Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Αεροδυναμική μελέτη & σχεδιασμός ρόδας (στεφάνη) αγωνιστικού ποδηλάτου δρόμου για κατασκευή από σύνθετο ενισχυμένο με ανθρακονήματα (Carbon Fiber Reinforced Polymer)

Aero design & flow study of a racing road bike rim for construction from composite reinforced with carbon fiber (CFRP)

Θεοφάνης Ι. Αθανάσιος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δ. Μανωλάκος, Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Copyright © Θεοφάνης Ι. Αθανάσιος, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στο σχεδιασμό και την αεροδυναμική μελέτη μίας ρόδας (στεφάνη) αγωνιστικού ποδηλάτου δρόμου για κατασκευή από CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer).

Για τον τελικό σχεδιασμό της διατομής της στεφάνης (προφίλ, rim profile), έγιναν προσομοιώσεις αεροδυναμικής βελτιστοποίησης μιας αρχικής επιφάνειας ώστε να καταλήξουμε στην βέλτιστη εξωτερική επιφάνεια για τα δεδομένα του προβλήματος.

Μελετήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια σχετικής ταχύτητας αέρα-αναβάτη ώστε να καλυφθεί ένα εύρος περιπτώσεων για μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση όπως επίσης συνυπολογίστηκε στην μοντελοποίηση το πιρούνι του ποδηλάτου για τον ίδιο λόγο. Χρησιμοποιώντας τα πρώτα αποτελέσματα ακολούθησε ακόμη μια σειρά αεροδυναμικών προσομοιώσεων ώστε να πλησιάσουμε ακόμα περισσότερο στο βέλτιστο αποτέλεσμα το οποίο ορίσαμε ως το μέσο όρο των 8 καλύτερων σχεδίων. Έπειτα σύμφωνα με το πρότυπο ISO 5775-2 “Bicycle Tyres and Rims”- Part 2 :Rims, 4th edition 03/2021 σχεδιάστηκαν οι εσωτερικές επιφάνειες της στεφάνης ώστε να υποδέχεται και να συνεργάζεται με τα αντίστοιχα ελαστικά του εμπορίου. Επειδή δεν είναι δυνατόν μία ρόδα να υποδέχεται όλα τα πιθανά ελαστικά του εμπορίου επιλέξαμε ανάμεσα στα πέντε είδη γεωμετρίας στεφάνης που αναφέρονται

στο πρότυπο ISO με κριτήριο το είδος και τη εμπορικότητα του. Η εσωτερική διαμόρφωση της ζάντας έχει καθοριστικό ρόλο στην σχεδίαση του αντίστοιχου διαιρετού καλουπιού όπως και στο πλήθος των τεμαχίων που το αποτελούν. Τέλος σχεδιάστηκε το διαιρετό καλούπι 14 τεμαχίων με το οποίο θα κατασκευαστεί η υπό μελέτη ρόδα. Το ίδιο σχεδιάστηκε με γνώμονα την κατασκευασιμότητα του, την λειτουργικότητα του, την ευκολία συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης όσο και με βάση την ευκολία αποδέσμευσης του τελικού προϊόντος.

Όλα τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης μιας σύγχρονης ανθρακονημάτινης ρόδας ποδηλάτου που πιστοποιείται σύμφωνα με τα τελευταία πρότυπα και ελαχιστοποιεί το βάρος και τις απώλειες αεροδυναμικής τριβή.

The present thesis refers to the design and aerodynamic study of a road bike rim for construction from CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer).

To design the rim profile, aerodynamic optimization simulations of an initial surface were performed to arrive at the optimal outer surface for the given problem. Four different Air-Cyclist relative velocity scenarios were studied to cover a range of cases for a more realistic approach as well as modeling of the bicycle fork for the same reason. Using the first results, another series of aerodynamic simulations followed in order to get even closer to the optimal result

which we set as the average of the 8 best designs. Then according to the ISO standard 5775-2 "Bicycle Tires and Rims" - Part 2: Rims, 4th edition 03/2021 that concerns the specific object, the inner surfaces of the rim were designed to receive and cooperate with the respective commercial tires. Because it is not possible for a wheel to accommodate all possible commercial tires, we chose among the five types of rim geometry mentioned in the ISO standard based on the type and commerciality. The internal configuration of the rim has a decisive role in the design of the respective split mold as well as in the number of parts that make it up. Finally, the 14 pieces split mold was designed, with which the wheel under study will be made. It was designed with its manufacturability, functionality, ease of assembly and disassembly as well as ease of release of the final product. All of the above was done in the context of the optimization of a modern carbon fiber bicycle wheel that is certified according to the latest standards and minimizes weight and aerodynamic friction losses.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ (KEYWORDS) : Composites, Aero Rim, CFRP, Αεροδυναμική, Σχεδιασμός, Μελέτη, Κατασκευή, Μοντελοποιήσεις, ISO Standard, καλούπια, προτυποποίηση, SOLIDWORKS.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Καθηγητή και Διευθυντή του Τομέα Τεχνολογίας και Κατεργασιών κ. Δημήτριο Μανωλάκο για την εμπιστοσύνη του στην ανάθεση της διπλωματικής και την άκρως βοηθητική στάση του στα όποια προβλήματα κλήθηκα να αντιμετωπίσω καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας αλλά και πριν από αυτή.

Επίσης, στον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Κιτσέλη για την στρατηγική καθοδήγηση, τις υποδείξεις καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε ώστε να βρίσκομαι στις εγκαταστάσεις της εταιρίας τους και για την παραχώρηση του υπολογιστικού συστήματος όπου και έτρεξαν οι μεγάλες και πολύωρες προσομοιώσεις.

Θερμές ευχαριστίες στην ομάδα του GramCarbon, κυρίους Θεόδωρο Θεοδωρίδη και Αναστάσιο Μηλιώτη για τις κατασκευαστικές πληροφορίες που μου παρείχαν και για την τεχνική κατάρτιση που απέκτησα δίπλα τους, καθώς επίσης και την Χρυσαυγή Νικολακέα για την υποστήριξη και τις συμβουλές της πάνω σε θέματα CAD, CAE .

Περιεχόμενα

Εξώφυλλο……1

Περίληψη……3

Ευχαριστίες ……6

Περιεχόμενα……7

Κεφάλαιο 1 : Θεωρία……10

1.2 Ιστορία των ινών άνθρακα……10

1.2 Ιστορική αναδρομή του ποδηλάτου……16

Κεφάλαιο 2 : Εισαγωγή……25

Κεφάλαιο 3 : Αεροδυναμική μελέτη……30

3.1 Αεροδυναμικές Παραδοχές……31

3.2 Έρευνα Αγοράς……37

3.3 Ανάλυση διαδικασία……38

3.4 Πρώτες αεροδυναμικές δοκιμές……44

3.5 Δεύτερες αεροδυναμικές δοκιμές……62

Κεφάλαιο 4: Διαδικασίες παραγωγής και κατασκευής εξαρτημάτων από σύνθετο υλικό……81

4.1 Καλούπωμα σε σακούλα με υποπίεση……..81

4.2 Καλούπωμα σε Autoclave……82

4.3 Καλούπωμα σε πρέσα……83

4.4 Καλούπωμα με σακούλα και θετική πίεση...84

4.5 Filament Winding……84

4.6 Thermal Expansion Molding……86

Κεφάλαιο 5: Εσωτερική διαμόρφωση της στεφάνης……...87

Κεφάλαιο 6: Διαιρετό Καλούπι……..92

6.1 Υλικό καλουπιού……...92

6.2 Μέθοδος συμπίεσης της διαστρωμάτωσης….95

6.3 Άνω και κάτω εξωτερικά καλούπια……..97

6.4 Άνω και κάτω εσωτερικά καλούπια……...101

6.5 Σφηνοειδές τμήμα……105

6.6 Αύλακα ρητίνης……...106

6.7 Θερμική διαστολή καλουπιού……..108

6.8 Υπολογισμός κοχλιών και ροπής σύσφιξης.....111

6.9 Πείροι κεντραρίσματος.....116

Κεφάλαιο 7: 3D printing και εκτυπωτές FDM..... 119

Επίλογος.....127

Βιβλιογραφία.....129

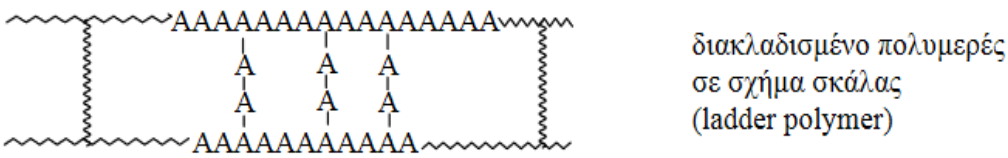
Κεφάλαιο 1

1.1 Ιστορία των Ινών Άνθρακα

Κατά τη διάρκεια της ιστορίας, τα μεγαλύτερα άλματα στην τεχνολογία προέκυψαν ως αποτέλεσμα της εκμετάλλευσης νέων υλικών.

Οι ίνες άνθρακα και ο ακόμα πιο φουτουριστικός αδελφός τους, οι νανοσωλήνες άνθρακα, έχουν χαρακτηριστεί ως η επόμενη μεγάλη καινοτομία που θα επιτρέψει στους ανθρώπους να κατασκευάσουν εκπληκτικές κατασκευές που κάποτε ήταν αδιανόητες. Οι πρώτες ίνες άνθρακα παρήχθησαν από τον Tomas Edison και τον Josef Swan για χρήση ως νήματα στους "νέους" ηλεκτρικούς λαμπτήρες πυρακτώσεως. Οι ίνες άνθρακα που δημιούργησαν παρήχθησαν με την ανθρακοποίηση φυτικών νημάτων όπως το βαμβάκι, το ξύλο και το μπαμπού. Το υλικό αυτό δεν είχε την αντοχή σε εφελκυσμό των σημερινών ινών άνθρακα, αλλά επέτρεψαν στον Edison και τον Swan να αντικαταστήσουν τα ακριβά νήματα πλατίνας που χρησιμοποιούνταν νωρίτερα. Τα νήματα από μπαμπού άνθρακα που ανέπτυξε ο Edison διαρκούσαν έως και 1200 ώρες, και ήταν ο κανόνας για 10 χρόνια μέχρι να αντικατασταθούν από νήματα βολφραμίου. Οι ίνες άνθρακα ως δομικό υλικό δεν είχαν μελετηθεί πολύ μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1950, όταν η Union Carbide

Corporation, μια εταιρεία που κατασκεύαζε νήματα λαμπτήρων, άρχισε να ερευνά την αντικατάσταση των νημάτων βολφραμίου. Άρχισαν να χρησιμοποιούν το Rayon, το οποίο είναι μια συνθετική ίνα, κατασκευασμένη από φυσικές πηγές αναγεννημένης κυτταρίνης, όπως ξύλο και συναφή γεωργικά προϊόντα. Έχει την ίδια μοριακή δομή με την κυτταρίνη. Ήταν δημοφιλής ως φθηνή εναλλακτική λύση στο μετάξι και το βαμβάκι και βασικό συστατικό για τις ίνες άνθρακα. Αυτή ήταν μια επαναστατική στιγμή για την έναρξη της σύγχρονης εποχής των ανθρακονημάτων αφού ως υλικό έδειξε δυνατότητες και ως δομικό υλικό. Οι ερευνητές σε όλο τον κόσμο το πρόσεξαν, και μόλις ένα μήνα αργότερα, το Ιαπωνικό Ινστιτούτο Βιομηχανικής Έρευνας άρχισε να φτιάχνει τις δικές τους ίνες από πολυακρυλονιτρίλιο ή "PAN" για συντομία.
Η πλειονότητα των σημερινών ινών άνθρακα παράγεται από PAN, παρόλο που είναι ένα ακριβό υποπροϊόν της παραγωγής πετρελαίου. Αποδίδει μια ίνα με πολύ υψηλότερο ποσοστό άνθρακα από το Rayon και είναι ευκολότερη στην κατασκευή.
Ο Dr. Shindo δημιούργησε μακριά νήματα από αυτό το υλικό, το οποίο σταθεροποίησε θερμαίνοντάς το πρώτα στους 250 βαθμούς για δύο ώρες. Αυτό αναδιατάσσει τον χημικό δεσμό για να δημιουργήσει έναν θερμικά σταθερό δεσμό σκάλας.



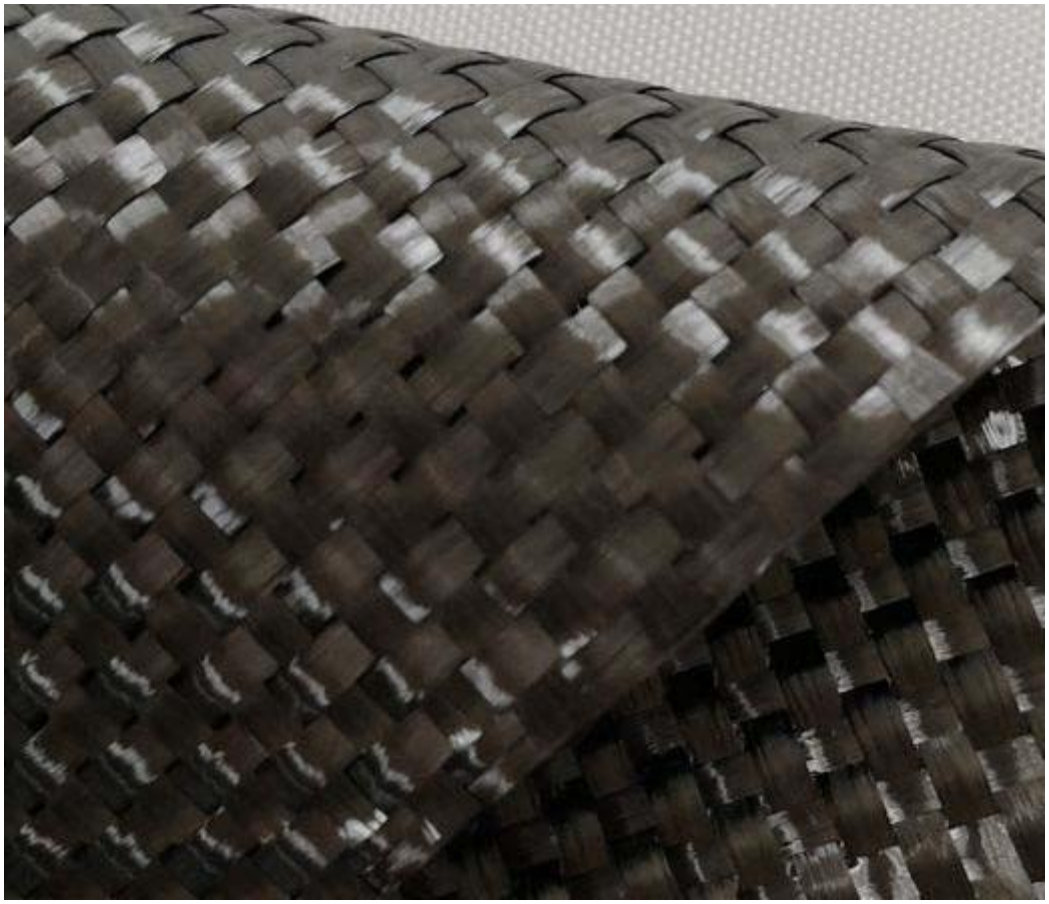
Εικόνα 1.1 Ladder polymer ,[B1]

Στη συνέχεια, οι ίνες αυτές θερμάνθηκαν ξανά σε θερμοκρασία περίπου 1. 000 βαθμών απουσία οξυγόνου, η οποία αποβάλλει τα μη άτομα άνθρακα στο υλικό αφήνοντας στενά συνδεδεμένα άτομα άνθρακα διατεταγμένα κυρίως προς την κατεύθυνση της ίνας. Το υλικό αυτό ήταν ανθεκτικό στη θερμότητα και στα χημικά. Είχε φανταστική αντοχή στον εφελκυσμό και δεν σκούριαζε. Εξειδικευμένες βιομηχανίες, όπως η αεροδιαστημική, είδαν αμέσως τις δυνατότητές ώστε να βοηθήσουν τα διαστημόπλοια να σπάσουν τον κλοιό της γήινης βαρύτητας. Και όταν ο Gay Brewer κέρδισε το τουρνουά γκολφ Taiheiyo Club Masters το 1972 χρησιμοποιώντας έναν μπαστούνι από ανθρακονήματα, το υλικό τράβηξε επίσης την προσοχή του κόσμου. Οι κατασκευαστές αθλητικών ειδών σε όλο τον κόσμο άρχισαν να δημιουργούν προϊόντα από ανθρακονήματα. Μπαστούνια γκολφ, ρακέτες τένις και αγωνιστικά ποδήλατα άρχισαν να κατασκευάζονται με τις φθηνότερες ίνες εκτός προδιαγραφών (quality control), που δεν μπορούσε να χρησιμοποιήσει η αεροδιαστημική βιομηχανία. Παρά την υψηλή τιμή του, η ζήτηση για το υλικό συνέχισε να αυξάνεται ώσπου μέχρι το 1980, 1.000 μετρικοί τόνοι

παραγόντουσαν ετησίως. Όμως ήταν ακόμα ένα υλικό με το οποίο ήταν δύσκολο να δουλέψει κανείς και πολλοί εξακολουθούσαν να αμφιβάλλουν για την ικανότητά του ως δομικό υλικό. Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης της McLaren MP4/1, ένας σκεπτικιστής μηχανικός είχε πάρει ένα κομμάτι σύνθετου υλικού από ανθρακονήματα και το έσπασε εύκολα στη μέση, δηλώνοντας ότι το υλικό ήταν πολύ αδύναμο και εύθραυστο.

Βέβαια αν είχε προσπαθήσει να το σπάσει κατά μήκος των ινών, θα αντιμετώπιζε σοβαρές δυσκολίες. Οι ίνες άνθρακα με πάχος 0.005-0.010 mm από μόνες τους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό, πρέπει πρώτα να δέσουμε αυτά τα μακριά νήματα ινών μαζί με μια μήτρα (πλαστική ρητίνη). Διαφορετικά, είναι απλά ένα σαθρό ύφασμα που δεν μπορεί να κρατήσει κανένα φορτίο εκτός από την τάση σε εφελκυσμό. Αν ένα μονοδιευθυντικό κομμάτι ανθρακονήματος το τραβήξουμε κατά μήκος των ινών, έχει φανταστική αντοχή επειδή η ίνα βρίσκεται στην ίδια κατεύθυνση με το φορτίο και, επομένως, μπορεί να του αντισταθεί. Αλλά αν το τραβήξουμε διαφορετικά, δεν υπάρχει μια συνεχής σειρά ινών που να αντιστέκεται στη δύναμη, η μήτρα ρητίνης διαλύεται και οι ίνες προσθέτουν πολύ μικρή αντοχή στο υλικό. Για να το καταπολεμήσουμε αυτό, στρώνουμε τις ίνες, τη μία πάνω στην άλλη. Εάν τοποθετήσουμε δύο μονοδιευθυντικά φύλλα σε γωνίες 0, 90 μοιρών τότε αυξάνουμε τις την αντοχή σε αυτές τις διευθύνσεις αλλά υστερούμε για παράδειγμα σε γωνία 45 μοιρών. Επίσης εάν

αυξήσουμε των αριθμό των διαστρωματώσεων μπορεί να έχουμε αποκόλληση με διατμητική τάση.



Εικόνα 1.2 Woven carbon plain weave [B2]

Εδώ έχουμε ένα πλεκτό στρώμα τύπου woven , πλεγμένο έτσι ώστε οι ιδιότητες του υλικού να είναι οι ίδιες προς τις κατευθύνσεις 0, 90 μοιρών. Από την άλλη υπερβολική ακαμψία δεν είναι πάντα επιθυμητή. Για παράδειγμα, σε περίπτωση ατυχήματος, θέλουμε το αυτοκίνητό να παραμορφώνεται για να απορροφήσει όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια. Έτσι, οι σύνθετες εμπρόσθιες πτέρυγες των αυτοκινήτων της F1 είναι σχεδιασμένες να θρυμματίζονται σε εκατομμύρια μικροσκοπικά κομμάτια, και αυτό

συμβάλλει στην απορρόφηση της ενέργειας και στην επιβράδυνση του αυτοκινήτου.

Μια τεράστια ανησυχία για τους κατασκευαστές σύνθετων υλικών, είναι και τα μικροκενά ή φυσαλίδες που παρουσιάζουν τα σύνθετα υλικά λόγω της παραγωγικής τους διαδικασίας και του εγκλωβισμένου αέρα. Αυτά αποδυναμώνουν το υλικό αφού δημιουργούν ασυνέχειες στην δομή. Για να ελαχιστοποιηθούν στο βαθμό που κρίνεται απαραίτητο από την εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ειδικός φούρνος που θερμαίνει το υλικό κατά την σκλήρυνση ή autoclave το οποίο είναι μια διάταξη τύπου αεροστεγούς αυτοματοποιημένου φούρνου με ταυτόχρονα έλεγχο της εσωτερικής πίεσης και θερμοκρασίας κατά την σκλήρυνση.

Για να το ελέγξουμε ότι η ρητίνη έχει σκληρύνει με μια ανεκτή ποσότητα μικροκενών τα τεμάχια σαρώνονται συχνά υπερήχους. Αυτά τα κενά αποτελούν ακόμη μεγαλύτερη ανησυχία για εφαρμογές δεξαμενών πίεσης επειδή το μεγαλύτερο πρόβλημα για το υλικό είναι η διαρροή ρευστού μέσω μικρορωγμών και κενών.

Αυτά τα προβλήματα καλούνται να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί των σύνθετων υλικών.

1.2 Ιστορική αναδρομή του ποδηλάτου

Ο πρώτος πρόγονος του ποδηλάτου εμφανίστηκε το 1791 στη Γαλλία και ονομαζόταν *celerifere*.

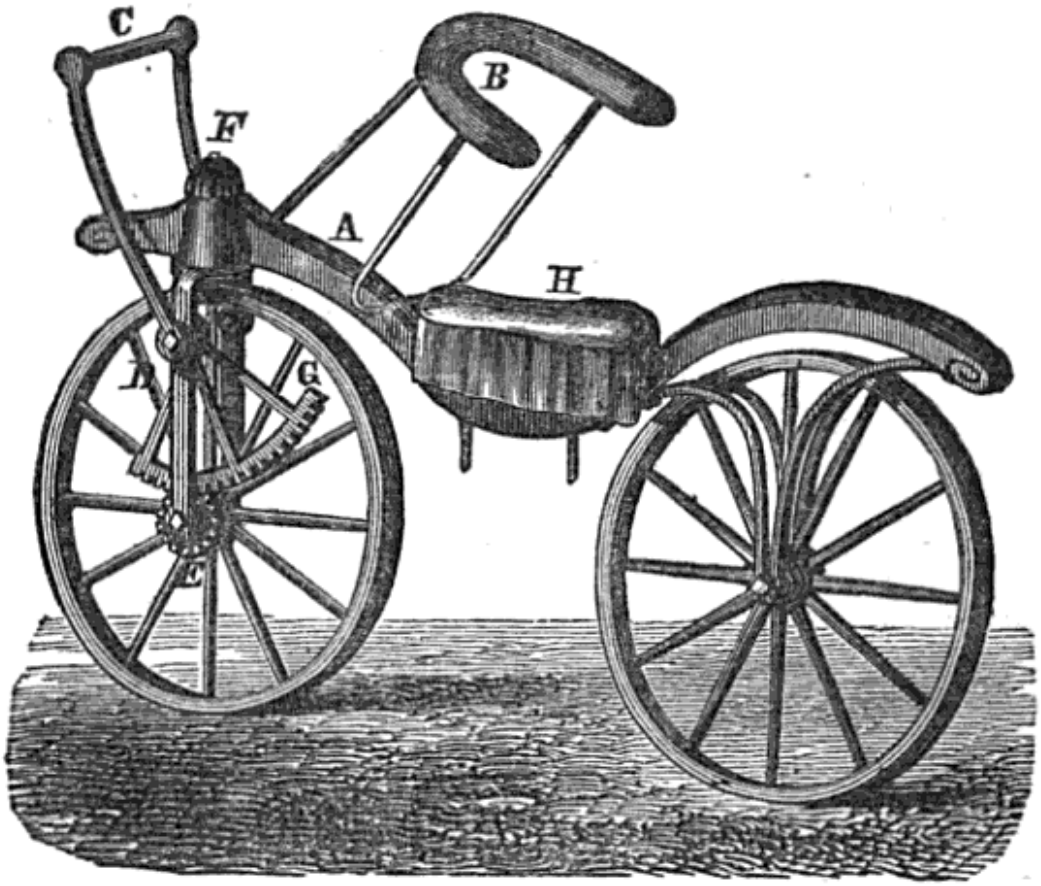
Εικόνα 1.3 Celerifere [B3]

Η κατασκευή αυτή είχε δύο ρόδες χωρίς δυνατότητα αλλαγής κατεύθυνσης και για να κινηθεί έπρεπε ο αναβάτης να σπρώχνει με τα πόδια του το έδαφος. Το 1793 η κατασκευή μετονομάστηκε σε *velocifere* και έγινε ιδιαίτερα δημοφιλής στο Παρίσι. Κατά τη διάρκεια της πρώτης δεκαετίας του 19ου αιώνα το *velocifere* έπαψε να είναι τόσο δημοφιλές. Το 1816 ο Nicephore Niepce παρουσίασε μια βελτιωμένη έκδοση του *velocifere*, ακόμα χωρίς δυνατότητα αλλαγής διεύθυνσης αλλά ελαφρύτερη, ταχύτερη και πιο άνετη

στην οδήγηση επειδή είχε μεγαλύτερες ρόδες. Ένα χρόνο αργότερα ο Baron von Drais μετέτρεψε το *velocifere* ώστε να μπορεί να αλλάζει κατεύθυνση και ονόμασε την κατασκευή του *velocipede*, όρος που διατηρήθηκε μέχρι το1869 που άρχισε να χρησιμοποιείται ο όρος bicycle. Το *velocipede* χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην Γαλλία και στην Αγγλία όπου ο Denis Johnson που πρόσθεσε βελτιώσεις. Τα *velocipede* έγινα πολύ γρήγορα δημοφιλή αλλά για σύντομο χρονικό διάστημα, αφού στη δεκαετία του 1820 σπάνιζαν.

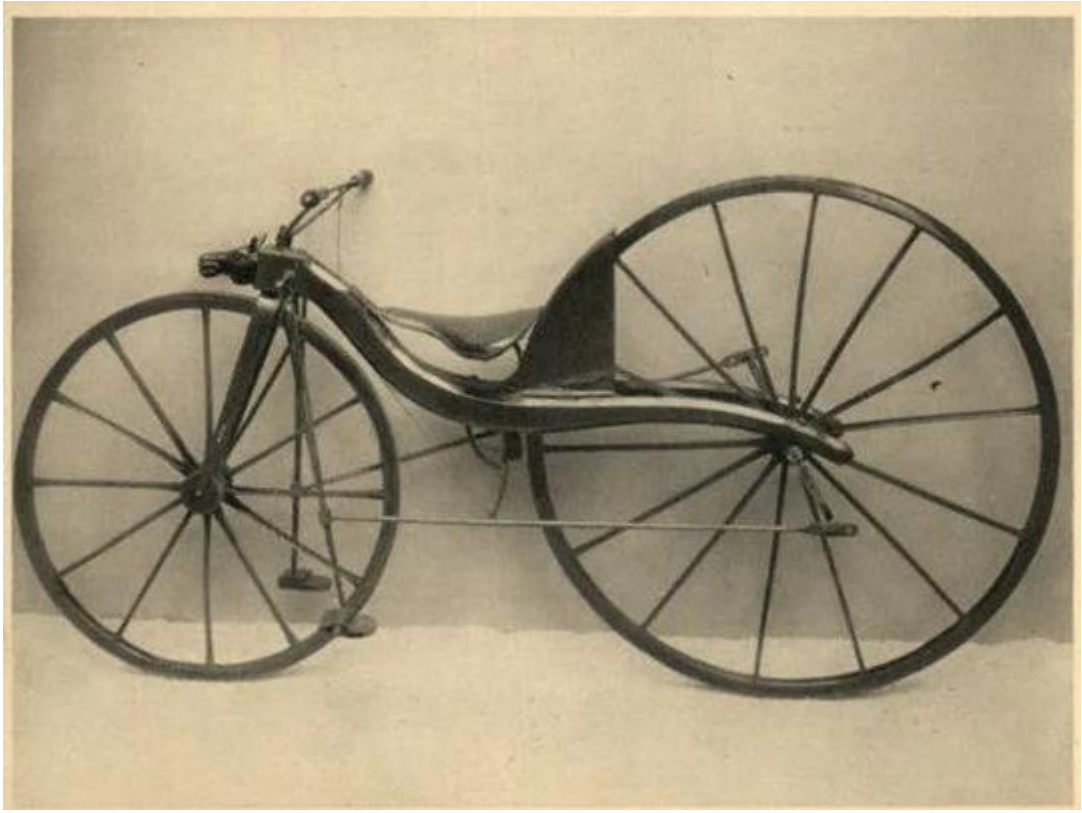
Εικόνα 1.4 *1819 Velocipede [B4]*

Περί το 1819 έγιναν απόπειρες για μηχανικές κατασκευές που βοηθούσαν τον αναβάτη να προωθήσει το *velocipede* αλλά χωρίς επιτυχία έως ότου ο Lewis Gompertz από το Surrey της Αγγλίας το 1821 ανέπτυξε έναν μηχανισμό μετάδοσης κίνησης. Ο μηχανισμός είχε έναν μοχλό πακτωμένο σε ένα τμήμα οδοντωτού τροχού ο οποίος συνεργαζόταν με έναν μικρότερο που έδινε κίνηση στην μπροστινή ρόδα όταν περιστρεφόταν προς μία κατεύθυνση και ήταν ελεύθερο προς την άλλη (καστάνια).



Εικόνα 1.5 Hand powered *Velocipede from Gompertz [B5]*

Η επόμενη σημαντική αλλαγή στην ιστορία του ποδηλάτου ήταν η εφεύρεση του σκωτσέζου Kirkpatrick Macmillan το 1839 που είχε μετάδοση κίνησης στον πίσω τροχό μέσω μοχλών που κινούσε ο αναβάτης με πετάλια.



Εικόνα 1.6 *First pedal powered bike* Macmillan 1839 [B6]

Το νέο *velocipede* κινούνταν με ταχύτητες 16-22 km/h αλλά παρόλα αυτά δεν είναι γνωστό αν πουλήθηκε κάποιο. Η δουλειά του αντιγράφηκε σε μικρό βαθμό με μικρές βελτιώσεις μέχρι το 1863 που στο Παρίσι ο Pierre Michaux ή ο Pierre Lallement τοποθέτησε τα πετάλια στον άξονα του μπροστινού τροχού. Το 1868 οι αδερφοί Hanlon μετέτρεψαν το *velocipede* ώστε να μπορούν να προσαρμόζονται τα πετάλια και η σέλα. Επίσης πρότειναν να

χρησιμοποιούνται λαστιχένιοι δακτύλιοι (τα πρώτα ελαστικά) για να γίνονται τα ποδήλατα αθόρυβα και να αποφεύγεται η ολίσθηση των τροχών. Η μετατροπή αυτή βοήθησε στην διάδοση των *velocipede* στην Αμερική όπου δεν διήρκησε πολύ λόγω του βάρους των *velocipede*, της άβολης θέσης οδήγησης και τους δρόμους της εποχής. Στην Ευρώπη η εξέλιξη του πρόγονου του ποδηλάτου συνεχίστηκε και έκαναν την εμφάνισή τους εφαρμογές που επηρέασαν ριζικά την μορφή του *velocipede*, όπως: ρόδες με συρμάτινες ακτίνες, συμπαγή ελαστικά, πλαίσια από σωλήνες, φρένα στην μπροστινή ρόδα, λασπωτήρες, μετάδοση κίνησης με αλυσοτροχούς (1869, Γαλλία) και κάποιες μορφές εναλλακτών ταχυτήτων. Ο Άγγλος James Starley Ariel ήταν ένας από τους πρωτοπόρους στον τομέα του ποδηλάτου, μέχρι το θάνατό του το 1881, ο πατέρας για πολλές νέες και έξυπνες λειτουργίες που αφορούν την ποδηλασία, κερδίζοντας επάξια τον τίτλο του «πατέρα της βιομηχανίας του ποδηλάτου". Το περίφημο ποδήλατό του Ariel παράχθηκε το 1871, με ακτίνες από σύρμα και πολύ μεγάλη μπροστινή ρόδα. Το Ariel αντιγράφηκε επί δύο δεκαετίες λόγω του καινοτομικού, για την εποχή, σχεδιασμού του. Ο σχεδιασμός του προσέφερε μεγαλύτερη ταχύτητα, εξαιτίας της μεγαλύτερης περιμέτρου του μπροστά τροχού, τοποθετώντας τον αναβάτη πάνω από τα πετάλια.

Αυτός ο τύπος ποδηλάτου, γρήγορα βελτιώθηκε από τον Starley και άλλους μέχρι που έγινε, σε σύγκριση με το παλιό, ένα άνετο, ελαφρύ

Εικόνα 1.7 1871 James Starley Ariel [7]

μηχάνημα, που κέρδισε γρήγορα δημοτικότητα και τελικά έγινε γνωστό ως "Ordinary".

Το Ordinary ήταν ιδιαίτερα επικίνδυνο, αφού το κέντρο βάρους του αναβάτη ήταν ελαφρώς πίσω από το μεγάλο μπροστινό τροχό και ο αναβάτης εύκολα εκτινασσόταν πάνω από αυτόν ή χτυπούσε το κεφάλι του σε αυτόν. Το ατύχημα αυτό συνέβαινε όταν ο εμπρόσθιος τροχός χτυπούσε ένα εμπόδιο στο δρόμο, ή όταν ο αναβάτης πατούσε το φρένο πολύ γρήγορα. Λόγω του μεγάλου κινδύνου του Ordinary έγιναν προσπάθειες για να σχεδιαστεί ένα ασφαλέστερο ποδήλατο. Το αποτέλεσμα των προσπαθειών αυτών ήταν ο σχεδιασμός του Safety και άλλων ποδηλάτων που προσπαθούσαν να φέρουν τον αναβάτη πιο κοντά στο έδαφος. Το 1878 ο Pope έγινε ο πρώτος κατασκευαστής ποδηλάτων στην Αμερική. Ένα χρόνο μετά στην Αγγλία ο Lawson παρήγαγε το Bicyclette, ένα ποδήλατο μη θελκτικό και πολύ εξειδικευμένο για την εποχή του που απέτυχε εμπορικά. Είχε μετάδοση με αλυσοτροχούς στην πίσω ρόδα και ήταν σχεδιασμένο με το κέντρο

βάρους του χαμηλότερα από ότι συνήθως. Μέχρι τα μέσα της

δεκαετίας του 1880, ένας αριθμός Βρετανών κατασκευαστών παράγουν διάφορους τύπους ποδηλάτων ασφαλείας. Την ίδια εποχή κάνουν την εμφάνισή τους και τα ρουλεμάν στα ποδήλατα. Οι πιο επιτυχημένες προσπάθειες ήταν του John Kemp Starley (ανιψιός του Τζέιμς Starley) του οποίου το μοντέλο Rover του 1886, με μετάδοση με αλυσοτροχούς, και χαμηλές ρόδες, επηρέασε τον σχεδιασμό ποδηλάτων μέχρι σήμερα.

Εικόνα 1.8 *John Kemp Starley 1886* [B8]

Το 1888 και 1889, ο John Boyd Dunlop, από το Μπέλφαστ, της Ιρλανδίας, κατοχύρωσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για πνευματικά ελαστικά στην Αγγλία και ένα χρόνο μετά στις Ηνωμένες Πολιτείες. Παρόλη την κριτική που ασκήθηκε για την ευρεσιτεχνία αυτή, έγινε κοινώς αποδεκτή η αξία της αφού μείωσε σημαντικά του κραδασμούς και βελτίωσε την ταχύτητα του ποδηλάτου. Τα ποδήλατα συχνά ήταν εξοπλισμένα και με μηχανισμούς πέδησης που λειτουργούσαν όταν γύριζαν τα πετάλια αντίστροφα της φοράς που θα προωθούσε το ποδήλατο. Όμως οι μηχανισμοί αυτοί δεν περιλάμβαναν ελεύθερο έως το 1898. Την εποχή εκείνη εμφανίστηκαν και οι πρώτες εναλλαγές ταχυτήτων αλλά δεν έγινα δημοφιλείς λόγω κόστους. Στη διάρκεια των εξήντα επόμενων χρόνων το ποδήλατο έπαψε να είναι δημοφιλές στους ενήλικες. Στη δεκαετία του 1970 όμως η ποδηλασία άνθισε ως άθλημα με αποτέλεσμα την αρχή καινούργιων εξελίξεων στο ποδήλατο. Με

τους αγώνες δημιουργήθηκε σταδιακά μεγάλος ανταγωνισμός στην ποδηλατική βιομηχανία, με αποτέλεσμα να γίνονται μελέτες για την γεωμετρία, τα υλικά κατασκευής, και τις αεροδυναμικές αντιστάσεις των ποδηλάτων και των εξαρτημάτων τους. Η παράλληλη ανάπτυξη της βιομηχανίας αυτοκινήτων, μοτοσικλετών, αεροσκαφών και διαστημοπλοίων οδήγησε στην βελτίωση του σχεδιασμού των ποδηλάτων έτσι ώστε να γίνουν ελαφρύτερα, ανθεκτικότερα, αεροδυναμικότερα και αποδοτικότερα.

Κεφάλαιο 2

Εισαγωγή

Στις μέρες μας το ποδήλατο διαδραματίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην ατομική μας υγεία, την φιλική προς το περιβάλλον μετακίνηση και σε πολλές περιπτώσεις ως εργαλείο της δουλειάς (πχ. Bike Delivery). Με τα ποδήλατα ως το 2019 να αγγίζουν τα 1.000.000.000 (1billion) παγκοσμίως η ζήτηση για ασφάλεια, αντοχή και απόδοση έχει αυξηθεί από την βιομηχανία.

Ο δικυκλιστής αφιερώνει ένα μεγάλο ποσοστό της παραγόμενης ισχύς του για να υπερνικήσει την αεροδυναμική οπισθέλκουσα. Το ποσοστό αυτό βρίσκεται μεταξύ 70% -90%. [A1] Chowdhury, (2011) και Debraux, (2011)

Οπισθέλκουσα ,Drag (D)

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A$$

Όπου ρ: η πυκνότητα του ρευστού (ατμοσφαιρικός αέρας)

U 2: η σχετική ταχύτητα

CD: ο συντελεστής αντίστασης

A: Το εμβαδό της διατομής στο επίπεδο πρόσπτωσης

Η διαφορά ανάμεσα στους τρείς πρώτους αθλητές που τερμάτισαν στο Tour de France το 2007 ήταν 31 δευτερόλεπτα μετά από σχεδόν 90 ώρες αγώνα. Στον ίδιο αγώνα, στο τελευταίο αγώνισμα τριάθλου οι πρώτοι δέκα ποδηλάτες, είχαν διαφορά περίπου 3 λεπτά σε αγώνα διάρκειας μίας ώρας. Μία φαινομενικά μικρή βελτίωση της τάξεως του 1% δηλαδή περίπου 40 δεύτερα σήμαινε την διαφορά ανάμεσα στην 3^{η} και την 8^{η} θέση. Η τάση προς ολοένα και περισσότερη αεροδυναμική βελτιστοποίηση στον τομέα της αγωνιστικής ποδηλασίας είναι αδιαμφισβήτητη. Είναι προφανές πως το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής οπισθέλκουσας δύναμης (DRAG FORCE) που αντιτίθεται στην κίνηση του αναβάτη, ασκείται στον ίδιο, το πλαίσιο του ποδηλάτου συμπεριλαμβανομένου του πιρουνιού (fork), της αερόμπαρας (aerobar) και των τροχών. Η συμμετοχή των τροχών στην συνολική ανεπιθύμητη οπισθέλκουσα δύναμη έχει συμπεραθεί ότι είναι της τάξεως του 10%-15%. [A2a] Jermy (2008). Ενώ η αεροδυναμική βελτίωση των τροχών μπορεί να επιτύχει συνολική μείωση κατά του Drag 2%-3%. [A2b] Greenwell, (1995)

Εικόνα 2.1 *Aero position optimization* [B9]

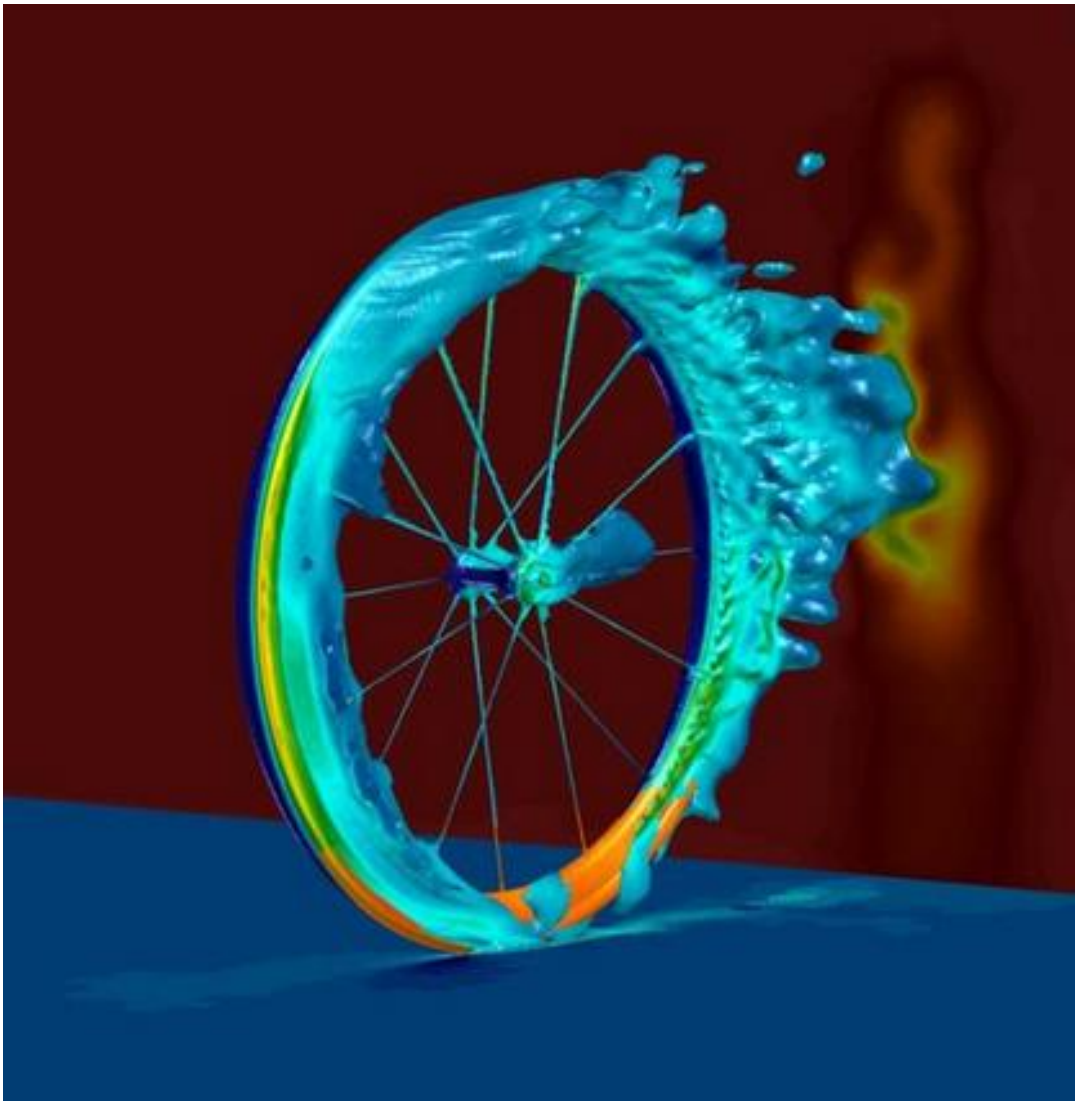
Η ρόδα ως ένα από τα κύρια εξαρτήματα καθορίζει την απόδοση και την ασφάλεια του ποδηλάτου σε όλες τις συνθήκες.

Μια ελαφριά και αεροδυναμική ρόδα είναι απαραίτητη για να ελαχιστοποιήσει τις ενεργειακές απώλειες κατά την επιτάχυνση.

Οι παραδοσιακοί τροχοί ποδηλάτου κατασκευάζονται από κράματα χάλυβα ή αλουμινίου. Παρόλο που τα παραδοσιακά υλικά είναι χρήσιμα, έχουν περιορισμούς για την ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων λόγω των εν γένη υλικών ιδιοτήτων τους. Τα σύνθετα υλικά από άνθρακα και εποξική ρητίνη είναι μια λύση για την ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων αυτών των απαιτήσεων, λόγω της

υψηλής ακαμψίας, αντοχής και χαμηλής πυκνότητας. Επιπλέον, αυτά τα σύνθετα υλικά είναι ανταγωνιστικά όσον αφορά τις ιδιότητες κόπωσης και έχουν καλύτερη ποιότητα απόσβεσης και αντίστασης στη διάβρωση. Επιπλέον, μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα την περίπτωση και τις σχεδιαστικές απαιτήσεις λόγω των ανισοτροπικών ιδιοτήτων τους. Στην ουσία η ίνα άνθρακα έχει διαφορετικές αντοχές ανάλογα την κατεύθυνση του φορτίου που της ασκείται. Ο σχεδιαστής-μελετητής έχει λοιπόν την δυνατότητα ανάλογος την γωνία, τον αριθμό των στρώσεων και το είδος της στρώσης (lamination), να καθορίζει τις αντοχές του τελικού προϊόντος κατά άξονα και κατεύθυνση.

Αποτελέσματα του [A3] Zdravkovich, (1992) έδειξαν ότι σε αεροσύραγγα η προσθήκη απλών αεροδυναμικών βοηθημάτων για την αύξηση του βάθους της ζάντας (rim depth)



Εικόνα 2.2 *Aero rim flow visualization [B10]*

επέφερε μείωση του drag σε βαθμό 5%. Βέβαια, προφανώς όσο αυξάνεται το βάθος της ζάντας και μειώνεται το drag εκθέτουμε όλο και μεγαλύτερη επιφάνεια στον αέρα που κτυπάει το προφίλ μας υπό κλίση και άρα αυξάνουμε την πλευρική δύναμη που ασκείται στην ρόδα από τον άνεμο (Side force). Αυτή η δύναμη δημιουργεί ροπή στο τιμόνι του αναβάτη και καθιστά την οδήγηση του ποδηλάτου ασταθή σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου.

Κεφάλαιο 3

Αεροδυναμική μελέτη

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν οι αεροδυναμικές παραδοχές που τέθηκαν στο πρόγραμμα, τα αριθμητικά αποτελέσματα από τις υπολογιστικές διαδικασίες καθώς και θα γίνει μια σύγκριση ανάμεσα στις δυνάμεις που παρουσιάζει το βελτιωμένο σχέδιο σε σχέση με το βασικό.

3.1 Αεροδυναμικές Παραδοχές

Ερχόμαστε στον πρώτο σκοπό της παρούσας εργασίας που είναι η βελτιστοποίηση του αεροδυναμικού προφίλ ώστε να μειωθούν μεν οι δυνάμεις drag αλλά ταυτόχρονα να εξετάσουμε συνολικά τις δυνάμεις που ασκούνται στην ρόδα. Ώστε να βρεθεί η χρυσή τομή στο σχέδιο αφού πρώτα έχουμε συμπεριλάβει διαφορετικά σενάρια μετωπικών και πλευρικών ανέμων καθώς και διαφορετικές ταχύτητες αναβάτη-ποδηλάτου.

Στις δημοσιεύσεις των [A4,A5,A6] Kyle & Burke (1984,1985,1991), παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του drag μοντελοποιώντας περιστρεφόμενες ρόδες σε σχέση με σταθερές. Για αυτό το λόγω και για πληρέστερη και ορθότερη ανάλυση επιλέξαμε να εισάγουμε στο μοντέλο μας περιστρεφόμενες περιοχές (rotating regions) για τη στεφάνη και το ελαστικό ώστε να έχουμε αποτελέσματα πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες. Το κόστος για κάτι τέτοιο είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα του μοντέλου και οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Γενικά τέτοιου είδους μοντελοποιήσεις και προσομοιώσεις έχουν υψηλές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και είναι αρκετά ενεργοβόρες.

Επίσης σημαντικό δεδομένο μετά τον ορισμό της περιστρεφόμενης περιοχής είναι η υπόθεση πως η ρόδα ακουμπά στο έδαφος, το

ελαστικό έρχεται σε επαφή με αυτό και το πλέον σημείο επαφής της γίνεται περιοχή επαφής της με το έδαφος (contact patch).

Έτσι λαμβάνουμε υπόψιν ότι το ελαστικό παραμορφώθηκε υπό την επίδραση του βάρους του ποδηλάτου. Το έδαφος είναι μια σημαντική επιφάνεια εάν θέλουμε να μελετήσουμε την αεροδυναμική του τροχού όπως και εντοπίζεται από τους [A7] McManus & Zhang, (2006) οι οποίοι χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική μέθοδο Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes (URANS), συγκρίνουν τα αποτελέσματα του υπολογισμού της CFD σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα των [A8,A9,A10] Fackrell & Harvey, (1973,1974,1975) για περιστρεφόμενο ελαστικό αυτοκινήτου σε σχέση με το έδαφος, χρησιμοποιώντας την μονή εξίσωση των [A11] Spalart-Allmaras (S-A), (1992) και τις δύο εξισώσεις του μοντέλου k-ε τυρβώδους ροής (RKE). [A12], (1995).

Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής έρευνας έδειξαν καλή ποιοτική και ποσοτική συμφωνία με τα πειραματική δεδομένα.

Συνεπώς και εμείς ήρθαμε στην απόφαση να μοντελοποιήσουμε το έδαφος στην προσομοίωση μας ως ένα στερεό με σχετική κίνηση προς το εξεταζόμενο συναρμολόγημα ρόδας πιρουνιού τέτοια ώστε ο περιστρεφόμενος τροχός να μην εμφανίζει ολίσθηση ως προς αυτό.

Ακόμη η επιλογή του μεγέθους του συναρμολογήματος (Assembly) προς εξέταση έχει άμεσο αντίκτυπο στον υπολογιστικό όγκο και

στον χρόνο υπολογισμού κάθε σεναρίου. Σε ένα ιδανικό σενάριο θα έπρεπε στο μοντέλο μας να συμπεριλάβουμε τον σκελετό του ποδηλάτου, τον αναβάτη, τις δύο ρόδες, το τιμόνι, διαφορετικές περιπτώσεις κίνησης, ταχύτητας και κλίσης οδοστρώματος κτλ.

Προφανώς κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό αφού ακόμα και σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα θα ήταν βελτιστοποιημένο για το συγκεκριμένο συνδυασμό ποδηλάτου-αναβάτη.

Ο λόγος που το αναφέρω αυτό είναι ότι θα μελετηθεί μόνον η εμπρόσθια ρόδα του ποδηλάτου για τους εξής λόγους:

- για την μείωση του υπολογιστικού φόρτου του μηχανήματος και κατά συνέπεια του συνολικού χρόνου μη διαθεσιμότητας του.
- διότι η αεροδυναμική συμμετοχή της ίδιας είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με την οπίσθια ρόδα, αφού η ροή του αέρα που προσκρούει στην πρώτη είναι εμφανώς πιο στρωτή και δεν επηρεάζεται από τα εξαρτήματα που μεσολαβούν έως ότου ο αέρας έρθει σε αλληλεπίδραση με την οπίσθια.
- Συντελεί στον έλεγχο της κατεύθυνσης του ποδηλάτου, συνεπώς είναι περισσότερο επηρεαζόμενη από τις πλευρικές

δυνάμεις του αέρα (Side force) που ασκούν ροπή στρέψης στις ρόδες και στο τιμόνι και αλλάζουν την κατευθυντικότητα του.

Συνεπώς οι αεροδυναμικά βελτιστοποιημένες ρόδες είναι μείζονος σημασίας για τον αθλητή ο οποίος θέλει να είναι ανταγωνιστικός.

Λογισμικό

Οι υπολογισμοί CFD έγινα χρησιμοποιώντας το SolidWorks Flow Simulation.Το ίδιο είναι ένα πρόσθετο κομμάτι του SolidWorks
(το SolidWorks είναι ένα 3D σχεδιαστικό πρόγραμμα μοντελισμού που εκδίδεται από την Dassault Systèmes)
το οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό και μοντελοποίησης της ροής ρευστού με την μορφή πεπερασμένων στοιχείων.

Επιλογή ελαστικού

Τα πιθανά ελαστικά που μπορεί να επιλέξει ένας αναβάτης δρόμου διαφοροποιούνται στο μοτίβο των αυλακώσεων, το υλικό κατασκευής άρα και την αντίσταση κύλισης και κρατήματος ενώ αυτό που μας ενδιαφέρει για την παρούσα μελέτη είναι η διαστάσεις τους.

Παραδείγματος χάριν όταν κάποιος αναφέρεται σε ένα ελαστικό 700x25c εννοεί ένα ελαστικό με εξωτερική διάμετρο 700 mm και πλάτος 25 mm. Το 25-622 είναι ο τρόπος του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO) για τον προσδιορισμό του ελαστικού 700x25c στο παραπάνω παράδειγμα. Αφού 622 είναι η ακριβής διάμετρος σε χιλιοστά στο σημείο που έρχεται σε επαφή με την στεφάνη.

Έπειτα από εκτενή έρευνα σε ελαστικά και διαστάσεις στην αγορά καταλήξαμε σε ένα ελαστικό διαμέτρου 25mm δηλαδή ένα μέσο πλάτος ελαστικού (ελάχιστο και μέγιστο που συναντάται: 18mm/30mm αντίστοιχα) βελτιστοποιώντας έτσι την ζάντα μας για ένα τέτοιο ελαστικό.

Σε περίπτωση που ο τελικός χρήστης επιλέξει ένα διαφορετικού πλάτους ελαστικό απλά θα έχουν αλλάξει κατά ένα μικρό ποσοστό οι δυνάμεις που υπολογίσαμε.

Προφίλ ζάντας

Κατά τον ίδιο τρόπο ορίσαμε ένα αρχικό προφίλ σύμφωνα με τις εμπορικές επιλογές που είχε στην διάθεση του ένας χρήστης από γνωστές εταιρίες του κλάδου.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας συγκριτικός πίνακας για τα προαναφερθέντα μετά από αντίστοιχη έρευνα αγοράς (12/2020)

3.2 Έρευνα Αγοράς

Μάρκα	Μοντέλο	Ακτίνες	Βάρος (g)	Βάθος(mm)	Διαστάσεις ελαστικού	Πλάτος ζάντας(mm)	Τιμή σετ σε €
Prototype	Pro tour DB 3	24	1425	30	19c-28c	20/27	1270
DT swiss	ARC 1400	24	1552	50	-	20/26,5	2099
Shimano	ULTEGRA Tubeless Disc Brake	24	1470	28	25c-28c	23/-	-
Campagnolo	Shamal	24	1589	21	25c-30c	21/-	1300
Hunt	Carbon aero 50	24	1487	50	25c (optimized)	20/26,6	967
Reynolds	Reynolds AR 29	24	1520	30	-	21/29,5	1110
ENVE	SE 3.4 AR	24	1420	39	28c-32c	25/32	2155
Zipp	858 NSW Carbon	24	1773	77-82	-	18/-	2400
Fast Forward	F6T	24/28	1635	60	21c-33c	-/22,4	1400
Corima	MCC DX	12	1320	32	23c-32c (25c optimal)	-/26	-

THM	Lunatum	24	1335	36	23c-28c	-/24,5	2350
Carbon-Ti	X-Wheel SpeedCarbon	24	1280	38	25c-32c	19,5/25	1700
AX lightness	engage 45C Disc SL carbon	24	1350	45mm	22,23,25,28mm	17,5/26,5mm	1.200
Μέσος όρος		1474g				1.631,91 €	

Πίνακας 3.1

Έρευνα Αγοράς

3.3 Ανάλυση διαδικασίας

Στο εικονίδιο Wizard ακολουθούμε την σειρά και επιλέγουμε

- Όνομα project
- Σύστημα μέτρησης : SI
- Θερμοκρασία σε Celsius
- Εξωτερική ροή ρευστού
- Rotation
- Gases: Air
- Flow type: laminar & Turbulent

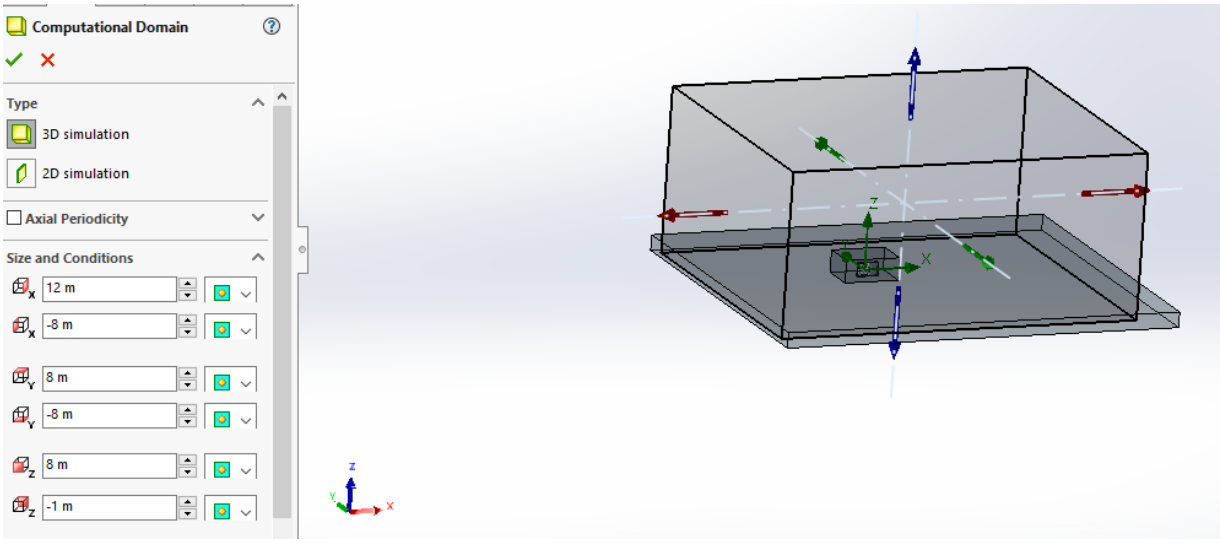
Στην ουσία μοντελοποιούμε ένα σταθερό ποδήλατο ως προς το σύστημα συντεταγμένων, με περιστρεφόμενες ρόδες, το έδαφος να κινείται με γραμμική ταχύτητα κατά Χ κάτω από τις ρόδες και χωρίς ολίσθηση προς αυτές, όπως επίσης και το περιβάλλον ρευστό έχει κίνηση κατά συνιστώσες Χ,Υ, με ταχύτητα Vx, Vy αντίστοιχα.

Το ποδήλατο στην πραγματικότητα έχει ταχύτητα αλλά στην μοντελοποίηση εισάγουμε μία τιμή ταχύτητας ρευστού σε κάθε διεύθυνση και γι' αυτό υπολογίζουμε την σχετική ταχύτητα που αντιλαμβάνεται ο τροχός, την ονομάζουμε Vx, Vy, όπως προαναφέρθηκε και είναι το άθροισμα κατά x, y αντίστοιχα από την μία της ταχύτητας του τροχού και από την άλλη της ταχύτητας του ανέμου ως προς το έδαφος.

Τα οποία θα επεξηγήσουμε παρακάτω.

- Computational domain

Ορίζουμε το χωρίο στο οποίο λαμβάνουν χώρα οι υπολογισμοί ενώ

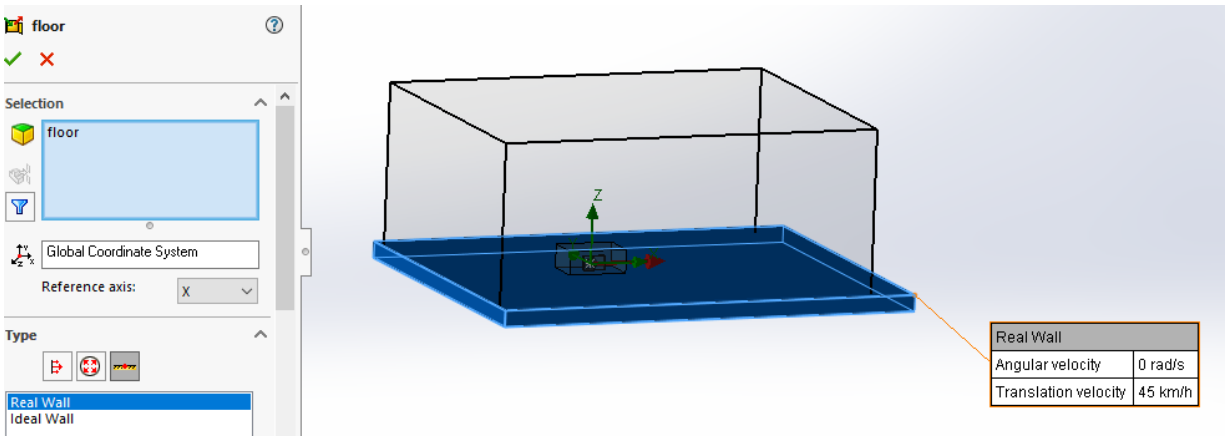


Εικόνα 3.3 Computational Domain

θα αποτελεί και το μεγαλύτερο κομμάτι όγκου της πλεγματοποίησης που θα πραγματοποιηθεί σε δεύτερο στάδιο.

- Οριακές συνθήκες

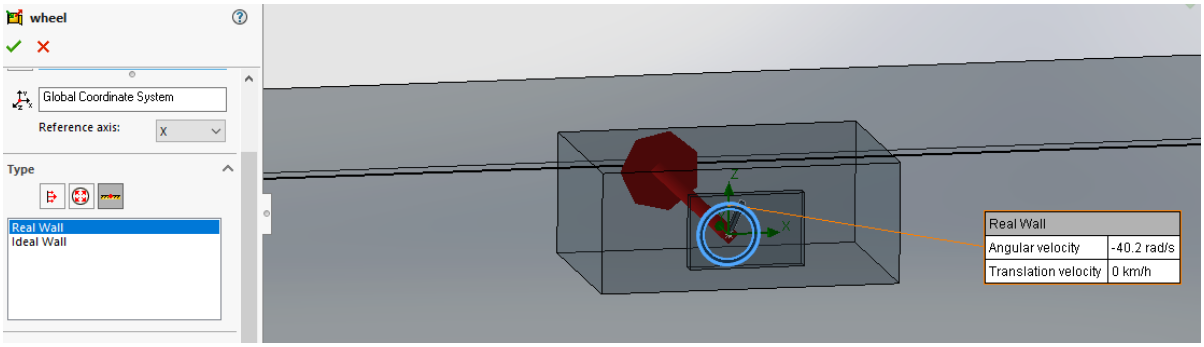
Έδαφος: μοντελοποιείται ως ένας πραγματικός τοίχος(Real Wall) και κατά τον άξονα του συστήματος μας X του δίνουμε γραμμική ταχύτητα τέτοια ώστε να συνάδει με την ταχύτητα κίνησης του ποδηλάτου που θέλουμε να μελετήσουμε.



Εικόνα 3.4 Floor

Ρόδα : μοντελοποιείται ως ένας πραγματικός τοίχος(Real wall) ώστε το ρευστό να μπορεί να αλληλοεπιδράσει μαζί της.

Στην προς μελέτη ρόδα στην καρτέλα Boundary conditions ορίζουμε μια περιστροφική κίνηση σε rad/s τέτοια ώστε να συνάδει με την ταχύτητα κίνησης του εδάφους



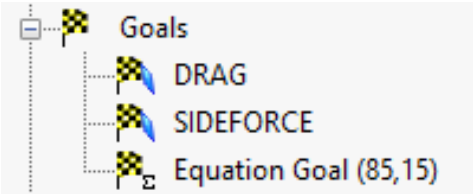
Εικόνα 3.5 Wheel

- Στόχοι (Goals)

Στην καρτέλα στόχοι , το πρόγραμμα θέλει να του δώσουμε τις μεταβλητές τις οποίες θα υπολογίζει καθ' όλη την διαδικασία μέχρι να συγκλίνουν και να μας δώσει τα αποτελέσματα. Σαν στόχους λοιπόν επιλέγουμε τις δυνάμεις που δέχεται ο τροχός κατά X και Y στην επιφάνεια του (Surface Goal) τις οποίες και μετονομάζουμε σε Drag και Side force αντίστοιχα. Εδώ θα σημειώσουμε πώς για να ζυγίσουμε την επιρροή που θέλουμε να έχει ο καθένας από τους δύο στόχους στο τελικό αποτέλεσμα, δημιουργούμε και μια νέα εξίσωση

Equation Goal = {DRAG}*0,85+{SIDEFORCE}*0,15

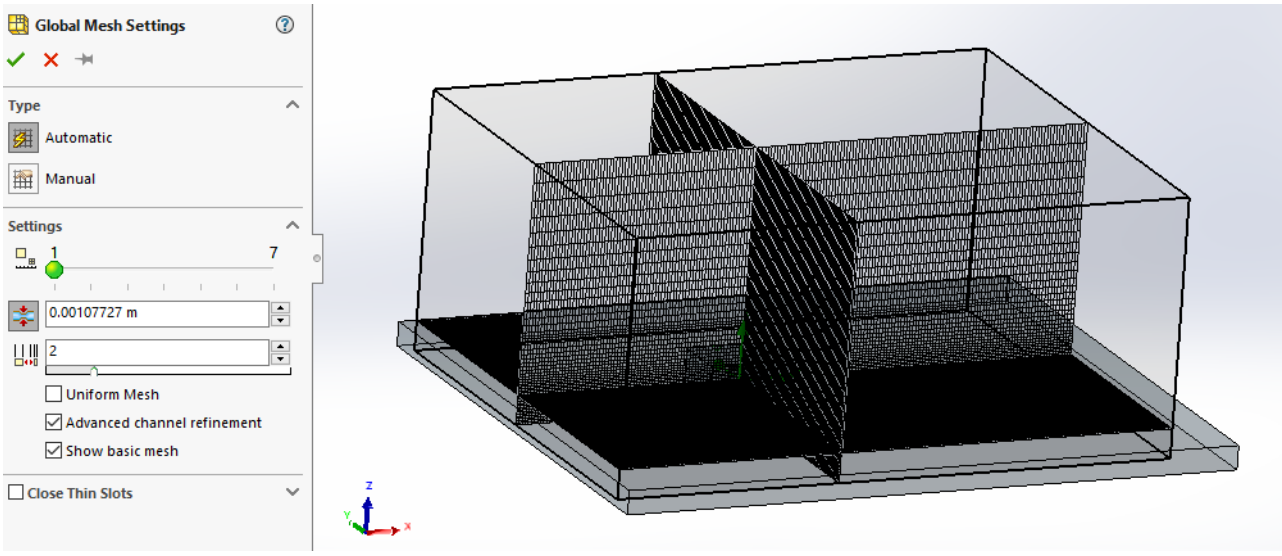
(εν συντομία : σενάριο 85/15) όπου δίνοντας συντελεστές βαρύτητας στις δυνάμεις θα ορίζουμε το ποσοστό που οι τιμές του επιδρούν στο τελικό αποτέλεσμα.



- Πλέγμα(Mesh)

Για την πλεγματοποίηση (meshing) στο πρόβλημα μας επιλέγουμε χάριν οικονομίας και ακρίβειας των υπολογισμών μας να ορίσουμε 3 πλέγματα που εμπεριέχονται το ένα μέσα στο άλλο με την εξής λογική . Το γενικό πλέγμα (**Global mesh**) αντλεί τις διαστάσεις του

από το Computational Domain και είναι αυτό που θα χωρίσει το ρευστό μας σε υποδιαιρέσεις.



Εικόνα 3.5 Mesh

Το μεγαλύτερο μέρος του χώρου μας δεν χρειάζεται τοπική ανάλυση του πλέγματος και για αυτό το λόγο το γενικό πλέγμα δεν είναι αρκετά αναλυτικό για να κρατηθούν χαμηλές οι υπολογιστικές απαιτήσεις.

Στην συνέχεια ένα δεύτερο μικρότερο παραλληλεπίπεδο χωρίο ορίζεται έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνει μόνο τον τροχό και το

περιβάλλον ρευστό του τροχού το οποίο στο σημείο αυτό καμπυλώνει γύρω από το στερεό (**Local Mesh**).

Κάθε νέο υποχωρίο πλεγματοποίησης υποδιαίρει εκ νέου και σε μικρότερα κομμάτια τον υπό εξέταση όγκο. Τέλος ορίστηκε ένα τρίτο χωρίο πλεγματοποίησης (**Rim Mesh**), ο στερεός όγκος του ίδιου του τροχού.

3.4 Πρώτες αεροδυναμικές δοκιμές

Ο Στόχος (Goal) της προσομοίωσής είναι να υπολογιστούν οι δυνάμεις που ασκούνται στην ρόδα από τον αέρα.

Οι δυνάμεις που μελετάμε είναι οι εξής:

- Κατά άξονα Χ και αντίθετα από την φορά κίνησης του τροχού η οπισθέλκουσα δύναμη **DRAG** η οποία αποτελεί την αεροδυναμική αντίσταση.

- Κατά άξονα Υ η δύναμη που επενεργεί στην επιφάνεια του τροχού **SIDEFORCE** και προκαλείται από τον πλευρικό άνεμο.

- Η εξίσωση **Equation Goal (85,15)** = 0,85*DRAG + 0,15* SIDEFORCE [N]

- Η εξίσωση **Equation Goal (50,50)** = 0,50*DRAG + 0,50* SIDEFORCE [N]

εξετάστηκαν τέσσερις (4) περιπτώσεις διαφορετικών ταχυτήτων ποδηλάτη-ανέμου (εν συντομία V1, V2, V3, V4) όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα

Case	*Bicycle Speed(km/h)*	*Absolute Wind Speed(km/h)*	*Wind angle (deg)*	*Partial Wind Speed (X, km/h)*	*Partial Wind Speed (Y, km/h)*
V1	*45*	*0*	*0*	*0*	*0*
V2	*32*	*18*	*2*	17,99725867	0,3141340519
V3	*32*	*18*	*7*	17,96642835	1,098841343
V4	*32*	*18*	*12*	17,90139993	1,881457051
Relative Speed (Fluid Speed, km/h)					
Case	*Vx*		*Vy*		
V1	45		*0*		
V2	49,99725867		0,31413405		
V3	49,96642835		1,09884134		
V4	49,90139993		1,88145705		

Πίνακας 3.2 Wind Conditions

για τις οποίες ορίστηκαν 100 σενάρια διαφορετικής γεωμετρίας για κάθε μία ταχύτητα και μελετήθηκαν 2 (δύο) Equation Goals, ένα σετ σεναρίων (85/15) και ένα σετ (50/50). Δηλαδή έγινε ένας υπολογισμός 800 σεναρίων για να έχουμε το **πρώτο σετ αποτελεσμάτων**. Για να προκύψουν αυτά τα 100 σενάρια θέσαμε τα όρια (εύρος) στα οποία το σχέδιο μπορεί να μεταβληθεί. Στο αρχικό Sketch για παράδειγμα ξέρουμε ότι το πλάτος της ζάντας δεν θέλουμε να ξεπερνάει τα 30 mm. Έτσι ως INPUT VARIABLES εκτός από τις ταχύτητες ανέμου, ρόδας και εδάφους έχουμε προσθέσει και ένα ζεύγος σημείων από την καμπύλη SPLINE του σχεδίου μας, τα οποία μπορούν να κινηθούν σε ένα εύρος x,y το καθένα όπως θα εξηγηθεί εκτενέστερα παρακάτω.

Η θέση των ίδιων ορίζεται τυχαία από το μηχάνημα με την εντολή CREATE κατά την δημιουργία των 100 σεναρίων. Αρχικά λοιπόν δοκιμάζουμε 800 διαφορετικά σενάρια στα οποία υπολογίζεται η οπισθέλκουσα δύναμη, η πλευρική δύναμη και η εξίσωση που τις συσχετίζει. Αξίζει να σημειώσουμε ότι ο χρόνος που χρειάστηκε ο υπολογιστής τελευταίας τεχνολογίας για να υπολογίσει αυτά τα σενάρια ήταν περίπου μια εβδομάδα!

Τα αποτελέσματα πλέον τα επεξεργαστήκαμε στο MS EXCEL για να εντοπίσουμε σε ποιες περιπτώσεις είχαμε τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Το αρχικό προφίλ δημιουργήθηκε μετρώντας ένα ήδη εμπορικό μοντέλο με μετρητικά όργανα ακριβείας ώστε να σχεδιαστεί στον υπολογιστή.

Εικόνα 3.1 Εσωτερικό μικρόμετρο

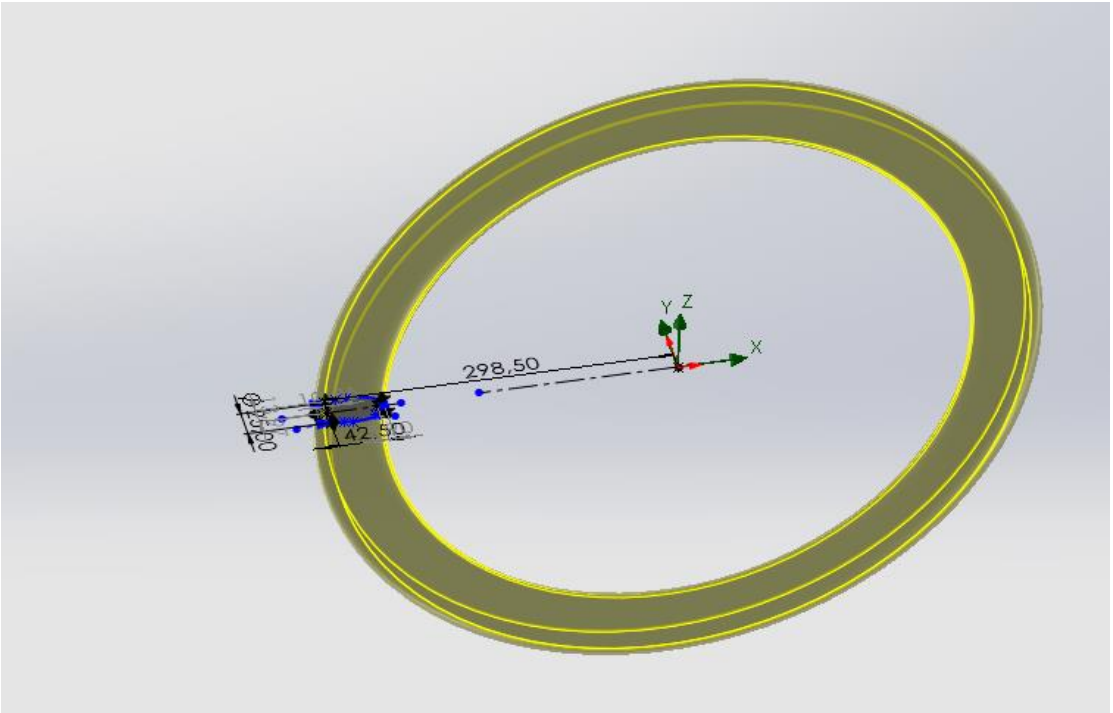
Χρησιμοποιήσαμε το κοινό παχύμετρο για να μετρήσουμε το πάχος του προφίλ όπου ήταν αυτό δυνατό σε μια τεμαχισμένης στεφάνης του εμπορίου. Για τον προσδιορισμό του μεταβλητού πάχους τοιχώματος σε διάφορα άλλα σημεία με δύσκολη πρόσβαση λόγω στης γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε ένα εσωτερικό μικρόμετρο

Όπως επίσης χρησιμοποιήθηκαν ραδιόμετρα για την μέτρηση των εσωτερικών και εξωτερικών καμπυλών της στεφάνης και της εσωτερικής διαμόρφωσης.

Εικόνα 3.2 Ραδιόμετρα

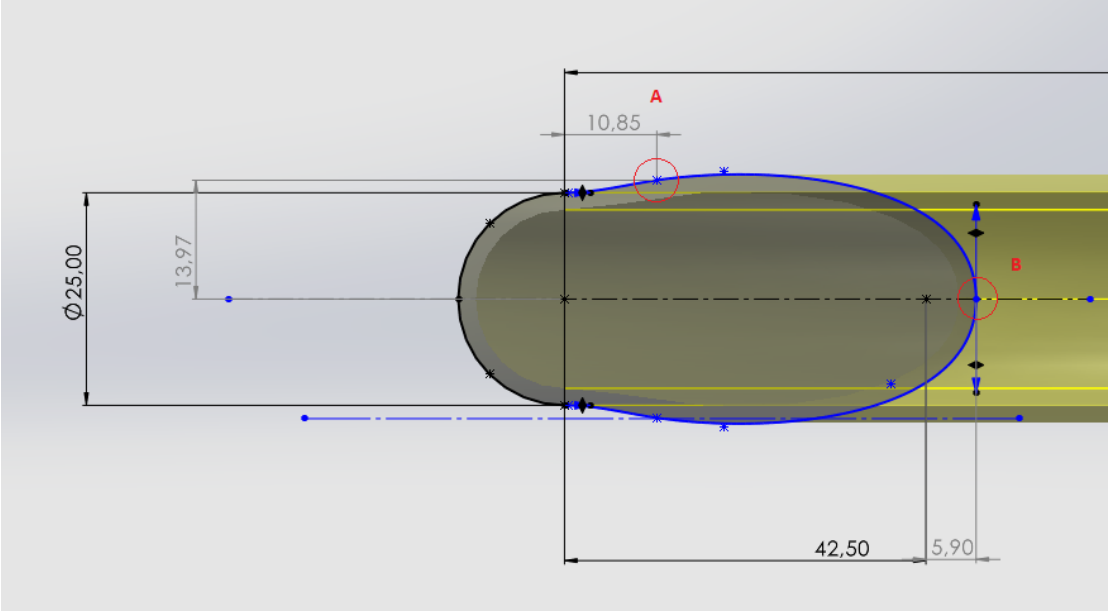
Αφού σχεδιάστηκε το προφίλ όπως προαναφέρθηκε με τη βοήθεια των μετρητικών οργάνων, πάνω στο σχέδιο ορίστηκαν 2 μεταβλητής θέσης σημεία εκ των οποίων διέρχεται η καμπύλη Spline που ορίζει το εξωτερικό σχήμα της στεφάνης.

Γνωρίζαμε εκ των προτέρων ότι οι διαστάσεις του **προφίλ** της ζάντας μας δεν θέλουμε να ξεπερνούν τα 30mm σε πλάτος και τα 52 mm σε μήκος (βάθος ζάντας).



Εικόνα 3.6 3D Rim model with the blue highlighted sketch profile.

Στο παρακάτω στιγμιότυπο φαίνονται τα σημεία ελέγχου της καμπύλης A , B με κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 3.7 Basic rim profile sketch with A,B spline control points.

Το **σημείο Α** έχει μια διάσταση 10,85 mm στο σχήμα (**κατά Χ**) , η οποία είναι ελεύθερη να μεταβληθεί από 6mm έως 36mm

Ενώ η διάσταση 13,97mm από τον άξονα συμμετρίας (**κατά Υ**) , είναι ελεύθερη να μεταβληθεί από 12,5mm έως 16mm.

Το σημείο Β έχει μια διάσταση 5,9mm στο σχήμα (**κατά Χ**) η οποία είναι ελεύθερη να μεταβληθεί από 0 έως 9 mm δίνοντας ένα βάθος ζάντας από 42,5mm έως 51,5 mm.

Το προφίλ ελέγχου μας δίνει τα

- **Βασικά** Αεροδυναμικά Αποτελέσματα του αρχικού σχεδίου

Περίπτωση Α (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V1 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	45
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0
Translation velocity (floor) [km/h]	45
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-40,2
Equation Goal (85,15) [N]	1,24643879
DRAG [N]	1,4522163
SIDEFORCE [N]	0,0103658

Περίπτωση Β (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V2 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,997
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0,31413
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,501693136
DRAG [N]	1,750066887
SIDEFORCE [N]	0,094241881

Περίπτωση Γ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V3 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,9664
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,098
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,55372495
DRAG [N]	1,761704775
SIDEFORCE [N]	0,375172627

Περίπτωση Δ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V4 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,901
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,8814
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,606127488
DRAG [N]	1,777
SIDEFORCE [N]	0,637

Περίπτωση Ε (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V1 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	45
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0
Translation velocity (floor) [km/h]	45
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-40,2
Equation Goal (50/50) [N]	0,736809319
DRAG [N]	1,47071677
SIDEFORCE [N]	0,002901868

Περίπτωση Z (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V2 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,997
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0,31413
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	0,984692847
DRAG [N]	1,767350741
SIDEFORCE [N]	0,202034953

Περίπτωση H (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V3 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,9664
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,098
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	1,102759503
DRAG [N]	1,78
SIDEFORCE [N]	0,426

Περίπτωση Θ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V4 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,901
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,8814
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	1,24356815
DRAG [N]	1,794383544
SIDEFORCE [N]	0,692752757

Έπειτα τρέξαμε την μοντελοποίηση και υπολογίστηκε το πρώτο σετ 800 σεναρίων για να έχουμε μια πρώτη εικόνα των οκτώ (8) καλύτερων σχεδίων-αποτελεσμάτων τα οποία και φαίνονται παρακάτω.

- **Βελτιωμένα** Αεροδυναμικά Αποτελέσματα

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Α (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V1 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	45
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0
Translation velocity (floor) [km/h]	45
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-40,2
Equation Goal (85,15) [N]	1,232498012
DRAG [N]	1,447548201
SIDEFORCE [N]	0,013880277

Ποσοστιαία Βελτίωση : 1,13%

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Β (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V2 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,997

Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0,31413
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,49880151
DRAG [N]	1,750279371
SIDEFORCE [N]	0,073760297

Ποσοστιαία Βελτίωση : 0,02%

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Γ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V3 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,9664
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,098
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,55048761
DRAG [N]	1,761213666
SIDEFORCE [N]	0,356373293

Ποσοστιαία Βελτίωση : 0,02%

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Δ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V4 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,901
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,8814
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,604346008
DRAG [N]	1,777562503
SIDEFORCE [N]	0,622785869

Ποσοστιαία Βελτίωση : 0,01%

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Ε (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V1 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	45
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0
Translation velocity (floor) [km/h]	45

Angular velocity (wheel) [rad/s]	-40,2
Equation Goal (50/50) [N]	0,727367489
DRAG [N]	1,467291459
SIDEFORCE [N]	0,010256481

Ποσοστιαία Βελτίωση : 1,30%

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Z (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V2 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,997
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0,31413
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	0,964545827
DRAG [N]	1,764297298
SIDEFORCE [N]	0,164794355

Ποσοστιαία Βελτίωση : 2,09%

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Η (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V3 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,9664
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,098
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	1,071099713
DRAG [N]	1,780660097
SIDEFORCE [N]	0,36153933

Ποσοστιαία Βελτίωση : 2,96%

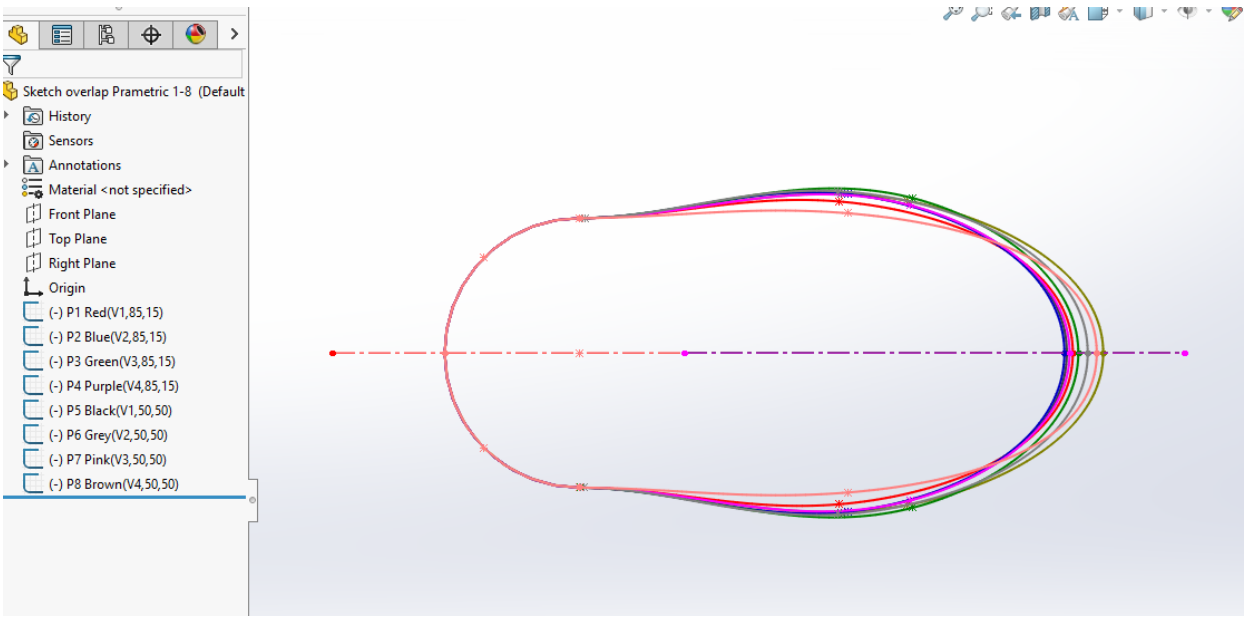
Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Θ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V4 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,901
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,8814
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	1,234721763
DRAG [N]	1,795484655
SIDEFORCE [N]	0,67395887

Ποσοστιαία Βελτίωση : 0,07%

- Μην ξεχνάμε ότι το περιθώριο της αεροδυναμικής βελτίωση που αναμένουμε είναι της τάξεως του 2-5%.

Στο παρακάτω στιγμιότυπο βλέπουμε τα 8 καλύτερα σχέδια από το πρώτο σετ υπολογισμών πάνω στα οποία θα βασιστούμε για την περεταίρω ανάλυση μας.



Εικόνα 3.8 Overlap of the eight optimized sketches for different wind conditions.

3.5 Δεύτερες αεροδυναμικές δοκιμές

Ο Στόχος και πάλι της προσομοίωσής είναι να υπολογιστούν οι δυνάμεις που ασκούνται στην ρόδα από τον αέρα.

Οι δυνάμεις που μελετάμε είναι οι εξής:

- Κατά άξονα X και αντίθετα από την φορά κίνησης του τροχού η οπισθέλκουσα δύναμη **DRAG** η οποία αποτελεί την αεροδυναμική αντίσταση

- Κατά άξονα Y η δύναμη που επενεργεί στην επιφάνεια του τροχού **SIDEFORCE** και προκαλείται από τον πλευρικό άνεμο.

- Η εξίσωση **Equation Goal (85,15)** = 0,85*DRAG + 0,15* SIDEFORCE [N]

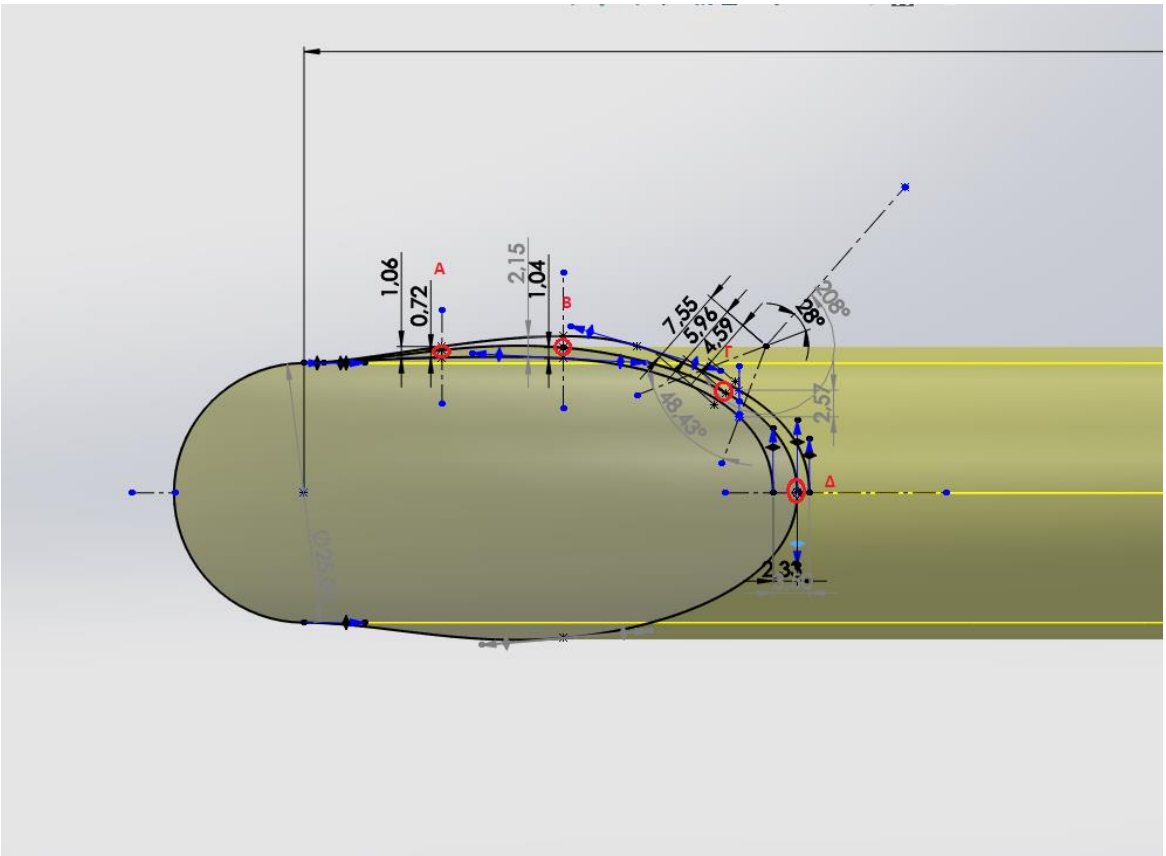
- Η εξίσωση **Equation Goal (50,50)** = 0,50*DRAG + 0,50* SIDEFORCE [N]

Εξετάστηκαν οι ίδιες τέσσερις (4) περιπτώσεις διαφορετικών ταχυτήτων ποδηλάτη-ανέμου (εν συντομία V1, V2, V3, V4) όπως φάνηκε και στον πίνακα 3.2.

για τις οποίες αυτή τη φορά ορίστηκαν 75 σενάρια διαφορετικής γεωμετρίας για κάθε μία (σύνολο 300) και μελετήθηκαν 2 (δύο) Equation Goals, ένα σετ σεναρίων (85/15) και ένα σετ (50/50). Δηλαδή έγινε ένας υπολογισμός 600 σεναρίων για να έχουμε το **δεύτερο σετ αποτελεσμάτων**.

Στην ουσία με βάση τα πρώτα αποτελέσματα ορίσαμε ένα νέο σχέδιο (καμπύλη b-spline που ορίζει το σχήμα της στεφάνης) χρησιμοποιώντας 4 νέα σημεία ελέγχου της καμπύλης. Αυτή τη φορά το σχέδιο που θα προκύψει θα βρίσκεται εντός του εύρος που όρισαν τα πρώτα 8 καλύτερα σχέδια.

Στο παρακάτω στιγμιότυπο φαίνονται τα νέα σημεία ελέγχου της καμπύλης Α , Β , Γ, Δ με κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 3.9 Control points

Το σημείο Α έχει μια διάσταση 0,72 mm στο σχήμα (κατά Y) , η οποία είναι ελεύθερη να μεταβληθεί από 0mm έως 1,06mm

Το σημείο Β έχει μια διάσταση 1,04 mm στο σχήμα (κατά Y) η οποία είναι ελεύθερη να μεταβληθεί από 0 έως 2,15 mm

Το σημείο Γ έχει μια διάσταση 5,96 mm στο σχήμα η οποία είναι ελεύθερη να μεταβληθεί από 4,59mm έως 7,55 mm πάνω σε ένα ευθύγραμμο τμήμα το οποίο μπορεί να αλλάζει σε γωνίες από 0 έως 0,785 rad(45 μοίρες) σε σχέση με μία ευθεία παράλληλη στην ευθεία y=x. Στο σχήμα έχει γωνία 0,488 rad (28 μοίρες).

Το σημείο Δ έχει μια διάσταση 2,33 mm στο σχήμα (κατά Y) η οποία είναι ελεύθερη να μεταβληθεί από 0 έως 3,5 mm

Στην πράξη για άλλη μια φορά θέλουμε να εισάγουμε την τυχαιότητα στην καμπύλη μας και να κρατήσουμε το βέλτιστο των αποτελεσμάτων.

Το εύρος πλέον το ορίζουν βέβαια οι 2 προηγούμενες καμπύλες που προέκυψαν από τον πρώτο υπολογισμό αλλά δεν διστάσουμε να δοκιμάσουμε και λίγα τυχαία σχέδια εκτός των αυστηρών αυτών ορίων.

- **Δεύτερα Αεροδυναμικά αποτελέσματα**

Έπειτα από τον υπολογισμό του δεύτερου σετ 600 σεναρίων τα οκτώ (8) καλύτερα σχέδια-αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Α (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V1 και σενάριο (85/15) #23)

Κόκκινο σχέδιο εικόνα 3.10

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	45
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0
Translation velocity (floor) [km/h]	45
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-40,2
Equation Goal (85,15) [N]	1,182508809
DRAG [N]	1,398865302
SIDEFORCE [N]	0,043511318

Ποσοστιαία Βελτίωση : 3,81% επί του αρχικού σχεδίου

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Β (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V2 και σενάριο (85/15) #49)

Μπλε σχέδιο Εικόνα 3.10

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,997
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0,31413
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,435837816
DRAG [N]	1,682473003
SIDEFORCE [N]	0,03823842

Ποσοστιαία Βελτίωση : 4,5% επί του αρχικού σχεδίου

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Γ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V3 και σενάριο (85/15) #10)

Πράσινο σχέδιο Εικόνα 3.10

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,9664
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,098
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,545841919
DRAG [N]	1,775463959
SIDEFORCE [N]	0,244650356

Ποσοστιαία Βελτίωση : 0,5% επί του αρχικού σχεδίου

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Δ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V4 και σενάριο (85/15) #49)

Μπλε σχέδιο Εικόνα 3.10

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,901

Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,8814
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,555950873
DRAG [N]	1,701841543
SIDEFORCE [N]	0,729237073

Ποσοστιαία Βελτίωση : 3,00 % επί του αρχικού σχεδίου

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Ε (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V1 και σενάριο (50/50) #18)

Μαύρο σχέδιο Εικόνα 3.10

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	45
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0
Translation velocity (floor) [km/h]	45
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-40,2
Equation Goal (50/50) [N]	0,708396789
DRAG [N]	1,4069667
SIDEFORCE [N]	0,009826879

Ποσοστιαία Βελτίωση : 2,61 %

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Ζ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V2 και σενάριο (50/50) #75)

Κίτρινο σχέδιο Εικόνα 3.10

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,997
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0,31413
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	0,926136026
DRAG [N]	1,719309764
SIDEFORCE [N]	0,132962287

Ποσοστιαία Βελτίωση : 3,98 % επί του αρχικού σχεδίου

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Η (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V3 και σενάριο (50/50) #43)

Ροζ σχέδιο Εικόνα 3.100

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,9664

Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,098
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	0,956319639
DRAG [N]	1,757025667
SIDEFORCE [N]	0,155613611

Ποσοστιαία Βελτίωση : 10,7 % επί του αρχικού σχεδίου

Βελτιωμένο σχέδιο Περίπτωση Θ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V4 και σενάριο (50/50)#50)

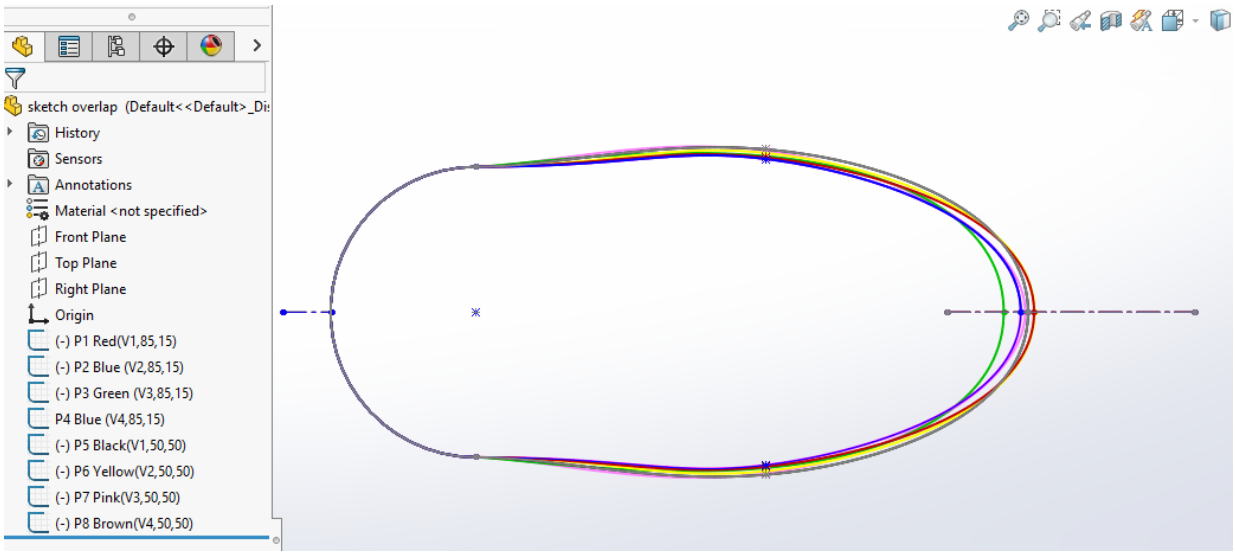
Καφέ σχέδιο Εικόνα 3.10

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,901

Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,8814
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	1,215032609
DRAG [N]	1,701349155
SIDEFORCE [N]	0,728716064

Ποσοστιαία Βελτίωση : 2,35%

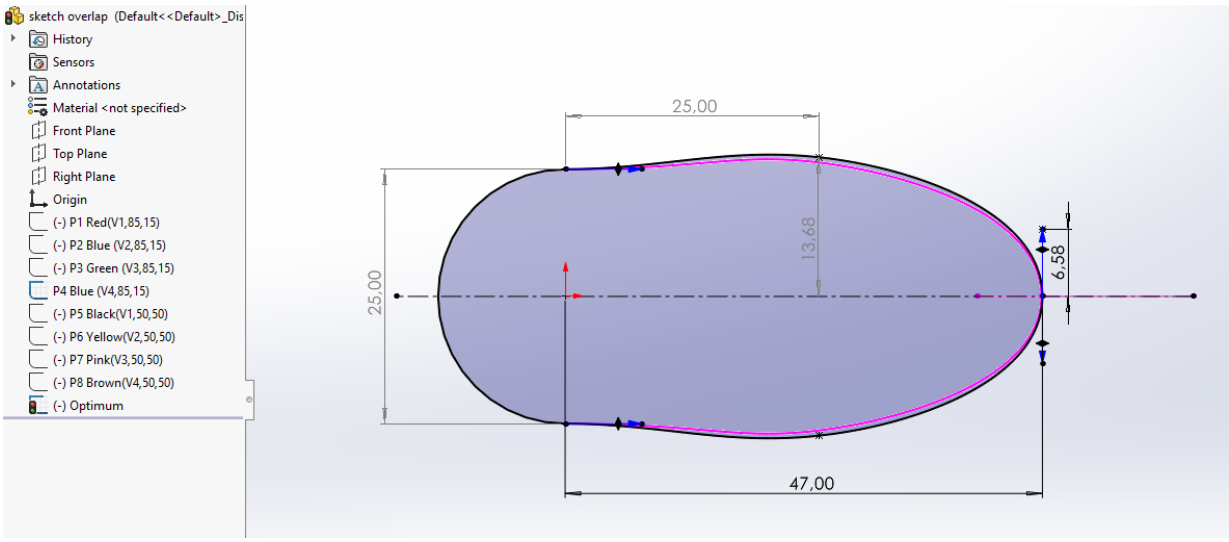
Στο παρακάτω στιγμιότυπο βλέπουμε τα 8 καλύτερα σχέδια από το δεύτερο σετ υπολογισμών



Εικόνα 3.10 Overlap of the eight optimized sketches of the second run.

Εδώ να σημειώσουμε ότι το καλύτερο σχέδιο για τα σενάρια Α: (V2,85,15) και Δ: (V4,85,15) ταυτίζεται (Blue).

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε εν τέλη το βέλτιστο αεροδυναμικό προφίλ που επιλέξαμε ως τον μέσο όρο των 8 καλύτερων σχεδίων όπως επίσης και τις διαφορές του με το μπλε σχέδιο που είναι το βέλτιστο στις περιπτώσεις Β, Δ.



Εικόνα 3.11 The chosen aero profile as the mean of the 8 best sketch results.

Έχοντας καταλήξει πλέον στο επιθυμητό προφίλ έγινε μια τελική αεροδυναμική προσομοίωση για τον υπολογισμών των δυνάμεων πάνω σε αυτό.

Παρακάτω βλέπουμε τα αεροδυναμικά αποτελέσματα του τελικού σχεδίου.

Περίπτωση Α (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V1 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	45
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0
Translation velocity (floor) [km/h]	45
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-40,2
Equation Goal (85,15) [N]	1,22562646
DRAG [N]	1,43604099
SIDEFORCE [N]	0,03327750

Ποσοστιαία Βελτίωση : 0,83% επί του αρχικού σχεδίου

Βέλτιστο σχέδιο Περίπτωση Β (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V2 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,997
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0,31413
Translation velocity (floor) [km/h]	32

Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,48356869
DRAG [N]	1,73418475
SIDEFORCE [N]	0,0634109873

Ποσοστιαία Βελτίωση : 1,2% επί του αρχικού σχεδίου

Περίπτωση Γ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V3 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,9664
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,098
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,55008237
DRAG [N]	1,74931138
SIDEFORCE [N]	0,421117948

Ποσοστιαία Βελτίωση : 0,23% επί του αρχικού σχεδίου

Περίπτωση Δ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V4 και σενάριο (85/15))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,901
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,8814
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	1,60314123
DRAG [N]	1,75638367
SIDEFORCE [N]	0,734767414

Ποσοστιαία Βελτίωση : 0,18% επί του αρχικού σχεδίου

Περίπτωση Ε (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V1και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,901
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,8814
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (85,15) [N]	0,707780607
DRAG [N]	1,43577927
SIDEFORCE [N]	0,0202180542

Ποσοστιαία Βελτίωση : 3,93% επί του αρχικού σχεδίου

Περίπτωση Z (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V2 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,997
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	0,31413
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	0,898911185
DRAG [N]	1,73383743
SIDEFORCE [N]	0,0639849389

Ποσοστιαία Βελτίωση : 8,71% επί του αρχικού σχεδίου

Περίπτωση H (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V3 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,9664
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,098
Translation velocity (floor) [km/h]	32

Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	1,08334882
DRAG [N]	1,74964667
SIDEFORCE [N]	0,417050975

Ποσοστιαία Βελτίωση : 1,76% επί του αρχικού σχεδίου

Περίπτωση Θ (ταχύτητα ποδηλάτη-ανέμου V4 και σενάριο (50/50))

Velocity in X direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	49,901
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Conditions) [km/h]	1,8814
Translation velocity (floor) [km/h]	32
Angular velocity (wheel) [rad/s]	-28,58
Equation Goal (50/50) [N]	1,24508549
DRAG [N]	1,75762118
SIDEFORCE [N]	0,732549796

Ποσοστιαία Βελτίωση : -0,12% επί του αρχικού σχεδίου

Κεφάλαιο 4

Διαδικασίες παραγωγής και κατασκευής εξαρτημάτων από σύνθετο υλικό κάνοντας κατηγοριοποίηση με βάση τον τρόπο συμπίεσης της διαστρωμάτωσης.

Οι διαδικασίες παραγωγής για την κατασκευή εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά γενικά απαιτούν την συνδρομή δύο παραγόντων:

- Θερμότητα για να ενεργοποιηθούν οι μηχανισμοί του curing στο σύστημα της ρητίνης και για να μειωθεί το ιξώδες της ρητίνης ώστε να ελαχιστοποιηθεί η δημιουργία πορώδους επιφάνειας.

- Πίεση για την συμπίεση και ενοποίηση της διαστρωμάτωσης που βρίσκεται στο καλούπι

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την παραγωγή θερμότητας και πίεσης με ελεγχόμενο τρόπο. Για τις κυριότερες από αυτές γίνεται αναφορά στην συνέχεια.

Γίνεται κατηγοριοποίηση σύμφωνα με τον τρόπο που ασκείται πίεση στην διαστρωμάτωση.

Σε κάθε περίπτωση , πριν αρχίσει το καλούπωμα , το υλικό πρέπει να έχει στρωθεί με την επιθυμητή κατεύθυνση των ινών πάνω ή μέσα στο χρησιμοποιούμενο εργαλείο (καλούπι) και να έχει δοθεί βάση στην αποφυγή εγκλωβισμού αέρος.

4.1 Καλούπωμα με σακούλα με υποπίεση (Vacuum Bag Molding)

Οι τεχνικές κατασκευής με υποπίεση έχουν αναπτυχθεί για την κατασκευή ποικιλίας εξαρτημάτων, αλλά κυρίως για πολύπλοκες μορφές και σχετικά μεγάλα εξαρτήματα. Η διαδικασία χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για το καλούπωμα εξαρτημάτων χαμηλού κόστους που είναι αρκετά μεγάλα ή σύνθετα για να συμπιεστούν με άλλα μέσα. Χρησιμοποιείται εύκαμπτη σακούλα που σφραγίζεται αεροστεγώς και από την οποία αναρροφάμε τον αέρα δημιουργώντας συνθήκες κενού, εφαρμόζοντας με αυτό τον τρόπο ομοιόμορφη πίεση μέχρι 1 bar στην διαστρωμάτωση μας μέσα στο καλούπι. Η συγκεκριμένη μέθοδος, που απαιτεί εξοπλισμό και εργαλεία μικρού κόστους, μπορεί να μας δώσει εξαρτήματα εύλογης ποιότητας, που είναι αποδεκτά για πολλές εφαρμογές. Βέβαια έχουμε μικρή επαναληψιμότητα όταν η ρητίνη εφαρμόζεται με το χέρι (wet layup) και λίγο καλύτερη όταν η ρητίνη αναρροφάται με την ίδια την υποπίεση από δοχείο (vacuum infusion).

4.2 **Καλούπωμα σε Autoclave**

Autoclave ονομάζεται ένα μεγάλο, θερμαινόμενο δοχείο υπό εσωτερική μεταβλητή πίεση. Το καλούπωμα σε autoclave είναι παρόμοιο με το καλούπωμα υποπίεσης με την διαφορά ότι η διαστρωμάτωση υποβάλλεται σε μεγαλύτερη πίεση, συνήθως έως 8 bar, ενώ εφαρμόζεται θερμότητα για το cure της ρητίνης. Στα αρχικά στάδια του cure συνήθως εφαρμόζεται υποπίεση για να απομακρυνθούν τα πτητικά στοιχεία και ο παγιδευμένος αέρας χωρίς να έχουμε υπερβολική ροή ρητίνης. Η πίεση που ασκείται στην διαστρωμάτωση κυμαίνεται συνήθως στο εύρος μεταξύ 3,5 έως 7 bar. Η διαδικασία καλουπώματος σε autoclave παράγει διαστρωματώσεις υψηλής ποιότητας , με ελάχιστους πόρους και ο έλεγχος στο τελικό πάχος της διαστρωμάτωσης είναι πολύ καλύτερος από αυτόν που μπορούμε να έχουμε από το καλούπωμα εν κενό. Το κεφάλαιο που απαιτείται για τον εξοπλισμό είναι μεγάλο και η παραγωγή σχετικά μικρή , παράγοντες που περιορίζουν την χρήση αυτής της διαδικασίας σε αγορές υψηλότερου κόστους , οπού η υψηλή ποιότητα είναι ουσιώδης. Πολλά κύρια δομικά εξαρτήματα για αεροσκάφη, όπως πτερύγια και άτρακτοι κατασκευάζονται με αυτή την μέθοδο, καθώς διασφαλίζει επαναληψιμότητα.

4.3 **Καλούπωμα σε πρέσα (Press Molding)**

Όπως και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις το ύφασμα διαστρωματώνεται στο καλούπι , ή προ μορφοποιείται σε ξεχωριστό εργαλείο για να διευκολυνθεί η γρήγορη τοποθέτηση του στο ζεστό εργαλείο.

Τα καλούπια/εργαλεία συνήθως κατασκευάζονται από μηχανικά κατεργασμένο ή χυτό μέταλλο, και παράγονται σε ζευγάρια αρσενικό-θηλυκό , ο χώρος μεταξύ τους καθορίζει την μορφή και το πάχος του υπό κατασκευή εξαρτήματος.

Η πίεση παράγεται συνήθως υδραυλικά και ο θερμικός κύκλος ελέγχεται από διάφορα μέσα θέρμανσης. Το εργαλείο μπορεί να θερμαίνεται άμεσα με ηλεκτρισμό, έλαια ή ατμό με δίαυλους μέσα στο ίδιο. Στην περίπτωση χρήσης ηλεκτρισμού μπορεί να εγκατασταθούν θερμαντικά στοιχεία μέσα στο καλούπι. Σε μικρά εξαρτήματα, η θερμότητα μπορεί να εφαρμόζεται απευθείας μέσω θερμαινόμενων πλακών στην ίδια την πρέσα.

Με αυτή την μέθοδο επιτυγχάνονται πολύ ακριβείς ανοχές και μπορούμε να έχουμε μεγάλο βαθμό αυτοματισμού. Οι θερμικοί κύκλοι cure μπορούν να οριστούν και να ελεγχθούν με μεγάλη ακρίβεια, ούτως ώστε η διαδικασία να παράγει συνεχώς εξαρτήματα υψηλής ποιότητας .

Εξαιτίας του υψηλού κόστους αρχικού εξοπλισμού αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για μεγάλο όγκο παραγωγής.

4.4 Καλούπωμα με σακούλα και θετική πίεση (Pressure Bag Molding)

Αυτή η μέθοδος είναι μια ενδιάμεση λύση παραγωγής σε σχέση με τις μεθόδους με υποπίεση και σε autoclave και χρησιμοποιεί πλαστική σακούλα, συνήθως από σιλικόνη, στο πάνω μέρος της διαστρωμάτωσης. Ένα θερμό, συμπιεσμένο αέριο ή υγρό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή θερμότητας στην διαδικασία του cure και πίεσης. Η διαδικασία αυτή μπορεί να υποβοηθηθεί και με κενό. Στην πράξη εφαρμόζεται θετική πίεση η οποία συμπιέζει το υλικό στα τοιχώματα του καλουπιού. Η θερμότητα μπορεί να επιτευχθεί και με χρήση ειδικού προγραμματιζόμενου φούρνου.

4.5 Filament Winding (Περιέλιξη νήματος)

Σε αυτή την διαδικασία συνεχείς ίνες ή ταινίες (tape) από ίνες πλέκονται σε ένα περιστρεφόμενο εργαλείο μορφής (mandrel). Οι ίνες τροφοδοτούνται μέσω κεφαλής με ελεγχόμενη γωνία στον άξονα του περιστρεφόμενου mandrel. Η ρητίνη μπορεί να διοχετεύεται μέσω λουτρού ή να εγχέεται υπό μορφή σταγονιδίων σε περίπτωση που δεν έχουμε prepreg (προ εμποτισμένο με ρητίνη) υλικό. Η πίεση επιτυγχάνεται τανύζοντας τις ίνες καθώς πλέκονται στο mandrel. Τα προϊόντα που προκύπτουν είναι σώματα εκ περιστροφής. Το curing διεξάγεται συνήθως σε κλίβανο.

Παραδείγματα προϊόντων που κατασκευάζονται με αυτή την μέθοδο είναι σωλήνες μεταφοράς ισχύος (άξονες ροπής). Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν δοχεία πίεσης, κελύφη κινητήρων σε πυραύλους, κελύφη σε σωλήνες άντλησης πετρελαίου.

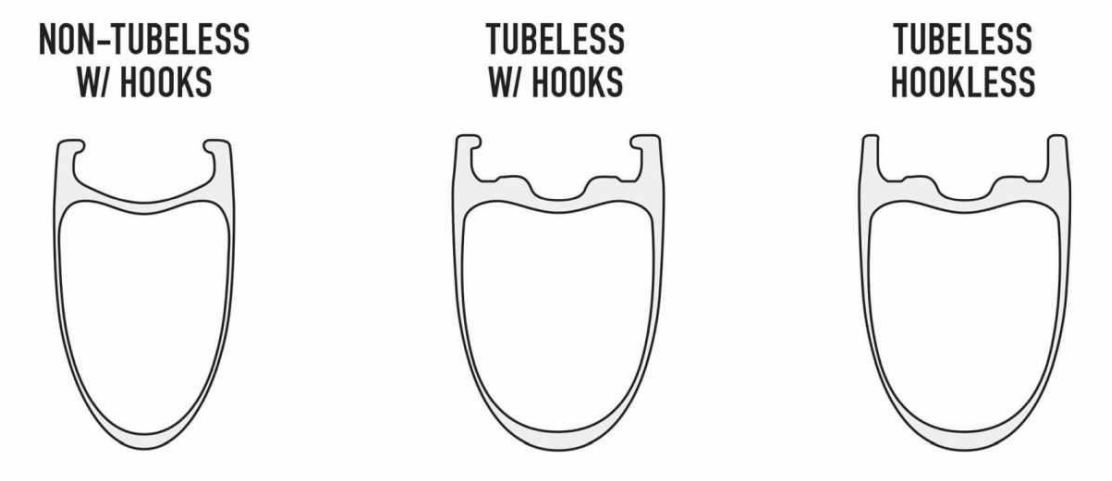
4.6 Thermal Expansion Molding

Γενικά χρησιμοποιείται για δομές με σύνθετη μορφή. Οι στρώσεις του prepreg τυλίγονται γύρω από μπλοκ πλαστικού ή αφρού και η διάταξη περιορίζεται με μεταλλική κοιλότητα (θηλυκό καλούπι). Εν συνεχεία θερμαίνεται. Όσο αυξάνει η θερμοκρασία μια υψηλή διαφορική θερμική διαστολή λαμβάνει χώρα μεταξύ πλαστικού και μετάλλου, το πλαστικό διαστέλλεται πολύ περισσότερο από ότι το μέταλλο. Εφόσον το μέταλλο περιορίζει την όλη διάταξη, ασκούνται πολύ υψηλές πιέσεις που συμπιέζουν τις διαστρωματώσεις. Αυτή η μέθοδος απαιτεί πολύ μικρό κεφάλαιο και τα εργαλεία είναι απλά και χαμηλού κόστους. Εξαρτήματα με πολύπλοκη γεωμετρία μπορούν να καλουπωθούν σε έναν θερμικό κύκλο, μειώνοντας τον αριθμό συνδέσμων και επιμέρους εξαρτημάτων, έτσι έχουμε μεγάλη εξοικονόμηση βάρους και εξόδων παραγωγής.

Κεφάλαιο 5

Εσωτερική διαμόρφωση της στεφάνης (διατομή)

Η εσωτερική διαμόρφωση την στεφάνης έχει ως στόχο την συγκράτηση του ελαστικού κατά την περιστροφή και φόρτιση της ρόδας κατά την λειτουργία της. Πέραν από τα φορτία που αναπτύσσονται κατά την περιστροφή ακόμα και σε μια στατική ρόδα, η δύναμη που ασκεί ο αέρας στο ελαστικό θα μπορούσε να το αποκολλήσει από την θέση του εάν η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση του αέρα πλήρωσης ξεπεραστεί. Αυτή η μέγιστη πίεση που μπορεί να συγκρατήσει μια ρόδα ποδηλάτου εξαρτάται άμεσα από την εσωτερική διαμόρφωση της ζάντας. Στην παρούσα μελέτη κληθήκαμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε πέντε διαφορετικές εσωτερικές διαμορφώσεις που προτείνονται στο πρότυπο ISO 5775-2 ανάλογα με τον τύπο της ρόδας που θέλουμε να μελετήσουμε.



Εικόνα 5.1 *rim profile* [B11]

Το κύριο ερώτημα ήταν εάν θα κατασκευαστεί μια στεφάνη με ή χωρίς διαμόρφωση άγκιστρου.

Crotchet (Hooked)	**Straight Side (Hookless)**
Μεγαλύτερη οριακή πίεση αέρα πλήρωσης	Μικρότερη οριακή πίεση αέρα πλήρωσης
Μέγιστο εύρος συμβατών ελαστικών	Συμβατότητα μόνο με καλής ποιότητας ελαστικά
Χρήση με ή χωρίς σαμπρέλα	Χρήση μόνο χωρίς σαμπρέλα
Αυξημένη πολυπλοκότητα καλουπιού	Πιο εύκολη κατασκευή καλουπιού
Αυξημένο κόστος κατασκευής	Χαμηλότερο κόστος κατασκευή
Μικρότερη αντοχή σε κρούση	Μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση
Μικρότερη πιθανότητα αποκόλλησης (flat tyre)	Μεγαλύτερη πιθανότητα αποκόλλησης (flat tyre)

Πίνακας 5.1 (Crotchet type rims VS Straight side type rims).

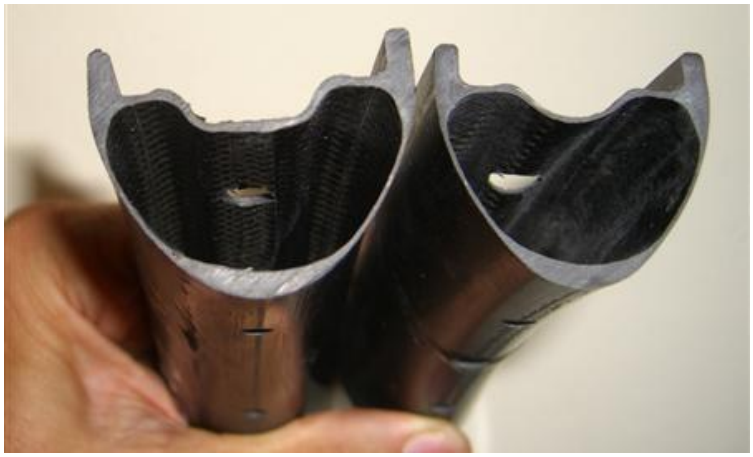
Το ίδιο είναι δύσκολο να απαντηθεί καθώς υπάρχουν πολλά επιχειρήματα γιατί η πρώτη υπερτερεί της δεύτερης και αντίστροφα.

Η επιλογή αυτή καθορίζει άμεσα την πολυπλοκότητα του καλουπιού αφού στην πρώτη περίπτωση (Hooked rim) δημιουργούνται

υποκοπές στο καλούπι οπότε το ίδιο θα πρέπει να διαιρεθεί σε τουλάχιστον 14 ανεξάρτητα τμήματα.

Αυτή η αυξημένη πολυπλοκότητα έχει σαν συνέπεια το αυξημένο κόστος κατά την σχεδίαση και κατασκευή του καλουπιού και το αυξημένο κόστος κατά την παραγωγή ενώ έκανε πολλούς κατασκευαστές να διαλέξουν την εύκολη οδό επιλέγοντας και διαφημίζοντας τις ζάντες χωρίς γάντζους. (hookless)

Εικόνα 5.2 *Carbon fiber hooked rim* [B12]



Εικόνα 5.3 *Carbon fiber hookless rim [B13]*

Κάθε κατασκευαστής επιλέγει σύμφωνα με τις ανάγκες του οπότε δεν υπάρχει μια σωστή απόφαση.

Αυτό που μας ενδιαφέρει στην παρούσα έρευνα είναι πρώτον η δυσκολία στην κατασκευή του καλουπιού στην περίπτωση του άγκιστρου και δεύτερον ότι οι περισσότεροι πελάτες θέλουν να έχουν επιλογές και θα επέλεγαν την ζάντα με το άγκιστρο αφού σε περίπτωση που υπάρξει flat tyre σε μία ζάντα χωρίς άγκιστρο δεν μπορεί να τοποθετηθεί η κλασσική σαμπρέλα για να επισκευαστεί όπως επίσης χρειάζεται και εξειδικευμένο προσωπικό για την επισκευή.

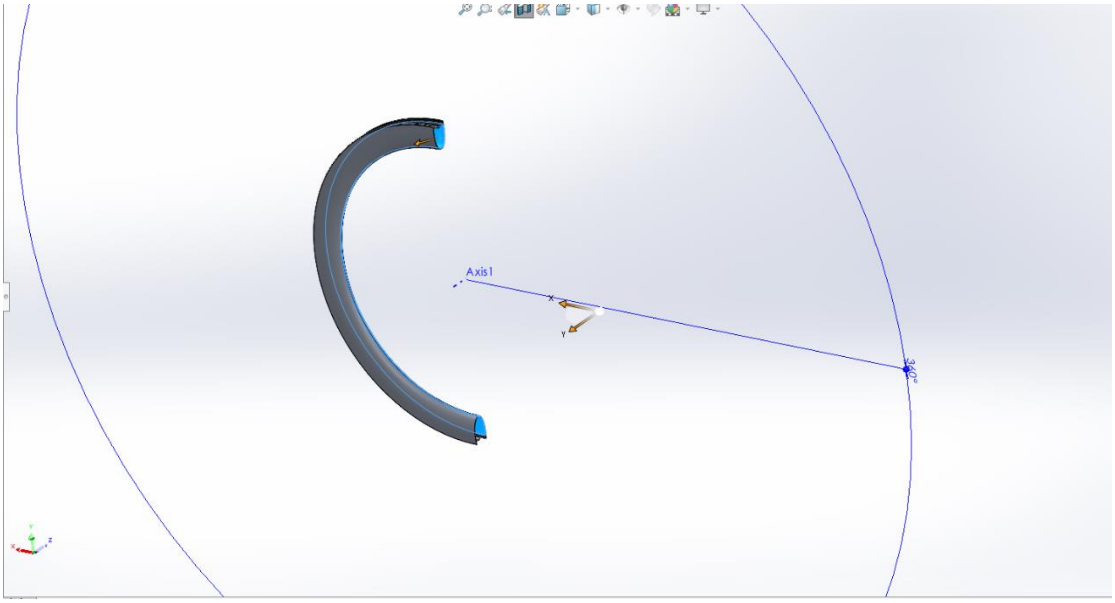
Η τρέχουσα έκδοση του ETRTO (Ευρωπαϊκός Τεχνικός Οργανισμός Ελαστικών και Ζαντών) αναφέρει ότι για ελαστικά με μέγιστη πίεση πάνω από 5,5bar (80psi), πρέπει απαραίτητα να υπάρχει διαμόρφωση με άγκιστρο στην ζάντα.

Ενώ αρχικά είχαμε πάρει την απόφαση να μελετήσουμε καλούπι ζάντας χωρίς γάντζους αλλάξαμε την επιλογή μας για μελέτη του πιο

πολύπλοκου καλουπιού για ζάντα με γάντζους αφού στην αγωνιστική ποδηλασία οι μέγιστες πιέσεις λειτουργίας ξεπερνούν αυτό το άνω όριο των 80 psi.

Κεφάλαιο 6

Διαιρετό Καλούπι



Εικόνα 6.1 *Στεφάνη σε τομή*

6.1 Υλικό καλουπιού

Με την επιλογή να κατασκευάσουμε μια στεφάνη τύπου Hooked Rim, θέσαμε ταυτόχρονα ένα πρόβλημα σχετικά με τον τρόπο σχεδίασης του καλουπιού που θα την δημιουργήσει.

Για να κατασκευαστεί ένα τεμάχιο από ανθρακόνημα θα πρέπει με κάποιο τρόπο οι στρώσεις να συμπιεστούν στο εκάστοτε καλούπι στην τελική τους θέση, να υποστεί την διαδικασία του curing και η ρητίνη να σταθεροποιήσει τελικά τις στρώσεις μεταξύ τους.

Όταν σχεδιάζεται ένα καλούπι, το πρώτο που πρέπει να αναρωτηθεί κανείς είναι πόσα τεμάχια αποσκοπεί να κατασκευάσει με το συγκεκριμένο.

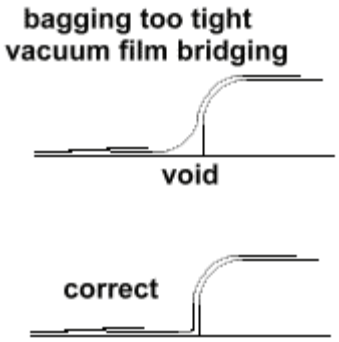
Εάν το καλούπι κατασκευαστεί από χάλυβα τότε η κατεργασία του είναι δυσκολότερη και πιο χρονοβόρα αλλά έχει πολύ καλύτερη αντοχή κατά την χρήση σε σχέση για παράδειγμα με ένα καλούπι από αλουμίνιο και έτσι μπορεί να παράξει μια τάξη μεγέθους περισσότερα τεμάχια. Στην βιομηχανία χρησιμοποιούν καλούπια από χάλυβα τα οποία προορίζονται για πολλές χιλιάδες χρήσεις. Βέβαια μια τέτοια κατασκευή στην περίπτωση μας απαιτεί υδραυλικές διατάξεις για το ξεκαλούπωμα και για να μετακινηθεί κατά την χρήση λόγω του αυξημένου βάρους του χάλυβα. Επιπρόσθετα χρησιμοποιούνται πρέσες για το κλείσιμο αντί για κοχλίες για να μειώσουν το χρόνο που απαιτείται κατά την παραγωγή. Προφανώς στο μικρό μηχανουργείο δεν είναι διαθέσιμος τέτοιος εξοπλισμός και τα καλούπια μετακινούνται με το χέρι από τεχνίτες. Έτσι η λύση του αλουμινίου είναι προτιμότερη λόγω βάρους και κατεργασιμότητας σε σχέση με τον χάλυβα. Επίσης ο ρυθμός απόψυξης του αλουμινίου είναι έως και 7 φορές πιο μεγάλος και επιτρέπει την πιο άμεση επαναχρησιμοποίηση του καλουπιού. Υπάρχει η πρόβλεψη σύμφωνα με το σχέδιο ίσως κάποια μικρά τμήματα του διαιρετού καλουπιού τα οποία θα τα αναλύσουμε παρακάτω και έχουν τον ρόλο σφήνας, να κατασκευαστούν ίσως σε δεύτερο χρόνο από χάλυβα εάν το αλουμίνιο δεν έχει την επιθυμητή αντοχή.

Στην περίπτωση μας το να κατασκευαστεί καλούπι από ανθρακόνημα απορρίφθηκε λόγω της γεωμετρίας του τεμαχίου, αφού το καλούπι από ανθρακόνημα προϋποθέτει την κατασκευή του θετικού plug δηλαδή καλούπι για το καλούπι. Αυτό συνεπάγεται μια εξίσου εκτενή μελέτη και στο τέλος ένα ανθρακονημάτινο καλούπι είναι πιο ευαίσθητο σε σχέση με τα μεταλλικά ενώ χρειάζεται και κατά καιρούς επισκευή.

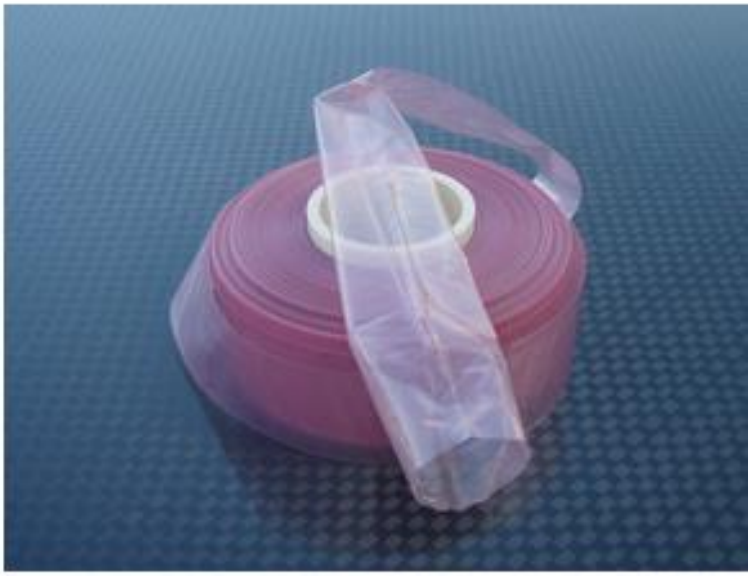
Κατά την διάρκεια της σχεδίασης ο μηχανολόγος έχει στην σκέψη του ότι αυτό που σχεδιάζει θα κατασκευαστεί από ένα συγκεκριμένο υλικό και από ένα συγκεκριμένο μηχάνημα. Αυτό είναι αναγκαίο καθώς θα προσδιορίσει τον αριθμό των τεμαχίων του διαιρετού καλουπιού έτσι ώστε το μεγαλύτερο από αυτά να μπορεί να χωρέσει στον διαθέσιμο όγκο προς κατεργασία του μηχανήματος. Επίσης όταν θα ορίσουμε κάποιες καμπύλες και ακτίνες πρέπει να σκεφτούμε εάν είναι εφικτή μια τέτοια διαμόρφωση με τα εργαλεία που διαθέτουμε και τον χρόνο για την κάθε τέτοια κατεργασία. Τέλος δεν είναι παράλογο να χρειαστεί να σχεδιαστεί και μια ιδιοσκευή δηλαδή κάποιο τεμάχιο μόνο και μόνο για να κρατήσει το καλούπι μας στην κατάλληλη θέση για να κατεργαστεί.

6.2 Μέθοδος συμπίεσης της διαστρωμάτωσης

Για την ονοματολογία των τεμαχίων του καλουπιού θα ορίσουμε εξωτερικά τα καλούπια που διαμορφώνουν το εξωτερικό αεροδυναμικό τμήμα της στεφάνης που έρχεται σε επαφή με τον αέρα. Ενώ εσωτερικά καλούπια θα ονομάζουμε τα τεμάχια που διαμορφώνουν την εσωτερική επιφάνεια που συγκρατεί τον αέρα



πλήρωσης και το ελαστικό, ενώ δεν σχετίζεται με την επιφάνεια που διαμορφώνει η σακούλα. Η σακούλα είναι κυλινδρική στην εκτεταμένη της μορφή ενώ κατά την τοποθέτηση της είναι κατάλληλα διπλωμένη ώστε όταν της ασκηθεί πίεση αέρα να αναπτυχθεί ομοιόμορφα και να ασκήσει δύναμη στις στρώσεις του carbon δίχως να δημιουργήσει bridging. Bridging ονομάζεται η ανεπιθύμητη κατάσταση όπου λόγω της μη ομοιόμορφης πίεσης των στρώσεων στην επιφάνεια του καλουπιού, το τελικό τεμάχιο εμφανίζει ελαττώματα και ασυνέχεια στην επιφάνεια του.



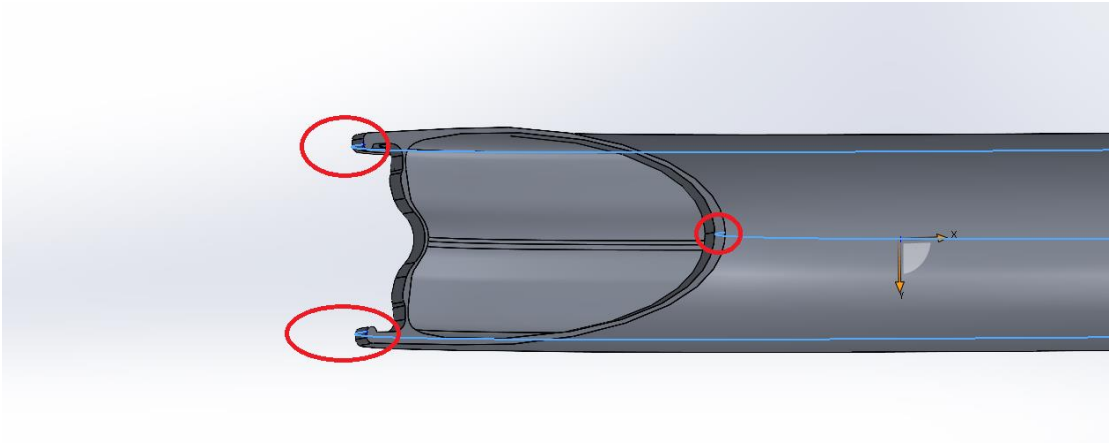
6.2 *Vacuum bagging*

Η σακούλα θα έχει μία είσοδο και μια έξοδο από την οπή της βαλβίδας πλήρωσης αέρα έτσι ώστε να μην υπάρχει κάποια περιττή ασυνέχεια στο τεμάχιο μας.

Η γεωμετρία του προφίλ είναι τέτοια που μας επιβάλλει την κατασκευή διαιρετού καλουπιού. Οι επιφάνειες στις οποίες εφάπτονται τα καλούπια μεταξύ του ορίζουν τρισδιάστατες γραμμές μαζί με το τεμάχιο, οι οποίες ονομάζονται Parting Lines. Για να οριστούν οι parting lines, οι επιφάνειες στην ουσία που θα χωρίσουμε το καλούπι μας σκεφτόμαστε ότι ένα τεμάχιο καλουπιού περικλείει και περιορίζει την τελική επιφάνεια χωρίς αυτή να περιλαμβάνει υποκοπές κατά την φορά κίνησης για την αφαίρεση του στην διαδικασία ξεκαλουπώματος.

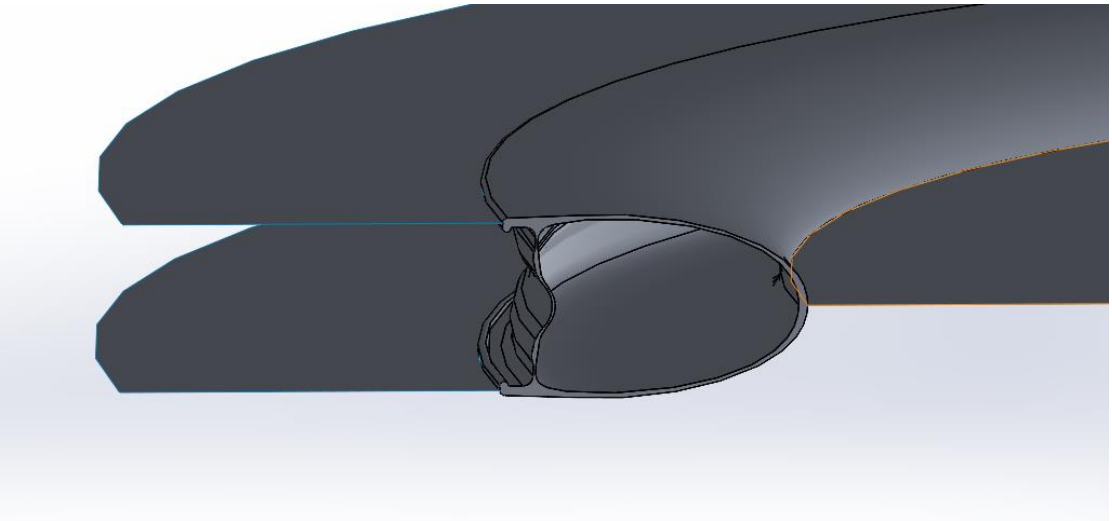
6.3 Άνω και Κάτω εξωτερικά καλούπια

Όσον αφορά τα άνω και κάτω εξωτερικά καλούπια οι θέσεις αυτές είναι σχετικά προκαθορισμένες όπως φαίνεται και στα επόμενα στιγμιότυπα.

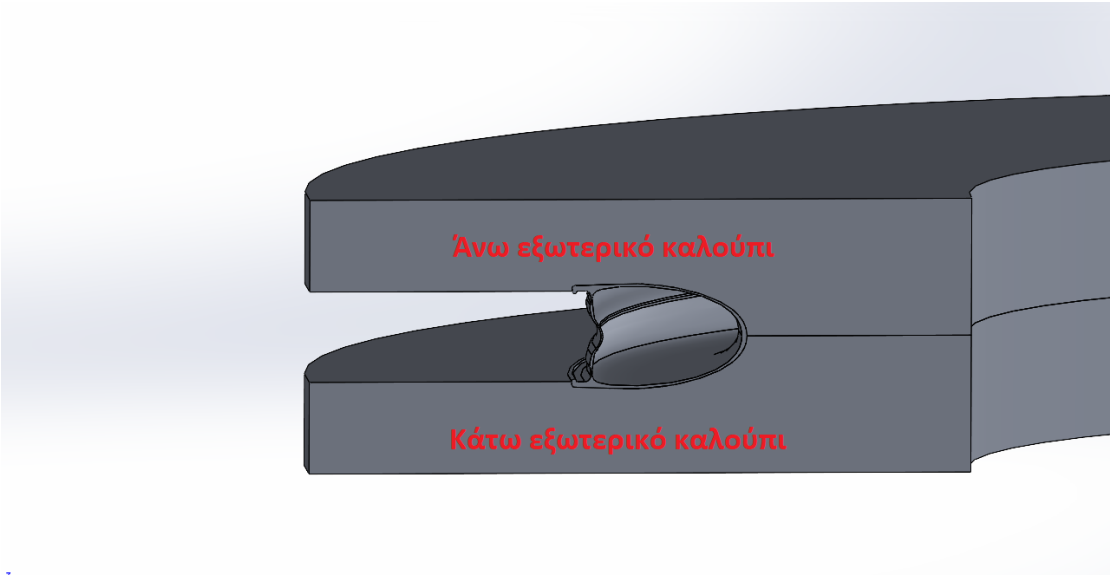


6.3 Parting lines

Οι γραμμές με γαλάζιο είναι οι parting lines οι οποίες οριοθετούν τις επιφάνειες του άνω και κάτω καλουπιού. Επίσης βλέπουμε τις επιφάνειες που οριοθετούν τα άνω και κάτω εξωτερικά καλούπια.



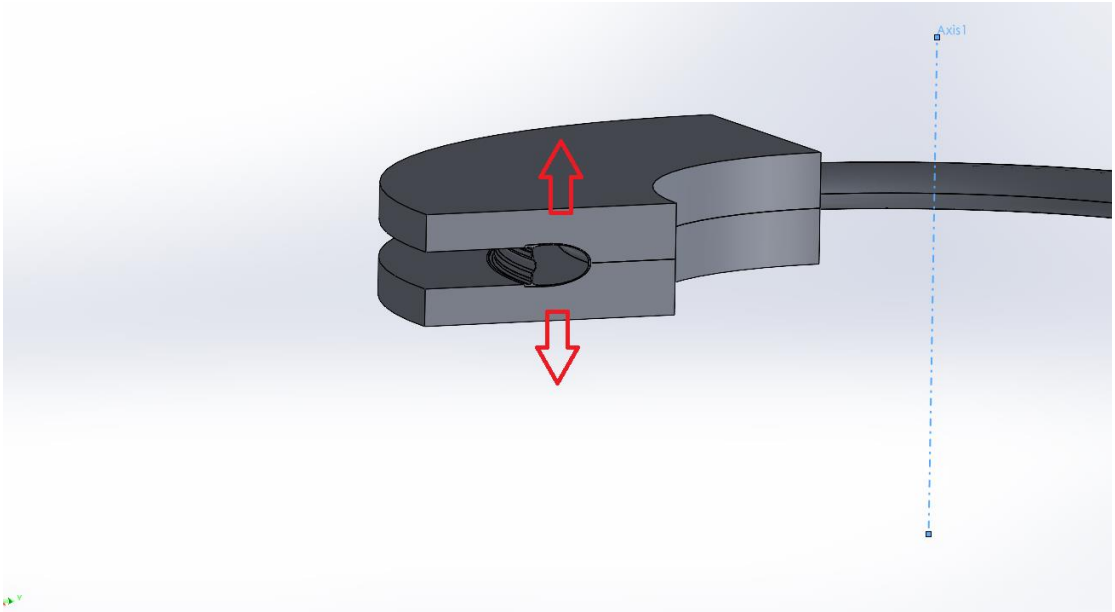
6.4 Parting surfaces



6.5 *Upper and Lower Mold halves*

Τα ίδια είναι τα μεγαλύτερα τεμάχια του καλουπιού τα οποία αφαιρούνται παράλληλα στον άξονα περιστροφής της στεφάνης και πιθανότατα θα πρέπει να διαιρούνται σε 4 τμήματα το καθένα για τον λόγο ότι το καλούπι θα κατεργαστεί σε CNC φρέζα της οποίας ο μέγιστος δυνατός όγκος κατεργασία δεν μας επιτρέπει την

κατεργασίας ενός τεμαχίου στις διαστάσεις της στεφάνης απευθείας.



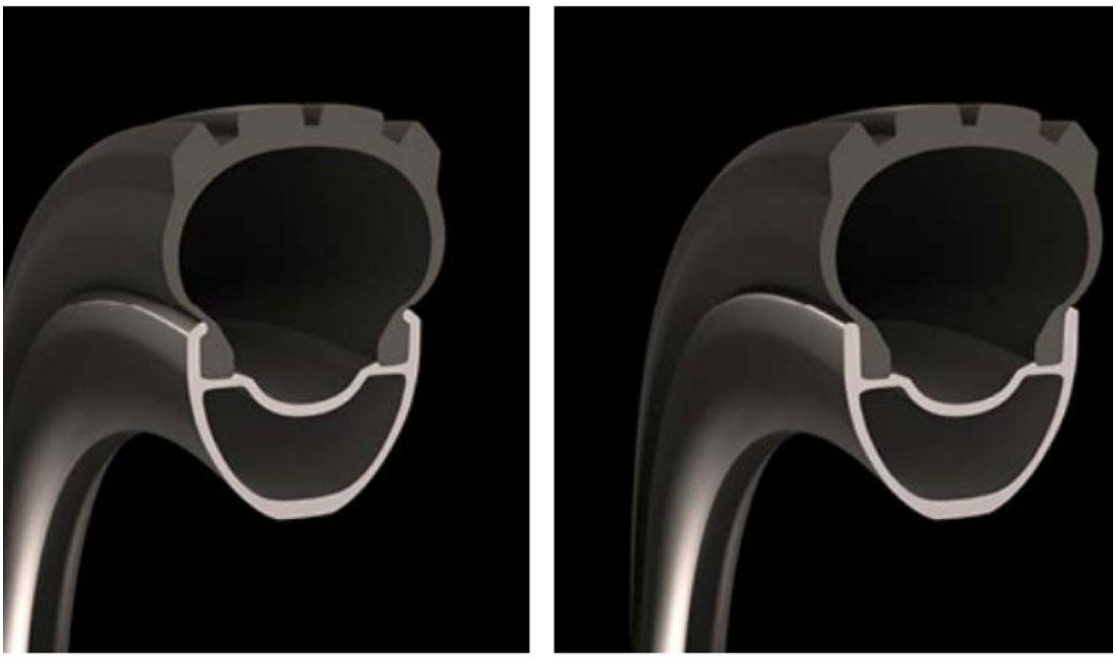
6.6 *Direction of disassembly*

Αν γίνει έτσι, χρειάζεται σχεδιαστεί και η κατάλληλη διαμόρφωση που θα επιτρέπει στα τέσσερα κομμάτια του άνω και του κάτω τμήματος του καλουπιού να συναρμολογούνται και να συμπεριφέρονται ως ένα τεμάχιο. Υπάρχει και μια δεύτερη λύση να κατασκευαστούν τα μεγάλα κομμάτια του καλουπιού σε δύο φάσεις με παύση της κατεργασίας και περιστροφή τους έχοντας την πόρτα ασφαλείας ανοιχτή. Βέβαια αυτή η ιδέα ενέχει πολλούς κινδύνους για τον χειριστή και για το ίδιο το μηχάνημα αφού ένα λάθος στον προγραμματισμό μπορεί να χτυπήσει το τεμάχιο στο μηχάνημα. Επίσης είναι υψίστης σημασίας η επανατοποθέτηση του υπό κατεργασία τεμαχίου να είναι ακριβής, διαφορετικά μια κακή

ευθυγράμμιση μπορεί να σημαίνει αποτυχία της κατασκευής ή και σύγκρουση του εργαλείου.

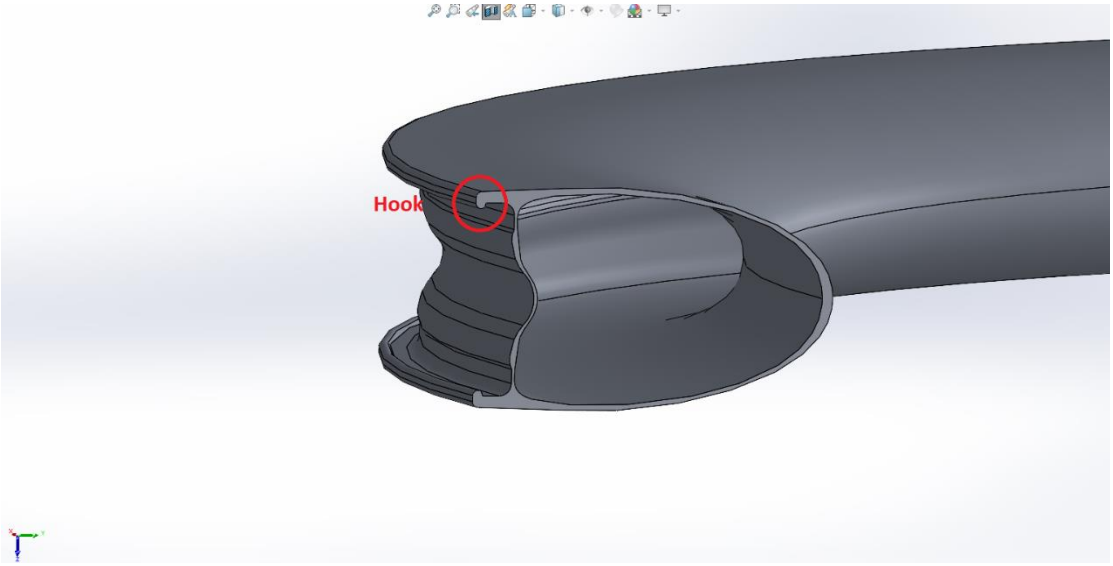
6.4 Άνω και κάτω εσωτερικά καλούπια

Στην περίπτωση μιας στεφάνης Hookless για την αποτύπωση της εσωτερικής διαμόρφωσης δεν χρειάζεται παρά ένα καλούπι το οποίο αποσύρεται **ακτινικά** κατά το ξεκαλούπωμα αφού οι επιφάνειες στην περίπτωση Hookless είναι παράλληλες και δεν δημιουργούν υποκοπές.



TRADITIONNAL (Hooked) HOOKLESS

6.7 *Hooked vs Hookless [B14]*

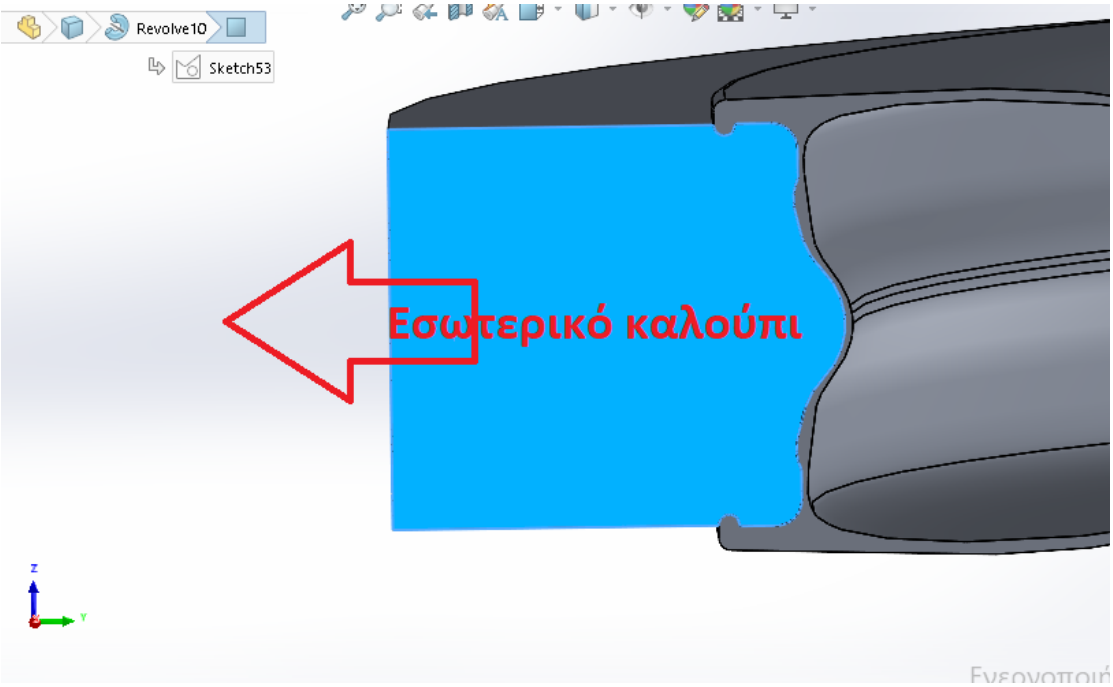


Εικόνα 6.8 *Cut view rim profile*

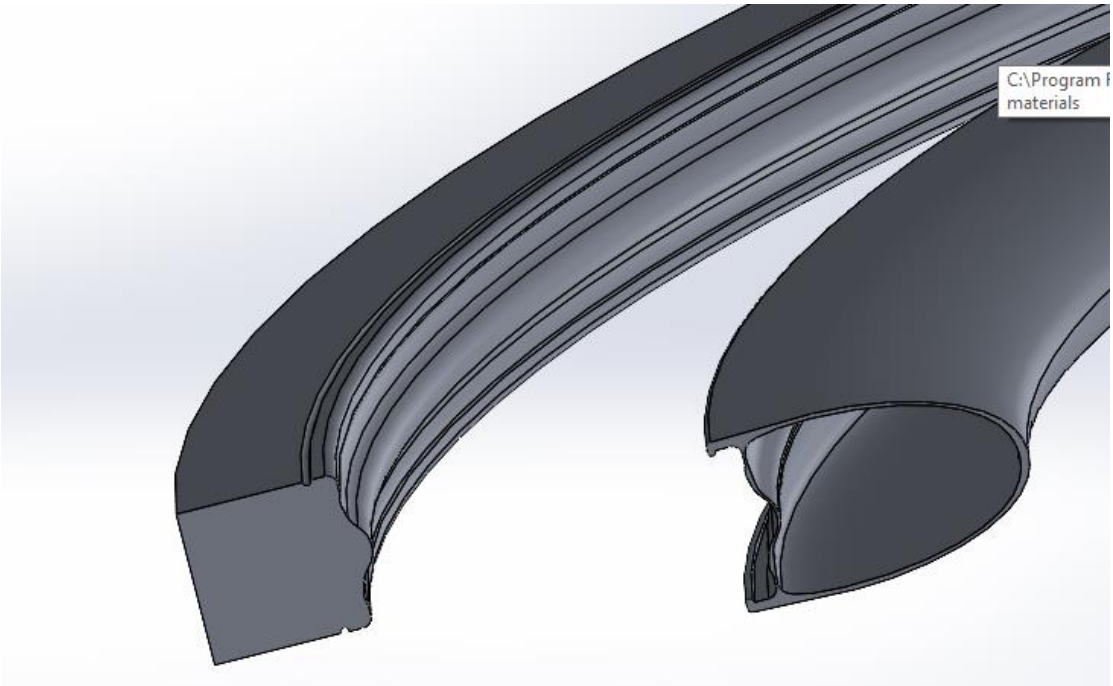
Επίσης και στις δύο περιπτώσεις για την ορθή και εύκολη τοποθέτηση του ελαστικού υπάρχει αντίστοιχη διαμόρφωση bead seat που το συγκρατεί κατά την τοποθέτηση του και εξασφαλίζει την στεγάνωση κατά την αρχική πλήρωση με αέρα ενώ είναι υπεύθυνο και για τον στιγμιαίο χαρακτηριστικό κρότο που ακούγεται όταν 'πατήσει' στην στεφάνη.

Ο συνδυασμός της διαμόρφωσης του hook και του bead seat δημιουργεί τις λεγόμενες υποκοπές και το εσωτερικό καλούπι στην ουσία δεν μπορεί να απομακρυνθεί μετά το πέρας της διαδικασίας.

Αυτό μας ωθεί στο δυσκολότερο κομμάτι αυτής της μελέτης, το οποίο είναι να βρεθεί ένας τρόπος κατασκευής και χρήσης ενός καλουπιού το οποίο θα μπορεί να αποσυναρμολογηθεί και να παράγει τελικό τεμάχιο χωρίς να το τραυματίζει κατά το ξεκαλούπωμα.



Εικόνα 6.9 *Demolding direction*

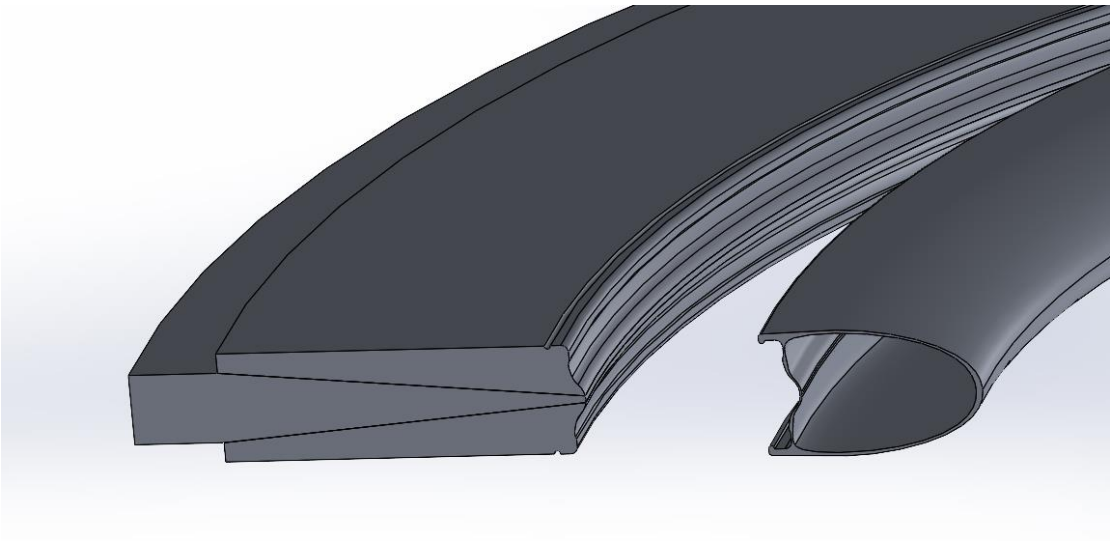


Εικόνα 6.10 *Inside mold shape*

Το εσωτερικό καλούπι είναι εκ περιστροφής τεμάχιο γωνίας 90 μοιρών ώστε σε τετράδα να ολοκληρώνει την εκάστοτε διαμόρφωση στο εσωτερικό της στεφάνης.

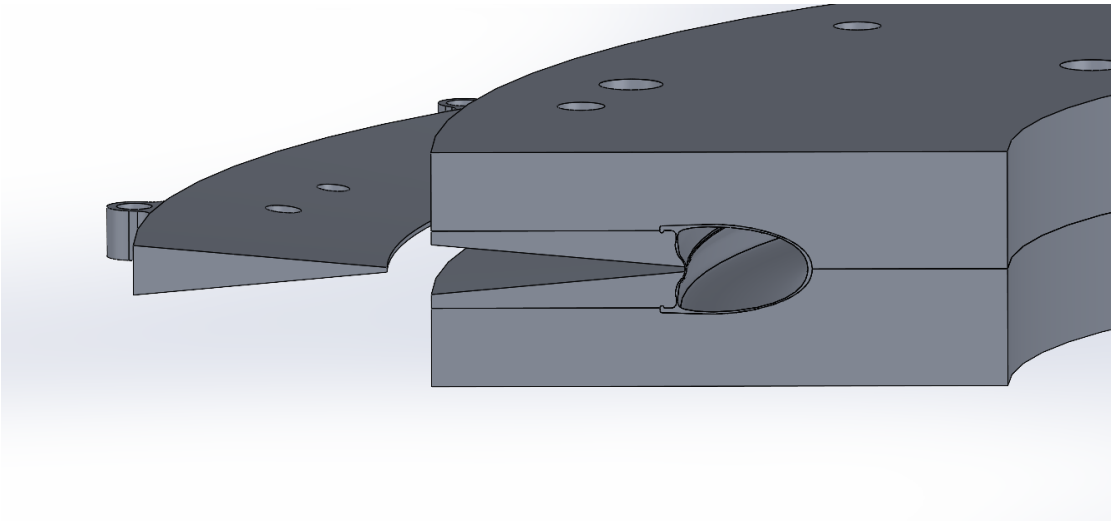
Μια μερική λύση της βιομηχανίας είναι το υπό μελέτη τεμάχιο να διαιρεθεί σε τρία τμήματα έτσι ώστε το άνω και το κάτω εσωτερικό καλούπι να συμπιέζουν την διαμόρφωση σε δύο άξονες ταυτόχρονα κατά την συναρμολόγηση τους. Για να επιτευχθεί αυτό τα εσωτερικά καλούπια θα γλιστρούν μεταξύ τους κατά την τοποθέτηση πάνω σε κατάλληλη επικλινή επιφάνεια γωνίας 10 μοιρών ώστε να κινούνται ταυτόχρονα σε 2 άξονας ενώ στην τελική τους θέση θα ασκούν πίεση και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Αυτή η πίεση θα συμπληρώνει την πίεση που ασκεί η σακούλα στο εσωτερικό αφού στο ακραίο τμήμα της στεφάνης δεν ενεργεί η ίδια.



Εικόνα 6.11 *Inside mold dissection*

6.5 Σφηνοειδές τμήμα



Εικόνα 6.12 *Wedge insertion*

Για την συναρμολόγηση, τοποθετούνται πρώτα τα άνω και κάτω τμήματα του εσωτερικού καλουπιού και στην συνέχεια εισάγεται το σφηνοειδές τεμάχιο καλουπιού, στο εξής σφήνα, με την βοήθεια σφυριού και πυρών κεντραρίσματος έτσι ώστε να πιέσει και να κρατήσεις στις θέσεις τους τα δύο προηγούμενα καλούπια ενώ το κορυφαίο τμήμα της συμπράττει στην συμπίεση της διαστρωμάτωσης.

Το πάχος του κορυφαίου τμήματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το κομμάτι της υποκοπής του καλουπιού ώστε μετά την αφαίρεση στης σφήνας κατά την αντίστροφη διαδικασία να δημιουργεί το κενό ώστε το άνω εσωτερικό καλούπι να υποχωρήσει σε αυτό.

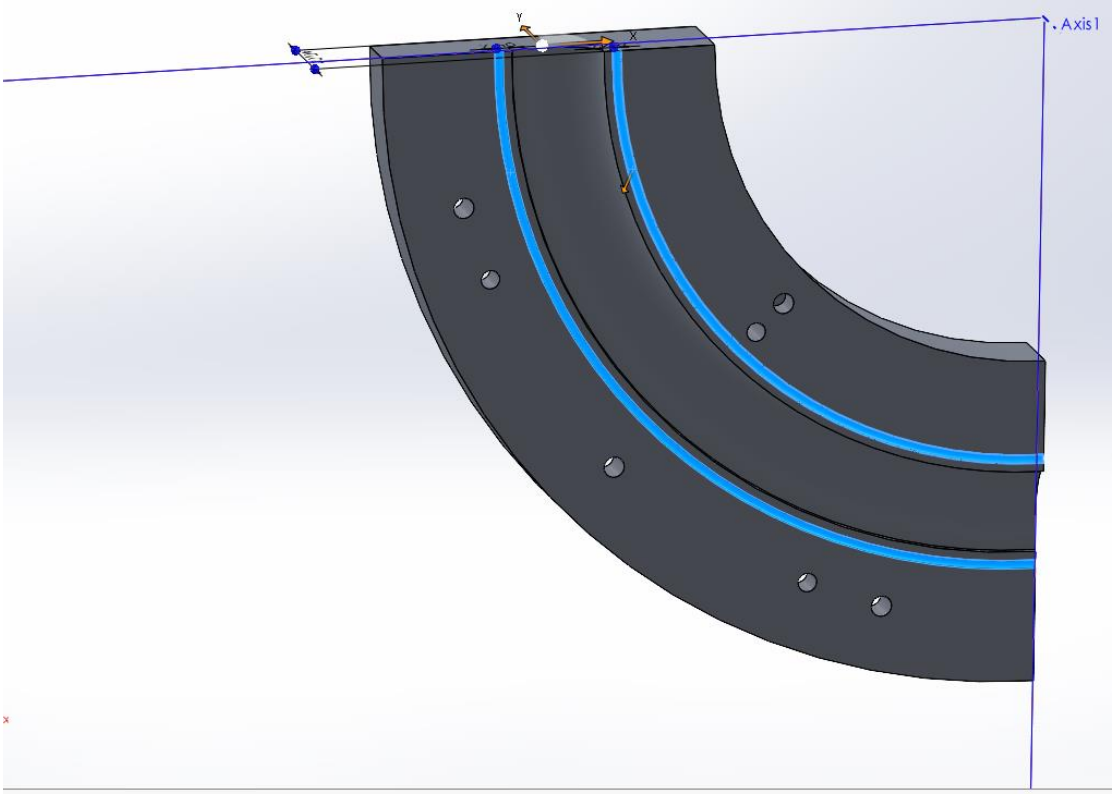
Πρέπει να έχει περιφερειακά προεξέχουσες διαμορφώσεις με οπή ώστε κατά την αποσυναρμολόγησή να μπορεί εισαχθεί εκεί το εργαλείο για την εξαγωγή του.

Σχηματίζει συμμετρική γωνία τουλάχιστον 10 μοιρών για να μπορεί να ολισθαίνει πάνω στα άλλα δύο τεμάχια χωρίς να κολλάει.

6.6 Αύλακα ρητίνης

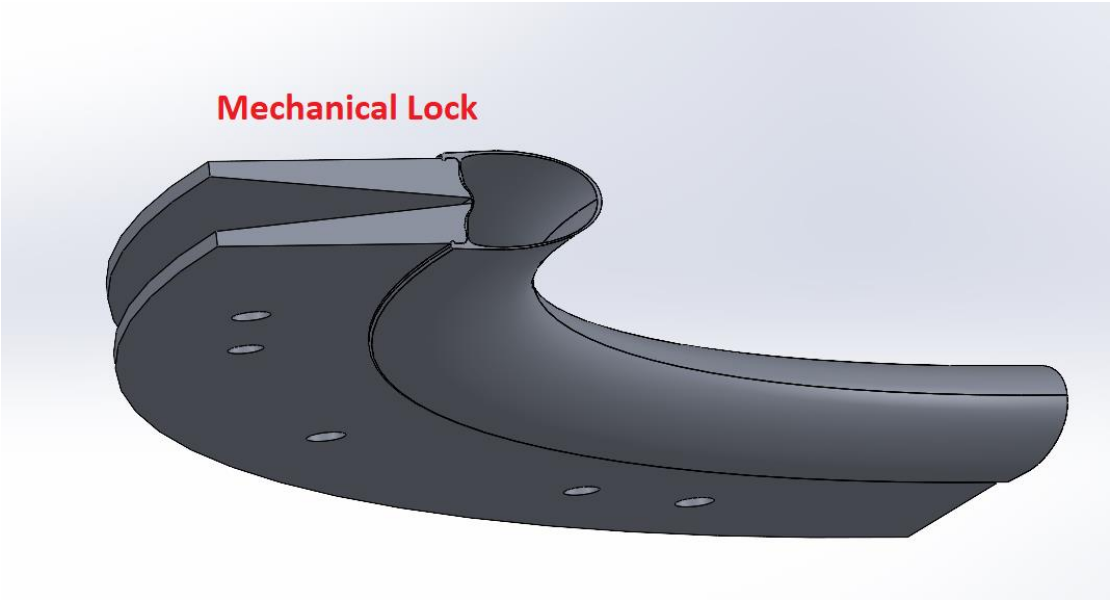
Κατά την διάρκεια του curing η ρητίνη διαρρέει τις ίνες άνθρακα και λόγω τις πίεσης που της ασκείται υπάρχει πιθανότητα να διαρρεύσει και ανάμεσα στα καλούπια. Η περίσσεια ρητίνης δεν μπορεί να εκκενωθεί εσωτερικά από την μεριά της σακούλας αφού δεν υπάρχουν πόροι σε αυτή άρα θα εκκενωθεί στα άνω και κάτω καλούπια. Σε αυτό θα βοηθήσει μια διαμόρφωση αύλακας η οποία θα έχει διάμετρο 5mm , σε απόσταση περίπου 5 mm από το τεμάχιο και θα διατρέχει περιφερειακά τα καλούπια. Η αύλακα

φαίνεται με γαλάζιο χρωματισμό στο επόμενο στιγμιότυπο.



Εικόνα 6.15 *Excess resin catch groove*

Βέβαια ακόμα δεν έχουμε λύσει το πρόβλημα του ξεκαλουπώματος αφού σύμφωνα με προσομοίωση αποσυναρμολόγησης στο Solidworks και με ενεργή την επιλογή εντοπισμού σύγκρουσης (collision detection) μας δείχνει ξεκάθαρα ότι τα τεμάχια του άνω και κάτω εσωτερικού καλουπιού δημιουργούν μηχανική σύνδεση με το τεμάχιο.



Εικόνα 6.13 *Mechanical lock*

6.7 Θερμική διαστολή καλουπιού

Εδώ η λύση θα δοθεί από την μελέτη και τον υπολογισμό της θερμικής διαστολής του καλουπιού κατά το ψήσιμο καθώς ο μηχανικός μπορεί να την χρησιμοποιήσει προς όφελος του κατά το ξεκαλούπωμα. Όταν ένα καλούπι βγαίνει από τον φούρνο οι τεχνίτες σπεύδουν να το αποσυναρμολογήσουν καθώς γνωρίζουν πολύ καλά ότι λόγω της θερμικής διαστολής το εξωτερικό καλούπι αλουμινίου μπορεί ακόμα και να σπάσει το εσωτερικό ανθρακονημάτινο τεμάχιο εάν αργήσουν να το απελευθερώσουν. Στην περίπτωση της στεφάνης τα εξωτερικά καλούπια πρέπει με την ίδια λογική να απομακρυνθούν όσο τον δυνατόν νωρίτερα αλλά τα εσωτερικά καλούπια εκτός της σφήνας αφήνοντας τα να

επιστέψουν στην θερμοκρασία περιβάλλοντος βοηθούν τον τεχνίτη στο ξεκαλούπωμα κατά την συστολή τους. Αυτή η σκέψη σε συνδυασμό με την επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμός προφίλ -> θερμική προσομοίωση -> εξαγωγή αποτελεσμάτων -> επανασχεδιασμός κατέληξε στην θεωρητική λύση του προβλήματος του εσωτερικού mechanical lock.

Επιγραμματικά να αναφέρουμε πώς το καλούπι αλλάζει διαστασιολογικά κατά το ψήσιμο στον φούρνο για δύο λόγους.

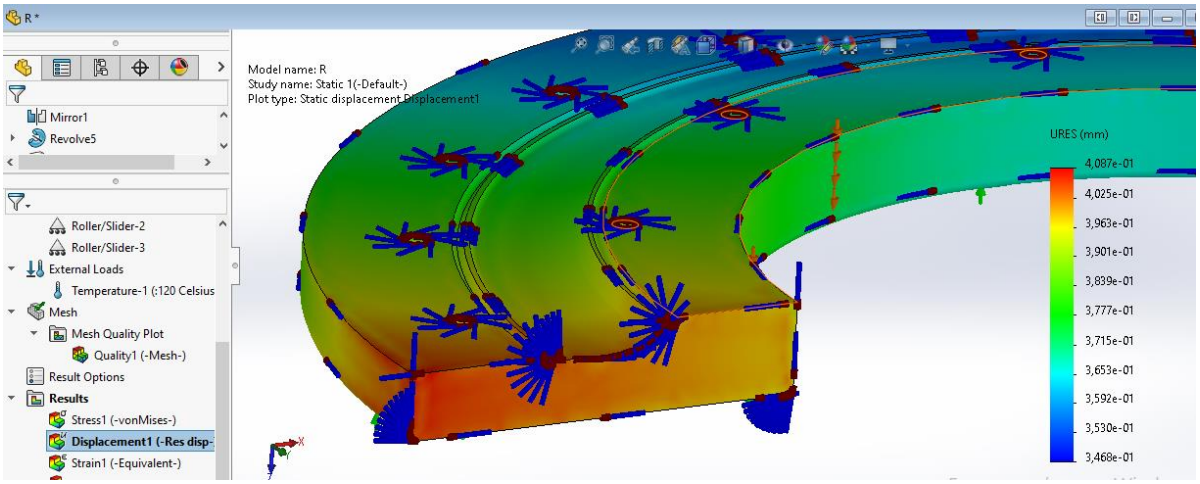
Πρώτον η αυξημένη θερμοκρασία περίπου 120 βαθμών Κελσίου που επικρατεί διαστέλλει θερμικά το αλουμίνιο ενώ η εσωτερική πίεση του καλουπιού που μπορεί να φτάσει και τα 8 bar τείνει να απομακρύνει τις επιφάνειες του διαιρετού καλουπιού.

Για μία τέτοια μοντελοποίηση χρησιμοποιείται είτε η σταθερή τελική θερμοκρασία του συναρμολογήματος, είτε η μεταβολή της θερμοκρασίας με το χρόνο ανάλογα με το πρόγραμμα ψησίματος. Να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις μεγάλων όγκων καλουπιών είτε καλουπιών με χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (πχ. ξύλο) θα πρέπει να συνυπολογιστεί και ο χρόνο που χρειάζεται το ανθρακόνημα να έρθει στην κατάλληλη θερμοκρασία. Αυτό γιατί δεν θερμαίνεται άμεσα προφανώς αλλά μέσω του καλουπιού. Το τελευταίο μπορεί να θερμαίνεται σε ηλεκτρικό φούρνο με ροές ζεστού αέρα και ανεμιστήρων που όταν πλησιάσουν τον θερμοκρασιακό στόχο κλείνουν και ανοίγουν ώστε να δημιουργούν μια ταλάντωση της θερμοκρασίας γύρω από τον στόχο. Αυτή η

θερμοκρασιακή ταλάντωση ιδανικά θα πρέπει να συνυπολογιστεί στο υπολογιστικό μοντέλο. Μια διαφορετική περίπτωση είναι το καλούπι να θερμαίνεται με εσωτερικό κύκλωμα ρευστού το οποίο έχει διαφορετική συμπεριφορά και πιο άμεσο έλεγχο της εσωτερικής θερμοκρασίας.

Ο συνδυασμός πίεσης και θερμοκρασίας είναι απαραίτητος για την καλύτερη ποιότητα του τελικού τεμαχίου αφού περιορίζεται ο σχηματισμός πορώδους επιφανείας και ατελειών

Για να έχουμε μίας εικόνα των πραγμάτων των τάξεων μεγέθους επισυνάπτεται ένα στιγμιότυπο τμήματος του παρόντος καλουπιού υπό στατική προσομοίωση στο SW ώστε να διερευνηθεί η διαστασιακή μεταβολή σε θερμοκρασία 120 °C



Εικόνα 6.15 *Volumetric temperature expansion*

Παρατηρούμε ότι στο ακραίο τμήμα της διαμέτρου του καλουπιού έχουμε μέγιστη διαστολή 0,4 mm στο αλουμίνιο ενώ η ελάχιστη δεν είναι κάτω από 0,34 mm. Αυτό μας επιβεβαιώνει ότι ο συλλογισμός

που έγινε για την αντιμετώπιση του προβλήματος του mechanical lock των εσωτερικών καλουπιών με τον υπολογισμό της ογκομετρικής θερμικής διαστολής είναι βάσιμος.

Έτσι γνωρίζοντας ότι οι διαστάσεις του τελικού τεμαχίου είναι αυτές που έχει το καλούπι κατά την διαδικασίας του ψησίματος, ο μηχανικός υποδιαστασιολογεί το τρισδιάστατο μοντέλο και το αρχικό καλούπι για να συνυπολογίσει αυτή την ιδιότητα του μετάλλου και το τελικό τεμάχιο να είναι εντός προδιαγραφών. Εάν το καλούπι είναι από ισότροπο υλικό χρησιμοποιείται ένας κοινός συντελεστής που διορθώνει τις διαστάσεις για κάθε άξονα ενώ αν το υλικό του καλουπιού είναι από αν ισότροπο υλικό θα πρέπει να υπολογιστεί ξεχωριστός συντελεστής για κάθε άξονα. Ο υπολογισμός αυτού του συντελεστή μπορεί να γίνει και μέσω πειραματικής διαδικασίας.

6.8 Υπολογισμός κοχλιών και ροπής σύσφιξης

Για να υπολογίσουμε τον αριθμό των κοχλιών ξεκινάμε από τον υπολογισμό της επιφάνεια του καλουπιού που είναι εκτεθειμένη στην εσωτερική πίεση η οποία τείνει να διαχωρίσει τα τμήματα του. Η μέτρηση του εμβαδού αυτής της επιφάνειας είναι εύκολη στο SolidWorks αφού υπάρχει ειδικό εργαλείο MEASURE το οποίο μετράει την επιφάνεια σε 26.690,91 mm2 **για τεταρτοκύκλιο**

καλουπιού. Για να υπολογίσουμε την συνολική δύναμη που θα ασκηθεί στο καλούπι και που θα πρέπει να συγκρατήσουν οι κοχλίες σκεφτόμαστε πως η εσωτερική πίεση του δεν θα υπερβαίνει τα 8 bar (1bar = 105 N/m2 = 105 * 10-6 = 0,1 N/mm2) και άρα 26690,91*0,8=21.352,7 N

Έχοντας υπόψιν μας την δύναμη που θα πρέπει να συγκρατήσουν οι κοχλίες για αυτό το τμήμα του καλουπιού θα πρέπει επιλέξουμε κατάλληλο τύπο και αριθμό κοχλιών που ενώ θα ασκείται η πίεση οι ίδιοι θα συνεχίσουν να συγκρατούν το καλούπι κλειστό για να μην διαρρεύσει ρητίνη προς τα έξω. Σε αντίστοιχες εφαρμογές χρησιμοποιούνται συνήθως κοχλίες M8 ή M10 και σε απόσταση όχι μεγαλύτερη 100-120 mm ο ένας από τον άλλο. Με γνώμονα αυτό και το γεγονός ότι όσο λιγότεροι σε αριθμό τόσο το καλύτερο αφού η διαδικασίες γίνονται γρηγορότερα και μειώνεται ο χρόνος που απασχολείται ο υπάλληλος

ΤΥΠΟΣ	Βήμα σπειρώματος, P	Κυρία διάμετρος, d = D	Μέση διάμετρος, $d_2 = D_2$	Εσωτερική διάμετρος κοχλία, d_3	Εσωτερική διάμετρος περικοχλίου, D_1	Βάθος σπειρώματος, h_3	Φορτιζόμενη επιφάνεια, A, mm^2
M 8	1.25	8.00	7.188	6.466	6.647	0.767	36.60
M 10	1.50	10.00	9.026	8.160	8.876	0.920	58.30

Πίνακας 6.1 Τύποι κοχλιών

Ο τύπος υπολογισμού του εμβαδού του κοχλία που φορτίζεται , **για στατική φόρτιση** υπολογίζεται από τον τύπο :

$$A = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_2 + d_3}{2}\right)^2$$

Για κοχλία M10 , A=57mm^2

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΚΟΧΛΙΑ	S_u (MPa)	S_y (MPa)	$S_{y0.2}$ (MPa)	δ_u (% επιμήκυνση μετά τη θραύση)	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΕΡΙ-ΚΟΧΛΙΟΥ	S_u (MPa)
3.6	300	180	-	25	5	500
4.6	400	240	-	22	5	500
4.8	400	320	-	14	5	500
5.6	500	300	-	20	5	500
5.8	500	400	-	10	5	500
6.6	600	360	-	16	6	600
6.8	600	480	-	8	6	600
6.9	600	-	540	12	6	600
8.8	800	-	640	12	8	800
10.9	1000	-	900	9	10	1000
12.9	1200	-	1080	8	12	1200
14.9	1400	-	1260	7	14	1400

Πίνακας 6.2 Κατηγορίες κοχλιών

Επιλέχθηκαν 5 κοχλίες M10 κατηγορίας 8.8 σύμφωνα και με βάση το πάχος του καλουπιού δηλαδή το μήκος του κοχλία. Ο καθένας θα κληθεί να κρατήσει δύναμη **F=**21.352,7/5 = **4270,54 N**.

Η πίεση που θα ασκηθεί σε κάθε κοχλία θα είναι **P**=F/A=4270,54/57mm^2**= 74,92 MPa.** Η τιμή αυτή είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους κάτω και από το όριο διαρροής και του ατσαλιού του κοχλία (800 MPa).

Θέλουμε να υπολογίσουμε την ροπή σύσφιξης που χρειάζεται για να δημιουργήσουμε προένταση στην συναρμολόγηση ώστε κάτω από τις συνθήκες πίεσης το καλούπι να είναι ερμητικά κλειστό.

Από τον τύπο: **Μολ=F*[tan(ρ'+α)*d2/2 + μπ*dm/2]**

γνωρίζοντας όλα τα μεγέθη του 2^{ου} μέλους μπορούμε να υπολογίσουμε και την απαιτούμενη ροπή. Έχουμε λοιπόν:

- ✓ **F=3558,8N**

Για μετρικό σπείρωμα ο τύπος λαμβάνει υπόψη του το ρ' για το οποίο ισχύει ότι:

- **ρ'=tan^(- 1) (tanρ/cos(β/2))**
- **μ=tanρ=0,17**(συντελεστής τριβής, από πίνακα)
- **β=60o** για μετρικό σπείρωμα

⇨ **ρ'=11,11o**

- **α = tan^(-1)(p/π*d2)**
- **p=1,5 mm** (βήμα σπειρώματος M10)

✓ **d2=9,026mm** (Μέση διάμετρος M10)

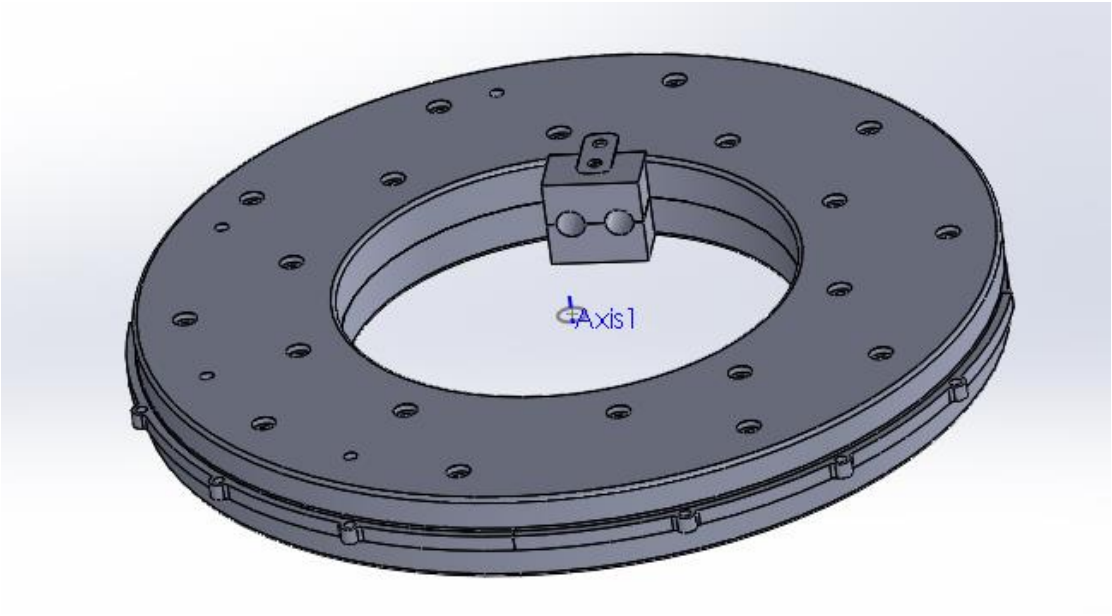
⇨ **α=3,03^{o}**

- ✓ **μπ=0,40 :** συντελεστής τριβής του κοχλία με το καλούπι (θεωρώντας ότι υπάρχει και λίπανση)

- ✓ **dm=15mm** (μέση διάμετρος βαρέως τύπου)

- Αντικαθιστώντας όλους αυτούς τους τύπους στην σχέση προκύπτει ότι :Μολ= 14,72 Nm

Η ροπή λοιπόν αυτή είναι αυτή που απαιτείται για την προένταση που θέλουμε να πετύχουμε έτσι ώστε οι δύο πλάκες του καλουπιού να βρίσκονται πάντα υπό τάση μεταξύ τους, κάτι που χωρίς την προένταση δεν θα συνέβαινε. Η ροπή αποσύσφιξης κανονικά θα πρέπει να είναι μικρότερη καθώς ο τύπος είναι: Mol=F*[tan(r'-a)*d2/2 + mp*dm/2] όμως επειδή η θερμοκρασία όταν βγαίνει το καλούπι από το φούρνο είναι περίπου στου 120oC γίνεται κατανοητό ότι η πραγματική ροπή που απαιτείται είναι αρκετά μεγαλύτερη λόγω διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής των δύο υλικών καθώς επίσης επηρεάζονται και οι συντελεστές τριβής.



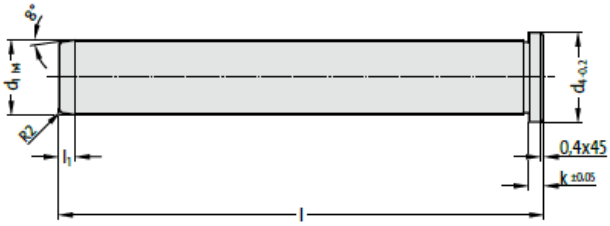
Εικόνα 6.16 Τελικό συναρμολόγημα

6.9 Πείροι κεντραρίσματος

Σε κάθε τεταρτημόριο πέρα από τους κοχλίες σύσφιξης υπάρχει πρόβλεψη για δύο πείρους κεντραρίσματος (guide pillar) οι οποίοι επιλέχθηκαν από τον κατάλογο προϊόντων της fibro.de σύμφωνα με την συγκεκριμένη εφαρμογή μας και κωδικό προϊόντος 3202.12.012.080 για την σωστή τοποθέτηση των ένθετων τεμαχίων του καλουπιού.

GUIDE PILLAR

3202.12.



3202.12. Guide pillar

Order No	d_1	l	d_4	k	l_1
3202.12.012.080	12	80	16	4	4
3202.12.012.100	12	100	16	4	4
3202.12.012.120	12	120	16	4	4
3202.12.018.120	18	120	22	6	7
3202.12.018.140	18	140	22	6	7
3202.12.018.160	18	160	22	6	7
3202.12.030.160	30	160	36	6	7
3202.12.030.200	30	200	36	6	7
3202.12.030.240	30	240	36	6	7

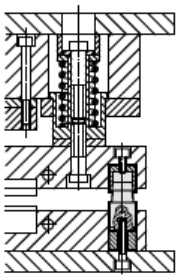
Εικόνα 6.17 Guide pillar

Οι ίδιοι θα εξασφαλίσουν πως κάθε τριπλέτα ένθετων τεμαχίων τεταρτημόριου καλουπιού θα πατήσει στην θέση της και θα διευκολύνει τους τεχνίτες κατά την συναρμολόγηση.

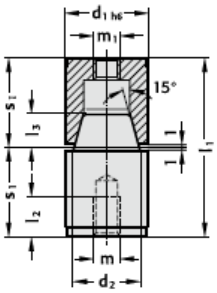
Από την άλλη τα εξωτερικά καλούπια θα κεντράρονται με χρήση δύο τεμαχίων όπως φαίνεται παρακάτω με κωδικό προϊόντος 2442.12.026.054 :

CENTERING UNIT
CENTERING UNIT, FLAT

Mounting example



2442.12.



Description:
Conical centring units are used to increase repeat accuracy in mould, die and machine-making.

2442.12. Centering unit

Order No	d_1	d_2	l_1	l_2	l_3	m, m_1	s_1
2442.12.012.034	12	8	34	6	4	M4	17
2442.12.014.034	14	10	34	7.5	6	M5	17
2442.12.016.034	16	10	34	7.5	6	M5	17
2442.12.020.054	20	15	54	12	9	M8	27
2442.12.025.054	25	20	54	12	10	M8	27
2442.12.026.054	26	20	54	12	10	M8	27
2442.12.030.072	30	25	72	15	14	M10	36
2442.12.032.072	32	25	72	15	14	M10	36
2442.12.042.092	42	35	92	15	18	M10	46

Ενεργοποιή

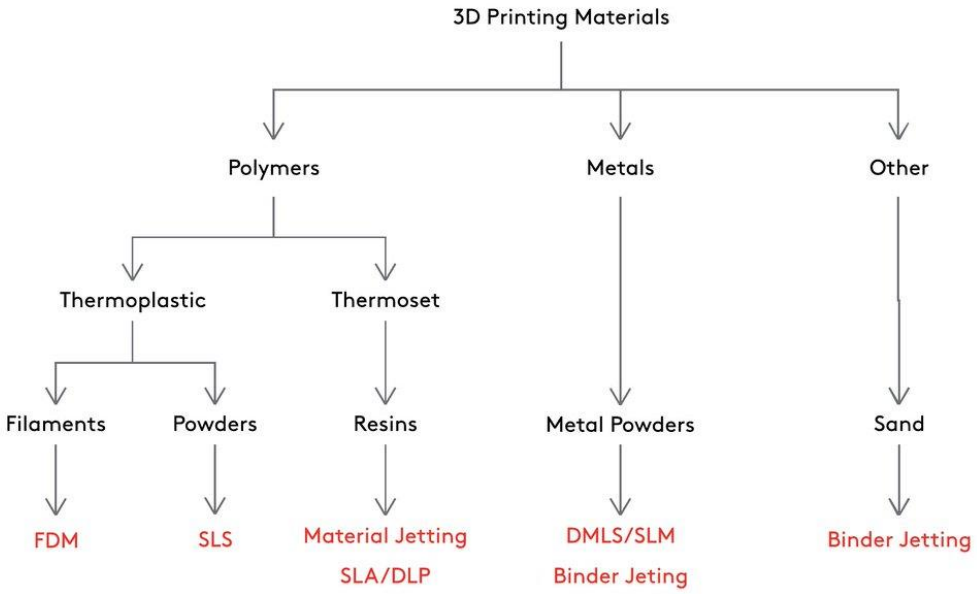
Εικόνα 6.18 Centering Unit

Τέλος θα κάνουμε μια αναφορά στην τεχνολογία της 3D εκτύπωσης η οποία αποτελεί ένα σύγχρονο εργαλείο του μηχανολόγου μηχανικού που μειώνει δραματικά το κόστος και το χρόνο δημιουργίας πρωτοτύπων και πραγματικών μοντέλων με βάση τα σχέδια που δημιουργήσαμε στον υπολογιστή.

Κεφάλαιο 7

3D printing και εκτυπωτές FDM

Fused Deposition Modeling (FDM) ή Fused Filament Fabrication (FFF)

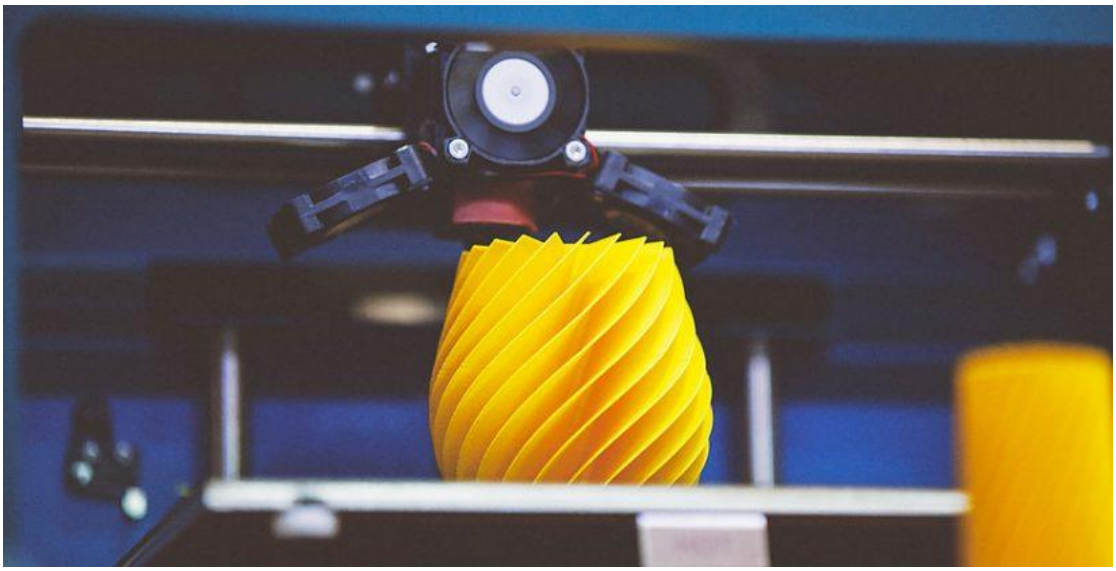


Εικόνα 7.1 3D printing processes [B15]

Το FDM είναι μια διαδικασία παραγωγής και ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων που ανήκει στην οικογένεια τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στο FDM, ένα αντικείμενο κατασκευάζεται από την επιλεκτική απόθεση του λιωμένου υλικού σε μια προκαθορισμένη διαδρομής στρώση-στρώση. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά είναι θερμοπλαστικά πολυμερή και έχουν μορφή νήματος.

Το FDM είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία 3D Printing

Ένας σχεδιαστής θα πρέπει να έχει κατά νου τις δυνατότητες και τους περιορισμούς της τεχνολογίας κατά την κατασκευή ενός τεμαχίου για παραγωγή με την μέθοδο FDM, καθώς αυτό θα τον βοηθήσει να επιτύχει το καλύτερο αποτέλεσμα.



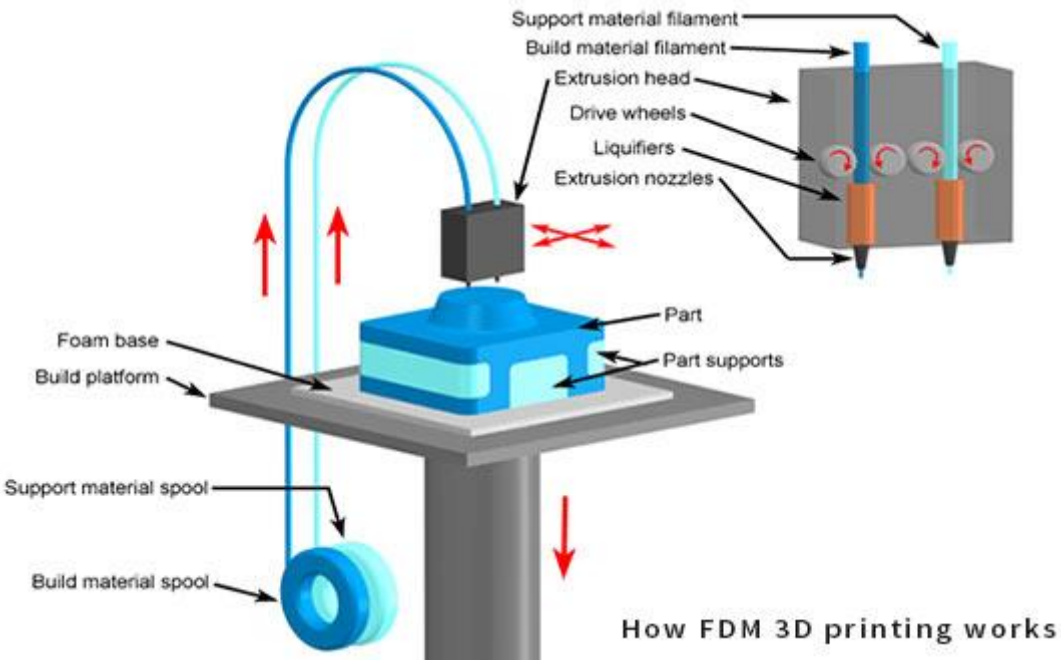
Εικόνα 7.2 *FDM 3D printing [B16]*

Πώς λειτουργεί το FDM;

Ένα καρούλι από θερμοπλαστικό νήμα φορτώνεται πρώτα στον εκτυπωτή. Αφού το ακροφύσιο φθάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία, το νήμα τροφοδοτείται στην κεφαλή εξώθησης και στο ακροφύσιο όπου λιώνει.

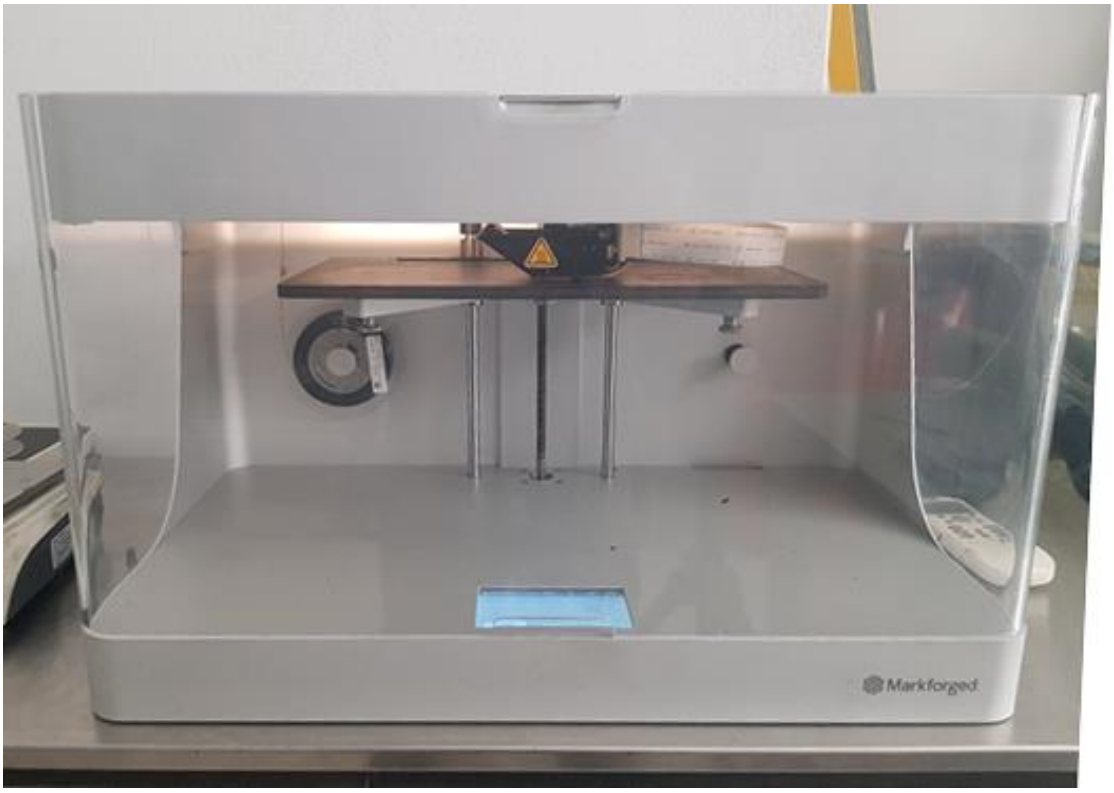
Η κεφαλή εξώθησης είναι προσαρτημένη σε ένα σύστημα 3 αξόνων που του επιτρέπει να κινείται σε κατευθύνσεις X, Y και Z. Το τετηγμένο υλικό εξωθείται σε λεπτούς κλώνους και εναποτίθεται στρώμα-στρώμα σε προκαθορισμένες θέσεις, όπου ψύχεται και στερεοποιείται. Μερικές φορές η ψύξη του υλικού επιταχύνεται μέσω της χρήσης ανεμιστήρων ψύξης προσαρτημένων στην κεφαλή εξώθησης.

Για να γεμίσει μια περιοχή, απαιτούνται πολλαπλά περάσματα. Όταν τελειώσει ένα στρώμα(layer), η πλατφόρμα (άξονας Z) κατεβαίνει προς τα κάτω (ή σε άλλες περιπτώσεις μηχανημάτων, η κεφαλή εξώθησης κινείται προς τα επάνω) και τοποθετείται ένα νέο στρώμα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το τεμάχιο.



Εικόνα 7.3 *Working principal of FDM [B17]*

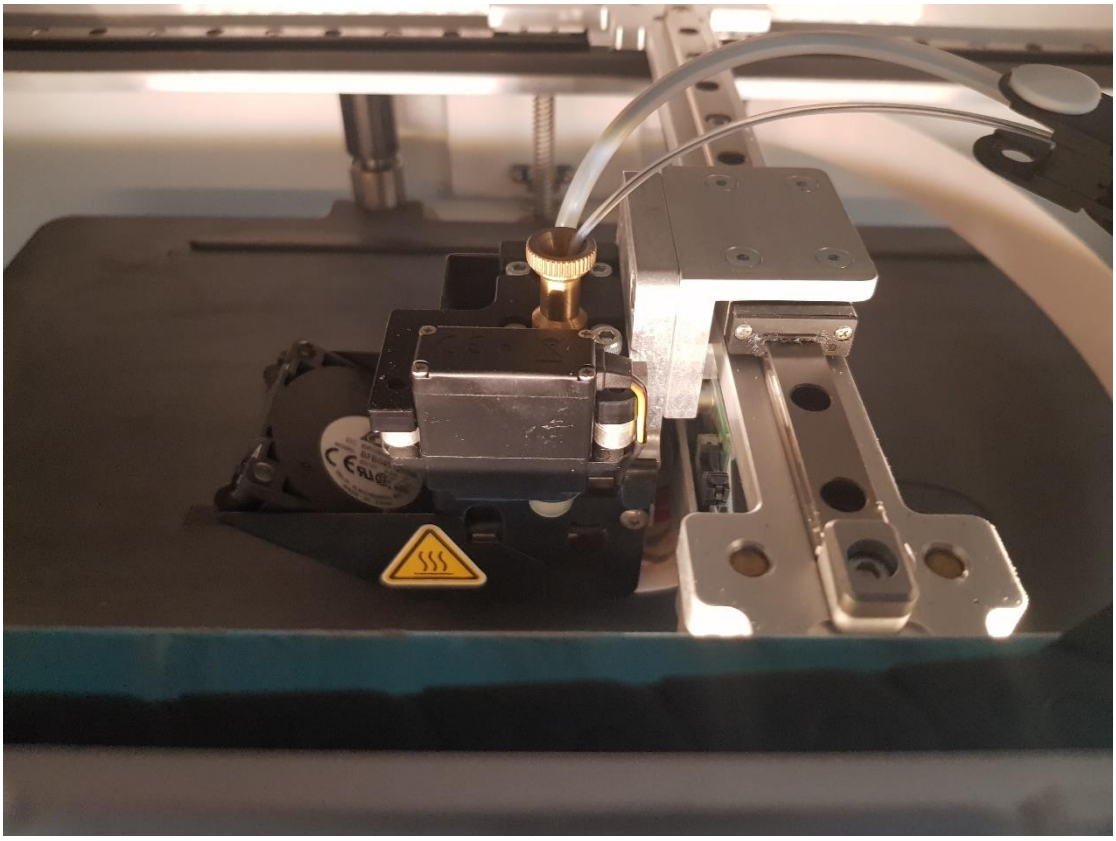
Κατά την σχεδίαση του καλουπιού κάναμε χρήση ενός 3d εκτυπωτή για να κατασκευάσουμε γρήγορα πρωτότυπα ενός τμήματος του καλουπιού και της στεφάνης ώστε να μπορέσουμε να οπτικοποιήσουμε άμεσα το σχέδιο και την γεωμετρία του. Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται mark 2 της εταιρίας MARKFORGED και ανήκει στους βιομηχανικούς 3d εκτυπωτές υψηλής ακρίβειας κόστους περίπου 20.000€.



Εικόνα 7.4 *MARKFORGED MARK 2*

Έχει δύο κεφαλές εκτύπωσης με δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας ενώ μπορεί να εναποθέτει συνεχή ίνα άνθρακα εντός του τεμαχίου αυξάνοντας έτσι την αντοχή στις διευθύνσεις

φόρτισης κατά την λειτουργία του. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το πατενταρισμένο υλικό της ίδιας εταιρίας ονόματι ONYX και περιέχει Nylon εμπλουτισμένο με τεμαχισμένες μικροΐνες άνθρακα ώστε να επιτύχει την επιθυμητή αντοχή και υφή στην τελική επιφανείας.

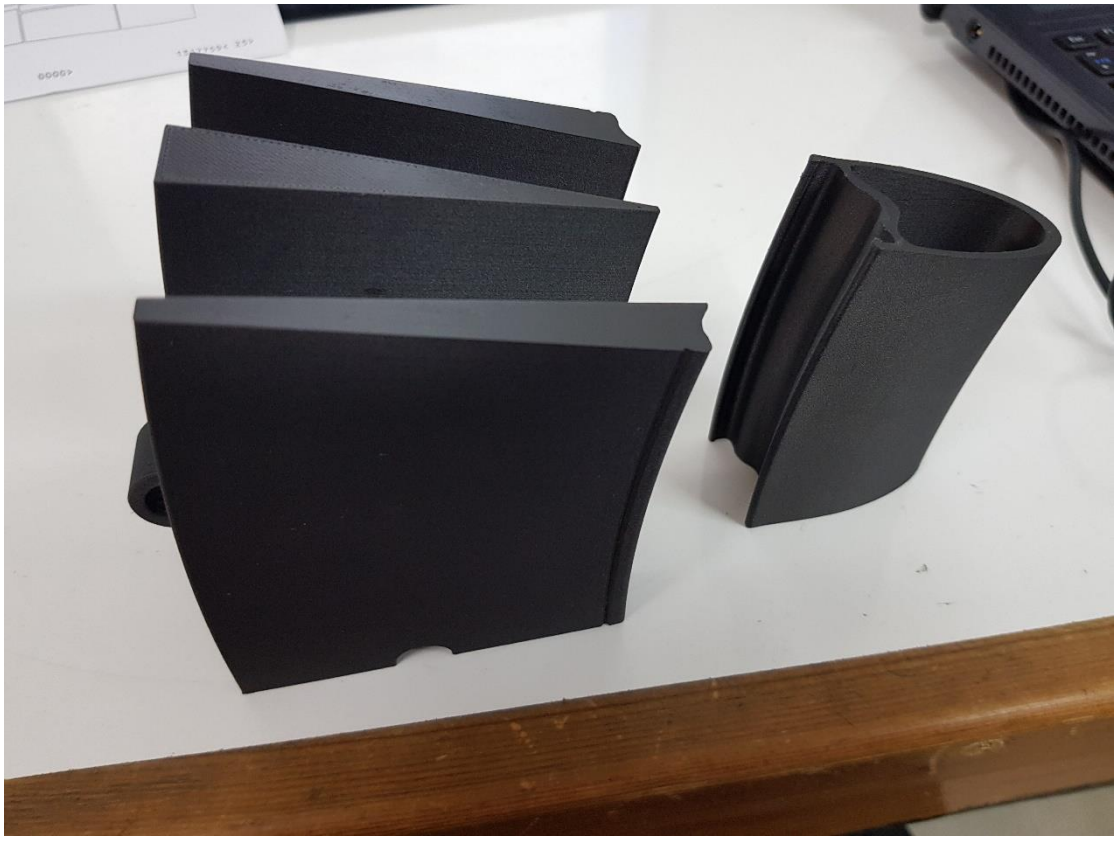


Εικόνα 7.5 *3D print head*

Τμήμα γωνίας 10 μοιρών του καλουπιού απομονώθηκε και στάλθηκε για εκτύπωση με ύψος στρώσης (layer height) 0,1 mm (υψηλή ακρίβεια) ενώ χρειάστηκαν περίπου 12 ώρες εκτύπωσης.

Εικόνα 7.6 *Printer during first layer*

Τα εκτυπωμένα τεμάχια χρησιμοποιήθηκαν για να οπτικοποιήσουμε το τρισδιάστατο σχέδιο και να κατανοήσουμε καλύτερα το μηχανισμό σύγκλισης του καλουπιού.



Εικόνα 7.7 *3D printed mold pieces and rim*

Δεν επιλέξαμε την τρισδιάστατη εκτύπωση για την ακρίβεια του τελικού τεμαχίου αφού η κεφαλή εκτύπωσης έχει διάμετρο οπής 0,4 mm και το υλικό είναι εύκολα παραμορφώσιμο σε σχέση με ένα τεμάχιο αλουμινίου.

Δεν υπήρχαν λοιπόν οι προσδοκίες το πλαστικό καλούπι να συναρμολογηθεί τέλεια απλά να μας προϊδεάσει ως προς τον τρόπο συνεργασίας των τεμαχίων.

Εικόνα 7.8 *Printed assembly*

Επίσης το πλαστικό τμήμα της στεφάνης συγκρίθηκε άμεσα με άλλες ρόδες του εμπορίου για να έχουμε μια εικόνα του τελικού στόχου.

Με βάση τα εκτυπωμένα τεμάχια και για καλή μας τύχη που επιλέξαμε αυτή την μέθοδο πριν προχωρήσουμε στην δημιουργία του καλουπιού από αλουμίνιο, εντοπίσαμε μια παράληψη κατά την διαδικασία του σχεδιασμού η οποία αφορούσε μια εσωτερική ακτίνα καμπυλότητας η οποία όταν το πλαστικό πρωτότυπο τοποθετήθηκε στο αντίστοιχο ελαστικό που θα χρησιμοποιηθεί δεν

υπήρχε η ορθή συνεργασία σε εκείνο το σημείο. Αμέσως επανασχεδιάστηκε η διατομή και προχωρήσαμε σε επανεκτύπωση και τελική αξιολόγηση των πλαστικών τεμαχίων. Έχοντας μείνει ευχαριστημένοι από το αποτέλεσμα τελειώνουμε την παρούσα μελέτη χωρίς όμως λόγω φόρτου εργασίας του μηχανήματος την παρουσίαση των τελικά κατεργασμένων τεμαχίων του καλουπιού από αλουμίνιο.

Επίλογος

Μέσα από την παρούσα εργασία προπτυχιακού επιπέδου και με ξεκάθαρο στόχο ότι όλες οι διαδικασίες, τα σχέδια, οι ανοχές και τα υπό μελέτη τεμάχια αποτελούν αντικείμενο προς άμεση παραγωγή και όχι απλά θεωρητική έρευνα, δόθηκε η δυνατότητα να υλοποιηθεί ένα σύνολο, ολοκληρωμένο και ταυτόχρονα βαθιά εκπαιδευτικό για ένα νέο μηχανολόγο μηχανικό. Ήταν μεγάλη ευκαιρία που ένα τεχνολογικά προηγμένο προϊόν μελετήθηκε σε όσο τον δυνατόν περισσότερα στάδια της δημιουργίας του με σύγχρονα εργαλεία, χρήση ακριβού και εξειδικευμένου εξοπλισμού που όμως αποτελεί μονόδρομο για κάθε μηχανικό που επιδιώκει να εξελίσσεται, να μαθαίνει και να εκσυγχρονίζεται διαρκώς όπως και η φύση της δουλειάς μας επιβάλλει. Η εφαρμογή των θεωρητικών γνώσεων στην πράξη αλλά και η επίλυση των προκύπτων προβλημάτων και προβληματισμών είναι πραγματικά μια δημιουργική διαδικασία εξέλιξης κάθε μηχανικού. Επίσης είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί πως η σφαιρική ενασχόληση με ένα

αντικείμενο, στην παρούσα περίπτωση η εξέλιξη ενός προϊόντος από το επίπεδο της σύλληψης της ιδέας μέχρι και την υλοποίηση της επιφέρει την αναζητούμενη επιβράβευση και την χαρά της δημιουργίας σε όλα τα μέλη της ομάδας.

Τέλος θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθεί πως η προσωπική μου ενασχόληση στον παρόν έργο από την μία διεύρυνε τις γνώσεις μου στο αντικείμενο και από την άλλη με έκανε να συνειδητοποιήσω την σημαντικότητα της επικοινωνίας των μελών της ομάδας έτσι ώστε να διαμοιράζεται η γνώση και να παίρνονται ορθές αποφάσεις πολυπαραγοντικών ζητημάτων πάσης φύσεως.

Βιβλιογραφία

[A1a] Chowdhury, Harun, Alam, F., Mainwaring, D., 2011b. A full scale bicycle aerodynamics

[A1b] Debraux, P., Grappe, F., Manolova, A.V., Bertucci, W., 2011. Aerodynamic drag in cycling: Methods of assessment. Sport. Biomech testing methodology.

[A2a] Jermy, M., Moore, J., Bloomfield, M., 2008. Translational and rotational aerodynamic drag of composite construction bicycle wheels

[A2b] Greenwell, D.I., Wood, N.J., Bridge, E.K.L and Add, R.J. 1995, “Aerodynamic characteristics of low-drag bicycle wheels”

[A3] Zdravkovich, M.M., 1992, “Aerodynamics of bicycle wheel and frame”, J. Wind Engg and Indust. Aerodynamics, 40, pp. 55-70.

[A4] Kyle, C.R. and Burke, E. 1984, “Improving the racing bicycle”, Mech. Eng., 106, pp. 34-35.

[A5] Kyle, C.R., 1985, “Aerodynamic wheels”, Bicycling, pp. 121-124.

[A6] Kyle, C.R., 1991, “New aero wheel tests”, Cycling Sci. pp. 27-32.

[A7] McManus και Zhang [McManus J. and Zhang, X., “A Computational Study of the Flow Around an Isolated Wheel in Contact with the Ground”, 2006.

[A8] Fackrell, J.E. and Harvey, J.K., “The Flowfield and Pressure Distribution of an Isolated Road Wheel”, Advances on Road Vehicle Aerodynamics”, Stephens, H.S., ed., BHRA Fluid Engineering, pp. 155-165, 1973.

[A9] Fackrell, J.E., “The Aerodynamics of an Isolated Wheel Rotating in Contact with the Ground”, Ph.D. Thesis, University of London, London, U.K. 1974.

[A10] Fackrell, J.E. and Harvey, J.K., “The Aerodynamics of an Isolated Road Wheel”, in Pershing, B. ed., Proc. of 2nd AIAA Symposium of Aerodynamics of Sports and Competition Automobiles, LA, Calif., USA, pp. 119-125], 1975.

[A11] Spalart, P.R. and Allmaras, S.R., 1992, “A one-equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows”, 30th AIAA Aerospace Sciences Annual Meeting, Reno NV, USA, 6-9 January, AIAA Paper No. 92-0439.

[A12] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J., 1995, “A New κ−ε Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows”, Comput. Fluids, 24(30), pp. 227-238.

Κατάλογος Εικόνων

[B1]

https://sites.google.com/site/bicicletasconscompfl2012/home/english/history

[B2]

http://karboncomposites.com

[B3]

https://williameggersmotorcycles.com/2013/05/14/1790-celerifere-replica/#jp-carousel-700

[B4]

https://ageofrevolution.org/200-object/velocipede/

[B5]

http://www.themotorcyclebook.com/Resources/Gompertz%20hand%20pedal.png

[B6]

https://alchetron.com/Kirkpatrick-Macmillan

[B7]

https://onlinebicyclemuseum.co.uk/1871-james-starley-ariel-replica-of-the-first-penny-farthing/

[B8]

https://en.wikipedia.org/wiki/John_Kemp_Starley#/media/File:1886_Starley_'Rover'_Safety_Cycle_British_Motor_Museum_09-2016_(29928044262).jpg

[B9]

https://www.theproscloset.com/blogs/news/do-you-need-an-aero-road-bike

[B10]

https://blog.silca.cc/part-5-tire-pressure-and-aerodynamics

[B11]

https://www.gravelcyclist.com/bicycle-tech/the-hookless-bead-rim-how-it-works-who-theyre-for-by-enve-composites/

[B12]

https://www.lightbicycle.com/newsletter/hooked-vs-hookless-bead-type-explained.html

B[13]

https://www.bikeradar.com/features/trail-tech-off-the-hook/?image=3&type=gallery&gallery=1&embedded_slideshow=1

[B14]

https://www.mbr.co.uk/news/mavic-quest-xa-carbon-wheelset-revealed-342483

[B15]

https://twitter.com/nereashub

[B16]

https://amfg.ai/2019/02/12/fdm-3d-printing-asa-petg-pc-filaments-compared/

[B17]

https://blog.axsysdental.com/terms-dental-technicians-should-know/