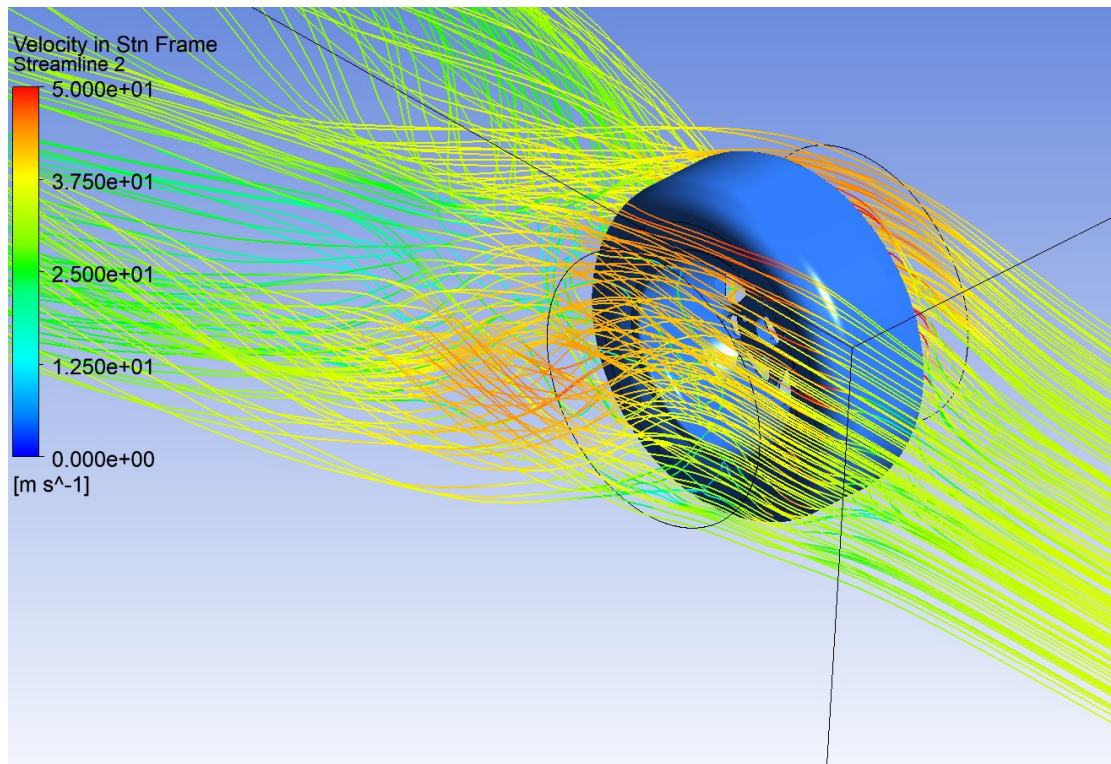




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ & ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ (TurboLab-TUC)

Προσομοίωση της ροής γύρω από περιστρεφόμενο τροχό οχήματος Formula Student

ΦΟΥΚΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ
A.M.: 2017010148



Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός, Καθηγητής

Χανιά, 9-2-2024



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΡΟΒΙΛΟΜΗΧΑΝΩΝ & ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ (TurboLab-TUC)

Προσομοίωση της ροής γύρω από περιστρεφόμενο τροχό οχήματος Formula Student

Διπλωματική Εργασία

ΤΟΥ

Φούκη Θεόδωρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την
(Υπογραφή) (Υπογραφή) (Υπογραφή)

.....
Νικολός Ιωάννης

.....
Δελής Ανάργυρος

.....
Αραμπατζής Γεώργιος

(Υπογραφή)

.....
Φούκης Θεόδωρος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας ολοκληρώνεται και ο κύκλος των προπτυχιακών σπουδών μου στη Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Δράττοντας της ευκαιρίας αυτής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Νικολό Ιωάννη για την εποπτεία της διπλωματικής εργασίας, την καθοδήγησή του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε.

Τέλος, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, στους φίλους και συναδέλφους μου, εντός και εκτός της Πολυτεχνειακής Κοινότητας, όπου ο κάθε ένας με τον δικό του μοναδικό τρόπο με στήριξε και συνέβαλε στην επίτευξη του στόχου μου και ήταν παρών όποτε χρειαζόταν.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΟΧΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	21
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ CAD	21
2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΖΑΝΤΑΣ ΤΡΟΧΟΥ	22
2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΓΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ - ΖΑΝΤΑΣ.....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο : ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS CFX	89
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ANSYS CFX	89
3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΓΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CATIA V5	89
3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΤΟ ANSYS CFX	106
3.4 ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΣΤΟ ANSYS CFX	111
3.5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΤΟ ANSYS CFX	124
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	146

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός του τροχού ενός αγωνιστικού οχήματος σε λογισμικό CAD, καθώς και η μελέτη της ροής γύρω από αυτόν, κατά την περιστροφή του. Στην εργασία αποτυπώνεται σε πρώτη φάση, ολόκληρη η διαδικασία της σχεδίασης των μελών από τα οποία αποτελείται ο τροχός, σχεδίαση η οποία επιτελείται με τη χρήση του λογισμικού CATIA V5R20. Σε δεύτερη φάση, υλοποιείται η ρευστομηχανική ανάλυση της ροής γύρω από τον περιστρεφόμενο τροχό, η οποία επιτυγχάνεται μέσω του λογισμικού ANSYS CFX. Ειδικότερα, η εργασία δομείται σε τρία βασικά μέρη, που περιγράφονται ακολούθως.

Αρχικά, στο πρώτο μέρος παρουσιάζονται επιστημονικές δημοσιεύσεις της ανοιχτής βιβλιογραφίας, οι οποίες εξετάζουν είτε με άμεσο είτε με έμμεσο τρόπο το θέμα το οποίο πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας προσανατολίζεται στην συνολική διαδικασία σχεδίασης του τροχού, με αφετηρία ωστόσο την αναφορά στην σχεδίαση προϊόντων με τη χρήση υπολογιστή σε CAD (Computer – Aided Design) λογισμικά.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος της εργασίας, υλοποιείται η μελέτη της ροής γύρω από τον περιστρεφόμενο τροχό στο λογισμικό ANSYS CFX, όπου μέσω της οπτικοποίησης των διαφόρων μεγεθών μπορούν να εξαχθούν για τον τροχό συμπεράσματα σχετικά με τη ρευστομηχανική του συμπεριφορά.

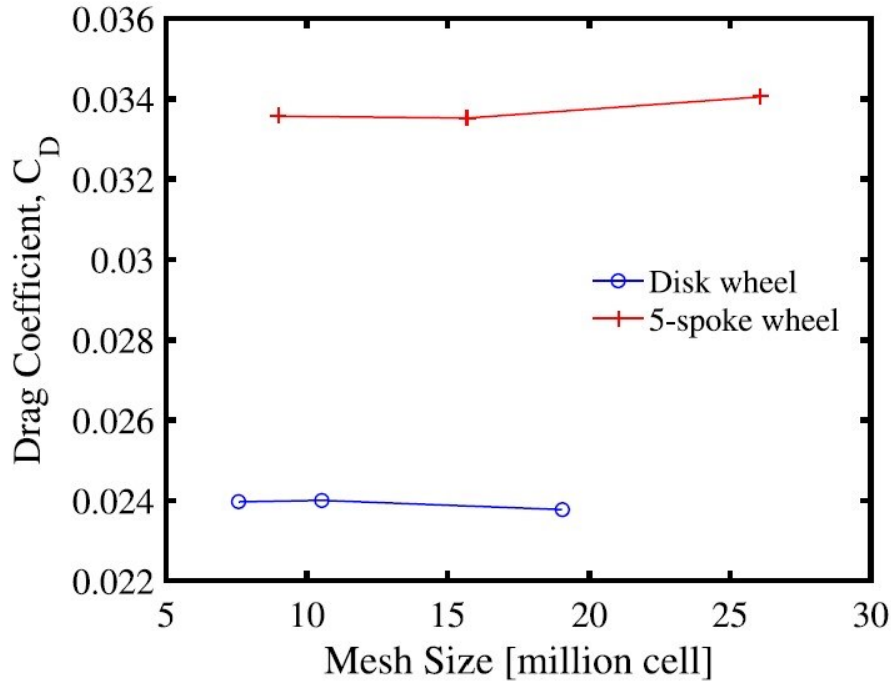
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η χρήση της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD - Computational Fluid Dynamics) στο τομέα της μηχανολογίας και ειδικότερα στην αυτοκινητοβιομηχανία, διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο τα τελευταία χρόνια. Οι αναλύσεις και οι μελέτες που διεξάγονται μέσω αντίστοιχων υπολογιστικών εργαλείων και μεθόδων, δύνανται να βελτιστοποιήσουν τον σχεδιασμό προϊόντων, ενώ ακολούθως βελτιστοποιούν σφαιρικά την απόδοσή τους σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Όσον αφορά στους τροχούς αγωνιστικών αλλά και γενικότερα των οχημάτων εδάφους, υπάρχουν έρευνες στη δημοσιευμένη βιβλιογραφία, οι οποίες μέσω πειραματικής αλλά και ψηφιακής προσέγγισης μοντέλων περιστρεφόμενων τροχών, παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών που οφείλουν να διέπουν την εκάστοτε χρήση τους. Στη περίπτωση των αγωνιστικών οχημάτων, ύψιστης σημασίας είναι η εφαρμογή μικρών συντελεστών αντίστασης, συγκεκριμένων κατανομών επιφανειακής πίεσης στους εν λόγω τροχούς, κ.λπ..

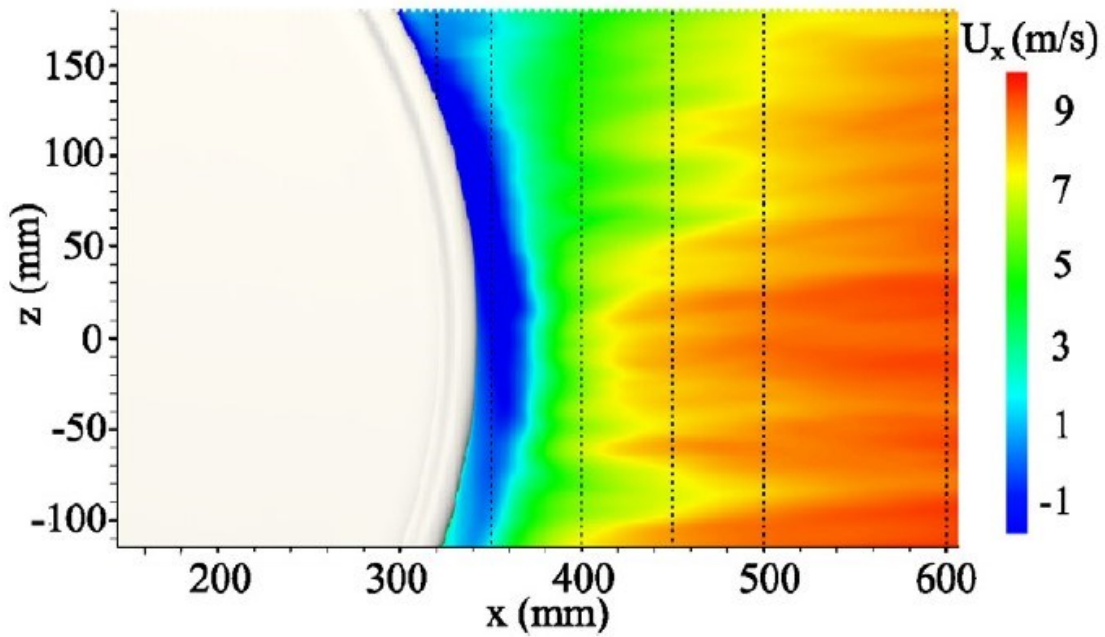
Οι (Yi et al., 2022) στρεφόμενοι στον τομέα της ποδηλάτησης, εφάρμοσαν πειραματικές αλλά και ψηφιακές προσεγγίσεις σε δύο τύπους τροχών. Οι πειραματικές προσεγγίσεις διαδραματίστηκαν σε ένα ειδικά διαμορφωμένο διάδρομο εδάφους, ενώ οι ψηφιακές προσομοιώσεις έγιναν με τη χρήση του λογισμικού ANSYS. Μελέτησαν έναν τροχό τύπου δισκίου και έναν πέντε ακτινών, όπου επιχείρησαν να περιγράψουν την αεροδυναμική συμπεριφορά που επιδεικνύουν, κατόπιν επιβολής τους σε προκαθορισμένες φυσικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές, αφορούσαν μεταβολές στη ταχύτητα της ροής του ρευστού (αέρας), στη γωνιακή περιστροφή του εκάστοτε τροχού και στη γωνία εκτροπής του τροχού.

Όσον αφορά στις εφαρμοσμένες οριακές συνθήκες της προσομοίωσης, για τον τροχό πέντε ακτινών διακρίνεται οριακή συνθήκη περιστρεφόμενου τοίχου στο λάστιχο του τροχού, ενώ για τον τροχό τύπου δισκίου επιλέγεται οριακή συνθήκη περιστρεφόμενου τοίχου σε ολόκληρο τον τροχό. Επιπροσθέτως, και για τους δύο τύπους τροχών, η ταχύτητα της εδαφικής στήριξης είναι ίση σε μέτρο με την ταχύτητα ροής του ρευστού (αέρας), αντιστοίχως, σημειώνοντας επίσης ότι παρατηρείται πλήρως ανεπτυγμένο το εκάστοτε προφίλ της περιβάλλουσας πίεσης στις συνοριακές επιφάνειες μελέτης των προαναφερθέντων προσομοιώσεων.

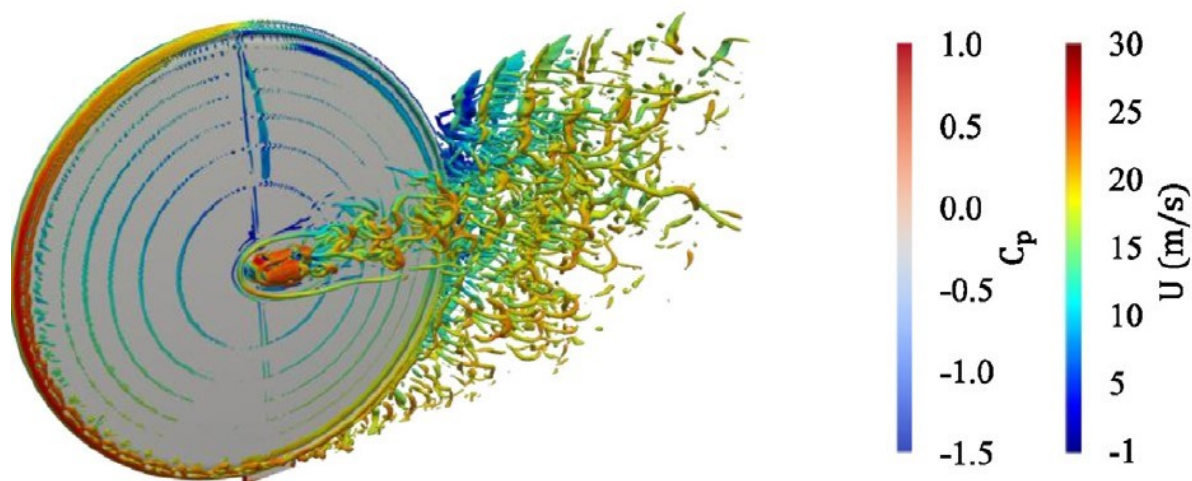
Παρακάτω παρουσιάζονται γραφήματα και απεικονίσεις, που απορρέουν από την παραπάνω μελέτη. Στην **Εικόνα 1.1** παρουσιάζεται ο συντελεστής αντιστάσεως του εκάστοτε τροχού, συναρτήσει του μεγέθους του πλέγματος, όπου παρατηρείται αντιστρόφως ανάλογη συμπεριφορά των δύο τροχών με αύξηση του μεγέθους του πλέγματος. Στην **Εικόνα 1.2** αναδεικνύεται η χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) στον άξονα x (σε mm) του τροχού τύπου δισκίου, στην περιφέρειά του, με τις χαμηλότερες τιμές της ταχύτητας να εμφανίζονται στη ζώνη του ομόρρου, πίσω από το ελαστικό. Επιπλέον, στην **Εικόνα 1.3** προβάλλεται εκτός της χρωματικής κατανομής της ταχύτητας της ροής του ρευστού, ο συντελεστής της επιφανειακής πίεσης του τροχού τύπου δισκίου, στη περιφέρειά του.



Εικόνα 1.1: Συντελεστής αντιστάσεως του εκάστοτε τροχού, συναρτήσει του μεγέθους πλέγματος (αντιστρόφως ανάλογη συμπεριφορά των δύο ελαστικών με αύξηση του μεγέθους του πλέγματος) (Yi et al., 2022).



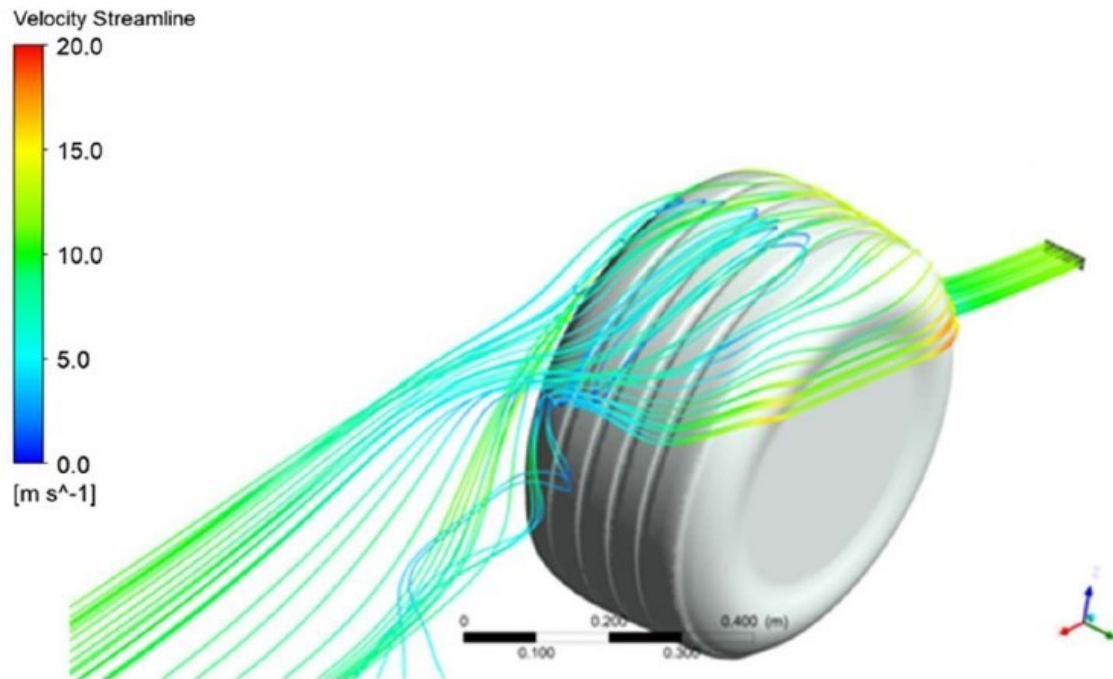
Εικόνα 1.2: Χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρα) στον άξονα x (σε mm) του τροχού τύπου δισκίου, στη περιφέρειά του (χαμηλότερες τιμές ταχύτητας παρουσιάζονται στη ζώνη του ομόρρου, πίσω από το ελαστικό) (Yi et al., 2022).



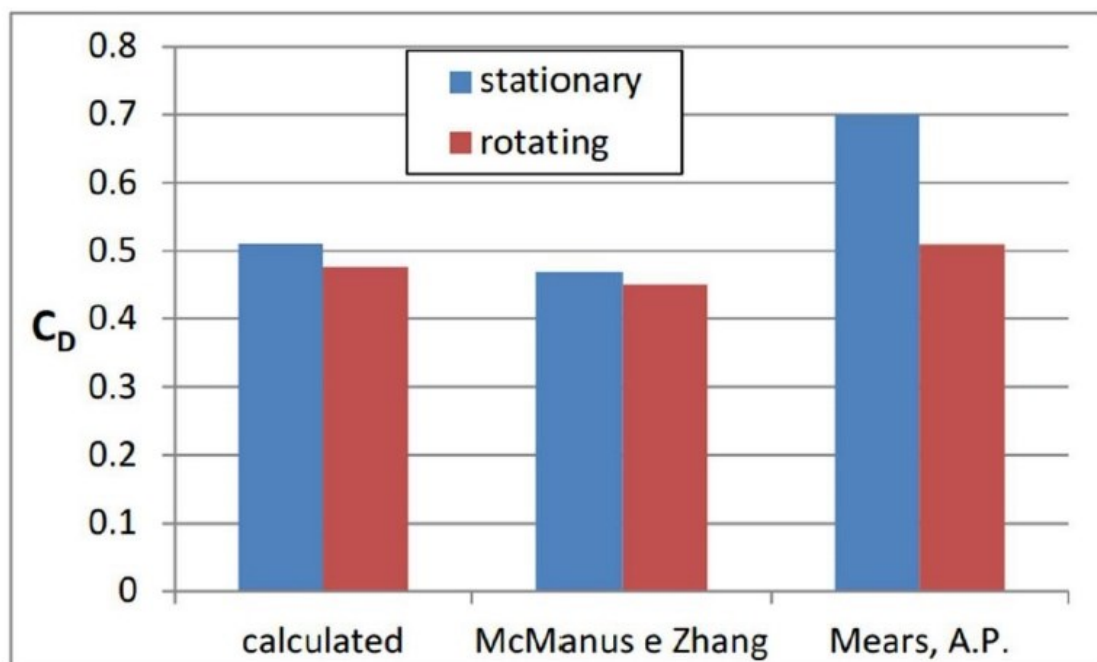
Εικόνα 1.3: Χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού και του συντελεστή της επιφανειακής πίεσης του τροχού τύπου δισκίου, στη περιφέρειά του (Yi et al., 2022).

Οι (Cravero et al., 2022), με απώτερο στόχο την ανακάλυψη μεθόδων βελτιστοποίησης της αεροδυναμικής απόδοσης ενός αγωνιστικού οχήματος, και σε κοινή βάση (πειράματα και προσομοιώσεις) με τους προαναφερθέντες, μελέτησαν την αεροδυναμική συμπεριφορά ενός εκ των τροχών σε σταθερές αλλά και χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες ροής, καθώς επίσης την αεροδυναμική συσχέτιση μεταξύ του τροχού και του εμπρόσθιου φτερού του οχήματος. Σημειώνεται ακολούθως σε αυτό το σημείο η εφαρμοσμένη οριακή συνθήκη περιστρεφόμενου τοίχου, με την ταχύτητα της εδαφικής στήριξης του ελαστικού να είναι ίση σε μέτρο με την ταχύτητα ροής του κυκλοφορούντος ρευστού (αέρας) (αντίθετη από τη φορά κίνησης του οχήματος).

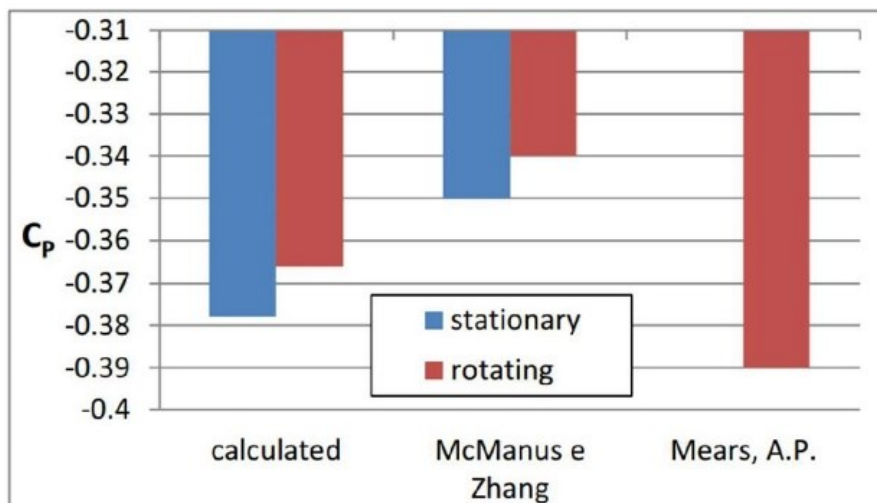
Στη συνέχεια παρατίθενται γραφήματα και απεικονίσεις, σχετιζόμενα με την αεροδυναμική συμπεριφορά ενός εκ των τροχών, με έμφαση στην περιστροφική του κατάσταση. Στην **Εικόνα 1.4** παρουσιάζεται η χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) περιφερειακά του τροχού και σε περιοχές γύρω του. Στην **Εικόνα 1.5** αναδεικνύεται ένα γράφημα των τιμών του συντελεστή αντίστασης του τροχού, εφαρμόζοντας τη RANS μέθοδο από τον (Mears, 2004) και την unsteady RANS μέθοδο από τους (McManus and Zhang, 2006), στο οποίο παρατηρούνται σχετικά παρόμοια αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, στην **Εικόνα 1.6** προβάλλεται ένα γράφημα των τιμών του συντελεστή της επιφανειακής πίεσης του τροχού, όπως προκύπτει από την προτεινόμενη μεθοδολογία, εφαρμόζοντας τη RANS μέθοδο από τον (Mears, 2004) και την unsteady RANS μέθοδο από τους (McManus and Zhang, 2006), στο οποίο διακρίνονται σημαντικές διαφορές στις τιμές, με τη μέγιστη να παρουσιάζεται στη προσομοίωση του (Mears, 2004) και την ελάχιστη στη προσομοίωση των (McManus and Zhang, 2006).



Εικόνα 1.4: Χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) περιφερειακά του τροχού και σε περιοχές γύρω του (Cravero et al., 2022).



Εικόνα 1.5: Τιμές του συντελεστή αντίστασης του τροχού, όπως προκύπτει από τον προτεινόμενο υπολογισμό, εφαρμόζοντας τη RANS μέθοδο από τον (Mears, 2004) και την unsteady RANS μέθοδο από τους (McManus and Zhang, 2006), (Cravero et al., 2022).

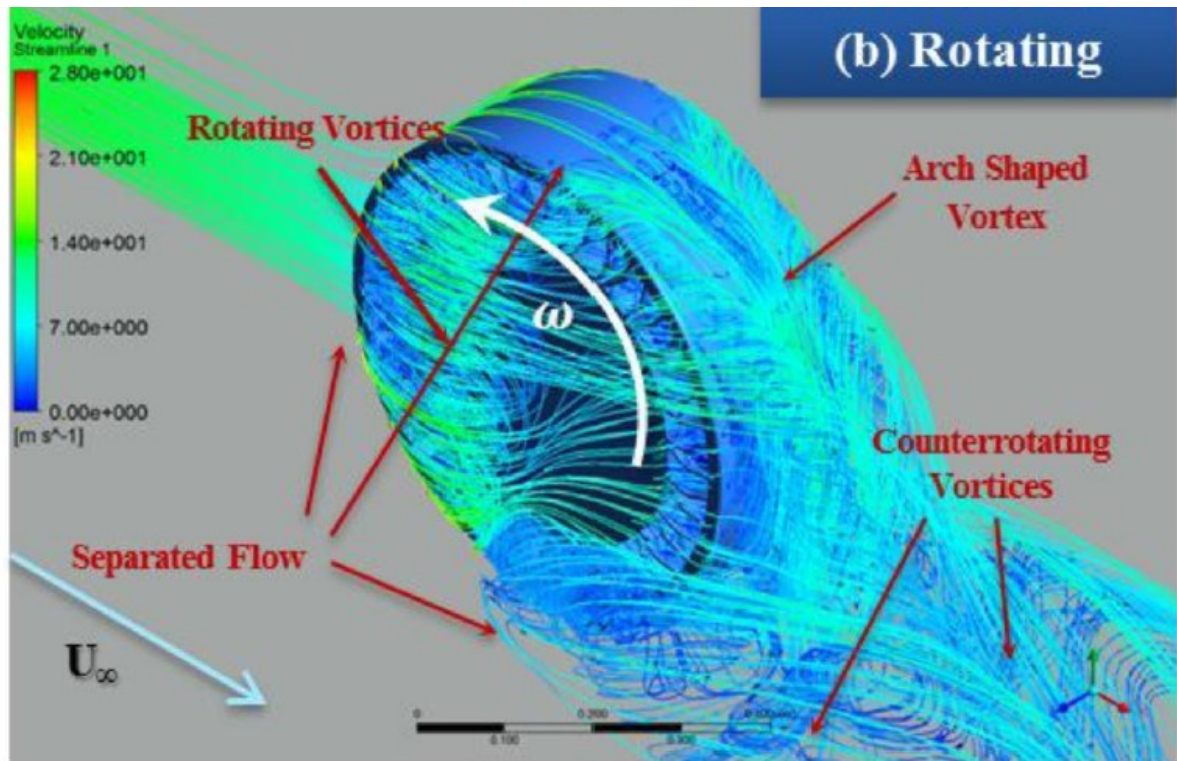


Εικόνα 1.6: Τιμές του συντελεστή της επιφανειακής πίεσης του τροχού, όπως προκύπτει από τον προτεινόμενο υπολογισμό, εφαρμόζοντας τη RANS μέθοδο από τον (Mears, 2004) και την unsteady RANS μέθοδο από τους (McManus and Zhang, 2006) (Σημαντικές διαφορές στις τιμές, με τη μέγιστη να παρουσιάζεται στη προσομοίωση του (Mears, 2004) και την ελάχιστη στη προσομοίωση των (McManus and Zhang, 2006), (Cravero et al., 2022).

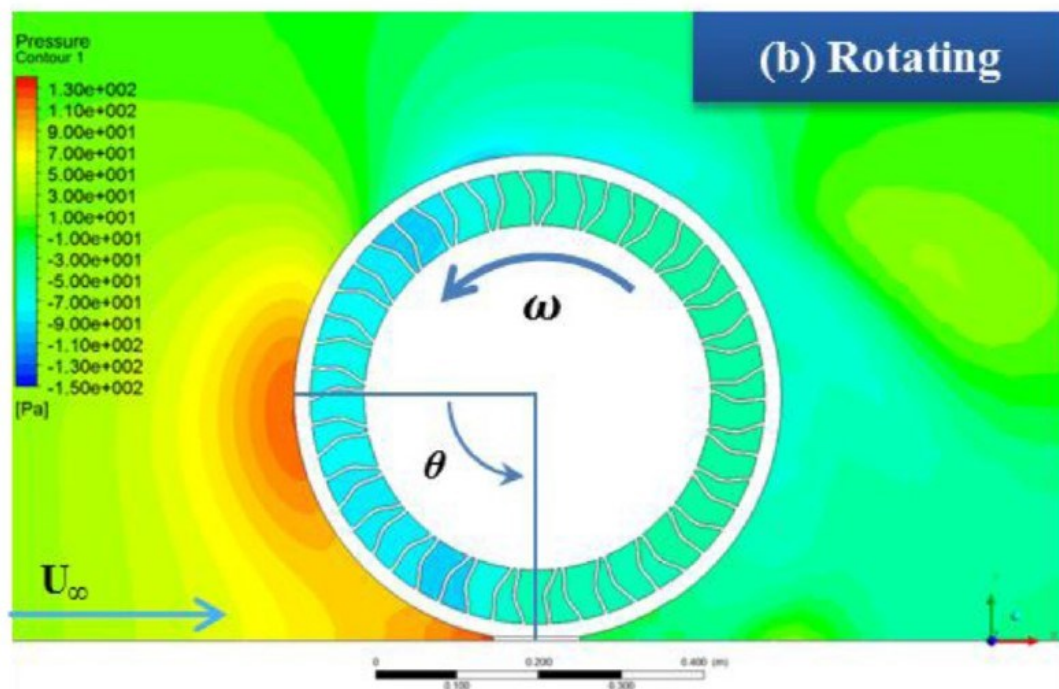
Από την πλευρά τους οι (Heo et al., 2014), με προσανατολισμένο το ενδιαφέρον στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμων των οχημάτων εδάφους, γεγονός που συνδέεται άμεσα με τη μείωση του συντελεστή αντίστασης του εκάστοτε τροχού, μελέτησαν την αεροδυναμική συμπεριφορά ενός μη πεπιεσμένου ελαστικού σε προσομοιωμένο περιβάλλον. Η μελέτη, διεξήχθη εφαρμόζοντας την RANS τεχνική και εξετάζοντας τον τροχό σε στατική και περιστροφική κατάσταση, αντιστοίχως. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι δίνεται έμφαση στη περιστροφική κατάσταση του ελαστικού.

Σχετικά με τις οριακές συνθήκες εφαρμογής της προσομοίωσης, γίνεται όπως προηγουμένως χρήση της συνθήκης περιστρεφόμενου τοίχου στην επιφάνεια του ελαστικού, με το μέτρο της ταχύτητά της ίσο με 14 m/s.

Ακολούθως παρουσιάζονται ένας πίνακας, καθώς και απεικονίσεις της αεροδυναμικής συμπεριφοράς του ελαστικού. Στην **Εικόνα 1.7** παρουσιάζεται η χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) γύρω από τον τροχό, σε περιστροφική κατάσταση. Στην **Εικόνα 1.8** προβάλλεται η χρωματική κατανομή της επιφανειακής πίεσης γύρω από τον τροχό, σε περιστροφική κατάσταση, όπου στις κόκκινες ζώνες, στο εμπρόσθιο και κατώτερο τμήμα του τροχού εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές της επιφανειακής πίεσης. Ενώ στην **Εικόνα 1.9** διακρίνεται ένας πίνακας μεταβολής των συντελεστών αντίστασης και άνωσης του τροχού σε στατική και περιστροφική κατάσταση, συναρτήσει του μεγέθους το υπολογιστικού πλέγματος της προσομοίωσης.



Εικόνα 1.7: Χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) γύρω από τον τροχό, σε περιστροφική κατάσταση (Heo et al., 2014).



Εικόνα 1.8: Χρωματική κατανομή της επιφανειακής πίεσης γύρω από τον τροχό, σε περιστροφική κατάσταση (στις κόκκινες ζώνες, στο εμπρόσθιο και κατώτερο τμήμα του τροχού εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές της επιφανειακής πίεσης) (Heo et al., 2014).

<i>Model (Grid Resolution)</i>	<i>Stationary</i>		<i>Rotating</i>	
	C_D	C_L	C_D	C_L
<i>Pneumatic Tire [4,5]</i>	0.707	0.630	0.602	0.476
<i>NPT (Fine)</i>	0.868	0.618	0.774	0.513
<i>NPT (Medium)</i>	0.839	0.615	0.730	0.490
<i>NPT (Coarse)</i>	0.856	0.606	0.761	0.505

Εικόνα 1.9: Πίνακας μεταβολής των συντελεστών αντίστασης και άνωσης του τροχού σε στατική και περιστροφική κατάσταση, συναρτήσει της μεγέθους του υπολογιστικού πλέγματος της προσομοίωσης (Heo et al., 2014).

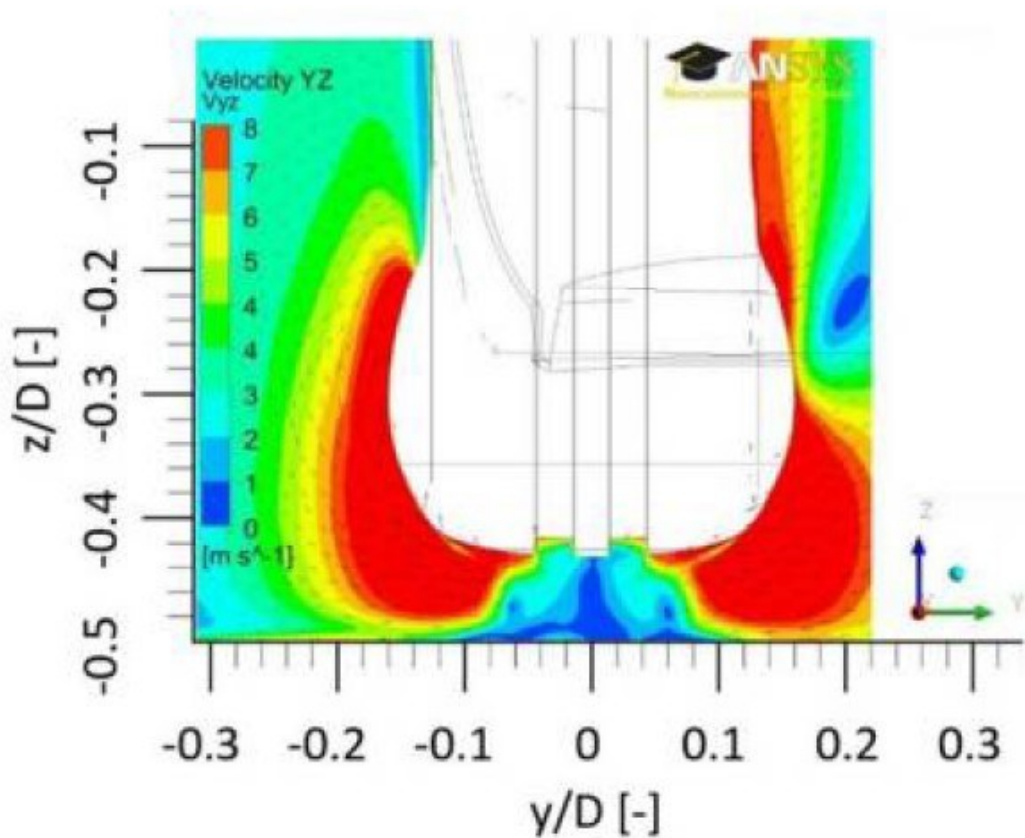
Αναφορικά με τους (Kulak et al., 2018), θέτοντας ως πρακτικούς στόχους την μείωση της κατανάλωσης καυσίμων των οχημάτων εδάφους, καθώς επίσης την μείωση των εκπομπών CO₂, σε άρρηκτη σύνδεση με τη συνολική ελάττωση της αεροδυναμικής αντίστασης του οχήματος, επιδόθηκαν στην μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς ενός ελαστικού. Έλαβαν δύο τύπους ελαστικού (λείο και αυλακωτό), όπου αρχικά μεμονωμένα εξέτασαν αεροδυναμικά τον τροχό σε περιστροφική κατάσταση, και ύστερα το ανέλυσαν συνολικά μαζί με το σύστημα ανάρτησης. Οι παραπάνω μελέτες έγιναν σε πειραματικό επίπεδο, αλλά και σε περιβάλλον προσομοίωσης, στο λογισμικό ANSYS. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα διασταυρώθηκαν μεταξύ τους.

Όσον αφορά στην επιβαλλόμενη οριακή συνθήκη στην εν λόγω προσομοίωση, χρησιμοποιήθηκε συνθήκη περιστρεφόμενου τοίχου, με τη ταχύτητα της εδαφικής στήριξης του ελαστικού να είναι ίση σε μέτρο με του κυκλοφορούντος ρευστού (αέρας). Σε επέκταση της προηγούμενης συνθήκης, αναφέρεται το προφίλ της επιφανειακής πίεσης στη συνοριακή επιφάνεια εξόδου του ρευστού στη συγκεκριμένη προσομοίωση, να είναι ορισμένο στα 101.325 Pa.

Στην **Εικόνα 1.10** παρουσιάζεται ένας πίνακας τιμών του συντελεστή αντίστασης, από πειραματική εφαρμογή και από το προσομοιωμένο περιβάλλον, για το 1° (αυλακωτό) και το 2° (λείο) τύπο ελαστικού. Ενώ στην **Εικόνα 1.11** προβάλλεται η χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) γύρω από το αυλακωτό ελαστικό.

	CFD isolated wheel (Fackrell geometry) (Leśniewicz et al., 2014)		CFD mock-up (S2A geometry)	EXP mock-up (S2A geometry)
Tyre	SCx	ΔSCx	ΔSCx	ΔSCx
W1	0.041	-0.002	-0.003	-0.002
W2	0.043	/	/	/

Εικόνα 1.10: Πίνακας τιμών του συντελεστή αντίστασης από πειραματική εφαρμογή και από το προσομοιωμένο περιβάλλον, για το 1^ο (αυλακωτό) και το 2^ο (λείο) τύπο ελαστικού (Kulak et al., 2018).



Εικόνα 1.11: Χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) γύρω από το αυλακωτό ελαστικό (Kulak et al., 2018).

Από τη μεριά τους, οι (Malizia et al., 2021), κινούμενοι σε παρόμοια κατεύθυνση με ορισμένους προαναφερθέντες μελετητές, και προβάλλοντας ως υπέρτατο στόχο τη βελτιστοποίηση της αγωνιστικής επίδοσης ενός ποδηλάτη αγώνων, μέσω της επινόησης

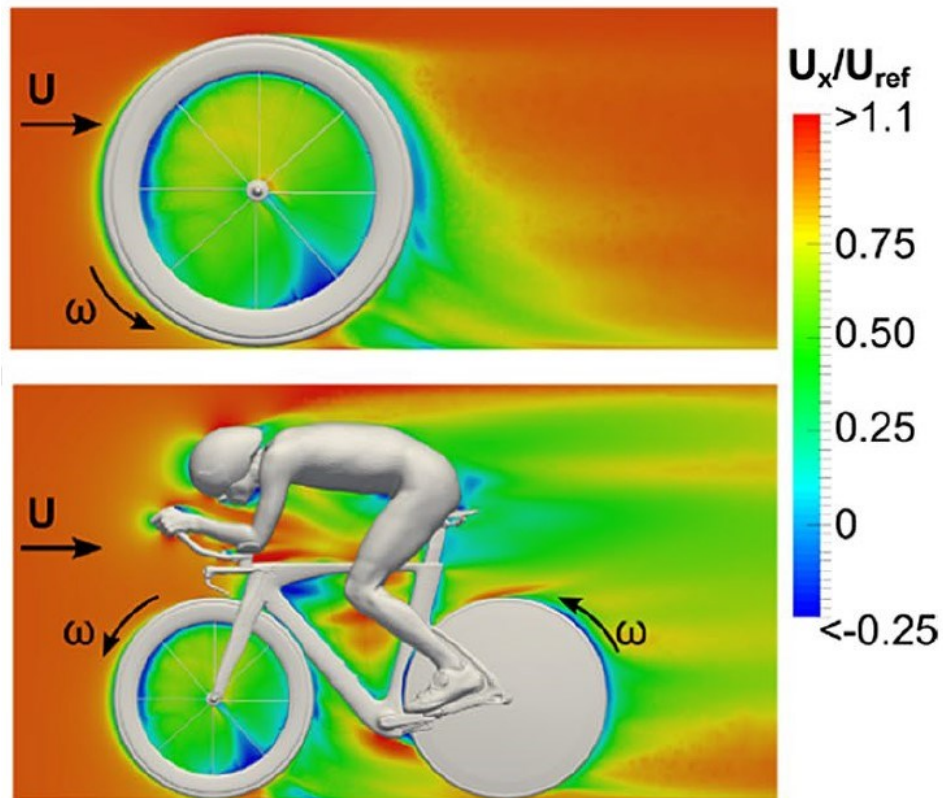
μεθόδων μείωσης της αεροδυναμικής αντίστασης, απομόνωσαν και μελέτησαν αεροδυναμικά σε πρώτη φάση έναν τροχό ποδηλάτου, και σε επόμενη φάση συνολικά το σύστημα δικυκλιστής - ποδήλατο. Η μελέτη, έλαβε χαρακτήρα πειράματος αλλά και προσομοίωσης, με τα αντίστοιχα αποτελέσματα να συγκρίνονται μεταξύ τους.

Σχετικά με τις επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο κομμάτι της προσομοίωσης και με πλήρη αναφορά στο απομονωμένο ελαστικό, αναφέρεται η επιβολή της συνθήκης περιστρεφόμενου τοίχου στην επιφάνεια του τροχού και ταχύτητας ολίσθησης στο έδαφος, ίση σε μέτρο με την ταχύτητα της ροής του ρευστού (αέρας).

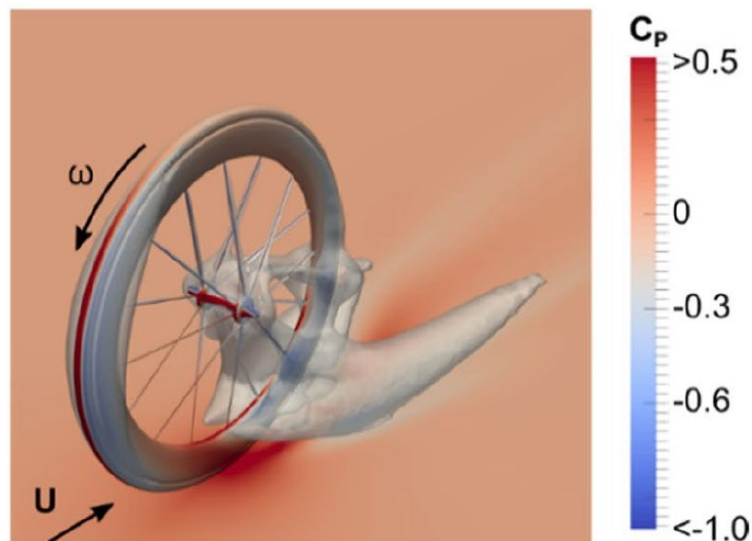
Σε κοινή ακολουθία, παρουσιάζονται παρακάτω ένας πίνακας και απεικονίσεις μερικών ενδεικτικών αποτελεσμάτων της παραπάνω μελέτης. Στην **Εικόνα 1.12** παρουσιάζεται πίνακας τιμών του συντελεστή αντίστασης επί την αντίστοιχη επιφάνεια και του συντελεστή ροπής επί την αντίστοιχη επιφάνεια του τροχού του ποδηλάτου, σε καταστάσεις στατικότητας και περιστροφής, αντίστοιχα. Στην **Εικόνα 1.13** αναδεικνύονται χρωματικές κατανομές, αρχικά της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) στον άξονα x, κανονικοποιημένη με βάση την ταχύτητα αναφοράς στο κεντρικό επίπεδο του τροχού, γύρω από το ελαστικό σε περιστροφική κατάσταση, και εν συνεχεία η αντιστοιχία για το συνολικό σύστημα δικυκλιστής - ποδήλατο. Τέλος, στην **Εικόνα 1.14** προβάλλεται η χρωματική κατανομή του συντελεστή της επιφανειακής πίεσης του ρευστού (αέρας) γύρω από τον τροχό σε περιστροφική κατάσταση.

Isolated wheel	$C_D A$ (m ²)				$C_M A$ (m ²)	Sum (m ²)
	Tire and rim	Spokes	Hub	Total	Total	
Static	0.00612	0.00150	0.00196	0.00958	-	0.00958
Rotating	0.00568	0.00163	0.00206	0.00937	0.00394	0.01331

Εικόνα 1.12: Πίνακας τιμών του συντελεστή αντίστασης επί την αντίστοιχη επιφάνεια και του συντελεστή ροπής επί την αντίστοιχη επιφάνεια του τροχού του ποδηλάτου σε καταστάσεις στατικότητας και περιστροφής, αντίστοιχα (Malizia et al., 2021).



Εικόνα 1.13: Χρωματικές κατανομές, άνω, της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) στον άξονα x , κανονικοποιημένη με βάση την ταχύτητα αναφοράς στο κεντρικό επίπεδο του τροχού, γύρω από τον τροχό σε περιστροφική κατάσταση, και κάτω της αντίστοιχης απεικόνισης για το συνολικό σύστημα δικυκλιστής - ποδήλατο (Malizia et al., 2021).



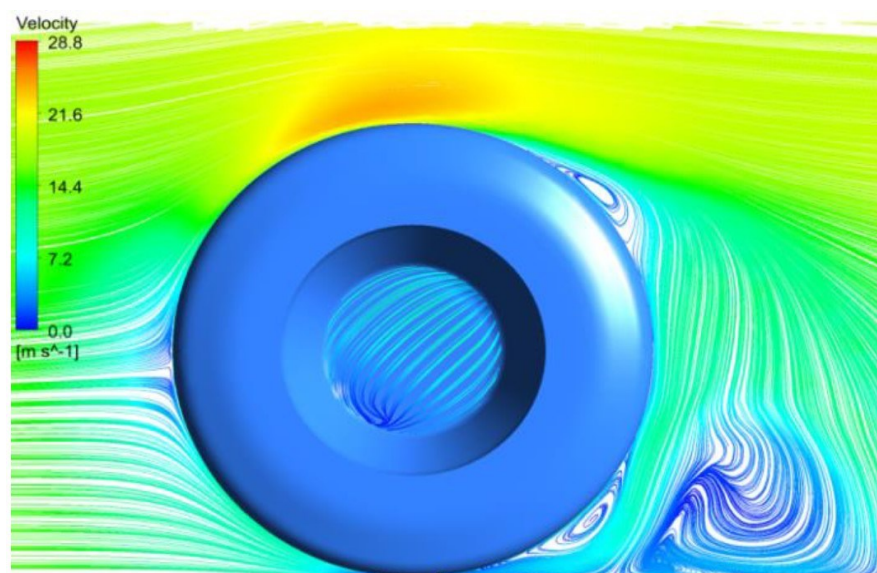
Εικόνα 1.14: Χρωματική κατανομή του συντελεστή της επιφανειακής πίεσης του ρευστού (αέρας) γύρω από τον τροχό, σε περιστροφική κατάσταση (Malizia et al., 2021).

Οι (Rasani et al., 2018) ασχολήθηκαν σε πρώτο στάδιο με την αεροδυναμική μελέτη ενός τροχού οχήματος εδάφους και σε δεύτερο στάδιο, με την αεροδυναμική συμπεριφορά που επιδεικνύουν μαζί δύο διαδοχικοί τροχοί, γεγονός το οποίο δεν είχε διερευνηθεί σε

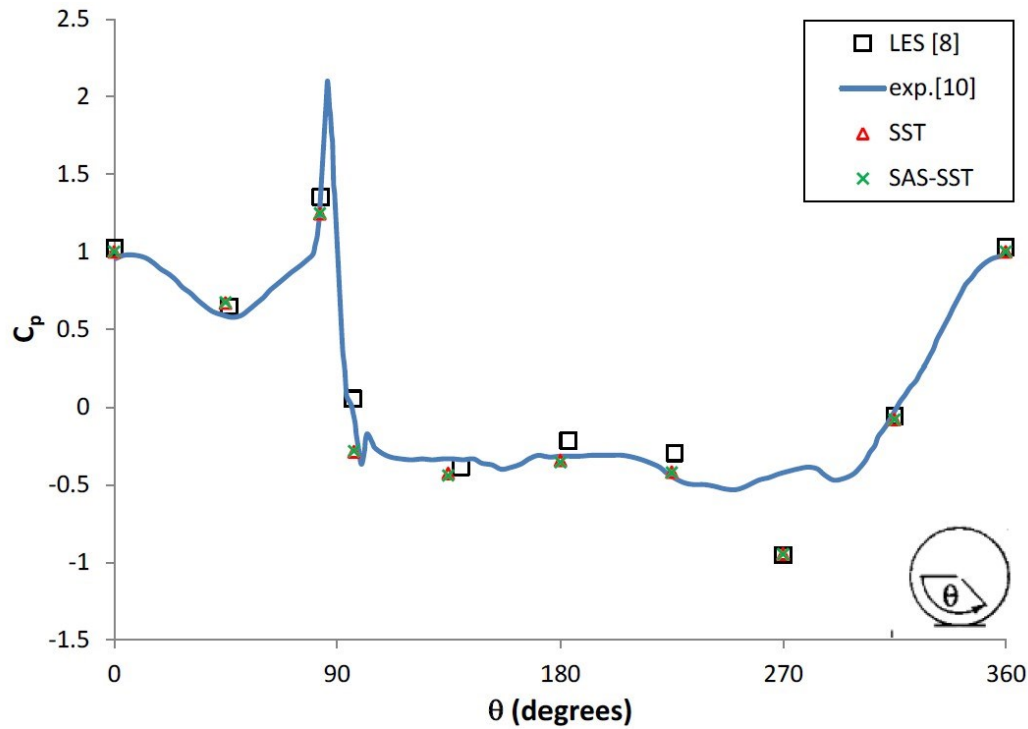
βάθος μέχρι εκείνη τη χρονική περίοδο. Η παραπάνω έρευνα διεξήχθη σε περιβάλλον προσομοίωσης, με τα αποτελέσματα να συγκρίνονται μεταξύ τους, αλλά και με δεδομένα πειραματικά, τα οποία ελήφθησαν από σχετική επιστημονική δημοσίευση (Fackrell and Harvey, 1975). Στόχοι τους η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμων, η μείωση της εκπομπής ρύπων και η οδηγική άνεση των οχημάτων, μέσω της βελτιστοποίησης της αεροδυναμικής επίδοσής τους.

Όσον αφορά στις επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στην εκάστοτε προσομοίωση, αρχικά εφαρμόζεται η συνθήκη περιστρεφόμενου τείχους, με την ταχύτητα της εδαφικής στήριξης των ελαστικών να είναι ίση σε μέτρο και αντίρροπη της ταχύτητας κίνησης του οχήματος. Εν συνεχεία, επιβάλλονται, μια οριακή συνθήκη ελευθέρας ολίσθησης του ρευστού (αέρας) στην ανώτερη συνοριακή επιφάνεια, καθώς επίσης μια συμμετρική οριακή συνθήκη στα πλευρικά τοιχώματά της. Τέλος, καθορίζεται μηδενική (σχετική) πίεση του ρευστού (αέρας) στην εξωτερική συνοριακή επιφάνεια.

Εστιάζοντας σε αυτό το σημείο, στην μεμονωμένη αεροδυναμική μελέτη ενός μόνο ελαστικού, παρατίθενται ακολούθως χαρακτηριστικά αποτελέσματα. Στην **Εικόνα 1.15** παρουσιάζεται μια χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) γύρω από το ελαστικό, σε περιστροφική κατάσταση. Στην **Εικόνα 1.16** προβάλλεται ένα γράφημα τιμών του συντελεστή επιφανειακής πίεσης γύρω από το ελαστικό σε περιστροφική κατάσταση, συναρτήσει της γωνίας εκτροπής του, με βάση τα εφαρμοσμένα μοντέλα προσομοίωσης και την πειραματική εφαρμογή των (Fackrell and Hrvey, 1975). Στην **Εικόνα 1.17** αναδεικνύεται ένας πίνακας με τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης του ελαστικού σε περιστροφική κατάσταση, με βάση τα εφαρμοσμένα μοντέλα προσομοίωσης και την πειραματική εφαρμογή των (Fackrell, and Harvey, 1975).



Εικόνα 1.15: Χρωματική κατανομή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) γύρω από το ελαστικό, σε περιστροφική κατάσταση (Rasani et al., 2018).



Εικόνα .116: Γράφημα τιμών του συντελεστή επιφανειακής πίεσης γύρω από το ελαστικό σε περιστροφική κατάσταση, συναρτήσει της γωνίας εκτροπής του, με βάση τα εφαρμοσμένα μοντέλα προσομοίωσης και την πειραματική εφαρμογή των (Fackrell and Harvey, 1975), (Rasani et al., 2018).

Case	C_L	C_D
Present model (SST)	0.37	0.53
Present model (SAS-SST)	0.38	0.54
S-A [5]	0.15	0.47
RKE [5]	0.16	0.43
Experiment [10]	0.28	0.51

Εικόνα 1.17: Πίνακας με τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης του ελαστικού σε περιστροφική κατάσταση, με βάση τα εφαρμοσμένα μοντέλα προσομοίωσης και την πειραματική εφαρμογή των (Fackrell and Harvey, 1975), (Rasani et al., 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΟΧΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ CAD

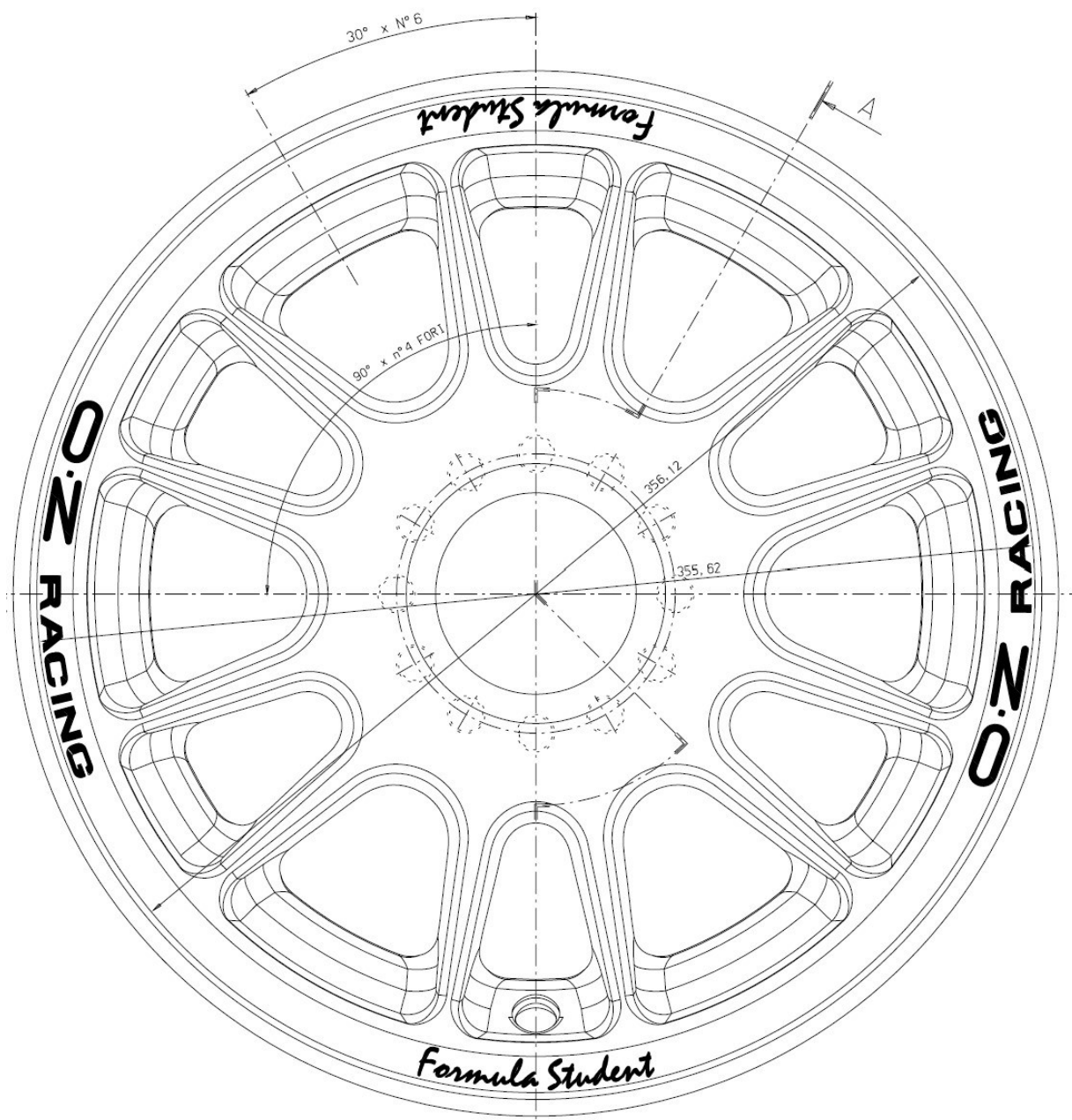
Τα λογισμικά CAD (Computer – Aided Design) είναι εργαλεία που παρέχουν τη δυνατότητα σχεδίασης, τροποποίησης, ανάλυσης, βελτιστοποίησης και γενικότερα προγραμματισμού των παραγωγικών διαδικασιών ενός προϊόντος (Bilalis et al., 2020). Η ανάγκη δημιουργίας αλλά και ευρείας εφαρμογής τους τα τελευταία χρόνια οφείλεται στο γεγονός ότι ελαχιστοποιείται ο χρόνος εργασίας σε σύγκριση με τη συμβατική χειρωνακτική εναπόθεση στο χαρτί, καθώς επίσης βελτιστοποιείται ταυτόχρονα η ποιότητα σχεδιασμού ενός προϊόντος, μέσω των εργαλείων που παρέχει η σχεδίαση σε ένα λογισμικό Η/Υ. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπάρχουν πολλά λογισμικά στη σημερινή αγορά, τα οποία διαθέτουν CAD εργαλεία, τα οποία σε συνδυασμό με άλλα παρεχόμενα εργαλεία, όπως το CAM (Computer – Aided Manufacturing) και το CAE (Computer – Aided Engineering), ολοκληρώνουν τη διαχείριση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε ορισμένα από αυτά:

- CATIA (Dassault Systems)
- SolidWorks (Dassault Systems)
- Fusion 360 (Autodesk)
- ArchiCAD (Graphisoft)
- Inventor (Autodesk)
- Solid Edge (Siemens)
- Revit (Autodesk)

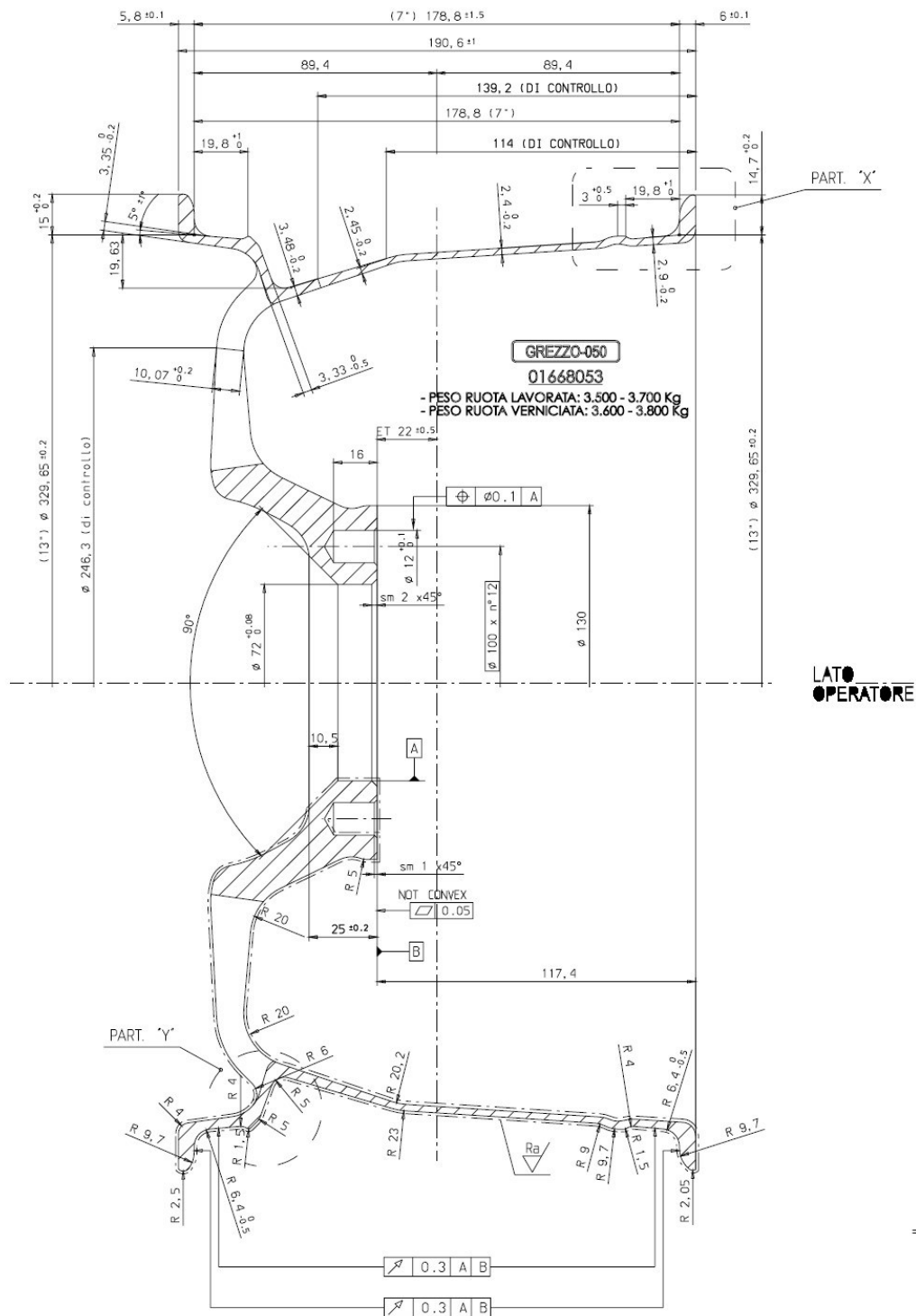
Ο σχεδιασμός της συναρμογής του ελαστικού στην εν παρούσα Διπλωματική Εργασία διεκπεραιώνεται μέσω της αξιοποίησης του λογισμικού CATIA V5R20, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά στη συνέχεια.

2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΖΑΝΤΑΣ ΤΡΟΧΟΥ

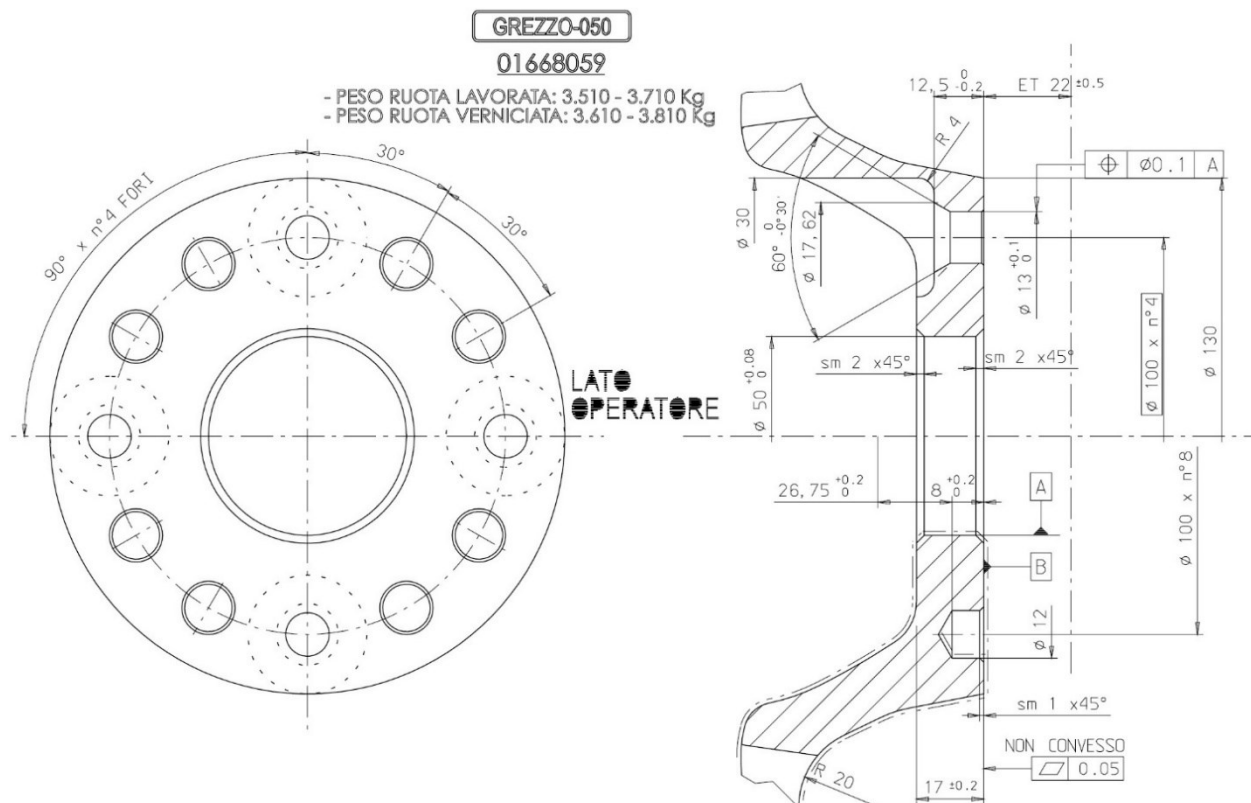
Ο σχεδιασμός της ζάντας του τροχού του οχήματος γίνεται με χρήση μηχανολογικού σχεδίου, που δόθηκε από την εταιρεία **OZ RACING COMPANY** και το οποίο είχε ως σκοπό την εξυπηρέτηση του project **FORMULA STUDENT**. Σχετικά με τις διαστάσεις της ζάντας, ορίζεται σε 13 ίντσες η διάμετρος και σε 7 ίντσες το πλάτος της. Στις **Εικόνες 2.1, 2.2, 2.3** παρουσιάζονται όψεις και διαμορφώσεις με διαστάσεις του προαναφερθέντος μηχανολογικού σχεδίου:



Εικόνα 2.1: Μηχανολογικό σχέδιο ζάντας τροχού (πρόοψη).

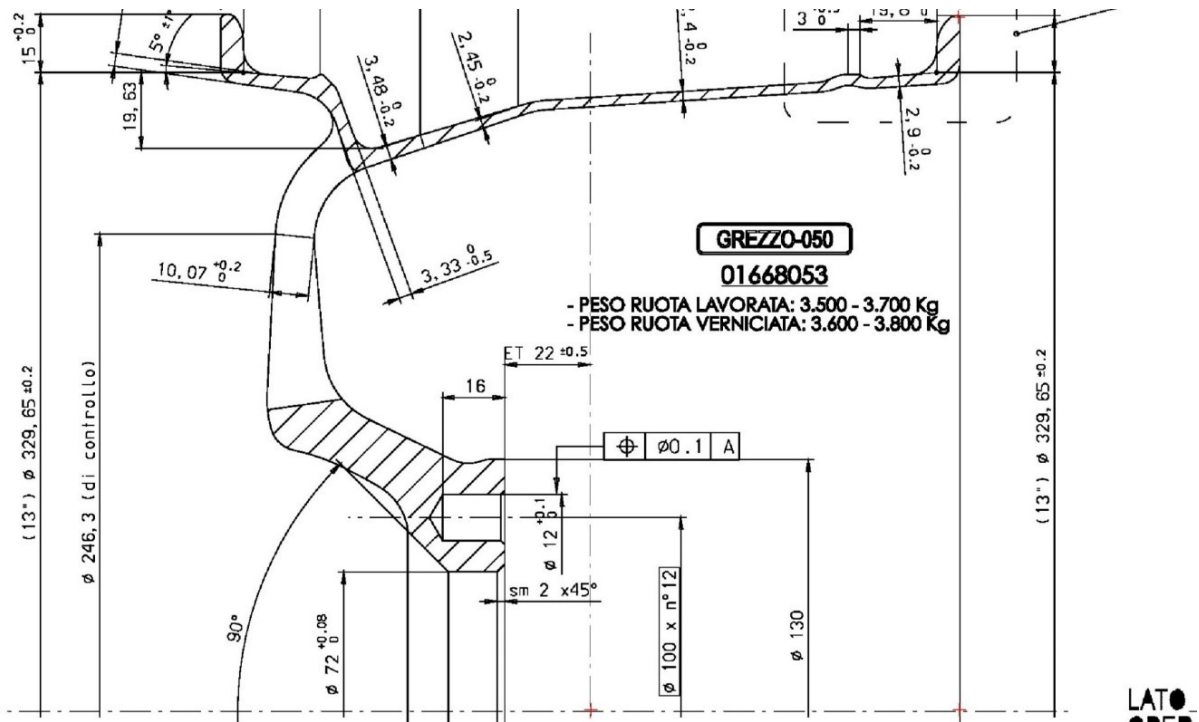


Εικόνα 2.2: Μηχανολογικό σχέδιο ζάντας τροχού (πλάγια όψη σε τομή).



Εικόνα 2.3: Μηχανολογικό σχέδιο ζάντας τροχού (λεπτομέρειες).

Η σχεδίαση της ζάντας του τροχού στο λογισμικό CATIA, όπως και κάθε άλλου μεμονωμένου αντικειμένου στη συνέχεια, έλαβε χώρα μέσα σε εργαλείο **Generative Shape Design**. Πιο συγκεκριμένα, η ζάντα προκύπτει από την σχεδίαση και ύστερα συγχώνευση δύο επιμέρους στερεών σωμάτων, καθώς επίσης και από τις διαμορφώσεις που θα τους επιβληθούν. Αφετηρία του σχεδιασμού του πρώτου στερεού σώματος, όπως και του δεύτερου που θα παρουσιαστεί αργότερα, είναι το λογισμικό **Engauge Digitizer**. Στο λογισμικό αυτό εισάγεται αρχικά το σχέδιο (σε μορφή εικόνας). Στη συνέχεια εισάγονται αρχικά σημεία αναφοράς (σημεία ορισμού αξόνων) με γνωστές συντεταγμένες ώστε να γίνεται αυτόματα η διαστασιολόγηση του σχεδίου. Στη συνέχεια επιλέγονται πάνω στην δεξιά όψη της ζάντας (σε τομή) όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2.2**, τα σημεία που θα ψηφιοποιηθούν και των οποίων οι συντεταγμένες εξάγονται σε ένα φύλλο Excel. Αργότερα, μέσω της χρήσης μακροεντολών στο Excel, γίνεται εισαγωγή των σημείων αυτών στο λογισμικό CATIA. Από τα σημεία αυτά, προκύπτει το σχετικό περίγραμμα, το οποίο μαζί με την εφαρμογή συγκεκριμένων διεργασιών στο CATIA, οδηγούν στην κατασκευή του πρώτου στερεού σώματος. Το αρχείο του CATIA στο οποίο γίνεται η δημιουργία του πρώτου στερεού σώματος λαμβάνει το όνομα **zanta_first_piece.CATPart**. Παρακάτω παρουσιάζεται σε διαδοχικές εικόνες η λεπτομερής διαδικασία που ακολουθείται για να εισαχθούν τα εν λόγω σημεία στο λογισμικό CATIA.



Εικόνα 2.4: Θεώρηση αρχικών σημείων, με συντεταγμένες στο καρτεσιανό σύστημα, για το 1^ο σημείο: $x=0$ και $y=0$, 2^ο σημείο: $x=95.4$ και $y=0.0$, 3^ο σημείο: $x=95.4$ και $y=179.5$.



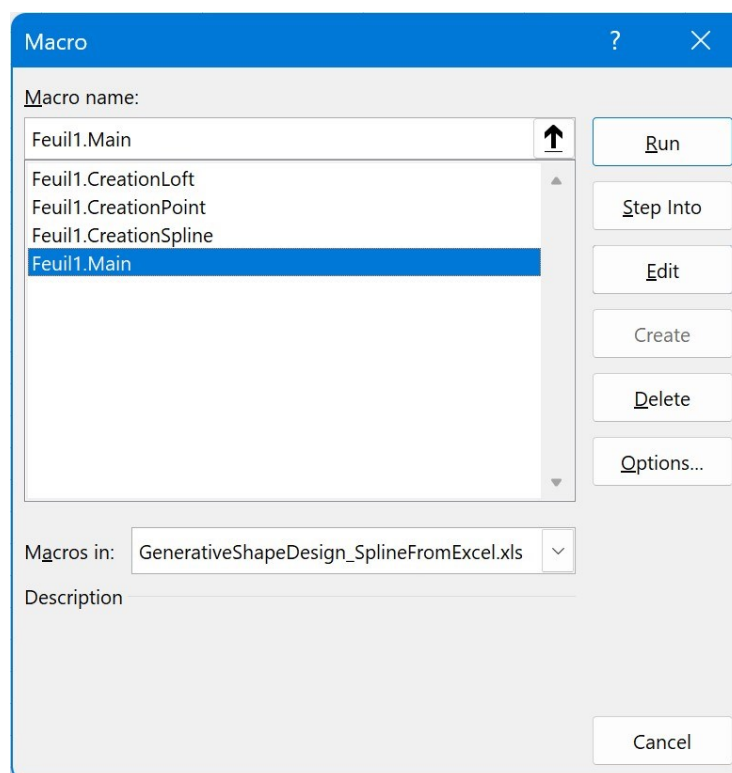
Εικόνα 2.5 Επιλογή σημείων προς ψηφιοποίηση, της πλάγιας όψης της ζάντας σε τομή, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2. Τα σημεία μαρκάρονται με σταυρούς σε μπλε απόχρωση.

	A	B
1	x	Curve1
2	-95.549	170.031
3	-95.131	178.688
4	-93.938	163.268
5	-91.616	179.635
6	-89.195	172.466
7	-85.961	165.973
8	-83.244	86.03
9	-83.129	162.186
10	-83.124	75.885
11	-82.683	99.827
12	-81.983	115.924
13	-80.477	128.91
14	-76.241	160.292
15	-76.1	164.35
16	-75.868	138.92
17	-71.157	126.34
18	-70.634	114.707
19	-69.507	145.548
20	-69.309	97.393
21	-69.083	157.992
22	-68.667	164.485
23	-66.55	134.726
24	-66.254	151.905
25	-65.295	160.833
26	-64.334	80.755
27	-62.602	154.34
28	-59.921	140.137
29	-59.236	146.495

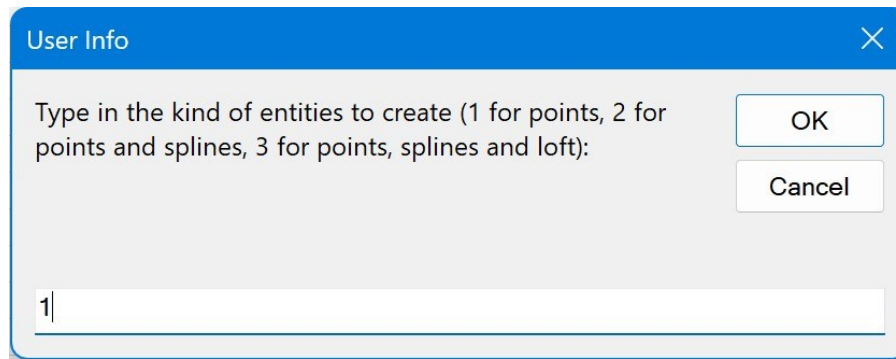
Εικόνα 2.6: Εξαγωγή των συντεταγμένων των ψηφιοποιημένων σημείων σε φύλλο του Excel (δείγμα σημείων).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	StartLoft								
2	StartCurve								
3	0	-95.549	170.031						
4	0	-95.131	178.688						
5	0	-93.938	163.268						
6	0	-91.616	179.635						
7	0	-89.195	172.466						
8	0	-85.961	165.973						
9	0	-83.244	86.03						
10	0	-83.129	162.186						
11	0	-83.124	75.885						
12	0	-82.683	99.827						
13	0	-81.983	115.924						
14	0	-80.477	128.91						
15	0	-76.241	160.292						
16	0	-76.1	164.35						
17	0	-75.868	138.92						
18	0	-71.157	126.34						
19	0	-70.634	114.707						
20	0	-69.507	145.548						
21	0	-69.309	97.393						
22	0	-69.083	157.992						
23									
24	EndCurve								
25	EndLoft								
26	End								

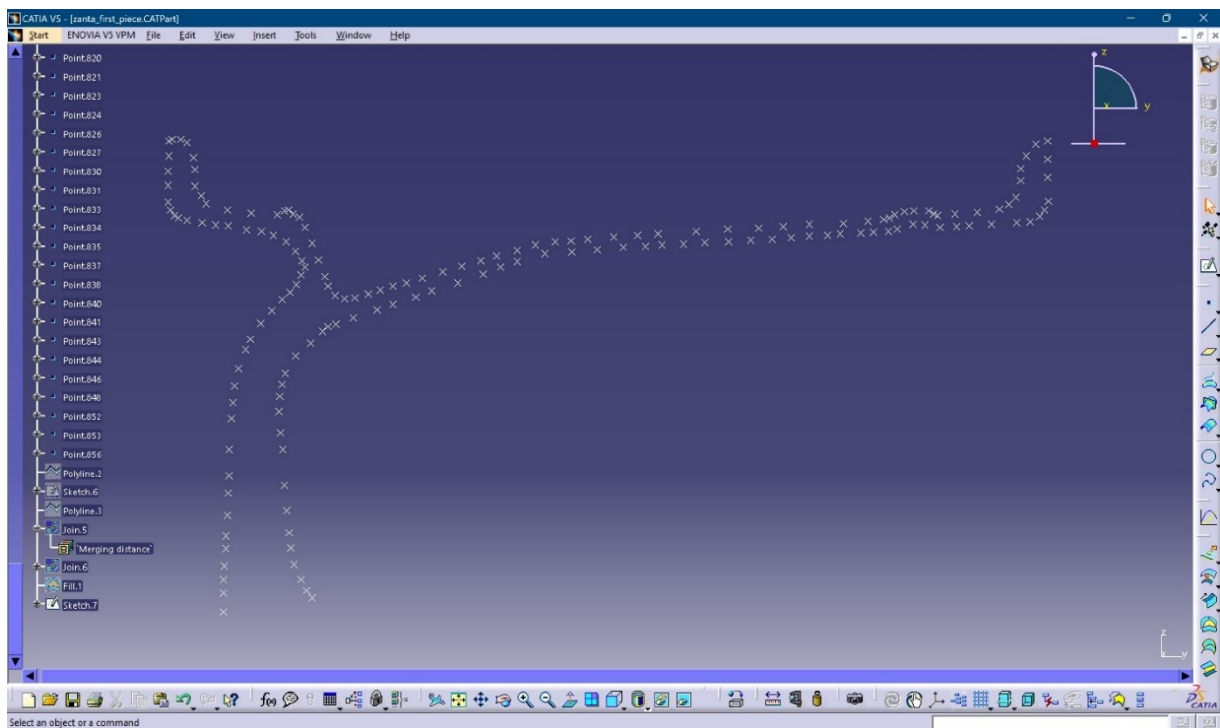
Εικόνα 2.7: Καταχώρηση των συντεταγμένων των σημείων σε φύλλο του Excel.



Εικόνα 2.8: Επιλογή της μακροεντολής «Feuil1.Main», με αναφορά στο αρχείο του Excel ονόματι GenerativeShapeDesign_SplineFromExcel.xls.







Εικόνα 2.9: Καταχώρηση της επιλογής «1», ώστε στο CATIA να μεταφερθούν τα ψηφιοποιημένα σημεία.

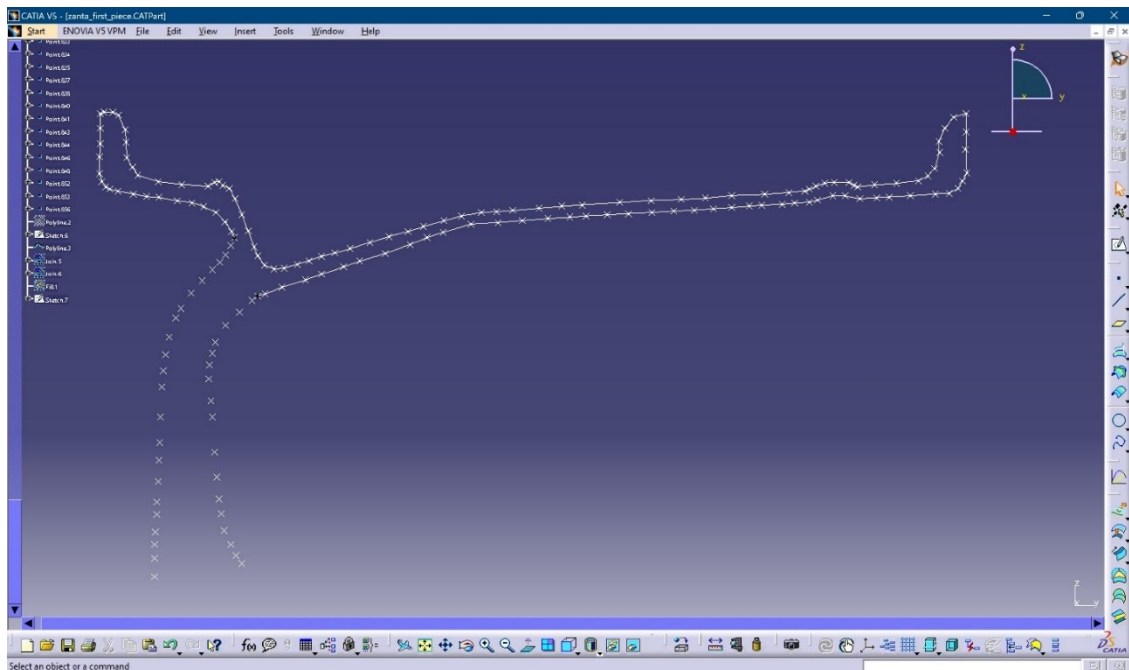


Εικόνα 2.10: Εισαγωγή και απεικόνιση των ψηφιοποιημένων σημείων στο CATIA.

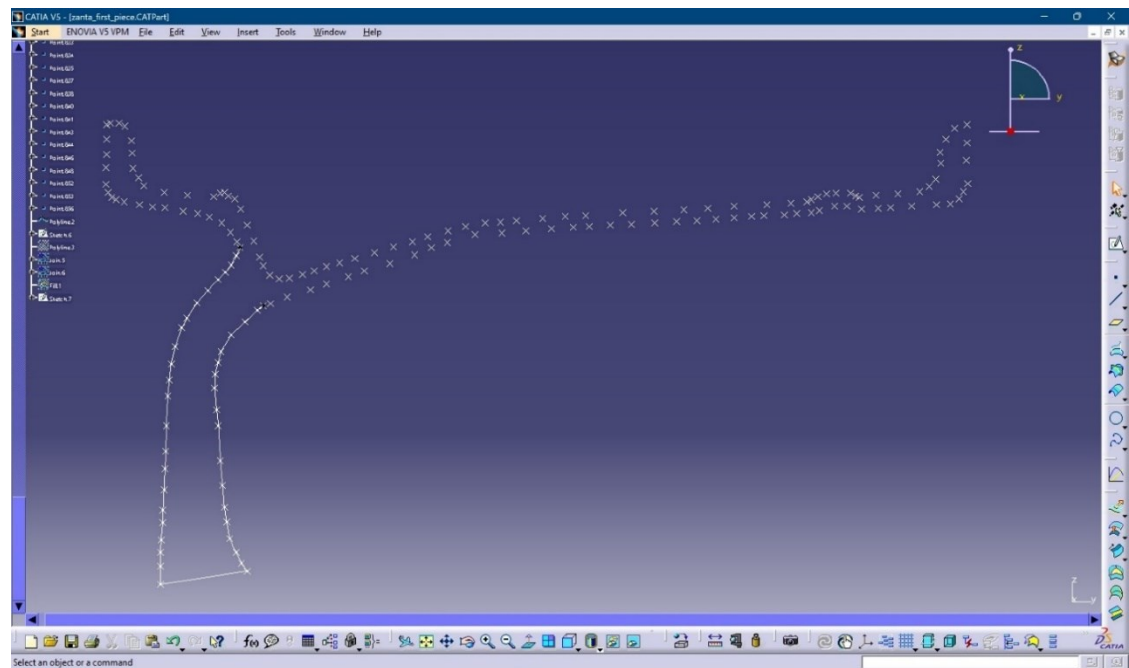
Στη συνέχεια της εισαγωγής των ψηφιοποιημένων σημείων στο CATIA, καταγράφονται οι ενέργειες που εκτελούνται, ώστε να παραχθεί το πρώτο στερεό σώμα από το οποίο αποτελείται η ζάντα του τροχού.

Αρχικά, επιλέγεται η εντολή **Sketch**  και μέσω της εντολής **Polyline**  δημιουργούνται 2 ξεχωριστές γραμμές σημείων του περιγράμματος, με χαρακτηριστικά ονόματα στο CATIA Polyline.2 στο Sketch.6 και Polyline.3 στο Sketch.7. Στη συνέχεια, ενώνονται οι γραμμές αυτές μέσω της εντολής **Join**  σε ένα ενιαίο περίγραμμα. Σε επόμενο βήμα «γεμίζει» η επιφάνεια του περιγράμματος, ώστε αργότερα κατά την περιστροφή του να παραχθεί συμπαγές στερεό. Η ενέργεια αυτή πραγματοποιείται μέσω εφαρμογής της εντολής **Fill** , με την απεικόνιση που προκύπτει να ονομάζεται Fill.1. Σε

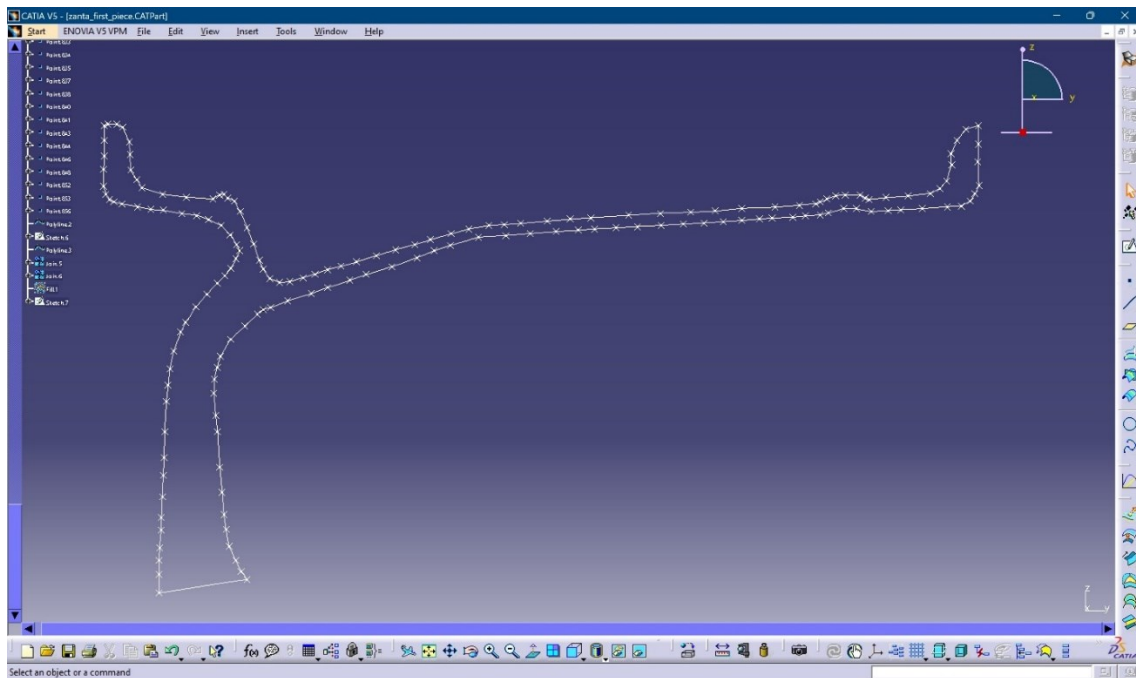
αυτό το σημείο παρατίθενται οι εικόνες που σκιαγραφούν την προαναφερθείσα σειρά εντολών.



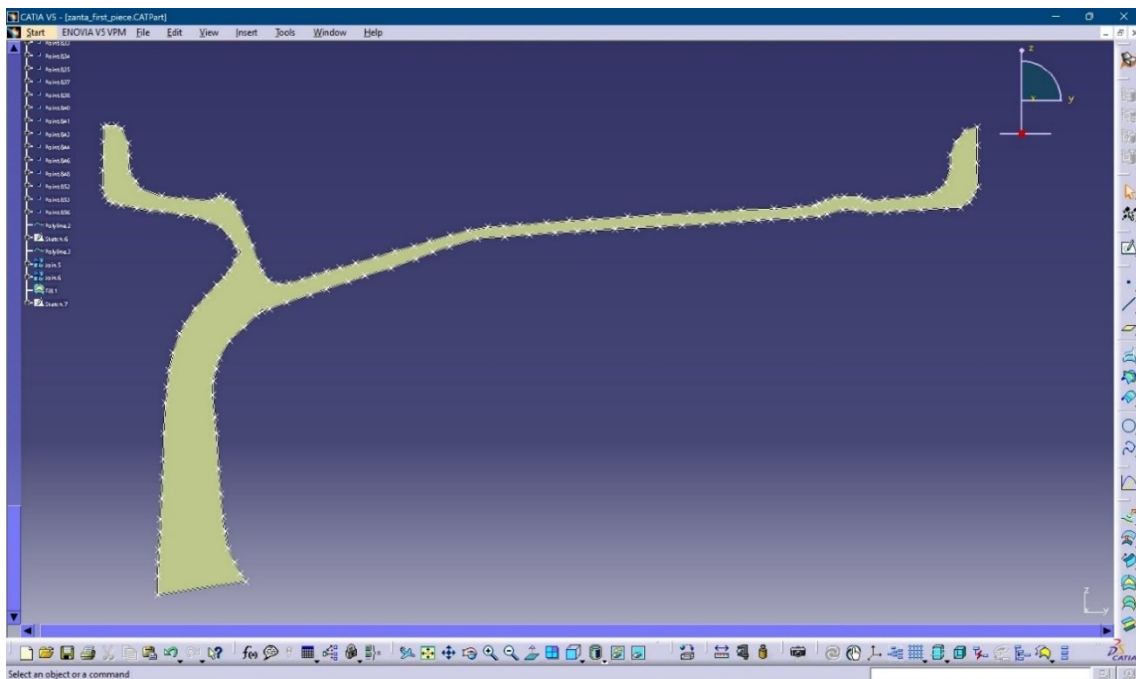
Εικόνα 2.11: Κατασκευή της Polyline 2.




Εικόνα 2.12: Κατασκευή της Polyline 3.




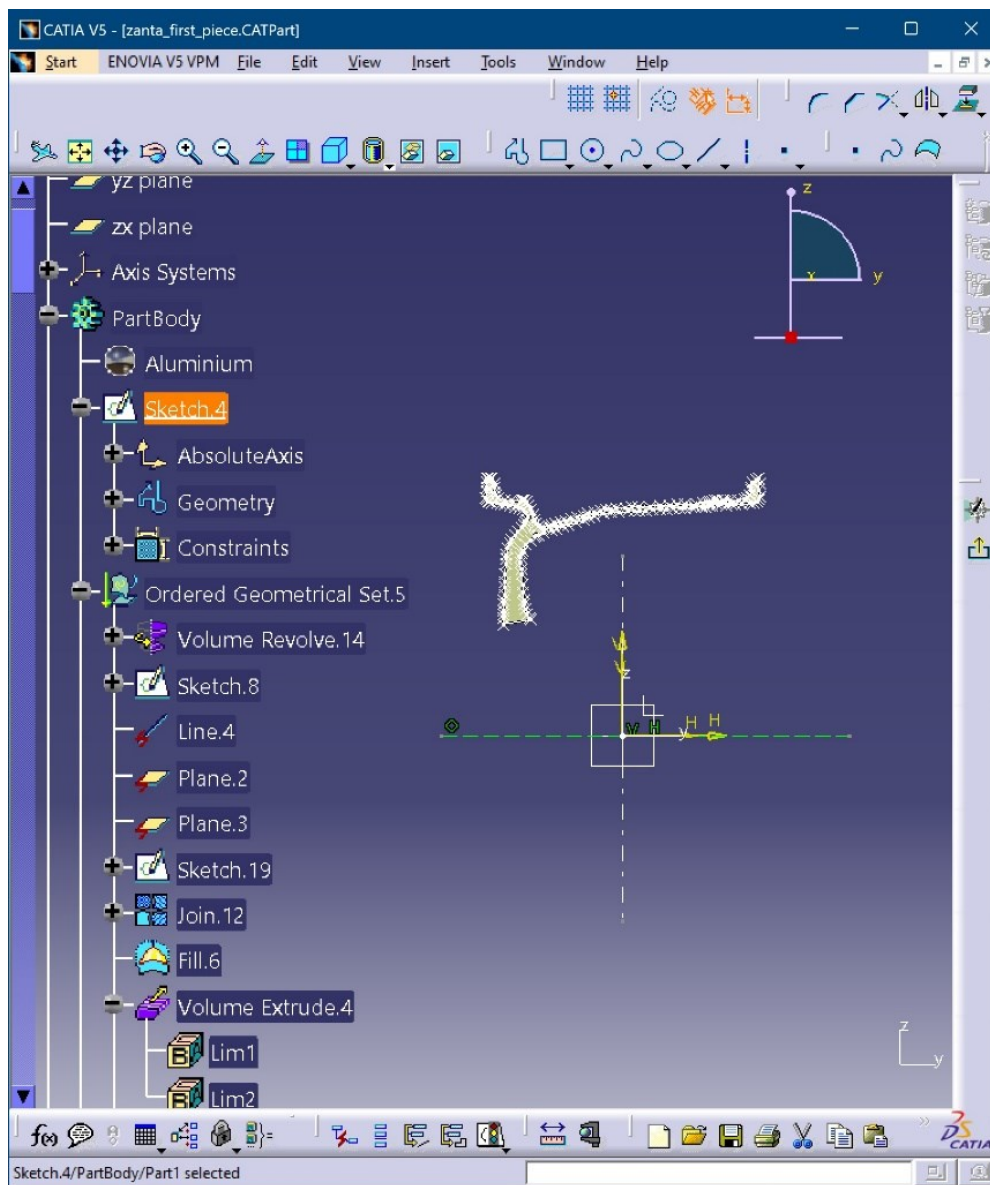
Εικόνα 2.13: Συγχώνευση των Polyline 2, 3 (με την εντολή join).



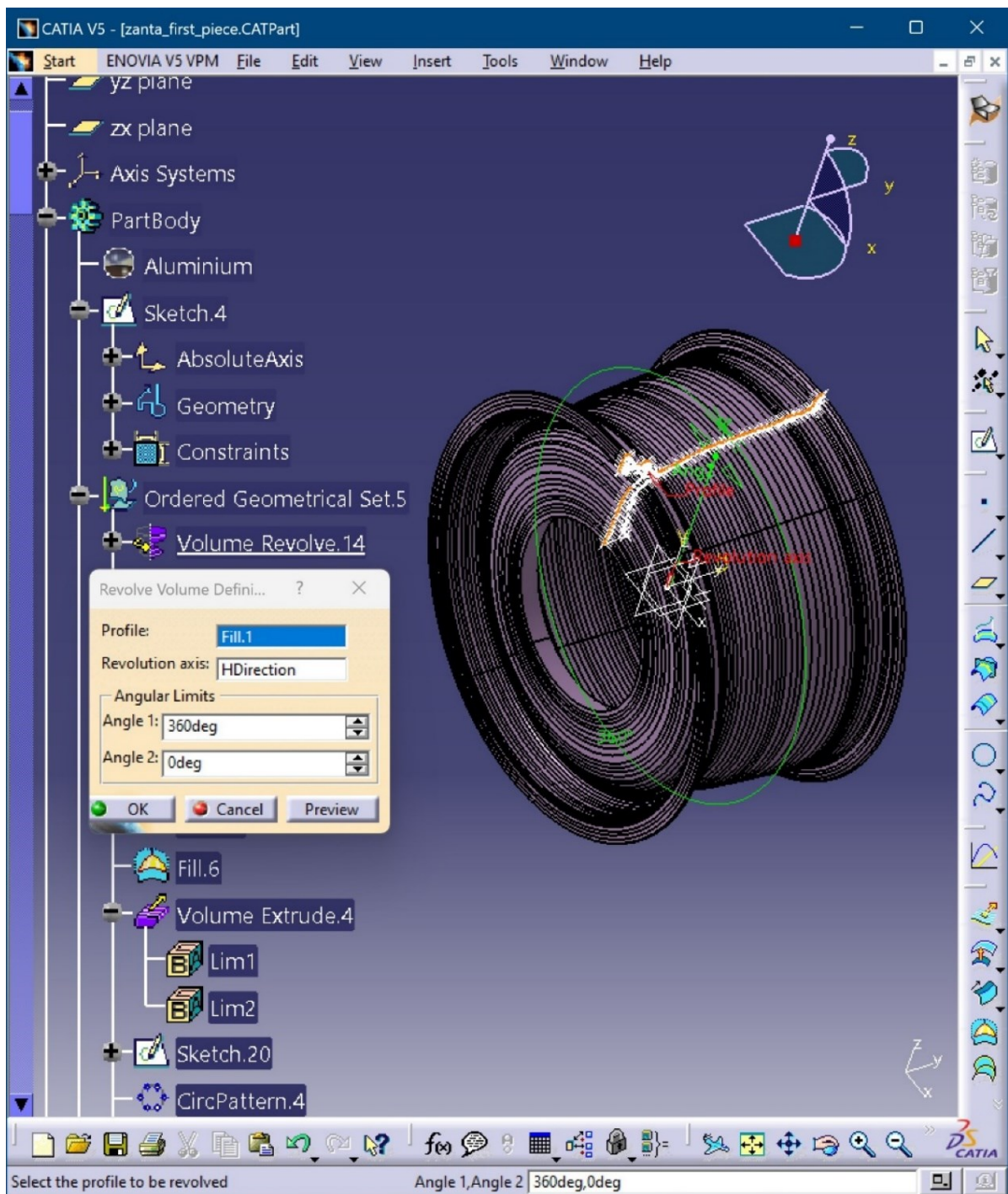
Εικόνα 2.14: «Γέμισμα» της επιφάνειας του περιγράμματος ώστε να προκύπτει το Fill.1.

Στη συνέχεια, τοποθετούνται άξονες μέσω της εντολής **Axis**  στο Sketch.4. Ύστερα γίνεται περιστροφή της παραπάνω «γεμισμένης» επιφάνειας (Fill.1), μέσω της εντολής



Volume Revolve , γύρω από τον οριζόντιο άξονα που δημιουργήθηκε στο Sketch.4, με αποτέλεσμα να προκύπτει στερεό σώμα ονόματι Volume Revolve.14. Στη συνέχεια απεικονίζονται οι προαναφερθείσες εντολές.



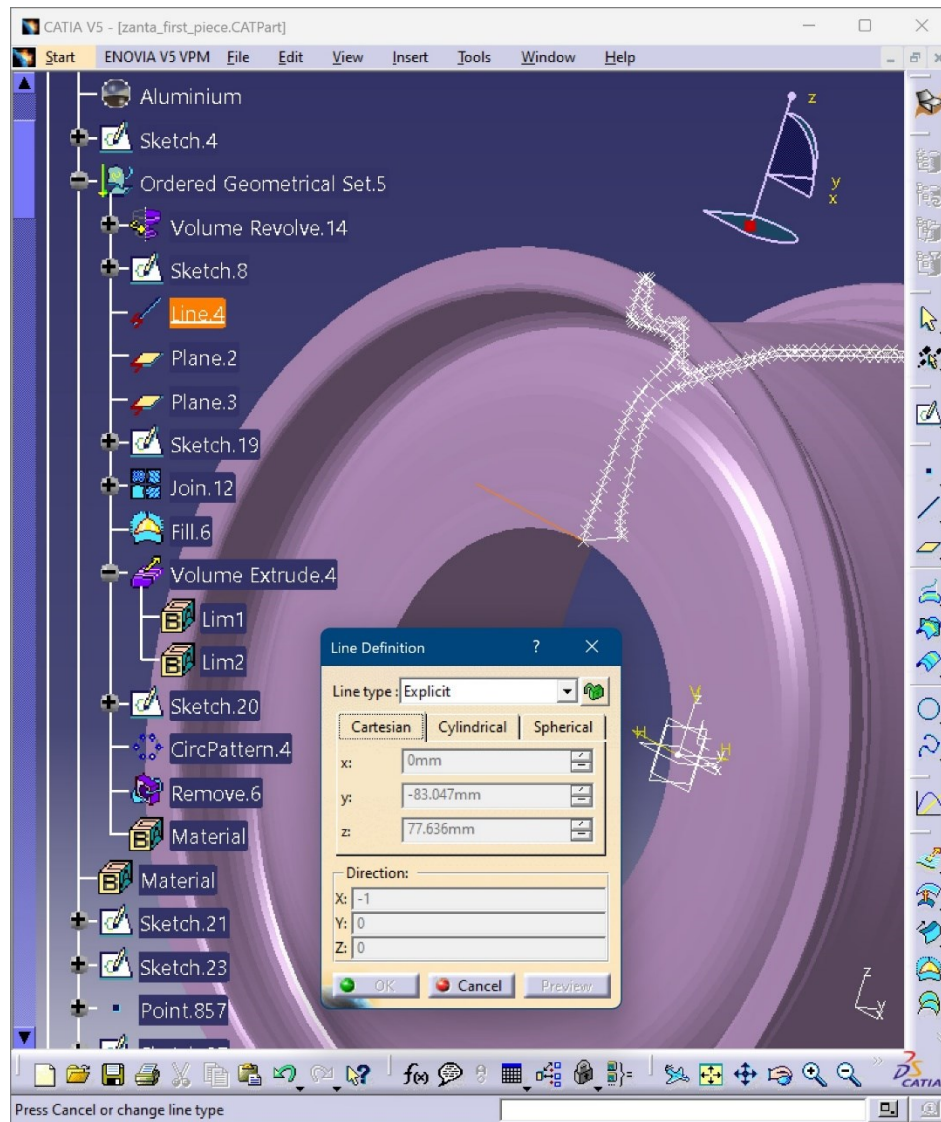
Εικόνα 2.15: Δημιουργία αξόνων στο Sketch.4.



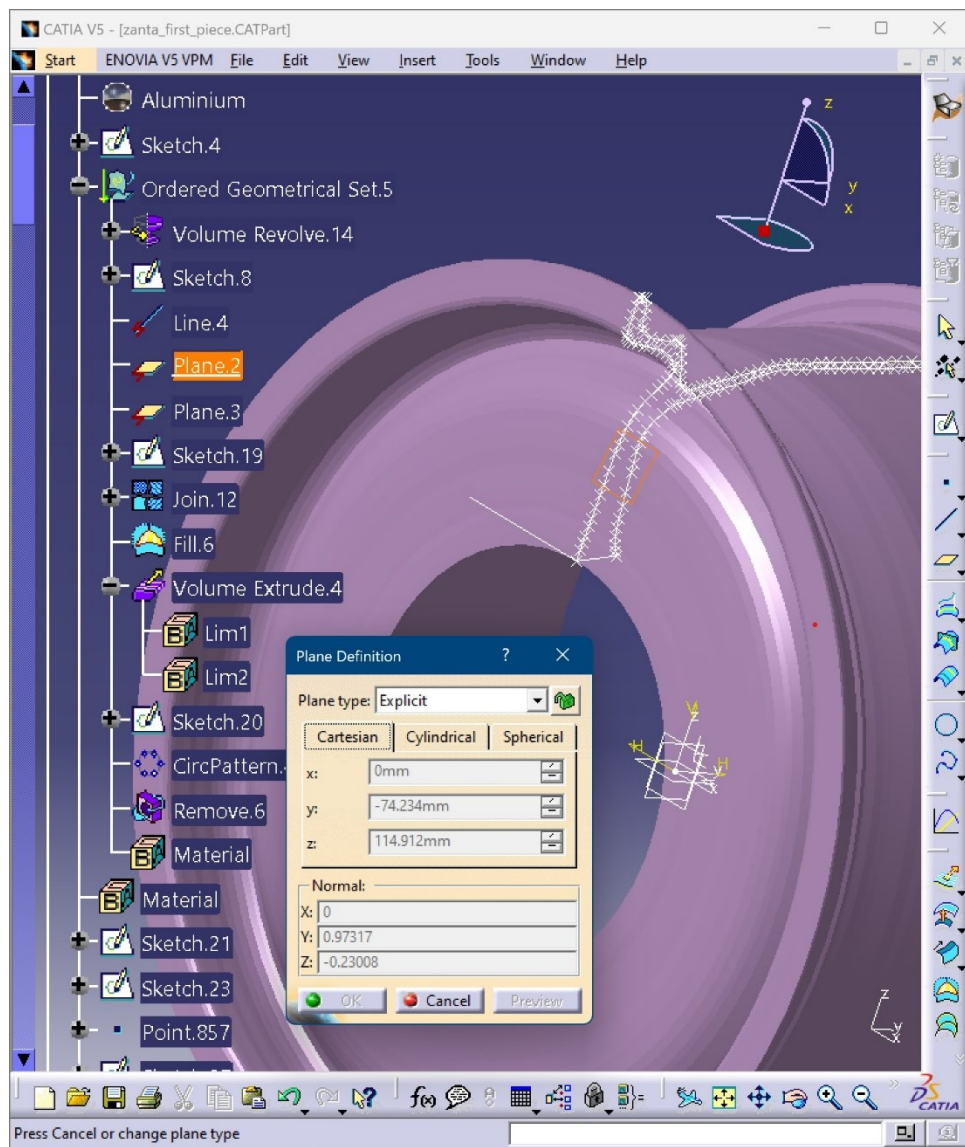
Εικόνα 2.16: Δημιουργία του Volume Revolve.14.

Έπειτα ακολουθεί η διαδικασία δημιουργίας των δύο προτύπων (pattern) οπών περιφερειακά της ζάντας και η αφαίρεσή τους, ώστε να παραμείνουν οι οπές στη ζάντα και όχι οι όγκοι τους. Αρχικά κατασκευάζεται μια γραμμή εφαπτόμενη της ζάντας στο κάτω μέρος του περιγράμματος των αρχικών ψηφιοποιημένων σημείων, μέσω της εντολής **Line** , οπότε προκύπτει η γραμμή Line.4. Ακολούθως δημιουργούνται δύο επίπεδα μέσω της εντολής **Plane** , ονόματι Plane.2 και Plane.3, στα οποία θα κατασκευαστούν τα περιγράμματα των οπών, όπου θα οδηγήσουν εντέλει στη κατασκευή των δύο

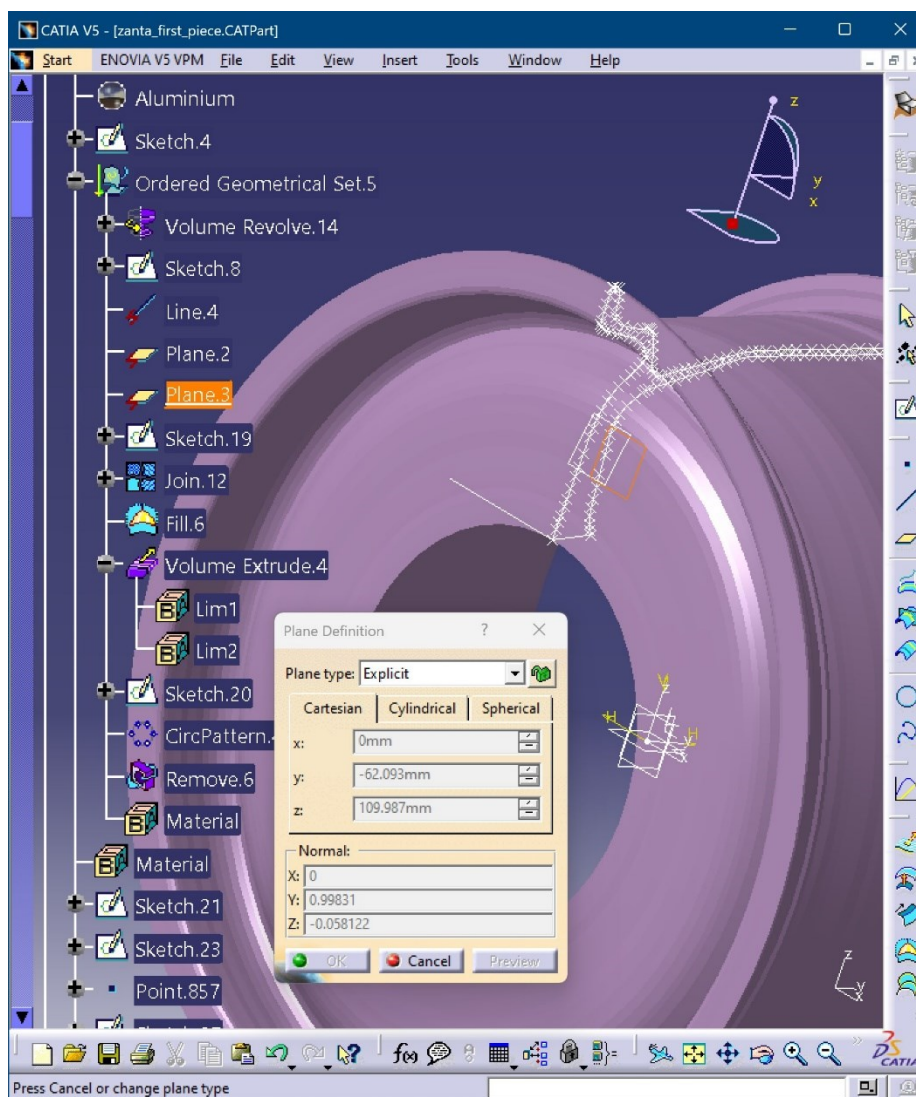
προαναφερόμενων προτύπων (pattern). Οι εικόνες που ακολουθούν αποτυπώνουν τις συγκεκριμένες εντολές.



Εικόνα 2.17: Δημιουργίας της Line.4.




Εικόνα 2.18: Δημιουργία του Plane.2.





Εικόνα 2.19: Δημιουργία του Plane.3.





Σχετικά με τη κατασκευή των περιγραμμάτων των οπών, λόγω ότι δεν αποτυπώνονται οι διαστάσεις τους στα παραπάνω μηχανολογικά σχέδια, γίνεται άνοιγμα του αρχείου **OZ_Drawing_Formula_Student_Alluminium_CL_4H** σε μορφή «.dxf» στο CATIA, ώστε να ληφθούν οι διαστάσεις χειροκίνητα από εκεί. Το αρχείο αποθηκεύεται με όνομα **zanta_CATDrawing1.CATDrawing**. Αφού ληφθούν οι απαραίτητες διαστάσεις, γίνεται

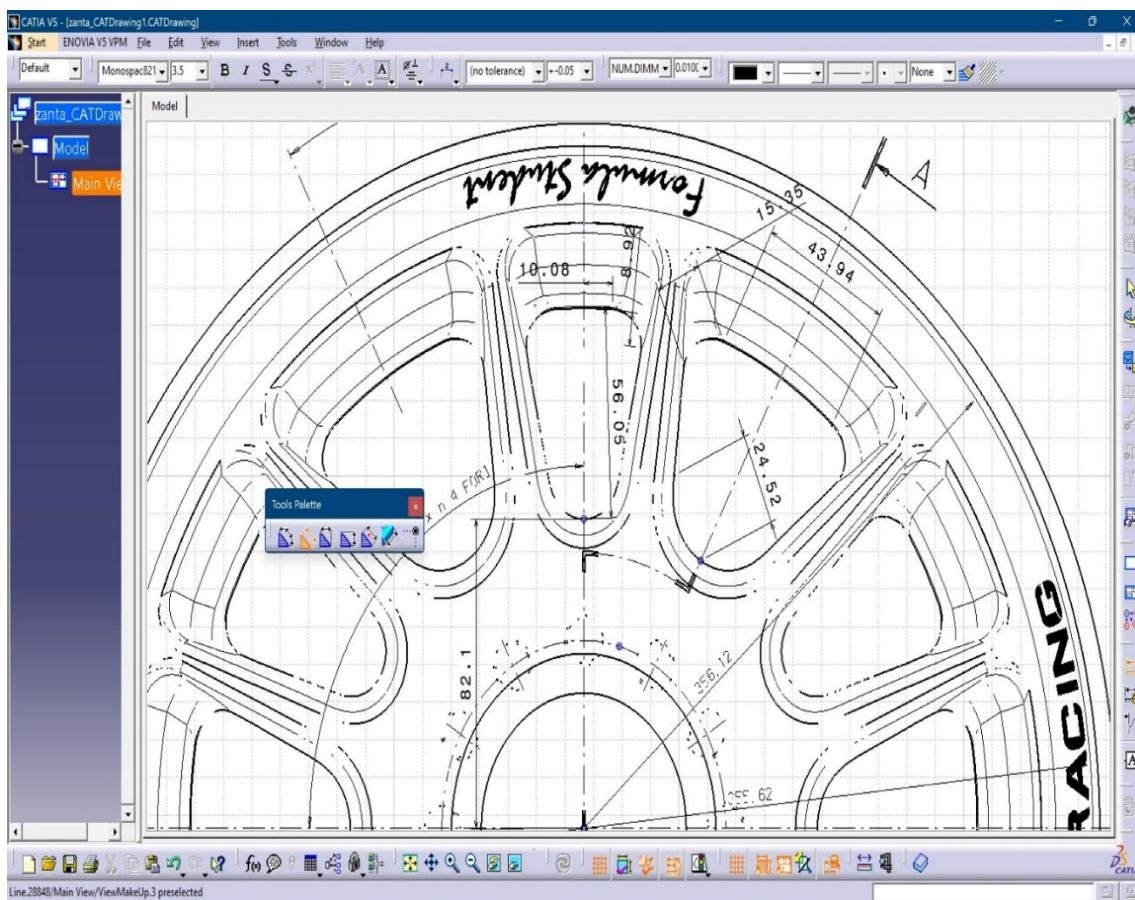
αρχικά κατασκευή του πρώτου περιγράμματος οπής μέσω της εντολής **Sketch** , ονόματι Sketch.19. Η κατασκευή του περιγράμματος αυτού εφαρμόζεται στο επίπεδο ονόματι Plane.3. Ύστερα πραγματοποιείται συγχώνευση των γραμμών του περιγράμματος σε ένα

ενιαίο περίγραμμα μέσω της εντολής **Join** , με όνομα Join.12. Ακολούθως, εφαρμόζεται

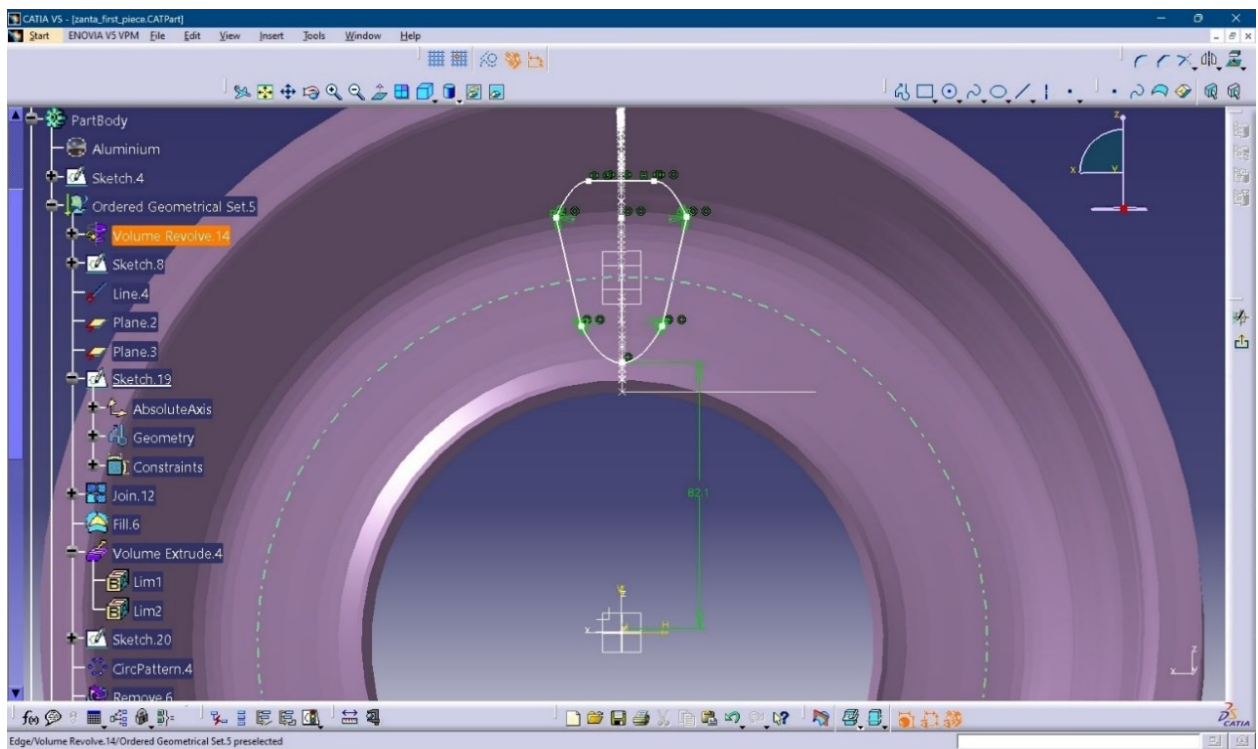
«γέμισμα» της επιφάνειας του περιγράμματος μέσω της εντολής **Fill** , με όνομα Fill.6. Εν συνεχεία, πραγματοποιείται εξώθηση όγκου της επιφάνειας αυτής μέσω της εντολής

Volume Extrude , με τον όγκο να λαμβάνει το όνομα Volume Extrude.4. Έπειτα

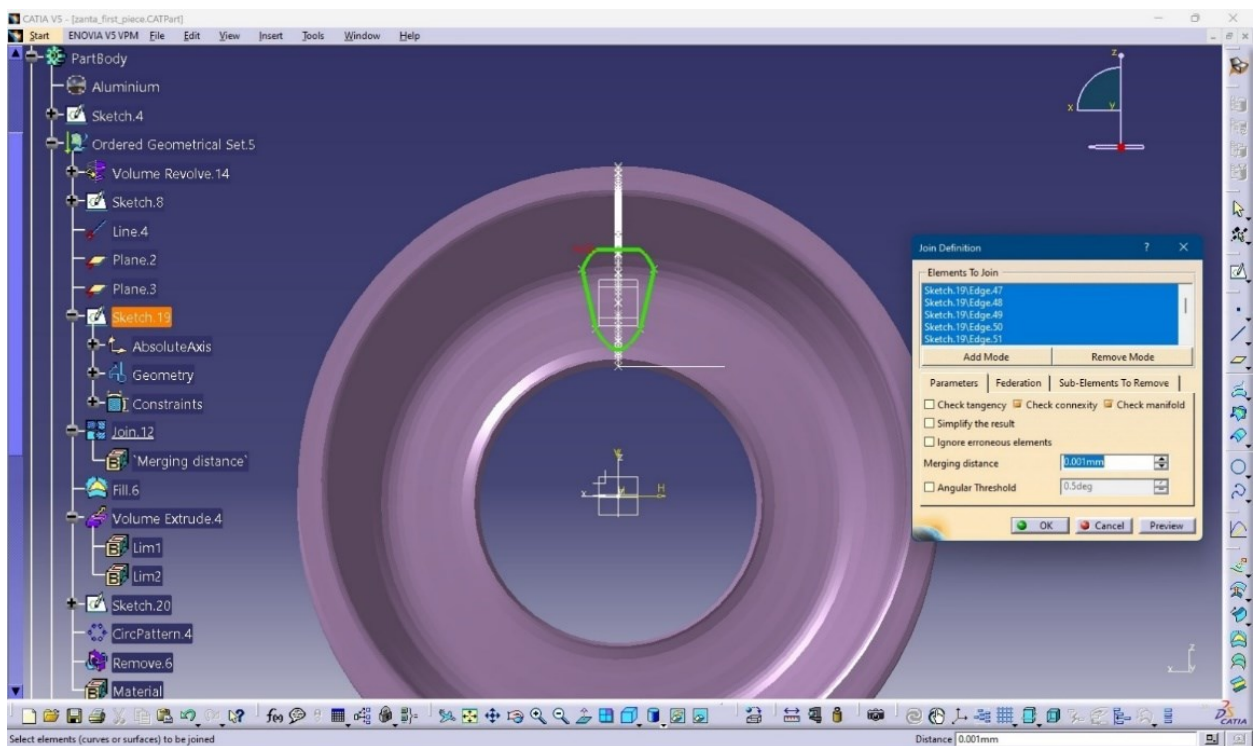
εφαρμόζοντας σε πρώτη φάση την εντολή **Sketch**  και σε δεύτερη φάση την εντολή **Axis**  κατασκευάζεται οριζόντιος άξονας ο οποίος διέρχεται από την αρχή των αξόνων, με λαμβάνουσα αποτύπωση στο CATIA ως Sketch.20. Επακόλουθα, δημιουργείται πρότυπο (pattern) του παραπάνω όγκου μέσω της εντολής **Circular Pattern** , με όνομα CircPattern.4, ώστε στη συνέχεια να αφαιρεθεί και να προκύψει ο πρώτος τύπος οπής περιφερειακά της ζάντας μέσω της εντολής **Remove** , ονόματι Remove.6. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες που επεξηγούν διαδοχικά την παραπάνω διαδικασία.



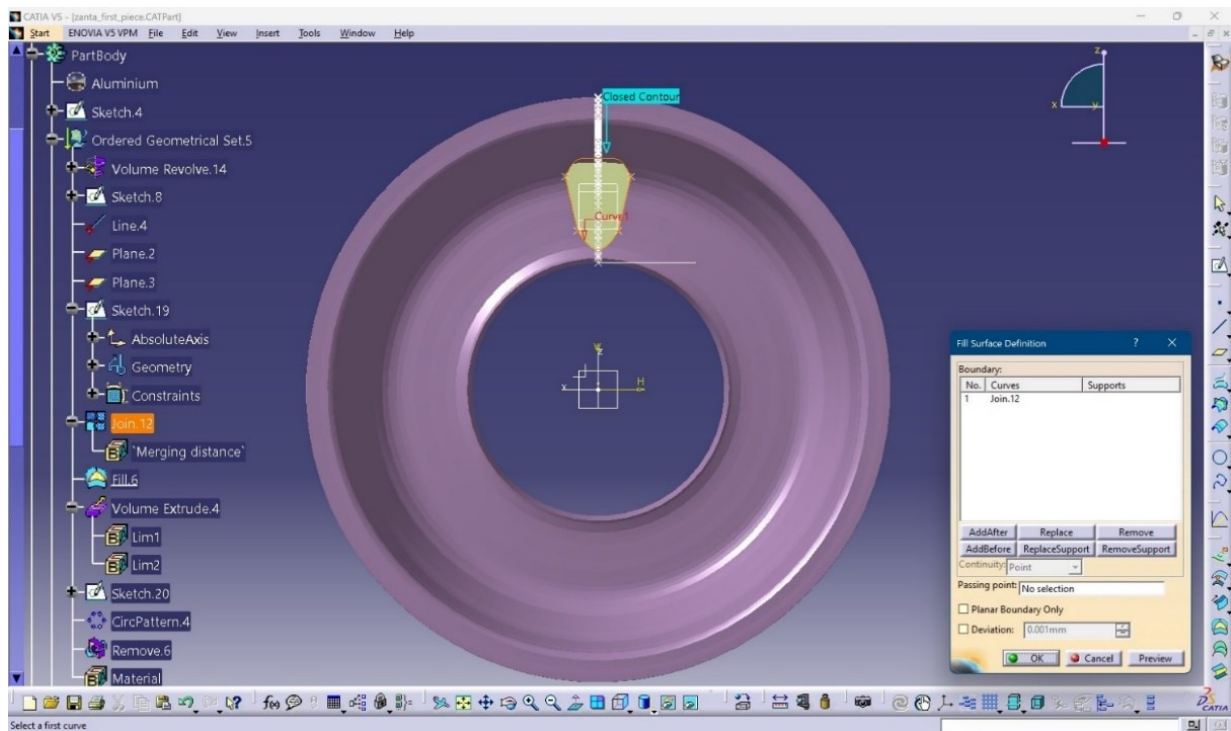
Εικόνα 2.20: Διαστάσεις των περιγραμμάτων των οπών.



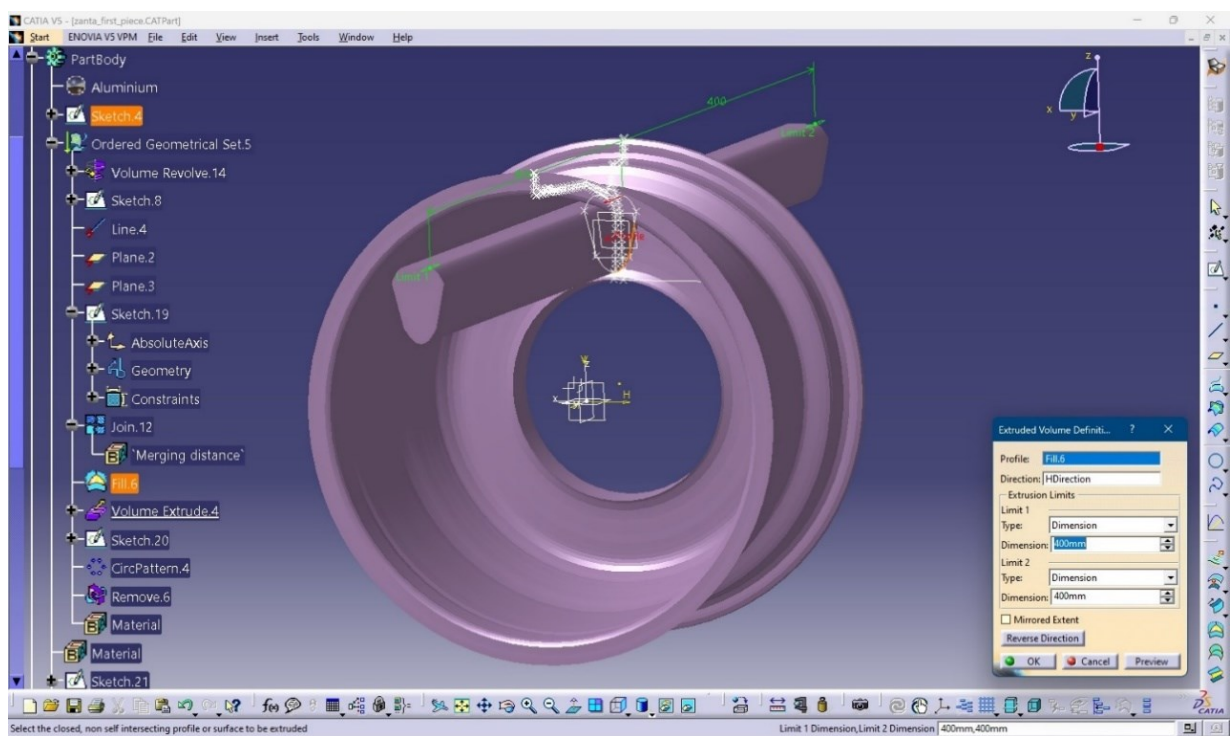
Εικόνα 2.21: Δημιουργία του Sketch.19.



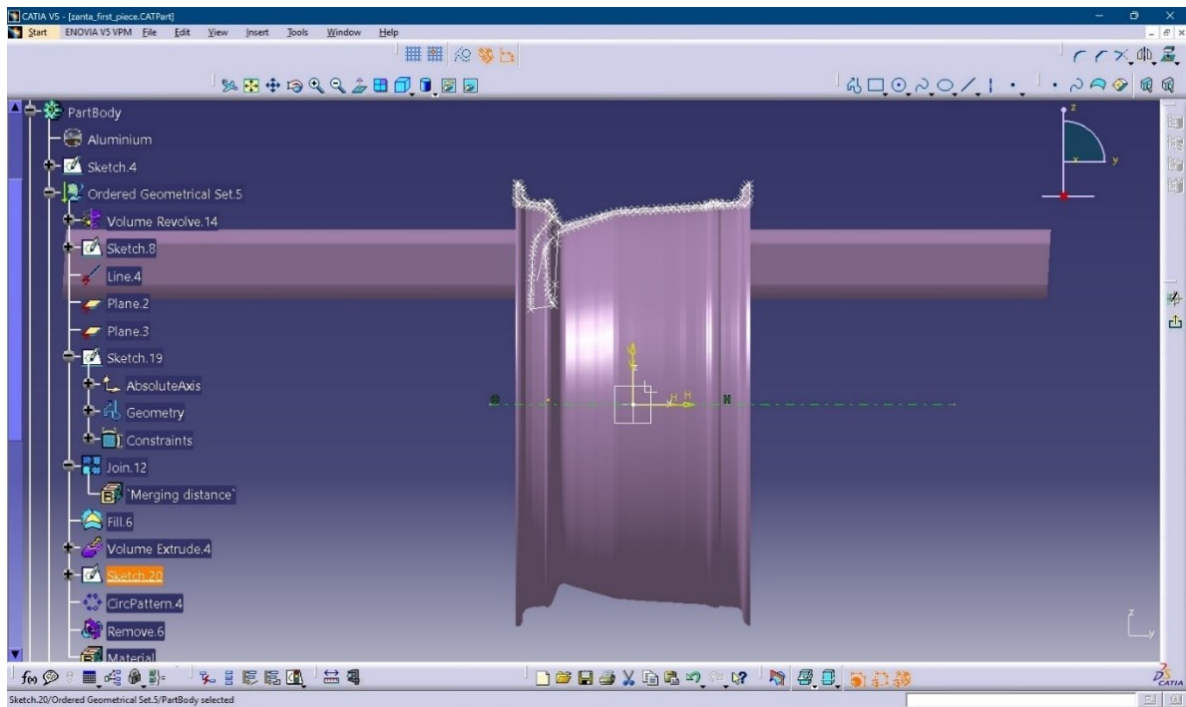
Εικόνα 2.22: Δημιουργία του Join.12.



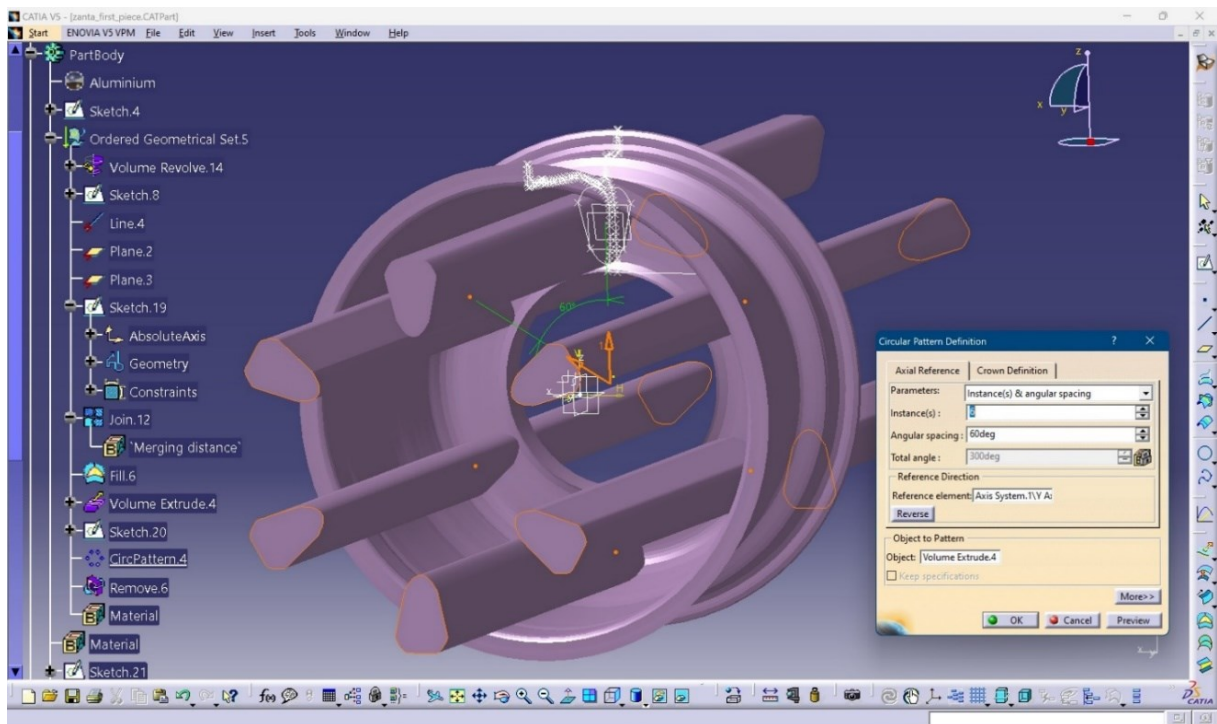
Εικόνα 2.23: Κατασκευή του Fill.6.



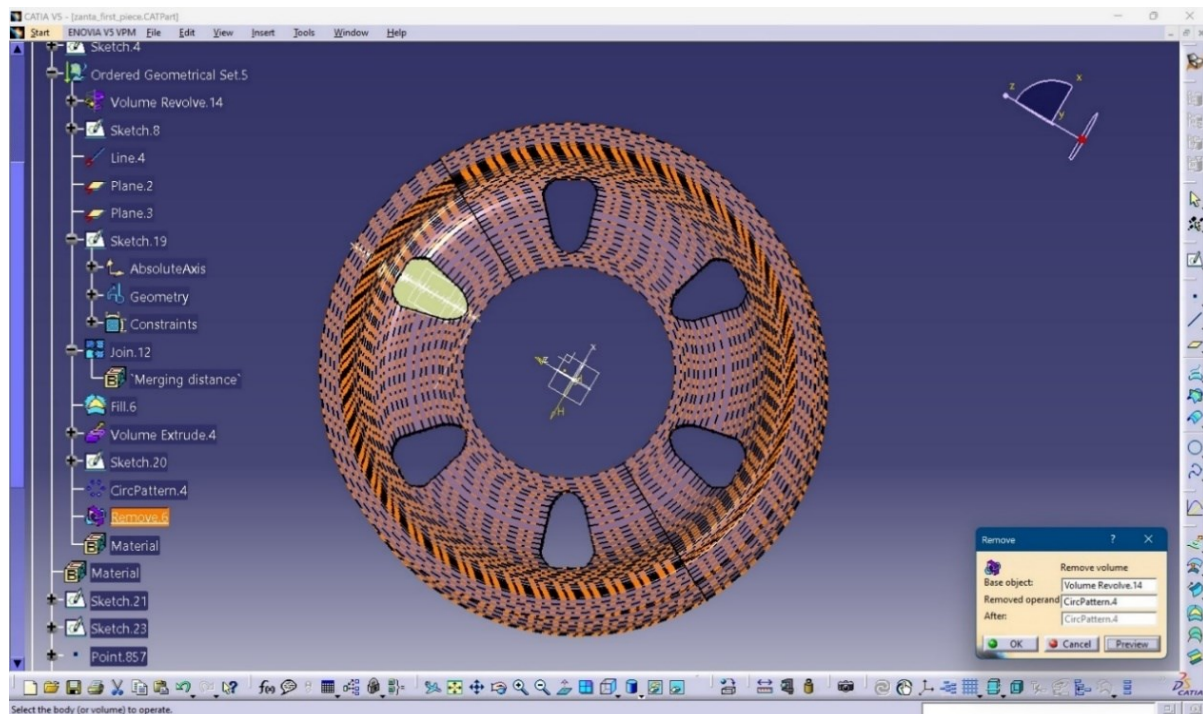
Εικόνα 2.24: Κατασκευή του Volume Extrude.4.





Εικόνα 2.25: Δημιουργία του Sketch.20.





Εικόνα 2.26: Κατασκευή του CircPattern.4.




Εικόνα 2.27: Δημιουργία του Remove.6.


Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να κατασκευαστεί το δεύτερο περίγραμμα της οπής επάνω στην περιφέρεια της ζάντας. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της εντολής **Sketch**  δημιουργούνται άξονες, οι οποίοι βρίσκονται επάνω στο Plane.2, οπότε και προκύπτει το Sketch.21. Έπειτα, επάνω στο Plane.2, δημιουργείται το Sketch.23, το οποίο αποτελείται από δύο γραμμές με εσωτερικό άνοιγμα 30 μοιρών. Ύστερα, πάλι μέσω της εντολής **Sketch** , δημιουργείται το Sketch.31 επάνω στο Plane.2, στο οποίο κατασκευάζεται το δεύτερο περίγραμμα της προαναφερόμενης οπής βάσει διαστάσεων οι οποίες προβάλλονται στην **Εικόνα 2.20**.

Μετά την σχεδίαση του περιγράμματος της οπής γίνεται συγχώνευση των ακμών του περιγράμματος μέσω της εντολής **Join** , οπότε και σχηματίζεται το Join.13.

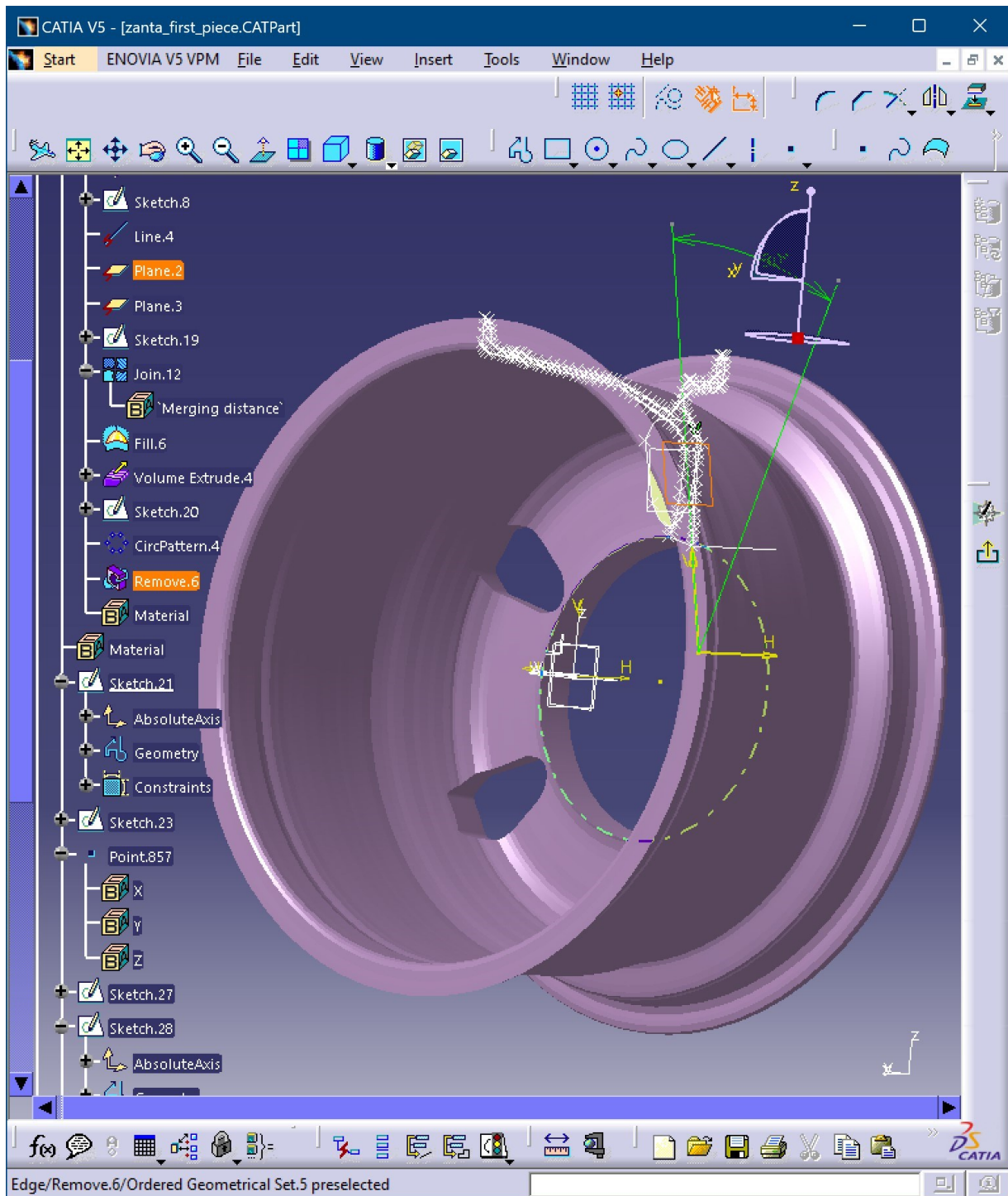
Ακολούθως, γίνεται γέμισμα της επιφάνειας του Join.13 μέσω της εντολής **Fill** , με αποτέλεσμα να προκύπτει το Fill.8. Εν συνεχεία, γίνεται χρήση της εντολής **Volume Extrude**



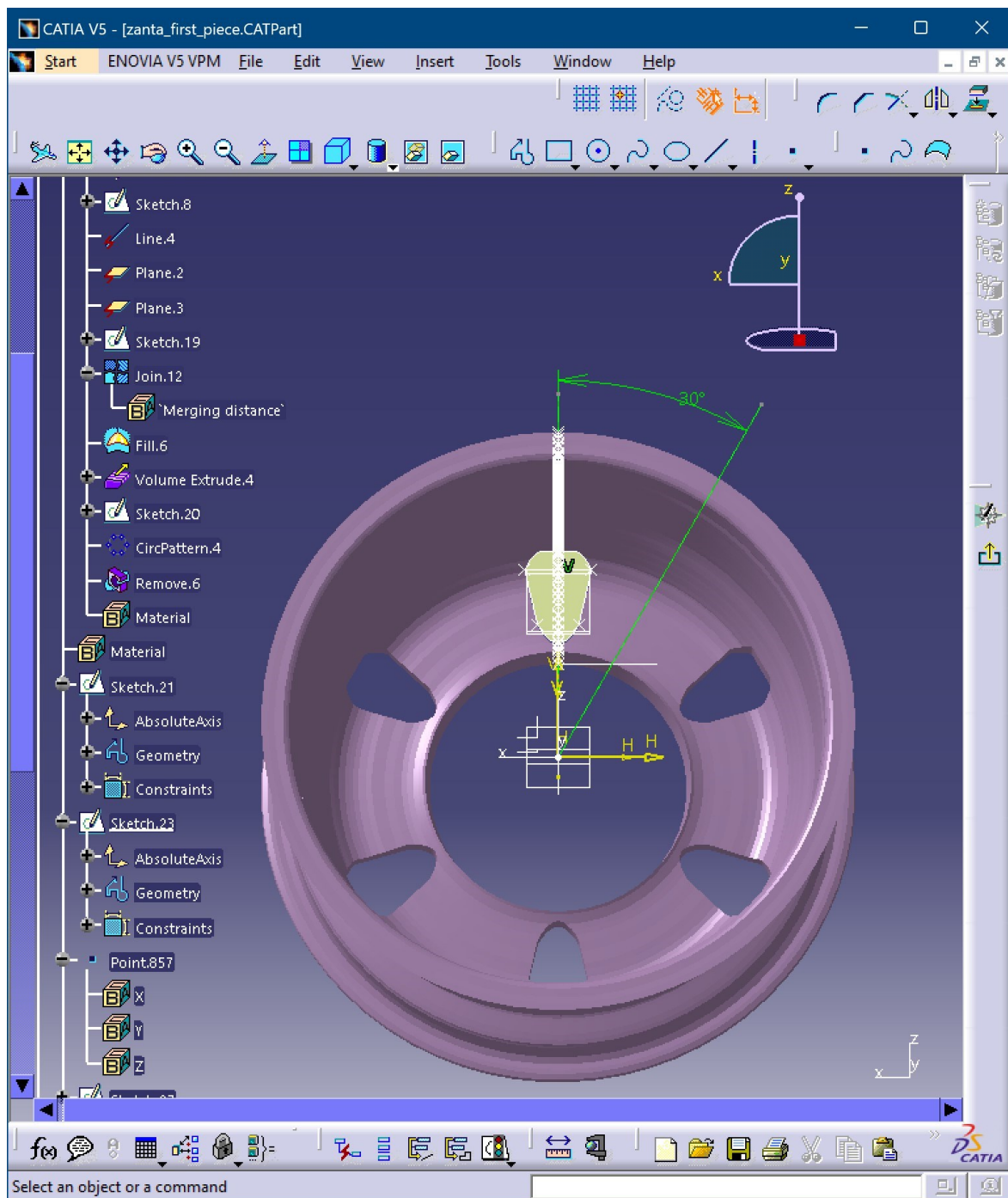
, όπου εξωθείται η παραπάνω «γεμισμένη» επιφάνεια και προκύπτει το Volume Extrude.6. Αφού γίνει αυτό, μέσω της εντολής **Circular Pattern** , κατασκευάζεται πρότυπο του παραπάνω όγκου γύρω από τη περιφέρεια της ζάντας, οπότε και προκύπτει το CircPattern.6. Τέλος πραγματοποιείται αφαίρεση των παραπάνω όγκων μέσω της εντολής

Remove , ώστε να προκύψουν οι οπές του δεύτερου περιγράμματος, όπου κατ' επέκταση προκύπτει το Remove.8. Στη συνέχεια προβάλλονται εικόνες, οι οποίες

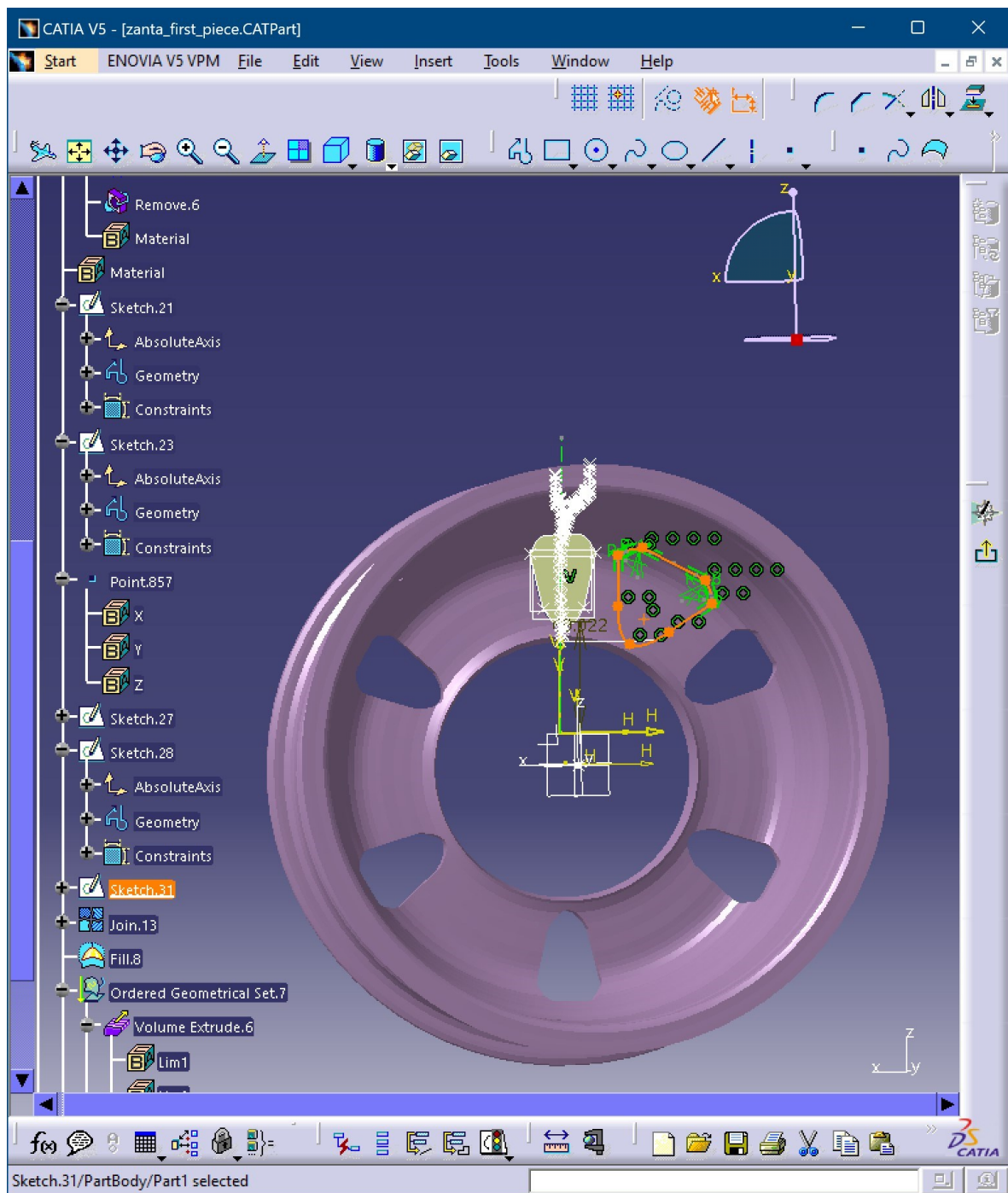
περιγράφουν την παραπάνω διαμόρφωση επάνω στην περιφέρεια της ζάντας, ενώ επίσης παρουσιάζεται η τελική μορφή του στερεού με εναπόθεση αλουμινένιου υλικού.



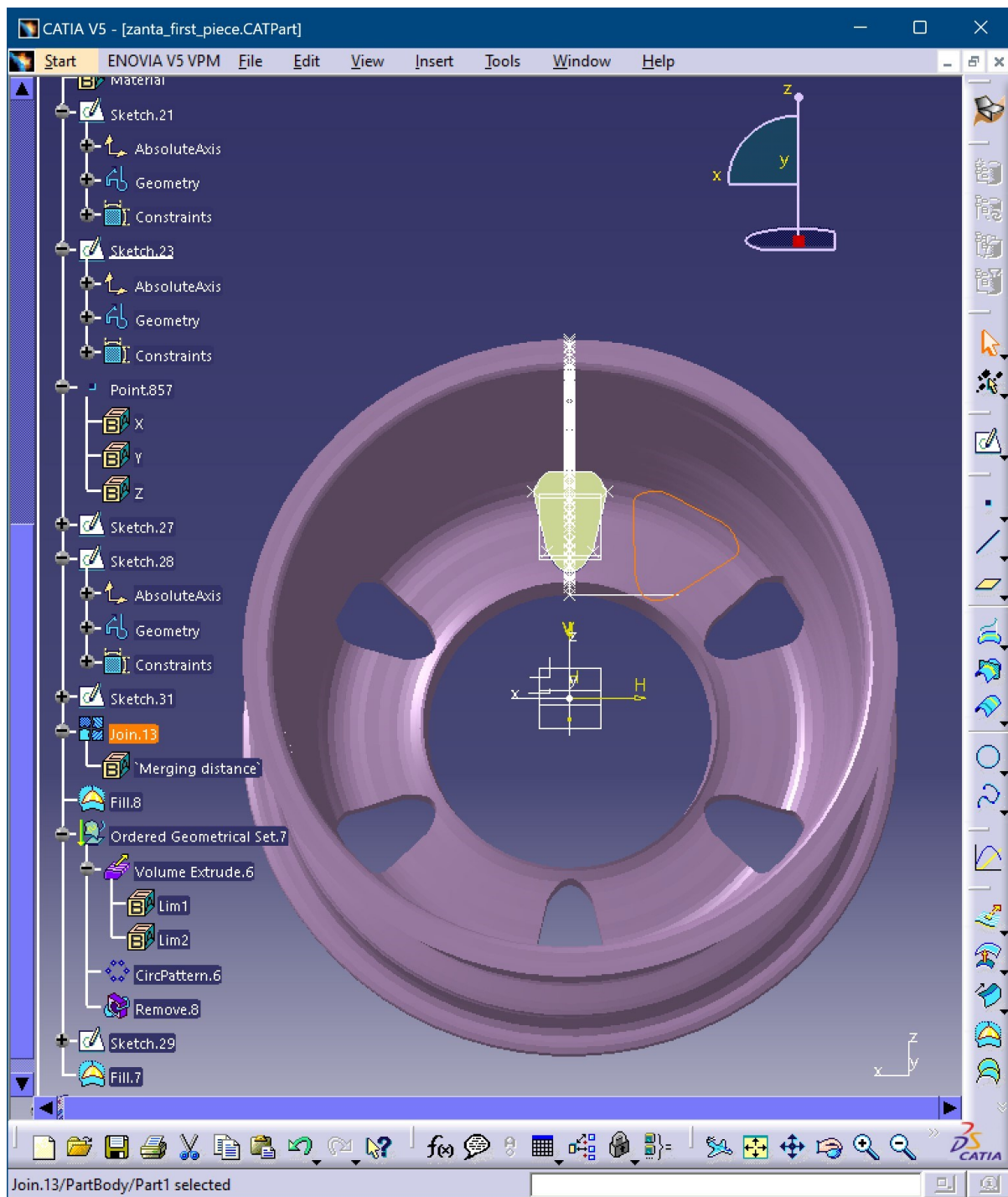
Εικόνα 2.28: Δημιουργία του Sketch.21.



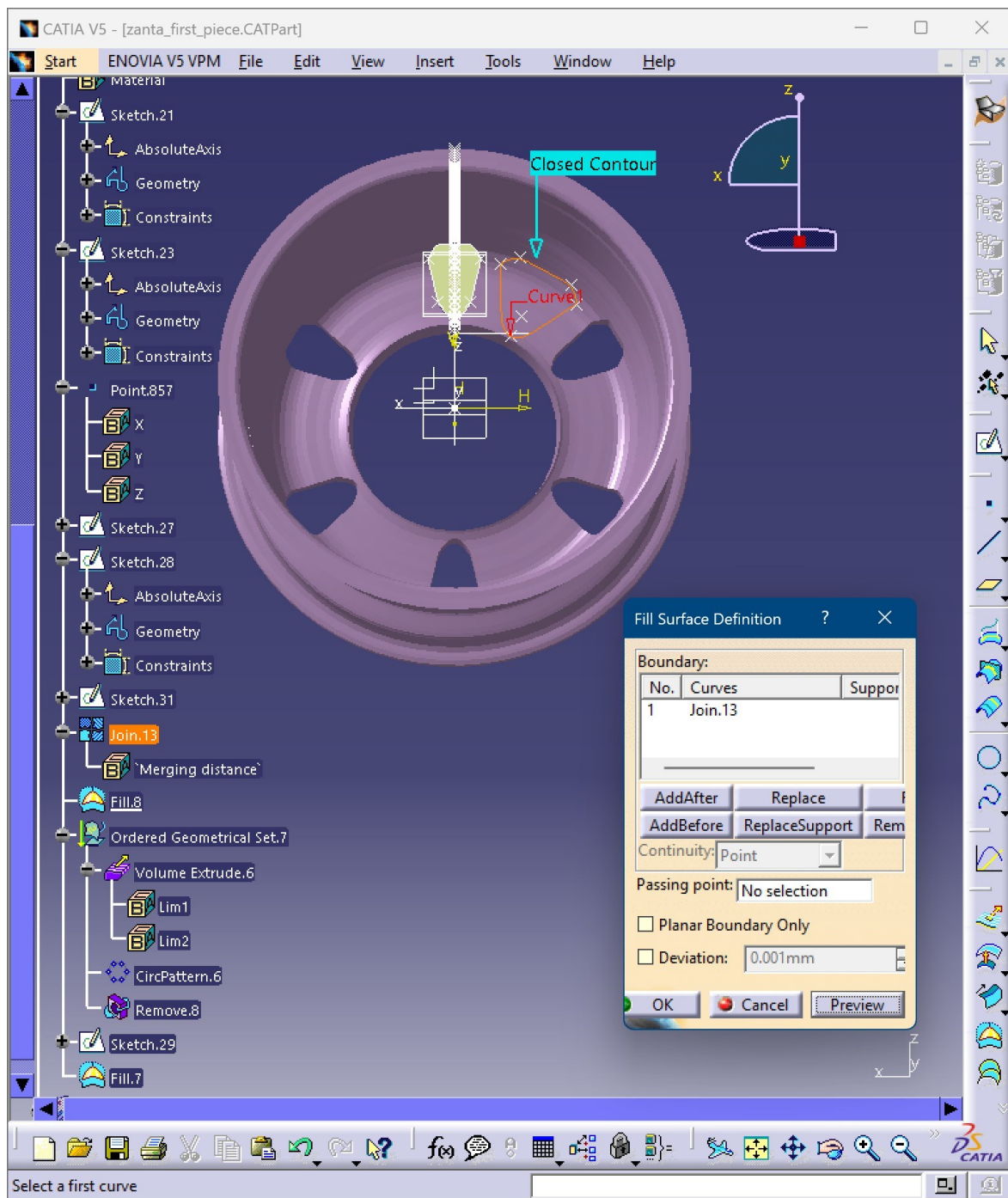
Εικόνα 2.29: Δημιουργία του Sketch.23.



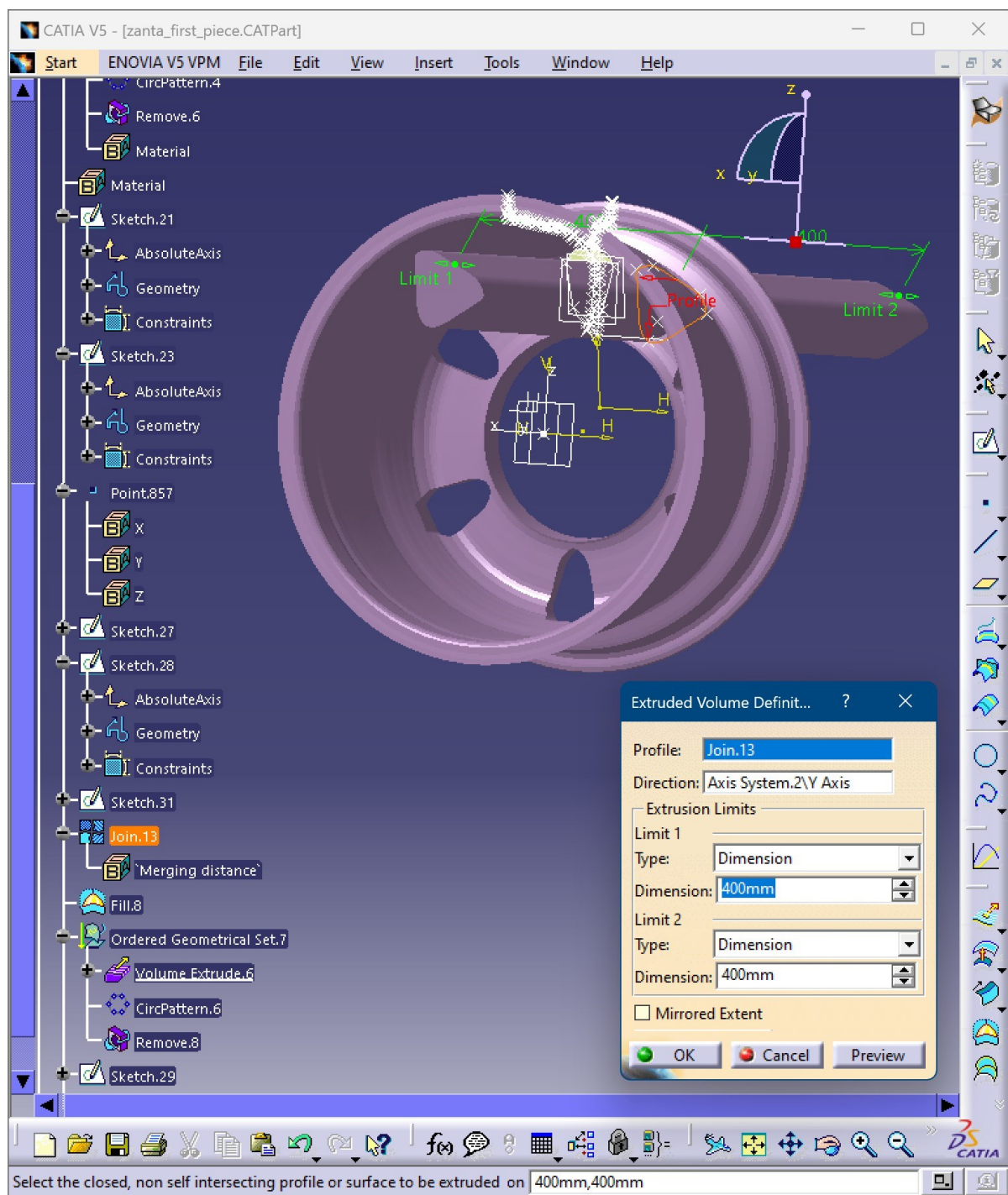
Εικόνα 2.30: Δημιουργία του Sketch.31.



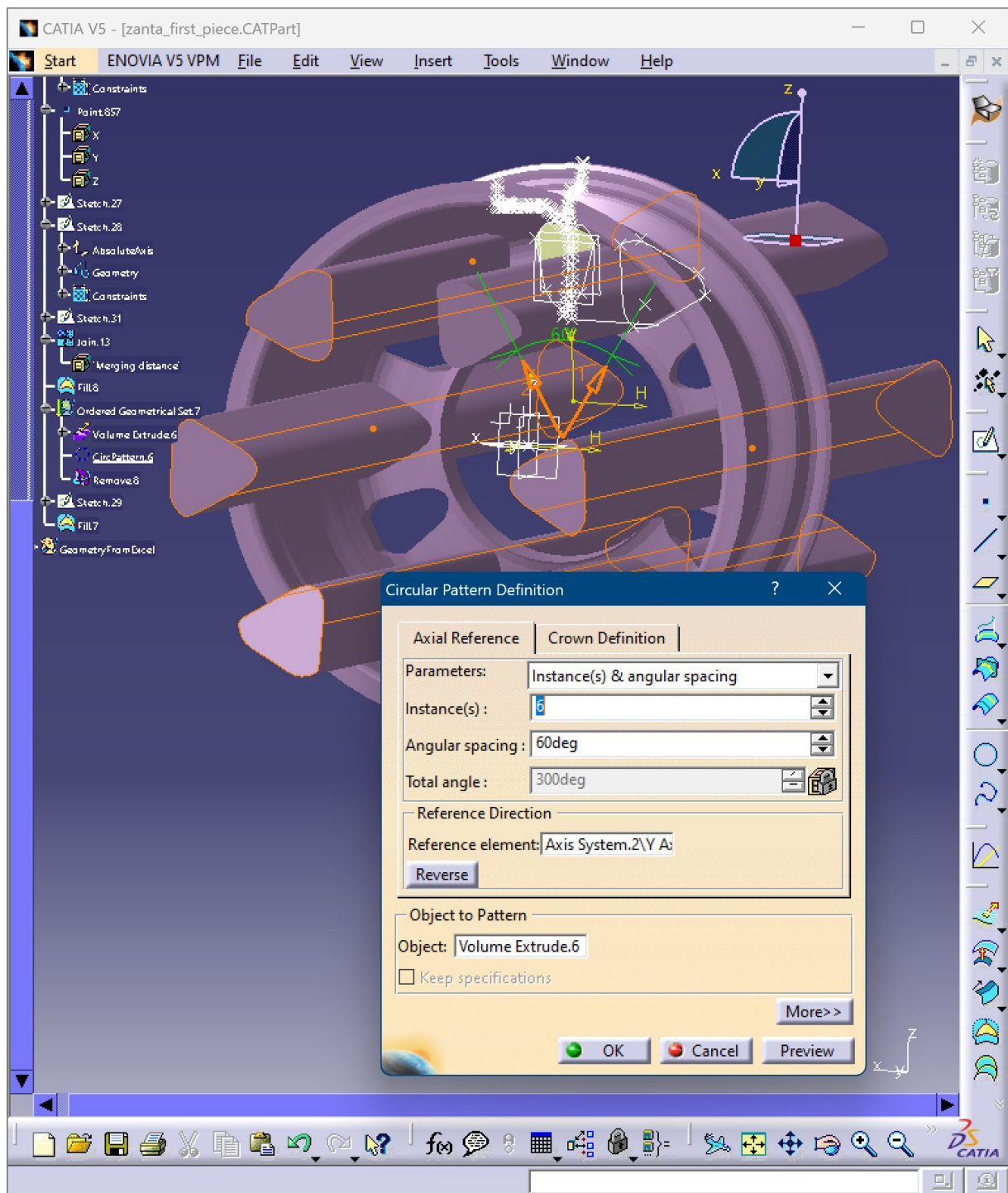
Εικόνα 2.31: Κατασκευή του Join.13.



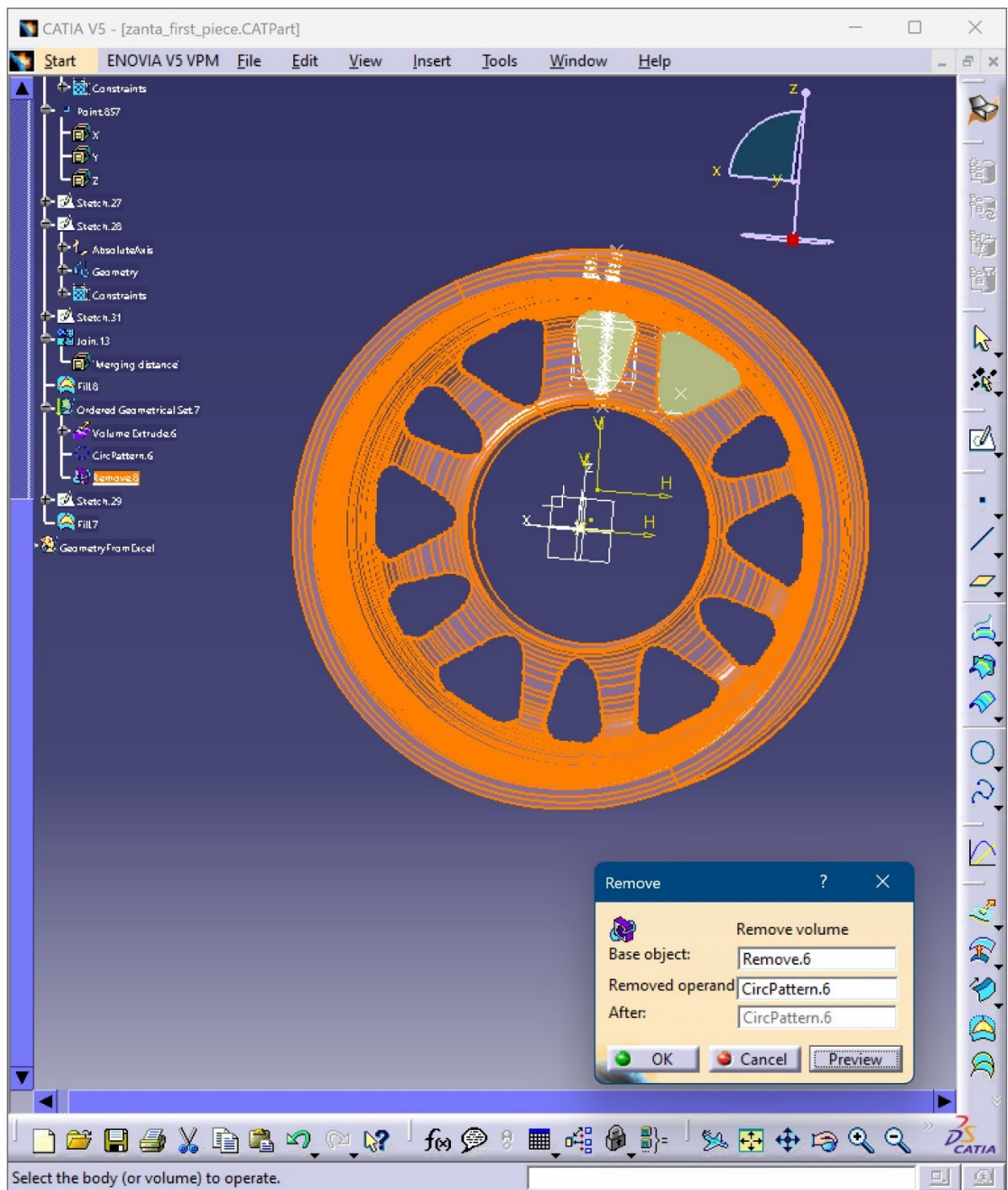
Εικόνα 2.32: Κατασκευή του Fill.8.



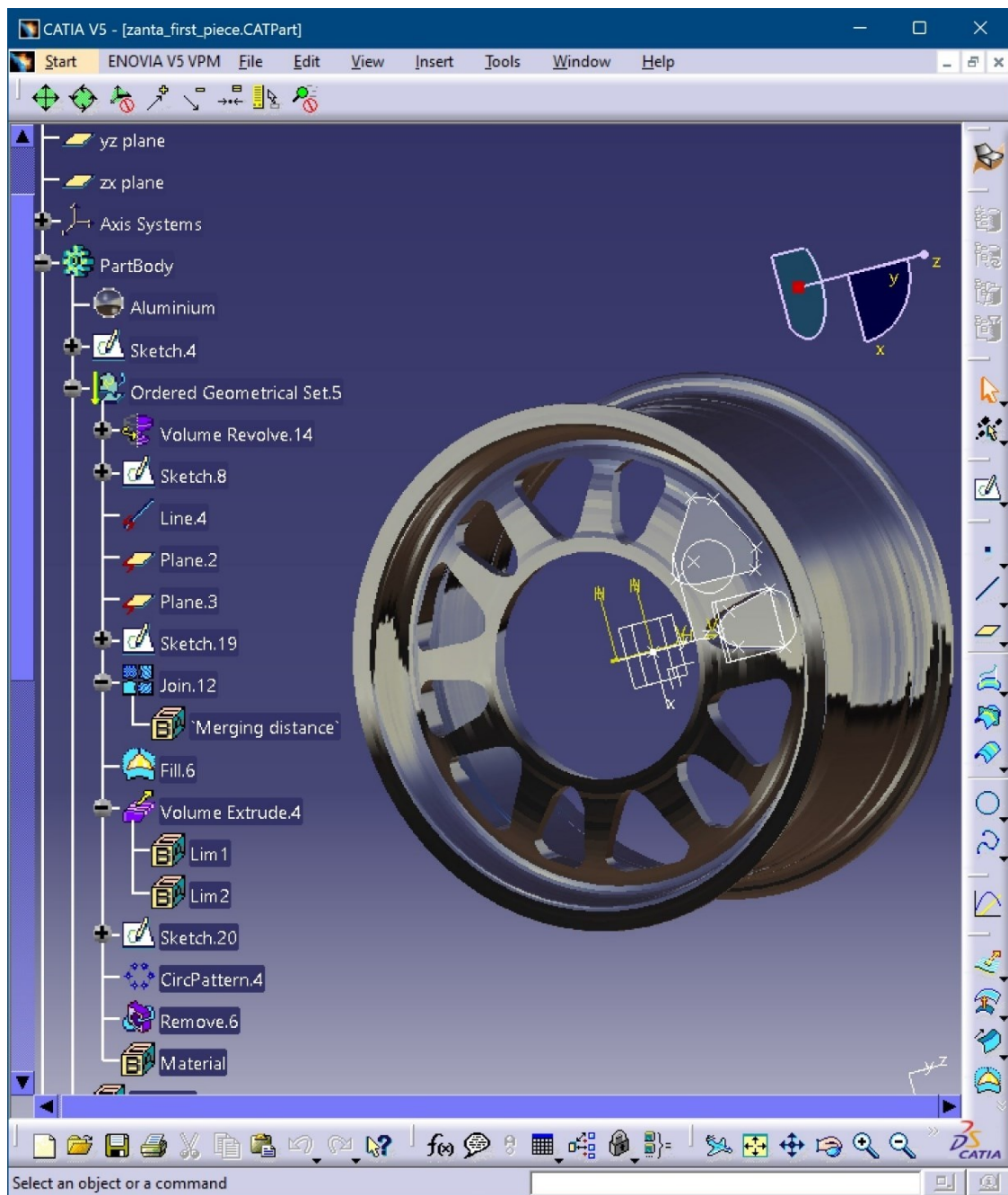
Εικόνα 2.33: Κατασκευή του Volume Extrude.6.



Εικόνα 2.34: Δημιουργία του CircPattern.6.



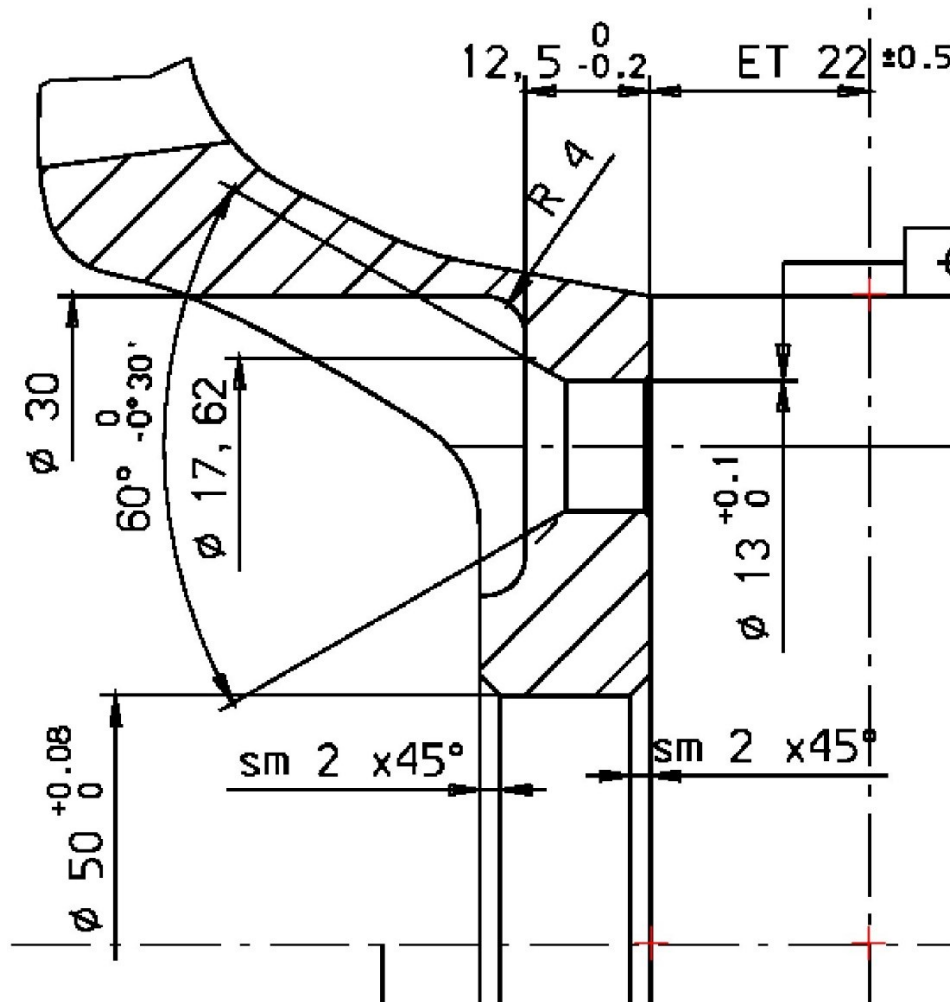
Εικόνα 2.35: Κατασκευή του Remove.8.



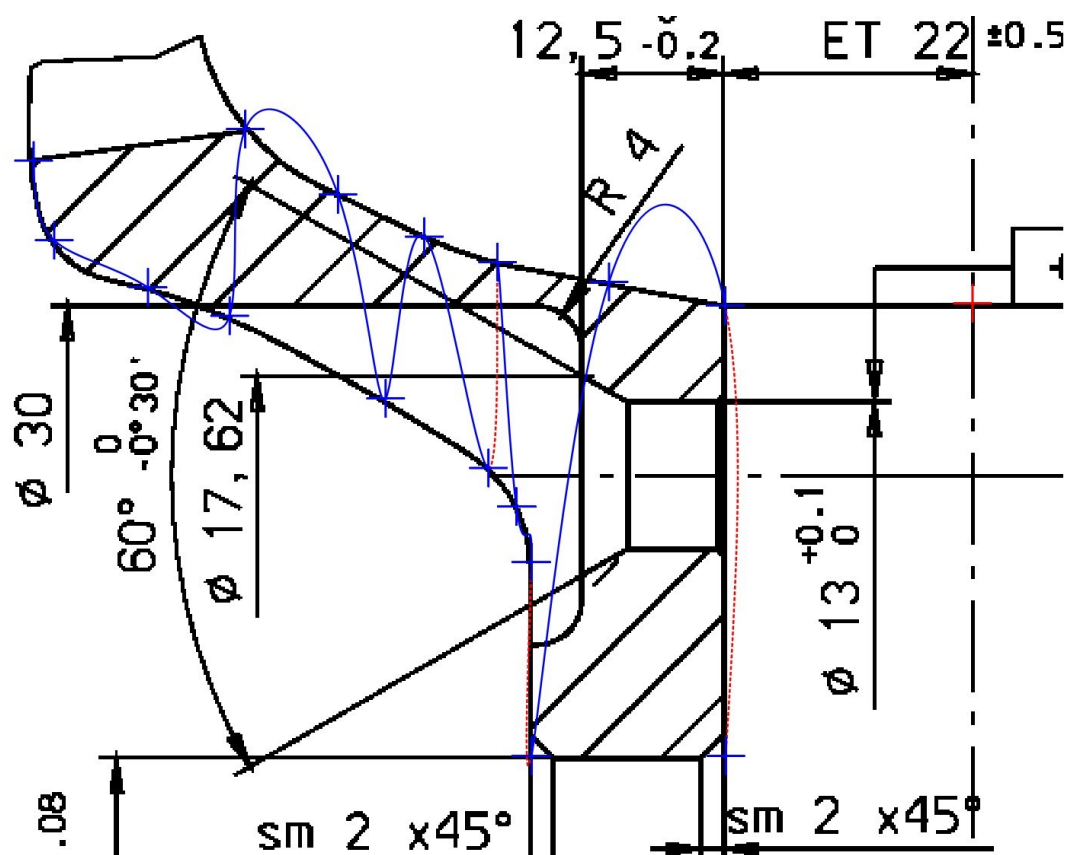
Εικόνα 2.36: Τελική μορφή στερεού σε αλουμινένια μορφή.

Έπειτα από την αναλυτική περιγραφή της δημιουργίας του πρώτου στερεού σώματος από το οποίο αποτελείται η ζάντα του τροχού, γίνεται μετάβαση στην αντίστοιχη περιγραφή του δεύτερου επιμέρους στερεού σώματος. Η διαδικασία που ακολουθείται, όπως και

προηγούμενως, έγκειται αρχικά στην τροφοδότηση σημείων ορισμένων συντεταγμένων στο CATIA, σημείων που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση που πραγματοποιή μέσω του λογισμικού Engauge Digitizer. Το αρχείο το οποίο διαθέτει τη σχεδίαση του δεύτερου στερεού σώματος στο CATIA λαμβάνει την ονομασία **zanta_second_piece.CATPart**. Εν συνεχεία παρατίθενται εικόνες που σκιαγραφούν τη σχετική διαδικασία.



Εικόνα 2.37: Θεώρηση αρχικών σημείων, με συντεταγμένες στο καρτεσιανό σύστημα, για το 1^ο σημείο: $x=0.0$ και $y=0.0$, 2^ο σημείο: $x=-22.0$ και $y=0.0$, 3^ο σημείο: $x=0.0$ και $y=65.0$. Τα σημεία είναι μαρκαρισμένα με κόκκινους σταυρούς.



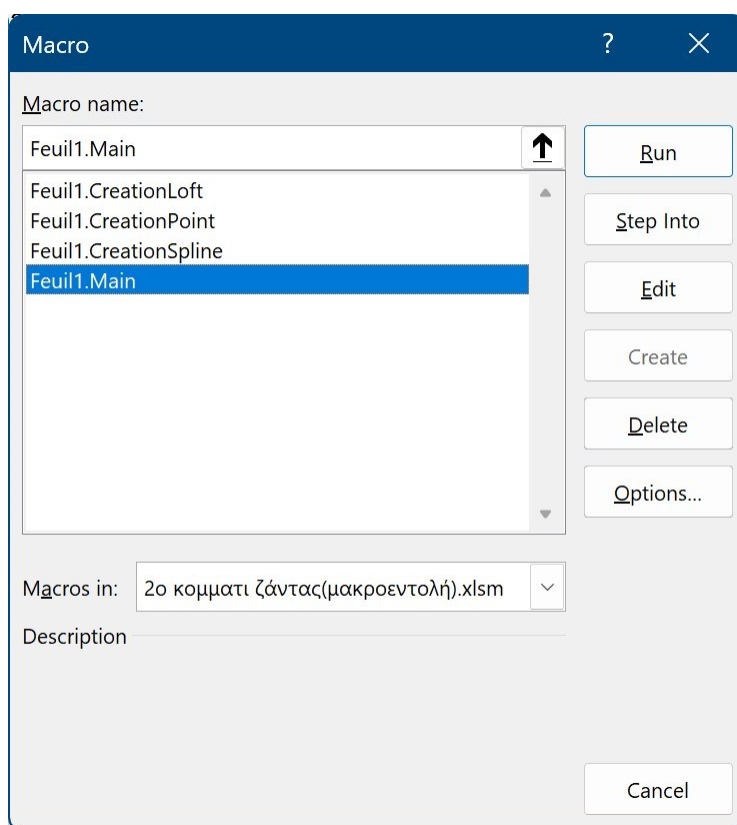
Εικόνα 2.38 Επιλογή σημείων προς ψηφιοποίηση, της δεξιάς όψης της ζάντας όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2.3. Τα σημεία μαρκάρονται με σταυρούς σε μπλε απόχρωση.

A	B
x	Curve1
-83.436	77.17
-81.601	70.146
-73.261	66.031
-65.997	63.562
-64.612	80.032
-56.378	74.318
-52.114	56.33
-48.683	70.626
-42.965	50.247
-42.173	68.419
-40.488	46.849
-39.193	41.954
-39.179	24.851
-32.328	66.709
-21.999	64.681
-21.913	24.935

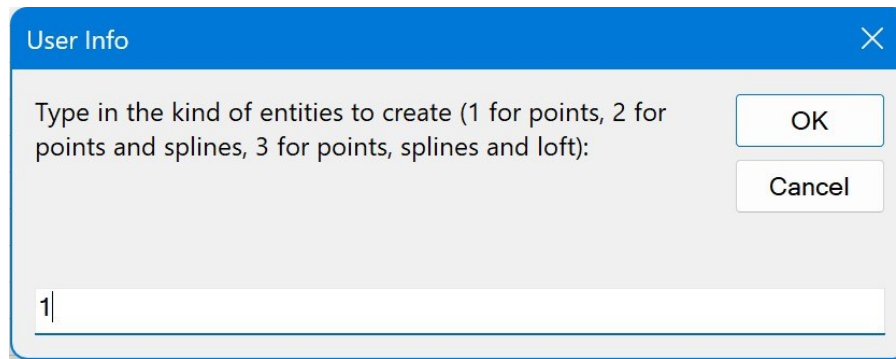
Εικόνα 2.39: Εξαγωγή των συντεταγμένων των ψηφιοποιημένων σημείων σε φύλλο του Excel.

	A	B	C
1	StartLoft		
2	StartCurve		
3	0	-83.436	77.17
4	0	-81.601	70.146
5	0	-73.261	66.031
6	0	-65.997	63.562
7	0	-64.612	80.032
8	0	-56.378	74.318
9	0	-52.114	56.33
10	0	-48.683	70.626
11	0	-42.965	50.247
12	0	-42.173	68.419
13	0	-40.488	46.849
14	0	-39.193	41.954
15	0	-39.179	24.851
16	0	-32.328	66.709
17	0	-21.999	64.681
18	0	-21.913	24.935
19			
20	EndCurve		
21	EndLoft		
22	End		

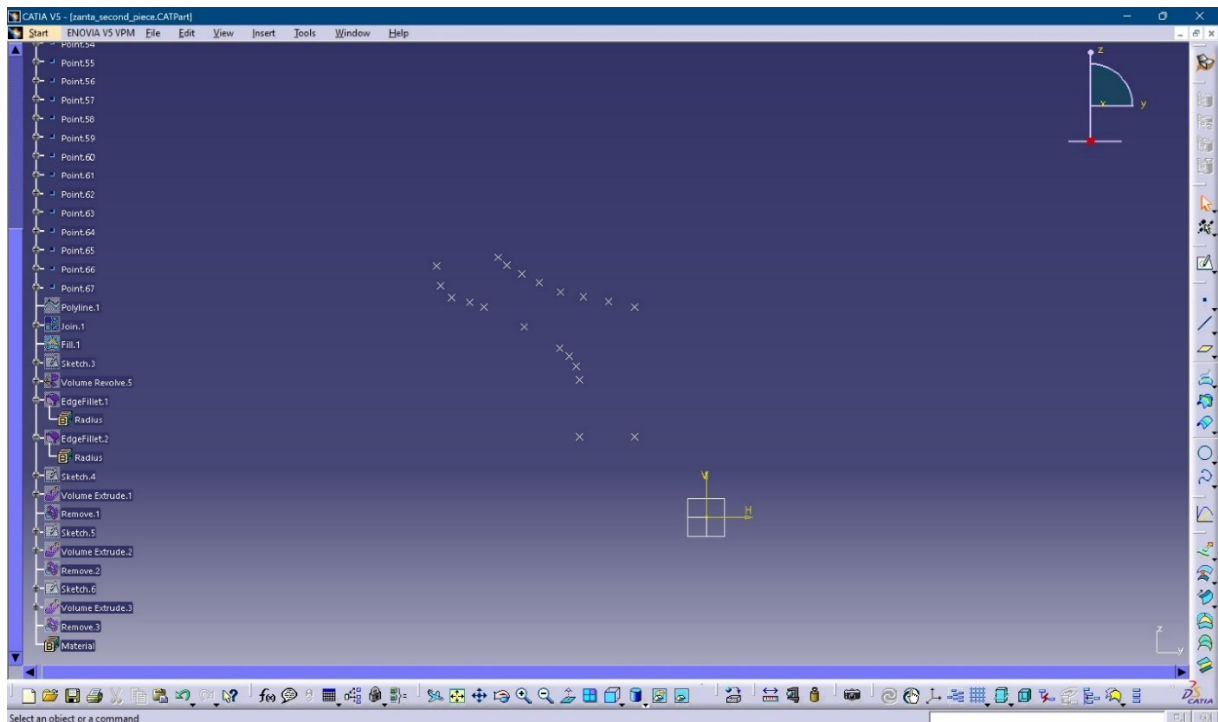
Εικόνα 2.40: Καταχώρηση των συντεταγμένων των σημείων σε φύλλο του Excel.







Εικόνα 2.41: Επιλογή της μακροεντολής «Feuil1.Main», με αναφορά στο αρχείο του Excel ονόματι 2^ο κομμάτι ζάντας (μακροεντολή).xlsm.



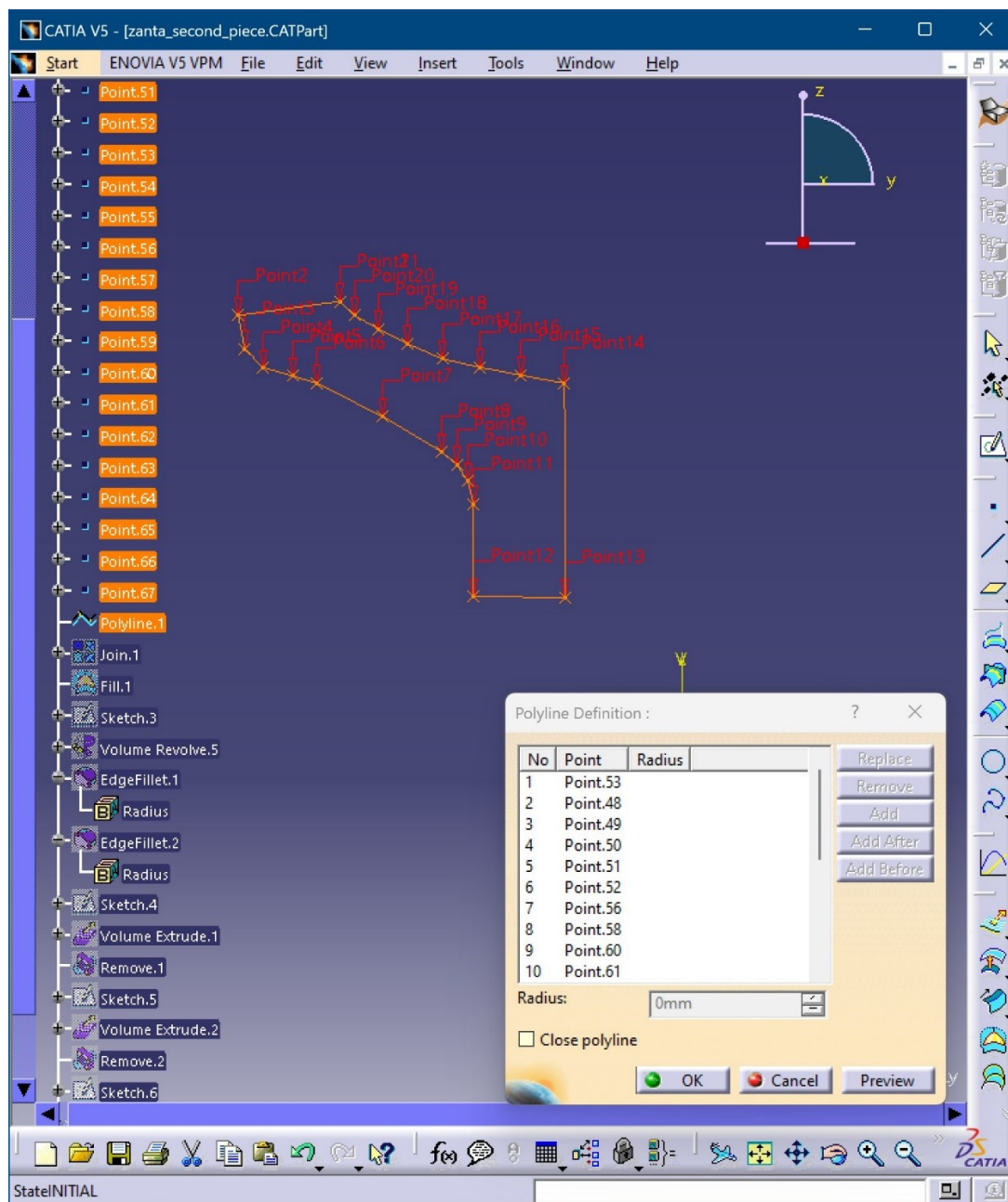
Εικόνα 2.42: Καταχώρηση της επιλογής «1», ώστε στο CATIA να μεταφερθούν τα ψηφιοποιημένα σημεία.



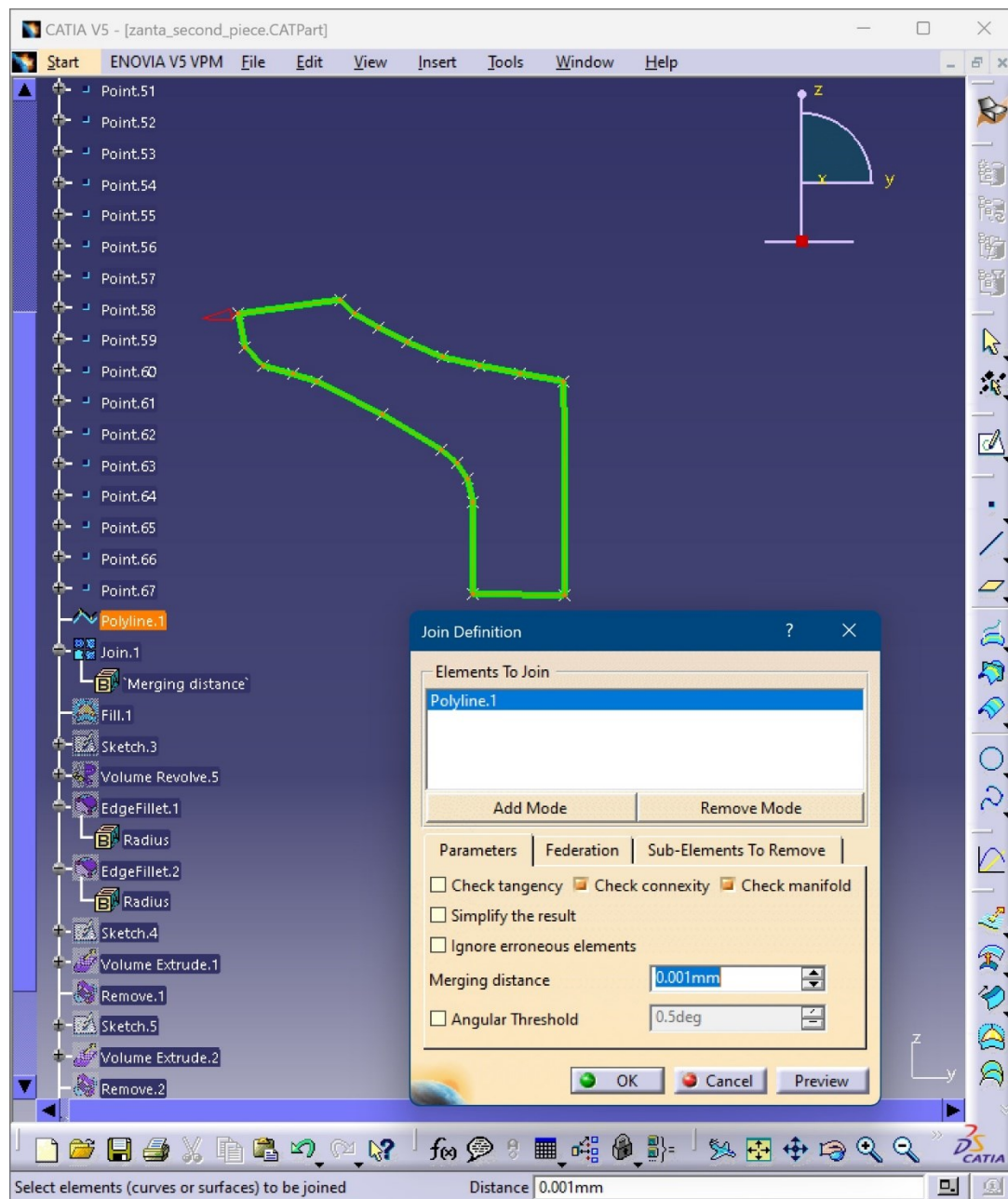
Εικόνα 2.43: Εναπόθεση των ψηφιοποιημένων σημείων στο CATIA.

Εν συνεχεία, παρατίθενται τα βήματα που εκτελούνται στο CATIA ώστε να παραχθεί και το δεύτερο στερεό σώμα από το οποίο αποτελείται η ζάντα του τροχού. Αρχικά, γίνεται χρήση της εντολής **Polyline** , οπότε ενώνονται τα ψηφιοποιημένα σημεία και προκύπτει η Polyline.1. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η εντολή **Join** , που ενοποιεί το περίγραμμα που παράχθηκε και κατασκευάζεται το Join.1. Ακολούθως, εφαρμόζεται η εντολή **Fill** , οπότε και «γεμίζει» το περίγραμμα, με αποτέλεσμα να προκύπτει το Fill.1. Έπειτα, σχεδιάζονται κάθετοι άξονες μεταξύ τους μέσω της εντολής **Sketch** , οπότε και σχηματίζεται το Sketch.3. Τέλος, γίνεται περιστροφή του παραπάνω περιγράμματος μέσω

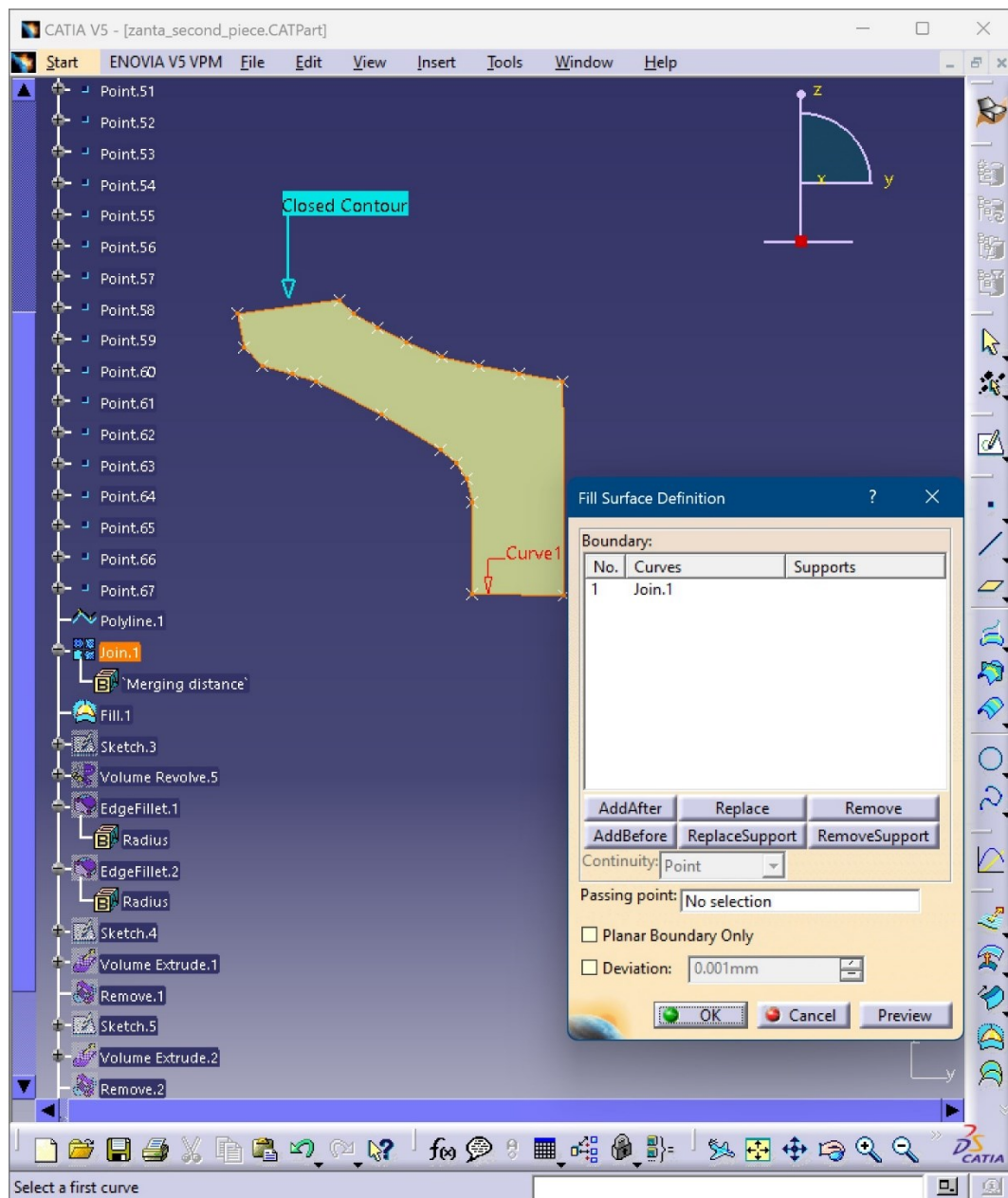
της εντολής **Volume Revolve**, οπότε δημιουργείται το Volume Revolve.6. Η διαδικασία που αναφέρθηκε, απεικονίζεται παρακάτω.



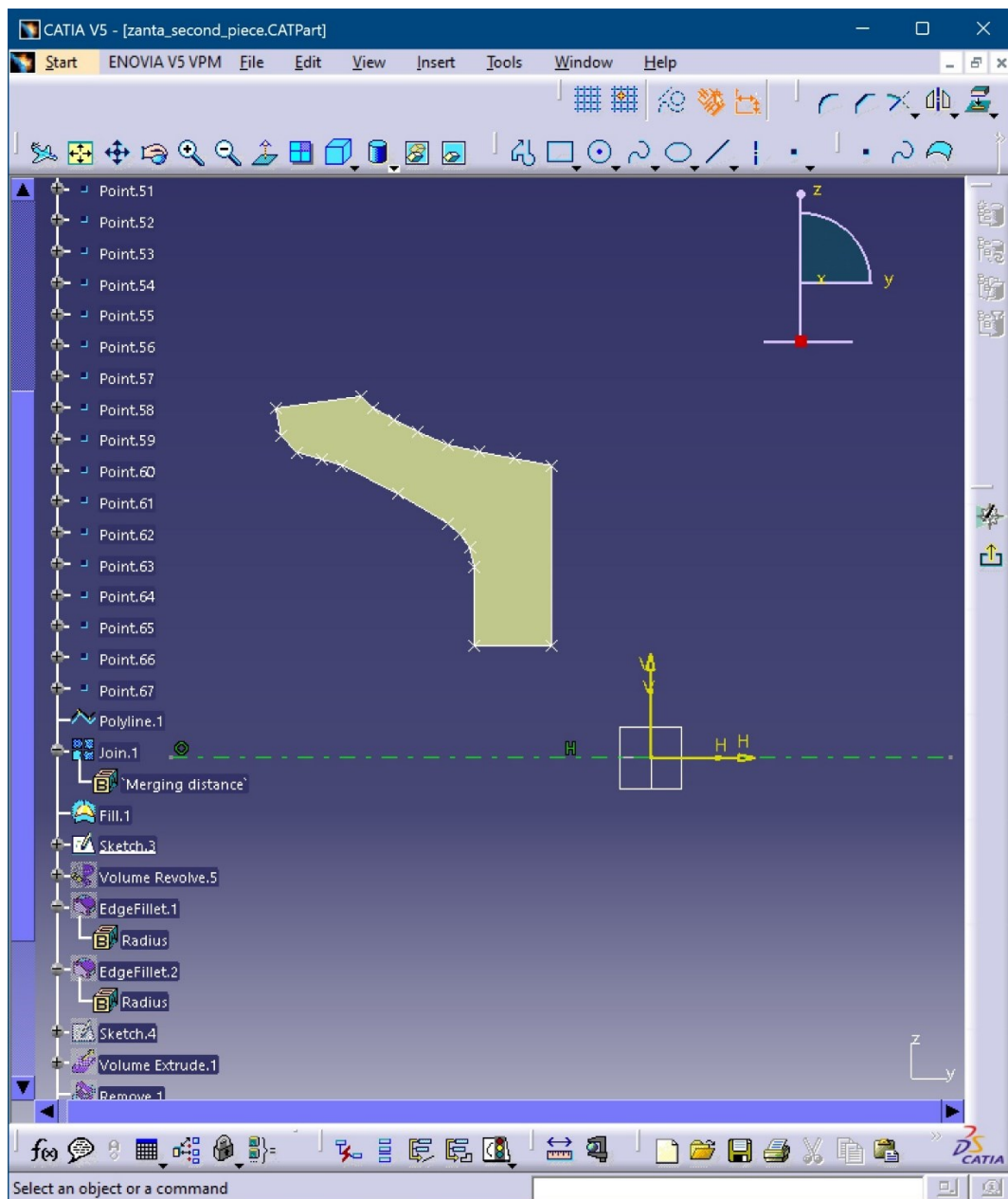
Εικόνα 2.44: Κατασκευή της Polyline.1.



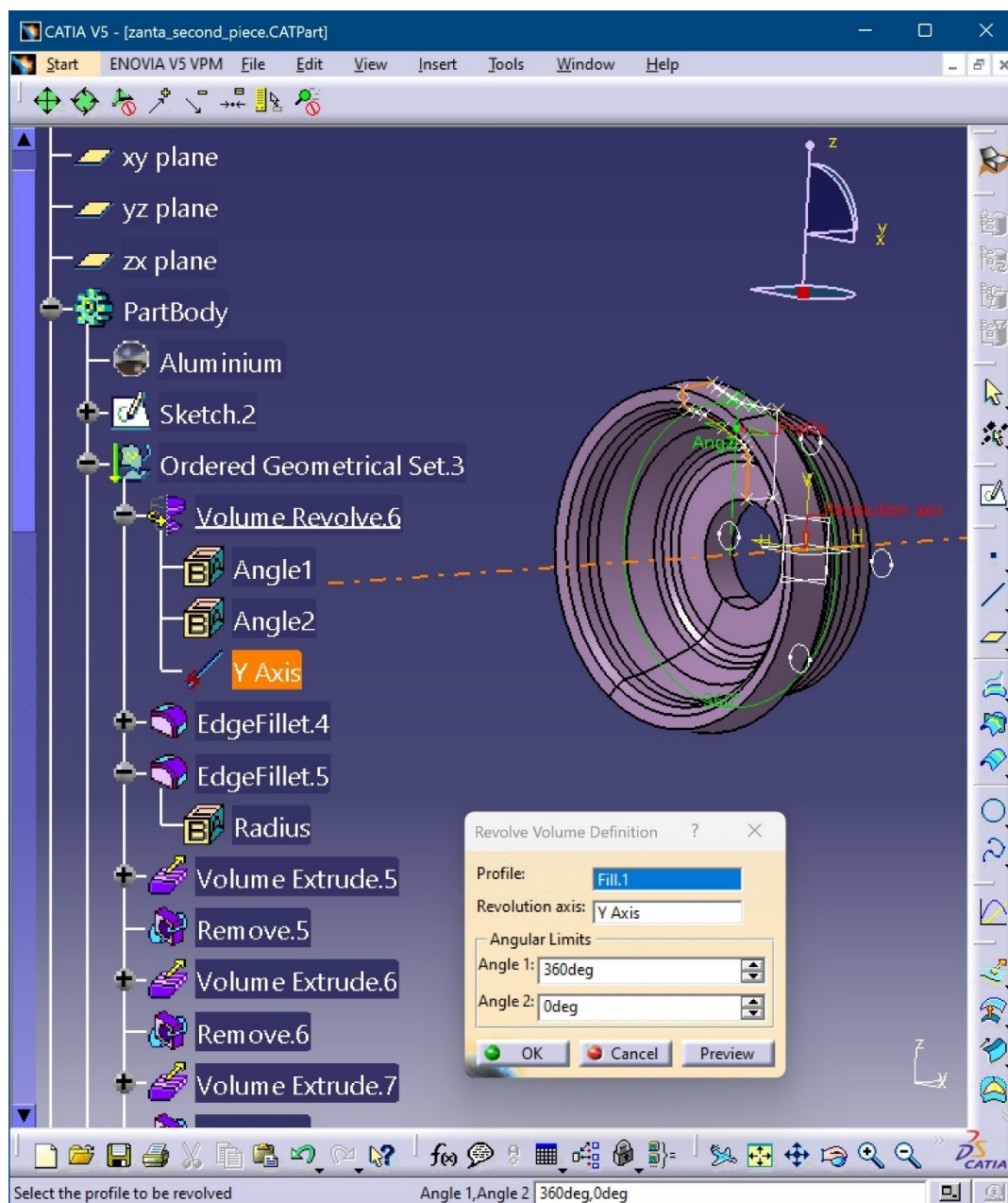
Εικόνα 2.45: Κατασκευή του Join.1.





Εικόνα 2.46: Δημιουργία του Fill.1.











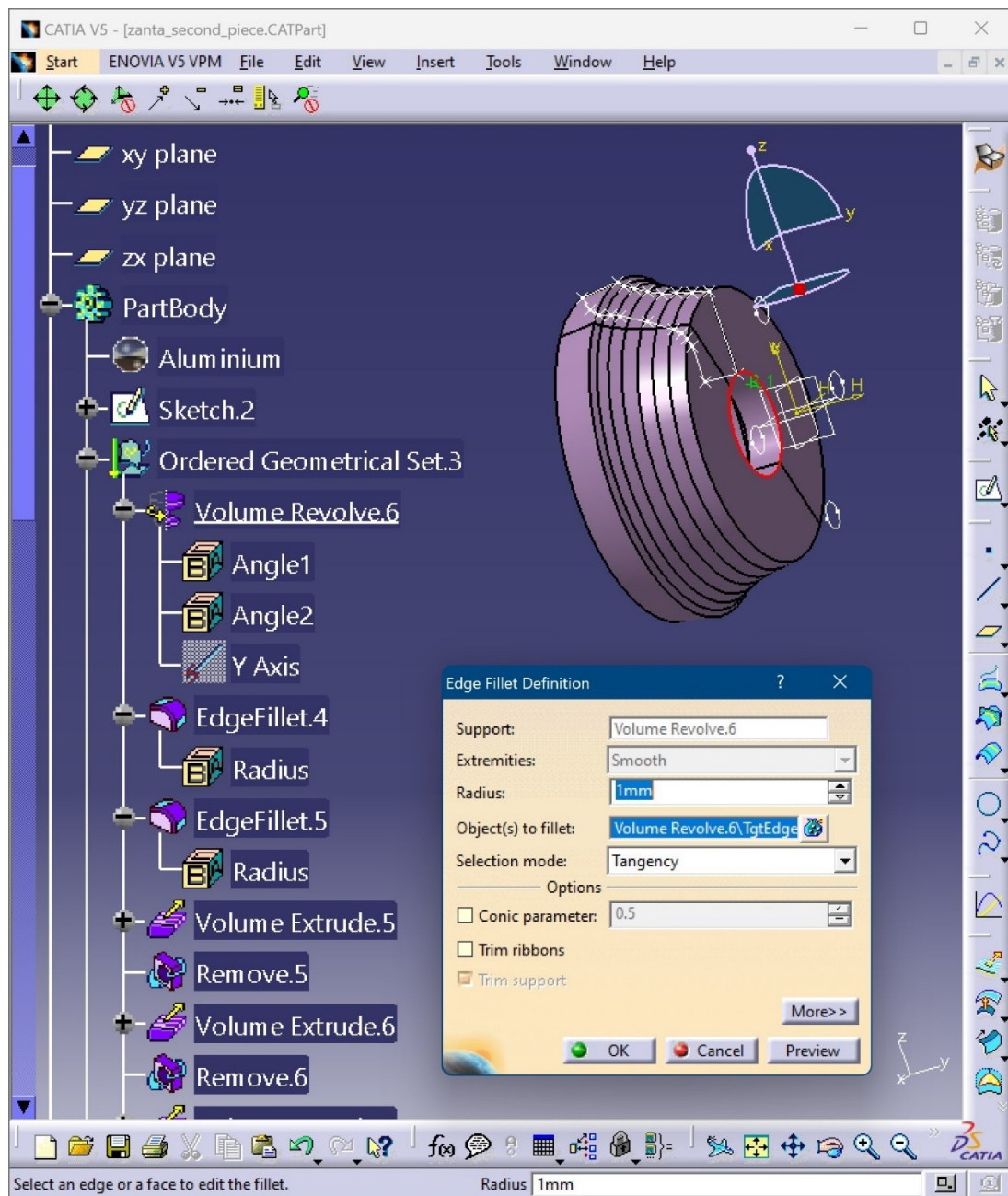
Εικόνα 2.47: Κατασκευή του Sketch.3.



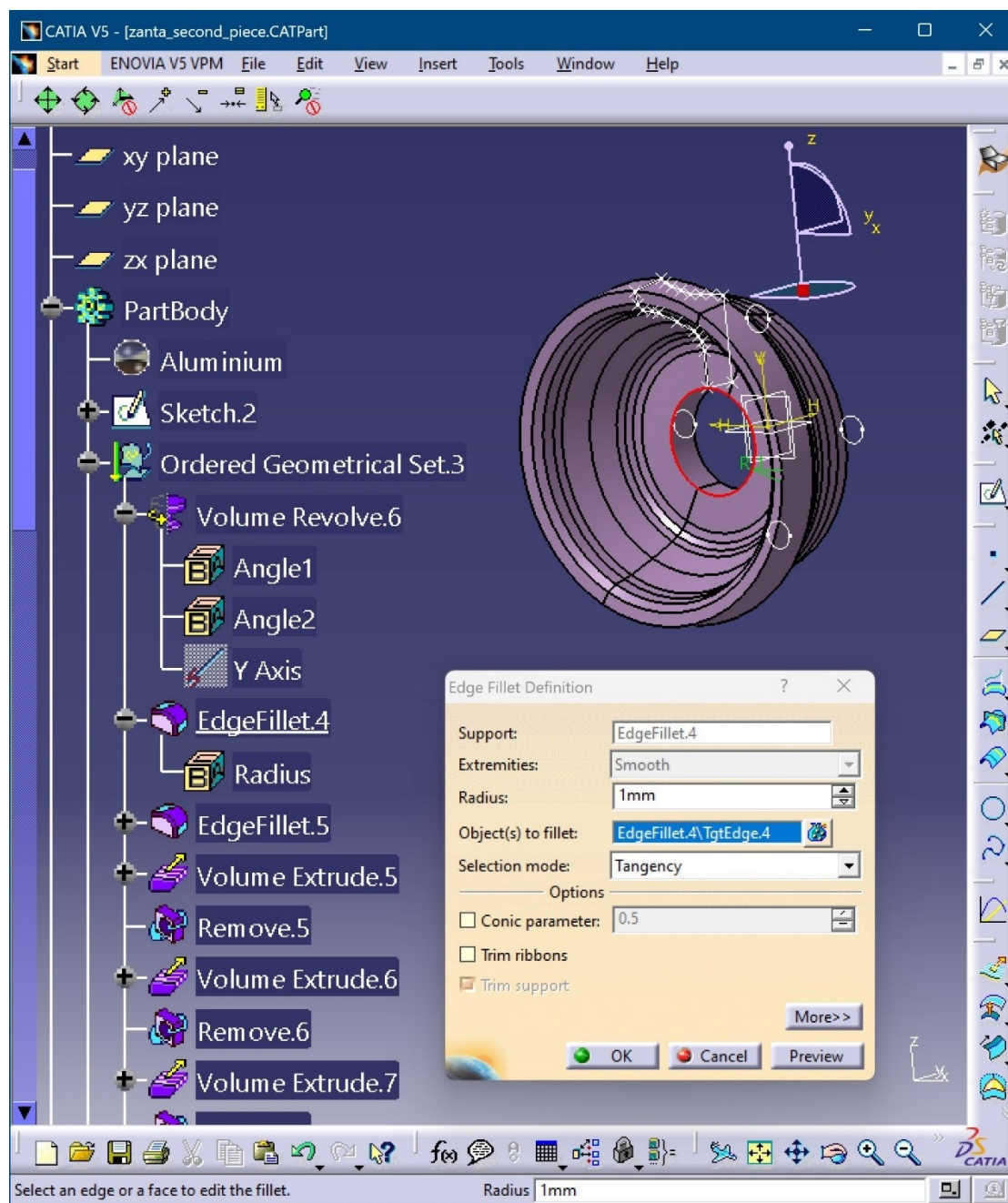
Εικόνα 2.48: Δημιουργία του Volume Revolve.6.

Ακολούθως, εφαρμόζονται οι υπόλοιπες εντολές, που συντελούν στη κατασκευή του δεύτερου επιμέρους στερεού σώματος της ζάντας του τροχού. Σε πρώτη φάση, «φιλετάρονται» ορισμένες περιοχές του στερεού με χρήση της εντολής **EdgeFillet** , οπότε και προκύπτουν οι στερεές διαμορφώσεις EdgeFillet.4 και EdgeFillet.5. Ύστερα δημιουργείται ένα πρότυπο (pattern) τεσσάρων αντιδιαμετρικών οπών στην περιφέρεια του στερεού με διαστάσεις που προκύπτουν από την πρόοψη της **Εικόνα 2.3** και τη χρήση του αρχείου **OZ_Drawing_Formula_Student_Alluminium_CL_4H** σε «.dxf» μορφή στο CATIA, όπου όπως προαναφέρθηκε αποθηκεύεται ως **zanta_CATDrawing1.CATDrawing**. Αρχικά, χρησιμοποιείται η εντολή **Sketch** , ώστε να κατασκευαστεί η διαμόρφωση Sketch.4.

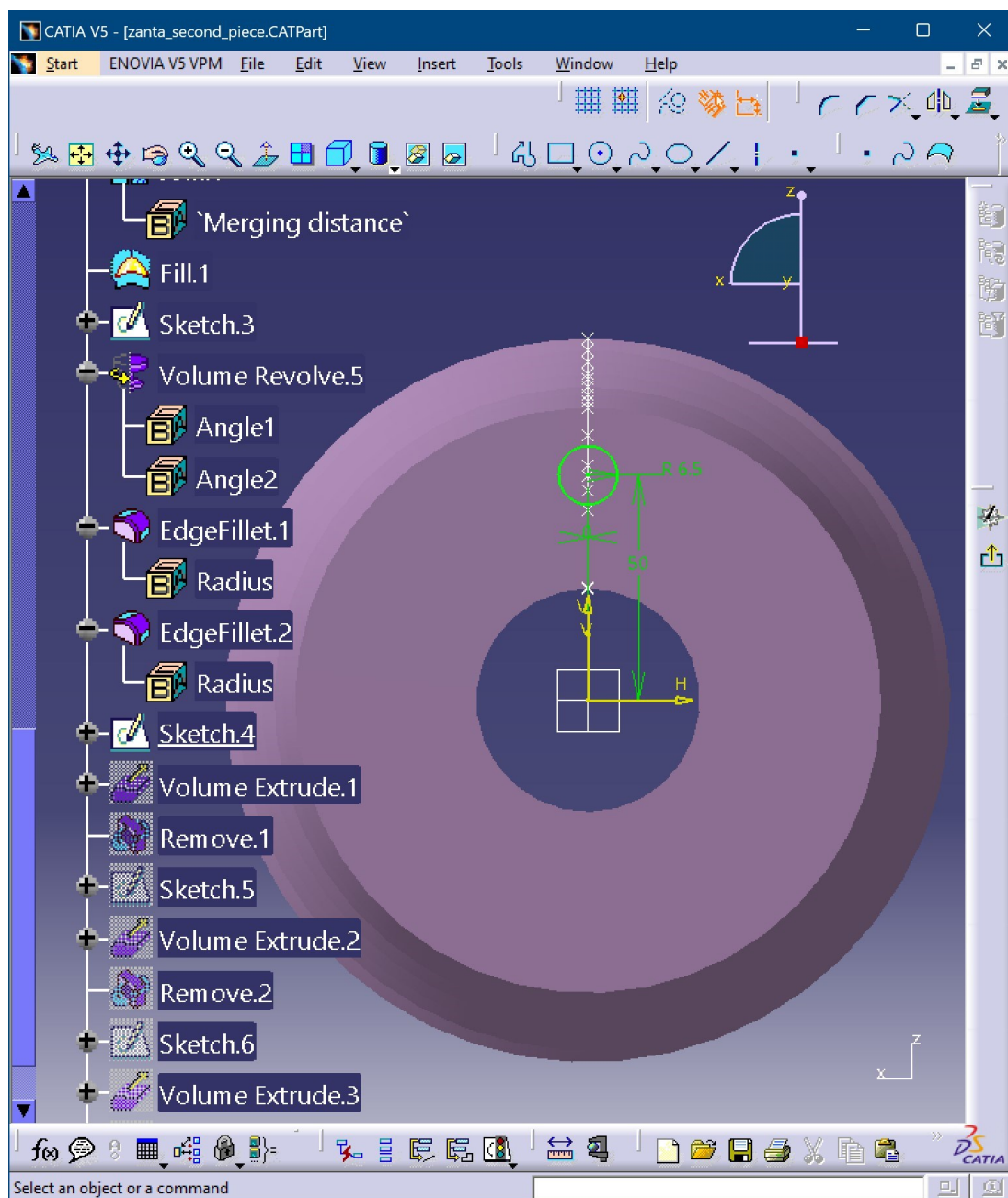
Έπειτα, γίνεται εξώθηση του περιγράμματος αυτού μέσω της εντολής **Volume Extrude** , για να δημιουργηθεί το Volume Extrude.5. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η εντολή **Remove** , οπότε δημιουργείται η σπή και προκύπτει το Remove.5. Σε επόμενη φάση δημιουργείται μέσω της εντολής **Sketch** , το Sketch.5, όπου με επακόλουθη χρήση των εντολών **Volume Extrude**  και **Remove** , προκύπτουν τα Volume Extrude.6 και Remove.6, αντίστοιχα. Τέλος σε αντιστοιχία με τα παραπάνω, με εφαρμογή και πάλι των εντολών **Sketch** , **Volume Extrude**  και **Remove** , εντέλει κατασκευάζονται σε ακολουθία οι στερεές διαμορφώσεις Sketch.6, Volume Extrude.7 και Remove.7. Η προαναφερθείσα διαδικασία αποτυπώνεται στη συνέχεια, καθώς επίσης παρουσιάζεται η τελική μορφή του στερεού σε αλουμινένια μορφή.



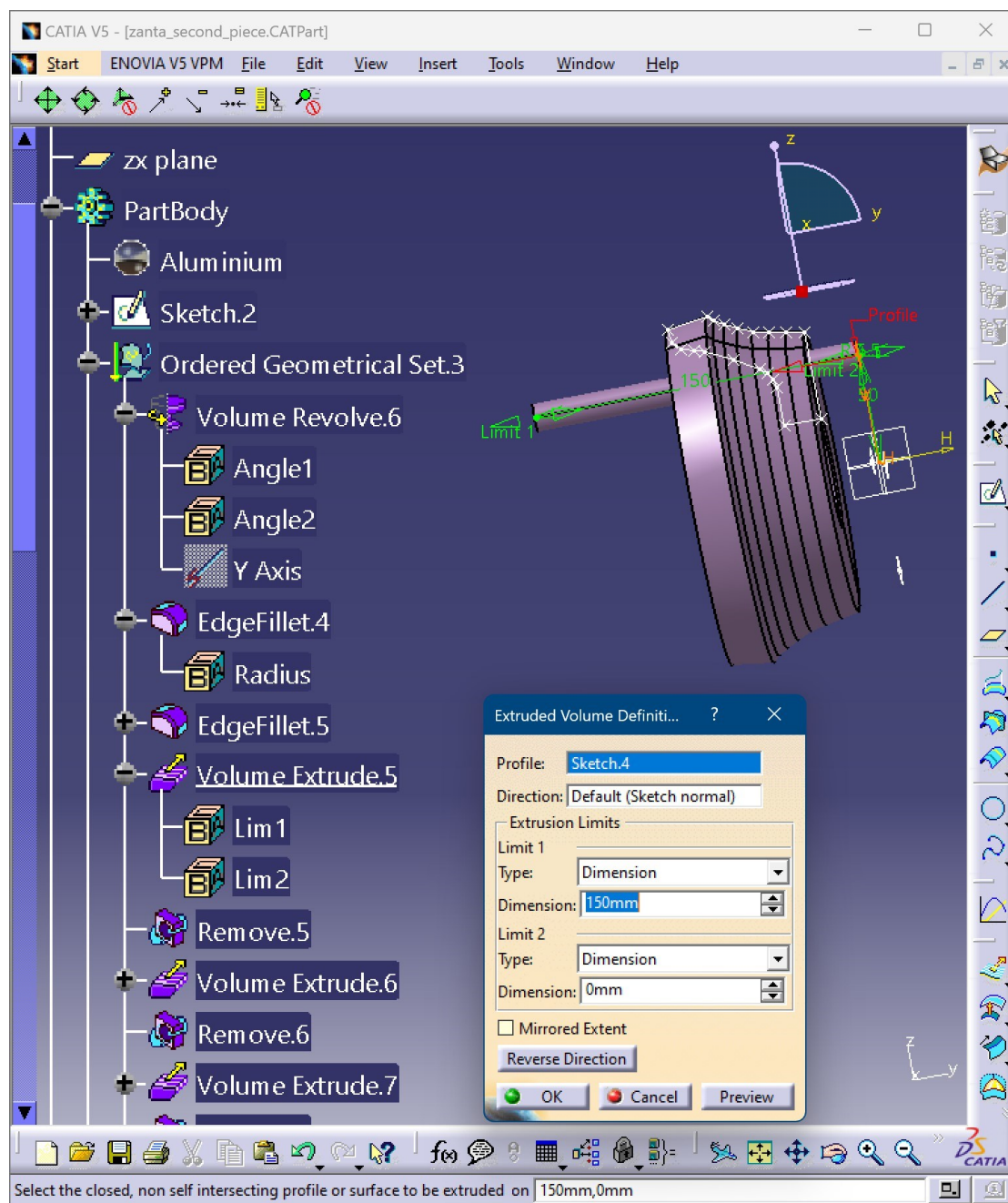
Εικόνα 2.49: Δημιουργία του EdgeFillet.4.



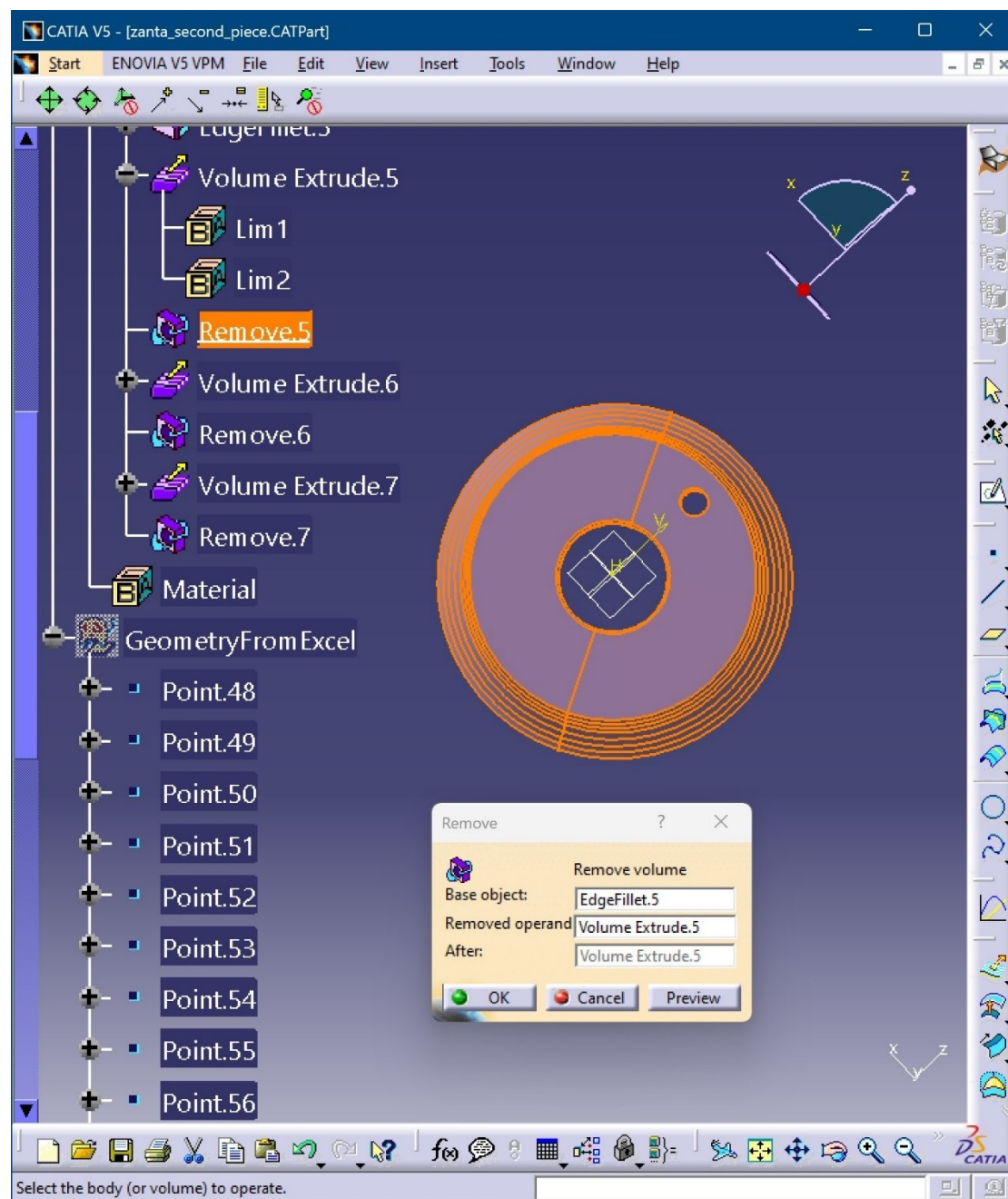
Εικόνα 2.50: Δημιουργία του EdgeFillet.5.



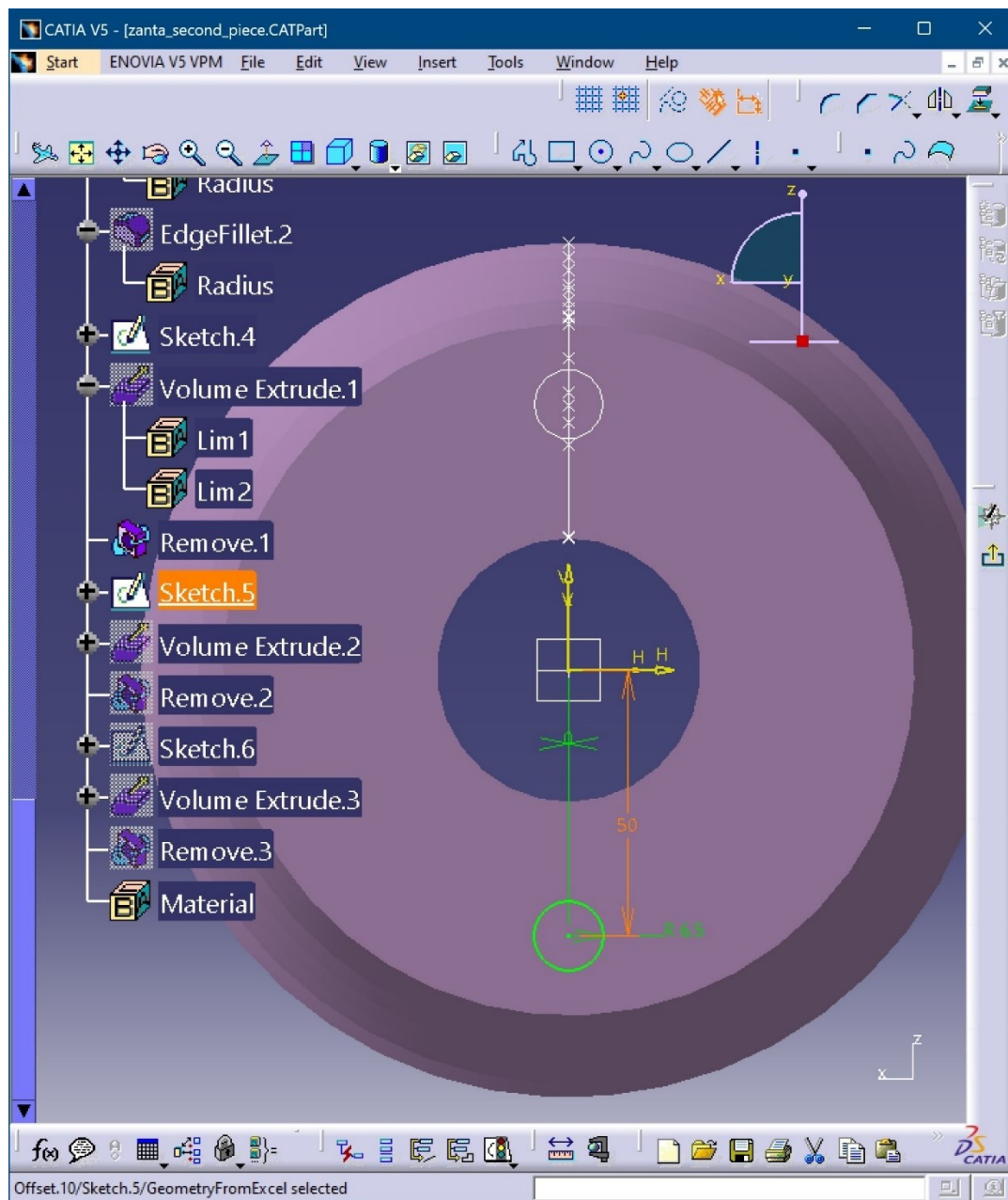
Εικόνα 2.51: Σχεδίαση του Sketch.4.



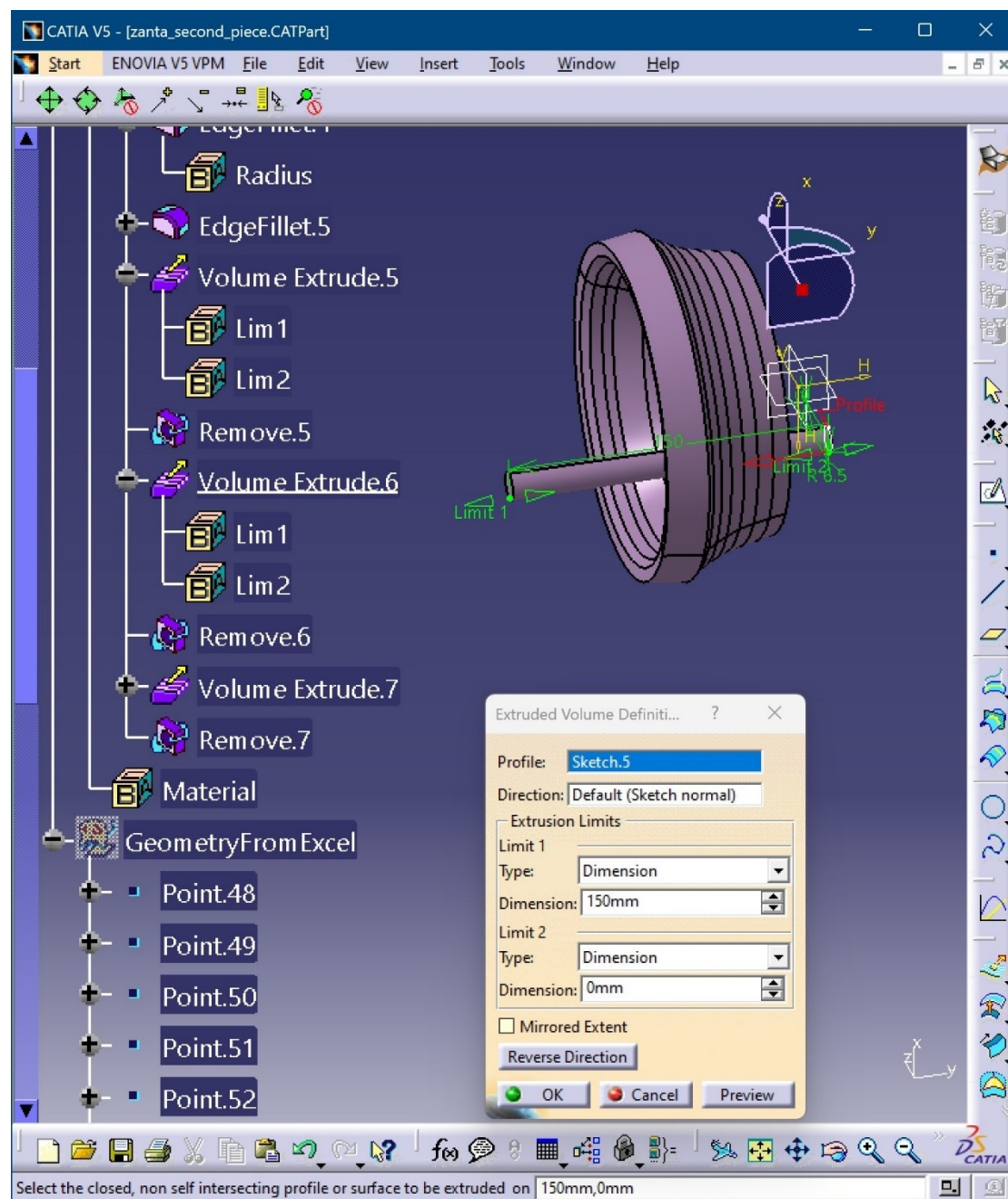
Εικόνα 2.52: Κατασκευή του Volume Extrude.5.



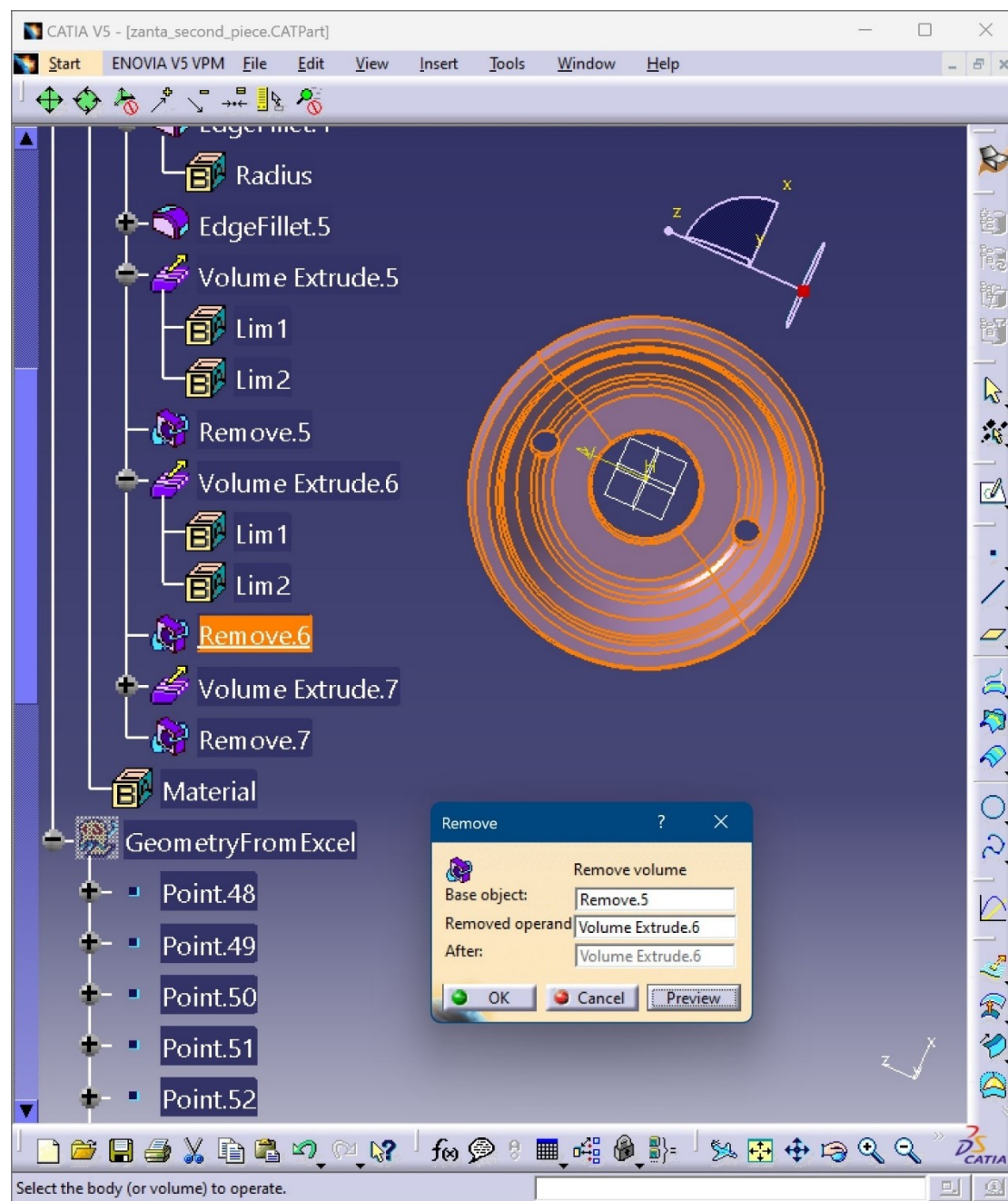
Εικόνα 2.53: Κατασκευή του Remove.5.



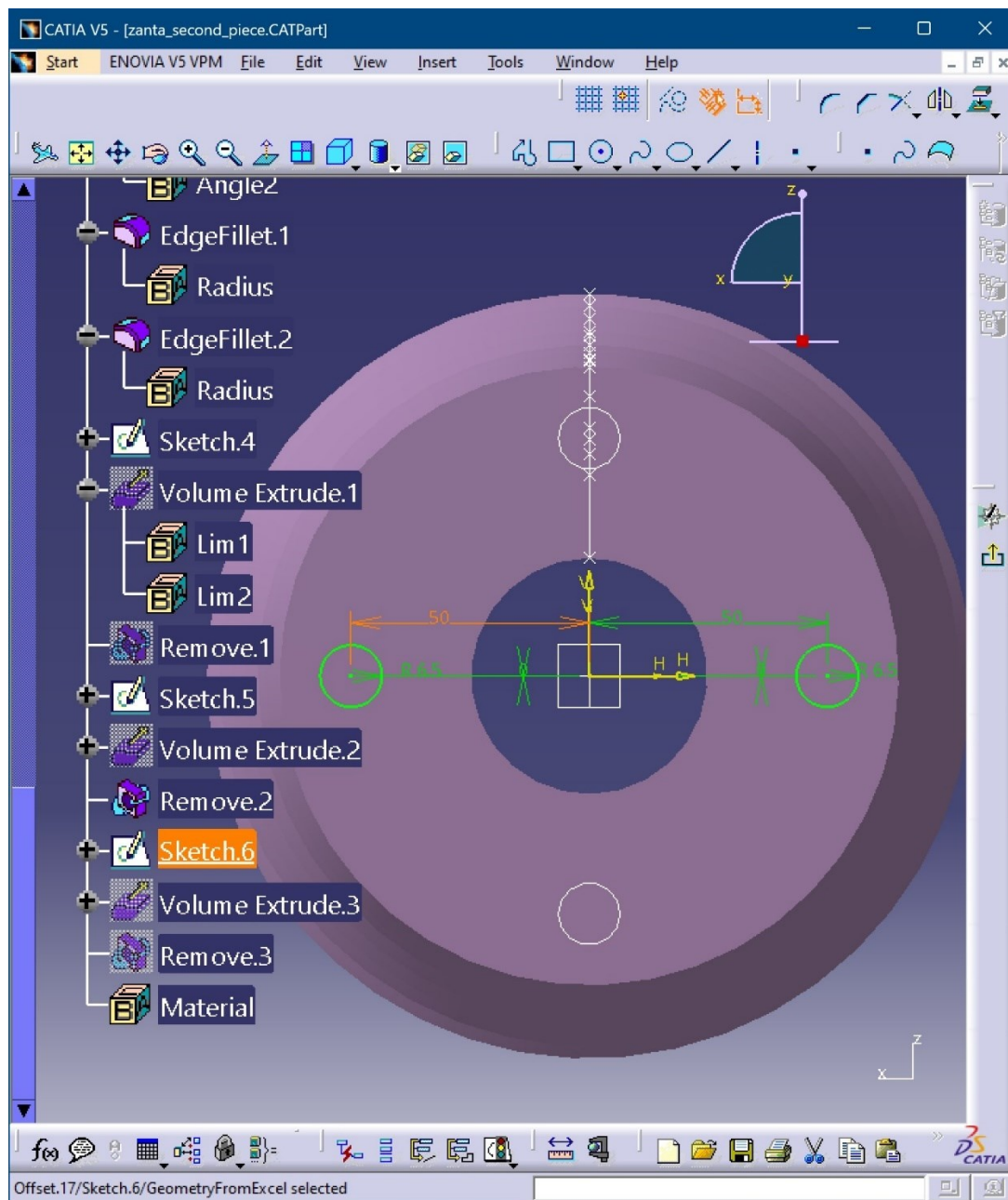
Εικόνα 2.54: Σχεδίαση του Sketch.5.



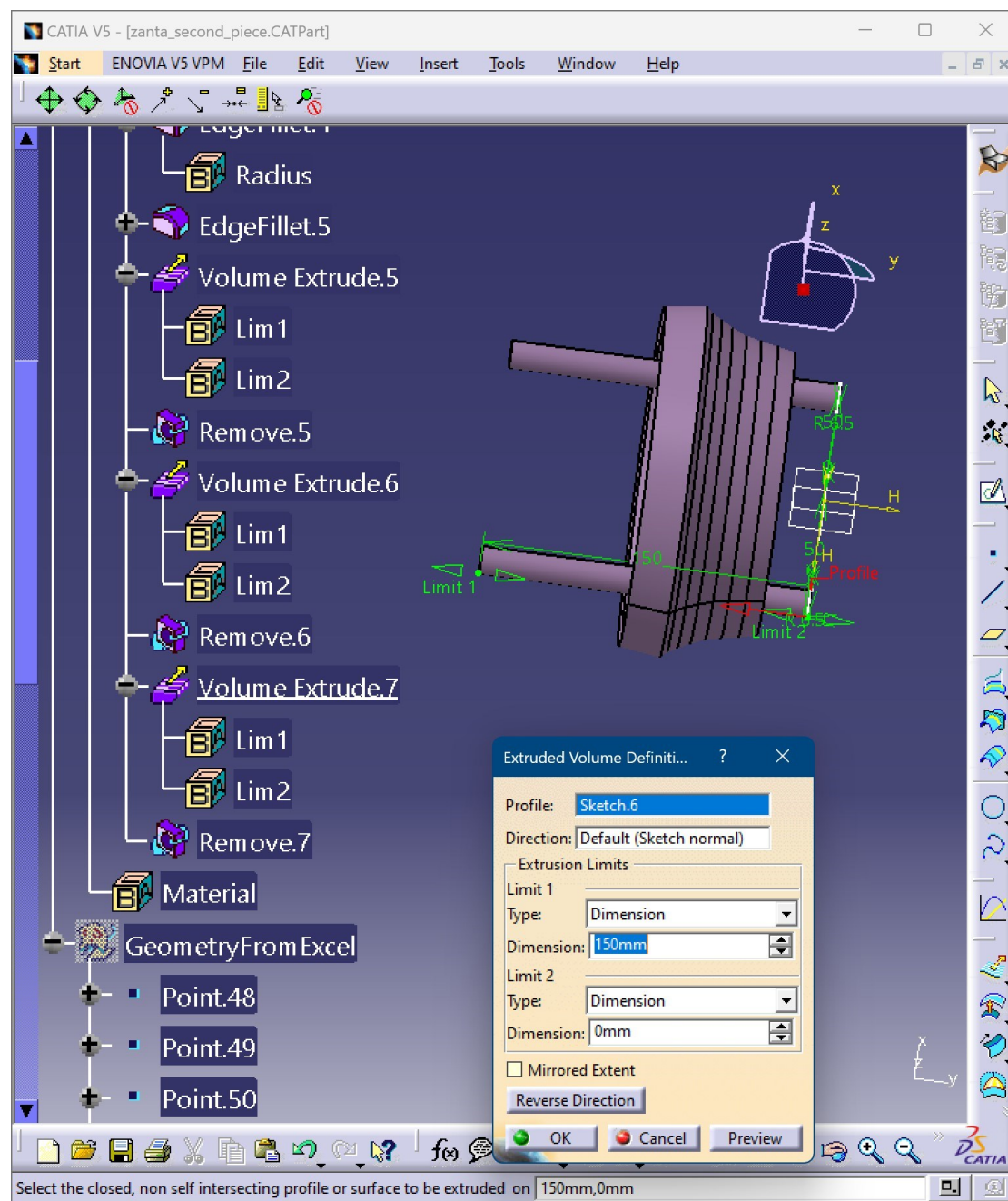
Εικόνα 2.55: Κατασκευή του Volume Extrude.6.



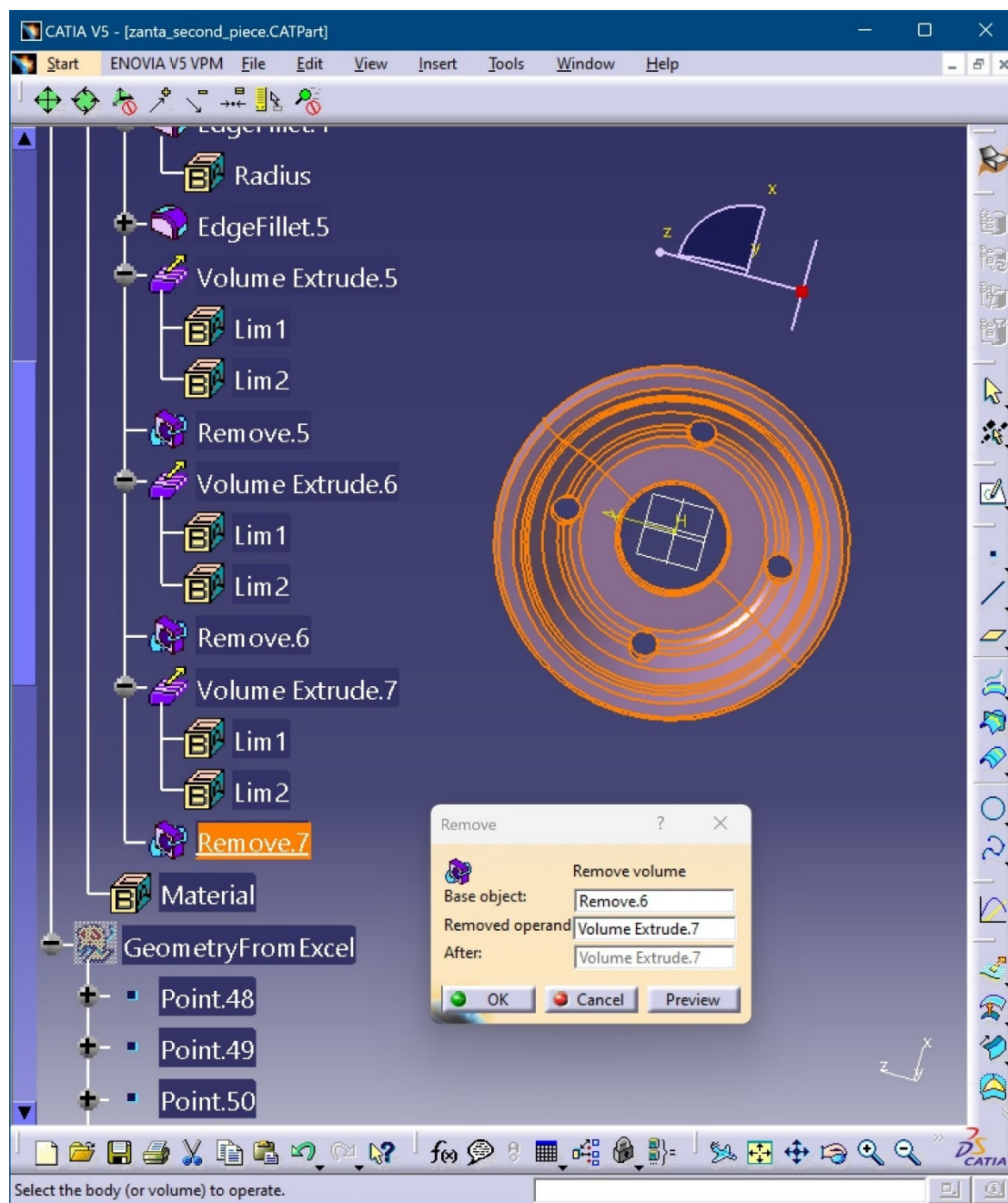
Εικόνα 2.56: Κατασκευή του Remove.6.



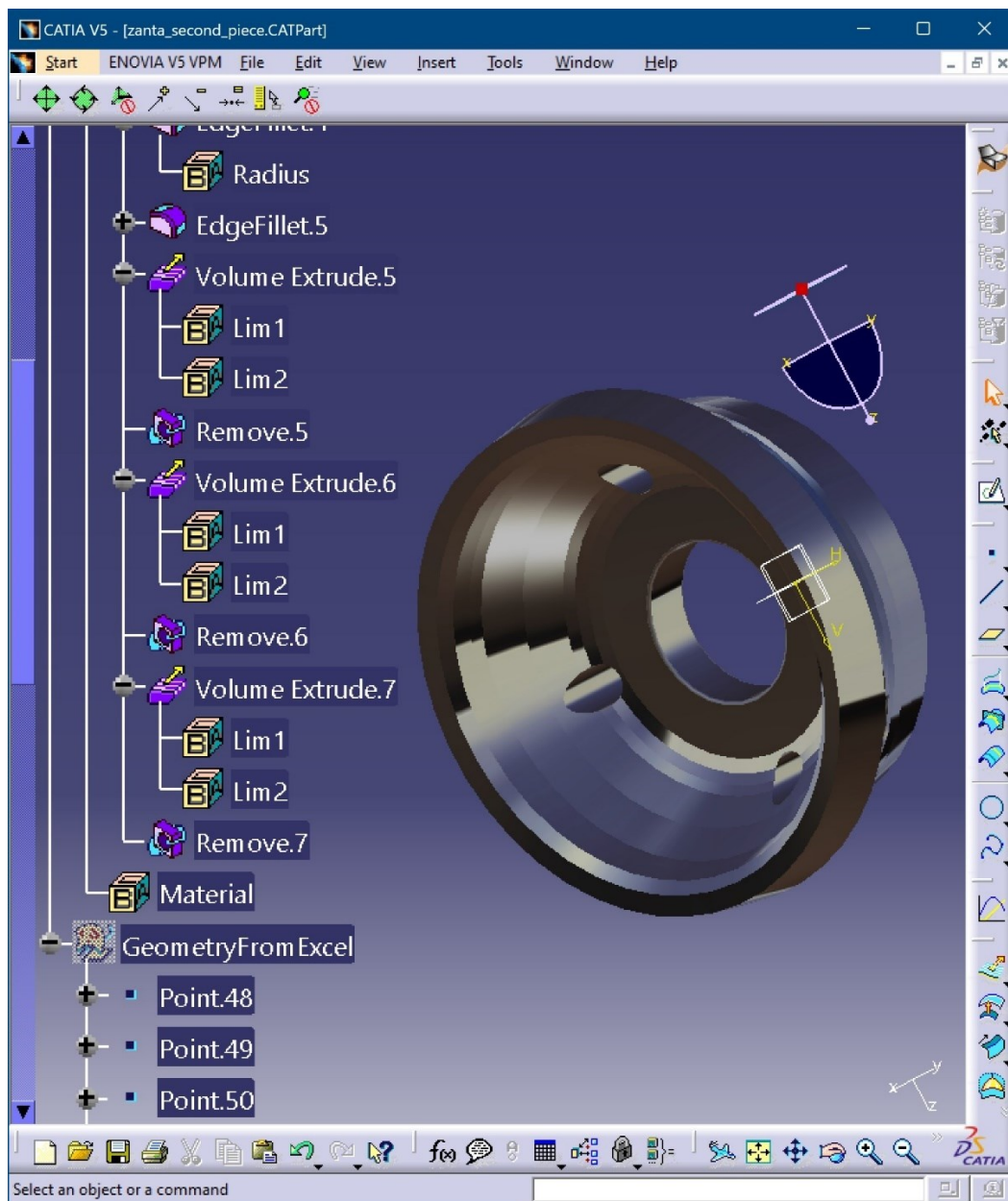
Εικόνα 2.57: Σχεδίαση του Sketch.6.



Εικόνα 2.58: Κατασκευή του Volume Extrude.7.

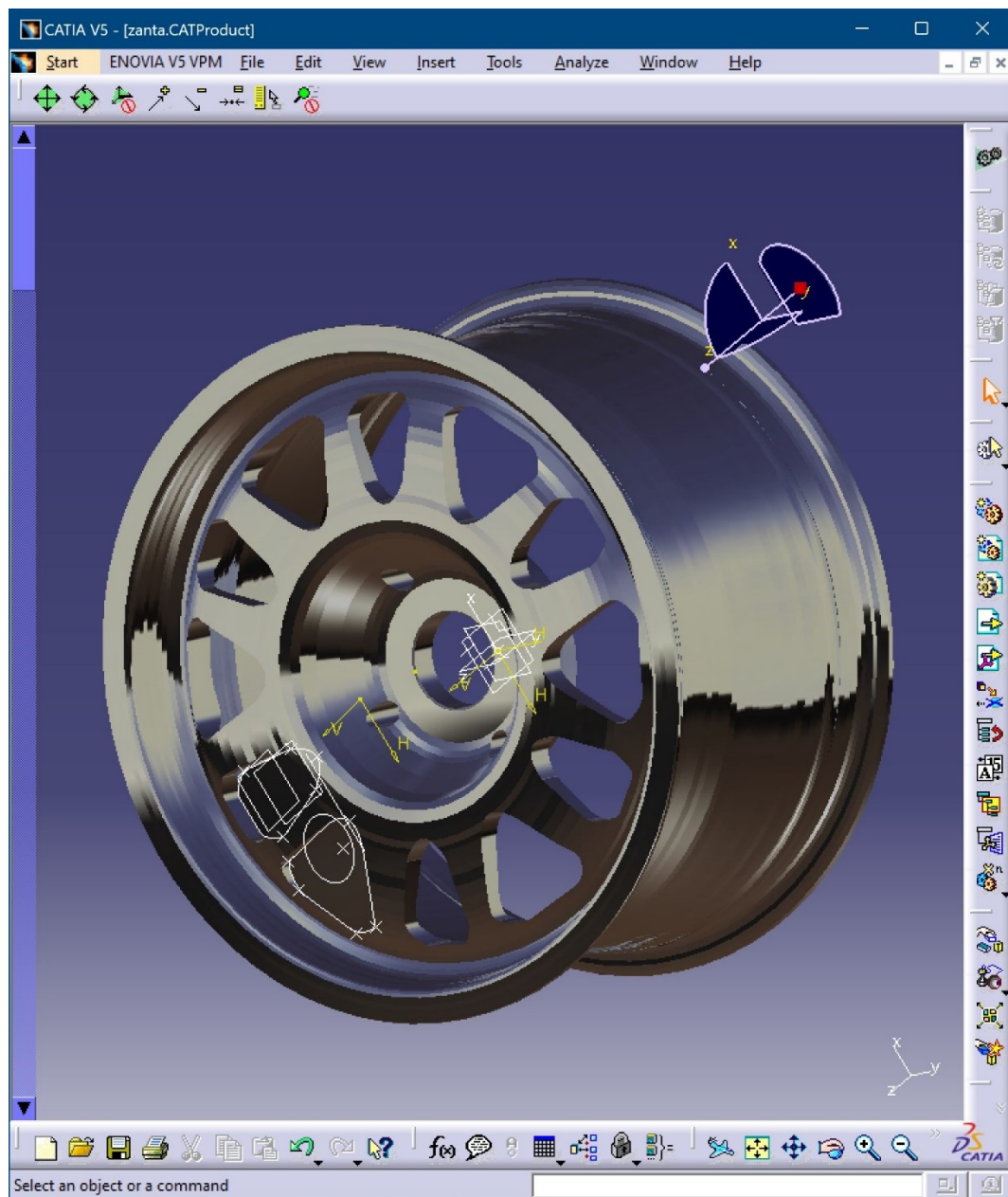


Εικόνα 2.59: Κατασκευή του Remove.7.



Εικόνα 2.60: Τελική μορφή στερεού σε αλουμινένια μορφή.

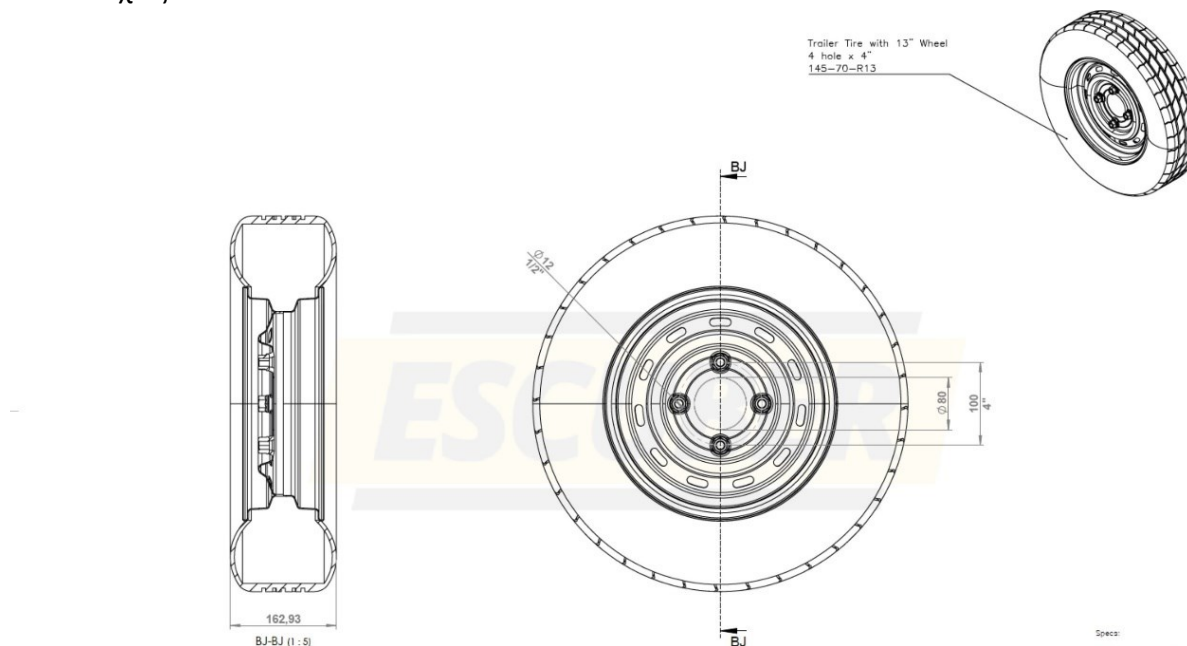
Με τη παραπάνω διαδικασία ολοκληρώνεται και η κατασκευή του δεύτερου στερεού σώματος από το οποίο απαρτίζεται η ζάντα του τροχού. Στη συνέχεια γίνεται συγχώνευση των δύο επιμέρους στερεών σε ένα ενιαίο στερεό σώμα. Το αρχείο το οποίο διαθέτει τη συναρμολογημένη πλέον ζάντα στο CATIA ονομάζεται **zanta.CATProduct**. Να τονιστεί σε αυτό το σημείο, ότι η συναρμολόγηση των επιμέρους κομματιών γίνεται αυτομάτως με την εισαγωγή τους στο assembly αρχείο, καθώς και τα δύο κομμάτια διαθέτουν συντεταγμένες σημείου αρχής των αξόνων κοινές.



Εικόνα 2.61: Τελική μορφή συναρμολογημένης ζάντας αλουμινίου.

2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΓΗ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ - ΖΑΝΤΑΣ

Η σχεδίαση του ελαστικού, βασίστηκε σε μηχανολογικό σχέδιο το οποίο πάρθηκε από τον διαδικτυακό ιστότοπο **GRABCAD COMMUNITY**, με διαδικτυακή διεύθυνση αναζήτησης: <https://grabcad.com/library/trailer-tire-with-13-wheel-4-hole-145-70-r13-1>. Οι **Εικόνες 2.62, 2.63** παρουσιάζουν όψεις με διαστάσεις και χαρακτηριστικά του ελαστικού, αντιστοίχως:



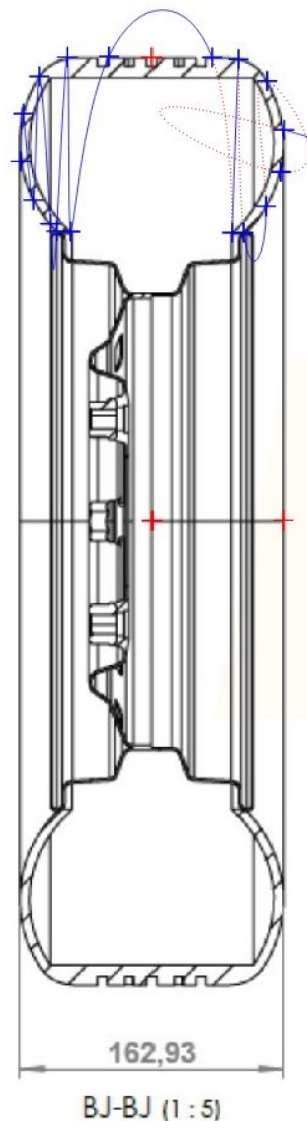
Εικόνα 2.62: Όψεις ελαστικού με διαστάσεις.



Εικόνα 2.63: Μηχανολογικά χαρακτηριστικά του ελαστικού.

Στη σχεδίαση του ελαστικού χρησιμοποιείται όπως και προηγουμένως το λογισμικό **Engauge Digitizer**, όπου μετά την εφαρμογή του, το περίγραμμα των ψηφιοποιημένων σημείων που προκύπτει, εισάγεται στο CATIA V5. Έπειτα, μέσω μεταθέσεων των σημείων του περιγράμματος και λοιπών διεργασιών, επιφέρεται η επιθυμητή επαφτόμενη θέση της ζάντας του τροχού με το ελαστικό. Το ελαστικό και η συναρμογή ελαστικού – ζάντας,

σχεδιάζονται σε αρχεία του CATIA V5, με αντίστοιχες ονομασίες, **tire_digitized.CATPart** και **assembly_zanta_tire.CATProduct**. Η προαναφερθείσα διαδικασία επεξηγείται στις ακόλουθες εικόνες.



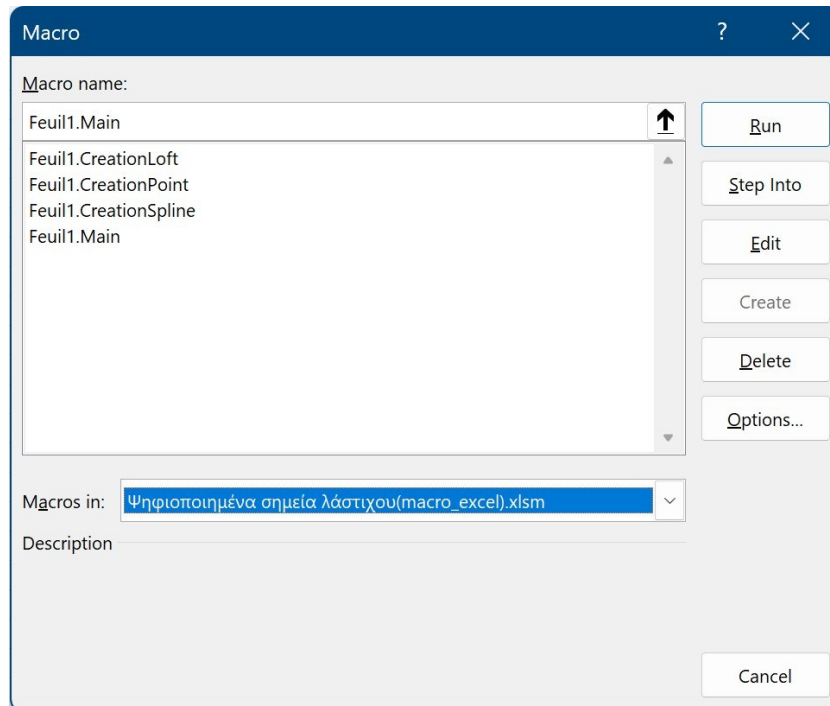
Εικόνα 2.64: Όψη του ελαστικού, με τα αρχικά σημεία σε κόκκινη απόχρωση και τα επιλεγθέντα προς ψηφιοποίηση σημεία σε μπλε απόχρωση. Οι συντεταγμένες των αρχικών σημείων στο καρτεσιανό σύστημα παρατίθενται, για το 1^ο σημείο: $x=0.0$ και $y=0.0$, 2^ο σημείο: $x=81.465$ και $y=0.0$, 3^ο σημείο: $x=0.0$ και $y=266.6$.

	A	B
1	x	Curve1
2	-81.418	206.968
3	-79.537	234.332
4	-73.432	184.683
5	-69.806	255.72
6	-62.971	171.042
7	-59.124	166.778
8	-52.229	266.877
9	-50.496	166.472
10	-26.345	267.094
11	37.285	266.504
12	49.648	165.646
13	53.769	265.326
14	56.889	165.485
15	70.927	180.764
16	71.626	252.801
17	80.04	200.452
18	82.224	224.554

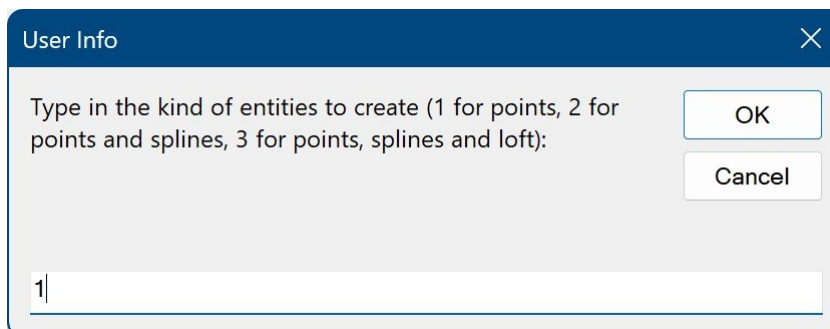
Εικόνα 2.65: Εξαγωγή των συντεταγμένων των ψηφιοποιημένων σημείων σε φύλλο του Excel.

	A	B	C
1	StartLoft		
2	StartCurve		
3	0	-81.418	206.968
4	0	-79.537	234.332
5	0	-73.432	184.683
6	0	-69.806	255.72
7	0	-62.971	171.042
8	0	-59.124	166.778
9	0	-52.229	266.877
10	0	-50.496	166.472
11	0	-26.345	267.094
12	0	37.285	266.504
13	0	49.648	165.646
14	0	53.769	265.326
15	0	56.889	165.485
16	0	70.927	180.764
17	0	71.626	252.801
18	0	80.04	200.452
19	0	82.224	224.554
20	EndCurve		
21	EndLoft		
22	End		

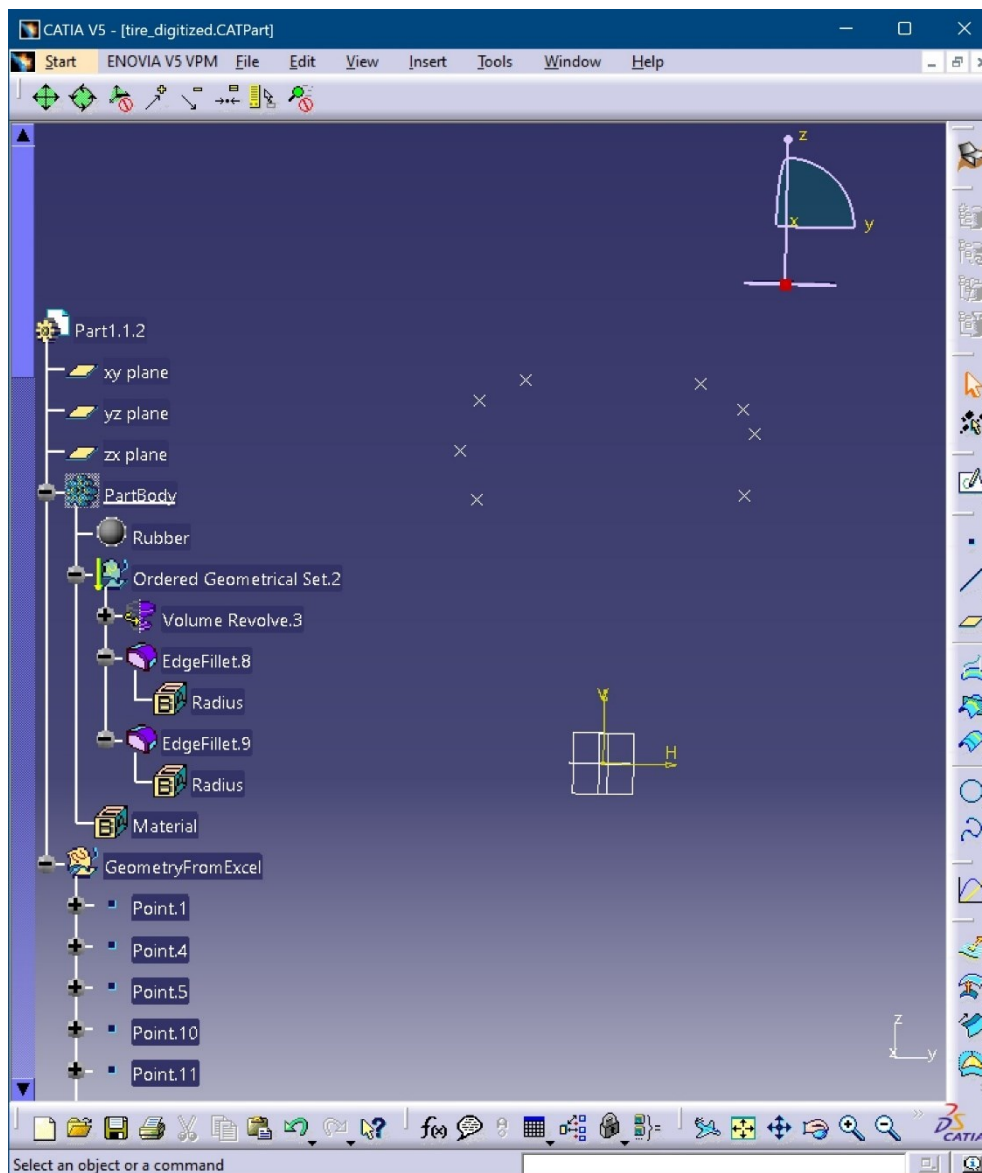
Εικόνα 2.66: Καταχώρηση των συντεταγμένων των σημείων σε φύλλο του Excel.



Εικόνα 2.67: Επιλογή της μακροεντολής «Feuil1.Main», με αναφορά στο αρχείο του Excel ονόματι Ψηφιοποιημένα σημεία λάστιχου(macro_excel).xlsm.




Εικόνα 2.68: Καταχώρηση της επιλογής «1», ώστε στο CATIA να μεταφερθούν τα ψηφιοποιημένα σημεία.

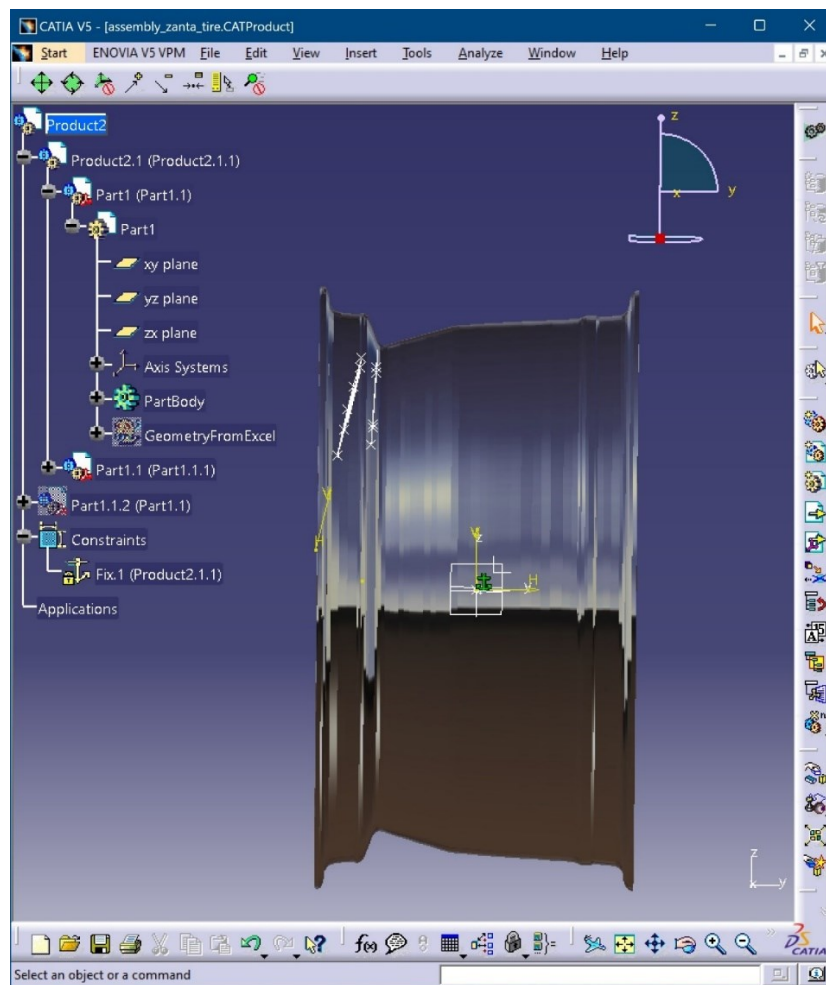


Εικόνα 2.69: Εισαγωγή των ψηφιοποιημένων σημείων στο CATIA.

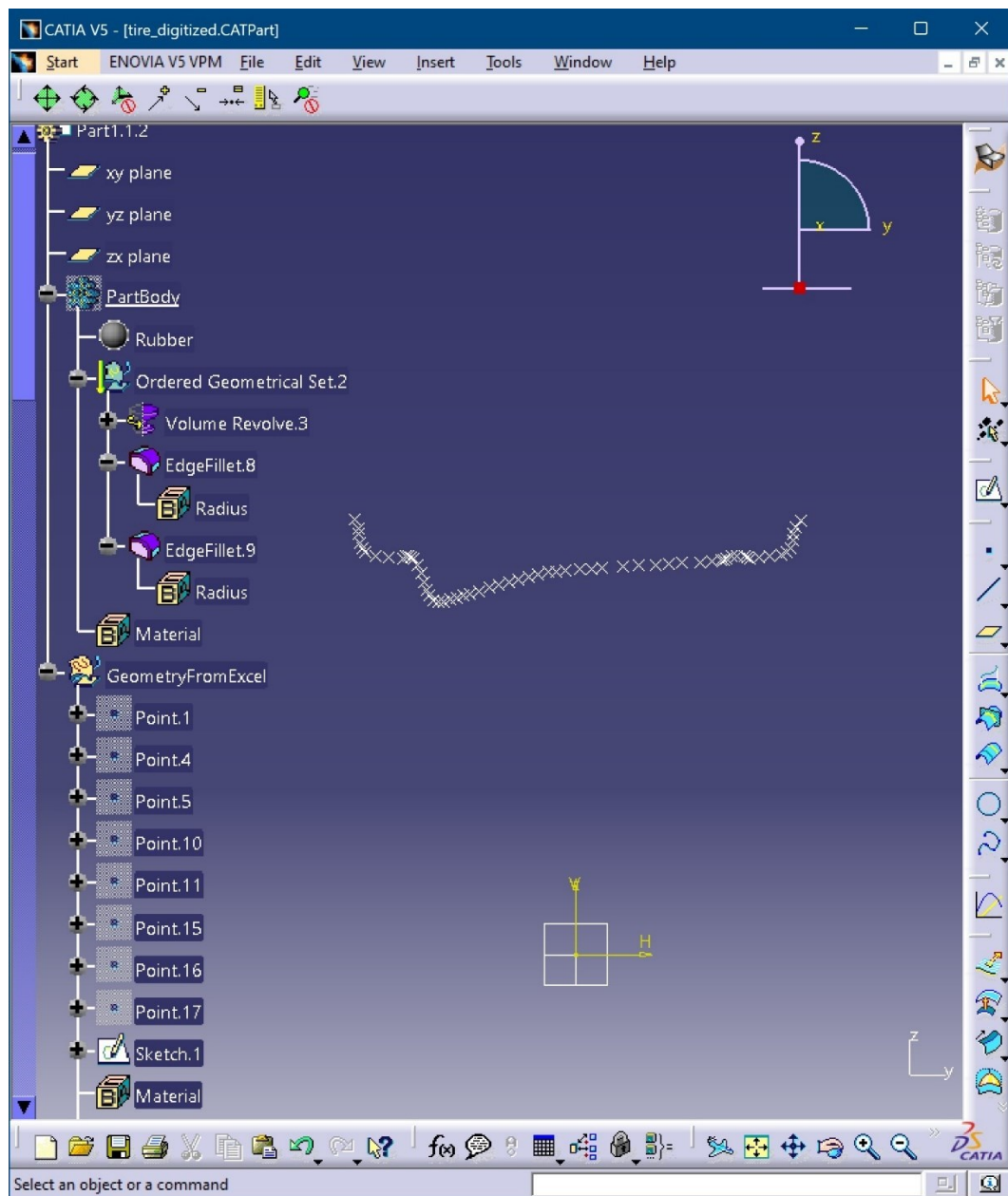
Στη συνέχεια καταγράφονται οι εντολές που εκτελούνται ώστε να δημιουργηθεί το ελαστικό το οποίο οφείλει να εφάπτεται κατάλληλα στη ζάντα του. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, γίνεται ταυτόχρονη επεξεργασία των αρχείων **tire_digitized.CATPart** και **assembly_zanta_tire.CATProduct** προκειμένου να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος.

Αρχικά, στο αρχείο ονόματι **assembly_zanta_tire.CATProduct** «φορτώνεται» η





συναρμολογημένη ζάντα του τροχού, στην οποία επιβάλλεται η εντολή **Fix** , η οποία διατηρεί την ζάντα στην αρχική θέση επιλογής της μετά από οποιαδήποτε μεταφορά της στο χώρο. Έπειτα, δημιουργούνται σημεία επάνω στο ανώτατο περίγραμμα της ζάντας του ελαστικού, τέτοια ώστε μετά την σύνδεσή τους με τα αρχικά ψηφιοποιημένα σημεία του ελαστικού και τη διενέργεια λοιπών διεργασιών, να δημιουργήσουν το ελαστικό το οποίο θα εφάπτεται καταλλήλως στη ζάντα. Τα δύο βήματα που αναφέρθηκαν, απεικονίζονται στη συνέχεια.

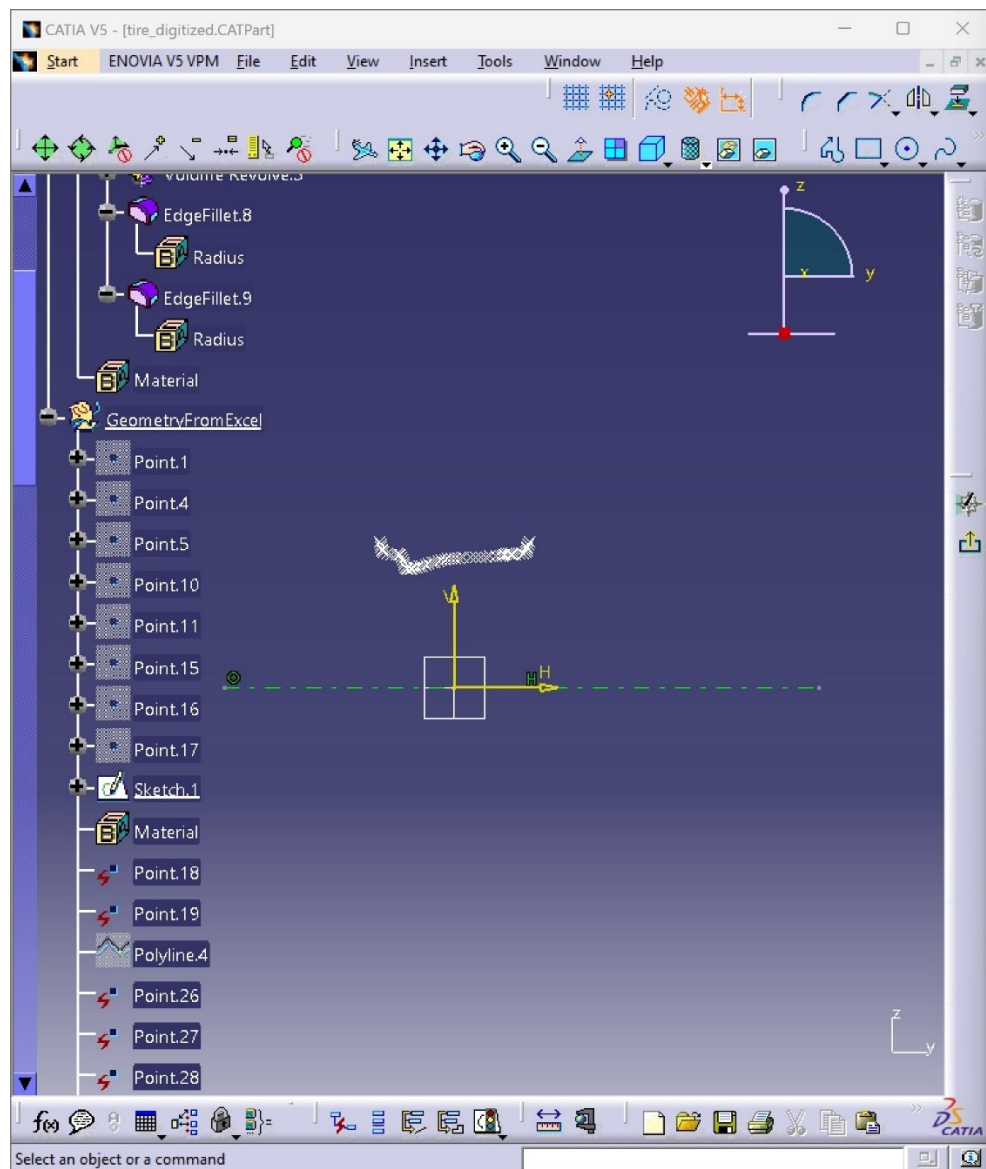


Εικόνα 2.70: Εισαγωγή της εντολής Fix στη ζάντα (σχήμα σε πράσινη απόχρωση).

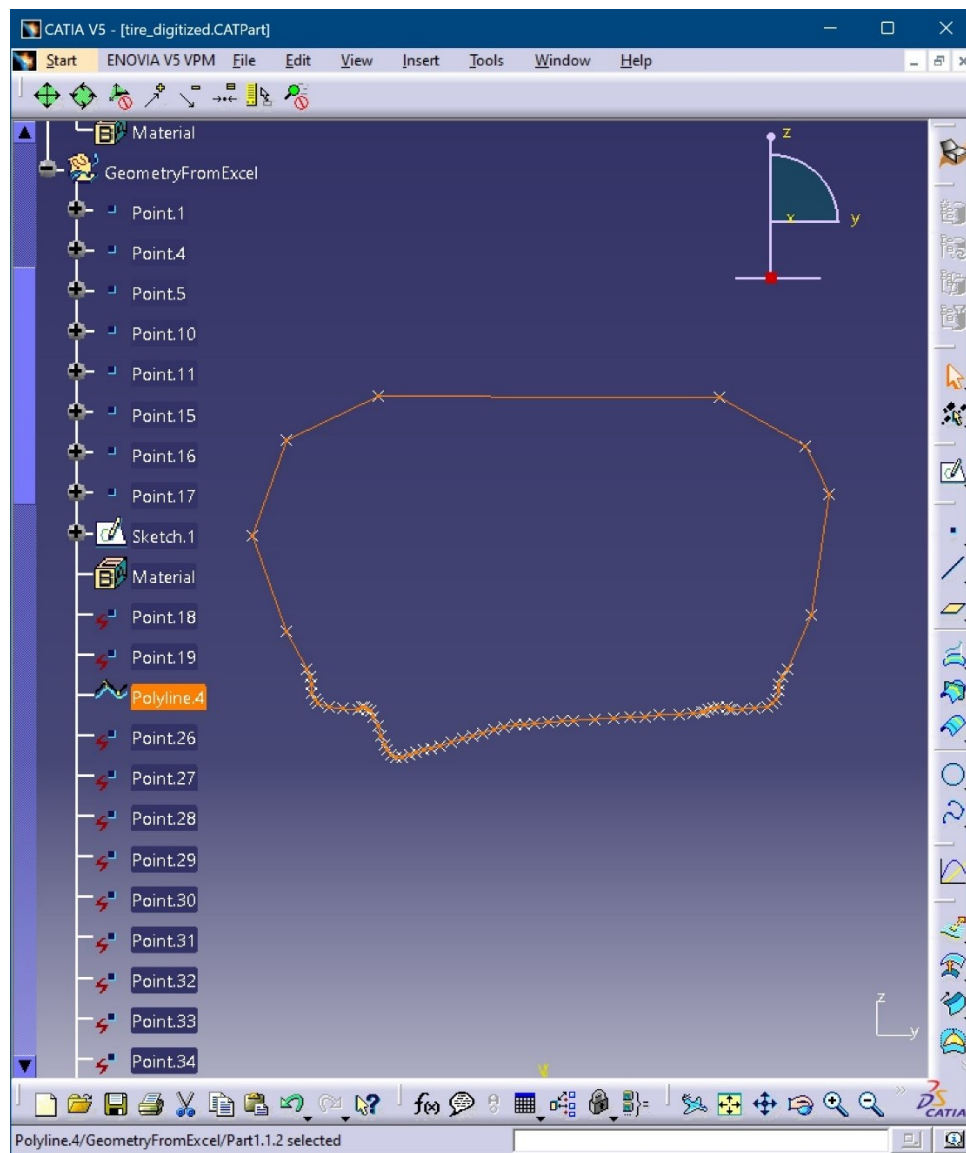


Εικόνα 2.71: Εισαγωγή σημείων επάνω στο ανώτατο περίγραμμα της ζάντας του ελαστικού.

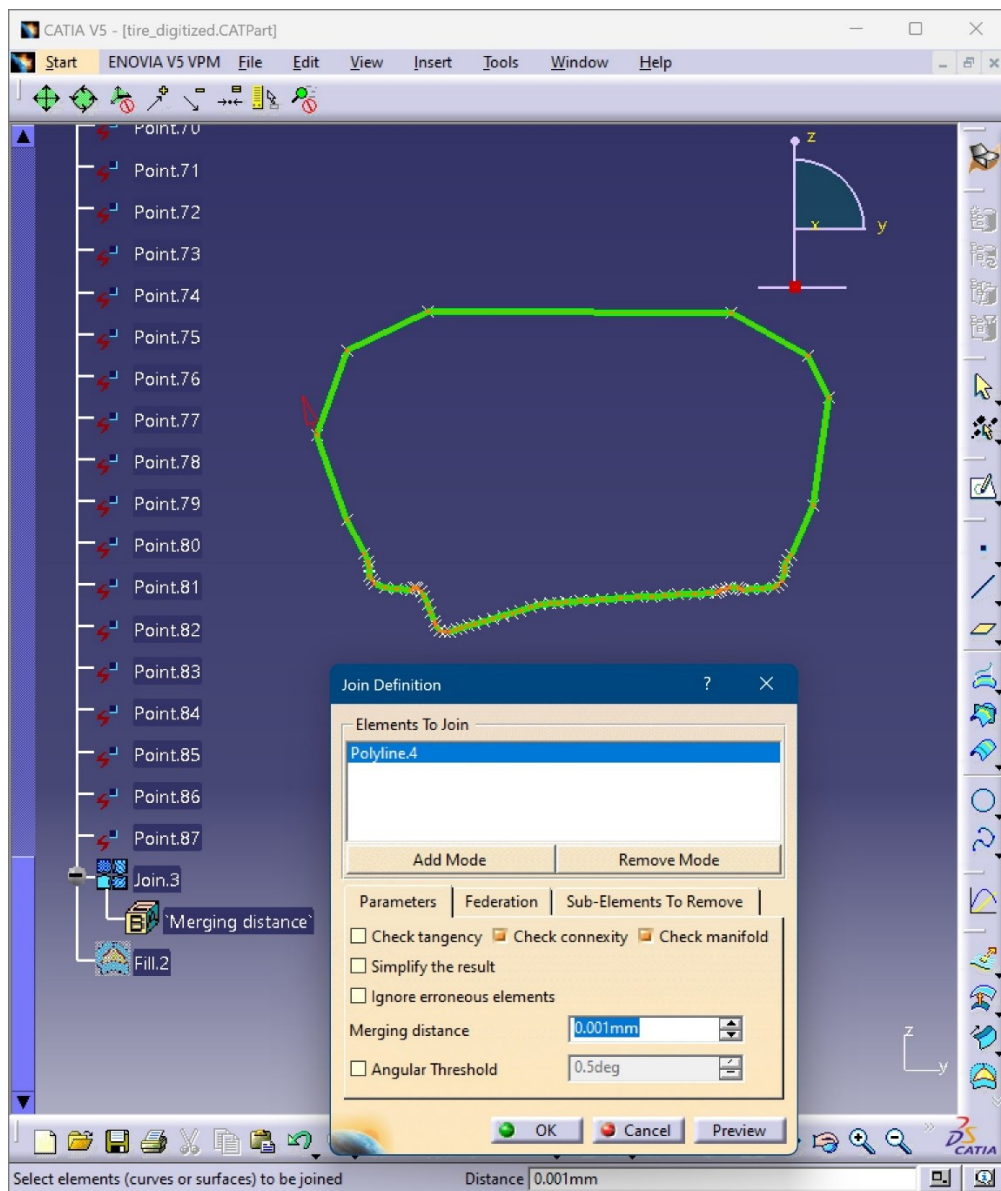
Εστιάζοντας και πάλι στη διαδικασία που επιτελείται, μέσω της εντολής **Sketch** , δημιουργείται άξονας ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή ακόλουθων διεργασιών, οπότε και προκύπτει το Sketch.1. Σε επόμενο βήμα, μέσω της εντολής **Polyline** , συνδέονται όλα τα παραχθέντα σημεία του λάστιχου του ελαστικού σε περίγραμμα ονόματι Polyline.4. Στη συνέχεια, ενοποιείται το περίγραμμα μέσω της εντολής **Join** , όπου και προκύπτει το Join.3. Τέλος, «γεμίζει» η επιφάνεια του περιγράμματος με την εντολή **Fill** , με αποτέλεσμα να δημιουργείται το Fill.2.



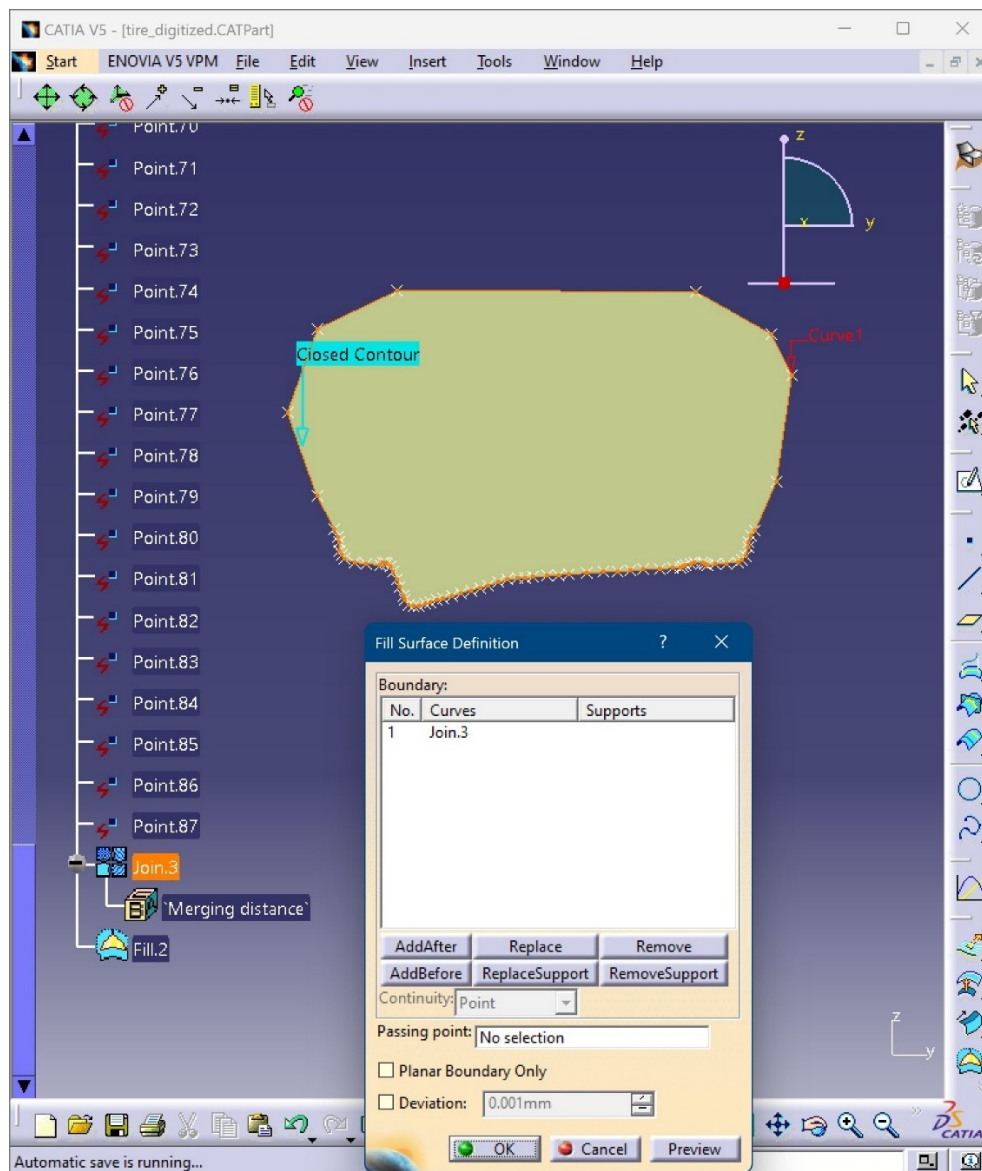
Εικόνα 2.72: Δημιουργία του Sketch.1.



Εικόνα 2.73: Δημιουργία του Polyline.4.



Εικόνα 2.74: Δημιουργία του Join.3.



Εικόνα 2.75: Δημιουργία του Fill.2.

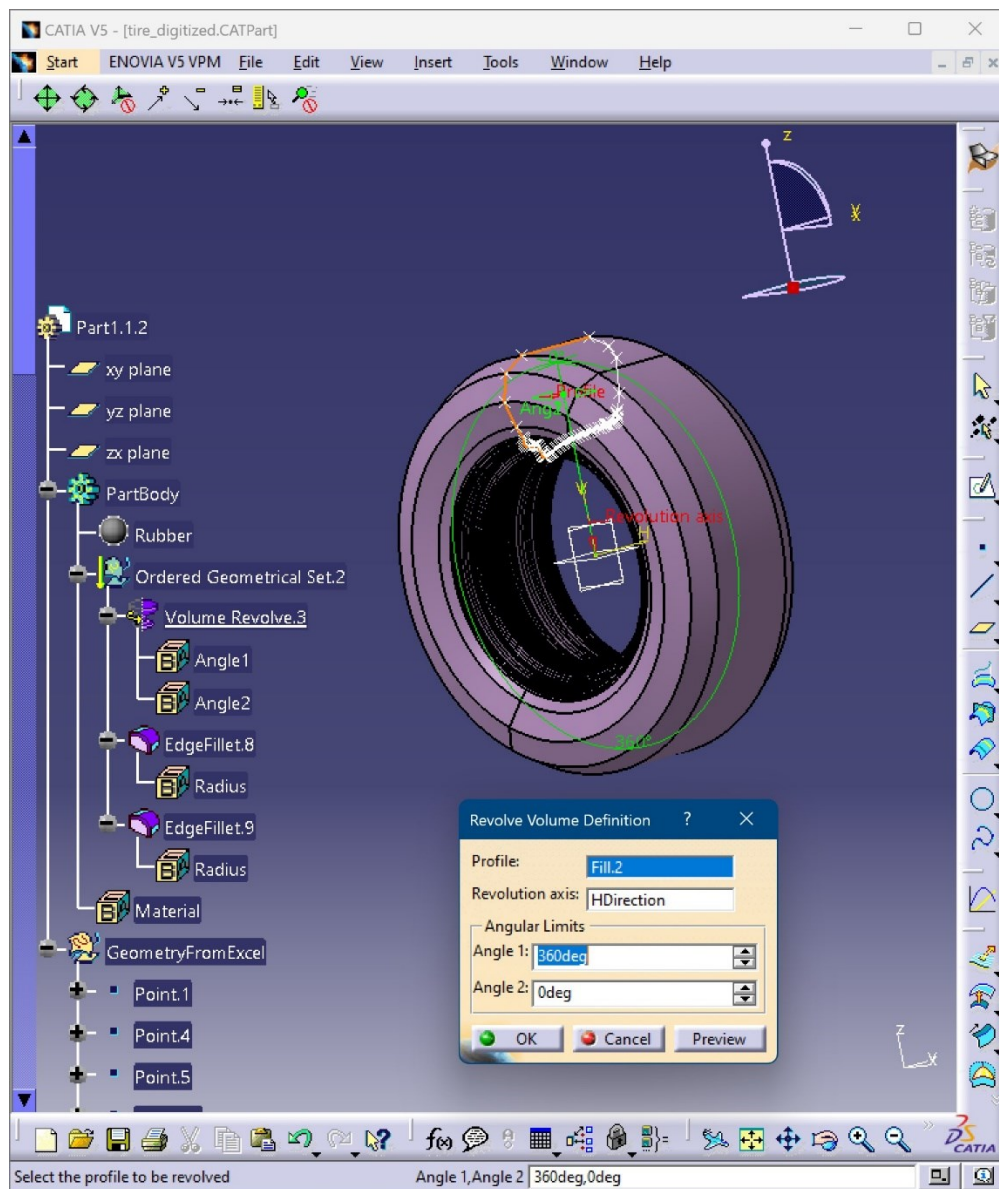
Σε αυτό το σημείο, γίνεται επαναφορά στο τελευταίο κομμάτι της διαδικασίας δημιουργίας του ελαστικού και της συναρμογής του με τη ζάντα που δημιουργήθηκε στην προηγούμενη υποενότητα. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται χρήση της εντολής **Volume Revolve**



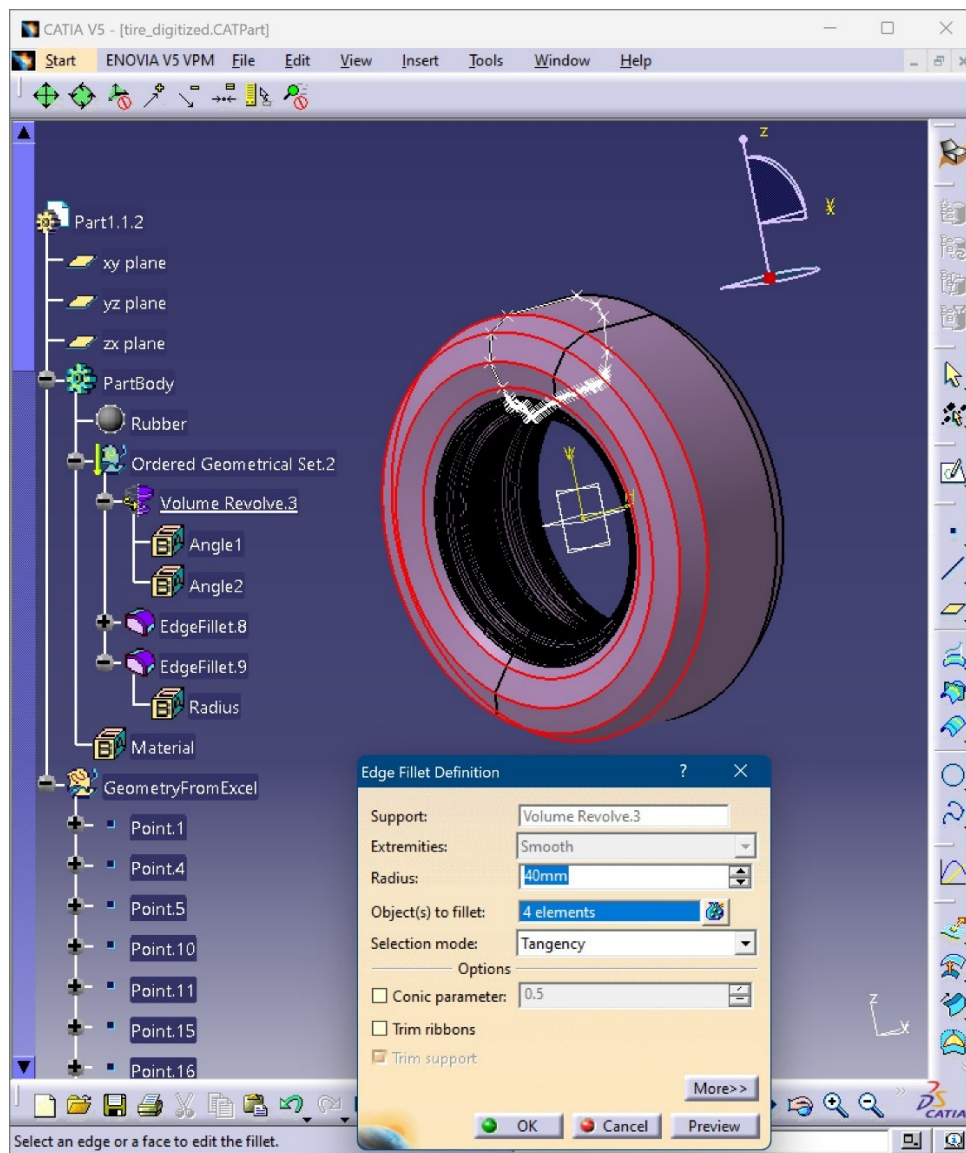
, όπου περιστρέφεται το παραπάνω Fill.2 γύρω από τον άξονα του Sketch.1 ώστε να προκύψει εντέλει το Volume Revolve.3. Έπειτα, επιβάλλεται «φιλετάρισμα» των επιφανειών



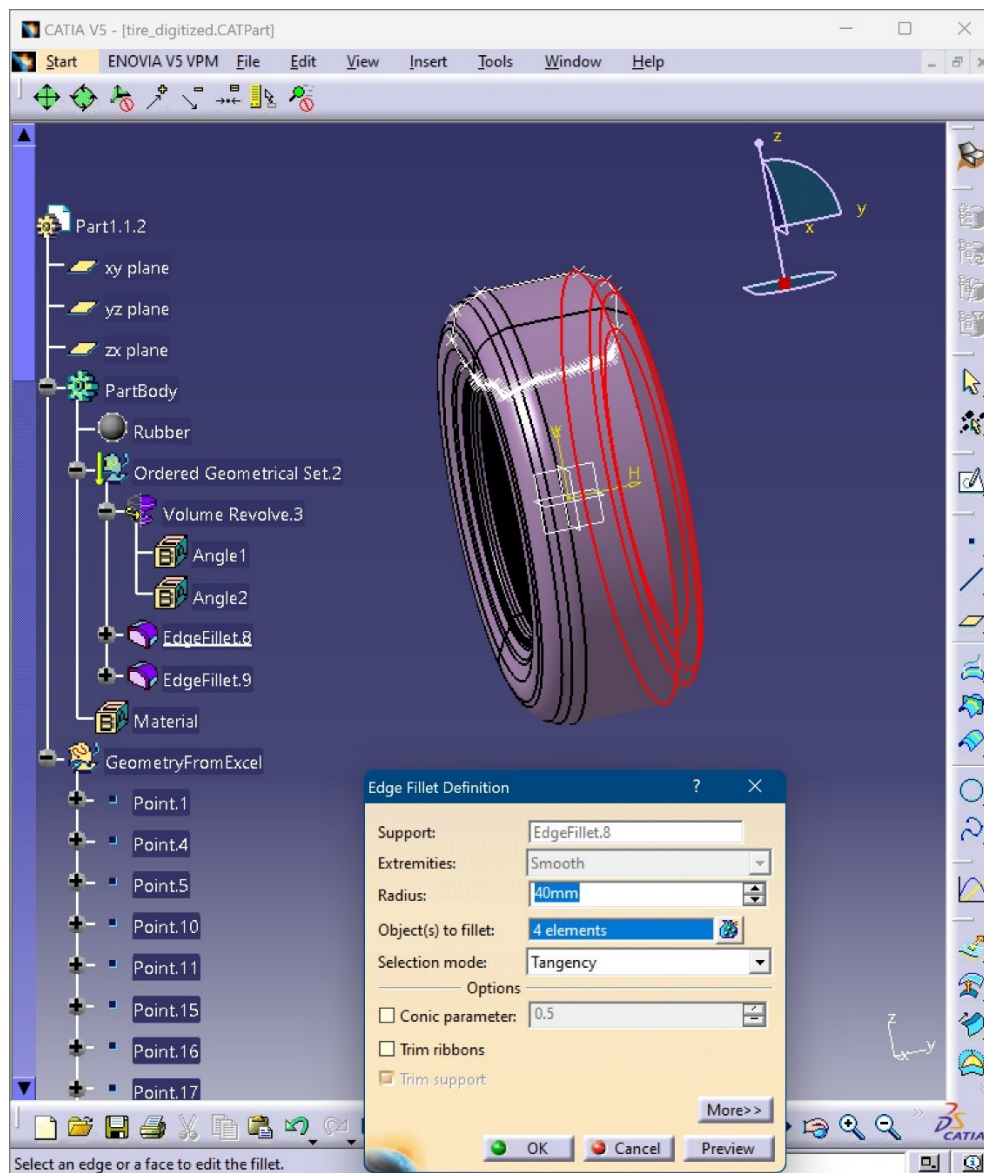
εκατέρωθεν του **zx επιπέδου** του ελαστικού μέσω της εντολής **EdgeFillet**, οπότε και προκύπτουν τα EdgeFillet.8 και EdgeFillet.9. Στη συνέχεια, τίθεται ως υλικό από το οποίο θα αποτελείται το ελαστικό, το καουτσούκ (Rubber). Τέλος, εισάγεται το παραχθέν ελαστικό από καουτσούκ (Rubber) στο αρχείο **assembly_zanta_tire.CATProduct**, στο οποίο προβάλλεται πλέον η τελική συναρμογή του ελαστικού.



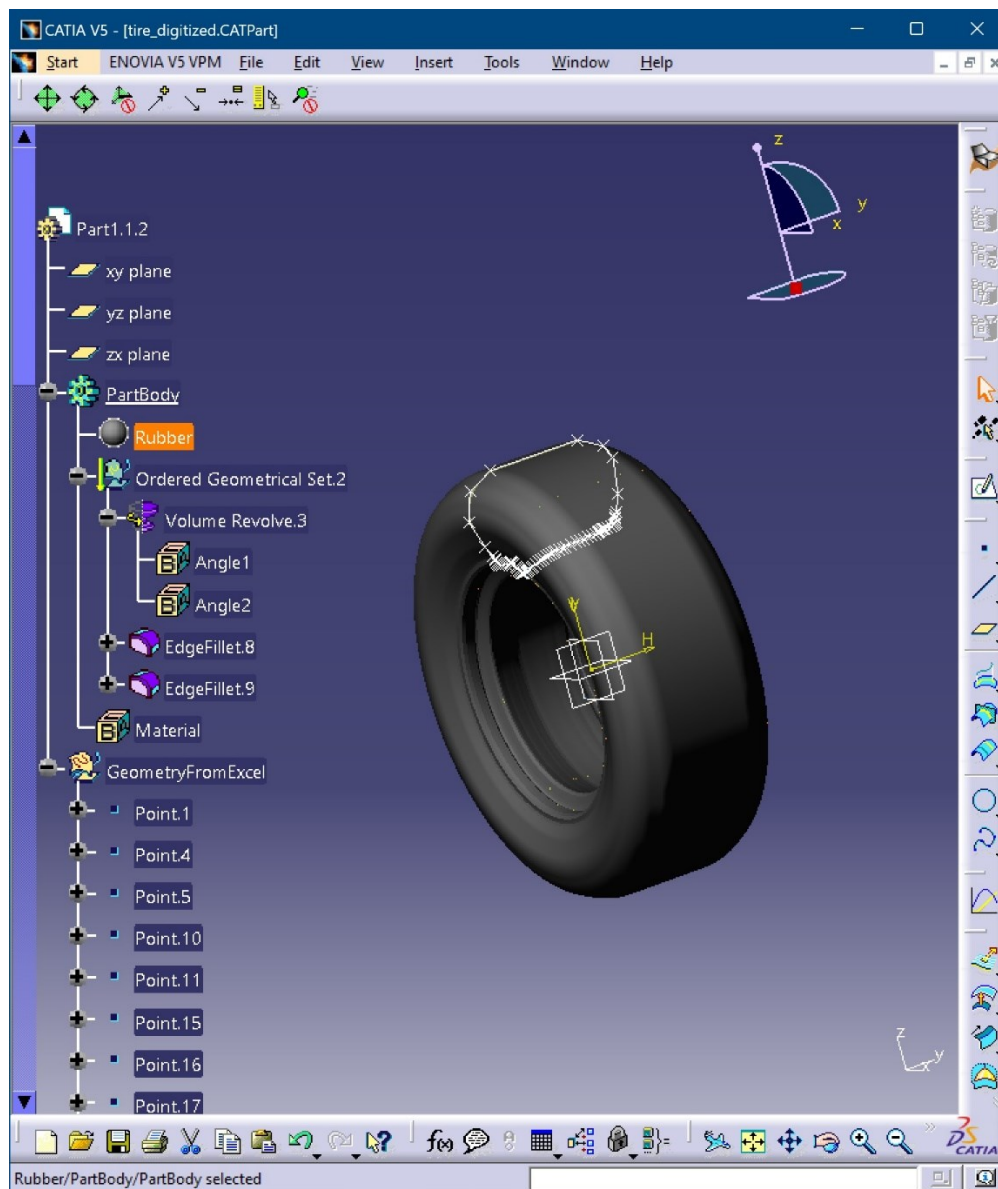
Εικόνα 2.76: Κατασκευή του Volume Revolve.3.



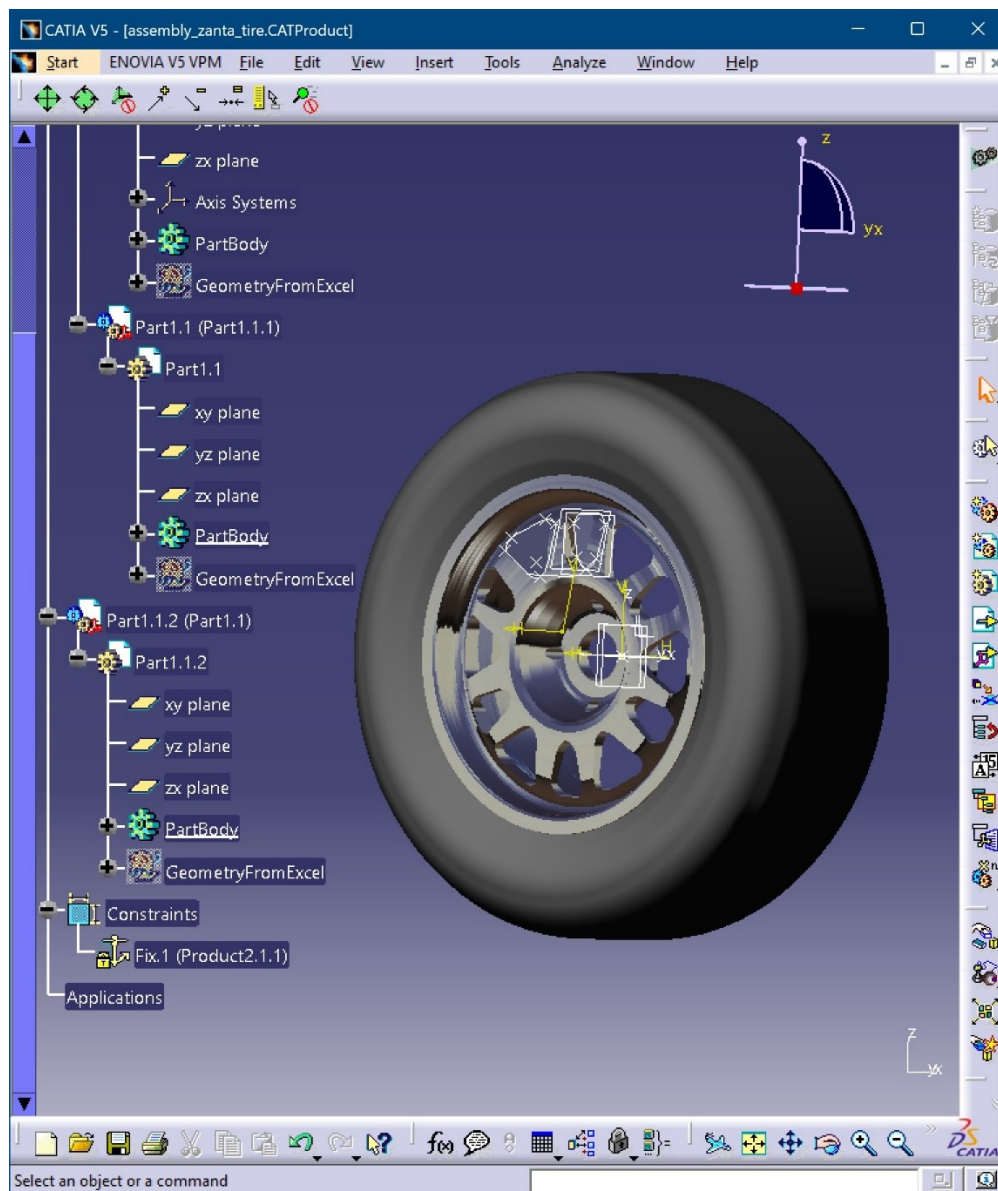
Εικόνα 2.77: Κατασκευή του EdgeFillet.8.



Εικόνα 2.78: Κατασκευή του EdgeFillet.9.



Εικόνα 2.79: Τελική μορφή (συμπαγούς) ελαστικού από καουτσούκ (Rubber).








Εικόνα 2.80: Πλήρες συναρμολογημένο ελαστικό με ζάντα.

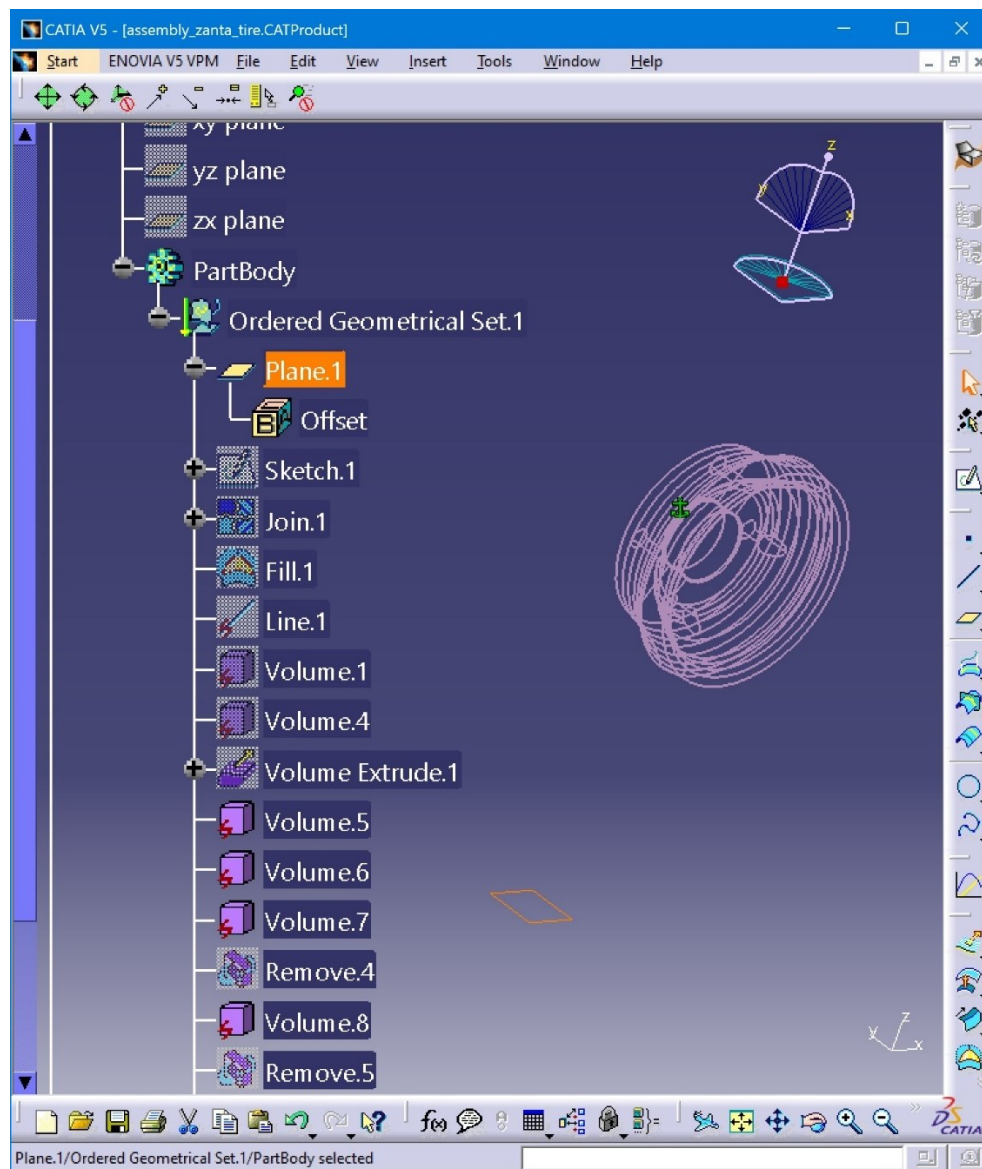
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS CFX

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ANSYS CFX

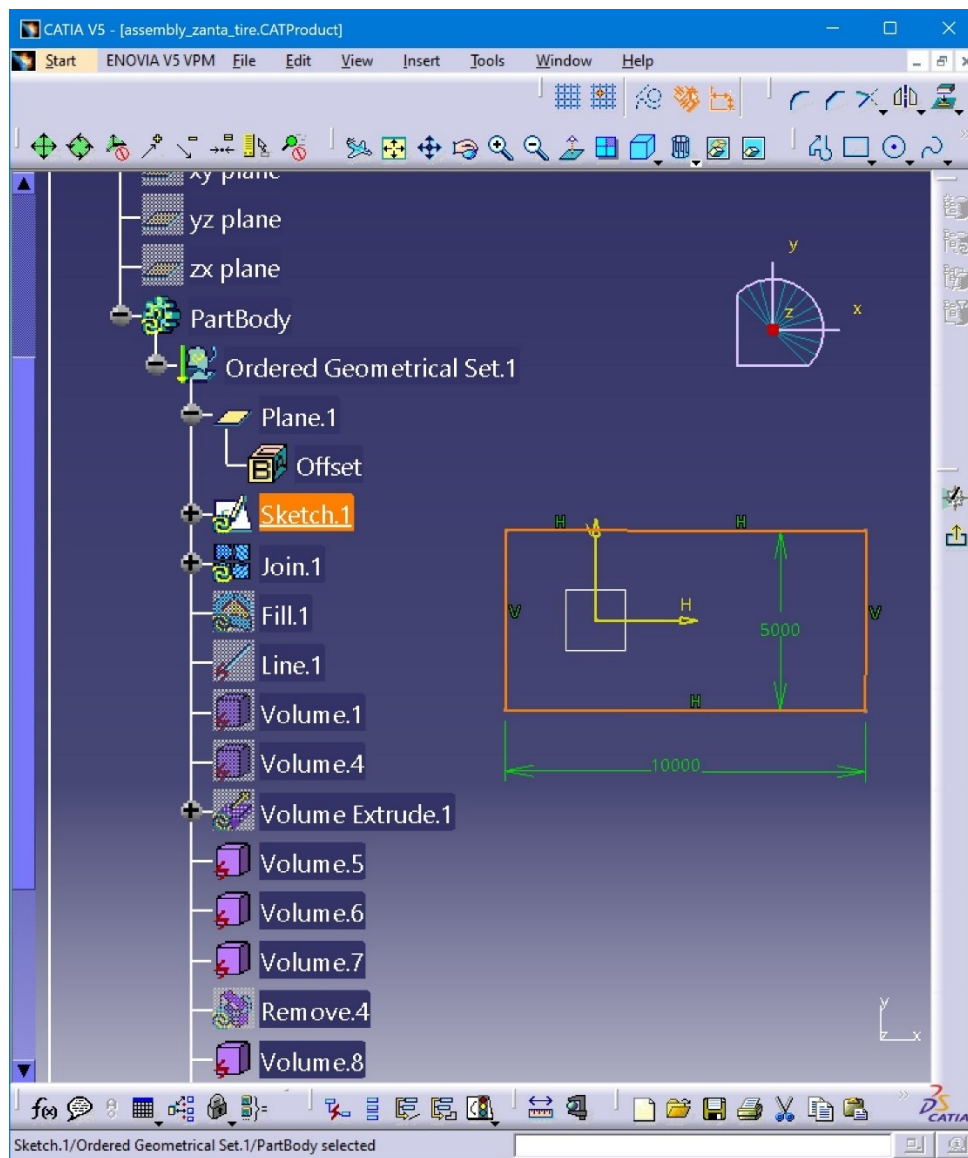
Το λογισμικό ANSYS CFX, όπως και κάθε άλλο λογισμικό προσομοίωσης, μιμείται τη λειτουργία μιας πραγματικής ροής ρευστού, επιλύοντας ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων, μετά από διακριτοποίησή τους σε μορφή αλγεβρικών εξισώσεων. Με αυτό το τρόπο, δίνεται η δυνατότητα της μελέτης ροϊκών φαινομένων των οποίων η πολυπλοκότητα δεν μπορεί να εκφραστεί με αναλυτικά μαθηματικά πρότυπα, αλλά δύναται να εκφραστεί πειραματικά. Ειδικότερα, με τη χρήση του λογισμικού ANSYS CFX, οι μηχανικοί μπορούν να εξερευνούν και να προβλέπουν τη λειτουργικότητα των υπό μελέτη προϊόντων τους, πριν τη πραγματική τους υλοποίηση. Έτσι, τα βιομηχανικά κόστη μειώνονται δραστικά, καθώς υπάρχει ένας δείκτης βεβαιότητας στην κατασκευή των διαφόρων προϊόντων (ANSYS, 2023). Εν συνεχεία, σημαντική είναι η αναφορά στη συμβατότητα του λογισμικού ANSYS CFX με λογισμικά CAD (Computer - Aided Design), CAM (Computer - Aided Manufacturing) και CAE (Computer – Aided Engineering), γεγονός το οποίο προσφέρει ιδιαίτερη ευελιξία στους μηχανικούς-μελετητές.

3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΟΓΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CATIA V5

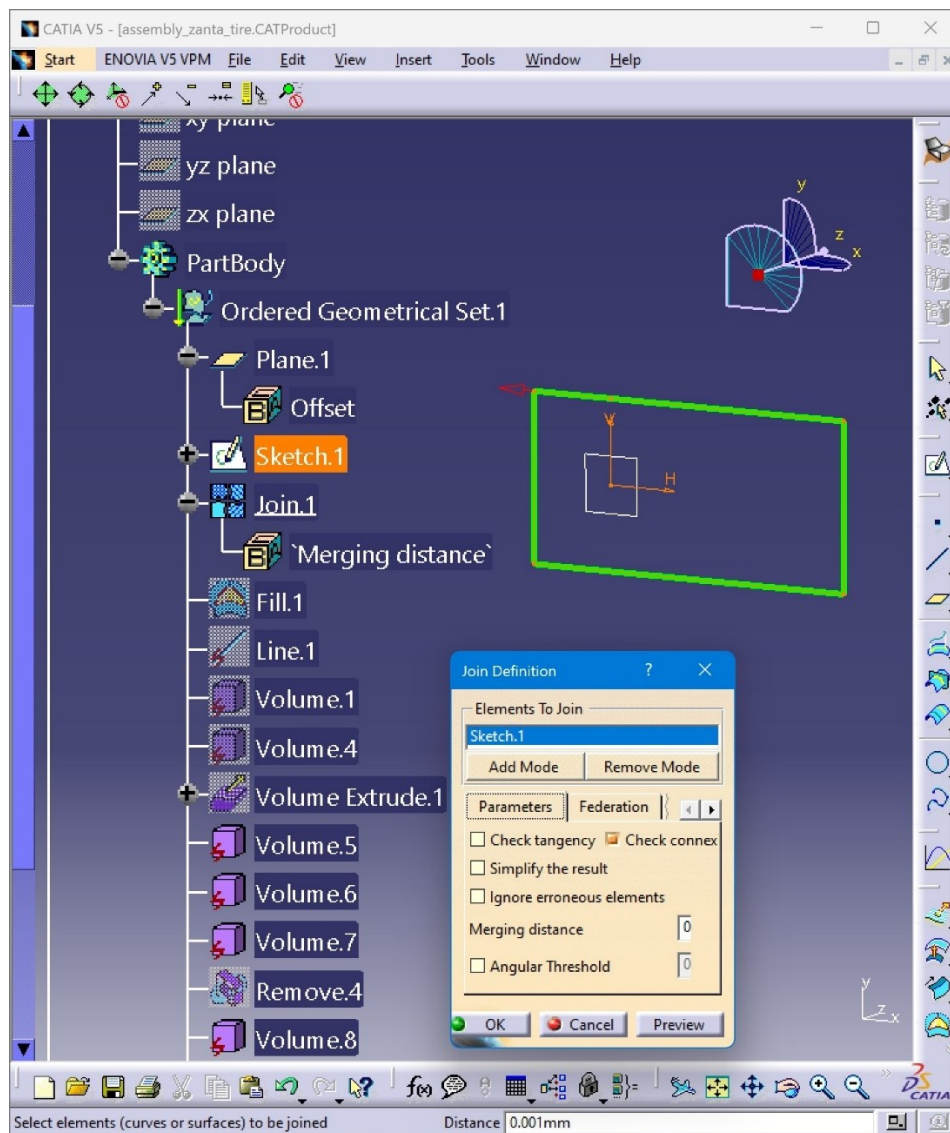
Οι όγκοι οι οποίοι θα «στεγάσουν» την προσομοίωση κατασκευάζονται στο αρχείο **assembly_zanta_tire.CATProduct**, με περαιτέρω τροποποίηση του υπάρχοντος τροχού. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την ονοματολογία του αρχείου, γίνεται κατασκευή των **Part2** και **Part3**. Όσον αφορά το **Part2**, σε πρώτη φάση με την εντολή **Plane** , δημιουργείται το **Plane.1**, πάνω στο οποίο θα σχεδιαστεί το **Sketch.1**, μέσω της εντολής **Sketch** . Ύστερα, δημιουργείται το **Join.1** μέσω της εντολής **Join** , και στη συνέχεια «γεμίζει» ο χώρος του **Join.1** μέσω της εντολής **Fill** , οπότε και προκύπτει το **Fill.1**. Έπειτα κατασκευάζεται το **Volume Extrude.1** μέσω της εντολής **Volume Extrude** . Να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι η απεικόνιση του τροχού και των χώρων προς δημιουργία γίνεται σε Wireframe μορφή. Η διαδικασία που προαναφέρθηκε αποτυπώνεται σχηματικά στις παρακάτω εικόνες.



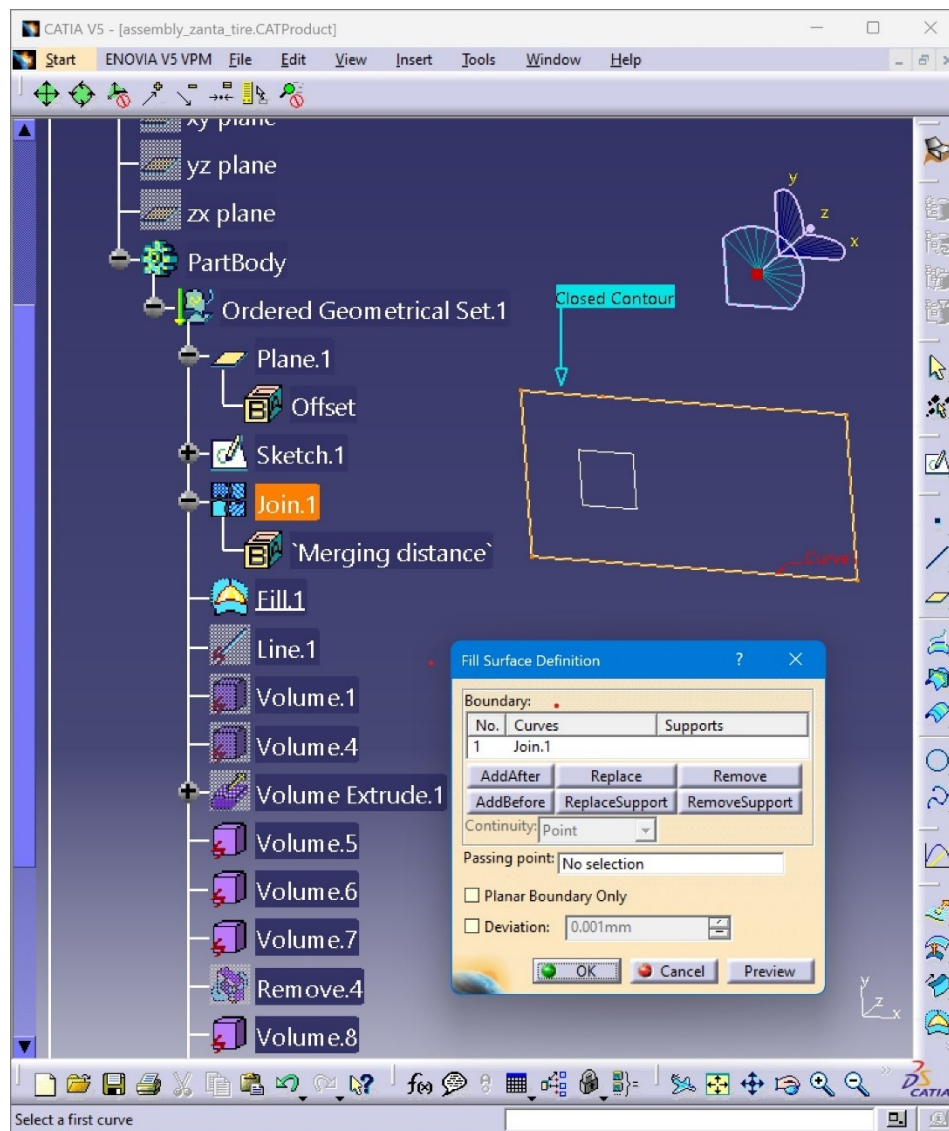
Εικόνα 3.1: Δημιουργία του Plane.1.



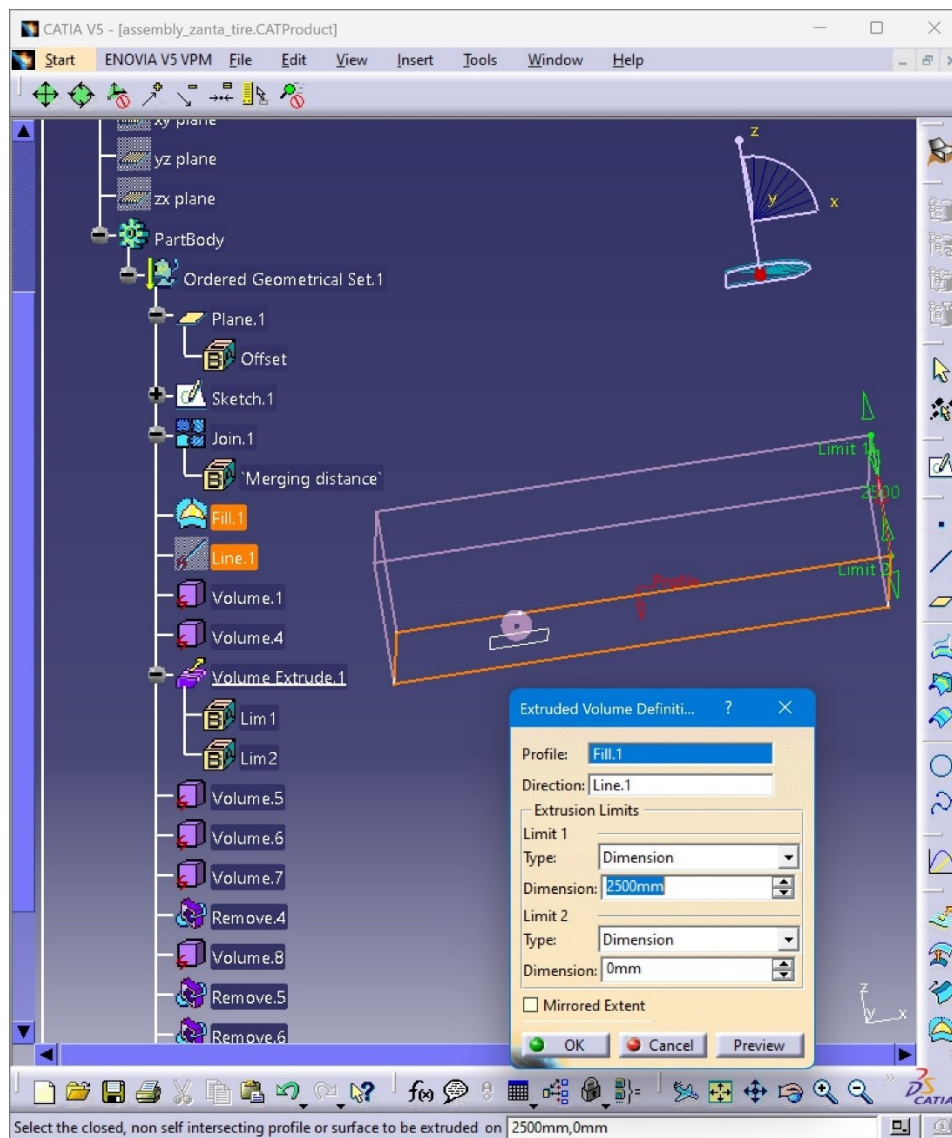
Εικόνα 3.2: Δημιουργία του Sketch.1.





Εικόνα 3.3: Δημιουργία του Join.1

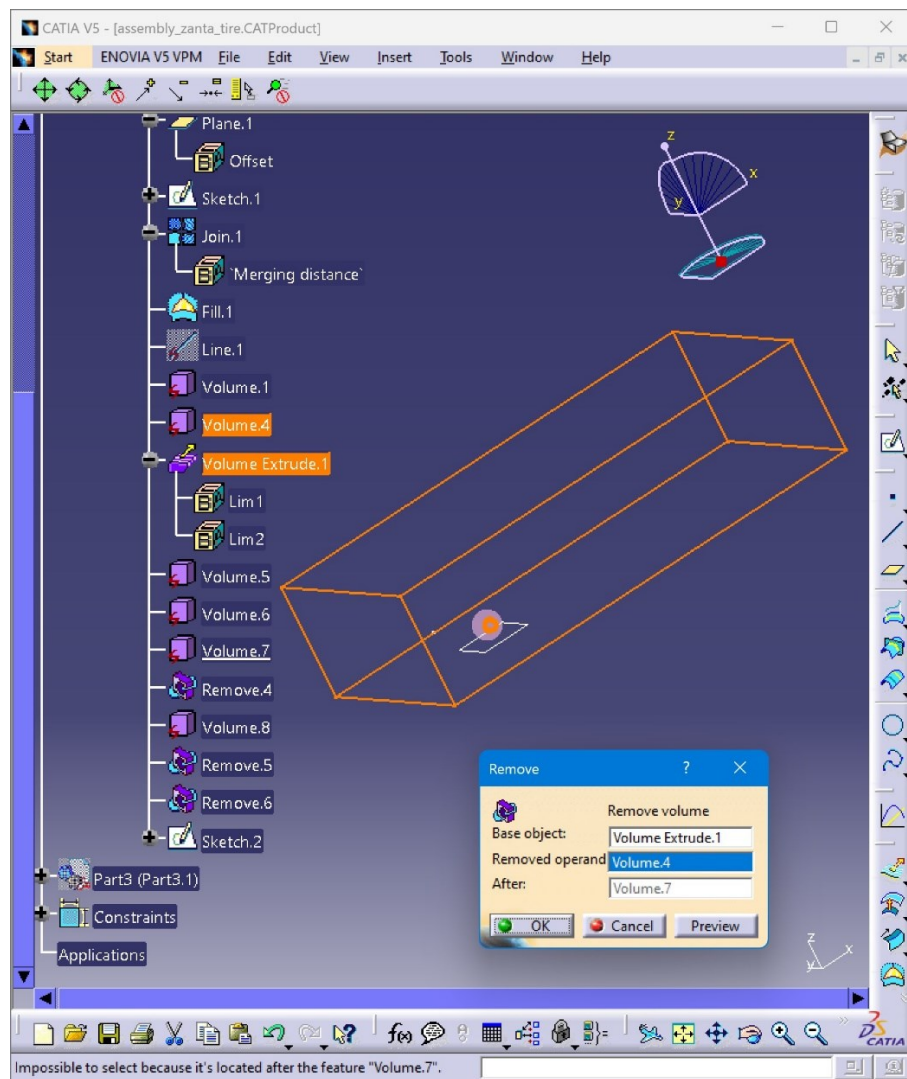


Εικόνα 3.4: Δημιουργία του Fill.1.

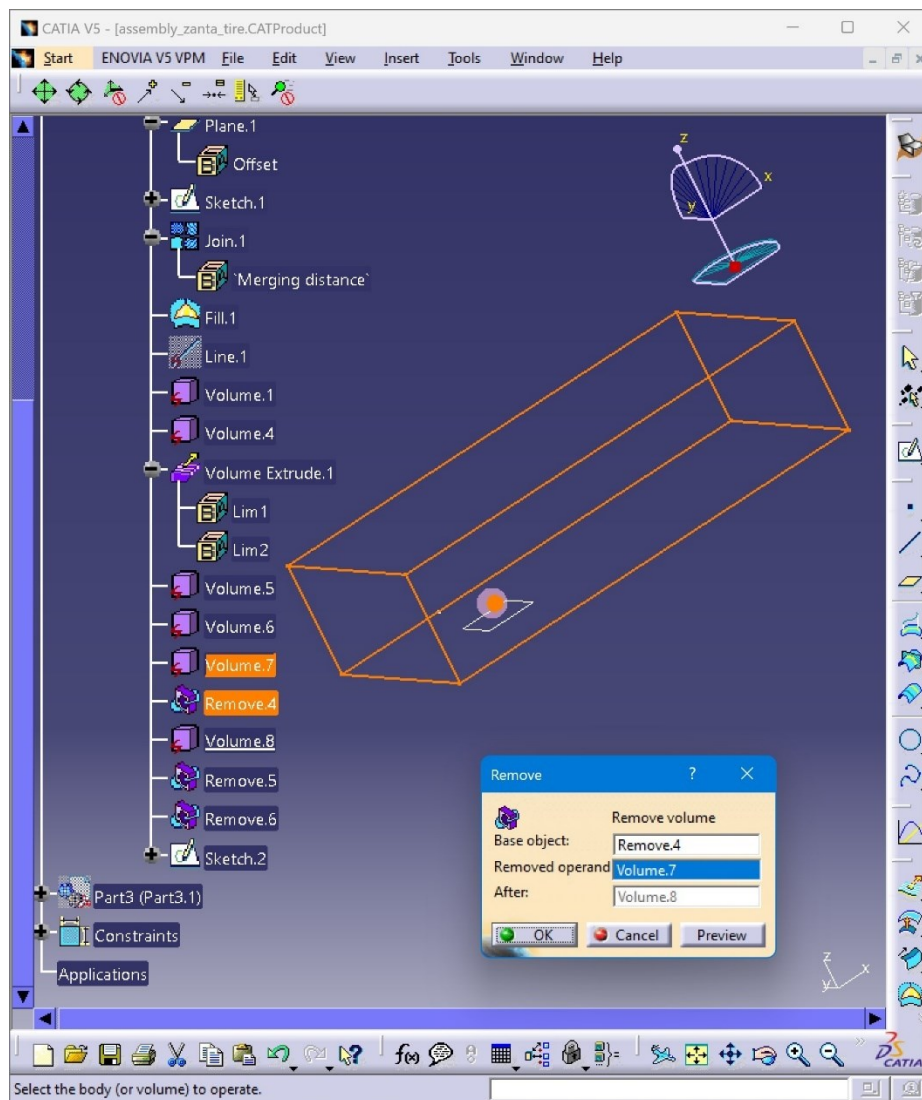


Εικόνα 3.5: Κατασκευή του Volume Extrude.1.

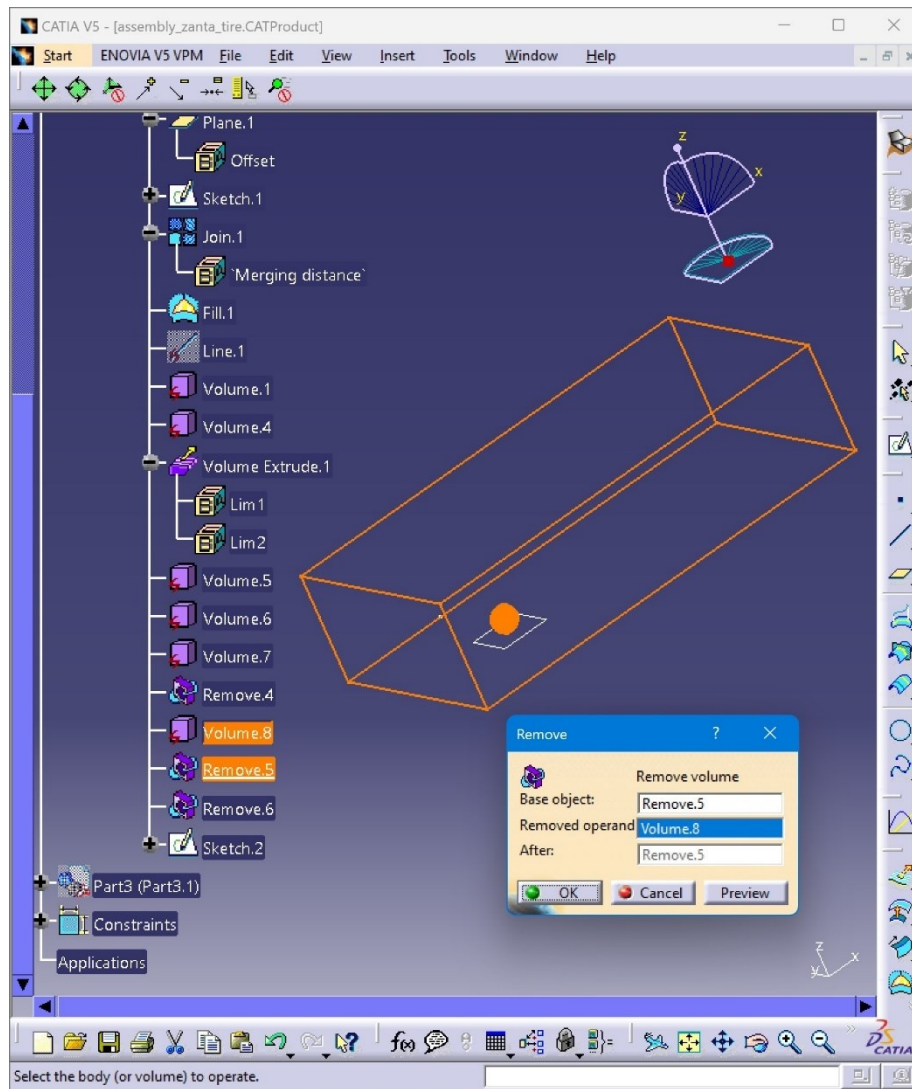
Συνεχίζοντας με τη κατασκευή του **Part2**, μέσω της εντολής **Remove** , κατασκευάζονται κατά ακολουθία τα Remove.4, Remove.5 και Remove.6. Τέλος, μέσω της εντολής **Sketch** , σχεδιάζεται άξονας ο οποίος διέρχεται από την αρχή των αξόνων και οποίος θα χρησιμοποιηθεί αργότερα στη καταχώρηση της γωνιακής ταχύτητας του τροχού στο λογισμικό ANSYS CFX, οπότε και προκύπτει το Sketch.2. Στο σημείο αυτό, παρουσιάζεται η προαναφερθείσα διαδικασία ολοκλήρωσης του **Part2**.



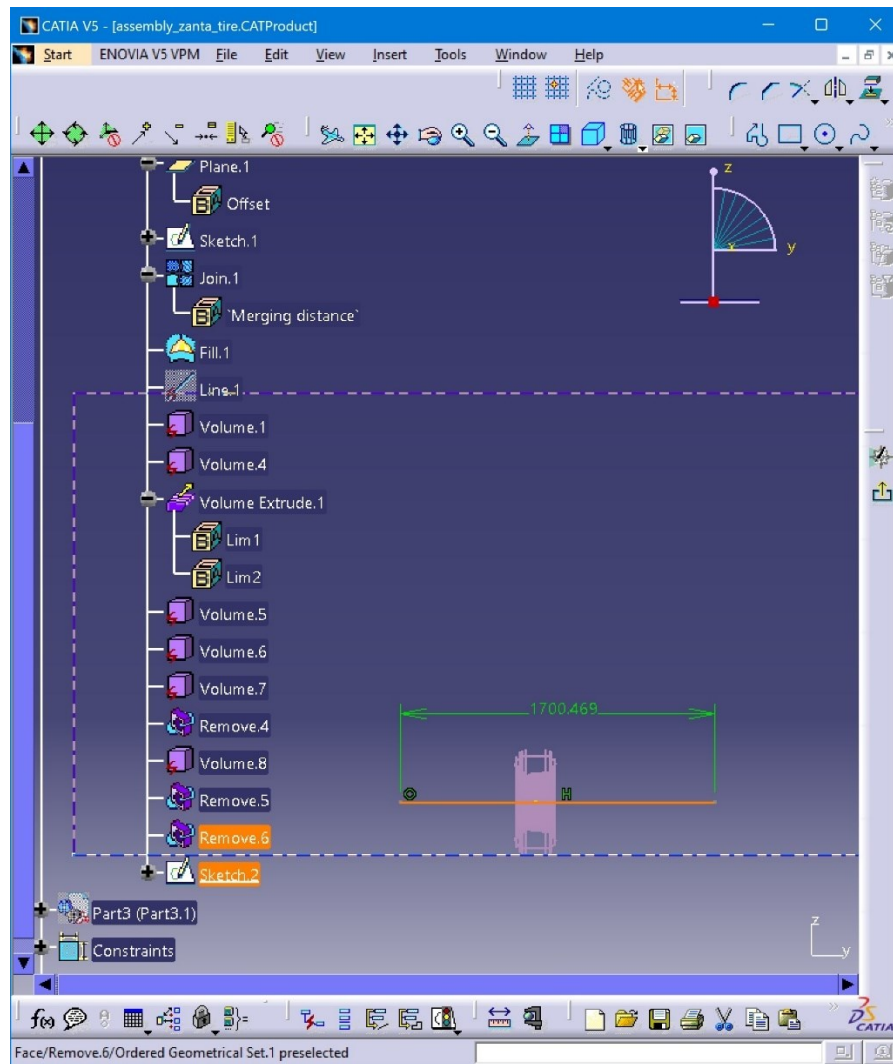
Εικόνα 3.6: Κατασκευή του Remove.4.



Εικόνα 3.7: Κατασκευή του Remove.5.




Εικόνα 3.8: Κατασκευή του Remove.6.




Εικόνα 3.9: Δημιουργία του Sketch.2.


Μετά τη κατασκευή του **Part2**, γίνεται αναφορά στη κατασκευή του Part3, κομμάτι από το οποίο θα προκύψουν οι δύο βασικοί όγκοι (domain), ο σταθερός (stationary) και ο περιστρεφόμενος (rotating), πάνω στους οποίους θα στηριχθεί η προσομοίωση του περιστρεφόμενου τροχού του οχήματος. Σε πρώτη φάση, δημιουργείται το Sketch.1 μέσω


της εντολής **Sketch** , και έπειτα κατασκευάζεται το Extrude.2 μέσω της εντολής **Extrude**




. Στη συνέχεια, γίνεται «γέμισμα» των ακραίων επιφανειών του κυλίνδρου που

προέκυψε από την εντολή Extrude , οπότε και δημιουργούνται τα Fill.2 και Fill.3 με

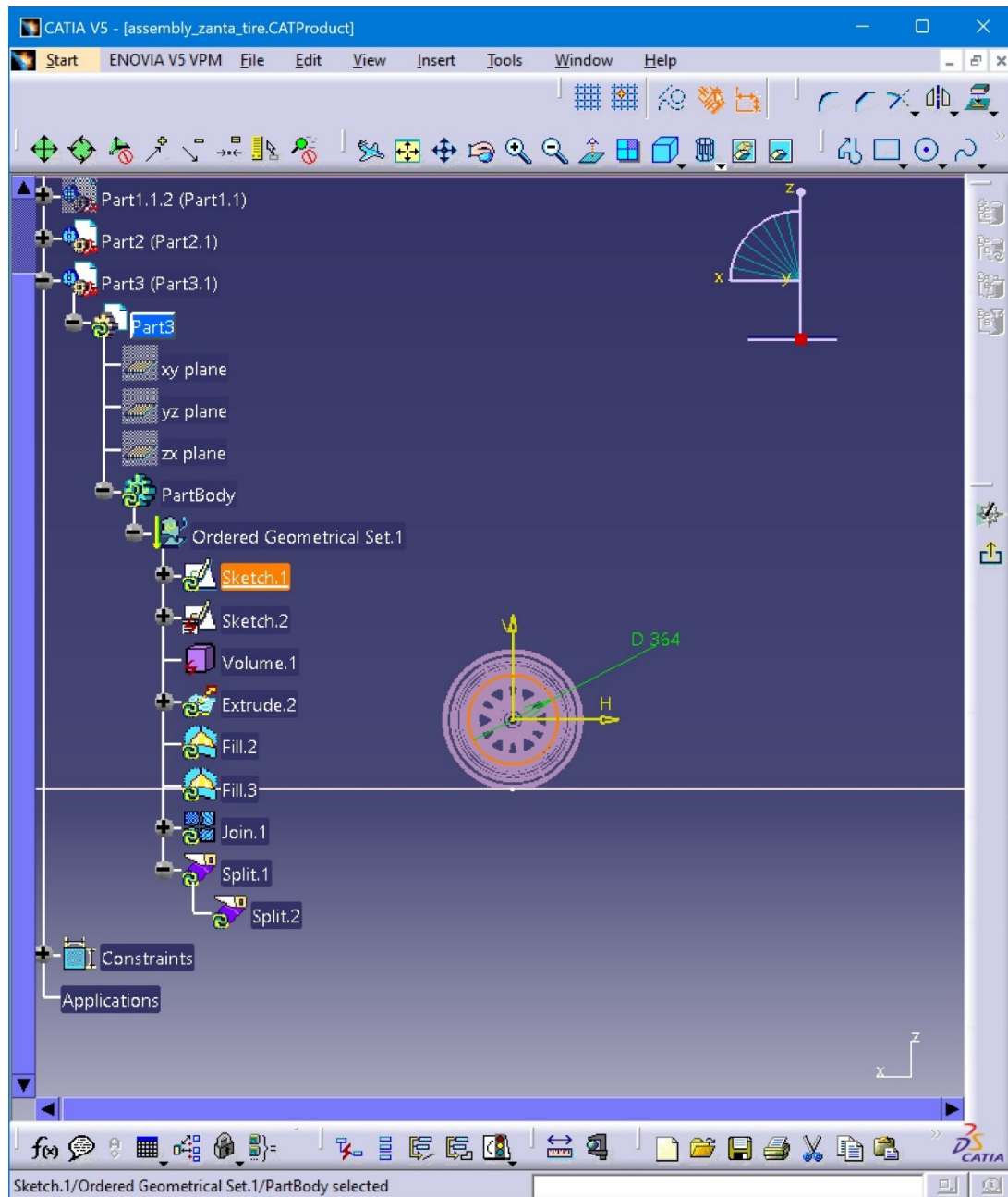
χρήση της εντολής **Fill** . Σε επόμενο βήμα, δημιουργείται συνένωση των επιφανειών

Fill.2, Fill.3 και Extrude.2, με χρήση της εντολής **Join** , οπότε και προκύπτει το Join.1.

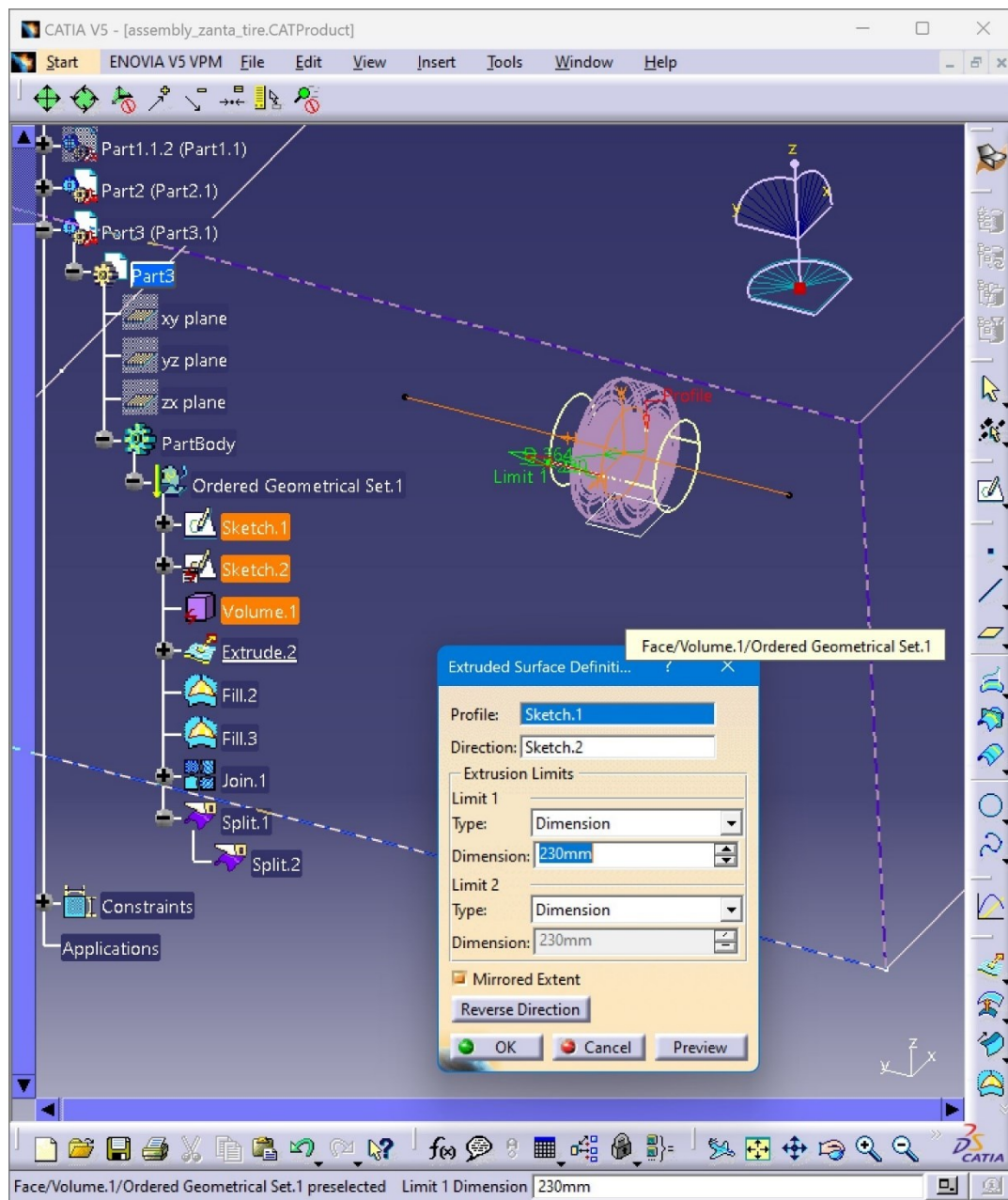
Τέλος, προκειμένου να προκύψουν οι δύο όγκοι (domain) της επερχόμενης προσομοίωσης,

γίνεται χρήση της εντολής **Split** , όπου προκύπτουν τα Split.1 και Split.2, με το πρώτο να αποτελεί τον σταθερό όγκο (stationary domain) και το δεύτερο να αποτελεί τον

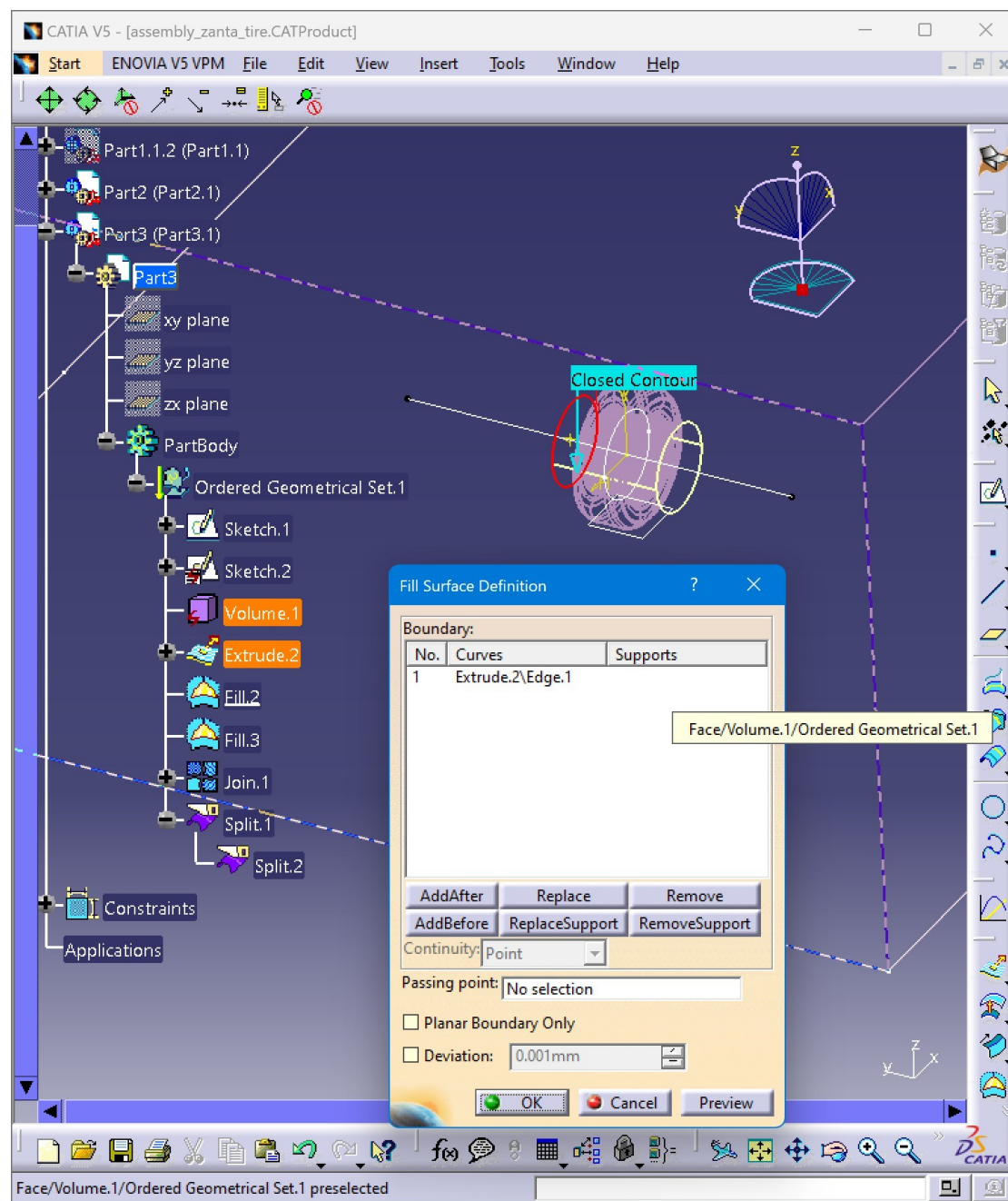
περιστρεφόμενο όγκο (rotating domain). Ακολουθώως, σημειώνεται σχηματικά η διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως.



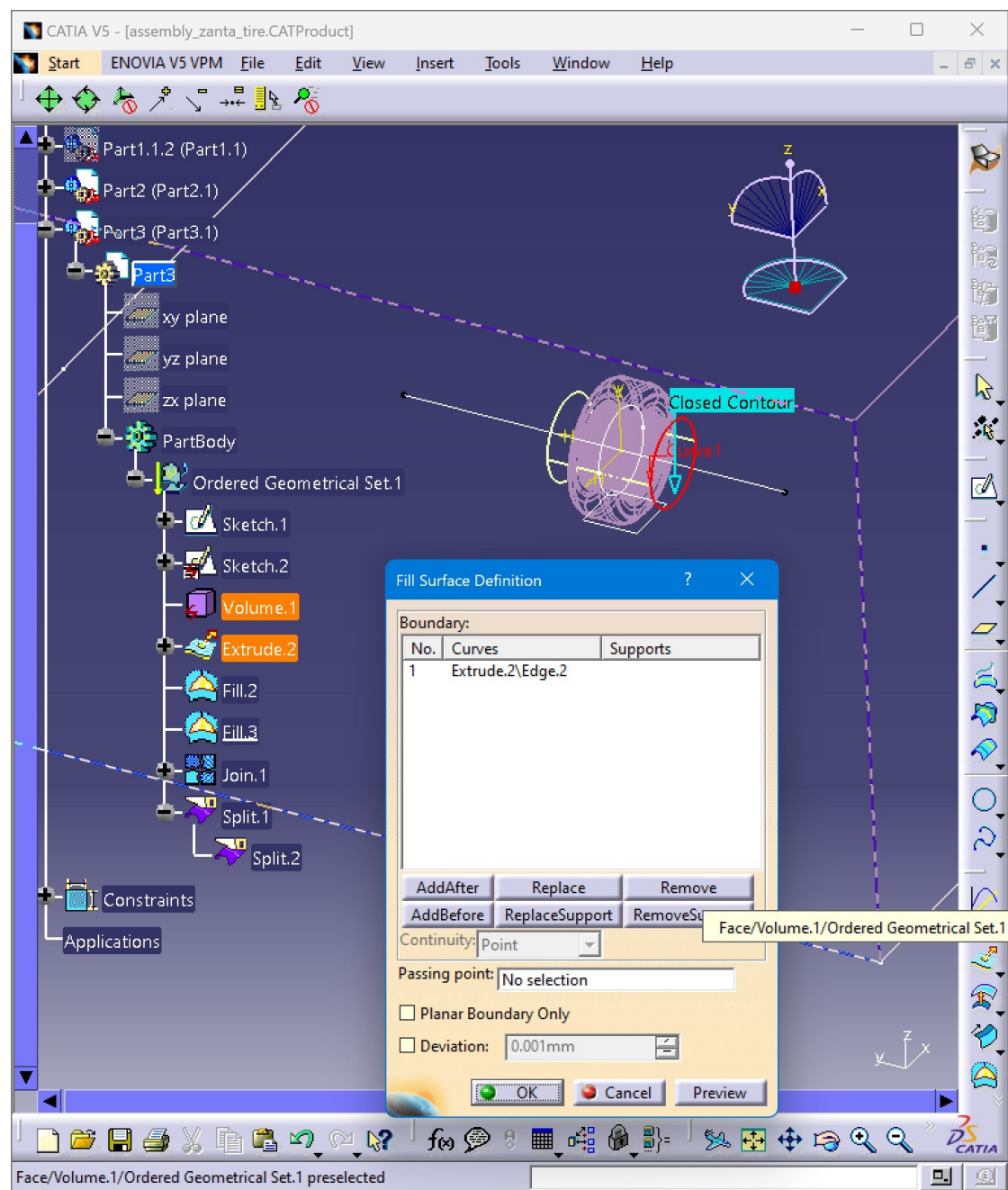
Εικόνα 3.10: Δημιουργία του Sketch.1.



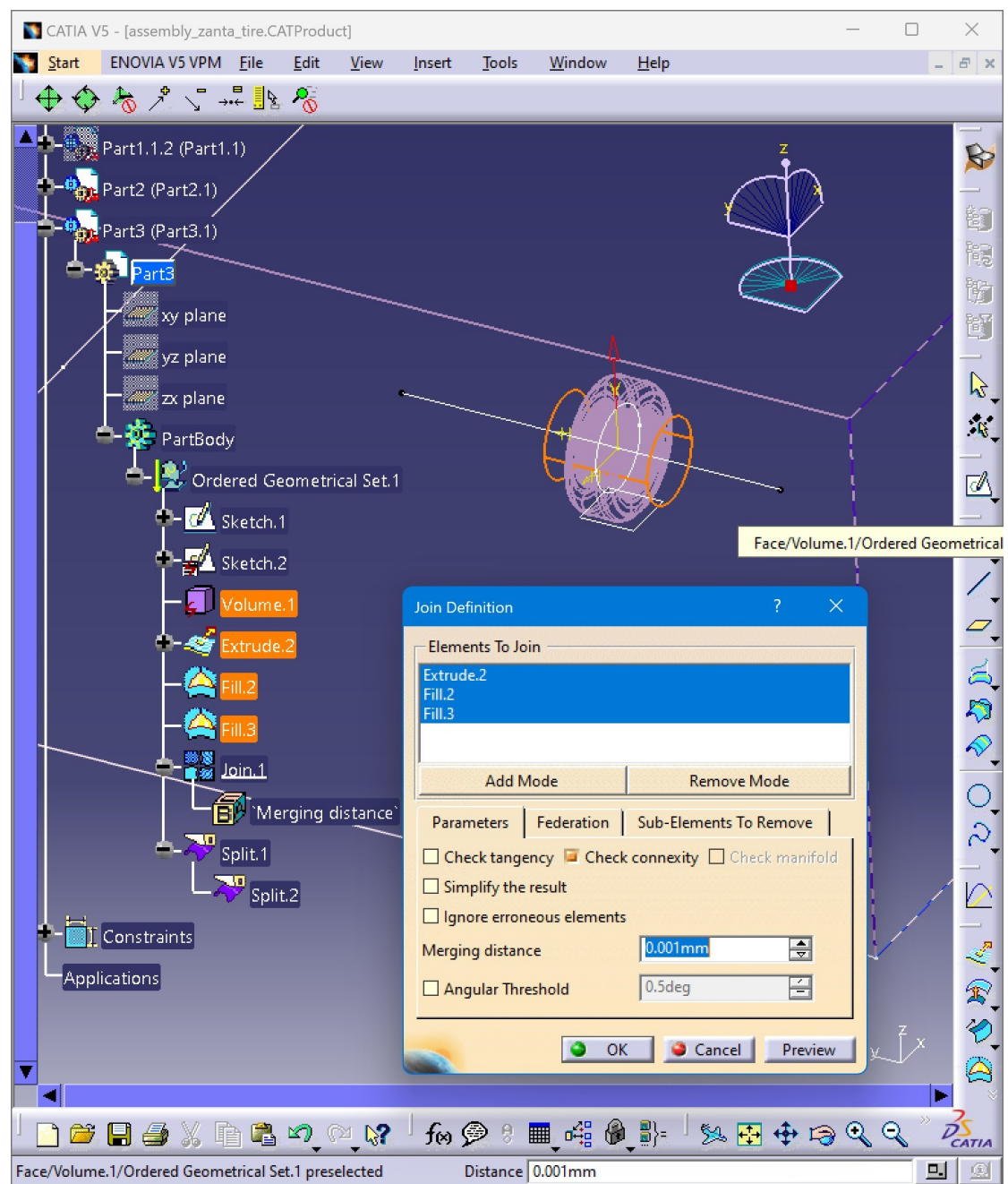
Εικόνα 3.11: Κατασκευή του Extrude.2.



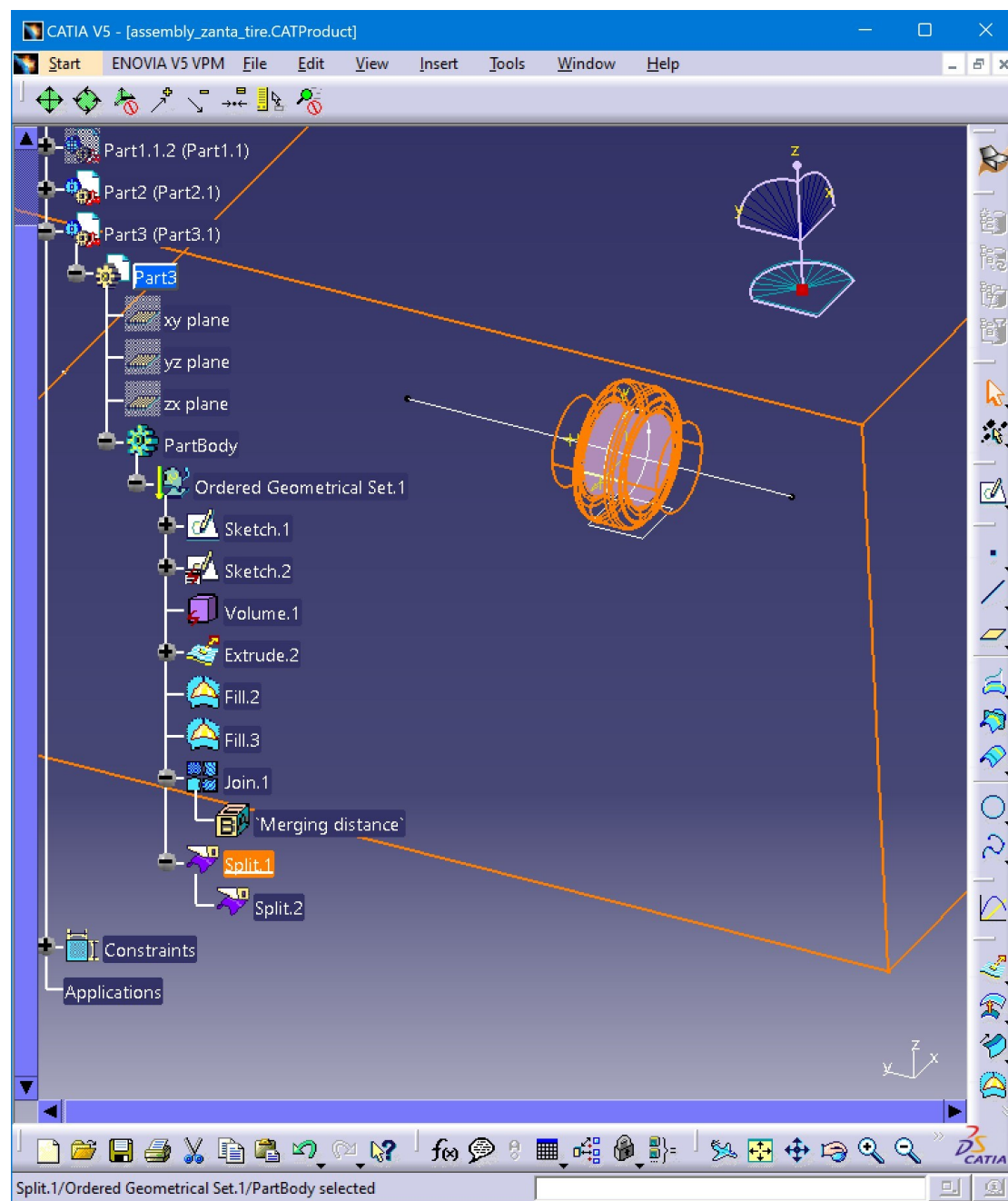
Εικόνα 3.12: Δημιουργία του Fill.2.



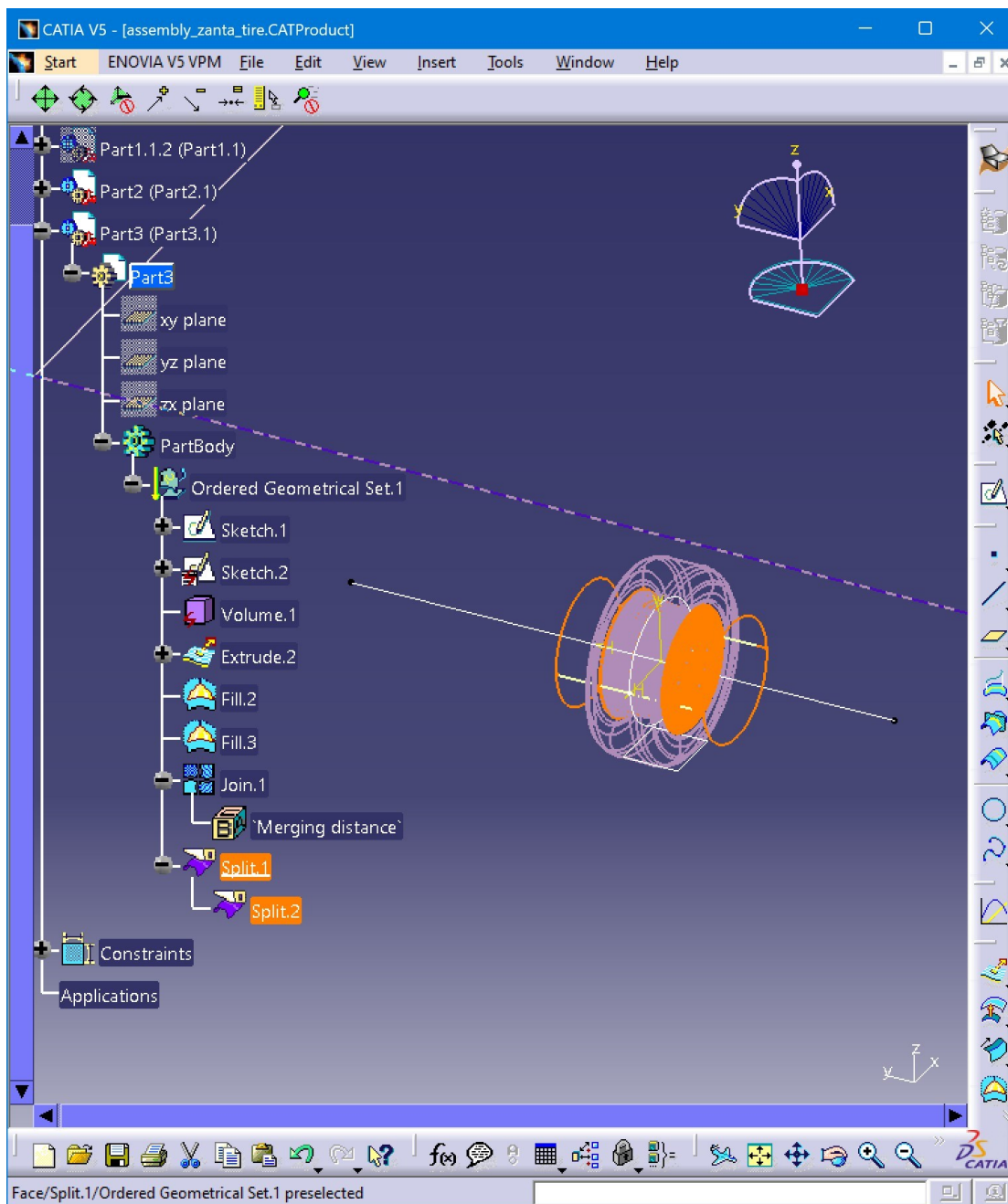
Εικόνα 3.13: Δημιουργία του Fill.3.



Εικόνα 3.14: Δημιουργία του Join.1.



Εικόνα 3.15: Δημιουργία του Split.1 (stationary domain).



Εικόνα 3.16: Δημιουργία του *Split.2* (rotating domain).

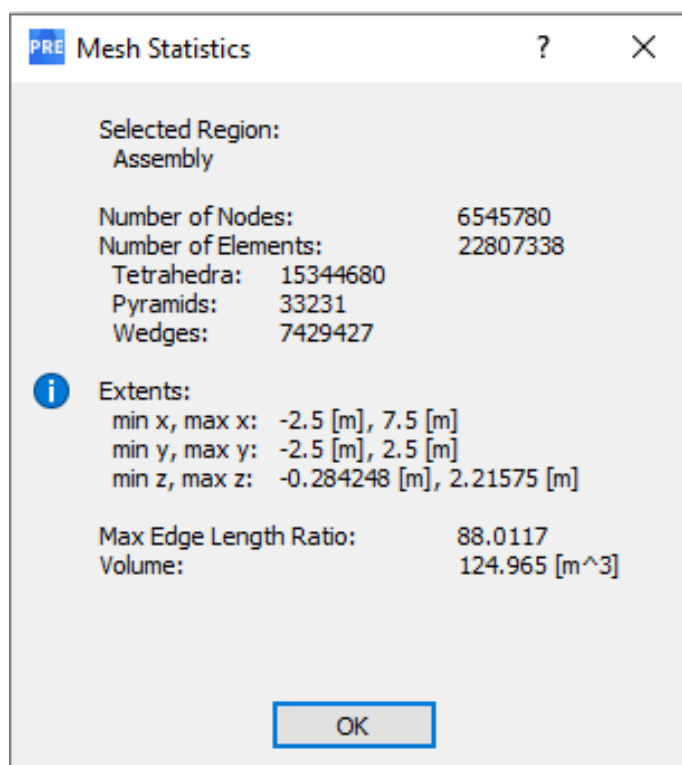
Με την ολοκλήρωση του **Part3**, αποθηκεύεται το τελικό τροποποιημένο αρχείο σε μορφή **.stp**, ονόματι **simulation_domain_4.stp**, το οποίο θα εισαχθεί στο λογισμικό ANSYS CFX, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση.

3.3 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΤΟ ANSYS CFX

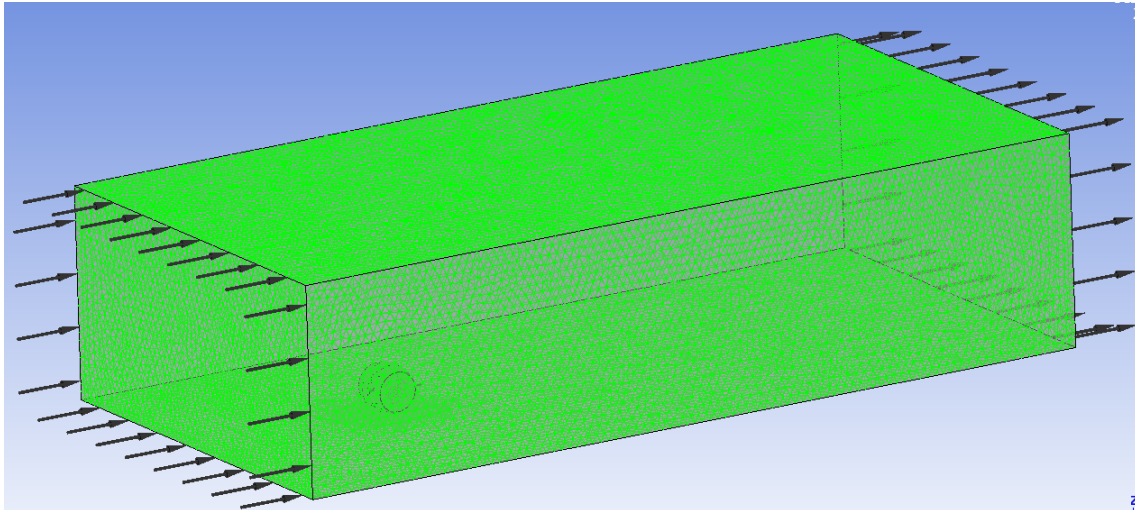
Για τη κατασκευή και προσομοίωση στο λογισμικό ANSYS CFX, του υπολογιστικού πλέγματος διακριτοποίησης της γεωμετρίας του αντικειμένου που κατασκευάστηκε στο λογισμικό CATIA V5, χρησιμοποιήθηκαν (6.545.780) κόμβοι και (22.807.338) στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, το πλέγμα δομήθηκε με τρεις τύπους στοιχείων, τετράεδρα (15.344.680), πυραμίδες (33.231) και πρίσματα (7.429.427). Σχετικά με τις διαστάσεις του συνολικού χώρου της προσομοίωσης σε κάθε άξονα, ισχύει:

- Άξονας (x): [min x, max x] = [-2,5 m, 7,5 m]
- Άξονας (y): [min y, max y] = [-2,5 m, 2,5 m]
- Άξονας (z): [min z, max z] = [-0,284248 m, 2,21575 m]

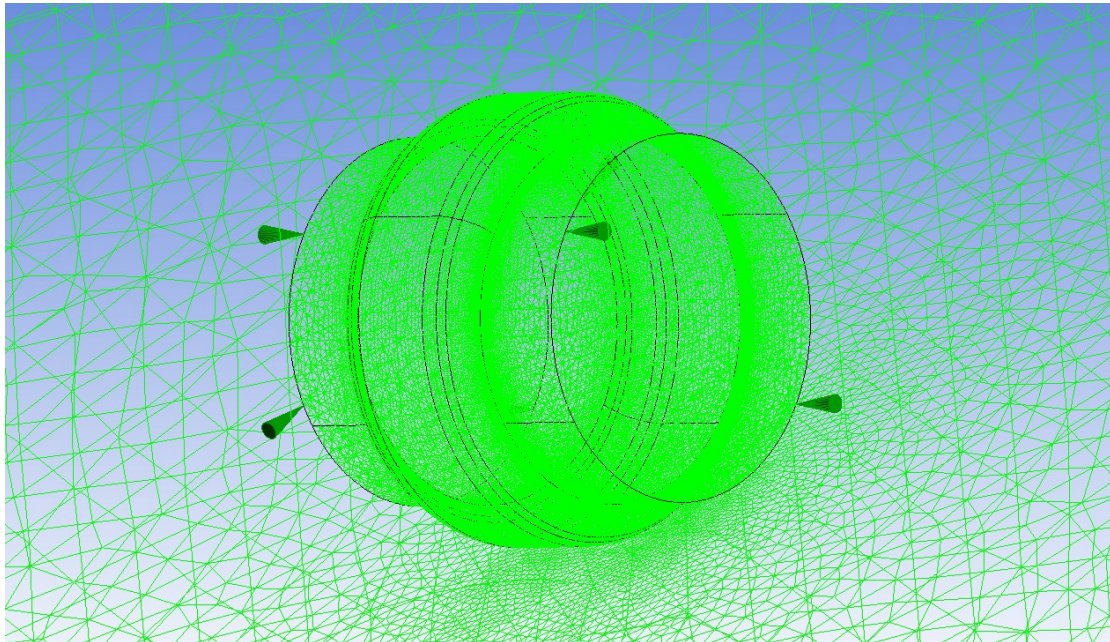
Όσον αφορά στον όγκο που καταλαμβάνει ο συνολικός χώρος που κατασκευάστηκε, λαμβάνει την τιμή των 124,965 (m³), καθώς επίσης να σημειωθεί η τιμή του συντελεστή μέγιστου μήκους ακμής (Max Edge Length Ratio), η οποία ανέρχεται στο 88,0117. Στη συνέχεια, προβάλλονται εικόνες οι οποίες, αποτυπώνουν τα παραπάνω καταγεγραμμένα δεδομένα και αναπαριστούν τη πλεγματική ανάπτυξη (meshing) των χώρων της προσομοίωσης και της μεταξύ τους διαχωριστικής επιφάνειας (Interface).



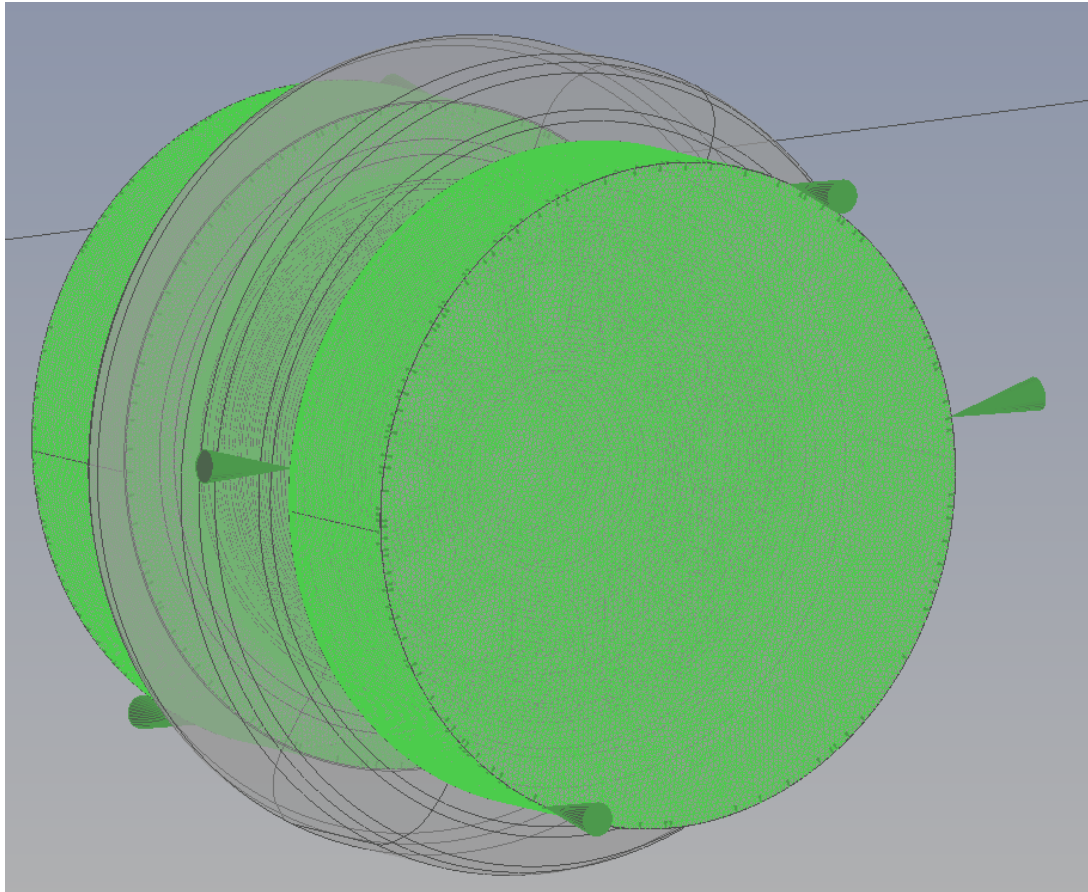
Εικόνα 3.17: Δεδομένα ρύθμισης του υπολογιστικού πλέγματος της προσομοίωσης.



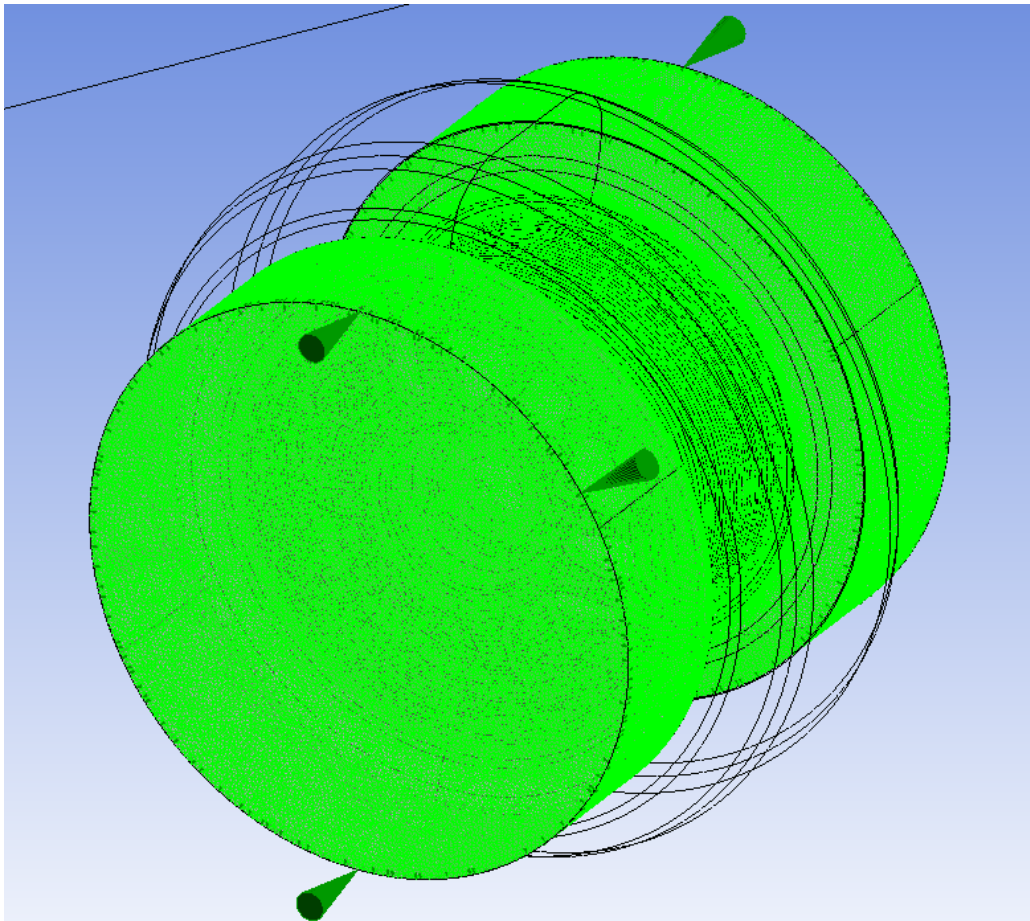
Εικόνα 3.18: Πλεγματική ανάπτυξη του σταθερού όγκου (stationary domain) (overview).



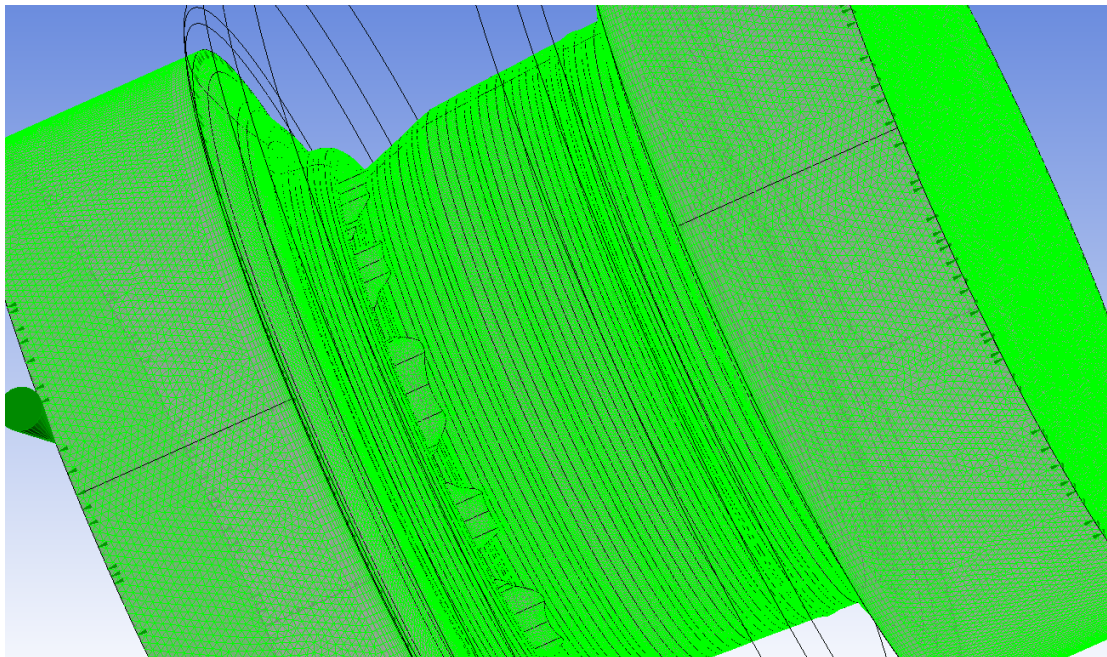
Εικόνα 3.19: Πλεγματική ανάπτυξη του σταθερού όγκου (stationary domain) (λεπτομέρεια).



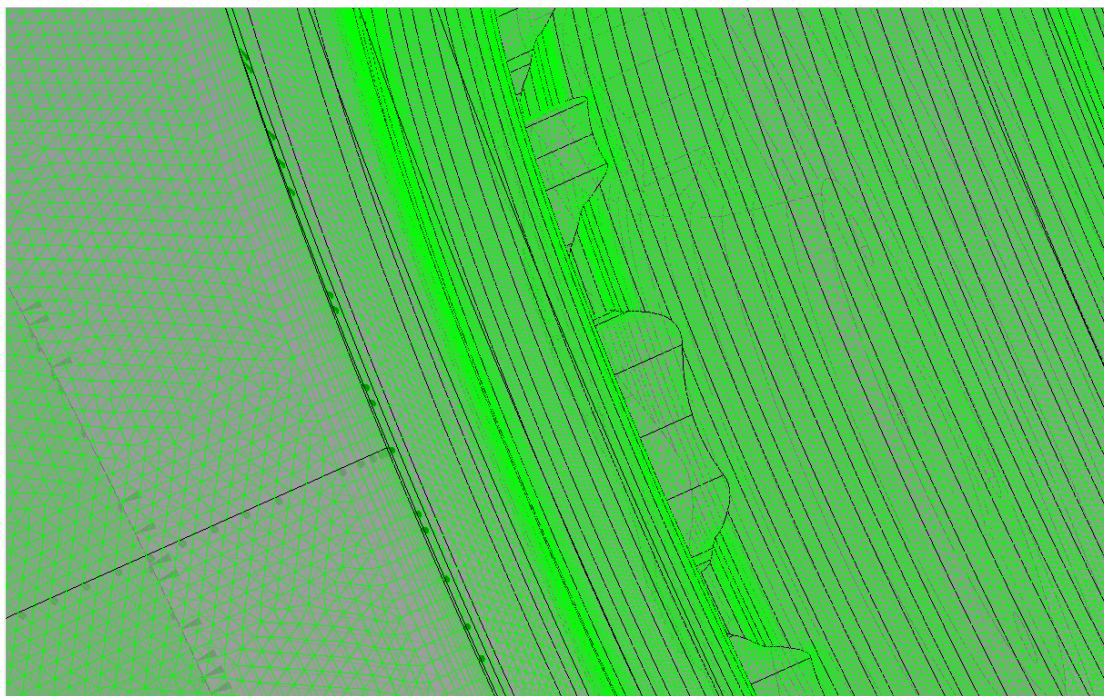
Εικόνα 3.20: Πλεγματική ανάπτυξη του περιστρεφόμενου όγκου (*rotating domain*) (λεπτομέρεια).



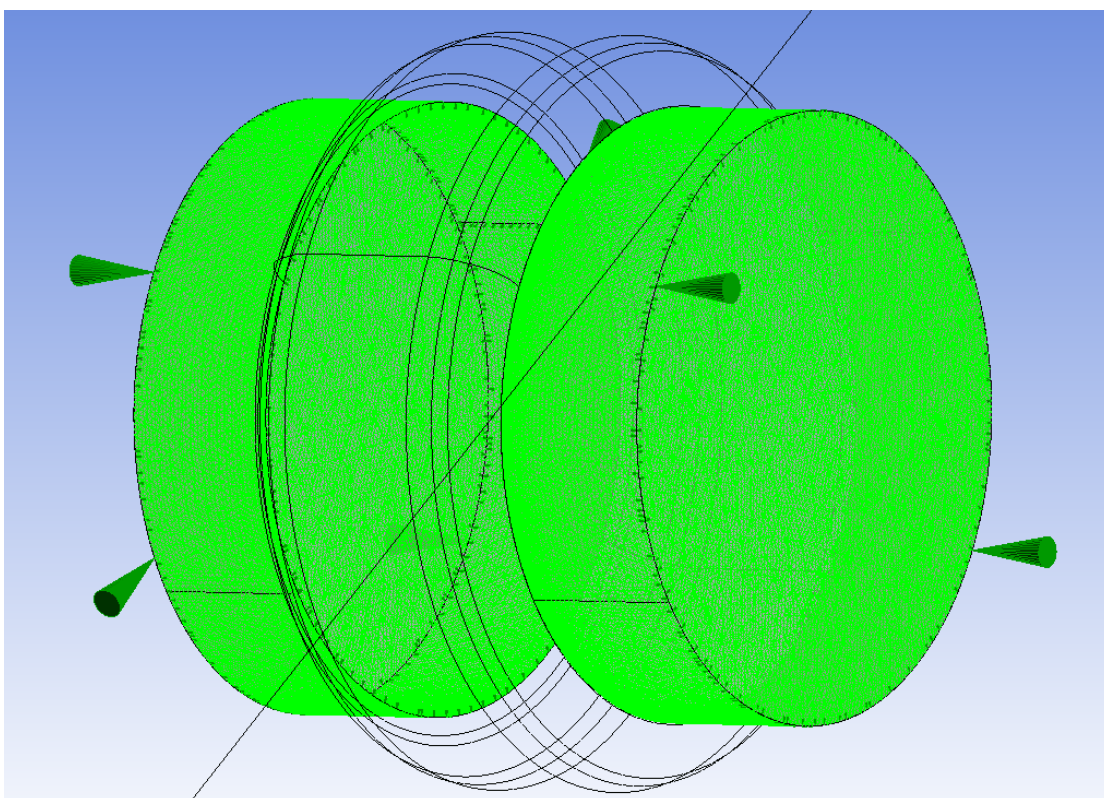
Εικόνα 3.21: Πλεγματική ανάπτυξη του περιστρεφόμενου όγκου (rotating domain) (εναλλακτική οπτική).



Εικόνα 3.22: Πλεγματική ανάπτυξη του περιστρεφόμενου όγκου (rotating domain) (εναλλακτική οπτική).



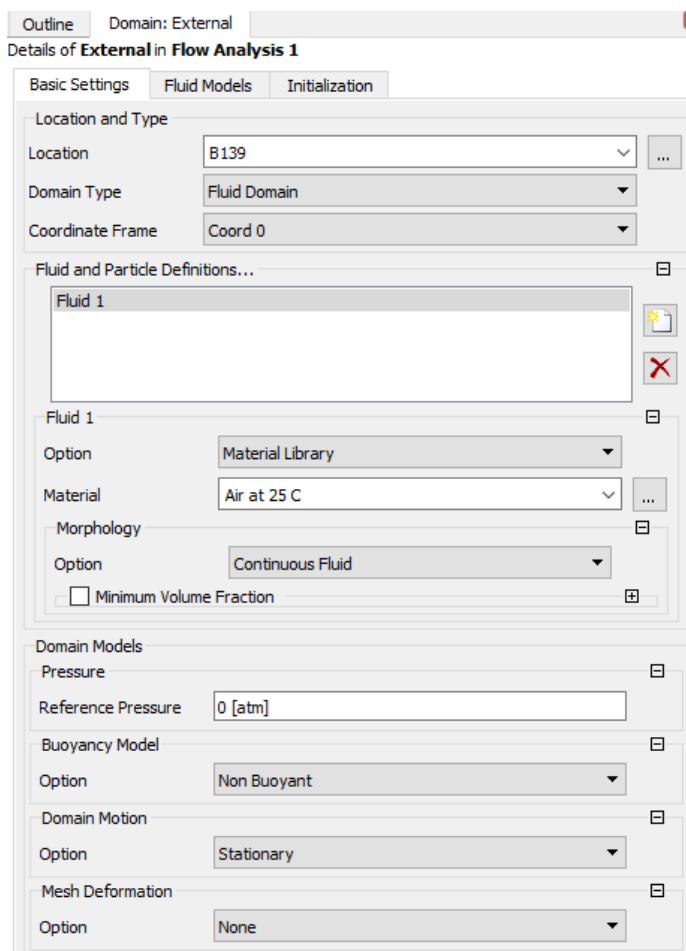
Εικόνα 3.23: Πλεγματική ανάπτυξη του περιστρεφόμενου όγκου (rotating domain) (λεπτομέρεια, όπου διακρίνεται η πυκνότητα του πλέγματος).



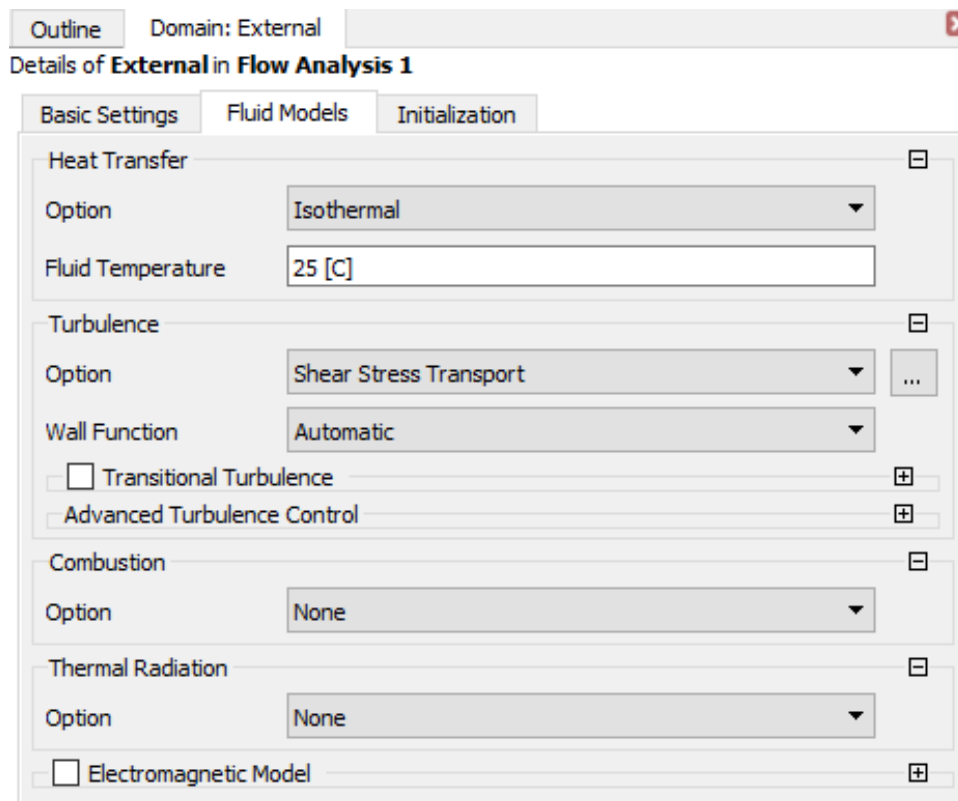
Εικόνα 3.24: Πλεγματική ανάπτυξη της διαχωριστικής επιφάνειας (Interface) μεταξύ σταθερού και περιστρεφόμενου όγκου της προσομοίωσης.

3.4 ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΤΡΟΧΟΥ ΣΤΟ ANSYS CFX

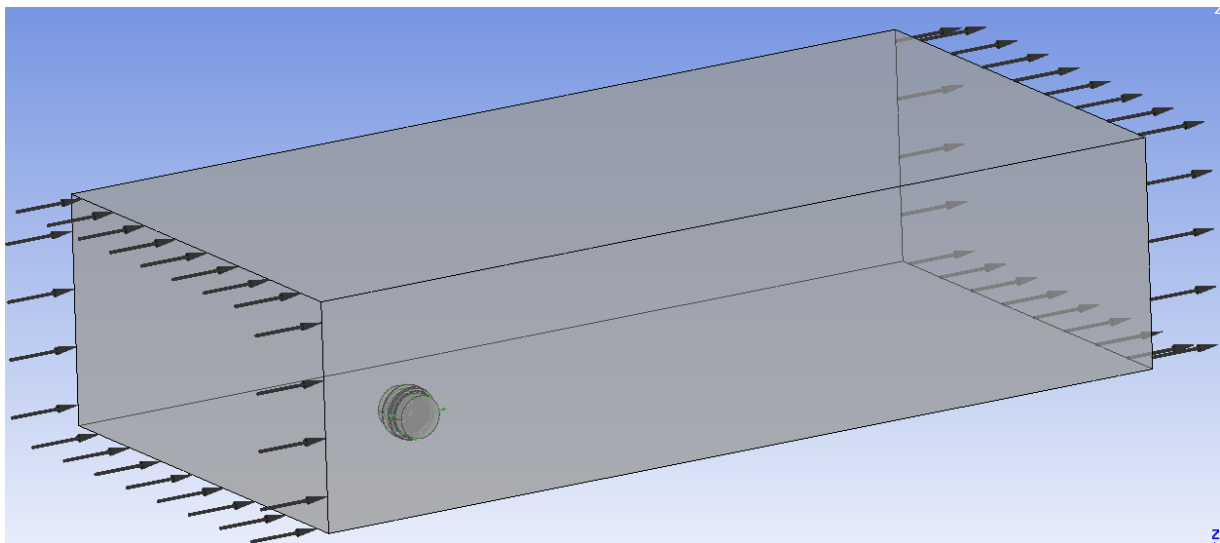
Η ρύθμιση της προσομοίωσης του περιστρεφόμενου τροχού ξεκινά με τις επιβαλλόμενες συνθήκες στον σταθερό της όγκο (stationary domain). Πιο συγκεκριμένα, στις βασικές ρυθμίσεις του όγκου αυτού, αρχικά ορίζεται ως κυκλοφορούν ρευστό, αέρας στους 25 °C, και στη συνέχεια ρυθμίζεται η πίεση αναφοράς στις 0 (atm) (ώστε οι υπολογισμοί της πίεσης να αναφέρονται σε απόλυτες τιμές και όχι σχετικές). Επιπροσθέτως, καταχωρείται το προσομοιωμένο μοντέλο χωρίς υδροστατική άνωση (Non Buoyant) και ρυθμίζεται ο χώρος ως ακίνητος (Stationary). Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά της ροής του ρευστού (αέρας) στον χώρο αυτό, σε πρώτη φάση ορίζονται οι εξωσώεις που αφορούν σε ασυμπίεστο ρευστό σταθερής θερμοκρασίας (isothermal), ενώ ως μοντέλο τύρβης επιλέγεται το SST - Shear Stress Transport. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται και αναπαρίσταται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 3.25: Βασικές ρυθμίσεις του ακίνητου όγκου (stationary domain) της προσομοίωσης.



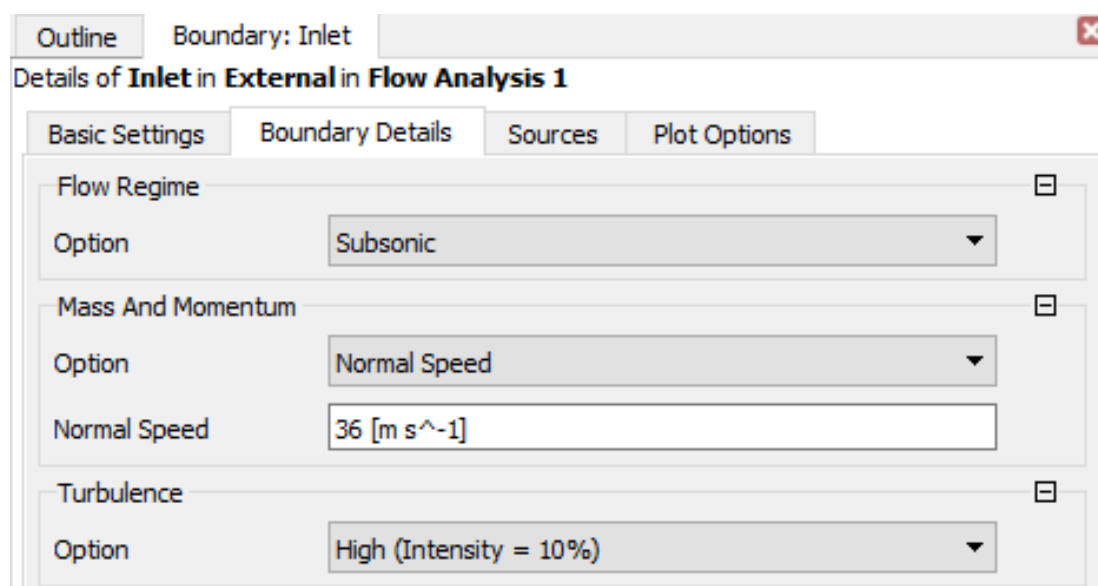
Εικόνα 3.26: Χαρακτηριστικά της ροής του ρευστού (αέρας) στον ακίνητο όγκο (stationary domain) της προσομοίωσης.



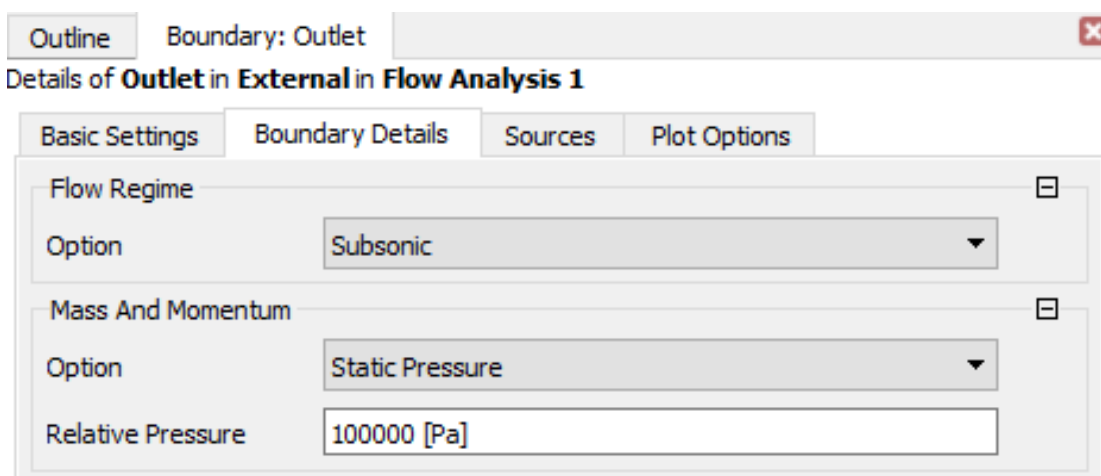
Εικόνα 3.27: Απεικόνιση του ακίνητου όγκου (stationary domain) κατά την ρύθμιση της προσομοίωσης.

Έπειτα από την αρχική ρύθμιση του ακίνητου όγκου (stationary domain) της προσομοίωσης, στο εσωτερικό του, γίνεται επιβολή οριακών συνθηκών που επικρατούν στην είσοδο (Inlet), έξοδο (Outlet), κάτω τοίχωμα (Road) και στα πλευρικά τοιχώματά (Side) του. Συγκεκριμένα, στην είσοδο (Inlet), καταχωρείται ως υποηχητική (Subsonic), η ταχύτητα της ροής του ρευστού (αέρας), καθώς επίσης λαμβάνει τη τιμή των 36 (m/s) σε υψηλή κατάσταση

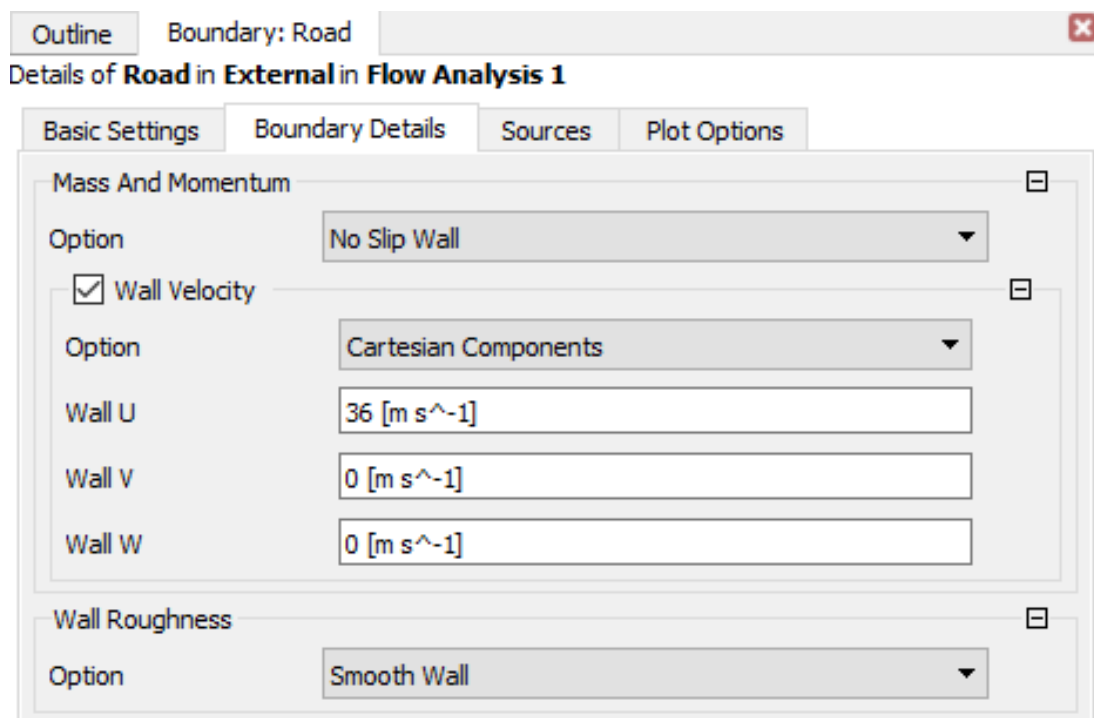
τύρβης (Turbulence Intensity = 10%). Σχετικά με την έξοδο (Outlet), αρχικά ρυθμίζεται και εδώ η ταχύτητα της ροής του ρευστού (αέρας), ως υποηχητική (Subsonic), και στη συνέχεια ορίζεται η πίεση ως στατική (Static) στα 100.000 (Pa). Όσον αφορά στο κάτω τοίχωμα (Road) του ακίνητου όγκου (stationary domain) της προσομοίωσης, σε πρώτη φάση ορίζεται συνθήκη μη ολίσθησης του ρευστού (αέρας) (No Slip Wall). Σε δεύτερη φάση καταχωρείται η τιμή της ταχύτητας της κίνησης του τοιχώματος στα 36 (m/s), μόνο κατά την διεύθυνση του οριζόντιου άξονα του χώρου της προσομοίωσης σε διεύθυνση αντίθετη της κίνησης του οχήματος (σχετικό σύστημα αναφοράς). Τέλος, στη τρίτη φάση καταχωρείται ως λεία η επιφάνεια του τοιχώματος (Smooth Wall). Συνοψίζοντας στο σημείο αυτό, ορίζεται η συνθήκη ελεύθερης ολίσθησης του ρευστού (αέρας) στα πλευρικά τοιχώματα (Side) του ακίνητου όγκου (stationary domain) της προσομοίωσης. Οι προαναφερθείσες οριακές συνθήκες ροής του ρευστού (αέρας), παρουσιάζονται ακολούθως.



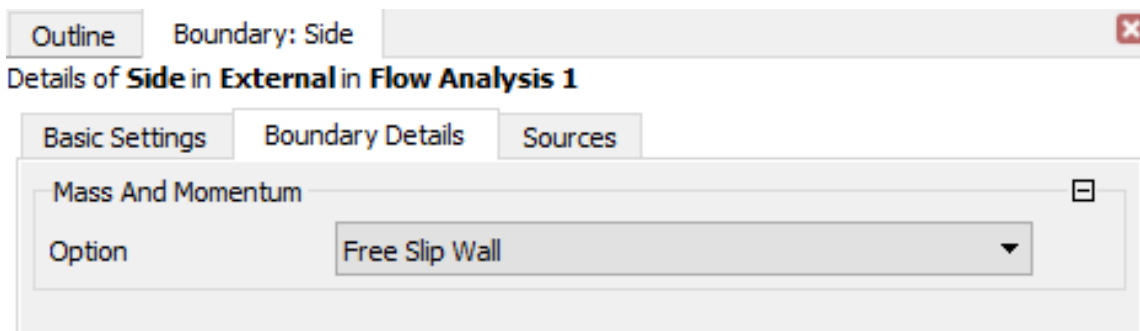
Εικόνα 3.28: Συνθήκες ροής του ρευστού (αέρας), στην είσοδο (Inlet) του ακίνητου όγκου (stationary domain) της προσομοίωσης.



Εικόνα 3.29: Συνθήκες ροής του ρευστού (αέρας), στην έξοδο (Outlet) του ακίνητου όγκου (stationary domain) της προσομοίωσης.



Εικόνα 3.30: Συνθήκες ροής του ρευστού (αέρας), στο κάτω τοίχωμα (Road) του ακίνητου όγκου (stationary domain) της προσομοίωσης.

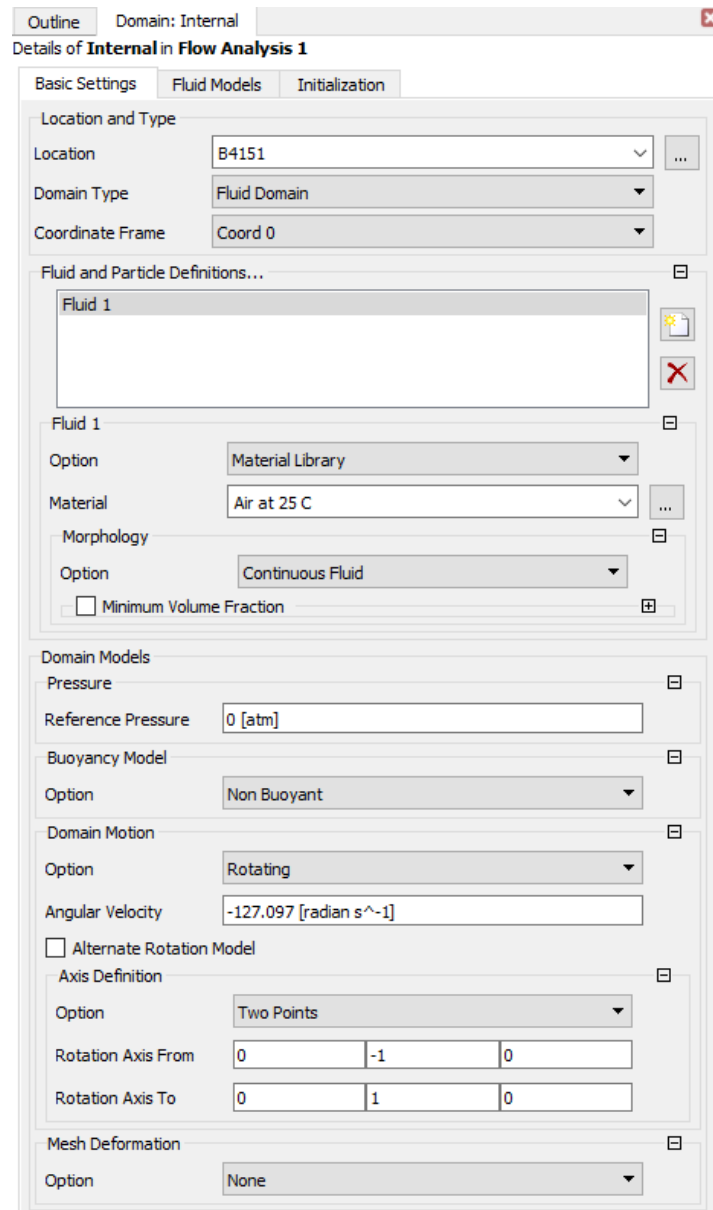


Εικόνα 3.31: Συνθήκες ροής του ρευστού (αέρας), στα πλευρικά τοιχώματα (Side) του ακίνητου όγκου (stationary domain) της προσομοίωσης.

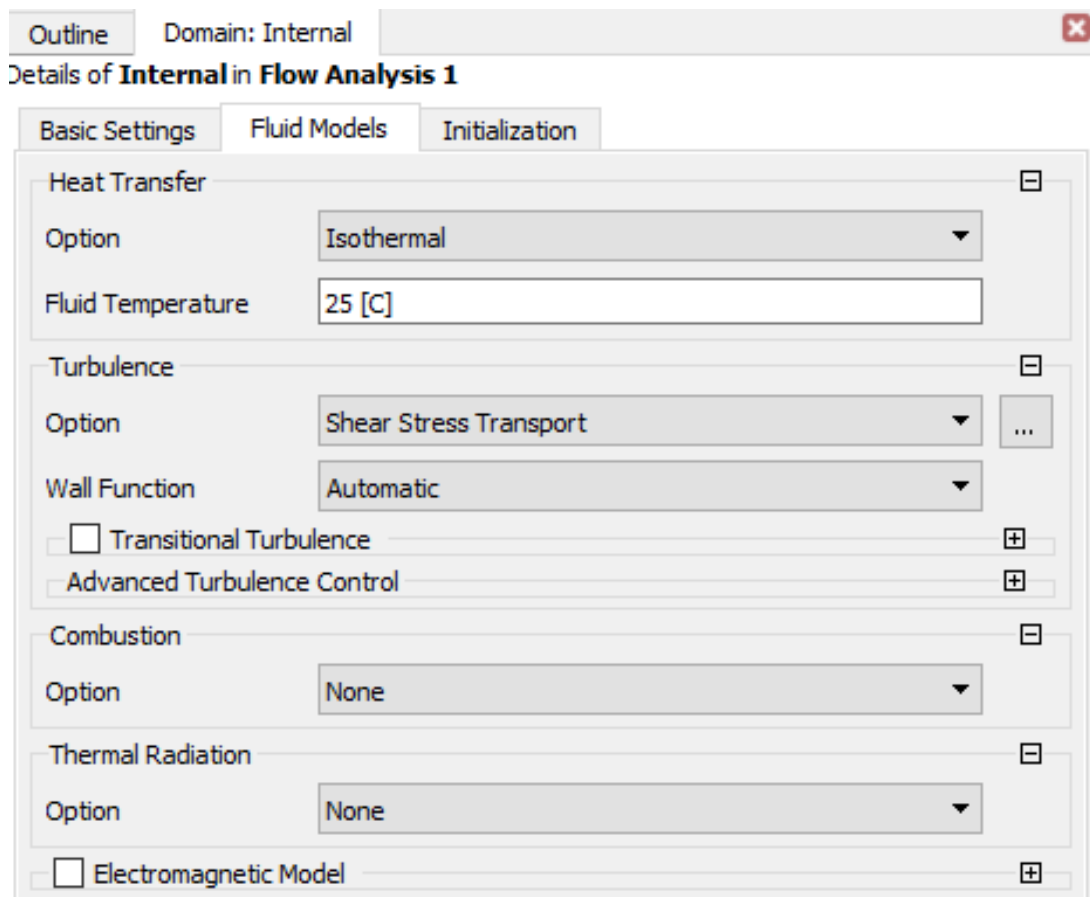
Ύστερα από τη ρύθμιση των οριακών συνθηκών που επικρατούν στον ακίνητο όγκο (stationary domain) της προσομοίωσης, γίνεται μετάβαση στις συνθήκες που επιβάλλονται στον περιστρεφόμενο όγκο (rotating domain), καθώς επίσης στην διεπιφάνεια (Interface) των δύο προαναφερθέντων όγκων (domains) της προσομοίωσης. Αρχικά, προβάλλονται οι βασικές ρυθμίσεις του περιστρεφόμενου όγκου (rotating domain). Λεπτομερέστερα, ορίζεται ως ρευστό, αέρας στους 25°C, με την πίεση αναφοράς καθορισμένη στις 0 (atm). Επιπροσθέτως, καταχωρείται το προσομοιωμένο μοντέλο ως μη έων υδροστατική άνωση (Non Buoyant) και ρυθμίζεται ο όγκος ως περιστρεφόμενος (Rotating). Εκτός αυτού, καταχωρείται η τιμή της γωνιακής ταχύτητας του τροχού στα (-127,097) (rad/s). Τέλος, καταχωρούνται τα σημεία τα οποία ορίζουν τον άξονα περιστροφής του ελαστικού, με καρτεσιανές συντεταγμένες (0, -1, 0) και (0, 1, 0), στους άξονες x, y, z, αντιστοίχως. Στη συνέχεια ορίζονται οι εντολές ρύθμισης της ροής του ρευστού (αέρας) στον περιστρεφόμενο χώρο (rotating domain) της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, ορίζονται οι εξισώσεις

ασυμπίεστου ισοθερμοκασιακού ρευστού, με τη θερμοκρασία του ρευστού (αέρας) ορισμένη στους 25 °C. Επιπλέον ορίζεται το μοντέλο τυρβής 2 εξισώσεων SST (Shear Stress Transport).

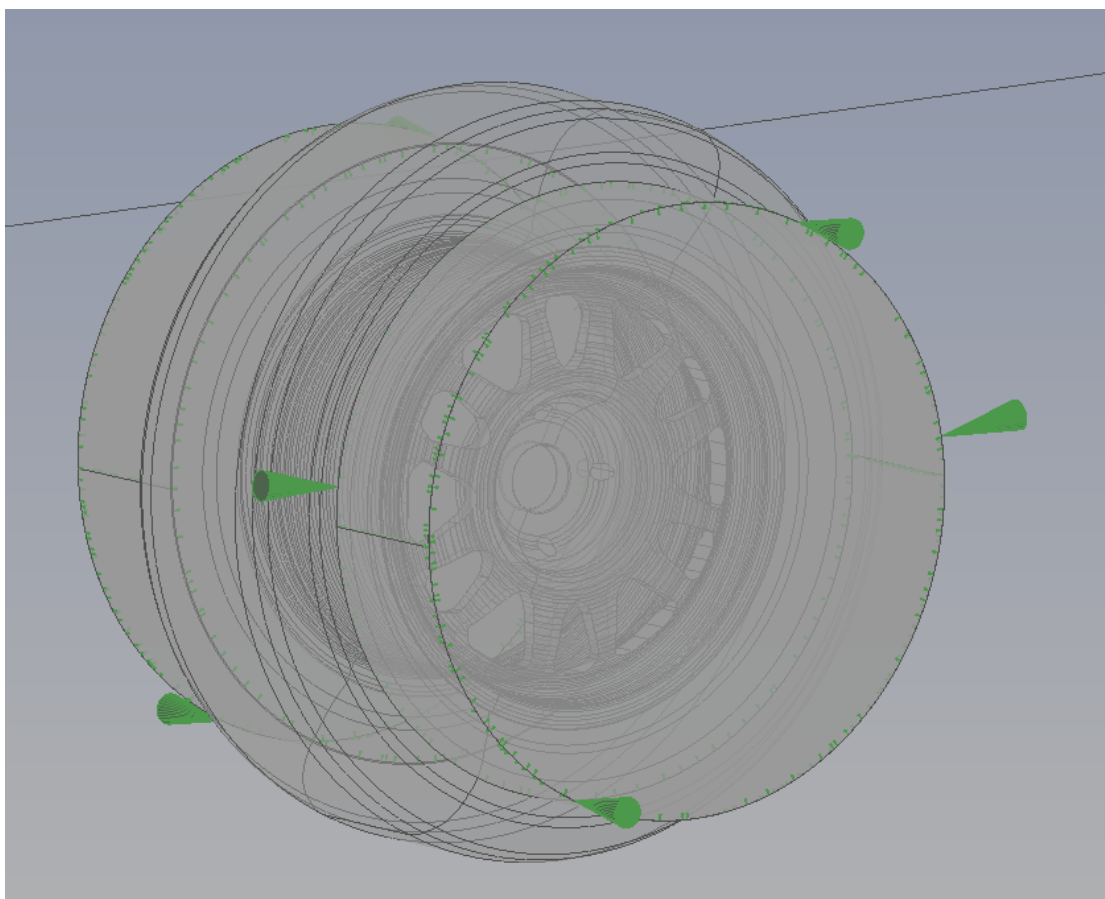
Στο σημείο αυτό, ολοκληρώνεται η ρύθμιση του περιστρεφόμενου όγκου (rotating domain) της προσομοίωσης, και δίνεται εστίαση στην ρύθμιση των συνθηκών που παρουσιάζονται στην διεπιφάνεια (Interface), μεταξύ ακίνητου (stationary domain) και περιστρεφόμενου όγκου (rotating domain) της προσομοίωσης. Αναφορικά, με τις βασικές ρυθμίσεις, ορίζεται ως ρευστό, ο αέρας μεταξύ των δύο πλευρών της διεπιφάνειας (Interface), καθώς επίσης χαρακτηρίζεται στην εκάστοτε επιλογή, η εξωτερική (External) και η εσωτερική επιφάνεια (Internal), της διεπιφάνειας (Interface). Ύστερα, καταχωρείται το εναλλασσόμενο πλαίσιο (Frame Change) ως μη κινούμενος ρότορας (Frozen Rotor). Όσον αφορά στη ροή του ρευστού (αέρας) στη διεπιφάνεια (Interface), χαρακτηρίζεται ως συντηρητική (Conservative Interface Flux). Τέλος, σχετικά με τη μέθοδο σύνδεσης των πλεγμάτων (meshes) εκατέρωθεν της διεπιφάνειας, επιλέγεται εκείνη του γενικού πλέγματος διεπαφής (General Grid Interface ή GGI). Σε κοινό μοτίβο με τα προαναφερθέντα, παρατίθενται εικόνες που περιγράφουν και σκιαγραφούν τις διαδικασίες ρύθμισης του περιστρεφόμενου όγκου (rotating domain) καθώς επίσης και της διεπιφάνειας (Interface) της προσομοίωσης.



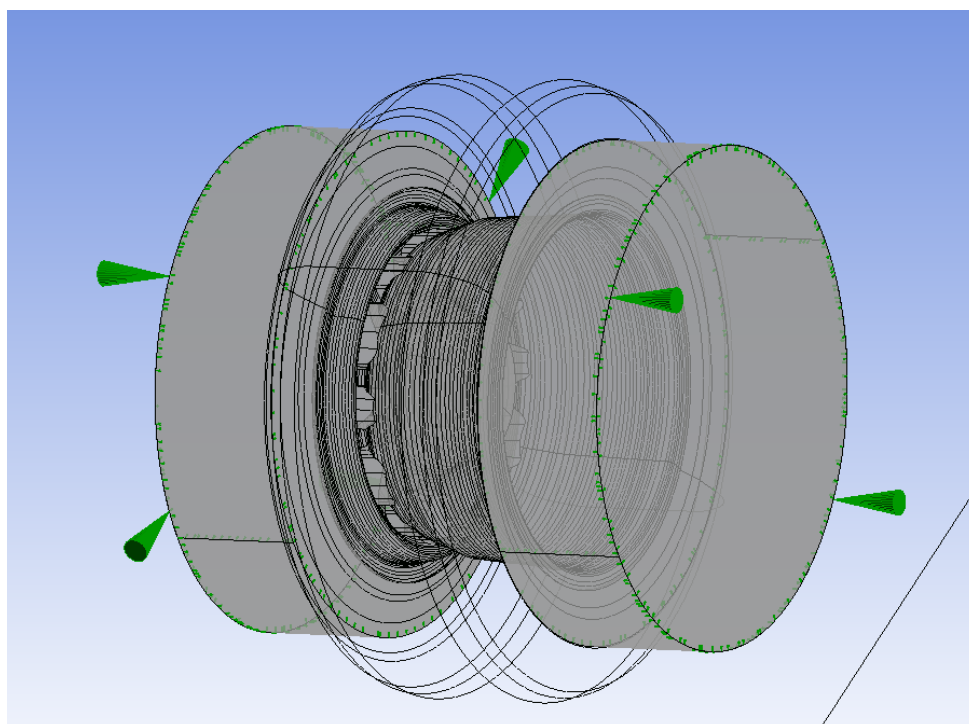
Εικόνα 3.32: Βασικές ρυθμίσεις του περιστρεφόμενου όγκου (*rotating domain*) της προσομοίωσης.



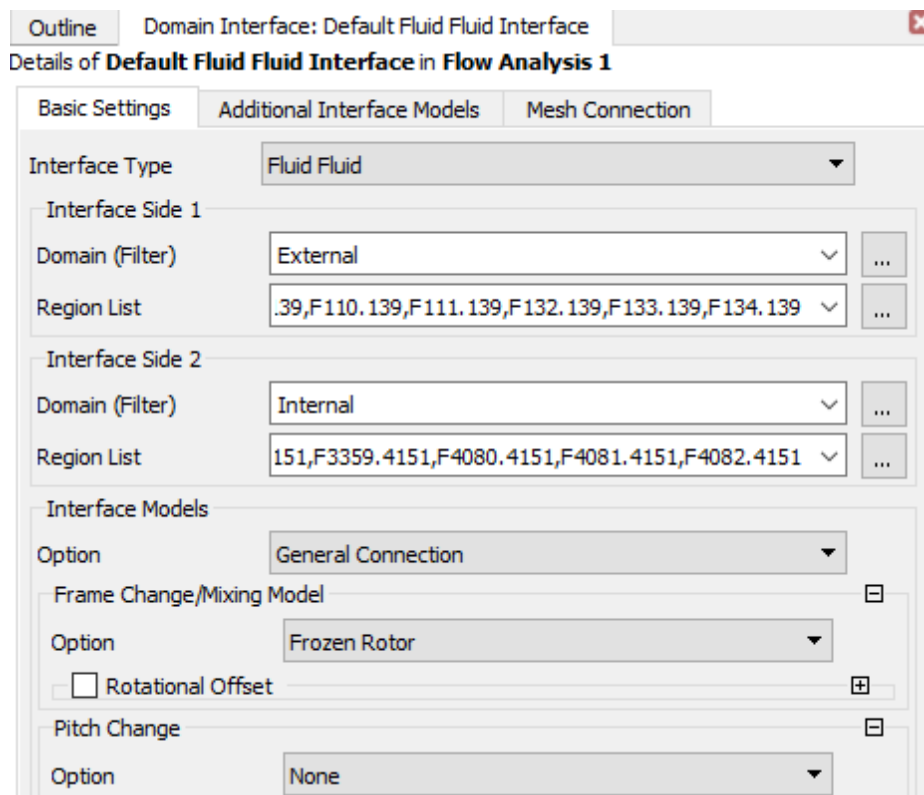
Εικόνα 3.33: Ρύθμιση των συνθηκών ροής του ρευστού (αέρας) στον περιστρεφόμενο όγκο (rotating domain) της προσομοίωσης.



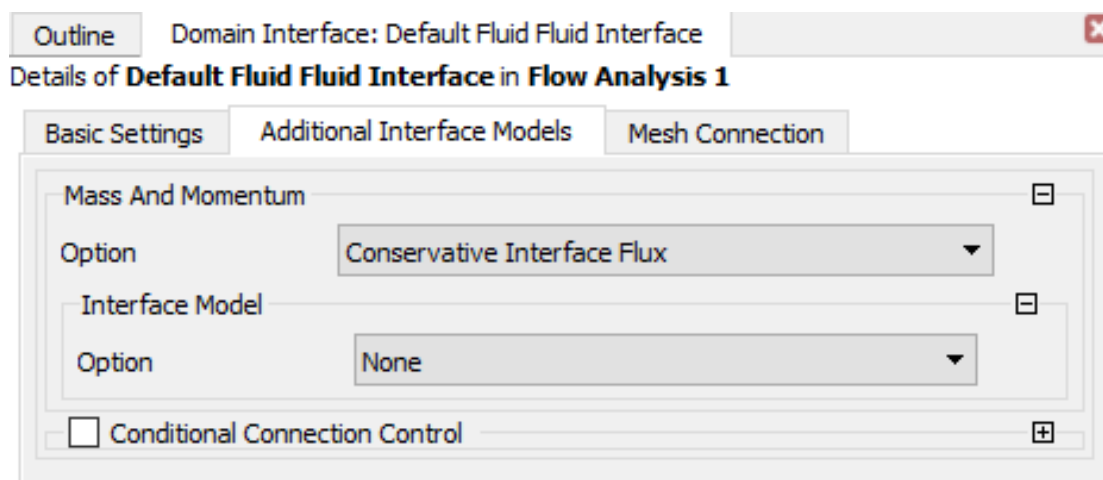
Εικόνα 3.34: Απεικόνιση του περιστρεφόμενου όγκου (*rotating domain*) της προσομοίωσης (1^η εστίαση).



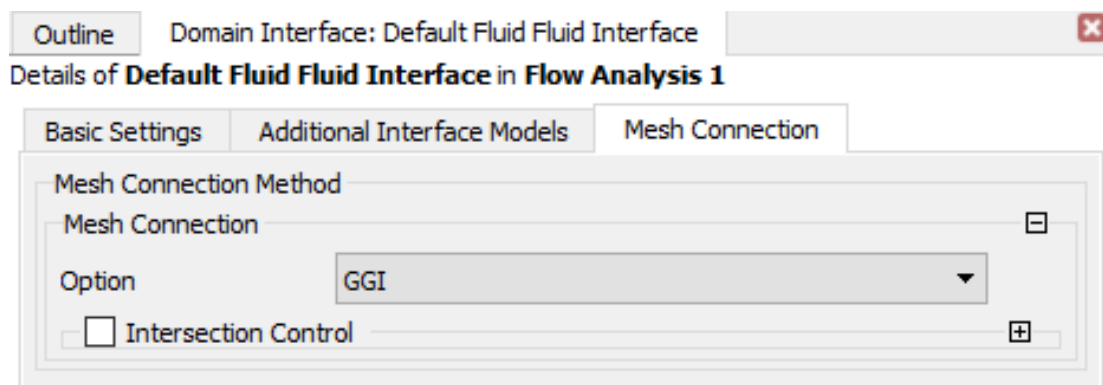
Εικόνα 3.35: Απεικόνιση του περιστρεφόμενου όγκου (*rotating domain*) της προσομοίωσης (2^η εστίαση).



Εικόνα 3.36: Βασικές ρυθμίσεις της διεπιφάνειας (Interface) μεταξύ του σταθερού (stationary domain) και περιστρεφόμενου όγκου (rotating domain), της προσομοίωσης.



Εικόνα 3.37: Ρύθμιση των συνθηκών ροής του ρευστού (αέρας) στην διεπιφάνεια (Interface) μεταξύ του σταθερού (stationary domain) και περιστρεφόμενου όγκου (rotating domain), της προσομοίωσης.

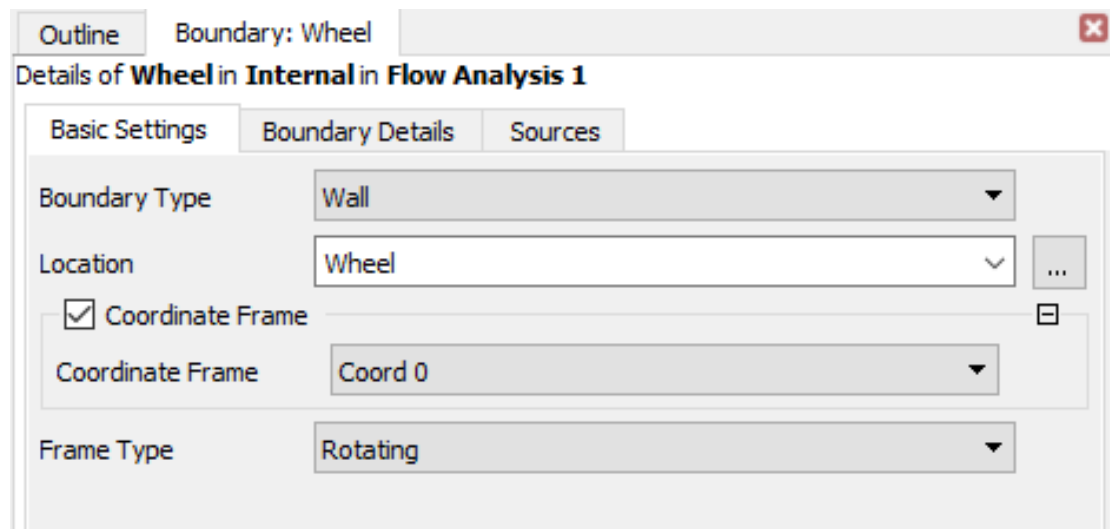


Εικόνα 3.38: Ρύθμιση της πλεγματικής σύνδεσης στην διεπιφάνεια (Interface) μεταξύ του σταθερού (stationary domain) και περιστρεφόμενου όγκου (rotating domain), της προσομοίωσης.

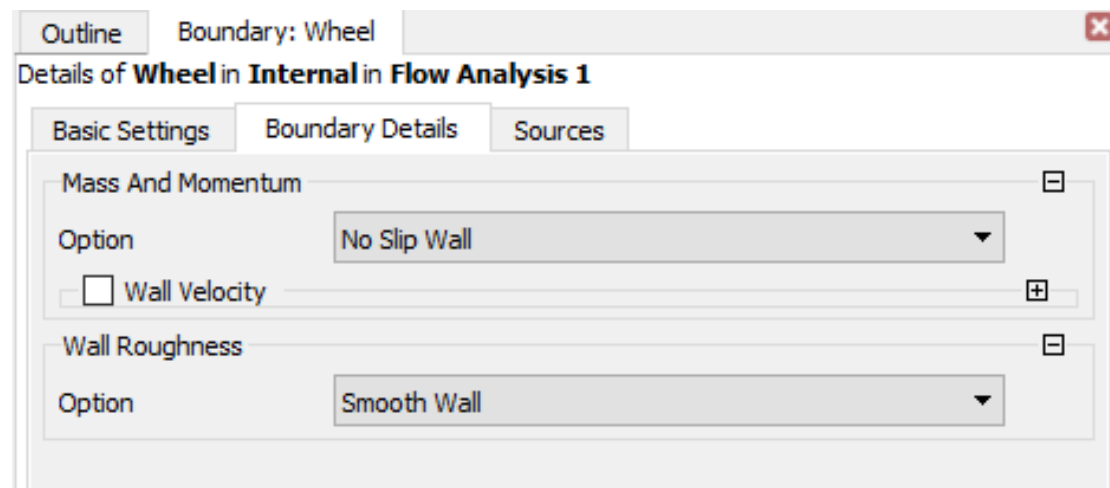
Σε επόμενο βήμα, στρέφεται ο προσανατολισμός, στην ρύθμιση των συνθηκών που λαμβάνουν χώρα στη ζάντα (Wheel) και στο ελαστικό (Tire) του τροχού. Σχετικά με τη ζάντα (Wheel) του τροχού, όσον αφορά στις βασικές ρυθμίσεις, επιλέγεται το τοίχωμα (Wall) ως οριακός τύπος (Boundary Type), με τον τύπο πλαισίου (Frame Type) καθορισμένο ως περιστρεφόμενο (Rotating). Εστιάζοντας στη ροή του ρευστού (αέρας) γύρω από τη ζάντα (Wheel), καταχωρείται το τοίχωμα μη ολίσθησης (No Slip Wall) ως οριακή συνθήκη (Boundary Condition), καθώς επίσης χαρακτηρίζεται ως λεία (Smooth Wall) η τραχύτητα του τοιχώματος (Wall Roughness) της ζάντας (Wheel).

Έπειτα, δίνεται προσοχή στη ρύθμιση των συνθηκών που επικρατούν γύρω από το ελαστικό (Tire) του τροχού (στον ακίνητο όγκο). Ιδιαίτερα, στο χωρίο που αφορά τις οριακές λεπτομέρειες (Boundary Details), ορίζεται η μη ολίσθηση τοιχώματος (No Slip Wall) ως οριακή συνθήκη, με το τοίχωμα του ελαστικού (Tire) ρυθμισμένο ως περιστρεφόμενο (Rotating Wall). Η τιμή της γωνιακής ταχύτητας (Angular Velocity) περιστροφής ορίζεται όπως προηγουμένως στα (-127,097) (rad/s). Αναφορικά, με τον άξονα περιστροφής του ελαστικού (Tire), ορίζεται με βάση τα σημεία (0, -1, 0) και (0, 1, 0), με συντεταγμένες στο καρτεσιανό σύστημα (x, y, z). Τέλος, χαρακτηρίζεται ως λεία (Smooth Wall) η τραχύτητα του τοιχώματος (Wall Roughness) του ελαστικού (Tire).

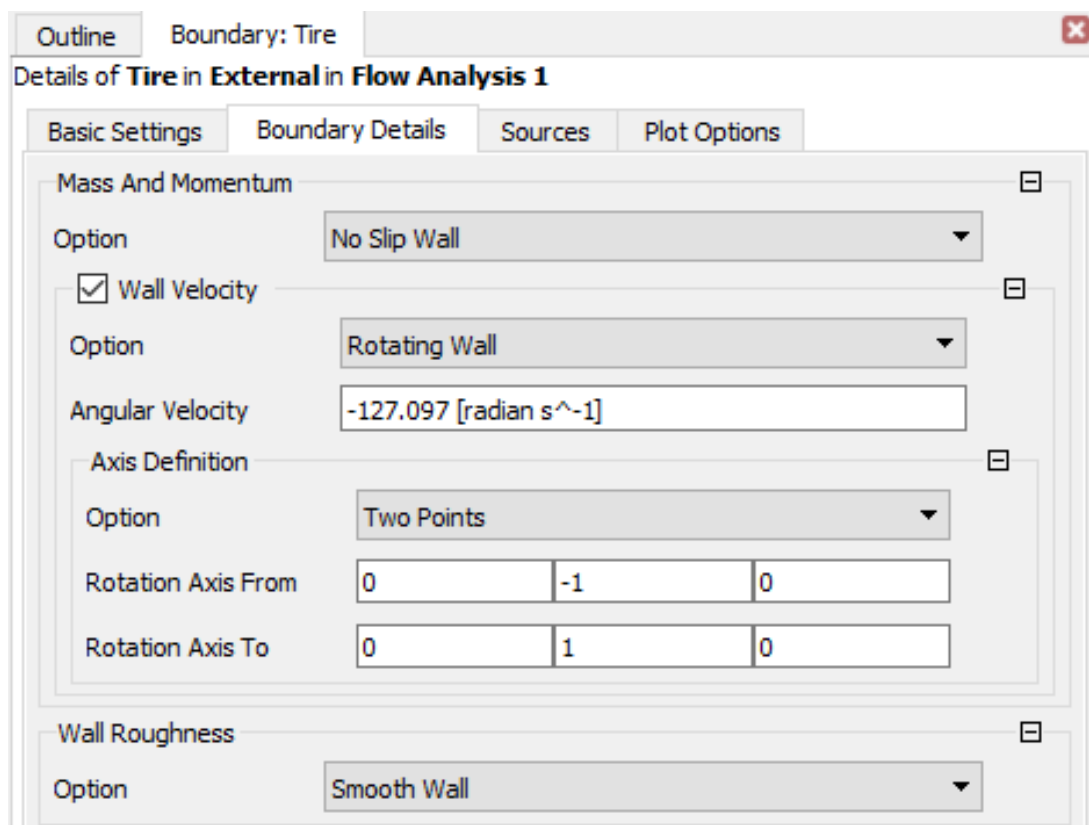
Οι παραπάνω ρυθμίσεις γύρω από τη ζάντα (Wheel) και το ελαστικό (Tire) του τροχού, αναπαρίστανται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 3.39: Βασικές ρυθμίσεις των συνθηκών που επικρατούν στη ζάντα (Wheel) του τροχού.



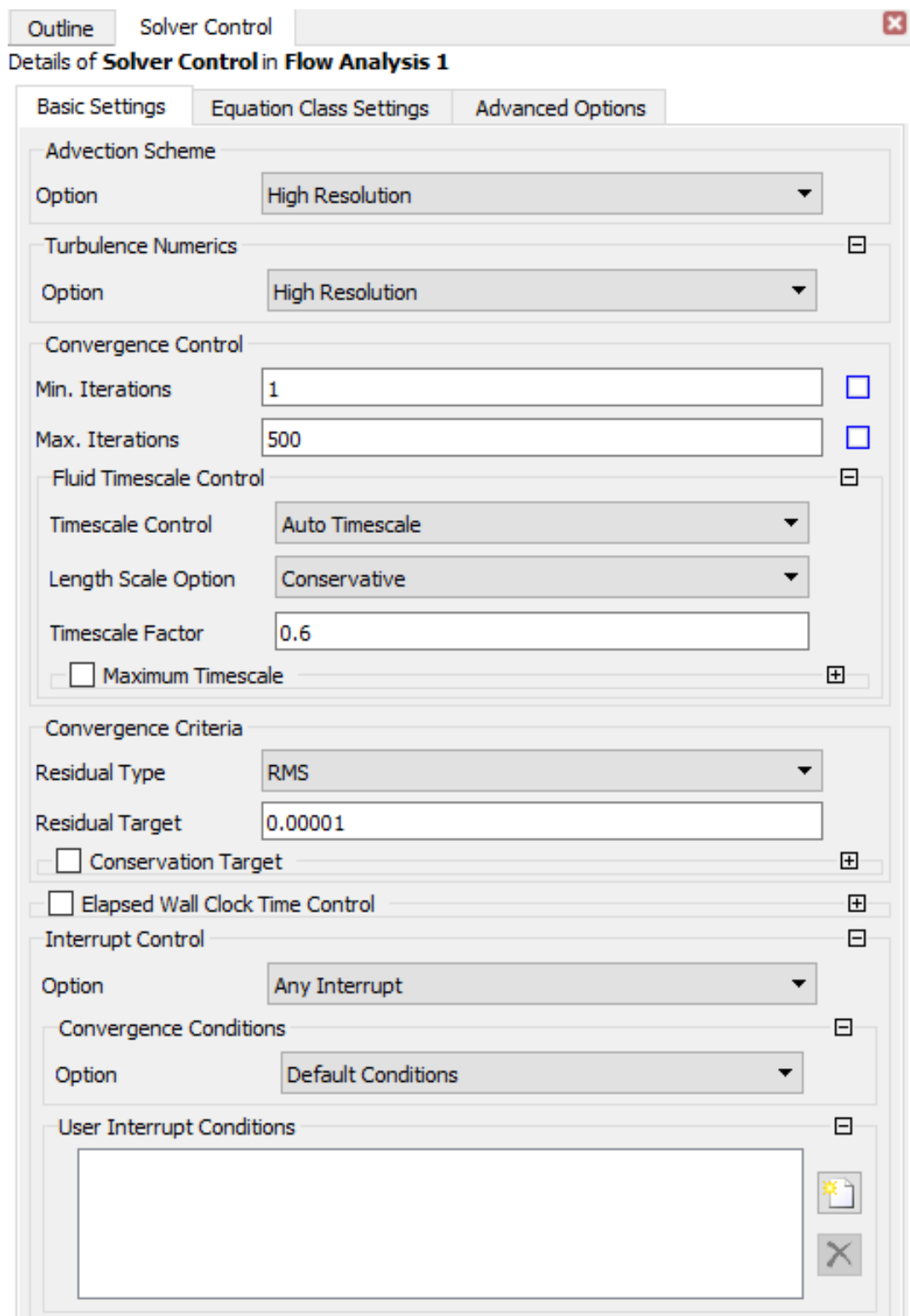
Εικόνα 3.40: Οριακές λεπτομέρειες (Boundary Details) των συνθηκών που επικρατούν στη ζάντα (Wheel) του τροχού.



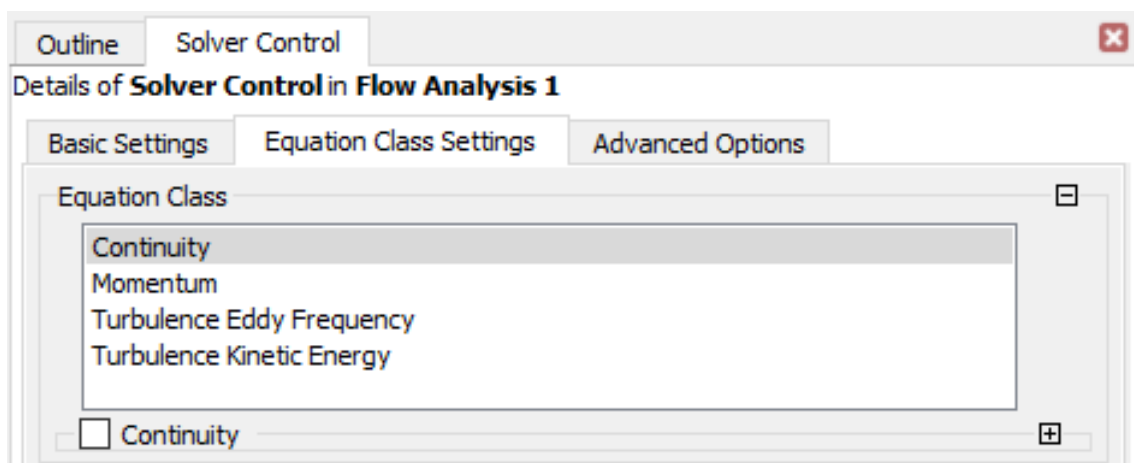
Εικόνα 3.41: Οριακές λεπτομέρειες (Boundary Details) των συνθηκών που επικρατούν στο ελαστικό (Tire) του τροχού.

Η ρύθμιση των συνθηκών που διέπουν την προσομοίωση, ολοκληρώνεται με τη ρύθμιση του επιλυτή (Solver), ο οποίος και θα εκτελέσει την προσομοίωση. Ειδικότερα, σε πρώτη φάση, δίνεται έμφαση στις βασικές ρυθμίσεις του επιλυτή (Solver). Αρχικά, επιλέγεται σχήμα υψηλής τάξης διακριτοποίησης και για τις βασικές εξισώσεις της ροής και για τις εξισώσεις του μοντέλου τύρβης. Ύστερα, ορίζονται κατά το μέγιστο 500 επαναλήψεις (Max. Iterations) στη διάρκεια της προσομοίωσης, με τον παράγοντα χρονικής μετάβασης (Timescale Factor) να λαμβάνει την τιμή 0,6. Στη συνέχεια, καταχωρείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) ως κριτήριο σύγκλισης (Convergence Criteria) των σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, με την αποδεκτή ακρίβεια (Residual Target) των υπολογισμένων σφαλμάτων ορισμένη στη τιμή 10^{-5} . Όσον αφορά στις εφαρμοσμένες διαφορικές εξισώσεις που υλοποιούν την προσομοίωση, είναι η εξίσωση της συνέχειας (Continuity Equation), οι εξισώσεις της ορμής (Momentum Equations) σε κάθε καρτεσιανό άξονα, καθώς επίσης και οι δύο εξισώσεις του μοντέλου τύρβης (Turbulence Equations). Τέλος, σημαντική είναι σε αυτό το σημείο, η αναφορά στους 12 πυρήνες επεξεργασίας που διαθέτει ο υπολογιστής, στον οποίο θα λάβει χώρα η προσομοίωση.

Οι προαναφερθείσες ρυθμίσεις του επιλυτή (Solver), προβάλλονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 3.42: Βασικές ρυθμίσεις του επιλυτή (Solver).

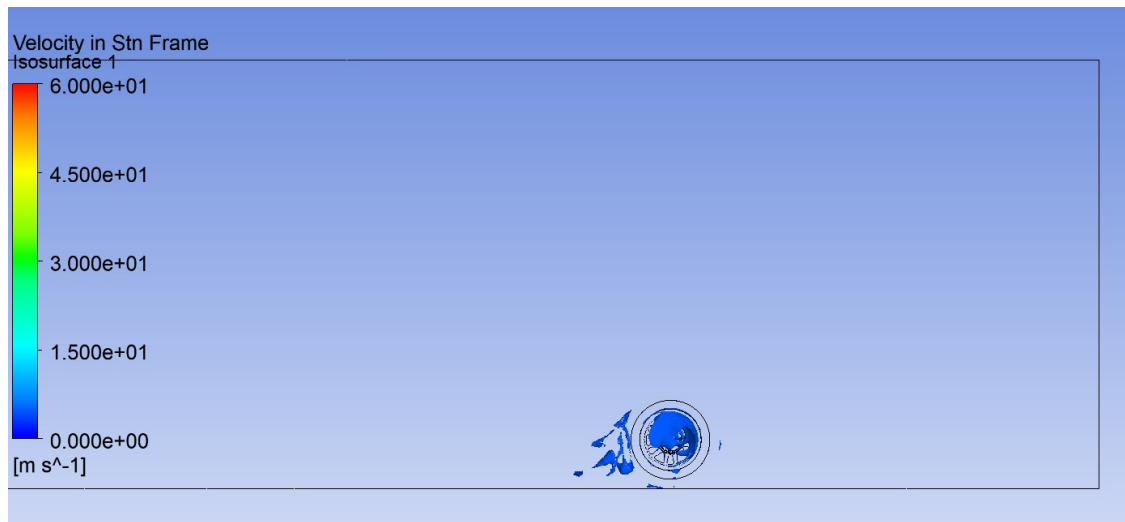


Εικόνα 3.43: Επιλογή των διαφορικών εξισώσεων που υλοποιούν την προσομοίωση.

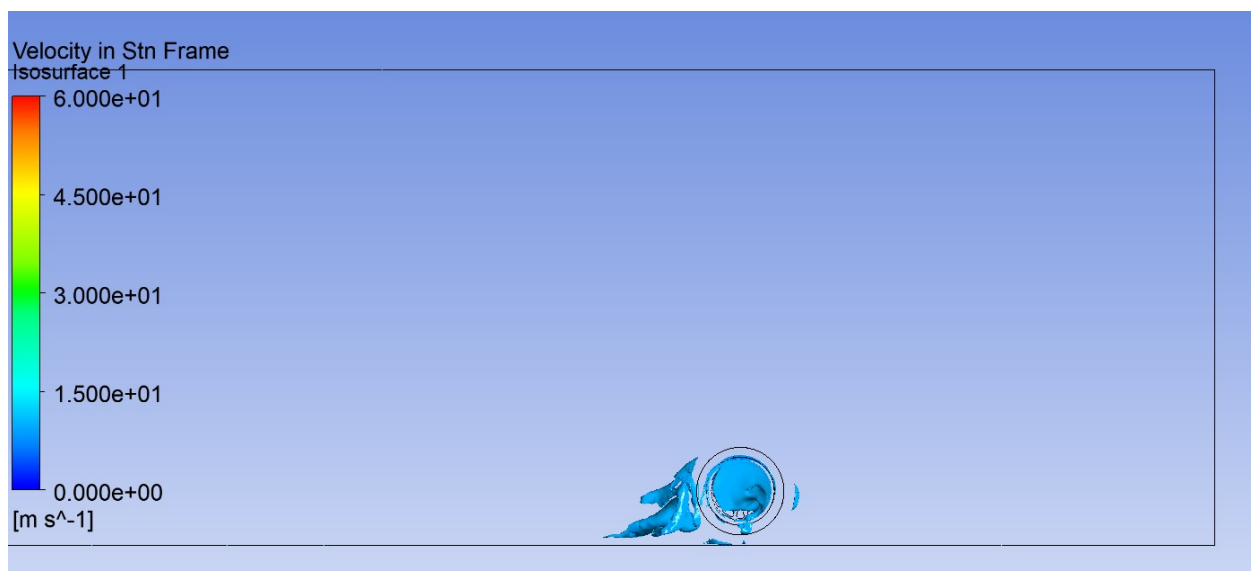
3.5 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΥ ΣΤΟ ANSYS CFX

Ύστερα από την σύγκλιση των διακριτοποιημένων διαφορικών εξισώσεων στα επιθυμητά σφάλματα, της προηγούμενης υποενότητας, επικεντρώνεται το ενδιαφέρον πλέον στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, επισυνάπτονται απεικονίσεις των μεγεθών που χαρακτηρίζουν τη ρευστομηχανική συμπεριφορά του περιστρεφόμενου τροχού.

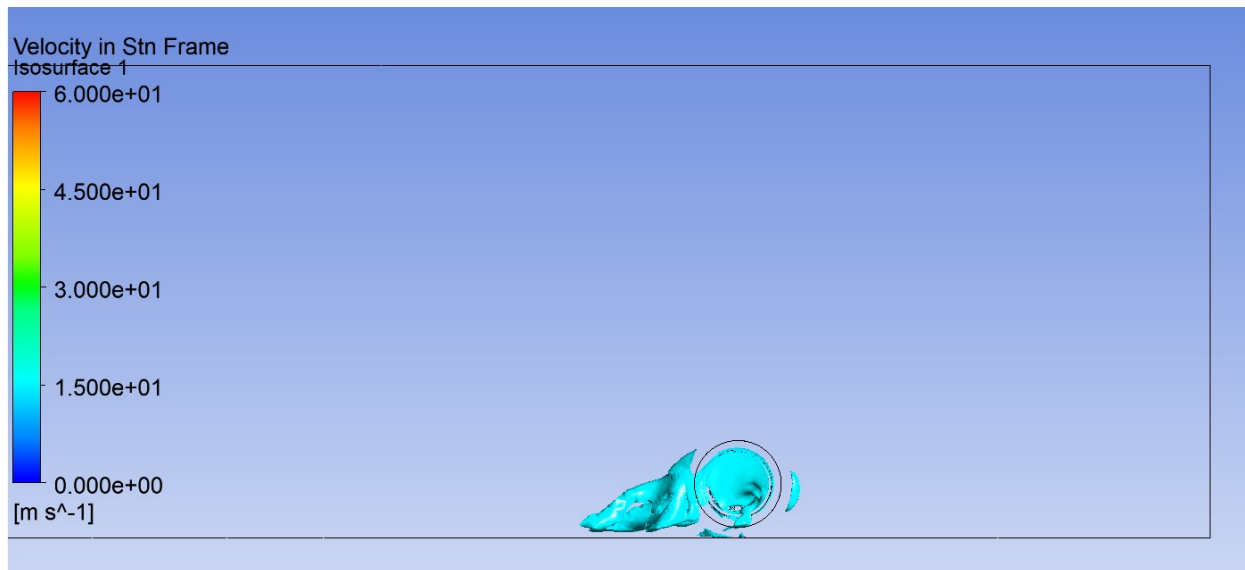
Αρχικά, προβάλλεται σε κατακόρυφο επίπεδο το χρωματικό αποτύπωμα της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) σε σταθερό πλαίσιο (Stn Frame) με τη χρήση ισο-επιφανειών (Isosurface), δηλαδή επιφανειών με την ίδια τιμή της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) στα σημεία γύρω από τον τροχό. Οι τιμές της ταχύτητας του ρευστού (αέρας) που επιλέγονται στην αποτύπωση ορίζονται ανά 5 (m/s), με τιμή κάτω ορίου τα 5 (m/s) και τιμή άνω ορίου τα 55 (m/s). Αυτό γίνεται για να οπτικοποιηθεί η μορφή του ομόρου (wake) πίσω από τον περιστρεφόμενο τροχό.



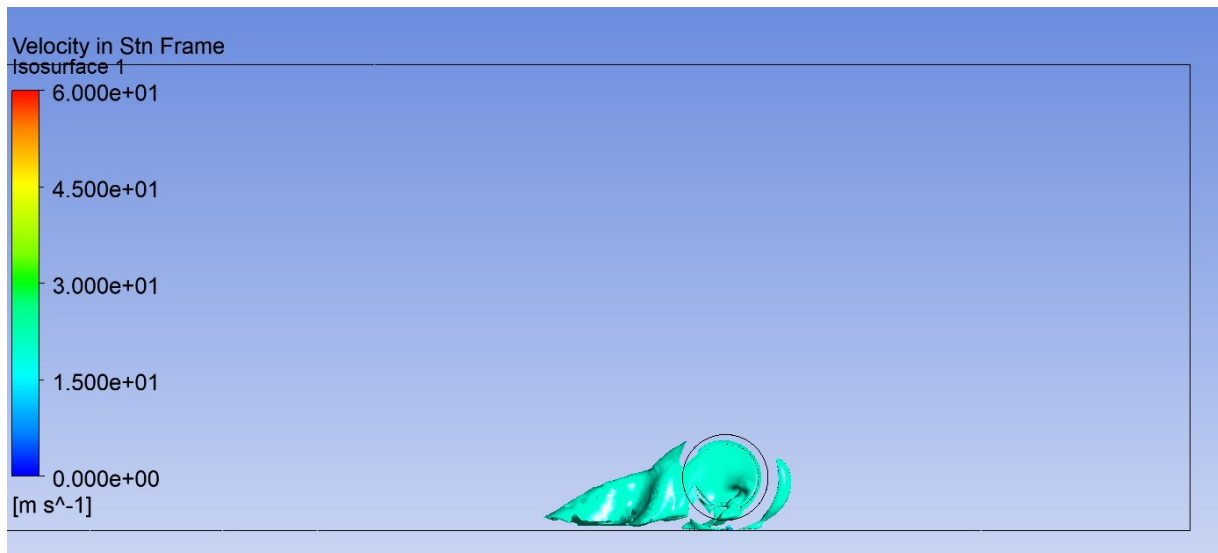
Εικόνα 3.44: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 5 (m/s), γύρω από τον τροχό.



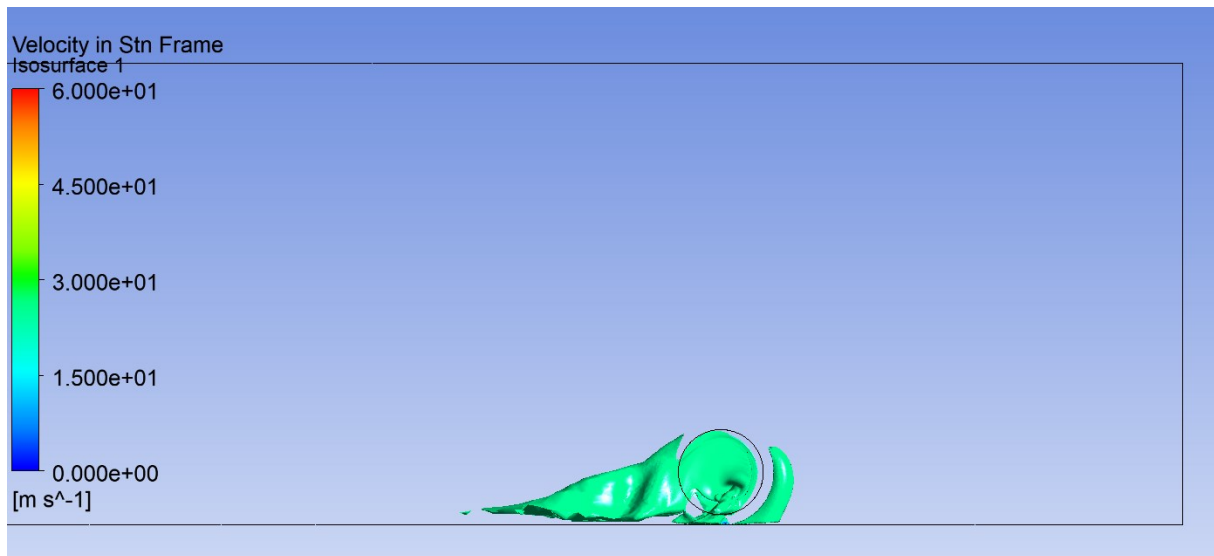
Εικόνα 3.45: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 10 (m/s), γύρω από τον τροχό.



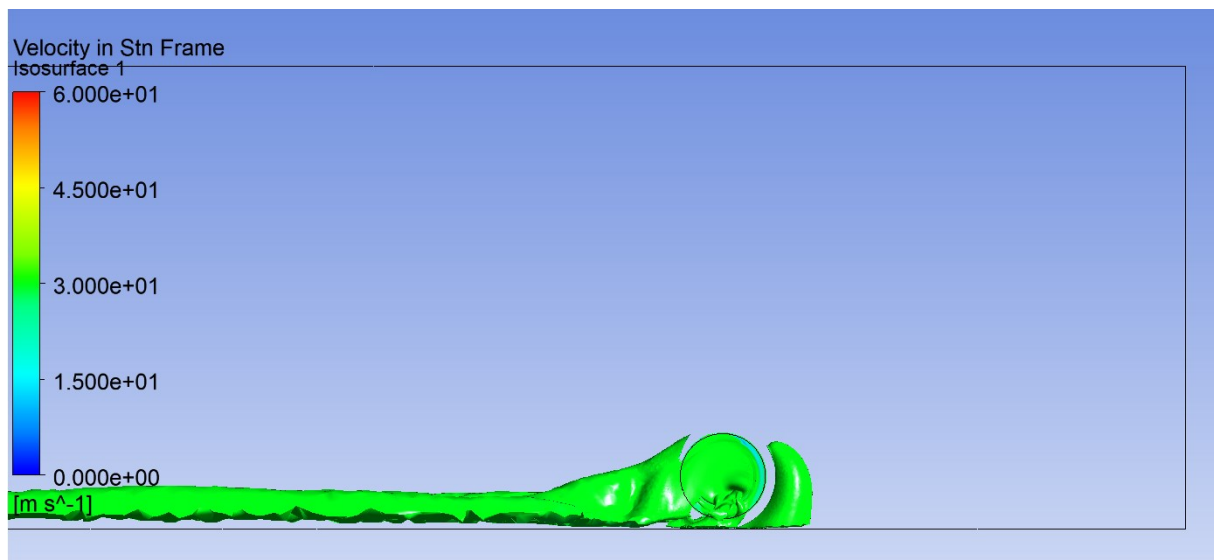
Εικόνα 3.46: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 15 (m/s), γύρω από τον τροχό.



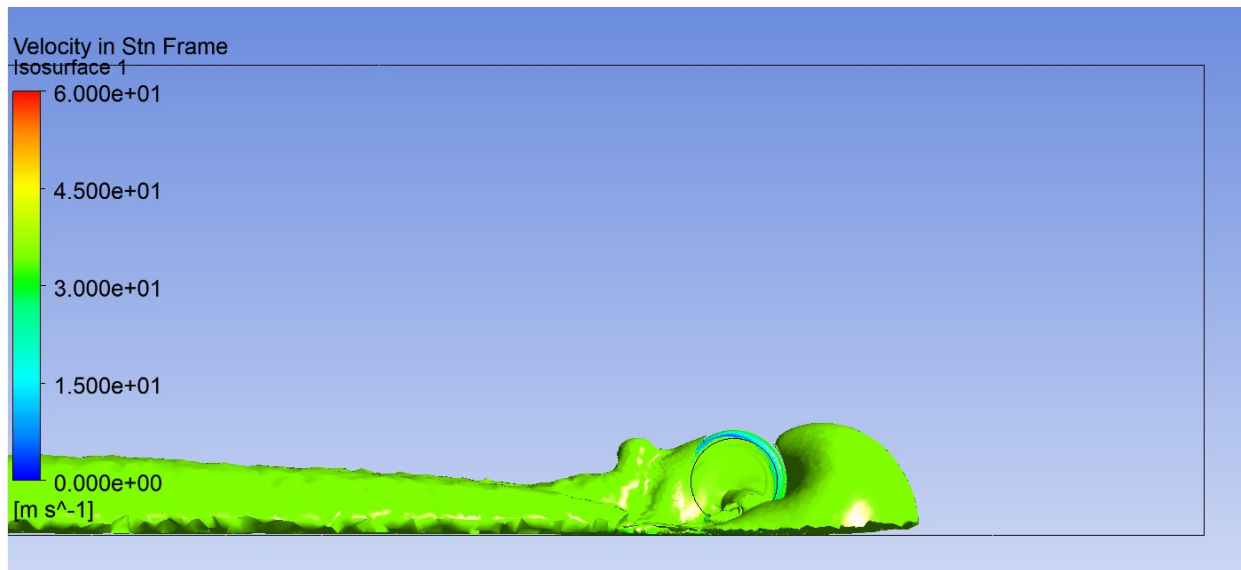
Εικόνα 3.47: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 20 (m/s), γύρω από τον τροχό.



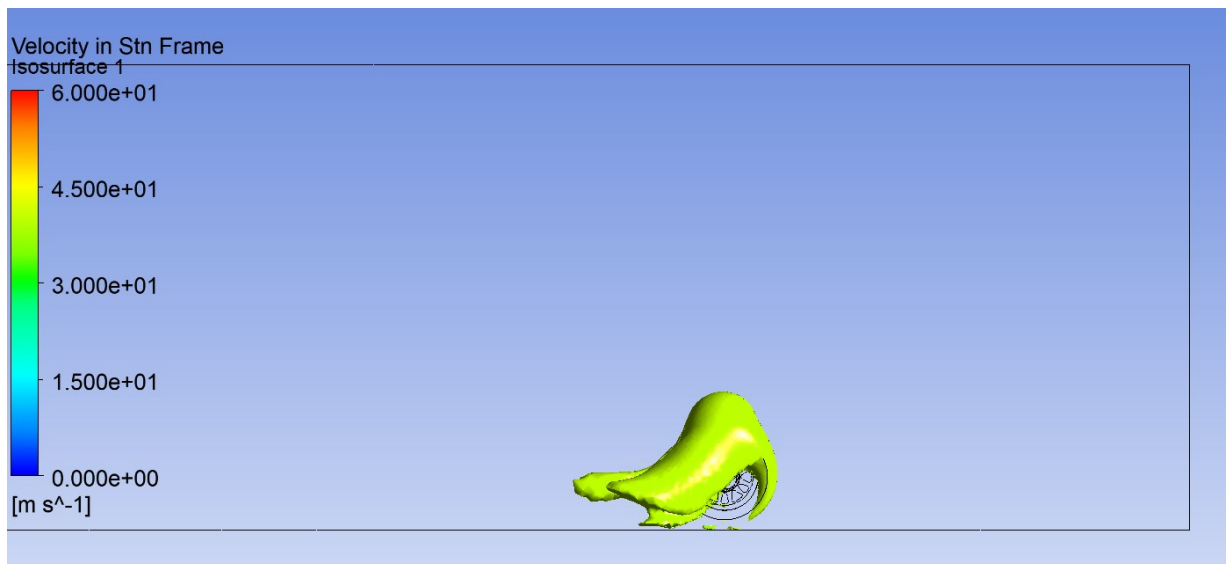
Εικόνα 3.48: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 25 (m/s), γύρω από τον τροχό.



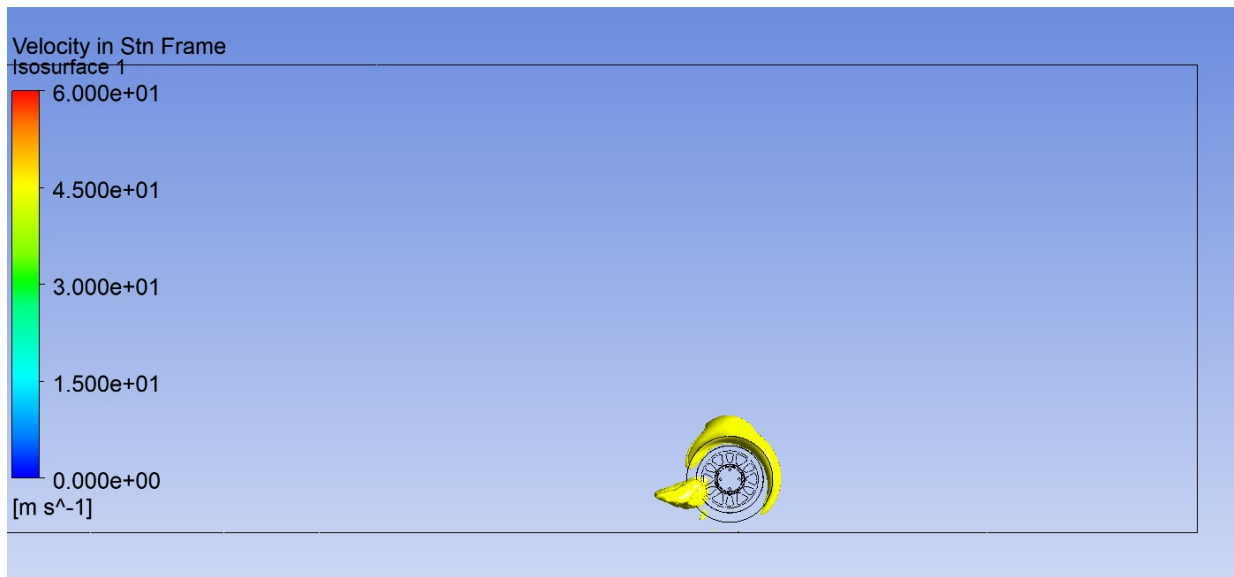
Εικόνα 3.49: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 30 (m/s), γύρω από τον τροχό.



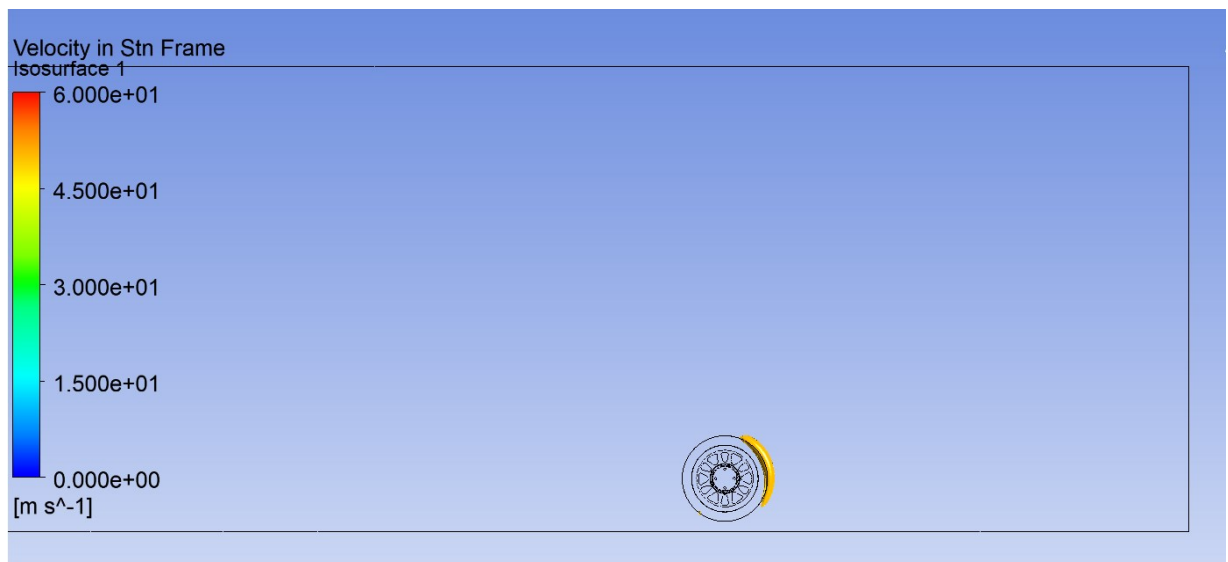
Εικόνα 3.50: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 35 (m/s), γύρω από τον τροχό.



Εικόνα 3.51: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 40 (m/s), γύρω από τον τροχό.



Εικόνα 3.52: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 45 (m/s), γύρω από τον τροχό.



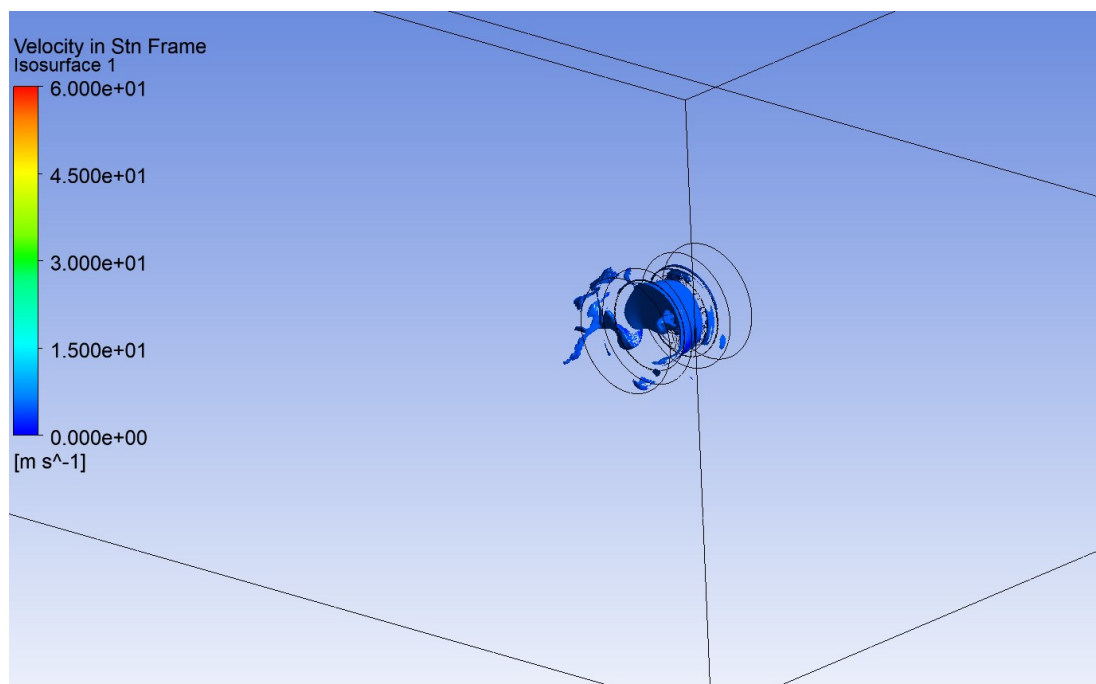
Εικόνα 3.53: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 50 (m/s), γύρω από τον τροχό.



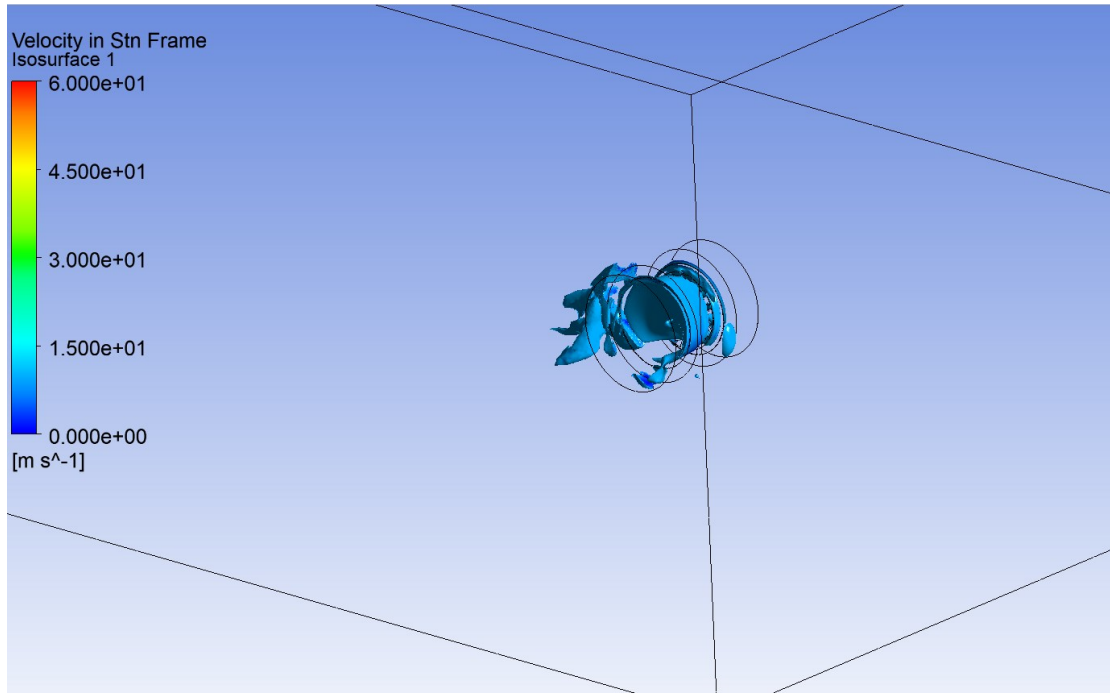
Εικόνα 3.54: Πλάγια χρωματική απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 55 (m/s), γύρω από τον τροχό.

Παρατηρείται ότι δημιουργείται μία περιοχή χαμηλών ταχυτήτων (ομόρους) πίσω από τον τροχό, η οποία επεκτείνεται καθώς αυξάνεται η τιμή της ταχύτητας, σε περιοχή αρκετά μεγάλη πίσω από τον τροχό. Στο εμπρός και άνω τμήμα του τροχού και κυρίως επί του ελαστικού παρατηρείται δημιουργία ζώνης υψηλών ταχυτήτων, λόγω της περιστροφής του τροχού αλλά και λόγω της καμπύλωσης της ροής από την παρουσία του τροχού.

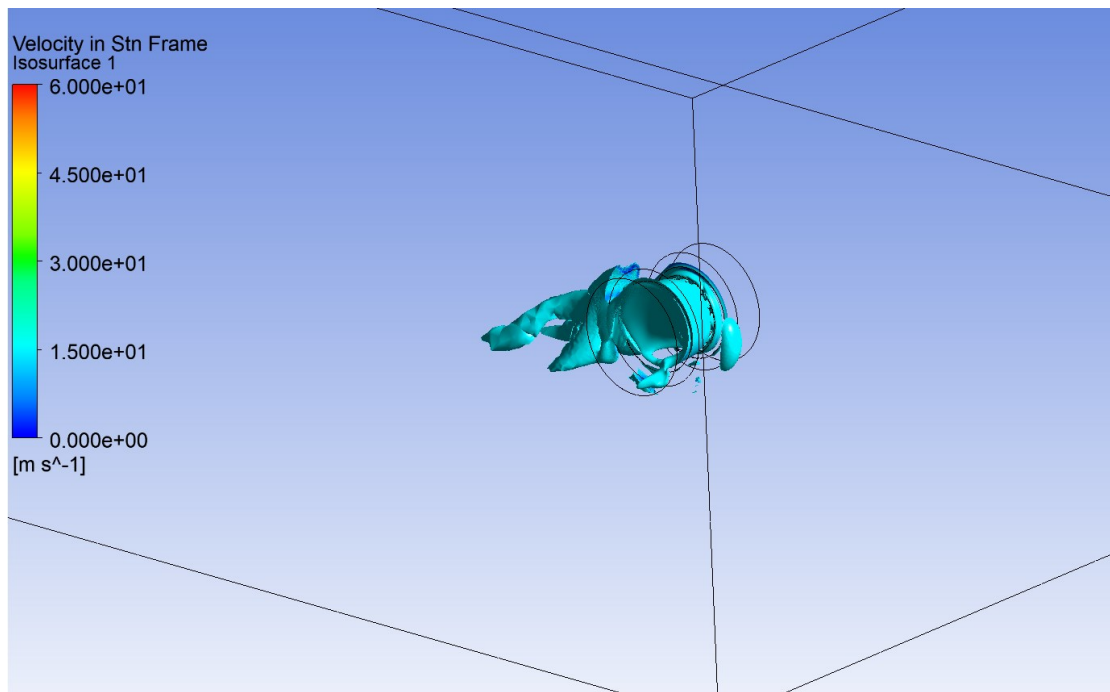
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ίδιες απεικονίσεις από διαφορετική οπτική γωνία, ώστε να φανεί πιο αναλυτική η μορφή των αντίστοιχων σχηματισμών.



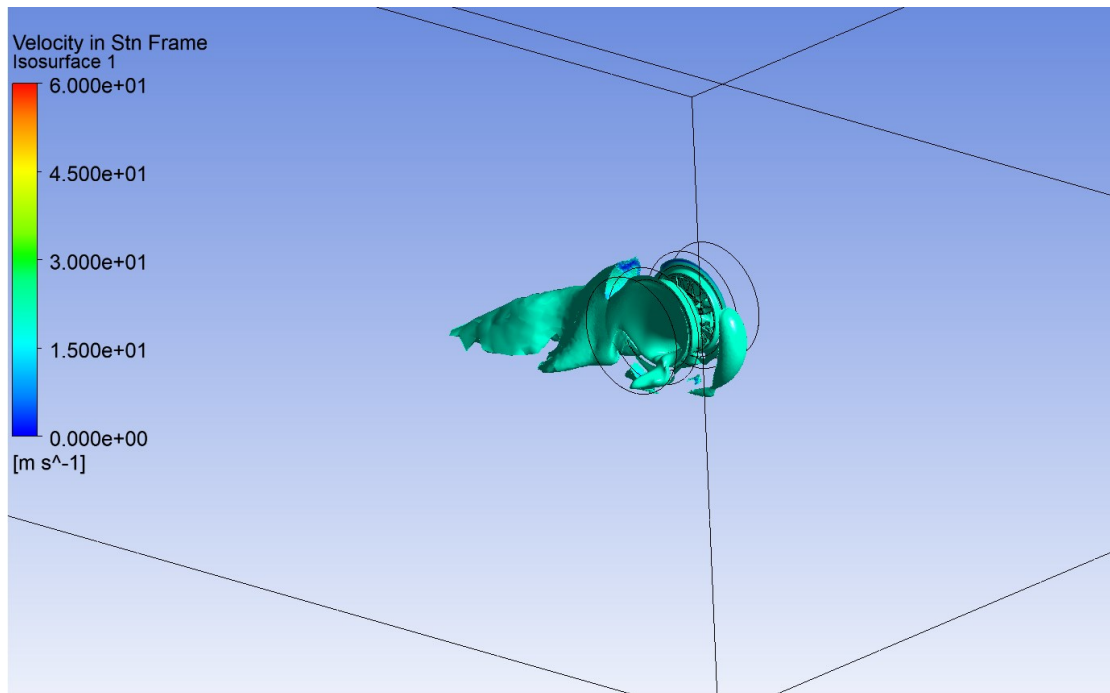
Εικόνα 3.55: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 5 (m/s), γύρω από τον τροχό.



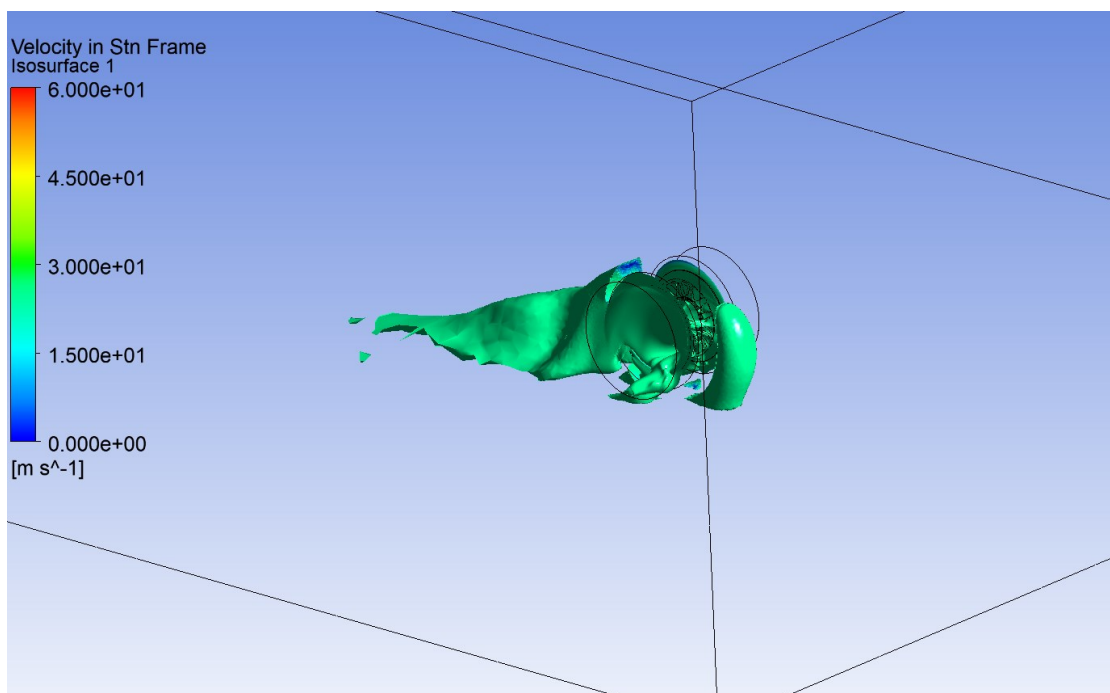
Εικόνα 3.56: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρα) ορισμένη στα 10 (m/s), γύρω από τον τροχό.



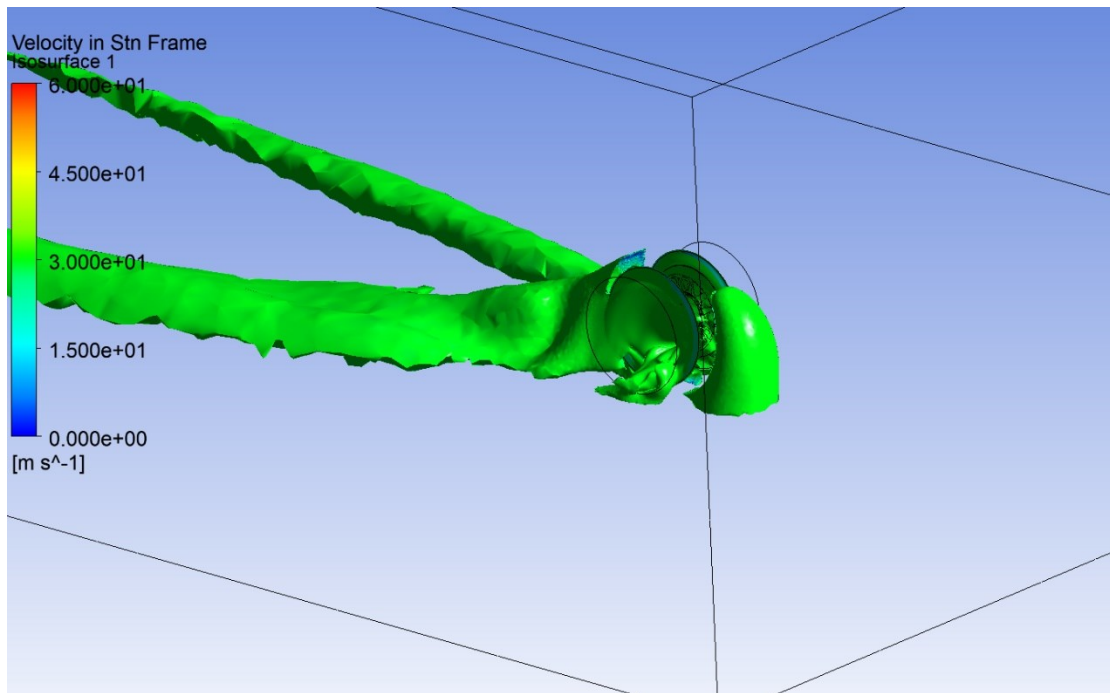
Εικόνα 3.57: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρα) ορισμένη στα 15 (m/s), γύρω από τον τροχό.



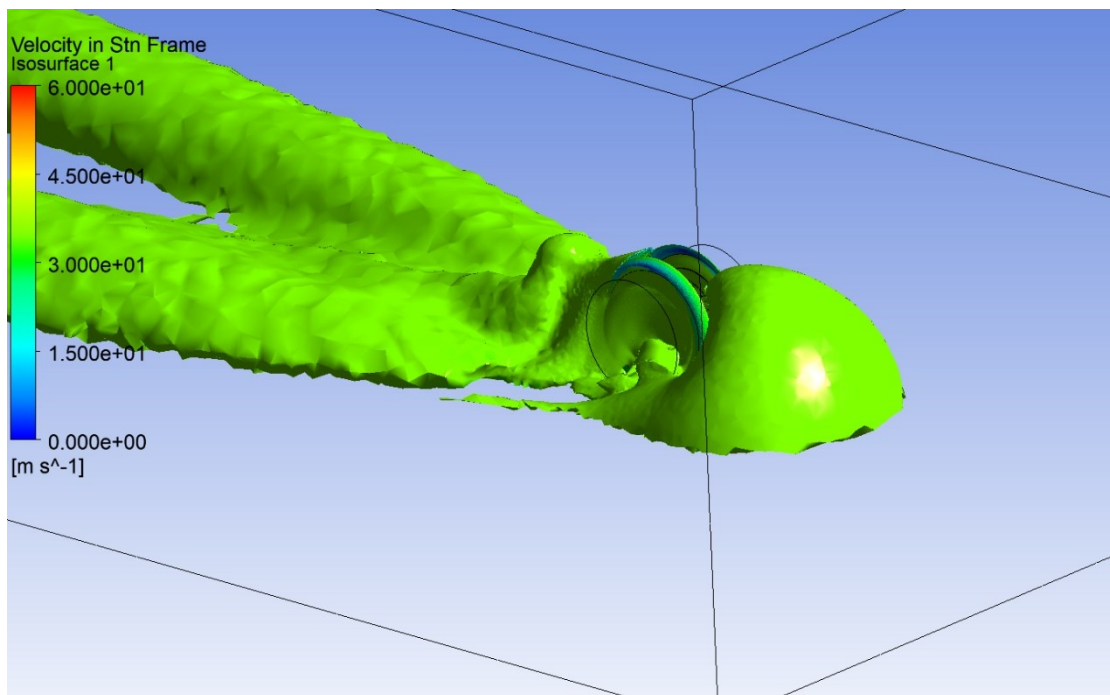
Εικόνα 3.58: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρα) ορισμένη στα 20 (m/s), γύρω από τον τροχό.



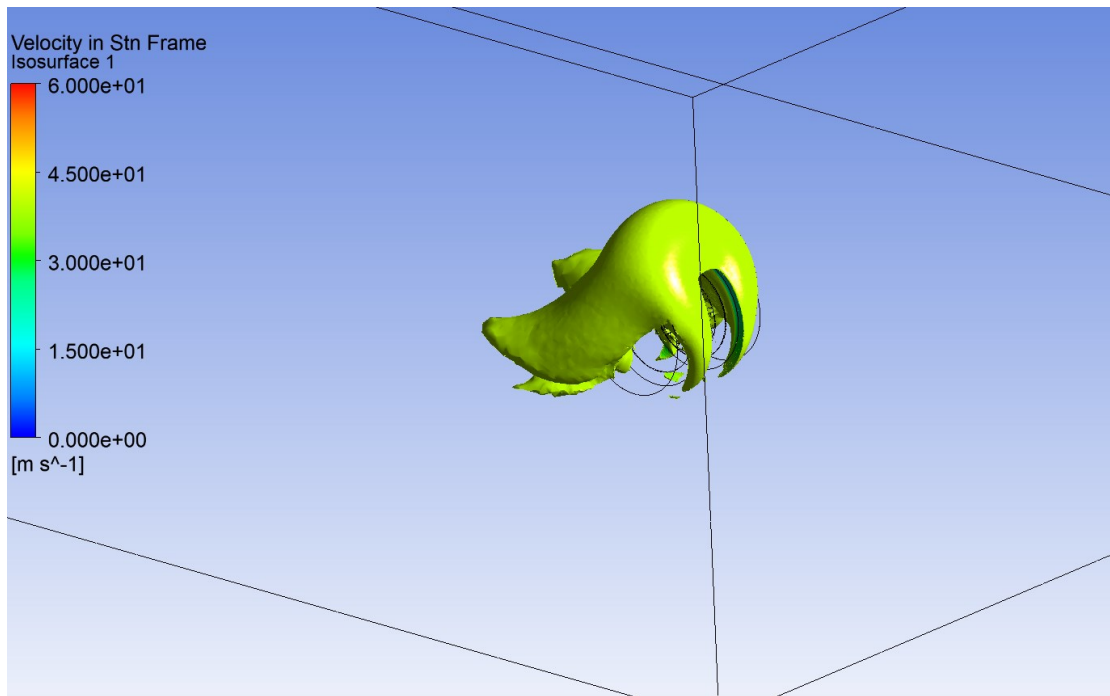
Εικόνα 3.59: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρα) ορισμένη στα 25 (m/s), γύρω από τον τροχό.



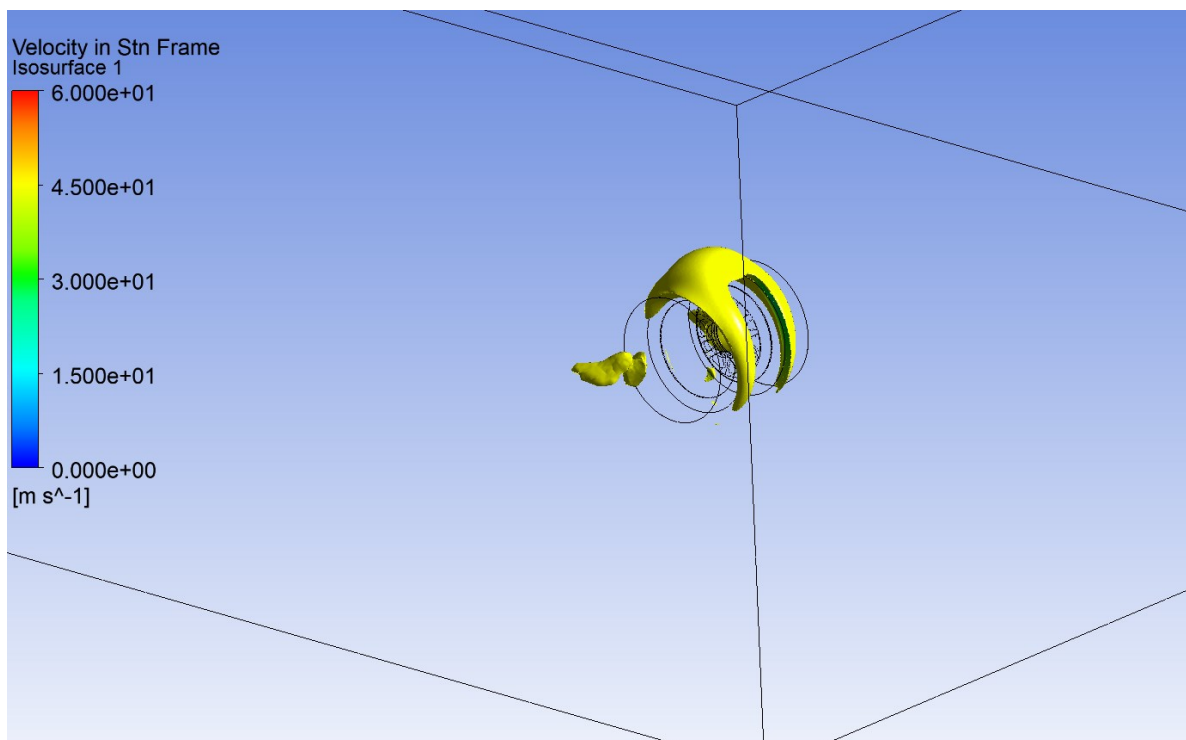
Εικόνα 3.60: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 30 (m/s), γύρω από τον τροχό.



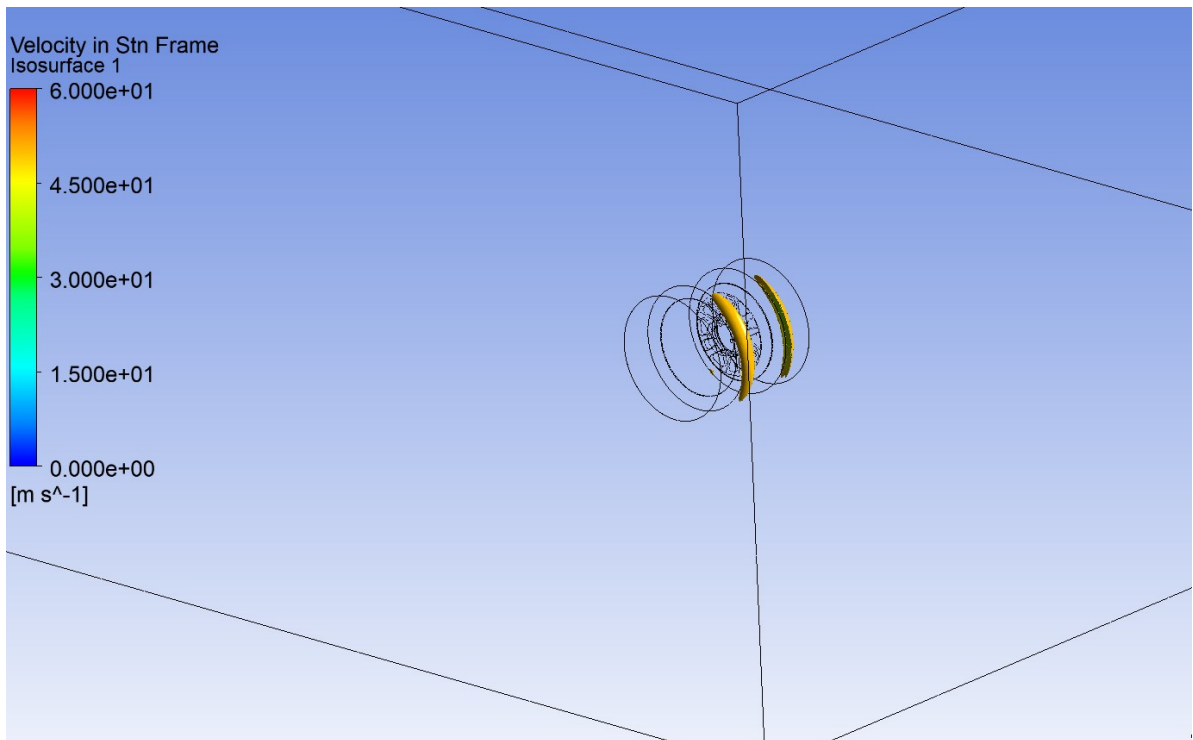
Εικόνα 3.61: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 35 (m/s), γύρω από τον τροχό.



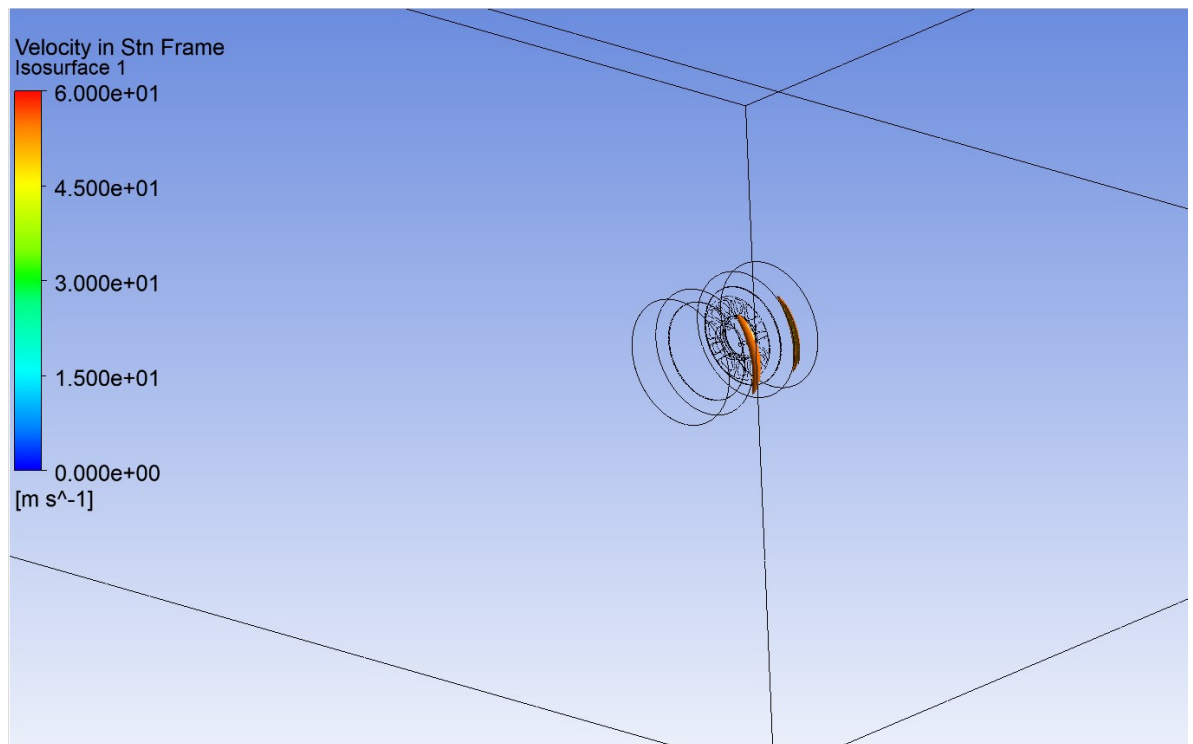
Εικόνα 3.62: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρα) ορισμένη στα 40 (m/s), γύρω από τον τροχό.



Εικόνα 3.63: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρα) ορισμένη στα 45 (m/s), γύρω από τον τροχό.



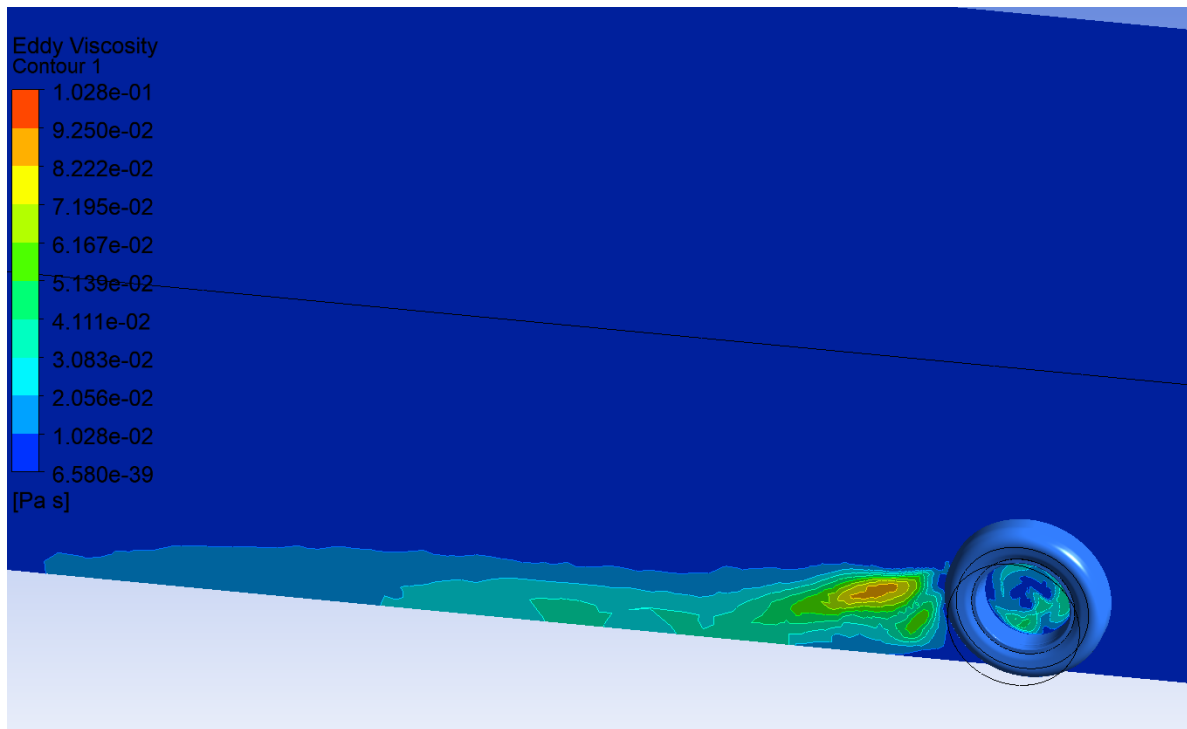
Εικόνα 3.64: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 50 (m/s), γύρω από τον τροχό.



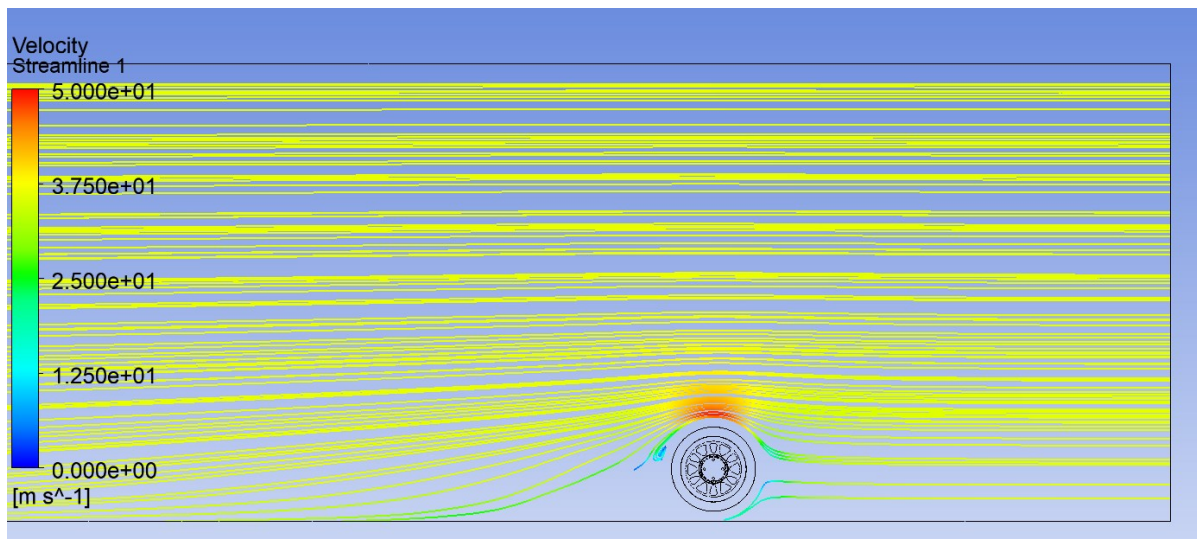
Εικόνα 3.65: Τριδιάστατη Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) ορισμένη στα 55 (m/s), γύρω από τον τροχό.

Οι παραπάνω απεικονίσεις επιβεβαιώνουν τα προηγούμενα συμπεράσματα. Διακρίνεται η ζώνη υψηλών ταχυτήτων στην εμπρός και πάνω περιοχή των μάγουλων του ελαστικού. Διακρίνεται επίσης ο σχηματισμός ενός αποκλίνοντος διπλού ομόρρου, πίσω

από τον τροχό. Στη συνέχεια παρουσιάζονται σχετικές απεικονίσεις της τυρβώδους συνεκτικότητας και των γραμμών ροής.

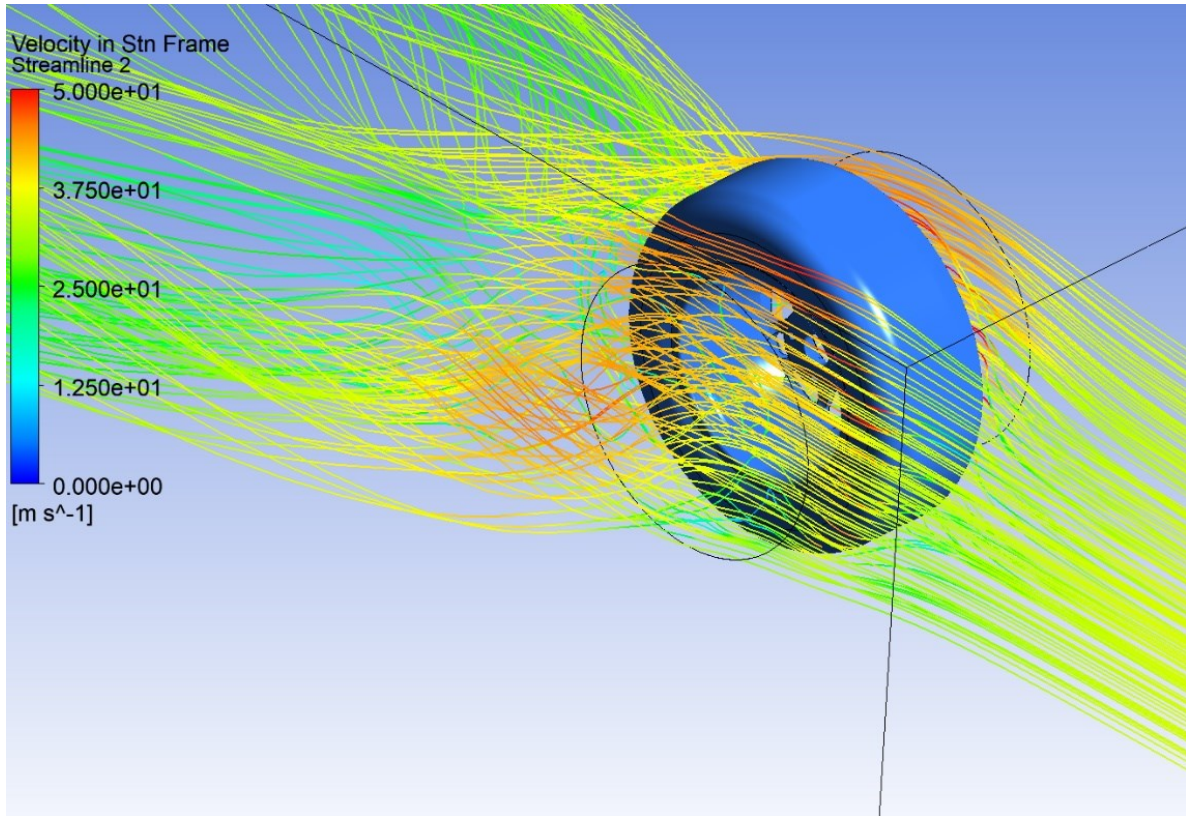


Εικόνα 3.66: Απεικόνιση της τυρβώδους συνεκτικότητας στο κατακόρυφο επίπεδο που περνάει από το μέσον του τροχού. Οπτικοποιείται η περιοχή του ομόρρου.

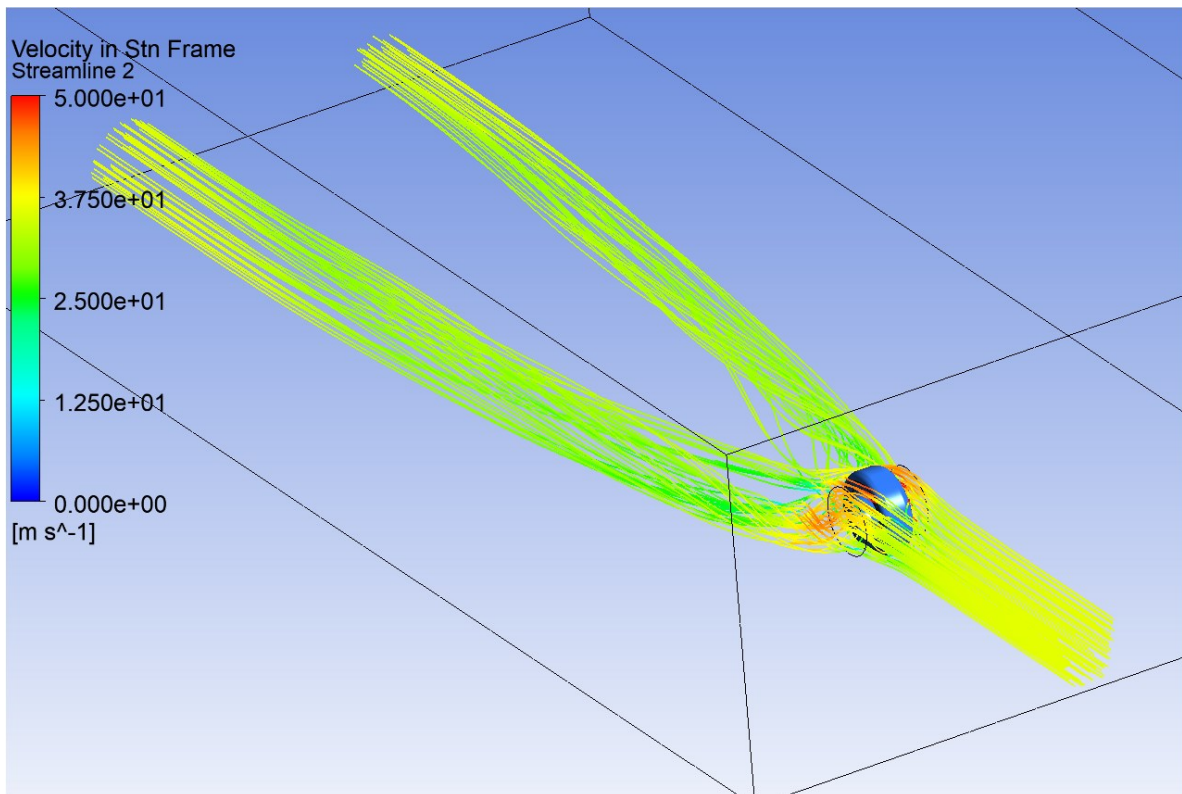


Εικόνα 3.67: Χρωματική Απεικόνιση των γραμμών ροής του ρευστού (αέρας) γύρω και περιφερειακά του ελαστικού, ορισμένες πάνω σε ένα κατακόρυφο επίπεδο στη θέση $z=0$. Διακρίνεται η καμπύλωση των γραμμών ροής πάνω από τον τροχό.

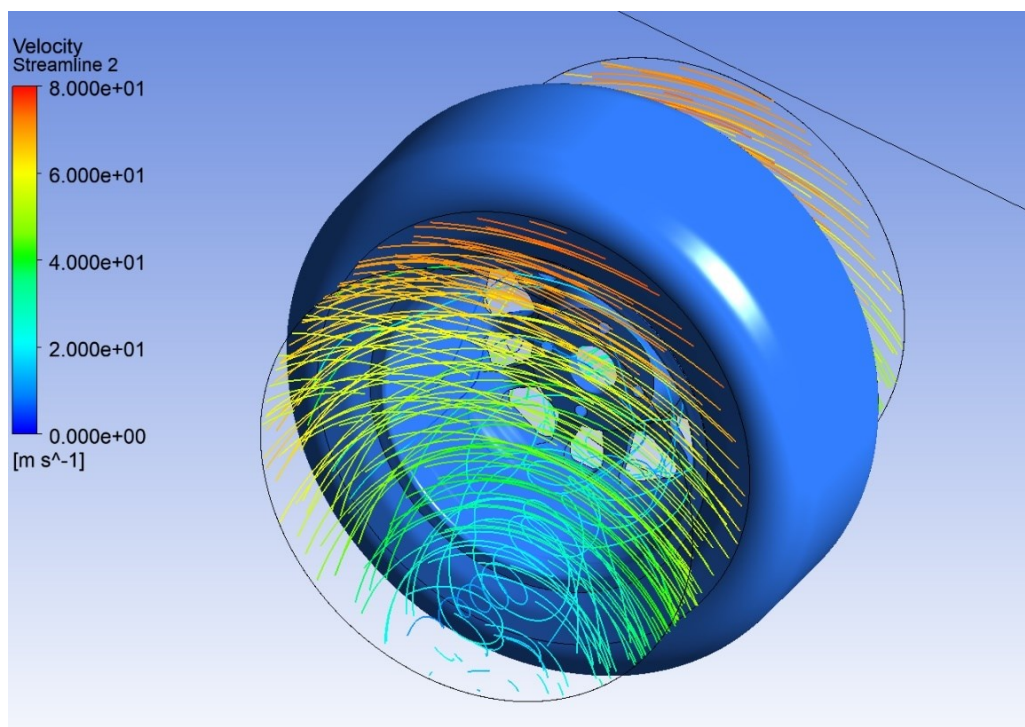
Στη συνέχεια δίνονται απεικονίσεις των γραμμών ροής γύρω και μέσα από τον τροχό, που οπτικοποιούν την πολυπλοκότητα του πεδίου ροής.



Εικόνα 3.68: Χρωματική Απεικόνιση των γραμμών ροής του ρευστού (αέρας) γύρω και περιφερειακά του τροχού, με τις τιμές της ταχύτητας εκφρασμένες στο ακίνητο σύστημα αναφοράς.

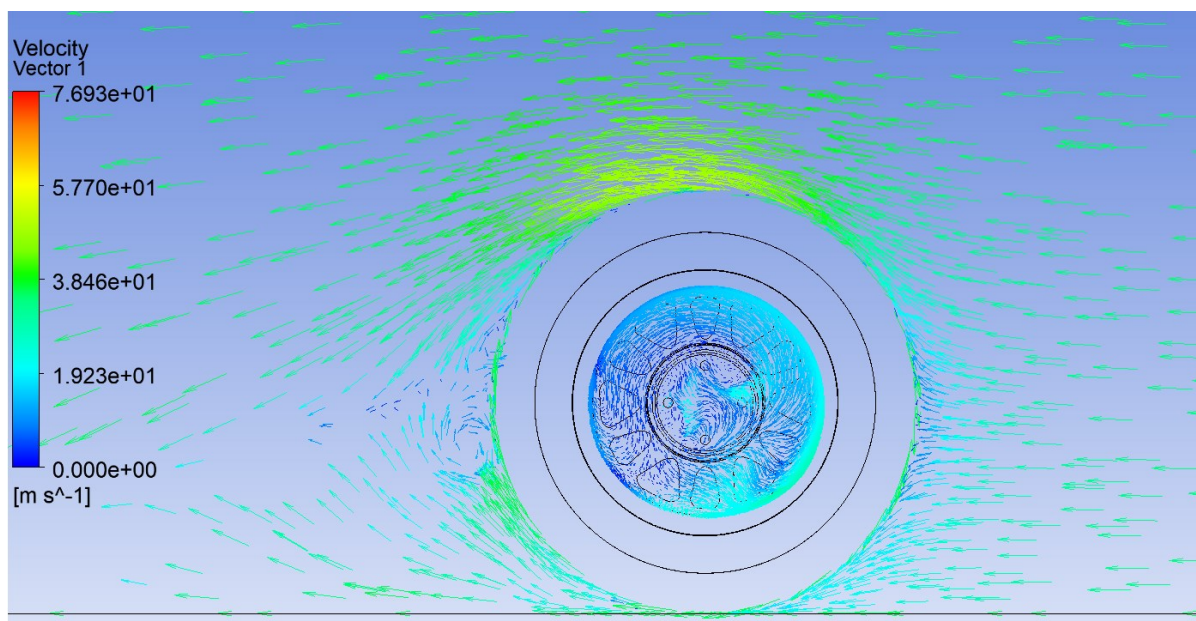


Εικόνα 3.69: Χρωματική απεικόνιση των γραμμών ροής του ρευστού (αέρας) γύρω και περιφερειακά του τροχού, με τιμές της ταχύτητας εκφρασμένες στο ακίνητο σύστημα αναφοράς. Διακρίνεται ο διπλός συμμετρικός ομόρρους πίσω από τον τροχό.

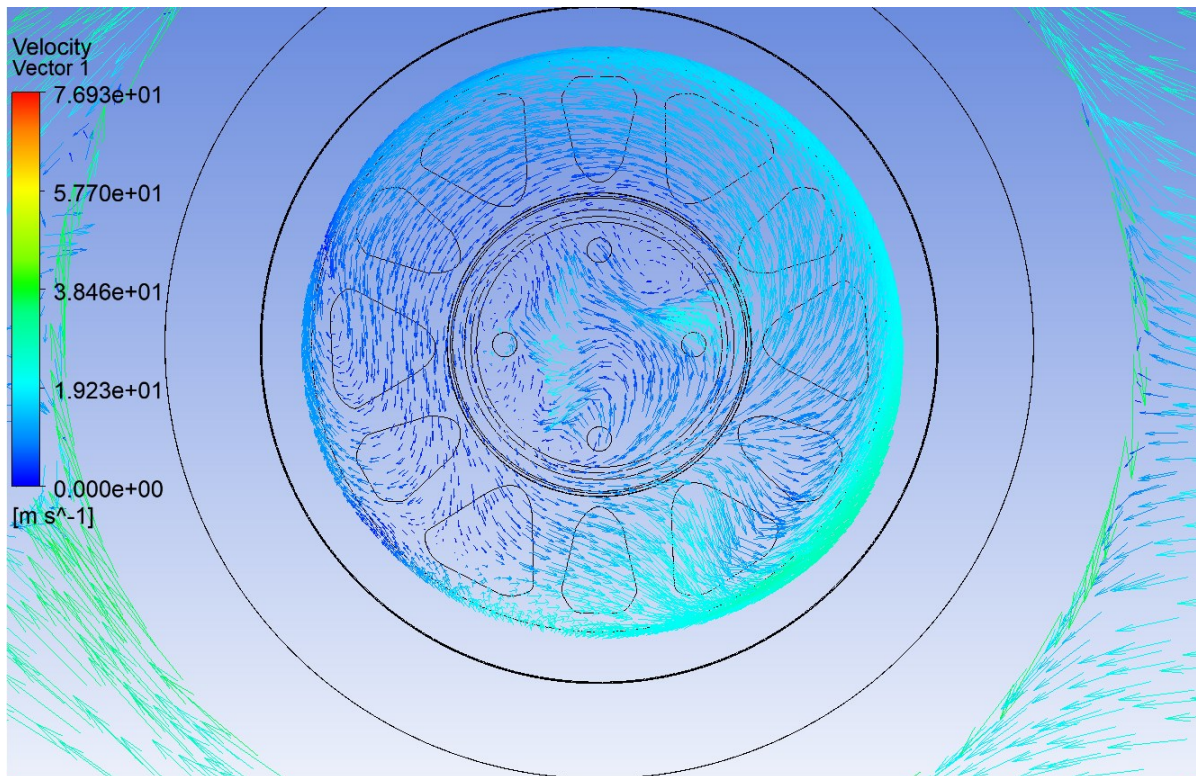


Εικόνα 3.70: Χρωματική Απεικόνιση της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) γύρω και περιφερειακά του τροχού, με τις τιμές της ταχύτητας εκφρασμένες στο σχετικό (περιστρεφόμενο) σύστημα αναφοράς.

Οι χρωματικές απεικονίσεις που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, αφορούν στο διάνυσμα της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) σε διάφορες περιοχές γύρω από τον τροχό και περιφερειακά του. Αρχικά, οι επόμενες δύο εικόνες, διαφορετικής εστίασης, αποτυπώνουν σε κατακόρυφο επίπεδο τη προαναφερθείσα αναφορά. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνεται διάσπαση εκατέρωθεν και καμπύλωση, της ροής του ρευστού (αέρας), γύρω από τον τροχό, με τις χαμηλότερες ως και μηδενικές, τιμές της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας), να παρατηρούνται στο πίσω μέρος του ελαστικού όπου εμφανίζεται αντίστροφη πορεία της ροής. Όσον αφορά στις υψηλότερες τιμές της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας), εκείνες προβάλλονται στις περιοχές μέγιστης καμπύλωσης της ροής γύρω από το ελαστικό.

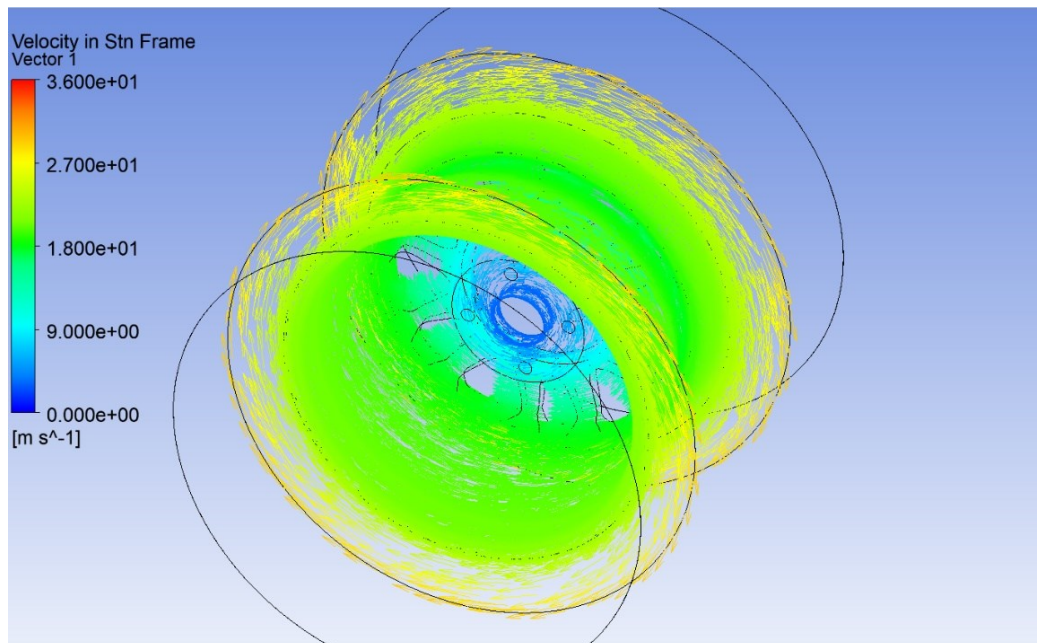


Εικόνα 3.71: Χρωματική απεικόνιση του διανύσματος της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας), σε κατακόρυφο επίπεδο, περιμετρικά του τροχού.

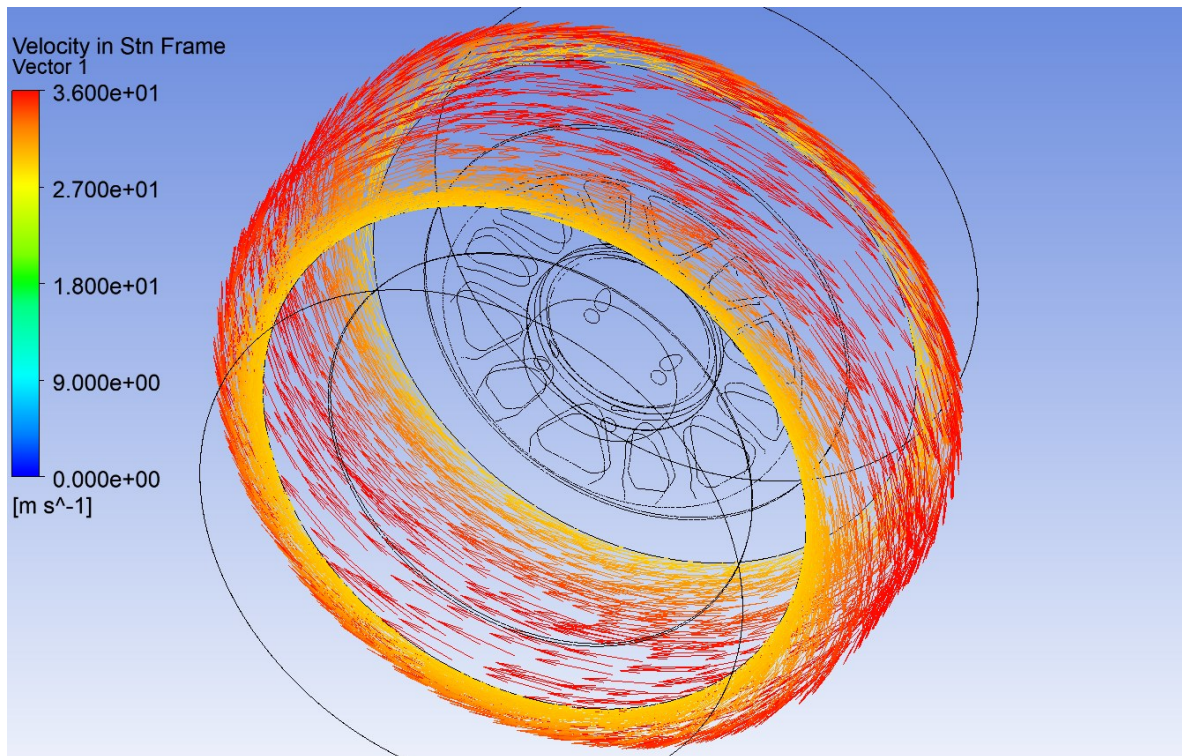


Εικόνα 3.72: Χρωματική απεικόνιση του διανύσματος της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας), σε κατακόρυφο επίπεδο, περιμετρικά του τροχού (λεπτομέρεια).

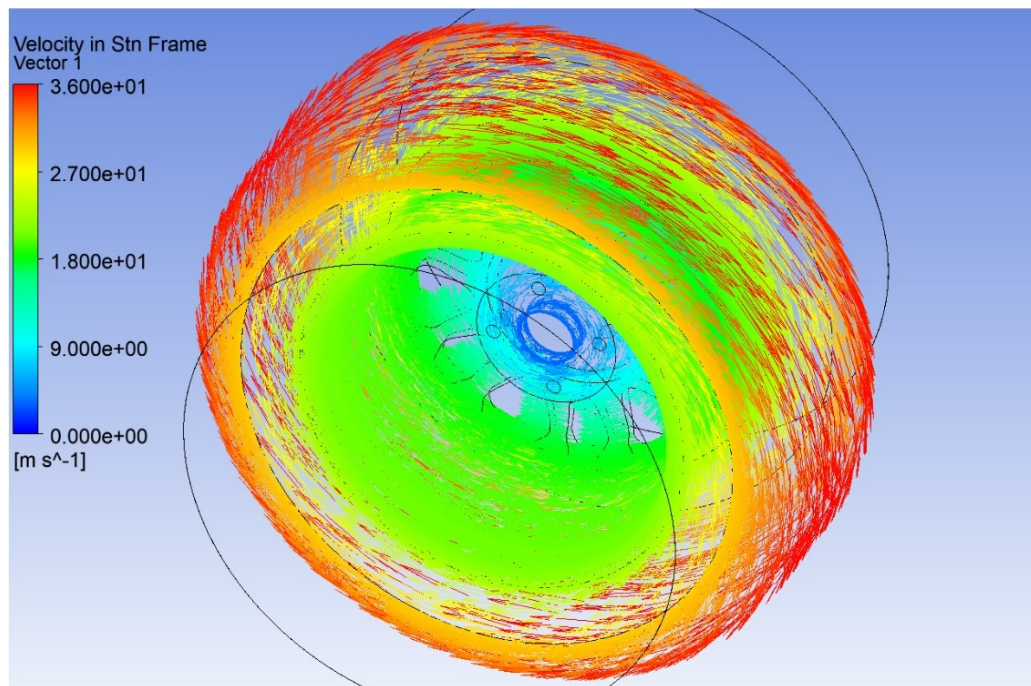
Ακολουθούν απεικονίσεις των διανυσμάτων της ροής, τόσο στο ακίνητο σύστημα αναφοράς όσο και στο περιστρεφόμενο, για να φανεί πιά χαρακτηριστικά η μορφή του πεδίου ροής.



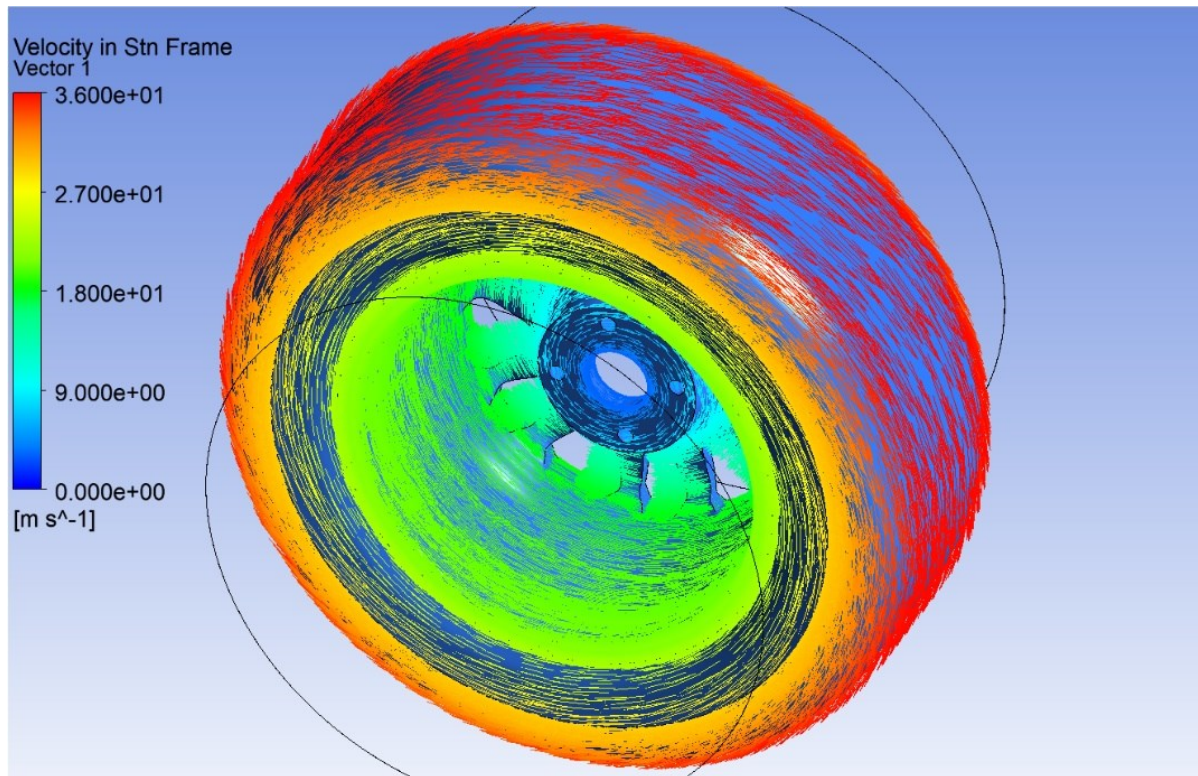
Εικόνα 3.73: Χρωματική απεικόνιση του διανύσματος της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) σε σταθερό σύστημα αναφοράς, γύρω από την ζάντα του τροχού.



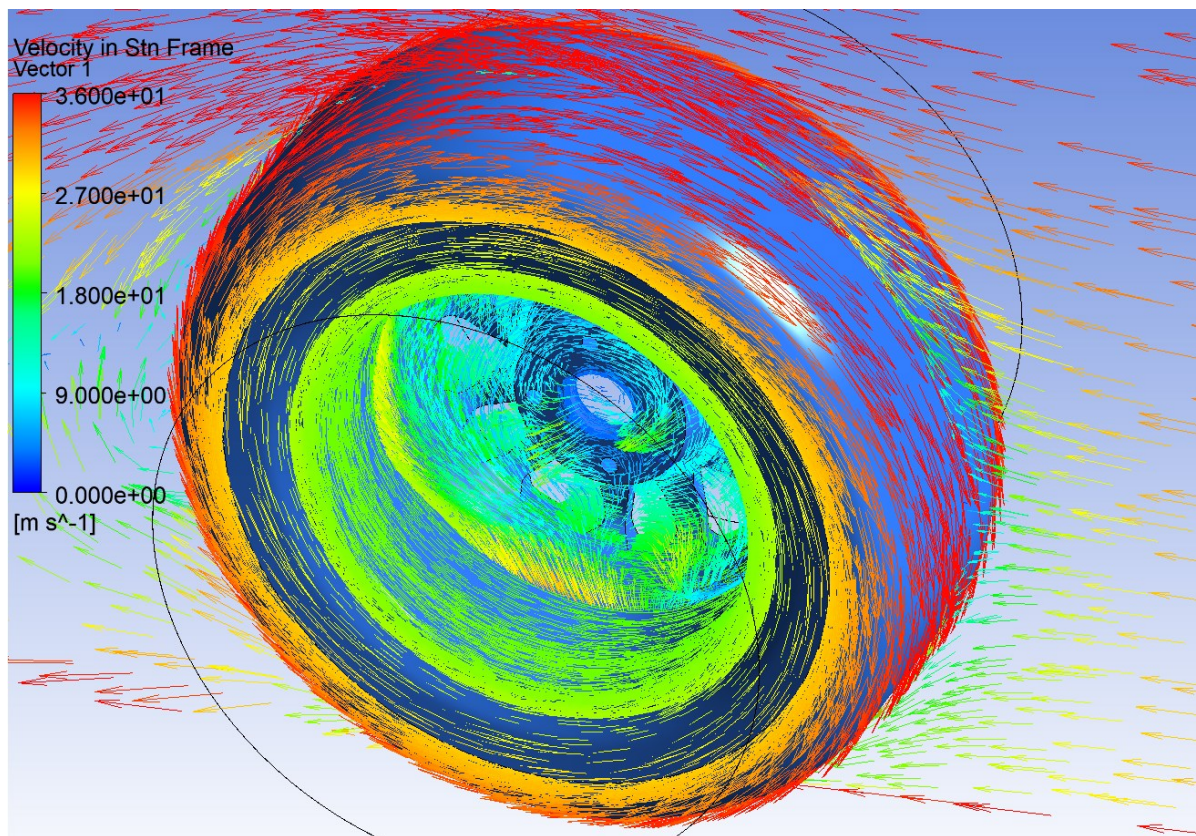
Εικόνα 3.74: Χρωματική απεικόνιση του διανύσματος της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) σε σταθερό σύστημα αναφοράς στην επιφάνεια του ελαστικού.



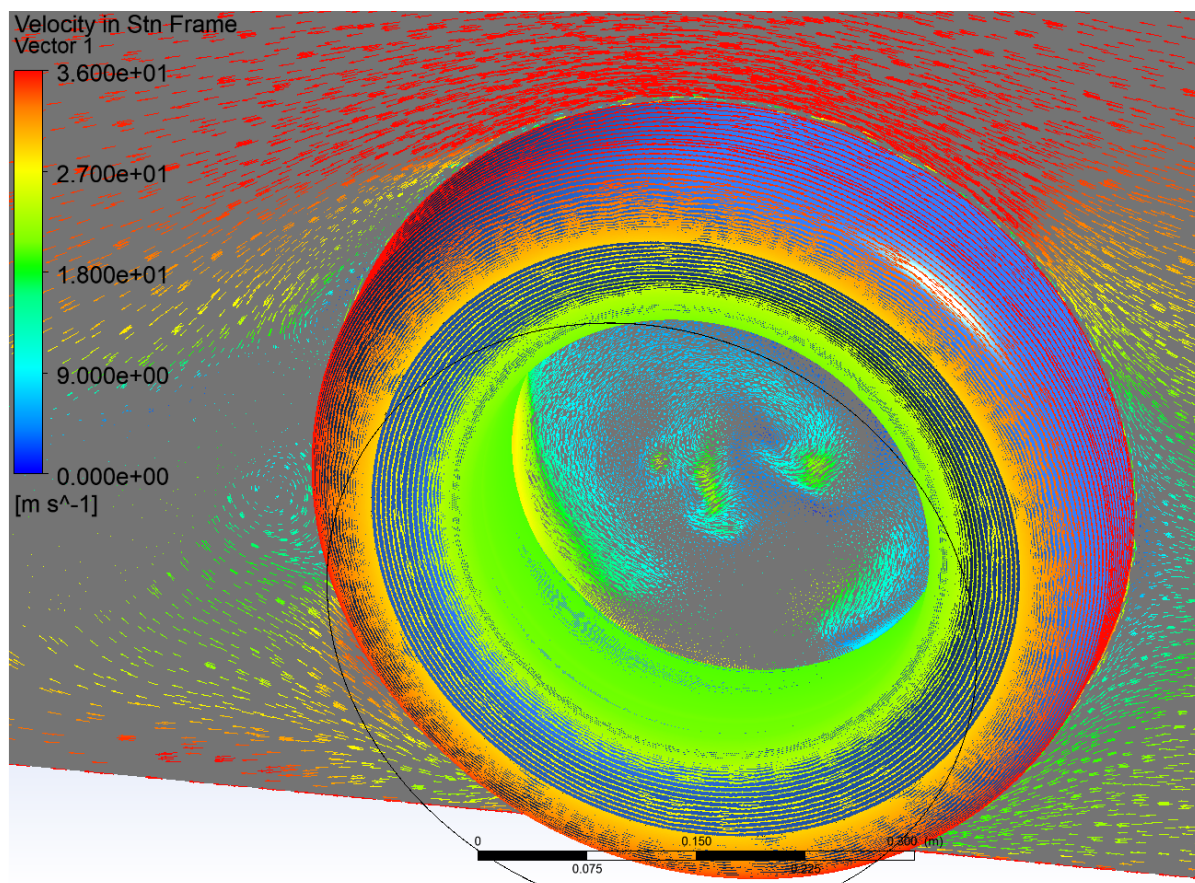
Εικόνα 3.75: Χρωματική απεικόνιση του διανύσματος της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) σε σταθερό σύστημα αναφοράς, στην επιφάνεια του συνολικού τροχού. Διακρίνεται η γραμμική αύξηση της ταχύτητας με την ακτίνα. Σημειώνεται ότι τα δύο τμήματα του τροχού έχουν προσομοιωθεί σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς (το εσωτερικό σε περιστρεφόμενο και το εξωτερικό σε ακίνητο).



Εικόνα 3.76: Χρωματική απεικόνιση του διανύσματος της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρα) σε σταθερό σύστημα αναφοράς, στην επιφάνεια του συνολικού τροχού. Διακρίνεται η γραμμική αύξηση της ταχύτητας με την ακτίνα.



Εικόνα 3.77: Χρωματική απεικόνιση του διανύσματος της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρας) σε σταθερό σύστημα αναφοράς, στην επιφάνεια του συνολικού τροχού, καθώς και σε κατακόρυφο επίπεδο που περνά από το μέσο του τροχού. Διακρίνεται η διαφορετική φορά των διανυσμάτων πάνω στον τροχό στο άνω τμήμα του σε σχέση με τον εισερχόμενο αέρα.



Εικόνα 3.78: Χρωματική απεικόνιση του διανύσματος της ταχύτητας της ροής του ρευστού (αέρα) σε σταθερό σύστημα αναφοράς, στην επιφάνεια του συνολικού τροχού, καθώς και σε κατακόρυφο επίπεδο που περνά από το μέσο του τροχού. Διακρίνεται η διαφορετική φορά των διανυσμάτων πάνω στον τροχό στο άνω τμήμα του σε σχέση με τον εισερχόμενο αέρα.

Με την χρήση κατάλληλης εντολής υπολογίστηκαν οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στον τροχό. Η δύναμη αντίστασης υπολογίστηκε ίση με $D=49,43 \text{ Nt}$, ενώ η δύναμη άνωσης υπολογίστηκε σε $L=48,81 \text{ Nt}$.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φάνηκε κατ' αρχήν η ορθότητα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, η οποία επιτρέπει την σωστή προσομοίωση της περιστροφής του τροχού. Η προσομοίωση αφορά σε σύστημα αναφοράς, το οποίο κινείται με σταθερή ταχύτητα μαζί με το όχημα. Ο όγκος του ρευστού χωρίστηκε σε ένα εξωτερικό ακίνητο τμήμα και σε ένα εσωτερικό κυλινδρικό περιστρεφόμενο τμήμα. Αυτό έγινε επειδή το εξωτερικό τμήμα του τροχού (ελαστικό) έχει απόλυτη κυλινδρική μορφή, οπότε μπορεί να εφαρμοστεί ταχύτητα ολίσθησης στην εν λόγω επιφάνεια. Η ζάντα όμως έχει οπές, οπότε δεν μπορεί να εφαρμοστεί ταχύτητα ολίσθησης στην επιφάνειά της. Για το λόγο αυτό, το εσωτερικό τμήμα του τροχού (ζάντα) ενσωματώθηκε σε περιστρεφόμενο κυλινδρικό όγκο, με άξονα περιστροφής τον άξονα του τροχού. Με τον τρόπο αυτό υλοποιήθηκε με ασφαλή τρόπο η περιστροφή του τροχού. Η ορθότητα της προσομοίωσης αποδεικνύεται από τον σωστό υπολογισμό της γραμμικής ταχύτητας σε όλη την περιστρεφόμενη επιφάνεια του τροχού (και σε αυτή που προσομοιώθηκε στο ακίνητο σύστημα αναφοράς και σε αυτή που προσομοιώθηκε στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς).

Οι μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας αφορούν σε ενσωμάτωση της εμπρός αεροδυναμικής πτέρυγας του οχήματος, ώστε να διαπιστωθεί η αλληλεπίδραση αυτής με τον περιστρεφόμενο τροχό. Σε επόμενο στάδιο σχεδιάζεται να γίνει συνολική προσομοίωση του οχήματος με τους περιστρεφόμενους τροχούς.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ANSYS Co., *The Ansys Story*, 2023.

C. Cravero, and D. Marsano, "Computational Investigation of the Aerodynamics of a Wheel Installed on a Race Car with a Multi – Element Front Wing", *Fluids*, 7, 182, 2022.
<https://doi.org/10.3390/fluids7060182>.

J.E. Fackrell, and J.K. Harvey, "The Aerodynamics of an Isolated Road Wheel", in B. Pershing, Editor, *Proceedings of the Second AIAA Symposium of Aerodynamics of Sports and Competition Automobiles*, Los Angeles, California, U.S.A., 1975.

H. Heo, J. Ju, D. Kim, H. Kim, "A Computational Study of the Flow around an Isolated Non-Pneumatic Tire", *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 7(1), pp. 405-412, 2014.
<https://doi.org/10.4271/2014-01-9123>.

M. Kulak, M. Karczewski, P. Lesniewicz, K. Olasek, B. Hoogterp, G. Spolaore, K. Jozwik, "Numerical and Experimental Analysis of the Rotating Wheel in Contact with the Ground", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 28(5), pp. 1203-1217, 2018.
DOI 10.1108/HFF-06-2017-0257.

F. Malizia, T. Van Druenen, and B. Blocken, "Impact of wheel rotation on the aerodynamic drag of a time trial cyclist", *Sports Engineering*, 24(3), 2021.

J. McManus, X. Zhang, "A computational study of the flow around an isolated wheel in contact with the ground", *ASME J. Fluids Eng.* 2006.

A.P. Mears, *The Aerodynamic Characteristics of an Exposed Racing Car Wheel*, Ph.D. Thesis, Durham University, Durham, UK, 2004.

M.R. Rasani, A. Shamsudeen, Z. Harun, W.M.F. Wan Mahmood, "A Computational Aerodynamic Study of Tandem Rotating Wheels in Contact with the Ground", *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.17), 2018.

W. Yi, C. Bertin, P. Zhou, J. Mao, S. Zhong, X. Zhang, "Aerodynamics of isolated cycling wheels using wind tunnel tests and computational fluid dynamics", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 228, 2022, 105085.

N. Μπιλάλης, Ε. Μαραβελάκης, *Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση*, Αθήνα: Εκδόσεις Κριτική ΑΕ., 2020.