



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
*Πολυτεχνική Σχολή*

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΤΡΑΚΙΝΗΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

ΑΧΙΛΛΕΑΣ ΧΕΙΜΩΝΙΔΗΣ

ΑΕΜ 1568

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΓΙΑΓΚΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ 2018



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
*Πολυτεχνική Σχολή*

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΤΡΑΚΙΝΗΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

ΑΧΙΛΛΕΑΣ ΧΕΙΜΩΝΙΔΗΣ

AEM 1568

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΓΙΑΓΚΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΚΟΖΑΝΗ 2018

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός, η μοντελοποίηση και η δυναμική ανάλυση ενός τετρακίνητου ηλεκτρικού οχήματος. Επίσης, για τον τελικό σχεδιασμό του οχήματος, αφού στόχος είναι η παραγωγή ενός πρωτοτύπου, έγινε έρευνα αγοράς για όλα τα απαραίτητα εξαρτήματα της συνολικής κατασκευής.

Ο σχεδιασμός του οχήματος έγινε χρησιμοποιώντας λογισμικό Solidworks. Για το τελικό συναρμολόγημα έγινε σχεδίαση και επεξεργασία όλων των επιμέρους κομματιών του οχήματος και συναρμολόγηση αυτών στο τελικό σχέδιο παραγωγής. Στη συνέχεια έγινε η διακριτοποίηση του οχήματος με χωρικά και επιφανειακά στοιχεία. Η μοντελοποίηση έγινε με χρήση του λογισμικού Ansa και για τη αριθμητική επίλυση χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πακέτο Dynamis. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων (ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές, τάσεις, κτλ.) που προκύπτουν από το υπολογιστικό πακέτο, πραγματοποιείται και απεικονίζεται στο λογισμικό μΕΤΑ post-processor της BETA CAE Systems S.A.

## Abstract

The aim of this dissertation is to design and analyze an all-wheel drive, electric vehicle with four in-wheel motors. To end up with the final production model, a market research was also necessary, in order to find all the components required for the final construction.

Designing of the vehicle was made using computer-aided design (CAD) software. The final assembly was made in Solidworks 2017, after every part of the vehicle was designed and edited properly. The discretization of the model was made with surface and solid elements, using computer-aided engineering (CAE) software, specifically Ansa from BETA CAE Systems S.A. Modeling of the structure was also made in Ansa by adding some NAS elements both for suspension's spring and absorber system and for all joints through parts. The numerical solution of the system came out after using Dynamis (solver) software. Finally, the results of the dynamic analysis are represented via  $\mu$ ETA (post-processor) software from BETA CAE Systems S.A.

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε όλα αυτά τα χρόνια και ήταν δίπλα μου όποτε το είχα ανάγκη. Επίσης τους καθηγητές του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας για την εκπαίδευση και τις γνώσεις που μου προσέφεραν και κυρίως τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου κύριο Δημήτρη Γιαγκόπουλο για τις συμβουλές και την καθοδήγησή του. Ακόμη τους συμφοιτητές και φίλους μου που καθημερινά περνούσαμε τόσες ώρες μαζί. Τέλος, τους ανθρώπους που βρίσκονται δίπλα μου και με βοηθούν ο καθένας με διαφορετικό τρόπο.

# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	3
Abstract.....	4
Ευχαριστίες .....	5
1. Εισαγωγή.....	8
2. Σχεδίαση.....	9
2.1 Σύστημα διεύθυνσης .....	9
2.2 Σασί .....	10
2.3 Κάθισμα .....	11
2.4 Ηλεκτρικό σύστημα .....	11
2.5 Σύστημα κίνησης .....	12
2.6 Σύστημα ανάρτησης.....	13
2.7 Μεταξόνιο - Μετατρόχιο .....	15
2.8 Γωνίες Caster, Camber και κλίση βασιλικού πύρου.....	16
3. Ανάλυση.....	18
3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων .....	18
3.2 Διακριτοποίηση γεωμετρίας.....	21
3.3 Μοντελοποίηση οχήματος .....	24
4. Επίλυση .....	31
4.1 Εξίσωση κίνησης ταλαντωτικού συστήματος.....	31
4.2 Επίλυση ιδιοπροβλήματος .....	32
4.3 Δυναμική επίλυση με διέγερση εδάφους .....	35
4.4 Μελέτη κόπωσης .....	38
5. Αποτελέσματα.....	41
5.1 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης.....	41

5.2 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης.....	46
5.3 Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης.....	46
5.4 Αποτελέσματα μελέτης κόπωσης.....	48
6. Συμπεράσματα .....	50
Βιβλιογραφία .....	51

## 1. Εισαγωγή

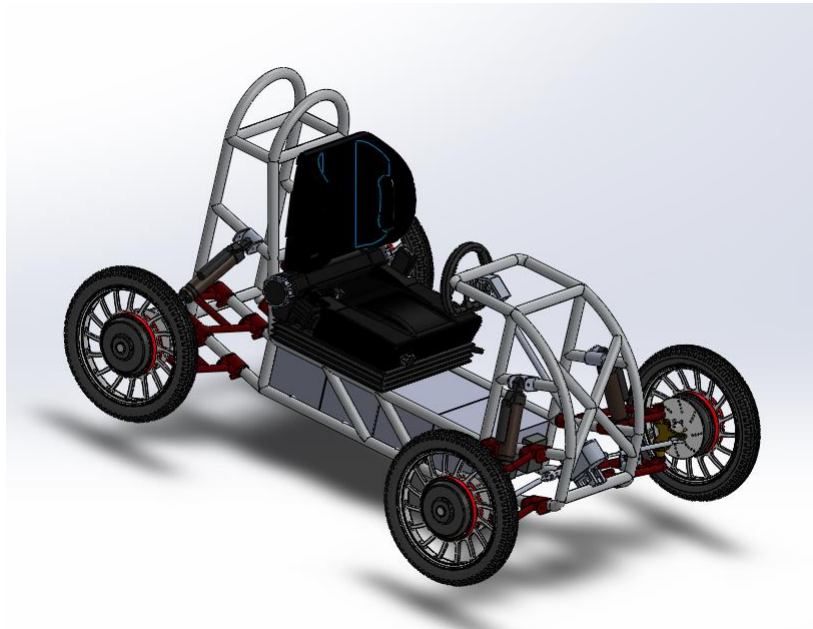
Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι πλέον κομμάτι της καθημερινότητας αφού ολοένα και περισσότερες εταιρίες συγκαταλέγουν στη γκάμα τους ηλεκτροκίνητα οχήματα, ενώ άλλες παράγουν αποκλειστικά τέτοια. Υπάρχει ωστόσο η ανάγκη για ηλεκτρικά οχήματα που να μπορούν να κινηθούν και εκτός δρόμου. Κατά καιρούς έχουν κυκλοφορήσει κάποια μοντέλα των οποίων όμως οι τιμές δεν ήταν προσιτές στο ευρύ κοινό.

Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζεται η σχεδιομελέτη ενός τετρακίνητου ηλεκτρικού οχήματος. Σε κάθε κεφάλαιο αναλύεται και ένα στάδιο ανάπτυξης του προϊόντος. Έτσι στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται το θέμα και ο σκοπός της μελέτης. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της διαδικασίας σχεδίασης και δημιουργίας του ψηφιακού μοντέλου του οχήματος, με τα συστήματα μοντελοποίησης με υπολογιστή (Computer Aided Design-CAD). Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται χρήση και επεξεργασία του σχεδίου, με σκοπό την ανάλυση της κατασκευής μετά την διακριτοποίηση και μοντελοποίησή της σε συστήματα μοντελοποίησης και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Computer Aided Engineering-CAE, Finite Element Method-FEM). Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος της αριθμητικής επίλυσης του μοντέλου χρησιμοποιώντας το λογισμικό επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων, Dynamis (solver). Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ιδιομορφικής και της δυναμικής ανάλυσης με χρήση του λογισμικού μΕΤΑ (post-processor). Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.



## 2. Σχεδίαση

Η σχεδίαση μίας κατασκευής γίνεται σε λογισμικά CAD (Computer-aided design) (1). Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την σχεδίαση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε λογισμικό Solidworks 2017. Κάποια από τα μέρη του σχεδίου όπως οι τροχοί, οι αναρτήσεις το κάθισμα και το τιμόνι δεν σχεδιάστηκαν εξ αρχής αλλά έγινε λήψη των σχεδίων τους από την βιβλιοθήκη του GrabCAD (2), μιας διαδικτυακής κοινότητας ανταλλαγής σχεδίων. Το σασί του οχήματος και τα ψαλίδια των αναρτήσεων σχεδιάστηκαν εξ ολοκλήρου στο Solidworks.



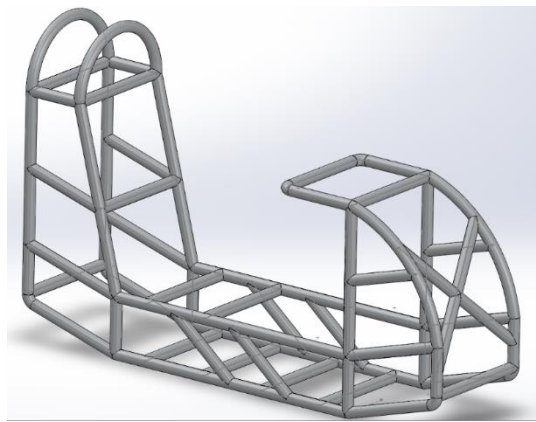
*Σχήμα 2.1*

### 2.1 Σύστημα διεύθυνσης

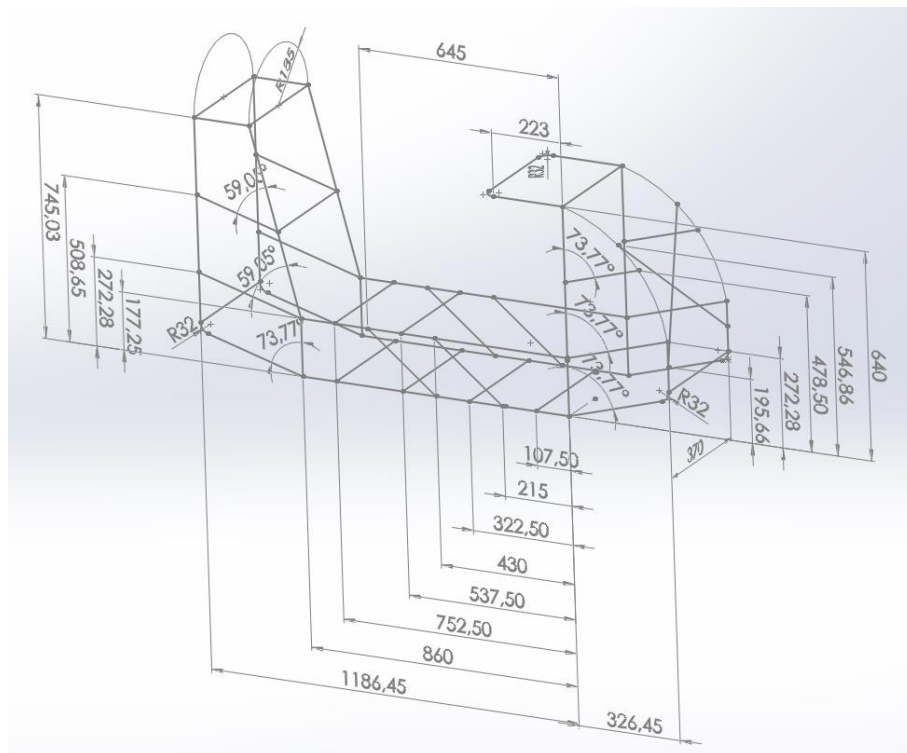
Το σύστημα διεύθυνσης που χρησιμοποιείται είναι πολύ απλό στην κατασκευή του. Το τιμόνι συνδέεται με τον άξονα διεύθυνσης που καταλήγει σε έναν οδοντωτό τροχό ο οποίος συνδέεται με ένα δεύτερο οδοντωτό τροχό που με τη σειρά του συνδέεται με τον οδοντωτό κανόνα. Στις άκρες του οδοντωτού κανόνα βρίσκονται οι σφαιρικοί σύνδεσμοι οι οποίοι μεταφέρουν την κίνηση των προαναφερθέντων μερών στους βραχίονες των τροχών.

## 2.2 Σασί

Το σασί αποτελείται από σωλήνες κυκλικής διατομής με εσωτερική και εξωτερική διάμετρο 25.7 και 33.7 mm αντίστοιχα (σχήμα 2.2-2.3). Για την σχεδίαση του πλαισίου στο Solidworks αρχικά έγινε το τρισδιάστατο σχέδιο της πορείας όλων των σωλήνων που απαρτίζουν το πλαίσιο και στη συνέχεια η δημιουργία των σωλήνων με την επιθυμητή διατομή (Weldments>Structural Member). Για τις αποστάσεις λήφθηκε υπόψη τόσο η εργονομία του οχήματος όσο και η οδηγική συμπεριφορά για μετακινήσεις εντός αλλά και εκτός δρόμου.



Σχήμα 2.2: Πλαίσιο



Σχήμα 2.3: Σκαρίφημα πλαισίου

## 2.3 Κάθισμα

Το κάθισμα που υπάρχει στο μοντέλο είναι της Toyota και χρησιμοποιείται στη σειρά των ανυψωτικών οχημάτων της εταιρίας (σχήμα 2.4). Δεν είναι τόσο ελαφρύ όσο ένα αγωνιστικό κάθισμα τύπου bucket, αλλά είναι καλής ποιότητας κατασκευή, με άνετο κάθισμα και πολλές ρυθμίσεις όπως για την κλίση της πλάτης, το ύψος αλλά και την σκληρότητα της ενσωματωμένης ανάρτησης που διαθέτει. Επίσης έχει ζώνη και μικρό αποθηκευτικό χώρο στην πλάτη.

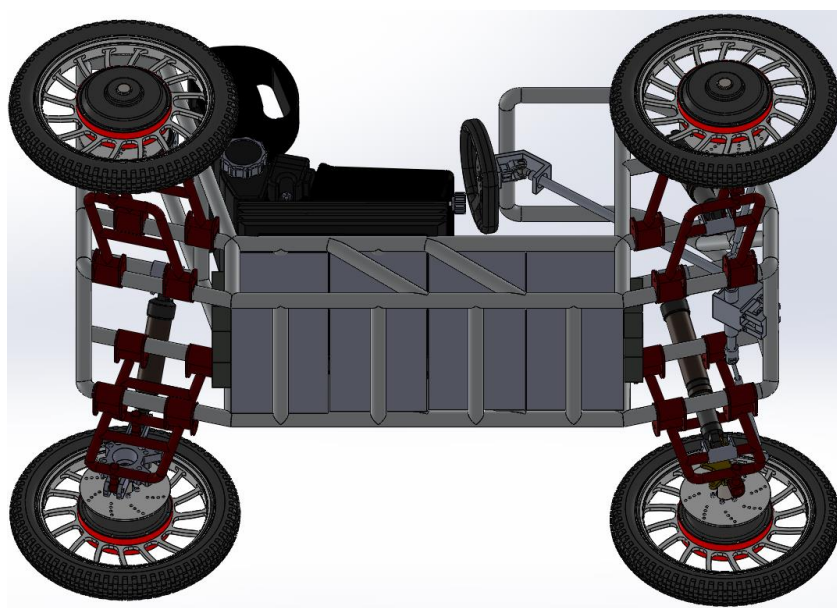


*Σχήμα 2.4: Κάθισμα*

## 2.4 Ηλεκτρικό σύστημα

Η τροφοδοσία του συστήματος γίνεται με τέσσερις μπαταρίες μολύβδου τύπου AGM, 12V C20 125Ah Tianneng EV1500 συνδεδεμένες σε σειρά. Κάθε μπαταρία ζυγίζει 32.1kg και η συστοιχία τους είναι τοποθετημένη κάτω από το κάθισμα του οδηγού (σχήμα 2.5). Στην μπαταρία συνδέονται παράλληλα οι τέσσερις Kelly controller QSKBS48051X, ένας για κάθε τροχό. Στο τιμόνι έχει τοποθετηθεί σύστημα γκαζιού thumb throttle στο δεξί χέρι του οδηγού, για ευκολία στην οδήγηση χωρίς κινήσεις των ποδιών. Όσο για το σύστημα πέδησης όταν αφήνεται το γκάζι το όχημα επιβραδύνει όπως σε ένα ομαλό φρενάρισμα, οι ηλεκτροκινητήρες μετατρέπονται σε γεννήτριες και ανακτούν μέρος της κινητικής ενέργειας του οχήματος γεμίζοντας τις μπαταρίες. Ωστόσο

στο αριστερό χέρι του οδηγού υπάρχει και συμβατικό φρένο που μπορεί να μην χρειαστεί κατά την οδήγηση αλλά είναι απαραίτητο σε ένα απότομο φρενάρισμα.



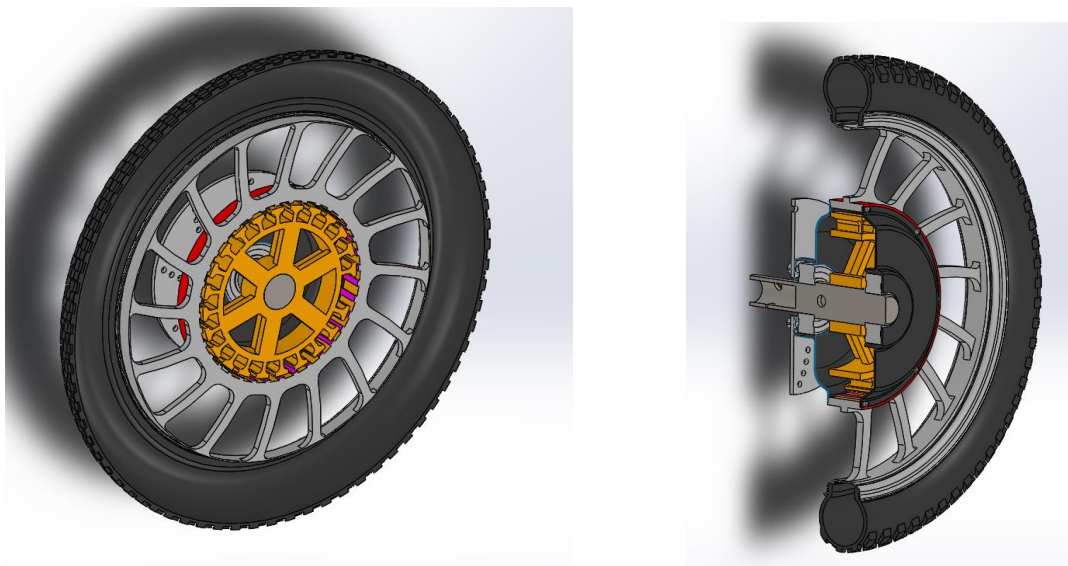
Σχήμα 2.5: Κάτω μέρος οχήματος με συστοιχία μπαταριών

Η αυτονομία του οχήματος εξαρτάται κυρίως από τις μπαταρίες και τους ηλεκτροκινητήρες που έχουν επιλεγθεί. Έτσι, οι τέσσερις μπαταρίες των 12V με χωρητικότητα 125Ah συνδεδεμένες σε σειρά αποδίδουν μια συστοιχία 48V και ενέργεια 6 kWh. Ο ηλεκτροκινητήρας του κάθε τροχού είναι 500W οπότε οι συνολικές απαιτήσεις ανέρχονται στα 2kW, πράγμα που σημαίνει ότι το όχημα θα είχε μια αυτονομία 3 ωρών αν δεν υπήρχε το σύστημα ανάκτησης ενέργειας. Το ποσοστό της ενέργειας που ανακτάται μπορεί να φτάσει το 70% (3), άρα η τελική αυτονομία μπορεί να αγγίξει τις 5 ώρες.

## 2.5 Σύστημα κίνησης

Οι τροχοί είναι της εταιρίας QS MOTOR, έχουν διάμετρο 20 ίντσες και είναι συνδεδεμένοι με τους controllers. Για την κίνηση του οχήματος κάθε τροχός έχει ενσωματωμένο ηλεκτροκινητήρα (σχήμα 2.6) του οποίου τα κύρια χαρακτηριστικά φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 1.1). Ο ηλεκτροκινητήρας είναι σύγχρονος κινητήρας

συνεχούς ρεύματος (4). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται κίνηση και στους τέσσερις τροχούς χωρίς να υπάρχουν άξονες μετάδοσης κίνησης, κιβώτια ταχυτήτων και διαφορικά συστήματα. Επίσης η απουσία αξόνων επιτρέπει στο σύστημα ανάρτησης του κάθε τροχού να είναι ανεξάρτητο.



Σχήμα 2.6: Τροχοί οχήματος με ενσωματωμένους ηλεκτροκινητήρες



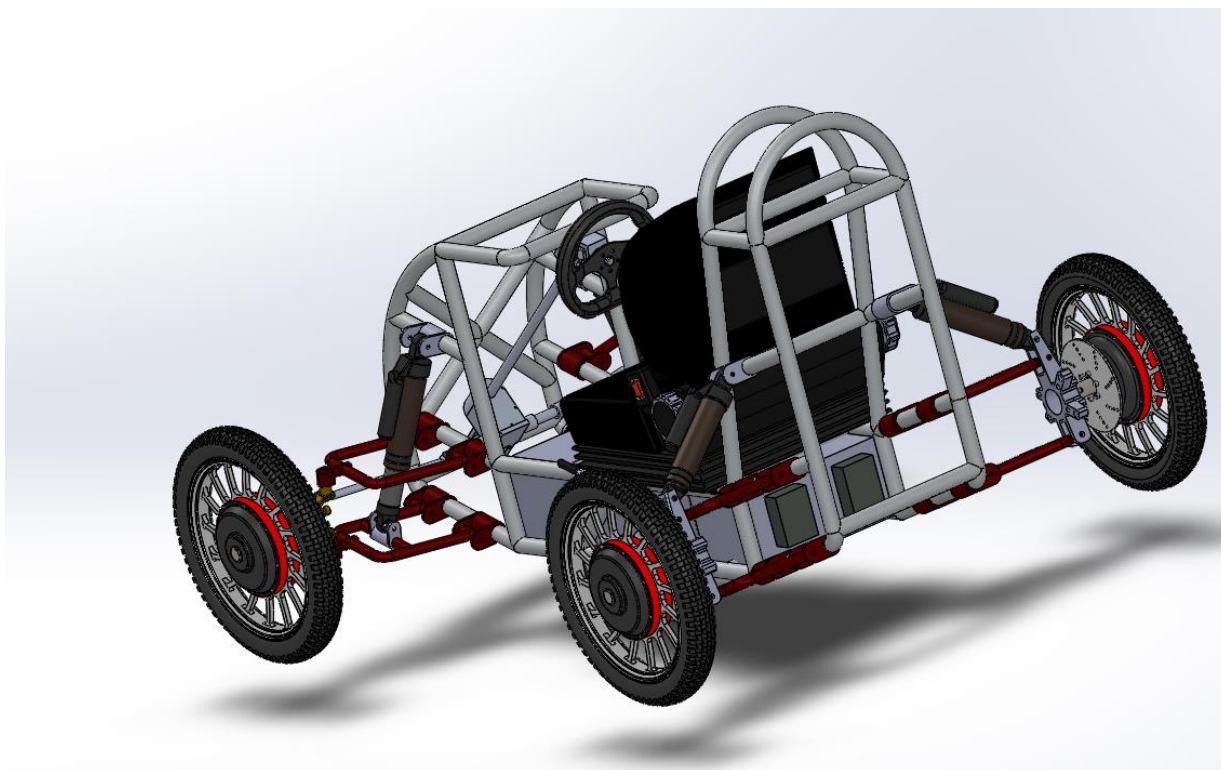
Πίνακας 1.1

<b>Βασικά χαρακτηριστικά ηλεκτροκινητήρων</b>	
<b>Power</b>	500 W
<b>Magnet</b>	27 H
<b>Battery current</b>	30 A
<b>Speed @48V</b>	20-40 km/h
<b>Torque</b>	72 N/m

## 2.6 Σύστημα ανάρτησης

Η ανάρτηση του κάθε τροχού γίνεται με δύο ψαλίδια το πάνω και το κάτω «Double Wishbone Independent Suspension» (5). Τα ψαλίδια είναι βραχίονες με εξωτερική και εσωτερική διάμετρο 21.3 και 16.5 mm αντίστοιχα. Η βάση του κάθε ψαλιδιού έχει δύο σκέλη που συνδέονται αρθρωτά σε σταθερό σημείο του πλαισίου, ενώ

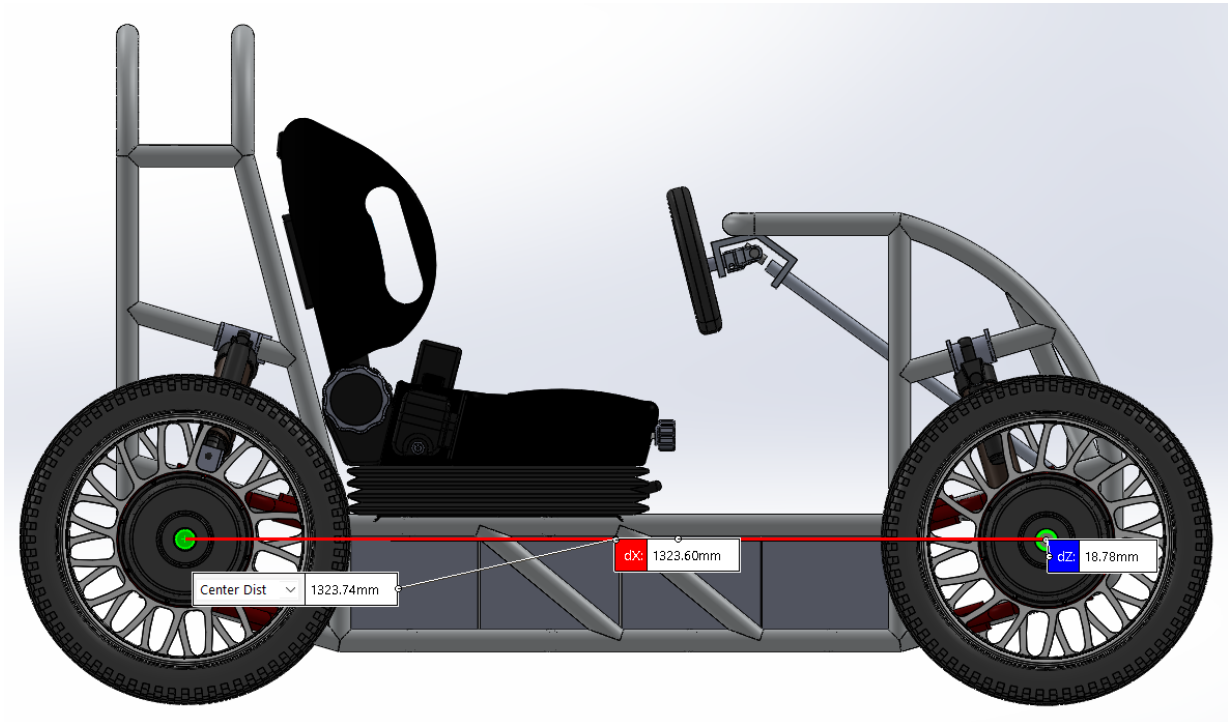
η κορυφή συνδέεται επίσης με άρθρωση με την άρθρωση του τροχού. Αν πρόκειται για μπροστινό τροχό τότε η άρθρωση στην κορυφή των ψαλιδιών δεν είναι στον οριζόντιο άξονα της ανάρτησης αλλά στον κάθετο, ώστε να μπορεί να στρίβει ο τροχός.



Σχήμα 2.7

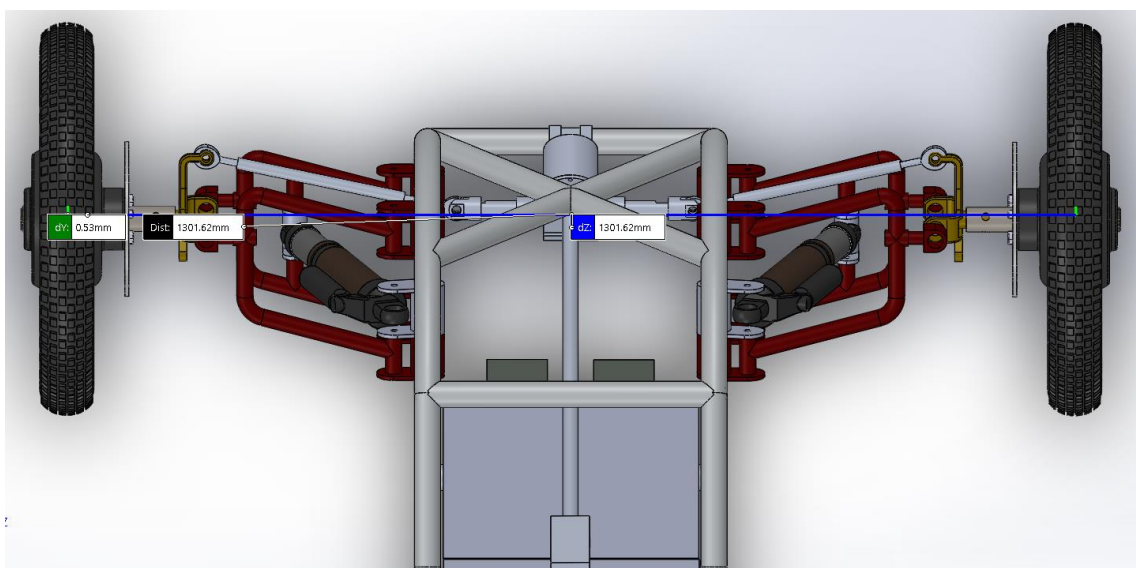
Η ανάρτηση διαχωρίζει τις αναρτημένες (σασί, κάθισμα, μπαταρίες, σύστημα διεύθυνσης, κτλ.) από τις μη αναρτημένες μάζες (τροχοί, ηλεκτροκινητήρες, δισκόφρενα, κτλ.) του οχήματος. Για να γίνει αυτό τα ψαλίδια της κάθε ανάρτησης συνδέονται με το πλαίσιο σε σταθερό σημείο μέσω ελατηρίων και αποσβεστήρων «αμορτισέρ». Στο σχέδιο έχουν τοποθετηθεί πνευματικές αναρτήσεις Fox Float3 Evol. Το βασικό χαρακτηριστικό των πνευματικών αναρτήσεων είναι ότι έχουν ένα κύκλωμα αέρα υπό πίεση, που τροφοδοτείται από ένα ηλεκτρικό συμπιεστή αέρα και ρυθμίζει τόσο τη σκληρότητα όσο και το ύψος του αέρα που παίζει το ρόλο των ελατηρίων. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τις αναρτήσεις ιδανικές για το όχημα αφού αυτές μπορούν να είναι μαλακές, με μεγάλη διαδρομή και ύψος εκτός δρόμου, αλλά και πιο σκληρές με μικρότερο ύψος εντός του δρόμου. Βέβαια το κόστος των συγκεκριμένων αναρτήσεων είναι αρκετά υψηλό οπότε στόχος είναι να τοποθετηθούν στο όχημα συμβατικές αναρτήσεις (coilover shock absorber) με βέλτιστη στιβαρότητα και συντελεστή απόσβεσης που θα προκύψουν από την ανάλυση του μοντέλου στο επόμενο κεφάλαιο.

## 2.7 Μεταξόνιο - Μετατρόχιο



Σχήμα 2.8: Μεταξόνιο οχήματος

Το μεταξόνιο του οχήματος είναι 1323.60mm (σχήμα 2.8) ενώ το μετατρόχιο είναι 1301,62mm και 1282,84mm για τον εμπρόσθιο και τον πίσω άξονα αντίστοιχα (σχήμα 2.9). Το μικρό μεταξόνιο του οχήματος καθιστά ευκολότερους τους ελιγμούς και το πλατύτερο μετατρόχιο παρέχει βελτιωμένη συγκράτηση στο δρόμο κατά την κίνηση σε στροφή. Το αποτύπωμα του οχήματος προσδιορίζεται από αυτές τις δύο αποστάσεις και η μεταξύ τους σχέση είναι καθοριστική για την οδηγική συμπεριφορά.

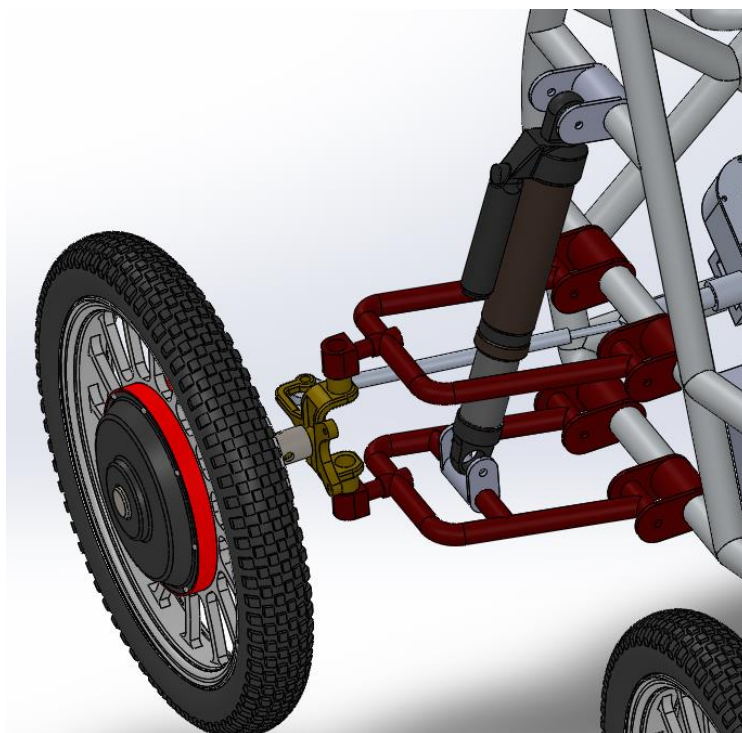


Σχήμα 2.9: Μετατρόχιο οχήματος

## 2.8 Γωνίες Caster, Camber και κλίση βασιλικού πύρου

Το όχημα έχει σχεδιαστεί με θετική γωνία Caster, δηλαδή το σημείο επαφής του τροχού είναι πίσω από την τομή του άξονα διεύθυνσης με το οδόστρωμα. Οι τροχοί έλκονται από τη θετική γωνία Caster και αυτό βοηθά στη σταθεροποίησή τους. Η θετική Caster προσφέρει ευστάθεια και καλύτερη κατευθυντικότητα, ενώ τείνει να επαναφέρει τους τροχούς στην ευθεία θέση μετά από στροφή. Η στροφή των τροχών ανυψώνει το σώμα του οχήματος στο εσωτερικό μιας στροφής και το χαμηλώνει στο εξωτερικό της στροφής. Αυτό καταλήγει σε μια ροπή επιστροφής διεύθυνσης μετά την κίνηση σε στροφή. Παράγεται επίσης μια αρνητική γωνία Camper στον τροχό στο εξωτερικό μιας στροφής.

Η γωνία Camper είναι η γωνία που σχηματίζεται από το επίπεδο του τροχού και το κάθετο προς το έδαφος επίπεδο. Το όχημα έχει σχεδιαστεί με μηδενική γωνία Camper για την ομαλή φθορά των ελαστικών, ωστόσο λόγω της μεγάλης διαδρομής της ανάρτησης σε διαδρομές που απαιτείται μεγαλύτερο ύψος αμαξώματος μπορεί να δημιουργηθεί θετική γωνία Camper. Σε αυτή την περίπτωση οι τροχοί, λόγω του φαινομένου του κώνου που δημιουργείται, τείνουν να περιστραφούν προς τα έξω κάτι που μπορεί να αποφευχθεί με μεγαλύτερη κλίση βασιλικού πύρου.



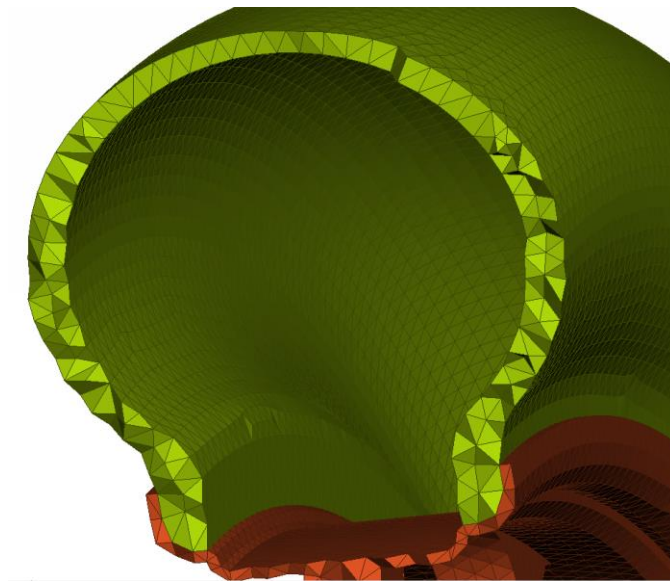
Σχήμα 2.10: Μπροστινό σύστημα ανάρτησης



Η κλίση του βασιλικού πύρου είναι η γωνία που σχηματίζεται από τον άξονα διεύθυνσης του τροχού και την κάθετο στην επιφάνεια του δρόμου. Γωνίες βασιλικού πύρου  $5^{\circ}$  έως  $10^{\circ}$  συνηθίζονται (6). Η απόκλιση βασιλικού πύρου «offset», είναι η απόσταση από το κέντρο του πέλματος του ελαστικού και την προέκταση του άξονα διεύθυνσης με την επιφάνεια του δρόμου. Η κλίση του βασιλικού πύρου, η γωνία Camper αλλά και το ύψος των τροχών επηρεάζουν αυτή την απόσταση. Στο σχέδιο προκύπτει μια θετική απόκλιση βασιλικού πύρου που όταν οι τροχοί γυρίζουν αναγκάζει το όχημα να σηκωθεί στο εμπρόσθιο, ενώ το βάρος του οχήματος δημιουργεί ροπή, η οποία επαναφέρει τους τροχούς αυτόματα στην ομαλή ευθεία θέση οδήγησης.

### 3. Ανάλυση

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος ανάλυσης του σχεδίου που προκύπτει από τα λογισμικά CAD (Computer-aided design) σε λογισμικό CAE (Computer-aided engineering) Ansa της BETA CAE Systems S.A.. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η διαδικασία διακριτοποίησης της γεωμετρίας και η συνολική μοντελοποίηση του οχήματος.



Σχήμα 3.1

#### 3.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM: Finite Element Method) είναι μια αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων πρωτοπαρουσιάστηκε περίπου το χίλια εννιακόσια πενήντα (1950) και η ανάπτυξη και επιτυχία της εξαρτήθηκε από τη διάδοση του ψηφιακού υπολογιστή, ωστόσο η ιδέα της τμηματικής προσέγγισης προϋπήρχε.

Οι αυξημένες απαιτήσεις των σύγχρονων κανονισμών καθιστούν σχεδόν αδύνατη την επίλυση φορέων χειροκίνητα, χρησιμοποιώντας τις κλασικές μεθόδους ανάλυσης. Έτσι, ο σύγχρονος μελετητής μηχανικός, χρησιμοποιεί σχεδόν αποκλειστικά για την ανάλυση

ακόμη και των πιο απλών φορέων, λογισμικά που βασίζονται στις μητρικές μεθόδους ανάλυσης κατασκευών. Τα λογισμικά αυτά, γνωστά ως FEA (Finite Element Analysis) βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, που αντιμετωπίζει με ενιαίο τρόπο σύνθετα προβλήματα ανάλυσης φορέων οποιασδήποτε μορφής.

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA) είναι η μοντελοποίηση προϊόντων σε ένα εικονικό περιβάλλον, με σκοπό την εξεύρεση και επίλυση πιθανών δομικών προβλημάτων. Έτσι κατά την φάση σχεδιασμού ενός προϊόντος μπορεί να ελεγχθεί και να αξιολογηθεί, πριν την παραγωγή του, το τελικό προϊόν. Οι σχετικές τροποποιήσεις αφορούν κυρίως στον καθορισμό του σχήματος (γεωμετρία) έτσι ώστε αυτό να είναι λειτουργικό, ανθεκτικό, ελαφρύ και στιβαρό, καθώς επίσης και στην επιλογή του υλικού (ενός ή περισσότερων) με τρόπο τέτοιο ώστε να εξασφαλίζεται η δομική ακεραιότητα κατά τη λειτουργία του. Στο παρελθόν, για την επιβεβαίωση κάθε ιδέας έπρεπε να κατασκευαστούν αντίστοιχα πρωτότυπα μοντέλα και να υποβληθούν σε ανάλογες μηχανικές καταπονήσεις (πειραματικές δοκιμές) ενώ σήμερα η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών με τα κατάλληλα λογισμικά FEA παρέχει ένα ισχυρότατο εναλλακτικό εργαλείο ανάλυσης (7).

Ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει ένα σύστημα σημείων που ονομάζονται κόμβοι. Οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους με στοιχεία (elements), που σχηματίζουν το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και περιέχουν τις υλικές και δομικές ιδιότητες του μοντέλου, καθορίζοντας τον τρόπο με τον οποίο αυτό θα αντιδράσει σε ορισμένες συνθήκες. Η πραγματική μεταβολή μιας μεταβλητής όπως για παράδειγμα της μετατόπισης, της καταπόνησης, της θερμοκρασίας, της πίεσης και της ταχύτητας δεν είναι απολύτως γνωστή μέσα στο σύνολο της γεωμετρίας. Για αυτό γίνεται η υπόθεση ότι η διακύμανσή της, εντός ενός πεπερασμένου στοιχείου μπορεί να προσεγγιστεί από μια απλή συνάρτηση. Τα μοντέλα παρεμβολής (που είναι οι προσεγγιστικές συναρτήσεις) ορίζονται σε σχέση με τις τιμές των μεταβλητών στους κόμβους. Έτσι, όταν οι εξισώσεις για το σύνολο του συνεχούς είναι γνωστές, οι νέοι άγνωστοι θα είναι οι κομβικές τιμές και η μεταβλητή που διερευνάται. Με την επίλυση των εξισώσεων, οι οποίες έχουν γενική μορφή μητρώων, οι κομβικές τιμές της μεταβλητής που διερευνάται είναι πλέον γνωστές. Μετέπειτα, οι προσεγγιστικές συναρτήσεις καθορίζουν τη μεταβλητή σε όλη την κατασκευή. Ακόμη, η πυκνότητα του πλέγματος πεπερασμένων

στοιχείων μπορεί να ποικίλει σε όλο το υλικό, ανάλογα με την αναμενόμενη μεταβολή των επιπέδων τάσης μιας συγκεκριμένης περιοχής. Οι περιφέρειες που αντιμετωπίζουν μεγάλες μεταβολές στην τάση συνήθως απαιτούν μεγαλύτερη πυκνότητα πλέγματος από αυτές που παρουσιάζουν μικρή ή καθόλου μεταβολή της τάσης. Τα σημεία ενδιαφέροντος μπορεί να περιλαμβάνουν σημεία θραύσης του υλικού όπως γωνίες, σύνθετες περιοχές και περιοχές υψηλής τάσης.

Η λύση ενός γενικότερου συνεχούς προβλήματος, με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, ακολουθεί μία συγκεκριμένη ακολουθία βημάτων:

#### A. Διακριτοποίηση της δομής

Το πρώτο βήμα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι να διαιρεθεί η γεωμετρία της κατασκευής σε στοιχεία (elements), με κατάλληλες αποφάσεις για τον τύπο, την διάταξη, το μέγεθος και τον συνολικό αριθμό των στοιχείων.

#### B. Επιλογή κατάλληλου μοντέλου παρεμβολής ή μετατόπισης

Η επίλυση της μετατόπισης μιας περίπλοκης γεωμετρίας κάτω από οποιεσδήποτε καθορισμένες συνθήκες φόρτισης δεν μπορεί να προβλεφθεί ακριβώς. Έτσι θα πρέπει να γίνει μια υπόθεση για κάποια απλή λύση μέσα σε ένα στοιχείο που να προσεγγίζει την άγνωστη, με την προϋπόθεση ότι συγκλίνει. Σε γενικές γραμμές, η λύση που λαμβάνεται είναι πολυωνυμικής μορφής.

#### C. Παραγωγή μητρώων στιβαρότητας και διανυσμάτων φορτίου του στοιχείου.

Από το θεωρητικό μοντέλο μετατόπισης, το μητρώο στιβαρότητας  $[K^e]$  και το διάνυσμα φορτίου  $\vec{P}^e$  του στοιχείου  $e$ , υπολογίζονται είτε με τη χρήση των συνθηκών ισορροπίας, είτε από μια κατάλληλη μεταβλητή αρχή.

#### D. Λήψη ολικών εξισώσεων ισορροπίας από τη συνάθροιση των εξισώσεων των στοιχείων.

Δεδομένου ότι η κατασκευή αποτελείται από πεπερασμένο αριθμό στοιχείων, τα μητρώα στιβαρότητας και τα διανύσματα φορτίου πρέπει να συναρμολογηθούν σωστά και το σύνολο των εξισώσεων ισορροπίας να είναι διαμορφωμένο ως:

$$[K] * \vec{U} = \vec{P}$$

Όπου  $[K]$  είναι ο πίνακας στιβαρότητας,  $\vec{U}$  το διάνυσμα κομβικών μετατοπίσεων και  $\vec{P}$  το διάνυσμα κομβικών φορτίων για ολόκληρη τη κατασκευή.

E. Επίλυση ως προς τις άγνωστες μετατοπίσεις κόμβων

Κάνοντας εφαρμογή των οριακών συνθηκών για όλες τις εξισώσεις ισορροπίας αυτές μπορούν να εκφραστούν ως:

$$[K] * \vec{U} = \vec{P}$$

Το διάνυσμα  $\vec{U}$  μπορεί να λυθεί πολύ εύκολα για γραμμικά προβλήματα. Ωστόσο, για μη γραμμικά προβλήματα ακολουθείται μια αλληλουχία βημάτων με μεταβολή του μητρώου στιβαρότητας  $[K]$  ή/και του διανύσματος φορτίου  $\vec{P}$ .

F. Υπολογισμός καταπονήσεων και παραμορφώσεων των στοιχείων

Από τις γνωστές κομβικές μετατοπίσεις  $\vec{U}$ , είναι εφικτό να υπολογιστούν οι καταπονήσεις και οι παραμορφώσεις των στοιχείων, με χρήση των απαραίτητων εξισώσεων των στερεών ή της μηχανικής των κατασκευών.

### 3.2 Διακριτοποίηση γεωμετρίας

Το πρώτο βήμα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, είναι η διακριτοποίηση της γεωμετρίας με απώτερο σκοπό την διαίρεση της περιοχής σε μικρότερες, γνωστά ως πεπερασμένα στοιχεία. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη για να μειωθούν οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος, σε ένα πιο διαχειρίσιμο πεπερασμένο εύρος. Υπάρχει μια ποικιλία μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, με την κάθε μέθοδο διαίρεσης του χώρου να συνεπάγεται διαφορετικός χρόνος υπολογισμού και διαφορετικές προσεγγίσεις στην λύση του προβλήματος.

Η επιλογή για το σχήμα, το μέγεθος και για τις διαμορφώσεις των στοιχείων είναι μια πολύ σημαντική παραδοχή, καθώς από την επιλογή αυτή κρίνεται το πόσο καλά θα προσομοιώνεται το αρχικό μοντέλο και ποιος θα είναι ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος για τη λύση. Η εμπειρία που έχει ο μελετητής μηχανικός, παίζει σημαντικό ρόλο

στην ορθή επιλογή. Ωστόσο, η επιλογή του τύπου του στοιχείου εξαρτάται κυρίως από τη γεωμετρία του μοντέλου και τον αριθμό των ανεξάρτητων συντεταγμένων που χρειάζονται για την περιγραφή του μοντέλου. Στην περίπτωση που οι ιδιότητες και η μεταβλητή πεδίου ενός μοντέλου μπορούν να περιγραφούν με όρους μόνο μίας χωρικής συντεταγμένης, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν μονοδιάστατα ή γραμμικά στοιχεία. Στα μονοδιάστατα στοιχεία υπάρχουν δύο κόμβοι, ένας σε κάθε άκρο, με την μεταβλητή πεδίου να επιλέγεται ως άγνωστος (βαθμός ελευθερίας).

Στην περίπτωση που για την περιγραφή τους χρειάζονται δύο όροι ανεξάρτητων χωρικών συντεταγμένων χρησιμοποιούνται δισδιάστατα στοιχεία, με βασικό στοιχείο που χρησιμοποιείται στη δισδιάστατη ανάλυση να είναι το τριγωνικό στοιχείο. Ωστόσο, ένα τετράπλευρο στοιχείο σε μερικές περιπτώσεις παρουσιάζει πλεονεκτήματα παρά το γεγονός ότι μπορεί να ληφθεί από την ένωση δύο ή τεσσάρων τριγωνικών στοιχείων. Στην περίπτωση που για την περιγραφή της γεωμετρίας, των ιδιοτήτων των υλικών, καθώς και άλλων παραμέτρων του μοντέλου χρειάζονται τρεις ανεξάρτητες χωρικές μεταβλητές, χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα στοιχεία. Βασικό στοιχείο στην περίπτωση αυτή είναι το τετραεδρικό στοιχείο.

Μετά από την επιλογή του βασικού στοιχείου πρέπει να γίνει το πλέγμα. Το πόσο πυκνό πλέγμα θα έχει μια περιοχή εξαρτάται από τη γεωμετρία και την επιθυμητή ακρίβεια λύσης, έτσι ώστε να μην υπάρχει επιβάρυνση του λογισμικού επίλυσης, καθώς η ακρίβεια της λύσης δεν αυξάνει σημαντικά μετά από ένα συγκεκριμένο πλήθος στοιχείων.

Με βάση το σύνολο των στοιχείων που θα τοποθετηθούν ανά περιοχή, γίνεται αναθεώρηση του πλέγματος για να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Βελτίωση των αποτελεσμάτων υπάρχει όταν δημιουργείται πυκνό πλέγμα στις περιοχές με υψηλή μεταβολή των παραμέτρων που αναζητούνται (ιδιοσυχνότητες, τάσεις, κτλ.). Με συνεχή τροποποίηση του πλέγματος κατορθώνεται να υπάρχει ακριβής λύση μέσα από τα λογισμικά FEA. Η εξακρίβωση της σύγκλισης σε μια λύση, μπορεί να επιβεβαιωθεί εάν στις περιοχές με υψηλή τάση τροποποιηθεί το πλέγμα έτσι ώστε να γίνει πιο πυκνό και η μεταβολή της τάσης σε σχέση με το προηγούμενο είναι μικρή. Οι κύριοι τρόποι παραγωγής πλέγματος είναι τρεις:

1. Χειροκίνητη δημιουργία πλέγματος (Manually)

Ο χειροκίνητος τρόπος δημιουργίας πλέγματος είναι η παλιότερη μέθοδος που χρησιμοποιούνταν για την ανάλυση FEA. Η μέθοδος αυτή είναι κοπιαστική και χρησιμοποιείται πολύ σπάνια εκτός από την περίπτωση κάποιων ειδικών περιοχών της κατασκευής που χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια.

## 2. Ημιαυτόματη δημιουργία πλέγματος

Στα σύγχρονα λογισμικά υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας πλέγματος αφού πρώτα ο μελετητής έχει ορίσει κάποιες αυστηρά ορισμένες οριακές συνθήκες. Επειδή είναι αναγκαίος ο ορισμός των οριακών συνθηκών από το μελετητή, η τεχνική αυτή θεωρείται ημιαυτόματη.

## 3. Πλήρως αυτοματοποιημένη δημιουργία πλέγματος

Τα περισσότερα λογισμικά FEA που υπάρχουν στην αγορά, έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να έχουν την δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας πλέγματος και αυτοπροσαρμοζόμενη τελειοποίηση του πλέγματος (mesh refinement). Με τα λογισμικά αυτά επιτυγχάνεται να μειωθεί σημαντικά ο προ-επεξεργαστικός χρόνος και να υπάρχει ένα καλό τελικό δομημένο πλέγμα FEA.

Παρόλο που τα λογισμικά FEA έχουν εξελιχθεί πάρα πολύ, η επέμβαση του μελετητή στην δημιουργία πλέγματος είναι απαραίτητη, ειδικά στην περίπτωση που υπάρχουν οπές, στρογγυλέματα και αιχμηρές ακμές. Επίσης, όπως έχει προαναφερθεί η εμπειρία του μελετητή παίζει σημαντικό ρόλο για την γρηγορότερη επίλυση του προβλήματος και την ελαχιστοποίηση της απόκλισης ανάμεσα στο θεωρητικό και το πραγματικό μοντέλο.

Ακόμη, για την ολοκλήρωση της δημιουργίας πλέγματος θα πρέπει να γίνει επιλογή του τύπου, του μεγέθους και του αριθμού των στοιχείων, καθώς και της θέσης των κόμβων.

### 1. Τύπος στοιχείων

Η επιλογή του τύπου των στοιχείων συχνά είναι εμφανής από την γεωμετρία του εξαρτήματος, αυτό όμως δεν συμβαίνει πάντα. Ορισμένα εξαρτήματα δεν μπορούν να

αναπαρασταθούν ως ένα σύνολο από στοιχεία ενός μόνο τύπου και έτσι είναι απαραίτητη η χρήση δύο ή περισσότερων τύπων στοιχείων.

## 2. Μέγεθος στοιχείων

Το μέγεθος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθεί παίζει καθοριστικό ρόλο, καθώς σχετίζεται άμεσα με την ακρίβεια της λύσης και τον υπολογιστικό χρόνο. Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των στοιχείων τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια της λύσης.

## 3. Αριθμός των στοιχείων

Μεγαλύτερος αριθμός στοιχείων σημαίνει μεγαλύτερη ακρίβεια στην λύση. Όμως μετά από έναν ορισμένο αριθμό στοιχείων η ακρίβεια δεν παρουσιάζει σημαντική βελτίωση. Ακόμη, ο αριθμός των στοιχείων καθορίζει τους βαθμούς ελευθερίας και τα μητρώα του προβλήματος με ότι αυτό συνεπάγεται για τον συνολικό χρόνο επίλυσης του μοντέλου.

## 4. Θέση των κόμβων

Οι κόμβοι ξεκινούν από κάποια εξωτερικά σημεία και ανάλογα με το μέγεθος των στοιχείων μοιράζονται σε όλο το μοντέλο. Στην περίπτωση που το εξάρτημα δεν έχει απότομες αλλαγές στη γεωμετρία, στις ιδιότητες των υλικών και στις εξωτερικές συνθήκες, οι κόμβοι μπορούν να μοιραστούν ομοιόμορφα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους.

### 3.3 Μοντελοποίηση οχήματος

Η μοντελοποίηση μιας κατασκευής γίνεται σε λογισμικό CAE (Computer-aided engineering) μετά τον σχεδιασμό της σε λογισμικό CAD. Για το όχημα το λογισμικό CAE που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Ansa της BETA CAE Systems S.A. Μετά τον σχεδιασμό του οχήματος έγινε εισαγωγή του τελικού αρχείου στο Ansa για τροποποιήσεις του μοντέλου και τυχόν αλλαγές στην γεωμετρία.

Στη διαδικασία της μοντελοποίησης ο μελετητής πρέπει να πάρει κάποιες κρίσιμες αποφάσεις σχετικά με τον τρόπο διακριτοποίησης αλλά και με το αν θα χρησιμοποιηθούν επιφανειακά ή χωρικά στοιχεία κάτι που εξαρτάται από την πολυπλοκότητα της



γεωμετρίας. Έτσι σε στερεά απλής γεωμετρίας με σταθερό και μικρό σε σχέση με το μήκος τους πάχος, συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται επιφανειακά στοιχεία πλέγματος και να ορίζεται σε αυτά το επιθυμητό πάχος. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται τα συνολικά στοιχεία του μοντέλου και κατά συνέπεια και ο συνολικός χρόνος επεξεργασίας χωρίς να υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις στην ανάλυση από τα αντίστοιχα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας χωρικά στοιχεία. Στη μοντελοποίηση του οχήματος στο σασί και στα ψαλίδια των αναρτήσεων επιλέχθηκε να γίνει διακριτοποίηση με επιφανειακά τριγωνικά στοιχεία ενώ στα υπόλοιπα μέρη του σχεδίου με χωρικά τετραεδρικά στοιχεία (tetraFEM). Το πλήθος και το είδος των στοιχείων παρουσιάζεται παρακάτω (Πίνακας 3.1) αναλυτικά για το κάθε εξάρτημα.

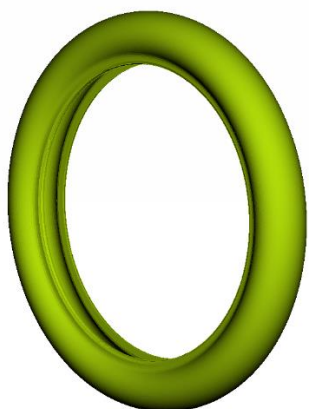
Για να γίνει η παραπάνω διακριτοποίηση απαραίτητο ήταν πρώτα να γίνει καθαρισμός επιφανειών αφού η γεωμετρία του σχεδίου δεν ήταν η τελική γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε στη μοντελοποίηση. Σε όλους τους σωλήνες του σασί και των ψαλιδιών των αναρτήσεων υπήρχε εξωτερική και εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια. Μετά από τροποποιήσεις έμεινε μία επιφάνεια για την τελική διακριτοποίηση.

Επίσης, κάποια από τα μέρη του αρχικού σχεδίου εισαγωγής από το Solidworks έπρεπε να εξαιρεθούν από την ανάλυση αφού αυτή εστιάζει στην αντοχή του οχήματος. Έτσι το κάθισμα, και το σύστημα διεύθυνσης αφαιρέθηκαν από το σχέδιο ενώ τα βάρη τους προστέθηκαν κατανεμημένα στα κατάλληλα στοιχεία για την τελική ανάλυση.

*Πίνακας 3.1: Πλήθος και είδος στοιχείων ανά εξάρτημα.*

<b>Εξάρτημα</b>	<b>Είδος στοιχείων</b>	<b>Πλήθος στοιχείων</b>
<b>Σασί</b>	Επιφανειακά	537.904
<b>Ψαλίδια ανάρτησης</b>	χωρικά	135.286
	Επιφανειακά	81.932
<b>Ελαστικά</b>	Χωρικά	1.050.500
<b>Τροχοί-ηλεκτροκινητήρες</b>	Χωρικά	2.269.064
<b>Αρθρώσεις πλαισίου</b>	Χωρικά	413.706
<b>Αρθρώσεις τροχών</b>	Χωρικά	250.632
<b>Συστοιχία μπαταριών</b>	Χωρικά	3.544
<b>Σύνολο</b>	Επιφανειακά και χωρικά	4.742.568

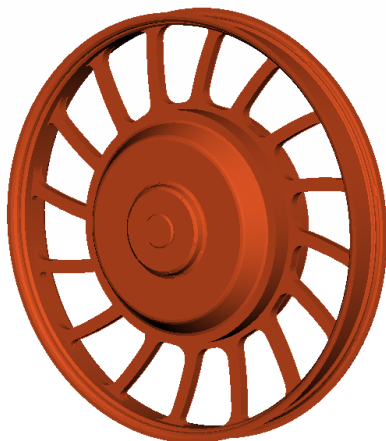
Παρακάτω (σχήμα 3.2-3.21) παρατίθενται τα σχήματα με όλα τα εξαρτήματα του οχήματος σε πεπερασμένα στοιχεία:



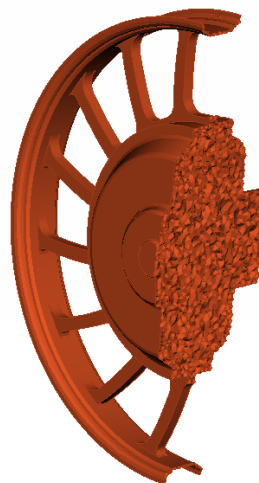
Σχήμα 3.2: Ελαστικό



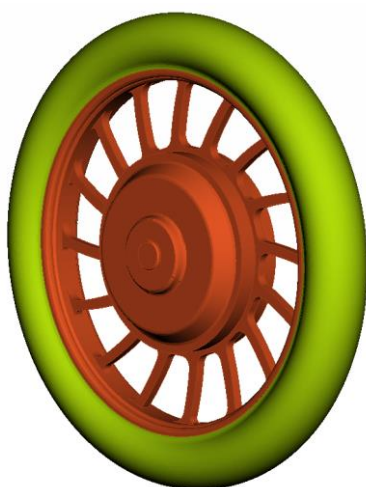
Σχήμα 3.3: Ελαστικό σε τομή



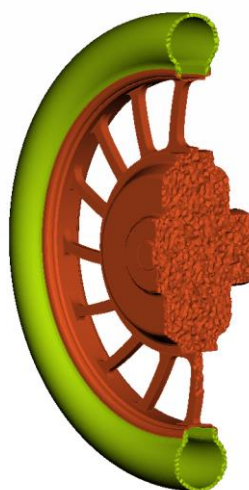
Σχήμα 3.4: Ηλεκτροκινητήρας



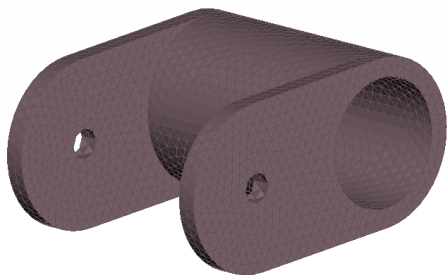
Σχήμα 3.5: Ηλεκτροκινητήρας σε τομή



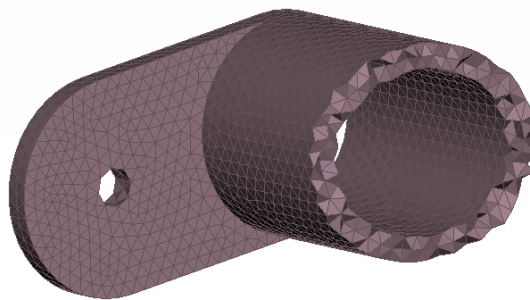
Σχήμα 3.6: Συνολικός τροχός



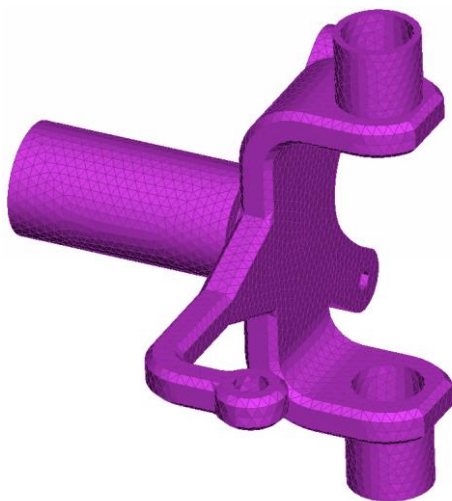
Σχήμα 3.7: Συνολικός τροχός σε τομή



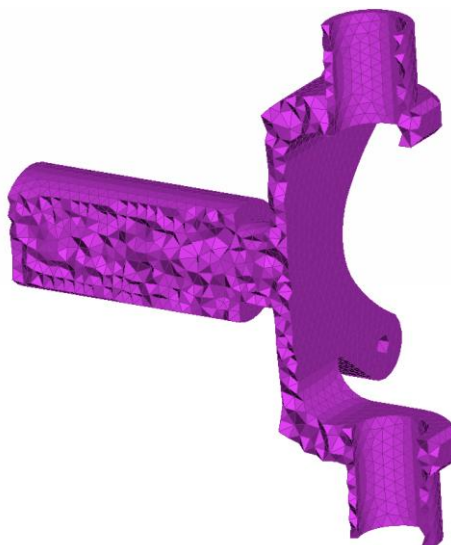
Σχήμα 3.8: Άρθρωση πλαισίου



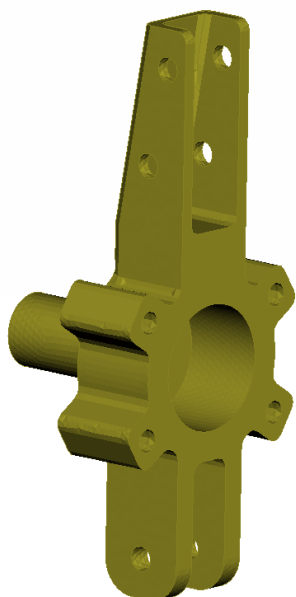
Σχήμα 3.9: Άρθρωση πλαισίου σε τομή



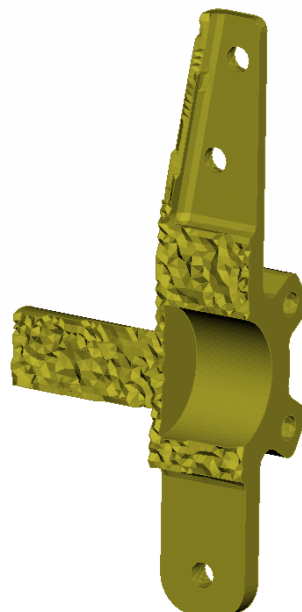
Σχήμα 3.10: Άρθρωση μπροστινού τροχού



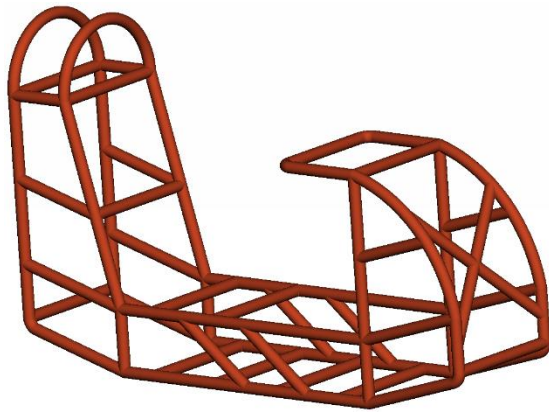
Σχήμα 3.11: Άρθρωση μπροστινού τροχού σε τομή



Σχήμα 3.12: Άρθρωση πίσω τροχού



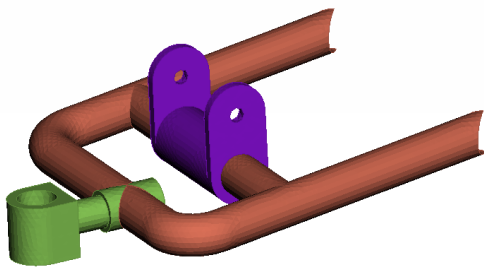
Σχήμα 3.13: Άρθρωση πίσω τροχού σε τομή



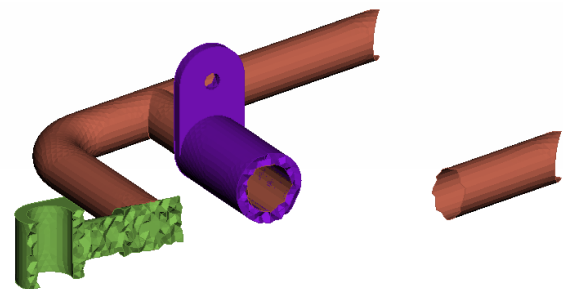
Σχήμα 3.14: Πλαίσιο



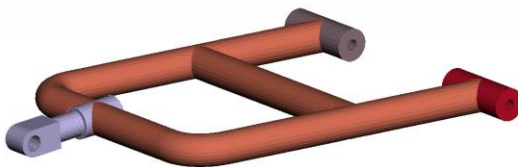
Σχήμα 3.15: Πλαίσιο σε τομή



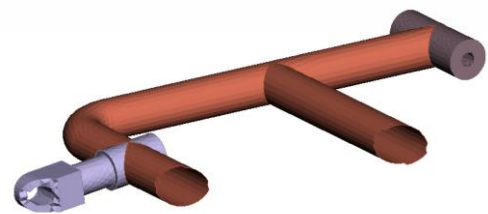
Σχήμα 3.16: Μπροστά ψαλίδι ανάρτησης



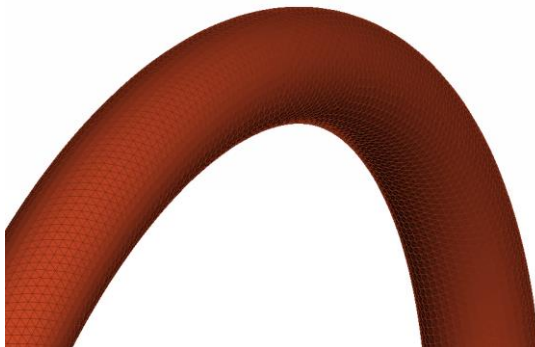
Σχήμα 3.17: Μπροστά ψαλίδι σε τομή



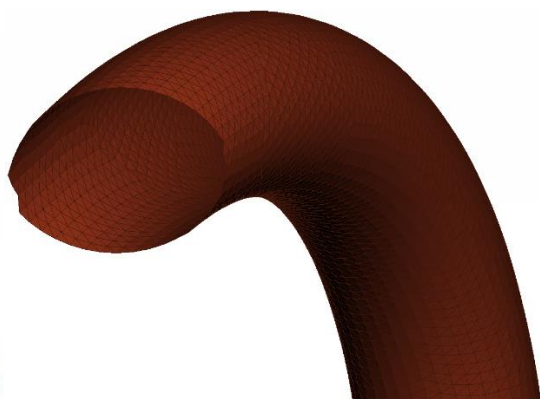
Σχήμα 3.18: Πίσω ψαλίδι ανάρτησης



Σχήμα 3.19: Πίσω ψαλίδι σε τομή



Σχήμα 3.20: Τμήμα πλαισίου



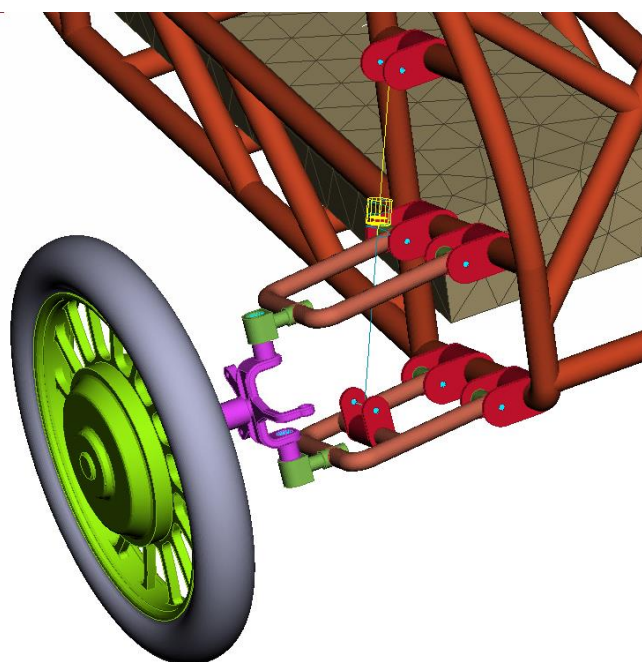
Σχήμα 3.21: Τμήμα πλαισίου σε τομή

Μετά την διακριτοποίηση της γεωμετρίας και με σκοπό την τελική μοντελοποίηση του οχήματος απαραίτητη είναι η προσθήκη στοιχείων (elements) για την σύνδεση των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής, αλλά και για την προσομοίωση των δυνάμεων που δέχεται το όχημα.

Έτσι για την προσομοίωση της ανάρτησης, τη θέση του ελατηρίου παίρνει το στοιχείο CELAS2 και της απόσβεσης το CDAMP2 (Σχήμα 3.22). Για την τοποθέτηση αυτών των στοιχείων στο μοντέλο ορίστηκε τοπικό σύστημα συντεταγμένων στραμμένο στη γωνία κίνησης της ανάρτησης, χρησιμοποιώντας την εντολή CORD2. Αντίστοιχο σύστημα συντεταγμένων ορίστηκε και στο πίσω μέρος του οχήματος για τον ορισμό των στοιχείων της πίσω ανάρτησης.

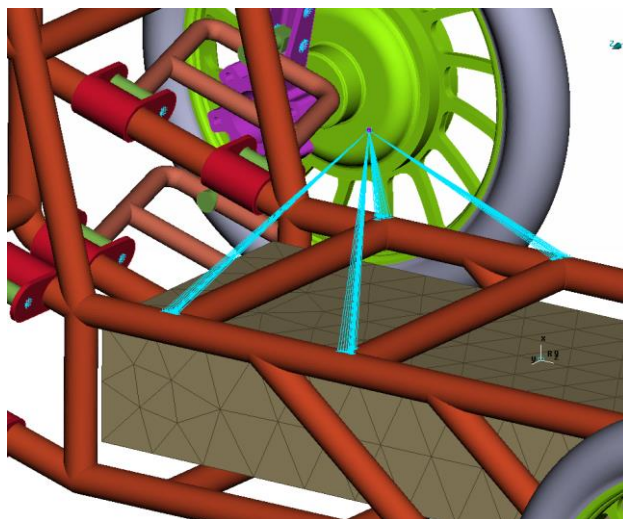
Για την προσομοίωση όλων των αρθρώσεων στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο RBE2 (Σχήμα 3.22). Μετά και τον ορισμό τοπικών συστημάτων συντεταγμένων στους άξονες διεύθυνσης των μπροστινών τροχών, ακολουθώντας τις κατάλληλες εντολές, αφέθηκε ελεύθερος ο σωστός βαθμός ελευθερίας που αντιστοιχεί στον άξονα περιστροφής της κάθε άρθρωσης. Στο σύνολο υπάρχουν οκτώ αρθρώσεις σε κάθε τροχό.

Οι δυνάμεις που δέχεται το όχημα είναι αρκετές. Εκτός από τις μάζες των τροχών, του πλαισίου και των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής, επιπλέον φορτίο αποτελούν το κάθισμα, το βάρος του οδηγού και το βάρος των μπαταριών.



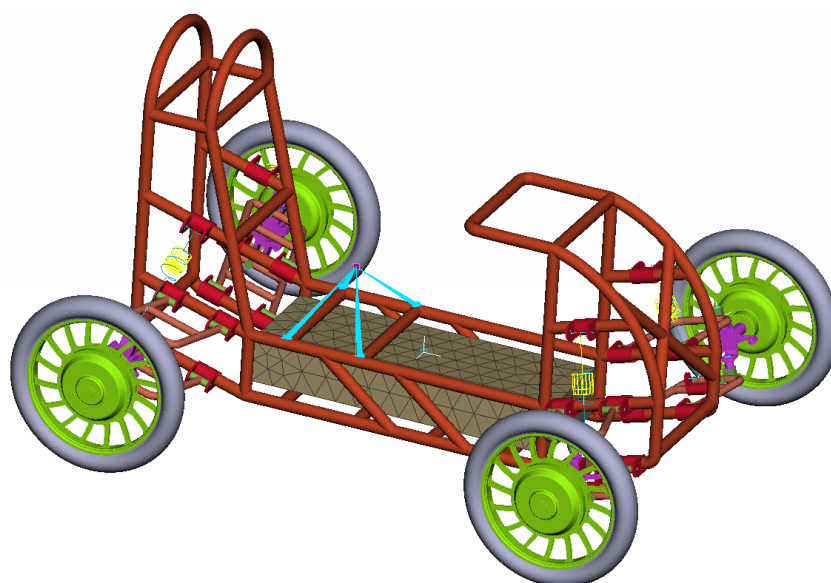
Σχήμα 3.22: Μοντελοποίηση μπροστινής ανάρτησης

Για την προσομοίωση του βάρους του καθίσματος και του οδηγού τοποθετήθηκε μάζα βάρους 80 κιλών, κατανομημένη κατάλληλα επάνω στο πλαίσιο του οχήματος (Σχήμα 3.23). Για την μάζα χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο CONM2 και για την κατανομή του βάρους το RBE2.



Σχήμα 3.23: Προσομοίωση βάρους καθίσματος-οδηγού

Για την προσομοίωση του βάρους των μπαταριών και των τροχών (καθώς αυτοί φέρουν ηλεκτροκινητήρες), έγινε προσαρμογή της πυκνότητας των αντίστοιχων υλικών ώστε με δεδομένη τη γεωμετρία τους να προκύπτει το πραγματικό τους βάρος.



Σχήμα 3.24

## 4. Επίλυση

Μετά τον σχεδιασμό του μοντέλου σε λογισμικά CAD και την μοντελοποίηση του σε λογισμικά CAE ακολουθεί η αριθμητική επίλυση του μοντέλου σε λογισμικά επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων (solver). Σε αυτή την διπλωματική εργασία γίνονται δύο αναλύσεις, μία για τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές του πλαισίου και μία δυναμική ανάλυση με διέγερση εδάφους για τις τάσεις που αναπτύσσονται στο μοντέλο. Σαν λογισμικό επίλυσης χρησιμοποιείται το Dynamis. Τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα αφού εξαχθούν σαν αρχείο Nastran από το Ansa. Στη συνέχεια γίνεται η επεξεργασία τους και μετά την επίλυση προκύπτουν τα επιθυμητά αποτελέσματα (ιδιοσυχνότητες, ιδιομορφές, κτλ.). Για την αριθμητική επίλυση του μοντέλου γίνεται μια σύντομη αναφορά στις εξισώσεις που διέπουν το σύστημα, στον τρόπο ανάλυσης των ιδιομορφών, της διέγερσης εδάφους αλλά και στην μελέτη της κόπωσης.

### 4.1 Εξίσωση κίνησης ταλαντωτικού συστήματος

Η ακριβής μελέτη της ταλαντωτικής απόκρισης πολλών μηχανικών συστημάτων απαιτεί την ανάπτυξη και ανάλυση της συμπεριφοράς δυναμικών μοντέλων με περισσότερους από έναν βαθμούς ελευθερίας. Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή στην μέθοδο ανάλυσης ιδιομορφών για τον προσδιορισμό ιδιοσυχνοτήτων, ιδιομορφών και μέτρων απόσβεσης.

Η γενική μορφή της εξίσωσης κίνησης ενός ταλαντωτικού συστήματος με περισσότερους από έναν βαθμούς ελευθερίας σε μητρική μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = f(t) \quad (4.1)$$

Όπου  $[M]$  είναι το μητρώο μάζας,  $[C]$  το μητρώο απόσβεσης,  $[K]$  το μητρώο στιβαρότητας,  $\underline{x}$  το διάνυσμα αποκρίσεων και  $\underline{f}$  το διάνυσμα διέγερσης του συστήματος. Όταν δεν ασκείται εξωτερική διέγερση στο ταλαντωτικό σύστημα, τότε ισχύει η περίπτωση της ελεύθερης ταλάντωσης και η εξίσωση (4.1) παίρνει τη μορφή:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (4.2)$$

Για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών της παραπάνω εξίσωσης απαιτείται η επίλυση ενός ιδιοπροβλήματος, το οποίο αποτελεί τη βάση στη μέθοδο της μορφικής ανάλυσης.

## 4.2 Επίλυση ιδιοπροβλήματος

Η μητρική εξίσωση κίνησης (4.2) αποτελεί ένα σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων με σταθερούς συντελεστές, οπότε οι λύσεις της εκφράζονται σε εκθετική μορφή. Επίσης, επειδή αναμένεται ταλαντωτική απόκριση του εξεταζόμενου συστήματος, γίνεται αρχική υπόθεση ότι η λύση είναι της μορφής:

$$\underline{x}(t) = \underline{\hat{x}} \cos(\omega t - \theta) \quad (4.3)$$

Με αντικατάσταση την εξίσωση (4.3) στην (4.2) προκύπτει:

$$(K - \omega^2 M)\underline{\hat{x}} \cos(\omega t - \theta) = \underline{0} \quad (4.4)$$

Επομένως, για να αποτελεί η εξίσωση (4.3) λύση της (4.2), πρέπει να ικανοποιείται το ομογενές αλγεβρικό σύστημα:

$$(K - \omega_n^2 M)\underline{\hat{x}}_n = \underline{0} \quad (4.5)$$

Το οποίο αντιπροσωπεύει το ιδιοπρόβλημα, που αντιστοιχεί στις εξισώσεις κίνησης (4.1). Για να έχει το πρόβλημα αυτό μη μηδενική λύση θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (4.6)$$

Με την επίλυση της ορίζουσας (4.6) προκύπτει το χαρακτηριστικό πολυώνυμο ως προς  $\omega^2$  στην μορφή:

$$\sum_{i=0}^N (a_i * (\omega^2)^i) = 0 \quad (4.7)$$



Επομένως, οι ρίζες του χαρακτηριστικού πολυωνύμου είναι οι ιδιοτιμές του προβλήματος. Επίσης, για κάθε ιδιοτιμή  $\omega_n$  υπολογίζεται από την εξίσωση (4.5) ένα αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα  $\underline{\hat{x}}_n$ . Επιπλέον, στην ορολογία των ταλαντώσεων, οι σταθερές  $\omega_n$  ονομάζονται ιδιοσυχνότητες, τα διανύσματα  $\underline{\hat{x}}_n$  ονομάζονται ιδιομορφές του δυναμικού συστήματος και μπορούν να γραφούν σε μητρική μορφή ως εξής:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nn} \end{pmatrix} \quad \text{και} \quad \Omega^2 = \begin{pmatrix} \omega_{11}^2 & \cdots & \omega_{1n}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{n1}^2 & \cdots & \omega_{nn}^2 \end{pmatrix}$$

Επίσης, με τις συνθήκες ορθογωνικότητας των ιδιομορφών:

$$\underline{\hat{x}}_r^T M \underline{\hat{x}}_s = \hat{m}_r \delta_{rs} \quad \text{και} \quad \underline{\hat{x}}_r^T K \underline{\hat{x}}_s = \hat{k}_r \delta_{rs} \quad (4.8)$$

Όπου το  $\delta_{rs}$  είναι το δέλτα του Kronecker. Επιπλέον, με ορισμό του πίνακα ιδιομορφών ως τον πίνακα εκείνο, του οποίου οι στήλες κατέχονται από τις ιδιομορφές του συστήματος, πιο συγκεκριμένα:

$$X = [\underline{\hat{x}}_1 \quad \underline{\hat{x}}_2 \quad \cdots \quad \underline{\hat{x}}_N]$$

Οι συνθήκες αυτές εκφράζονται σε συμπαγή μορφή:

$$X^T M X = \hat{M} \quad \text{και} \quad X^T K X = \hat{K} \quad (4.9)$$

Όπου  $\hat{M}$  και  $\hat{K}$  είναι διαγώνιοι πίνακες με στοιχεία διαγωνίου  $\hat{m}_r$  και  $\hat{k}_r$  αντίστοιχα. Για ευκολία, το μέτρο των ιδιομορφών επιλέγεται συνήθως έτσι ώστε να έχει μοναδιαία τιμή, δηλαδή:

$$\hat{m}_r = 1.$$

Οι ιδιομορφές που προκύπτουν συμβολίζονται με  $\underline{\hat{\phi}}_N$  και ονομάζονται ορθοκανονικές, όπου σύμφωνα με τον αντίστοιχο πίνακα ιδιομορφών:

$$\Phi = [\underline{\hat{\phi}}_1 \quad \underline{\hat{\phi}}_2 \quad \cdots \quad \underline{\hat{\phi}}_N] \quad (4.10)$$

Οι ιδιότητες ορθογωνικότητας εκφράζονται στη μορφή :

$$\Phi^T M \Phi = I = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \Phi^T K \Phi = \Lambda = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \omega_N^2 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Όμως, στην πλειοψηφία των πρακτικών περιπτώσεων δεν είναι δυνατός ο αναλυτικός υπολογισμός των στοιχείων του πίνακα απόσβεσης C. Σε τέτοιες περιπτώσεις μια πρώτη ανάλυση της ταλαντωτικής συμπεριφοράς γίνεται με κατάλληλη επιλογή του πίνακα C, με την οποία το σύστημα διατηρεί τις ιδιομορφές που έχει όταν η απόσβεση είναι αμελητέα. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως μέθοδος Caughey. Με την επίλυση του συστήματος χωρίς απόσβεση προκύπτει ο πίνακας ιδιομορφών  $\Phi$  (4.10) και με τις συνθήκες ορθογωνικότητας (4.11), γράφεται η απόκριση του συστήματος μετά από μετασχηματισμό συντεταγμένων στην μορφή :

$$\underline{x}(t) = \Phi \underline{\tau}(t) \quad (4.12)$$

Οι εξισώσεις (4.1) μπορούν να τεθούν στη μορφή :

$$\underline{\ddot{\tau}} + Z \underline{\dot{\tau}} + \Lambda \underline{\tau} = \underline{p}(t) \quad (4.13)$$

$$\text{Με} \quad \underline{p}(t) = \Phi^T \underline{f}(t) \quad \text{και} \quad Z = \Phi^T C \Phi = \begin{bmatrix} 2\zeta_1 \omega_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 2\zeta_N \omega_N \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Από τις σχέσεις (4.14) και (4.11) προκύπτει ότι

$$C = M\Phi Z\Phi^T M \quad (4.15)$$

Με την παραπάνω σχέση υπολογίζονται τα στοιχεία του πίνακα C. Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού των στοιχείων του πίνακα απόσβεσης είναι :

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4.16)$$

Όπου τα  $\alpha$ ,  $\beta$  είναι βαθμωτές σταθερές. Η επιλογή αυτή είναι ειδική περίπτωση του πίνακα απόσβεσης που προκύπτει από τη μέθοδο του Caughey εάν γίνει αντικατάσταση της (4.16) στην (4.14) με ταυτόχρονη εφαρμογή των συνθηκών ορθογωνικότητας :

$$2\zeta_n \omega_n = \alpha + \beta \omega_n^2$$

Η παραπάνω μέθοδος επιλογής του πίνακα απόσβεσης είναι γνωστή ως μέθοδος Rayleigh (8).

### 4.3 Δυναμική επίλυση με διέγερση εδάφους

Για τον προσδιορισμό της διέγερσης αυτής ακολουθείται το πρότυπο διέγερσης οδοστρώματος ISO, όπου για συγκεκριμένη κλάση (ποιότητα δρόμου) υπολογίζεται το πλάτος της διέγερσης. Οι επιλογές για τη μορφή του δρόμου έγιναν με βάση το πρότυπο ISO 8608. Αυτό το πρότυπο προτείνει την ταξινόμηση με βάση την τραχύτητα της οδού (κλάσεις A έως H), χρησιμοποιώντας την ισχύ φασματικής πυκνότητας (PSD)  $S_g(\Omega)$  όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1 και στον Πίνακα 4.1. Η φασματική πυκνότητα ισχύος υπολογίζεται ανάλογα με τη χωρική συχνότητα  $\Omega$  όπως φαίνεται παρακάτω.

Για  $\Omega \leq \Omega_o = 1/2\pi \text{ cycles / m}$ ,

$$S_g(\Omega) = S_g(\Omega_o)(\Omega/\Omega_o)^{-N_1}$$

Και για  $\Omega \geq \Omega_o = 1/2\pi \text{ cycles / m}$ ,

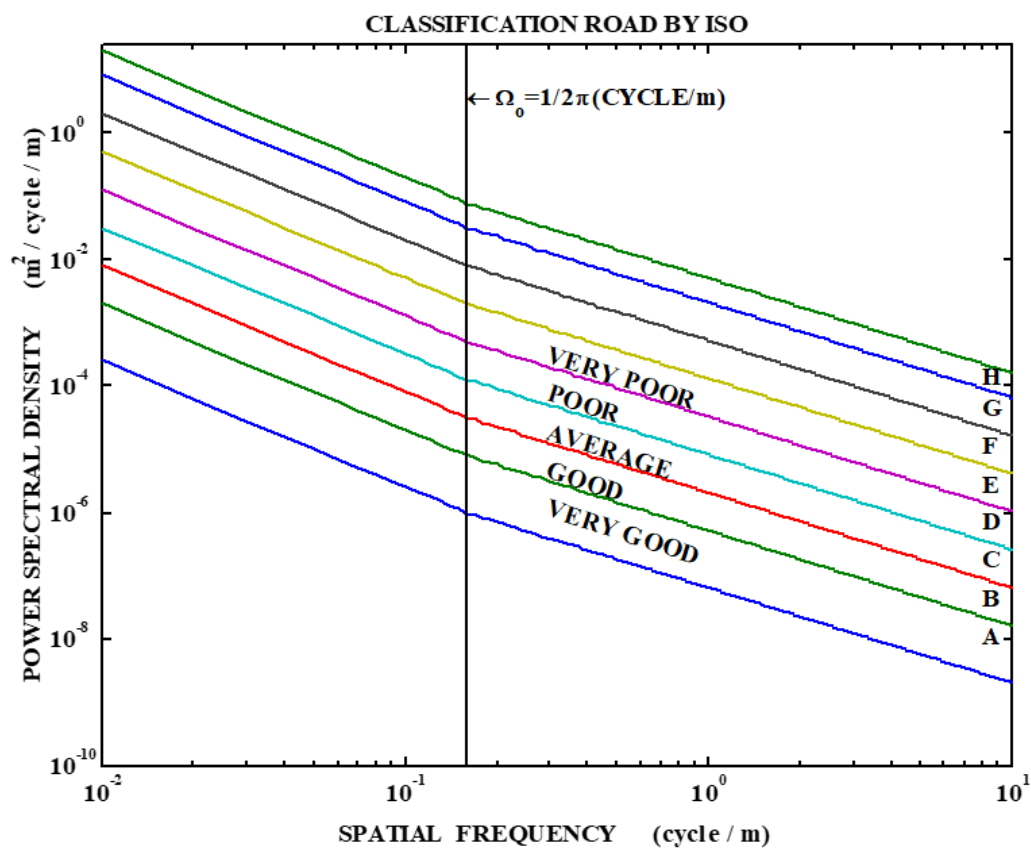
$$S_g(\Omega) = S_g(\Omega_o)(\Omega/\Omega_o)^{-N_2}$$

Με  $N_1 = 2.0$  και  $N_2 = 1.5$

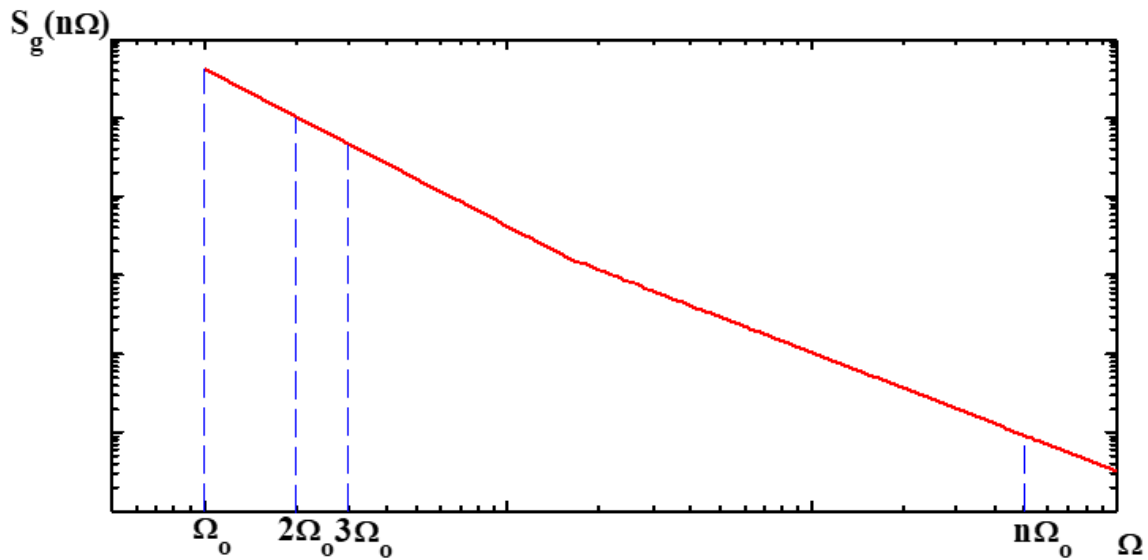
Η σχέση μεταξύ της φασματικής πυκνότητας ισχύος του οδικού προφίλ, με τη χωρική συχνότητα ή χρονική συχνότητα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.

Πίνακας 4.1: Βαθμονόμηση της τραχύτητας

$S_g(\Omega_o), 10^{-6} m^2 / \text{cycles} / m$		
Road Class	Range	Geometric Mean
<b>A (Very good)</b>	< 8	4
<b>B (Good)</b>	8 – 32	16
<b>C (Average)</b>	32 – 128	64
<b>D (Poor)</b>	128 – 512	256
<b>E (Very poor)</b>	512 – 2048	1024
<b>F</b>	2048 – 8192	4096
<b>G</b>	8192 – 32768	16384
<b>H</b>	> 32768	



Σχήμα 4.1: Ταξινόμηση κλάσης οδικού προφίλ



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα σχέσης μεταξύ της φασματικής πυκνότητας ισχύος του οδικού προφίλ, με τη χωρική συχνότητα ή χρονική συχνότητα.

$$\text{Όπου } \Omega = \frac{2\pi}{l} \text{ και } \omega = \frac{2\pi}{l} v_o = \Omega v_o$$

Το χρονικό ιστορικό του οδοστρώματος υπολογίστηκε ως άθροισμα αρμονικών, από την ακόλουθη εξίσωση:

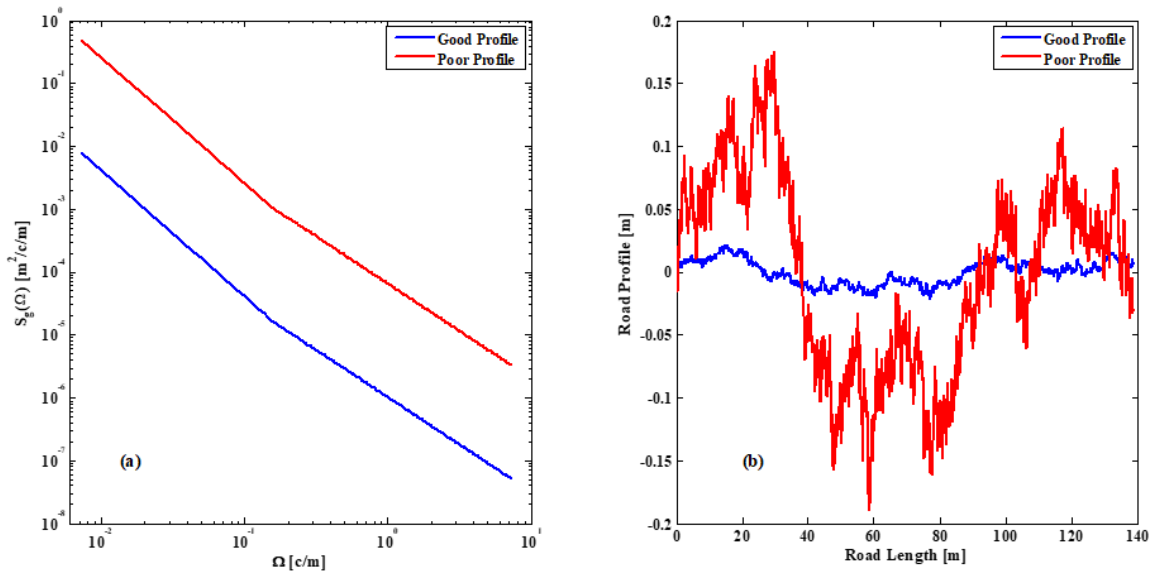
$$X_g(t) = \sum_{n=1}^N X_n \sin(n\omega_o t + \varphi_n) \quad (4.17)$$

και το πλάτος  $X_n$  των αρμονικών που υπολογίζονται από την εξίσωση 4.18, όπου η φάση συμπεριλαμβάνεται ως ομοιόμορφη στοχαστική κατανομή από το 0 έως  $\pi$ .

$$X_n = \sqrt{2S_g(n\Omega_o)\Omega_o} \quad \varphi_n: \text{Uniform Distribution from } 0 - \pi \quad (4.18)$$

$$\text{Όπου } l_o, L, v_o \Rightarrow \begin{cases} N = L/l_o, & \Omega_o = 2\pi/L = \Delta\Omega, & \Omega_{max} = N\Omega_o \\ T = L/v_o, & \Delta t = T/N, & \omega_o = 2\pi/T = 2\pi v_o/L = \Omega_o v_o \end{cases}$$

Για παράδειγμα, το σχήμα 4.3 δείχνει τη φασματική πυκνότητα ισχύος και τη χρονική ιστορία για ποιοτικό δρόμο τύπου A και έναν λιγότερο ποιοτικό δρόμο τύπου C, επιλεγμένα σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα ISO.



Σχήμα 4.3

#### 4.4 Μελέτη κόπωσης

Η διαδικασία εκκίνησης και διάδοσης των ρωγμών μέσω ενός δομικού στοιχείου λόγω της διακύμανσης της τάσης είναι επίσης γνωστή ως κόπωση. Όταν αντιμετωπίζεται το φαινόμενο μιας μονοαξονικής τάσης με χρονική ιστορία  $\sigma_k$ ,  $k=1, \dots, N_t$ , ο κανόνας Palmgren-Miner (9) χρησιμοποιείται συνήθως για να προβλέψει τη συσσώρευση φθοράς λόγω κόπωσης. Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα, η φθορά λόγω κόπωσης σε ένα σημείο της δομής που υπόκειται σε τάση μεταβλητού εύρους με χρονική ιστορία  $\sigma_k$ , ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των κύκλων φόρτισης προς τον αριθμό των κύκλων μέχρι την αστοχία σε ένα δεδομένο επίπεδο τάσης. Όταν αντιμετωπίζεται το φαινόμενο πολλαπλών επιπέδων τάσης, σύμφωνα με τον κανόνα Palmgren-Miner (10) το άθροισμα των κύκλων κόπωσης σε διάφορα επίπεδα αποδίδει τη συνολική φθορά λόγω κόπωσης:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (4.11)$$

όπου  $n_i$  δηλώνει τον αριθμό των κύκλων σε επίπεδο τάσης  $\sigma(i)$  της χρονικής ιστορίας  $\sigma_k$ ,  $N_i$  αντιπροσωπεύει τον αριθμό των κύκλων που απαιτούνται για αστοχία σε επίπεδο τάσης  $\sigma(i)$  και  $k$  είναι ο αριθμός των επιπέδων τάσης που εμφανίζονται σε μια χρονική ιστορία για το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο. Όταν αντιμετωπίζεται το φαινόμενο με τυχαίες χρονικές ιστορίες τάσεων σε ένα στοιχείο της δομής, ο αριθμός των κύκλων σε ένα επίπεδο τάσης λαμβάνεται συνήθως με την εφαρμογή μεθόδων μέτρησης κύκλων, όπως η μέθοδος «rainflow cycle counting» (11). Οι κώδικες σχεδιασμού καθορίζουν τα επίπεδα τάσης για κόπωση των κοινώς χρησιμοποιούμενων κατασκευαστικών υλικών. Επιπλέον, οι καμπύλες S-N (12) περιλαμβάνονται στους κώδικες σχεδίασης για τον προσδιορισμό του αριθμού των κύκλων  $N_i$  που απαιτούνται μέχρι την αστοχία ως προς το επίπεδο τάσης  $\sigma(i)$ . Οι καμπύλες S-N λαμβάνονται μέσω πειραματικών δοκιμών σε δείγματα πραγματικού μεγέθους. Για να γίνει αυτό, μονοαξονικοί κύκλοι φόρτισης σταθερού πλάτους εφαρμόζονται σε διάφορα δομικά μέλη με διαφορετικά σχήματα. Στους κώδικες σχεδίασης, οι καμπύλες S-N εκφράζονται σε λογαριθμικό διάγραμμα (log-log), στο οποίο απεικονίζεται ο αριθμός κύκλων  $N_i$  που απαιτείται για αστοχία λόγω κόπωσης, ως προς το εύρος του φάσματος της τάσης. Κάθε καμπύλη ορίζεται με έναν αριθμό που καθορίζει τη λειτουργία, το σχήμα και την κατασκευή του εξεταζόμενου δομικού στοιχείου.

Από τα προηγούμενα είναι προφανές ότι η ακριβής εκτίμηση της συσσώρευσης φθοράς από κόπωση σε ένα σημείο εξαρτάται από την ακριβή πρόβλεψη ή μέτρηση των χρονικών ιστοριών καταπόνησης καθώς και από τις ακριβείς διαδικασίες καταμέτρησης των κύκλων για τον προσδιορισμό του εύρους του φάσματος των τάσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης μέχρι την αστοχία εξαρτάται και από τη μέση τάση, καθώς όταν αυτή αυξάνεται για ένα δεδομένο επίπεδο κυμαινόμενης τάσης, η διάρκεια ζωής μέχρι την αστοχία μειώνεται. Άρα, το μοντέλο συσσώρευσης φθοράς λόγω κόπωσης πρέπει να αναθεωρηθεί για να υπολογίσει μια μη μηδενική μέση τάση σύμφωνα με τη σχέση Goodman (13):

$$\Delta\sigma_{Rt} = \Delta\sigma_R \left(1 - \frac{\sigma_\mu}{\sigma_u}\right) \quad (2)$$

όπου  $\Delta\sigma_{Rt}$  αντιπροσωπεύει το τροποποιημένο εύρος του κύκλου φόρτισης,  $\Delta\sigma_R$  υποδηλώνει το αρχικό εύρος του κύκλου φόρτισης,  $\sigma_\mu$  υποδηλώνει τη μέση τάση και

υπολογίζεται από τον αλγόριθμο καταμέτρησης κύκλων και  $\sigma_u$  είναι το όριο αντοχής σε εφελκυσμό του υλικού.

Μόλις ληφθεί το εύρος του φάσματος της τάσης για ένα δομικό στοιχείο και προσδιοριστεί η σχετική κατηγορία, χρησιμοποιούνται καμπύλες S-N για την εκτίμηση της αντοχής σε κόπωση. Σε αυτό το σημείο, χρησιμοποιώντας τον κανόνα του Miner οι φθορές λόγω κόπωσης που σχετίζονται με τα εύρη τάσεων αθροίζονται γραμμικά. Η παραμετρική αναπαράσταση της φθοράς λόγω κόπωσης προκύπτει ως :

$$D = \underbrace{\sum_{i=1}^{\kappa_1} \frac{n_i}{N_D} \left( \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_D} \right)^m}_{\Delta\sigma_i \geq \Delta\sigma_D} + \underbrace{\sum_{j=1}^{\kappa_2} \frac{n_j}{N_D} \left( \frac{\Delta\sigma_j}{\Delta\sigma_D} \right)^{m+2}}_{\Delta\sigma_L \leq \Delta\sigma_j \leq \Delta\sigma_D} \quad (3)$$

όπου  $\Delta\sigma_D$  δηλώνει το όριο κόπωσης για εύρη τάσεων σταθερού πλάτους σε  $N_D = 5 \times 10^6$  κύκλους,  $\Delta\sigma_L$  αντιπροσωπεύει το όριο θραύσης,  $\Delta\sigma_i$  και  $\Delta\sigma_j$  είναι το  $i^{th}$  και το  $j^{th}$  εύρος τάσης,  $n_i$  και  $n_j$  είναι ο αριθμός των κύκλων για κάθε  $\Delta\sigma_i$  και  $\Delta\sigma_j$  και  $\kappa_1, \kappa_2$  αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των ομάδων με διαφορετικό εύρος τάσης πάνω ή κάτω από το όριο κόπωσης για εύρη τάσεων σταθερού πλάτους  $\Delta\sigma_D$ .

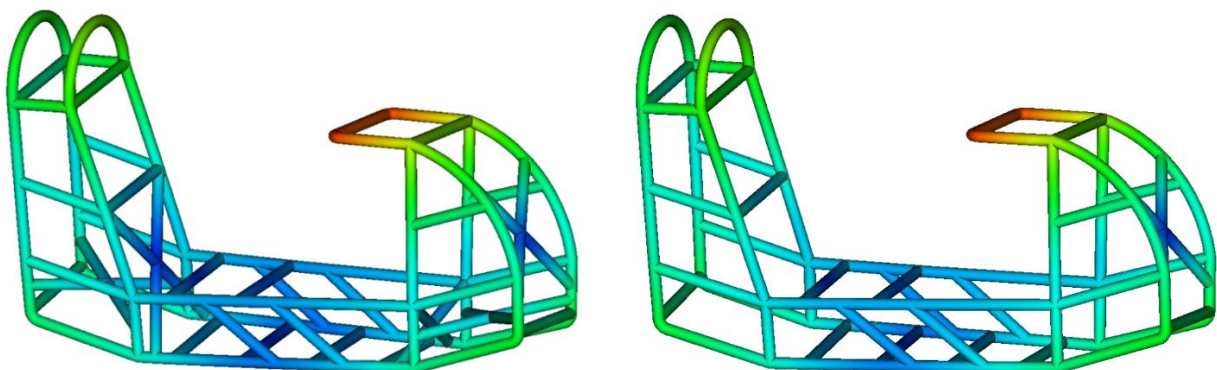


## 5. Αποτελέσματα

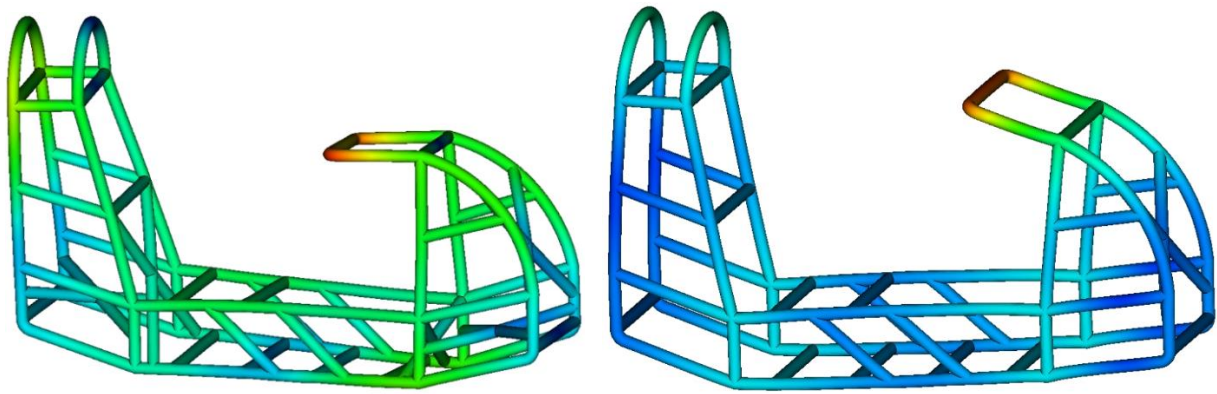
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής και της δυναμικής ανάλυσης (ιδιομορφές, ιδιοσυχνότητες, τάσεις, κτλ.). Μετά την επίλυση του συστήματος από το λογισμικό Dynamis, γίνεται ανάγνωση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης μέσω του λογισμικού μΕΤΑ post-processor της BETA CAE Systems S.A.

### 5.1 Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης

Σε αυτή την ενότητα βλέπουμε την μορφή που παίρνει το σασί και στη συνέχεια ολόκληρο το όχημα (ιδιομορφή), όταν διεγείρεται σε συχνότητες συντονισμού (ιδιοσυχνότητες). Για το όχημα έγιναν διάφορες δοκιμές πλαισίων. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για δύο πιθανά πλαίσια που μετά την ανάλυση τους έγινε επιλογή του καταλληλότερου. Το πρώτο είχε περισσότερα δομικά στοιχεία από το δεύτερο και σαν συνέπεια ήταν βαρύτερο αλλά η ύπαρξη των έξτρα δομικών στοιχείων, μετά τα αποτελέσματα της ανάλυσης, κρίθηκε ότι δεν βελτίωνε συνολικά την κατασκευή οπότε επιλέχθηκε το δεύτερο. Παρακάτω εμφανίζονται, για τα δύο διαφορετικά σασί, ενδεικτικές ιδιομορφές (Σχήμα 5.1-5.2).



Σχήμα 5.1: 1<sup>η</sup> ελαστική ιδιομορφή για τα δύο σασί



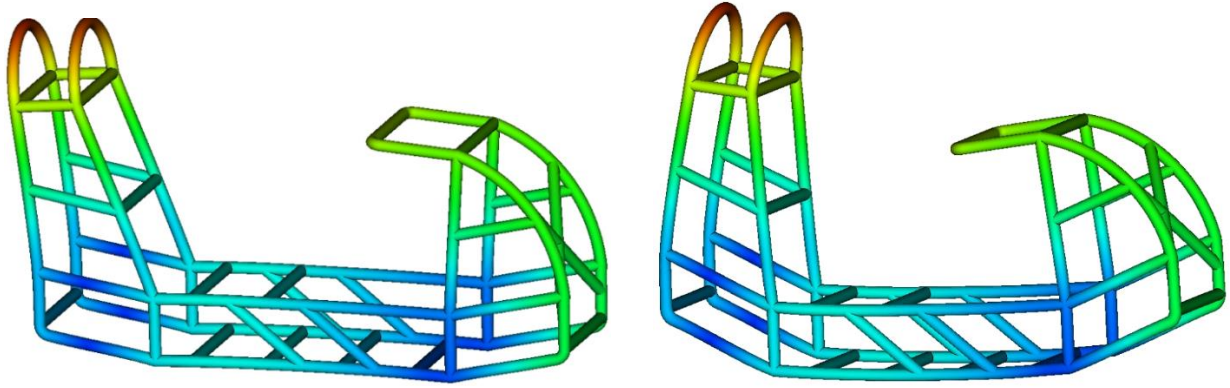
Σχήμα 5.2: 4<sup>η</sup> ελαστική ιδιομορφή για τα δύο σασί

Έπειτα, παρουσιάζονται οι πρώτες δέκα ελαστικές ιδιοσυχνότητες για να γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο πλαισίων (Πίνακας 5.1).

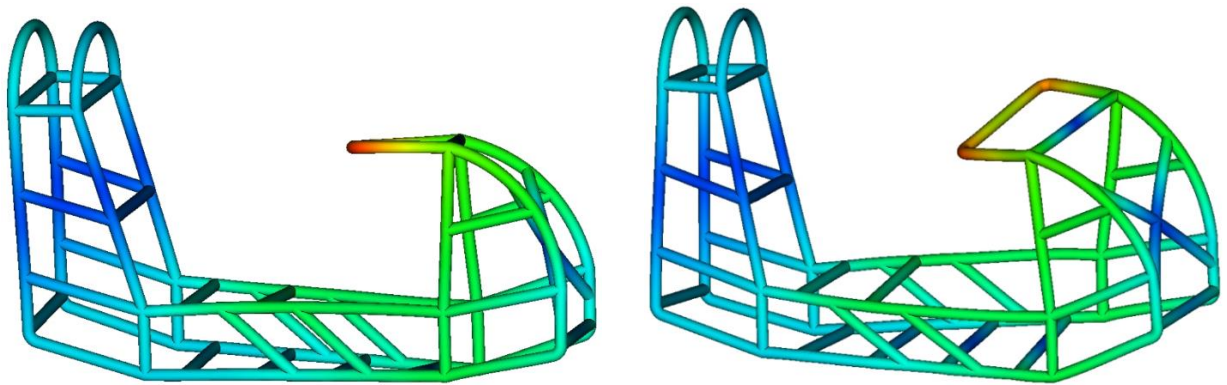
Πίνακας 5.1

mode	Ιδιοσυχνότητες 1 <sup>ου</sup> σασί [Hz]	Ιδιοσυχνότητες 2 <sup>ου</sup> σασί [Hz]
1	44.8	42.3
2	78.5	70.6
3	121.3	100.2
4	131.8	119.7
5	140.6	120.3
6	187.5	146.2
7	216.8	175.1
8	230.3	190.7
9	250.3	202.2
10	257.9	231.1

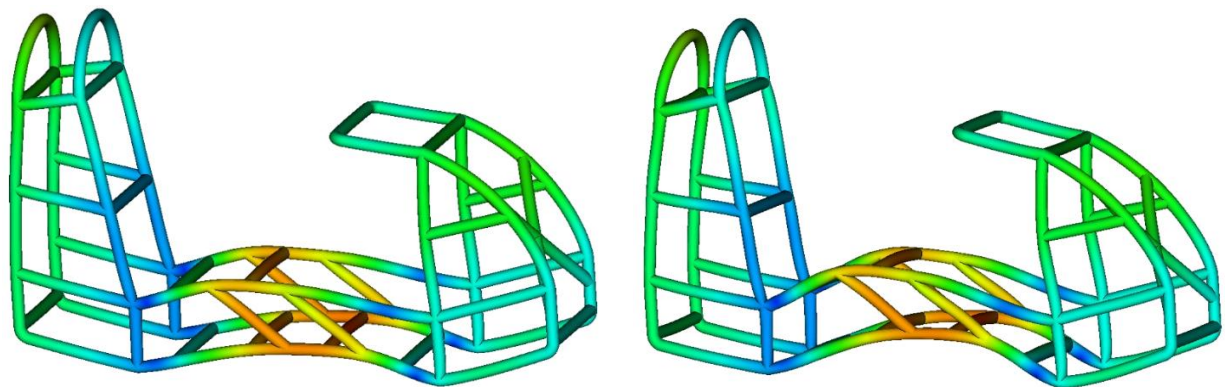
Για το σασί που επιλέχθηκε δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικά υλικά στην ιδιομορφική ανάλυση, χάλυβας και αλουμίνιο. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι με το σασί από αλουμίνιο το βάρος του οχήματος μειώνεται αισθητά. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες ενδεικτικές ιδιομορφές για σύγκριση μεταξύ σασί χάλυβα και αλουμινίου (Σχήμα 5.3-5.5).



Σχήμα 5.3: 2<sup>η</sup> ελαστική ιδιομορφή σε σασί χάλυβα (αριστερά) και αλουμινίου (δεξιά)



Σχήμα 5.4: 5<sup>η</sup> ελαστική ιδιομορφή σε σασί χάλυβα (αριστερά) και αλουμινίου (δεξιά)



Σχήμα 5.5: 11<sup>η</sup> ελαστική ιδιομορφή σε σασί χάλυβα (αριστερά) και αλουμινίου (δεξιά)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δέκα πρώτες ελαστικές ιδιοσυχνότητες των δυο πλαισίων με διαφορετικά υλικά (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Ενδεικτικές ελαστικές δισυχνότητες με σασί από χάλυβα και από αλουμίνιο.

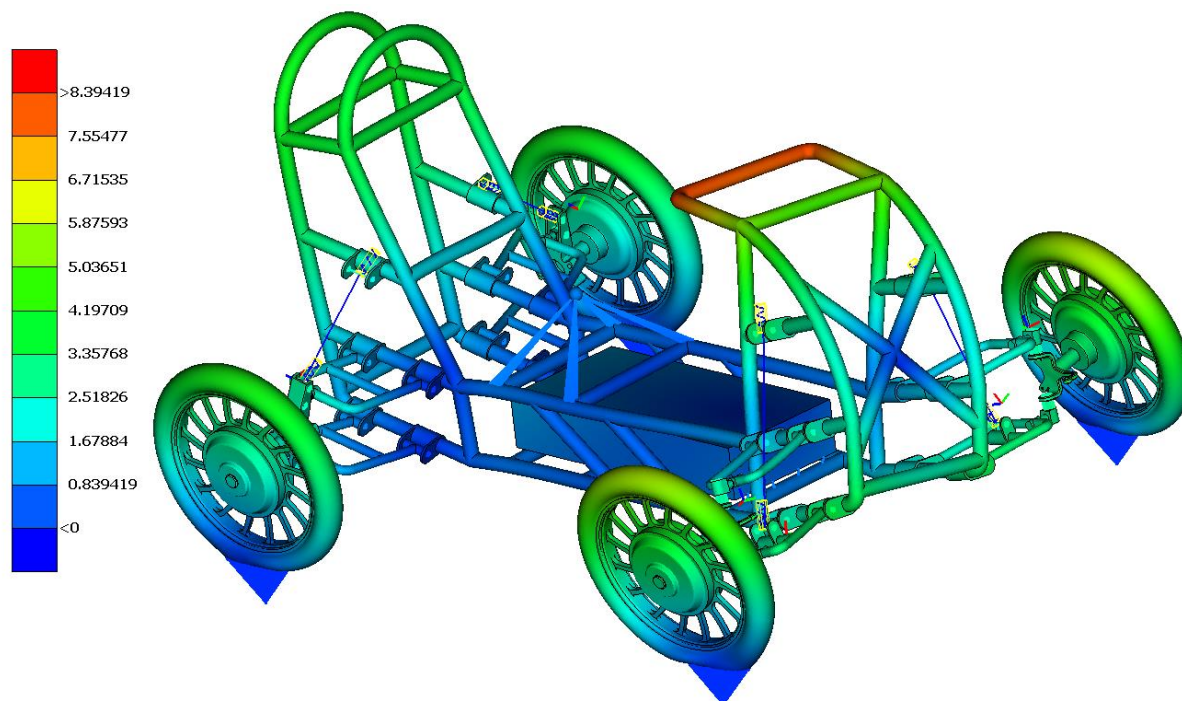
<b>mode</b>	<b>Ιδιοσυχνότητες πλαισίου με χάλυβα [Hz]</b>	<b>Ιδιοσυχνότητες πλαισίου με αλουμίνιο [Hz]</b>
<b>1</b>	42.3	41.6
<b>2</b>	70.6	69.4
<b>3</b>	100.2	98.4
<b>4</b>	119.7	117.6
<b>5</b>	120.3	118.2
<b>6</b>	146.2	143.7
<b>7</b>	175.1	172.1
<b>8</b>	190.7	187.4
<b>9</b>	202.2	198.7
<b>10</b>	231.1	227.1

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι αν αλλάξει το υλικό του πλαισίου θα πρέπει να αλλάξει και το υλικό των αρθρώσεων του πλαισίου (αρθρώσεις στα ψαλίδια των αναρτήσεων) καθώς μεταξύ τους υπάρχει συγκόλληση. Οι αποκλίσεις που προέκυψαν ανάμεσα στο σασί χάλυβα και αλουμινίου δεν είναι πολύ μεγάλες και η μείωση του βάρους στο συνολικό όχημα (σασί, αρθρώσεις) ανέρχεται στα 50 kg (Πίνακας 5.3). Βέβαια, για την επιλογή του τελικού υλικού θα πρέπει να γίνει και περαιτέρω μελέτη του μοντέλου σχετικά με τις τάσεις που αναπτύσσονται στο όχημα.

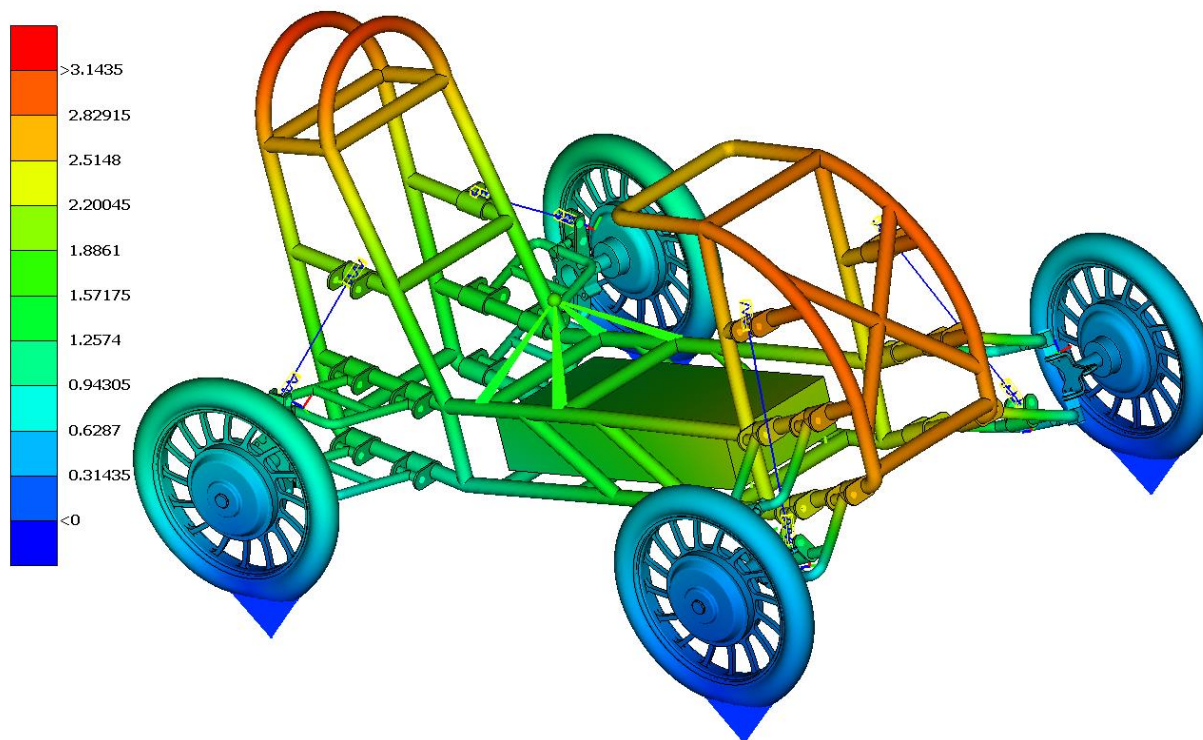
Πίνακας 5.3: Βάρη πλαισίου και αρθρώσεων ανάλογα με το υλικό.

<b>Εξάρτημα</b>	<b>Βάρος με χάλυβα [kg]</b>	<b>Βάρος με αλουμίνιο [kg]</b>
<b>Σασί</b>	66.5	22.9
<b>Αρθρώσεις πλαισίου</b>	9.8	3.4
<b>Σύνολο</b>	76.3	26.3

Μετά την επιλογή ενός πλαισίου παρουσιάζονται παρακάτω ενδεικτικές ιδιομορφές για ολόκληρο το όχημα (Σχήμα 5.6-5.7).



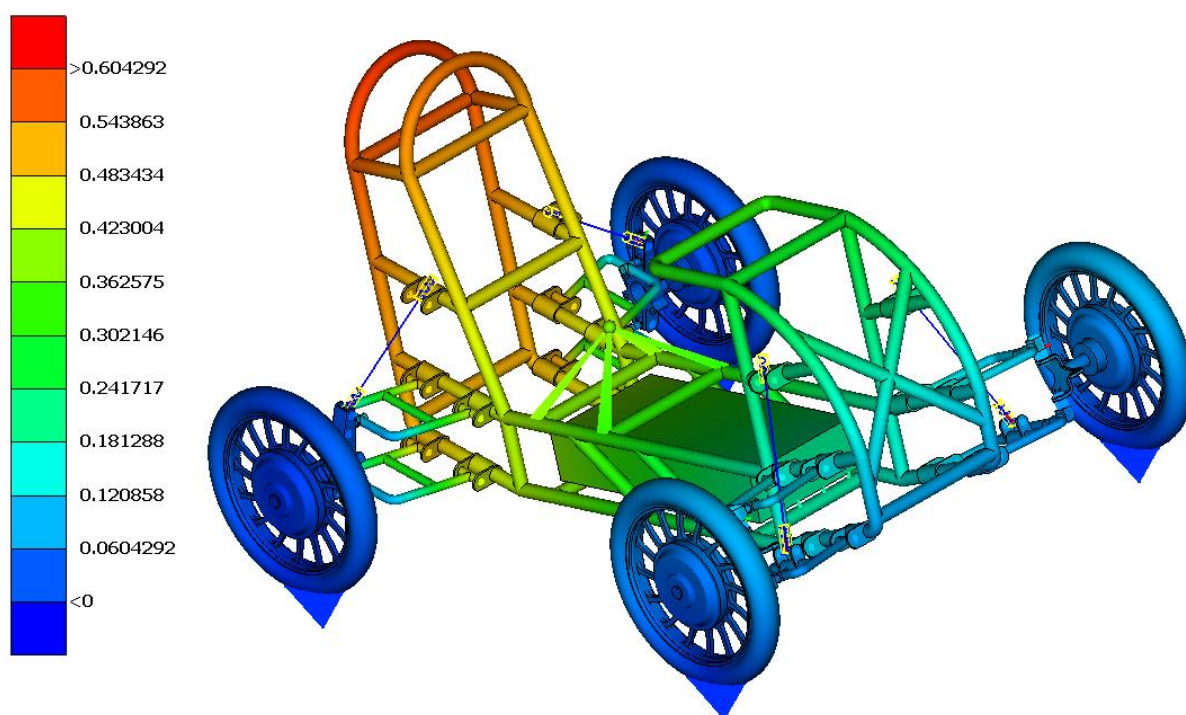
Σχήμα 5.6



Σχήμα 5.7

## 5.2 Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης

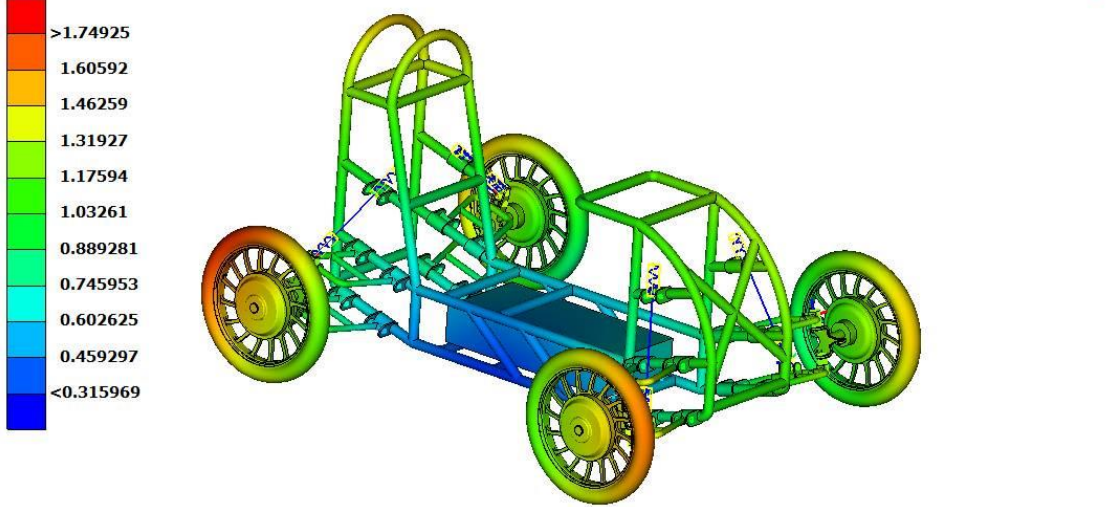
Μετά τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης φαίνεται ότι το περισσότερο βάρος του οχήματος πέφτει στους πίσω τροχούς αφού η θέση του οδηγού είναι πιο κοντά στο πίσω μέρος. Για καλύτερη κατανομή δυνάμεων θα πρέπει να αυξηθεί η στιβαρότητα των πίσω ελατηρίων στις αναρτήσεις του οχήματος.



## 5.3 Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης

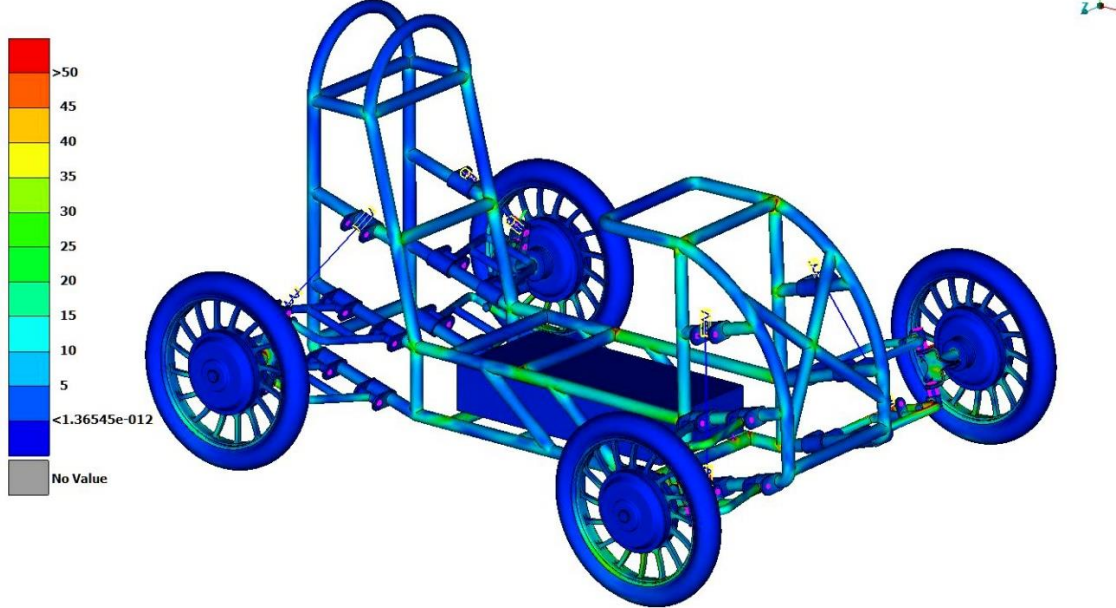
Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων και των τάσεων που αναπτύσσονται στο συνολικό μοντέλο μετά την επίδραση όλων των δυνάμεων στο όχημα (βάρη, διέγερση εδάφους, κτλ.). Το μοντέλο επιλύεται σε ένα κακό προφίλ δρόμου για να τονιστούν οι περιοχές που υφίσταται μεγαλύτερη καταπόνηση. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικές εικόνες (Σχήμα 5.8-5.9).

0:teliko22\_109\_1\_disp.op2 : Scalar: Magnitude of Displacements,Translational : : Scale Factor 1.500E+001 : SUBCASE 1 ::TIME 3.750000E-001



Σχήμα 5.8: Μετατοπίσεις σε διέγερση εδάφους

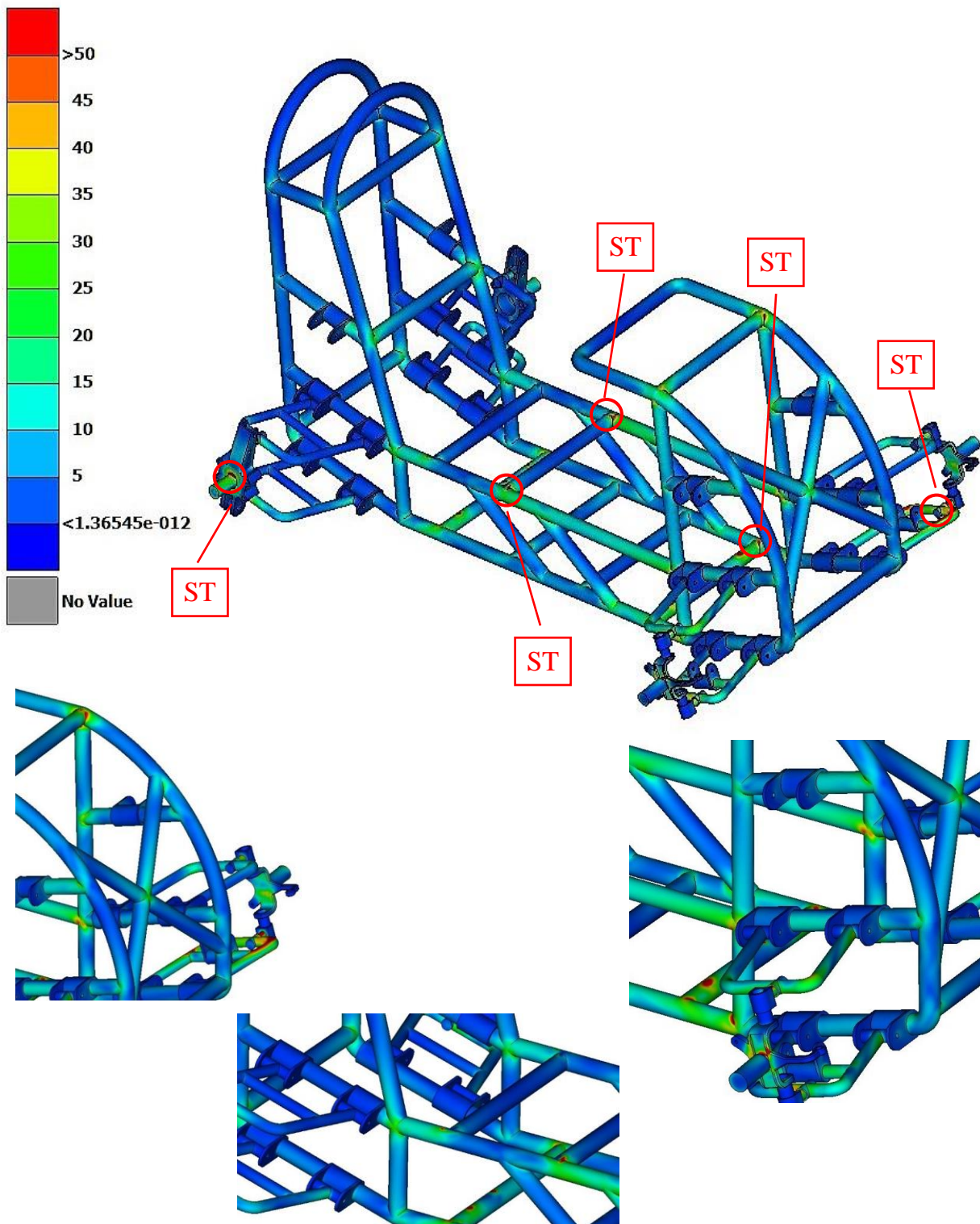
0:teliko22\_109\_1.op2 : Scalar: Stresses,Von Mises,Max of Top Bottom,Centroid : : Scale Factor 1.500E+001 : SUBCASE 1 ::TIME 1.150000E-001



Σχήμα 5.9: Τάσεις σε διέγερση εδάφους

## 5.4 Αποτελέσματα μελέτης κόπωσης

Σε αυτή την ενότητα επιλέγουμε, μετά τα αποτελέσματα των τάσεων από την δυναμική ανάλυση, τα σημεία εκείνα που καταπονούνται περισσότερο για να γίνει μελέτη της κόπωσης. Στην παρούσα μελέτη επιλέγονται πέντε κρίσιμα σημεία ενδεικτικά όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.10: Σημεία που επιλέχθηκαν για την μελέτη κόπωσης



Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης κόπωσης για τα κρίσιμα σημεία που επιλέχθηκαν σε κύκλους φόρτισης (Πίνακας 5.4). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μελέτη δείχνουν ότι ακόμη και στα σημεία που εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις η διάρκεια ζωής σε κύκλους φόρτισης είναι πολύ μεγάλη και άρα το συνολικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο.

*Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα κόπωσης σε κύκλους φόρτισης*

<b>Location</b>	<b>Calculated Fatigue Life (Days)</b>
<b>ST1</b>	<b>207652</b>
<b>ST2</b>	<b>514534</b>
<b>ST3</b>	<b>128462</b>
<b>ST4</b>	<b>432987</b>
<b>ST5</b>	<b>378652</b>

## 6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται σχεδίαση και ανάλυση ενός τετρακίνητου ηλεκτρικού οχήματος. Η σχεδίαση του οχήματος έγινε σε λογισμικό CAD (Computer-aided design) πιο συγκεκριμένα στο Solidworks 2017. Κάποια από τα μέρη του οχήματος δεν σχεδιάστηκαν εξ αρχής αλλά έγινε λήψη των σχεδίων τους από την βιβλιοθήκη του GrabCAD, μιας διαδικτυακής κοινότητας ανταλλαγής σχεδίων. Το τελικό συναρμολόγημα έγινε στο Solidworks αφού πρώτα έγινε η σχεδίαση του πλαισίου και των ψαλιδιών της ανάρτησης.

Στη συνέχεια, έγινε εισαγωγή του αρχείου σχεδίασης σε λογισμικό CAE (Computer-aided engineering) και πιο συγκεκριμένα στο Ansa της BETA CAE Systems S.A. όπου έγινε ο καθαρισμός της γεωμετρίας, η διακριτοποίηση του μοντέλου και η μοντελοποίηση του συνολικού οχήματος. Σε αυτή τη διαδικασία γίνεται η προσομοίωση των αναρτήσεων (ελατήρια, αποσβεστήρες, κτλ.) αλλά και όλων των δυνάμεων που επιδρούν στο όχημα (βάρη, διέγερση εδάφους, κτλ.).

Μετά την επεξεργασία του μοντέλου ακολουθεί η αριθμητική επίλυση του σε λογισμικά επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων (solver) και πιο συγκεκριμένα στο Dynamis. Στην παρούσα διπλωματική γίνεται ιδιομορφική ανάλυση για το σασί του οχήματος και δυναμική ανάλυση σε διέγερση εδάφους για το συνολικό μοντέλο.

Το προφίλ του δρόμου υπολογίζεται βάση ISO 8608. Μετά την επίλυση του μοντέλου στο λογισμικό Dynamis, τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται στο λογισμικό μΕΤΑ. Από τα αποτελέσματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μοντέλο είναι αξιόπιστο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περεταίρω μελέτη και βελτιστοποίηση ώστε το όχημα να προχωρήσει στο στάδιο παραγωγής.

## Βιβλιογραφία

1. Νικόλαος Μπιλάλης, Εμμανουήλ Μαραβελάκης. *Συστήματα CAD/CAM και τρισδιάστατη μοντελοποίηση*. 1η έκδοση. Αθήνα : εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ, 2009.
2. GrabCAD: Design Community, CAD Library, 3D Printing Software.  
<https://grabcad.com/>. [Ηλεκτρονικό]
3. Manuel Ignacio González Hernández, Blanca Araujo Pérez, Juan Sabas Martín Sánchez and Esteban Cañibano Álvarez. Optimized Regenerative Friction Braking Distribution in an Electric Vehicle with Four In-Wheel Motors. [επιμ.] Jan Fischer-Wolfarth Gereon Meyer. *Advanced Microsystems for Automotive Applications*. Berlin : Springer , 2013, σσ. 317-326.
4. Stephen J. Chapman. *Ηλεκτρικές Μηχανές*. [επιμ. μεταφρ.] Θεόδωρος Π. Θεοδουλίδης. 4η έκδοση. Θεσσαλονίκη : εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2016.
5. Bernd Heißing, Metin Ersoy, [επιμ.]. *Chassis Handbook*. Berlin : Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
6. Rolf Gscheidle. *Τεχνολογία Αυτοκινήτων-Οχημάτων*. [επιμ.] Βλάσιος Κουτσούκος. 4η. s.l. : ΕΚΔΟΤΙΚΟΣ ΟΜΙΛΟΣ ΙΩΝ, 2015.
7. Προβατίδης Χριστόφορος Γ. *Πεπερασμένα Στοιχεία στην Ανάλυση Κατασκευών*. 1η έκδοση. s.l. : εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2016.
8. Νατσιάβας Σ. *Ταλαντώσεις Μηχανικών Κατασκευών*. Θεσσαλονίκη : εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2001.
9. Palmgren A. *Die Lebensdauer von Kugellagern*. s.l. : VDI-Zeitchrift, 1924. σσ. 339-341.
10. Miner M.A. *Cumulative damage in fatigue*. s.l. : Applied Mechanics Transactions (ASME), 1945. σσ. 159-164.

11. Macha E., T. Lagoda, A. Nieslony and D kardas. *Fatigue life under variable-amplitude loading accorging to the cycle-counting and spectral methods*. s.l. : Materials Science, 2006. σσ. 416-425.
12. Nieslony A., M. Böhm. *Mean stress effect correction using constant stress ratio S-N curves*. s.l. : International Journal of Fatigue, 2013. σσ. 49-59.
13. Tunna J.M. *Fatigue life prediction for Gaussian random loads at the design state*. s.l. : Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1986. σσ. 169-184.