

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Διπλωματική εργασία

Τίτλος εργασίας:

«Μελέτη και κατασκευή του συστήματος Τροχού-Πλήμνης για
χρήση σε πειραματικό όχημα χαμηλής κατανάλωσης»



ΠΛΟΥΜΑΚΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
ΧΑΝΙΑ 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατά την διάρκεια της συγγραφής αυτής της εργασίας, υπήρξαν αρκετοί άνθρωποι οι οποίοι συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της, ο καθένας με το δικό του τρόπο. Θεωρώ απαραίτητο λοιπόν να αφιερώσω μερικές γραμμές σε αυτούς, για να τους ευχαριστήσω ξεχωριστά.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νίκο Τσουρβελούδη, για την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας και την ουσιαστική συμβολή του στη διαμόρφωση αυτής, με τις σκέψεις, παρατηρήσεις και διορθώσεις του σε κάθε προβληματισμό μου.

Τον κ. Πολυχρόνη Σπανουδάκη υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, για την συνεχή βοήθεια σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή του ζητήθηκε, τις πολύτιμες παρατηρήσεις του, και την άψογη καθημερινή συνεργασία του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, γιατί στέκονται πάντα δίπλα μου και η βοήθεια και στήριξη τους είναι ανεκτίμητη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 1.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ
- 1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
- 1.3 ΣΤΟΧΟΙ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΡΕΥΝΑ ΑΓΟΡΑΣ

- 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΑ
- 2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΕΣ - ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ
- 2.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΗ

- 3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΟΣ
- 3.2 ΥΠΑΡΧΟΝ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΧΟΥ
 - 3.2.1 ΣΤΟΧΟΣ 2010-2011
- 3.3 ΑΡΧΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ
 - 3.3.1 ΤΡΟΧΟΣ
 - 3.3.2 ΠΛΗΜΝΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

- 4.1 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
- 4.2 ΖΑΝΤΕΣ-ΤΡΟΧΟΙ
- 4.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ
 - 4.3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΕΝΤΡΟΥ ΒΑΡΟΥΣ
 - 4.3.2 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΡΟΧΟ
 - 4.3.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΤΗ ΠΛΗΜΝΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

- 5.1 ΓΕΝΙΚΑ
- 5.2 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
- 5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ
- 5.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ
 - 5.4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
 - 5.4.2 ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΗ
 - 5.4.3 ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

- 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΓΕΝΙΚΑ
- 6.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
 - 6.2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
 - 6.2.2 ΤΟ ΚΑΛΟΥΠΙ
- 6.3 ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ-ΑΤΕΛΕΙΕΣ
- 6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ
- 6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο την μελέτη τον σχεδιασμό και σε τελικό στάδιο την κατασκευή συστήματος Τροχού-Πλήμνης με σκοπό την τοποθέτησή της σε πειραματικό όχημα χαμηλής κατανάλωσης. Αρχικά πραγματοποιείται έρευνα αγοράς προκειμένου να προσδιοριστούν με σαφήνεια οι επιλογές όσον αφορά τα υλικά κατασκευής, τις διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής και τις εμπορικές εφαρμογές τους. Με βάση την έρευνα αυτή εξάγονται τα πρώτα στοιχεία για τις προδιαγραφές των διαθέσιμων στην αγορά συστημάτων. Δεδομένου ότι το δικό μας σύστημα είναι σαφώς ορισμένο και αυστηρά περιορισμένο από τους κανονισμούς του Ευρωπαϊκού Διαγωνισμού που συμμετέχει το όχημα μας όσον αφορά τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, απορρίπτεται το σενάριο αγοράς έτοιμης εμπορικής εφαρμογής. Ακολουθεί η φάση της σχεδίασης του συστήματος με βάση τους περιορισμούς του διαγωνισμού με στόχο την ελαχιστοποίηση του βάρους. Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση των φορτίσεων/τάσεων που δέχεται το σύστημα και ειδικότερα ο τροχός, σε διάφορα σενάρια καταπόνησης με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων και επανασχεδιάζονται τα τμήματα που παρουσιάζουν ατέλειες. Μέσω επαναληπτικής διαδικασίας καταλήγουμε στο τελικό σχέδιο του συστήματος που ικανοποιεί τις προδιαγραφές και τους στόχους που θέσαμε. Σε τελικό στάδιο και αφού έχει επιλεγεί το υλικό κατασκευής, το σχέδιο, και η τεχνολογία παραγωγής προχωράμε στην κατασκευή του συστήματος. Γίνεται σύγκριση του θεωρητικού μοντέλου με το πραγματικό και εξάγουμε τα τελικά συμπεράσματα.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη ενός συστήματος τροχού προσαρμοσμένου πάνω στα δεδομένα ενός πειραματικού οχήματος χαμηλής κατανάλωσης που είναι σύμφωνο με τους περιορισμούς που θέτει ο ευρωπαϊκός διαγωνισμός Shell Eco Marathon.

1.3 ΣΤΟΧΟΙ

Στόχος της σχεδίασης είναι να οριστούν όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος και να ελεγχθεί η αντοχή της προτεινόμενης σχεδίασης, ώστε να είναι δυνατή η μετάβαση στο επόμενο στάδιο ανάπτυξης του προϊόντος, που είναι η κατασκευή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΡΕΥΝΑ ΑΓΟΡΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΓΕΝΙΚΑ

Ο τροχός ως γνωστόν θεωρείται μια από τις σημαντικότερες και αρχαιότερες ανακαλύψεις. Η πρώτη του χρήση τοποθετείται την 5^η χιλιετία π.Χ. σε συσκευές αγγειοπλαστικής, ενώ κάρα με τροχούς έχουν βρεθεί σε προϊστορικούς τάφους στην περιοχή του Καυκάσου που χρονολογούνται γύρω στο 3700 π.χ.. Η σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία στο μεγαλύτερο μέρος της πλέον έχει καταλήξει στην χρήση τροχών από αλουμίνιο ενώ σε ειδικές εφαρμογές (αγωνιστικά, πειραματικά οχήματα) χρησιμοποιούνται πολύ ακριβότερα υλικά, όπως το μαγνήσιο και το ανθρακόνημα.

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η παρούσα κατάσταση της αγοράς μέσα από δυο βασικά σημεία: το υλικό κατασκευής και το βάρος των διαθέσιμων στην αγορά προϊόντων. Λόγω των περιορισμών στην διάσταση των τροχών που ορίζει ο διαγωνισμός (16'' x 3.5'') η έρευνα αγοράς περιορίστηκε στους κατασκευαστές τροχών για μοτοσυκλέτες. Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί από ειδικούς καταλόγους, περιοδικά και το διαδίκτυο.

2.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΕΣ - ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Η έρευνα ξεκίνησε με σκοπό την εύρεση ενός εμπορικού πακέτου το οποίο θα ικανοποιούσε τα κριτήρια που θέσαμε εξ αρχής, όσον αφορά την ελαχιστοποίηση του βάρους, αλλά και τα σαφώς περιορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Βασικός σκοπός της έρευνας ήταν να σχηματιστεί μια ολοκληρωμένη άποψη όσον αφορά τα υλικά κατασκευής, το βάρος των διαθέσιμων στην αγορά τροχών, αλλά και το κόστος μιας ενδεχόμενης παραγγελίας. Η επαφή με κατασκευαστές του εξωτερικού ήταν απαραίτητη μιας και ελαφρού κράματος ζάντες στην Ελλάδα έρχονται μόνο κατόπιν παραγγελίας από το εξωτερικό.

Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα της έρευνας και αφορά τα ελαφρύτερα μοντέλα κάθε εταιρίας:

Πίνακας 2.1: Κατασκευαστές Τροχών

Κατασκευαστής	Υλικό Κατασκευής	Βάρος σε Kg (Μπροστά Ζάντα)	Διάσταση
Blackstone Tech (BST)	Ανθρακόνημα	2.1	17"
Marchesini	Σφυρήλατο Μαγνήσιο	3	17"
Marvic Penta	Χυτό Μαγνήσιο	3.4	17"
PVM	Σφυρήλατο Αλουμίνιο	3.6	17"
Performance Machine	Σφυρήλατο Αλουμίνιο	4.1	17"
Dymag	Σύνθετο Ανθρακόνημα	2.2	17"
Suzuki	Χυτό Αλουμίνιο	4.7	17"

Με μια γρήγορη σύγκριση μεταξύ του βάρους που ανακοινώνει κάθε εταιρία καταλήγουμε, προκειμένου να ερευνήσουμε περαιτέρω, σε δυο μεγάλους κατασκευαστές την Dymag και την Blackstone Tech, οι οποίες είναι οι μόνες που

ασχολούνται με την κατασκευή τροχών ελαφρού κράματος σε μαζική παραγωγή, χρησιμοποιώντας εκτός των άλλων και ανθρακόνημα.

Η Dymag υπάρχει στο χώρο της παραγωγής τροχών εδώ και 30 χρόνια και είναι περισσότερο γνωστή για τις ζάντες μαγνησίου ενώ κατέχει και το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Από την άλλη η Blackstone Tech είναι νέα στο χώρο και έχει περιορισμένη εμπειρία και παραγωγικότητα οπότε δεν θα ασχοληθούμε περαιτέρω. Ακολουθεί πίνακας με τις μικρότερες σε διάσταση ζάντες που παράγει η Dymag:

Πίνακας 2.2: Υλικά τροχών από την Dymag

Κατασκευαστής	Υλικό Κατασκευής	Βάρος Kg (Μπροστά Ζάντα)	Διάσταση
Dymag	Σύνθετο Ανθρακόνημα	2.2	17"
	Ανθρακόνημα	2.9	17"
	Σφυρήλατο Μαγνήσιο	3.5	17"
	Σφυρήλατο Αλουμίνιο	2.9	17"
	Χυτό Μαγνήσιο	3.2	17"
	Ανθρακόνημα-Μαγνήσιο	3.2	17"

Στον Πίνακα 2.2 παρατηρούμε, ότι η επιλογή του ανθρακονήματος είναι η καλύτερη όσον αφορά το βάρος σε σχέση με το αλουμίνιο και το μαγνήσιο οπότε στρεφόμαστε προς εκείνη την κατεύθυνση μιας και αντικειμενικός μας στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους του οχήματος.

Το σενάριο της αγοράς μιας εκ των παραπάνω εμπορικών λύσεων απορρίφθηκε άμεσα για τους παρακάτω λόγους:

- Οι εμπορικές εφαρμογές έχουν ελάχιστη διάσταση 17'' ενώ τα ειδικά σχεδιασμένα χαμηλής τριβής ελαστικά που χρησιμοποιούνται στον διαγωνισμό (μετά την πρόσφατη αλλαγή των κανονισμών) είναι για ζάντες 16''.
- Οι μοτοσυκλέτες στις οποίες χρησιμοποιούνται οι εν λόγω τροχοί, έχουν διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με το δικό μας τετράτροχο όχημα, οπότε και δέχονται διαφορετικές σε μέτρο και διεύθυνση φορτίσεις.

2.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Θέλοντας λοιπόν να προσεγγίσουμε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το πρόβλημα μας πήραμε την απόφαση να κατασκευάσουμε εξ αρχής τους τροχούς του οχήματος.

Επελέγη το **ανθρακόνημα** ως υλικό κατασκευής για τους παρακάτω λόγους:

Πλεονεκτήματα:

- 1) Εξαιρετικά υψηλή σχετική αντοχή σε εφελκυσμό (για δεδομένο βάρος)
- 2) Υψηλό σχετικό μέτρο ελαστικότητας (για δεδομένο βάρος)
- 3) Πολύ χαμηλό δείκτη γραμμικής θερμικής παραμόρφωσης
- 4) Υψηλή αντοχή σε κόπωση
- 5) Υψηλή θερμική αγωγιμότητα (υψηλότερη ακόμη και από εκείνη του χαλκού)

Ακόμη κι όταν οι ίνες άνθρακα βρίσκονται εντός της σχετικά αδύναμης μήτρας (ρητίνης), το τελικό προϊόν έχει υψηλότερη αντοχή από το ατσάλι και μόνο ελαφρώς χαμηλότερη ακαμψία, όταν συγκρίνονται με βάση τον όγκο τους. Όταν δε συγκριθούν με βάση το βάρος η διαφορά υπέρ του ανθρακονήματος είναι τεράστια [13].

Ίσως η σημαντικότερη και πιο καθοριστική παράμετρος για την τελική απόφαση και την επιλογή του ανθρακονήματος σαν υλικό κατασκευής, ήταν το μικρότερο βάρος σε σύγκριση με τα άλλα υλικά μιας και μειωμένο βάρος συνεπάγεται άμεσα με μειωμένη αδράνεια.

Οφέλη λόγω μειωμένης αδράνειας:

Όταν συγκρίνουμε τροχούς και βάρη, δεν είναι πάντα το συνολικό βάρος που μετράει, αλλά η κατανομή του βάρους στον εκάστοτε τροχό που επηρεάζει την απόδοση του συστήματος. Οι ζάντες από ανθρακονήματα είναι γενικά πιο ελαφριές και μεταφέρουν το κύριο τμήμα της μάζας τους στο κέντρο, όπου και επηρεάζει κατά το λιγότερο δυνατό την απόδοση του τροχού.

Οι επιδόσεις που κερδίζουμε όταν μειώνουμε την μάζα στους τροχούς (μη αναρτώμενη μάζα του οχήματος) μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με συντελεστή το 6 [12]. Αυτό σημαίνει ότι για να πετύχουμε το ίδιο κέρδος σε απόδοση είναι απαραίτητο να μειώσουμε από το υπόλοιπο όχημα 6 φορές το βάρος που κερδίζουμε από τους τροχούς.

«Η αφαίρεση 2 kg από κάθε τροχό x 4 τροχούς = Αφαίρεση 48 kg από το αμάξωμα»[12].

Βασικοί Υπολογισμοί:

Κάθε αντικείμενο που έχει μάζα και κινείται με ταχύτητα έχει συγκεκριμένη ενέργεια η οποία προέρχεται από το μοτέρ που χρησιμοποιούμε. Εάν κινείς έναν τροχό με συγκεκριμένη ταχύτητα η ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$E = \frac{1}{2} m v^2,$$

όπου m η μάζα και v η ταχύτητα με την οποία κινείται ο τροχός.

Μόλις ο τροχός αρχίζει να γυρίζει, η συνολική ενέργεια αποτελείται από δυο στοιχεία, δηλαδή το στοιχείο της μεταφοράς και το στοιχείο της περιστροφής. Ο νέος τύπος είναι:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} J \omega^2,$$

όπου J η αδράνεια περιστροφής και ω οι περιστροφές ανά sec.

Η αδράνεια περιστροφής απαρτίζεται από δυο στοιχεία, την μάζα του αντικειμένου και την απόσταση που αυτή βρίσκεται από τον άξονα περιστροφής. Όσο πιο μακριά είναι η μάζα από τον άξονα τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτείται για να την επιταχύνεις ή να την φρενάρεις. Αν η μάζα είναι σε διπλάσια απόσταση από τον άξονα περιστροφής, απαιτεί **4 φορές** περισσότερη ενέργεια (η ισχύ στη μηχανή) για να την επιταχύνει και να τη φρενάρει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΗ

3.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Όπως προαναφέρθηκε αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη ενός συστήματος τροχού προσαρμοσμένου πάνω στα δεδομένα ενός πειραματικού οχήματος χαμηλής κατανάλωσης που είναι σύμφωνα με τους περιορισμούς που θέτει ο Ευρωπαϊκός διαγωνισμός Shell Eco Marathon. Ακολουθεί σύντομη παρουσίαση του πειραματικού οχήματος ER10 που αποτελεί την βάση των υπολογισμών μας για σύστημα του τροχού.

Το ER10 είναι ένα πρωτότυπο τετράτροχο, μονοθέσιο ηλεκτρικό όχημα πόλης, που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο **Διατμηματικό Εργαστήριο Εργαλειομηχανών** και στο **Εργαστήριο Ευφών Συστημάτων και Ρομποτικής** του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αποτελεί πλατφόρμα πειραματισμού για προβλήματα που σχετίζονται με την επίτευξη χαμηλής κατανάλωσης, την οδική ασφάλεια αλλά και την αυτόνομη πλοήγηση. Καλύπτει εκπαιδευτικές ανάγκες των εργαστηρίων αλλά αποτελεί και αντικείμενο έρευνας με στόχο τη συνεχή εξέλιξη του και τη βελτίωση των επιδόσεών του. Το Μάιο του 2009 συμμετείχε πρώτη φορά στο Μαραθώνιο οικονομίας της Shell (Shell Eco Marathon).



Εικόνα 3.1: Το πειραματικό όχημα ER10

Τεχνικά Χαρακτηριστικά του ER10

Πλαίσιο: Σωλήνες αλουμινίου

Κάλυμμα: Ανθρακονήματα

Κινητήρας: Ηλεκτρικός

Μονάδα Παραγωγής Ενέργειας: Κυψέλες Υδρογόνου

Διαστάσεις: 2,5 x 1,25 x 1 (ΜxΠxΥ σε μέτρα)

Βάρος Οχήματος: 110 Kg

3.2 ΥΠΑΡΧΟΝ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΡΟΧΟΥ

Το ήδη εγκατεστημένο σύστημα τροχού του πειραματικού οχήματος ER10 προέρχεται από μοτοσυκλέτα και είναι κατασκευασμένο από χυτό αλουμίνιο. Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά του:



Εικόνα 3.2: Υπάρχον σύστημα τροχού

Διαστάσεις:

17''x 3.50''

Βάρη:

Ζάντα + Πλήμνη + Δισκόφρενο = 5180 gr

Λάστιχο = 3720 gr

Σύνολο + Αέρας = 8930 gr

Ακολουθεί ο υπολογισμός της αδράνειας του υπάρχοντος συστήματος προκειμένου να υπάρξει μέτρο σύγκρισης με το προτεινόμενο σύστημα.

Αδράνεια λόγω περιστροφής του τροχού είναι:

$$I_{2009} = 0.2081 \text{ kg} * \text{m}^2$$

3.2.1 ΣΤΟΧΟΣ 2010-2011

Αναλογιζόμενοι τις λύσεις που κυκλοφορούν στο εμπόριο και αφορούν τροχούς κατασκευασμένους από αναθρακόνημα θέτουμε στόχο για την χρονιά 2010-2011 την μείωση του βάρους κάθε τροχού (ζάντα + πλήμνη + δισκόφρενο) κάτω από τα 3 kg.

3.3 ΑΡΧΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ

Στο τμήμα αυτό παρουσιάζεται η προτεινόμενη σχεδίαση του συστήματος τροχού-πλήμνης βάσει των περιορισμών που τίθενται από τον διαγωνισμό με σκοπό την ελαχιστοποίηση του βάρους.

Η μορφή του προτεινόμενου μοντέλου παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3. Το σχέδιο αυτό όπως και όλα όσα παρουσιάζονται στη συνέχεια, έγιναν με χρήση του εξειδικευμένου σχεδιαστικού πακέτου, PRO/ENGINEER, της εταιρίας Parametric Technology Corporation.



Εικόνα 3.3 Προτεινόμενο σύστημα τροχού

Το σύστημα που παρουσιάζεται παραπάνω αποτελείται από 5 στοιχεία:

- Τον τροχό
- Την πλήμνη
- Την ασφάλεια της πλήμνης
- Τον άξονα περιστροφής
- Την Δισκόπλακα

3.3.1 ΤΡΟΧΟΣ

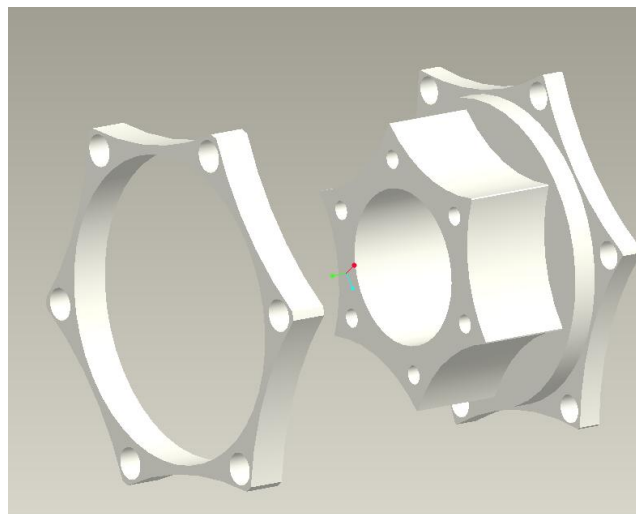
Ο τροχός αποτελείται από το στεφάνι, του οποίου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσδιορίζονται σαφώς από τον κανονισμό του διαγωνισμού, και τις ακτίνες. Ο τροχός έχει ύψος 16'' και πλάτος 3.5''. Το πάχος της στεφάνης είναι 2mm και των ακτίνων αυξάνεται σταδιακά όσο κινούμαστε προς το κέντρο από 6mm σε 12mm.



Εικόνα 3.4: Τροχός

3.3.2 ΠΛΗΜΝΗ

Η πλήμνη είναι το στοιχείο του συστήματος που συνδέει τον τροχό με τον άξονα περιστροφής και συγκρατεί την δισκόπλακα. Η ασφάλεια της πλήμνης χρησιμοποιείται προκειμένου να μην βιδωθεί απευθείας η πλήμνη πάνω στον τροχό ο οποίος λόγω του υλικού κατασκευής του –ανθρακόνημα- είναι ευαίσθητος σε ορθές τάσεις.

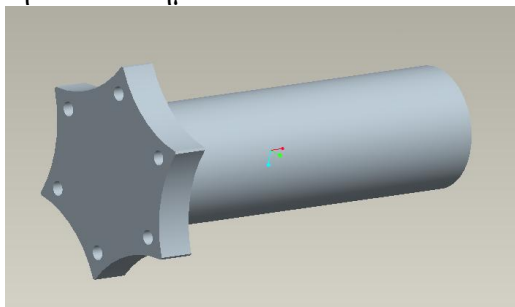


Εικόνα 3.5: Πλήμνη

Προκειμένου να θεωρηθεί πλήρες το σύστημα του τροχού και να κατανοηθεί πλήρως ο τρόπος λειτουργίας του θα πρέπει να παρασταθούν και τα λοιπά στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημά μας.

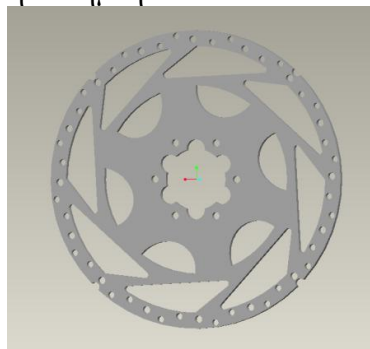
Αυτά είναι:

- Ο άξονας περιστροφής, που δένεται πάνω στην πλήμνη και μεταδίδει μέσω αυτής την κίνηση στο σύστημα.



Εικόνα 3.6: Άξονας κίνησης

- Η δισκόπλακα που χρησιμοποιείται απ το σύστημα πέδησης του οχήματος και προσδένεται πάνω στην πλήμνη.



Εικόνα 3.7: Δισκόπλακα

Το πλεονέκτημα της παραπάνω κατασκευής είναι η ευκολία με την οποία μπορεί να αφαιρεθεί ο τροχός από το σύστημα, απλά και μόνο αφαιρώντας την ασφάλεια της πλήμνης, κάνοντας έτσι πολύ εύκολη την δουλειά της επιδιόρθωσης πιθανής βλάβης στο σύστημα στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Πίνακας 3.1: Βάρη επί μέρους στοιχείων

Στοιχείο	Βάρος (gr)
Τροχός	2276
Πλήμνη	135
Ασφάλεια Πλήμνης	17
Άξονας περιστροφής	282
Δισκόφρενο	107
Σύνολο	2817

Αδράνεια λόγω περιστροφής του συστήματος:

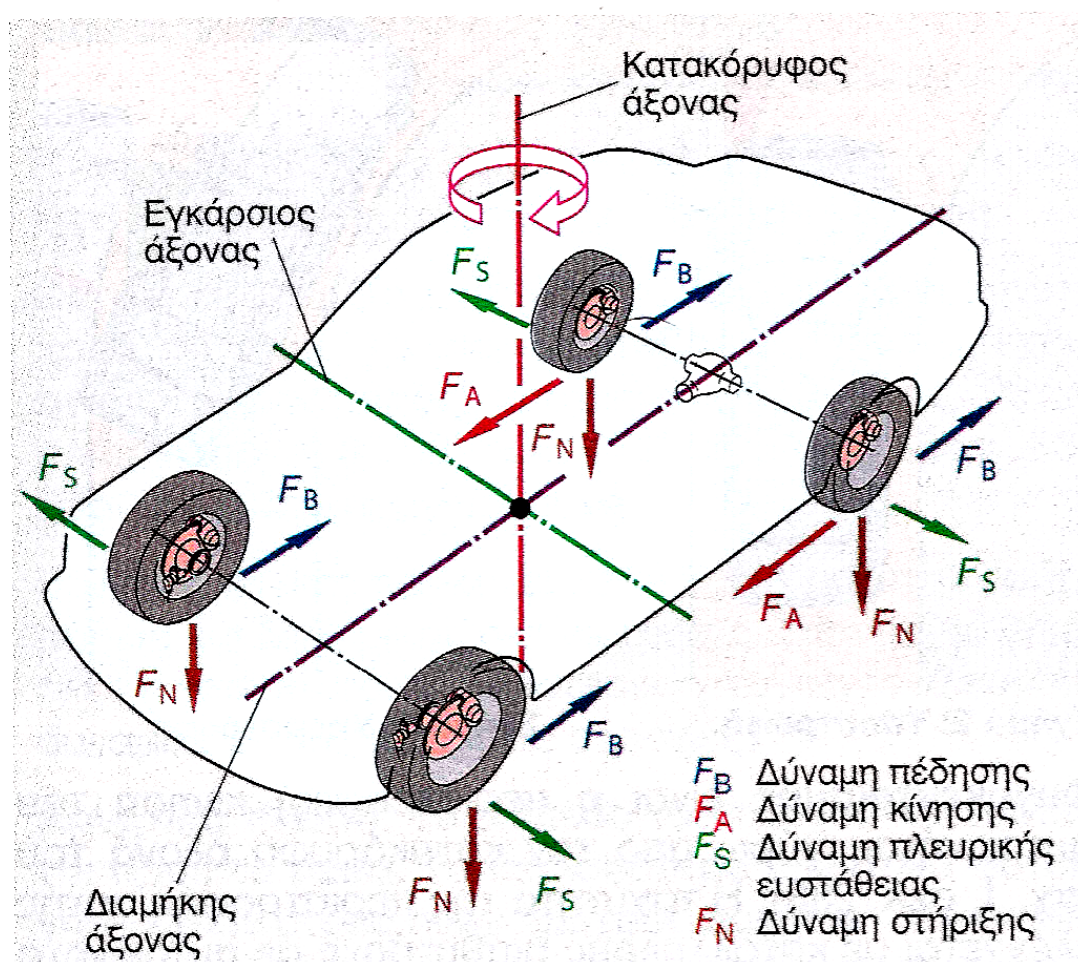
$$I_1 = \frac{1}{2} m * r^2 = \frac{1}{2} 2.817 * (203.2 * 10^{-3})^2 = 0.0581 \text{ _kg * m}^2.$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

4.1 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ [3], [11]

Ασχολείται με την επίδραση των δυνάμεων που ενεργούν στο αυτοκίνητο, όταν αυτό κινείται και με τη συμπεριφορά του στο δρόμο εξαιτίας των δυνάμεων αυτών.

Οι κινήσεις του αυτοκινήτου μπορεί να είναι προς τη διεύθυνση των αξόνων αλλά και γύρω απ' αυτούς. Οι άξονες αυτοί είναι: Ο **διαμήκης άξονας**, ο **εγκάρσιος άξονας** και ο **κατακόρυφος άξονας** (Σχήμα 4.1). Οι δυνάμεις μεταφέρονται από τα ελαστικά του αυτοκινήτου στο οδόστρωμα, από το οποίο αναπτύσσονται αντίρροπες δυνάμεις.



Σχήμα 4.1: Δυνάμεις και άξονες στο αυτοκίνητο

Οι δυνάμεις αυτές είναι:

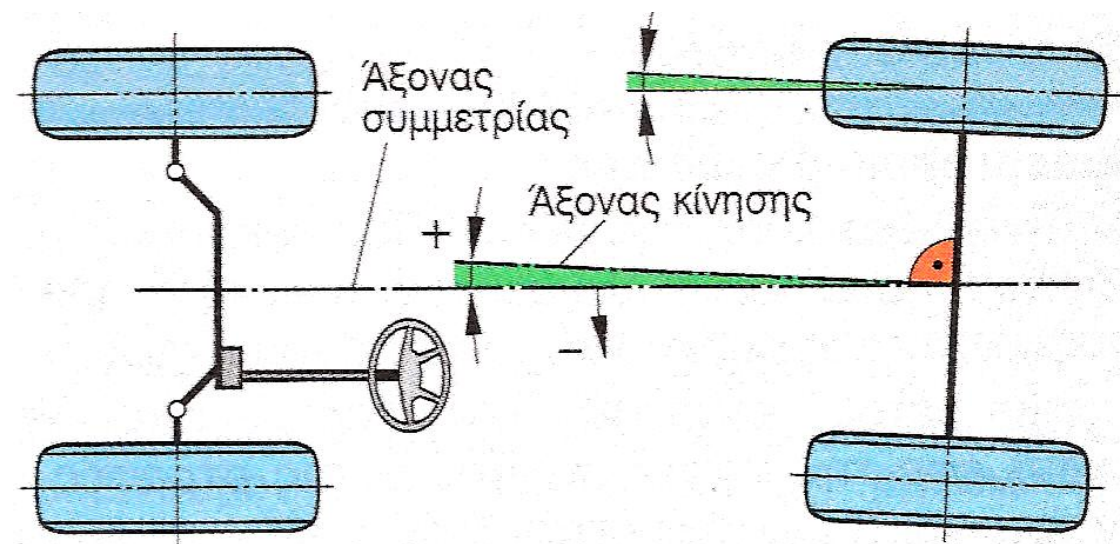
- Δυνάμεις παράλληλες προς το διαμήκη άξονα: Η δύναμη κίνησης, η δύναμη πέδησης (φρένα), η δύναμη τριβής.
- Δυνάμεις παράλληλες προς τον εγκάρσιο άξονα: Φυγόκεντρη δύναμη, δύναμη από ανεμόπτηση, δύναμη πλευρικής ευστάθειας.

- Δυνάμεις παράλληλες προς τον κατακόρυφο άξονα: Φόρτιση τροχών, δυνάμεις από ωθήσεις του οδοστρώματος.
- Οι κινήσεις, οι οποίες προκύπτουν από την ταυτόχρονη επίδραση όλων των δυνάμεων, εκφράζονται με την οδική συμπεριφορά του αυτοκινήτου.

Επίδραση στην οδική συμπεριφορά έχουν:

- Η θέση του κέντρου βάρους, του κέντρου κλυδωνισμού, του άξονα κλυδωνισμού και του άξονα κίνησης
- Το είδος της κίνησης και η διάταξη των μερών του συστήματος κίνησης
- Ανάρτηση τροχών και θέσεις τροχών
- Ελατήρια και αποσβεστήρες κραδασμών
- Αυτόματα συστήματα ρύθμισης τροχών, πχ ABS, ASR, ESP.

Άξονας συμμετρίας. Βρίσκεται στην διαμήκη διεύθυνση του αυτοκινήτου και διέρχεται από τα μέσα του εμπρόσθιου και του οπίσθιου άξονα (Σχήμα 4.2).



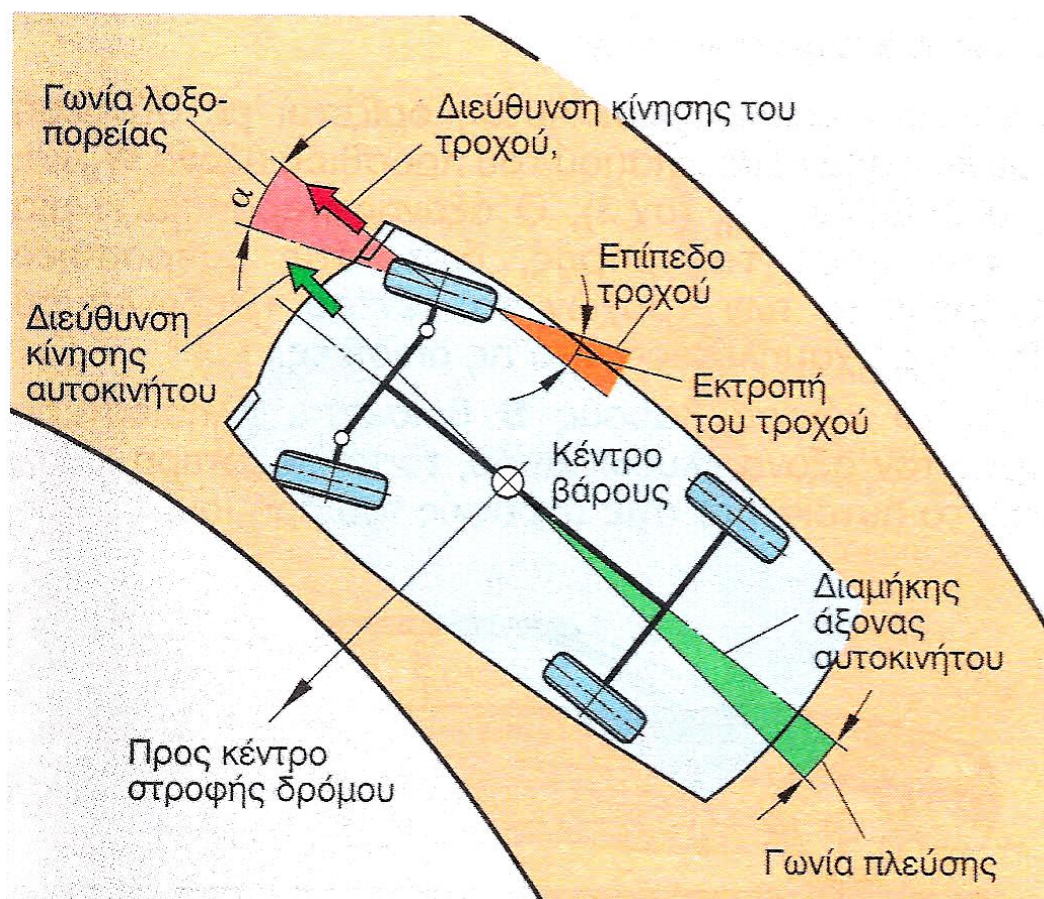
Σχήμα 4.2: Άξονες συμμετρίας και κίνησης

Άξονας κίνησης (γεωμετρικός άξονας κίνησης). Σχηματίζεται από την θέση των οπίσθιων τροχών και είναι η κάθετη στο μέσο του οπίσθιου άξονα.. Σε κανονική περίπτωση ο άξονας συμμετρίας και ο άξονας κίνησης ταυτίζονται. Αν ο άξονας κίνησης αποκλίνει από τον άξονα συμμετρίας, τότε το αυτοκίνητο κινείται λοξά.

Μετάθεση τροχών (Σχήμα 4.2). Είναι η γωνία, κατά την οποία αποκλίνουν οι τροχοί ενός άξονα από τη διεύθυνση του άξονα συμμετρίας του εμπρόσθιου ή του οπίσθιου άξονα.

Γωνία λοξοπορείας. Όταν σε ένα κινούμενο αυτοκίνητο επενεργεί μία πλευρική δύναμη (ανεμόπωση ή φυγόκεντρη δύναμη), τότε ενεργούν και στους 4 τροχούς πλευρικές δυνάμεις ευστάθειας. Αν δεν γίνει μία διόρθωση στο τιμόνι, τότε οι τροχοί μεταβάλουν τη διεύθυνση κίνησης και κινούνται λοξά. Κατά τη γωνία α , προς την αρχική διεύθυνση κίνησης (Σχήμα 4.3)

Η γωνία λοξοπορείας α είναι η γωνία, την οποία σχηματίζει το επίπεδο ενός τροχού προς την διεύθυνση κίνησης του τροχού αυτού.



Σχήμα 4.3: Γωνίες Λοξοπορείας και πλεύσης

Γωνία πλεύσης. Αυτή αναφέρεται στο συνολικό αυτοκίνητο (Σχήμα 4.1)

Η γωνία πλεύσης είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης κίνησης του αυτοκινήτου και του διαμήκους άξονα του αυτοκινήτου.

Συμπεριφορά ιδιοκίνησης :

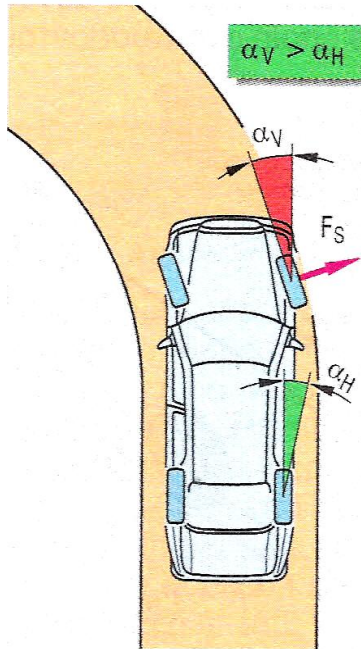
Για την γνωμάτευση της οδικής συμπεριφοράς εκτελούνται τυποποιημένοι ελιγμοί, πχ κυκλική κίνηση και εξακριβώνεται η συμπεριφορά του αυτοκινήτου. Η τριβή μεταξύ ελαστικών και οδοστρώματος είναι αρκετή έως την οριακή ταχύτητα στις στροφές για την μεταφορά των πλευρικών δυνάμεων, Αν η στροφή διανυθεί με μεγαλύτερη ταχύτητα, τότε αναπτύσσεται στους τροχούς (εμπρόσθιους, οπίσθιους ή σ' όλους) μία εγκάρσια ολίσθηση. Αν η ολίσθηση γίνει μεγάλη, τότε το αυτοκίνητο δεν κινείται πλέον στην προβλεπόμενη τροχιά του οδοστρώματος.

Γίνεται διάκριση:

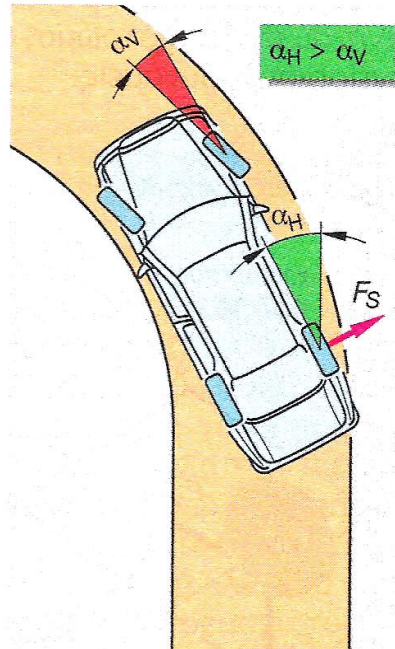
- **Υποστροφή** (Σχήμα 4.4). Η γωνία λοξοπορείας α_v των εμπρόσθιων τροχών είναι μεγαλύτερη από αυτήν των οπίσθιων τροχών. Το αυτοκίνητο έχει την τάση να κινηθεί σε καμπύλη με μεγαλύτερη ακτίνα από αυτήν που ορίζουν με την εκτροπή τους οι εμπρόσθιοι τροχοί. Έτσι το εμπρόσθιο μέρος του αυτοκινήτου εκτρέπεται προς τα έξω.
- **Υπερστροφή** (Σχήμα 4.5). Η γωνία λοξοπορείας α_H των οπίσθιων τροχών είναι μεγαλύτερη από τη γωνία λοξοπορείας α_v των εμπρόσθιων τροχών. Το αυτοκίνητο

τείνει να κινηθεί σε καμπύλη με μικρότερη ακτίνα απ' αυτήν που ορίζουν με την εκτροπή τους οι εμπρόσθιοι τροχοί. Έτσι το οπίσθιο μέρος του αυτοκινήτου εκτρέπεται προς τα έξω.

- **Ουδέτερη συμπεριφορά.** Οι γωνίες λοξοπορείας των εμπρόσθιων και των οπίσθιων τροχών είναι ίσες. Το αυτοκίνητο μπορεί να εκτραπεί τόσο με τους εμπρόσθιους όσο και με τους οπίσθιους τροχούς.



Σχήμα 4.4: Υποστροφή



Σχήμα 4.5: Υπερστροφή

Φυγοκεντρισμός είναι η περιστροφική κίνηση του αυτοκινήτου γύρω από τον κατακόρυφο άξονά του (Σχήμα 4.1). Η ταχύτητα της περιστροφής αυτής ελέγχεται με κατάλληλους αισθητήρες σε αυτοκίνητα που έχουν ESP (Electronic Stability Programm).

Κλυδωνισμός είναι η κίνηση γύρω από τον διαμήκη άξονα του αυτοκινήτου (Σχήμα 4.1).

Πρόνευση είναι η περιστροφική κίνηση ενός αυτοκινήτου γύρω από τον εγκάρσιο άξονά του (Σχήμα 4.1).

Τα αυτοκίνητα που έχουν:

- Εμπρόσθιους κινητήριους τροχούς, έχουν την τάση για υπόστροφη συμπεριφορά
- Οπίσθιους κινητήριους τροχούς, έχουν την τάση για υπέρστροφη συμπεριφορά
- Όλους τους τροχούς κινητήριους, έχουν ουδέτερη οδική συμπεριφορά,

4.2 ΖΑΝΤΕΣ - ΤΡΟΧΟΙ

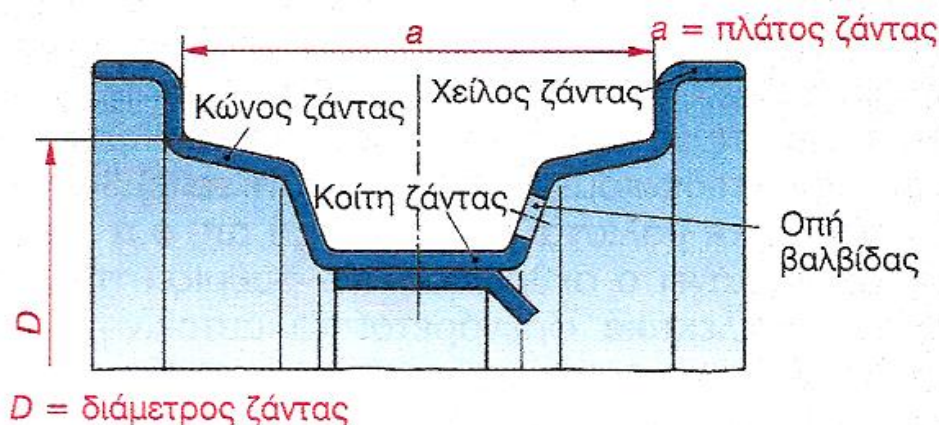
Απαιτούμενα χαρακτηριστικά:

- Μικρή μάζα
- Μεγάλη εσωτερική διάμετρο για μεγάλους δίσκους φρένων
- Διατήρηση της μορφής σε υψηλό βαθμό και ελαστικότητα
- Καλή απαγωγή της θερμότητας (θερμότητα τριβής και πέδησης)
- Απλή αντικατάσταση των ελαστικών και της ζάντας, σε περίπτωση βλάβης.

Ζάντες

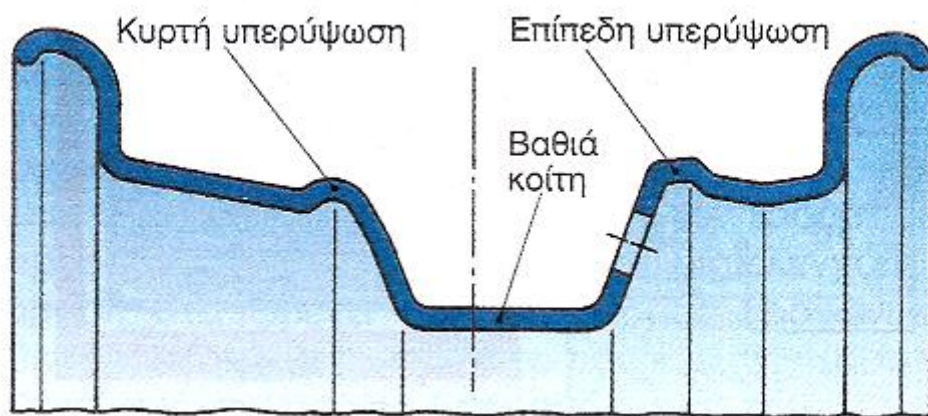
Υπάρχουν ζάντες ενιαίου τύπου, δηλαδή το περιμετρικό τμήμα και το κυρτό κεντρικό (λεκάνη) απαρτίζουν ένα ενιαίο σύνολο και οι διαιρούμενες, όπου το περιμετρικό τμήμα μπορεί να αφαιρεθεί. Εκτός αυτού υπάρχουν ζάντες βαθιάς κοίτης (μη διαιρούμενες και διαιρούμενες).

Ζάντες βαθιάς κοίτης. Αυτές χρησιμοποιούνται στα επιβατικά αυτοκίνητα σχεδόν αποκλειστικά. Στα δίκυκλα χρησιμοποιούνται μόνο αυτού του τύπου (Σχήμα 4.6). Το περιμετρικό τμήμα τους ενώνεται με ήλωση ή με συγκόλληση με τον κεντρικό δίσκο (λεκάνη) και αποτελούν ένα ενιαίο σύνολο. Μπορεί ακόμη να σχηματιστεί και με χύτευση ή σφυρηλασία.



Σχήμα 4.6 Μη διαιρούμενη συμμετρική ζάντα βαθιάς κοίτης

Ζάντα με υπερύψωση. Η διατομή της περιφέρειας της ζάντας μπορεί να είναι συμμετρική ή ασύμμετρη. Αν ένα επιβατικό αυτοκίνητο χρησιμοποιεί ελαστικά τύπου Radial χωρίς αεροθάλαμο (Tubeless), τότε πρέπει να χρησιμοποιήσει και **ζάντες με υπερυψώσεις** (Σχήμα 4.6). Αυτές είναι ζάντες βαθιάς κοίτης, οι οποίες, στη στεφάνη τους έχουν κυρτή υπερύψωση, η οποία διατρέχει όλη τη ζάντα περιμετρικά. Αν η υπερύψωση δεν είναι κυρτή αλλά επίπεδη, τότε λέγονται ζάντες με επίπεδη υπερύψωση. Και οι δύο υπερυψώσεις έχουν σκοπό να παρεμποδίσουν το άκρο του ελαστικού να εισχωρήσει προς το εσωτερικό της ζάντας (κοίτη) όταν, λόγω μεγάλης ταχύτητας σε στροφή, παραμορφωθεί αυτό αρκετά από τις αναπτυσσόμενες πλάγιες δυνάμεις με κίνδυνο να διαφύγει ακαριαία ο αέρας (ελαστικά Tubeless).



Σχήμα 4.7: Ασύμμετρη ζάντα με υπερυψώσεις

Διαστάσεις και σημάνσεις ζαντών.

Οι διαστάσεις και οι σημάνσεις των ζαντών είναι τυποποιημένες. Οι σημάνσεις της ζάντας χαράσσονται από τον κατασκευαστή επάνω σ' αυτήν. Η ζάντα χαρακτηρίζεται από δύο διαστάσεις: το πλάτος a σε ίντσες και τη διάμετρο D σε ίντσες. Αν η ζάντα είναι βαθιάς κοίτης, οι παραπάνω διαστάσεις χωρίζονται με ένα x . Αν η ζάντα είναι διαιρούμενου τύπου, τότε χωρίζονται με ένα "-----". Τα χαρακτηριστικά γράμματα μετά το πλάτος αναφέρονται στη μορφή του χείλους της ζάντας, ενώ τα γράμματα μετά τη διάμετρο πληροφορούν σχετικά με το είδος της ζάντας.

Παράδειγμα: 6 ½ J x 13 HS

6 ½ = Πλάτος σε ίντσες

J = Χαρακτηριστικό γράμμα για τις διαστάσεις του χείλους της ζάντας.

x = Ζάντα βαθιάς κοίτης (μη διαιρούμενη)

13 = Διάμετρος ζάντας σε ίντσες

H = Μία υπερύψωση στην εξωτερική πλευρά της ζάντας

S = Συμμετρική ζάντα

Άλλα χαρακτηριστικά γράμματα για τις σημάνσεις στις ζάντες:

H2 = Υπερύψωση και στις δύο πλευρές

FH = Επίπεδη υπερύψωση στην εξωτερική πλευρά της στεφάνης

FH2 = Επίπεδες υπερυψώσεις και στις δύο πλευρές

ET = Βάθος διείσδυσης σε mm (Σχήμα 4.8)

CH = Συνδυασμός υπερυψώσεων: Επίπεδη υπερύψωση στην εξωτερική πλευρά και κυρτή στην εσωτερική

SOC = Ζάντα ημιβαθιάς κοίτης (semi-drop-center)

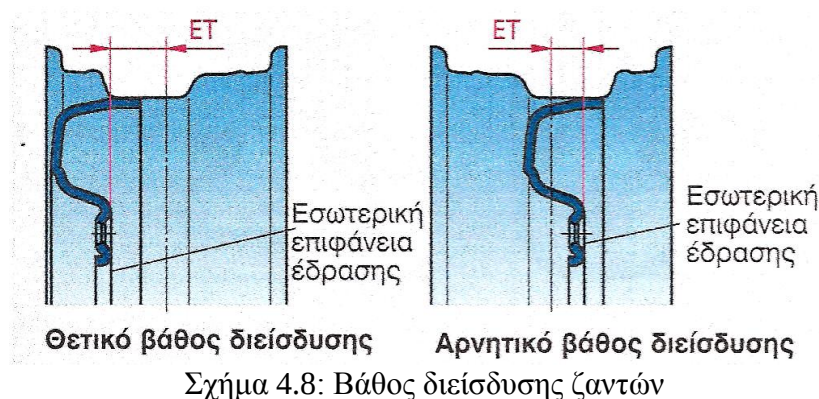
TD = Ειδική ζάντα με περίγραμμα αυξημένης ασφάλειας στο κωνικό της μέρος και χαμηλό ύψος χείλους. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο ελαστικά με το ίδιο περίγραμμα ασφάλειας. Εκτίναξη του ελαστικού δεν είναι δυνατή ακόμη και σε πολύ μικρές πιέσεις. Δίνεται το πλάτος και η διάμετρος της ζάντας σε mm.

Βάθος διείσδυσης. Είναι το μέγεθος από το κέντρο της ζάντας μέχρι την εσωτερική επιφάνεια επαφής αυτής με την πλήμνη (μουναγιέ).

Με τη συγκόλληση της ζάντας με τη λεκάνη του τροχού, εξασφαλίζεται το βάθος διείδυσης. Με αυτό τον τρόπο, ο τροχός είναι καθορισμένος για ένα συγκεκριμένο όχημα, λόγω του ότι το βάθος διείδυσης σχετίζεται άμεσα με τη γεωμετρία του συστήματος διεύθυνσης. Το βάθος διείδυσης λέγεται και offset.

Θετικό βάθος διείδυσης. Η εσωτερική επιφάνεια έδρασης σε σχέση με το μέσο της ζάντας έχει μετατοπιστεί προς το εξωτερικό του τροχού.

Αρνητικό βάθος διείδυσης. Η εσωτερική επιφάνεια έδρασης έχει μετατοπιστεί προς την εσωτερική πλευρά του τροχού. Με τη χρήση ζαντών με αρνητικό βάθος διείδυσης μπορεί να αυξηθεί το μετατρόchio των αυτοκινήτων.



Είδη τροχών:

Οι δισκοειδείς τροχοί είναι από χαλυβδοελάσματα διαμορφωμένα σε πρέσα ή από κράματα ελαφρού μετάλλου, Π.χ. GK-AISi 10 Mg χυτευμένα ή σφυρήλατα, ή τέλος απο σύνθετα υλικά όπως το ανθρακόνημα.

Πλεονεκτήματα ζαντών από κράματα ελαφρού μετάλλου:

- Μικρό βάρος (μικρή μάζα χωρίς ελατήρια)
- Καλύτερος αερισμός φρένων και απαγωγή θερμότητας

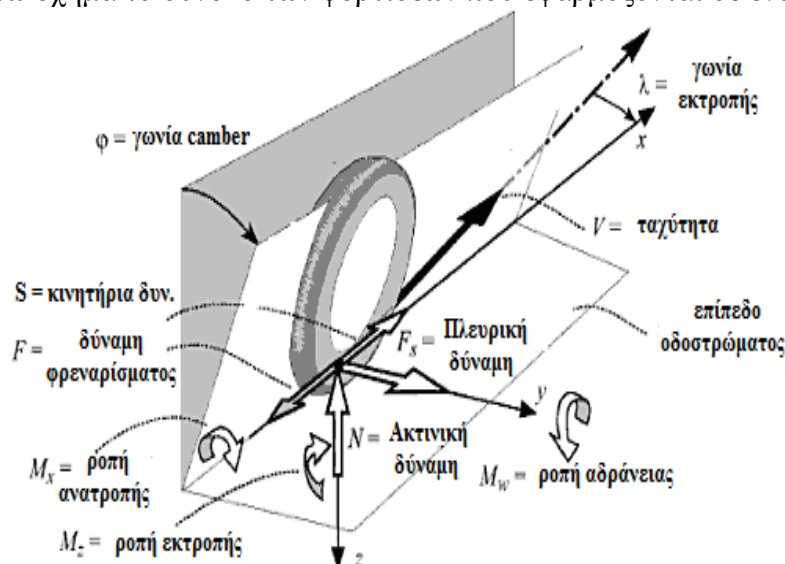
Οι ζάντες ελαφριάς κατασκευής από χάλυβες νέας τεχνολογίας, πχ OP 600 ή HR 60 επιτρέπουν μικρά πάχη λαμαρίνας και έναντι των μέχρι τώρα ζαντών από χάλυβα RSt37 είναι έως 40% ελαφρότερες.

Πλεονεκτήματα ζαντών από ανθρακονήματα (σε σχέση με τα κράματα):

- Το ανθρακόνημα έχει μεγαλύτερη αντοχή ανα μονάδα βάρους σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο κράμα.
- Οι τροχοί είναι ελαφρύτεροι και με μεγαλύτερη αντοχή.
- Οι τροχοί είναι ελαφρύτεροι στο κέντρο και στις ακτίνες γεγονός που μειώνει την αδράνεια.
- Καλύτερη συμπεριφορά στο δρόμο, πολύ καλύτερη αμεσότητα.
- Γρηγορότερη επιτάχυνση και φρενάρισμα.
- Πιο ασφαλής οδήγηση.

4.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

Συνοψίζοντας την θεωρία της κινηματικής που προηγήθηκε παρουσιάζουμε στο παρακάτω σχήμα το σύνολο των φορτίσεων που εφαρμόζονται σε έναν τροχό:



Εικόνα 4.5: Δυνάμεις και Ροπές μεταξύ του τροχού και της επιφάνειας του δρόμου

Συνοψίζουμε λοιπόν με τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται στο σύστημά μας: [3],[4],[5],[6],[7]

1. Ροπή λόγω φρεναρίσματος
2. Ακτινική Δύναμη
3. Πλευρική Δύναμη
4. Πίεση λόγω αέρα του ελαστικού

4.3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΕΝΤΡΟΥ ΒΑΡΟΥΣ

Ο υπολογισμός του κέντρου βάρους είναι απαραίτητος προκειμένου να μπορέσουν να προσδιοριστούν με ακρίβεια τα δυναμικά στοιχεία του αυτοκινήτου και στην συνέχεια να προσδιοριστούν οι φορτίσεις στον τροχό και την πλήμνη.

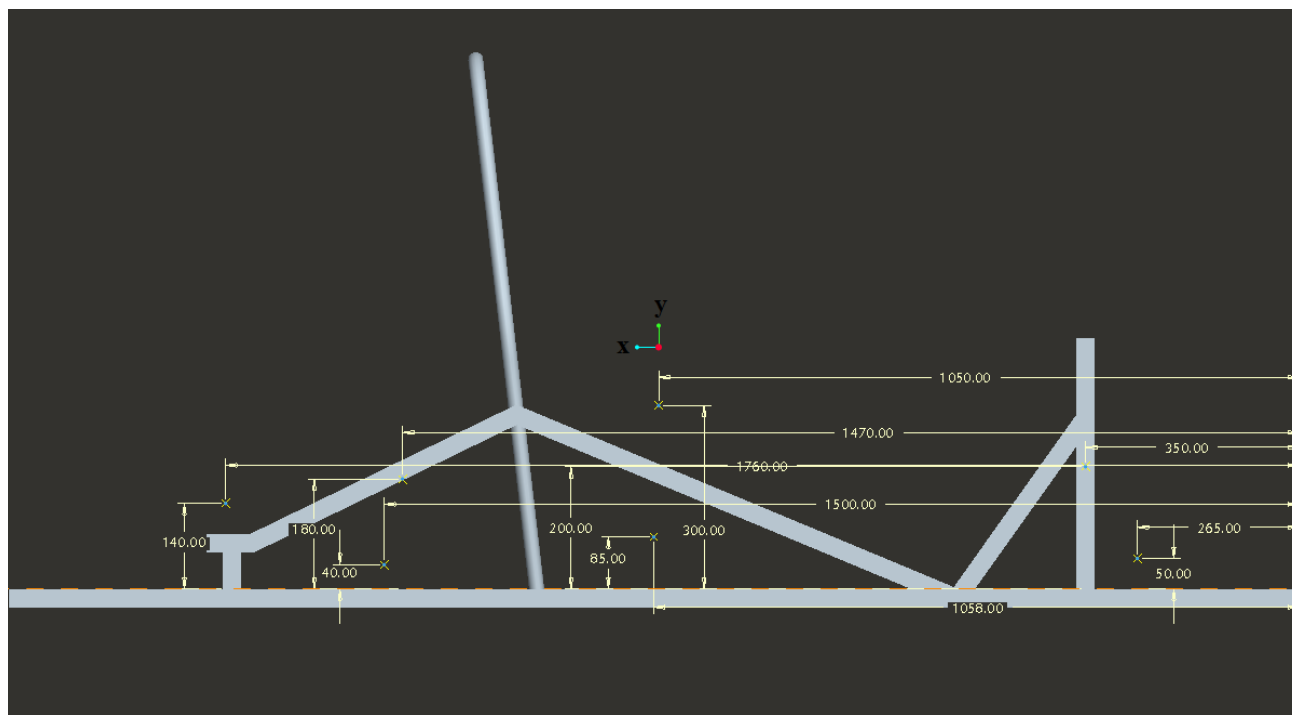
Κέντρο Βάρους. Ορίζεται ως το θεωρητικό σημείο όπου υποτίθεται ότι βρίσκεται συγκεντρωμένο όλο το βάρος του οχήματος. [10]

Ακολουθεί αναλυτικός πίνακας με τα στοιχεία του οχήματος προκειμένου να γίνει με ακρίβεια ο προσδιορισμός του κέντρου βάρους.

Πίνακας 4.1: Στοιχεία του οχήματος

Στοιχείο	Βάρος (kg)	Απόσταση (mm) από εμπρός	Βάρος (Kg) * Απόσταση(mm)	Απόσταση (mm) από έδαφος	Βάρος (Kg) * Απόσταση (mm)
Ηλεκτρικός Κινητήρας	13	1775	23075	270	3510
Fuel Cell	12	1485	17820	310	3720
DC-DC Converter	2	1515	3030	170	340
Πλαίσιο	9	1073	9657	215	1935
Οδηγός + Κάθισμα	75	1065	79875	430	32250
Μπροστά Σύστημα	7	365	2555	330	2310
Μπαταρία φώτων	2	280	560	180	360
Σύνολο (χωρίς τροχούς)	120		136572		44425
4 Τροχοί	50	<i>Δεν επιδρούν στην εύρεση του κέντρου βάρους</i>			
Σύνολο	170				

Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται το όχημα σε πλάγια όψη, με τα σημεία εφαρμογής των βαρών των τμημάτων του και τις αποστάσεις που αυτά έχουν από τον άξονα αναφοράς στα δεξιά.



Εικόνα 4.2: Πλάγια όψη του πλαισίου και γραφική απεικόνιση των αποστάσεων των στοιχείων του οχήματος

Γνωρίζοντας τις ακριβείς θέσεις εφαρμογής των βαρών των επιμέρους τμημάτων σε κάθε άξονα, το κέντρο βάρους του οχήματος βρίσκεται από την εξίσωση:

$$L_{KB} W_{Ολικό} = L_1 W_1 + L_2 W_2 + L_3 W_3 \dots$$

Οπότε καταλήγουμε:

Κέντρο Βάρους στον x άξονα= 136572 / 120

Κέντρο Βάρους στον y άξονα = 44425 / 120

Πίνακας 4.2: Κέντρα βάρους

Κέντρο Βάρους x	Κέντρο Βάρους y
1138,1 mm	370,2 mm

Πλέον μπορούμε να έχουμε μια ολοκληρωμένη απεικόνιση των ιδιοτήτων του οχήματος όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.3: Ιδιότητες οχήματος

Ιδιότητες πειραματικού οχήματος ER10		
Ύψος στον κατακόρυφο άξονα	0,359	m
Μεταξόνιο	1,400	m
Ακτίνα κύλισης εμπρόσθιου τροχού	0,280	m
Ακτίνα κύλισης οπίσθιου τροχού	0,280	m
Βάρος στον μπροστά άξονα	92	kg
Βάρος στον πίσω άξονα	78	kg
Συντελεστής τριβής ελαστικών	0,0025	
Συνολικό Βάρος με οδηγό	170	kg
Βάρος στον μπροστά άξονα %	54,1	%
Βάρος στον πίσω άξονα %	45,9	%

4.3.2 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΤΟΝ ΤΡΟΧΟ

1. Ροπή λόγω φρεναρίσματος

Για τον υπολογισμό της εν λόγω φόρτισης χρησιμοποιήσαμε έναν υπολογιστή σε Excel που παρουσιάζεται στους πίνακες 4.4 και 4.5 (στο Υπόμνημα), ενώ η εγκυρότητα των υπολογισμών ελέγχθηκε από την βιβλιογραφία [3], [4], [6].

$$\text{Ροπή φρεναρίσματος} = M = F * Cf * R$$

Όπου M = Ροπή φρεναρίσματος

F = Δύναμη*

Cf = Συντελεστής τριβής

R = Ενεργή Διάμετρος Δισκόπλακας*

*Ο αναλυτικός υπολογισμός των παραπάνω μεγεθών όπως και όλων των μεγεθών του υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε γίνεται στο **Υπόμνημα**.

Η τελική τιμή που τελικά θα εφαρμόσω, στην προσομοίωση του συστήματος, είναι $M = 180 \text{ Nm}$ προσεγγίζοντας την χειρότερη δυνατή περίπτωση όπου η κατανομή της πέδησης είναι 100% σε έναν από τους δυο άξονες.

2. Ακτινική Δύναμη

Για τον υπολογισμό της εφαρμόσαμε την παρακάτω μέθοδο που προτείνεται στην βιβλιογραφία [2], [7] .

$$\text{Ακτινική Δύναμη} = \frac{Al + Lw}{2}$$

Όπου Al = Μέγιστη φόρτιση άξονα

Lw = Εγκάρσια μεταφορά βάρους

Ενδιάμεσοι υπολογισμοί:

$$LatT = \frac{Tw * Cg * a}{Wt} = \frac{1700 N * 0.358m * 0.5 \frac{m}{s^2}}{1.22m} = 253.58 N$$

Όπου LatT = Εγκάρσια μεταφορά βάρους

Tw = Συνολικό βάρος

Cg = Κέντρο βάρους

a = Μέγιστη επιβράδυνση

Wt = Μετατρόχιο

$$LongT = \frac{Tw * Cg * a}{Wb} = \frac{1700 N * 0.358m * 0.5 \frac{m}{s^2}}{1.399m} = 218.35 N$$

Όπου LongT = Διαμήκης μεταφορά βάρους

Tw = Συνολικό βάρος

Cg = Κέντρο βάρους

a = Μέγιστη επιβράδυνση

Wb = Μεταξόνιο

$$FrontL = Fw + LongT = 920N + 218N = 1138N$$

Όπου FrontL = Φόρτιση στον μπροστινό άξονα

Fw = Βάρος μπροστινού άξονα

LongT = Διαμήκης μεταφορά βάρους

$$RearL = Rw - LongT = 780N - 218N = 562N$$

Όπου RearL = Φόρτιση στον μπροστινό άξονα

Rw = Βάρος μπροστινού άξονα

LongT = Διαμήκης μεταφορά βάρους

Άρα μέγιστη φόρτιση άξονα = Φόρτιση στον μπροστινό άξονα = 1138 N

$$\text{Άρα τελικά από τον αρχικό τύπο, Ακτινική Δύναμη} = \frac{Al + Lw}{2} = 695.8 N$$

3. Πλευρική Δύναμη

Για τον υπολογισμό της εφαρμόσαμε την παρακάτω μέθοδο που προτείνεται στην βιβλιογραφία [1] .

Πλευρική Δύναμη = Συντελεστής τριβής (Cf) * Ακτινική δύναμη στον τροχό

Όπου Cf (συντελεστής τριβής) για τα χαμηλής τριβής ελαστικά μας, Cf = 0.0025

Άρα τελικά Πλευρική Δύναμη = 1.75 N

4. Πίεση λόγω ελαστικού

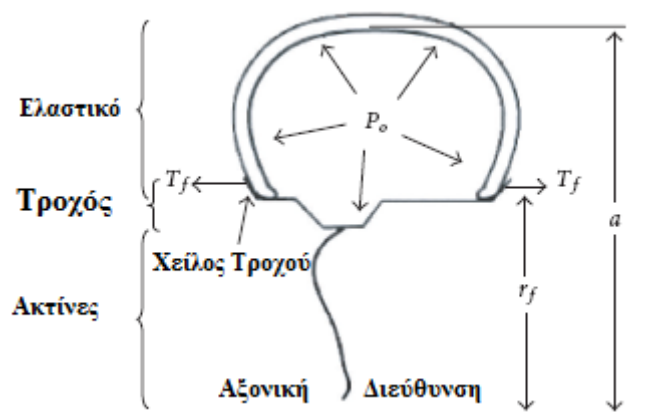
Ο υπολογισμός της γίνεται με βάση τον παρακάτω τύπο: [7]

$$\text{Πίεση λόγω ελαστικού} = T_f = \frac{(a^2 - r_f^2) * P_o}{4 * r_f}$$

Όπου α = ακτίνα σχεδίασης του ελαστικού

r_f = ακτίνα του σημείου εφαρμογής της πίεσης στο Χείλος του τροχού

P_o = η πίεση λόγω φουσκώματος του ελαστικού



Εικόνα 4.6: Παρουσίαση τροχού

Αναλυτικός υπολογισμός Πίεσης ελαστικού:

$$T_f = \frac{(280\text{mm})^2 - (202\text{mm})^2 * 30\text{ psi}}{4 * (202\text{mm})^2} = \frac{(78400 * 10^{-6}\text{m} - 40804 * 10^{-6}\text{m}) * 206842.7\text{ Pa}}{4 * 40804 * 10^{-6}\text{m}} = 47.645\text{ KPa}$$

Συνοψίζοντας έχουμε:

Φορτίσεις στον τροχό:

1. Ροπή λόγω φρεναρίσματος = 180 Nm
2. Ακτινική Δύναμη = 700 N
3. Πλευρική Δύναμη = 1.7 N
4. Πίεση ελαστικού = 47 KPa

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΟΝ ΤΡΟΧΟ

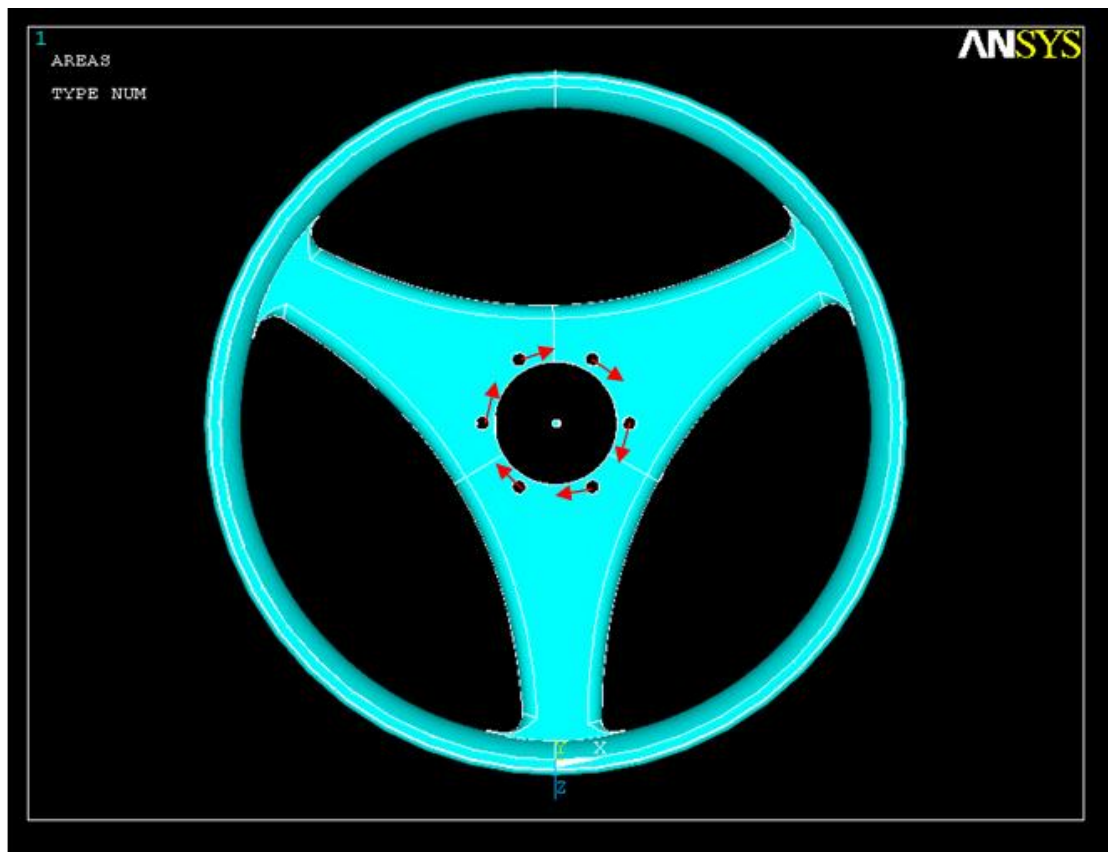
Η εφαρμογή της Ροπής λόγω φρεναρίσματος γίνεται στις 6 οπές του μοντέλου και η πάκτωση στο Χείλος του τροχού (Εικ.4.6).

Εφαρμόζω Ροπή Φρεναρίσματος = 180 Nm προσεγγίζοντας την χειρότερη δυνατή περίπτωση όπου η κατανομή της πέδησης είναι 100% σε έναν από τους δυο άξονες. Η ροπή αυτή εφαρμόζεται σε απόσταση 80 mm από το κέντρο(δισκόπλακα 160 mm) οπότε έχουμε:

$$M = F * r \text{ άρα } F = \frac{180}{80 * 10^{-3}} = 2.25 * 10^3 N$$

(τη μετατρέψαμε σε δύναμη λόγω αδυναμίας εφαρμογής ροπής στο ANSYS)

Η εφαρμογή της δύναμης φαίνεται παρακάτω προκειμένου να δημιουργεί ροπή ως προς τον άξονα της ζάντας.

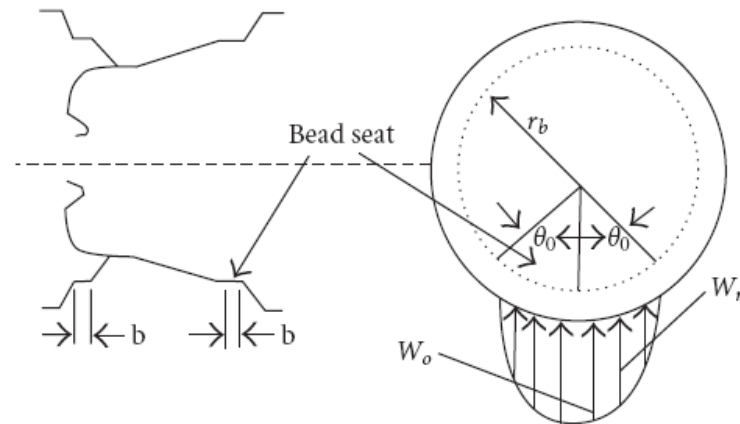


Εικόνα 4.7: Εφαρμογή ροπής φρεναρίσματος

Η εφαρμογή της Ακτινικής δύναμης [7] γίνεται στο Bead seat (Εικ. 4.8) πάνω στο στεφάνι του μοντέλου και η πάκτωση εφαρμόζεται στις οπές.

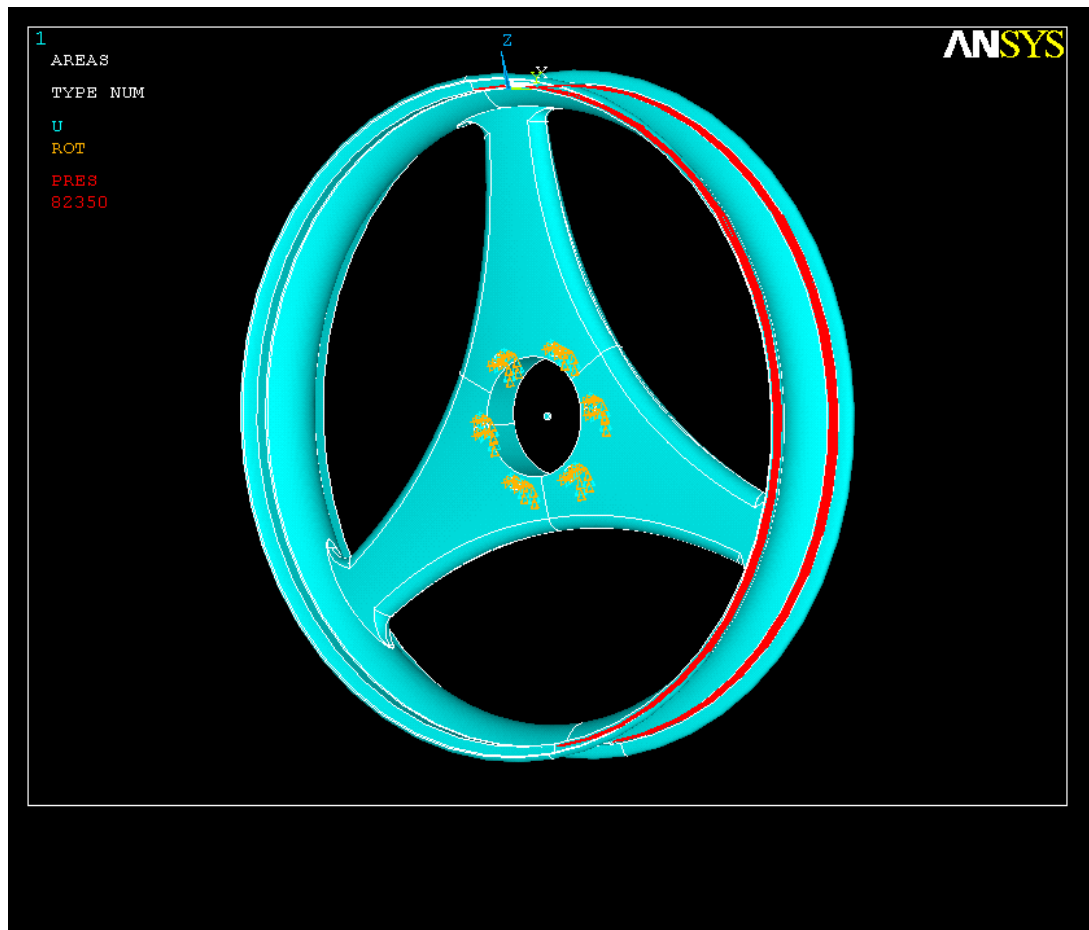
Η ακτινική δύναμη Μοιράζεται 50/50 στο Χείλος του Τροχού (Εικ.4.6) και στο bead seat και παρουσιάζει συνημιτονοειδή κατανομή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα σύμφωνα με τη σχέση :

$$W_r = W_o * \cos\left(\frac{\pi}{2} * \frac{\theta}{\theta_o}\right)$$



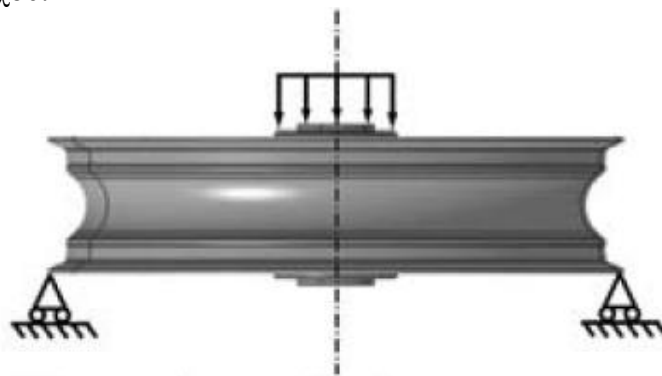
Εικόνα 4.8: Κατανομή Ακτινικής Δύναμης [7]

Η δύναμη των 700N μετατρέπεται σε πίεση προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί σε επιφάνειες στο ANSYS. Εφαρμόζεται λοιπόν στις σημειωμένες με κόκκινο (Εικ.4.9) επιφάνειες με συνολικό εμβαδόν $8.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ και έχει μέγιστη τιμή 82.35 kPa.



Εικόνα 4.9: Εφαρμογή Ακτινικής Δύναμης

Η εφαρμογή της Πλευρικής Δύναμης γίνεται μέσα στις οπές της μοντέλου και παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής της ενώ η πάκτωση εφαρμόζεται στο Χείλος του Τροχού.

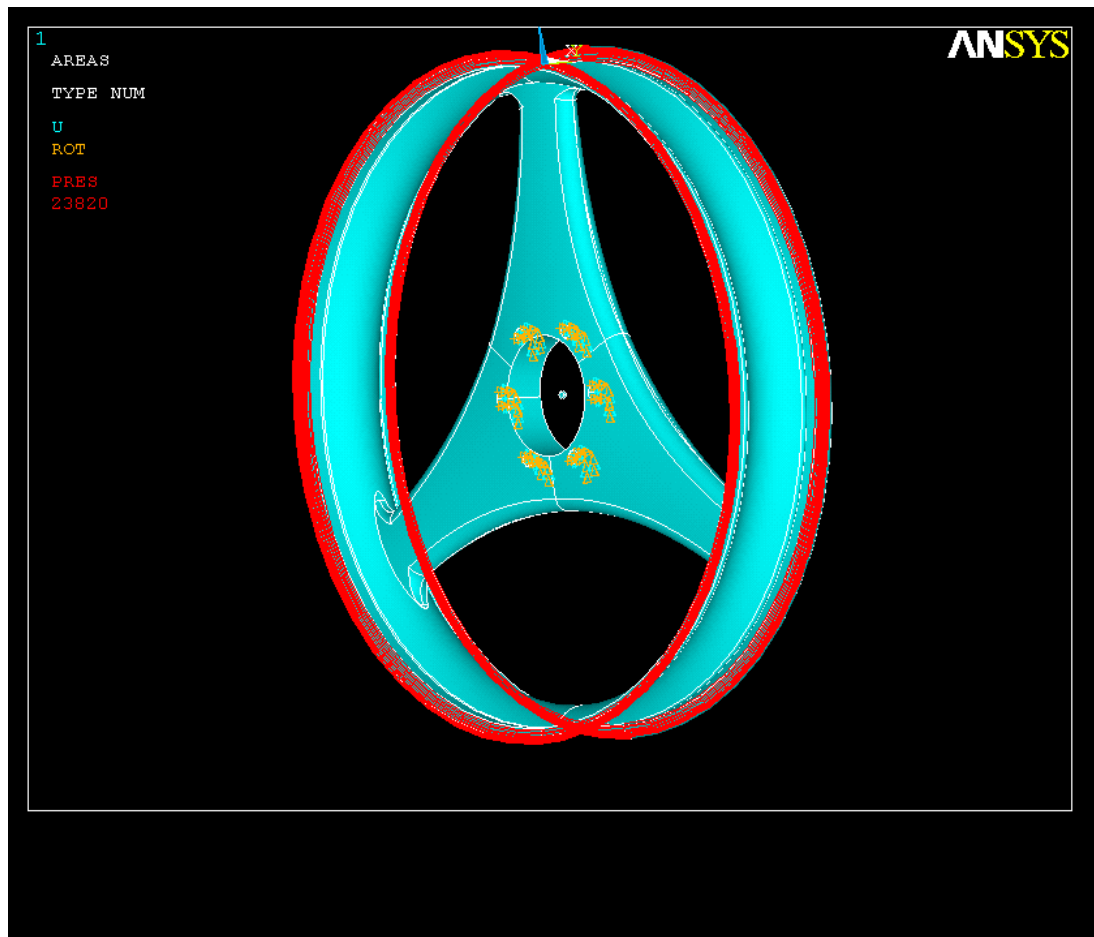


Εικόνα 4.10: Εφαρμογή Πλευρικής Δύναμης [4]

Η εφαρμογή της Πίεσης λόγω του ελαστικού γίνεται στο Χείλος του Τροχού, ενώ η πάκτωση μπαίνει στην θέση στήριξης δηλαδή στις 6 οπές του τροχού. Μοιράζεται κατά 50% στο ελαστικό και 50% στο Χείλος του Τροχού.

Άρα τελικά η πίεση που εφαρμόζεται στο Χείλος του τροχού είναι :

$$\text{Πίεση Ελαστικού} = \frac{47.645}{2} = 23.822 \text{ KPa}$$



Εικόνα 4.11: Εφαρμογή της πίεσης λόγω αέρα του ελαστικού

4.3.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΤΗ ΠΛΗΜΝΗ

Οι παραπάνω φορτίσεις που υπολογίστηκαν για την ζάντα μεταφέρονται αυτούσιες στην πλύμνη του τροχού και με την σειρά τους στα λοιπά στοιχεία του συστήματος, αφού για λόγους απλούστευσης του προβλήματος κάνουμε την παραδοχή της τέλει συναρμογής μεταξύ των στοιχείων του συστήματος και άρα της συμπεριφοράς του σαν ένα σώμα.

Οπότε αντίστοιχα έχουμε:

Φορτίσεις στη Πλήμνη:

1. Ροπή λόγω φρεναρίσματος = 180 Nm
2. Ακτινική Δύναμη = 700 N ή 100 KPa
3. Πλευρική Δύναμη = 1.7 N

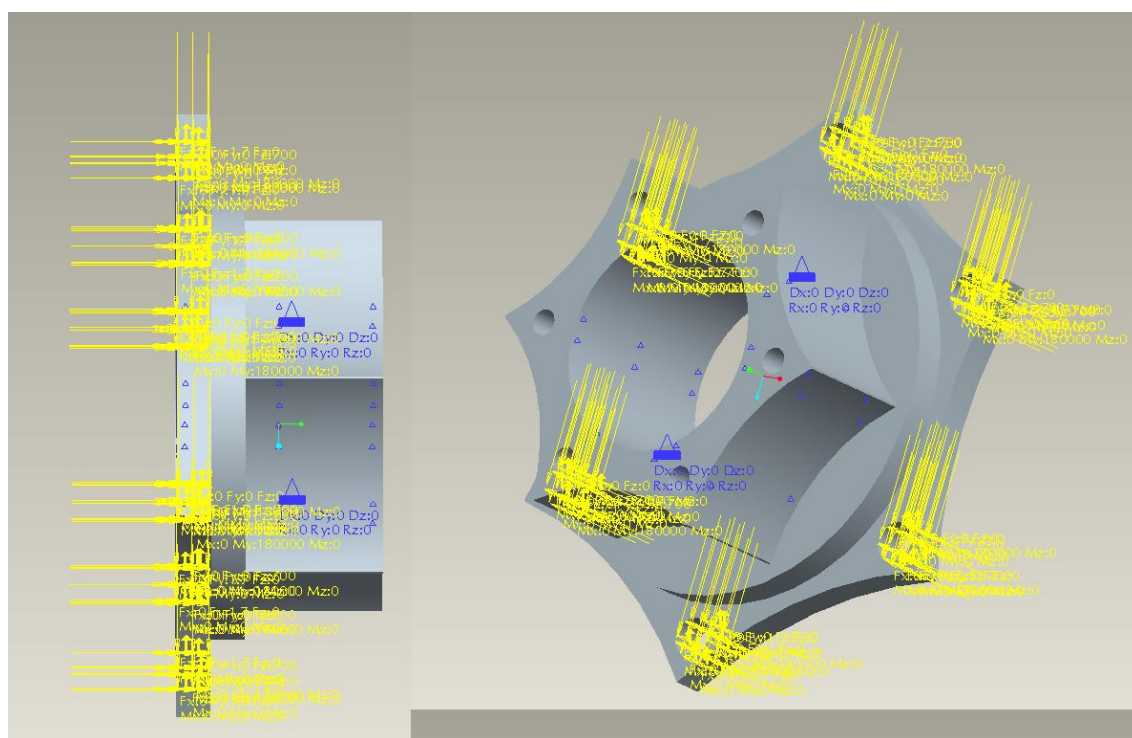
Δεν θα ασχοληθούμε με την μελέτη της επίδρασης των φορτίσεων στα άλλα στοιχεία του συστήματος μιας και η εργασία αυτή περιορίζεται στην μελέτη αποκλειστικά και μόνο του συστήματος ζάντας-πλύμνης.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΗ ΠΛΗΜΝΗ

Το σχέδιο που προτείνεται για την πλήμνη απλοποιεί πολύ τα πράγματα από την άποψη της εφαρμογής των δυνάμεων μιας και όλες εφαρμόζονται στις 6 οπές όπου στηρίζεται η ζάντα και το δισκόφρενο.

Έχουμε λοιπόν:

Ροπή λόγω φρεναρίσματος = 180 Nm, Ακτινική Δύναμη = 700 N ή 100 KPa και Πλευρική Δύναμη = 1.7 N οι οποίες εφαρμόζονται στις 6 οπές του μεγάλου αστεροειδούς της πλήμνης, ενώ η πάκτωση θεωρείται στο εσωτερικό της.



Εικόνα 4.12: Εφαρμογή δυνάμεων στην πλήμνη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ανάγκη μελέτης και εξακρίβωσης της αντοχής των κατασκευών με όλο και ακριβέστερες μεθόδους είναι το ζητούμενο σε κάθε επίπεδο εφαρμογών. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί προγράμματα που βοηθούν στην ανάλυση, εξέταση και βελτίωση τέτοιου είδους κατασκευών. Τα προγράμματα αυτά στηρίζονται στην μέθοδο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία που για συντομία στη συνέχεια θα αναφέρεται με τη διεθνή ονομασία της ως FEA (Finite Elements Analysis). Η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει αποτελέσματα ακριβείας για πολύπλοκες κατασκευές, απαιτεί όμως πολλούς και χρονοβόρους υπολογισμούς οι οποίοι με την παρούσα τεχνολογία στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές πραγματοποιούνται μέσα σε αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα. Η χρήση αυτών των λογισμικών πακέτων σε συνδυασμό με άλλα εξειδικευμένα πακέτα σχεδίασης (CAD) αρχίζουν να αποτελούν το βασικό πυρήνα για την ανάπτυξη και τον έλεγχο πολύπλοκων αεροπορικών κατασκευών.

Στην περίπτωση μας το ζητούμενο είναι ο έλεγχος αντοχής της προτεινόμενης κατασκευής κάτω από συγκεκριμένα στατικά και δυναμικά φορτία.

Το λογισμικό πακέτο που επιλέχθηκε για την πραγματοποίηση των δοκιμών είναι το ANSYS 10.0 της ομώνυμης εταιρίας Ansys Inc. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιείται από πολλούς κατασκευαστές καθιστώντας τα αποτελέσματα του αξιόπιστα και ακριβή, ενώ η εταιρία παραγωγής του έχει μεγάλη εμπειρία σε αυτού του είδους τις εφαρμογές με μεγάλες διεθνείς συνεργασίες ανά τον κόσμο.

Για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στη συνέχεια δίνονται κάποια στοιχεία θεωρίας που σχετίζονται με τις γενικές αρχές τους, ώστε να γίνει δυνατή η κατανόηση της διαδικασίας υπολογισμών που ακολουθείται κατά την επίλυση ενός προβλήματος.

Επίσης επεξηγεται ο τρόπος μοντελοποίησης της κατασκευής, των υλικών και των φορτίσεων πριν την έναρξη της υπολογιστικής διαδικασίας ενώ παρουσιάζονται και οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι υπολογισμού της αντοχής και του συντελεστή ασφαλείας κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το λογισμικό.

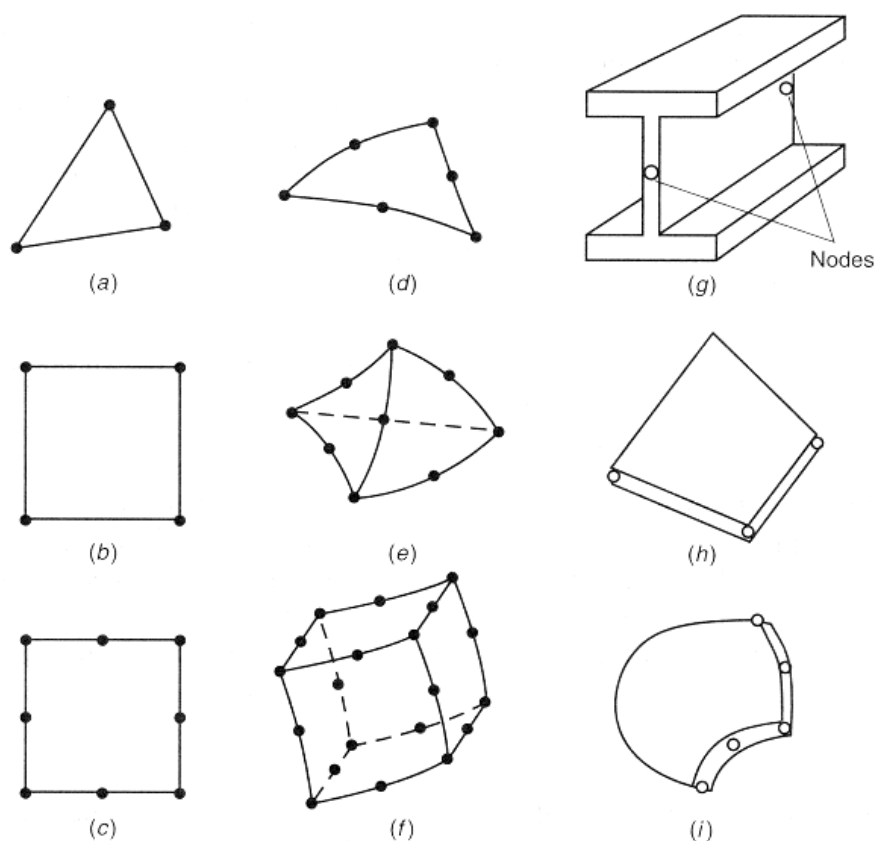
Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου και παρουσιάζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης της σχεδίασης του συστήματος τροχού ώστε να καταλήξουμε σε επιτρεπτά όρια αντοχής με την μικρότερη δυνατή τιμή βάρους.

5.2 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων [9] (Finite Element Analysis ή FEA) είναι μια βασισμένη σε υπολογιστή αριθμητική μέθοδος για επίλυση μεγάλου φάσματος προβλημάτων του τομέα εφαρμοσμένης μηχανικής όπως ανάλυση τάσεων, θερμική ανάλυση, ροής ρευστών, ρευστής διάχυσης ροής και μαγνητικών πεδίων [1]. Στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ένα στερεό ή ένα συνεχές ρευστό, θεωρείται δομημένο από πολυάριθμα μικροσκοπικά συνδεδεμένα στοιχεία. Δεδομένου ότι τα στοιχεία μπορούν να είναι τοποθετημένα ουσιαστικά με οποιαδήποτε τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διαμόρφωση πολύ σύνθετων μορφών. Κατά συνέπεια, δεν είναι πλέον απαραίτητο να βρεθεί μια αναλυτική λύση η οποία να μεταχειρίζεται ένα στενά "εξιδανικευμένο" μοντέλο, μαντεύοντας πώς η απόκλιση από το μοντέλο επηρεάζει το πρωτότυπο. Κατά την ανάπτυξη της, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει αντικαταστήσει σημαντικά την ακριβή προκαταρκτική μέσω δοκιμών ανάπτυξη, με τη γρηγορότερη και φτηνότερη μοντελοποίηση μέσω υπολογιστή.

Σε αντίθεση με τις αναλυτικές μεθόδους που συχνά απαιτούν τη χρήση υψηλότερου επιπέδου μαθηματικών, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται σε απλές αλγεβρικές εξισώσεις. Εντούτοις, μια λύση FEA μπορεί να απαιτήσει την ταυτόχρονη επίλυση εκατοντάδων εξισώσεων με εκατοντάδες άγνωστους όρους. Επομένως, η ανάπτυξη της τεχνικής απαίτησε τη διαθεσιμότητα πολύ γρήγορων ψηφιακών υπολογιστών για να μπορεί να λύσει αποτελεσματικά τις εξισώσεις με την μέθοδο των πινάκων. Η γρήγορη αποδοχή της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, οφείλεται κατά ένα μεγάλο μέρος στην αυξανόμενη διαθεσιμότητα του λογισμικού FEA μέσω των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων αρχικά αναπτύχθηκε για δισδιάστατες καταστάσεις. Ένα τρισδιάστατο στερεό αυξάνει την τάξη μεγέθους στον αριθμό των εξισώσεων που πρέπει να επιλυθούν ταυτόχρονα. Όμως αυτό το χειρίζονται πλέον τα λογισμικά FEA με τη χρήση μεγαλύτερου βαθμού στοιχείων και γρηγορότερων υπολογιστών. Τα πιο διαδεδομένα στοιχεία είναι δύο: τα συνεχή και τα δομικά. Στα συνεχή η γεωμετρία τους ορίζεται πλήρως από τις συντεταγμένες των κόμβων τους. Τα δομικά στοιχεία είναι στοιχεία που συμπεριφέρονται σύμφωνα με παραδοχές της συμπεριφοράς των κατασκευών σε σχέση με την αντοχή των υλικών. Στην Εικόνα 7.3 παρουσιάζονται μερικά από τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Τα τρίγωνα και τετράγωνα (a,b) είναι τα πιο απλά στοιχεία με δύο βαθμούς ελευθέριας σε κάθε κόμβο. Προσθέτοντας κι άλλους κόμβους στις άκρες ή στο κέντρο μοντελοποιούνται καλύτερα καμπύλες και μέτωπα (c). Τρισδιάστατα μοντέλα έχουμε: τα ισοπαραμετρικά τρίγωνα (d), τα τετράεδρα (e) και τα εξάεδρα (f). Τέλος, τα πιο κοινά δομικά στοιχεία είναι: το στοιχείο δοκού (g), το στοιχείο δίσκου (h) και το στοιχείο κελύφους (i).



Εικόνα 5.1 Χρησιμοποιούμενοι τύποι στοιχείων μοντελοποίησης στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Θεωρίες Αστοχίας :

Όταν ένα κομμάτι φορτίζεται ομοαξονικά, τότε η τάση και η αντοχή μπορούν να συγκριθούν απευθείας για να υπολογιστεί ο συντελεστής ασφαλείας του ή για να γίνει φανερό αν το κομμάτι θα αστοχήσει. Η μέθοδος αυτή είναι απλή, καθώς υπάρχει μία μόνο τιμή τάσης και μία τιμή αντοχής, είτε είναι διαρροής είτε είναι μέγιστη ή διατμητική ή ότι αρμόζει στην μελετούμενη περίπτωση.

Το πρόβλημα όμως γίνεται αρκετά πολύπλοκο όταν έχουμε τάσεις σε δύο ή τρεις διαστάσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις υπάρχουν πολλές τάσεις, αλλά μονάχα μία σημαντική αντοχή. Για να γίνει δυνατός λοιπόν ο προσδιορισμός της ασφάλειας του κομματιού, αναπτύχθηκαν διάφορες θεωρίες για να βοηθήσουν στον υπολογισμό αυτό.

Συνοπτικά οι θεωρίες αυτές είναι

- Η θεωρία μέγιστης ορθής τάσης
- Η θεωρία μέγιστης διατμητικής τάσης
- Η θεωρία ενέργειας παραμόρφωσης ή Von Misses

Από τις παραπάνω θα μας απασχολήσει η:

Θεωρία ενέργειας παραμόρφωσης ή Von Misses:

Σε αυτήν προβλέπεται ότι η αστοχία από διαρροή προκύπτει όταν η Von Misses ή αλλιώς ισοδύναμη τάση σ' , ισούται με το όριο διαρροής του υλικού. Η τιμή της τάσης αυτής προκύπτει χρησιμοποιώντας μια υπόθεση για την ενέργεια παραμόρφωσης και δίνεται από την ακόλουθο τύπο:

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{1/2}$$

Το σημαντικό στοιχείο της θεωρίας αυτής είναι ότι μπορεί να αναπαραστήσει ολόκληρη την κατάσταση των τάσεων, όσο πολύπλοκη και αν είναι αυτή, ενώ παράλληλα δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα από τις άλλες δύο.

5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Για να πραγματοποιηθεί μία ανάλυση με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση του σχεδίου που έχει προκύψει από το σχεδιαστικό πακέτο, με τον προσδιορισμό των φορτίσεων, περιορισμών, χρησιμοποιούμενων υλικών και την δημιουργία του πλέγματος από τα κατάλληλα στοιχεία.

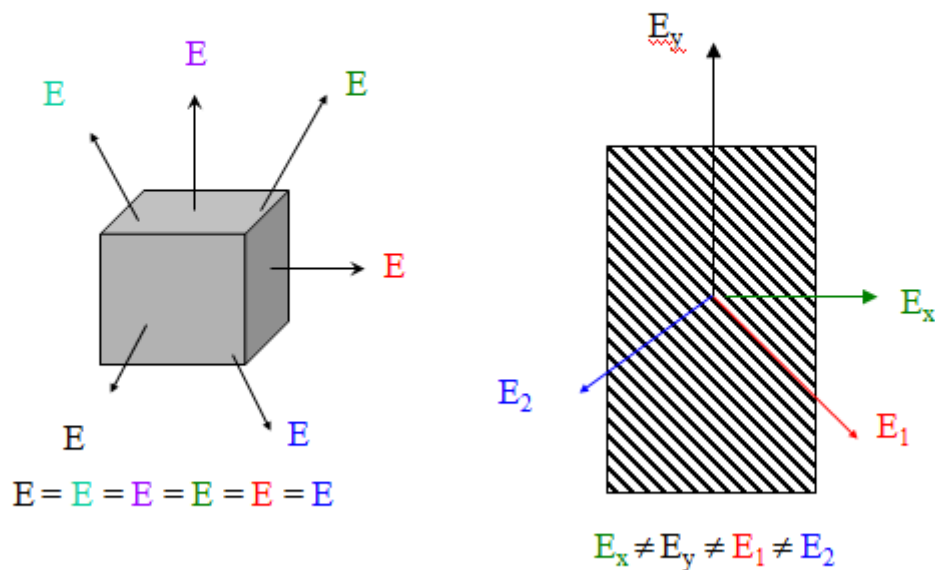
Εφόσον έχουν ήδη προσδιοριστεί οι περιορισμοί, οι φορτίσεις και τα υλικά κατασκευής μένει να γίνει σωστά η επιλογή των στοιχείων και η δημιουργία του πλέγματος για τα δυο βασικά στοιχεία του μοντέλου μας.

Μοντελοποίηση ζάντας:

Ως υλικό κατασκευής της ζάντας επελέγη το ανθρακόνημα. Το ανθρακόνημα είναι ένα σύνθετο υλικό γεγονός που συνεπάγεται άμεσα περεταίρω δυσκολία στην μοντελοποίηση του. Σύνθετο υλικό γενικά είναι ένα στέρεο σώμα το οποίο προκύπτει όταν δυο ή περισσότερες ουσίες, κάθε μια με τα δικά της χαρακτηριστικά, συνδυάζονται προκειμένου να δημιουργήσουν ένα νέο υλικό, που έχει καλύτερες ιδιότητες από τα αρχικά, για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Στην περίπτωση του ανθρακονήματος αυτό επιτυγχάνεται ενσωματώνοντας τις ίνες του ανθρακοϋφάσματος σε λουτρό εποξικής ρητίνης. Οι ίνες του υφάσματος δίνουν την σκληρότητα στο σύνθετο υλικό(ανθρακόνημα) ενώ η εποξική ρητίνη παρέχει προστασία από το περιβάλλον και του προσδίδει θερμική σταθερότητα.

Τα σύνθετα υλικά είναι δυσκολότερο να μοντελοποιηθούν σε σχέση με τα ισοτροπικά (Εικ.5.2) όπως ο σίδηρος ή το αλουμίνιο. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον ορισμό των ιδιοτήτων και του προσανατολισμού κάθε στρώσης μίας και κάθε μια από αυτές μπορεί να έχει διαφορετικές ορθοτροπικές ιδιότητες.

Ισοτροπικό vs Ορθοτροπικό



Εικόνα 5.2 Διάκριση Ισοτροπικού-Ορθοτροπικού υλικού

Η διαδικασία μοντελοποίησης έχει ως εξής:

- Επιλογή κατάλληλου τύπου στοιχείου
- Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού
- Καθορισμός των στρώσεων
- Ορισμός κριτηρίων αστοχίας

Το μοντέλο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FE-Model) δημιουργείται στο ANSYS R.10 εισάγοντας τις επιφάνειες του μοντέλου που σχεδιάσαμε στο Pro/E. Επιλέγεται το τρισδιάστατο στοιχείο SHELL181 με 4 σημεία ολοκλήρωσης και 6 βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο όπως προτείνεται από το εγχειρίδιο του λογισμικού για σύνθετα υλικά.

Εισάγουμε στην συνέχεια τις ιδιότητες του ανθρακονήματος που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή του μοντέλου ως εξής: [8]

	T1
Temperatures	0
EX	5.5E+009
EY	2.34E+010
EZ	4.9E+010
PRXY	0.43
PRYZ	0
PRXZ	0
GXY	6.9E+008
GYZ	6.9E+008
GXZ	2.96E+010

Εικόνα 5.3 : Ιδιότητες ανθρακονήματος

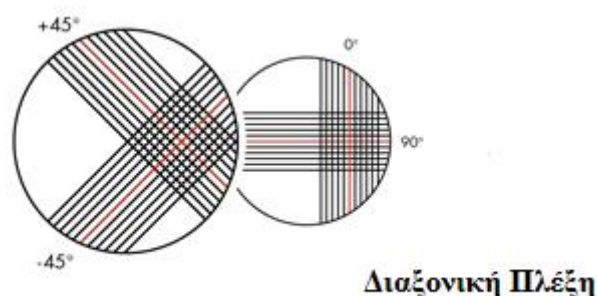
Όπου:

Ex Ey Ez αφορούν το **μέτρο ελαστικότητας του Young** (Young's Elastic Moduli)

PRxy PRyz PRxz αφορούν το **λόγος Poisson** (Poisson Ratio)

Gxy Gyz Gxz αφορούν τον **συντελεστή ακαμψίας** (Shear Moduli)

Ίσως το σημαντικότερο χαρακτηριστικό ενός σύνθετου υλικού είναι η διαμόρφωση των στρώσεων των επιμέρους υλικών. Κάθε στρώση μπορεί να αποτελείται από διαφορετικό ορθοτροπικό υλικό και να έχει διαφορετική κατεύθυνση. Στην περίπτωση μας η διεύθυνση κάθε στρώσης καθορίζεται από τον προσανατολισμό του ανθρακούφασματος που επιλέγουμε. Η μέθοδος που ακολουθούμε για την μοντελοποίηση των στρώσεων είναι προσδιορίζοντας ανεξάρτητες ιδιότητες για κάθε στρώση. Ο αριθμός των στρώσεων καθορίζεται από την διάσταση που θέλουμε τελικά να επιτύχουμε ενώ ο προσανατολισμός που προτείνεται από το εγχειρίδιο του λογισμικού για εφαρμογές όπως η δική μας είναι η διάταξη $[45^\circ, -45^\circ]$.



Εικόνα 5.4: Διάταξη στρώσεων

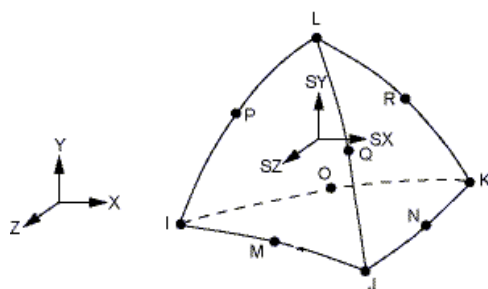
Τα κριτήρια αστοχίας χρησιμοποιούνται προκειμένου να εντοπιστεί εάν μια στρώση έχει αποτύχει λόγω της εφαρμοσμένης φόρτισης. Τα τρία προκαθορισμένα κριτήρια είναι:

- Μέγιστης έντασης κριτήριο αστοχίας, το οποίο επιτρέπει μέχρι εννέα αστοχίες έντασης
- Μέγιστης φόρτισης κριτήριο αστοχίας, το οποίο επιτρέπει μέχρι εννέα αστοχίες φόρτισης
- Το κριτήριο αστοχίας Tsai-Wu, το οποίο επιτρέπει εννέα αστοχίες φόρτισης και τρεις ακόμα αστοχίες συντελεστών ζεύξης.

Μοντελοποίηση πλήμνης:

Ως υλικό κατασκευής της πλήμνης επελέγη το αλουμίνιο για λόγους που έχουν να κάνουν με την ευκολία κατεργασίας του, αλλά και το χαμηλό κόστος αγοράς της πρώτης ύλης. Το αλουμίνιο επίσης ως ισοτροπικό υλικό απλουστεύει την διαδικασία μοντελοποίησης.

Το μοντέλο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FE-Model) δημιουργείται στο Mechanica του Pro/Engineer εισάγοντας τις επιφάνειες του μοντέλου που σχεδιάσαμε στο ίδιο πρόγραμμα. Επιλέγεται το στερεό τρισδιάστατο τετραεδρικό στοιχείο SOLID92 με 10 σημεία ολοκλήρωσης όπως προτείνεται από το εγχειρίδιο του λογισμικού για ισοτροπικά υλικά.



Εικόνα 5.5: Γεωμετρία Στοιχείου SOLID92

Ως υλικό κατασκευής χρησιμοποιούμε το κράμα αλουμινίου με κωδικό AL2014 του οποίου η σύσταση και οι ιδιότητες παρουσιάζονται παρακάτω:

Στοιχείο	Βάρος %
Al	93.5
Si	0.80
Cu	4.40
Mg	0.50

Εικόνα 5.6: Χημική σύσταση κράματος AL2014

Πίνακας 5.1: Ιδιότητες κράματος AL2014.

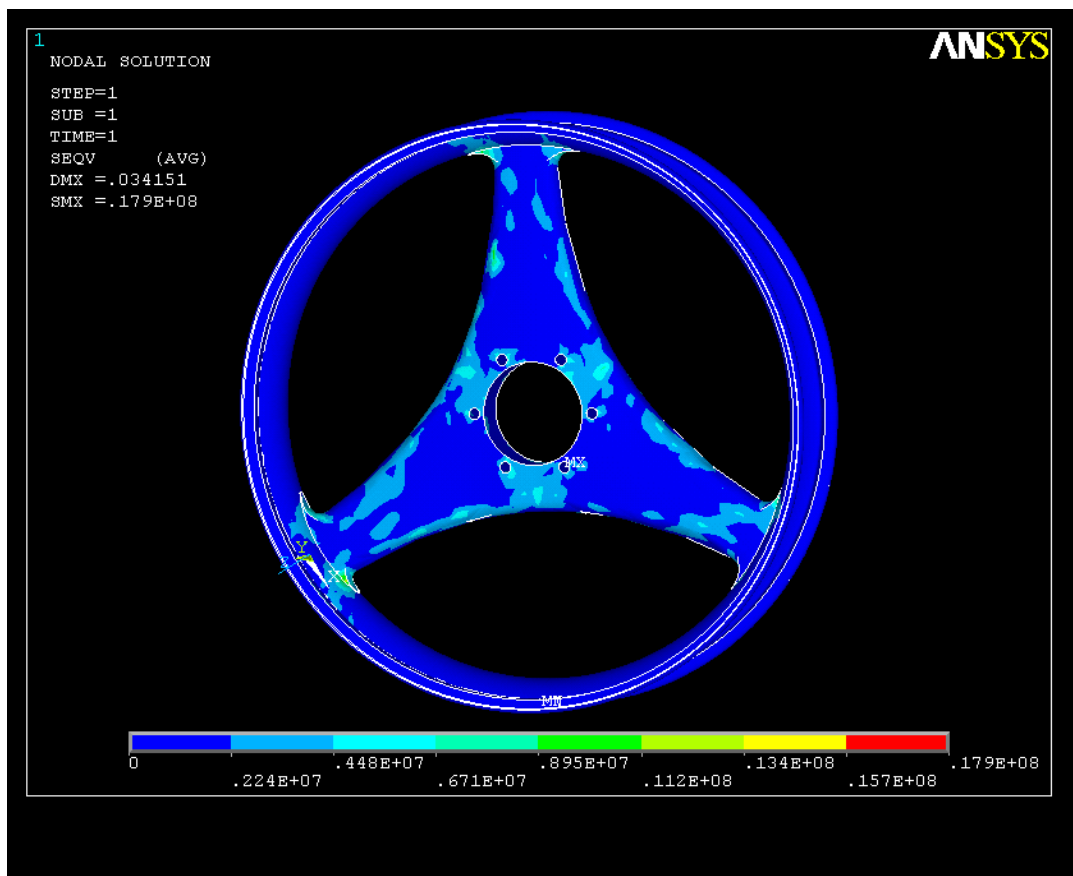
Μηχανικές Ιδιότητες AL2014	
Πυκνότητα ($\times 1000 \text{ kg/m}^3$)	2.8
Λόγος Poisson	0.33
Μέτρο Ελαστικότητας (Gpa)	73
Όριο Αντοχής (Mpa)	480
Όριο Διαρροής (Mpa)	415

5.4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

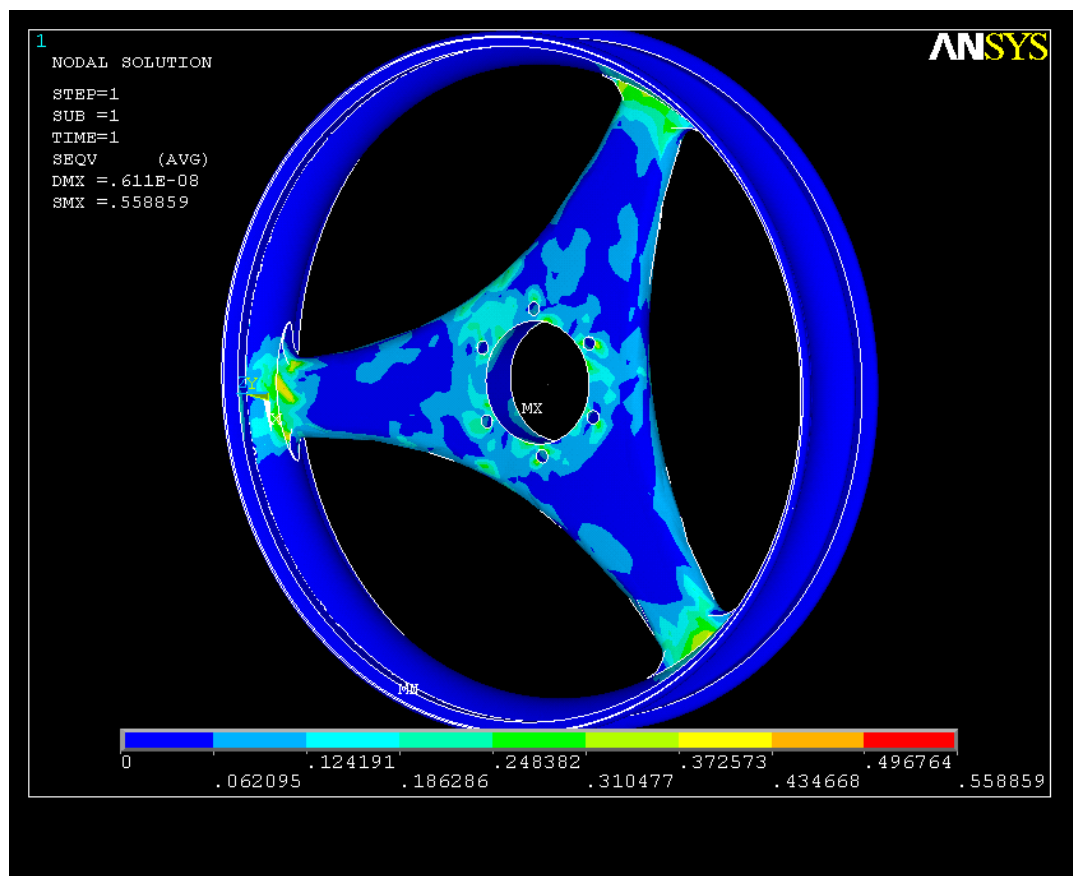
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται όλη η διαδικασία ελέγχου αντοχής του πλαισίου του συστήματος τροχού, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως. Υποδεικνύονται τα αδύναμα σημεία της προτεινόμενης σχεδίασης, πραγματοποιούνται βελτιώσεις και επαναλαμβάνονται δοκιμές.

5.4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

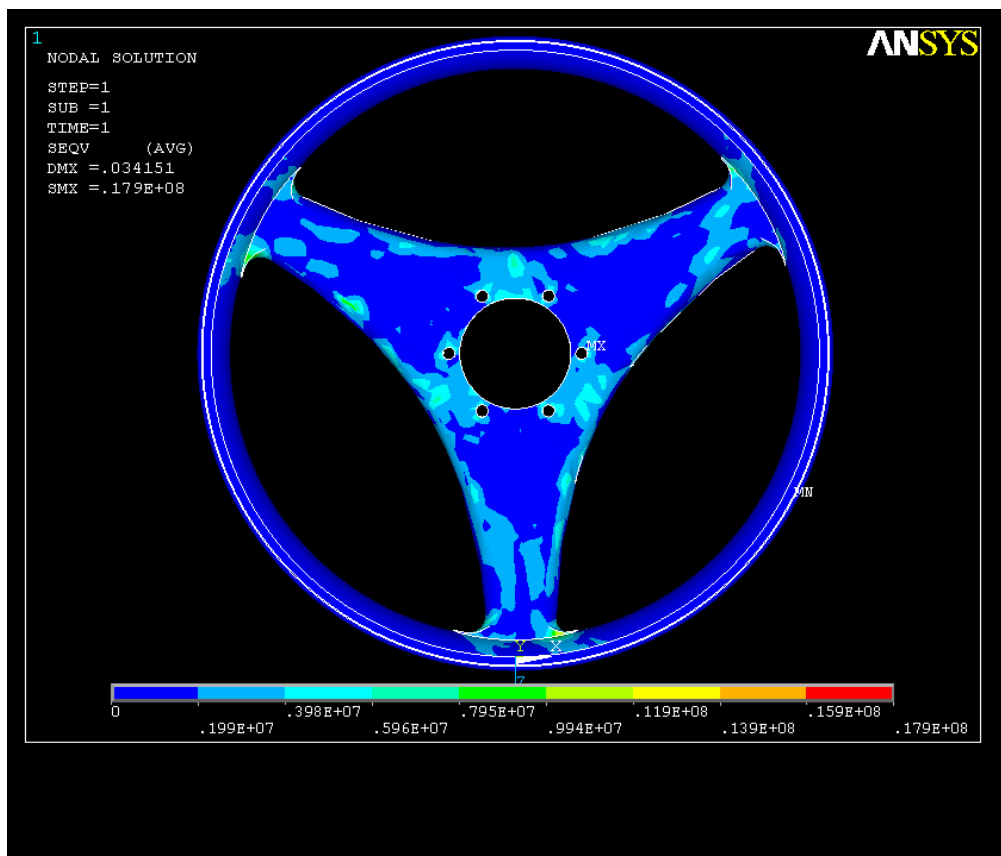
Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε φωτογραφίες, οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο σύστημα Τροχού-Πλήμνης. Σε κάθε εικόνα οι τάσεις εμφανίζονται πάνω στο μοντέλο με χρωματικές διακυμάνσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο εύρος τάσης. Στο κάτω μέρος κάθε εικόνας εμφανίζεται η χρωματική αντιστοιχία για κάθε εύρος τάσης. Όσο τα μεγέθη των τάσεων αυξάνονται, τα χρώματα απεικόνισης μετασχηματίζονται από το μπλε σκούρο προς το κόκκινο. Οι τάσεις υπολογίζονται με βάση τον κανόνα Von Misses. Σε κάθε χρονική στιγμή η μέγιστη και ελάχιστη εμφανιζόμενη τάση, προσδιορίζονται πάνω στο μοντέλο, αυτόματα, ως MX ή MN αντίστοιχα.



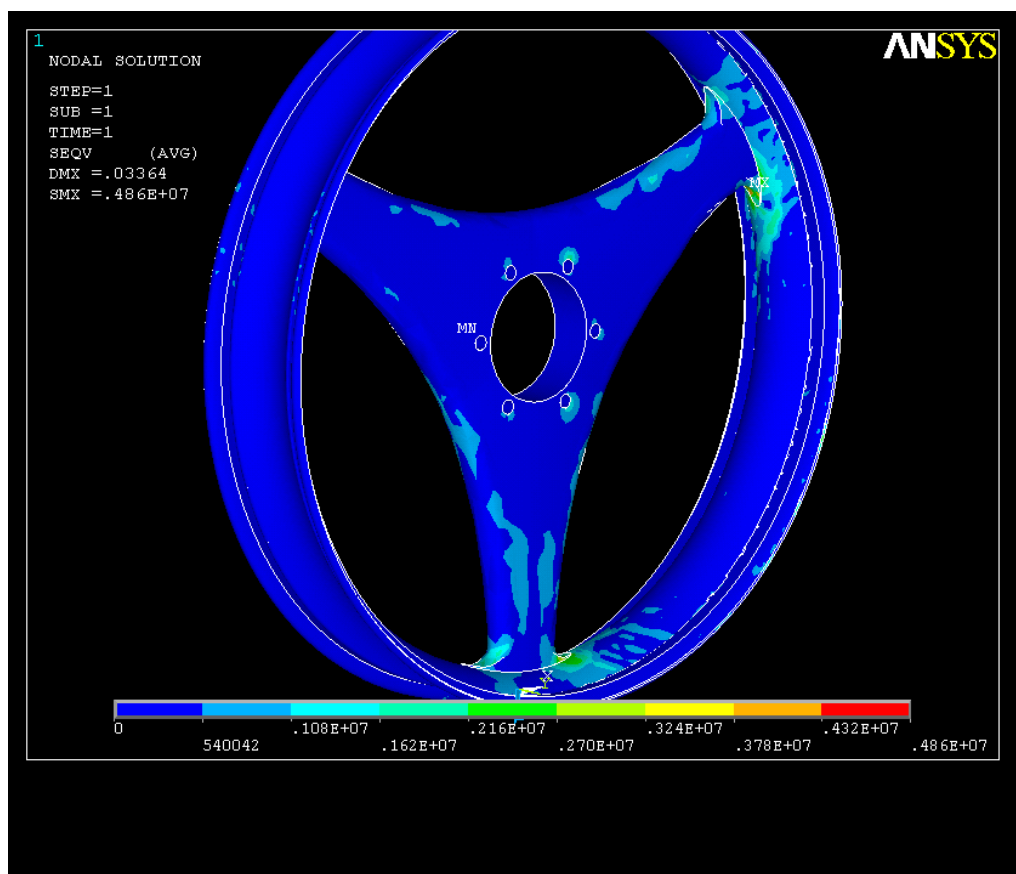
Εικόνα 5.6: Τάσεις λόγω εφαρμογής Ροπής Φρεναρίσματος 180Nm



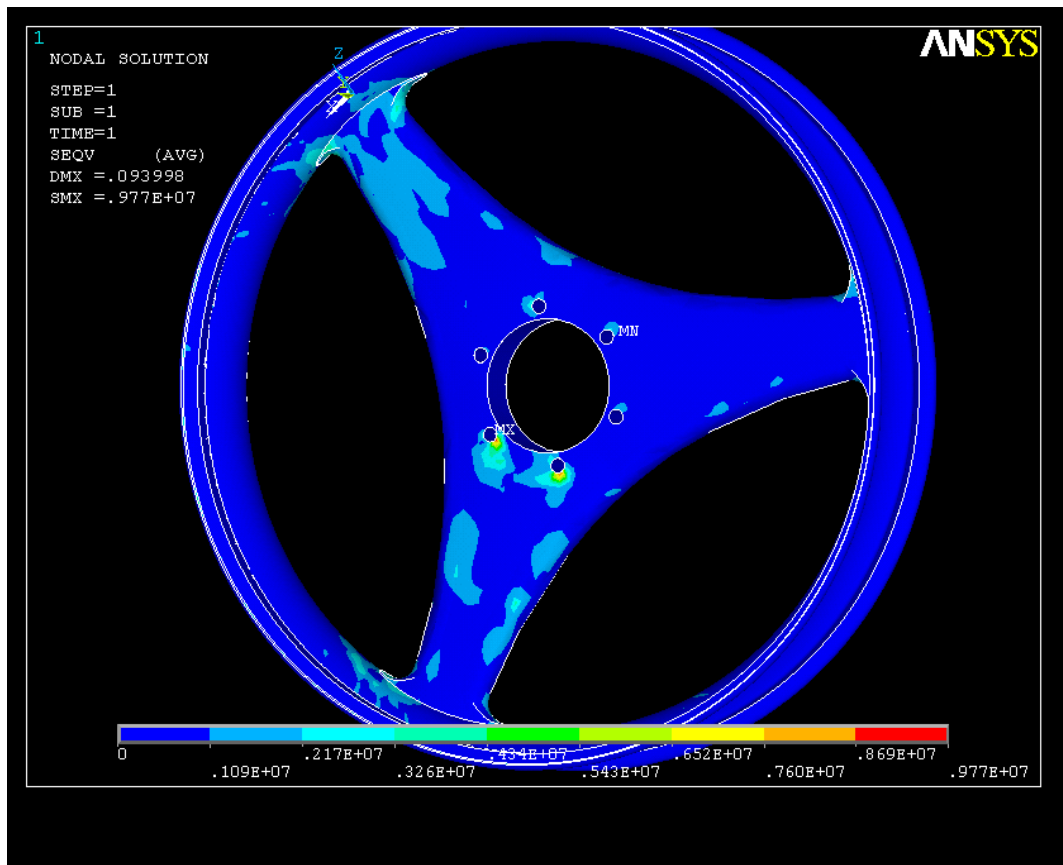
Εικόνα 5.7: Τάσεις λόγω εφαρμογής Πλευρικής Δύναμης 1.7N



Εικόνα 5.8: Σενάριο 1ο - Τάσεις λόγω συνδυασμένης εφαρμογής Ροπής Φρεναρίσματος και Πλευρικής Δύναμης



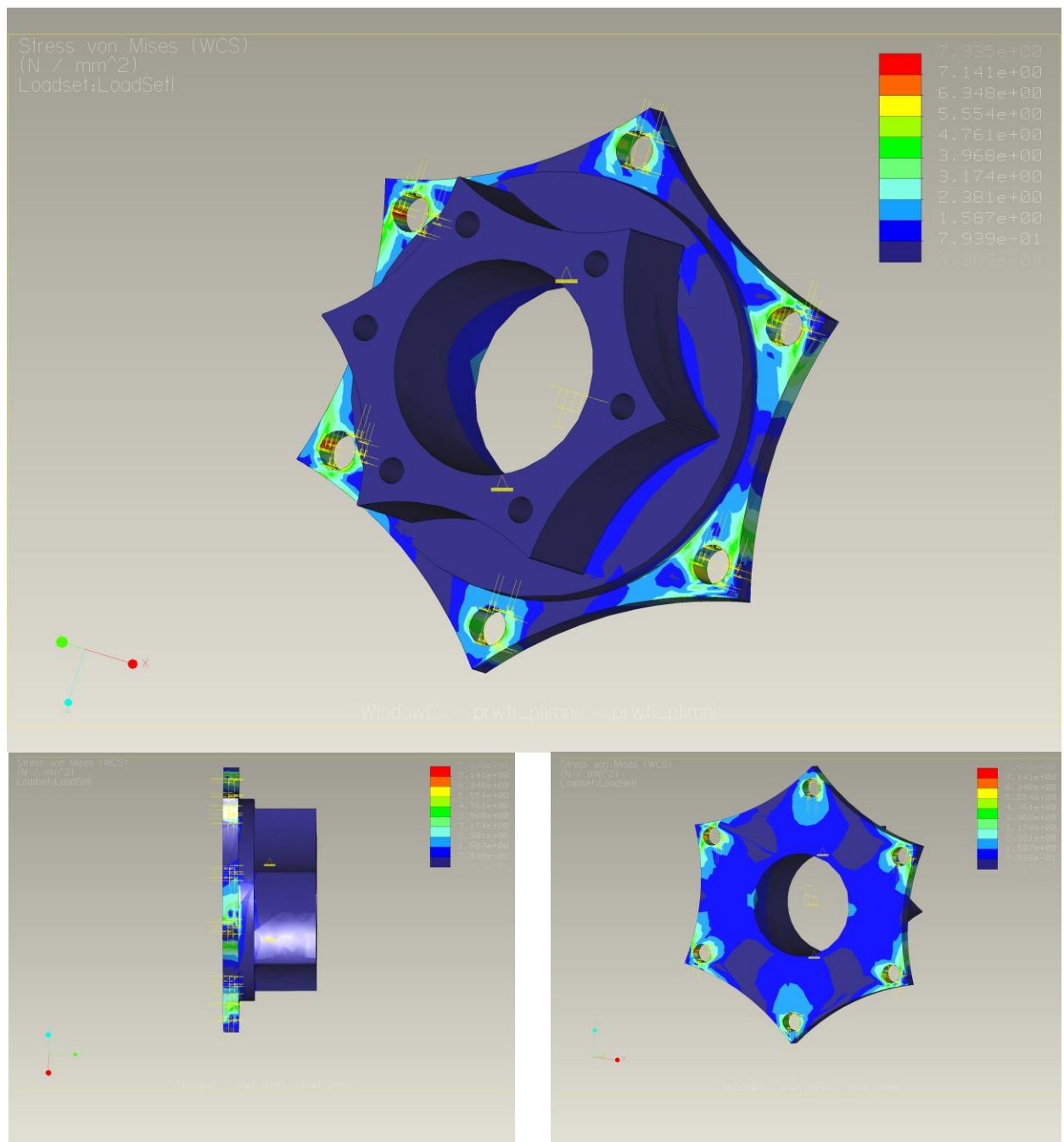
Εικόνα 5.9: Τάσεις λόγω εφαρμογής Ακτινικής Δύναμης 700N



Εικόνα 5.10: Σενάριο 2ο - Τάσεις λόγω συνδυασμένης εφαρμογής Ακτινικής Δύναμης και Πίεσης Ελαστικού

Λόγω διαφορετικού τρόπου εφαρμογής των δυνάμεων που ασκούνται στην ζάντα ήταν αδύνατο να γίνει μια προσομοίωση συνδυασμένης εφαρμογής όλων των τάσεων οπότε και ήταν αναγκαία η δημιουργία των παραπάνω σεναρίων.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξάγουμε ως μέγιστη τάση της πρώτης συνδυασμένης φόρτισης 18 MPa και από την δεύτερη συνδυασμένη φόρτιση 9.8 MPa. Εάν συγκρίνουμε τις δυο αυτές τιμές με το όριο διαρροής του αναθρακονήματος που χρησιμοποιούμε και που είναι 690 MPa καταλήγουμε σε ένα συντελεστή ασφαλείας της τάξης του 38 που είναι σαφώς ανώτερος από τον συντελεστή ασφαλείας 2.25 που προτείνεται για σύνθετα υλικά.



Εικόνα 5.11: Τάσεις λόγω συνδυασμένης εφαρμογής Ροπής φρεναρίσματος, Πλευρικής και Ακτινικής Δύναμης

Το αποτέλεσμα της συνδυασμένης φόρτισης στην πλήμνη είναι μέγιστη τάση 7.9 MPa και συγκρίνοντας την με το Όριο διαρροής του κράματος Αλουμινίου 2014 που είναι 185 MPa προκύπτει συντελεστής ασφαλείας ίσος με 23. Ο συντελεστής ασφαλείας που προτείνεται σε τέτοιου είδους εφαρμογές είναι ίσος με 1.8.

Σε μια προσπάθεια να μειώσουμε ακόμα περισσότερο το βάρος των 2817gr του συστήματος και αφού τα αποτελέσματα που μας δίνει το μοντέλο με τόσο υψηλούς συντελεστές ασφαλείας είναι ενθαρρυντικά αποφασίζουμε να επανασχεδιάσουμε το σύστημα.

5.4.2 ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΗ

Στόχος της επανασχεδίασης του συστήματος τροχού είναι αφενός η περεταίρω ελάττωση του βάρους και αφετέρου η εξάλειψη αδυναμιών στην σχεδίαση που προτάθηκε αρχικά.

Όσον αφορά τη ζάντα για λόγους καλύτερης κατανομής των τάσεων και ελάττωσης του βάρους του συστήματος γίνεται αισθητή μείωση της διαμέτρου της εσοχής προκειμένου να αυξηθεί η επιφάνεια της ζάντας και να μειωθεί αντίστοιχα το υλικό από τον άξονα και την πλήμνη. Επίσης για λόγους πρακτικότητας και ευκολίας αποσυναρμολόγησης της κατασκευής μειώνουμε τις οπές στήριξης από έξι σε τρεις. Τέλος το μεταβλητό πάχος των ακτινών του αρχικού σχεδίου θα δυσκόλευε ακόμα περισσότερο το ήδη απαιτητικό έργο της κατασκευής. Επανασχεδιάζεται λοιπόν και προτείνεται νέο σχέδιο με λεπτότερες ακτίνες σταθερού πάχους και απλής γεωμετρίας.

Όσον αφορά την πλήμνη ένα πρόβλημα που ανέκυψε κατά την ανάλυση που προηγήθηκε, είναι η συγκέντρωση των τάσεων στον μεγάλο αστεροειδή της πλήμνης, αποτέλεσμα της συνολικής εφαρμογής των τάσεων στα σημεία εκείνα. Επιχειρείται λοιπόν επανασχεδίαση της πλήμνης με σκοπό να διαφοροποιηθεί το σημείο εφαρμογής της ροπής λόγω φρεναρίσματος με το σημείο εφαρμογής της ακτινικής δύναμης λόγω στήριξης της ζάντας.



Εικόνα 5.12 Νέο σύστημα Τροχού

Το σύστημα που παρουσιάζεται παραπάνω αποτελείται από 4 στοιχεία:

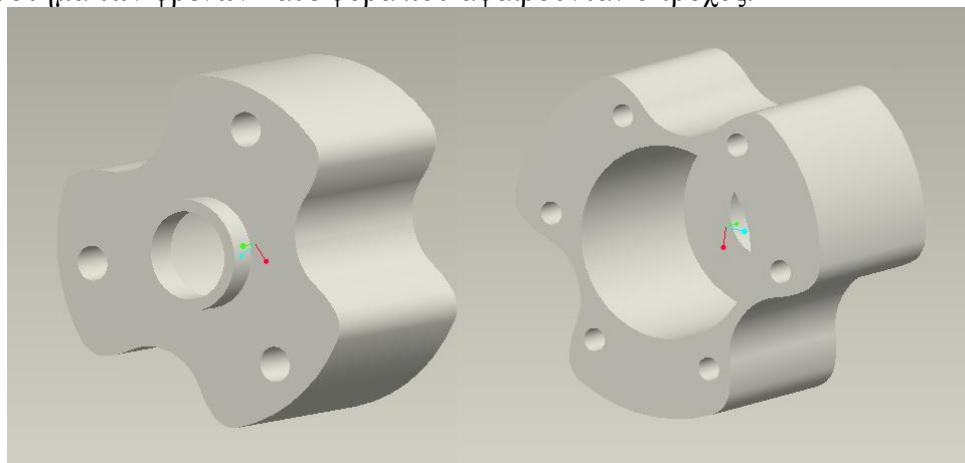
- Τον τροχό
- Την πλήμνη
- Τον άξονα περιστροφής
- Τη Δισκόπλακα

Ο Τροχός αποτελείται από το στεφάνι, του οποίου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσδιορίζονται σαφώς από τον κανονισμό του διαγωνισμού, και τις ακτίνες. Ο τροχός έχει ύψος 16'' και πλάτος 3.5''. Το πάχος της στεφάνης είναι 2mm και των ακτίνων είναι σταθερό και ίσο με 4mm.



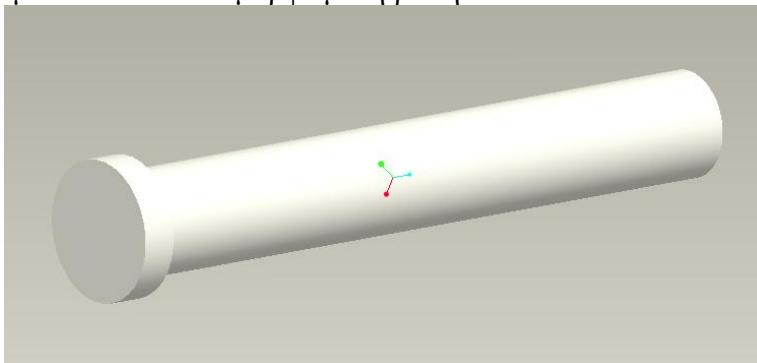
Εικόνα 5.13: Τροχός

Η Πλήμνη στην συγκεκριμένη σχεδίαση είναι τύπου μουαγιέ όπως στα αυτοκίνητα είναι δηλαδή μόνιμα στηριγμένη στο πλαίσιο του οχήματος με σταθερά στηριγμένο πάνω της το σύστημα των φρένων. Παρουσιάζει λοιπόν σαφές πλεονέκτημα πρακτικότητας έναντι του προηγούμενου μοντέλου στο οποίο έπρεπε να αφαιρεθεί το σύστημα των φρένων κάθε φορά που αφαιρούνταν ο τροχός.



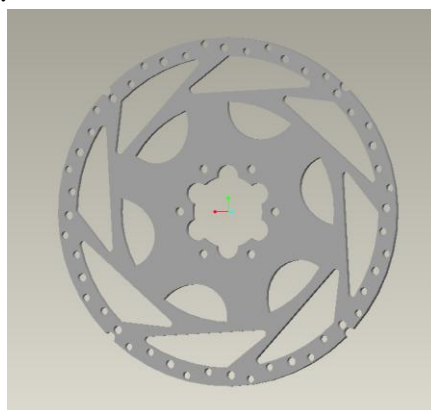
Εικόνα 5.14: Πλήμνη - Μουαγιέ

Ο Άξονας Περιστροφής είναι σαφώς μικρότερης διαμέτρου από τον προηγούμενο και σφίγγεται εσωτερικά της πλήμνης με ρουλεμάν ενώ η στήριξή του ολοκληρώνεται πάλι με ρουλεμάν σε ειδικά διαμορφωμένη βάση πάνω στο πλαίσιο του οχήματος.



Εικόνα 5.15: Άξονας περιστροφής

Η Δισκόπλακα τέλος εξασφαλίζει το σωστό φρενάρισμα του οχήματος και δένεται μόνιμα πάνω στο μυναγιέ.



Εικόνα 5.16: Δισκόπλακα

Πλεονεκτήματα της νέας σχεδίασης:

- Απλούστερη κατασκευή μιας και κρίθηκε περιττή η τοποθέτηση ασφάλειας στην πλήμνη, ενώ το πρόβλημα της παραλαβής των ορθών τάσεων από την ζάντα εφόσον προκύψει προβλέπεται να λυθεί τοποθετώντας ειδικά διαμορφωμένα δακτυλίδια εσωτερικά των οπών της ζάντας.
- Κάθε είδους πλεονέκτημα που προσφέρει μια διάταξη τύπου μυναγιέ με σταθερά τοποθετημένο σύστημα φρένων και επιπλέον ευκολία στην αφαίρεση του τροχού.
- Χαμηλότερο συνολικό βάρος κατά 185%.

Πίνακας 5.1: Βάρος των επί μέρους στοιχείων

Στοιχείο	Βάρος (gr)
Τροχός	705
Πλήμνη	124
Άξονας περιστροφής	52
Δισκόφρενο	107
Σύνολο	988

Αδράνεια λόγω περιστροφής του συστήματος

$$I_2 = 0.0203 \text{ kg} * \text{m}^2$$

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΗ ΖΑΝΤΑ

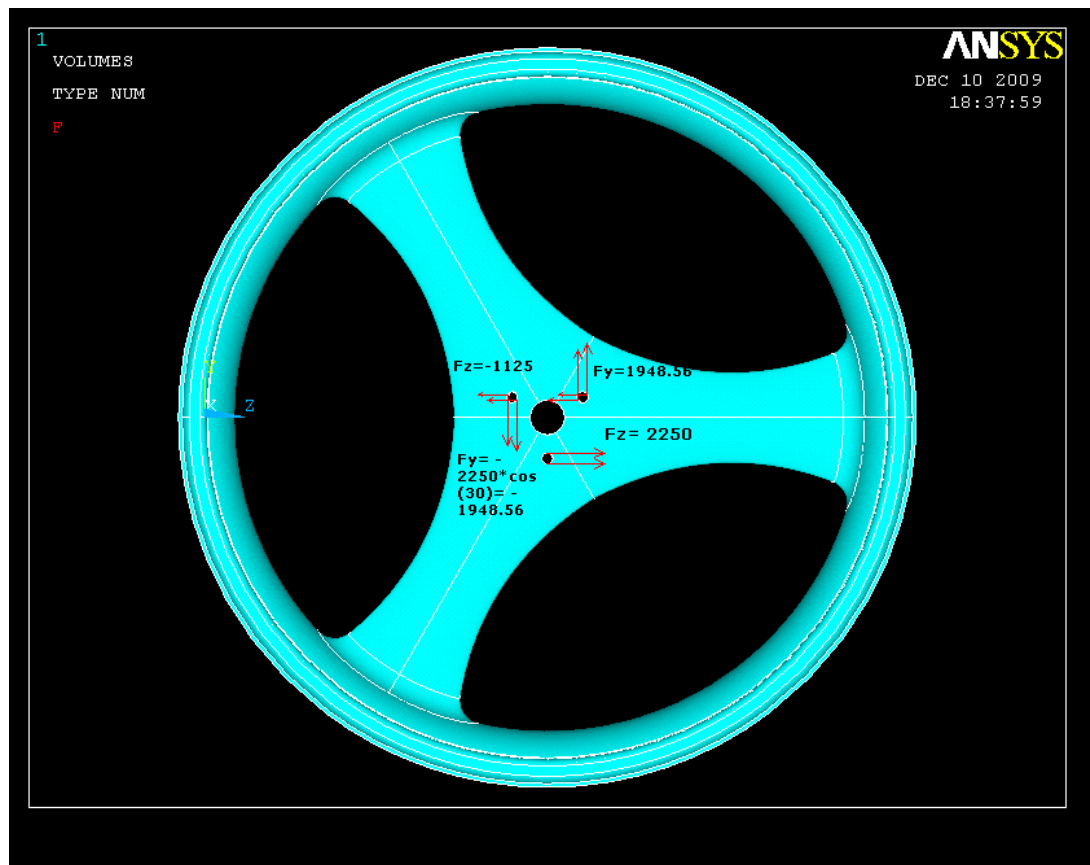
Η εφαρμογή της ροπής λόγω φρεναρίσματος γίνεται στις 3 οπές του μοντέλου και η πάκτωση στο Χείλος του Τροχού (Εικ. 4.6).

Εφαρμόζω Ροπή Φρεναρίσματος = 180 Nm προσεγγίζοντας την χειρότερη δυνατή περίπτωση όπου η κατανομή της πέδησης είναι 100% σε έναν από τους δυο άξονες. Η ροπή αυτή εφαρμόζεται σε απόσταση 80 mm από το κέντρο(δισκόπλακα 160 mm) οπότε έχουμε:

$$M = F * r \text{ άρα } F = \frac{180}{80 * 10^{-3}} = 2.25 * 10^3 \text{ N}$$

(τη μετατρέψαμε σε δύναμη λόγω αδυναμίας εφαρμογής ροπής στο ANSYS)

Η εφαρμογή της δύναμης φαίνεται παρακάτω προκειμένου να δημιουργεί ροπή ως προς τον άξονα της ζάντας.

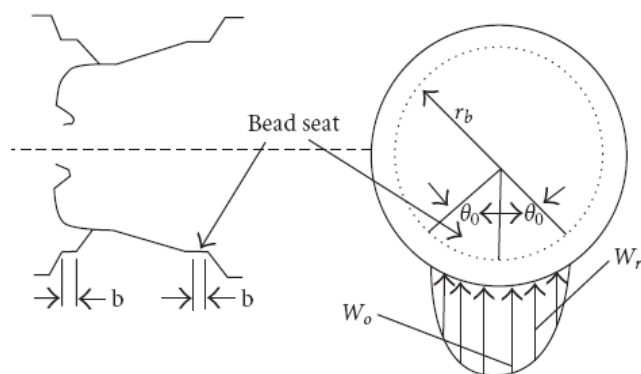


Εικόνα 5.17: Εφαρμογή ροπής φρεναρίσματος

Η εφαρμογή της Ακτινικής δύναμης γίνεται στο bead seat (Εικ. 4.8) πάνω στο στεφάνι του μοντέλου και η πάκτωση εφαρμόζεται στις οπές.

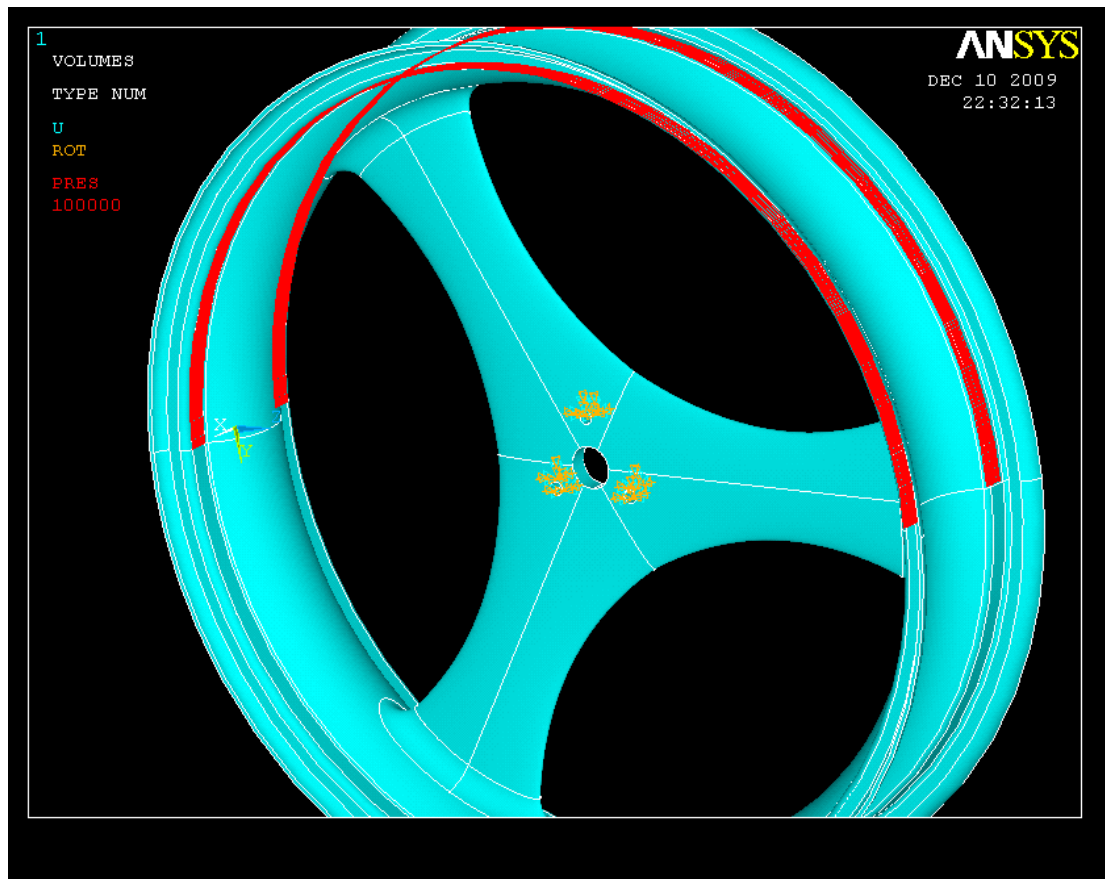
Η ακτινική δύναμη Μοιράζεται 50/50 στο χείλος του τροχού και στο Bead seat (Εικ.5.18) και παρουσιάζει συνημιτονοειδή κατανομή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα σύμφωνα με τη σχέση :

$$W_r = W_o * \cos\left(\frac{\pi}{2} * \frac{\theta}{\theta_o}\right)$$



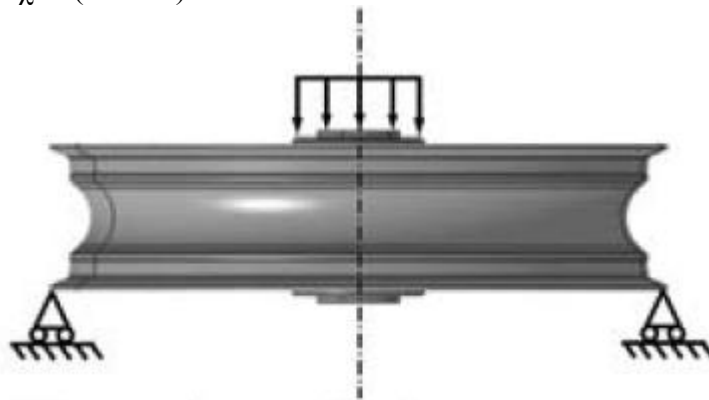
Εικόνα 5.18: Κατανομή Ακτινικής Δύναμης

Η δύναμη των 700N μετατρέπεται σε πίεση προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί σε επιφάνειες στο ANSYS. Εφαρμόζεται λοιπόν στις σημειωμένες με κόκκινο (Εικ.4.26) επιφάνειες με συνολικό εμβαδόν $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ και έχει μέγιστη τιμή 100 kPa.



Εικόνα 5.19: Εφαρμογή Ακτινικής Δύναμης

Η εφαρμογή της Πλευρικής Δύναμης γίνεται μέσα στις οπές της μοντέλου και παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής της ενώ η πάκτωση εφαρμόζεται στο Χείλος του Τροχού (Εικ.4.6).

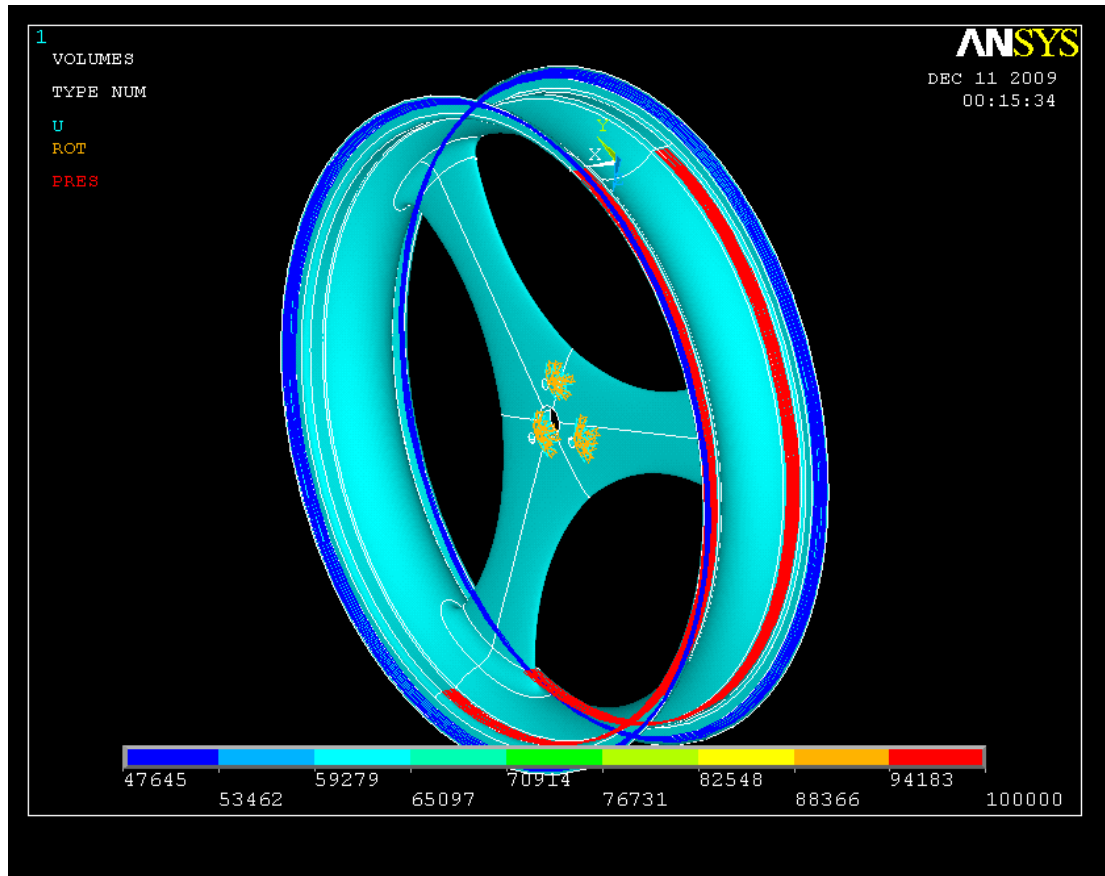


Εικόνα 5.20: Εφαρμογή Πλευρικής Δύναμης

Η εφαρμογή της Πίεσης του ελαστικού γίνεται στο χείλος του τροχού ενώ η πάκτωση μπαίνει στην θέση στήριξης δηλαδή στις 3 οπές του τροχού. Μοιράζεται κατά 50% στο ελαστικό και 50% καταλήγει στο χείλος του τροχού.

Άρα τελικά η πίεση που εφαρμόζεται στο χείλος του τροχού είναι :

$$\text{Πίεση ελαστικού} = \frac{47.645}{2} = 23.822 \text{ KPa}$$

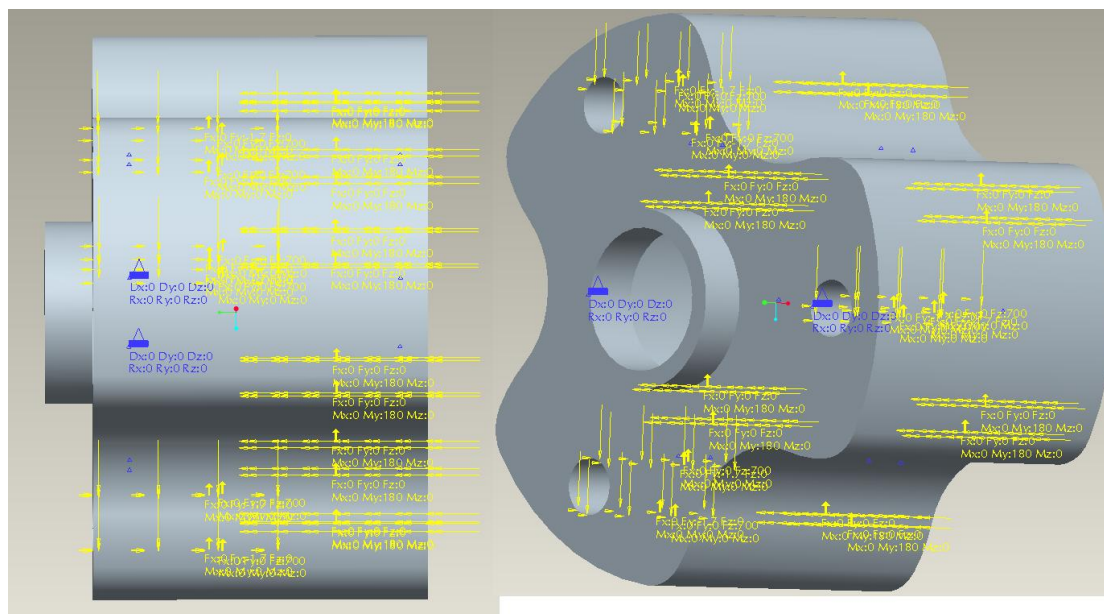


Εικόνα 5.21: Εφαρμογή της πίεσης λόγω αέρα του ελαστικού

Η εφαρμογή της Πίεσης του ελαστικού (με μπλε Εικ.4.27) γίνεται σε συνδυασμό με την εφαρμογή της Ακτινικής Δύναμης (με κόκκινο Εικ.4.27) λόγω της ομοιότητας στον τρόπο εφαρμογής τους στα πεπερασμένα στοιχεία (κοινή πάκτωση-εφαρμογή σαν πίεση πάνω σε επιφάνειες).

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΣΤΗ ΠΛΗΜΝΗ-ΜΟΥΑΓΙΕ

Το σχέδιο που προτείνεται για την πλήμνη παρουσιάζει ακόμα ένα πλεονέκτημα έναντι του προηγούμενου και έχει άμεση σχέση με την εφαρμογή των δυνάμεων. Στην Εικ. 4.29 φαίνεται η εφαρμογή των δυνάμεων και η πάκτωση στην νέα πλήμνη. Σε αντίθεση με το προηγούμενο σχέδιο που όλες οι δυνάμεις εφαρμόζονταν στις 6 οπές στήριξης του δισκόφρενου, εδώ μόνο η ροπή λόγω φρεναρίσματος εφαρμόζεται στο σημείο αυτό, ενώ η εφαρμογή της Πλευρικής και της Ακτινικής Δύναμης γίνεται στις 3 οπές στήριξης της ζάντας πετυχαίνοντας, όπως θα διαπιστώσουμε παρακάτω, πολύ καλύτερη κατανομή των τάσεων.



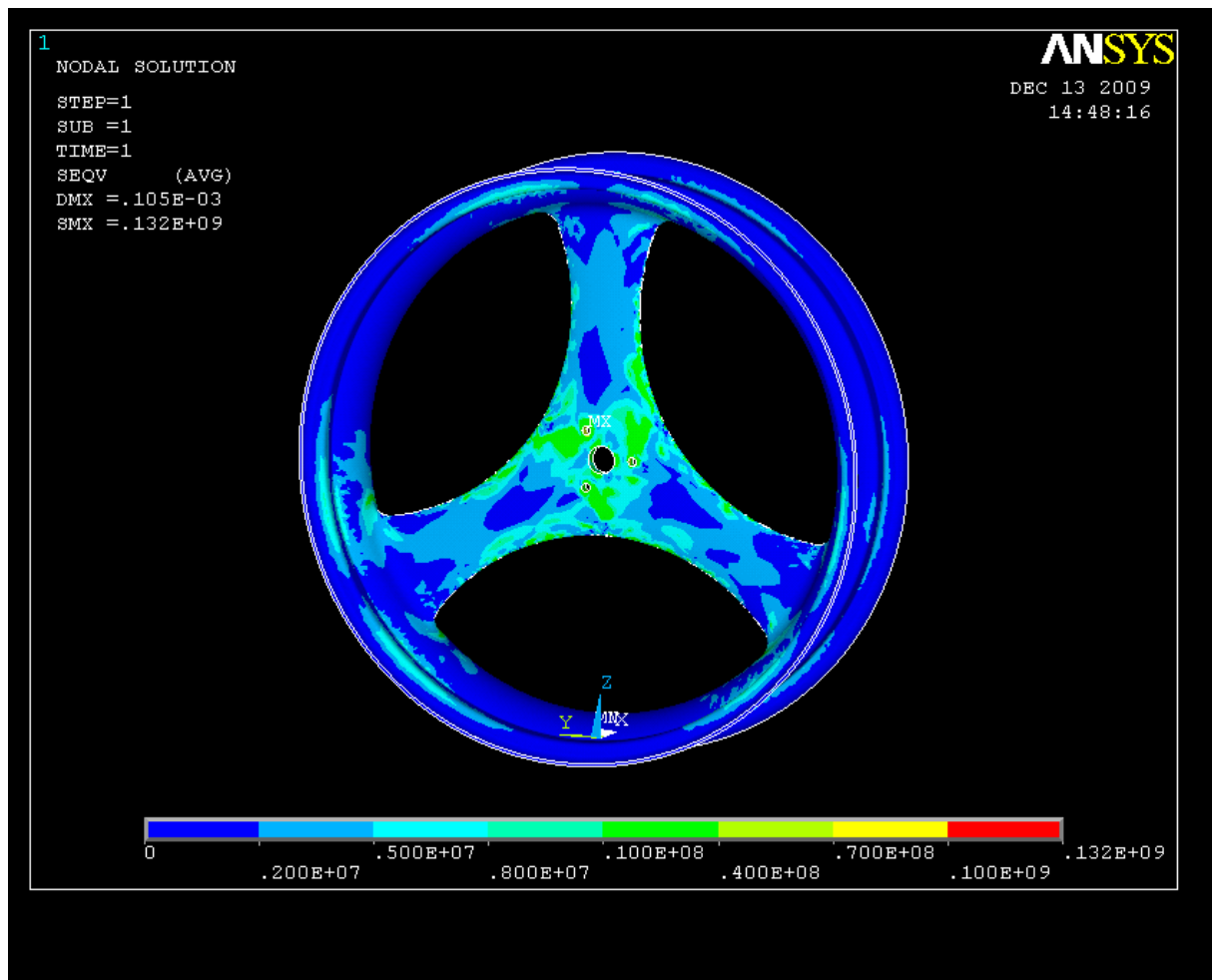
Εικόνα 5.22: Εφαρμογή δυνάμεων στην πλήμνη-μουαγιέ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

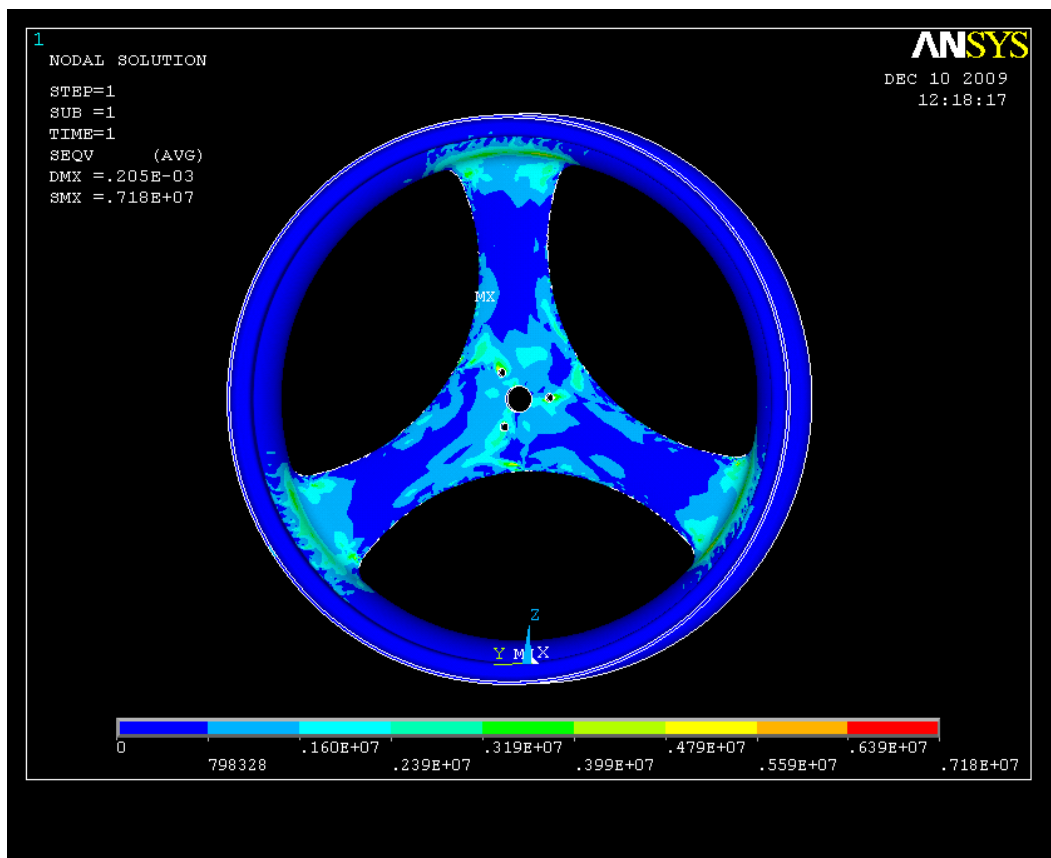
Η διαδικασία μοντελοποίησης παραμένει ίδια μιας και το μόνο που αλλάξαμε είναι η γεωμετρία των επί μέρους στοιχείων του συστήματος. Επαναλαμβάνουμε λοιπόν την ίδια διαδικασία και εξάγουμε τα αποτελέσματα.

5.4.3 ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

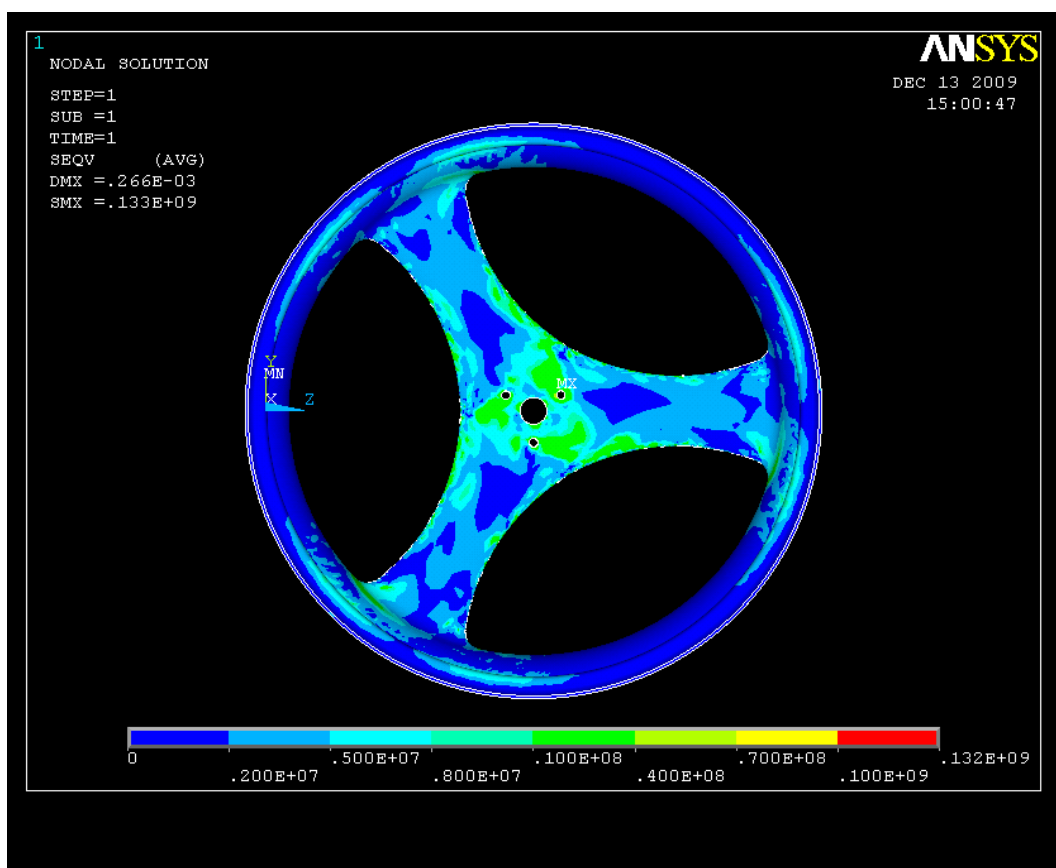
Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε φωτογραφίες, οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο επανασχεδιασμένο σύστημα Τροχού-Πλήμνης. Σε κάθε εικόνα οι τάσεις εμφανίζονται πάνω στο μοντέλο με χρωματικές διακυμάνσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο εύρος τάσης. Στο κάτω μέρος κάθε εικόνας εμφανίζεται η χρωματική αντιστοιχία για κάθε εύρος τάσης. Όσο τα μεγέθη των τάσεων αυξάνονται, τα χρώματα απεικόνισης μετασχηματίζονται από το μπλε σκούρο προς το κόκκινο. Οι τάσεις υπολογίζονται με βάση τον κανόνα Von Misses. Σε κάθε χρονική στιγμή η μέγιστη και ελάχιστη εμφανιζόμενη τάση, προσδιορίζονται πάνω στο μοντέλο, αυτόματα, ως MX ή MN αντίστοιχα.



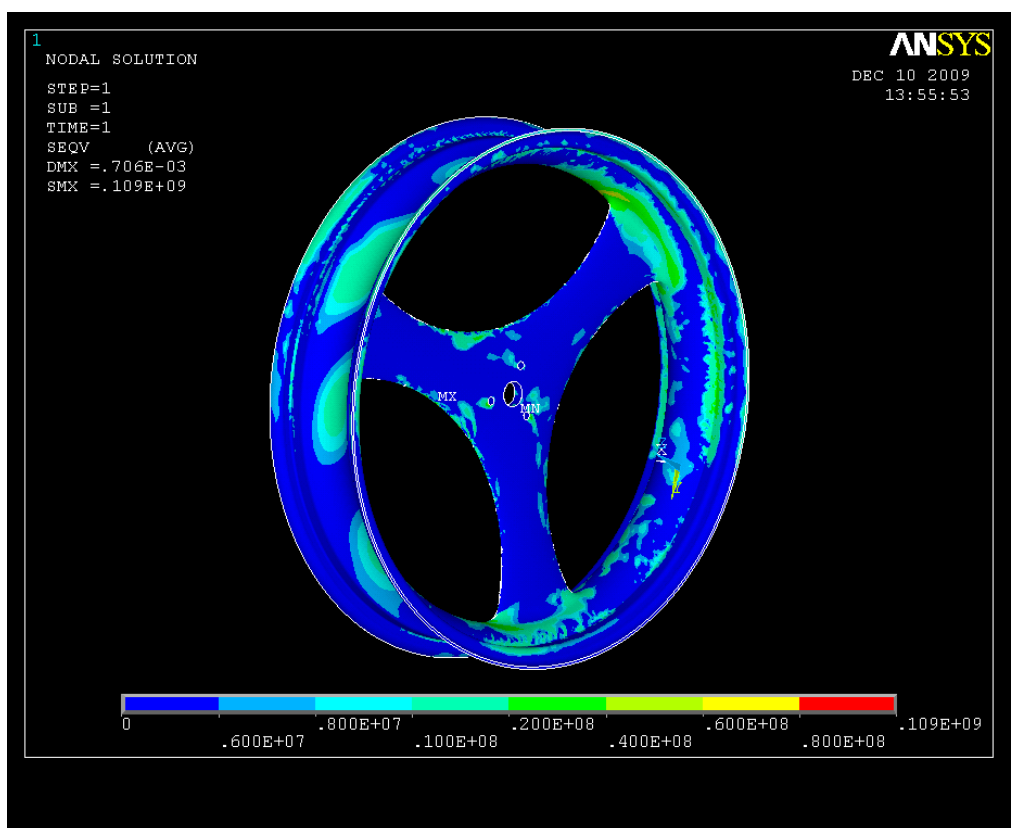
Εικόνα 5.23: Τάσεις λόγω εφαρμογής Ροπής λόγω Φρεναρίσματος 180 Nm



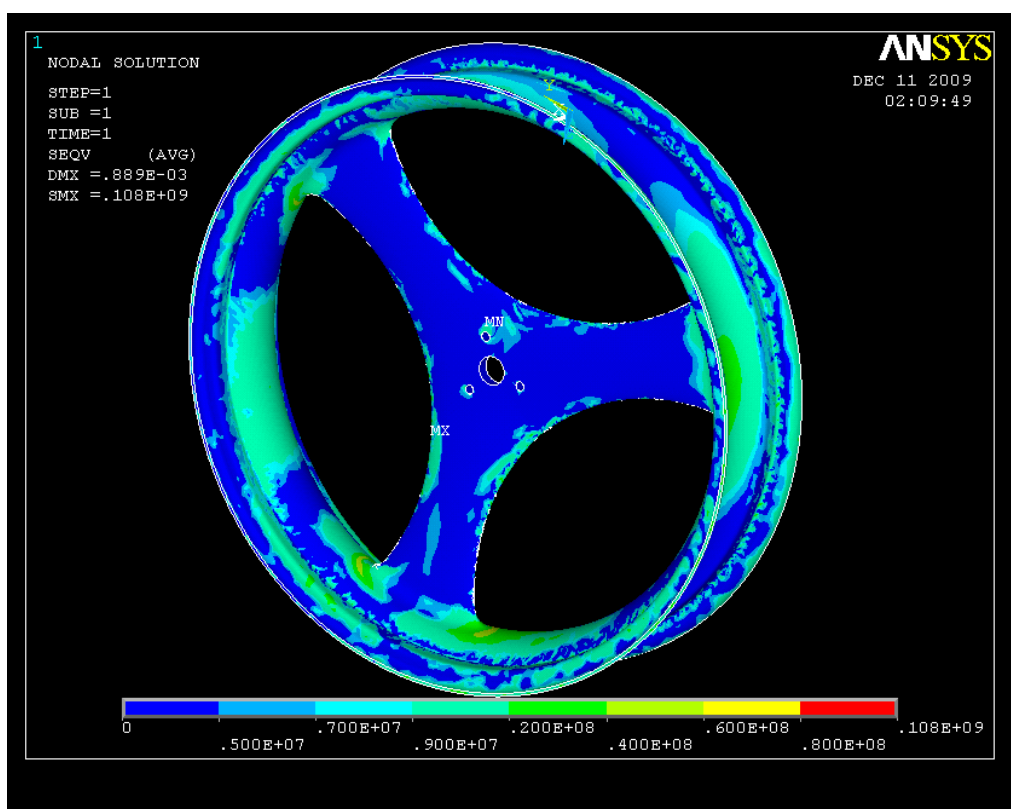
Εικόνα 5.24: Τάσεις λόγω εφαρμογής Πλευρικής Δύναμης 1.7 N



Εικόνα 5.25: Τάσεις λόγω συνδυασμένης Φόρτισης Ροπής λόγω Φρεναρίσματος και Πλευρικής Δύναμης

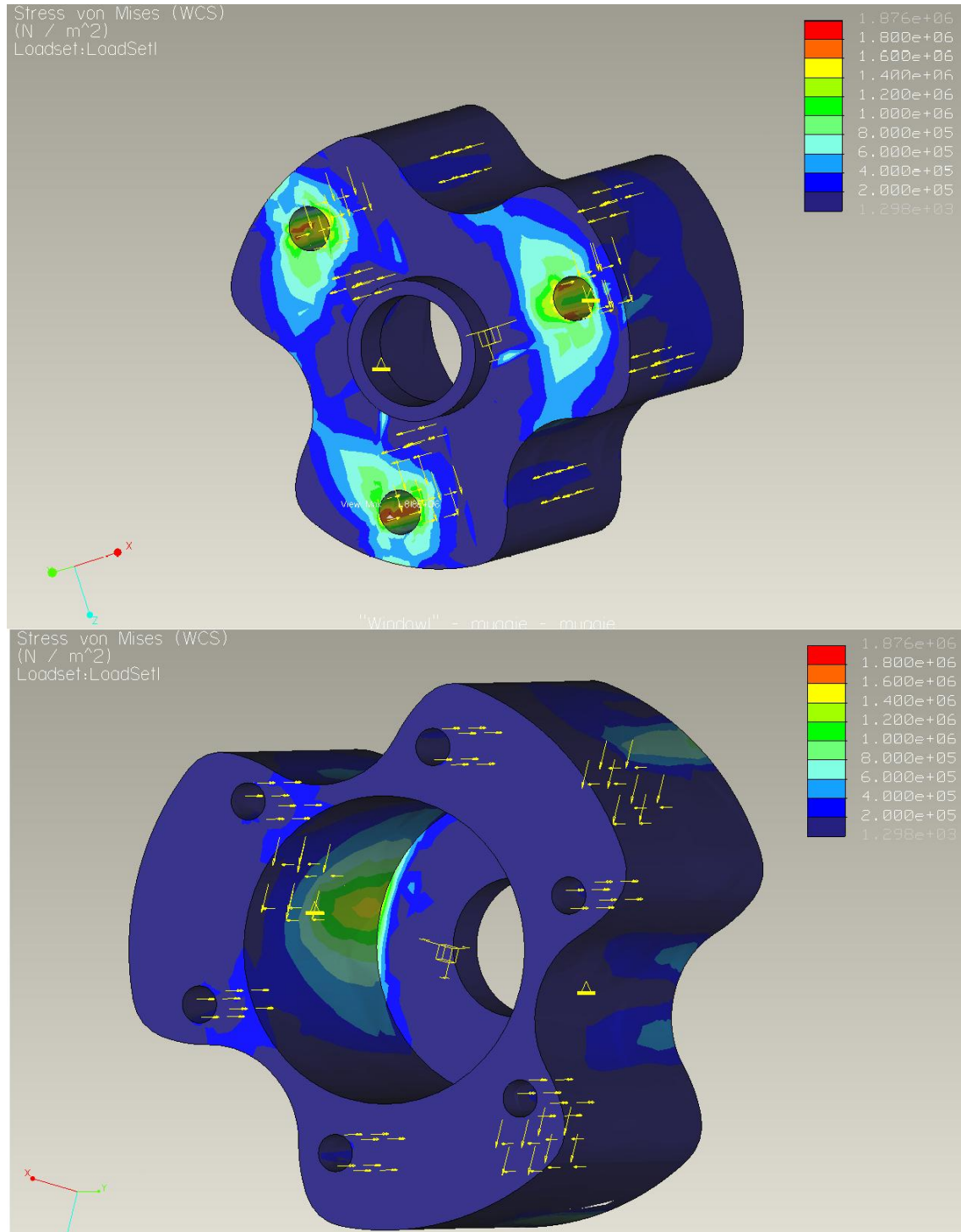


Εικόνα 5.26: Τάσεις λόγω εφαρμογής Ακτινικής Δύναμης



Εικόνα 5.27: Τάσεις λόγω συνδυασμένης φόρτισης Ακτινικής Δύναμης και Πίεσης λόγω Ελαστικού

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη ζάντα εξάγουμε ως μέγιστη τάση της πρώτης συνδυασμένης φόρτισης 132 Mpa και από την δεύτερη συνδυασμένη φόρτιση 108 Mpa. Εάν συγκρίνουμε τις δυο αυτές τιμές με το όριο διαρροής του αναθρακονήματος που χρησιμοποιούμε δηλαδή τα 690 Mpa καταλήγουμε σε ένα συντελεστή ασφαλείας της τάξης του 5.2 σαφώς ανώτερος από τον συντελεστή ασφαλείας 2.25 που προτείνεται για σύνθετα υλικά, αλλά και τεχνικά πιο άρτιος από τον κατά πολύ μεγαλύτερο της αρχικής σχεδίασης αφού εκμεταλλευόμαστε με πολύ καλύτερο τρόπο την αντοχή του υλικού κατασκευής.



Εικόνα 5.28: Τάσεις λόγω συνδυασμένης εφαρμογής Ροπής φρεναρίσματος, Πλευρικής και Ακτινικής Δύναμης

Το αποτέλεσμα της συνδυασμένης φόρτισης στην πλήμνη είναι μέγιστη τάση 1.87 Mpa και συγκρίνοντας την με το Όριο διαρροής του κράματος Αλουμινίου 2014 που είναι 185 Mpa προκύπτει συντελεστής ασφαλείας 99. Ο συντελεστής ασφαλείας που προτείνεται σε τέτοιου είδους εφαρμογές είναι ίσος με 1.8. Πετυχημένη λοιπόν και η επανασχεδίαση της πλήμνης μιας και πετύχαμε τους στόχους μας για καλύτερη κατανομή των τάσεων αλλά και καλύτερης χρηστικότητας του συστήματος. Περαιτέρω μείωση του βάρους της πλήμνης δεν είναι δυνατή και πλέον ανούσια μιας και οι διαστάσεις της είναι καθορισμένες και απόλυτα προσαρμοσμένες στο σύστημα.

Ακολουθεί συγκριτικός πίνακας με το υπάρχον και το προτεινόμενο σύστημα για το πειραματικό όχημα ER10:

Πίνακας 5.2: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

	Υπάρχον Σύστημα 2009 (gr)	Προτεινόμενο Σύστημα 2010 (gr)
Τροχός	4810	705
Λάστιχο	3720	1500 (χαμηλής τριβής)
Πλήμνη	280	124
Δισκόφρενο	107	107
Σύνολο	8930	2436

$$I_{2009} = 0.2081 \text{ kg} * \text{m}^2$$

$$I_{2010} = 0.0502 \text{ kg} * \text{m}^2$$

Το αδρανειακό λοιπόν κέρδος που προκύπτει από την μελέτη μας για το σύστημα του τροχού-πλήμνης είναι της τάξης του 75.8 % !

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα σύνθετα υλικά είναι μια σχετικά καινούργια κατηγορία μηχανολογικών υλικών. Δεν βρίσκονται αυτούσια στη φύση όπως π.χ. τα μεταλλικά υλικά, αλλά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα υλικά με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Αυτά τα υλικά συνδυάζονται μεταξύ τους και το τελικό προϊόν έχει ιδιότητες βελτιωμένες σχετικά με τα επιμέρους υλικά που το αποτελούν.

Αποτελούνται από τη μήτρα και την ενίσχυση. Η μήτρα η οποία στην περίπτωση που εξετάζουμε είναι η ρητίνη αποτελεί το υλικό που εγκλείει το ενισχυτικό υλικό. Το ενισχυτικό υλικό στην περίπτωση μας είναι ύφασμα ανθρακονημάτων (carbon), για λόγους που εξηγήσαμε στην έρευνα αγοράς. Με το συνδυασμό μήτρας και ενίσχυσης, επιτυγχάνονται ισχυροί δεσμοί μεταξύ των επιφανειών επαφής τους και το αποτέλεσμα είναι ένα υλικό με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες.

Ο ρόλος της μήτρας σε ένα σύνθετο υλικό είναι:

- 1) Να διατηρήσει τις ίνες στη θέση τους.
- 2) Να μεταφέρει τις τάσεις από ένα σε ένα.
- 3) Να προστατεύσει τις ίνες από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (χημικά, υγρασία, κτλ).
- 4) Να προστατεύσει τις ίνες από μηχανική υποβάθμιση, λόγω εξωτερικής φθοράς.

Από όλες τις κατηγορίες μητρών, εμάς μας ενδιαφέρουν οι πολυμερικές θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Οι πιο διαδεδομένες είναι οι πολυεστερικές και οι εποξικές.

ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

Οι πολυεστερική ήταν η πρώτη ρητίνη που μπορούσε να "ψηθεί" σε θερμοκρασίες δωματίου, καθιστώντας τη διαδικασία παρασκευής σύνθετων υλικών πολύ πιο απλή, εύκολη και φθηνή.

Πλεονεκτήματα:

- 1) Λιγότερο από μισή τιμή σε σχέση με τις εποξικές.
- 2) Εύκολες στη χρήση, υγραίνουν το ύφασμα ευκολότερα, λόγω χαμηλότερου ιξώδους.
- 3) Ο χρόνος "ψήσιματος" της πολυεστερικής ρητίνης μπορεί να ρυθμιστεί μεταβάλλοντας το ποσοστό του καταλύτη στο σύστημα.
- 4) Λιγότερο τοξικές από τις εποξικές.

Μειονεκτήματα:

- 1) Το τελικό προϊόν έχει κατώτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με ένα αντίστοιχο όπου χρησιμοποιείται εποξική ρητίνη.
- 2) Η πολυεστερική κατά το ψήσιμό της συρρικνώνεται πολύ περισσότερο (7%) από την εποξική με κίνδυνο στην ακριβή μορφή του τελικού προϊόντος.
- 3) Η πολυεστερική είναι ασύμβατη με carbon
- 4) Άσχημη μυρωδιά.

ΕΠΟΞΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

Πλεονεκτήματα:

- 1) Το τελικό προϊόν έχει ανώτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με ένα αντίστοιχο όπου χρησιμοποιείται πολυεστερική ρητίνη.
- 2) Η εποξική ρητίνη συρρικνώνεται 40%-50% λιγότερο σε σχέση με την πολυεστερική, οδηγώντας σε ακριβέστερα ομοιώματα.
- 3) Είναι συμβατές με carbon.

Μειονεκτήματα:

- 1) Υψηλό κόστος.
- 2) Δυσκολότερες στη χρήση καθώς έχουμε υψηλότερο ιξώδες και είναι δύσκολες στην εφαρμογή τους πάνω στο ύφασμα, αλλά είναι και δυσκολότερη η μίξη της με τον σκληρυντή.
- 3) Σε αντίθεση με τις πολυεστερικές όπου τα αντιδρώντα της χημικής ένωσης υπάρχουν ήδη και απλά ο καταλύτης επιταχύνει τη διαδικασία, στην περίπτωση της εποξικής ρητίνης αυτά που αναμιγνύουμε, η ρητίνη και ο σκληρυντής είναι τα ίδια τα αντιδρώντα της αντίδρασης, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η ακριβής μίξη τους κατά βάρος. Εάν δεν αναμιχθούν σωστά, τότε κάποιο από τα δύο αντιδρώντα θα βρίσκεται σε περίσσεια και το τελικό προϊόν θα έχει κατώτερες από τις αναμενόμενες μηχανικές ιδιότητες.

Ανεξάρτητα από την μέθοδο κατασκευής που θα επιλεγεί και η οποία θα περιγραφεί παρακάτω, αξίζει να σημειωθεί η χρήση δυο ακόμα υλικών, αυτή του gel coat και του PVA(Polyvinyl Alcohol), που συμβάλουν καθοριστικά στην ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Το "gelcoat" δεν είναι τίποτα διαφορετικό από πολυεστερική ή εποξική ρητίνη με ορισμένα έξτρα χημικά πρόσθετα. Είναι πολύ πιο πηκτό από μια απλή ρητίνη με την προσθήκη μιας θιξοτροπικής ουσίας και είναι το υλικό εκείνο που θα δώσει την τελική επιφάνεια αλλά και το χρώμα στο προϊόν. Εφαρμόζεται πάνω στην επιφάνεια του καλουπιού αφότου αυτό περαστεί με κερί και PVA (αν χρησιμοποιηθεί). Η εφαρμογή του γίνεται είτε με πινέλο, είτε με ειδικό πιστόλι αέρα. Βοηθά στο να δοθεί μια τέλεια επιφάνεια στο προϊόν αφού σχηματίζει μια σκληρή κρούστα η οποία εμποδίζει το ύφασμα να αποτυπωθεί στο καλούπι, με αποτέλεσμα είτε να έχουμε ένα άσχημο προϊόν, ή ακόμη χειρότερα να σπάσει το φιλμ του κεριού και το προϊόν να κολλήσει για πάντα στο καλούπι.

Το PVA είναι σε υγρή μορφή και εφαρμόζεται πάνω από το φιλμ κεριού στην επιφάνεια του καλουπιού. Σχηματίζει ένα προστατευτικό φιλμ, το οποίο προστατεύει το κερί κατά την εφαρμογή της ρητίνης στο ύφασμα. Είναι δηλαδή μια δεύτερη δικλείδα ασφαλείας ενάντια στο κόλλημα του προϊόντος πάνω στο καλούπι. Χρησιμοποιείται συνήθως σε καινούργια καλούπια τα οποία δεν έχουν ακόμη "ψηθεί" 100%. Σε παλιά καλούπια είναι ανεπιθύμητο αφού αφήνει στο προϊόν μια τραχιά επιφάνεια η οποία θα πρέπει τελικά να γυαλιστεί. Το PVA στο τέλος γίνεται ένα λεπτό πλαστικό φιλμ το οποίο συνήθως αφαιρείται με ζεστό νερό.

6.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

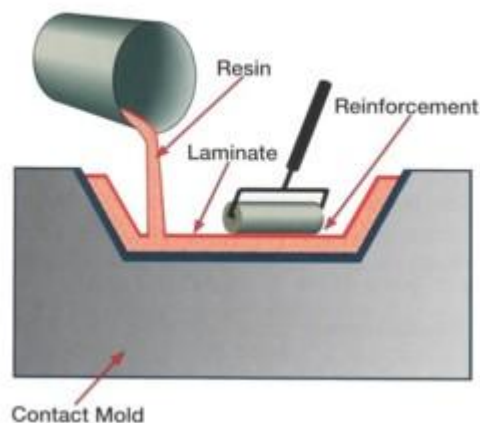
6.2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Οι ενισχύσεις που γίνονται με ίνες άνθρακα στα σύνθετα έχουν τη μορφή υφάσματος (ανθρακοϋφάσματος). Πολλά στρώματα υφάσματος εμποτίζονται με ρητίνες και όταν αυτές πολυμεριστούν παίρνουμε το τελικό δοκίμιο. Ανάλογα με τις επιδιωκόμενες ιδιότητες της κατασκευής μας, τη μέθοδο παραγωγής που διαθέτουμε και το τελικό κόστος επιλέγουμε τη ρητίνη που θα χρησιμοποιηθεί (πολυεστερική ή εποξική) και την ύφανση του ανθρακοϋφάσματος. Στη βιομηχανία εφαρμόζονται πολλοί τρόποι εμποτισμού των ινών από ρητίνη. Οι κυριότεροι που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για κατασκευή μπλοκ υλικού ή τεμάχια one-off είναι οι παρακάτω:

1. Επίστρωση, στρωματοποίηση και εμποτισμός με το χέρι (Hand Layup)

Ο εμποτισμός και η στρωματοποίηση με το χέρι είναι η απλούστερη μέθοδος κατασκευής σύνθετων υλικών. Είναι η διαδικασία που έχει τις μικρότερες απαιτήσεις από πλευράς εγκαταστάσεων και μηχανημάτων οπότε και η οικονομικότερη.

Οι ίνες τοποθετούνται διαδοχικά, στρώμα προς στρώμα μέσα ή πάνω σε ένα καλούπι, το οποίο προηγουμένως έχει περαστεί με κερί και ενδεχομένως από ένα προστατευτικό στρώμα ρητίνης (Gel Coat). Αφού τοποθετηθεί το στρώμα ινών στο καλούπι, ο τεχνίτης το εμποτίζει με πινέλο, ρολό ή άλλο αντίστοιχο εργαλείο με ρητίνη. Στη συνέχεια, αφού βεβαιωθεί ότι το στρώμα έχει καλυφθεί με ρητίνη και δεν υπάρχουν ξηρές περιοχές, τοποθετεί το επόμενο και επαναλαμβάνει τη διαδικασία μέχρι να φτάσει το επιδιωκόμενο πάχος ή αριθμό στρωμάτων. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία λόγω των ελάχιστων απαιτήσεων της από πλευράς μηχανημάτων και εφαρμόζεται ευρέως σε ναυπηγεία και βιοτεχνίες κατασκευής σκαφών αναψυχής.

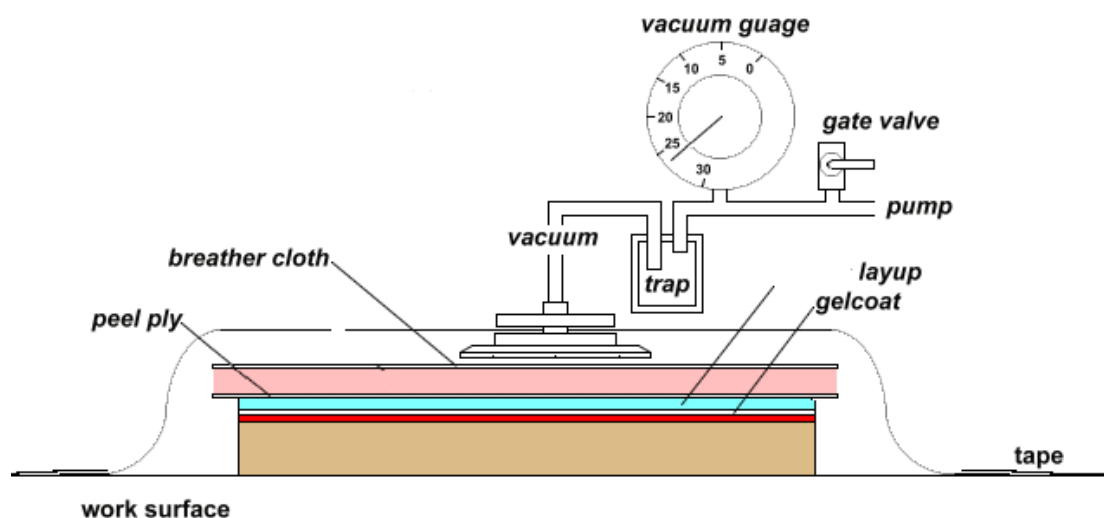


Εικόνα 6.1: Μέθοδος Hand Layup

2. Vacuum Bagging

Χρησιμοποιώντας την προηγούμενη μέθοδο είναι εύκολο να κατασκευαστούν τεμάχια σχετικά απλής γεωμετρίας, χωρίς οξείες γωνίες και απότομες αλλαγές καμπυλότητας. Για αυτές τις περιπτώσεις που δεν μπορούν να καλυφθούν από το Hand Layup εφαρμόζεται η μέθοδος Vacuum Bagging.

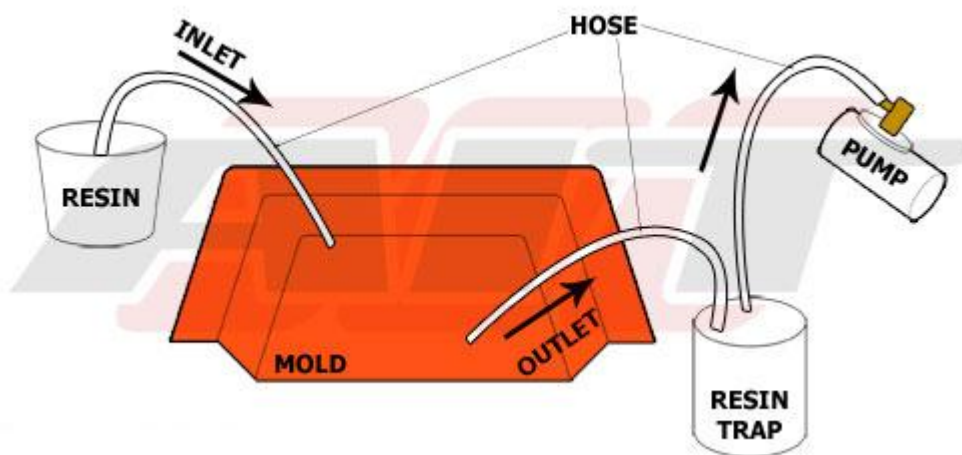
Με τη μέθοδο Vacuum Bagging εξασφαλίζουμε ότι αφού οι ίνες εμποτιστούν σε ρητίνη, μπορούν να αποκτήσουν σχήματα περίπλοκης γεωμετρίας. Στη μέθοδο αυτή οι ίνες τοποθετούνται μέσα ή πάνω στο καλούπι, εμποτίζονται και στρώματοποιούνται κατά τα γνωστά. Στη συνέχεια μπαίνει επάνω τους ένα ειδικό ύφασμα που δε κολλάει στη ρητίνη (peel ply), ένα ύφασμα απορρόφησης της ρητίνης που περισσεύει (breather) και μια ειδική σακούλα νάιλον που κλείνει με ειδική μαστίχα επάνω στο καλούπι. Στη σακούλα αυτή προσαρμόζεται ένας σωλήνας που συνδέει το σύστημα με αντλία κενού. Όταν η αντλία κενού ξεκινήσει τη λειτουργία της, ο αέρας που υπάρχει μέσα στη σακούλα οδηγείται έξω από το σύστημα. Η σακούλα πιέζει τις στρώσεις υαλοφύσματος με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν συνήθως να έχει καλύτερο ποσοστό περιεκτικότητας κατα βάρος σε γυαλί και λιγότερες ατέλειες (φυσαλίδες) από ότι με απλό Hand Layup.



Εικόνα 6.2: Μέθοδος Vacuum Bagging

3. Vacuum Assisted Resin Infusion

Η μέθοδος V.A.R.I. (Vacuum Assisted Resin Infusion) αποτελεί μια εξέλιξη της τεχνικής του Vacuum Bagging ώστε να επιταχυνθεί η κατασκευή δοκιμίων, παρακάμπτοντας τη διαδικασία της επίστρωσης και του εμποτισμού με το χέρι. Στη μέθοδο αυτή τα στρώματα ανθρακοϋφάσματος τοποθετούνται μέσα στο καλούπι χωρίς να γίνεται εμποτισμός σε ρητίνη. Στη συνέχεια τοποθετείται η ειδική σακούλα του Vacuum Bagging όπως και τα υπόλοιπα ειδικά υφάσματα και επάνω στη σακούλα προσαρμόζονται δυο σωλήνες. Ο ένας πηγαίνει στην αντλία κενού και ο δεύτερος έρχεται από δοχείο ρητίνης. Με την εκκίνηση της αντλίας κενού η ρητίνη αρχίζει να κυκλοφορεί μέσα στις στρώσεις γυαλιού και τις εμποτίζει μέχρι να φτάσει στο σωλήνα της αντλίας κενού, οπότε και ολοκληρώνεται η διαδικασία. Έτσι αποφεύγουμε τη χρονοβόρα διαδικασία του Hand Layup. Το πρόβλημα της μεθόδου είναι ότι για να εφαρμοστεί απαιτούνται ρητίνες ειδικού ιξώδους ώστε να μπορεί να γίνει σωστή κυκλοφορία υγρού μέσα από τις ίνες.



Εικόνα 6.3: Μέθοδος V.A.R.I.

6.2.2 ΤΟ ΚΑΛΟΥΠΙ

Όπως συμβαίνει στις κατεργασίες χύτευσης των μετάλλων έτσι και στα συνθετικά υλικά για να τους δώσουμε το επιθυμητό σχήμα χρειαζόμαστε ένα καλούπι. Το καλούπι είναι σημαντικότερο κεφάλαιο στη διαδικασία της κατασκευής ανθρακονημάτων, αφού μαζί με το πρωτότυπο αποτελούν την ουσιαστική επένδυση ενός κατασκευαστή. Από τη στιγμή που θα φτιάξουμε το (ακριβό) καλούπι, μεγάλο μέρος της αξίας των αρχικών προϊόντων θα παίζει το ρόλο της απόσβεσης του καλουπιού. Γίνεται λοιπόν κατανοητό πως η τιμή μιας κατασκευής από ανθρακονήματα εξαρτάται σε τεράστιο βαθμό από το καλούπι. Παρόλο το αυξημένο κόστος, επιλέγεται ο σίδηρος ως υλικό κατασκευής του καλουπιού, για λόγους αντοχής αλλά και λόγω της ανάγκης για επαναληψιμότητα της διαδικασίας.

Για την κατασκευή ενός τροχού απαιτούνται 2 επαναλήψεις τις διαδικασίας, μιας και κάθε φορά από το καλούπι εξάγεται αντίστοιχα το δεξιό ή το αριστερό μέρος του. Ακολουθεί η διαδικασία της κόλλησης των δυο κομματιών με ειδική κόλλα στο επίπεδο κομμάτι του τροχού, αλλά και μια στρώση ανθρακοϋφάσματος-ρυτίνης στο κοίλο κομμάτι της ζάντας που εξασφαλίζει σε δεύτερο χρόνο την αξιοπιστία και την στιβαρότητα της κατασκευής.



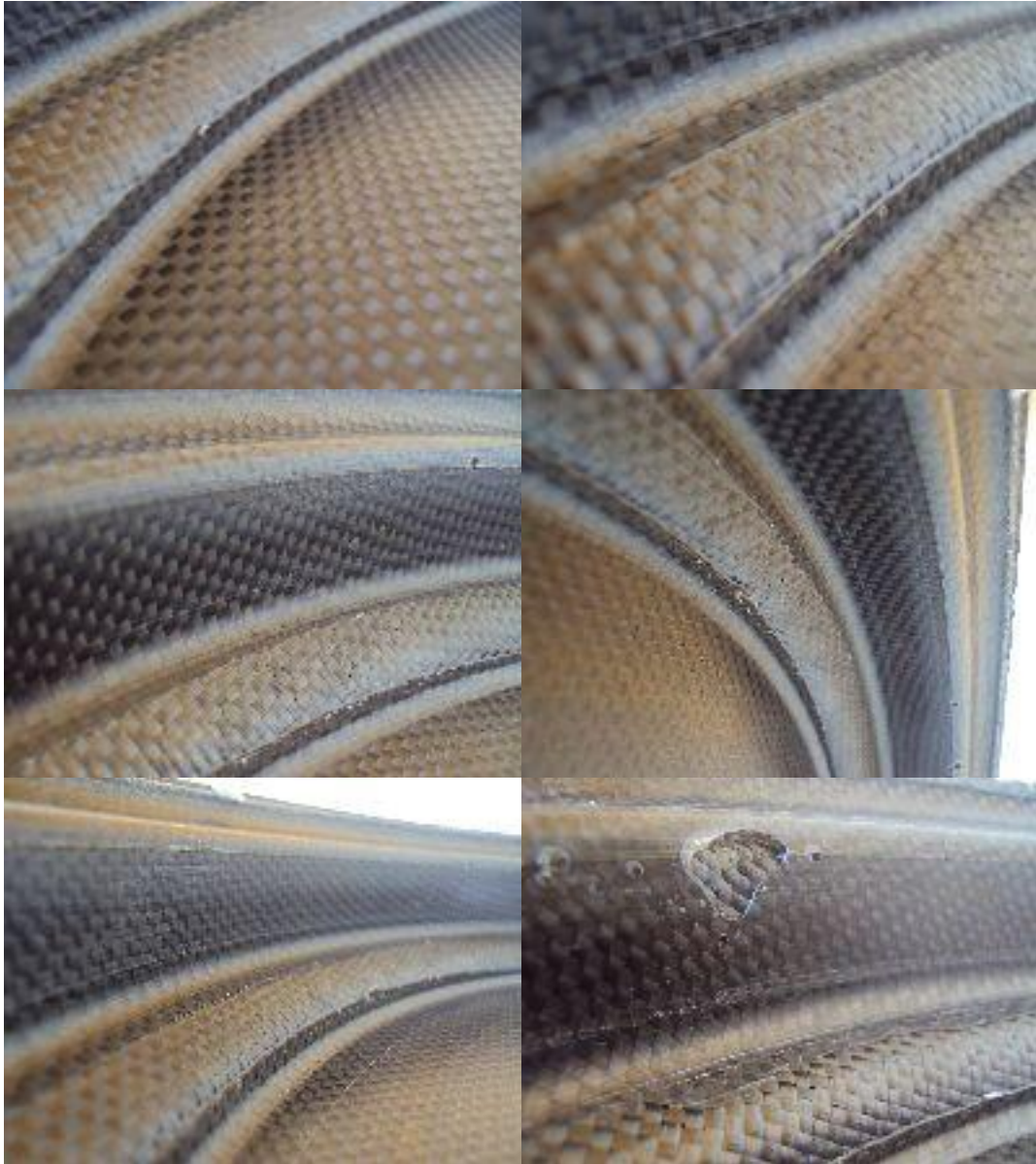
Εικόνα 6.3: Σιδερένιο Καλούπι (κομπλέ)



Εικόνα 6.4: Καλούπι (πάνω(2) και δεξιά(1)) , Αριστερό Πιάτο-Αποτέλεσμα (αριστερά)

6.3 ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ – ΑΤΕΛΕΙΕΣ

Το πρώτο κομμάτι που κατασκευάστηκε έγινε με την μέθοδο Hand Layup λόγω μικρού κόστους και απλότητας της διαδικασίας προκειμένου να εξαχθούν τα πρώτα συμπεράσματα όσον αφορά την στιβαρότητα της κατασκευής αλλά και την ποιότητα του προϊόντος. Προκειμένου να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερο αποτέλεσμα και να βελτιωθεί η διαδικασία κατασκευάστηκε το «θηλυκό» του καλουπιού 1 για να ασκήσει πίεση κατά την διάρκεια του εμποτισμού και μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία. Το αποτέλεσμα της προσπάθειας αυτής φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:











Η σημαντικότερη ατέλεια που παρατηρείται στο παραπάνω αποτέλεσμα είναι οι φυσαλίδες που εμφανίζονται σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας του «πιάτου». Οι φυσαλίδες αυτές δημιουργούνται λόγω της ανάμειξης κατά την διαδικασία παρασκευής της εποξικής ρητίνης και οι οποίες παραμένουν στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού. Μέσω της πίεσης που εφαρμόζεται από τον τεχνίτη κατά την διαδικασία της επίστρωσης, αλλά και από το δεύτερο καλούπι στο τελικό στάδιο βγαίνουν στην επιφάνεια. Το συμπέρασμα λοιπόν που εξάγεται είναι ότι δεν εφαρμόστηκε ομοιόμορφα η πίεση από το δεύτερο καλούπι προκειμένου να εξαλειφθεί το φαινόμενο.

6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ

Σε επόμενο στάδιο του πειραματισμού μας προβλέπεται η χρησιμοποίηση της μεθόδου Vacuum Bagging και η οποία αποδεδειγμένα εξαλείφει το φαινόμενο της φυσαλίδας. Η διαδικασία αυτή δεν έχει ολοκληρωθεί προς το παρόν λόγω αναμονής της αντλίας που απαιτείται για την δημιουργία συνθηκών κενού.

Σύγκριση όμως της προσομοίωσης που κάναμε με το αναμενόμενο αποτέλεσμα μπορεί να γίνει μέσω αναλογίας. Δοκίμιο που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο διαστάσεων 14.5cm x 16.8cm με 6 στρώσεις ανθρακονήματος είχε πάχος 2.1mm και βάρος 54gr. Η επιφάνεια του δοκιμίου είναι 0.02436m² ενώ η επιφάνεια του κάθε πιάτου που προκύπτει από την διαδικασία είναι 0.185m². Αναλογικά λοιπόν προκύπτει ότι το βάρος κάθε πιάτου θα είναι περίπου 411gr. Συνολικά λοιπόν προβλέπεται ότι ο τροχός που πρόκειται να κατασκευαστεί με 2mm στεφάνι και 4mm ακτίνες θα έχει βάρος περίπου 822gr.

Πίνακας 6.1: Σύγκριση θεωρητικού με πραγματικού τροχού

	Θεωρητικό μοντέλο (gr)	Τελικό προϊόν (gr)
Τροχός	705	822

Η απόκλιση που παρατηρούμε μεταξύ του μοντέλου της προσομοίωσης και του προσδοκώμενου αποτελέσματος είναι της τάξης του 14.2 % που δικαιολογείται από ενδεχόμενη απόκλιση της αναλογίας που προηγήθηκε, αλλά και εξαιτίας της μη τυποποιημένης διαδικασίας παραγωγής του δοκιμίου.

Πίνακας 6.2: Σύστημα τροχού 2010

	Σύστημα 2010 (gr)
Τροχός	822
Λάστιχο	1500 (χαμηλής τριβής)
Πλήμνη	124
Δισκόφρενο	107
Σύνολο	2553

$$I_{real\ 2010} = \frac{1}{2} m * r^2 = \frac{1}{2} 2.553 * (203.2 * 10^{-3})^2 = 0.0527 kg * m^2$$

$$I_{2009} = \frac{1}{2} m * r^2 = \frac{1}{2} 8.930 * (215.9 * 10^{-3})^2 = 0.2081 kg * m^2$$

Ο στόχος για μείωση του βάρους του συστήματος τροχού, που θέσαμε αρχικά, κάτω από τα 3 kg επετεύχθη, ενώ η αδράνεια μειώθηκε εν τέλει κατά 74.7%.

6.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βασικός σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η μελέτη και η κατασκευή ενός νέου συστήματος τροχού για το όχημα χαμηλής κατανάλωσης ER10 με σκοπό την συμμετοχή του στον Ευρωπαϊκό διαγωνισμό Shell Eco Marathon.

Ο έλεγχος της κατασκευής αποτελεί την πιστοποίηση της ορθότητας και καταλληλότητας της σχεδίασης του συστήματος τροχού λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένους κανόνες ασφαλείας που χρησιμοποιούνται για στην κατασκευή τροχών. Με χρήση ειδικού λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, εκτελέστηκαν συγκεκριμένου τύπου δοκιμές από τις οποίες προέκυψαν τα παραπάνω αποτελέσματα. Με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών επιβεβαιώθηκε η καταλληλότητα του προτεινόμενου σχεδιασμού του συστήματος τροχού.

Βρέθηκε ότι η τελική σχεδίαση του τροχού αντέχει, στα προτεινόμενα από την βιβλιογραφία, σενάρια φόρτισης και εμφανίζει τιμές τάσης αρκετά πιο χαμηλές από το όριο διαρροής του υλικού. Αυτό δηλώνει ότι το υλικό παραμένει στην ελαστική περιοχή, δεν παρουσιάζει δηλαδή πλαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες με τη χρήση θα οδηγήσουν σε αστοχία και άρα θραύση του πλαισίου. Αυτό ικανοποιεί και τις επιβολές των κανονισμών ασφαλείας και άρα πιστοποιεί την καταλληλότητα της κατασκευής.

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

Υπολογιστής Excel:

Brake System Dimensions

Force Applied to pedal	30	kg
Pedal Ratio	4	:1

Front

Wheel radius	0,280	m
Master cylinder diameter	0,5	in
Distance - pushrod to balance bar pivot	30	mm
Piston Area	0,0008	m ²
Pad Coefficient of friction	0,35	
Disc diameter	160	mm
Pad depth	3	mm
Gap between top of pad and disc	1	mm

Rear

Wheel radius	0,280	m
Master cylinder diameter	0,5	in
Distance - pushrod to balance bar pivot	40	mm
Piston Area	0,0008	m ²
Pad Coefficient of friction	0,35	
Disc diameter	160	mm
Pad depth	3	mm
Gap between top of pad and disc	1	mm

Target front wheel braking torque	78	Nm
Target rear wheel braking torque	39	Nm
Force Applied to pedal	294,3	N
Force on Balance bar	1.177	N
Distance between balance bar clevises	70	mm

M/cyl Area	0,00013	m ²
Balance bar proportion	57%	Front
Force on M Cyl piston	672,68571	N
Line pressure (should be below 7million)	5.310.249	N/m ²
Clamping force on disk	4.459	N
Force x Coeff friction	1.561	N
Disc effective radius	0,0775	m
Disc torque (both pads 1 wheel)	121	Nm
Force at tyre contact patch	432	N

M/cyl Area	0,00013	m ²
Balance bar proportion	43%	Rear
Force on M Cyl piston	504,5	N
Line pressure (should be below 7million)	3.982.687	N/m ²
Clamping force on disk	3.344	N
Force x Coeff friction	1.170	N
Disc effective radius	0,0775	m
Disc torque (both pads 1 wheel)	91	Nm
Force at tyre contact patch	324	N

Πίνακας 4.4: Υπολογισμός Ροπής Φρεναρίσματος

Οδηγίες:

- Με κίτρινο χρώμα είναι τα κελία με τα δεδομένα, με γκρι οι ενδιάμεσοι υπολογισμοί και με πράσινο τα τελικά αποτελέσματα.
- Με κόκκινο χρώμα ο στόχος που θα έπρεπε να πετύχουμε προκειμένου να φρενάρει αποτελεσματικά το όχημά μας και με πράσινο τα τελικά αποτελέσματα για τον μπροστά και πίσω άξονα αντίστοιχα.

Ακολουθεί αναλυτικός πίνακας με τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος:

Cg Height	0,3702	m		
Wheelbase	1,400	m		
Front wheel rolling radius	0,280	m		
Rear wheel rolling radius	0,280	m		
Deceleration	0,5	g		
Weight on Front Axle	92	kg		
Weight on Rear Axle	78	kg		
Total Weight	170	kg		
Weight on Front Axle	55	%		
Weight on Rear Axle	45	%		
Weight Transfer	22	kg		
Front axle load under braking	114	kgf	Dynamic front wheel load	57 kgf
Rear axle load under braking	56	kgf	Dynamic rear wheel load	28 kgf
Dynamic front axle load	1.116	N	Dynamic front wheel load	558 N
Dynamic rear axle load	551	N	Dynamic rear wheel load	276 N
Dynamic front axle load *g	57	kgf	Dynamic front wheel load *g	28 kgf
Dynamic rear axle load * g	28	kgf	Dynamic rear wheel load * g	14 kgf
Dynamic front axle load *g	558	N	Dynamic front wheel load *g	279 N
Dynamic rear axle load * g	276	N	Dynamic rear wheel load * g	138 N
Potential single front wheel braking torque	78	Nm		
Potential single rear wheel braking torque	39	Nm		

Πίνακας 4.5: Υπολογισμός δυναμικών φορτίσεων σε κάθε άξονα

Ακολουθεί αναλυτικά το τυπολόγιο που χρησιμοποιείται στον υπολογιστή του Excel:
(με πλάγια γράμματα έχουμε τους αγνώστους σε κάθε εξίσωση)

$$M = F * Cf * R$$

Όπου M = Ροπή φρεναρίσματος (Disc torque (both pads 1 wheel))

F = Δύναμη (Force)

Cf = Συντελεστής τριβής (Coeff friction)

R = Ενεργή Διάμετρος Δισκόπλακας (Disc effective radius)

$$F = CFd * PadCf$$

Όπου F = Δύναμη (Force)

CFd = Δύναμη δαγκάνας στην δισκόπλακα (Clamping force on disk)

PadCf = Συντελεστής τριβής του υλικού τριβής της δαγκάνας (τακάκι) (Pad Coefficient of friction)

$$Def = (Dd - Pd) / 2 - GapPd$$

Όπου Def = Ενεργή διάμετρος δισκόπλακας (Disc effective radius)

Dd = Διάμετρος δισκόπλακας (Disc diameter)

Pd = Πλάτος που καλύπτει το τακάκι (Pad depth)

GapPd = Απόσταση δισκόπλακας-τακάκι (Gap between top of pad and disc)

$$CFd = Lp * Pa$$

Όπου CFd = Δύναμη δαγκάνας στην δισκόπλακα (Clamping force on disk)
 Lp = Πίεση στο υδραυλικό σύστημα (Line pressure)
 Pa = Επιφάνεια του υλικού τριβής (τακάκι) (Piston Area)

$$Lp = Fc / Ma$$

Όπου Lp = Πίεση στο υδραυλικό σύστημα (Line pressure)
 Fc = Δύναμη στο Πιστόνι του κεντρικού κυλίνδρου (Force on Master Cylinder piston)
 Ma = Επιφάνεια κεντρικού κυλίνδρου (M/cyl Area)

$$Ma = \pi * ((Md * 0.0254)^2) / 4$$

Όπου Ma = Επιφάνεια κεντρικού κυλίνδρου (Master/cylinder Area)
 Md = Διάμετρος κεντρικού κυλίνδρου (Master cylinder diameter)

$$Fc = Bb * FBb$$

Όπου Fc = Δύναμη στο πιστόνι του κεντρικού κυλίνδρου (Force on M Cyl piston)
 Bb = Κατανομή πέδησης δεξιά και αριστερά (Balance bar proportion)
 FBb = Δύναμη στη δοκό εξισορρόπησης (Force on Balance bar)

$$Bb = Pr / (Pf + Pr)$$

Όπου Bb = Κατανομή πέδησης δεξιά και αριστερά (Balance bar proportion)
 Pr = Πίσω κατανομή πέδησης (pushrod to balance bar pivot_rear)
 Pf = Μπροστά κατανομή πέδησης (pushrod to balance bar pivot_front)

$$FBb = Fp * PRa$$

Όπου FBb = Δύναμη στη δοκό εξισορρόπησης (Force on Balance bar)
 Fp = Δύναμη στο πεντάλ (Force Applied to pedal)
 PRa = Λόγος του πεντάλ (Pedal Ratio)

Ακολουθεί αναλυτικά ο υπολογισμός των τιμών στόχου (με κόκκινο), που πρέπει να επιτυγχάνει το σύστημα των φρένων μας, με βάση το παρακάτω τυπολόγιο:

$$PfBt = Df * g * FRr$$

Όπου $PfBt$ = Τιμή στόχου ροπής φρεναρίσματος μπροστινού τροχού (Potential single front wheel braking torque)
 Df = Δυναμική φόρτιση μπροστινού άξονα (Dynamic front axle load)
 FRr = Ακτίνα κύλισης μπροστινού τροχού (Front wheel rolling radius)

$$Df = Fb * g$$

Όπου Df = Δυναμική φόρτιση μπροστινού άξονα (Dynamic front axle load)
 Fb = Φόρτιση μπροστινού άξονα σε κατάσταση φρεναρίσματος (Front axle load under braking)

$$Fb = Wf + Wt$$

Όπου Fb = Φόρτιση μπροστινού άξονα σε κατάσταση φρεναρίσματος (Front axle load under braking)
 Wf = Βάρος στον μπροστά άξονα (Weight on Front Axle)

$Wt = \text{Μεταφορά βάρους (Weight Transfer)}$

$$Wt = a * TW * (Cg / Wb)$$

Όπου $Wt = \text{Μεταφορά βάρους (Weight Transfer)}$

$a = \text{Επιβράδυνση (Deceleration)}$

$TW = \text{Συνολικό βάρος (Total Weight)}$

$Cg = \text{Κέντρο βάρους (Cg height)}$

$Wb = \text{Μεταξόνιο (Wheel base)}$

$$a = (Us - Uf) / t$$

Όπου $a = \text{Επιβράδυνση (Deceleration)}$

$Us = \text{Ταχύτητα πριν το φρενάρισμα (Speed at beginning of braking zone)}$

$Uf = \text{Ταχύτητα μετά το φρενάρισμα (Speed at end of braking zone)}$

$t = \text{Χρόνος που χρειάστηκε (Time taken)}$

- **Potential single rear wheel braking torque** = ομοίως αλλά με τα δεδομένα για τον πίσω άξονα.
- **Rear axle load under braking** = ομοίως αλλά με τα δεδομένα για τον πίσω άξονα.

Οι υπολογισμοί για τα **Dynamic front wheel load** και **Dynamic rear wheel load** προκύπτουν αν διαιρέσουμε με το 2 τα **Front axle load under braking** και **Rear axle load under braking**.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. M. Giger and P. Ermanni 2005 , *Development of CFRP racing motorcycle rims using a heuristic evolutionary algorithm approach*
- [2]. Steven Coons, Raymon Gallé, Bryan GilroySmith, John Nanry 4-17-2007 , *Formula SAE Cast Magnesium Wheels*
- [3]. Thomas D.Gillespie , *Fundamentals of vehicle Dynamics*
- [4]. Brian Beckman 1991 , *The Physics of Racing*
- [5]. Ergin Tonuk, Y. Samin Unlusoy , 13 March 2001 , *Prediction of automobile tire cornering force characteristics by finite element modelling and analysis*
- [6]. John C. Stearns, May 2000, *An investigation of stress and displacement distribution in a aluminium alloy automobile rim*
- [7]. J. Stearns, T. S. Srivatsan, X. Gao, and P. C. Lam, Accepted 9 February 2005 , *Understanding the Influence of Pressure and Radial Loads on Stress and Displacement Response of a Rotating Body: The Automobile Wheel*
- [8]. José Ricardo Tarpani*, Marcelo Tadeu Milan, Dirceu Spinelli, Waldek Wladimir Bose, December 29, 2005, *Mechanical Performance of Carbon-epoxy Laminates Part I: Quasi-static and Impact Bending Properties*
- [9]. Σπανουδάκης Πολυχρόνης, Οκτώβριος 2003, Σχεδίαση νέου μη επανδρωμένου οχήματος κάθετης απογείωσης-προσγείωσης
- [10]. James Hakewill, June 2007, Measuring center-of-gravity height on a Formula Car
- [11]. Bohner Max, Gscheidle Rolf, Keil Wolfgang, Layer Siegfried, Saier Wolfgang, Schmidt Haro, Siegmayer Paul, Wimmer Alois, Zwickel Heinz, Μετάφραση Μελέτης Βούλγαρης, Παναγιώτα Ψαλλίδα, Βιβλιοθήκη του μηχανικού αυτοκινήτων-οχημάτων, Συστήματα αυτοκινήτου 2, 3^η Ελληνική Έκδοση
- [12]. Dymag-Usa Internet Page. [Online]. Available: <http://www.dymag-usa.com/automotive/#technical>
- [13]. Material Property Data. [Online]. Available: <http://www.matweb.com>