

Ανάπτυξη τροχού για όχημα χαμηλής κατανάλωσης

Γκουβέλης Μιχαήλ-Άγγελος

*Διπλωματική εργασία που υποβάλλεται ως μέρος
της εκπλήρωσης των απαιτήσεων για το δίπλωμα
Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης*



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Πολυτεχνείο Κρήτης
Χανιά, Ελλάδα

Επιβλέπων καθηγητής: Τσουρβελούδης Νικόλαος

Σεπτέμβριος 2025

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία αφορά την ανάπτυξη τροχού, για όχημα χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, κατασκευασμένου από σύνθετα υλικά. Ο στόχος της εργασίας είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του τροχού.

Ο σχεδιασμός, που είναι το αρχικό στάδιο της εργασίας, περιλαμβάνει την ανάλυση και μελέτη των βασικών τμημάτων (στεφάνι, τοίχωμα, κέντρο) του τροχού, αναφορικά με τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις για κάθε τμήμα, διασφαλίζοντας ότι ο τροχός θα πληροί τις λειτουργικές και μηχανικές απαιτήσεις. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται προσομοίωση δυνάμεων και ανάλυση των καταπονήσεων που δέχεται ο τροχός κατά τη χρήση του, ώστε να εξασφαλιστεί η αντοχή και η ασφαλής λειτουργία του σε διαφορετικές συνθήκες χρήσης. Η προσομοίωση των σύνθετων υλικών εξετάζεται με τη χρήση τεχνικών ομογενοποίησης, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι μικροδομικές ιδιότητες και η συμβολή τους στη μακροσκοπική εικόνα.

Εξετάζονται διάφορα υλικά με έμφαση στις ιδιότητες του ανθρακονήματος, καθώς και τις δυνατότητες βελτιστοποίησης των στρώσεων του υλικού, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή απόδοση σε σχέση με το βάρος και την αντοχή. Περιγράφεται ακόμα η διαδικασία δημιουργίας μήτρας, καθώς και η τεχνική διάχυσης ρητίνης υπό κενό, που συμβάλλουν στην παραγωγή ενός τροχού.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όπου αξιολογούνται οι επιδόσεις του τροχού και συγκρίνονται με τις αρχικές προδιαγραφές. Τα αποτελέσματα αυτά επικεντρώνονται στην επίτευξη των στόχων για τη μείωση του βάρους και την εξασφάλιση της απαιτούμενης αντοχής, προσφέροντας έτσι μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στην ανάπτυξη ενός καινοτόμου προϊόντος που μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα των οχημάτων χαμηλής κατανάλωσης.

Abstract

The thesis concerns the development of a wheel for a low-energy consumption vehicle, made of composite materials. The aim of the thesis is to improve the energy efficiency of the wheel.

The design, which is the initial stage of the thesis, includes the analysis and study of the basic parts (rim, wall, center) of the wheel in relation to the specifications and requirements for each part, ensuring that the wheel will meet the functional and mechanical requirements. Next, a simulation of forces and an analysis of the stresses to which the wheel is subjected during use are carried out to ensure its durability and safe operation under different conditions of use. The simulation of composite materials is examined using homogenization techniques in order to take into account the microstructural properties and their contribution to the macroscopic picture.

Various materials are examined with an emphasis on the properties of carbon fiber, as well as the possibilities for optimizing the layers of the material in order to achieve the best possible performance in terms of weight and strength. The process of creating a mold and the technique of vacuum resin infusion, which contribute to the production of a wheel, are also described.

The work concludes with a presentation of the results, where the wheel's overall performance is evaluated and compared to the initial specifications. These results focus on achieving the goals of reducing weight and ensuring the required strength, thus offering a comprehensive approach to developing an innovative product that can improve the energy efficiency of low-consumption vehicles.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	9
1.1	Η Σημασία Ελαφρών Εξαρτημάτων	9
1.2	Διαγωνισμός Shell Eco-Marathon	10
1.3	Στόχος και Αντικειμενικοί Σκοποί	11
2	Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	12
2.1	Φορτίσεις και Καταπονήσεις Τροχού	12
2.1.1	Κατηγορίες Φορτίων	12
2.1.2	Πρότυπα και Δοκιμές	13
2.1.3	Ενσωμάτωση σε μελέτη πεπερασμένων στοιχείων	13
2.2	Εισαγωγή στα Σύνθετα Υλικά	14
2.3	Ανισοτροπία και Ορθοτροπία	15
2.4	Παραγωγή και Ιδιότητες Ινών Άνθρακα	17
2.5	Μηχανική Συμπεριφορά και Ομογενοποίηση για FEA	17
2.5.1	Μέθοδοι Ομογενοποίησης	18
2.6	Δείκτες Ασφάλειας σε Σύνθετα Υλικά	18
2.6.1	Κριτήριο Tsai-Wu	19
2.6.2	Αντίστροφος Tsai-Wu και Δείκτες Ασφάλειας	19
2.6.3	Συμπεράσματα	20
3	Μεθοδολογία Ανάπτυξης	21
4	Σχέδιο	24
4.1	Τροχός	24
4.1.1	Στεφάνι	25
4.1.2	Πλευρικό Τοίχωμα	25
4.1.3	Κέντρο	26
4.2	Μήτρες	27
4.2.1	Προσπάθεια 1	28
4.2.2	Προσπάθεια 2	29
4.2.3	Προσπάθεια 3	30

5	Ανάλυση με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	32
5.1	Μοντελοποίηση σύνθετων υλικών	32
5.1.1	Παράμετροι φάσεων και γεωμετρία RVE	32
5.1.2	Πλεγματοποίηση και οριακές συνθήκες	33
5.1.3	Εξαγωγή ισοδύναμων ιδιοτήτων	34
5.1.4	Πυκνότητα, εκτίμηση μάζας και σχολιασμός	35
5.1.5	Κριτήρια αστοχίας και όρια αντοχών	37
5.2	Προεπεξεργασία μοντέλου τροχού	37
5.3	Δημιουργία και βελτιστοποίηση πλέγματος	38
5.3.1	Στρατηγική πλέγματος και «ροή» στοιχείων	38
5.3.2	Κριτήρια ποιότητας στοιχείων	39
5.3.3	Μοντελοποίηση σύνδεσης κόλλας	39
5.4	Ανάθεση υλικού	39
5.5	Οριακές συνθήκες	40
5.6	Αποτελέσματα	42
6	Διαδικασία Κατασκευής	47
6.1	Μοντελοποίηση φρέζας CNC και κοπτικών εργαλείων	47
6.2	Παραγωγή G κώδικα	48
6.3	Κατασκευή Πρωτοτύπου	49
6.3.1	Μήτρα Πλευρικού Τοιχώματος	49
6.3.2	Μήτρα Στεφανιού	49
6.4	Κατασκευή Τροχού με Μέθοδο Διάχυσης Ρητίνης	50
6.5	Κατασκευή Κέντρου	52
7	Δοκιμές και Αποτελέσματα	54
7.1	Δοκιμές αντοχής	55
7.2	Συγκριτικά πειράματα	55
7.3	Μέθοδος υπολογισμών	56
7.3.1	Προεπεξεργασία δεδομένων	56
7.3.2	Ανίχνευση και χρήση φάσεων	58
7.3.3	Ισχύς, απόσταση και ενεργειακοί δείκτες	58
7.3.4	Παλινδρόμηση δυναμικού μοντέλου	59
7.3.5	Εκτίμηση σχετικής ροπής αδράνειας	60
7.3.6	Ποιότητα προσαρμογής και διαγνωστικά	60
7.3.7	Συγκεντρωτικά μεγέθη και διαστήματα εμπιστοσύνης	61
7.4	Αποτελέσματα	61
7.5	Εγκατάσταση τροχού στο όχημα	64
8	Συμπεράσματα	66
8.1	Συμπεράσματα	66
8.2	Μελλοντική έρευνα	67

A' Πρόσθετες Πληροφορίες	70
A'.1 Υπολογισμός Φορτίων Τροχού	70
A'.1.1 Φρενάρισμα σε κλίση	70
A'.1.2 Στροφή	71
A'.1.3 Απαίτηση πίεσης ελαστικού	72
A'.1.4 Κατακόρυφη κρούση (Bump)	72
B' Βάση Δοκιμών Τροχού	73
B'.1 Μηχανολογική σύνθεση	74
B'.2 Υποσύστημα ελέγχου και ισχύος	74
B'.3 Λειτουργικό σύστημα & έλεγχος (firmware)	75
B'.4 Δομή δεδομένων	76
Γ' Θερμοθάλαμος Ωρίμανσης	77
Γ'.1 Σκοπός και απαιτήσεις	77
Γ'.2 Μοντελοποίηση και διαστασιολόγηση ισχύος	77
Γ'.3 Κατασκευή	79
Δ' Κατασκευαστικά Σχέδια Τροχού	81

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Όχημα ομάδας TUCer	11
2.1	Αναπαράσταση σύνθετου υλικού	14
2.2	Αναπαράσταση ανισότροπου υλικού	15
3.1	Απλοποιημένος κύκλος μεθοδολογίας και ανατροφοδοτήσεις. . .	21
3.2	Επαναληπτική διαδικασία: οι εικόνες δείχνουν, από αριστερά προς δεξιά, τις αλλαγές που προέκυψαν μετά από κάθε κύκλο φορτίσεων–προσομοιώσεων.	23
4.1	Φωτορεαλιστική απεικόνιση τροχού.	24
4.2	Ανεπτυγμένη όψη πλευρικού τοιχώματος.	26
4.3	Ανεπτυγμένη όψη κέντρου και προσαρμογέα.	27
4.4	Μήτρα στεφανιού (MDF) και τομή της.	28
4.5	Μήτρα στεφανιού (έκδοση 2) και τμήμα της.	29
4.6	Συσκευή πρόσδεσης/στήριξης για τη μήτρα.	30
4.7	Μήτρα πλευρικού τοιχώματος.	30
4.8	Τελική έκδοση μήτρας στεφανιού.	31
5.1	Παράδειγμα περιοδικού τμήματος ύφανσης 2×2 Twill.	33
5.2	Γεωμετρικά ορίσματα ύφανσης του σύνθετου υλικού.	33
5.3	Μοντέλο RVE με εφαρμοσμένες οριακές συνθήκες.	34
5.4	Πεδία τάσεων/παραμορφώσεων RVE — Εφελκυσμός	35
5.5	Πεδία τάσεων/παραμορφώσεων RVE — Διάτμηση	36
5.6	Μέτρα ελαστικότητας E_{11} , E_{22} , E_{33} από την ομογενοποίηση του RVE.	37
5.7	Μέτρα διάτμησης G_{12} , G_{23} , G_{13} από την ομογενοποίηση του RVE.	37
5.8	Γεωμετρία πριν και μετά το στάδιο προεπεξεργασίας.	38
5.9	Πλέγμα του τροχού μετά τη βελτιστοποίηση.	38
5.10	Τμήμα μοντέλου συγκολλητικού υλικού με στρώμα <i>hex</i> και συνδετικά στοιχεία.	40
5.11	Φορά ινών: (α) στεφάνι, (β) πλευρικό τοίχωμα.	40
5.12	Ενδεικτική τοπική ενίσχυση στο στεφάνι με γεωμετρία περιοχής και προσανατολισμούς.	41
5.13	Τελικές στοιβάξεις: (α) στεφάνι, (β) πλευρικό τοίχωμα.	41

5.14	Περιοχές εφαρμογής φορτίσεων στο στεφάνι: κάτω, αριστερά, δεξιά.	42
5.15	Ολοκληρωμένο μοντέλο τροχού έτοιμο για επίλυση.	42
5.16	Απεικονίζεται ο δείκτης αντοχής ανά στρώση για το στοιχείο με τη μικρότερη τιμή RF . Η κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο όριο $RF = 1$.	44
5.17	Χρονική εξέλιξη της μέγιστης μετατόπισης και των ακραίων τιμών τάσεων/ RF στο σενάριο κρούσης.	44
5.18	Σύγκριση ανά σενάριο φόρτισης: ελάχιστος δείκτης Tsai–Wu και μέγιστη μετατόπιση.	45
5.19	Κύριες τάσεις στο σενάριο 3. Οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται κοντά στα χείλη του στεφανιού και σε ζώνες αλλαγής καμπυλότητας.	45
5.20	Ελάχιστος δείκτης Tsai–Wu σε όλα τα στρώματα (σενάριο 4).	46
5.21	Κατανομή της ολικής μετατόπισης στο σενάριο κρούσης.	46
6.1	Μοντέλο φρέζας αριθμητικού ελέγχου Stepcraft M700.	48
6.2	Τροχιά και προσομοίωση κοπτικού εργαλείου στο Autodesk Fusion.	49
6.3	Στάδια κατασκευής μήτρας στεφανιού	50
6.4	Στάδια στοίβαξης υφασμάτων	51
6.5	Διάταξη διάχυσης ρητίνης	52
6.6	Κατεργασίες εξαρτημάτων	52
6.7	Εξαρτήματα και συναρμολόγηση κέντρου	53
7.1	Βάση δοκιμών τροχού.	54
7.2	Υφιστάμενος και νέος τροχός.	55
7.3	Με φορτίο 40 kg: ταχύτητα (αριστερός άξονας) και ρεύμα (δεξιός).	57
7.4	Χωρίς φορτίο: ταχύτητα και ρεύμα.	58
7.5	Ενέργεια οδήγησης ανά πείραμα (Wh).	62
7.6	Ρεύμα μόνιμης κατάστασης ανά πείραμα (A).	62
7.7	Συντελεστής $A = k_t/J$ ανά πείραμα.	63
7.8	Νέος και παλιός τροχός στο όχημα	64
7.9	Συγκριτική απεικόνιση παλαιού και νέου κέντρου	65
B'.1	Βάση δοκιμών τροχού.	73
B'.2	Υποσύστημα φορτίων και μηχανισμοί κίνησης.	74
Γ'.1	Θερμικό μοντέλο.	78
Γ'.2	Σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας.	78
Γ'.3	Προφίλ θερμοκρασίας.	78
Γ'.4	Θερμοκρασία ανά στρώμα.	79
Γ'.5	Ενέργεια ανά κύκλο.	79
Γ'.6	Κατασκευασμένος Θερμοθάλαμος.	80

Κατάλογος πινάκων

4.1	Διαστάσεις τομής στεφανιού	25
5.1	Μηχανικές ιδιότητες φάσεων που χρησιμοποιήθηκαν στο RVE. . .	32
5.2	Ιδιότητες ορθότροπου υλικού από ομογενοποίηση RVE (μία στρώση twill 2×2).	34
5.3	Κριτήρια ποιότητας πλέγματος και όρια αποδοχής.	39
5.4	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων.	43
6.1	Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή της μήτρας	50
7.1	Σενάρια πειραμάτων, σύντομοι κωδικοί και αντιστοίχιση σε ονομασίες αρχείων.	55
7.2	Σήματα που καταγράφει το σύστημα και ο ρόλος τους στην επεξεργασία.	59
7.3	Ενεργειακά αποτελέσματα και μέσο ρεύμα στη μόνιμη πορεία ανά πείραμα.	61
7.4	Συντελεστής δυναμικού μοντέλου και σχετική ροπή αδράνειας. . .	63
7.5	Συγκριτικός πίνακας μαζών παλαιού και νέου τροχού	64
A'.1	Ορισμοί μεταβλητών & σύμβολα	71
A'.2	Αποτελέσματα δυνάμεων σε στροφή	72
A'.3	Bump — είσοδοι και παράγωγα μεγέθη.	72
B'.1	Υποσυστήματα και διασυνδέσεις.	75
B'.2	Μεγέθη, μονάδες και προέλευση μετρήσεων.	75
B'.3	Εντολές κονσόλας firmware.	76
Γ'.1	Σύνοψη βασικών παραμέτρων θερμοθαλάμου.	80

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η ενεργειακή απόδοση των οχημάτων βρίσκεται στο προσκήνιο της σύγχρονης αυτοκινητοβιομηχανίας, λόγω της επιτακτικής ανάγκης για βιωσιμότητα, βελτιστοποίηση των επιδόσεων και συμμόρφωση με τους ολοένα και αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς [1]. Καθώς η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και η εξοικονόμηση ενέργειας αποκτούν προτεραιότητα, κάθε στοιχείο ενός οχήματος, από τα μεγάλα συστήματα μετάδοσης κίνησης έως τις φαινομενικά ασήμαντες λεπτομέρειες, έχει καταστεί κρίσιμο για την επίτευξη σημαντικών αυξήσεων στην απόδοση [2]. Μεταξύ αυτών των εξαρτημάτων, οι τροχοί και τα ελαστικά επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του οχήματος, αποτελώντας έναν κρίσιμο αλλά συχνά υποτιμημένο τομέα βελτιστοποίησης. Οι τροχοί, συγκεκριμένα, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο επηρεάζοντας άμεσα την αντίσταση κύλισης, την αεροδυναμική απόδοση και τη συνολική δυναμική του οχήματος [3]. Η μείωση της αντίστασης κύλισης από μόνη της μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, ιδιαίτερα κρίσιμη σε διαγωνισμούς όπου η οριακή αύξηση της απόδοσης μπορεί να αναδείξει τους νικητές.

1.1 Η Σημασία Ελαφρών Εξαρτημάτων

Η σημασία των ελαφρών εξαρτημάτων για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης των οχημάτων είναι εκτεταμένη, επηρεάζοντας σημαντικά το σχεδιασμό, τις επιδόσεις και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αυτοκινήτων [1]. Η μείωση της μάζας των εξαρτημάτων του οχήματος επηρεάζει άμεσα την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την επιτάχυνση, την επιβράδυνση και τη διατήρηση της ταχύτητας του [3], [4]. Τα βαρύτερα οχήματα απαιτούν εγγενώς περισσότερη ενέργεια για να κινηθούν, οδηγώντας σε αυξημένη κατανάλωση καυσίμου ή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, τα ελαφριά οχήματα απαιτούν λιγότερη εισροή ενέργειας για τις ίδιες συνθήκες οδήγησης, βελτιώνοντας έτσι άμεσα την οικονομία καυσίμου ή επεκτείνοντας την εμβέλεια της μπαταρίας στα ηλεκτρικά οχήματα.

Επιπλέον, τα ελαφρύτερα εξαρτήματα του οχήματος μειώνουν την περιστροφική αδράνεια, ιδιαίτερα κρίσιμη σε μέρη όπως οι τροχοί, τα συστήματα μετάδο-

σης κίνησης και τα συστήματα πέδησης. Η χαμηλότερη περιστροφική αδράνεια μεταφράζεται σε βελτιωμένη επιτάχυνση, απόκριση στα φρένα και καλύτερα συνολικά χαρακτηριστικά χειρισμού, συμβάλλοντας στην ασφάλεια του οχήματος και τη δυναμική οδήγησης. Ειδικότερα, η μείωση της μη αναρτώμενης μάζας -όπως οι τροχοί, τα φρένα και τα εξαρτήματα της ανάρτησης- έχει δυσανάλογα θετική επίδραση στον χειρισμό, την άνεση και την αποδοτικότητα των οχημάτων [3]. Η μικρότερη μάζα για την επιτάχυνση και την επιβράδυνση μειώνει επίσης σημαντικά τη φθορά των μηχανικών εξαρτημάτων, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής τους και ελαχιστοποιώντας το κόστος συντήρησης.

Από περιβαλλοντική άποψη, η χρήση ελαφρών εξαρτημάτων μειώνει τις εκπομπές ρύπων σε άμεση αναλογία με τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου [1]. Η ευθυγράμμιση με τα παγκόσμια πρότυπα εκπομπών και τα κανονιστικά πλαίσια είναι όλο και πιο κρίσιμη, καθώς οι αυστηρές περιβαλλοντικές πολιτικές συνεχίζουν να οδηγούν την καινοτομία στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η μειωμένη μάζα υποστηρίζει επίσης τη σμίκρυνση των συστημάτων μετάδοσης κίνησης, επιτρέποντας μικρότερους κινητήρες ή συστοιχίες μπαταριών που επιτείνουν περαιτέρω τις βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης.

Επιπλέον, οι στρατηγικές ελαφρού σχεδιασμού, που συχνά αφορούν προηγμένα υλικά όπως κράματα αλουμινίου, μαγνήσιο, σύνθετα υλικά όπως πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (Carbon Fiber Reinforced Polymers, CFRP) και προηγμένα πλαστικά, παρέχουν το πλεονέκτημα της προσαρμογής των μηχανικών ιδιοτήτων ώστε να ανταποκρίνονται ακριβώς στις λειτουργικές απαιτήσεις. Αυτή η ακρίβεια επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της δομικής ακεραιότητας, της ασφάλειας και των επιδόσεων, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την περιττή μάζα.

Στην ουσία, η χρήση ελαφρών εξαρτημάτων στη μηχανική αυτοκινήτων αποτελεί μια βασική προσέγγιση για την επίτευξη σημαντικών βελτιώσεων στην ενεργειακή απόδοση. Δεν ανταποκρίνεται μόνο στις κανονιστικές απαιτήσεις και τους περιβαλλοντικούς στόχους, αλλά βελτιώνει επίσης τις επιδόσεις του οχήματος, τη λειτουργική οικονομία και την ανταγωνιστικότητα της αγοράς, εδραιώνοντας τη σημασία της στη σύγχρονη ανάπτυξη της αυτοκινητοβιομηχανίας [1], [3].

1.2 Διαγωνισμός Shell Eco-Marathon

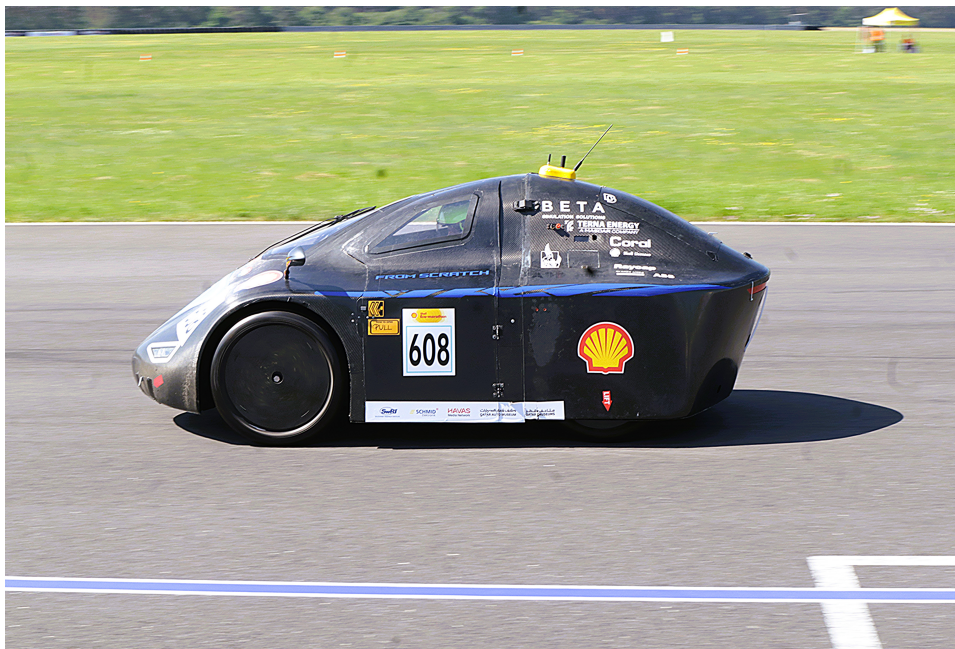
Ο διαγωνισμός Shell Eco-Marathon είναι ένας διεθνής διαγωνισμός καινοτομίας που στοχεύει στην ανάπτυξη και παρουσίαση οχημάτων υψηλής ενεργειακής απόδοσης, με συμμετοχή φοιτητικών ομάδων από πανεπιστήμια όλου του κόσμου. Ξεκινώντας το 1985 ως μια τοπική πρωτοβουλία της Shell στη Γαλλία, έχει εξελιχθεί πλέον σε έναν παγκόσμιας εμβέλειας θεσμό, ο οποίος πραγματοποιείται σε διάφορες περιοχές, όπως η Ευρώπη, η Αφρική, η Αμερική και η Ασία [5].

Κεντρικός στόχος του διαγωνισμού είναι η κατασκευή οχημάτων που μπορούν να καλύψουν τη μέγιστη δυνατή απόσταση με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, είτε αυτή προέρχεται από συμβατικά καύσιμα, ηλεκτρική ενέργεια, είτε από εναλλακτικές πηγές όπως το υδρογόνο. Ο διαγωνισμός χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγο-

ρίες: την κατηγορία των πρωτότυπων οχημάτων, που δίνει έμφαση στην απόλυτη ενεργειακή απόδοση με φουτουριστικά και αεροδυναμικά σχέδια, και την κατηγορία συμβατικών οχημάτων, που απαιτεί πιο ρεαλιστικά οχήματα με χαρακτηριστικά αστικής χρήσης. Σε αυτό το περιβάλλον, οι τροχοί παίζουν καθοριστικό ρόλο, καθώς επηρεάζουν όχι μόνο τη συνολική μάζα αλλά και τη ροπή αδράνειας, επηρεάζοντας σημαντικά την ενεργειακή απόδοση και τον χειρισμό του οχήματος.

1.3 Στόχος και Αντικειμενικοί Σκοποί

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στον ολοκληρωμένο σχεδιασμό, την ανάλυση, τη διαδικασία κατασκευής και τον πειραματικό έλεγχο καινοτόμων τροχών που αναπτύχθηκαν ειδικά από την αρχή για την ομάδα TUCer, του Πολυτεχνείου Κρήτης. Ο σχεδιασμός του τροχού αφορά τους ακόλουθους τομείς επιδόσεων: δομική ακεραιότητα, μείωση ενέργειας αδράνειας, αντίστασης κύλισης και αεροδυναμική απόδοση. Ξεκινώντας με τα στάδια της σύλληψης και του επαναληπτικού σχεδιασμού, η διαδικασία περιλαμβάνει προηγμένες μεθοδολογίες σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (Computer Aided Design, CAD), ακολουθούμενες από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis, FEA) για να διασφαλιστεί η δομική ακεραιότητα υπό ειδικές συνθήκες φόρτισης για τον αγώνα [6], [7]. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων δίνει ιδιαίτερη έμφαση στις ανισοτροπικές μηχανικές ιδιότητες των CFRP, οι οποίες είναι κρίσιμες για την ακριβή πρόβλεψη των δομικών επιδόσεων και της αξιοπιστίας των τροχών.



Σχήμα 1.1: Όχημα ομάδας TUCer

Κεφάλαιο 2

Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

2.1 Φορτίσεις και Καταπονήσεις Τροχού

Η ανάλυση των φορτίσεων που δέχεται ένας τροχός αποτελεί κρίσιμο στάδιο στη διαδικασία σχεδίασης και επικύρωσης, ιδιαίτερα για οχήματα χαμηλής κατανάλωσης, όπου η ελαχιστοποίηση μάζας πρέπει να ισορροπεί με την αντοχή και την ασφάλεια. Η σωστή κατανόηση των τύπων φορτίων, των σημείων εφαρμογής τους και της δυναμικής τους συμπεριφοράς είναι απαραίτητη για τη δημιουργία προσομοιώσεων με FEA και για την τήρηση των σχετικών κανονισμών, όπως το πρότυπο JASO T 203 [7].

2.1.1 Κατηγορίες Φορτίων

Ακτινικά Φορτία

Τα ακτινικά φορτία (F_r) προέρχονται κυρίως από το βάρος του οχήματος και τις κάθετες επιταχύνσεις κατά την κίνηση σε ανωμαλίες του οδοστρώματος. Υπολογίζονται προσεγγιστικά ως:

$$F_r = \frac{m_{veh} \cdot g}{n_{wheels}} \cdot k_{sf} \quad (2.1)$$

όπου m_{veh} η μάζα του οχήματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, n_{wheels} ο αριθμός των τροχών, και k_{sf} συντελεστής ασφάλειας που λαμβάνει υπόψη δυναμικές αιχμές [8].

Αξονικά Φορτία

Τα αξονικά φορτία (F_a) εμφανίζονται κυρίως κατά τις στροφές λόγω πλευρικών δυνάμεων από την τριβή ελαστικού-δρόμου. Στα οχήματα Shell Eco-Marathon, όπου η ταχύτητα είναι περιορισμένη, τα φορτία αυτά είναι μικρότερα σε σχέση με αγωνιστικά οχήματα, αλλά παραμένουν σημαντικά για τη διαστασιολόγηση [9].

Ροπές Πέδησης και Επιτάχυνσης

Η ροπή πέδησης (M_b) και η ροπή επιτάχυνσης (M_t) προκαλούν στρέψη στην περιοχή του κέντρου του τροχού. Σύμφωνα με σχετική έρευνα [10], οι τιμές αυτές μπορούν να προσεγγιστούν από δεδομένα αισθητήρων ανάρτησης ή από την ιπποδύναμη/ροπή του κινητήρα και τις γεωμετρικές παραμέτρους του τροχού.

Εσωτερική Πίεση Ελαστικού

Η πίεση λειτουργίας του ελαστικού δημιουργεί κυκλικές τάσεις (hoop stresses) στο στεφάνι, οι οποίες υπολογίζονται ως:

$$\sigma_h = \frac{p \cdot r}{t} \quad (2.2)$$

όπου p η πίεση, r η ακτίνα και t το πάχος του στεφανιού [10].

Συνδυασμένες Φορτίσεις

Σενάρια όπως φρενάρισμα σε στροφή οδηγούν σε ταυτόχρονη δράση ακτινικών, αξονικών και στρεπτικών φορτίων, με αυξημένο κίνδυνο τοπικών υπερφορτίσεων.

2.1.2 Πρότυπα και Δοκιμές

Το πρότυπο JASO T 203 [7] καθορίζει ελάχιστες απαιτήσεις για:

- Αντοχή σε κάμψη υπό σταθερή ροπή (10^5 κύκλοι).
- Αντοχή σε ακτινικό φορτίο (5×10^5 κύκλοι).
- Αντοχή σε κρούση.
- Αντοχή σε στρεπτική ροπή (10^5 κύκλοι).

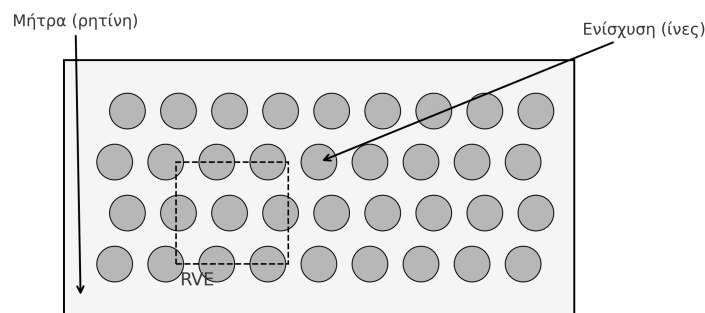
Η συμμόρφωση σε αυτά τα πρότυπα εξασφαλίζει ότι ο τροχός μπορεί να αντέξει τις πραγματικές καταπονήσεις χωρίς σημαντικές παραμορφώσεις ή ρωγμές.

2.1.3 Ενσωμάτωση σε μελέτη πεπερασμένων στοιχείων

Τα φορτία εφαρμόζονται στο αριθμητικό μοντέλο ως οριακές συνθήκες, με στόχο την εκτίμηση μετατοπίσεων, τάσεων και δεικτών αστοχίας (π.χ. Tsai–Wu). Οι μελέτες [4], [10] δείχνουν ότι η καλή αντιστοίχιση μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων είναι εφικτή, εφόσον οι συνθήκες φόρτισης είναι ρεαλιστικές.

2.2 Εισαγωγή στα Σύνθετα Υλικά

Τα σύνθετα υλικά (composites) αποτελούν συνδυασμό δύο ή περισσότερων διακριτών φάσεων, με στόχο τη βελτιστοποίηση μηχανικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων που δεν μπορούν να επιτευχθούν από κάθε φάση μεμονωμένα. Συνήθως περιλαμβάνουν μία ενισχυτική φάση (π.χ. ίνες άνθρακα, ίνες γυαλιού, αραμιδικές ίνες, βοριοπλαστικές ίνες) και μία μητρική φάση (π.χ. εποξική ή πολυεστερική ρητίνη, θερμοπλαστική μήτρα, μεταλλική ή κεραμική μήτρα). Η ενισχυτική φάση είναι υπεύθυνη για την παροχή υψηλής αντοχής και ακαμψίας, ενώ η μήτρα προστατεύει τις ίνες, μεταφέρει τα φορτία μεταξύ τους και διατηρεί τη συνοχή του υλικού.



Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση σύνθετου υλικού

Ανάλογα με τον τύπο της ενίσχυσης και τον προσανατολισμό της, τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε μονοκατευθυντικά (UD), υφαντά (woven) και τυχαίας διάταξης ινών. Η επιλογή του τύπου καθορίζεται από τις απαιτήσεις φόρτισης, το επιθυμητό βάρος και το κόστος παραγωγής.

Η χρήση σύνθετων υλικών σε προηγμένες εφαρμογές, όπως η αεροναυπηγική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυπηγική, η αμυντική βιομηχανία, τα αθλητικά είδη και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχει αυξηθεί ραγδαία λόγω:

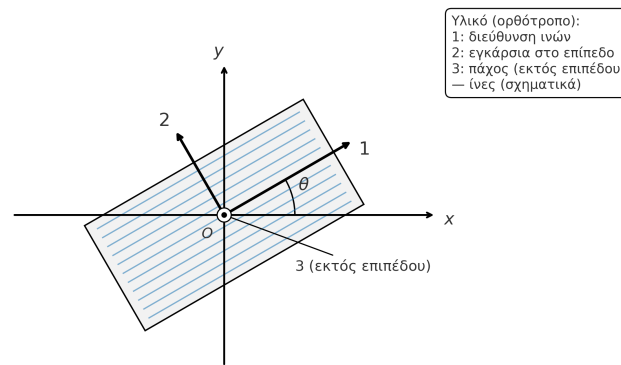
- του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος,
- της δυνατότητας προσαρμογής των μηχανικών ιδιοτήτων μέσω ελέγχου της γεωμετρίας, του πάχους και της διάταξης των στρώσεων (stacking sequence),
- της ανθεκτικότητας σε διάβρωση, υπεριώδη ακτινοβολία και θερμοκρασιακές μεταβολές,
- της δυνατότητας ενσωμάτωσης σύνθετων γεωμετριών και πολυλειτουργικών χαρακτηριστικών.

Η σχεδίαση με σύνθετα υλικά απαιτεί κατανόηση της μικροδομής τους, της αλληλεπίδρασης μεταξύ ίνας και μήτρας, καθώς και της επίδρασης παραγόντων όπως ο προσανατολισμός ινών, η ποιότητα σύνδεσης στις διεπιφάνειες, η ύπαρξη κενών,

μικρορωγμών και άλλων ατελειών παραγωγής. Αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν άμεσα τη μηχανική συμπεριφορά, την αντοχή σε αστοχία και την αξιοπιστία του τελικού προϊόντος, καθορίζοντας παράλληλα την κατάλληλη μεθοδολογία ομογενοποίησης και ανάλυσης για εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων [11].

2.3 Ανισοτροπία και Ορθοτροπία

Τα περισσότερα μεταλλικά υλικά θεωρούνται ισότροπα, με τις μηχανικές τους ιδιότητες να είναι ίδιες προς όλες τις διευθύνσεις λόγω της ομοιογενούς κρυσταλλικής δομής τους και της ισοκατανομής των ατομικών δεσμών. Αντίθετα, τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν ανισοτροπία, δηλαδή οι ιδιότητές τους εξαρτώνται από τη διεύθυνση μέτρησης. Η ανισοτροπία στα σύνθετα υλικά προκύπτει κυρίως από τον προσανατολισμό των ινών, τον τύπο της ύφανσης, την κατανομή των φάσεων και τις διαδικασίες παραγωγής.



Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση ανισότροπου υλικού

- **Ανισότροπο υλικό:** Υλικό στο οποίο οι μηχανικές ιδιότητες (π.χ. μέτρο ελαστικότητας, αντοχή, κ.ά.) διαφέρουν σε κάθε κατεύθυνση του τρισδιάστατου χώρου. Ένα πλήρως ανισότροπο υλικό απαιτεί την περιγραφή με 21 ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές.

Γενικευμένος νόμος του Hooke (μορφή Voigt, με μηχανικές διατμητικές $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$) [12]:

$$\{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}, \quad \{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}, \quad \{\sigma\} = [C] \{\varepsilon\}, \quad (2.3)$$

με $[\mathbf{C}]$ συμμετρικό 6×6 και γενική μορφή:

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Ισοδύναμα, $\{\varepsilon\} = [\mathbf{S}] \{\sigma\}$ με $[\mathbf{S}] = [\mathbf{C}]^{-1}$.

- **Ορθότροπο υλικό:** Ιδιαίτερη περίπτωση ανισοτροπίας με τρεις αμοιβαία κάθετους άξονες συμμετρίας, όπου οι ιδιότητες είναι ίδιες κατά μήκος κάθε άξονα αλλά διαφορετικές μεταξύ τους. Η περιγραφή ενός ορθότροπου υλικού γίνεται με 9 ανεξάρτητες ελαστικές σταθερές (3 μέτρα ελαστικότητας, 3 συντελεστές Poisson και 3 μέτρα διάτμησης) [13]. *Μορφή συμμόρφωσης σε τοπικούς άξονες 1, 2, 3:*

$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}}_{[\mathbf{S}]_{\text{ortho}}} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

με σχέσεις αμοιβαιότητας για τους λόγους Poisson:

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}, \quad \frac{\nu_{13}}{E_1} = \frac{\nu_{31}}{E_3}, \quad \frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3}. \quad (2.6)$$

Εναλλακτικά, μορφή δυσκαμψίας με μηδενική σύζευξη κανονικών-διατμητικών:

$$\{\sigma\} = \underbrace{\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix}}_{[\mathbf{C}]_{\text{ortho}}} \{\varepsilon\}, \quad (2.7)$$

όπου τα C_{ij} του άνω 3×3 μπλοκ σχετίζονται με E_1, E_2, E_3 και ν_{ij} μέσω $[\mathbf{C}]_{\text{ortho}} = [\mathbf{S}]_{\text{ortho}}^{-1}$.

Η ορθότροπη προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην ανάλυση CFRP υλικών, καθώς επιτρέπει τον ακριβή ορισμό μηχανικών ιδιοτήτων ανά διεύθυνση φόρτισης και διευκολύνει την ενσωμάτωση των δεδομένων αυτών σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων, μειώνοντας την πολυπλοκότητα της πλήρους ανισοτροπικής περιγραφής.

2.4 Παραγωγή και Ιδιότητες Ινών Άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα κατασκευάζονται κυρίως από πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), ενώ σε μικρότερο ποσοστό χρησιμοποιούνται πίσσα (pitch) ή ίνες κυτταρίνης ως πρώτες ύλες. Η παραγωγική διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βασικά στάδια:

1. **Πολυμερισμός και κλώση:** Δημιουργία και διαμόρφωση των ινών από την πρώτη ύλη.
2. **Θερμική σταθεροποίηση:** Θέρμανση σε οξειδωτική ατμόσφαιρα για την ανάπτυξη σταθερής χημικής δομής.
3. **Ανθρακοποίηση:** Θέρμανση σε αδρανή ατμόσφαιρα (1000–1500°C) για την απομάκρυνση μη άνθρακικών ατόμων.
4. **Γραφίτιοποίηση:** Θέρμανση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (2500–3000°C) για την ανάπτυξη κρυσταλλικής δομής γραφίτη και τη βελτίωση του μέτρου ελαστικότητας.

Οι τυπικές μηχανικές ιδιότητες περιλαμβάνουν υψηλή αντοχή (3-7 GPa), υψηλό μέτρο ελαστικότητας (200-500 GPa), χαμηλή πυκνότητα (1.75-2.00 g/cm³), αντοχή στη διάβρωση και στην κόπωση [11]. Οι ιδιότητες αυτές, σε συνδυασμό με το χαμηλό βάρος, καθιστούν τις ίνες άνθρακα ιδανικές για χρήση σε δομικές εφαρμογές υψηλής απόδοσης.

2.5 Μηχανική Συμπεριφορά και Ομογενοποίηση για FEA

Για την προσομοίωση σύνθετων υλικών σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, απαιτείται η ομογενοποίηση των ιδιοτήτων τους. Αυτό περιλαμβάνει τη μετάβαση από μικροδομική περιγραφή (ίνες, ρητίνη) σε ισοδύναμες μακροσκοπικές ιδιότητες. Ο λόγος που αυτό είναι απαραίτητο είναι ότι η άμεση μοντελοποίηση κάθε μικροδομικού χαρακτηριστικού θα απαιτούσε τεράστιο αριθμό στοιχείων, αυξάνοντας δραματικά το υπολογιστικό κόστος. Μέσω της ομογενοποίησης, τα πολύπλοκα φαινόμενα σε μικροκλίμακα αποτυπώνονται με αποτελεσματικό τρόπο στις μακροσκοπικές ιδιότητες, επιτρέποντας ακριβείς αλλά και αποδοτικές υπολογιστικές αναλύσεις.

2.5.1 Μέθοδοι Ομογενοποίησης

1. **Κανόνας των Μιγμάτων (Rule of Mixtures):** Αποτελεί μια απλή αλλά χρήσιμη μέθοδο εκτίμησης των ισοδύναμων μηχανικών ιδιοτήτων ενός σύνθετου υλικού. Υπολογίζει τις ιδιότητες ως σταθμισμένο μέσο των ιδιοτήτων των επιμέρους φάσεων, ανάλογα με το ποσοστό όγκου τους. Για παράδειγμα, το μέτρο ελαστικότητας κατά την διεύθυνση των ινών δίνεται από:

$$E_{\parallel} = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (2.8)$$

όπου V_f είναι το ποσοστό όγκου των ινών, E_f το μέτρο ελαστικότητας των ινών και E_m το μέτρο ελαστικότητας της μήτρας. Η μέθοδος είναι ακριβής κυρίως για μονοκατευθυντικά σύνθετα.

2. **Μικρομηχανικά μοντέλα:** Μοντέλα όπως τα Halpin–Tsai και Mori–Tanaka επεκτείνουν τον κανόνα των μιγμάτων, ενσωματώνοντας την επίδραση του σχήματος, του μεγέθους και του προσανατολισμού των ινών, καθώς και την αλληλεπίδραση μεταξύ ινών και μήτρας. Το μοντέλο Halpin–Tsai χρησιμοποιεί εμπειρικούς παράγοντες για την προσαρμογή των υπολογισμών, ενώ το Mori–Tanaka εφαρμόζει θεωρία ελαστικότητας για τον υπολογισμό της κατανομής τάσεων και παραμορφώσεων στο υλικό [14].
3. **Αριθμητική ομογενοποίηση:** Βασίζεται στη δημιουργία ενός Αντιπροσωπευτικού Στοιχείου Όγκου (RVE), το οποίο αναπαριστά την πραγματική μικροδομή του σύνθετου. Το RVE υποβάλλεται σε προσομοιώσεις με περιοδικές οριακές συνθήκες και από την απόκρισή του εξάγονται οι ισοδύναμες μακροσκοπικές ιδιότητες. Η μέθοδος αυτή μπορεί να λάβει υπόψη περίπλοκες γεωμετρίες ινών, ακανόνιστες διατάξεις και ατέλειες [15].
4. **Πειραματική ομογενοποίηση:** Βασίζεται στη μέτρηση μηχανικών ιδιοτήτων σε πραγματικά δοκίμια, σύμφωνα με διεθνή πρότυπα. Ένα παράδειγμα είναι το ASTM D3518, το οποίο καθορίζει τον τρόπο δοκιμής για τον προσδιορισμό της απόκρισης σε διάτμηση εντός επιπέδου πολυμερικών σύνθετων υλικών, μέσω εφελκυστικών δοκιμών σε δοκίμια $\pm 45^\circ$. Οι τιμές που προκύπτουν χρησιμοποιούνται άμεσα ως είσοδος στα μοντέλα FEA [16].

2.6 Δείκτες Ασφάλειας σε Σύνθετα Υλικά

Η αξιολόγηση της ασφάλειας σε σύνθετα υλικά απαιτεί κριτήρια που λαμβάνουν υπόψη την ανισοτροπική συμπεριφορά και τις διαφορετικές αντοχές σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση. Ένα από τα πιο διαδεδομένα είναι το κριτήριο Tsai–Wu, το οποίο προτάθηκε το 1971 και χρησιμοποιείται ευρέως σε υπολογισμούς αντοχής σύνθετων υλικών [17].

2.6.1 Κριτήριο Tsai-Wu

Η γενική μορφή του κριτηρίου είναι:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j \leq 1, \quad (2.9)$$

όπου $i, j = 1, \dots, 6$ (συμβατική αναπαράσταση Voigt). Οι παράμετροι F_i και F_{ij} προσδιορίζονται πειραματικά ώστε να ορίσουν την επιφάνεια αστοχίας του υλικού.

Για επίπεδη κατάσταση τάσεων σε ορθότροπη επίστρωση, η (2.9) παίρνει τη μορφή:

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{66} \tau_{12}^2 \leq 1. \quad (2.10)$$

Οι συντελεστές υπολογίζονται από τις αντοχές της επίστρωσης:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}, \quad F_{11} = \frac{1}{X_t X_c}, \quad (2.11)$$

$$F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}, \quad F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c}, \quad (2.12)$$

$$F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2}, \quad F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{F_{11} F_{22}}, \quad (2.13)$$

όπου:

- X_t, X_c : αντοχές σε εφελκυσμό/θλίψη κατά την κατεύθυνση 1,
- Y_t, Y_c : αντοχές σε εφελκυσμό/θλίψη κατά την κατεύθυνση 2,
- S_{12} : αντοχή σε διάτμηση στο επίπεδο 1-2.

2.6.2 Αντίστροφος Tsai-Wu και Δείκτες Ασφάλειας

Για να βρεθεί ο *συντελεστής ασφαλείας* υπολογίζεται ο μέγιστος συντελεστής κλίμακας λ που μπορεί να εφαρμοστεί στις τάσεις πριν την αστοχία:

$$FI(\lambda) = F_1(\lambda \sigma_1) + F_2(\lambda \sigma_2) + F_{11}(\lambda \sigma_1)^2 + F_{22}(\lambda \sigma_2)^2 + 2F_{12}(\lambda \sigma_1)(\lambda \sigma_2) + F_{66}(\lambda \tau_{12})^2 = 1. \quad (2.14)$$

Λύνοντας ως προς λ :

$$\lambda^* = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (2.15)$$

όπου:

$$a = F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{66} \tau_{12}^2, \quad (2.16)$$

$$b = F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2, \quad (2.17)$$

$$c = -1. \quad (2.18)$$

Ο δείκτης Reserve Factor (RF) ορίζεται ως:

$$RF = \lambda^*, \quad (2.19)$$

και το περιθώριο ασφαλείας (Margin of Safety (MOS)) υπολογίζεται ως:

$$MOS = \lambda^* - 1. \quad (2.20)$$

Αν $RF \geq 1$ (ή ισοδύναμα $MOS \geq 0$), η δομή θεωρείται ασφαλής.

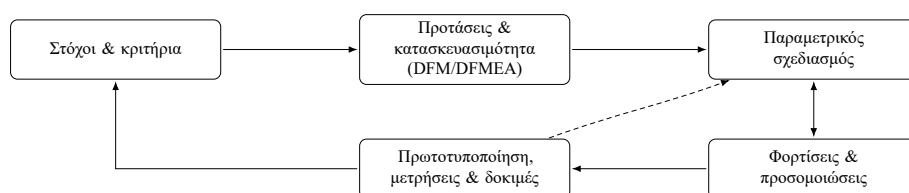
2.6.3 Συμπεράσματα

Το κριτήριο Tsai-Wu, σε συνδυασμό με τον αντίστροφο υπολογισμό του, προσφέρει έναν ευέλικτο τρόπο εκτίμησης της ασφάλειας σύνθετων υλικών υπό πολύπλοκες καταπονήσεις. Με κατάλληλα πειραματικά δεδομένα, μπορεί να δώσει αξιόπιστες εκτιμήσεις της αντοχής σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης.

Κεφάλαιο 3

Μεθοδολογία Ανάπτυξης

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε είναι ένας επαναληπτικός κύκλος βελτίωσης. Ξεκινά με ορισμό στόχων και κριτηρίων για μάζα, ροπή αδράνειας, ειδική κατανάλωση, επιτρεπτές μετατοπίσεις και περιθώρια ασφάλειας. Με βάση αυτά διαμορφώνονται εναλλακτικές λύσεις και ελέγχονται από νωρίς ως προς κατασκευασιμότητα, ανοχές, χρόνο και κόστος ώστε να προχωρούν μόνο όσες μπορούν να υλοποιηθούν με τα διαθέσιμα μέσα. Οι βιώσιμες επιλογές γίνονται παραμετρικά μοντέλα με σαφείς μεταβλητές και περιορισμούς. Το μοντέλο αξιολογείται με προσομοιώσεις για αντιπροσωπευτικά φορτία και από τα αποτελέσματα προκύπτουν διορθώσεις στη γεωμετρία και στις στοιβάξεις. Όταν τα όρια ικανοποιούνται στο ψηφιακό στάδιο κατασκευάζεται πρωτότυπο και ακολουθούν μετρήσεις και δοκιμές στη βάση. Τα πειραματικά δεδομένα επιστρέφουν στον σχεδιασμό για νέες βελτιώσεις ή για αναθεώρηση στόχων όπου χρειάζεται. Ο κύκλος επαναλαμβάνεται μέχρι η λύση να καλύπτει ταυτόχρονα απόδοση, ασφάλεια και κατασκευασιμότητα με το μικρότερο δυνατό βάρος και ροπή αδράνειας. Η ροή που ακολουθείται φαίνεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Απλοποιημένος κύκλος μεθοδολογίας και ανατροφοδοτήσεις.

Προτάσεις και κατασκευασιμότητα Παράγονται εναλλακτικές λύσεις και από νωρίς ελέγχονται για συμβατότητα με υλικά, εργαλεία, διαδικασίες και ανοχές. Εκτιμώνται χρόνοι και κόστη ενώ το ρίσκο αξιολογείται με το *Σχεδιασμό για Κατασκευασιμότητα* (DFM, *Design for Manufacturability*) που ελέγχει αν το εξάρτημα μπορεί να παραχθεί αξιόπιστα και οικονομικά με τα διαθέσιμα μέσα και με την *Ανάλυση Τρόπων και Επιπτώσεων Αστοχίας στο Στάδιο Σχεδιασμού* (DFMEA, *Design*

Failure Mode and Effects Analysis) που εντοπίζει πιθανές αστοχίες τα αίτια και τις συνέπειές τους ώστε να ληφθούν στοχευμένα μέτρα μείωσης ρίσκου. Λύσεις που δεν μπορούν να παραχθούν σταθερά ή εμφανίζουν υψηλό κίνδυνο απορρίπτονται πριν επενδυθεί χρόνος σε λεπτομερή ανάλυση.

Παραμετρικός σχεδιασμός Οι βιώσιμες ιδέες γίνονται παραμετρικά μοντέλα με καθορισμένες μεταβλητές όπως πάχη, γωνίες στρώσεων και βασικές διαστάσεις. Ορίζονται περιορισμοί από τα κριτήρια και συνδέσεις με υπολογισμό μάζας και ροπής αδράνειας. Η παραμετρικότητα επιτρέπει γρήγορες αλλαγές και καθαρές συγκρίσεις μεταξύ εκδόσεων.

Φορτίσεις και προσομοιώσεις Το μοντέλο αξιολογείται για αντιπροσωπευτικά φορτία όπως πίεση ελαστικού με βάρος, ροπή κίνησης ή πέδησης και πλευρικό φορτίο σε στροφή. Υπολογίζονται τάσεις, παραμορφώσεις και δείκτες ασφάλειας και ελέγχονται λειτουργικές μετατοπίσεις. Παράλληλα ενημερώνονται οι εκτιμήσεις για μάζα και ροπή αδράνειας. Τα ευρήματα οδηγούν σε στοχευμένες αλλαγές στον σχεδιασμό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.

Προτυποποίηση, μετρήσεις και δοκιμές Όταν ικανοποιούνται τα όρια στο ψηφιακό στάδιο κατασκευάζεται πρωτότυπο με τυποποιημένες διεργασίες. Στη βάση δοκιμών καταγράφονται ταχύτητα και ρεύμα, και υπολογίζονται ενεργειακοί δείκτες όπως Wh/km. Γίνεται έλεγχος γεωμετρίας και μάζας για να επιβεβαιωθεί η συμφωνία με τις προσομοιώσεις.

Ανατροφοδότηση και σύγκλιση Τα αποτελέσματα των δοκιμών τροφοδοτούν ξανά τον παραμετρικό σχεδιασμό. Αν εντοπιστούν αποκλίσεις γίνονται διορθώσεις σε γεωμετρία, στοιβάξεις ή παραδοχές. Αν χρειάζεται αναθεωρούνται και τα αρχικά όρια. Ο κύκλος συνεχίζεται μέχρι η λύση να ικανοποιεί ταυτόχρονα απόδοση, ασφάλεια και κατασκευασιμότητα με το μικρότερο δυνατό βάρος και ροπή αδράνειας.



Σχήμα 3.2: Επαναληπτική διαδικασία: οι εικόνες δείχνουν, από αριστερά προς δεξιά, τις αλλαγές που προέκυψαν μετά από κάθε κύκλο φορτίσεων–προσομοιώσεων.

Κεφάλαιο 4

Σχέδιο

4.1 Τροχός

Ο τροχός σχεδιάστηκε με κύριο γνώμονα τα χαρακτηριστικά που παρέχει η Michelin για το ελαστικό που διαθέτει το μονοθέσιο (90/80–16 WSC). Στόχος είναι η μείωση της απαιτούμενης για την κίνηση του τροχού ενέργειας, ενώ παράλληλα να βρίσκεται εντός των προδιαγραφών που ορίζει ο διαγωνισμός. Αυτό μπορεί να εξασφαλιστεί κρατώντας μικρή τη μάζα και τη ροπή αδράνειάς του.



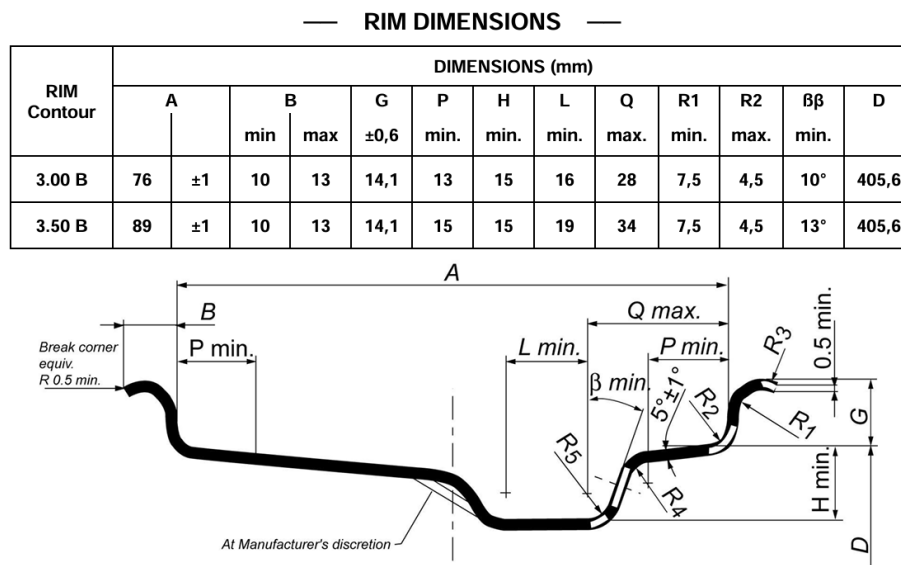
Σχήμα 4.1: Φωτορεαλιστική απεικόνιση τροχού.

Στο παρελθόν είχε γίνει ξανά προσπάθεια δημιουργίας τέτοιου τροχού όμως υπήρχαν ορισμένες αδυναμίες. Το προφίλ του στεφανιού δεν ήταν κατάλληλο να συγκρατήσει το ελαστικό στις απαιτούμενες πιέσεις ενώ ήταν απαραίτητη η χρήση αεροθαλάμου η οποία αυξάνει τη μάζα και ροπή αδράνειάς του. Αποτελείται από δύο όμοια τμήματα τα οποία όταν κολλιούνται σχηματίζουν τη γεωμετρία του προφίλ με αποτέλεσμα να μην φορτίζεται σωστά το υλικό εστιάζοντας τις τάσεις στην σύνδεση κόλλας που τον συγκρατεί. Στόχος είναι η δημιουργία νέου σχεδίου όπου

το στεφάνι θα αποτελείται από ένα τμήμα μόνο, το οποίο θα μπορεί να συγκρατήσει το ελαστικό στις πιέσεις λειτουργίας του, χωρίς τη χρήση αεροθαλάμου. Κατασκευάστηκε λοιπόν παραμετρικό σχέδιο στο πρόγραμμα Fusion της Autodesk, όπου μπορούν εύκολα να γίνουν αλλαγές στη γεωμετρία αλλά και στα υπόλοιπα συμπληρωματικά αρχεία που χρειάζονται, όπως οι μήτρες και οι κώδικες μηχανής για την κατασκευή τους. Ακόμα, η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την γρήγορη κατασκευή μοντέλων προσομοίωσης επιταχύνοντας περαιτέρω τη διαδικασία της ανάπτυξης.

4.1.1 Στεφάνι

Η Michelin παρέχει προδιαγραφές για δύο γεωμετρίες στεφανιών κατάλληλες για το ελαστικό που χρησιμοποιεί η ομάδα (Πίνακας 4.1). Επιπλέον δίνει πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του ελαστικού σε συνθήκες λειτουργίας. Με βάση τον συντελεστή αντίστασης κύλισης στη μέση ταχύτητα του οχήματος σε κατάσταση διαγωνισμού (35 km h^{-1}) επιλέγεται η γεωμετρία 3.00 B όπου ο συντελεστής αυτός είναι μικρότερος.

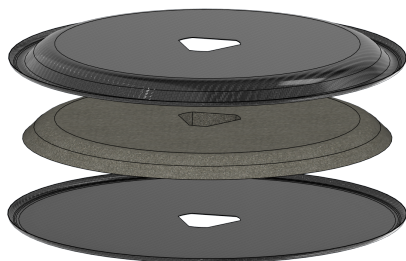


Πίνακας 4.1: Διαστάσεις τομής στεφανιού

4.1.2 Πλευρικό Τοίχωμα

Ο τροχός που σχεδιάστηκε, χρησιμοποιώντας μια δομή πλευρικού τοιχώματος από αφρό και ανθρακονήματα (Σχήμα 4.2) αντί των παραδοσιακών ακτίνων, αποσκοπεί κυρίως στην ενίσχυση της δομικής ακεραιότητας και τη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του τροχού. Αυτός ο σχεδιασμός κατανέμει ομοιόμορφα τις τάσεις και τα φορτία σε όλη την περιφέρεια του τροχού, μειώνοντας σημαντικά τις

συγκεντρώσεις τάσεων και ελαχιστοποιώντας την παραμόρφωση υπό δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Η λεία επιφάνεια του πλευρικού τοιχώματος μειώνει εγγενώς την αεροδυναμική αντίσταση σε σύγκριση με τις συμβατικές κατασκευές με ακτίνες, συμβάλλοντας έμμεσα στην αύξηση της απόδοσης του οχήματος. Η κατασκευή της δομής αυτής ενισχύει επίσης τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του τροχού παρέχοντας αντοχή σε κάμψη, λυγισμό και άλλες δομικές καταπονήσεις που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του διαγωνισμού. Επιπλέον, το πλευρικό τοίχωμα έχει σχεδιαστεί για να στηρίζει με ασφάλεια το στεφάνι του τροχού στο κέντρο του και να μεταφέρει αποτελεσματικά τις δυνάμεις και τα φορτία που προκαλούνται από το δρόμο απευθείας στο όχημα, ολοκληρώνοντας τον κρίσιμο λειτουργικό ρόλο της στη δυναμική και τις επιδόσεις του οχήματος.



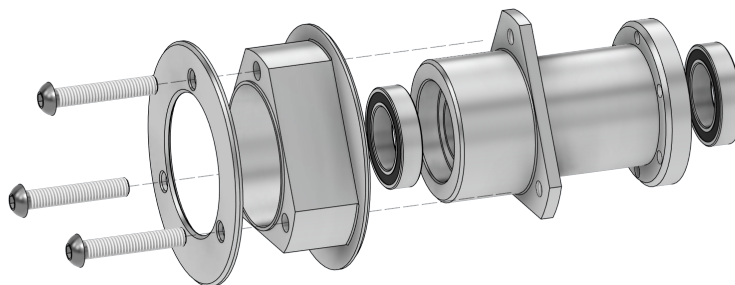
Σχήμα 4.2: Ανεπτυγμένη όψη πλευρικού τοιχώματος.

4.1.3 Κέντρο

Το κέντρο (hub) αποτελεί τον σύνδεσμο μεταξύ τροχού και οχήματος, αναλαμβάνοντας τη μεταφορά ροπής και τη στήριξη των λειτουργικών φορτίων (ακτινικών, αξονικών και καμπτικών). Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι εσκεμμένα απλή: το κέντρο αποτελείται από δύο μόνο κομμάτια και έναν προσαρμογέα που παραμένει μόνιμα επάνω στο όχημα. Ο προσαρμογέας συγκρατεί τη δισκόπλακα του φρένου, τα έδρανα κύλισης και τον ίδιο τον τροχό, ενώ το κέντρο δένει επάνω του με τρεις βίδες. Η γεωμετρία του κέντρου είναι τριγωνική ώστε να εξασφαλίζεται ευθύγραμμη ροή φορτίων και στατική καθοδήγηση της ροπής. Η διεπαφή του προσαρμογέα με το όχημα παραμένει συμβατή με την παλαιά διάταξη, περιορίζοντας τις αλλαγές στο υπόλοιπο σύστημα.

Η παραμονή του προσαρμογέα στο όχημα επιτρέπει την απομάκρυνση του τροχού χωρίς να απαιτείται η αφαίρεση της δαγκάνας του φρένου ή άλλων στοιχείων πέδησης. Έτσι μειώνεται δραστικά ο χρόνος συντήρησης και οι κίνδυνοι φθοράς σε ευαίσθητα μέρη κατά τη διαδικασία αλλαγής (pit/εργαστήριο), ενώ η επαναληψιμότητα της συναρμολόγησης αυξάνει την ασφάλεια του χειριστή.

Η σύνδεση κέντρου–προσαρμογέα μέσω τριών βιδών, σε συνδυασμό με κατάλληλη επιφάνεια πρόσδεσης, περιορίζει την εκκεντρότητα και το πλευρικό κενό. Το αποτέλεσμα είναι μικρότεροι κραδασμοί, ομοιόμορφες καταπονήσεις στα ρου-



Σχήμα 4.3: Ανεπτυγμένη όψη κέντρου και προσαρμογέα.

λεμάν και σταθερότερη επαφή ελαστικού–οδοστρώματος, γεγονός που βελτιώνει τόσο την αξιοπιστία όσο και την ενεργειακή απόδοση της κύλισης.

Η διάσπαση της λειτουργίας σε δύο απλά τεμάχια και έναν προσαρμογέα με ευθύγραμμες κατεργασίες (επίπεδα πατήματα, οπές διέλευσης, βασικές έδρες) καθιστά την κατασκευή εφικτή σε συμβατικές εργαλειομηχανές, μειώνοντας κόστος και χρόνο. Παράλληλα, η συμβατότητα της διεπαφής με την παλαιά διάταξη περιορίζει τις ανοχές που απαιτούνται σε νέο εξοπλισμό και απλοποιεί τον ποιοτικό έλεγχο (συγκεντρότητα, επιπεδότητα, τερματικές επιφάνειες).

4.2 Μήτρες

Η χρήση μήτρας (καλουπιού) είναι απαραίτητη για την κατασκευή των τμημάτων του τροχού από σύνθετα υλικά. Ο σχεδιασμός της επηρεάζει άμεσα τόσο την ποιότητα των παραγόμενων εξαρτημάτων όσο και την ευκολία παραγωγής και εξαγωγής τους. Στο πλαίσιο ανάπτυξης του συγκεκριμένου τροχού υλοποιήθηκαν τρεις διαδοχικές εκδόσεις μητρών για το *στεφάνι* και το *πλευρικό τοίχωμα*. Κάθε νέα έκδοση σχεδιάστηκε βάσει βασικών αρχών σχεδιασμού μητρών και στόχευσε στη συστηματική επίλυση ζητημάτων που αναδείχθηκαν στην προηγούμενη.

Η επιλεγμένη παραγωγική μέθοδος είναι η έγχυση ρητίνης υπό κενό (VARTM/infusion), καθώς προσφέρει υψηλότερο κλάσμα όγκου ινών με σχετικά απλό εξοπλισμό, καλή επαναληψιμότητα και χαμηλό ποσοστό κενών. Η μέθοδος αυτή παράγει τμήματα με μία *λεία* επιφάνεια (στην πλευρά επαφής με τη μήτρα) και μία *τραχεία* επιφάνεια, λόγω της χρήσης αποκολλητικού υφάσματος (*peel ply*). Λαμβάνοντας υπόψη αυτό το χαρακτηριστικό, οι μήτρες σχεδιάστηκαν ώστε: (i) η λεία επιφάνεια να προκύπτει στη διεπαφή στεφανιού–ελαστικού και στην εξωτερική ορατή επιφάνεια για αισθητικούς και αεροδυναμικούς λόγους, και (ii) η τραχεία επιφάνεια να αξιοποιείται ως επιφάνεια συγκόλλησης μεταξύ στεφανιού και πλευρικού τοιχώματος. Η τραχεία υφή αυξάνει τη μικροτραχύτητα και την ενεργό επιφάνεια επαφής, βελτιώνοντας τη μηχανική σύνδεση και την πρόσφυση της συγκολλητικής

ρητίνης, χωρίς την ανάγκη πρόσθετης κατεργασίας (τρίψιμο/απολίπανση) που θα απαιτούνταν σε γυαλισμένες επιφάνειες.

Για την επίτευξη του κενού απαιτείται χρήση σακούλας κενού, με δύο κύριες πρακτικές:

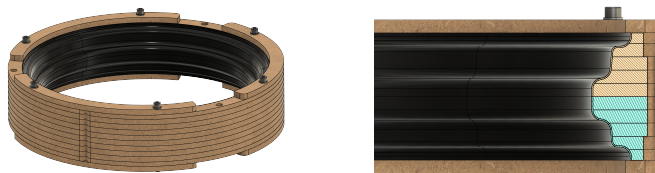
- **Φάκελος (envelope bag):** δημιουργείται *φάκελος* από τη σακούλα, μέσα στον οποίο τοποθετούνται η μήτρα και τα υφάσματα.
- **Σφράγιση στη φλάντζα:** η σακούλα συγκολλάται περιμετρικά στις φλάντζες/τοιχώματα της μήτρας ώστε να μειώνεται ο ελεύθερος όγκος και να ελέγχεται η ροή ρητίνης.

Και στις δύο περιπτώσεις προϋπόθεση είναι η αεροστεγής σφράγιση της διάταξης, ώστε να διατηρείται σταθερά το επίπεδο κενού καθ' όλη τη διάρκεια της έγχυσης και της ωρίμανσης.

4.2.1 Προσπάθεια 1

Σχεδιάστηκε αρχικά μήτρα για το στεφάνι, με στόχο την απόδειξη εφικτότητας. Ως υλικό επιλέχθηκε ινοσανίδα μέσης πυκνότητας (Medium Density Fiberboard, MDF), η οποία επικαλύφθηκε με πολυεστερική στρώση για το κλείσιμο των πόρων και τη δημιουργία λείας, κατεργάσιμης επιφάνειας. Η επιλογή MDF έγινε λόγω κόστους και ευκολίας κατεργασίας (ταχεία πρωτοτυποποίηση).

Η κατασκευή στεφανιού υπήρξε εν μέρει επιτυχής, αποδεικνύοντας ότι η παραγωγή είναι εφικτή εντός του εργαστηρίου. Ωστόσο, αναδείχθηκαν ουσιαστικά μειονεκτήματα: ευαισθησία του MDF στην υγρασία, περιορισμένη θερμική αντοχή (με συνακόλουθη παραμόρφωση σε αυξημένες θερμοκρασίες), μεγάλος χρόνος παραγωγής λόγω γεωμετρικών επιλογών και χρήση «φακέλου» που επέτρεπε ανεπιθύμητη μετακίνηση ρητίνης σε νεκρούς όγκους. Αυτό αύξησε την κατανάλωση ρητίνης, δυσχέρανε την αποκόλληση του τεμαχίου και επιμήκυνε τον χρόνο καθαρισμού/επαναπροετοιμασίας της μήτρας, ενώ δεν διευκόλυνε την αξιόπιστη ευθυγράμμιση των τμημάτων της.



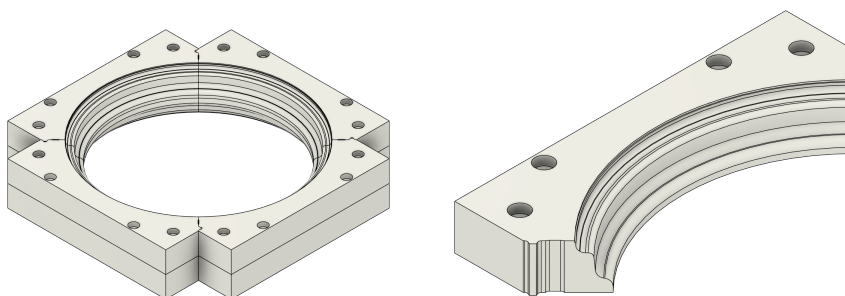
Σχήμα 4.4: Μήτρα στεφανιού (MDF) και τομή της.

4.2.2 Προσπάθεια 2

Με στόχο την επίλυση των προβλημάτων της πρώτης έκδοσης, επιλέχθηκε νέο υλικό κατασκευής, το πολυαιθυλένιο υπερυψηλού μοριακού βάρους (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene, UHMWPE) λόγω εξαιρετικής χημικής αντοχής, μεγαλύτερης θερμικής σταθερότητας και χαμηλής επιφανειακής ενέργειας που μειώνει/καθιστά περιττούς τους παράγοντες αποδέσμευσης, μειώνοντας τον χρόνο προετοιμασίας.

Μήτρα Στεφανιού

Ανασχεδιάστηκαν οι συνδέσεις των τμημάτων με κατάλληλες γεωμετρίες για θετική ευθυγράμμιση, ενώ η χρήση μεγάλων μονοκόμματων στοιχείων UHMWPE μείωσε τον αριθμό αρμών, άρα και τον χρόνο κατεργασίας/συναρμολόγησης. Η μορφή της μήτρας επιτρέπει σφράγιση της σακούλας στις φλάντζες, περιορίζοντας τους ελεύθερους όγκους όπου μπορεί να κινηθεί η ρητίνη. Παρά το βελτιωμένο ποιοτικά αποτέλεσμα στο στεφάνι, η επίτευξη πλήρους στεγανότητας αποδείχθηκε απαιτητική λόγω των πολλών «ραφών», γεγονός που περιόρισε την πρακτικότητα της λύσης.

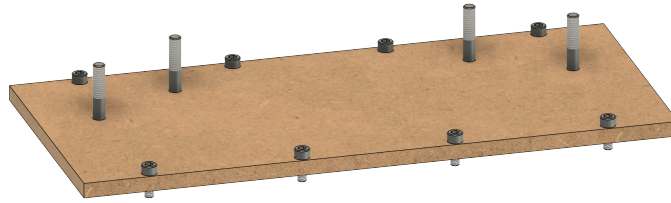


Σχήμα 4.5: Μήτρα στεφανιού (έκδοση 2) και τμήμα της.

Για τις δύο πρώτες εκδόσεις της μήτρας στεφανιού κατασκευάστηκε ειδική συσκευή πρόσδεσης/στήριξης για κατεργασία σε εργαλειομηχανή CNC (Σχήμα 4.6). Η διάταξη αυτή παρείχε κοινό σύστημα αναφοράς (μηδενισμοί, πείροι οδήγησης) για όλα τα τμήματα, εξασφαλίζοντας υψηλή επαναληψιμότητα και ακρίβεια στη μηχανουργική κατεργασία και τη συναρμολόγηση. Η επιλογή είναι ιδανική επειδή τα τμήματα είναι μεταξύ τους όμοια/ανταλλάξιμα, μειώνοντας τους χρόνους set-up και τις γεωμετρικές αποκλίσεις.

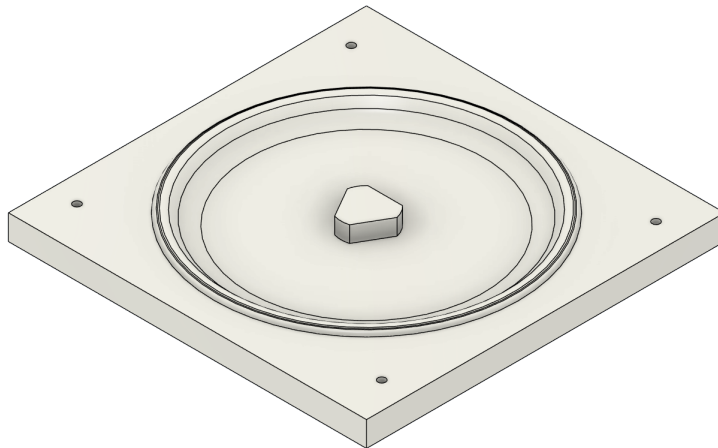
Μήτρα Πλευρικού Τοιχώματος

Η μήτρα αποτελείται από ένα μόνο τμήμα και ενσωματώνει την οπή του πλευρικού τοιχώματος. Δεν χρησιμοποιεί φάκελο, περιορίζοντας την απαιτούμενη ποσό-



Σχήμα 4.6: Συσκευή πρόσδεσης/στήριξης για τη μήτρα.

τητα ρητίνης και τον νεκρό όγκο. Η λύση κρίθηκε επιτυχής: ελάχιστη προετοιμασία χρήστη, εύκολη αποδέσμευση τεμαχίων, απουσία ορατών παραμορφώσεων τόσο στα εξαρτήματα όσο και στη μήτρα μετά από πολλούς θερμικούς κύκλους.

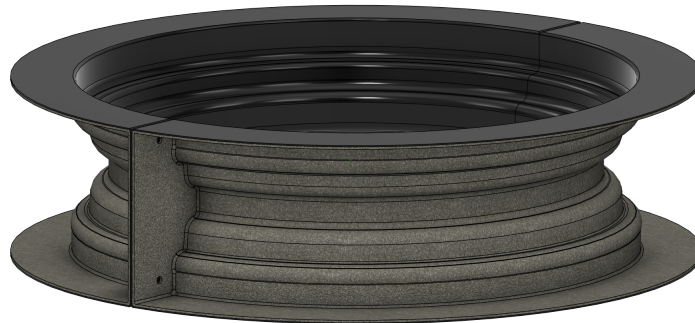


Σχήμα 4.7: Μήτρα πλευρικού τοιχώματος.

4.2.3 Προσπάθεια 3

Στην τρίτη και τελική έκδοση για το στεφάνι, η σχεδίαση επιτρέπει λειτουργία με ή χωρίς φάκελο χωρίς αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας ρητίνης. Ο αριθ-

μός των «ραφών» μειώθηκε σημαντικά, ενώ η μήτρα αποτελείται μόλις από δύο τμήματα με ενσωματωμένες γεωμετρίες ευθυγράμμισης και απελευθέρωσης για ασφαλή αποδέσμευση μετά την ωρίμανση.



Σχήμα 4.8: Τελική έκδοση μήτρας στεφανιού.

Ιδανικά, η κατασκευή θα γινόταν από UHMWPE, όμως οι διαστάσεις υπερβαίνουν τις δυνατότητες κατεργασίας του εργαστηρίου. Ως εκ τούτου, επιλέχθηκε κατασκευή με gelcoat-υαλονήματα-βινυλεστέρα, με τον βινυλεστέρα να προτιμάται έναντι του συμβατικού πολυεστέρα λόγω ανώτερων ιδιοτήτων. Ενδεικτικά για ρητίνες μετά από συνιστώμενο κύκλο ωρίμανσης: πολυεστέρας $\sigma_t \approx 75 \text{ MPa}$, $\text{HDT}@1.8 \text{ MPa} \approx 75^\circ\text{C}$, έναντι βινυλεστέρα $\sigma_t \approx 80 \text{ MPa}$, $\text{HDT}@1.8 \text{ MPa} \approx 100^\circ\text{C}$ [18], [19]. Στη σύνθετη κατασκευή οι τελικές ιδιότητες καθορίζονται κυρίως από το ενισχυτικό, το κλάσμα ίνας και την διαδικασία ωρίμανσης. Η μήτρα έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για τρία στεφάνια χωρίς ενδείξεις παραμόρφωσης ή φθοράς, προσφέροντας υψηλή πιθανότητα επιτυχούς παραγωγής ανά κύκλο. Κύριο μειονέκτημα παραμένει ο αυξημένος αριθμός χειρωνακτικών ωρών που απαιτούνται για την αρχική της κατασκευή.

Σύνοψη. Η εξέλιξη από MDF σε UHMWPE και, τελικά, σε σύνθετη μήτρα gelcoat-υαλονήματος-βινυλεστέρα οδήγησε σε βελτιωμένη στεγανότητα, καλύτερο έλεγχο ροής, ευκολότερη αποδέσμευση και υψηλότερη επαναληψιμότητα, διατηρώντας την κρίσιμη απαίτηση για λεία επιφάνεια στις ορατές/λειτουργικές διεπαφές και τραχεία επιφάνεια στις προς συγκόλληση ζώνες.

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

5.1 Μοντελοποίηση σύνθετων υλικών

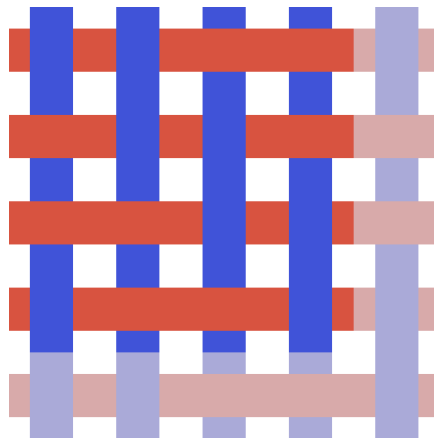
Για την αποδοτική μελέτη των σύνθετων χρησιμοποιείται αριθμητική ομογενοποίηση με τη χρήση Αντιπροσωπευτικού Στοιχείου Όγκου (Representative Volume Element, RVE). Η προσέγγιση αυτή μοντελοποιεί ένα περιοδικό τμήμα της μικροδομής (μήτρα–ενίσχυση, Σχήμα 5.1) και, με κατάλληλες οριακές συνθήκες, παρέχει ισοδύναμες ορθότροπες ιδιότητες σε μακροκλίμακα.

5.1.1 Παράμετροι φάσεων και γεωμετρία RVE

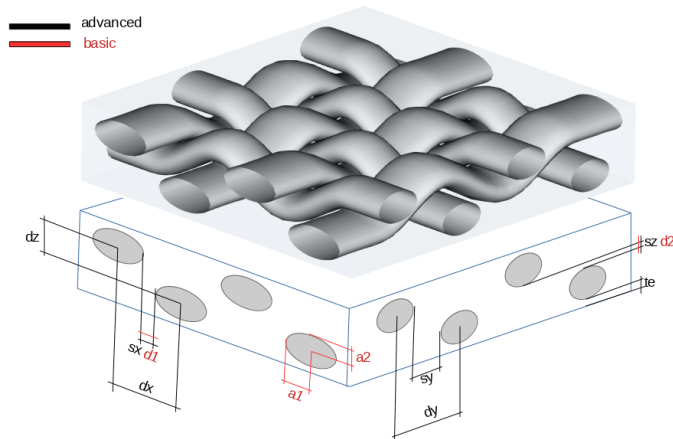
Η γεωμετρία του RVE ορίστηκε ώστε να είναι περιοδική χωρίς κενά. Οι τοπικοί άξονες 1–2 ευθυγραμμίστηκαν με το επίπεδο της ύφανσης. Το υπό μελέτη υλικό είναι ύφασμα *twill* 2×2 με ίνες άνθρακα T300 και εποξική ρητίνη έγχυσης Resoltech 1050/1058s. Οι ιδιότητες των φάσεων (μέτρο ελαστικότητας E , λόγος Poisson ν , πυκνότητα ρ) εισήχθησαν στο ANSA – λογισμικό προεπεξεργασίας (pre-processor) της BETA CAE Systems για προετοιμασία γεωμετρίας και πλεγματοποίηση FEA – με βάση δεδομένα κατασκευαστών και τυπικές βιβλιογραφικές τιμές (Πίνακας 5.1). Επιπλέον, στο ίδιο περιβάλλον ορίστηκαν και ελέγχθηκαν οι κατευθύνσεις των ινών και οι περιοδικές συνθήκες του RVE για συνέπεια με τη μικροδομή της ύφανσης.

Πίνακας 5.1: Μηχανικές ιδιότητες φάσεων που χρησιμοποιήθηκαν στο RVE.

Παράμετρος	Ενίσχυση (T300 CF)	Μήτρα (Resoltech 1050/1058s)
E (MPa)	230000	3360
ν	0.26	0.325
ρ (g cm ⁻³)	1.76	1.10



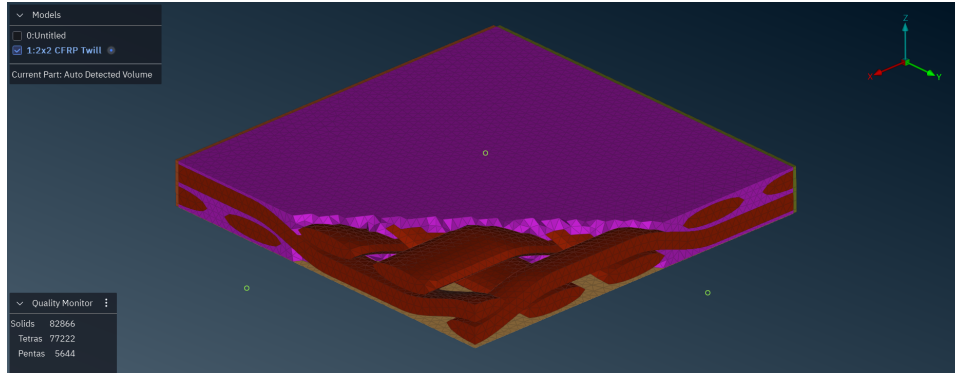
Σχήμα 5.1: Παράδειγμα περιοδικού τμήματος ύφανσης 2×2 Twill.



Σχήμα 5.2: Γεωμετρικά ορίσματα ύφανσης του σύνθετου υλικού.

5.1.2 Πλεγματοποίηση και οριακές συνθήκες

Η πλεγματοποίηση υλοποιήθηκε στο ANSA με αυξημένη λεπτομέρεια στις διεπιφάνειες ίνας-μήτρας. Επιβλήθηκαν περιοδικές οριακές συνθήκες μετατόπισης ώστε αντίθετα όρια να εμφανίζουν συμβατές παραμορφώσεις. Εκτελέστηκαν έξι δοκιμές υπό ελεγχόμενες παραμορφώσεις (εφελκυσμοί κατά 1, 2, 3 και διατμήσεις 12, 13, 23) στη γραμμική περιοχή. Η επίλυση έγινε με EPILYSIS ως στατικό πρόβλημα (SOL101).



Σχήμα 5.3: Μοντέλο RVE με εφαρμοσμένες οριακές συνθήκες.

5.1.3 Εξαγωγή ισοδύναμων ιδιοτήτων

Οι ισοδύναμες ιδιότητες προέκυψαν από τους μέσους τανυστές τάσεων– παραμορφώσεων του RVE:

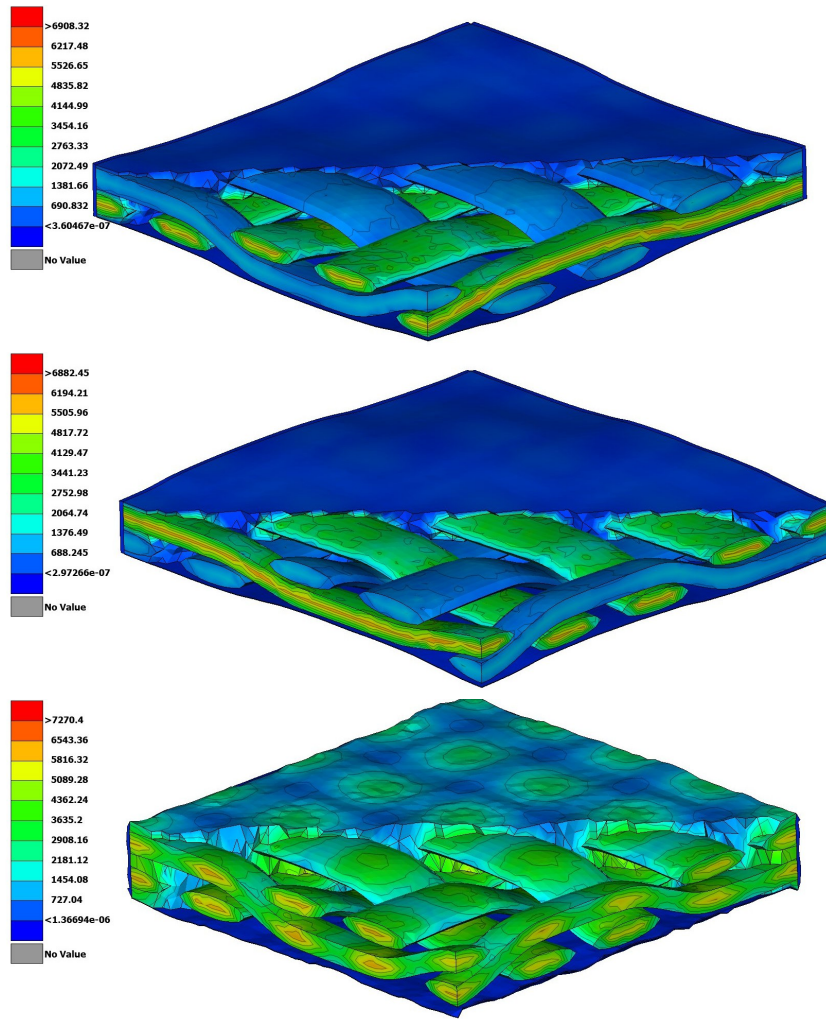
$$\langle \sigma \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma \, dV, \quad (5.1)$$

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon \, dV, \quad (5.2)$$

και ο πίνακας C εκτιμήθηκε από τα ζεύγη $\{\langle \sigma \rangle, \langle \varepsilon \rangle\}$ των δοκιμών. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2. Παρατηρείται σχεδόν ισοδυναμία $E_1 \approx E_2$ (ισορροπημένη ύφανση), υψηλότερο G_{12} έναντι G_{13} , G_{23} και τιμές ν_{ij} συμβατές με την αρχιτεκτονική.

Πίνακας 5.2: Ιδιότητες ορθότροπου υλικού από ομογενοποίηση RVE (μία στρώση twill 2×2).

Παράμετρος	Τιμή
Ποσοστό όγκου ινών V_f	0.4536
Ποσοστό όγκου μήτρας V_m	0.5464
E_1 (MPa)	52373.65
E_2 (MPa)	52419.52
E_3 (MPa)	9732.90
ν_{12}	0.1447
ν_{13}	0.0745
ν_{23}	0.4005
G_{12} (MPa)	8525.90
G_{13} (MPa)	3205.75
G_{23} (MPa)	3206.66



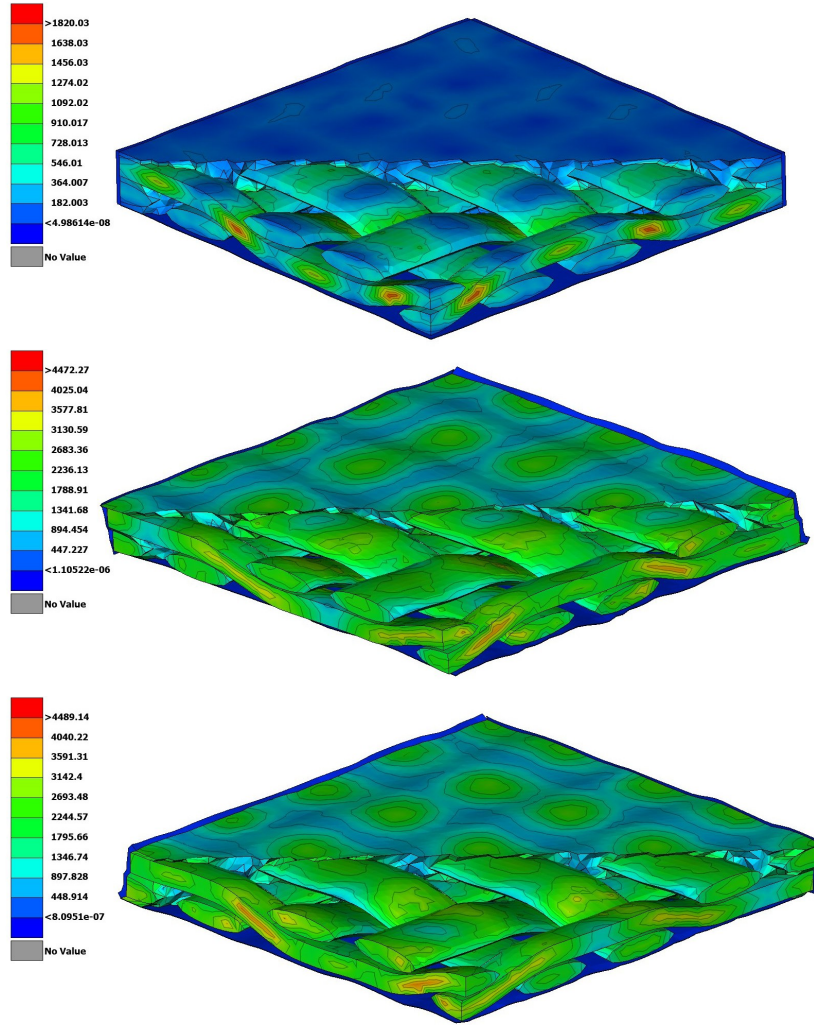
Σχήμα 5.4: Πεδία τάσεων/παραμορφώσεων RVE — Εφελκυσμός

Η γραφική αναπαράσταση των μέτρων ελαστικότητας και διάτμησης που εξήχθησαν από την ομογενοποίηση παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.6–5.7.

5.1.4 Πυκνότητα, εκτίμηση μάζας και σχολιασμός

Με $V_f = 0.4536$, $V_m = 0.5464$ και πυκνότητες $\rho_f = 1.76 \text{ g cm}^{-3}$ (T300), $\rho_m = 1.10 \text{ g cm}^{-3}$ (Resoltech 1050/1058s), η ισοδύναμη πυκνότητα (γραμμικός κανόνας μίξης) είναι:

$$\rho_{eq} = V_f \rho_f + V_m \rho_m = 1399.4 \text{ kg m}^{-3}. \quad (5.3)$$

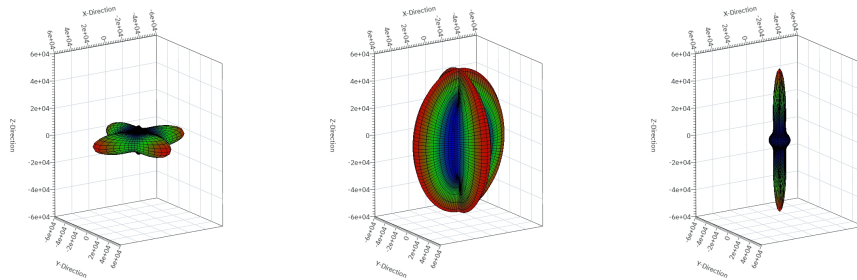


Σχήμα 5.5: Πεδία τάσεων/παραμορφώσεων RVE — Διάτμηση

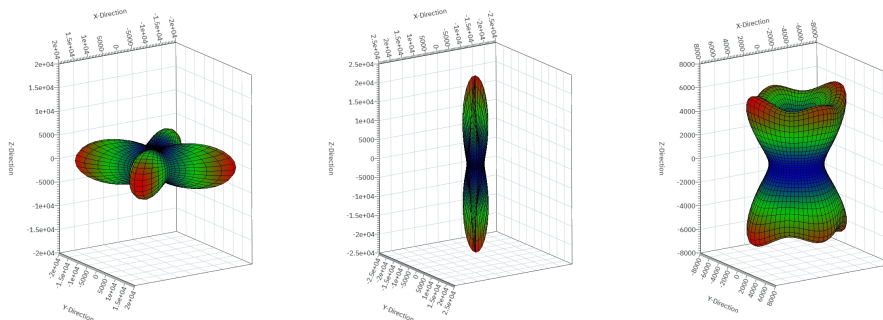
Τα κλάσματα κατά μάζα προκύπτουν:

$$w_f = \frac{V_f \rho_f}{\rho_{eq}} \approx 0.570, \quad w_m = 1 - w_f \approx 0.430. \quad (5.4)$$

Η επιφανειακή μάζα ανά πάχος είναι $m'' = \rho_{eq} t$ · για $t = 1 \text{ mm}$ δίνει $m'' = 1.399 \text{ kg m}^{-2}$. Για τυπικό επιφανειακό βάρος ίνας 200 g/m^2 εκτιμάται πάχος στρώσης $t \approx 0.251 \text{ mm}$ και επιφανειακή μάζα $\sim 0.351 \text{ kg/m}^2$.



Σχήμα 5.6: Μέτρα ελαστικότητας E_{11} , E_{22} , E_{33} από την ομογενοποίηση του RVE.



Σχήμα 5.7: Μέτρα διάτμησης G_{12} , G_{23} , G_{13} από την ομογενοποίηση του RVE.

5.1.5 Κριτήρια αστοχίας και όρια αντοχών

Για την αποτίμηση ασφάλειας χρησιμοποιήθηκαν τα κριτήρια Tsai–Wu και *Max Stress* ανά στρώση με όρια για μία στρώση twill 2×2 T300/Resoltech:

$$X_t = Y_t = 900 \text{ MPa}, \quad X_c = Y_c = 650 \text{ MPa}, \quad S \equiv S_{12} = 100 \text{ MPa}.$$

Η εξίσωση Tsai–Wu διαμορφώνεται με αντίστοιχους συντελεστές και αξιολογείται στον τοπικό άξονα κάθε στρώσης. Για εκτός επιπέδου δράσεις εφαρμόζονται όρια σε S_{13} , S_{23} όπου απαιτείται.

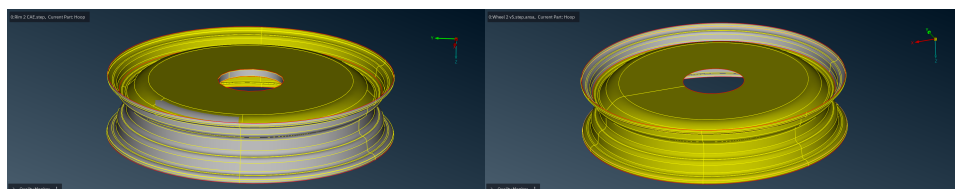
5.2 Προεπεξεργασία μοντέλου τροχού

Η προεπεξεργασία στο ANSA στόχευσε στη δημιουργία συνεκτικής γεωμετρίας που λειτουργεί ως εργαλείο διαστρωμάτωσης. Διατηρήθηκαν μόνο οι εξωτερικές επιφάνειες που εδράζονται στο καλούπι ώστε να παραμένουν αμετάβλητες με την αλλαγή πάχους. Έτσι το εξωτερικό περίγραμμα μένει σταθερό και η αύξηση πάχους υλοποιείται προς το εσωτερικό μέσω στρώσεων και πυρήνων.

Ο γεωμετρικός καθαρισμός έγινε με συγχωνεύσεις επιφανειών, διόρθωση ελεύθερων ακμών και μικρο-κενών, αφαίρεση λεπτομερειών που δημιουργούν εκφυλισμένα στοιχεία, ενοποίηση προσανατολισμών και δημιουργία καθαρών γραμμών

διαχωρισμού για αλλαγές υλικού/πάχους. Το εργαλείο *Geometry Check* χρησιμοποιήθηκε επαναληπτικά για αυτόματες ή ημι-αυτόματες διορθώσεις.

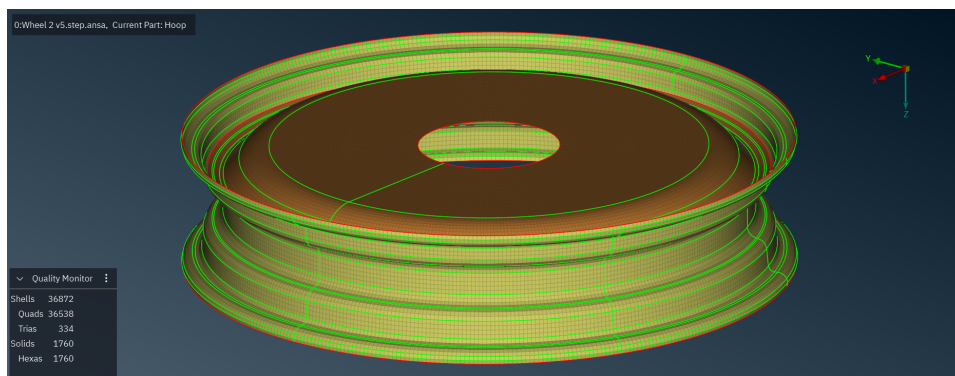
Παράλληλα ορίστηκαν οι επιφάνειες οριακών συνθηκών (στεφάνι, πλευρικό τοίχωμα, περιοχές σύνδεσης) ώστε να γίνεται με ακρίβεια και ταχύτητα η ανάθεση των φορτίων και των περιορισμών.



Σχήμα 5.8: Γεωμετρία πριν και μετά το στάδιο προεπεξεργασίας.

5.3 Δημιουργία και βελτιστοποίηση πλέγματος

Η επιλογή ανάμεσα σε 2D (κελύφη) και 3D (στερεά) στοιχεία, καθώς και ο τύπος στοιχείου, καθορίζονται από το υπό μελέτη φαινόμενο και το υπολογιστικό κόστος. Στο παρόν, το συνολικό πεδίο παραμορφώσεων μελετήθηκε κυρίως με 2D κελύφη για ακρίβεια στις επιφανειακές παραμορφώσεις, ενώ 3D στοιχεία χρησιμοποιούνται για τη μελέτη διαστρωματικών φαινομένων.



Σχήμα 5.9: Πλέγμα του τροχού μετά τη βελτιστοποίηση.

5.3.1 Στρατηγική πλέγματος και «ροή» στοιχείων

Κύρια αρχή ήταν η «ροή» του πλέγματος: ευθυγράμμιση γραμμών και ακμών με τις κύριες κατευθύνσεις γεωμετρίας και φόρτισης ώστε να αποφεύγονται τεχνητές τοπικές δυσκαμψίες.

- **Στεφάνι:** τετράπλευρα στοιχεία σε κανονικό μοτίβο, ευθυγραμμισμένα με την περιφέρεια και την αξονική διεύθυνση για ομαλή μεταφορά τάσεων.

- **Πλευρικό τοίχωμα:** μεικτό πλέγμα quads–trias σε κυκλικό μοτίβο με ακτινική συμμετρία και συνεχή σύζευξη με το στεφάνι.

Τα αυτόματα εργαλεία αποτέλεσαν αφετηρία, αλλά χρειάστηκαν χειρωνακτικές παρεμβάσεις για βελτίωση ποιότητας και συνέχειας.

5.3.2 Κριτήρια ποιότητας στοιχείων

Η ποιότητα του πλέγματος επηρεάζει άμεσα τη σταθερότητα και την ακρίβεια. Ελέγχθηκαν συστηματικά οι μετρικές του Πίνακα 5.3 με τα αντίστοιχα όρια.

Πίνακας 5.3: Κριτήρια ποιότητας πλέγματος και όρια αποδοχής.

Κριτήριο (ορισμός)	Όριο αποδοχής
Aspect ratio (NASTRAN)	≤ 3.0
Skewness (PATRAN, °)	≤ 45
Warping (NASTRAN, °)	≤ 10
Jacobian (ANSA, ελαχ.)	≥ 0.70
Min angle quads (NASTRAN, °)	≥ 45
Max angle quads (NASTRAN, °)	≤ 135
Min angle trias (NASTRAN, °)	≥ 30
Max angle trias (NASTRAN, °)	≤ 120

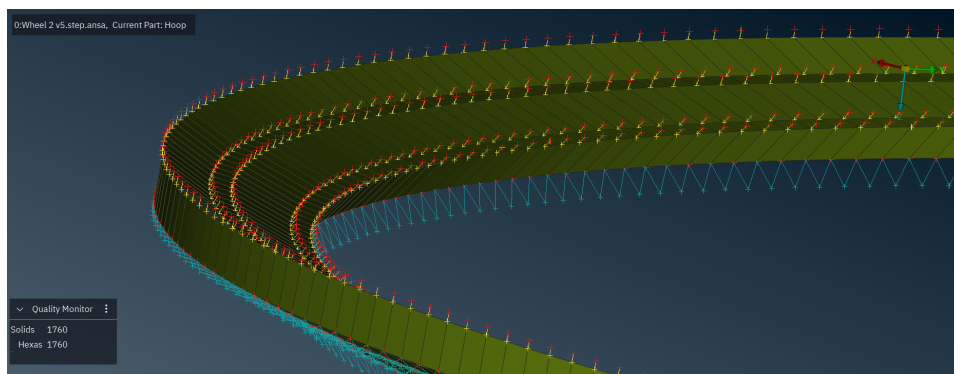
5.3.3 Μοντελοποίηση σύνδεσης κόλλας

Η συνδεσμολογία μεταξύ τμημάτων αποδόθηκε με λεπτό στρώμα στερεών *hex* στοιχείων (πάχος t_a) για το συγκολλητικό και συνδετικά RBE2/RBE3 για ελεγχόμενη κατανομή φορτίου. Η συνεχής μοντελοποίηση της κόλλας καταγράφει τη διατμητική και καμπτική συμμόρφωση, ενώ τα RBE3 διασφαλίζουν ομαλή μεταφορά φορτίου ανάμεσα σε ανόμοιες διακριτοποιήσεις.

5.4 Ανάθεση υλικού

Για να ελέγξουμε δείκτες αστοχίας σε επίπεδο στρώσης (ply), η προσομοίωση στήθηκε με ανάθεση υλικών στο ANSA και επίλυση στον EPILYSIS σε επίπεδο στρώσης.

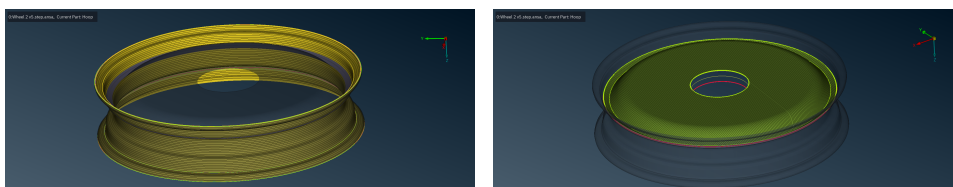
- **Μοντέλα υλικών.** Οι στρώσεις CFRP ορίστηκαν ως MAT8 (ορθότροπο έλασμα) με ιδιότητες από ομογενοποίηση, ενώ τα ισότροπα μέρη (π.χ. πυρήνας, κόλλες, ένθετα) ως MAT1.
- **Διαστρωμάτωση.** Η στοίβαξη περιγράφηκε με PCOMP/PCOMPG. Ενεργοποιήθηκε το GPLYID ώστε τα αποτελέσματα να ιχνηλατούνται ανά στρώση (post-processing per ply).



Σχήμα 5.10: Τμήμα μοντέλου συγκολλητικού υλικού με στρώμα *hex* και συνδετικά στοιχεία.

- **Τοπικοί άξονες υλικού.** Στο στεφάνι ο άξονας 1 (διεύθυνση ινών) τέθηκε παράλληλος στην περιφέρεια και στο πλευρικό τοίχωμα ακτινικά. Οι γωνίες των στρώσεων επιλέχθηκαν ώστε, όπου απαιτείται, η εντός-επιφάνειας απόκριση να είναι πρακτικά ισотροπική (quasi-isotropic).
- **Αναφορά πάχους.** Οι παράμετροι Z0/OFFSET ευθυγραμμίστηκαν με την επιφάνεια του καλουπιού, ώστε το μηδενικό επίπεδο και το πρόσημο της στοίβαξης να αντιστοιχούν στη φυσική ακολουθία τοποθέτησης.

Με αυτή τη ρύθμιση, οι δείκτες αστοχίας (π.χ. Tsai–Wu) αξιολογούνται για κάθε στρώση χωριστά και είναι δυνατή η στοχευμένη βελτιστοποίηση της στοίβαξης.

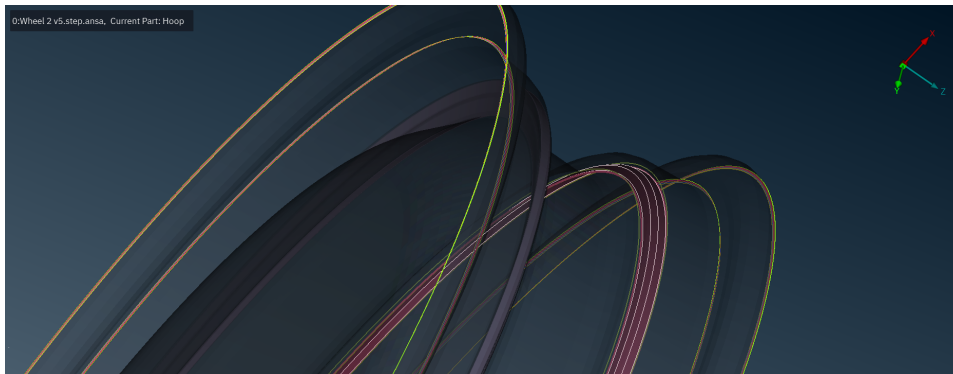


Σχήμα 5.11: Φορά ινών: (α) στεφάνι, (β) πλευρικό τοίχωμα.

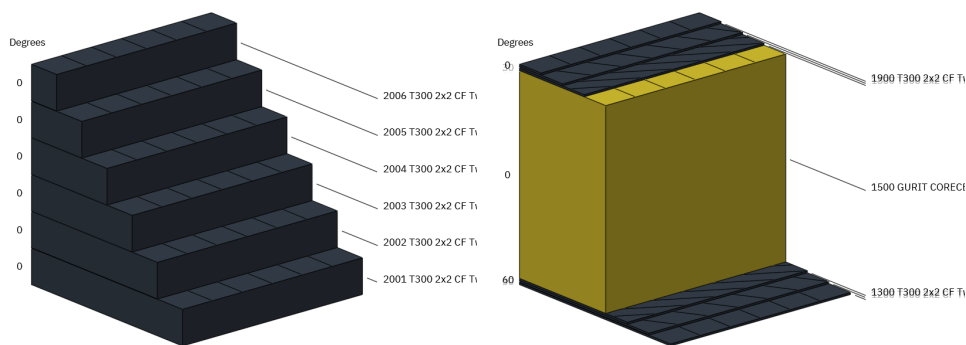
Στο πλαίσιο παραμετρικής διερεύνησης εξετάστηκαν διαφορετικοί πυρήνες, αριθμοί στρώσεων και τοπικές ενισχύσεις στο στεφάνι.

5.5 Οριακές συνθήκες

Στο ANSA ορίστηκαν σύνολα κόμβων και στοιχείων με ονοματοδοσία που επιτρέπει γρήγορη εφαρμογή φορτίων και περιορισμών. Η στήριξη στο κέντρο αναπαραστάθηκε με στοιχείο RBE2 (πάκτωση 6 DOF). Η επαφή με το οδόστρωμα εφαρμόστηκε σε κόμβους της ζώνης επαφής και κατανεμήθηκε στο στεφάνι μέσω



Σχήμα 5.12: Ενδεικτική τοπική ενίσχυση στο στεφάνι με γεωμετρία περιοχής και προσανατολισμούς.

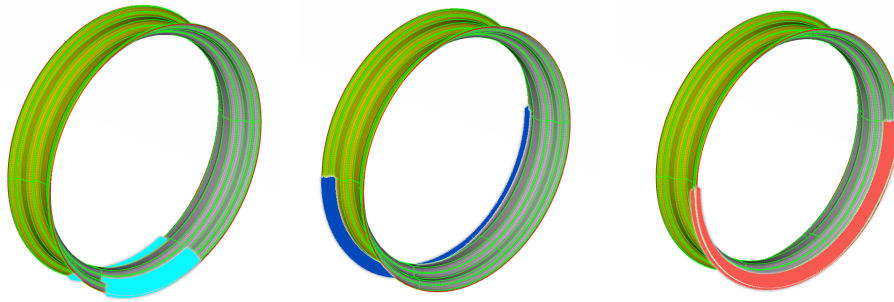


Σχήμα 5.13: Τελικές στοιβάξεις: (α) στεφάνι, (β) πλευρικό τοίχωμα.

στοιχείων RBE3. Χρησιμοποιήθηκαν διακριτές περιοχές: κάτω τόξο για βάρος, πέδηση και κρούση, αριστερό/δεξί τόξο για πλευρικές δράσεις. Η εσωτερική πίεση εφαρμόστηκε στις επιφάνειες του αεροθαλάμου, με ονομαστική τιμή λειτουργίας και σχεδιαστική τιμή διπλάσια από αυτή. Ο αναλυτικός υπολογισμός των φορτίων παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α'.

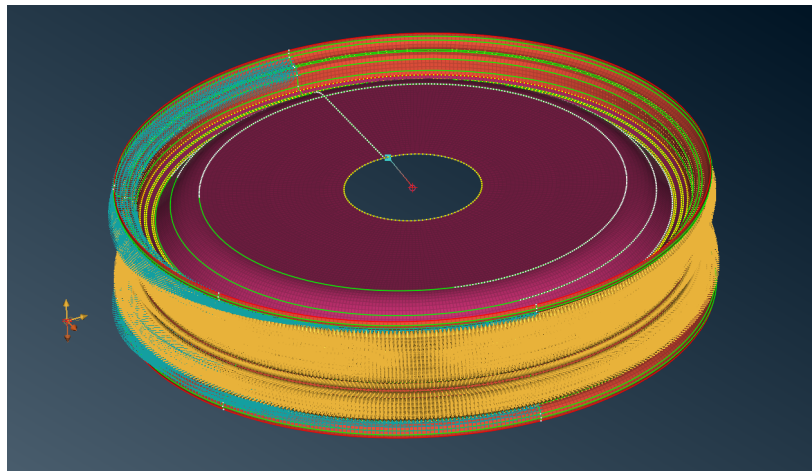
Φορτίσεις

- **Κατακόρυφη φόρτιση (βάρος):** δύναμη από την κατανομή βάρους στους κόμβους επαφής του κάτω τόξου με κατανομή στο αντίστοιχο τμήμα του στεφανιού.
- **Πλευρική φόρτιση σε στροφή:** οριζόντια δύναμη στους κόμβους επαφής του αριστερού/δεξιού τόξου με κατανομή στο στεφάνι.



Σχήμα 5.14: Περιοχές εφαρμογής φορτίσεων στο στεφάνι: κάτω, αριστερά, δεξιά.

- **Πέδηση:** εφαπτομενικές δυνάμεις σε υποσύνολο του κάτω τόξου (τόξο πέδησης) με χωρική κατανομή.
- **Εσωτερική πίεση:** ομοιόμορφη πίεση στις εσωτερικές επιφάνειες του στεφανιού με διεύθυνση τη νόρμα της επιφάνειας.
- **Κρούση (λακκούβα):** κατακόρυφος παλμός σύντομης διάρκειας στο κάτω τόξο ως DAREA+TLOAD με κανονικοποιημένη ημιτονοειδή χρονοϊστορία $g(t)$ διάρκειας $T = 0.03086$ s.



Σχήμα 5.15: Ολοκληρωμένο μοντέλο τροχού έτοιμο για επίλυση.

5.6 Αποτελέσματα

Στόχος ήταν η επιλογή στοιβάξεων με ισορροπία μάζας, ακαμψίας και αντοχής. Πραγματοποιήθηκαν στατικές προσομοιώσεις (Subcases 1–4) και μία δυναμική κρούσης (Subcase 5). Για κάθε περίπτωση καταγράφηκαν η μάζα m από το

ANSA, η μέγιστη μετατόπιση u_{\max} και ο δείκτης Tsai–Wu (RF) ως ελάχιστη τιμή ανά στοιχείο/στρώση.

Κριτήρια αποδοχής και συνάρτηση κατάταξης Απορρίπτονται λύσεις με $RF < 1$ σε οποιοδήποτε σενάριο. Για τις υπόλοιπες, η βαθμολογία ορίζεται:

$$S = \begin{cases} 0, & \text{αν } \min_{s=1,\dots,5} RF_s < 1, \\ \frac{3 \max_{s=1,\dots,5} RF_s}{m^3 \left(\max_{s=1,\dots,5} u_s \right)^{3/2}}, & \text{διαφορετικά,} \end{cases} \quad (5.5)$$

όπου RF_s είναι ο δείκτης του σεναρίου s , u_s η μέγιστη μετατόπιση (mm) και m η μάζα (g). Η μορφή αξιολογεί το δυσμενέστερο σενάριο ως προς μετατόπιση, τιμωρεί έντονα την αύξηση μάζας και επιβραβεύει διαθέσιμο περιθώριο αντοχής. Οι ευαισθησίες

$$\frac{\partial \ln S}{\partial \ln m} = -3, \quad \frac{\partial \ln S}{\partial \ln u} = -\frac{3}{2}$$

δείχνουν ότι αύξηση μάζας κατά 10% μειώνει το S κατά περίπου 27%, ενώ αντίστοιχη αύξηση μετατόπισης κατά $\sim 14\%$.

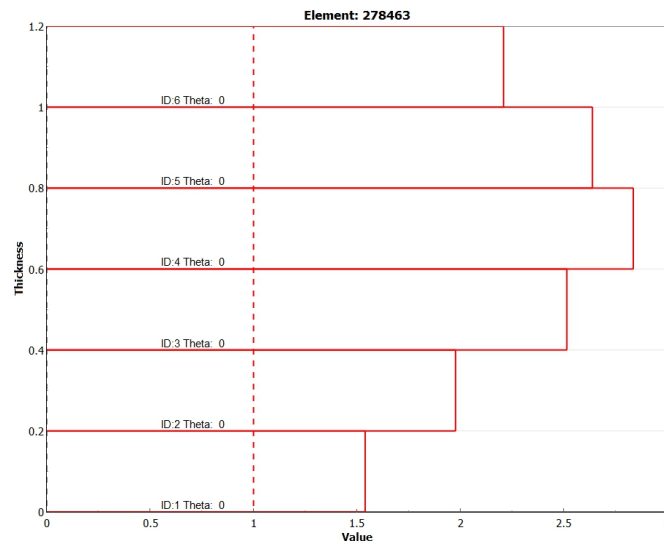
Ο Πίνακας 5.4 συνοψίζει τα αποτελέσματα. Η στοιβάξη R6W6 με πυρήνα 20 mm συγκέντρωσε το υψηλότερο κανονικοποιημένο σκορ (100 %), με όλες τις φορτίσεις ασφαλείς και μετατοπίσεις σε αποδεκτά επίπεδα. Η παραλλαγή με πρόσθετη ενίσχυση 2 mm στο στεφάνι βελτίωσε την ακαμψία με αύξηση μάζας, οδηγώντας σε συνολικό σκορ 93 %. Λύσεις με λεπτότερο ή χωρίς πυρήνα, παρότι σε ορισμένα σενάρια υπερβαίνουν το όριο αντοχής, εμφανίζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις και χαμηλότερη κατάταξη.

Πίνακας 5.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων.

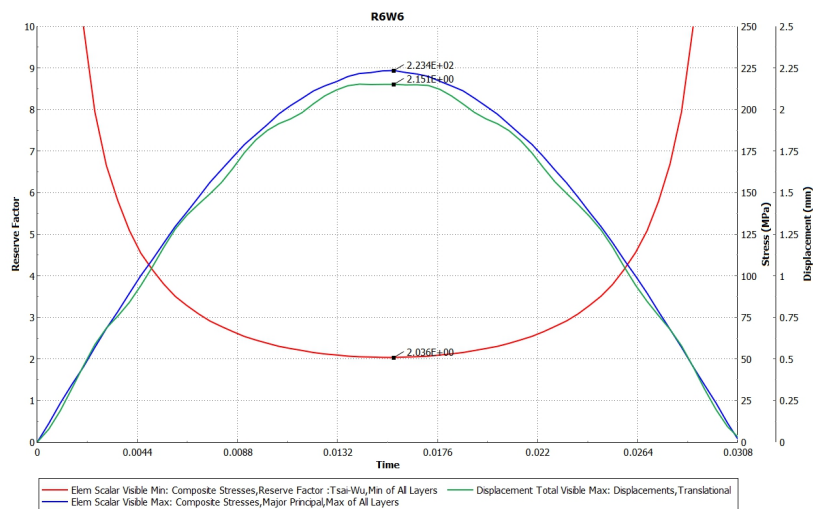
Layup		Mass (g)	Fail	Reserve Factor (Tsai-Wu)					Max Displacement (mm)					Normalized Score (%)
Code	Description			RF1	RF2	RF3	RF4	RF5	D1	D2	D3	D4	D5	
R6W6	20mm Core Wall	635	0	2.033	1.863	1.540	1.611	2.036	2.166	2.289	6.748	5.667	2.152	100%
R6W6	20mm Core Wall + 2mm Core Rim	776	0	2.869	2.841	2.479	2.752	2.875	1.446	1.568	5.963	4.253	1.440	93%
R5W6	20mm Core Wall	590	0	1.613	1.466	1.203	1.313	1.614	2.685	2.863	7.467	6.272	2.686	85%
R6W8	20mm Core Wall	659	0	1.618	1.470	1.211	1.502	1.620	2.489	2.663	6.446	5.074	2.485	76%
R6W6*	20mm Core Wall + LR	660	0	2.084	1.911	1.592	1.632	2.087	1.883	1.968	7.704	6.780	1.868	75%
R6W6	15mm Core Wall	596	0	2.026	1.857	1.521	1.594	2.027	2.445	2.576	10.670	8.862	2.471	61%
R6W6	10mm Core Wall	557	0	2.014	1.848	1.485	1.548	2.019	3.048	3.200	16.450	13.130	3.053	39%
R6W6	No Core	478	1	1.566	1.379	0.147	0.180	0.899	39.330	43.850	363.60	280.10	77.50	0%
R4W6	20mm Core Wall	545	1	1.222	1.101	0.894	1.063	1.223	10.434	12.039	20.837	12.792	3.586	0%

Οι κατανομές τάσεων και του δείκτη Tsai–Wu δείχνουν ότι οι κρίσιμες περιοχές βρίσκονται στα χείλη του στεφανιού και στη ζώνη του κέντρου, όπου συνυπάρχουν κάμψη και μεμβρανικές δράσεις (Σχήματα 5.19, 5.20). Η στοιβάξη R6W6 διατηρεί ικανοποιητικό περιθώριο με παραμορφώσεις εντός αποδεκτών ορίων.

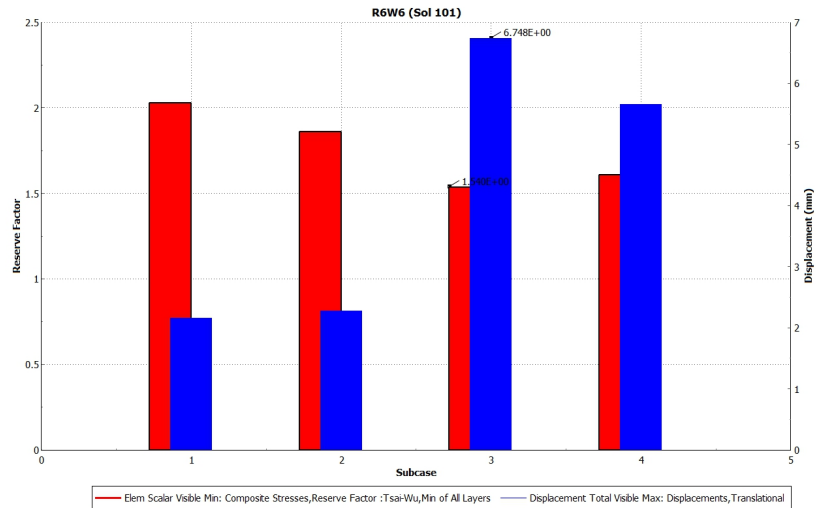
Σύνοψη Η κατάταξη αναδεικνύει ως βασική επιλογή τη R6W6 με πυρήνα 20 mm. Η τοπική ενίσχυση 2 mm στο χείλος αυξάνει την ακαμψία με κόστος μάζας, ενώ οι λεπτότεροι ή μηδενικοί πυρήνες υπολείπονται σε ακαμψία.



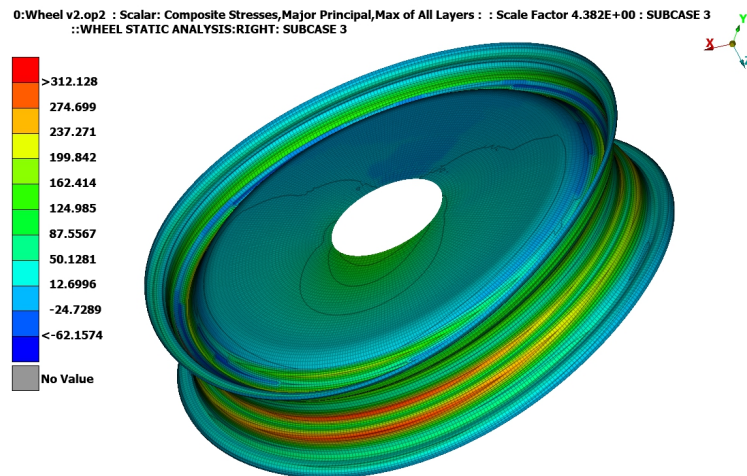
Σχήμα 5.16: Απεικονίζεται ο δείκτης αντοχής ανά στρώση για το στοιχείο με τη μικρότερη τιμή RF . Η κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο όριο $RF = 1$.



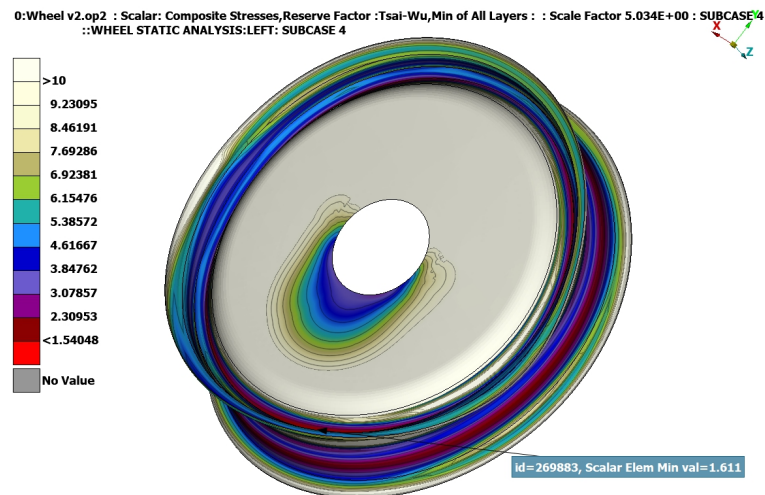
Σχήμα 5.17: Χρονική εξέλιξη της μέγιστης μετατόπισης και των ακραίων τιμών τάσεων/ RF στο σενάριο κρούσης.



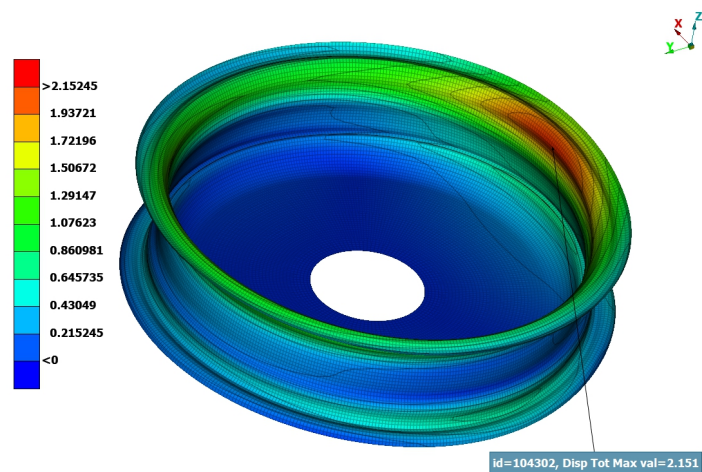
Σχήμα 5.18: Σύγκριση ανά σενάριο φόρτισης: ελάχιστος δείκτης Tsai–Wu και μέγιστη μετατόπιση.



Σχήμα 5.19: Κύριες τάσεις στο σενάριο 3. Οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται κοντά στα χείλη του στεφανιού και σε ζώνες αλλαγής καμπυλότητας.



Σχήμα 5.20: Ελάχιστος δείκτης Tsai–Wu σε όλα τα στρώματα (σενάριο 4).



Σχήμα 5.21: Κατανομή της ολικής μετατόπισης στο σενάριο κρούσης.

Κεφάλαιο 6

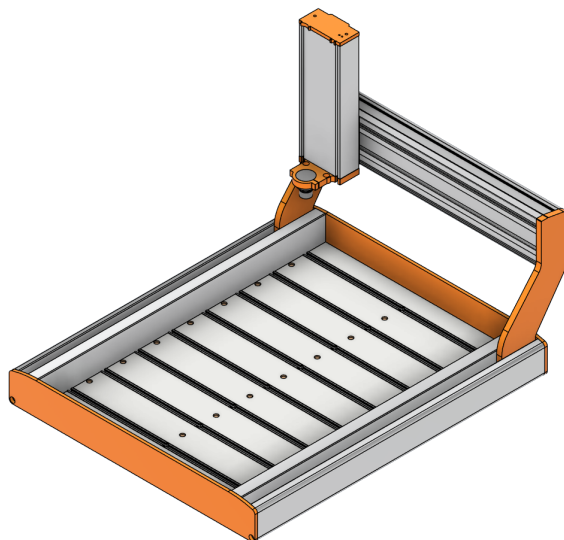
Διαδικασία Κατασκευής

Η διαδικασία κατασκευής του τροχού αποτελείται από διαδοχικά στάδια που καλύπτουν όλο το φάσμα από τον ψηφιακό σχεδιασμό μέχρι το τελικό σύνθετο εξάρτημα. Αρχικά, γίνεται η μοντελοποίηση των κατεργασιών CNC και των απαιτούμενων κοπτικών εργαλείων, ώστε να διασφαλιστεί ότι το τρισδιάστατο σχέδιο μπορεί να παραχθεί με ακρίβεια στις διαθέσιμες μηχανές. Στη συνέχεια ακολουθεί η παραγωγή του κώδικα μηχανής (G-code), ο οποίος καθορίζει τις τροχιές και τις παραμέτρους κατεργασίας για τη δημιουργία των καλουπιών.

Η κατασκευή των καλουπιών πραγματοποιήθηκε με διαφορετικές μεθόδους, προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια και αντοχή, αλλά και να διερευνηθεί η αποδοτικότητα κάθε προσέγγισης. Τέλος, το τελικό στάδιο περιλαμβάνει την παραγωγή του ίδιου του τροχού μέσω της μεθόδου έγχυσης ρητίνης υπό κενό (vacuum infusion), η οποία επιλέχθηκε λόγω της δυνατότητάς της να προσφέρει υψηλή ποιότητα σύνθετου υλικού, χαμηλό ποσοστό κενών και επαναληψιμότητα στη διαδικασία.

6.1 Μοντελοποίηση φρέζας CNC και κοπτικών εργαλείων

Για την ακριβή κατασκευή των καλουπιών που απαιτούνται για τα διάφορα μέρη του τροχού, αναπτύχθηκαν λεπτομερή μοντέλα μηχανής (σχήμα 6.1) και εργαλείων CNC. Ο πρωταρχικός στόχος της δημιουργίας αυτών των προσομοιώσεων είναι η μελέτη της τροχιάς των εργαλείων πριν από την πραγματική κατεργασία, επιτρέποντας τον εντοπισμό και την πρόληψη πιθανών συγκρούσεων μεταξύ εργαλείου, εξαρτήματος και τεμαχίου. Επιπλέον, με την προσομοίωση της τροχιάς, είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της στρατηγικής κατεργασίας για την ενίσχυση της ακρίβειας των διαστάσεων, τη βελτίωση της επιφάνειας και τη μείωση του συνολικού χρόνου κατεργασίας. Μέσω της επαναληπτικής ανάλυσης και βελτίωσης αυτών των προσομοιωμένων διαδρομών εργαλείων, η διαδικασία κατασκευής έγινε πιο αποτελεσματική, ακριβής και αξιόπιστη, διασφαλίζοντας τελικά ότι τα παραγόμενα καλούπια ανταποκρίνονταν στις σχεδιασμένες προδιαγραφές και βελτιώνοντας τη συνολική ποιότητα και απόδοση των τελικών εξαρτημάτων του τροχού.



Σχήμα 6.1: Μοντέλο φρέζας αριθμητικού ελέγχου Stepcraft M700.

6.2 Παραγωγή G κώδικα

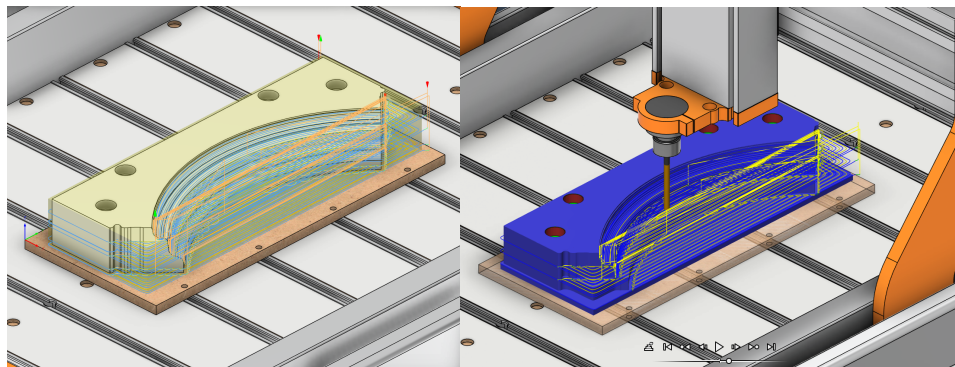
Η παραγωγή του κώδικα μηχανής για την κατεργασία των καλουπιών του τροχού έγινε στο Autodesk Fusion, στο περιβάλλον CAM. Αρχικά, εισάγεται το τρισδιάστατο μοντέλο και ορίζεται το τεμάχιο (stock) που θα κατεργαστεί με τις ονομαστικές διαστάσεις του. Στη συνέχεια καθορίζεται το τοπικό μηδέν (π.χ. G54) και το αντίστοιχο σύστημα αξόνων, ώστε η φρέζα να διαθέτει σαφή αναφορά για τις κινήσεις του εργαλείου σε σχέση με το τεμάχιο.

Η στρατηγική κατεργασίας περιλάμβανε δύο βασικά στάδια. Για το εκχόνδρισμα χρησιμοποιήθηκε η στρατηγική Adaptive Clearing, η οποία επιτρέπει την αποδοτική απομάκρυνση μεγάλου όγκου υλικού με σταθερό φορτίο κοπής. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν στρατηγικές 2D/3D Contour για την αποπεράτωση, ώστε να επιτευχθεί η τελική γεωμετρία με την απαιτούμενη ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας.

Για κάθε διαδρομή καθορίστηκαν οι παράμετροι κοπής, δηλαδή τα χαρακτηριστικά του εργαλείου (υλικό, διάμετρος, μήκος, σχήμα, κ.ά.), οι στροφές τις ατράκτου, οι προώσεις, καθώς και τα βάθη ανά πέρασμα. Παράλληλα, ελέγχθηκαν οι είσοδοι-έξοδοι του εργαλείου και τα όρια κατεργασίας. Η διαδικασία προσομοιώθηκε σε περιβάλλον CAM, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι οι τροχιές είναι ελεύθερες από συγκρούσεις και ότι ο χρόνος κατεργασίας είναι αποδεκτός.

Οι τελικές τροχιές μετατράπηκαν σε G κώδικα μέσω του μεταγλωττιστή (post-processor) UCCNC, ο οποίος είναι συμβατός με το CNC κέντρο κατεργασίας που χρησιμοποιήθηκε. Το παραγόμενο αρχείο περιλαμβάνει τους μηδενισμούς, τις αλ-

λαγές εργαλείων και τις ακολουθίες ασφάλειας, και μεταφέρθηκε στη φρέζα για εκτέλεση. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε η ακριβής κατεργασία των καλουπιών σύμφωνα με το αρχικό μοντέλο.



Σχήμα 6.2: Τροχιά και προσομοίωση κοπτικού εργαλείου στο Autodesk Fusion.

6.3 Κατασκευή Πρωτοτύπου

6.3.1 Μήτρα Πλευρικού Τοιχώματος

Η μήτρα του πλευρικού τοιχώματος κατασκευάστηκε από UHMWPE, υλικό με χαμηλή επιφανειακή ενέργεια και καλή κατεργασιμότητα, που επιτρέπει απελευθέρωση του εξαρτήματος χωρίς χρήση αποκολλητικών. Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιήθηκε κομμάτι διαστάσεων $470 \times 470 \times 50$ mm, το οποίο κατεργάστηκε στη φρέζα Stepcraft M700.

Για την ασφαλή πρόσδεση στο τραπέζι διανοίχθηκαν τέσσερις οπές σύσφιξης πριν από την κύρια κατεργασία. Η ακολουθία εργασιών οργανώθηκε σε δύο στάδια: εκχόνδριση με Adaptive Clearing για απομάκρυνση του κύριου όγκου με σταθερό φορτίο κοπής και αποπεράτωση με 2D/3D Contour ώστε να επιτευχθεί η τελική γεωμετρία και ποιότητα επιφάνειας. Χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά εργαλεία διαμέτρου 6 mm (τρυπάνι, κονδύλι επίπεδης απόλξης, κονδύλι σφαιρικής απόλξης), ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι αλλαγές εργαλείων και ο νεκρός χρόνος. Οι τροχιές επαληθεύτηκαν σε προσομοίωση για αποφυγή συγκρούσεων και έλεγχο του χρόνου κατεργασίας, ενώ τα τελικά προγράμματα περιείχαν τις απαραίτητες ακολουθίες μηδενισμών, εναλλαγών εργαλείων και κινήσεων ασφαλείας. Τα ενδεικτικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

6.3.2 Μήτρα Στεφανιού

Η μήτρα του στεφανιού κατασκευάστηκε ως διμερές καλούπι από υαλονήματα με ρητίνη βινυλεστέρα. Η διαδικασία ξεκίνησε με την κατεργασία θετικού μοντέλου από αφρό στη φρέζα CNC. Το μοντέλο στοκαρίστηκε, ασταρώθηκε και τρί-

Τύπος Εργαλείου	Διάμετρος (mm)	Χρήση
Τρυπάνι	6	Διάνοιξη οπών συναρμολόγησης
Κονδύλι επίπεδης απόληξης	6	Αδρή και ημιτελής κατεργασία
Κονδύλι σφαιρικής απόληξης	6	Τελική μορφοποίηση επιφανειών

Πίνακας 6.1: Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή της μήτρας

φτηκε μέχρι να επιτευχθεί λεία και ομοιόμορφη επιφάνεια. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν διαχωριστικά και διαμορφώσεις από κερί για τις γεωμετρίες ευθυγράμμισης και αποδέσμευσης.

Κάθε τμήμα της μήτρας κατασκευάστηκε σε δύο βήματα. Αρχικά εφαρμόστηκε gelcoat, ώστε να αποδοθούν καθαρά οι λεπτομέρειες και να παραχθεί κατάλληλη επιφάνεια για το καλούπι. Πριν από την πλήρη σκλήρυνση στρώθηκαν υαλοϋφάσματα με βινυλεστέρα, τα οποία αποτέλεσαν το κύριο σώμα της μήτρας. Μετά την ωρίμανση αφαιρέθηκαν τα διαχωριστικά και οι κέρινες διαμορφώσεις και η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για το δεύτερο μισό. Στο τέλος, τα δύο τμήματα τριμαρίστηκαν, σπάστηκαν οι αιχμηρές ακμές, αποκαταστάθηκαν μικρές φθορές από την απομάκρυνση του θετικού μοντέλου, γυαλίστηκε η εσωτερική επιφάνεια και ανοίχθηκαν οπές σύσφιξης για την ακριβή σύνδεση των δύο ημιμορίων κατά την διαμόρφωση του τροχού.



Σχήμα 6.3: Στάδια κατασκευής μήτρας στεφανιού

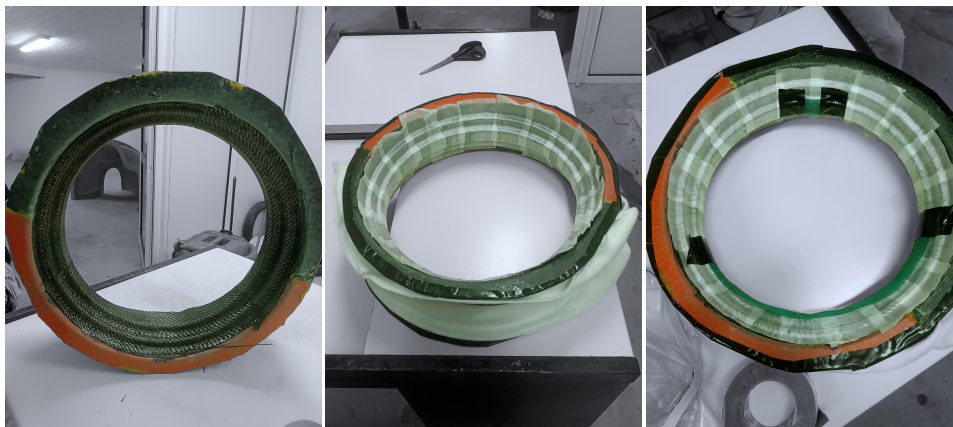
6.4 Κατασκευή Τροχού με Μέθοδο Διάχυσης Ρητίνης

Η κατασκευή του τροχού ξεκινά με την προετοιμασία του καλουπιού, όπου όλες οι επιφάνειες καθαρίζονται από σκόνη και λάδια για την αποφυγή ατελειών στο τελικό τεμάχιο. Ακολουθεί η εφαρμογή κεριού σε διαχωριστικά και οπές για την προστασία του καλουπιού και την αποτροπή συγκόλλησης, ενώ ταυτόχρονα απλώνεται πολυβινυλική αλκοόλη (PVA) ως διαχωριστικό υλικό, δημιουργώντας λεπτό προστατευτικό στρώμα ανάμεσα στο καλούπι και το παραγόμενο εξάρτημα.

Η επόμενη φάση περιλαμβάνει την κοπή των υφασμάτων σύμφωνα με το σχέδιο στρώσεων: 18 κομμάτια για το στεφάνι, 6 για το τοίχωμα και τον πυρήνα. Κατά

την κοπή σημειώνεται η κατεύθυνση των ινών για διατήρηση των επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων. Σε περιοχές που δέχονται αυξημένα φορτία τοποθετούνται συμπληρωματικά υφάσματα, όπως ενισχυτικές λωρίδες και τοπικές ενισχύσεις, για βελτίωση της αντοχής. Η τοποθέτηση των υφασμάτων στο καλούπι γίνεται με προσοχή, ακολουθώντας τη σωστή σειρά και τον καθορισμένο προσανατολισμό, ώστε να εξασφαλίζεται αποτελεσματική μεταφορά φορτίων και αποφυγή πτυχώσεων. Ο έλεγχος συμβατότητας με το σχέδιο γίνεται σε κάθε στάδιο.

Ακολουθεί η διαμόρφωση του συστήματος διάχυσης, με τοποθέτηση υφάσματος αποκόλλησης για εύκολη αφαίρεση μετά τη σκλήρυνση, στρώματος διανομής για ομοιόμορφη ροή της ρητίνης και σακούλας κενού για δημιουργία υποπίεσης. Οι σωληνώσεις εισαγωγής ρητίνης και κενού τοποθετούνται στρατηγικά ώστε να επιτευχθεί πλήρης εμποτισμός όλων των στρώσεων.

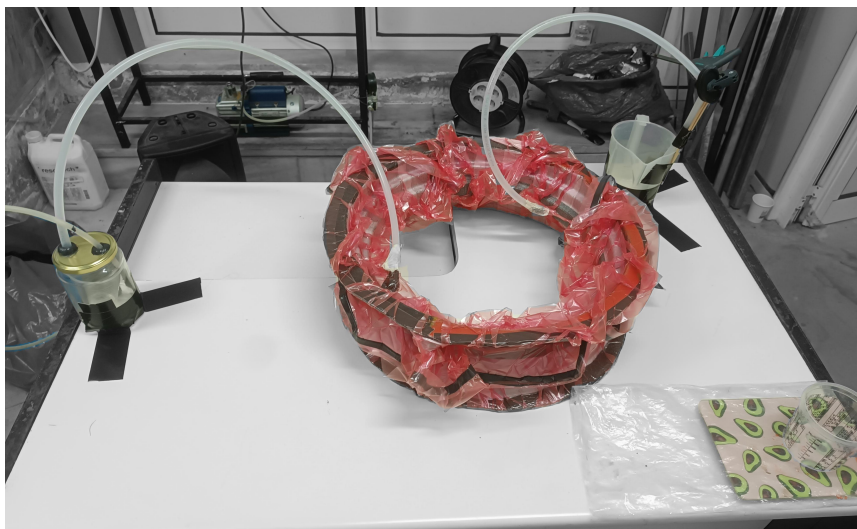


Σχήμα 6.4: Στάδια στοίβαξης υφασμάτων

Η διάχυση ξεκινά με την προετοιμασία και ανάμιξη της ρητίνης με τον σκληρυντή σε αναλογία 100:35, ακολουθούμενη από έλεγχο θερμοκρασίας και ιξώδους για σταθερή ροή χωρίς εγκλωβισμένο αέρα. Η εισαγωγή της ρητίνης υπό κενό εξασφαλίζει την πλήρη διείσδυση στις ίνες και την αποφυγή κενών.

Μετά τη διάχυση, η ωρίμανση πραγματοποιείται υπό σταθερό κενό και θερμοκρασία, με θερμικό κύκλο 16 ωρών στους 60°C, όπως ορίζει ο κατασκευαστής της ρητίνης, σε ειδικό φούρνο που κατασκευάστηκε για τον σκοπό αυτό. Το στάδιο αυτό ολοκληρώνει τη σκλήρυνση και σταθεροποιεί τις μηχανικές ιδιότητες.

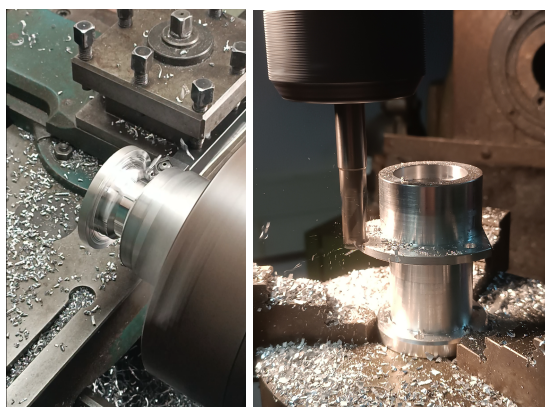
Η αφαίρεση του τροχού από το καλούπι γίνεται προσεκτικά για να αποφευχθούν φθορές, και ακολουθεί καθαρισμός και κοπή του περιττού υλικού για την τελική διαμόρφωση. Στη συνέχεια τα δύο επιμέρους εξαρτήματα συγκολλούνται με ειδική εποξική ρητίνη και υποβάλλονται εκ νέου σε θερμική επεξεργασία ωρίμανσης.



Σχήμα 6.5: Διάταξη διάχυσης ρητίνης

6.5 Κατασκευή Κέντρου

Το κέντρο αποτελείται από δύο μέρη: ένα που παραμένει μόνιμα στον τροχό και ένα που συνδέεται με τον προσαρμογέα. Και τα δύο σχεδιάστηκαν ώστε να κατασκευάζονται σε συμβατικές εργαλειομηχανές (τόρνος, φρέζα). Για κάθε εξάρτημα συντάχθηκαν κατασκευαστικά σχέδια με όλες τις απαραίτητες διαστάσεις και ανοχές, ώστε να διασφαλιστεί η σωστή συναρμογή με τον τροχό και τον προσαρμογέα.



Σχήμα 6.6: Κατεργασίες εξαρτημάτων

Ως υλικό επιλέχθηκε αλουμίνιο 7075. Οι στροφές και οι προώσεις ρυθμίστηκαν με βάση τις ιδιότητες του υλικού και τις προδιαγραφές των εργαλείων. Ο κύριος όγκος υλικού αφαιρέθηκε στον τόρνο, όπου διαμορφώθηκαν οι βασικές διαμέτροι,

οι επιφάνειες αναφοράς και οι κεντρικές οπές. Στη συνέχεια, οι τριγωνικές διαμορφώσεις και οι οπές πρόσδεσης κατεργάστηκαν στη φρέζα με χρήση διαιρέτη για ακριβή γωνιακή τοποθέτηση.

Οι οπές συναρμολόγησης του προσαρμογέα φέρουν σπείρωμα, το οποίο ανοίχτηκε στο χέρι μετά την κατεργασία των οπών οδηγών, ώστε να διασφαλιστεί καλή αίσθηση κοπής και καθαρή μορφή του σπειρώματος. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην ακρίβεια επαναπρόσδεσης του τεμαχίου μεταξύ διαδοχικών μετακινήσεων. Μετά από κάθε μεταφορά έγινε ευθυγράμμιση με ρολόι ένδειξης (γράφτη) επάνω σε επιφάνειες αναφοράς, μέχρι να επιτευχθεί η απαιτούμενη ομοαξονικότητα.

Κρίσιμες επιφάνειες για τη λειτουργία του συγκροτήματος είναι οι έδρες του προσαρμογέα όπου βρίσκονται τα έδρανα κύλησης, καθώς και η επιφάνεια επαφής του προσαρμογέα με το κέντρο του τροχού. Οι διαστάσεις και η γεωμετρία τους ελέγχθηκαν μετά την κατεργασία, σύμφωνα με τις ανοχές των σχεδίων. Η τελική επιβεβαίωση έγινε με δοκιμαστική συναρμολόγηση, έλεγχο χάρης και οπτικό έλεγχο της επαφής στις επιφάνειες έδρασης.



Σχήμα 6.7: Εξαρτήματα και συναρμολόγηση κέντρου

Κεφάλαιο 7

Δοκιμές και Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του νέου τροχού, ακολούθησε η πειραματική αξιολόγηση με δύο βασικούς στόχους: (α) την επιβεβαίωση της μηχανικής αντοχής της κατασκευής και (β) τη συγκριτική διερεύνηση της ενεργειακής και δυναμικής συμπεριφοράς του νέου τροχού έναντι του υφιστάμενου. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ειδική βάση δοκιμών, η οποία, σε συνδυασμό με αυτοματοποιημένα προγράμματα καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων, επέτρεψε την εκτέλεση πολλαπλών πειραμάτων και επαναλήψεων με ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Τελικά ο νέος τροχός προσαρμόστηκε στο όχημα και εξετάστηκε η πρακτική λειτουργία του κέντρου του.



Σχήμα 7.1: Βάση δοκιμών τροχού.

7.1 Δοκιμές αντοχής

Αρχικά πραγματοποιήθηκε δοκιμή στεγανότητας και δοκιμή πίεσης λειτουργίας, κατά την οποία ο τροχός έφτασε την επιθυμητή πίεση χωρίς εμφάνιση ρωγμών ή παραμορφώσεων. Για λόγους ασφαλείας που σχετίζονται με το ελαστικό, η δοκιμή πίεσης πραγματοποιήθηκε έως και +20% της πίεσης λειτουργίας και όχι στο διπλάσιο της, όπως προβλέπουν οι κανονισμοί του διαγωνισμού. Στη συνέχεια εκτελέστηκε δοκιμή κόπωσης στη βάση δοκιμών, με εφαρμογή φορτίου 40 kg και λειτουργία στη μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητα για χρονική διάρκεια ίση με τρεις αγώνες του διαγωνισμού. Η δοκιμή απέδειξε ικανοποιητική αντοχή σε κυκλικά φορτία χωρίς ενδείξεις βλάβης.

7.2 Συγκριτικά πειράματα

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των τροχών (*A*: υφιστάμενος, *B*: νέος) εκτελέστηκαν τέσσερα διαφορετικά πειράματα που περιγράφονται στον πίνακα 7.1.



Σχήμα 7.2: Υφιστάμενος και νέος τροχός.

A/A	Περιγραφή	Κωδικός	Ονομασία αρχείου
1	Σταθερό γκάζι χωρίς φορτίο	XΦ-Γ	no_load_throttle_30s
2	Σταθερό γκάζι με φορτίο	Φ40-Γ	load40_throttle_30s
3	Σταθερή ταχύτητα χωρίς φορτίο	XΦ-Σ35	no_load_const35_60s
4	Σταθερή ταχύτητα με φορτίο	Φ40-Σ35	load40_const35_60s

Πίνακας 7.1: Σενάρια πειραμάτων, σύντομοι κωδικοί και αντιστοίχιση σε ονομασίες αρχείων.

Κάθε πείραμα εκτελέστηκε επαναληπτικά στους δύο τροχούς ώστε να εξασφα-

λιστεί στατιστική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Κατά τη διάρκεια του κάθε πειράματος, συλλέχθηκαν δεδομένα για την ταχύτητα του τροχού και το ρεύμα εισόδου του κινητήρα για κάθε χρονική στιγμή. Οι μετρούμενες καμπύλες που προκύπτουν (Σχήματα 7.3, 7.4) έχουν χαρακτηριστική μορφή που αντικατοπτρίζει τις επιμέρους φάσεις του κύκλου λειτουργίας:

- **Ταχύτητα (v):** Απότομη αύξηση στην εκκίνηση, στη συνέχεια παραμονή κοντά στην τιμή αναφοράς, με μικρές ταλαντώσεις (επίδραση PID και θορύβου), και τέλος ομαλή μείωση έως μηδενισμό.
- **Ρεύμα (I):** Υψηλή αιχμή κατά την εκκίνηση για υπερνίκηση της αδράνειας και των αρχικών τριβών, έπειτα σταθεροποίηση σε σχεδόν σταθερή τιμή στη φάση σταθερής ταχύτητας (διαφοροποιείται ανά τροχό, αντανακλώνοντας τις απώλειες) και τέλος, μηδενισμός όταν διακοπεί το γκάζι.
- **Ισχύς ($P = VI$):** Ακολουθεί την τάση του ρεύματος, με αιχμή στην εκκίνηση, οροπέδιο στη μόνιμη κατάσταση και πτώση στο μηδέν κατά την επιβράδυνση.
- **Συσσωρευμένη ενέργεια ($E = \int P dt$):** Μονοτονική αύξηση με μεγαλύτερη κλίση στην επιτάχυνση και γραμμική αύξηση στη σταθερή ταχύτητα.

Ο οπτικός αυτός χαρακτηρισμός διευκολύνει την αναγνώριση μεταβάσεων και την ερμηνεία διαφορών μεταξύ τροχών: ο τροχός B εμφανίζει μικρότερη τιμή σταθερού ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση, άρα και χαμηλότερη ισχύ για διατήρηση ταχύτητας.

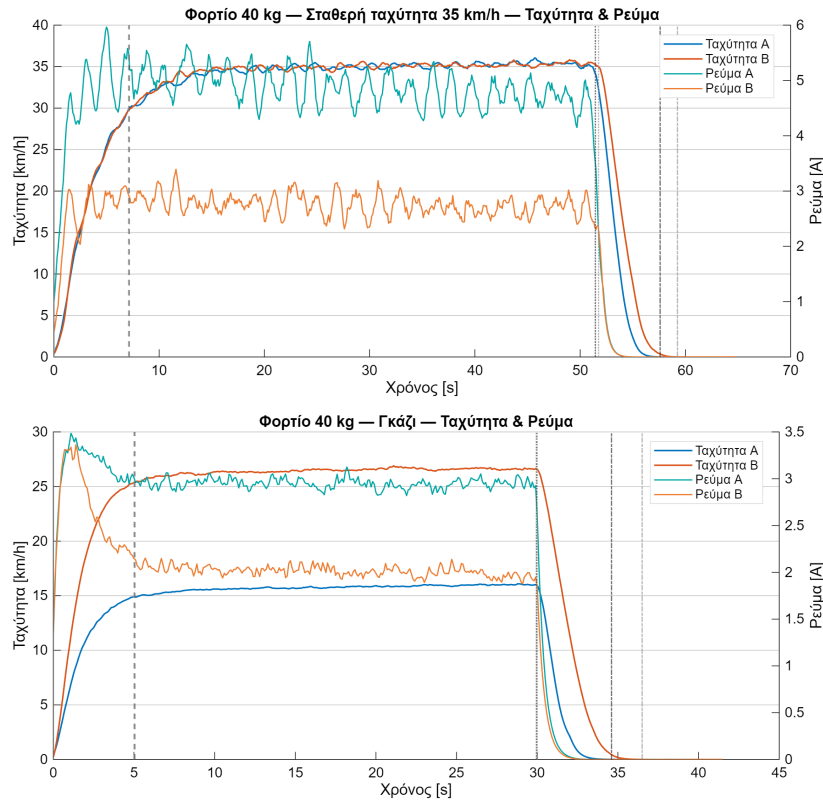
7.3 Μέθοδος υπολογισμών

Η επεξεργασία αποσκοπεί σε εκτίμηση δεικτών κατανάλωσης και σε συγκρίσιμη εκτίμηση της παραμέτρου $A \approx k_t/J$ ανά πείραμα και τροχό. Η διαδικασία περιλαμβάνει προεπεξεργασία δεδομένων, ανίχνευση φάσεων, υπολογισμό ισχύος και ενεργειακών μεγεθών, παλινδρόμηση του δυναμικού μοντέλου και στατιστική σύνοψη.

7.3.1 Προεπεξεργασία δεδομένων

Κάθε επανάληψη πειράματος αποθηκεύεται ως χρονοσειρά από μετρήσεις αισθητήρων και σημάτων ελέγχου. Στόχος της προεπεξεργασίας είναι να μετατρέψει αυτά τα σήματα σε ένα σύνολο δεδομένων, κατάλληλο για υπολογισμούς και εκτίμηση παραγώγων. Η διαδικασία ξεκινά με την κατανόηση των δεδομένων που καταγράφονται και τον ορισμό των μεγεθών που παράγονται από αυτά. Ο Πίνακας 7.2 συνοψίζει μονάδες, τυπικές τιμές και τον ρόλο κάθε μεταβλητής.

Αφετηρία αποτελεί η χρονική βάση: ο χρόνος μετατρέπεται σε δευτερόλεπτα και επιβάλλεται γνήσια αύξουσα ακολουθία, απορρίπτοντας κάθε δείγμα με μη θετικό βήμα $\Delta t \leq 0$. Έτσι οι αριθμητικές ολοκληρώσεις για ισχύ/ενέργεια και οι



Σχήμα 7.3: Με φορτίο 40 kg: ταχύτητα (αριστερός άξονας) και ρεύμα (δεξιός).

διακριτές παράγωγοι είναι καλά ορισμένες. Στη συνέχεια, γίνεται μετατροπή όλων των μεγεθών στο SI . Η μεταφορική ταχύτητα είναι $v = \text{Speed_kmh}/3.6$, ενώ η γωνιακή ταχύτητα ω προτιμάται από RPM μέσω $\omega = (2\pi/60) \text{ RPM}$.

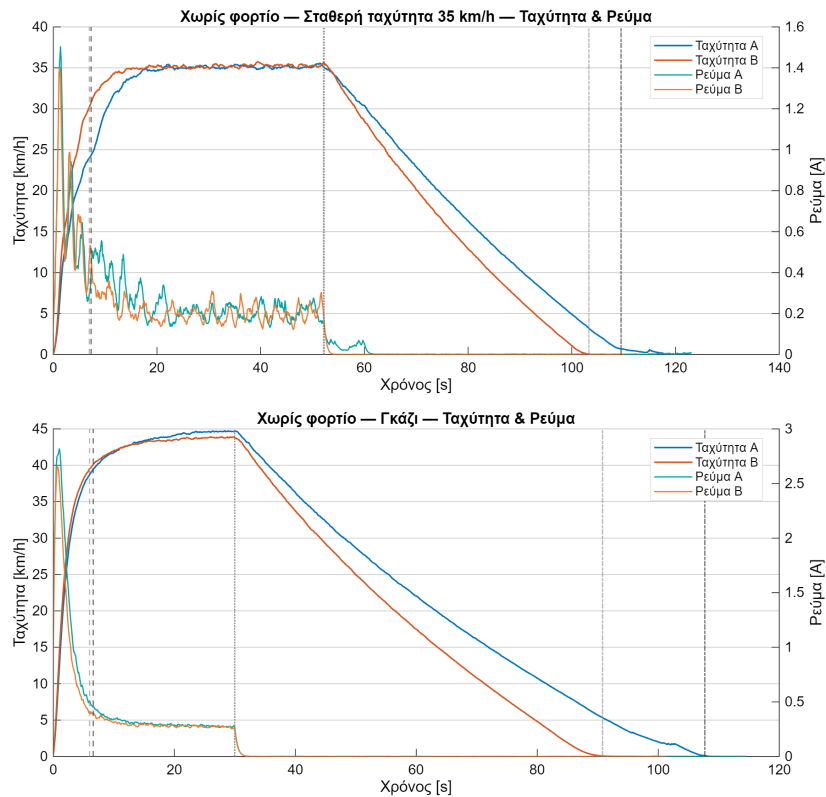
Όταν είναι διαθέσιμο, χρησιμοποιείται το ρεύμα εισόδου I_{filt} ενώ διαφορετικά χρησιμοποιείται το I_{raw} που είναι οι ακατέργαστες τιμές του αισθητήρα ρεύματος. Σε κάθε περίπτωση επιβάλλεται $I = \max(I, 0)$, ώστε να αγνοούνται αρνητικές τιμές που προκύπτουν από θόρυβο στο σήμα. Η στιγμιαία ισχύς υπολογίζεται ως $P(t) = V(t) I(t)$, με $V(t) = 48V$. Η τιμή αυτή δίνεται ως σταθερά, καθώς το τροφοδοτικό που χρησιμοποιείται δεν έχει πτώση τάσης στο φορτίο που χρησιμοποιείται.

Οι επιταχύνσεις υπολογίζονται με διακριτές παραγώγους πρώτης τάξης:

$$\alpha_k \approx \frac{v_k - v_{k-1}}{t_k - t_{k-1}}, \quad (7.1)$$

$$\alpha_k \approx \frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{t_k - t_{k-1}}, \quad (7.2)$$

Τέλος, γραμμές με ελλειπίς ή μη έγκυρες τιμές σε οποιοδήποτε από τα t, v, ω, V, I απομακρύνονται, ώστε το τελικό σύνολο δεδομένων να είναι έτοιμο για μοντελοποίηση.



Σχήμα 7.4: Χωρίς φορτίο: ταχύτητα και ρεύμα.

7.3.2 Ανίχνευση και χρήση φάσεων

Η ενεργή οδήγηση (*drive phase*) θεωρείται η φάση που ισχύει $ThrottleN \geq 0.05$ ή $V_{out} \geq 1$ V. Εντός της περιόδου αυτής, η *λήξη επιτάχυνσης* ορίζεται ως η πρώτη χρονική στιγμή που η επιτάχυνση παραμένει κάτω από το 10% της μέγιστης τιμής της για τουλάχιστον 0.7 s. Το διάστημα που ακολουθεί μέχρι τη διακοπή του γκαζιού χαρακτηρίζεται ως σταθερή ταχύτητα (*steady state*). Μετά τη λήξη της ενεργής οδήγησης ξεκινά η επιβράδυνση, η οποία τερματίζει όταν η ταχύτητα παραμείνει κάτω από 0.05 km/h για τουλάχιστον 1 s.

Οι φάσεις αξιοποιούνται ως εξής: τα δείγματα της ενεργής οδήγησης στο σύνολό τους τροφοδοτούν την παλινδρόμηση του δυναμικού μοντέλου, τα δείγματα σταθερής ταχύτητας δίνουν δείκτες μόνιμης κατανάλωσης/απωλειών (μέσο ρεύμα, Wh/km), ενώ η φάση επιβράδυνσης χρησιμοποιείται ως ποιοτική επαλήθευση του επιπέδου τριβών από τον ρυθμό πτώσης της ταχύτητας.

7.3.3 Ισχύς, απόσταση και ενεργειακοί δείκτες

Η στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς ορίζεται ως $P(t) = V(t)I(t)$. Με κανόνα τραπεζίου και $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ υπολογίζονται η ενέργεια και η απόσταση σε σύνολο

Όνομα	Μονάδα	Τιμές	Περιγραφή
t_ms	ms	ακέραιος ≥ 0	Χρονική σήμανση δείγματος.
Auto	—	0/1	Κατάσταση ελέγχου.
Ref_kmh	km/h	πραγματικός	Ταχύτητα αναφοράς του ελεγκτή.
Speed_kmh	km/h	πραγματικός	Μετρούμενη ταχύτητα οχήματος.
ThrottleN	—	$[0, 1]$	Κανονικοποιημένη εντολή γκαζιού.
Vset	V	πραγματικός	Εντολή γκαζιού.
Vout	V	πραγματικός	Σήμα προς τον ελεγκτή κινητήρα.
Iraw	A	πραγματικός	Ακατέργαστο ρεύμα.
Ifilt	A	πραγματικός	Φιλτραρισμένο ρεύμα.
RPM	rpm	πραγματικός	Ταχύτητα περιστροφής.
Fault	—	0/μη-0	Ένδειξη σφάλματος.
EStop	—	0/1	Emergency stop.

Πίνακας 7.2: Σήματα που καταγράφει το σύστημα και ο ρόλος τους στην επεξεργασία.

δειγμάτων \mathcal{S} (επιτάχυνση, σταθερή ταχύτητα, επιβράδυνση, σύνολο):

$$E_{\mathcal{S}} \approx \sum_{k \in \mathcal{S}} \frac{P_k + P_{k-1}}{2} \Delta t_k, \quad (7.3)$$

$$s_{\mathcal{S}} \approx \sum_{k \in \mathcal{S}} \frac{v_k + v_{k-1}}{2} \Delta t_k. \quad (7.4)$$

Μετατροπές μονάδων: $E [\text{Wh}] = E [\text{J}]/3600$, $Q [\text{Ah}] = \frac{1}{3600} \sum_k \frac{I_k + I_{k-1}}{2} \Delta t_k$,

$$\text{Wh/km} = \frac{E_{\text{total}}}{s_{\text{total}}/1000}. \quad (7.5)$$

Ως δείκτης μόνιμης κατανάλωσης χρησιμοποιείται ο απλός μέσος του ρεύματος στη φάση σταθερής ταχύτητας:

$$I = \frac{1}{N_{\text{steady}}} \sum_{k \in \text{steady}} I_k. \quad (7.6)$$

7.3.4 Παλινδρόμηση δυναμικού μοντέλου

Η ισορροπία ροπών στον άξονα δίνεται από:

$$J_{\text{eff}} \alpha = k_t I - \tau_{\text{loss}}(\omega), \quad (7.7)$$

όπου J_{eff} η συνολική ροπή αδράνειας (τροχός, δρομέας κινητήρα, και αξόνες μετάδοσης), $\alpha = \dot{\omega}$ είναι η γωνιακή επιτάχυνση του τροχού (rad/s^2), k_t η σταθερά

ροπής του κινητήρα και $\pi_{\text{loss}}(\omega)$ οι απώλειες (σταθερός όρος, ιξώδης $\propto \omega$, αεροδυναμικός $\propto \omega^2$). Διαιρώντας με J_{eff} προκύπτει το γραμμικό ως προς τους αγνώστους μοντέλο:

$$\alpha = A I - \beta_1 \omega - \beta_2 \omega^2 - \beta_3, \quad (7.8)$$

με $A \approx k_t/J_{\text{eff}}$.

Η εκτίμηση γίνεται με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων (OLS) σε όλα τα δείγματα της φάσης οδήγησης. Θέτοντας $y = \alpha$ και $X = [I \ \omega \ \omega^2 \ 1]$, λύνεται

$$\hat{c} = (X^\top X)^{-1} X^\top y, \quad (7.9)$$

όπου ορίζονται $A = c_1 \text{ rad s}^{-2} A^{-1}$, $\beta_1 = -c_2 \text{ s}^{-1}$, $\beta_2 = -c_3 \text{ rad}^{-1}$, $\beta_3 = -c_4 \text{ rad s}^{-2}$.

7.3.5 Εκτίμηση σχετικής ροπής αδράνειας

Με δεδομένο $A \approx k_t/J$ και κοινό κινητήρα/ρυθμίσεις, για δύο τροχούς A, B ισχύει

$$\frac{J_B}{J_A} = \frac{A_A}{A_B}. \quad (7.10)$$

Θέτουμε

$$\Delta = \ln A_A - \ln A_B, \quad (7.11)$$

οπότε το e^Δ εκτιμά τον λόγο J_B/J_A (λόγος γεωμετρικών μέσων). Το τυπικό σφάλμα είναι

$$\text{SE}_\Delta = \sqrt{\frac{\text{Var}(\ln A_A)}{n_A} + \frac{\text{Var}(\ln A_B)}{n_B}}, \quad (7.12)$$

και το διάστημα εμπιστοσύνης 95% (κανονική προσέγγιση) υπολογίζεται ως:

$$\Delta \pm 1.96 \text{SE}_\Delta \implies 95\% \text{ CI} \left(\frac{J_B}{J_A} \right) = \left[e^{\Delta - 1.96 \text{SE}_\Delta}, e^{\Delta + 1.96 \text{SE}_\Delta} \right]. \quad (7.13)$$

Στα αποτελέσματα της ανάλυσης, το SE_Δ αναφέρεται ως SE_lnratio . Σημαίνει ότι αν όλο το διάστημα είναι κάτω από 1, ο τροχός B έχει μικρότερη αδράνεια από τον A στο 95%. Αν περιέχει το 1, δεν τεκμηριώνεται διαφορά στο επίπεδο αυτό.

7.3.6 Ποιότητα προσαρμογής και διαγνωστικά

Η ποιότητα της παλινδρόμησης αξιολογείται με:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_k (\alpha_k - \hat{\alpha}_k)^2}{\sum_k (\alpha_k - \bar{\alpha})^2}, \quad (7.14)$$

υπολογισμένο ανά επανάληψη πειράματος. Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 εκφράζει το ποσοστό της διασποράς των δεδομένων που ερμηνεύεται από το μοντέλο, με τιμές κοντά στο 1 να υποδηλώνουν πολύ καλή προσαρμογή και τιμές κοντά στο 0 χαμηλή εξηγητική ικανότητα.

Για τον εντοπισμό ενδεχόμενης εξάρτησης από τη ζώνη λειτουργίας, η περιοχή της ω διαιρείται σε διαστήματα βάσει ποσοστημορίων και επιλύεται ανεξάρτητη παλινδρόμηση σε κάθε διάστημα, αναφέροντας το R^2 . Διαστήματα με ανεπαρκή πλήθη δειγμάτων απορρίπτονται.

7.3.7 Συγκεντρωτικά μεγέθη και διαστήματα εμπιστοσύνης

Για κάθε μέγεθος z (ενέργεια, ειδική κατανάλωση, μέσο ρεύμα, παράμετρος A) και για κάθε συνδυασμό πειράματος και τροχού υπολογίζονται ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και προσεγγιστικό διάστημα εμπιστοσύνης

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (7.15)$$

$$s_z = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (7.16)$$

$$CI_{95\%} \approx \bar{z} \pm 1.96 \frac{s_z}{\sqrt{n}} \quad (7.17)$$

Οι τιμές αυτές απεικονίζονται και εξάγονται σε συνοπτικούς πίνακες για τεκμηρίωση και σύγκριση.

7.4 Αποτελέσματα

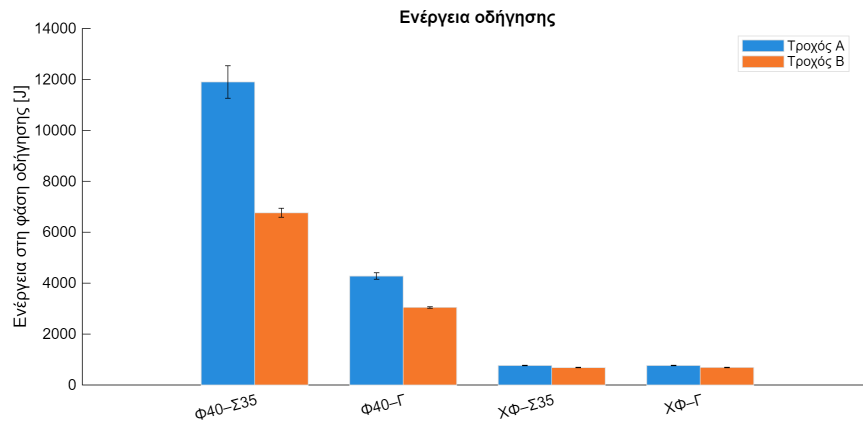
Σε κάθε πείραμα συγκρίνονται οι τροχοί A και B ως προς ειδική ενέργεια (Wh/km), μέσο ρεύμα στη φάση σταθερής πορείας, τον δυναμικό συντελεστή $A=k_t/J$ και τον εκτιμώμενο λόγο αδράνειας J_B/J_A (95% διάστημα εμπιστοσύνης). Στα σενάρια με φορτίο ο B υπερέχει καθαρά ενεργειακά και δυναμικά, και σε αυτά χωρίς φορτίο οι ενεργειακές διαφορές μικραίνουν, αλλά το πλεονέκτημα του B παραμένει στα δυναμικά μεγέθη.

Πείραμα	Wh/km A	Wh/km B	$\Delta\%$	I_{steady} A	$\pm\Delta E$	I_{steady} B	$\pm\Delta E$
Φ40-Σ35	6.95	3.87	-44.3	4.87	0.26	2.75	0.07
Φ40-Γ	9.43	3.86	-59.1	2.92	0.03	2.01	0.04
XΦ-Σ35	0.31	0.27	-12.8	0.23	0.00	0.21	0.00
XΦ-Γ	0.29	0.30	2.5	0.31	0.00	0.29	0.00

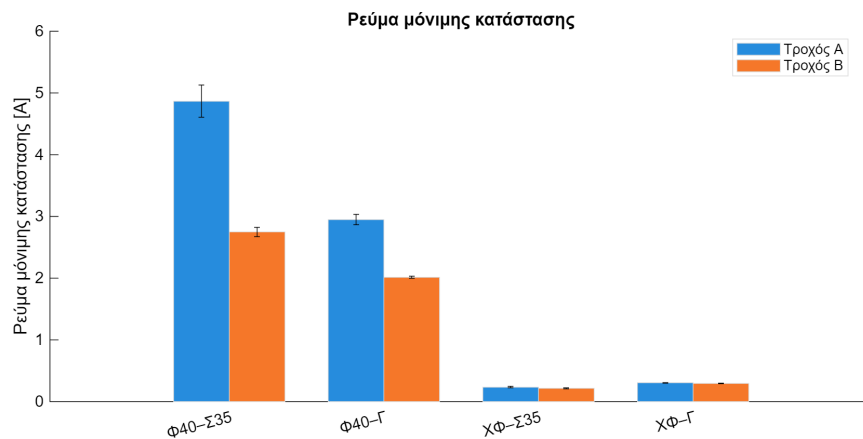
Πίνακας 7.3: Ενεργειακά αποτελέσματα και μέσο ρεύμα στη μόνιμη πορεία ανά πείραμα.

Ερμηνεία ανά πείραμα

Φ40-Σ35: Ο B καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ενέργεια (-44.3% Wh/km) και απαιτεί χαμηλότερο μέσο ρεύμα (2.75 A έναντι 4.87 A). Το \bar{A} είναι υψηλότερο στον



Σχήμα 7.5: Ενέργεια οδήγησης ανά πείραμα (Wh).



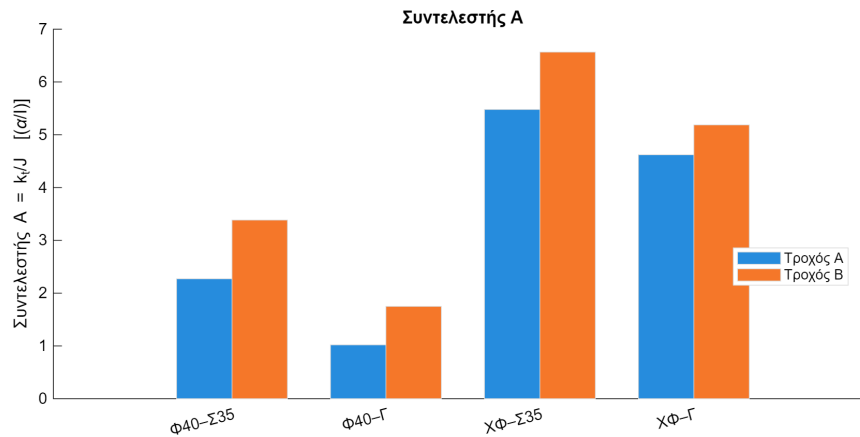
Σχήμα 7.6: Ρεύμα μόνιμης κατάστασης ανά πείραμα (A).

B (3.38 έναντι 2.27), άρα η ανηγμένη ροπή αδράνειας του είναι μικρότερη. Ο λόγος $J_B/J_A = 0.671$ είναι σαφώς κάτω από 1 και η ποιότητα προσαρμογής είναι ικανοποιητική ($R^2 \approx 0.71-0.75$).

Φ40-Γ: Η υπεροχή του B εντείνεται με χειρισμό γκαζιού (-59.1% Wh/km). Το \bar{A} είναι υψηλότερο στον B (1.75 έναντι 1.02) και δίνει $J_B/J_A = 0.534$. Τα διάμεσα R^2 παραμένουν υψηλά (0.77-0.81).

ΧΦ-Σ35: Χωρίς φορτίο, οι ενεργειακές διαφορές μικραίνουν (-12.8% Wh/km υπέρ B), όμως ο B διατηρεί πλεονέκτημα στη δυναμική (\bar{A} : 6.57 έναντι 5.48, $J_B/J_A = 0.837$). Η ποιότητα προσαρμογής είναι μέτρια-καλή (0.69-0.71).

ΧΦ-Γ: Η ειδική ενέργεια είναι πολύ κοντά ($\approx +2.5\%$ υπέρ A), αλλά ο B παραμένει πιο «ελαφρύς» δυναμικά ($J_B/J_A = 0.891$). Τα διάμεσα R^2 είναι τα υψηλότερα (0.82-0.84).



Σχήμα 7.7: Συντελεστής $A = k_t/J$ ανά πείραμα.

Πείραμα	\bar{A}_A	$\pm CI_{95\%}$	\bar{A}_B	$\pm CI_{95\%}$	J_B/J_A	R_A^2	R_B^2
Φ40-Σ35	2.27	0.08	3.38	0.09	0.671	0.71	0.75
Φ40-Γ	1.02	0.56	1.75	0.20	0.534	0.77	0.81
ΧΦ-Σ35	5.48	0.15	6.57	0.38	0.837	0.71	0.69
ΧΦ-Γ	4.62	0.18	5.19	0.22	0.891	0.82	0.84

Πίνακας 7.4: Συντελεστής δυναμικού μοντέλου και σχετική ροπή αδράνειας.

Σχόλια.

1. Σε όλα τα σενάρια $J_B/J_A < 1$, δηλώνοντας σταθερά μικρότερη ανηγμένη ροπή αδράνειας για τον B, σε συμφωνία με το υψηλότερο \bar{A} .
2. Οι ενεργειακές βελτιώσεις του B αναδεικνύονται ιδιαίτερα με φορτίο (−44% έως −59% Wh/km). Χωρίς φορτίο οι τιμές Wh/km συγκλίνουν.
3. Τα διάμεσα R^2 είναι ικανοποιητικά (≈ 0.69 – 0.84) και υποστηρίζουν τη συνοχή του μοντέλου.
4. **Περιορισμός φορτίου:** στα σενάρια με βάρος το εφαρμοζόμενο φορτίο δεν ήταν κοινό μεταξύ τροχών λόγω εκκεντρίας (A: 25–40kg, B: 20–40kg). Η μη ισοδυναμία ενδέχεται να επηρεάζει τις ενεργειακές συγκρίσεις, οπότε τα φορτισμένα σενάρια διαβάζονται με επιφύλαξη.

Συνολικά, ο τροχός B παρουσιάζει συστηματικά μικρότερη ανηγμένη ροπή αδράνειας (λόγοι $J_B/J_A \approx 0.53$ – 0.89) και, με φορτίο, ουσιαστικά χαμηλότερη ειδική ενέργεια (Wh/km) και μέσο ρεύμα.

7.5 Εγκατάσταση τροχού στο όχημα

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων σε κάθε τροχό πραγματοποιήθηκε η προετοιμασία για την εγκατάσταση του νέου τροχού στο όχημα. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία τοποθέτησης οι δύο τροχοί ζυγίστηκαν ώστε να καταγραφεί η διαφορά στη μάζα και να αξιολογηθεί το ποσοστό μείωσης που επετεύχθη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.5.



Σχήμα 7.8: Νέος και παλιός τροχός στο όχημα

Πίνακας 7.5: Συγκριτικός πίνακας μαζών παλαιού και νέου τροχού

Μάζα (g)	Ρόδα (A)	Ρόδα (B)	Δ	$\Delta\%$
Σύνολο	3515	2841	674	-19.2%
Ελαστικό	1965	1965	0	0.0%
Αεροθάλαμος	350	0	350	-100.0%
Κέντρο	175	90	85	-48.6%
Προσαρμογέας	0	149	-149	---
Τροχός	1025	637	388	-37.9%

Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι η συνολική μάζα ανά τροχό μειώθηκε κατά 674 g δηλαδή περίπου 19 %. Η μεγαλύτερη συνεισφορά στη μείωση προήλθε από την κατάργηση του αεροθαλάμου και τη βελτιστοποίηση του κέντρου. Σε επίπεδο οχήματος με μάζα 91 kg και τέσσερις τροχούς η ισοδύναμη μείωση μάζας

είναι

$$\Delta m_{\text{όχημα}} = 4 \times 0.674 \text{ kg} = 2.696 \text{ kg}$$

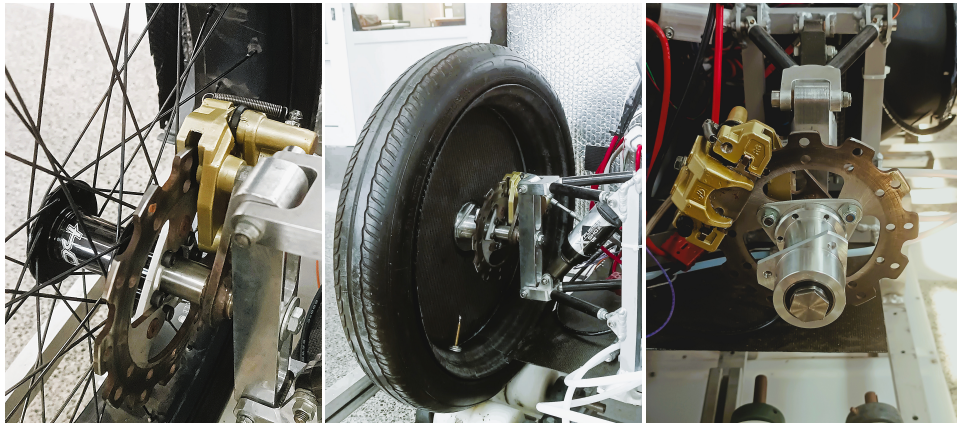
που αντιστοιχεί σε ποσοστό περίπου 2.96 % της μάζας του οχήματος. Επιπλέον στην αγωνιστική διαμόρφωση ο παλαιός τροχός φέρει αεροδυναμικά καπάκια (δίσκους) που προσθέτουν πρόσθετη μάζα Δm_{caps} ανά τροχό και επομένως το πραγματικό όφελος μάζας σε χρήση είναι

$$\Delta m_{\text{όχημα, in situ}} = 2.696 \text{ kg} + 4 \Delta m_{\text{caps}}$$

κάτι που ενισχύει περαιτέρω τα δυναμικά πλεονεκτήματα όπως μικρότερη αδράνεια και χαμηλότερη κατανάλωση.

Στη συνέχεια ο νέος τροχός τοποθετήθηκε στο όχημα και ελέγχθηκε η ευκολία αφαίρεσης και επανατοποθέτησης. Η διαφορά σε σχέση με τον προηγούμενο τροχό ήταν ιδιαίτερα σημαντική καθώς ο προσαρμογέας επιτρέπει την αφαίρεση του τροχού χωρίς να απαιτείται αποσυναρμολόγηση της δαγκάνας του φρένου. Έτσι η διαδικασία γίνεται ταχύτερη και ασφαλέστερη καθώς αποφεύγεται η πιθανότητα εισόδου αέρα στο κύκλωμα πέδησης ενώ δεν απαιτείται εκ νέου ευθυγράμμιση της δαγκάνας με τη δισκόπλακα.

Ενδεικτικά ο χρόνος αντικατάστασης μειώθηκε από περίπου 17 min στην προηγούμενη διάταξη σε μόλις 1 min και 25 s στη νέα κάτι που αποτελεί ουσιαστική βελτίωση για τη διαδικασία συντήρησης και αλλαγής τροχών κατά τη διάρκεια δοκιμών ή αγώνων.



Σχήμα 7.9: Συγκριτική απεικόνιση παλαιού και νέου κέντρου

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

8.1 Συμπεράσματα

Στόχος της εργασίας ήταν η ανάπτυξη ελαφρού και αποδοτικού τροχού από σύνθετα υλικά για το όχημα της ομάδας TUCer, με έμφαση στη μείωση μάζας και ροπής αδράνειας χωρίς να θυσιάζεται η μηχανική αντοχή. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε απέδειξε την αποτελεσματικότητά της: σε σύντομο χρονικό διάστημα αξιολογήθηκαν πολλαπλά σχήματα και στοιβάξεις, ενώ κατασκευάστηκαν διαδοχικά καλούπια έως την τελική λύση. Καθοριστικό ρόλο είχε ο παραμετρικός σχεδιασμός με αλληλοεξαρτώμενα μοντέλα CAD/CAM, που επέτρεψε γρήγορες και ασφαλείς επαναλήψεις τόσο στη μελέτη όσο και στην κατασκευή. Συμπληρωματικά, η αριθμητική ομογενοποίηση με RVE λειτούργησε ως αξιόπιστο εργαλείο για υφαντά σύνθετα, ενισχύοντας την ακρίβεια των ιδιοτήτων που τροφοδοτούν τα μακρο-μοντέλα. Η επαναληπτική εκτέλεση πειραμάτων, σε συνδυασμό με κατάλληλο μοντέλο παλινδρόμησης, αύξησε τον δείκτη αξιοπιστίας R^2 και ενίσχυσε την εμπιστοσύνη στα πορίσματα.

Σε επίπεδο κατασκευής, διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια στη διαστρωμάτωση επηρεάζει άμεσα τόσο τη μάζα όσο και τη διαστατική ακρίβεια: σφάλματα στη διαδικασία οδηγούν σε τοπική συγκέντρωση ρητίνης, γεωμετρικές αποκλίσεις και αύξηση βάρους. Ως προς τα υλικά των καλουπιών, το πολυαιθυλένιο υπερυψηλού μοριακού βάρους (UHMWPE) αποδείχθηκε ιδιαίτερα κατάλληλο, χάρη στην εύκολη κατεργασία, την υψηλή χημική αντοχή και τη μειωμένη ανάγκη για αποκολλητικά.

Σε επίπεδο επίδοσης, ο νέος τροχός πέτυχε ουσιαστική μείωση μάζας (περίπου 19 % ανά τροχό), μικρότερη ανηγμένη ροπή αδράνειας σε όλα τα σενάρια ($J_B/J_A \approx 0.53-0.89$) και, στα πειράματα με φορτίο, χαμηλότερη ειδική ενέργεια κατά 44–59 % (Wh/km). Χωρίς φορτίο, οι ενεργειακές διαφορές μικραίνουν, αλλά το δυναμικό πλεονέκτημα παραμένει. Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία οδηγεί σε τροχό με σαφώς βελτιωμένα χαρακτηριστικά για χρήση σε όχημα χαμηλής κατανάλωσης, ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα της ομάδας στον διαγωνισμό.

8.2 Μελλοντική έρευνα

Με βάση τα ευρήματα, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για περαιτέρω εξέλιξη:

- **Επανασχεδίαση τροχού ως μονοκόμματου εξαρτήματος:** Η ενοποίηση των τμημάτων μειώνει τις διεπιφάνειες και τα σημεία κόλλας, ενισχύει τη δομική συνέχεια και επιτρέπει περαιτέρω μείωση μάζας και βελτίωση ανοχών.
- **Καλούπια από UHMWPE ή αλουμίνιο:** Πλήρης κατεργασία σε CNC για σταθερή ποιότητα επιφάνειας, επαναληψιμότητα και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής καλουπιών.
- **Αυτοματοποίηση μελέτης στοιβάξεων/ενισχύσεων:** Ανάπτυξη ροής με εργαλεία βελτιστοποίησης (π. χ. στο ANSA) για επιλογή προσανατολισμών, τοπικών ενισχύσεων και αριθμού στρώσεων, σε συνδυασμό με μορφολογική βελτιστοποίηση.
- **Πειραματικός χαρακτηρισμός ιδιοτήτων:** Μετρήσεις σε δοκίμια από το ίδιο υλικό και διαδικασία ώστε να τροφοδοτούνται απευθείας τα μοντέλα προσομοίωσης και να μειώνεται η αβεβαιότητα.
- **Αναβάθμιση βάσης δοκιμών:** Βελτίωση στήριξης και εφαρμογής φορτίου για υψηλότερη επαναληψιμότητα και μείωση σφαλμάτων λόγω εκκεντρότητας.

Η μελλοντική εργασία δεν περιορίζεται στον τροχό: η τεχνογνωσία που αποκτήθηκε μπορεί να επεκταθεί σε κρίσιμα εξαρτήματα όπως η ανάρτηση ή το monocoque, προσφέροντας περαιτέρω βελτίωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης του οχήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] International Energy Agency, *Technology Roadmap: Fuel Economy of Road Vehicles*. Paris, France: OECD/IEA, 2012.
- [2] International Energy Agency, *Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions*. Paris, France: IEA Publications, 2023.
- [3] T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International, 2021.
- [4] A. Air, M. Shamsuddoha, E. Oromiehie και B. G. Prusty, "Development of an Automated Fibre Placement-Based Hybrid Composite Wheel for a Solar-Powered Car", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, τόμ. 125, αρθμ. 9-10, σσ. 4083–4097, Απρ. 2023. doi: 10.1007/s00170-023-10946-9
- [5] Shell Eco-Marathon. "About Shell Eco-Marathon". διεύθν.: <https://www.shellecomarathon.com/about.html>
- [6] Shell Global. "Shell Eco-marathon 2025 Official Rules — Chapter I: Vehicle Design and Construction". Official rulebook PDF provided by Shell Eco-marathon. διεύθν.: <https://www.shellecomarathon.com/about/global-rules/>
- [7] *JASO T 203: Aluminum Road Wheel Strength Test Procedures for Passenger Cars*, Tokyo, Japan: Japanese Automobile Standards Organization, 1985.
- [8] A. Rongoni, "Lightweight design of mechanical components of a Shell Eco-marathon vehicle", Politecnico di Milano, αδημοσίευτη ερευνητική εργασία, 2020.
- [9] D. Cocchi, L. Raimondi, T. M. Brugo και A. Zucchelli, "A systematic material-oriented design approach for lightweight components and the CFRP motor wheel case study", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, τόμ. 109, αρθμ. 7-8, σσ. 2133–2153, Αύγ. 2020. doi: 10.1007/s00170-020-05756-2
- [10] P. Kruse, H. J. Wathen, J. J. Hyde, N. D. Dobben και J. D. Blake, "Numerical Estimation of the Torsional Stiffness Characteristics of a Carbon Fiber Reinforced Polymer Wheel", SAE International, SAE Technical Paper 2021-01-0460, 2021. doi: 10.4271/2021-01-0460

- [11] M. L. Minus και S. Kumar, "The Processing, Properties, and Structure of Carbon Fibers", *JOM*, τόμ. 57, αρθμ. 2, 2005.
- [12] D. Chakrabarty, P. Dourmashkin, M. Tomasik, A. Frebel και V. Vuletić. "7.4 Hooke's Law, Classical Mechanics (8.01SC)". Lecture video and transcript; As taught in Fall 2016 at MIT, MIT OpenCourseWare. διεύθυν.: <https://ocw.mit.edu/courses/8-01sc-classical-mechanics-fall-2016/pages/week-2-newtons-laws/7-4-hookes-law/>
- [13] A. M. Mahmoud, "Strengthening of concrete beams having shear zone openings using orthotropic CFRP modeling", *Ain Shams Engineering Journal*, τόμ. 3, αρθμ. 3, σσ. 177–190, 2012.
- [14] D. Hull και T. W. Clyne, *Micromechanical Modelling of Advanced Composites*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [15] Y. W. Kwon και K. Roach, "Unit-cell model of 2/2-twill woven fabric composites for multi-scale analysis", *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, τόμ. 5, αρθμ. 1, σσ. 63–72, 2004.
- [16] *ASTM D3518/D3518M-18: Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate*, ASTM International, 2018.
- [17] "Tsai–wu criterion, An overview," ScienceDirect Topics. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/tsai-wu-criterion>
- [18] Scott Bader Company Ltd., "Crystic 491 & 491PA Polyester Resin --- Technical Data Sheet", Scott Bader Company Ltd., Wellingborough, UK, αδημοσίευτη ερευνητική εργασία, Ιούν. 2000.
- [19] Scott Bader Company Ltd., "Crystic VE 677 PA: Epoxy Bisphenol Vinyl Ester Resin --- Technical Data Sheet", Scott Bader Company Ltd., Wellingborough, UK, αδημοσίευτη ερευνητική εργασία, Απρ. 2017.

Παράρτημα Α'

Πρόσθετες Πληροφορίες

Α'.1 Υπολογισμός Φορτίων Τροχού

Η μελέτη των δυνάμεων του τροχού βασίστηκε σε τυπικά σενάρια του διαγωνισμού SEM και ειδικούς ελέγχους του τεχνικού ελέγχου.

Παραδοχές/κανόνες:

- **Μέγιστη ταχύτητα** 35 km/h.
- **Ελάχιστη ακτίνα στροφής** 8 m για τον εξωτερικό τροχό (τόξο 90°).
- **Δοκιμή κλίσης** 20 % (slope ratio = 0.20).
- **Απαιτηση πίεσης τροχού:** αντοχή $2 \times$ της πίεσης λειτουργίας του ελαστικού (2×73 psi).

Α'.1.1 Φρενάρισμα σε κλίση

Η F_{brake} είναι η διαμήκης δύναμη που πρέπει να αναπτυχθεί μεταξύ ελαστικού-οδοστρώματος για το τεστ κλίσης, την ώρα του τεχνικού ελέγχου στο διαγωνισμό. Η τ_{wheel} είναι η αντίστοιχη ροπή στον άξονα του τροχού. Τα αποτελέσματα δίνονται ανά τροχό σε N και N m αντίστοιχα. Με $m_w = 40$ kg, $r_w = 0.277$ m: Για $\tan \theta = 0.20$ ισχύει $\sin \theta = \frac{0.20}{\sqrt{1 + 0.20^2}} \simeq 0.1961$. Ο έλεγχος γίνεται ανά τροχό:

$$F_{\text{brake}} = SF_{\text{brake}} m_w g \sin \theta, \quad (\text{A'.1})$$

$$\tau_{\text{wheel}} = F_{\text{brake}} r_w. \quad (\text{A'.2})$$

$$SF_{\text{brake}} = 3 : F_{\text{brake}} \approx 230.9 \text{ N}, \quad \tau_{\text{wheel}} \approx 63.9 \text{ N m},$$

$$SF_{\text{brake}} = 1 : F_{\text{brake}} \approx 77.0 \text{ N}, \quad \tau_{\text{wheel}} \approx 21.3 \text{ N m}.$$

Πίνακας Α'.1: Ορισμοί μεταβλητών & σύμβολα

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες / Τιμή
m	Μάζα οχήματος (με οδηγό)	160 kg
n_w	Αριθμός τροχών	4
$m_w = m/n_w$	Ισοδύναμη μάζα ανά τροχό	40 kg
g	Επιτάχυνση βαρύτητας	9.81 m/s ²
r_w	Ακτίνα τροχού	0.277 m
SF	Συντελ. ασφαλείας	2–3
θ	Γωνία κλίσης ($\tan \theta = 0.20$)	–
v	Ταχύτητα κίνησης	35 km/h = 9.7 m/s
R	Ακτίνα στροφής εξωτερικού τροχού	8 m
a_y	Πλευρική (κεντρομόλος) επιτάχυνση	m/s ²
$F_{y,\text{total}} = ma_y$	Συνολική πλευρική δύναμη οχήματος	N
$F_{y,\text{per wheel}}$	Πλευρική δύναμη αναφοράς ανά τροχό	N
α	Μετωπική κατανομή βάρους	45 %
t	Μετατρόχιο	1.10 m
h_{CG}	Ύψος Κέντρου Βάρους	0.10 m
$W_{\text{total}} = mg$	Συνολικό στατικό βάρος	N
$W_{\text{front}}, W_{\text{rear}}$	Στατικό φορτίο εμπρός/πίσω άξονα	N
ΔW_{total}	Συνολική μεταφορά φορτίου	N
$W_{\text{outer/inner}, F/R}$	Φορτίο ανά τροχό (εμπρός/πίσω)	N
P_{oper}	Πίεση λειτουργίας ελαστικού	73 psi
$P_{\text{req}} = 2P_{\text{oper}}$	Ελάχιστη πίεση αντοχής τροχού	146 psi

Α'.1.2 Στροφή

Η F_y είναι η πλευρική (κεντρομόλος) απαίτηση του οχήματος και χρησιμοποιείται ως μέγεθος αναφοράς. Ο πίνακας που ακολουθεί δεν δείχνει την F_y , αλλά τις κατακόρυφες αντιδράσεις ανά τροχό ($W_{\text{outer}}, W_{\text{inner}}$) που προκύπτουν από τη μεταφορά φορτίου ΔW στον αντίστοιχο άξονα.

$$a_y = \frac{v^2}{R} \Rightarrow a_y \simeq 11.81 \text{ m/s}^2 \text{ (1.20 g)}, \quad F_{y,\text{total}} = ma_y.$$

Για την κατακόρυφη ισορροπία στη στροφή:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{tot}} &= mg, \quad (W_F, W_R) = (\alpha, 1 - \alpha) W_{\text{tot}}, \\
 \Delta W_{\text{tot}} &= \frac{m a_y h_{CG}}{t}, \quad (\Delta W_F, \Delta W_R) = \frac{(W_F, W_R)}{W_{\text{tot}}} \Delta W_{\text{tot}}, \\
 W_{F,\text{out/in}} &= \frac{W_F}{2} \pm \frac{\Delta W_F}{2}, \quad W_{R,\text{out/in}} = \frac{W_R}{2} \pm \frac{\Delta W_R}{2}.
 \end{aligned}$$

Πίνακας Α'.2: Αποτελέσματα δυνάμεων σε στροφή

	W_{outer} [N]	W_{inner} [N]	W_{axle} [N]
Εμπρός	391.8	314.5	706.3
Πίσω	478.9	384.4	863.3

Α'.1.3 Απαίτηση πίεσης ελαστικού

Το P_{req} είναι κριτήριο αντοχής (όχι δύναμη) για τον τροχό και χρησιμοποιείται σε ελέγχους διαρροής/τρέχουσας τάσης (hoop stress) όπως προβλέπουν οι κανονισμοί της διοργάνωσης. Παρουσιάζεται σε psi/MPa ως μοναδικό όριο σχεδιασμού.

$$P_{\text{req}} = 2 P_{\text{oper}} = 2 \times 73 \text{ psi} \simeq 146 \text{ psi} \simeq 1 \text{ MPa} (\sim 10 \text{ bar}).$$

Α'.1.4 Κατακόρυφη κρούση (Bump)

Η $F_{z,\text{peak}}$ είναι η *στιγμιαία κατακόρυφη αιχμή* ανά τροχό από τη λακούβα (χρησιμοποιείται ως δυσμενής είσοδος για FEA σε N). Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις εισόδους (H, L, v) και τα παράγωγα ($T, a_{z,\text{max}}, F_{z,\text{peak}}$). Μοντελοποιείται ως μισό ημίτονο ύψους H και διάρκειας T :

$$a_z(t) = \frac{\pi^2 H}{2T^2} \sin\left(\pi \frac{t}{T}\right), \quad a_{z,\text{max}} = \frac{\pi^2 H}{2T^2},$$

με χρόνο $T = L/v$ (μήκος εξογκώματος L , ταχύτητα v). Η μέγιστη δύναμη ανά τροχό:

$$F_{z,\text{peak,front}} = \frac{\alpha m}{2} (g + a_{z,\text{max}}), \quad F_{z,\text{peak,rear}} = \frac{(1 - \alpha)m}{2} (g + a_{z,\text{max}}).$$

Πίνακας Α'.3: Bump — είσοδοι και παράγωγα μεγέθη.

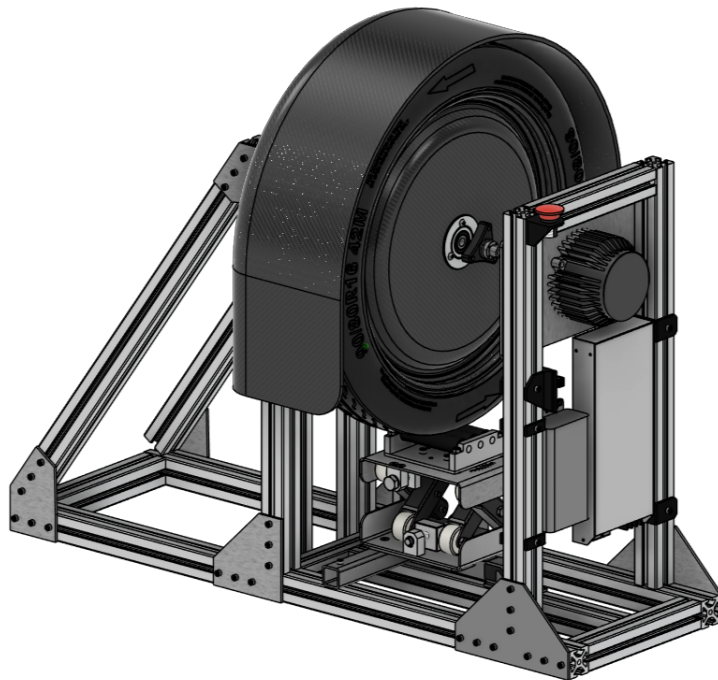
Μέγεθος	Περιγραφή	Τιμή / Μονάδες
H	Ύψος εξογκώματος	0.010 m
L	Μήκος εξογκώματος	0.300 m
v	Ταχύτητα διέλευσης	35 km/h = 9.7 m/s
$T = L/v$	Διάρκεια περάσματος	0.030 86 s
$a_{z,\text{max}}$	Μέγιστη επιτάχυνση	52 m/s ² ($\sim 5.28 g$)
$m_{\text{wheel,front}} = \alpha m/2$	Ισοδ. μάζα εμπρός τροχού	36 kg
$m_{\text{wheel,rear}} = (1 - \alpha)m/2$	Ισοδ. μάζα πίσω τροχού	44 kg
$F_{z,\text{peak,front}}$	Μέγιστη δύναμη (εμπρός)	$\approx 2.23 \text{ kN}$
$F_{z,\text{peak,rear}}$	Μέγιστη δύναμη (πίσω)	$\approx 2.72 \text{ kN}$

Παράρτημα Β΄

Βάση Δοκιμών Τροχού

Για την επαλήθευση προσομοιώσεων και θεωρητικών υποθέσεων αναπτύχθηκε ειδική βάση δοκιμών πολλαπλών χρήσεων. Το σύστημα αυτό επιτρέπει:

1. τη μέτρηση κατανάλωσης ενέργειας διαφορετικών τροχών και μεταδόσεων
2. την εκτίμηση της ροπής αδράνειας
3. τη χρήση ως δυναμόμετρο κινητήρα με απλές προσαρμογές

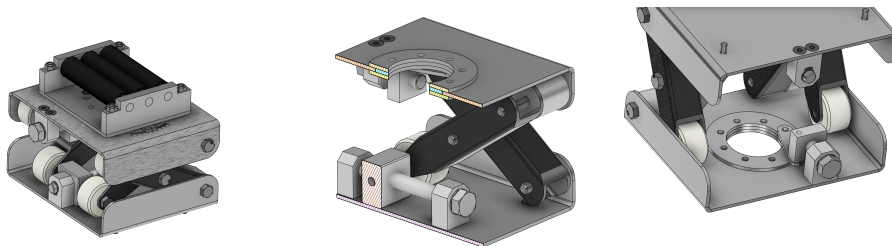


Σχήμα Β΄.1: Βάση δοκιμών τροχού.

B'.1 Μηχανολογική σύνθεση

Πλαίσιο Η κύρια δομή της βάσης κατασκευάστηκε από προφίλ αλουμινίου τύπου T-slot, ώστε να προσφέρονται δυνατότητες εύκολης προσθήκης και μετατροπής χωρίς μόνιμες κατεργασίες. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την ακριβή ευθυγράμμιση του πλαισίου και του άξονα του κινητήρα με τον τροχό.

Εφαρμογή φορτίων Η αναπαραγωγή κατακόρυφων και πλευρικών φορτίων γίνεται μέσω μηχανισμού ανύψωσης που συμπιέζει το ελαστικό στην επιφάνεια επαφής του ελαστικού με το οδόστρωμα και περιστροφικού συνδέσμου που επιτρέπει πλευρική φόρτιση σε σενάρια στροφής. Όλα τα εξαρτήματα κατασκευάστηκαν στο μηχανουργείο της σχολής με απλές κατεργασίες (διάτρηση, φρεζάρισμα, τόρνευση), ώστε να είναι εύκολη η συντήρηση και η αντικατάστασή τους. Η κίνηση των μηχανισμών επιτυγχάνεται με κοχλίες.



Σχήμα B'.2: Υποσύστημα φορτίων και μηχανισμοί κίνησης.

Πρόσδεση και ασφάλεια Ο τροχός στηρίζεται σε βάσεις παρόμοιες με αυτές του οχήματος, που επιτρέπουν γρήγορη αλλαγή. Για λόγους ασφαλείας τοποθετήθηκε θόλος από σύνθετα υλικά για συγκράτηση θραυσμάτων, καθώς και ηλεκτρικό Emergency Stop (E-STOP) που αποκόπτει άμεσα το σήμα γκαζιού.

B'.2 Υποσύστημα ελέγχου και ισχύος

Το υποσύστημα ελέγχου και ισχύος είναι υπεύθυνο για την οδήγηση του κινητήρα και την καταγραφή των μεγεθών που προκύπτουν από τους αισθητήρες.

Ισχύς και ηλεκτρονικά Η τροφοδοσία παρέχεται από τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος 48 V, ονομαστικής ισχύος 1 kW (Mean Well RSP-1000-48). Ο BLDC κινητήρας (750 W) συνδέεται ομόκεντρα στον τροχό μέσω άξονα και οδηγείται από ελεγκτή που δέχεται αναλογική εντολή γκαζιού. Η εντολή αυτή παράγεται από μικροελεγκτή (Arduino Uno), ο οποίος αποτελεί το κεντρικό στοιχείο ελέγχου του συστήματος. Σε αυτόν συνδέονται όλοι οι αισθητήρες: δύναμης για τον έλεγχο φορτίου, ρεύματος για μέτρηση ισχύος, καθώς και φωτοδιακόπτης με διάτρητο δίσκο

για υπολογισμό στροφών και ταχύτητας. Ο μικροελεγκτής φροντίζει επίσης για συλλογή/προεπεξεργασία μετρήσεων και αποστολή τους σε υπολογιστή μέσω σειριακής θύρας.

Πίνακας Β'.1: Υποσυστήματα και διασυνδέσεις.

Υποσύστημα	Ρόλος
Τροφοδοτικό DC 48 V	Τροφοδοσία ισχύος
Ελεγκτής κινητήρα	Οδήγηση κινητήρα
Κινητήρας BLDC	Φορτίο
Μικροελεγκτής (Uno)	Έλεγχος/καταγραφή
ACS711 (Hall)	Μέτρηση ρεύματος
Ταχογράφος (φωτοδιακόπτης)	RPM/ταχύτητα
E-STOP (N.C.)	Ασφάλεια

Καταγραφόμενα μεγέθη Η δειγματοληψία γίνεται στα 10 Hz. Τα καταγραφόμενα μεγέθη συνοψίζονται στον Πίνακα Β'.2.

Πίνακας Β'.2: Μεγέθη, μονάδες και προέλευση μετρήσεων.

Μέγεθος	Μονάδα	Πηγή
Speed_kmh	km/h	Ταχογράφος
ThrottleN	–	Υπολογιστικό
Vset/Vout	V	PWM/μοντέλο
Iraw/Ifilt	A	ACS711
RPM	rpm	Ταχογράφος
Fault/EStop	–	FAULT/INT1

Β'.3 Λειτουργικό σύστημα & έλεγχος (firmware)

Ο έλεγχος υλοποιείται σε Arduino Uno. Το firmware παράγει σήμα PWM, το οποίο μετά από RC φίλτρο μετατρέπεται σε αναλογική τάση [0.90 V, 2.40 V] για την είσοδο του ελεγκτή του κινητήρα.

Κύριες λειτουργίες

- **Τρόποι λειτουργίας:** *Manual* (άμεση εντολή γκαζιού), *Auto* (PID διατήρησης ταχύτητας), *Profile* (γραμμικό σε προκαθορισμένη αναφορά).
- **Ασφάλεια:** E-STOP *latch* με άμεση διακοπή (PWM= 0) και εντολή επαναφοράς.
- **Καταγραφή:** CSV σε 10 Hz με όλα τα μεγέθη

Νόμος ελέγχου Στον *Auto* έλεγχο, εφαρμόζεται PID στην ταχύτητα (km/h), με παράγωγο πάνω στη μέτρηση και anti-windup μέσω κοφτή ολοκλήρωσης.

Πίνακας Β'.3: Εντολές κονσόλας firmware.

Εντολή	Περιγραφή
auto on/off	Ενεργοποίηση/απενεργοποίηση κλειστού βρόχου
setspd X	Διατήρηση ταχύτητας X km/h
run V T	Ράμπα $v : v_0 \rightarrow V$ σε T s
csv on/off	Καταγραφή CSV με/χωρίς επικεφαλίδα
cal, zero	Βαθμονόμηση V_{cc} , μηδενισμός αισθητήρα ρεύματος
kp/ki/kd X	Ρυθμίσεις ελεγκτή
estop, estop reset	Ανάγνωση/αποκατάσταση E-STOP

Εντολές λειτουργίας

Β'.4 Δομή δεδομένων

Προτείνεται η ακόλουθη δομή φακέλων για οργάνωση πειραμάτων και εκδόσεων τροχών:

```
data/
├─ load40_const35_60s/
│   ├── Wheel A/ run_*.csv
│   └── Wheel B/ run_*.csv
└─ no_load_throttle_30s/
    ├── Wheel A/ ...
    └── Wheel B/ ...
```

Παράρτημα Γ'

Θερμοθάλαμος Ωρίμανσης

Γ'.1 Σκοπός και απαιτήσεις

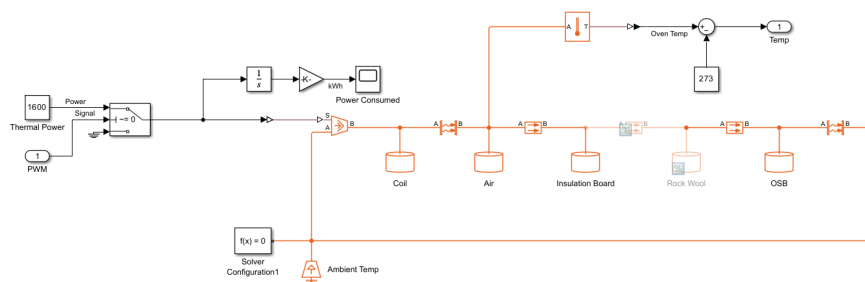
Στόχος ήταν η κατασκευή θερμοθαλάμου που να ακολουθεί προφίλ θερμοκρασίας για την ωρίμανση σύνθετων εξαρτημάτων, με επαρκή ωφέλιμο όγκο, σταθερό έλεγχο και καλή επαναληψιμότητα. Τα βασικά όρια είναι:

- μέγιστη θερμοκρασία $120\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- ρυθμός ανόδου έως $3\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$,
- διακύμανση θερμοκρασίας $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

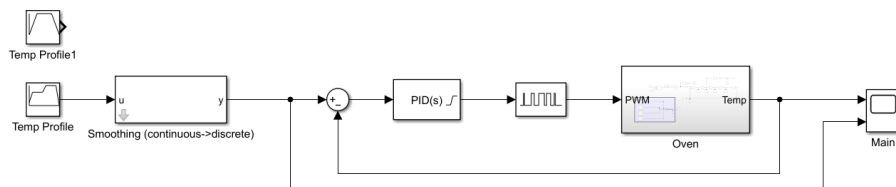
Γ'.2 Μοντελοποίηση και διαστασιολόγηση ισχύος

Για τον ορισμό των προδιαγραφών αναπτύχθηκε συγκεντρωμένο θερμικό μοντέλο στο MATLAB/Simulink (Σχήμα Γ'.1). Το μοντέλο περιλαμβάνει κόμβους θερμικής χωρητικότητας για την αντίσταση θέρμανσης, τον αέρα και τα δομικά στρώματα (επένδυση, μόνωση, σανίδα με προσανατολισμένα ξυλοτεμαχίδια), ενώ οι ροές θερμότητας περιγράφονται με θερμικές αντιστάσεις αγωγής και συναγωγής. Δοκιμάστηκαν διαφορετικά υλικά μονώσεων και πάχη ώστε να επιλεγεί συνδυασμός που ικανοποιεί τις προδιαγραφές με την ελάχιστη δυνατή εγκατεστημένη ισχύ.

Ο έλεγχος υλοποιείται με PID που οδηγεί PWM στο στοιχείο ισχύος. Για ωφέλιμο όγκο 0.55 m^3 η μέση απαιτούμενη ισχύς για τυπικό προφίλ είναι περίπου 300 W . Επιλέχθηκε εγκατεστημένη ισχύς 1.6 kW ώστε να υπάρχει περιθώριο αναβάθμισης σε μεγαλύτερες διαστάσεις, καθώς και κάλυψη γρήγορων ραμπών και μεταβατικών απωλειών. Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν στην έκδοση R2024a με λύτη `daessc`, θερμοκρασία περιβάλλοντος $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ και αρχικές συνθήκες $T_{\text{air}}(0) = T_{\text{wall}}(0) = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$.

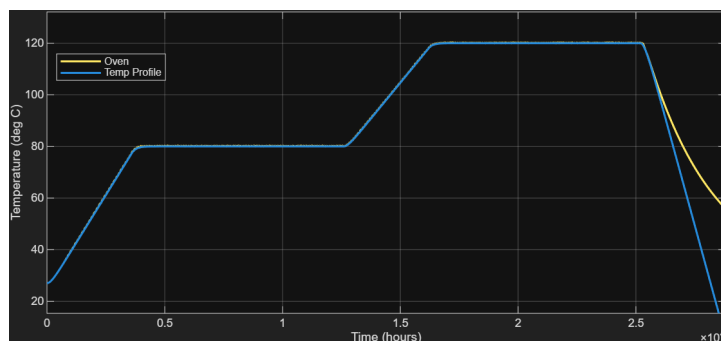


Σχήμα Γ'.1: Θερμικό μοντέλο.



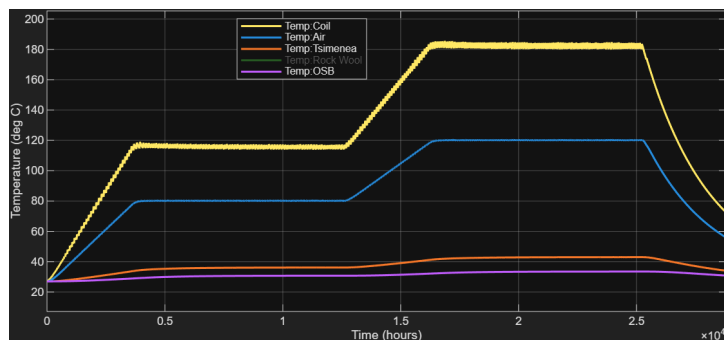
Σχήμα Γ'.2: Σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας.

Προφίλ ωρίμανσης και δοκιμές Χρησιμοποιήθηκε προφίλ με δύο θερμοκρασιακές στάθμες: 80°C και 120°C , και έπειτα ελεγχόμενη ψύξη. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στα παρακάτω σχήματα: στο Γ'.3 φαίνεται η παρακολούθηση του προφίλ, στο Γ'.4 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των κόμβων (αντίσταση, αέρας, μόνωση, κλπ.) και στο Γ'.5 η εκτιμώμενη ενέργεια ανά κύκλο.

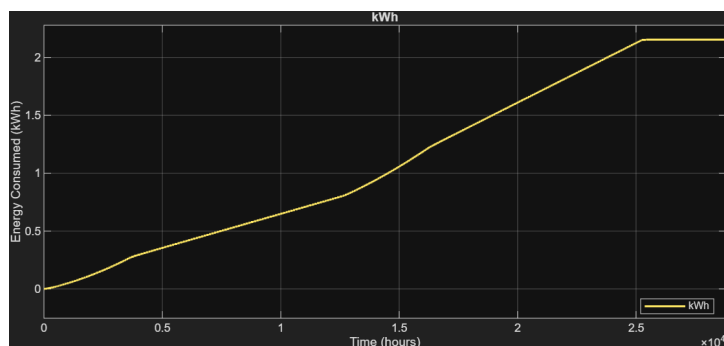


Σχήμα Γ'.3: Προφίλ θερμοκρασίας.

Αποτελέσματα λειτουργίας Οι στάθμες στις 80°C και 120°C τηρούνται με μικρό σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση. Ο ρυθμός ανόδου έως $3^{\circ}\text{C min}^{-1}$ είναι εφικτός με την επιλεγμένη ισχύ και η κατανάλωση ανά κύκλο είναι τάξης μερικών kWh.



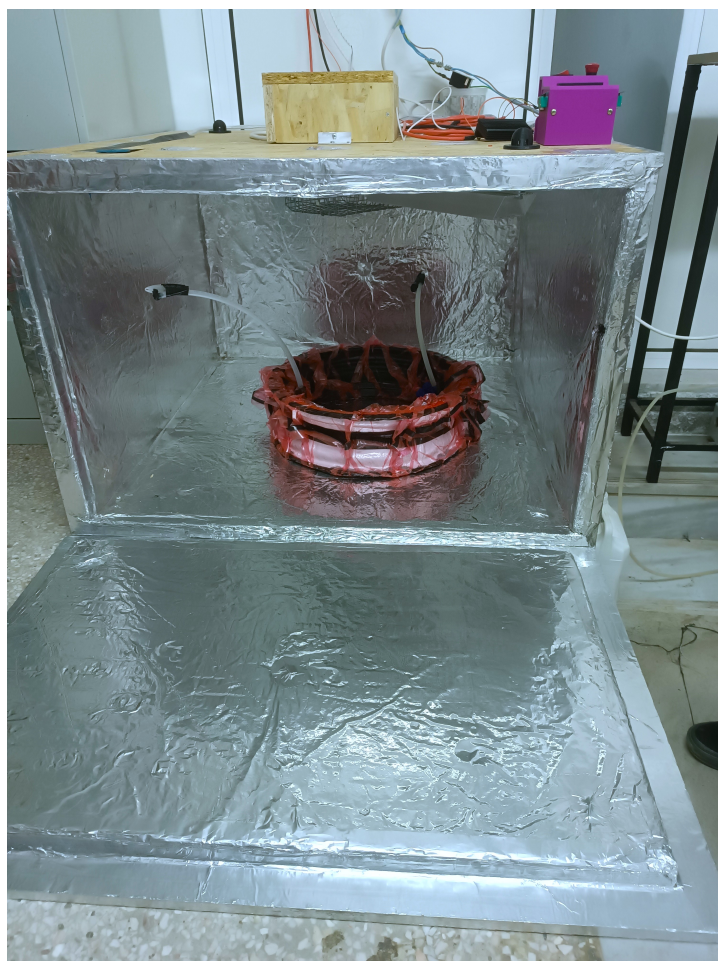
Σχήμα Γ'.4: Θερμοκρασία ανά στρώμα.



Σχήμα Γ'.5: Ενέργεια ανά κύκλο.

Γ'.3 Κατασκευή

Ο θάλαμος έχει εσωτερικές διαστάσεις $940 \times 970 \times 600$ mm (ωφέλιμος όγκος 0.55 m^3). Το κέλυφος αποτελείται από πλάκες με προσανατολισμένα ξυλοτεμαχίδια πάχους 18 mm με σφράγιση ραφών με αλουμινοταινία. Η μόνωση είναι πετροβάμβακας καμινάδας πάχους 30 mm. Η θέρμανση γίνεται με δύο αντιστάσεις συνεχούς ρεύματος 1Ω , 800 W έκαστη. Η κυκλοφορία αέρα είναι εξαναγκασμένη και η μέτρηση θερμοκρασίας γίνεται με δύο θερμοζεύγη τύπου K (αέρας, τοίχωμα). Ο έλεγχος είναι PID με διαμόρφωση PWM και στοιχείο ισχύος MOSFET.



Σχήμα Γ'.6: Κατασκευασμένος Θερμοθάλαμος.

Πίνακας Γ'.1: Σύνοψη βασικών παραμέτρων θερμοθαλάμου.

Παράμετρος	Τιμή	Σχόλιο
Ωφέλιμος όγκος	0.55 m^3	---
Διαστάσεις (εσωτερικές)	$940 \times 970 \times 600 \text{ mm}$	$L \times W \times H$
Θερμομόνωση	Πετροβάμβακας 30 mm	Καμινάδας
Ισχύς θέρμανσης	$2 \times 800 \text{ W}$	Αντιστάσεις 1Ω
Μέτρηση θερμοκρασίας	$2 \times$ θερμοζεύγη K	Αέρας, τοίχωμα
Έλεγχος	PID + PWM	MOSFET στοιχείο ισχύος
Απαιτήσεις προφίλ	120°C max	έως $3^\circ \text{C min}^{-1}$

Παράρτημα Δ'

Κατασκευαστικά Σχέδια Τροχού

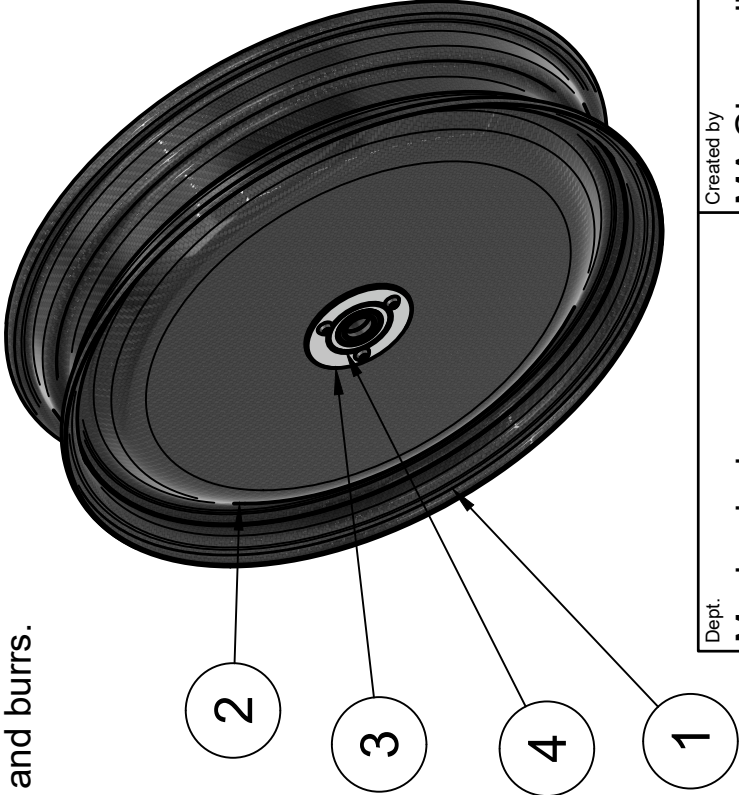
Στο παράρτημα παρατίθενται, τα τεχνικά σχέδια του τροχού, που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του. Το Φύλλο 1/7 περιλαμβάνει συνοπτικό πίνακα υλικών/μαζών (BOM), γενικές σημειώσεις για μονάδες, ανοχές και τραχύτητα. Τα Φύλλα 2–7 παρουσιάζουν τα επιμέρους εξαρτήματα: στεφάνι (Hoop), πλευρικό τοίχωμα (Wall), κέντρο (Center: Main και Cap) και αντάπτορα (Adaptor), με πλήρεις διαστάσεις, θέσεις/τύπους σπειρωμάτων, εφαρμογές ανοχών και απαιτήσεις επιφανειών.

Notes:

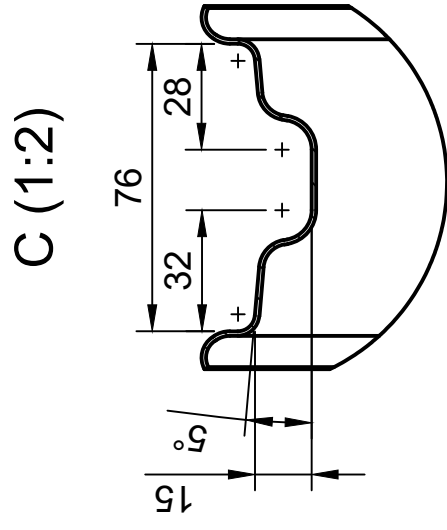
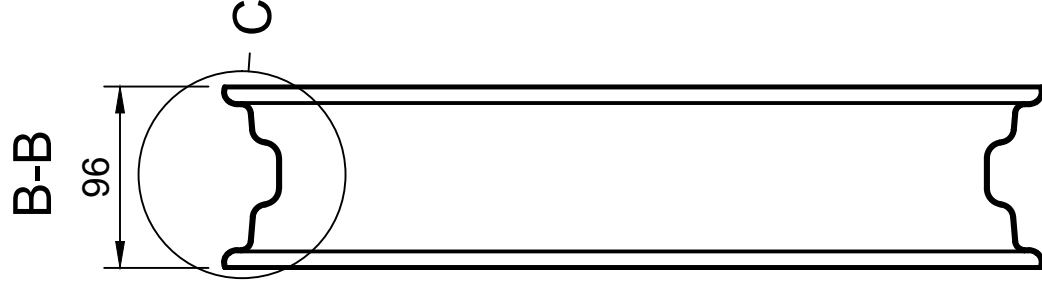
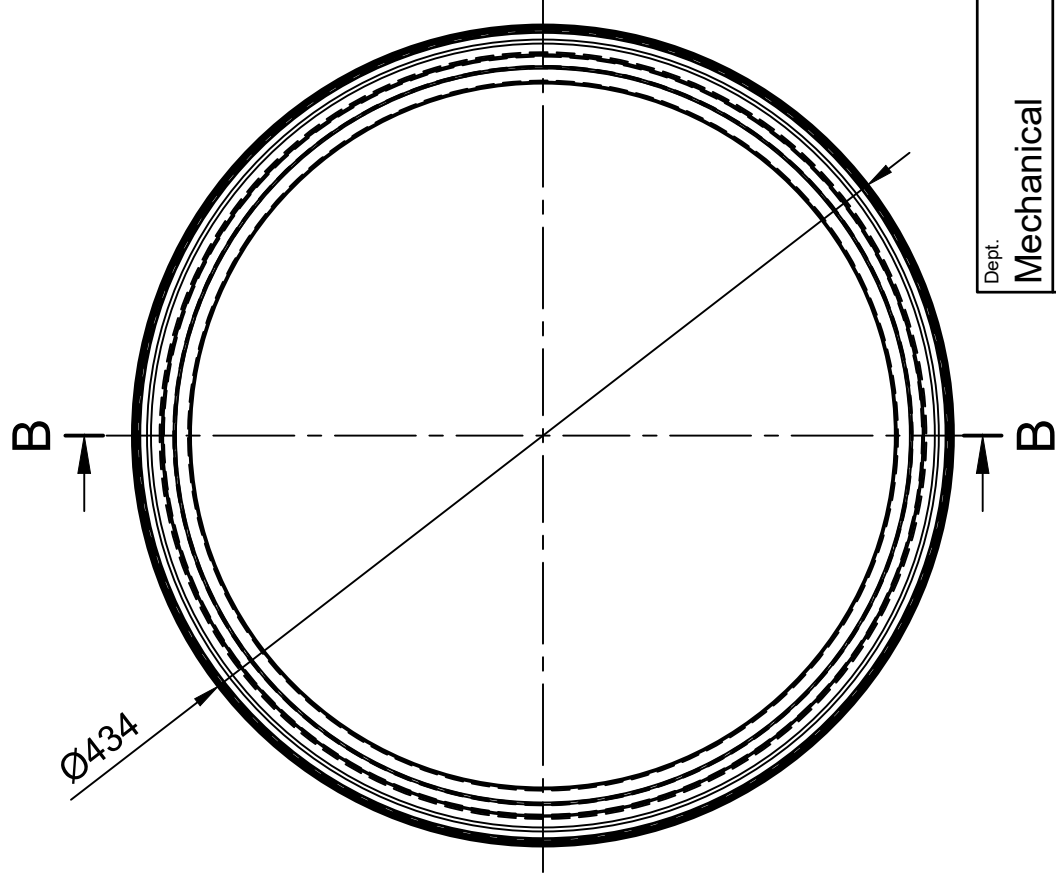
- 1. All dimensions in millimeters (mm).
- 2. Tolerances:
 - 2.1. General tolerances per ISO 2768-mK unless otherwise specified.
 - 2.2. Linear dimensions: ± 0.2 mm unless noted.
 - 2.3. Angular dimensions: $\pm 0.5^\circ$ unless noted.
- 3. Surface roughness (Ra): $1.6\text{ }\mu\text{m}$ unless noted.
- 4. Remove all sharp edges and burrs.


Parts List

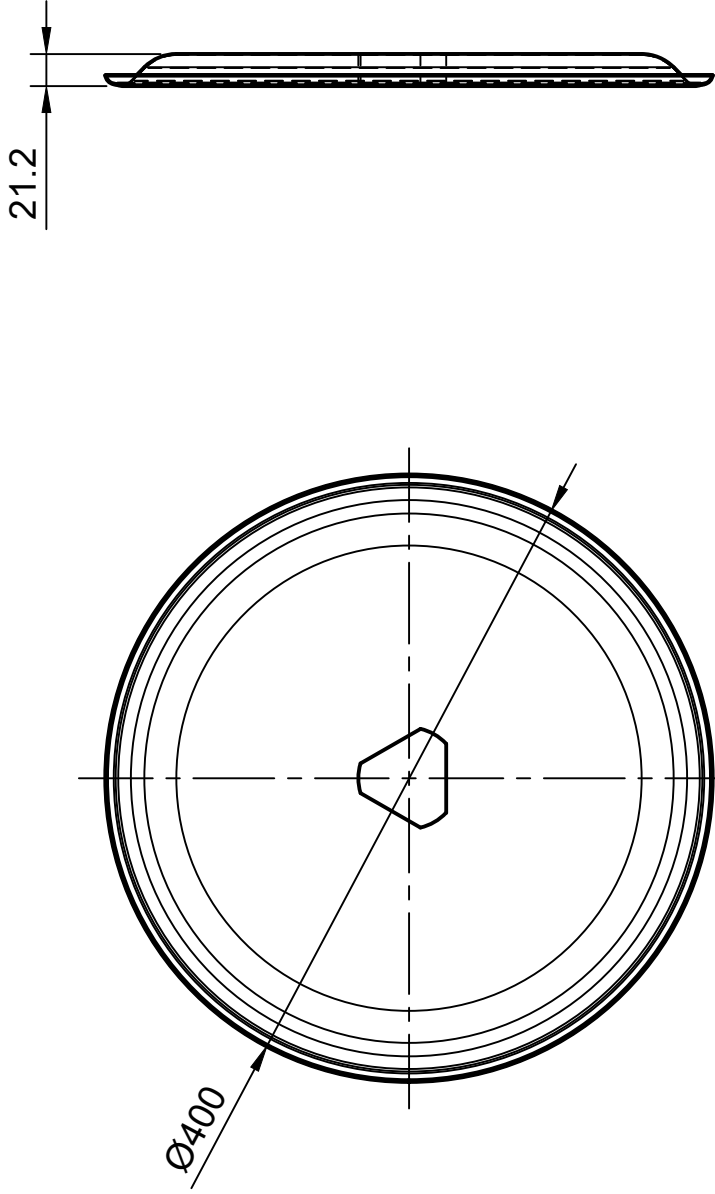
Item	Part Name	Material	Mass
1	Hoop	CFRP	278 g
2	Wall	----	284 g
3	Center	----	118 g
4	Adaptor	Aluminum 7075	178 g




Dept. Mechanical	Created by MA Gkouvelis	5/22/2025	Approved by			
Document type Technical Drawing		Document status Approved				
Title Wheel 3		DWG No.		ER-25S200		
		Rev.	3	Date of issue	6/26/2025	Sheet 1/7

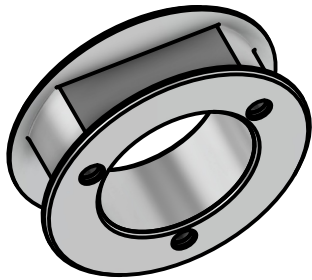
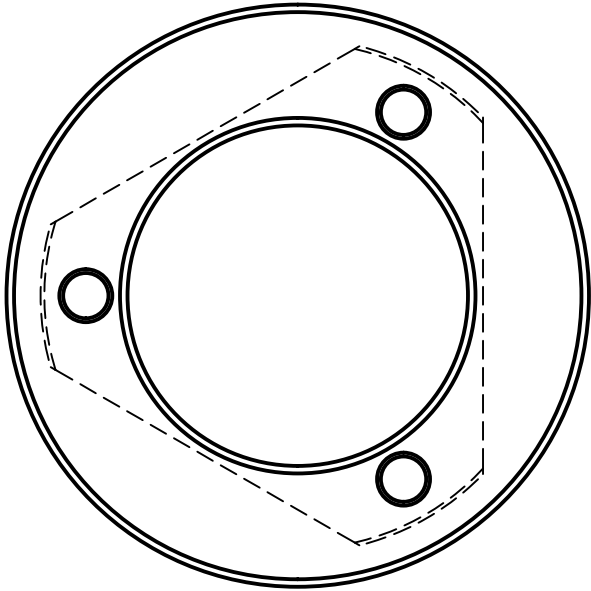



<div>Dept.</div> <div>Mechanical</div>	<div></div>	Created by	MA Gkouvelis	5/22/2025	Approved by				
		Document type	Technical Drawing				Document status	Approved	
		Title	Wheel 3 Hoop				DWG No.		
						ER-25S201			
		Rev.	2	Date of issue	6/26/2025	Sheet	2/7		

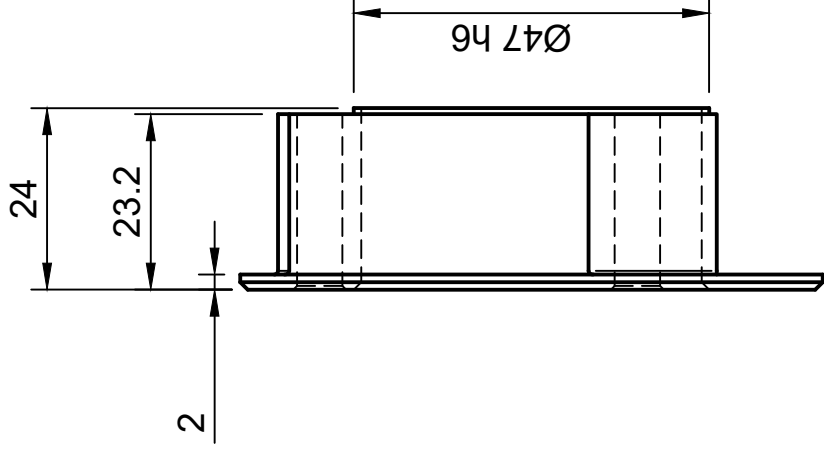
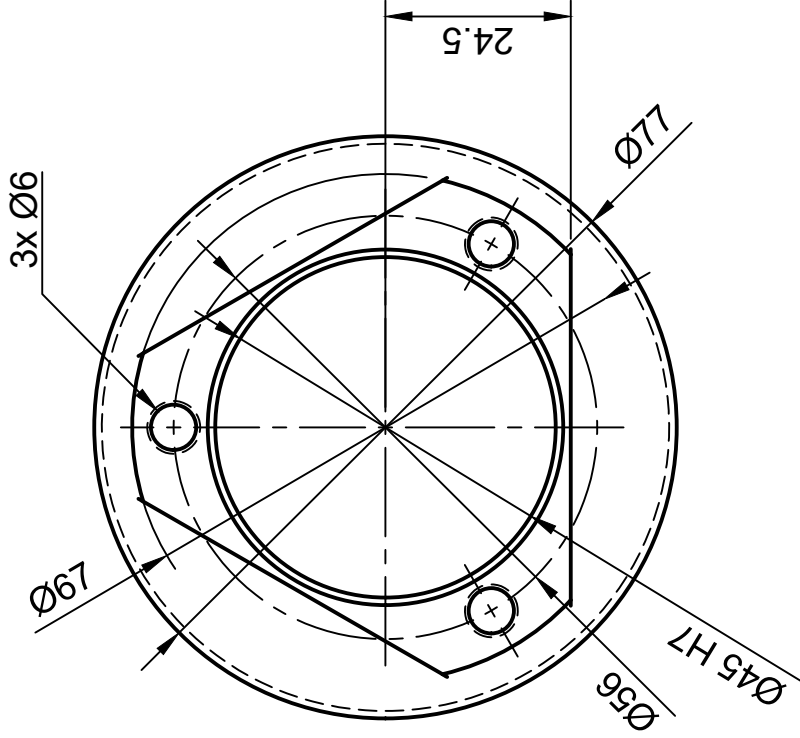


<div>Dept.</div> <div>Mechanical</div>	Created by		Approved by	
	MA Gkouvelis		5/22/2025	
	Document type		Document status	
	Technical Drawing		Approved	
<div></div>	Title		DWG No.	
	Wheel 3		ER-25S202	
	Wall		Rev.	Sheet
			3	3/7
			Date of issue	
			6/26/2025	

Parts List				
Item	Qty	Part Name	Material	Mass
1	1	Main	Aluminum 7075	76 g
2	1	Cap	Aluminum 7075	16 g



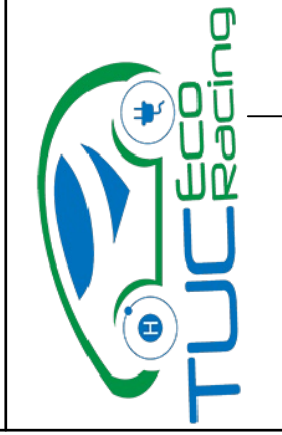
Dept. Mechanical	Created by MA Gkouvelis	5/22/2025	Approved by	
	Document type Technical Drawing		Document status Approved	
	Title Wheel 3 Center		DWG No.	ER-25S210
			Rev. 1	Date of issue 6/26/2025
				Sheet 4/7



Dept.
Mechanical

Created by
MA Gkouvelis 5/22/2025

Approved by



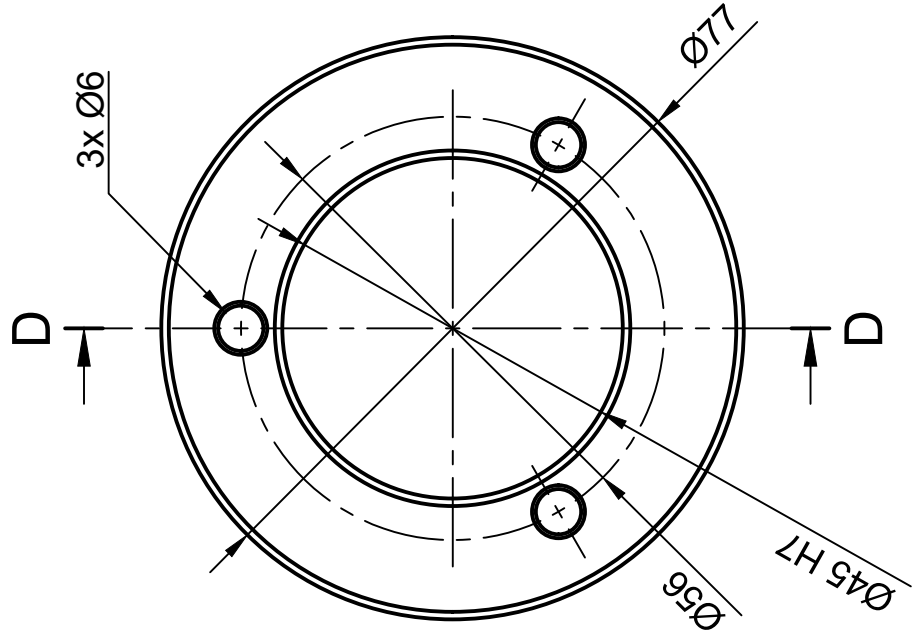
Document type
Technical Drawing

Document status
Approved

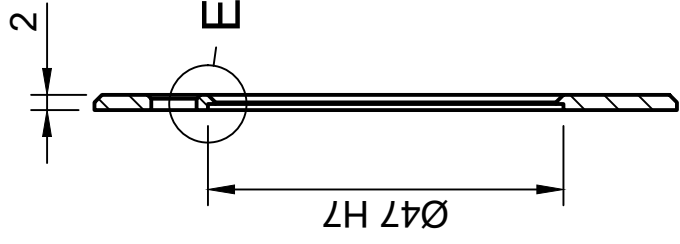
Title
Wheel 3
Center
Main

DWG No.
ER-25S211

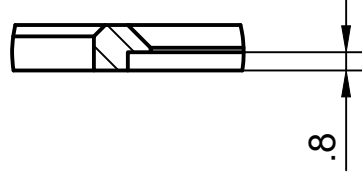
Rev.	Date of issue	Sheet
2	6/26/2025	5/7



D-D (1:1)




E (3:1)



Dept.

Mechanical



Created by

MA Gkouvelis

5/22/2025

Document type

Technical Drawing

Title

Wheel 3
Center
Cap

Approved by

Document status

Approved

DWG No.

ER-25S212

Rev.

2

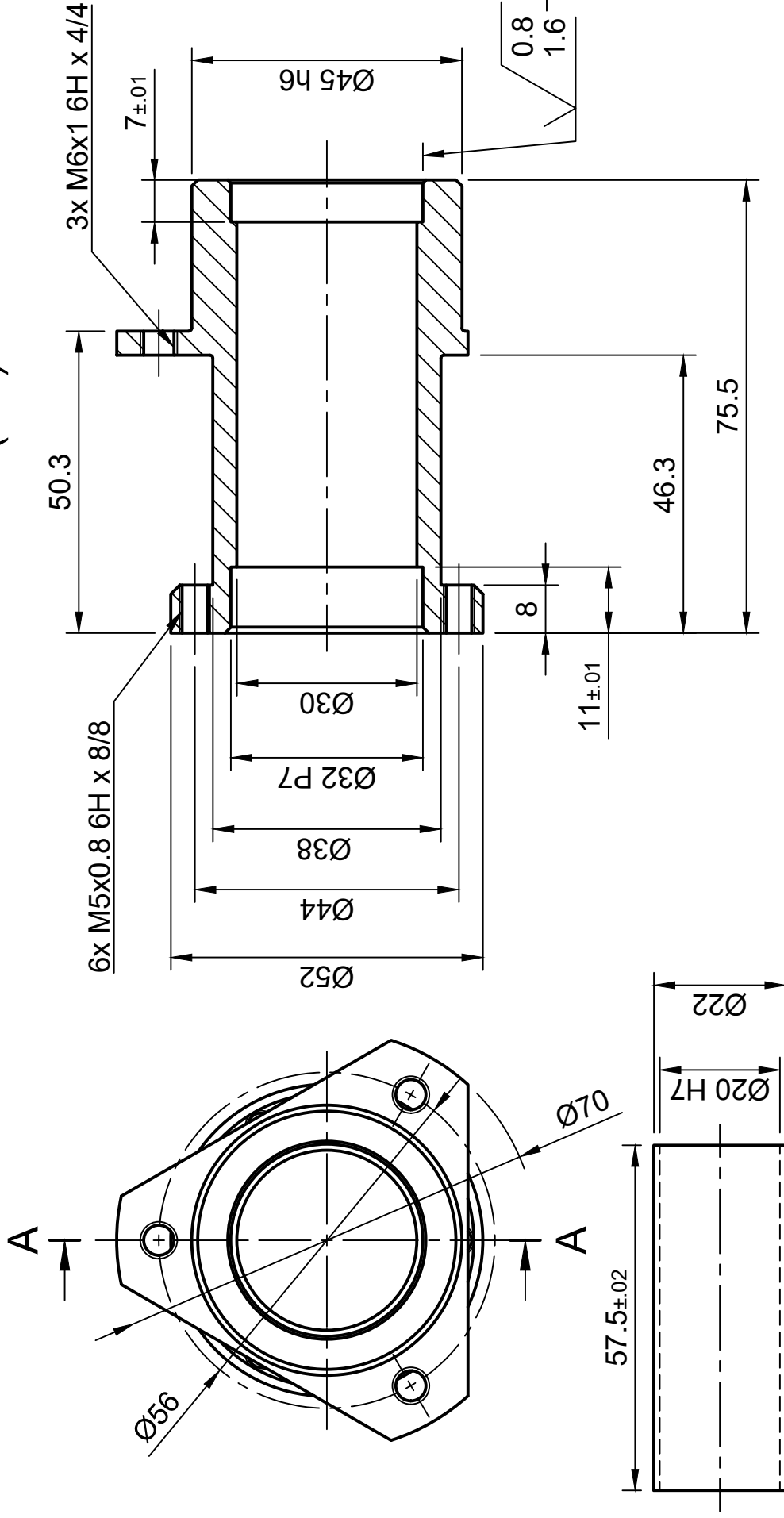
Date of issue

6/26/2025

Sheet

6/7

A-A (1:1)



Dept. Mechanical	Created by MA Gkouvelis	5/22/2025	Approved by			
	Document type Technical Drawing		Document status Approved			
	Title Wheel 3 Adaptor		DWG No. ER-25S220	Rev. 3	Date of issue 6/26/2025	Sheet 7/7

