο πλησιάζουμε προς τον μετατροπέα DC-DC. Κατά τον άξονα y απεικονίζεται η μικρότερη διαφορά θερμοκρασιών λόγω του μεγέθους των ανεμιστήρων, ωστόσο δεν είναι αμελητέα καθώς όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο των ανεμιστήρων και πλησιάζουμε προς τα τοιχώματα του χώρου χαμηλής τάσης έχουμε μειωμένη ταχύτητα ψυκτικού μέσου που διέρχεται από τα κανάλια του εναλλάκτη θερμότητας, συνεπώς αυξημένες θερμοκρασίες.

Η μελέτη των θερμοκρασιών καταλήγει με την ανεύρεση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται εσωτερικά του χώρου χαμηλής τάσης.

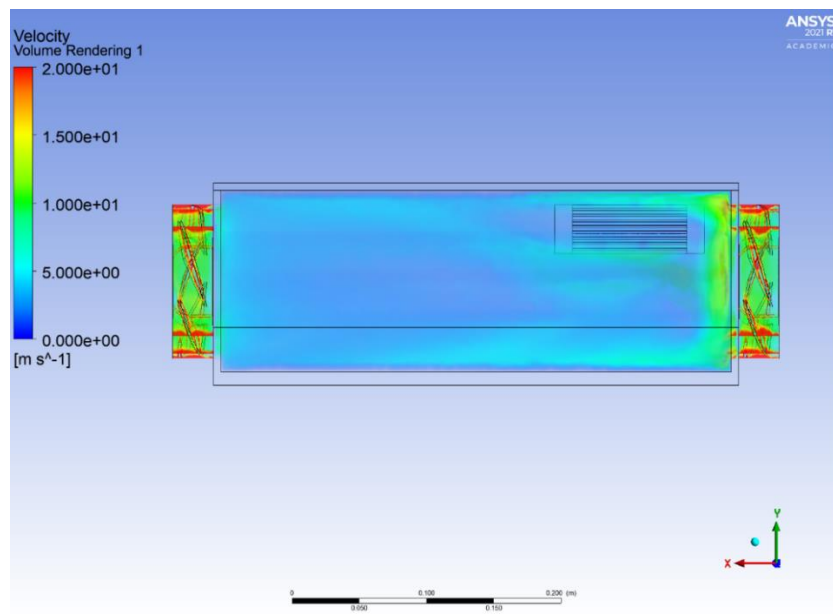


Εικόνα 130: Μέγιστη θερμοκρασία LV χώρου (Steady State)

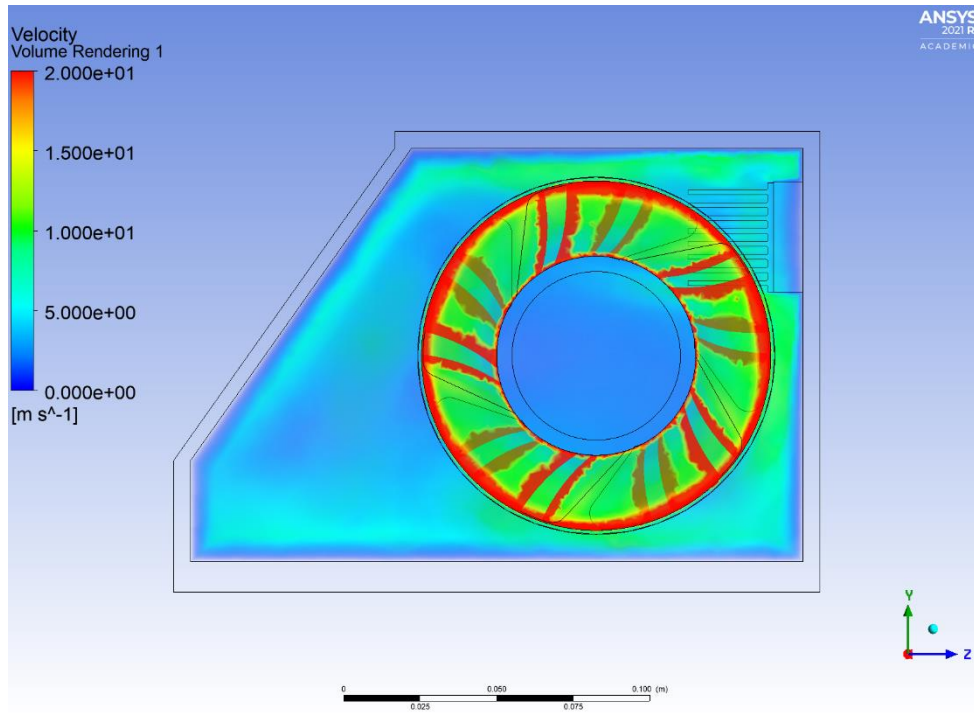
Η χρήση ποσοτικών πέρα από ποιοτικών (οπτικών) μέσων κατά την φάση της μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη όπως παρουσιάζεται και από την Εικόνα 130, καθώς η πραγματική μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε είναι 90°C και όχι 88°C που ήταν η μέγιστη ορατή. Πράγματι, εσωτερικά του όγκου του μετατροπέα ρεύματος DC-DC προκύπτει η μέγιστη θερμοκρασία των 90°C, η οποία βέβαια βρίσκεται εντός των προδιαγραφών του κατασκευαστή.

9.1.2 Ταχύτητα

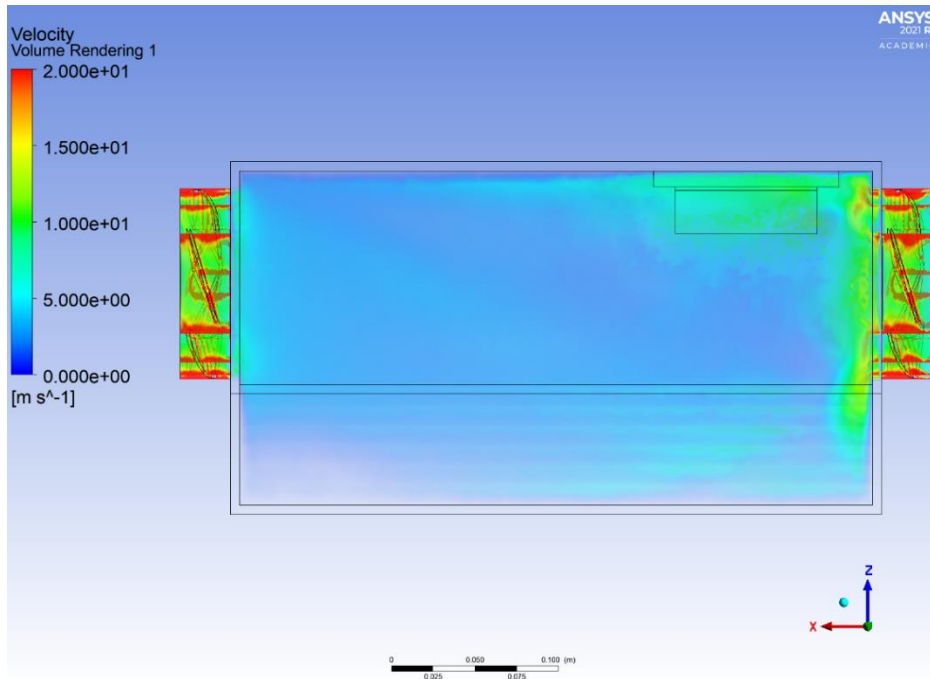
Σε αντιστοιχία με το πρώτο στάδιο παρατηρήθηκε η κατανομή της ταχύτητας του ψυκτικού μέσου εσωτερικά του χώρου χαμηλής τάσης. Συγκεκριμένα, με την χρήση της εντολής Volume Rendering απεικονίστηκε το πεδίο ταχύτητας.



Εικόνα 131: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 1



Εικόνα 132: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 2



Εικόνα 133: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 3

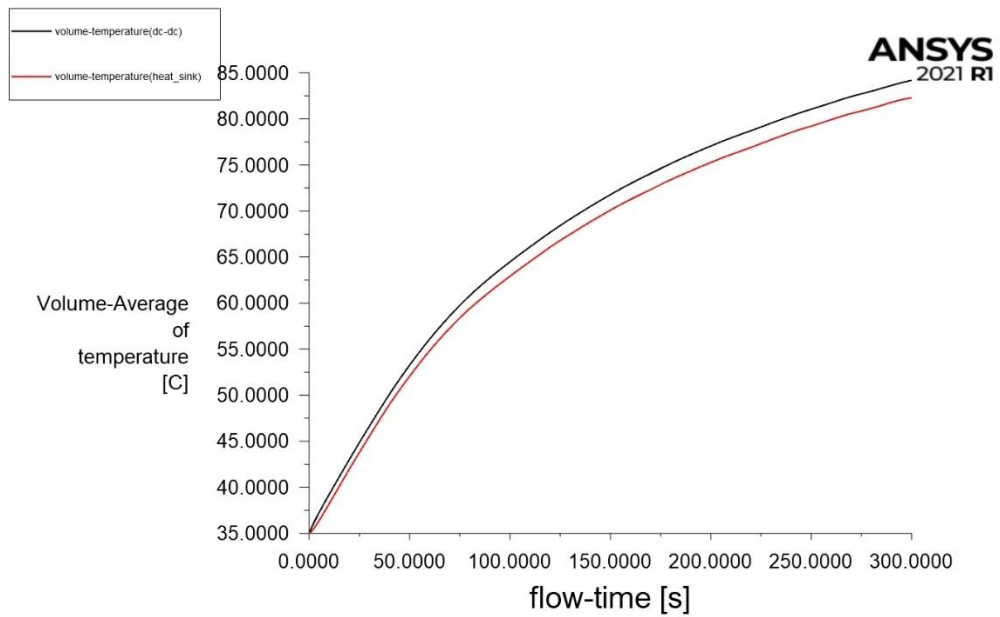
Για την ορθή κατανόηση των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην κλίμακα των ταχυτήτων. Παρατηρούνται αρκετά υψηλές ταχύτητες σε όλο τον LV χώρο, αλλά κυρίως κοντά στους ανεμιστήρες όπως και αναμένεται. Το γεγονός αυτό συνάδει με τους σχεδιαστικούς στόχους καθώς προκύπτει μεγαλύτερη παροχή ψυκτικού μέσου. Κατά τον άξονα x αρχικά παρουσιάζονται ταχύτητες της τάξης των 11 m/s, οι οποίες εν συνεχεία επιβραδύνονται μέχρι τα 5 m/s στο μέσο του χώρου χαμηλής τάσης και τελικά επιταχύνονται στα 9 m/s λόγω του ανεμιστήρα εξόδου. Οι αυξομειώσεις αυτές οφείλονται στην αποκόλληση που δημιουργείται στο πίσω μέρος του μετατροπέα DC-DC και του εναλλάκτη θερμότητας και στους στροβιλισμούς της τυρβώδους ροής που προκύπτει από τους ανεμιστήρες. Ταυτόχρονα, εξαιρετικής σημασίας είναι η ταχύτητα που επιτυγχάνει το ψυκτικό μέσο το οποίο διέρχεται εσωτερικά των καναλιών του εναλλάκτη θερμότητας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην γεωμετρία αλλά και την τοποθέτηση των εξαρτημάτων στο κουτί χαμηλής τάσης. Κατά τον άξονα y στα κανάλια του εναλλάκτη παρατηρούνται μειωμένες ταχύτητες όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο του ανεμιστήρα, ενώ ταυτόχρονα κατά τον άξονα z απεικονίζονται οι μικρότερες διαφορές ταχυτήτων.

Η εποπτεία των ταχυτήτων του ψυκτικού μέσου είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της απαραίτητης παροχής εντός του χώρου χαμηλής τάσης και για την αποφυγή επικίνδυνων φαινομένων που μπορεί να παρουσιάσει η ροή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται είναι αρκετά υψηλές και ικανοποιητικές για τους σχεδιαστικούς μας στόχους.

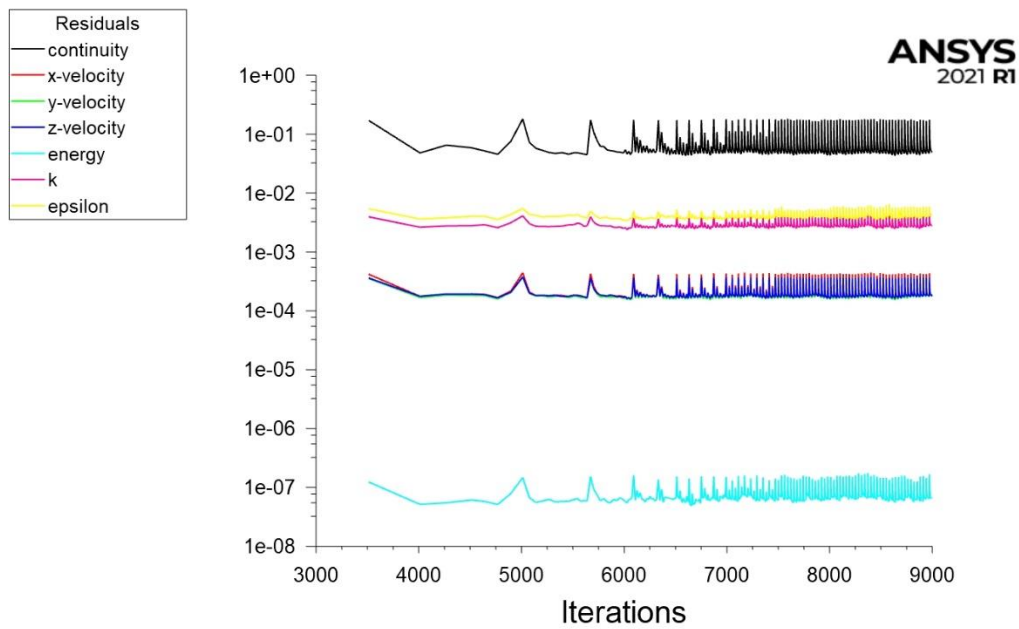
9.2 Χώρος Χαμηλής Τάσης – Transient Simulation

Στην περίπτωση της Transient προσομοίωσης του χώρου χαμηλής τάσης, τα θερμικά κρίσιμα εξαρτήματα τέθηκαν και πάλι στην μέγιστη δυνατή τιμή απαγωγής θερμότητας, με σκοπό την διαπίστωση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται εσωτερικά του κουτιού και ιδιαίτερα στον όγκο του μετατροπέα όπου και αναμένεται. Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ορίστηκε στα 300 sec, δηλαδή στα 5 λεπτά, συνεχούς λειτουργίας σε ακραία αγωνιστικές συνθήκες, έτσι ώστε να ελεγχθεί η κατανομή της θερμοκρασίας εσωτερικά του χώρου χαμηλής τάσης και να διαπιστωθεί εάν επιτυγχάνεται η μέγιστη θερμοκρασία που υπολογίστηκε κατά την Steady State προσομοίωση. Να σημειωθεί ότι οι ανεμιστήρες λειτουργούν συνεχώς στις προδιαγεγραμμένες μέγιστες στροφές ανεξάρτητα του ρεύματος εξόδου άρα και της απαγωγής θερμότητας των θερμικά κρίσιμα εξαρτημάτων. Συνεπώς, θερμοκρασία εντός των προδιαγραφών κατά αυτήν την προσομοίωση συνεπάγεται και θερμοκρασία εντός των προδιαγραφών και για μικρότερες απαγωγές θερμότητας.

Όπως και στην Steady State προσομοίωση, σε πρώτη φάση ελέγχθηκαν το διάγραμμα επισκόπησης και το διάγραμμα των υπολειμματικών.



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα επισκόπησης μέσης θερμοκρασίας LV χώρου (Transient)

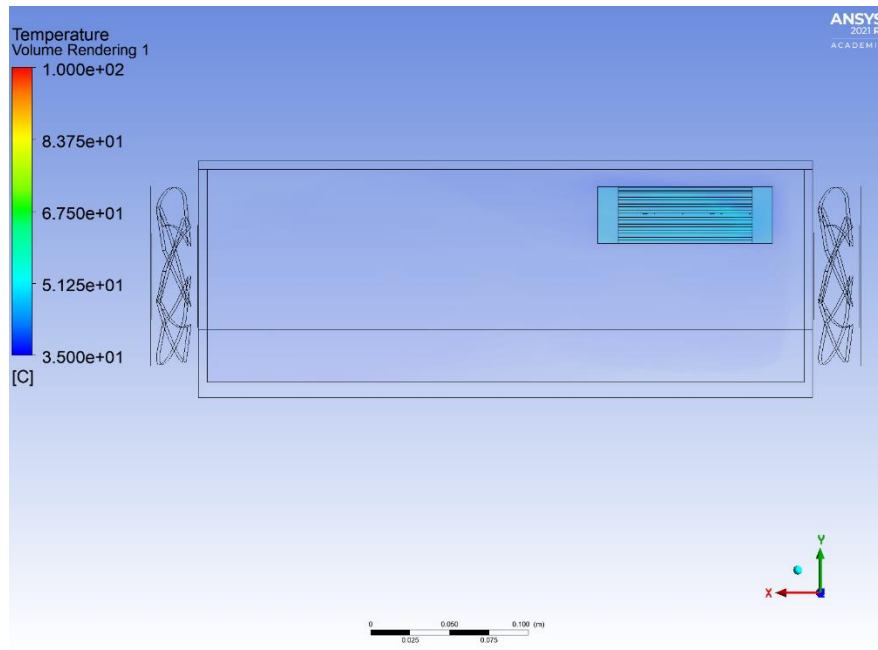


Διάγραμμα 4: Διάγραμμα υπολειμματικών LV χώρου (Transient)

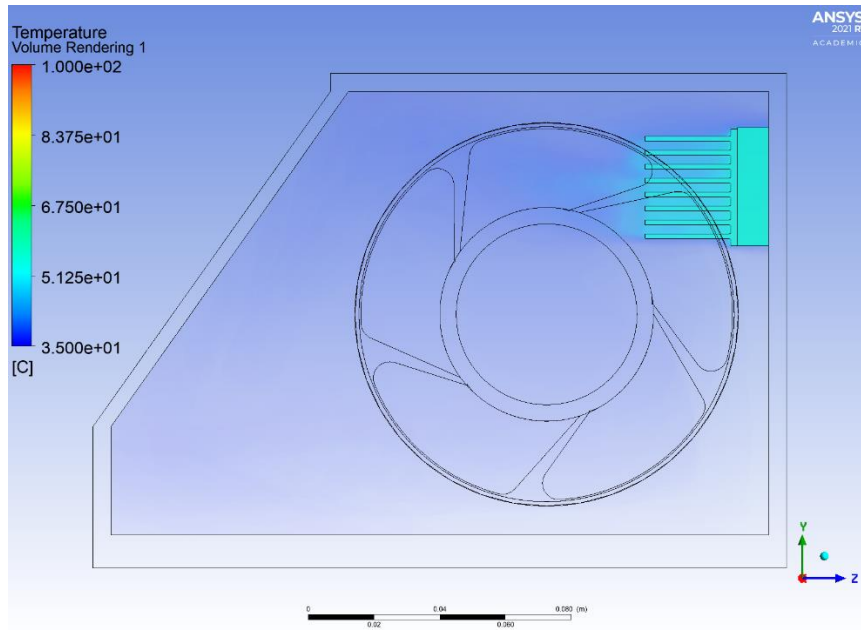
Όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3 η μέγιστη μέση τιμή της θερμοκρασίας μετά από 5 λεπτά λειτουργίας σε ακραίες συνθήκες είναι 84°C, χαμηλότερη της τιμής της Steady State προσομοίωσης και προφανώς εντός των ορίων λειτουργίας του μετατροπέα ρεύματος DC-DC. Η εικόνα των υπολειμματικών δείχνει την περιοδική συμπεριφορά τους, κάθε φορά και με μεγαλύτερη συχνότητα.

9.2.1 Θερμοκρασία

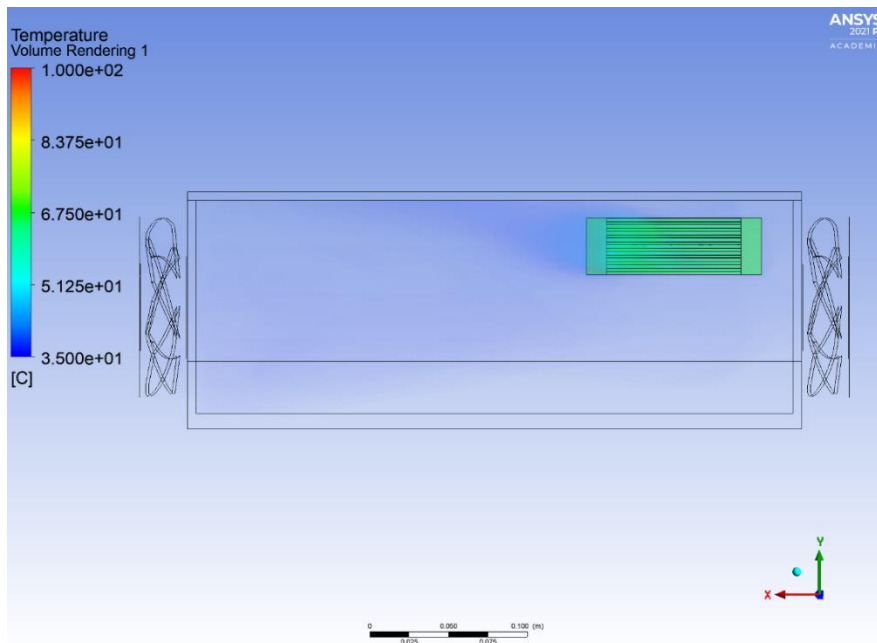
Σε πρώτο στάδιο παρατηρήθηκε η κατανομή των θερμοκρασιών εσωτερικά του χώρου χαμηλής τάσης. Συγκεκριμένα, με την χρήση της εντολής Volume Rendering απεικονίστηκαν οι θερμοκρασίες σε όλα τα επιμέρους τμήματα του LV χώρου για κάθε λεπτό λειτουργίας.



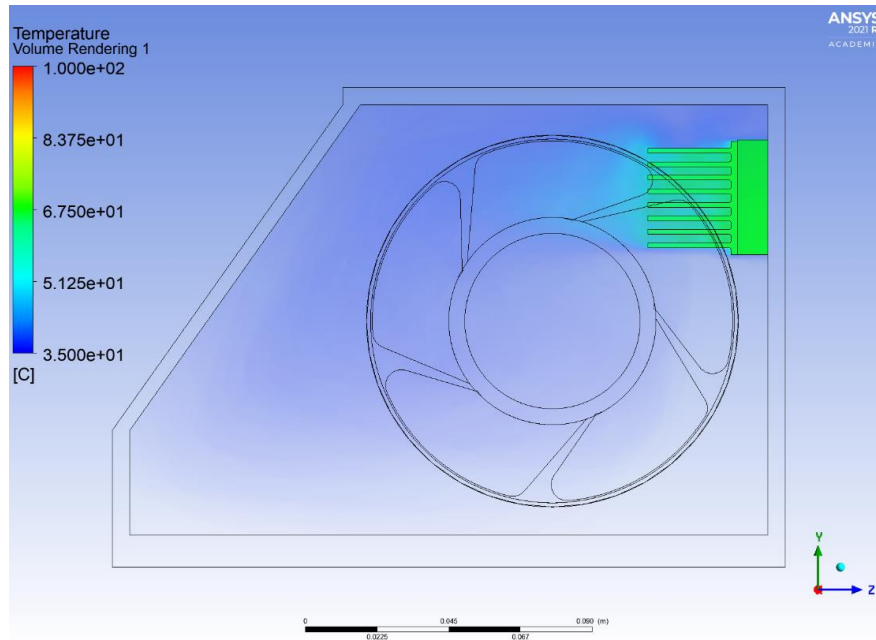
Εικόνα 134: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 1



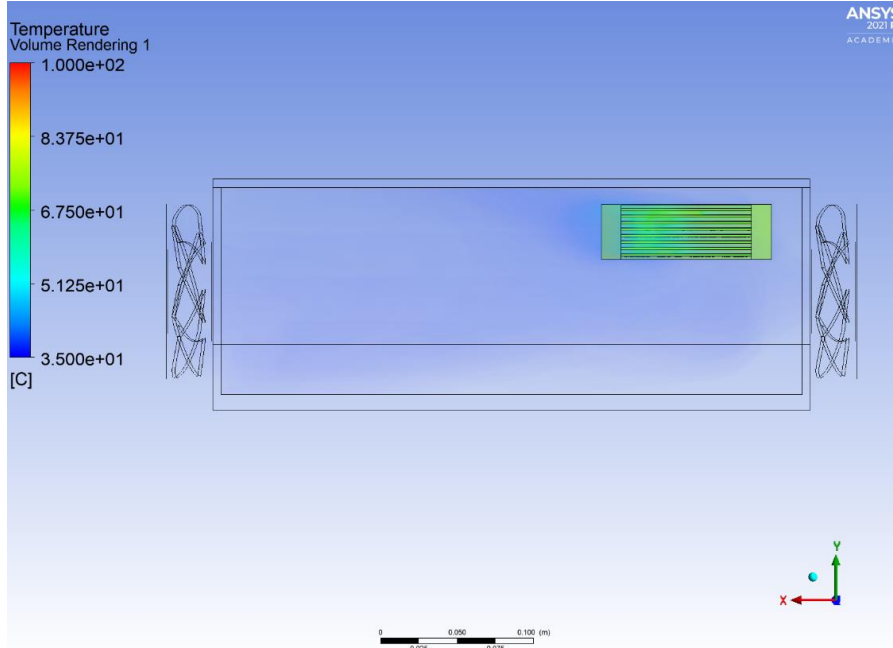
Εικόνα 135: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 2



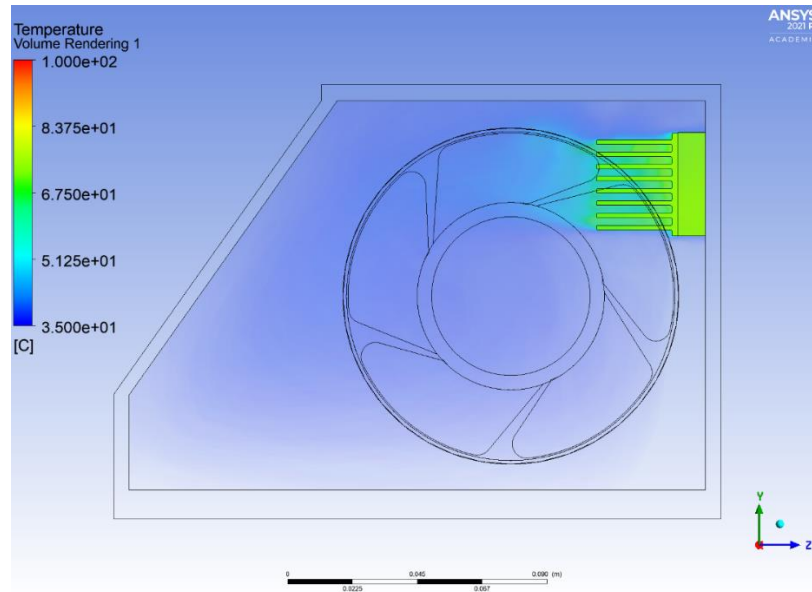
Εικόνα 136: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 1



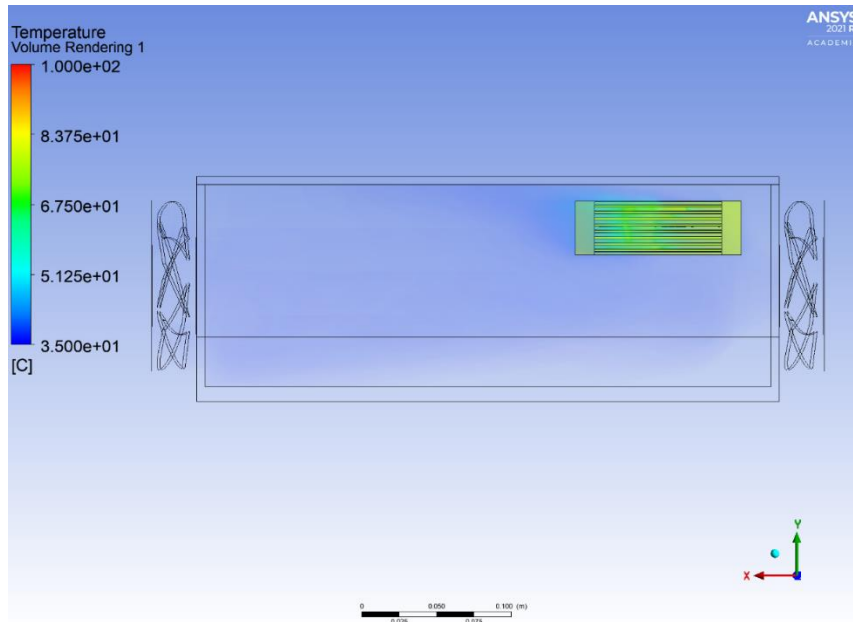
Εικόνα 137: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 2



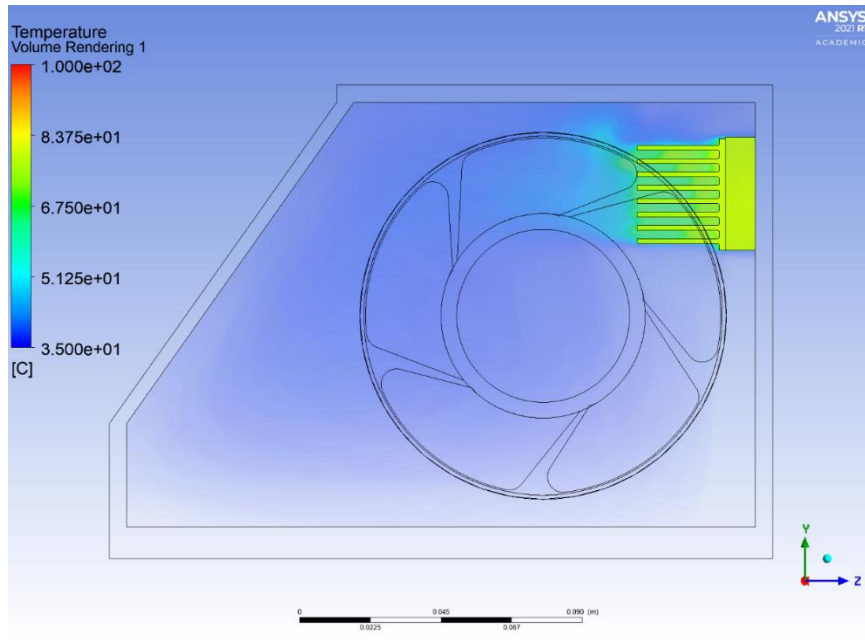
Εικόνα 138: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 1



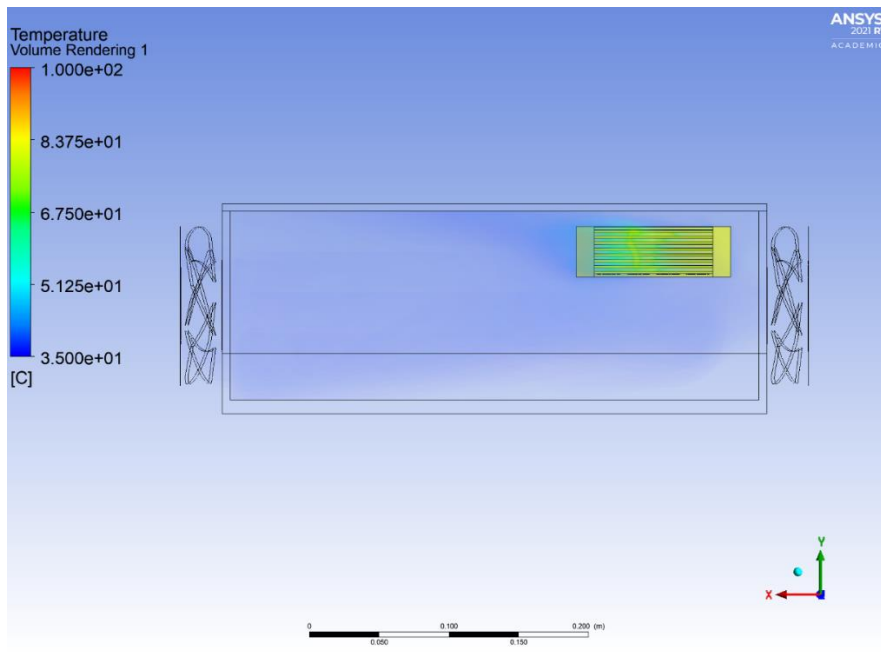
Εικόνα 139: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 2



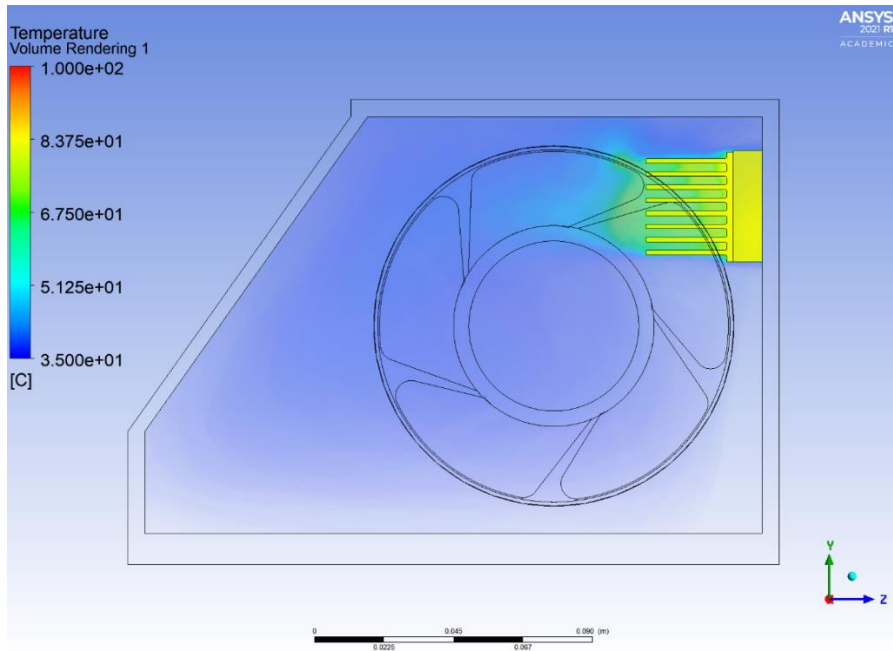
Εικόνα 140: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 1



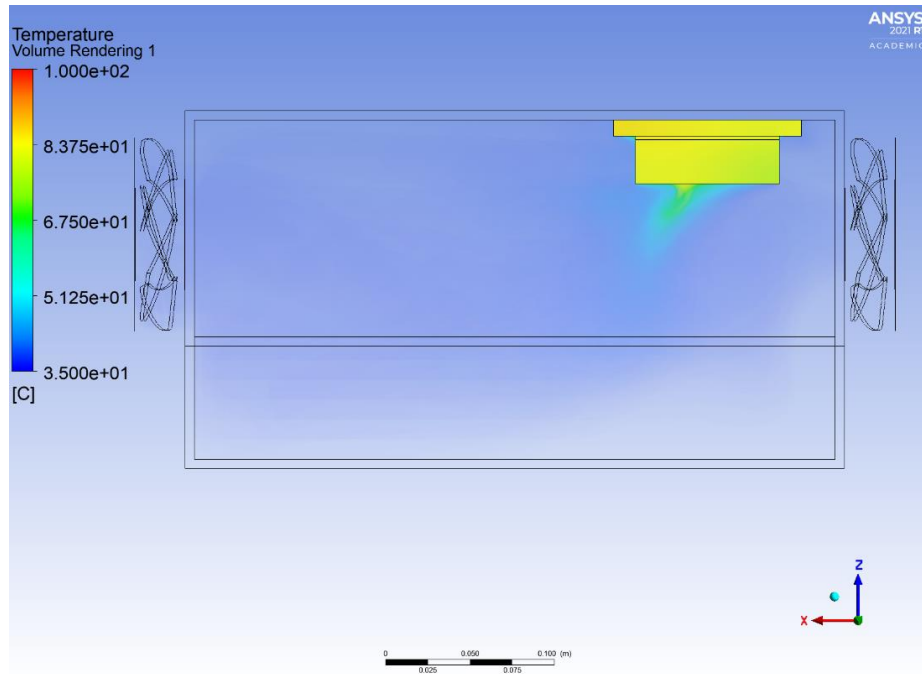
Εικόνα 141: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 2



Εικόνα 142: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 1



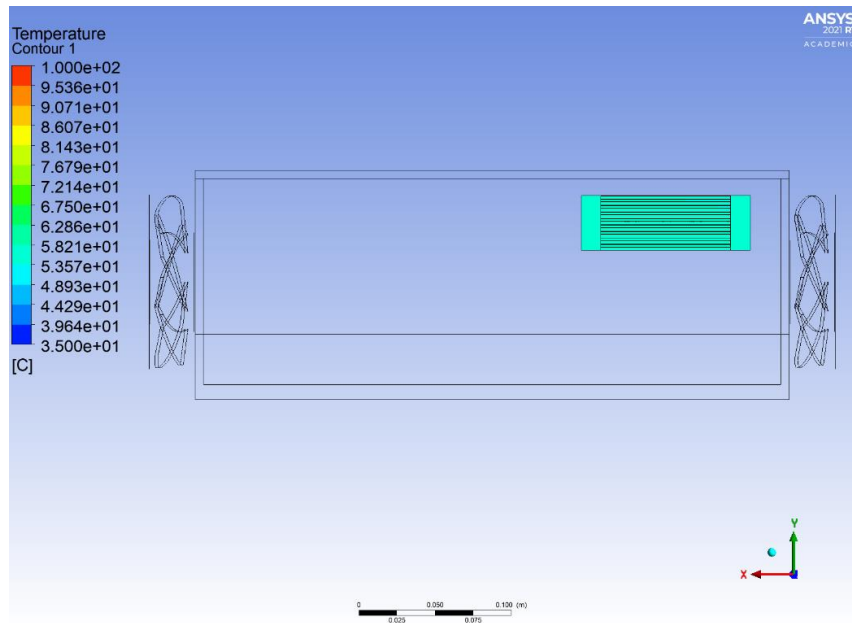
Εικόνα 143: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 50 λεπτό λειτουργίας - 2



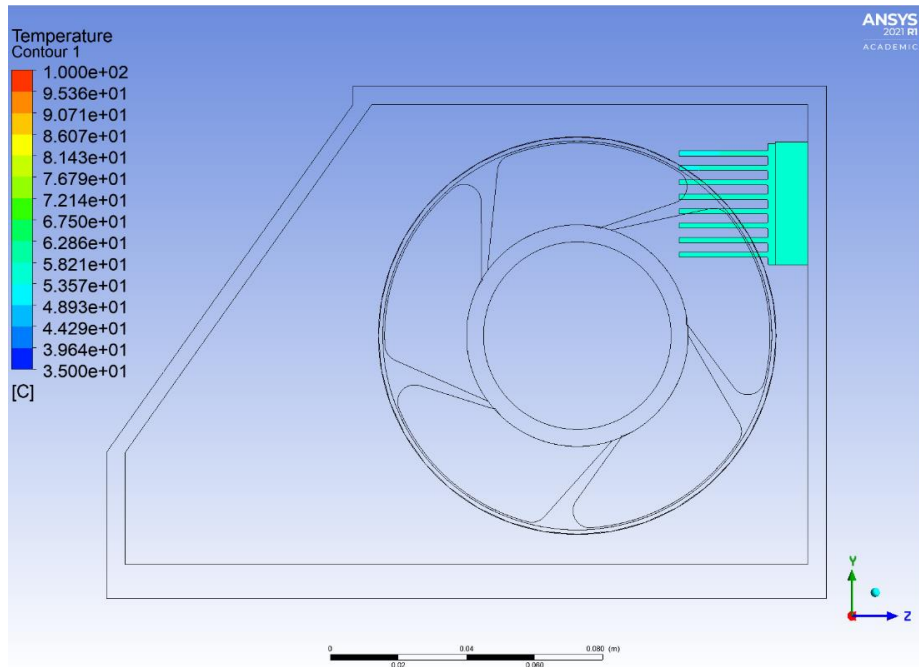
Εικόνα 144: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 50 λεπτό λειτουργίας - 3

Στο πρώτο λεπτό της λειτουργίας του χώρου χαμηλής τάσης η μέγιστη θερμοκρασία ανήλθε στους 52°C, στο δεύτερο λεπτό στους 67°C, στο τρίτο λεπτό στους 77°C, στο τέταρτο λεπτό στους 81°C και στο πέμπτο λεπτό στους 83°C. Παρατηρείται λοιπόν απότομη αύξηση της θερμοκρασίας στα πρώτα 2-3 λεπτά, η οποία σταθεροποιείται σιγά σιγά στα τελευταία δυο λεπτά στην τιμή 83°C, χαμηλότερη της αντίστοιχης steady state προσομοίωσης. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι δεν προλαβαίνει ο μετατροπέας ρεύματος DC-DC να φτάσει στην σταθερή θερμοκρασία που θα έφτανε αν λειτουργούσε για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα.

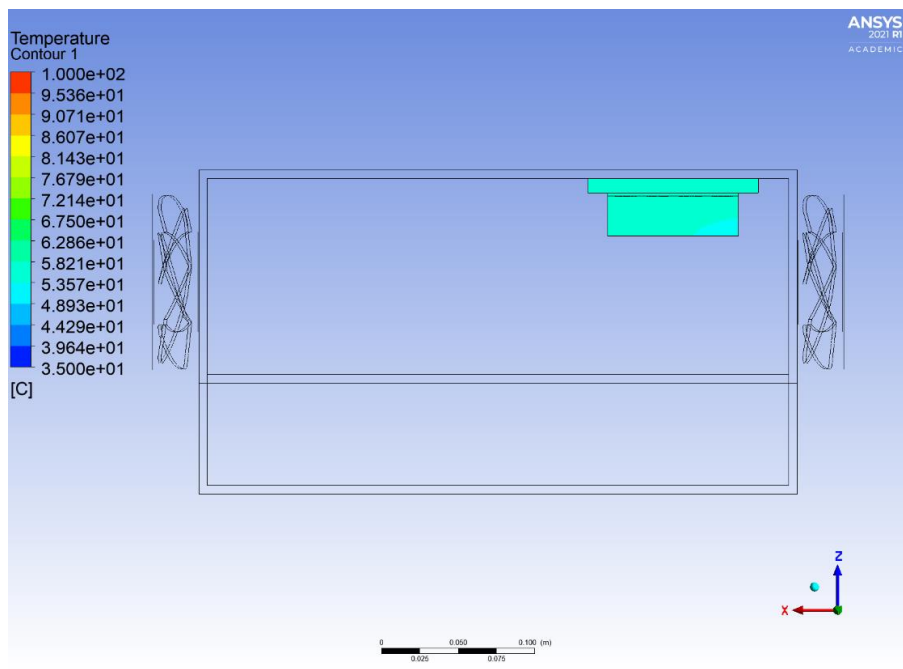
Επόμενο βήμα αποτελεί η λεπτομερής θερμοκρασιακή σκιαγράφιση των θερμικά κρίσιμων εξαρτημάτων για κάθε λεπτό λειτουργίας. Με την χρήση της εντολής Contour διευκολύνεται η διαδικασία απεικόνισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.



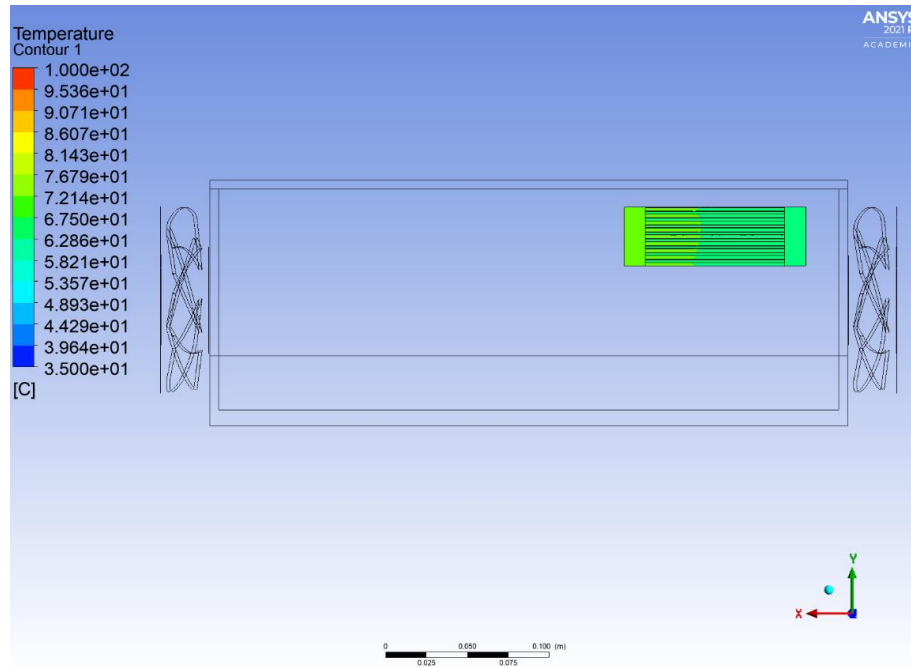
Εικόνα 145: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 1



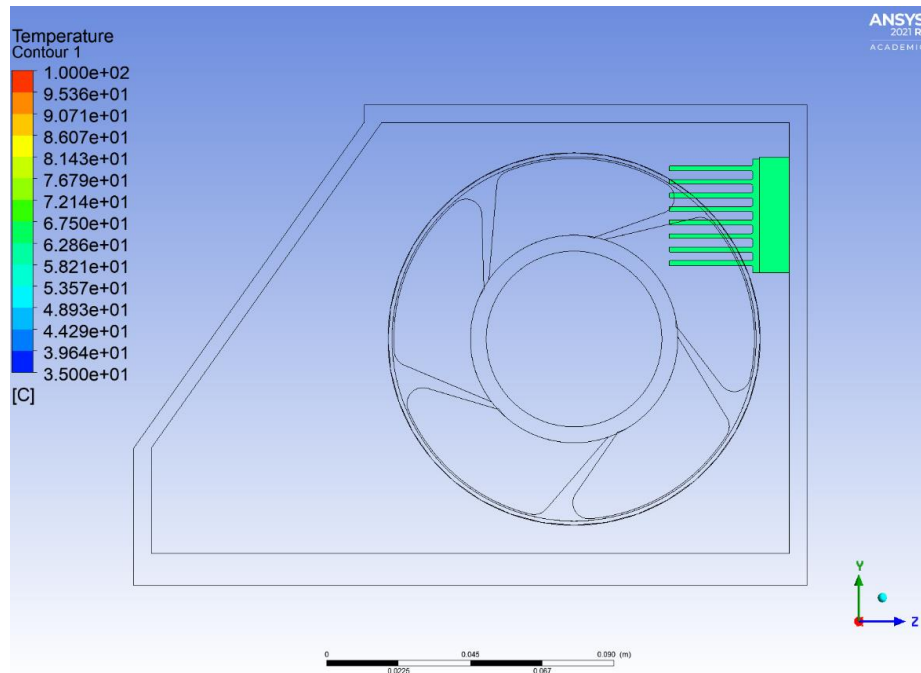
Εικόνα 146: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 2



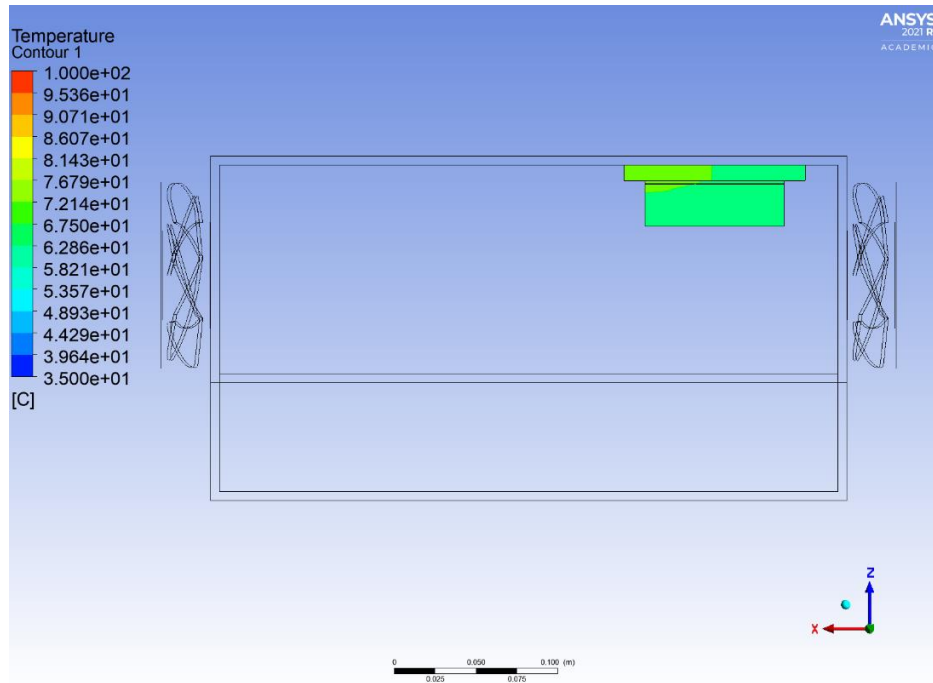
Εικόνα 147: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 3



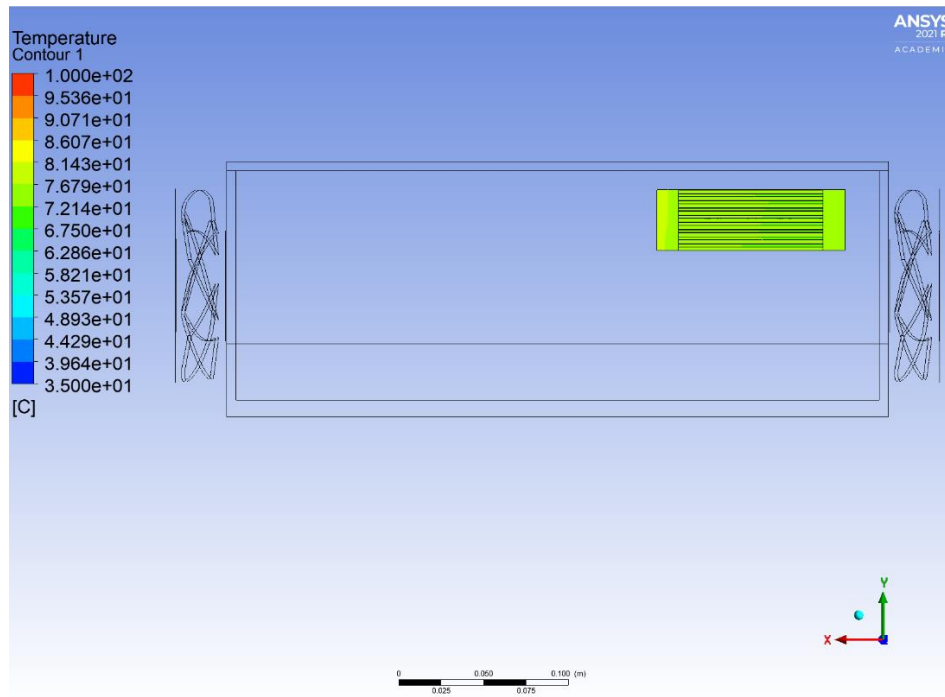
Εικόνα 148: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 1



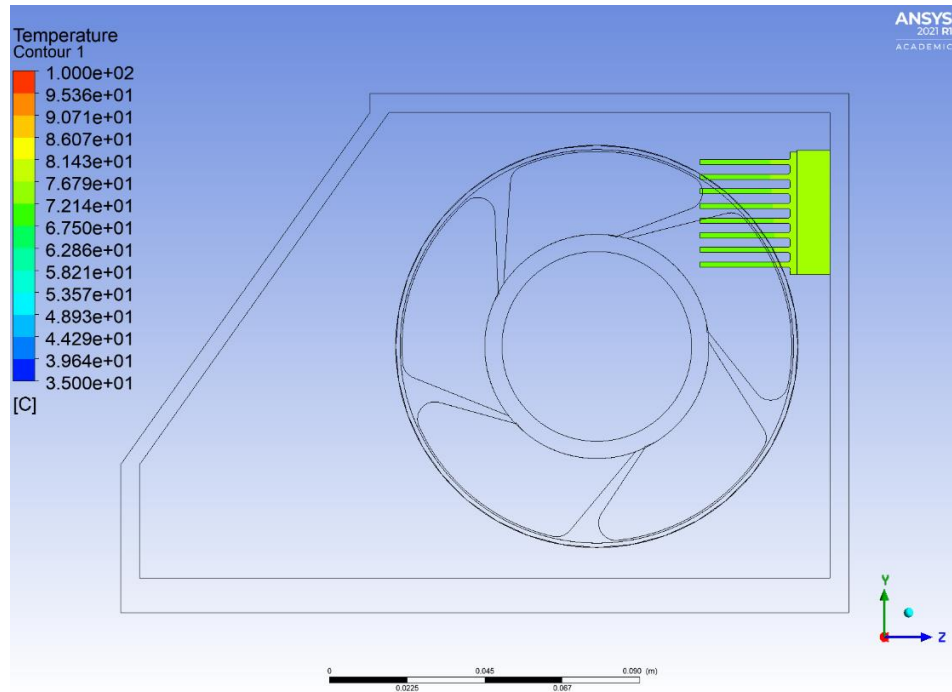
Εικόνα 149: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 2



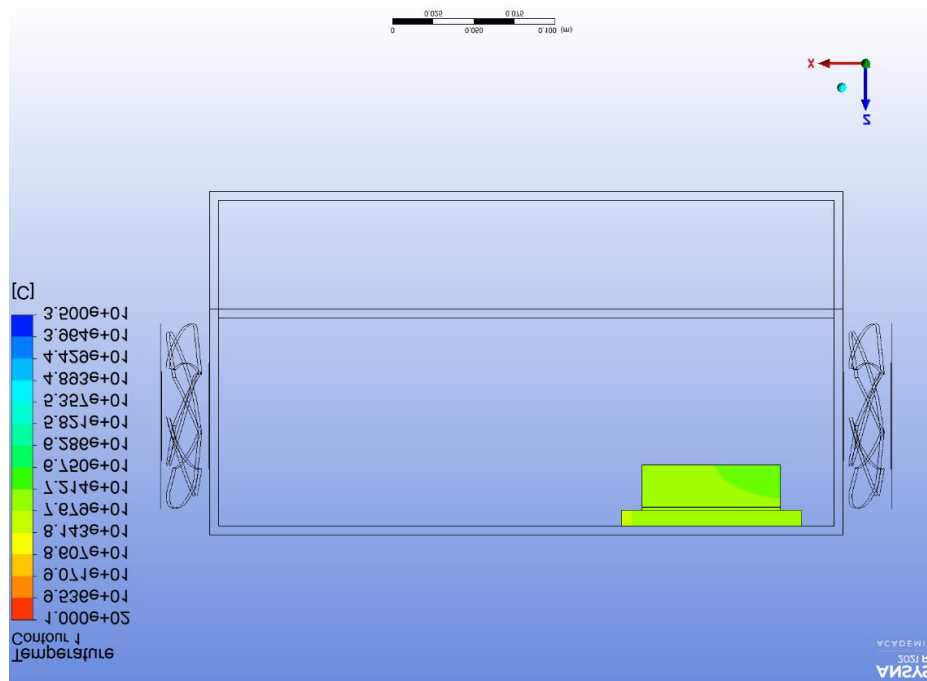
Εικόνα 150: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 3



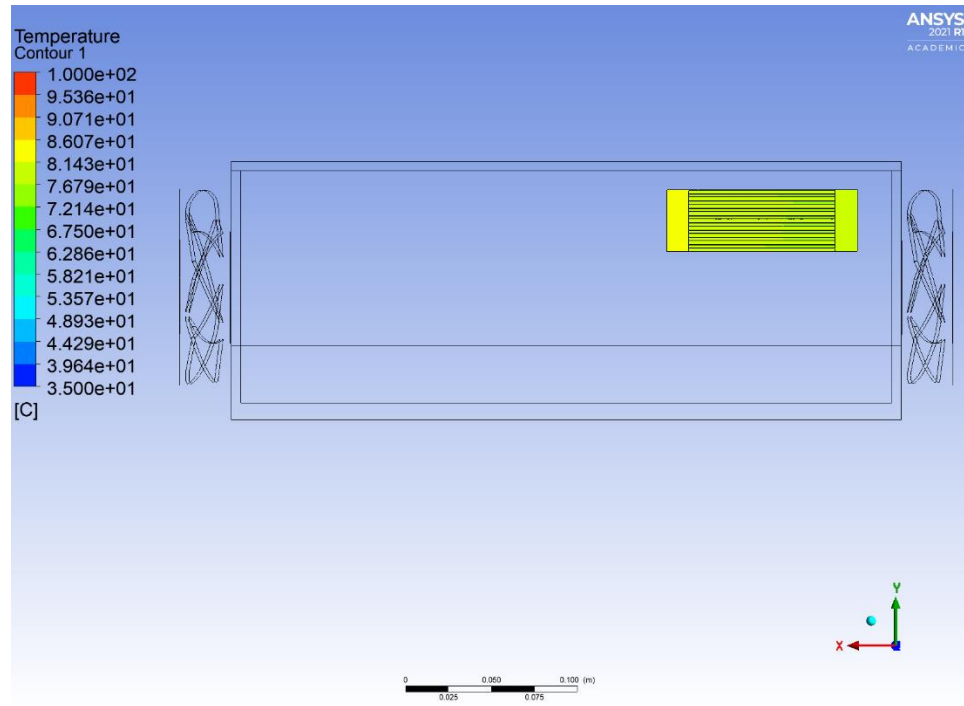
Εικόνα 151: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 1



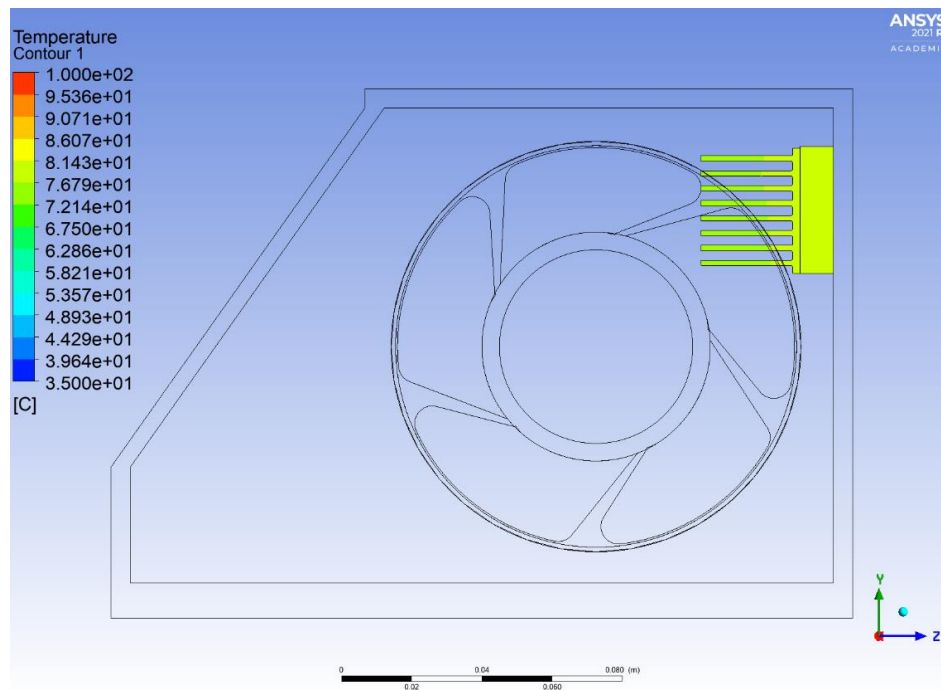
Εικόνα 152: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 2



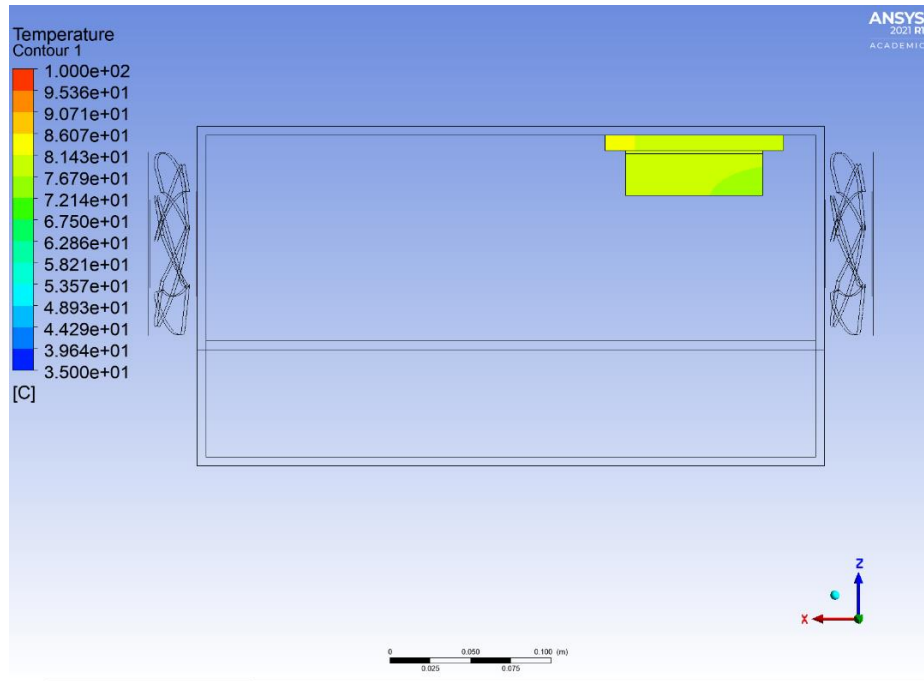
Εικόνα 153: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 3



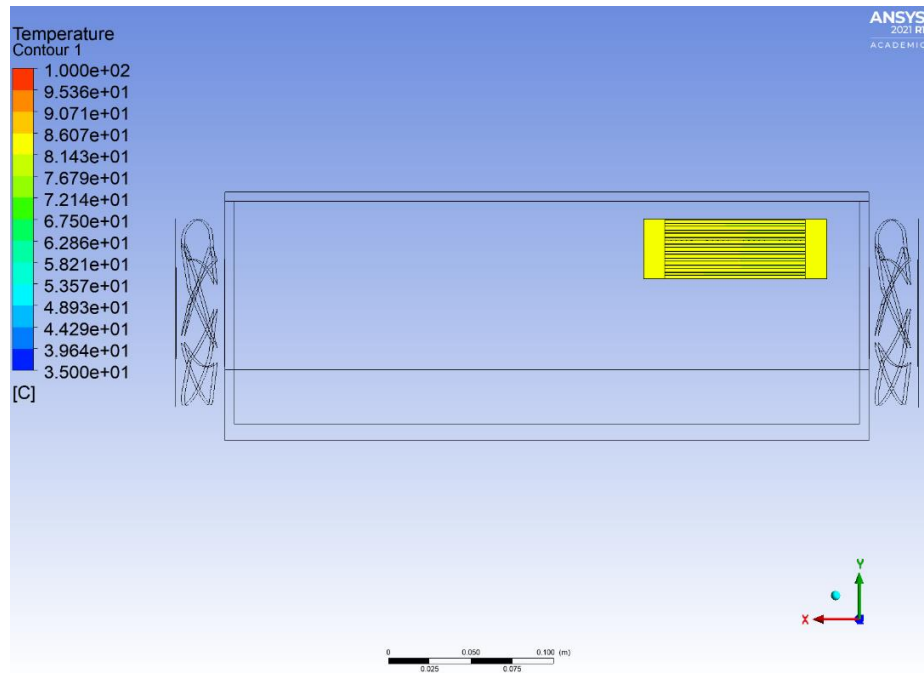
Εικόνα 154: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 1



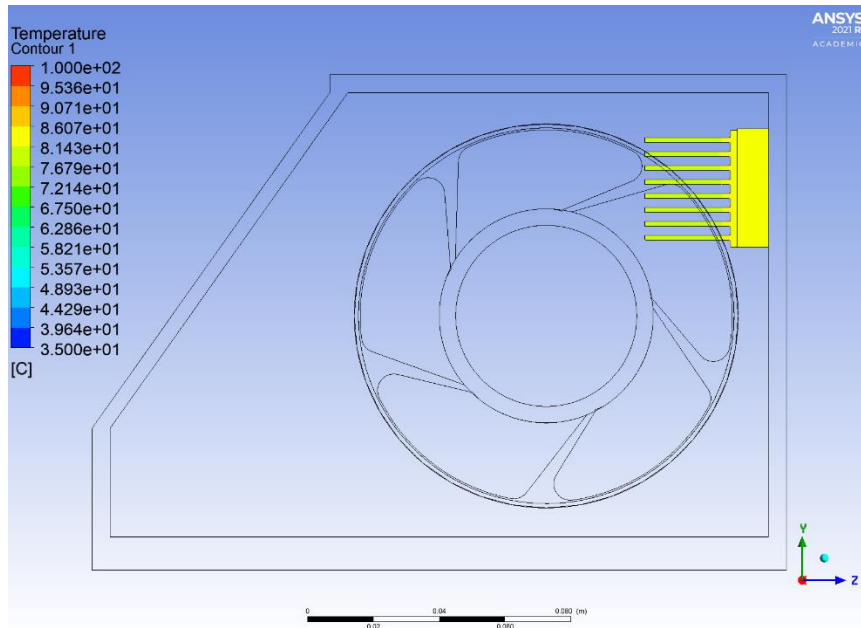
Εικόνα 155: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 2



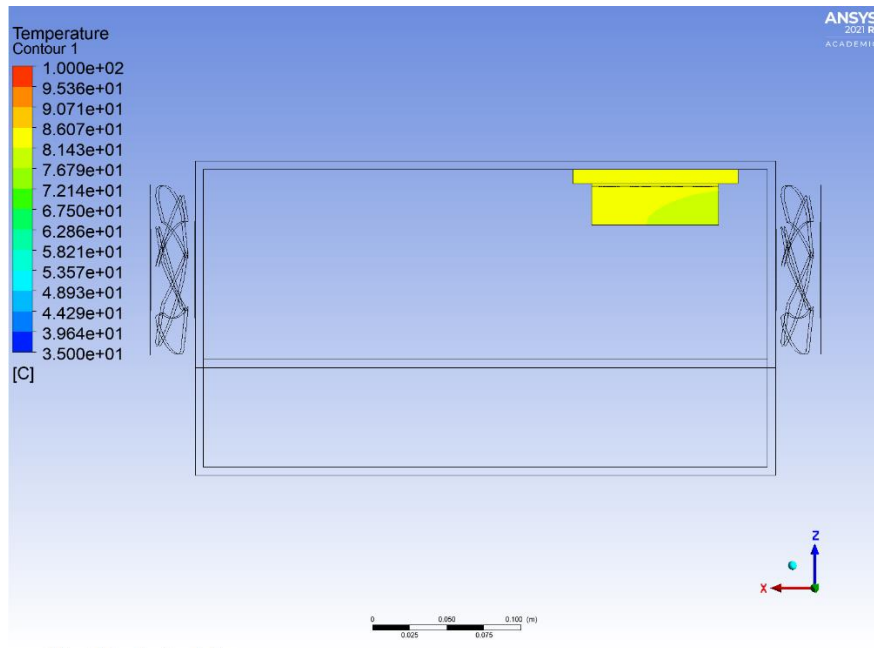
Εικόνα 156: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 3



Εικόνα 157: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 1



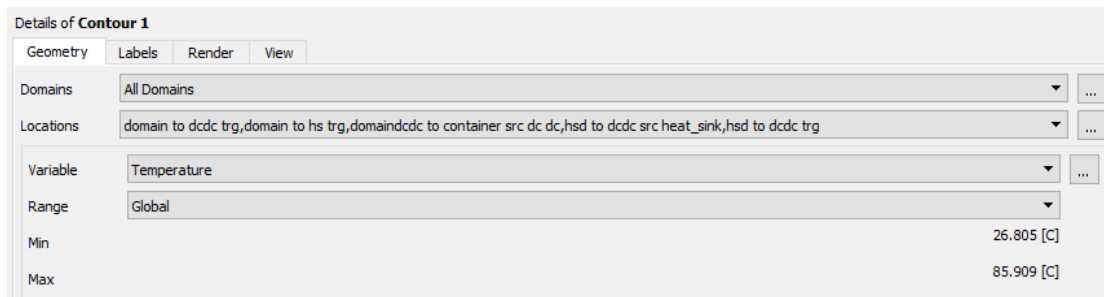
Εικόνα 158: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 2



Εικόνα 159: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 3

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρατηρείται αύξηση θερμοκρασιών κατά τον άξονα x, δηλαδή όσο απομακρυνόμαστε από τον ανεμιστήρα εισόδου και κατά τον άξονα z, δηλαδή όσο πλησιάζουμε προς τον μετατροπέα DC-DC. Κατά τον άξονα y απεικονίζεται η μικρότερη διαφορά θερμοκρασιών λόγω του μεγέθους των ανεμιστήρων, ωστόσο δεν είναι αμελητέα καθώς όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο των ανεμιστήρων και πλησιάζουμε προς τα τοιχώματα του χώρου χαμηλής τάσης έχουμε μειωμένη ταχύτητα ψυκτικού μέσου που διέρχεται από τα κανάλια του εναλλάκτη θερμότητας, συνεπώς αυξημένες θερμοκρασίες.

Συνολικά, επιβεβαιώνονται οι θερμοκρασίες που υπολογίσαμε με την εντολή Volume Rendering σε κάθε λεπτό λειτουργίας. Η μελέτη των θερμοκρασιών καταλήγει με την ανεύρεση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται εσωτερικά του χώρου χαμηλής τάσης.

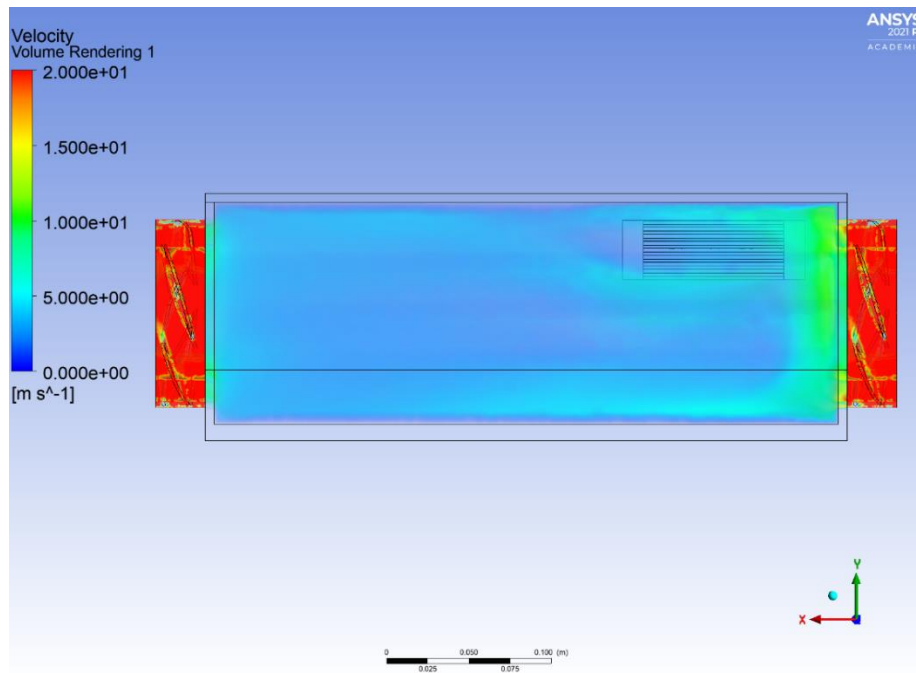


Εικόνα 160: Μέγιστη θερμοκρασία LV χώρου (Transient)

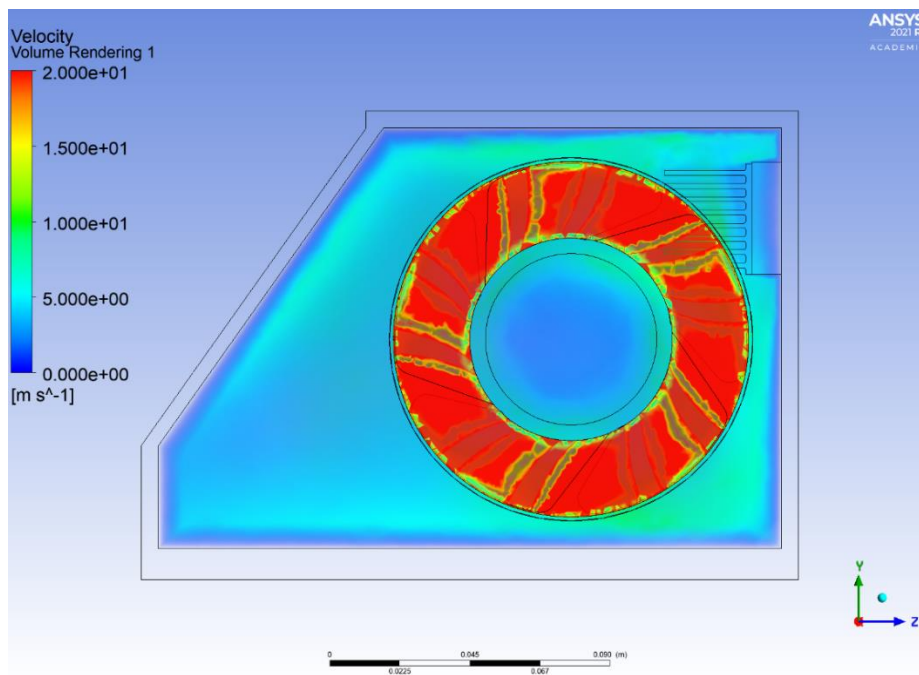
Η χρήση ποσοτικών πέρα από ποιοτικών (οπτικών) μέσων κατά την φάση της μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη όπως παρουσιάζεται και από την Εικόνα 160, καθώς η πραγματική μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε είναι 86°C και όχι 83°C που ήταν η μέγιστη ορατή. Πράγματι, εσωτερικά του όγκου του μετατροπέα ρεύματος DC-DC προκύπτει η μέγιστη θερμοκρασία των 86°C, η οποία βέβαια βρίσκεται εντός των προδιαγραφών του κατασκευαστή και σαφώς μικρότερη της steady state προσομοίωσης.

9.2.2 Ταχύτητα

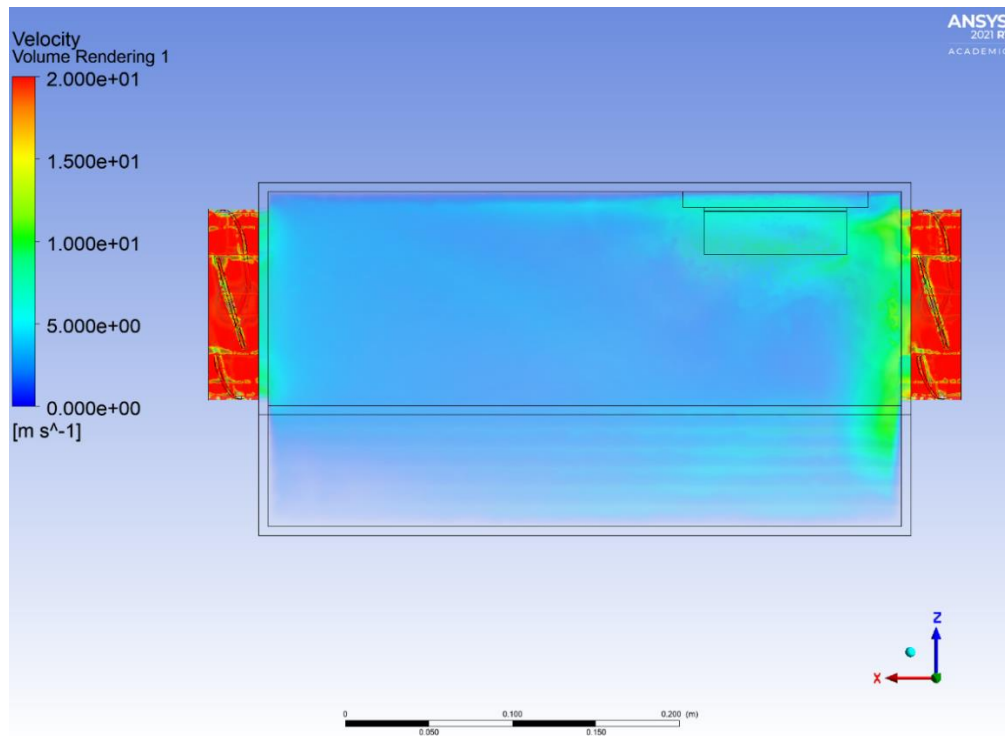
Σε αντιστοιχία με το πρώτο στάδιο παρατηρήθηκε η κατανομή της ταχύτητας του ψυκτικού μέσου εσωτερικά του χώρου χαμηλής τάσης. Συγκεκριμένα, με την χρήση της εντολής Volume Rendering απεικονίστηκε το πεδίο ταχύτητας. Στην περίπτωση της transient προσομοίωσης δεν έχει νόημα να απεικονίσουμε το πεδίο αυτό για κάθε λεπτό καθώς δεν έχουμε ανεμιστήρες μεταβλητών στροφών συνεπώς παραμένει ίδιο.



Εικόνα 161: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Transient) - 1



Εικόνα 162: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Transient) - 2



Εικόνα 163: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Transient) - 3

Για την ορθή κατανόηση των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην κλίμακα των ταχυτήτων. Παρατηρούνται αρκετά υψηλές ταχύτητες σε όλο τον LV χώρο, αλλά κυρίως κοντά στους ανεμιστήρες όπως και αναμένεται. Το γεγονός αυτό συνάδει με τους σχεδιαστικούς στόχους καθώς προκύπτει μεγαλύτερη παροχή ψυκτικού μέσου. Κατά τον άξονα x αρχικά παρουσιάζονται ταχύτητες της τάξης των 12 m/s, οι οποίες εν συνεχεία επιβραδύνονται μέχρι τα 5 m/s στο μέσο του χώρου χαμηλής τάσης και τελικά επιταχύνονται στα 8 m/s λόγω του ανεμιστήρα εξόδου. Οι αυξομειώσεις αυτές οφείλονται στην αποκόλληση που δημιουργείται στο πίσω μέρος του μετατροπέα DC-DC και του εναλλάκτη θερμότητας και στους στροβιλισμούς της τυρβώδους ροής που προκύπτει από τους ανεμιστήρες. Ταυτόχρονα, εξαιρετικής σημασίας είναι η ταχύτητα που επιτυγχάνει το ψυκτικό μέσο το οποίο διέρχεται εσωτερικά των καναλιών του εναλλάκτη θερμότητας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην γεωμετρία αλλά και την τοποθέτηση των εξαρτημάτων στο κουτί χαμηλής τάσης. Κατά τον άξονα y στα κανάλια του εναλλάκτη παρατηρούνται μειωμένες ταχύτητες όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο του ανεμιστήρα, ενώ ταυτόχρονα κατά τον άξονα z απεικονίζονται οι μικρότερες διαφορές ταχυτήτων.

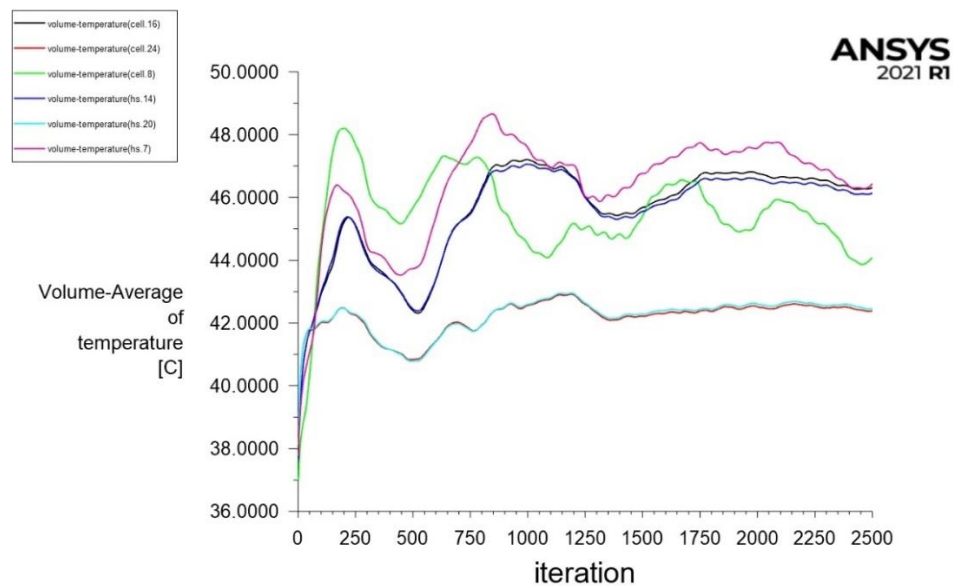
Η εποπτεία των ταχυτήτων του ψυκτικού μέσου είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της απαραίτητης παροχής εντός του χώρου χαμηλής τάσης και για την αποφυγή επικίνδυνων φαινομένων που μπορεί να παρουσιάσει η ροή. Στην συγκεκριμένη

περίπτωση, οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται είναι αρκετά υψηλές και ικανοποιητικές για τους σχεδιαστικούς μας στόχους. Ωστόσο παρουσιάζεται απόκλιση συγκριτικά με τα αποτελέσματα της steady state προσομοίωσης, ενώ στην πραγματικότητα δεν υπάρχει φαινόμενο που οφείλεται στο γεγονός ότι έτρεξαν δύο διαφορετικές προσομοιώσεις, οι οποίες δεν θα δώσουν ποτέ ακριβώς ταυτόσημα αποτελέσματα.

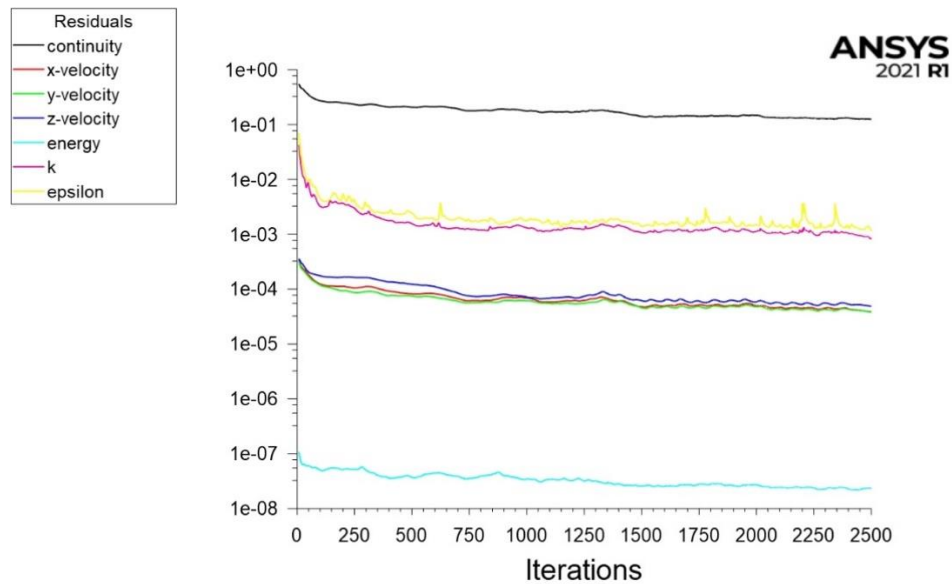
9.3 Χώρος Υψηλής Τάσης – Steady State Simulation

Στην περίπτωση της Steady State προσομοίωσης του χώρου υψηλής τάσης, σε αντιστοιχία με τον LV χώρο, τα θερμικά κρίσιμα εξαρτήματα τέθηκαν στην μέγιστη δυνατή τιμή απαγωγής θερμότητας, με σκοπό την διαπίστωση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται εσωτερικά του κουτιού και ιδιαίτερα στον όγκο των κελιών μπαταριών όπου και αναμένεται.

Για ακόμη μια φορά, πρωτίστως ελέγχθηκαν το διάγραμμα επισκόπησης και το διάγραμμα των υπολειμματικών. Το διάγραμμα επισκόπησης σε αυτήν την περίπτωση δεν μπορεί να διαθέτει όλα τα θερμικά κρίσιμα εξαρτήματα καθώς, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, δεν θα μπορούσε να είναι ευανάγνωστο. Χρησιμοποιήθηκαν τα τρία κελιά μπαταριών που πιθανώς αναμένονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες και οι αντίστοιχοι εναλλάκτες θερμότητας.



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα επισκόπησης μέσης θερμοκρασίας HV χώρου (Steady State)

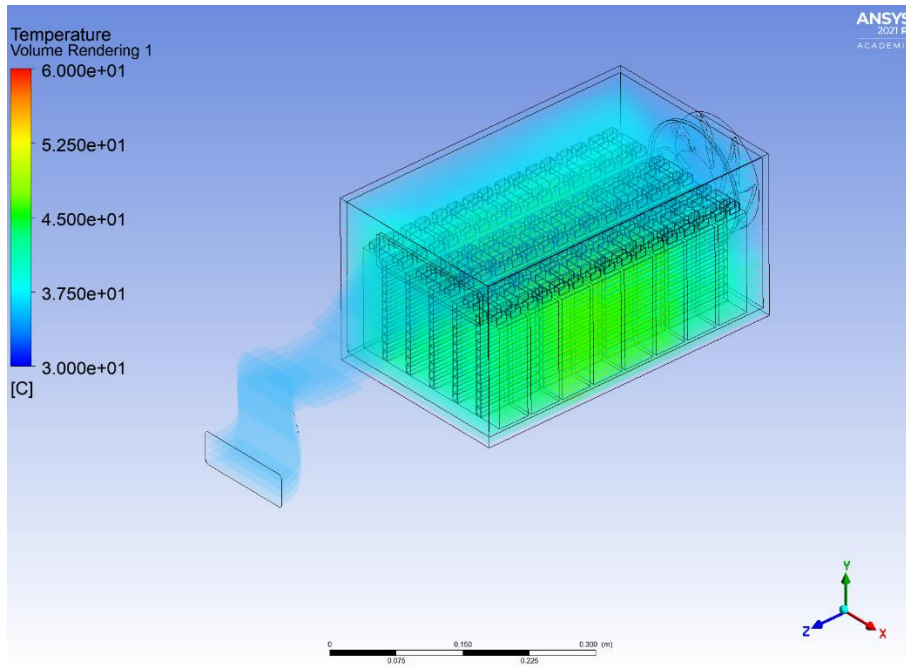


Διάγραμμα 6: Διάγραμμα υπολειμματικών LV χώρου (Steady State)

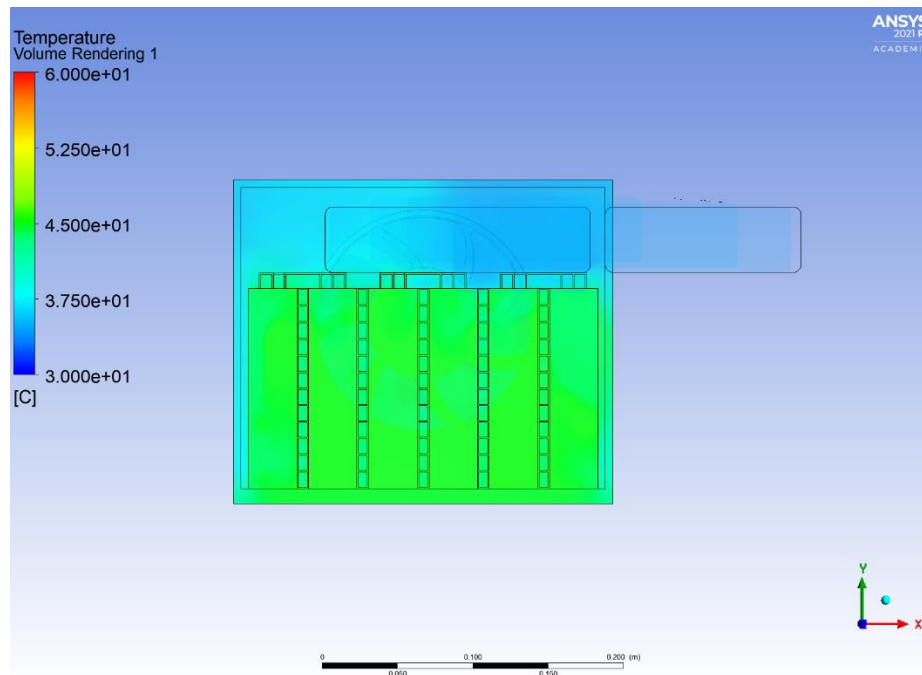
Όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5 η μέση τιμή των θερμοκρασιών των τριών κελιών που επιλέχθηκαν για την επισκόπηση των θερμοκρασιών βρέθηκε σε εύρος 44°C - 48°C μετά από 2500 επαναλήψεις, η οποία είναι εντός των θερμικών προδιαγραφών του συστήματος. Η εικόνα των υπολειμματικών όπως και στην περίπτωση του χώρου χαμηλής τάσης είναι ικανοποιητική.

9.3.1 Θερμοκρασία

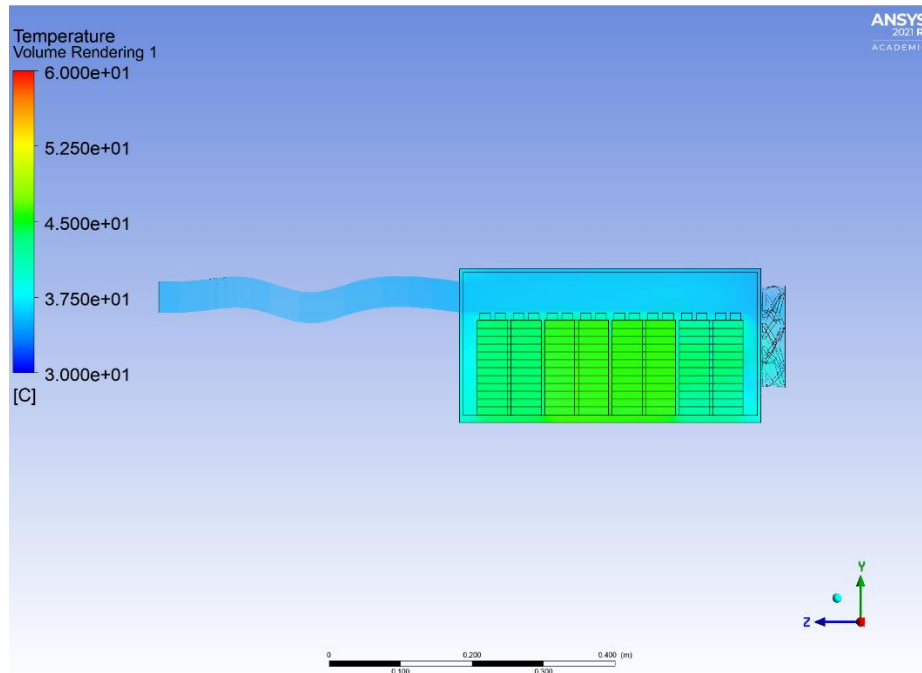
Σε πρώτο στάδιο παρατηρήθηκε η κατανομή των θερμοκρασιών εσωτερικά του χώρου υψηλής τάσης. Συγκεκριμένα, με την χρήση της εντολής Volume Rendering απεικονίστηκαν οι θερμοκρασίες σε όλα τα επιμέρους τμήματα του HV χώρου.



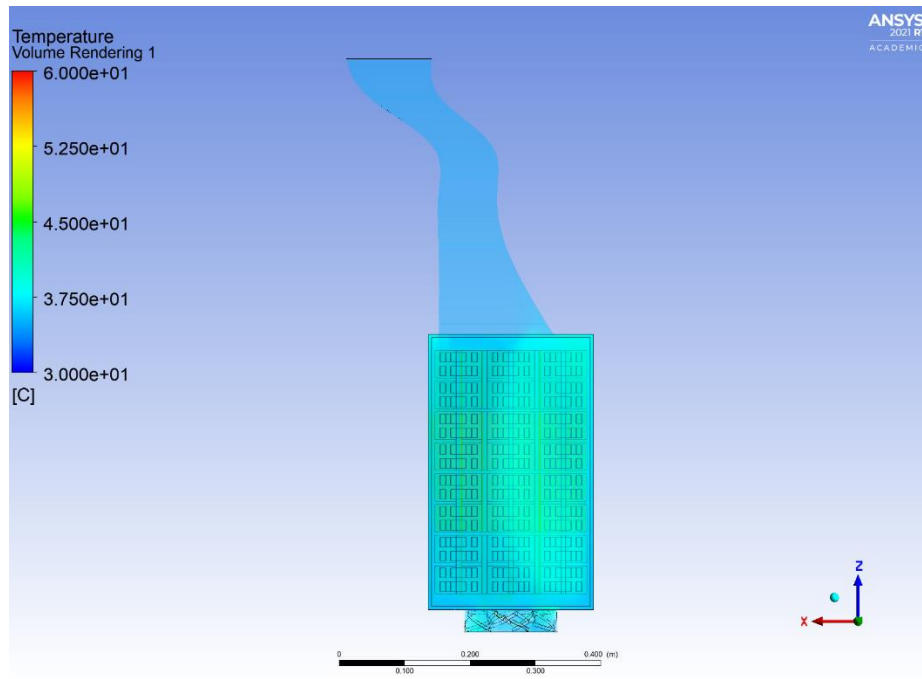
Εικόνα 164: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 1



Εικόνα 165: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 2



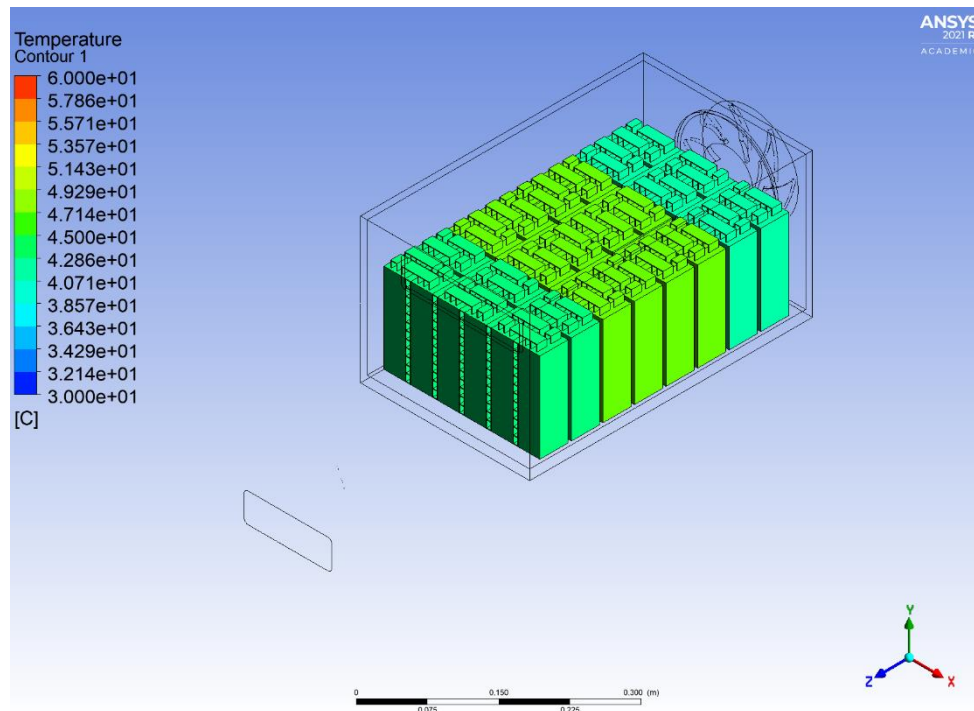
Εικόνα 166: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 3



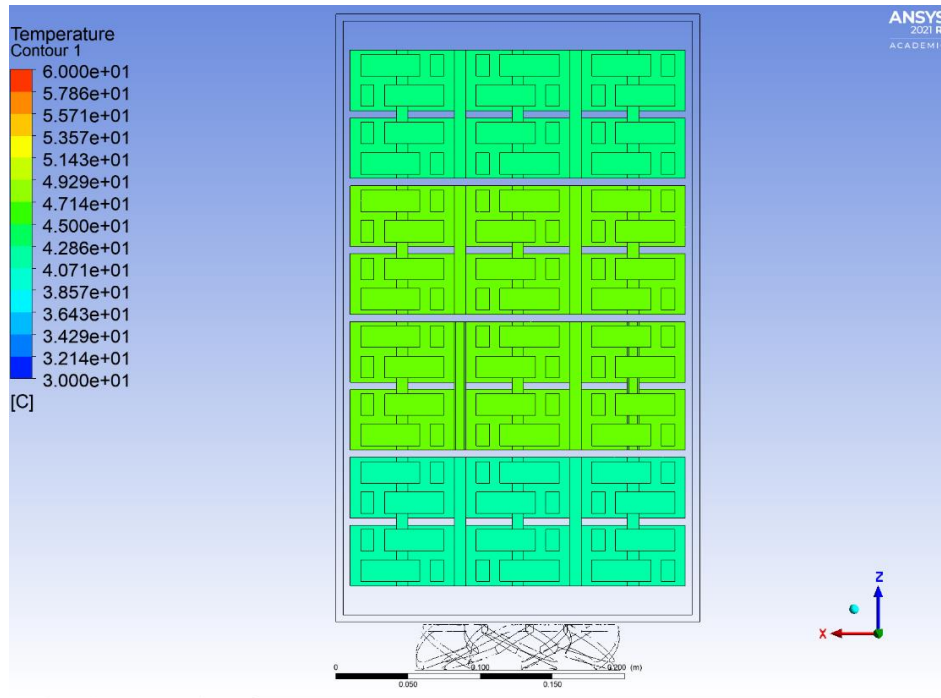
Εικόνα 167: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 4

Παρατηρούμε πως οι θερμοκρασίες των θερμικά κρίσιμων εξαρτημάτων, εδώ των κελιών μπαταριών και των εναλλακτών θερμότητας, κυμαίνονται από τους 37°C έως τους 45°C με αυτές, όπως είναι αναμενόμενο, να αυξάνονται όσο απομακρυνόμαστε από τον αγωγό εισόδου κατά τον άξονα z. Ωστόσο, υπάρχει μια μικρή πτώση της θερμοκρασίας κοντά στον ανεμιστήρα εξόδου και αυτό οφείλεται στην αυξημένη ταχύτητα που παρουσιάζεται στην αρχή και το τέλος του κουτιού και στην γεωμετρία του συστήματος. Ταυτόχρονα, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως οι θερμοκρασίες του ψυκτικού μέσου που βρίσκεται κοντά στην περιοχή των θερμικά κρίσιμων εξαρτημάτων παρουσιάζουν μια άνοδο σχετικά με τις θερμοκρασίες του υπόλοιπου ψυκτικού μέσου, ιδιαίτερα όσο απομακρυνόμαστε από τον αγωγό εισόδου και τον ανεμιστήρα εξόδου κατά τον άξονα γ. Σημαντική είναι και η πτώση της θερμοκρασίας κατά τον άξονα x λόγω της γεωμετρίας του αγωγού εισόδου και του προφίλ της ταχύτητας που αυτός δημιουργεί.

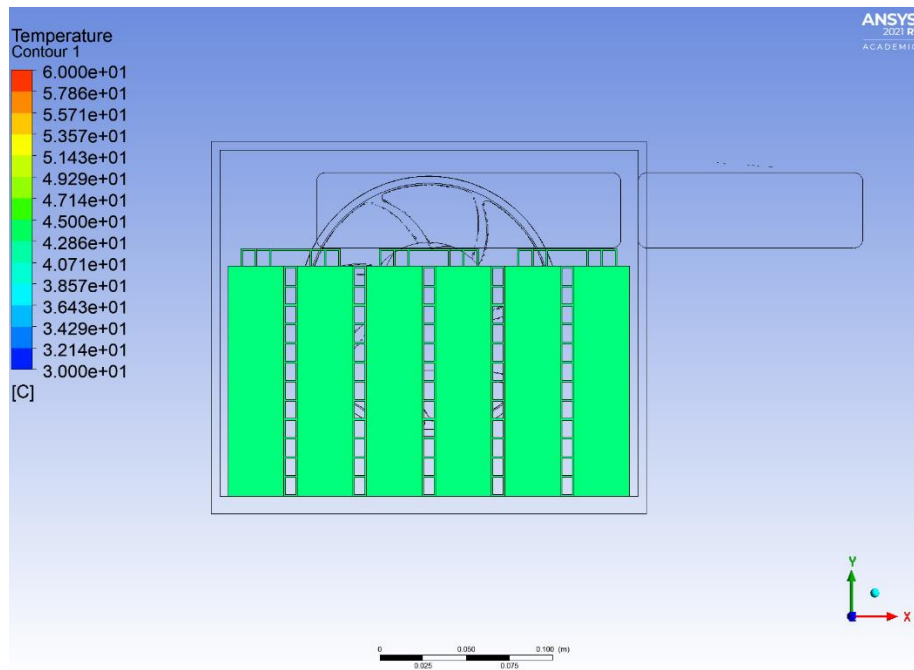
Επόμενο βήμα αποτελεί η λεπτομερής θερμοκρασιακή σκιαγράφηση των θερμικά κρίσιμων εξαρτημάτων. Με την χρήση της εντολής Contour διευκολύνεται η διαδικασία απεικόνισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.



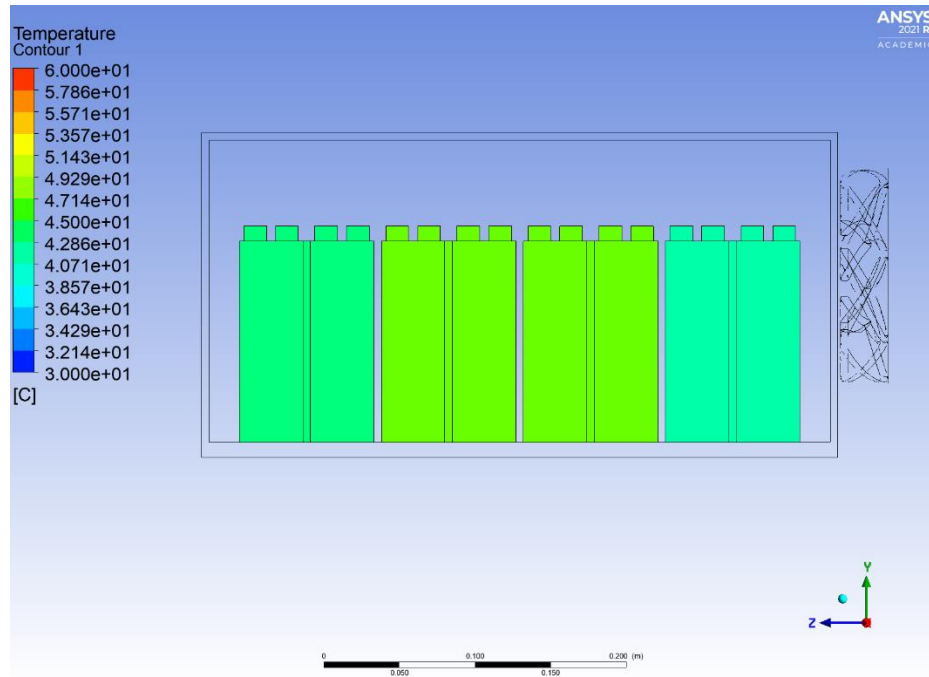
Εικόνα 168: Temperature Contour HV χώρου (Steady State) - 1



Εικόνα 169: Temperature Contour HV χώρου (Steady State) - 2



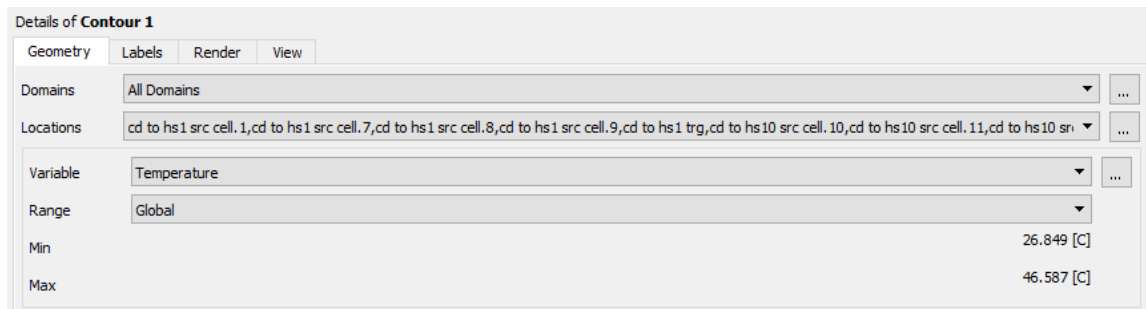
Εικόνα 170: Temperature Contour HV χώρου (Steady State) - 3



Εικόνα 171: Temperature Contour HV χώρου (Steady State) - 4

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρατηρείται αύξηση θερμοκρασιών κατά τον άξονα z, δηλαδή όσο απομακρυνόμαστε από τον αγωγό εισόδου και μία μείωση κοντά στον ανεμιστήρα εξόδου. Κατά τους άξονες y και x απεικονίζεται η μικρότερη διαφορά θερμοκρασιών. Συνολικά, επιβεβαιώνονται οι θερμοκρασίες που υπολογίσαμε με την εντολή Volume Rendering.

Η μελέτη των θερμοκρασιών καταλήγει με την ανεύρεση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται εσωτερικά του χώρου χαμηλής τάσης.

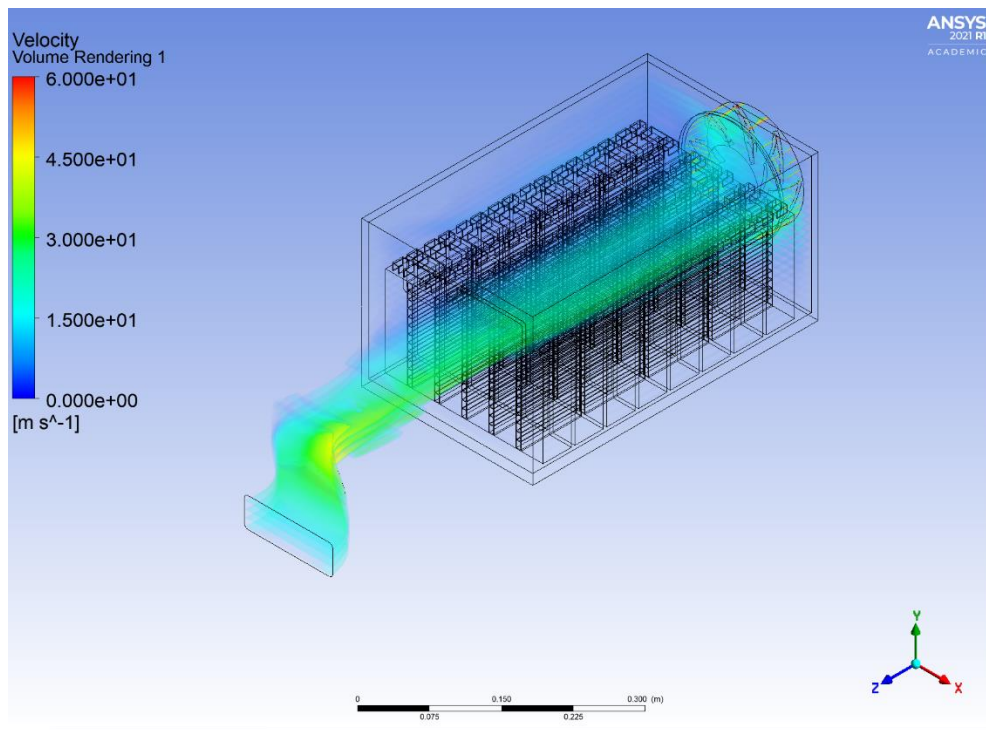


Εικόνα 172: Μέγιστη θερμοκρασία HV χώρου (Steady State)

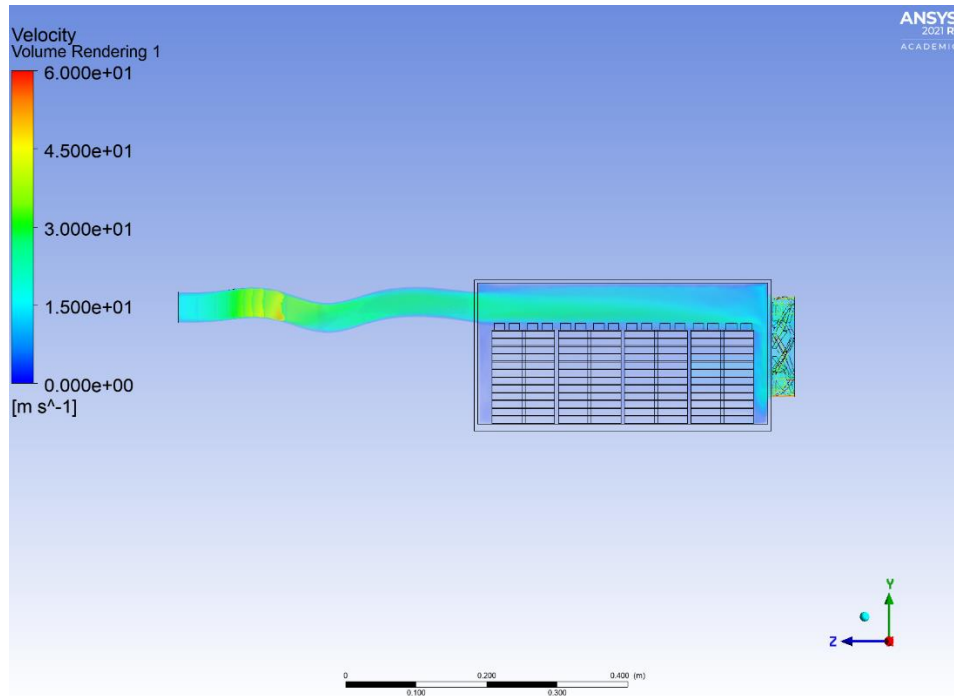
Η χρήση ποσοτικών πέρα από ποιοτικών (οπτικών) μέσων κατά την φάση της μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη όπως παρουσιάζεται και από την Εικόνα 172, καθώς η πραγματική μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε είναι 47°C και όχι 45°C που ήταν η μέγιστη ορατή, η οποία βέβαια βρίσκεται εντός των προδιαγραφών του κατασκευαστή.

9.3.2 Ταχύτητα

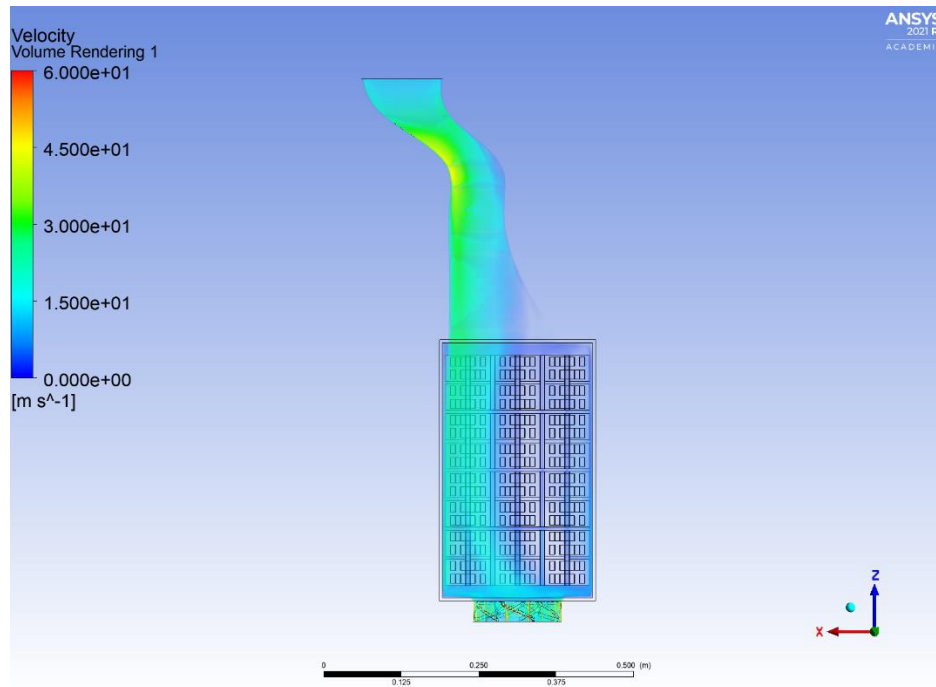
Σε αντιστοιχία με το πρώτο στάδιο παρατηρήθηκε η κατανομή της ταχύτητας του ψυκτικού μέσου εσωτερικά του χώρου υψηλής τάσης. Συγκεκριμένα, με την χρήση της εντολής Volume Rendering απεικονίστηκε το πεδίο ταχύτητας.



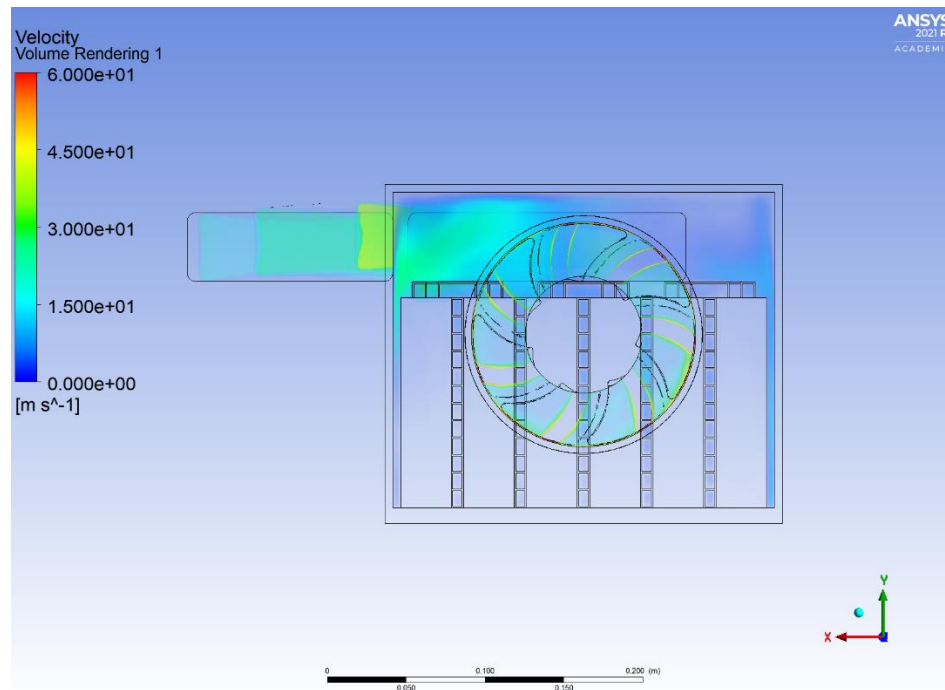
Εικόνα 173: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 1



Εικόνα 174: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 2



Εικόνα 175: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 3



Εικόνα 176: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 4

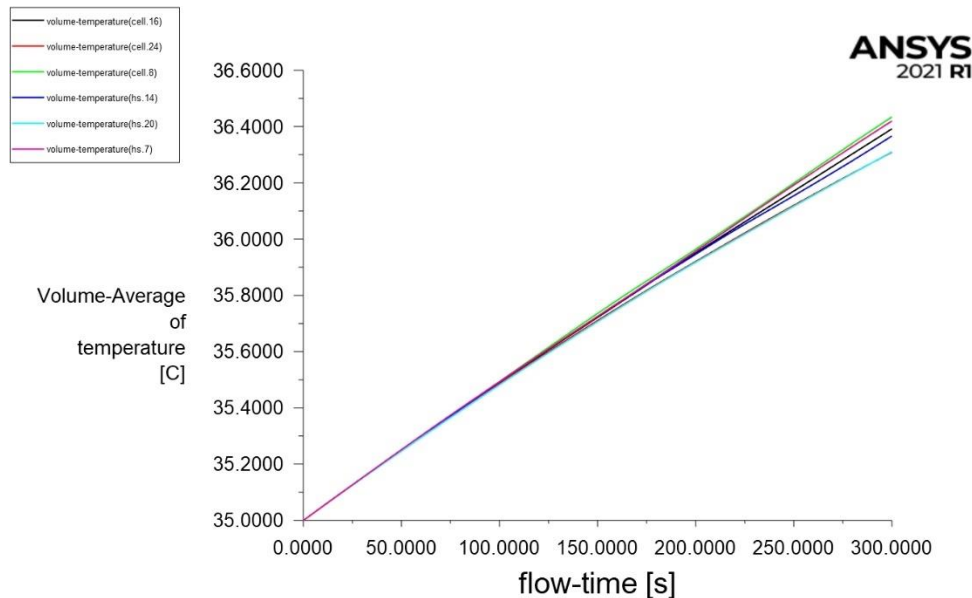
Για την ορθή κατανόηση των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην κλίμακα των ταχυτήτων. Παρατηρούνται αρκετά υψηλές ταχύτητες σε όλο τον HV χώρο, αλλά κυρίως εσωτερικά του αγωγού εισόδου, στο πάνω μέρος του κουτιού και κοντά στον ανεμιστήρα όπως και αναμένεται. Το γεγονός αυτό συνάδει με τους σχεδιαστικούς στόχους καθώς προκύπτει μεγαλύτερη παροχή ψυκτικού μέσου. Κατά τον άξονα x παρουσιάζεται μεγάλη διαφορά ταχυτήτων γεγονός που οφείλεται στην γεωμετρία του αγωγού εισόδου. Ταυτόχρονα, εξαιρετικής σημασίας είναι η ταχύτητα που επιτυγχάνει το ψυκτικό μέσο το οποίο διέρχεται εσωτερικά των καναλιών των εναλλακτών θερμότητας. Παρόλο που φαίνεται μικρή έως μηδενική λόγω της κλίμακας και των κελιών μπαταριών που εμποδίζουν την ορατότητα, στην πραγματικότητα είναι υπαρκτή και της τάξης των 2-3 m/s. Κατά τον άξονα y παρουσιάζεται αύξηση των ταχυτήτων όσο πλησιάζουμε στο πάνω τοίχωμα του κουτιού και κατά τον άξονα z έχουμε μια επιβράδυνση της ταχύτητας από τον αγωγό εισόδου έως την ταχύτητα εξόδου του ανεμιστήρα.

Η εποπτεία των ταχυτήτων του ψυκτικού μέσου είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της απαραίτητης παροχής εντός του χώρου χαμηλής τάσης και για την αποφυγή επικίνδυνων φαινομένων που μπορεί να παρουσιάσει η ροή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται είναι αρκετά υψηλές και ικανοποιητικές για τους σχεδιαστικούς μας στόχους.

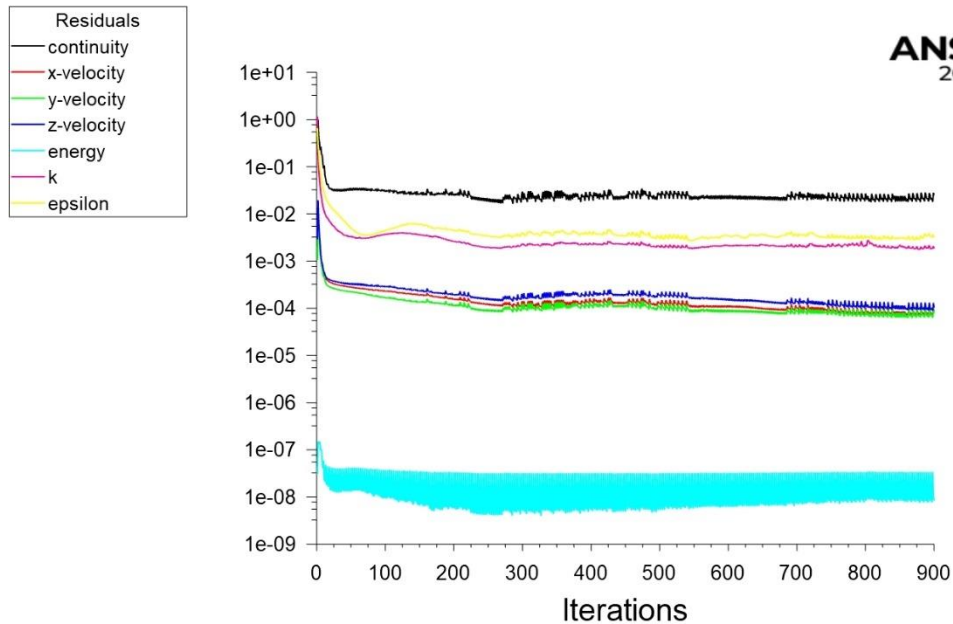
9.4 Χώρος Υψηλής Τάσης – Transient Simulation

Στην περίπτωση της Transient προσομοίωσης του χώρου υψηλής τάσης, τα θερμικά κρίσιμα εξαρτήματα τέθηκαν και πάλι στην μέγιστη δυνατή τιμή απαγωγής θερμότητας, με σκοπό την διαπίστωση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται εσωτερικά του κουτιού και ιδιαίτερα στον όγκο των κελιών μπαταριών όπου και αναμένεται. Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ορίστηκε στα 300 sec, δηλαδή στα 5 λεπτά, συνεχούς λειτουργίας σε ακραία αγωνιστικές συνθήκες, έτσι ώστε να ελεγχθεί η κατανομή της θερμοκρασίας εσωτερικά του χώρου υψηλής τάσης και να διαπιστωθεί εάν επιτυγχάνεται η μέγιστη θερμοκρασία που υπολογίστηκε κατά την Steady State προσομοίωση.

Όπως και στην Steady State προσομοίωση, σε πρώτη φάση ελέγχθηκαν το διάγραμμα επισκόπησης και το διάγραμμα των υπολειμματικών.



Διάγραμμα 7: Διάγραμμα επισκόπησης μέσης θερμοκρασίας HV χώρου (Transient)

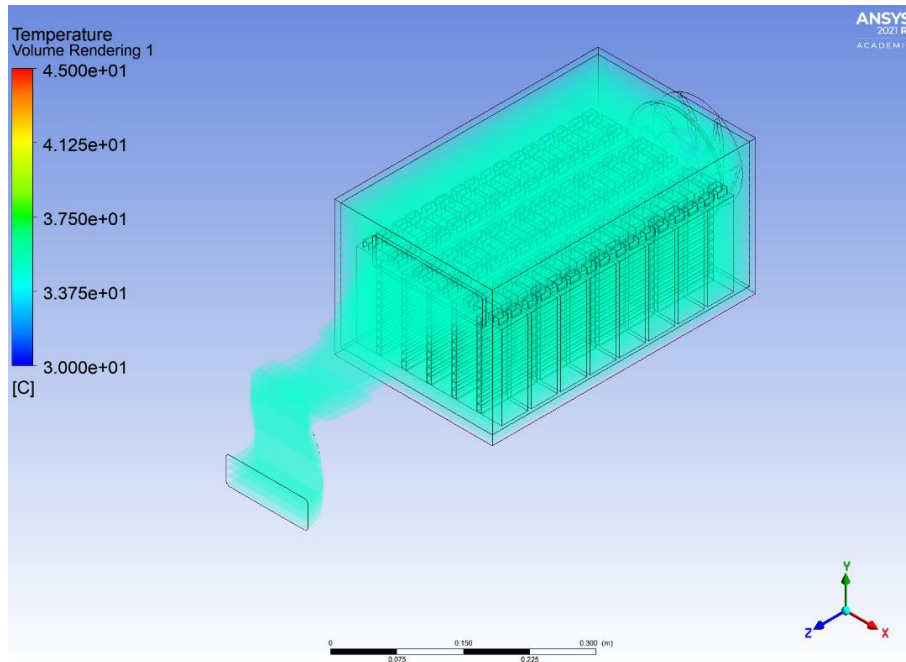


Διάγραμμα 8: Διάγραμμα υπολειμματικών HV χώρου (Transient)

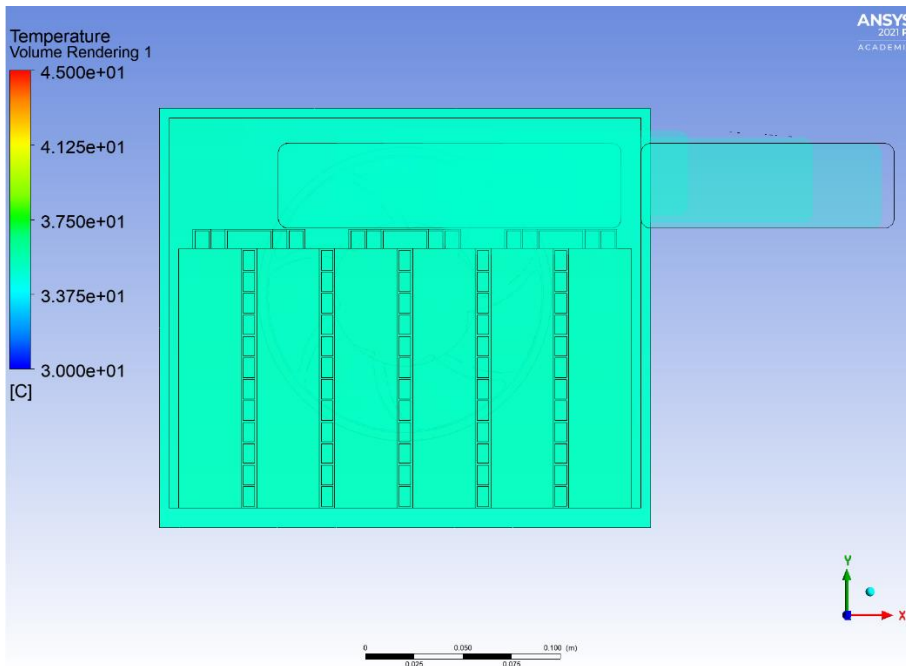
Όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 7 η μέγιστη μέση τιμή των θερμοκρασιών των κελιών μπαταριών μετά από 5 λεπτά λειτουργίας σε ακραίες συνθήκες είναι 37°C, αρκετά χαμηλότερη της τιμής της Steady State προσομοίωσης και προφανώς εντός των ορίων λειτουργίας του κατασκευαστή. Η εικόνα των υπολειμματικών δείχνει την περιοδική συμπεριφορά τους, κάθε φορά και με μεγαλύτερη συχνότητα.

9.4.1 Θερμοκρασία

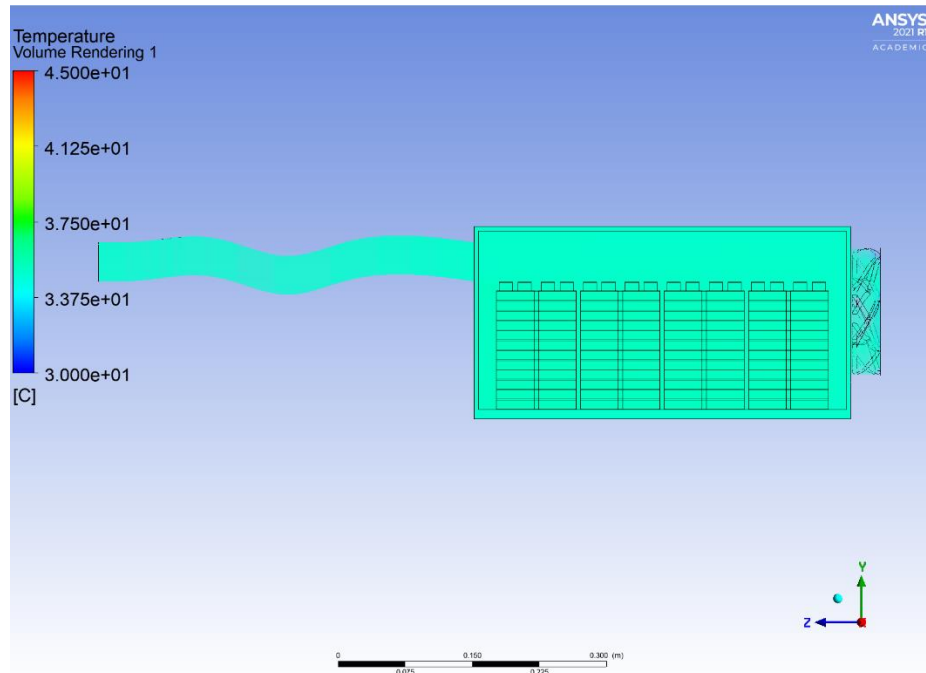
Σε πρώτο στάδιο παρατηρήθηκε η κατανομή των θερμοκρασιών εσωτερικά του χώρου υψηλής τάσης. Συγκεκριμένα, με την χρήση της εντολής Volume Rendering απεικονίστηκαν οι θερμοκρασίες σε όλα τα επιμέρους τμήματα του HV χώρου για κάθε λεπτό λειτουργίας.



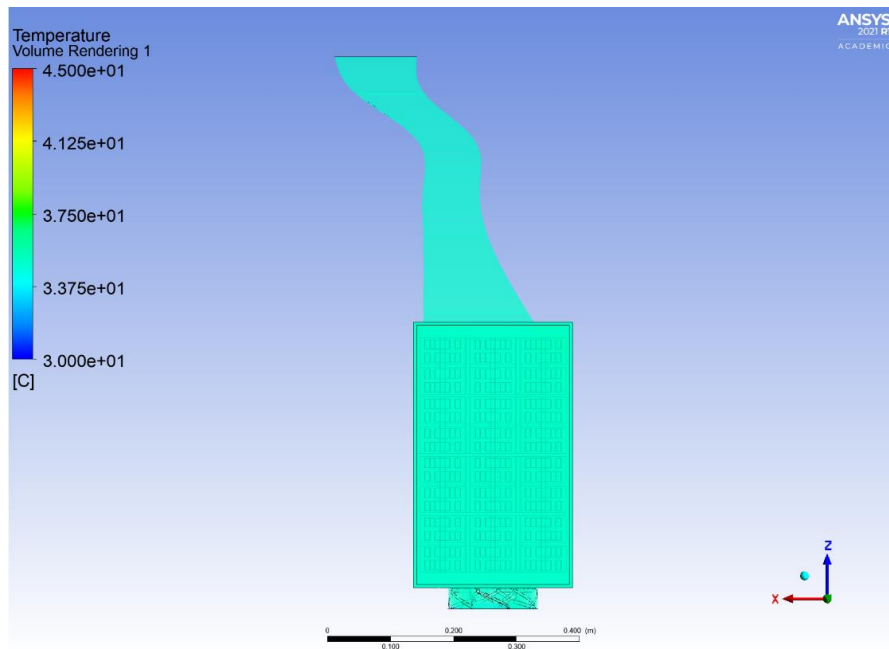
Εικόνα 177: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 1



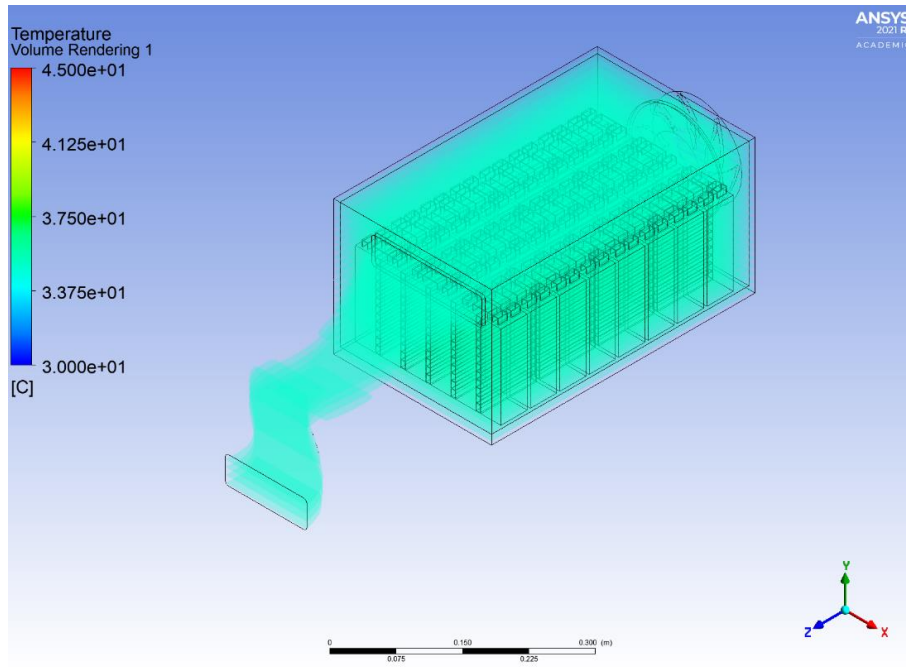
Εικόνα 178: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 2



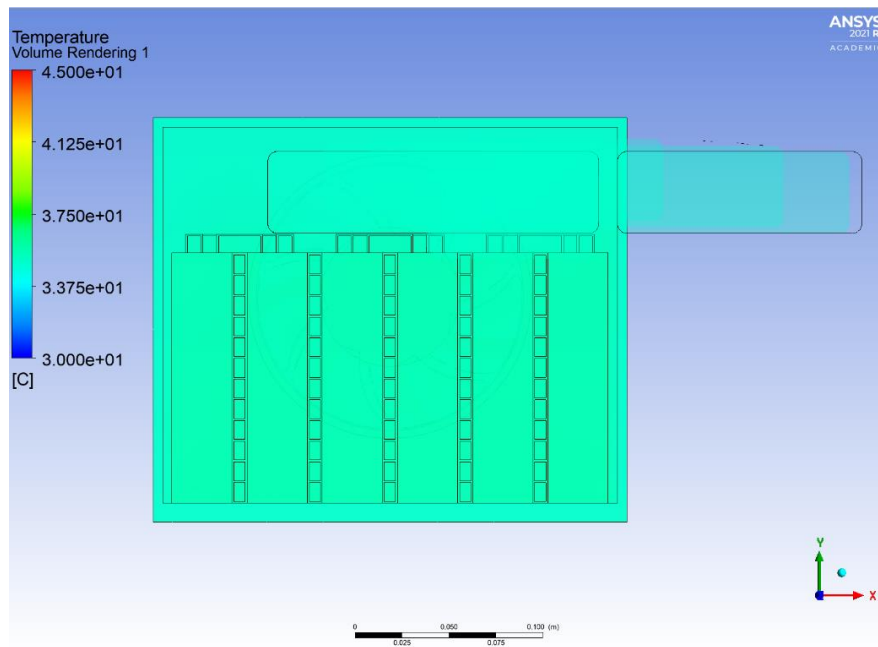
Εικόνα 179: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 3



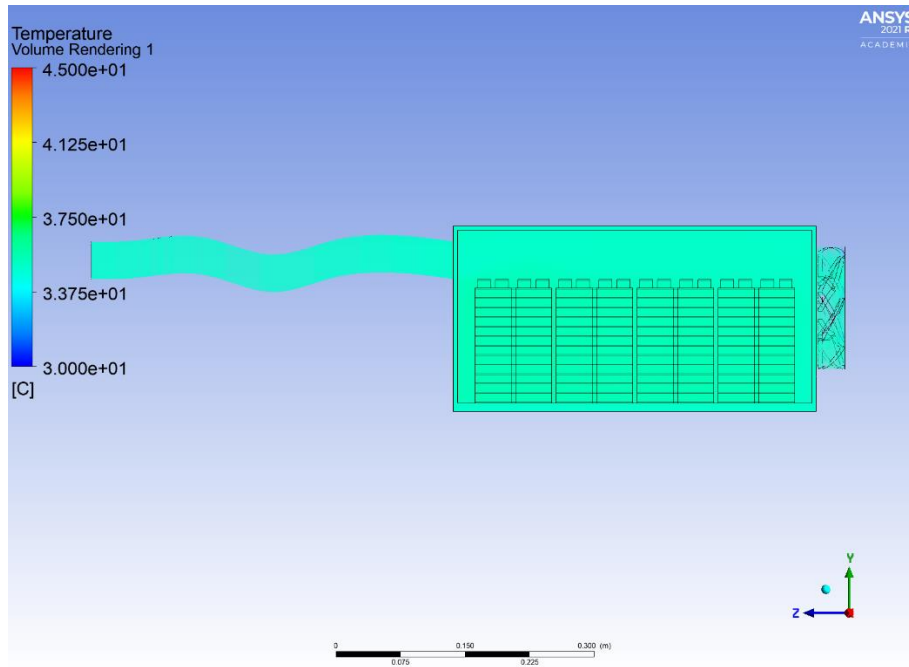
Εικόνα 180: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 4



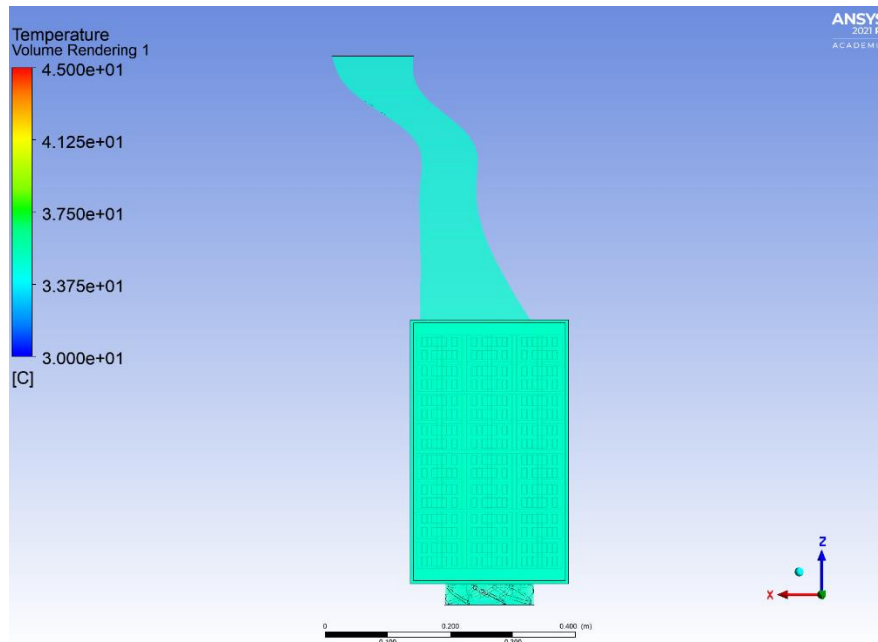
Εικόνα 181: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 1



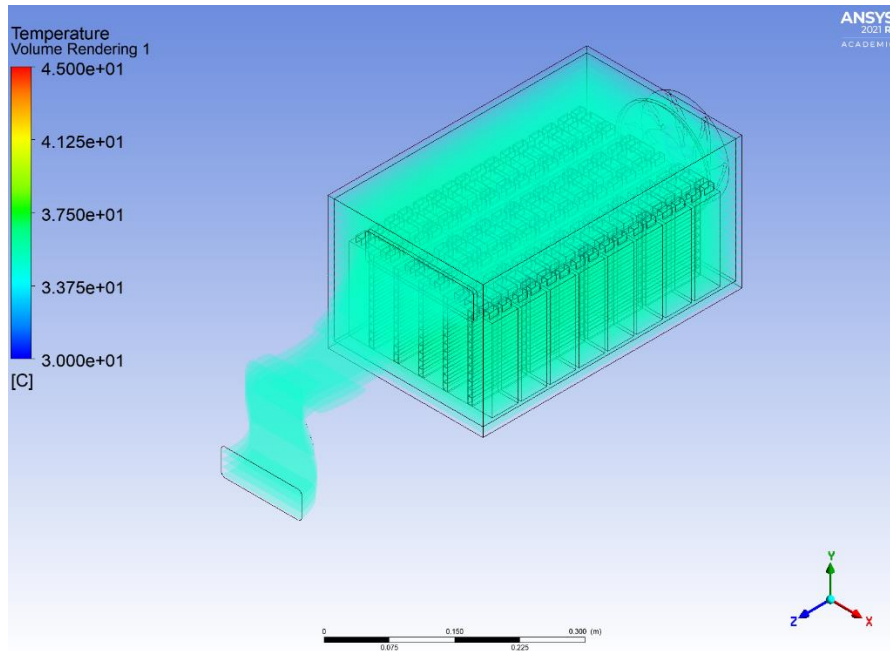
Εικόνα 182: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 2



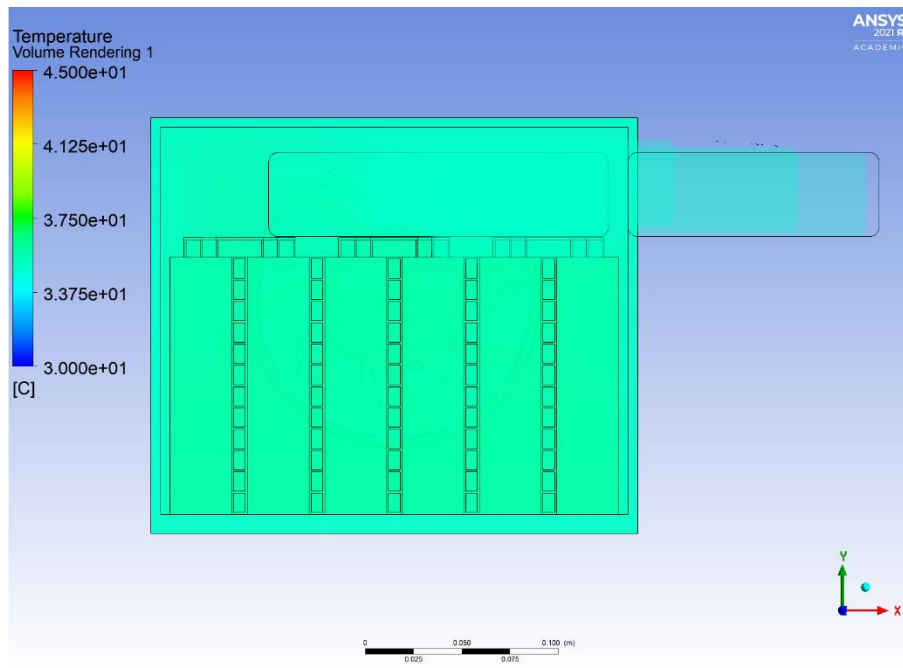
Εικόνα 183: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 3



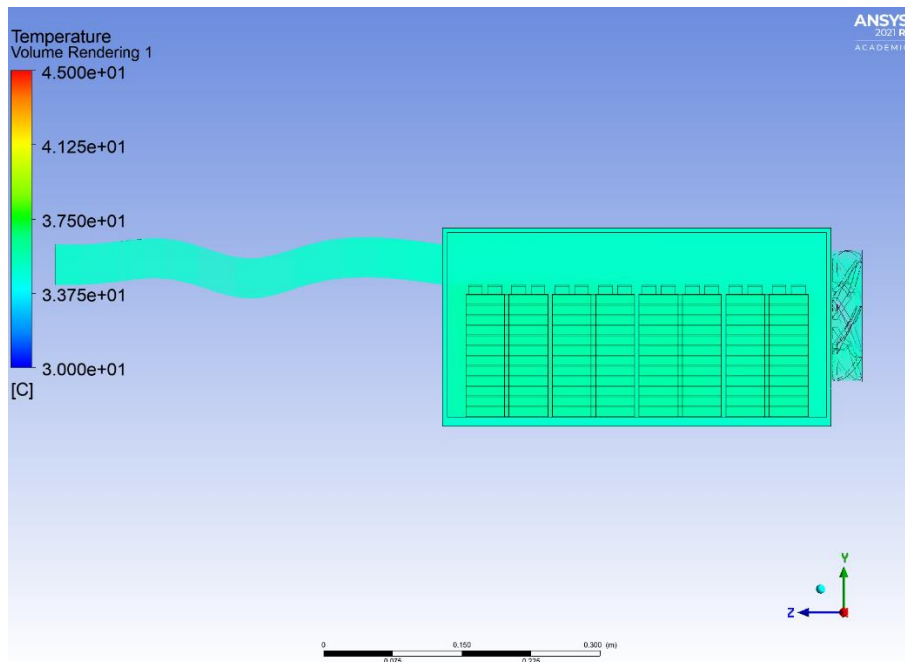
Εικόνα 184: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 4



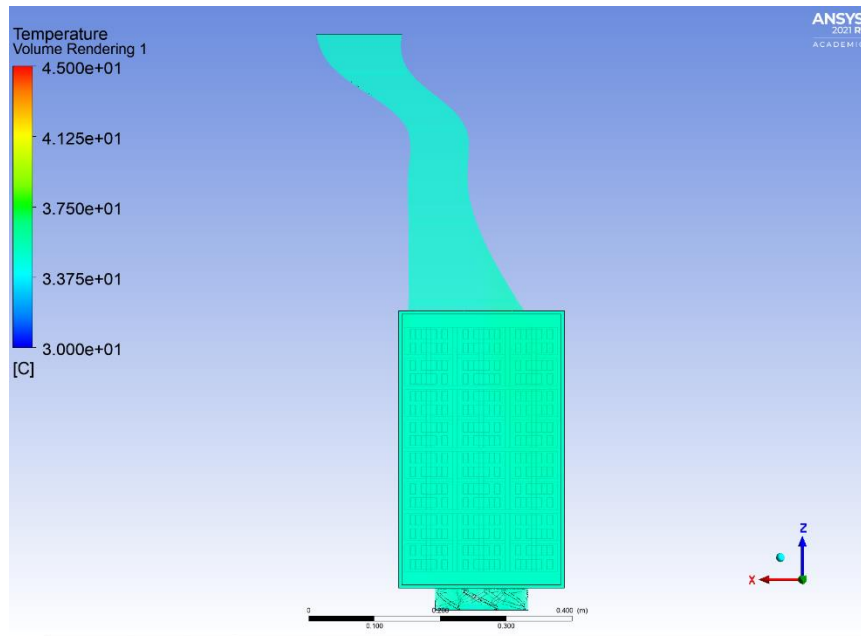
Εικόνα 185: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 1



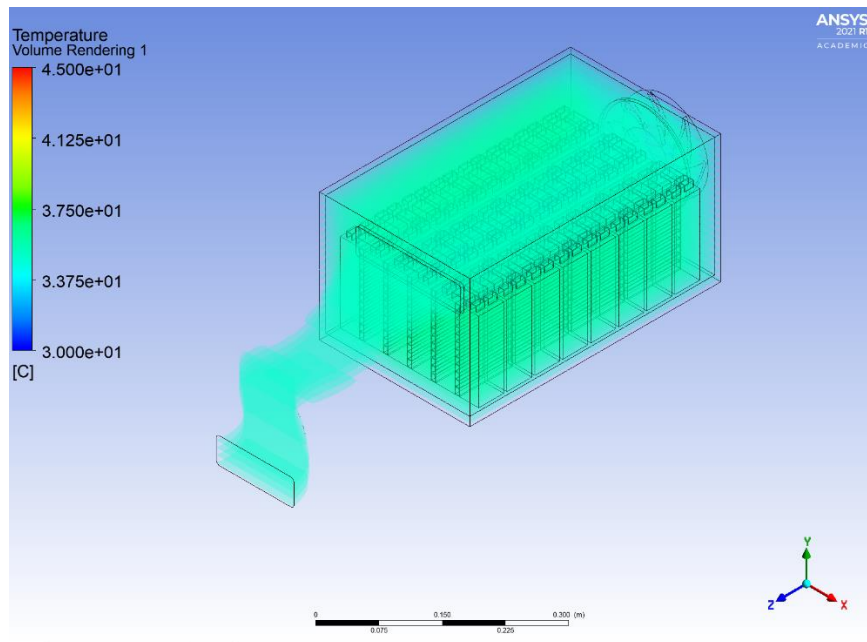
Εικόνα 186: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 2



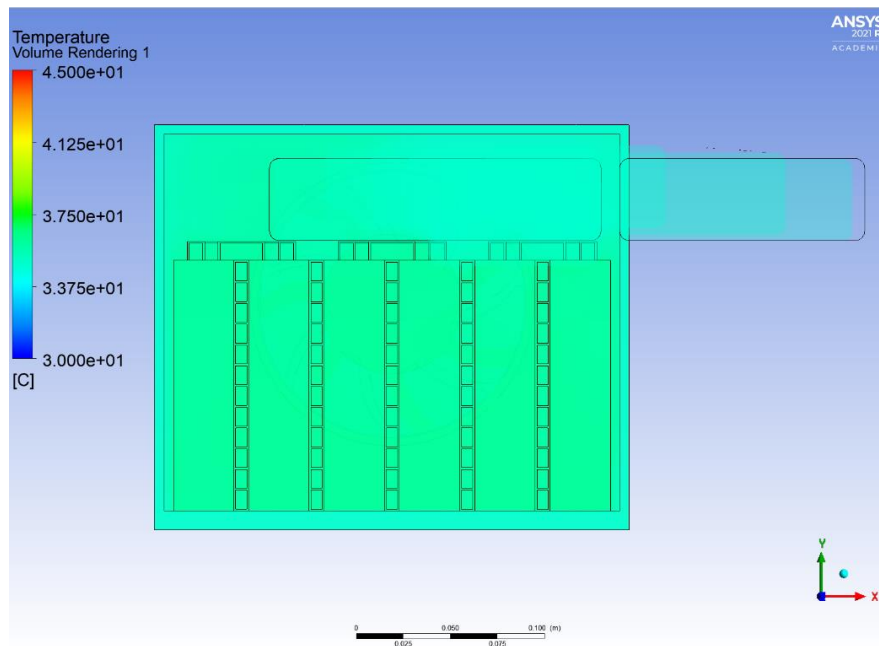
Εικόνα 187: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 3



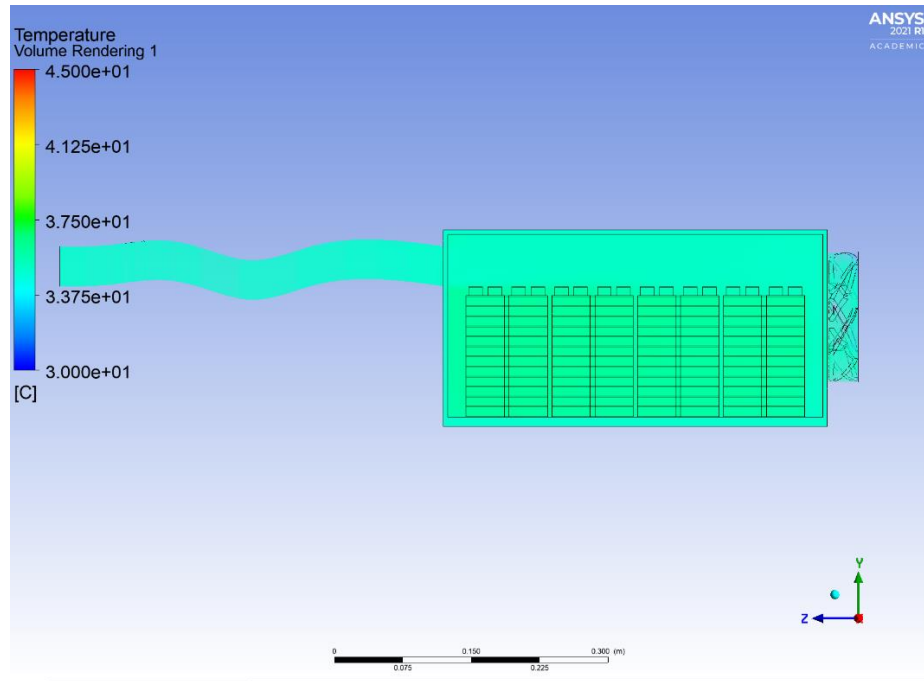
Εικόνα 188: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 4



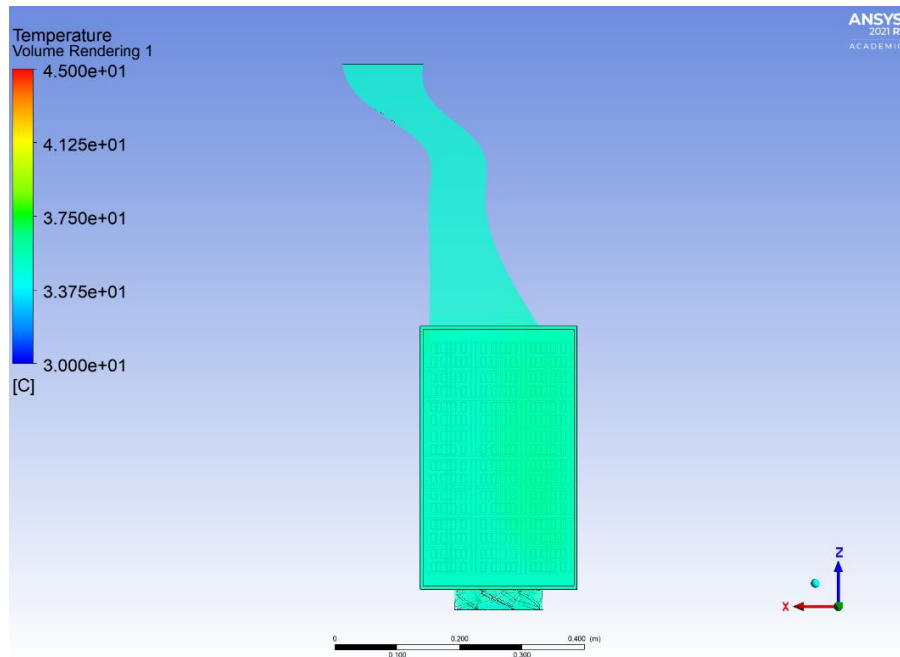
Εικόνα 189: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 1



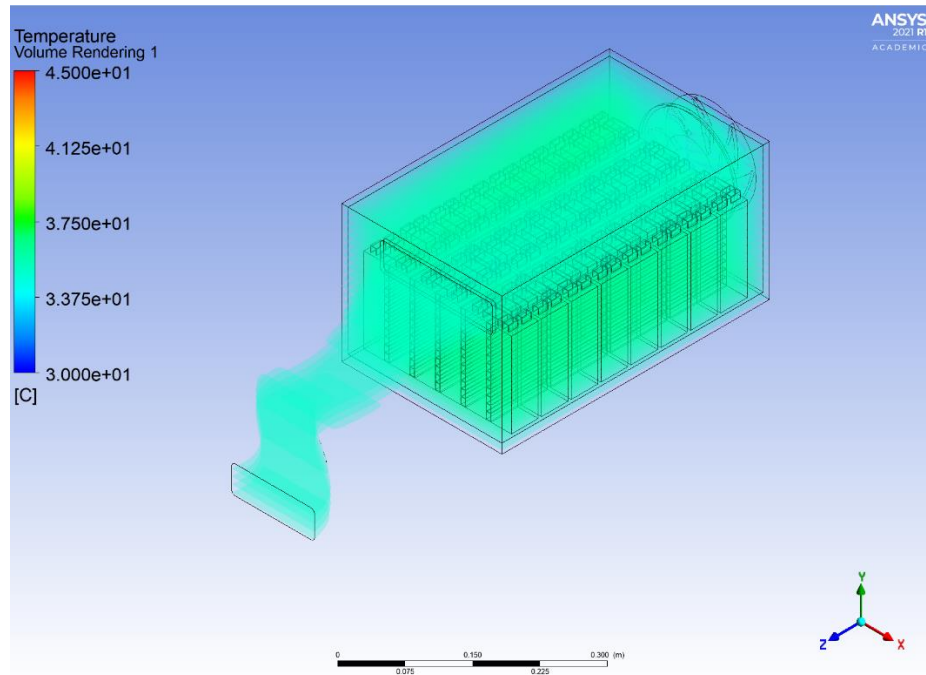
Εικόνα 190: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 2



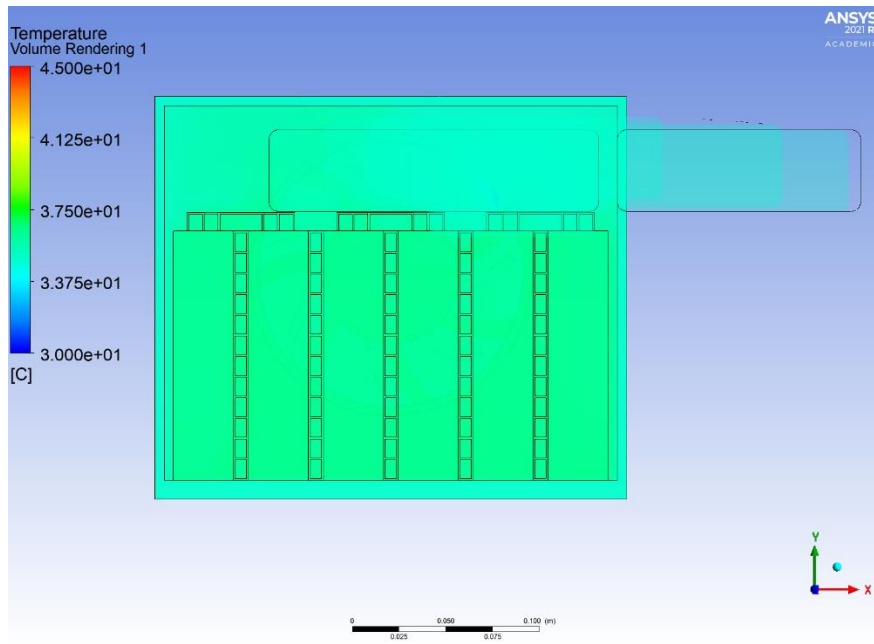
Εικόνα 191: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 3



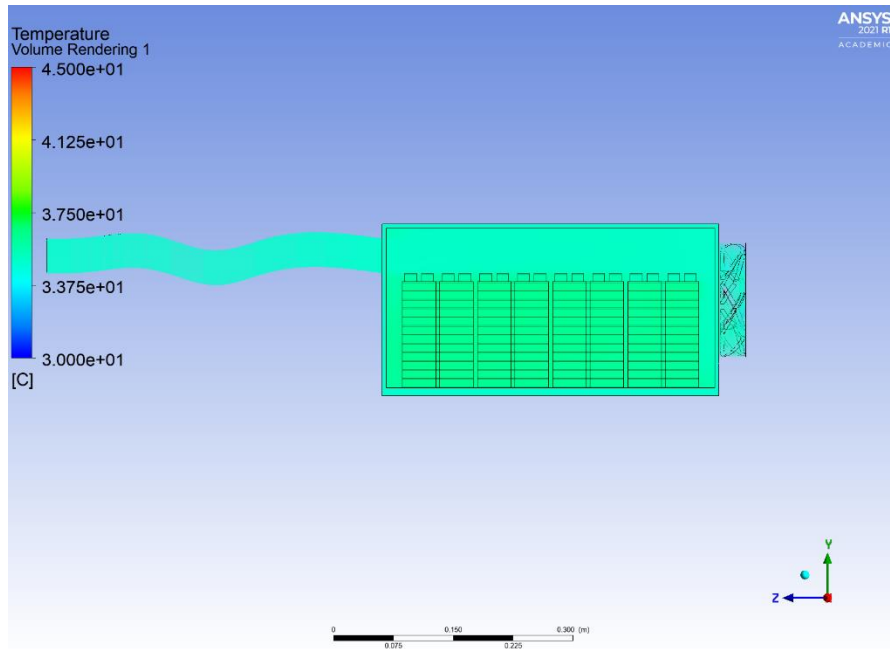
Εικόνα 192: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 4



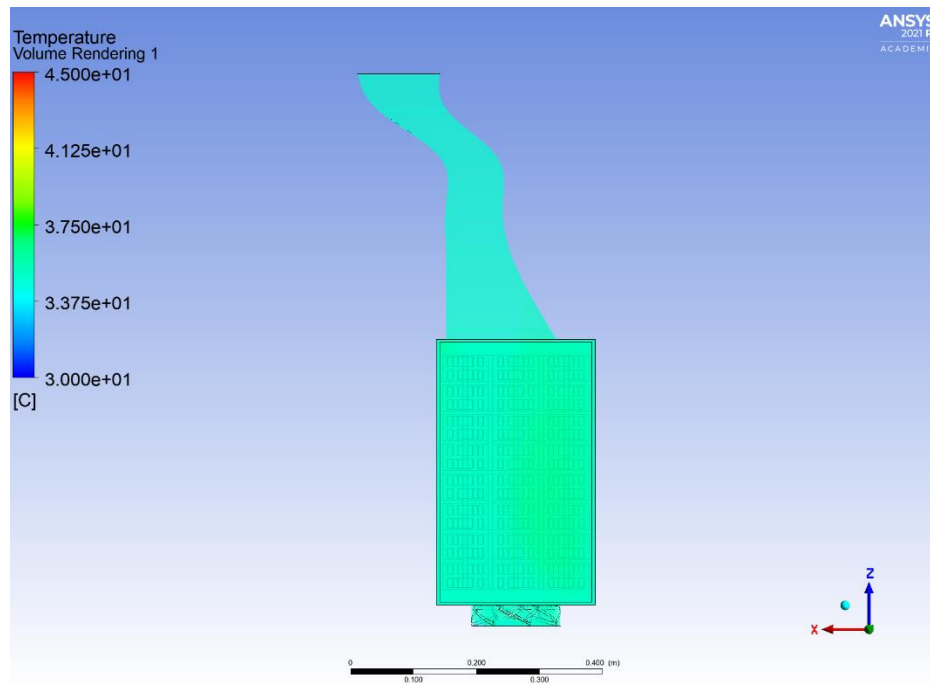
Εικόνα 193: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 1



Εικόνα 194: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 2



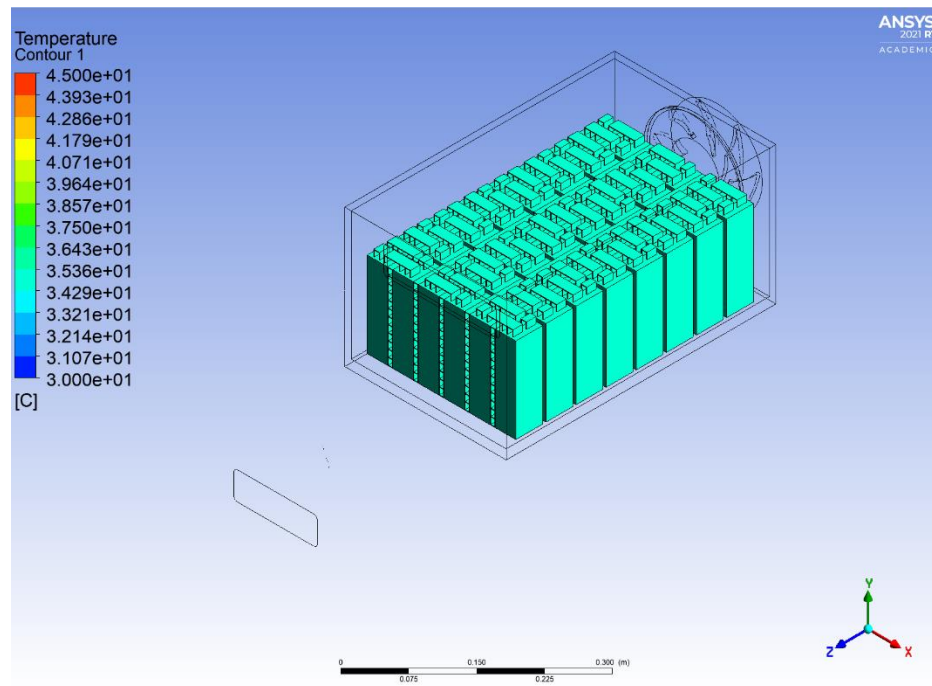
Εικόνα 195: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 50 λεπτό λειτουργίας - 3



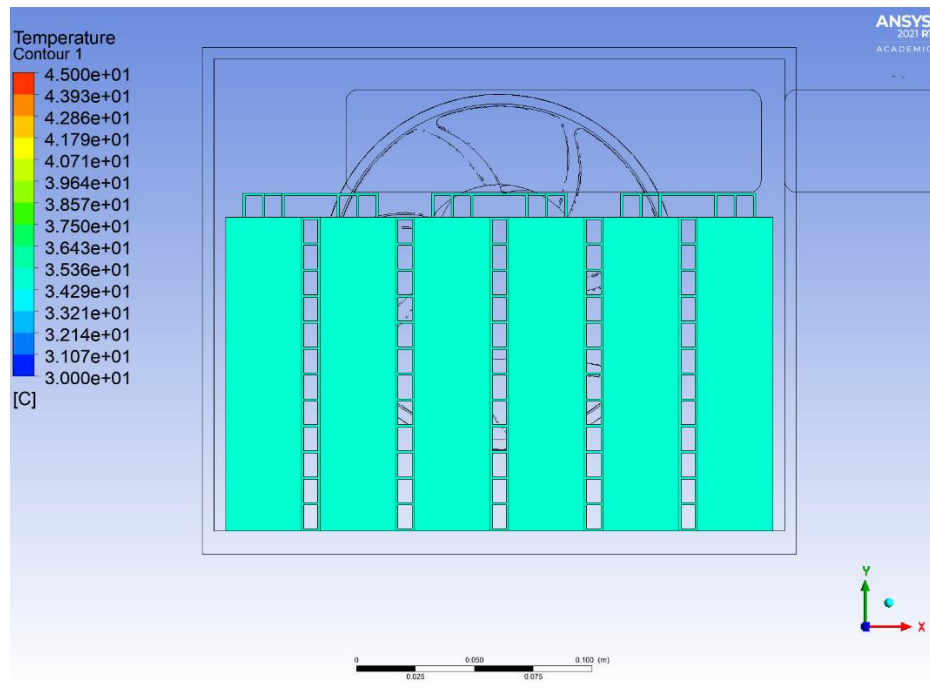
Εικόνα 196: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 50 λεπτό λειτουργίας - 4

Στο πρώτο λεπτό της λειτουργίας του χώρου υψηλής τάσης η μέγιστη θερμοκρασία ανήλθε στους 35°C, στο δεύτερο λεπτό στους 35°C, στο τρίτο λεπτό στους 36°C, στο τέταρτο λεπτό στους 36°C και στο πέμπτο λεπτό στους 37°C. Παρατηρείται λοιπόν πολύ μικρή αύξηση της θερμοκρασίας σε όλη την διάρκεια λειτουργίας, χαμηλότερη της αντίστοιχης steady state προσομοίωσης. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι δεν προλαβαίνει το σύστημα να φτάσει στην σταθερή θερμοκρασία που θα έφτανε αν λειτουργούσε για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα.

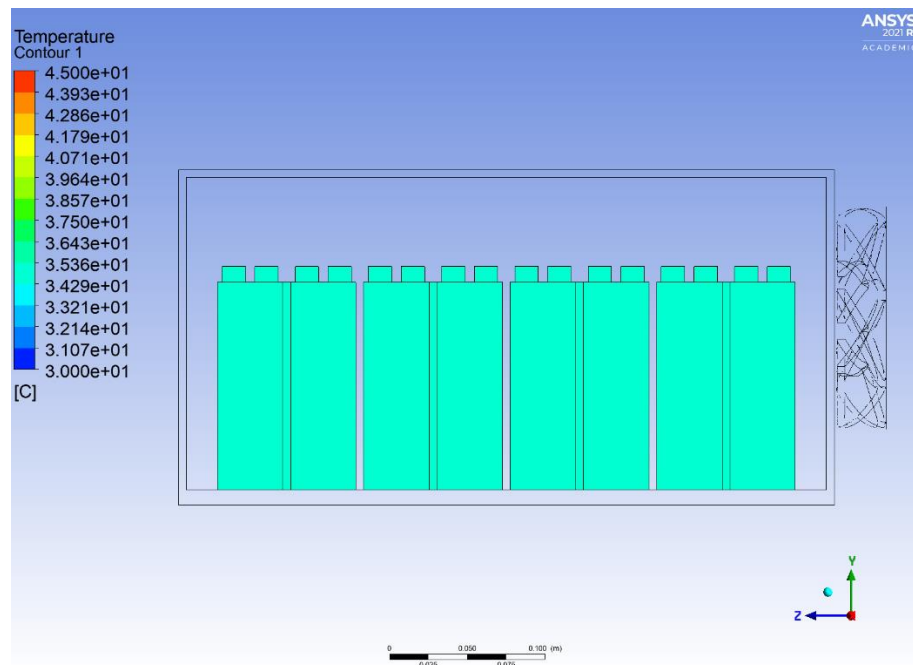
Επόμενο βήμα αποτελεί η λεπτομερής θερμοκρασιακή σκιαγράφιση των θερμικά κρίσιμων εξαρτημάτων για κάθε λεπτό λειτουργίας. Με την χρήση της εντολής Contour διευκολύνεται η διαδικασία απεικόνισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.



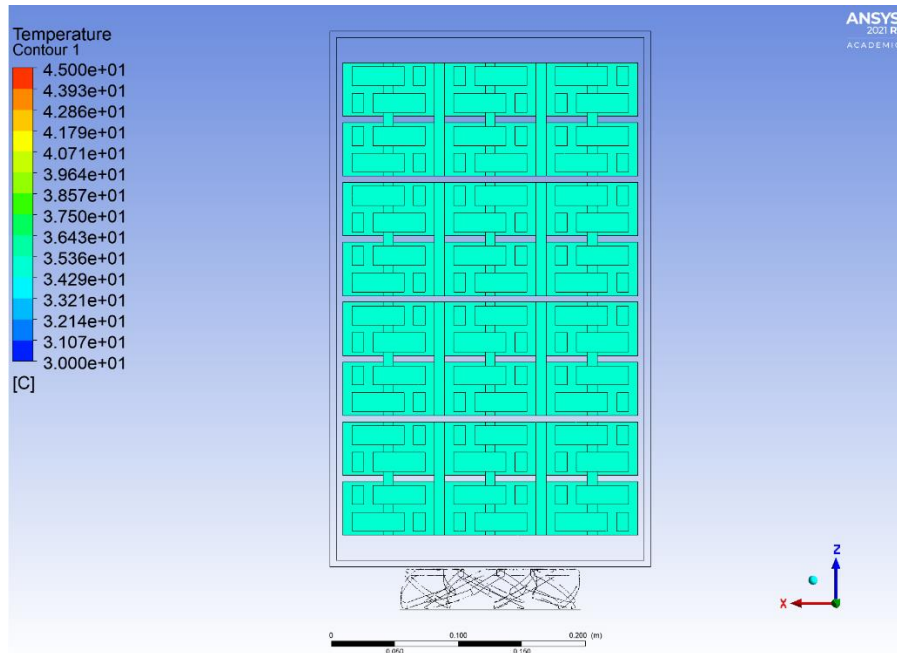
Εικόνα 197: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 1



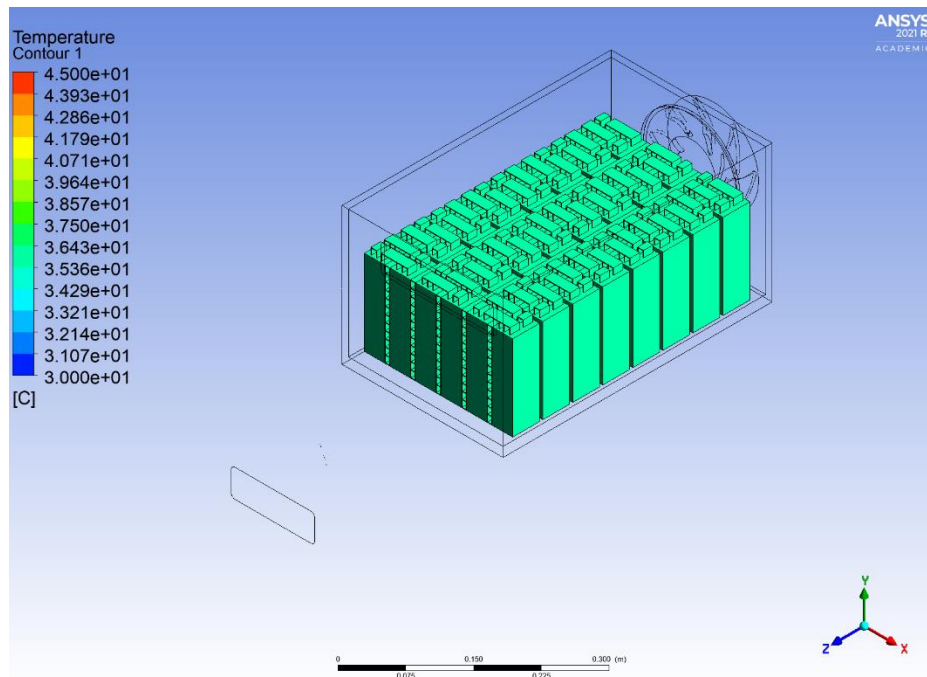
Εικόνα 198: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 2



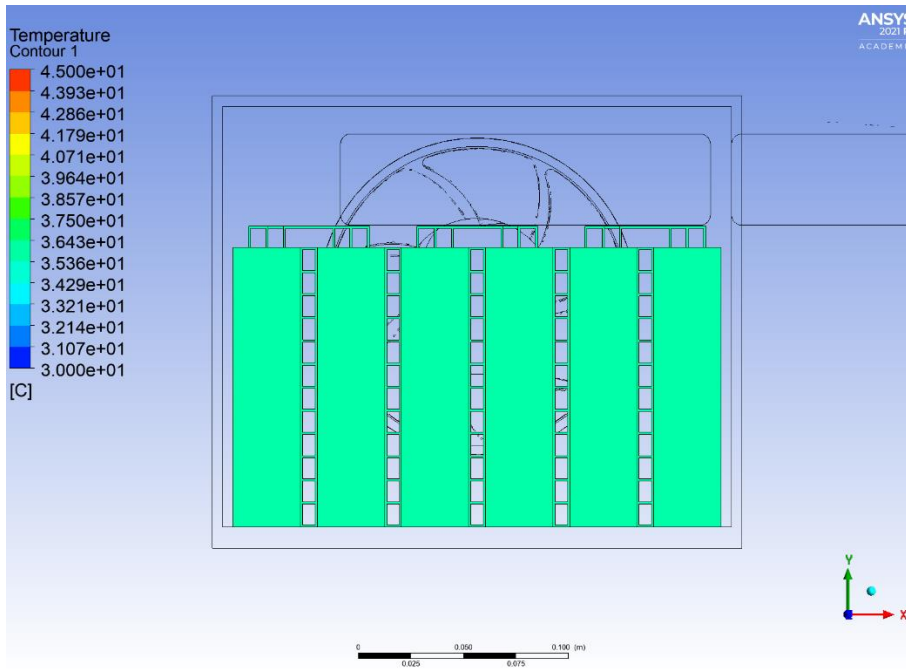
Εικόνα 199: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 3



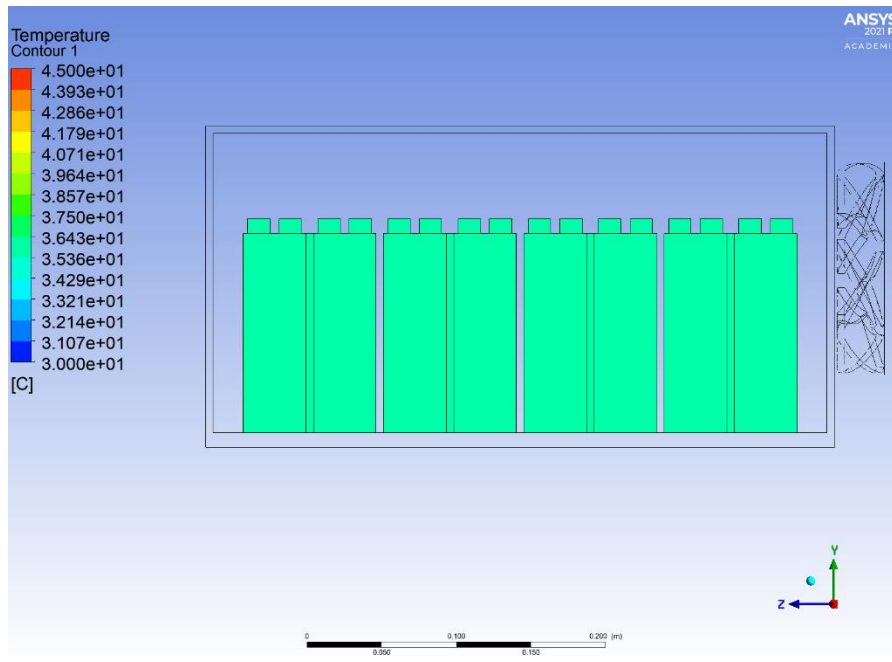
Εικόνα 200: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 4



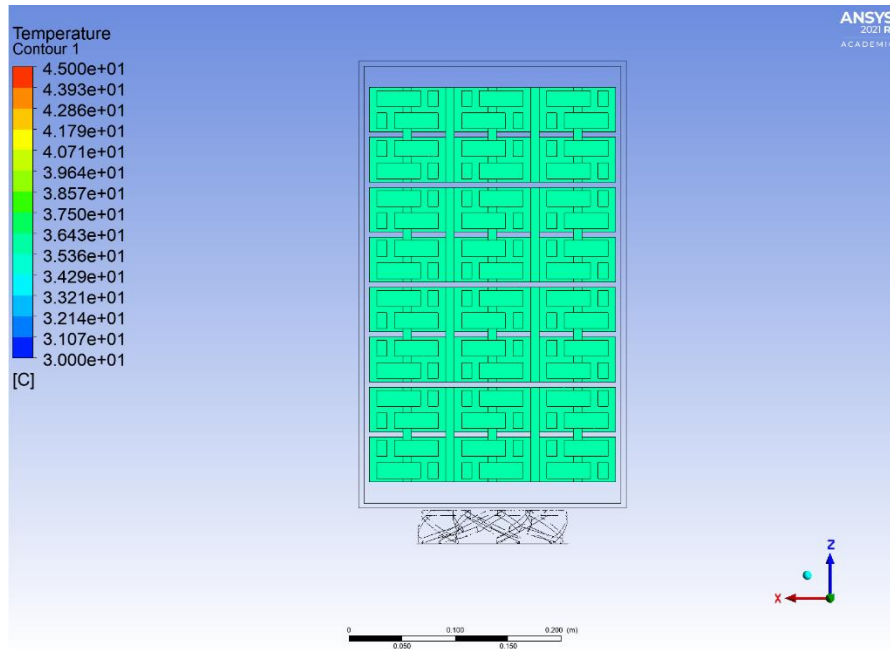
Εικόνα 201: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 1



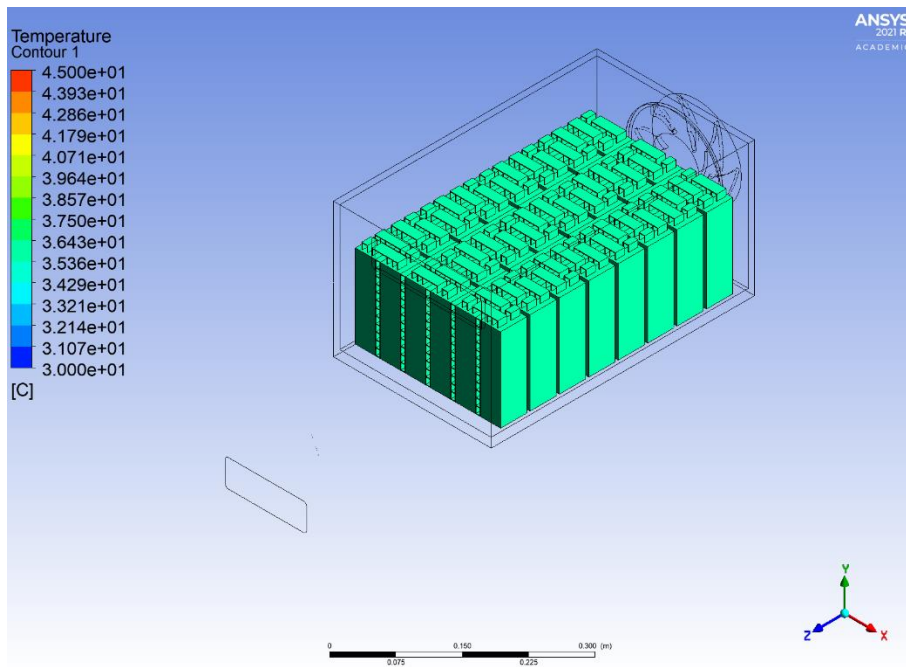
Εικόνα 202: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 2



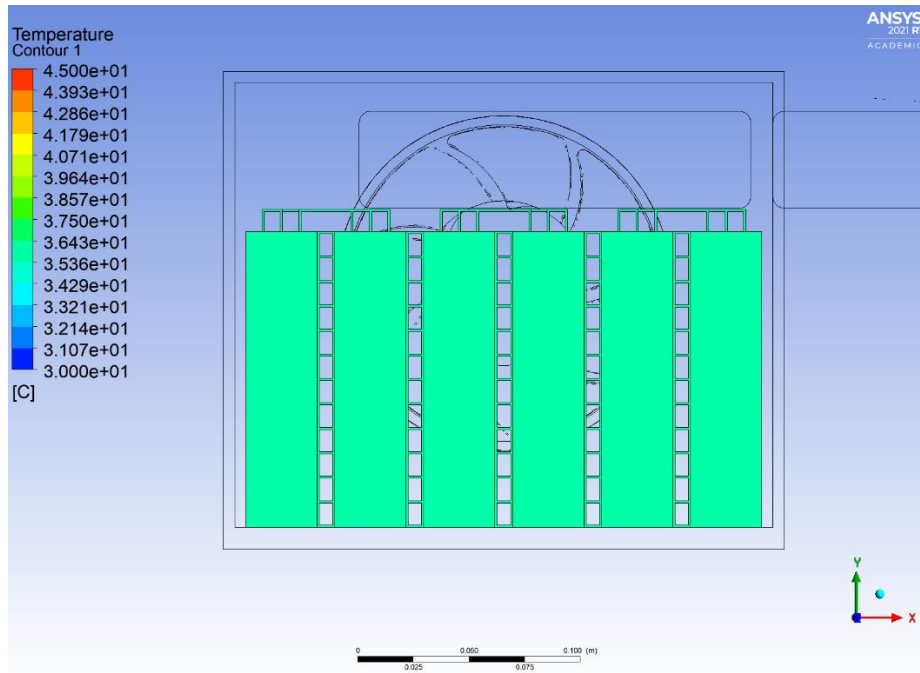
Εικόνα 203: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 3



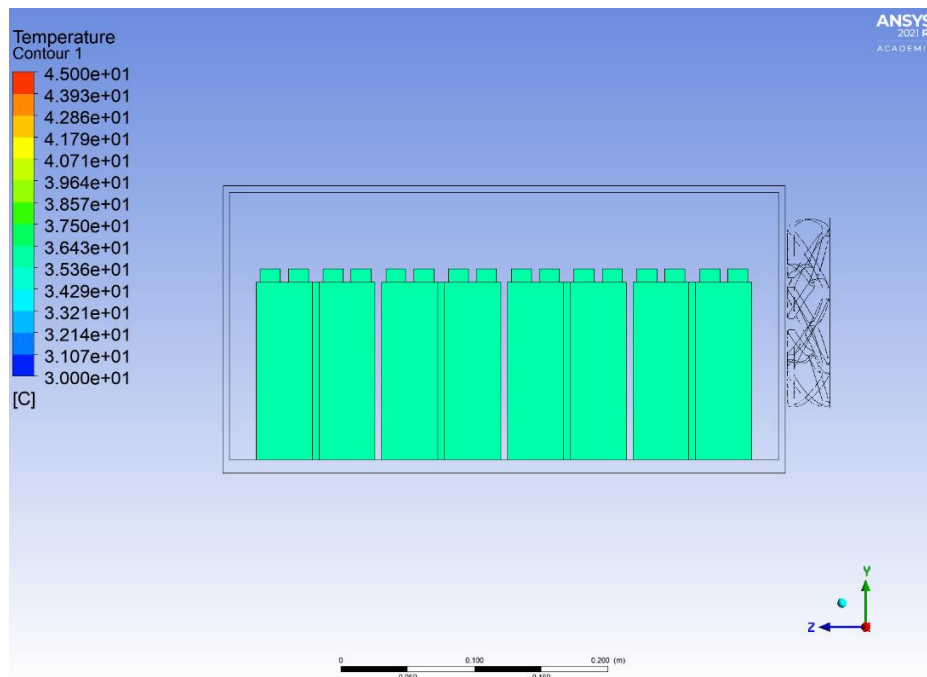
Εικόνα 204: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 4



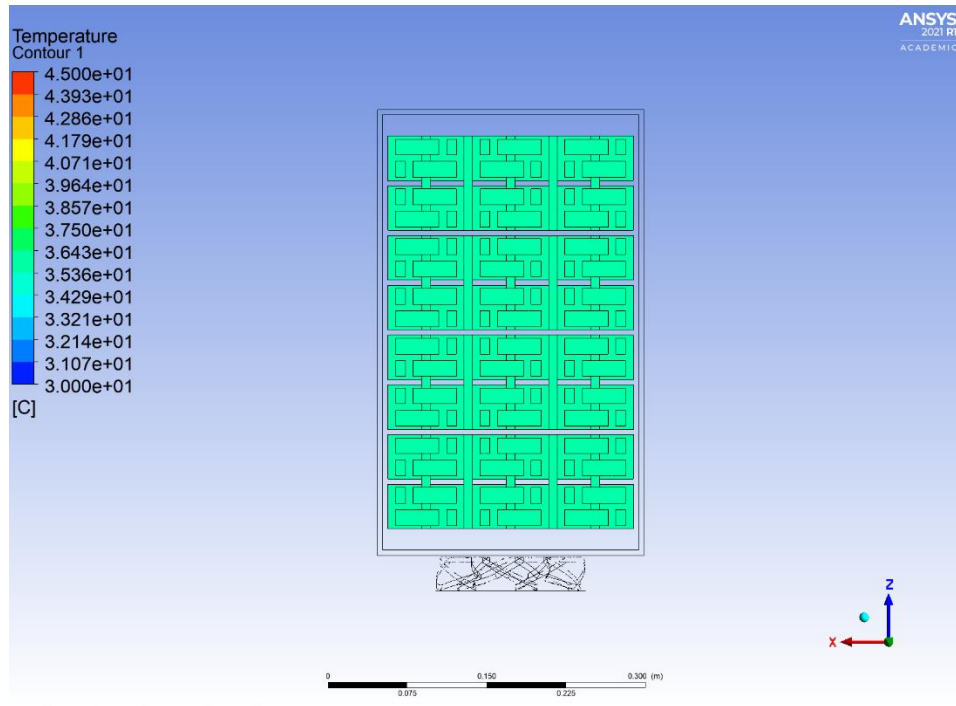
Εικόνα 205: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 1



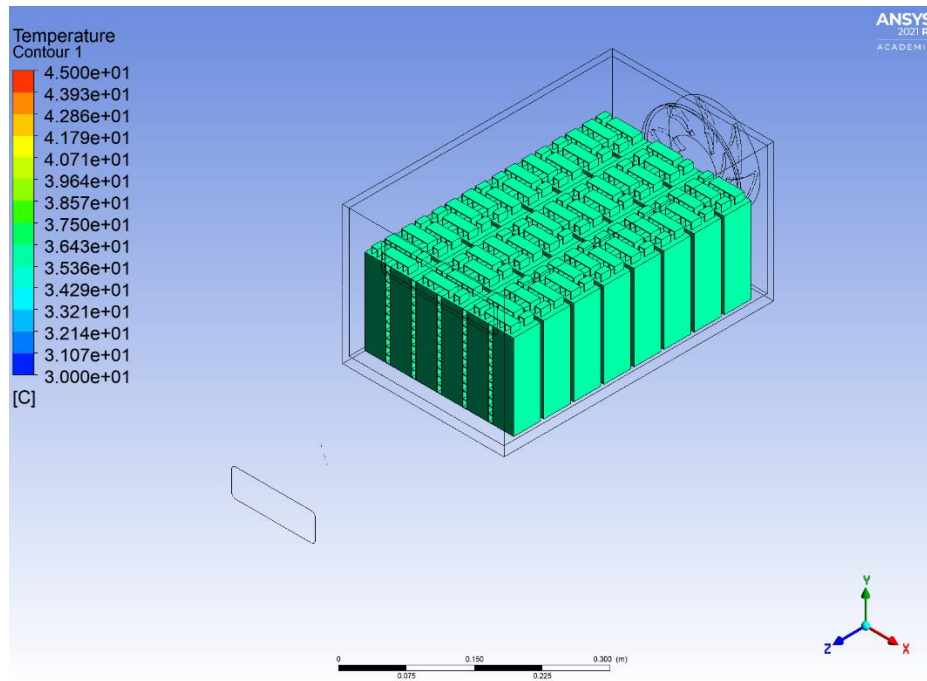
Εικόνα 206: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 2



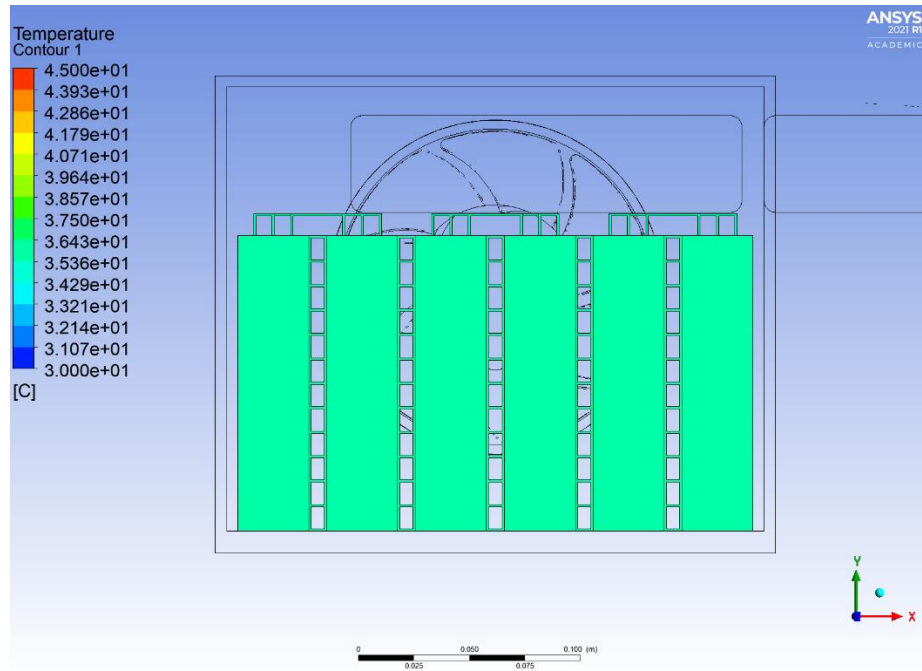
Εικόνα 207: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 3



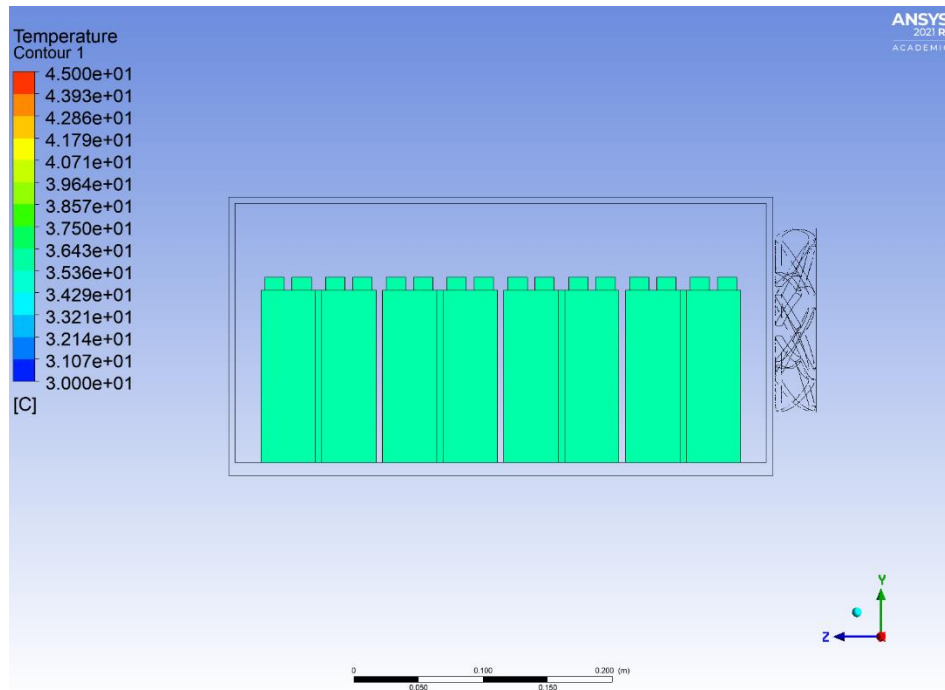
Εικόνα 208: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 4



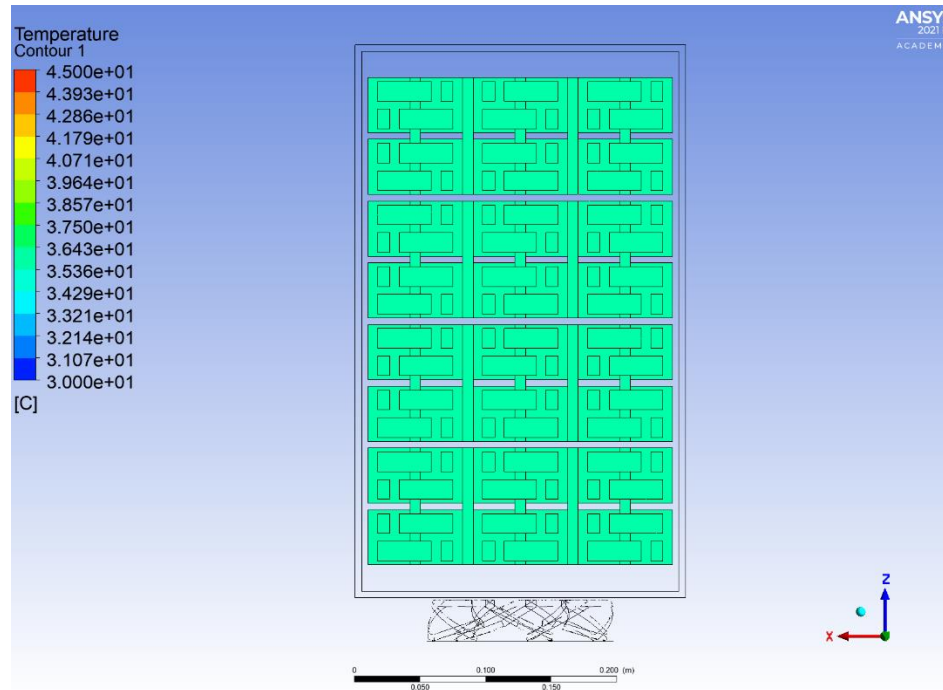
Εικόνα 209: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 1



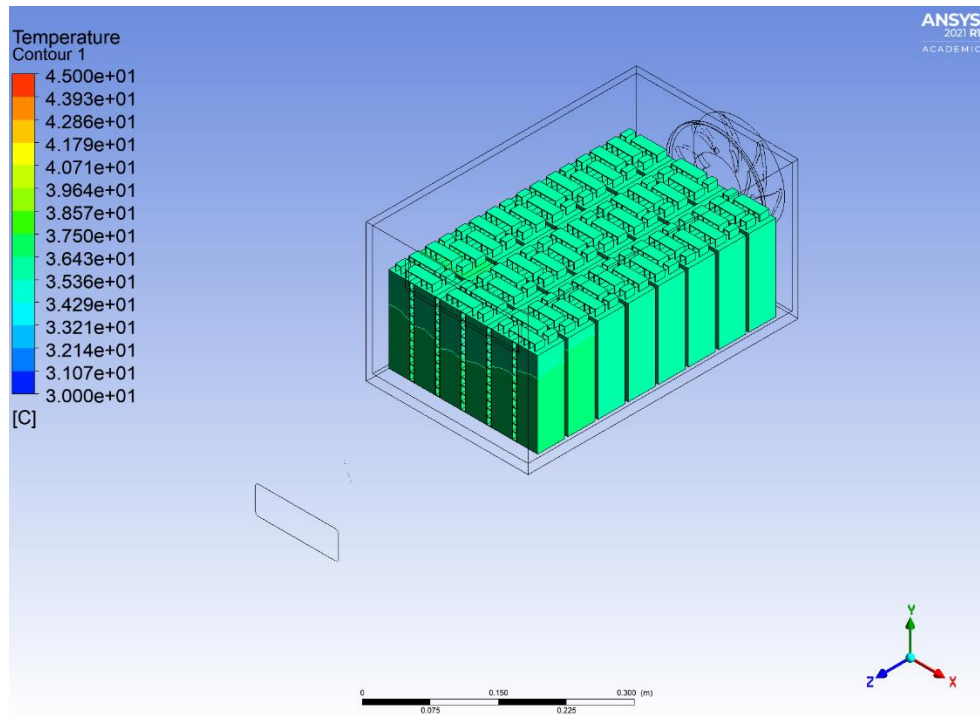
Εικόνα 210: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 2



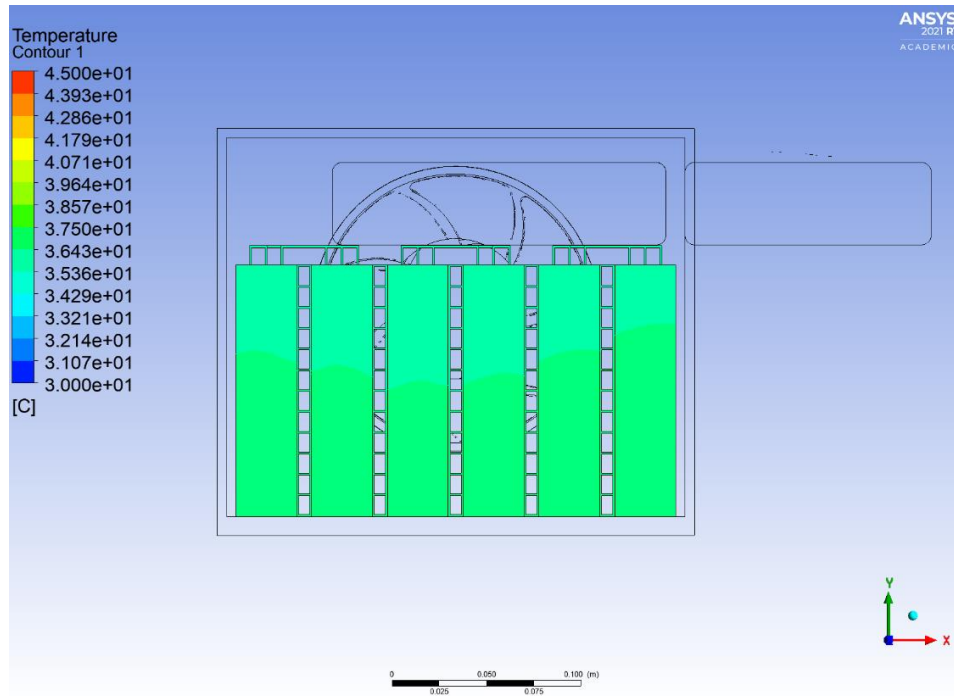
Εικόνα 211: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 3



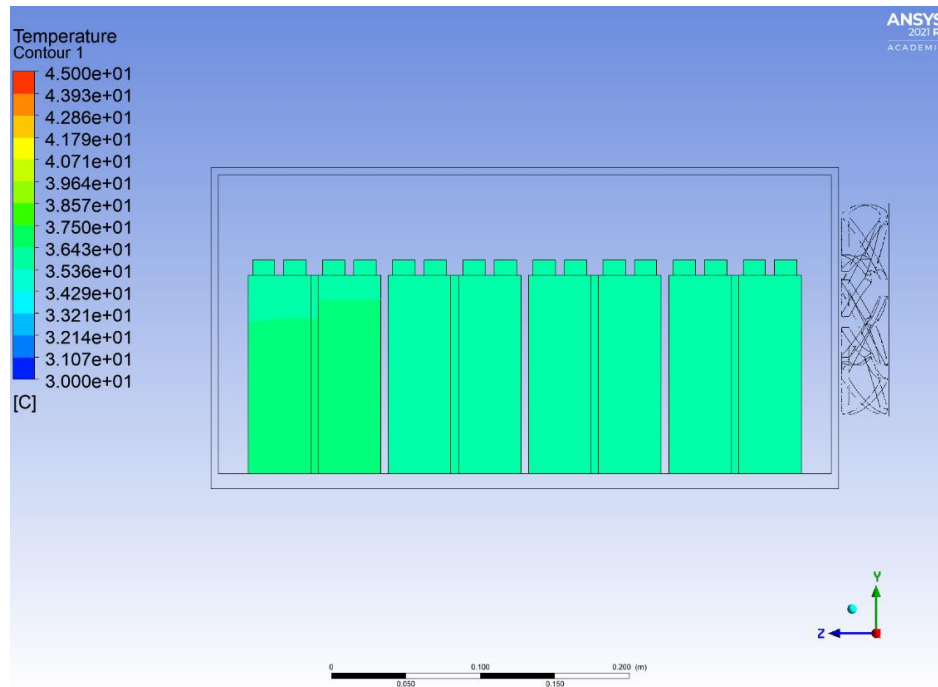
Εικόνα 212: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 4



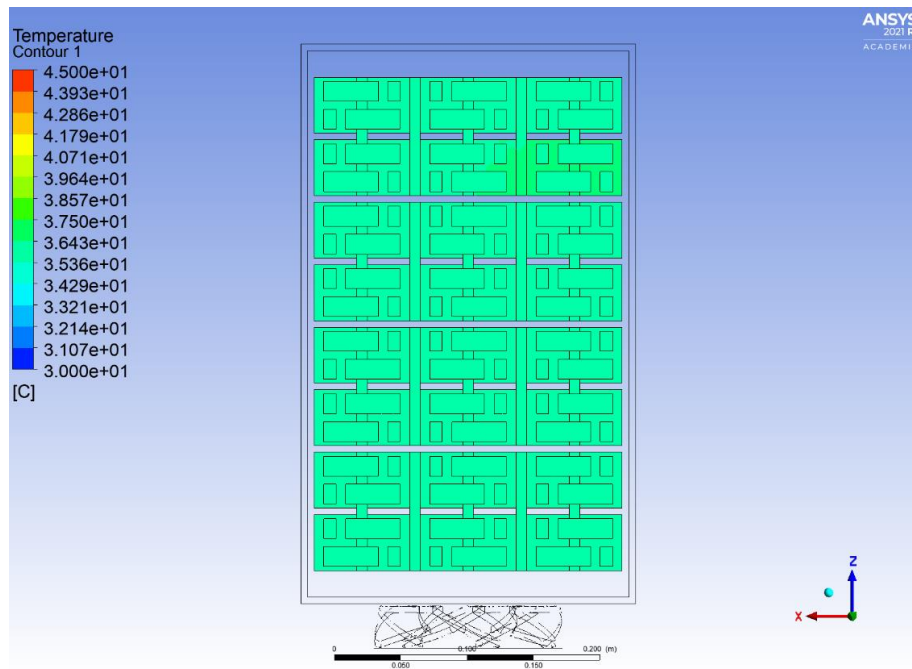
Εικόνα 213: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 1



Εικόνα 214: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 2

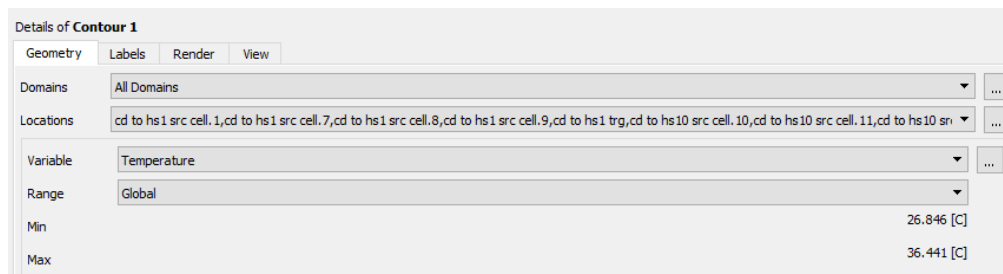


Εικόνα 215: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 3



Εικόνα 216: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 4

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παρατηρούνται πολύ μικρές διαφορές θερμοκρασιών σε όλους τους άξονες, γεγονός που υποδηλώνει πως για να επιτευχθούν οι τιμές της steady state προσομοίωσης χρειάζεται αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα λειτουργίας. Αξίζει να σημειωθεί πως παρατηρείται μια γρηγορότερη άνοδος της θερμοκρασίας κοντά στον αγωγό εισόδου προς την βάση του χώρου υψηλής τάσης, φαινόμενο που δικαιολογείται από την τοποθέτηση του αγωγού εισόδου στο επάνω μέρος του κουτιού και από την γεωμετρία του. Συνολικά, επιβεβαιώνονται οι θερμοκρασίες που υπολογίσαμε με την εντολή Volume Rendering. Η μελέτη των θερμοκρασιών καταλήγει με την ανεύρεση της μέγιστης θερμοκρασίας που επιτυγχάνεται εσωτερικά του χώρου χαμηλής τάσης.

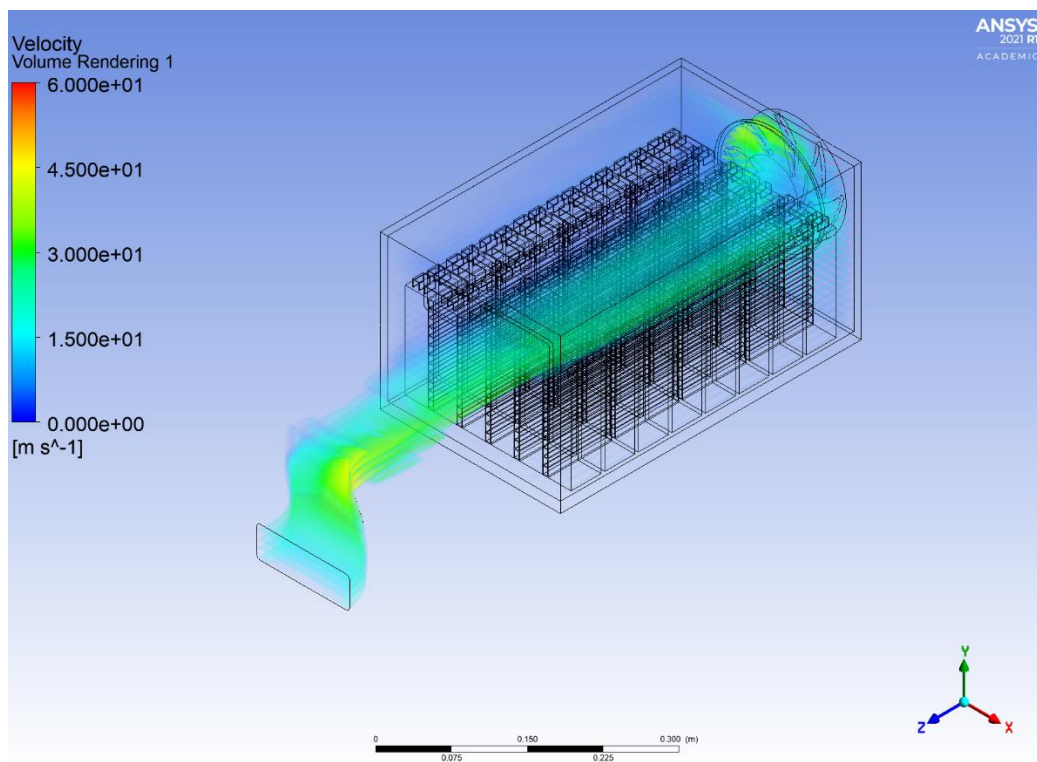


Εικόνα 217: Μέγιστη θερμοκρασία HV χώρου (Transient)

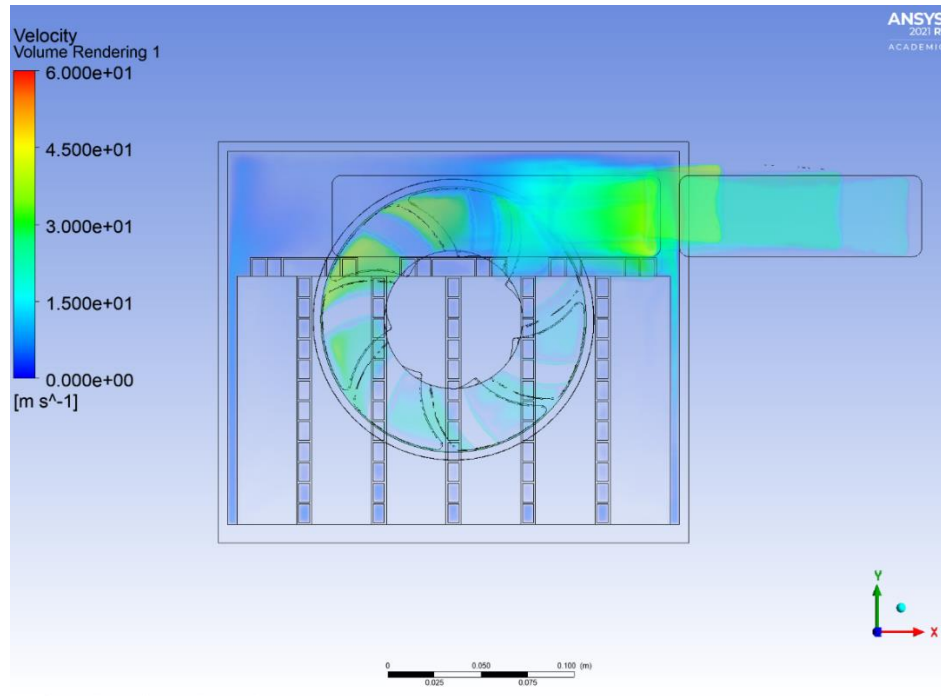
Η χρήση ποσοτικών πέρα από ποιοτικών (οπτικών) μέσων κατά την φάση της μετεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητη. Όπως παρουσιάζεται και από την Εικόνα 217, στην συγκεκριμένη περίπτωση η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε είναι 37°C ίση με την μέγιστη ορατή. Πράγματι, εσωτερικά του όγκου των κελιών μπαταριών προκύπτει η μέγιστη θερμοκρασία των 37°C, η οποία βέβαια βρίσκεται εντός των προδιαγραφών του κατασκευαστή και σαφώς μικρότερη της steady state προσομοίωσης.

9.4.2 Ταχύτητα

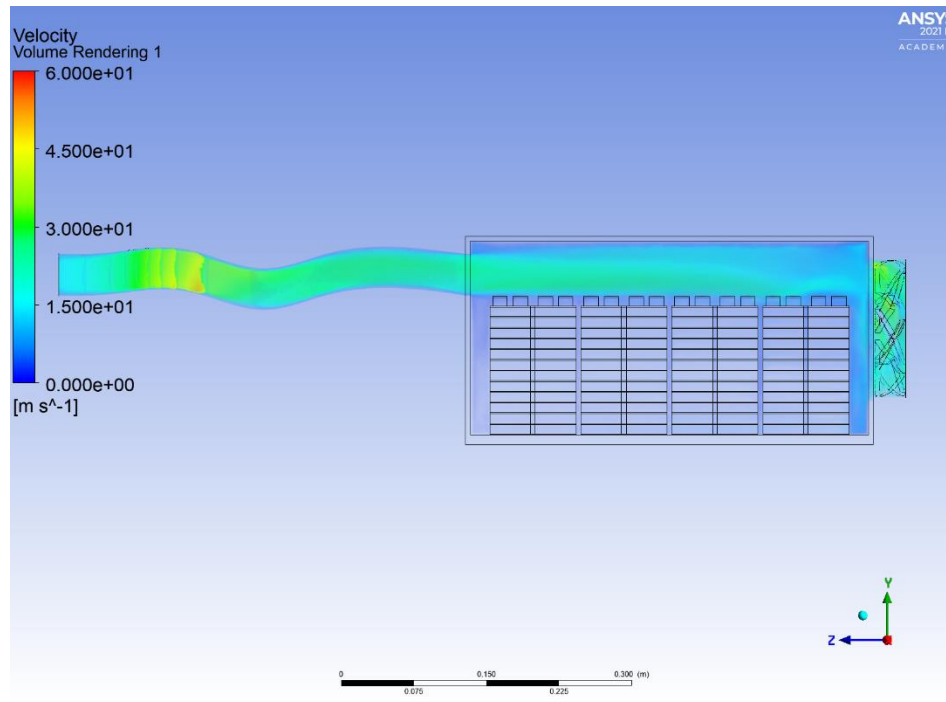
Σε αντιστοιχία με το πρώτο στάδιο παρατηρήθηκε η κατανομή της ταχύτητας του ψυκτικού μέσου εσωτερικά του χώρου υψηλής τάσης. Συγκεκριμένα, με την χρήση της εντολής Volume Rendering απεικονίστηκε το πεδίο ταχύτητας. Στην περίπτωση της transient προσομοίωσης δεν έχει νόημα να απεικονίσουμε το πεδίο αυτό για κάθε λεπτό καθώς δεν έχουμε ανεμιστήρα μεταβλητών στροφών και ο αγωγός εισόδου είναι σταθερής παροχής, συνεπώς παραμένει ίδιο.



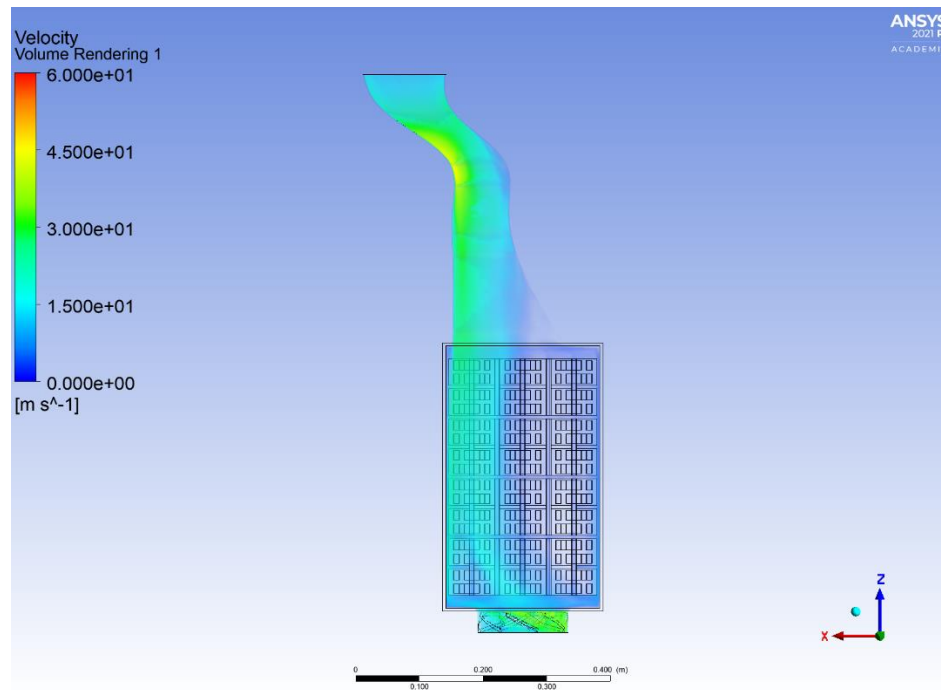
Εικόνα 218: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Transient) - 1



Εικόνα 219: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Transient) - 2



Εικόνα 220: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Transient) - 3



Εικόνα 221: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Transient) - 4

Για την ορθή κατανόηση των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην κλίμακα των ταχυτήτων. Παρατηρούνται αρκετά υψηλές ταχύτητες σε όλο τον HV χώρο, αλλά κυρίως εσωτερικά του αγωγού εισόδου, στο πάνω μέρος του κουτιού και κοντά στον ανεμιστήρα όπως και αναμένεται. Το γεγονός αυτό συνάδει με τους σχεδιαστικούς στόχους καθώς προκύπτει μεγαλύτερη παροχή ψυκτικού μέσου. Κατά τον άξονα x παρουσιάζεται μεγάλη διαφορά ταχυτήτων γεγονός που οφείλεται στην γεωμετρία του αγωγού εισόδου. Ταυτόχρονα, εξαιρετικής σημασίας είναι η ταχύτητα που επιτυγχάνει το ψυκτικό μέσο το οποίο διέρχεται εσωτερικά των καναλιών των εναλλακτών θερμότητας. Παρόλο που φαίνεται μικρή έως μηδενική λόγω της κλίμακας και των κελιών μπαταριών που εμποδίζουν την ορατότητα, στην πραγματικότητα είναι υπαρκτή και της τάξης των 2-3 m/s. Κατά τον άξονα y παρουσιάζεται αύξηση των ταχυτήτων όσο πλησιάζουμε στο πάνω τοίχωμα του κουτιού και κατά τον άξονα z έχουμε μια επιβράδυνση της ταχύτητας από τον αγωγό εισόδου έως την ταχύτητα εξόδου του ανεμιστήρα.

Η εποπτεία των ταχυτήτων του ψυκτικού μέσου είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση της απαραίτητης παροχής εντός του χώρου χαμηλής τάσης και για την αποφυγή επικίνδυνων φαινομένων που μπορεί να παρουσιάσει η ροή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται είναι αρκετά υψηλές και ικανοποιητικές για τους σχεδιαστικούς μας στόχους.

10. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, ο σχεδιασμός και η θερμική ανάλυση του συστήματος ψύξης του συσσωρευτή ενέργειας ενός αγωνιστικού μονοθεσίου τύπου Formula Student εξετάστηκαν σχολαστικά και διεξοδικά καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Ο πρωταρχικός στόχος ήταν η ανάπτυξη ενός αποδοτικού και αξιόπιστου ψυκτικού συστήματος που διαχειρίζεται αποτελεσματικά τα θερμικά φορτία που δημιουργούνται από το δοχείο των συσσωρευτών, ενώ παράλληλα διασφαλίζει τα πρότυπα ασφαλείας και απόδοσης που απαιτούνται σε αγωνιστικά περιβάλλοντα όπως αυτό ενός διαγωνισμού Formula Student.

Μέσω της αρχικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης, διερευνήθηκαν διεξοδικά θεμελιώδεις έννοιες σχετικά με το σύστημα του συσσωρευτή ενέργειας, την θερμική διαχείριση και τις αρχές σχεδιασμού ενός ψυκτικού συστήματος. Η θεωρητική αυτή κατανόηση λειτούργησε ως ακρογωνιαίος λίθος για τις επόμενες φάσεις της έρευνας.

Η διαδικασία σχεδιασμού περιλάμβανε μια συστηματική προσέγγιση που ενσωμάτωνε τις θεωρητικές αρχές με πρακτικές εκτιμήσεις. Σε πρώτο στάδιο, έχοντας εξάγει τις προδιαγραφές της ψύξης και επιλέγοντας τον τύπο της, υπολογίστηκαν σε θεωρητικό επίπεδο οι ανάγκες θερμικής διαχείρισης του εξεταζόμενου συστήματος, όπως και η αναμενόμενη απόδοση του συστήματος της ψύξης και η μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία.

Εν συνεχεία τόσο ο συσσωρευτής ενέργειας όσο και το σύστημα ψύξης σχεδιάστηκαν στο λογισμικό SolidWorks και έπειτα εισήχθησαν στο λογισμικό ANSYS, όπου και έγινε η προσομοίωσή τους. Συγκεκριμένα, υποβλήθηκαν σε μετεπεξεργασία στο λογισμικό Design Modeler του ANSYS ενώ η φάση της πλεγματοποίησης πραγματοποιήθηκε στο ANSYS Meshing. Εξίσου σημαντική ήταν η ρύθμιση της επίλυσης της προσομοίωσης, για την εξαγωγή ουσιαστικών αποτελεσμάτων με όσο το δυνατόν μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Πρόκειται, για μια πολύπλοκη διαδικασία, καθώς αποτελεί ένα συνδυαστικό πρόβλημα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής και θερμικής ανάλυσης, το οποίο πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού ANSYS Fluent. Η προσομοίωση έγινε σε δύο φάσεις. Αρχικά έγινε μια steady state προσομοίωση κατά την οποία τέθηκε μέγιστη απαγωγή θερμότητας από τα θερμικά κρίσιμα εξαρτήματα κατά την οποία το σύστημα ελέγχθηκε για την λειτουργία του εντός προδιαγραφών. Η δεύτερη φάση περιλάμβανε μια transient προσομοίωση, κατά την οποία το σύστημα τέθηκε πάλι σε μέγιστη απαγωγή θερμότητας για διάρκεια 5 λεπτών, χρόνος ο οποίος σύμφωνα με δεδομένα της τηλεμετρίας από την προηγούμενη συμμετοχή της ομάδας PROM Racing NTUA FSAE Team σε παρόμοιους διαγωνισμούς, υπερκαλύπτει τον χρόνο λειτουργίας σε ακραίες θερμικά συνθήκες.

Την ολοκλήρωση των επιλύσεων των προσομοιώσεων αυτών ακολούθησε η οπτικοποίηση και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Παρατηρήθηκαν μεγέθη όπως η κατανομή των θερμοκρασιών εντός του συσσωρευτή ενέργειας, η μέγιστη θερμοκρασία που επιτυγχάνεται, η ταχύτητα του ψυκτικού μέσου και η ροή δια μέσω του συσσωρευτή.

Συνολικά, σχεδιάστηκε και αναλύθηκε θερμικά το σύστημα ψύξης του συσσωρευτή ενέργειας ενός μονοθεσίου αυτοκινήτου τύπου Formula SAE, το οποίο πληροί τις προϋποθέσεις και προδιαγραφές που τέθηκαν. Μελλοντικά, το σύστημα αυτό μπορεί μετά από πειραματική επαλήθευσή του να κατασκευαστεί και να ενσωματωθεί στο μονοθέσιο της ομάδας PROM Racing NTUA FSAE Team. Επιπλέον, οι γνώσεις που αποκτήθηκαν από την παρούσα έρευνα θα αποτελέσουν πολύτιμο θεμέλιο για μελλοντικές προσπάθειες που αποσκοπούν στην εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Η συνεχιζόμενη καινοτομία και η συνεργασία στο πλαίσιο της κοινότητας του θεσμού Formula Student θα συμβάλει αναμφίβολα στην εξέλιξη βιώσιμων και υψηλών επιδόσεων αγωνιστικών περιβαλλόντων, οδηγώντας την αυτοκινητοβιομηχανία προς ένα πιο πράσινο και ηλεκτρικό μέλλον.

11. Βιβλιογραφία – Κατάλογος Αναφορών

BANK William, & Hartley James. (n.d.). Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική (Σταθάρης Ιωάννης, Ed.). Εκδόσεις Ίων.

Kreith Frank, & Manglik Raj. (n.d.). Μεταφορά Θερμότητας Βασικές Αρχές και Εφαρμογές (Κουμπογιάννης Δημήτριος, Ed.; 8th ed.). Εκδόσεις Τζιόλα.

Matsson John. (2022). An Introduction to ANSYS Fluent 2022. SDC Publications.

ANSYS. (2017). ANSYS Fluent Tutorial Guide. ANSYS.

ANSYS. (2010). ANSYS Meshing User's Guide. ANSYS.

Tu Jiyuan, Yeoh Guan Heng, & Liu Chaoqin. (2018). Computation Fluid Dynamics (3rd ed.).

Steinberg Dave. (1992). Cooling Techniques for Electronic Equipment (2nd ed.). Wiley.

Ujjwal Ashish, Bishav Raj, & Abhishek Kumar. (2016). DESIGN AND FABRICATION OF AN ACCUMULATOR CONTAINER/ BATTERY PACK FOR A FORMULA STUDENT VEHICLE.

Lee Huei-Huang. (2023). Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 2023. SDC Publications.

Moran Michael, Shapiro Howard, Boettner Daisie, & Bailey Margaret. (2018). Fundamentals of Engineering Thermodynamics (9th ed.). Wiley.

Wilcox David. (1993). Turbulence Modeling for CFD (3rd ed.).

<https://blog.thermoanalytics.com/blog/3-strategies-for-battery-packaging-cooling-and-system-integration-for-electric-vehicles>

<https://products.sanyodenki.com/en/sanace/dc/dc-fan/9GV1212P1J01/>

<https://products.sanyodenki.com/en/sanace/dc/dc-fan/9GV1512H501/>

<https://promracingteam.com/el/>

https://publish.sanyodenki.com/San_Ace_E/book/#target/page_no=170

https://publish.sanyodenki.com/San_Ace_E/book/#target/page_no=188

<https://www.dober.com/electric-vehicle-cooling-systems>

<https://www.formulastudent.de/about/concept/>

<https://www.formulastudent.de/about/disciplines/>

<https://www.formulastudent.de/about/motivation/>

[https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/important_docs/FSG24
Competition Handbook v1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/important_docs/FSG24_Compensation_Handbook_v1.0.pdf)

[https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-
Rules 2024 v1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf)

<https://www.melasta.com/cells/lithium-polymer-li-po-batteries-cells-.html>

<https://www.melasta.com/web/userfiles/download/LiPO-Cell-6550mAh15C.pdf>

https://www.vicorpower.com/documents/datasheets/DCM3414x50M13C2yzz_ds.pdf

https://en.wikipedia.org/wiki/Formula_SAE

<https://promracingteam.com/el/>

12. Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διάγραμμα επισκόπησης μέσης θερμοκρασίας LV χώρου (Steady State) .	150
Διάγραμμα 2: Διάγραμμα υπολειμματικών LV χώρου (Steady State)	151
Διάγραμμα 3: Διάγραμμα επισκόπησης μέσης θερμοκρασίας LV χώρου (Transient)	159
Διάγραμμα 4: Διάγραμμα υπολειμματικών LV χώρου (Transient)	159
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα επισκόπησης μέσης θερμοκρασίας HV χώρου (Steady State) .	177
Διάγραμμα 6: Διάγραμμα υπολειμματικών LV χώρου (Steady State)	178
Διάγραμμα 7: Διάγραμμα επισκόπησης μέσης θερμοκρασίας HV χώρου (Transient).....	187
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα υπολειμματικών HV χώρου (Transient)	188

13. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Το αγωνιστικό μονοθέσιο P22 της ομάδας PROM Racing.....	16
Εικόνα 2: Φωτογραφία από τον διαγωνισμό Formula Student Germany	18
Εικόνα 3: Λογότυπο του λογισμικού SolidWorks	21
Εικόνα 4: Λογότυπο του λογισμικού ANSYS	22
Εικόνα 5: Συσσωρευτής ενέργειας της ομάδας PROM Racing για το μονοθέσιο P22	24
Εικόνα 6: Κελί Melasta SLPBB042126	25
Εικόνα 7: Σύνδεση γλωττίδων κελιών μπαταριών και ράβδου διακλάδωσης.....	26
Εικόνα 8: Πλαϊνή όψη μιας συστάδας (segment) κελιών μπαταριών.....	27
Εικόνα 9: Μετατροπέας ρεύματος DC-DC VICOR DCM3414x50M13C2yzz.....	28
Εικόνα 10: Πλακέτα AMS	29
Εικόνα 11: Πλακέτα συσσωρευτή	29
Εικόνα 12: Πλακέτα IMD	30
Εικόνα 13: Αισθητήρας ρεύματος.....	31
Εικόνα 14: Αντίσταση μόνωσης συσσωρευτή	32
Εικόνα 15: Οι 8 συστάδες του συσσωρευτή ενέργειας.....	93
Εικόνα 16: Συστάδα κελιών μπαταριών.....	94
Εικόνα 17: Κελί μπαταρίας.....	94
Εικόνα 18: Εναλλάκτης θερμότητας και η γεωμετρία των πτερυγίων του	95
Εικόνα 19: Διαμόρφωση κελιών μπαταριών και εναλλακτών θερμότητας εντός μιας συστάδας.....	95
Εικόνα 20: Γλωττίδες ένωσης των κελιών μπαταριών.....	96
Εικόνα 21: Πλάγια όψη των sketches των γλωττίδων	96
Εικόνα 22: Πλακέτες σύνδεσης γλωττίδων.....	97
Εικόνα 23: Ράβδοι Διακλάδωσης.....	97
Εικόνα 24: Πλακέτα AMS	97
Εικόνα 25: Σύνδεση με υπόλοιπες συστάδες	98
Εικόνα 26: Ηλεκτρονικά εξαρτήματα συστάδας.....	98
Εικόνα 27: Τελικό συναρμολόγημα συστάδας	99
Εικόνα 28: Εξαρτήματα χαμηλής τάσης.....	100
Εικόνα 29: Πλακέτα συσσωρευτή	100
Εικόνα 30: Πλακέτα IMD	101
Εικόνα 31: Μετατροπέας ρεύματος DC-DC	101
Εικόνα 32: Εναλλάκτης θερμότητας του χώρου χαμηλής τάσης.....	101
Εικόνα 33: Αισθητήρας ρεύματος.....	102
Εικόνα 34: Θετική και αρνητική αντίσταση μόνωσης συσσωρευτή.....	102
Εικόνα 35: Φύσα χαμηλής τάσης.....	103
Εικόνα 36: Deutsch connector	103
Εικόνα 37: Ράβδοι διακλάδωσης.....	104
Εικόνα 38: Κάτοψη χώρου υψηλής τάσης.....	105

Εικόνα 39: Πλαίσιο χώρου χαμηλής τάσης.....	105
Εικόνα 40: Πλαίσιο χώρου υψηλής τάσης.....	105
Εικόνα 41: Εσωτερική διαμόρφωση τοιχωμάτων του χώρου υψηλής τάσης.....	106
Εικόνα 42: Πλάγια όψη από τα αριστερά του πλαισίου του συσσωρευτή ενέργειας.....	106
Εικόνα 43: Πλάγια όψη από τα δεξιά του πλαισίου του συσσωρευτή ενέργειας.....	106
Εικόνα 44: Πίσω όψη του πλαισίου του συσσωρευτή ενέργειας.....	107
Εικόνα 45: Πλάγια όψη από τα δεξιά των ανοιγμάτων πίεσης.....	107
Εικόνα 46: Πλαίσιο του συσσωρευτή ενέργειας.....	107
Εικόνα 47: Αγωγοί εισόδου με τα βοηθητικά Planes.....	108
Εικόνα 48: Κάτοψη αγωγών εισόδου.....	109
Εικόνα 49: Αγωγοί εισόδου.....	109
Εικόνα 50: Ανεμιστήρας χώρου υψηλής τάσης.....	110
Εικόνα 51: Ανεμιστήρας χώρου χαμηλής τάσης.....	110
Εικόνα 52: Τοποθέτηση εξαρτημάτων χαμηλής τάσης.....	111
Εικόνα 53: Κάτοψη του συναρμολογημένου χώρου υψηλής τάσης.....	112
Εικόνα 54: Ισομετρική όψη εκ των αριστερά του συσσωρευτή ενέργειας.....	112
Εικόνα 55: Ισομετρική όψη εκ των δεξιά του συσσωρευτή ενέργειας.....	113
Εικόνα 56: Πίσω όψη του συσσωρευτή ενέργειας.....	113
Εικόνα 57: Χώρος χαμηλής τάσης στο SolidWorks.....	114
Εικόνα 58: Συμμετρικός χώρος (δεξί τμήμα) υψηλής τάσης στο SolidWorks.....	115
Εικόνα 59: Συμμετρικός χώρος (αριστερό τμήμα) υψηλής τάσης στο SolidWorks.....	115
Εικόνα 60: Απλοποιημένος χώρος χαμηλής τάσης στο SolidWorks.....	116
Εικόνα 61: Απλοποιημένος συμμετρικός χώρος (δεξί τμήμα) υψηλής τάσης στο SolidWorks.....	117
Εικόνα 62: Απλοποιημένος συμμετρικός χώρος (αριστερό τμήμα) υψηλής τάσης στο SolidWorks.....	117
Εικόνα 63: Χώρος χαμηλής τάσης στο Design Modeler.....	118
Εικόνα 64: Συμμετρικός χώρος υψηλής τάσης στο Design Modeler.....	118
Εικόνα 65: Μετονομασία στερεών σωμάτων χώρου χαμηλής τάσης.....	119
Εικόνα 66: Μετονομασία στερεών σωμάτων και ομαδοποίησή τους στον χώρο υψηλής τάσης.....	119
Εικόνα 67: Δημιουργία rotating regions στον χώρο χαμηλής τάσης.....	120
Εικόνα 68: Δημιουργία rotating region στο χώρο υψηλής τάσης.....	120
Εικόνα 69: Δημιουργία υπολογιστικού χωρίου στον χώρο χαμηλής τάσης.....	121
Εικόνα 70: Δημιουργία υπολογιστικού χωρίου στον χώρο υψηλής τάσης.....	121
Εικόνα 71: Δημιουργία Named Selections στον χώρο χαμηλής τάσης.....	122
Εικόνα 72: Δημιουργία Named Selections στον χώρο υψηλής τάσης.....	122
Εικόνα 73: Χρήση της εντολής Shared Topology στον χώρο υψηλής τάσης.....	123
Εικόνα 74: Έλεγχος των Contacts στην καρτέλα Connections.....	124
Εικόνα 75: Μετονομασία των Contacts.....	124
Εικόνα 76: Ρυθμίσεις Mesh.....	125

Εικόνα 77: Πλέγμα rotating region	125
Εικόνα 78: Πλέγμα rotating region (2)	126
Εικόνα 79: Πλέγμα μετατροπέα DC-DC.....	126
Εικόνα 80: Πλέγμα εναλλάκτη θερμότητας	127
Εικόνα 81: Πλέγμα πλαισίου χαμηλής τάσης	127
Εικόνα 82: Πλέγμα υπολογιστικού χωρίου	128
Εικόνα 83: Πλέγμα υπολογιστικού χωρίου κοντά την περιοχή του μετατροπέα DC-DC και του εναλλάκτη θερμότητας.....	128
Εικόνα 84: Πλέγμα συνολικού συναρμολογήματος χώρου χαμηλής τάσης	129
Εικόνα 85: Παράγοντας ποιότητας πλέγματος skewness	129
Εικόνα 86: Παράγοντας ποιότητας πλέγματος orthogonal quality	130
Εικόνα 87: Έλεγχος των Contacts στην καρτέλα Connections	130
Εικόνα 88: Μετονομασία των Contacts	131
Εικόνα 89: Ρυθμίσεις Mesh.....	131
Εικόνα 90: Δημιουργία Wall Named Selection	132
Εικόνα 91: Πλέγμα rotating region	133
Εικόνα 92: Πλέγμα rotating region (2)	133
Εικόνα 93: Πλέγμα κελιών μπαταριών και γλωττίδων σύνδεσης	134
Εικόνα 94: Πλέγμα κελιών μπαταριών και γλωττίδων σύνδεσης (2)	134
Εικόνα 95: Πλέγμα εναλλακτών θερμότητας.....	134
Εικόνα 96: Πλέγμα εναλλακτών θερμότητας (2)	135
Εικόνα 97: Πλέγμα πλαισίου υψηλής τάσης	135
Εικόνα 98: Πλέγμα υπολογιστικού χωρίου.....	136
Εικόνα 99: Πλέγμα υπολογιστικού χωρίου κοντά στην περιοχή των κελιών και των εναλλακτών θερμότητας.....	136
Εικόνα 100: Πλέγμα συνολικού συναρμολογήματος χώρου υψηλής τάσης	137
Εικόνα 101: Παράγοντας ποιότητας πλέγματος skewness	137
Εικόνα 102: Παράγοντας ποιότητας πλέγματος orthogonal quality	138
Εικόνα 103: Γενικές επιλογές και έλεγχος πλέγματος	139
Εικόνα 104: Προσαρμογή μονάδων μέτρησης	140
Εικόνα 105: Ενεργοποίηση εξίσωσης ενέργειας	140
Εικόνα 106: Επιλογή μοντέλου τύρβης.....	141
Εικόνα 107: Ορισμός υλικών.....	141
Εικόνα 108: Cell Zone Conditions.....	142
Εικόνα 109: Ορισμός ταχύτητας περιστροφής των rotating regions	142
Εικόνα 110: Ορισμός απαγωγής θερμότητας μετατροπέα DC-DC.....	143
Εικόνα 111: Οριακή συνθήκη εισόδου	143
Εικόνα 112: Ορισμός περιστρεφόμενων χωρίων	144
Εικόνα 113: Ορισμός δυναμικού πλέγματος	144
Εικόνα 114: Ορισμός coupled walls	144
Εικόνα 115: Ορισμός υπολειμματικών (residuals)	145

Εικόνα 116: Ορισμός μεθόδου επίλυσης.....	145
Εικόνα 117: Υβριδική αρχικοποίηση της επίλυσης.....	146
Εικόνα 118: Δημιουργία διαγράμματος επισκόπησης	146
Εικόνα 119: Ορισμός επαναλήψεων επίλυσης.....	147
Εικόνα 120: Ορισμός transient προσομοίωσης.....	148
Εικόνα 121: Επιλογή Mesh Motion	148
Εικόνα 122: Εξαγωγή δεδομένων	148
Εικόνα 123: Ορισμός επαναλήψεων επίλυσης.....	149
Εικόνα 124: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 1	152
Εικόνα 125: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 2	152
Εικόνα 126: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 3	153
Εικόνα 127: Temperature Contour LV χώρου (Steady State) - 1	154
Εικόνα 128: Temperature Contour LV χώρου (Steady State) - 2	154
Εικόνα 129: Temperature Contour LV χώρου (Steady State) - 3	155
Εικόνα 130: Μέγιστη θερμοκρασία LV χώρου (Steady State)	156
Εικόνα 131: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 1.....	156
Εικόνα 132: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 2.....	157
Εικόνα 133: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Steady State) - 3.....	157
Εικόνα 134: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 1.....	160
Εικόνα 135: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 2.....	161
Εικόνα 136: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 1.....	161
Εικόνα 137: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 2.....	162
Εικόνα 138: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 1.....	162
Εικόνα 139: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 2.....	163
Εικόνα 140: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 1.....	163
Εικόνα 141: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 2.....	164
Εικόνα 142: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 1.....	164
Εικόνα 143: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 2.....	165
Εικόνα 144: Temperature Volume Rendering LV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 3.....	165
Εικόνα 145: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 1...	166

Εικόνα 146: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 2...	167
Εικόνα 147: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 3...	167
Εικόνα 148: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 1...	168
Εικόνα 149: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 2...	168
Εικόνα 150: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 3...	169
Εικόνα 151: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 1...	169
Εικόνα 152: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 2...	170
Εικόνα 153: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 3...	170
Εικόνα 154: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 1...	171
Εικόνα 155: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 2...	171
Εικόνα 156: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 3...	172
Εικόνα 157: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 1...	172
Εικόνα 158: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 2...	173
Εικόνα 159: Temperature Contour LV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 3...	173
Εικόνα 160: Μέγιστη θερμοκρασία LV χώρου (Transient)	174
Εικόνα 161: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Transient) - 1.....	175
Εικόνα 162: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Transient) - 2.....	175
Εικόνα 163: Velocity Volume Rendering LV χώρου (Transient) - 3.....	176
Εικόνα 164: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 1	179
Εικόνα 165: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 2	179
Εικόνα 166: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 3	180
Εικόνα 167: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 4	180
Εικόνα 168: Temperature Contour HV χώρου (Steady State) - 1	181
Εικόνα 169: Temperature Contour HV χώρου (Steady State) - 2	182
Εικόνα 170: Temperature Contour HV χώρου (Steady State) - 3	182
Εικόνα 171: Temperature Contour HV χώρου (Steady State) - 4	183
Εικόνα 172: Μέγιστη θερμοκρασία HV χώρου (Steady State)	183
Εικόνα 173: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 1.....	184
Εικόνα 174: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 2.....	185
Εικόνα 175: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 3.....	185
Εικόνα 176: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Steady State) - 4.....	186
Εικόνα 177: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 1.....	189
Εικόνα 178: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 2.....	189
Εικόνα 179: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 3.....	190
Εικόνα 180: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 4.....	190
Εικόνα 181: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 1.....	191

Εικόνα 182: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 2.....	191
Εικόνα 183: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 3.....	192
Εικόνα 184: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 4.....	192
Εικόνα 185: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 1.....	193
Εικόνα 186: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 2.....	193
Εικόνα 187: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 3.....	194
Εικόνα 188: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 4.....	194
Εικόνα 189: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 1.....	195
Εικόνα 190: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 2.....	195
Εικόνα 191: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 3.....	196
Εικόνα 192: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 4.....	196
Εικόνα 193: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 1.....	197
Εικόνα 194: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 2.....	197
Εικόνα 195: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 3.....	198
Εικόνα 196: Temperature Volume Rendering HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 4.....	198
Εικόνα 197: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 1..	199
Εικόνα 198: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 2..	200
Εικόνα 199: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 3..	200
Εικόνα 200: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 1ο λεπτό λειτουργίας - 4..	201
Εικόνα 201: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 1..	201
Εικόνα 202: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 2..	202
Εικόνα 203: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 3..	202
Εικόνα 204: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 2ο λεπτό λειτουργίας - 4..	203
Εικόνα 205: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 1..	203
Εικόνα 206: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 2..	204
Εικόνα 207: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 3..	204

Εικόνα 208: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 3ο λεπτό λειτουργίας - 4..	205
Εικόνα 209: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 1..	205
Εικόνα 210: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 2..	206
Εικόνα 211: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 3..	206
Εικόνα 212: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 4ο λεπτό λειτουργίας - 4..	207
Εικόνα 213: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 1..	207
Εικόνα 214: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 2..	208
Εικόνα 215: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 3..	208
Εικόνα 216: Temperature Contour HV χώρου (Transient) στο 5ο λεπτό λειτουργίας - 4..	209
Εικόνα 217: Μέγιστη θερμοκρασία HV χώρου (Transient)	209
Εικόνα 218: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Transient) - 1	210
Εικόνα 219: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Transient) - 2	211
Εικόνα 220: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Transient) - 3	211
Εικόνα 221: Velocity Volume Rendering HV χώρου (Transient) - 4	212

14. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Συγκεντρωτικός πίνακας εξαρτημάτων συσσωρευτή ενέργειας	33
Πίνακας 2: Συγκεντρωτικός πίνακας προδιαγραφών	37
Πίνακας 3: Απώλειες εισόδου για διαφορετικές διατομές	51
Πίνακας 4: Απώλειες σε διακλαδώσεις	52
Πίνακας 5: Απώλειες διαστολής και συστολής της διατομής	53
Πίνακας 6: Τιμές συντελεστή τριβής f για στρωτή ροή για διαφορετικές διατομές με λεία τοιχώματα	58

15. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Τύποι συστημάτων ψύξης στην ηλεκτροκίνηση.....	12
Σχήμα 2: Ανεμιστήρας αξονικής ροής παρέχει αέρα στο κουτί	40
Σχήμα 3: Ανεμιστήρας αξονικής ροής εξάγει αέρα από το κουτί.....	40
Σχήμα 4: Καλά διαμορφωμένο προφίλ ταχύτητας ανεμιστήρα αξονικής ροής.....	41
Σχήμα 5: Ανεπαρκώς διαμορφωμένο προφίλ ταχύτητας ανεμιστήρα αξονικής ροής	41
Σχήμα 6: Περιορισμός ελεύθερης ανάπτυξης ροής λόγω τοποθεσίας του ανεμιστήρα	42
Σχήμα 7: Σφραγισμένο ηλεκτρονικό κουτί χωρίς παροχή αέρα.....	43
Σχήμα 8: Δυναμικά ύψη πίεσης όταν ο ανεμιστήρας παρέχει ροή στο κουτί	44
Σχήμα 9: Δυναμικά ύψη πίεσης όταν ο ανεμιστήρας εξάγει ροή από το κουτί	44
Σχήμα 10: Τυπική καμπύλη αντίστασης ροής για ηλεκτρονικά κουτιά	46
Σχήμα 11: Τυπική χαρακτηριστική καμπύλη ανεμιστήρα	47
Σχήμα 12: Τομή καμπύλης αντίστασης ροής ηλεκτρονικού κουτιού και χαρακτηριστικής καμπύλης ανεμιστήρα	47
Σχήμα 13: Τυπικός μικρός ελικοφόρος ανεμιστήρας	48
Σχήμα 14: Τυπικός αξονικός ανεμιστήρας αγωγού	49
Σχήμα 15: Αξονικός ανεμιστήρας με πτερύγια ρύθμισης υψηλής ταχύτητας	49
Σχήμα 16: Προτεινόμενη περιοχή λειτουργίας αξονικών ανεμιστήρων	50
Σχήμα 17: Τυπικός φυγοκεντρικός ανεμιστήρας.....	51
Σχήμα 18: Τυπικός Εναλλάκτης Θερμότητας.....	55
Σχήμα 19: Τοποθέτηση φύλλων αλουμινίου στις πλακέτες PCB	55
Σχήμα 20: Ροή θερμότητας από την πλακέτα PCB προς τους εναλλάκτες θερμότητας	56
Σχήμα 21: Ροή θερμότητας σε ένα πτερύγιο ψύξης.....	59
Σχήμα 22: Πτερύγιο ψύξης με δυο πηγές θερμότητας στα άκρα του.....	60
Σχήμα 23: Σύστημα ψύξης παράλληλης ροής με ακροφύσια εισαγωγής και εξόδου	60
Σχήμα 24: Ανακυκλοφορία ροής.....	61
Σχήμα 25: Κωνικό ακροφύσιο εισόδου.....	62
Σχήμα 26: Διάγραμμα ιδιοτήτων νερού.....	67
Σχήμα 27: Χαρακτηριστική καμπύλη ανεμιστήρα 9GV1512H501.....	82
Σχήμα 28: Χαρακτηριστική καμπύλη ανεμιστήρα 9GV1212P1J01.....	83