



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΣΕ  
ΖΑΝΤΑ ΤΡΟΧΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ»**



PSI®

υπό

**ΠΑΠΑΓΓΕΛΗ ΓΕΩΡΓΙΟ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού 2015



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14159/1  
Ημερ. Εισ.: 21-03-2017  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΜΜ  
2015  
ΠΑΠ

**© 2015 Παπαγγελής Γεώργιος**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

**Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)**    **Κερμανίδης Αλέξης**  
Επίκουρος Καθηγητής  
Μηχανική Συμπεριφορά Μεταλλικών Υλικών

**Δεύτερος Εξεταστής**    **Χαιδεμένοπουλος Γρηγόριος**  
Καθηγητής, Φυσική Μεταλλουργία - Ανάπτυξη Κραμάτων &  
Σύγχρονες Κατεργασίες

**Τρίτος Εξεταστής**    **Καραμάνος Σπυρίδων**  
Καθηγητής, Υπολογιστικές Μέθοδοι-Πεπερασμένα Στοιχεία  
των Κατασκευών



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Πρώτα απ'όλα θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της εργασίας μου, Επίκουρο Καθηγητή Κερμανίδα Αλέξη, για την ευκαιρία που μου παρείχε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και για την καθοδήγηση του καθ'όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και όλη την οικογένεια μου, για την ηθική και οικονομική της στήριξη της όλα αυτά τα χρόνια της φοιτητικής μου ζωής, και να τους αφιερώσω την εργασία μου.

Παπαγγελής Γιώργος

## Περίληψη

Ο σχεδιασμός της ζάντας σε τροχούς σύγχρονων συμβατικών αυτοκινήτων απαιτεί την κατάλληλη επιλογή υλικού, που πέρα από την ασφάλεια στην μεταφορά μηχανικών φορτίων, θα πρέπει να προσφέρει χαμηλό βάρος κατασκευής και κόστος, αλλά ταυτόχρονα να είναι φιλικό προς το περιβάλλον. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μελέτη επιλογής μεταλλικού κράματος, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια σχεδιασμού, για χρήση σε ζάντα τροχού συμβατικού οχήματος. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού προγράμματος CES EduPack. Συμπληρωματικά, έγινε αναλυτική σπουδή με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (πρόγραμμα ANSYS) για τον προσδιορισμό των κρίσιμων περιοχών καταπόνησης του στοιχείου ζάντας υπό συνθήκες στατικής φόρτισης. Τα αποτελέσματα της μελέτης με τα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των ορίων των μηχανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν σαν κριτήρια σχεδιασμού.

## Περιεχόμενα

Έγκριση	
Ευχαριστίες	
Περίληψη	
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφικά στοιχεία.....	2
2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη τροχού.....	2
2.2 Υλικά κατασκευής ζαντών.....	5
2.2.1 Ζάντες από Μεταλλικά κράματα.....	5
2.2.2 Ζάντες από σύνθετα υλικά.....	6
2.3 Τύποι και μέθοδοι κατασκευής ζαντών.....	7
2.3.1 Κύριοι τύποι ζαντών.....	7
2.3.2 Μέθοδοι κατασκευής ζαντών.....	8
Κεφάλαιο 3 Μελέτη επιλογής ελαφριού μεταλλικού κράματος με το λογισμικό CES.....	10
3.1 Κριτήρια επιλογής υλικού.....	10
3.2 Συντελεστής ασφάλειας.....	12
3.3 Χρήση κριτηρίων σχεδιασμού στην επιλογή υλικών.....	12
3.3.1 Βήμα Επιλογής 1 - Ειδικές ιδιότητες.....	13
3.3.2 Βήμα Επιλογής 2 - Καθορισμός επιτρεπτών ορίων (ιδιοτήτων- κόστους).....	15
3.3.3 Βήμα Επιλογής 3: Ενέργεια κατεργασιμότητας –Κόστος.....	20
3.3.4 Βήμα Επιλογής 4 - Ανακυκλωσιμότητα-εκπομπές CO <sub>2</sub> .....	21
3.3.5 Βήμα Επιλογής 5 - Ενέργεια ανακύκλωσης-κόστος.....	22
3.4 Συμπεράσματα Αναλυσης.....	23
Κεφάλαιο 4 Ανάλυση Τάσεων & Παραμορφώσεων Ζαντας.....	24
4.1 Σχεδιασμός στο SOLIDWORKS.....	24
4.2 Υπολογισμός τάσεων χρησιμοποιώντας την αναλυτική λύση Hertz.....	25
4.3 Ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σε στατική φόρτιση.....	27
4.3.1 Οριακές συνθήκες του προβλήματος.....	27
4.3.2 Παραδοχές και υλικά.....	29
4.3.3 Κατανομή τάσεων.....	32
4.3.4 Κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων.....	34
4.3.5 Συμπεράσματα.....	35
4.4 Ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σε κρουστική φόρτιση.....	36
4.4.1 Οριακές συνθήκες του προβλήματος.....	37
4.4.2 Κατανομή τάσεων.....	38
4.4.3 Κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων.....	40
4.4.4 Συμπεράσματα .....	41
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα.....	42
Κεφάλαιο 6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	43
Βιβλιογραφία.....	44

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Οι τροχοί είναι από τα βασικότερα τμήματα λειτουργίας ενός αυτοκινήτου καθώς σχετίζονται με την ποιότητα κύλισης του οχήματος και ταυτόχρονα συνεισφέρουν στην ασφάλεια του αυτοκινήτου, καθώς μέσω της ζάντας και του ελαστικού μεταφέρονται οι δυνάμεις του αυτοκινήτου στο έδαφος κατά την επιτάχυνση, επιβράδυνση ή κατά την στροφή του οχήματος. Ταυτόχρονα, μέσω της ζάντας μεταφέρονται τα δυναμικά φορτία, που δημιουργούνται κατά την κύλιση του τροχού στο οδόστρωμα, στην ανάρτηση του οχήματος.

Οι ζάντες πρέπει να ικανοποιούν συγκεκριμένες προδιαγραφές αντοχής ενώ πρέπει να έχουν μικρό βάρος και χαμηλό κόστος, προκειμένου να είναι όχι μόνο χρηστικές αλλά και προσιτές. Η επιλογή υλικού ζάντας στον τροχό είναι μια σύνθετη διαδικασία σχεδιασμού. Το υλικό θα πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια που σχετίζονται με την ασφάλεια, την διαδικασία παραγωγής, το κόστος και την φιλικότητα προς το περιβάλλον. Στην σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιούνται ελαφριά κράματα μετάλλου που καλύπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα παραπάνω κριτήρια. Άρα η επιλογή υλικού ανάμεσα στην πληθώρα των διαθέσιμων μεταλλικών κραμάτων είναι ένα σύνθετο και πολυπαραμετρικό πρόβλημα. Στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται μελέτη επιλογής ελαφριού μεταλλικού κράματος, για ζάντα τροχού συμβατικού οχήματος, με την χρήση του λογισμικού προγράμματος CES. Η μελέτη γίνεται με βάση τις μηχανικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητες ενώ λαμβάνονται υπόψη το κόστος, τα επίπεδα ρύπων και η ενέργεια κατεργασίας. Για τον καθορισμό των κριτηρίων σχεδιασμού με βάση τις μηχανικές ιδιότητες πραγματοποιήθηκε ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων με την χρήση των λογισμικών προγραμμάτων SOLIDWORKS και ANSYS για τον προσδιορισμό των κρίσιμων περιοχών (των υψηλότερα καταπονούμενων περιοχών) της ζάντας, αρχικά σε στατική και στη συνέχεια σε δυναμική φόρτιση. Αρχικά σχεδιάστηκε μια συμβατική ζάντα τροχού αυτοκινήτου και ακολούθησε μια γενική ανάλυση, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, σε στατική και κρουστική καταπόνηση.

Παρόμοιες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί και από ξένους ερευνητές, μελέτες οι οποίες είναι σχετικές με την κατανομή των τάσεων, την βελτιστοποίηση του βάρους (Souvan Das - DESIGN AND WEIGHT OPTIMIZATION OF ALUMINIUM ALLOY WHEEL, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 4, Issue 6), την αντοχή σε κόπωση και την διαδικασία σφυρηλάτησης μιας ζάντας (Y.H. Kim, T.K. Ryou, H.J. Choi, B.B. Hwang – AN ANALYSIS OF THE FORGING PROCESSES FOR 6061 ALUMINUM ALLOY WHEELS, Journal of Materials Processing Technology), οι οποίες και αναφέρονται στην βιβλιογραφία, χωρίς όμως να υπάρχει μελέτη ως προς την κατάλληλη επιλογή υλικού. Για τον λόγο αυτό η μελέτη επιλογής υλικού και της κατανομής τάσεων και παραμορφώσεων μελετώνται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφικά στοιχεία

Ο τροχός είναι ένα κυκλικό εξάρτημα που προορίζεται για περιστροφή σε ένα έδρανο άξονα. Οι τροχοί, μαζί με τους άξονες, επιτρέπουν σε βαριά αντικείμενα να κινούνται εύκολα, διευκολύνοντας την μεταφορά ή την μετακίνηση, ενώ υποστηρίζουν ένα φορτίο, ή την εκτέλεση της εργασίας σε μηχανές. Ο τροχός μειώνει την τριβή, διευκολύνοντας έτσι την κίνηση, λόγω της περιστροφής, πάντα μέσω της χρήσης ενός άξονα. Για να περιστραφούν οι τροχοί, πρέπει να εφαρμοστεί σε αυτούς μια ροπή γύρω από τον άξονα τους (άξονας περιστροφής δηλαδή), ή μέσω της βαρύτητας, ή μέσω μιας άλλης εφαρμογής μια εξωτερικής δύναμης ή ροπής. Ουσιαστικά ο τροχός αποτελείται από την ζάντα και το ελαστικό. Ως ζάντα ορίζεται το εσωτερικό τμήμα του τροχού το οποίο υποδέχεται το ελαστικό.

### 2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη τροχού

Τα κύρια τμήματα που αποτελούν τον τροχό (που περιλαμβάνει την ζάντα και το ελαστικό) ενός οχήματος είναι τα εξής:

1) Στεφάνι/ βαρέλι (Rim): Αποτελεί την εξωτερική κυκλική πλευρά του τροχού, που 'συγκρατεί' και την εσωτερική πλευρά του λάστιχου.

2) Κέντρο (Hub/center bore): Το hub είναι το κέντρο του τροχού, το οποίο τυπικά φιλοξενεί ένα ρουλεμάν, και είναι το σημείο όπου οι ακτίνες συναντώνται.

3α) Ακτίνες: οι ακτίνες είναι ένας αριθμός από ράβδους που 'ακτινοβολούν' από το κέντρο του τροχού (hub), συνδέοντας ουσιαστικά το κέντρο με την εξωτερική κυκλική επιφάνεια (rim). Ακτίνες για παράδειγμα συναντάμε στους τροχούς ποδήλατου.

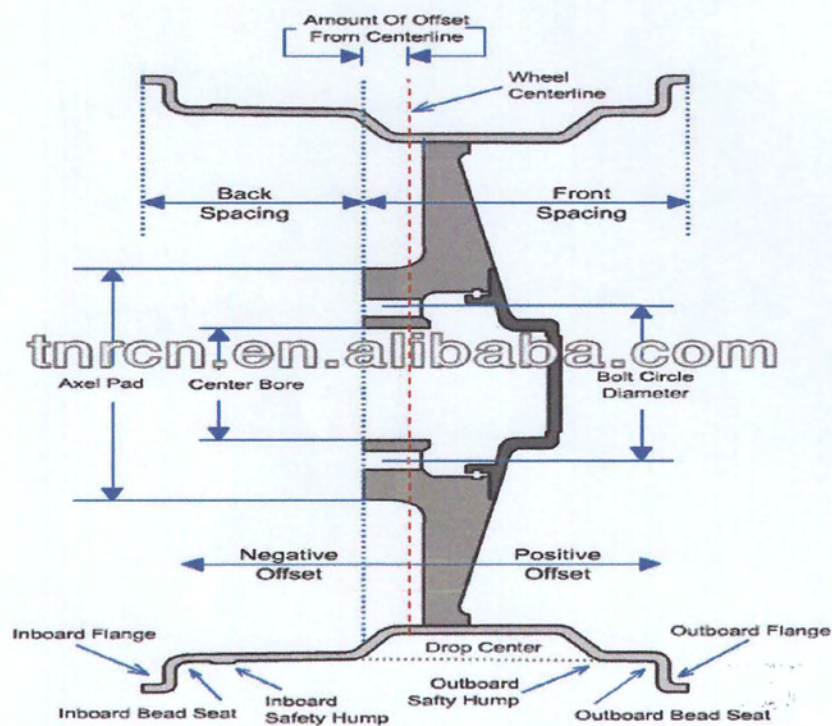
3β) Disc: είναι το κομμάτι του τροχού που συνδέει την εξωτερική επιφάνεια του τροχού (Rim) με το κέντρο του (Hub). Ουσιαστικά είναι ένα κομμάτι που αντικαθιστά τις ακτίνες.

4) Λάστιχο: το λάστιχο είναι ένα κάλυμμα, μορφής δακτυλίου, το οποίο προσαρμόζεται γύρω από εξωτερική επιφάνεια του τροχού, ή αλλιώς RIM, έτσι ώστε να παρέχει προστασία και να παρέχει καλύτερες επιδόσεις στο αυτοκίνητο, καθώς προσδίδει ένα ευέλικτο 'μαξιλάρι' το οποίο απορροφά κραδασμούς ενώ κρατά τον τροχό σε επαφή με το έδαφος. Τα συστατικά κατασκευής του είναι: φυσικό καουτσούκ, χημικό καουτσούκ, σύρμα, ύφασμα σε συνδυασμό με άλλα χημικά συστατικά. Το λάστιχο δουλεύει ουσιαστικά ως τροχός μόνο όταν προσαρμοστεί στο εξωτερικό πέλμα και γεμίσει με αέρα. Ο συνδυασμός λάστιχου και τροχού επηρεάζει την λειτουργία και τις επιδόσεις του αυτοκινήτου. Το λάστιχο σχεδιάζεται έτσι ώστε να ταιριάζει σε μια συγκεκριμένη ζάντα (δηλαδή με

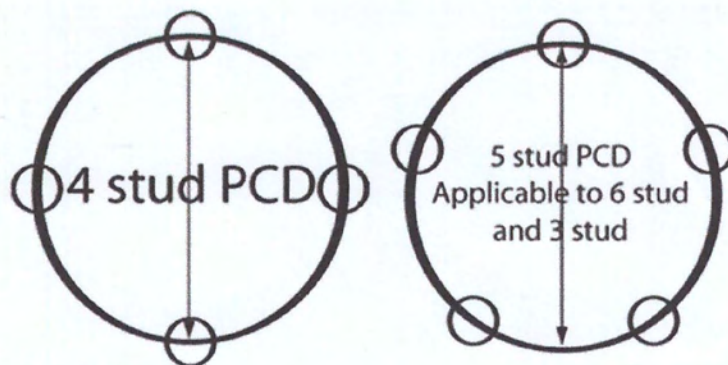


συγκεκριμένα χαρακτηριστικά). Η συναρμολόγηση όλων των παραπάνω δημιουργεί τον τροχό.

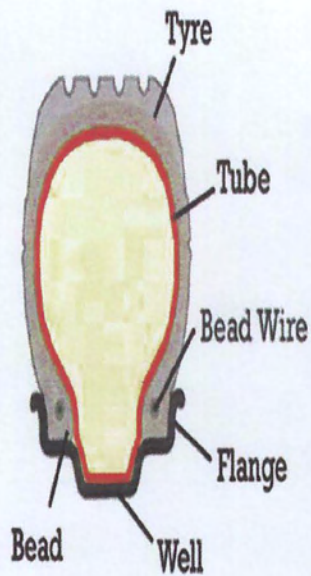
Κάνοντας μια πιο λεπτομερή ανάλυση του τροχού και συμφώνα με τα παρακάτω σχήματα, παρατηρούμε κάποια πιο εξειδικευμένα χαρακτηριστικά της ζάντας του τροχού.



Σχήμα 1: Ονοματολογία βασικών χαρακτηριστικών της ζάντας



Σχήμα 2: P.C.D. (Απόσταση και κατανομή μπουλονιών)



Σχήμα 3: Ονοματολογία βασικών χαρακτηριστικών του RIM της ζάντας ειδικότερα

Σύμφωνα με τα Σχήματα 1,2,3 αναλύονται οι παρακάτω ορισμοί των χαρακτηριστικών μεγεθών της ζάντας.

- **Offset:** Είναι το κενό ανάμεσα από το 'wheel mounting surface' και της κεντρικής γραμμής του τροχού. Χωρίζεται σε θετικό, μηδενικό ή αρνητικό.
- **Rim width:** πλάτος ζάντας
- **Rim diameter:** διάμετρος ζάντας
- **B.C.D (Bolt Circle Diameter):** Είναι η διάμετρος του κύκλου, πάνω στον οποίο βρίσκονται οι οπές για τα μπουλόνια.
- **Flange:** Είναι η φλάντζα η οποία συγκρατεί και τα 2 Bead του ελαστικού και τα εμποδίζει να γλιστρήσουν εκτός τροχού. Οι περιοχές αυτές είναι λυγισμένες κατά 90 μοίρες σε κάθε μεριά της ζάντας.
- **Bead seat:** Είναι περιοχές εσωτερικά των flanges όπου οι περιοχές του ελαστικού (beads) έρχονται σε επαφή με την ζάντα. Οι περιοχές αυτές πρέπει να είναι καθαρές από παλιά ελαστικά ή διάβρωση, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής επαφή ελαστικού και ζάντας.
- **Hump:** Είναι μικρές ακμές στα bead seats που εμποδίζουν το ελαστικό να γλιστρήσει εκτός ζάντας ενώ το αυτοκίνητο κινείται.
- **Well:** Είναι το μέρος της ζάντας με πλάτος και βάθος, το οποίο βοηθά στην εγκατάσταση και την αφαίρεση του ελαστικού.



## 2.2 Υλικά κατασκευής ζαντών

Τα υλικά κατασκευής μιας ζάντας τροχού αυτοκινήτου χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες, τα μεταλλικά κράματα και τα σύνθετα υλικά. Παρακάτω γίνεται μία λεπτομερέστερη αναφορά στα βασικά υλικά κατασκευής ζαντών που κυκλοφορούν στο εμπόριο και συγκεκριμένα στον χάλυβα, αλουμίνιο και μαγνήσιο αλλά και στα σύνθετα υλικά.

### 2.2.1 Ζάντες από μεταλλικά κράματα

#### Χάλυβας

Οι χαλύβδινες ζάντες κατασκευάζονται από κράμα σιδήρου με άνθρακα και μαγγάνιο ενώ χρησιμοποιούνται και διάφορα κραματικά στοιχεία αναλόγως το κράμα και είναι οι πιο φτηνές ζάντες. Χαρακτηρίζονται από διαμορφωσιμότητα, στεγανότητα και αντοχή. Οι χαλύβδινες ζάντες είναι πολύ ποιο δυνατές και έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε κόπωση από τις περισσότερες ζάντες αλουμινίου. Κατασκευάζονται υπό πίεση με μεθόδους χύτευσης και χαρακτηρίζονται από το αυξημένο βάρος τους, της τάξης του 1/2 έως 1/3 μεγαλύτερο, σε σχέση με μια ζάντα αλουμινίου με ίδια αντοχή και σχεδιασμό. Επίσης λόγω του μεγάλου βάρους τους και της υψηλής αδράνειας τους, η οδήγηση του αυτοκινήτου γίνεται πιο επίπονη για τους επιβάτες λόγω των κραδασμών που προκαλούνται. Η παραγωγή τους γίνεται για ζάντες μικρότερες από 17 ίντσες, εξάλλου για μεγαλύτερες ίντσες το βάρος τους θα ήταν τεράστιο. Άρα δεν μπορούν να προσαρμοστούν για κάθε ανάγκη. Επίσης μπορούν να επιδιορθωθούν εύκολα.

#### Κράματα αλουμινίου

Είναι οι πιο δημοφιλείς ζάντες για αυτοκίνητα. Είναι εύκολο να τις βρει κάποιος καθώς κατασκευάζονται σε πάρα πολλά μεγέθη και είναι πολύ ελκυστικές στην εμφάνισή τους άρα σίγουρα ο αγοραστής θα μπορέσει να βρει την κατάλληλη για την περίπτωση του. Οι αλουμινένιες ζάντες αποτελούν ένα κράμα αλουμινίου-νικελίου. Όσο λιγότερο νικέλιο, τόσο ελαφρύτερες είναι οι ζάντες αλλά και πιο εύπλαστες και πιο επιρρεπείς σε λυγισμό κάτω από ένα κρουστικό φορτίο. Το ακριβώς αντίθετο γίνεται όσο ανεβαίνουν τα ποσοστά νικελίου στο κράμα. Το υλικό αυτό είναι οικονομικό ενώ παρέχει αντοχή και δύναμη. Σε σχέση με τις χαλύβδινες ζάντες, η σχεδίασή τους επιτρέπει την καλύτερη ψύξη των φρένων και επιπλέον λόγω της υψηλής θερμικής αγωγιμότητάς τους, η θερμότητα διαχέεται καλύτερα από τα φρένα του αυτοκινήτου, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του φρεναρίσματος. Είναι ελαφρύτερες και λόγω του χαμηλού βάρους τους έχουν και ευεργετική επιρροή στην κατανάλωση καύσιμου του αυτοκινήτου. Επίσης λόγω του χαμηλού βάρους, και συνεπώς της μικρότερης αδράνειας, ένα αυτοκίνητο με ζάντες



αλουμινίου έχει πολύ καλό χειρισμό και ανταποκρίνεται πολύ καλά στην επιτάχυνση και το φρενάρισμα και επιπλέον μεταφέρονται λιγότεροι κραδασμοί μέσω της ανάρτησης, στον οδηγό σε σχέση με βαρύτερες ζάντες. Επίσης παρουσιάζουν καλή αντοχή στη διάβρωση. Σε σχέση με τις ζάντες μαγνησίου, οι ζάντες αλουμινίου έχουν μεγαλύτερη αντοχή. Μειονέκτημα είναι η δυσκολία της επισκευής τους καθώς σε σχέση με τις χαλύβδινες ζάντες παραμορφώνονται ποιο εύκολα κάτω από κρουστικά φόρτια.

### **Κράματα Μαγνησίου**

Το μαγνήσιο είναι πιο ελαφρύ από τα προηγούμενα κράματα, όμως η τιμή του είναι συγκριτικά με άλλα υλικά μεγαλύτερη. Οι ζάντες μαγνησίου είναι πολύ ελκυστικές στην εμφάνισή τους, είναι πιο ελαφριές σε σχέση με τις χαλύβδινες και τις αλουμινένιες άρα παρέχουν και κάποια οικονομία σε καύσιμο και καλό χειρισμό και ανταπόκριση του αυτοκίνητου στις στροφές. Οι μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων μαγνησίου, (αν και υποδεέστερες από τις αντίστοιχες των κραμάτων αλουμινίου), λαμβάνουν ικανοποιητικά εύρη τιμών, σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές μιας ζάντας όπως αντοχή σε κρουστικά φόρτια. Έχουν καλύτερη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τις ζάντες αλουμινίου, κάνοντας έτσι το φρενάρισμα ποιο αποτελεσματικό. Όμως οι ζάντες μαγνησίου είναι πιο δύσκολο να κατασκευαστούν και επίσης μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως αν στραβώσουν δεν μπορούν να επαναφερθούν στην αρχική τους κατάσταση.

### **2.2.2 Ζάντες από σύνθετα υλικά**

Οι τροχοί από σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγωνιστικό επίπεδο και παρατηρούνται σπάνια σε συμβατικά αυτοκίνητα. Ως σύνθετο υλικό σε εφαρμογή ζαντών χρησιμοποιείται το ανθρακόνημα. Το ανθρακόνημα αποτελεί μια επανάσταση στη αυτοκινητοβιομηχανία. Το ανθρακόνημα ή ίνες άνθρακα είναι υλικό το οποίο αποτελείται κυρίως από άτομα άνθρακα. Οι ίνες αποτελούνται από άτομα άνθρακα των οποίων οι δεσμοί είναι περίπου παράλληλοι με τον άξονα της ίνας. Ένα παράδειγμα ζάντας αποτελεί το μοντέλο CR-9 (Σχήμα 4) του οποίου η αρχική ιδέα ζάντα διατυπώθηκε το 2004 στα πλαίσια του Formula SAE project. Το μοντέλο CR-9 δημιουργήθηκε εξ ολοκλήρου από ανθρακονήματα σε ένα μόνο κομμάτι. Το γεγονός αυτό αυξάνει κατά πολύ τις επιδόσεις του σε σχέση με τα έως τώρα υπάρχοντα μοντέλα στις ζάντες. Κατ' αρχήν είναι ως και 50% ελαφρύτερη από αυτές του αλουμινίου. Οι ζάντες έχουν βάρος από 7 έως 8,3 κιλά και είναι ελαφρύτερες κατά 4,5 με 6,8 κιλά από τις ζάντες αλουμινίου. Μετά, τις ξεπερνά στα τεστ εργαστηρίου σε όλες τις μετρήσεις καθώς αυτή η διάταξη των ινών προσδίδει στο ανθρακόνημα υψηλή αντοχή σε θραύση, χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής, χαμηλό βάρος και ανθεκτικότητα σε χημικές ουσίες. Έχουν καλύτερη

επιτάχυνση, φρενάρισμα, πρόσφυση και ανταπόκριση στις αλλαγές ταχυτήτων. Επίσης παρατηρείται βελτίωση τόσο στην πορεία όσο και στο κράτημα του οχήματος, αφού οι αναρτήσεις του αυτοκινήτου θα σηκώνουν πολύ λιγότερο βάρος και θα ταλαιπωρούνται λιγότερο. Εξαιτίας του μικρότερου βάρους είναι σημαντική η μείωση στην κατανάλωση καυσίμου που επιτυγχάνεται με τη νέα ζάντα αφού ένας ελαφρύτερος τροχός έχει και μικρότερη ροπή αδράνειας. Η CR9 επίσης λόγω του μειωμένου αναρτώμενου βάρους, μειώνει τη μέση κατανάλωση και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> ενός αυτοκινήτου κατά 2 έως 4%. Κάποια αλλά πλεονεκτήματα είναι η ελαστικότητα και η αντοχή σε κόπωση. Για την ώρα βέβαια το κόστος τους παραμένει υψηλό και γι' αυτό απευθύνονται κυρίως σε αγωνιστικά και πολυτελή αυτοκίνητα. Για μια τετράδα το κόστος ανέρχεται στις 12000 ευρώ.

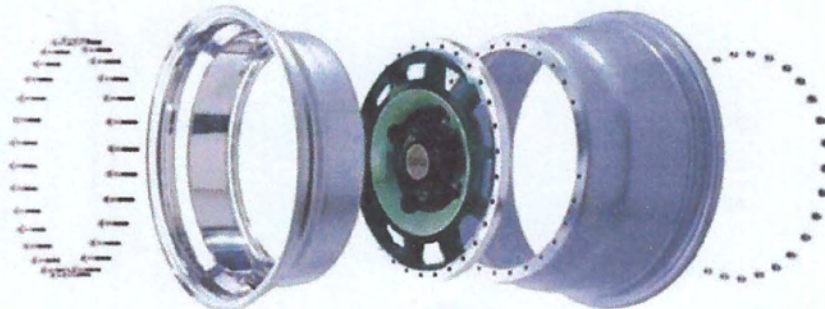


Σχήμα 4: τροχός CR-9 FIBER

## 2.3 Τύποι και μέθοδοι κατασκευής ζαντών

### 2.3.1 Κύριοι τύποι ζαντών

Οι ζάντες οι οποίες κυκλοφορούν στην αγορά χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, τις μονοκόμματες και τις σπαστές ζάντες (Σχήμα 5). Οι μονοκόμματες ζάντες αποτελούνται από ένα μόνο κομμάτι και είναι οι πιο διαδεδομένες ενώ οι σπαστές αποτελούνται από περισσότερα κομμάτια: το κεντρικό τμήμα, τα πλαϊνά και το εσωτερικό. Η σπαστή ζάντα αποτελείται από δύο ή τρία στοιχεία συγκολλημένα μεταξύ τους για να σχηματίσουν μία ενιαία ζάντα.



Σχήμα 5: Τμήματα σπαστής ζάντας

Οι σπαστές ζάντες σχεδιάζονται με διαφορετικές μεθόδους. Το κεντρικό τμήμα μπορεί είτε να σφυρηλατηθεί είτε να χυτευθεί. Τα πλαϊνά των σπαστών ζαντών συχνά σχεδιάζονται από ένα δίσκο αλουμινίου αλλά μπορούν επίσης να είναι και από μαγνήσιο. Υπάρχουν ζάντες ειδικές για διάφορες εφαρμογές. Αρχικά, αυτό το είδος ζάντας αναπτύχθηκε για τα αγωνιστικά αυτοκίνητα. Οι σπαστές ζάντες προορίζονται για το ανώτατο επιπέδου τμήμα της αγοράς. Παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία προσαρμογής και είναι κατάλληλες για οχήματα με ασυνήθιστες διαστάσεις ή απλά για tuning. Σε περίπτωση ατυχήματος, είναι δυνατόν να αντικατασταθεί μόνο το κατεστραμμένο τμήμα της ζάντας.

### **2.3.2 Μέθοδοι κατασκευής ζαντών**

Οι μέθοδοι κατασκευής ζαντών στην αυτοκινητοβιομηχανία, ποικίλουν και εξαρτώνται από την φιλοσοφία της κάθε εταιρίας παραγωγής. Οι μέθοδοι αυτές είναι οι εξής:

- Χύτευση με βαρύτητα
- Χύτευση χαμηλής πίεσης
- Τεχνολογία πλαστικής παραμόρφωσης ή υδραυλικής μορφοποίησης
- Σφυρήλατες ζάντες

Για τις μονοκόμματες ζάντες η χύτευση των ζαντών πραγματοποιείται χυτεύοντας υγρό αλουμίνιο μέσα σε ένα ειδικά σχεδιασμένο καλούπι. Χρησιμοποιούνται πολλές μέθοδοι και η κατεργασία ποιοτικών ζαντών απαιτεί μεγάλη γνώση.

#### **Χύτευση με βαρύτητα**

Η χύτευση με βαρύτητα είναι η πιο απλή διαδικασία χύτευσης. Χρησιμοποιούμε απλά τη βαρύτητα για να γεμίσουμε το καλούπι. Βασικός στόχος της χύτευσης με βαρύτητα είναι η μείωση του κόστους. Επίσης πρόκειται για καλή μέθοδο σε περιπτώσεις όπου το ντιζάιν υπερτερεί του βάρους. Δεδομένου ότι η διαδικασία βασίζεται ουσιαστικά στο φαινόμενο της βαρύτητας, η περιεκτικότητα αυτού του τύπου ζάντας σε αλουμίνιο δεν είναι τόσο υψηλή όσο με άλλες μεθόδους παραγωγής. Κατά γενικό κανόνα, αυτές οι ζάντες απαιτούν μεγαλύτερη μάζα για την κάλυψη ειδικών απαιτήσεων αντοχής.

#### **Χύτευση χαμηλής πίεσης**

Η χύτευση χαμηλής πίεσης χρησιμοποιεί χαμηλή πίεση για ταχύτερη μεταφορά του αλουμινίου μέσα στο καλούπι σε σχέση με την χύτευση με βαρύτητα. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού βελτιώνονται χάρη στη μεγαλύτερη πυκνότητα. Το κόστος παραγωγής είναι ελαφρώς υψηλότερο από ότι για τη χύτευση με βαρύτητα. Ωστόσο, σήμερα είναι η βασική μέθοδος παραγωγής ζαντών από κράματα. Μερικοί κατασκευαστές έχουν καταφύγει σε υψηλότερες πιέσεις για



να μειώσουν το βάρος της ζάντας και να ενισχύσουν τη δομή της, αλλά αυτή η διαδικασία είναι πιο δαπανηρή. Η ζάντα από τη χύτευση χαμηλής πίεσης είναι η πιο δημοφιλής λύση της αγοράς ανταλλακτικών λόγω της σημαντικής ισορροπίας βάρους και αντοχής.

### **Ζάντες τεχνολογίας πλαστικής παραμόρφωσης ή υδραυλικής μορφοποίησης**

Αυτή η κορυφαία μέθοδος προέρχεται από τη χύτευση χαμηλής πίεσης. Σε δεύτερο χρόνο, ένα ειδικό μηχάνημα προκαλεί περιστροφή του καλουπιού βάσης και θερμαίνει το εξωτερικό μέρος του καλουπιού, ενώ κύλινδροι οδήγησης λαμβάνουν το μέρος των πλαϊνών της ζάντας και το εκτείνουν κατά μήκος, όπως κάνουν οι κεραμοποιοί. Ο συνδυασμός θερμότητας, πίεσης και περιστροφής επιτρέπουν τη λήψη πλαϊνών ζάντας με αντίσταση παρόμοια με εκείνη μίας σφυρήλατης ζάντας, κάνοντας σημαντική οικονομία. Η O.Z χρησιμοποιεί αυτή την τεχνολογία για την επεξεργασία των ζαντών της για τη Formula 1 εδώ και πολλά χρόνια. Η ανταλλακτική ζάντα HLT για τη Formula είναι ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα των ζαντών που κατασκευάζονται μέσω υδραυλικής μορφοποίησης. Αυτό που πρέπει να γνωρίζουμε είναι ότι όλοι οι κατασκευαστές προσπαθούν να επιτύχουν τις ιδιότητες της σφυρήλατης ζάντας αλουμινίου περιορίζοντας τα υπέρογκα έξοδα που προκύπτουν από αυτές.

### **Σφυρήλατες ζάντες**

Πρόκειται για την κορυφαία επιλογή στις ζάντες. Η μέθοδος της σφυρήλατης συνιστάται στη διαμόρφωση μιας ζάντας με πολύ υψηλή πίεση από ένα κομμάτι αλουμίνιο. Το τελικό προϊόν έχει τόσο μεγάλη πυκνότητα και αντοχή, που οι σφυρήλατες ζάντες είναι ανάλαφρες. Αυτό εξηγείται χάρη στην ινοποίηση που προκαλείται από την παραμόρφωση του υλικού και την αλλαγή του προσανατολισμού των μεταλλικών κρυστάλλων που ενισχύει τη δομή του τελικού προϊόντος. Το κόστος όσον αφορά τα εργαλεία, τα μηχανήματα και την εργασία κάνουν αυτές τις ζάντες προϊόντα πολυτελείας.

### **Σπαστές ζάντες**

Όπως περιγράψαμε σε προηγούμενο σημείο, οι τρόποι κατασκευής των σπαστών ζαντών δεν διαφέρουν σε τίποτα από εκείνες που περιγράψαμε παραπάνω, παρά μόνο στο ότι κάθε κομμάτι κατασκευάζεται ξεχωριστά. Αυτό επιτρέπει πολλούς συνδυασμούς διαδικασιών και υλικών. Για παράδειγμα, μπορούμε να έχουμε μία ζάντα με κεντρικό μέρος από χυτό μαγνήσιο, σε συνδυασμό με πλαϊνά από σφυρήλατο αλουμίνιο.

## Κεφάλαιο 3 Μελέτη επιλογής ελαφριού μεταλλικού κράματος με το λογισμικό CES

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μελέτη επιλογής μεταλλικού κράματος, για ζάντα τροχού συμβατικού οχήματος, με την χρήση του λογισμικού προγράμματος CES. Αρχικά περιγράφονται τα κριτήρια με τα οποία γίνεται η επιλογή και στην συνέχεια γίνεται εφαρμογή του Προγράμματος CES σε διαδοχικά βήματα χρησιμοποιώντας τα κριτήρια σχεδιασμού. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει σε κάθε βήμα το «φιλτράρισμα» των υλικών που ικανοποιούν τα κριτήρια σχεδιασμού.

### 3.1 Κριτήρια επιλογής υλικού

Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για την μελέτη επιλογής υλικού αφορούν μηχανικές, φυσικές, θερμικές και ιδιότητες κατεργασίας καθώς και κριτήρια σχετικά με το κόστος και την φιλικότητα προς το περιβάλλον.

Σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες, η επιλογή υλικού γίνεται με βάση ελάχιστα επιτρεπτά όρια όσον αφορά τις τιμές αντοχής, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα της ζάντας και συνεπώς η ασφάλεια των επιβατών του αυτοκινήτου. Η επιλογή ελαχίστων κριτηρίων γίνεται με βάση τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και τον συντελεστή ασφάλειας που επιλέγεται κατά τον σχεδιασμό. Με τον καθορισμό του ελάχιστου μέτρου Ελαστικότητας επιτυγχάνεται η ελάχιστη δυνατή δυσκαμψία του υλικού ώστε να αποφεύγονται σημαντικές ελαστικές παραμορφώσεις κατά την λειτουργία. Η τιμή του ορίου επιμήκυνσης θα πρέπει να είναι τέτοια, ώστε το υλικό να μην είναι ψαθυρό, και συνεπώς να μπορεί να κατεργαστεί και μορφοποιηθεί με ευκολία από τον κατασκευαστή χωρίς να παρουσιάζει ρηγματώσεις. Στην παρούσα εργασία δεν μελετήθηκαν μέθοδοι παραγωγής με χύτευση αλλά μόνο διαδικασίες μορφοποίησης (σφυρηλάτηση), που οδηγούν σε καλύτερες τελικές μηχανικές ιδιότητες και η επιμήκυνση θραύσης είναι σημαντική.

Η φυσική ιδιότητα που είναι σχετική με την παρούσα ανάλυση είναι η πυκνότητα του υλικού. Σε συνδυασμό με τις μηχανικές ιδιότητες η πυκνότητα καθορίζει τις ειδικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού που είναι το κριτήριο σχεδιασμού για ελαφριές κατασκευές. Στην περίπτωση των ζαντών χρειαζόμαστε ένα υλικό σχετικά ελαφρύ, καθώς λόγω της μικρότερης αδράνειας λόγω χαμηλού βάρους σε σχέση με ζάντες υψηλής πυκνότητας, μπορούμε να πετύχουμε όχι μόνο υψηλότερες αποδόσεις όπως π.χ. επιτάχυνση και καλύτερο χειρισμό για το αυτοκίνητο αλλά και μεγαλύτερη άνεση ταξιδιού για τους επιβάτες λόγω χαμηλών κραδασμών.

Η θερμική ιδιότητα που χρησιμοποιήθηκε σαν κριτήριο επιλογής είναι η θερμική αγωγιμότητα. Στην περίπτωση της ζάντας, απαιτείται σχετικά υψηλή τιμή θερμικής αγωγιμότητας που οδηγεί σε μεγαλύτερη απώλεια θερμότητας από τα φρένα του αυτοκινήτου και οδηγεί σε καλύτερη απόδοση φρεναρίσματος. Πέραν

των ιδιοτήτων των υλικών υπάρχουν περαιτέρω κριτήρια που είναι σημαντικά στον σχεδιασμό και την τελική επιλογή του υλικού. Πολύ σημαντικό κριτήριο επιλογής αποτελεί το κόστος προμήθειας του υλικού καθώς οι ζάντες τροχού αυτοκινήτου δεν πρέπει να ικανοποιούν μόνο τις παραπάνω μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, αλλά πρέπει να είναι και προσιτές στον αγοραστή. Παράλληλα σημαντικά είναι τα κριτήρια που έχουν να κάνουν με την παραγωγική διαδικασία του υλικού. Για παράδειγμα στην παραγωγή της ζάντας σημαντική είναι η καλή ή κακή κατεργασιμότητα του υλικού. Για τον λόγο αυτό, εξετάζεται το κόστος ενέργειας που απαιτείται για την μορφοποίηση της ζάντας. Τέλος πολύ σημαντική παράμετρος πλέον για την χρήση σύγχρονων υλικών, είναι το υλικό να συμπεριφέρεται φιλικά προς το περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό εξετάζονται μεγέθη όπως οι εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα και η ενέργεια που απαιτείται για την ανακύκλωση μιας ζάντας τροχού. Στον Πίνακα 1 φαίνονται σχηματικά τα παραπάνω κριτήρια σχεδιασμού καθώς και οι σχετικές ιδιότητες/παράμετροι τους.

Πίνακας 1 : Κριτήρια σχεδιασμού και σχετικές ιδιότητες/παράμετροι

Κριτήρια σχεδιασμού	Σχετική ιδιότητα/παράμετρος	
Ιδιότητες	Μηχανικές	Όριο διαρροής Όριο θραύσης Όριο αντοχής σε κόπωση Όριο θραύσης σε θλίψη Μέτρο ελαστικότητας Επιμήκυνση σε θραύση
	Φυσικές	Πυκνότητα
	Θερμικές	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
Κατεργασιμότητα	Ενέργεια μορφοποίησης	
Κόστος	Τιμή αγοράς	
Φιλικότητα ως προς το περιβάλλον	Εκπομπές CO <sub>2</sub> Ενέργεια ανακύκλωσης	

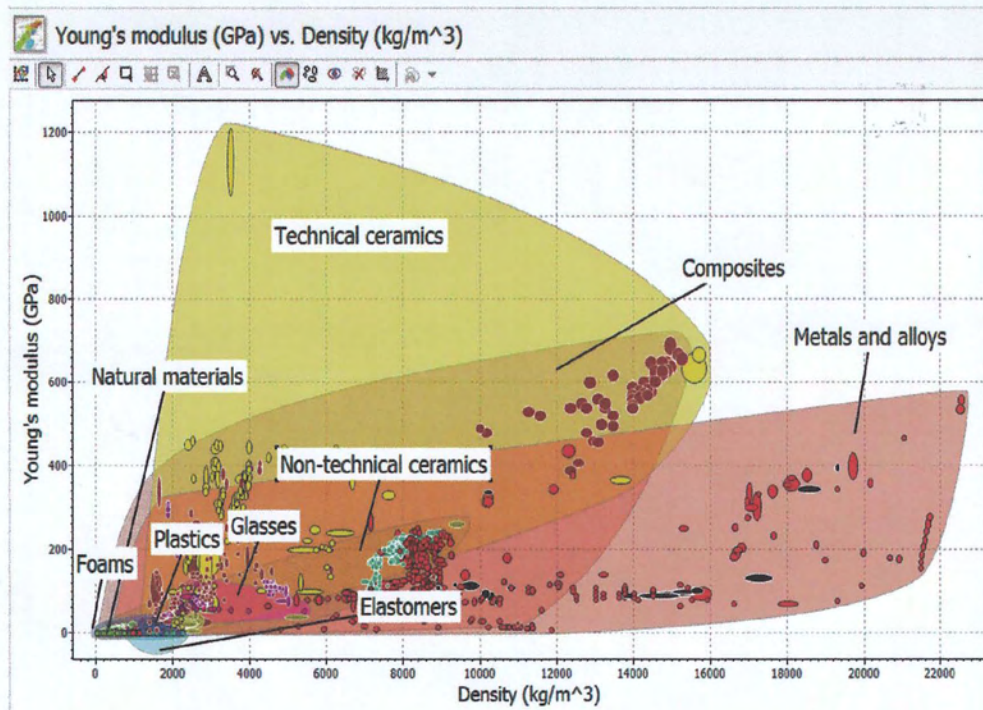


### 3.2 Συντελεστής ασφάλειας

Για τον καθορισμό των απαιτούμενων ορίων αντοχής στο Πρόγραμμα CES είναι απαραίτητος στον σχεδιασμό ο καθορισμός ενός συντελεστή ασφάλειας. Η τιμή του συντελεστή ασφάλειας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη εκτιμήθηκε από αριθμητική προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε στην ζάντα σε στατική μελέτη φόρτισης που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4 της εργασίας. Στο πλαίσιο της εργασίας χρησιμοποιήθηκε τέτοια οριακή τιμή ορίου διαρροής έτσι ώστε να ικανοποιείται μια αρχική τιμή συντελεστή ασφάλειας κατά των στατικών έλεγχου  $\eta > 3,5$ .

### 3.3 Χρήση κριτηρίων σχεδιασμού στην επιλογή υλικών

Στο διάγραμμα του Σχήματος 6 δίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κατηγοριοποίησης των κατασκευαστικών υλικών από το πρόγραμμα CES, με βάση το ειδικό μέτρο Ελαστικότητας  $E_{ελδ} = E/\rho$  (όπου  $E$  το μέτρο Ελαστικότητας και  $\rho$  η πυκνότητα). Στην συγκεκριμένη περίπτωση υλικά που ικανοποιούν την απαίτηση για υψηλό ειδικό μέτρο Ελαστικότητας θα βρίσκονταν στην επάνω-αριστερά περιοχή του διαγράμματος. Όπως προκύπτει από την ανάλυση η διαθεσιμότητα τέτοιων υλικών είναι πολύ μικρή. Για τον λόγο αυτό ανάλογα με την σχεδιαστική ανάγκη τίθενται ρεαλιστικά αριθμητικά όρια για τις ιδιότητες που καλύπτουν τις απαιτήσεις για την ασφάλεια και λειτουργικότητα.



Σχήμα 6: Μέτρο Ελαστικότητας σε συνάρτηση με την πυκνότητα για διάφορες οικογένειες υλικών με βάση το πρόγραμμα CES

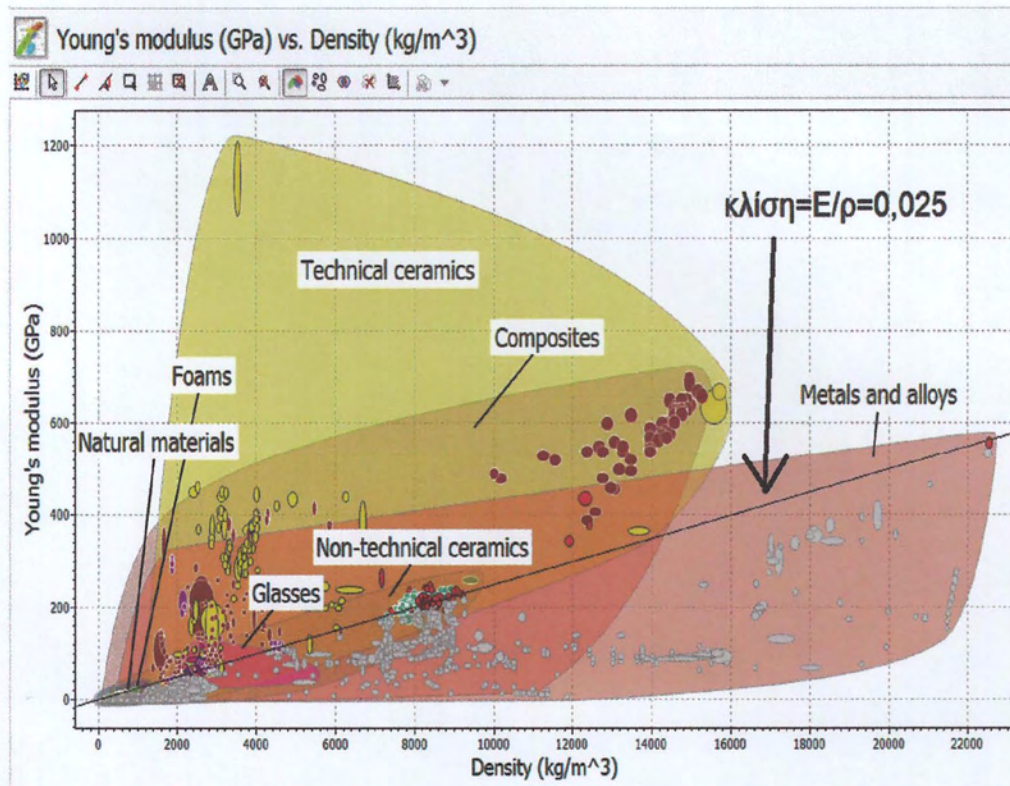
Οι ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα CES σε ξεχωριστά στάδια ανάλυσης προκειμένου να γίνει το φιλτράρισμα των υλικών που καλύπτουν τις απαιτήσεις του σχεδιασμού για την ζάντα του τροχού ενός συμβατικού αυτοκινήτου. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα στάδια επιλογής των υλικών αναλυτικά ξεκινώντας από τις ιδιότητες του υλικού και στην συνέχεια τα χαρακτηριστικά που αφορούν την ευκολία καταργασίας, το κόστος και την φιλικότητα προς το περιβάλλον.

### 3.3.1 Βήμα Επιλογής 1 - Ειδικές ιδιότητες

Οι ειδικές ιδιότητες λαμβάνουν υπόψη την μηχανική ιδιότητα για ένα υλικό σε συνάρτηση με την πυκνότητα. Η σχεδιαστική αυτή φιλοσοφία που εφαρμόζεται στις ελαφριές κατασκευές και χρησιμοποιείται εδώ για να τονίσει την σημασία που έχει η χρήση υλικών που θα οδηγήσουν σε σχεδιασμό της ζάντας με την φιλοσοφία μίας ελαφριάς κατασκευής, με πλεονεκτήματα όσον αφορά το βάρος της κατασκευής.

Σε πρώτο στάδιο τέθηκε ως παράμετρος το ειδικό μέτρο Ελαστικότητας  $E_{ελδ}=(E/\rho)$ . Η τιμή του  $E_{ελδ}$  καθορίστηκε από την ελάχιστη τιμή που δίνουν μεταλλικά κράματα αλουμινίου και μαγνησίου που έχουν μέτρο Ελαστικότητας (E) 72GPa και 45GPa και πυκνότητές τους είναι  $2700\text{kg}/\text{m}^3$  και  $1800\text{kg}/\text{m}^3$  αντίστοιχα. Για τις τιμές αυτές προκύπτει ελάχιστη τιμή του ειδικού μέτρου Ελαστικότητας 0,025 Nm/kg που είναι η κλίση της καμπύλης του διαγράμματος E-ρ. Τα υλικά τα οποία βρίσκονται πάνω από την καμπύλη ικανοποιούν τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου σταδίου, απαιτήσεις δηλαδή για ελαφρύ υλικό με ταυτόχρονη απαίτηση μιας αναγκαίας δυσκαμψίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 7 από το οποίο περνάνε 1281 από τα 2920 αρχικά υλικά που ελέγχθηκαν και υπάρχουν στην βάση δεδομένων του προγράμματος.



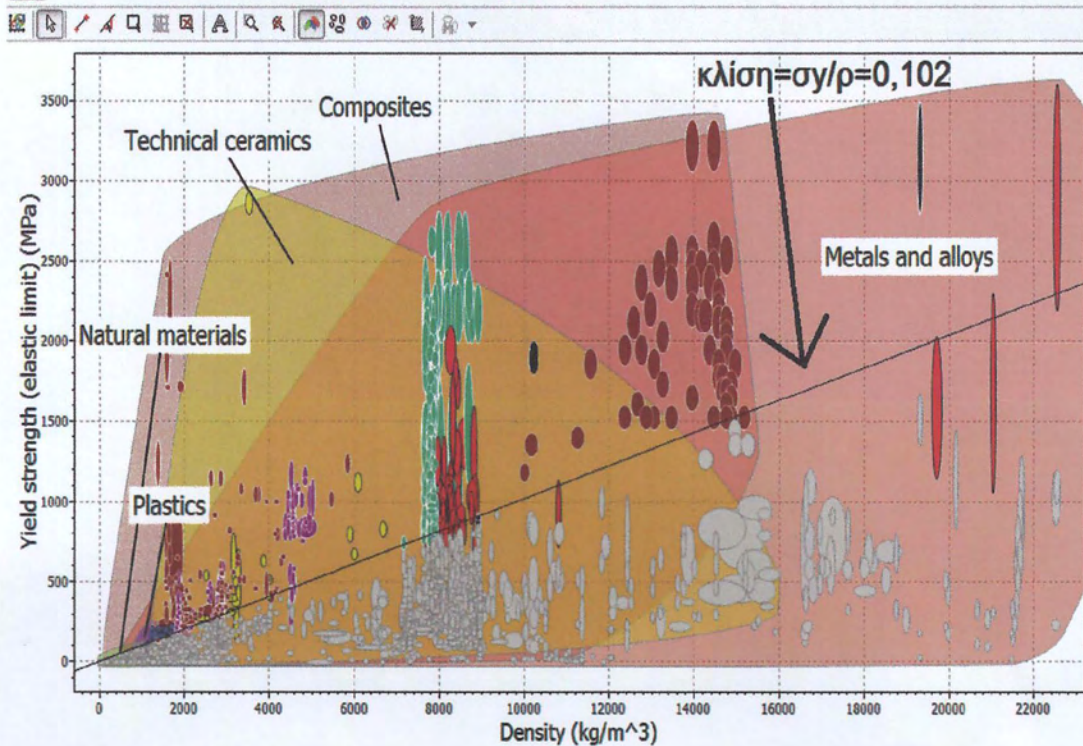


Σχήμα 7 : Μέτρο Ελαστικότητας σε συνάρτηση με την πυκνότητα για διάφορες οικογένειες υλικών με βάση το πρόγραμμα CES

Στο δεύτερο στάδιο βάζουμε ως παράμετρο το ειδικό όριο διαρροής  $\sigma_{ελδ}=(\sigma_y/\rho)$ . Το ελάχιστο ειδικό όριο επιλέχθηκε πάλι για τα ελαφριά μεταλλικά κράματα αλουμινίου και μαγνησίου. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν τυπικές ελάχιστες τιμές του ορίου διαρροής 276MPa και 230MPa για αλουμίνιο και μαγνήσιο με πυκνότητα 2700kg/m<sup>3</sup> και 1800kg/m<sup>3</sup> αντίστοιχα. Με τις τιμές αυτές προκύπτει η κλίση της ευθείας του διαγράμματος που είναι το κάτω όριο για την επιλογή υλικών ίση με 0,102 και 0,12 για αλουμίνιο και μαγνήσιο αντίστοιχα. Έτσι επιλέχθηκε η μικρότερη κλίση ως όριο για να υπάρχει μεγαλύτερο εύρος υλικών που περνούν το test. Τα υλικά τα οποία βρίσκονται πάνω από την καμπύλη ικανοποιούν τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου βήματος επιλογής και φαίνονται στο Σχήμα 8. Από το στάδιο αυτό περνάνε 791 από τα 2920 αρχικά υλικά που υπάρχουν στη βάση δεδομένων.



Yield strength (elastic limit) (MPa) vs. Density (kg/m<sup>3</sup>)



Σχήμα 8: Όριο διαρροής σε συνάρτηση με την πυκνότητα για διάφορες οικογένειες υλικών με βάση το πρόγραμμα CES

### 3.3.2 Βήμα Επιλογής 2 - Καθορισμός επιτρεπτών ορίων (ιδιοτήτων-κόστους)

Στο επόμενο στάδιο καθορίζονται επιτρεπτά όρια ιδιοτήτων των υλικών (μηχανικών, θερμικών) για τον σχεδιασμό της ζάντας, σχετικών με τις απαιτήσεις παραγωγής και λειτουργίας της καθώς και του κόστους αγοράς που κρίνει επιτρεπτή από την οικονομική σκοπιά την χρήση του υλικού.

Για παράδειγμα, θεωρώντας τον τύπο σφυρήλατης ζάντας απαιτείται η ικανότητα μορφοποίησης του προϊόντος άρα ικανοποιητική ομοιόμορφη παραμόρφωση. Η σχετική ιδιότητα που δίνεται στο Πρόγραμμα είναι η επιμήκυνση μέχρι την θραύση. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε χαρακτηριστική τιμή επιμήκυνσης για την οποία ένα υλικό έχει όγκιμα χαρακτηριστικά. Ενδεικτική τιμή είναι 15% επιμήκυνση σε θραύση, η οποία και χρησιμοποιήθηκε. Ένα ακόμη σημαντικό κριτήριο αποτελεί το κόστος, προκειμένου μια ζάντα να είναι προσιτή στον αγοραστή. Στο κριτήριο αυτό τέθηκε ως μέγιστη τιμή, η τιμή 10USD, τιμή η οποία καλύπτει τα περισσότερα κράματα σιδήρου, αλουμινίου και μαγνησίου.

Παράλληλα θα πρέπει η ζάντα να μπορεί εύκολα να απάγει την θερμότητα που δημιουργείται κατά το φρενάρισμα, αυξάνοντας έτσι την απόδοση της λειτουργίας των φρένων. Εδώ σημαντική είναι η χρήση ενός υλικού με μεγάλη

θερμική αγωγιμότητα. Τα ελαφριά μεταλλικά κράματα (αλουμινίου και μαγνησίου) έχουν έως τέσσερις φορές μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα από τα κράματα σιδήρου. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ως κατώτατη τιμή, η τιμή 60 W/m.k η οποία αντιστοιχεί σε ένα κράμα μαγνησίου. Επίσης σημαντική είναι η ιδιότητα του ορίου κοπώσεως του υλικού αφού η ζάντα δέχεται κατά την λειτουργία της εναλλασσόμενα κυκλικά φορτία. Η ελάχιστη τιμή του ορίου κοπώσεως στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε να είναι 80 MPa. Όσον αφορά το όριο αντοχής σε θλίψη επιλέχθηκε ως ελάχιστη τιμή, η τιμή 150 MPa καθώς και οι μέγιστες ορθές τάσεις  $\sigma_z$  που υπολογίζονται στο Κεφάλαιο 4.2 ανέρχονται σε 142 MPa, αλλά στην πραγματικότητα κυμαίνονται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα λόγω της παρουσίας του ελαστικού. Τα όρια που τέθηκαν για τις παραπάνω ιδιότητες δίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2:Χαρακτηριστικά ελάχιστα όρια ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη

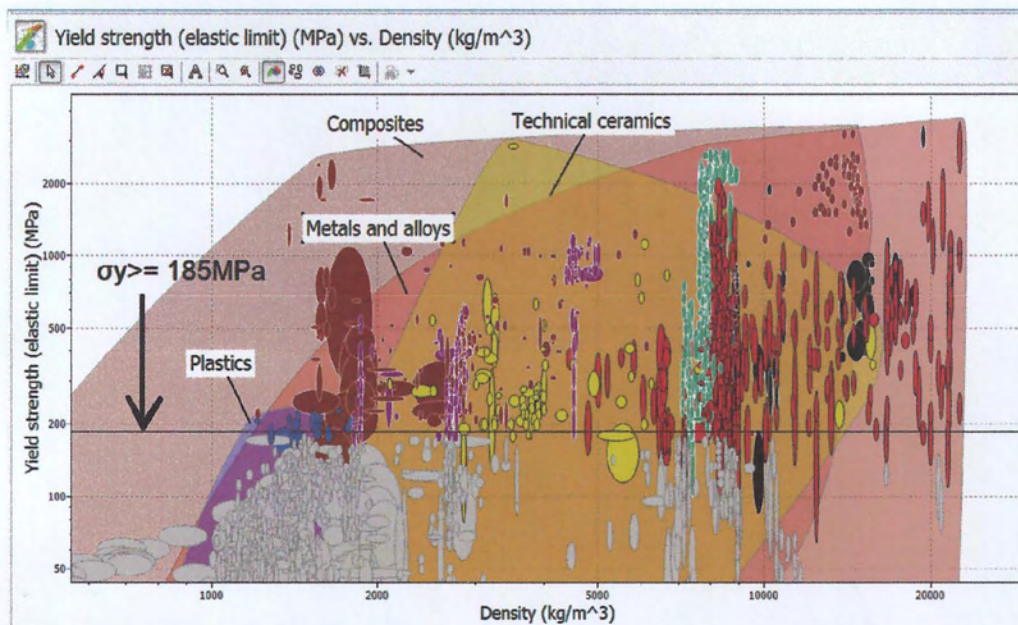
	Ιδιότητα υλικού	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Υλικά που περνούν το αντίστοιχο τεστ
Μηχανικές Ιδιότητες	Όριο Διαρροής $\sigma_y$	185 MPa	-	1613 από 2920
	Όριο Θραύσης $\sigma_{uts}$	230 MPa	-	1719/2920
	Όριο αντοχής σε κόπωση $10^7$ κύκλων	80 MPa	-	1798/2920
	Όριο θραύσης σε θλίψη	150 MPa	-	1949/2920
	Επιμήκυνση στην θραύση (elongation at fracture)	15%	-	1292/2920
	Μέτρο Ελαστικότητας	45 GPa	-	1922/2920
Κόστος	Τιμή αγοράς	-	10 USD/Kg	1882/2920
Επιπλέον ειδικά μεγέθη	Θερμική αγωγιμότητα	60 W/m.k		747/2920



Ορισμένες από τις παραπάνω ιδιότητες παρουσιάζονται σχηματικά στα παρακάτω διαγράμματα.

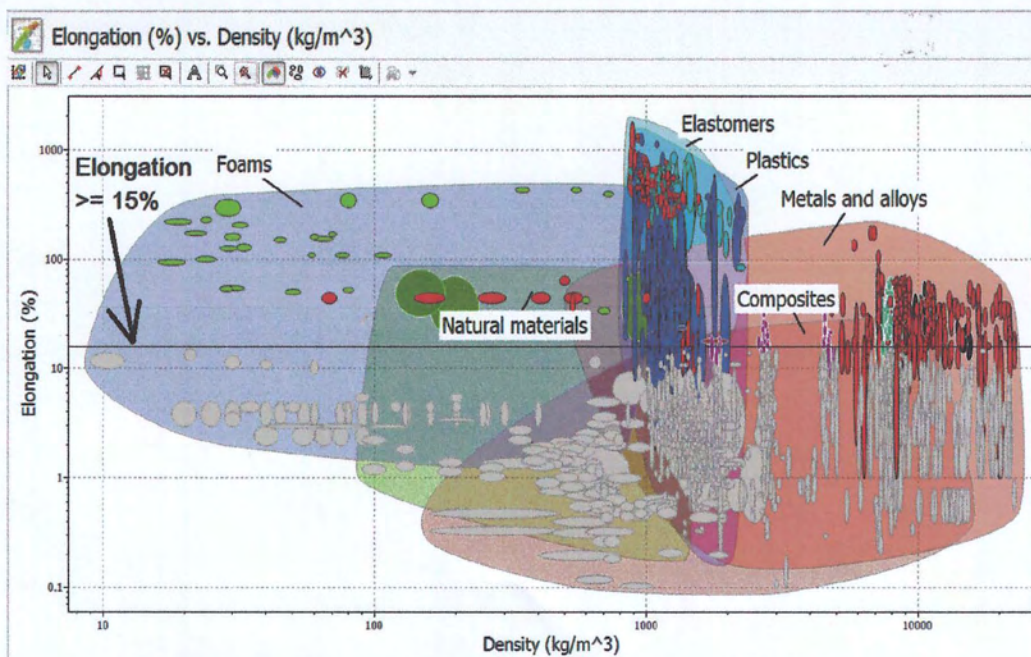


Τα αποτελέσματα των υλικών που ικανοποιούν το κριτήριο για ελάχιστο όριο διαρροής  $\sigma_y$  ίσο με 185 MPa παρουσιάζονται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9 : Υλικά που περνούν το CES τεστ για όριο διαρροής  $\sigma_y \geq 185 \text{ MPa}$

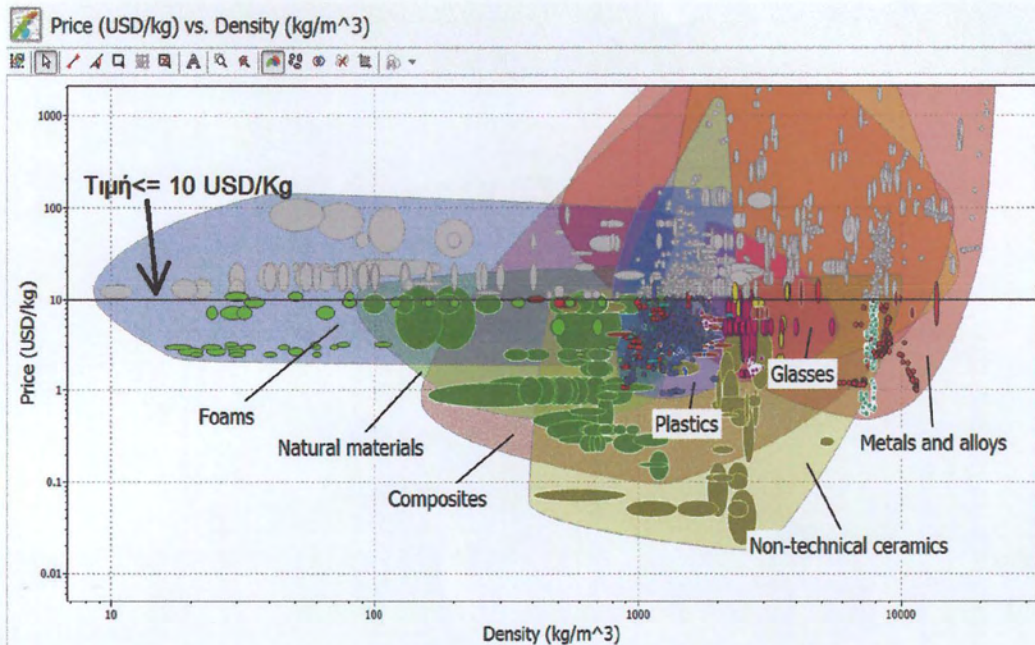
Τα αποτελέσματα των υλικών που ικανοποιούν το κριτήριο για ελάχιστη επιμήκυνση σε θραύση 15% παρουσιάζονται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10 : Υλικά που περνούν το CES τεστ για όριο επιμήκυνσης  $\geq 15\%$

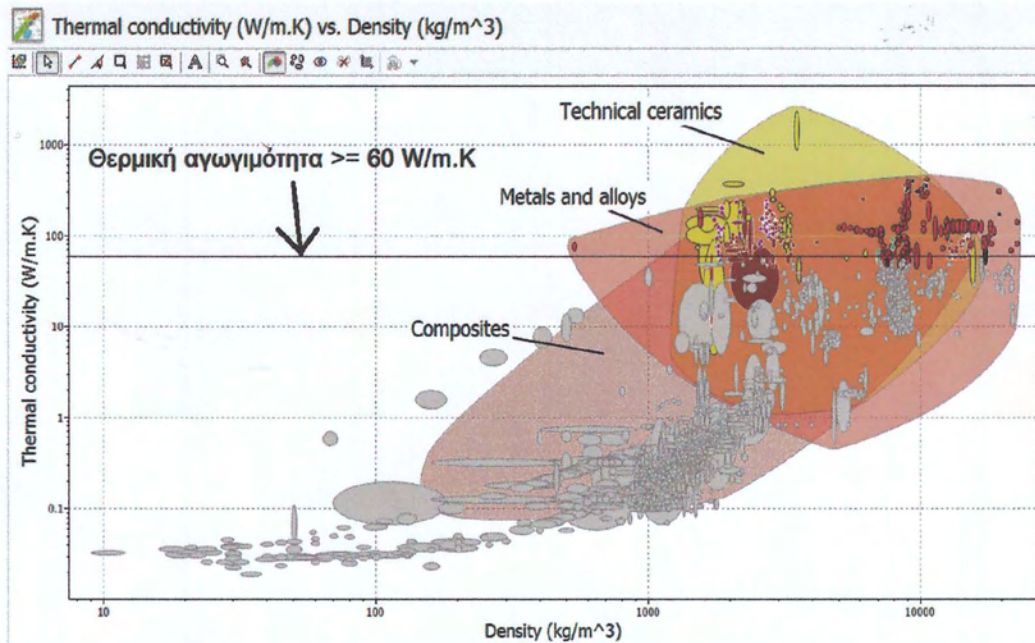


Τα αποτελέσματα των υλικών που ικανοποιούν το κριτήριο για μέγιστη τιμή αγοράς ίση με 10 USD/Kg παρουσιάζονται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11: Υλικά που περνούν το CES τεστ για τιμή αγοράς <= 10 USD/Kg

Τα αποτελέσματα των υλικών που ικανοποιούν το κριτήριο για ελάχιστη θερμική αγωγιμότητα ίση με 60 W/m.K παρουσιάζονται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Υλικά που περνούν το CES τεστ για θερμική αγωγιμότητα >= 60 W/m.K



Με την χρήση των ορίων του Πίνακα 2 για τις ιδιότητες και το κόστος προέκυψαν 10 υλικά από την βάση δεδομένων του προγράμματος CES που ικανοποιούν τα κριτήρια ανάμεσα σε συνολικά 2920 υλικά. Τα υλικά είναι ελαφριά μεταλλικά κράματα αλουμινίου και μαγνησίου και δίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3:Υλικά που ικανοποιούν τα κριτήρια σχεδιασμού με βάση τα βήματα 1 και 2

**3. Results: 10 of 2920 pass** ▼

Show: **Pass all Stages** ▼

Rank by: **Alphabetical** ▼

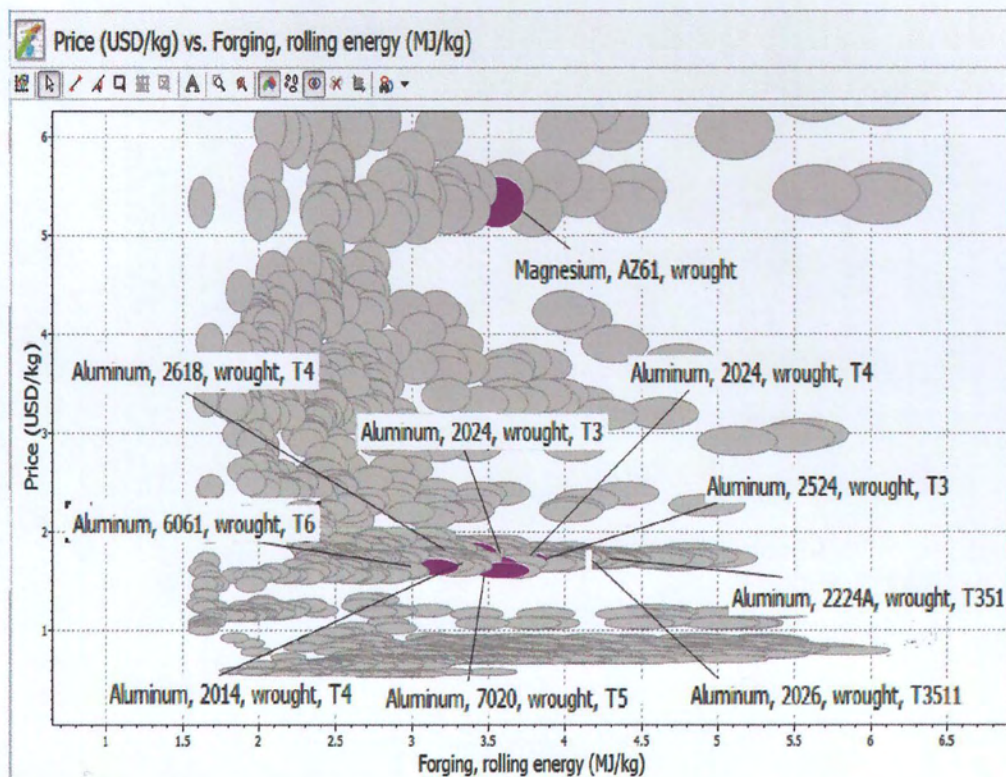
Name
■ Aluminum, 2014, wrought, T4
■ Aluminum, 2024, wrought, T3
■ Aluminum, 2024, wrought, T4
■ Aluminum, 2026, wrought, T3511
■ Aluminum, 2224A, wrought, T351
■ Aluminum, 2524, wrought, T3
■ Aluminum, 2618, wrought, T4
■ Aluminum, 6061, wrought, T6
■ Aluminum, 7020, wrought, T5
■ Magnesium, AZ61, wrought

Για τα παραπάνω 10 υλικά πραγματοποιείται στη συνέχεια (στα βήματα 3 έως 5), μια πιο εξειδικευμένη ανάλυση που σχετίζεται με χαρακτηριστικά όπως η κατεργασιμότητα σε συνάρτηση με το κόστος, η ανακυκλωσιμότητα του υλικού και η εκπομπή ρύπων που σχετίζεται με τις παραπάνω διαδικασίες.



### 3.3.3 Βήμα Επιλογής 3: Ενέργεια κατεργασιμότητας –Κόστος

Στο διάγραμμα του Σχήματος 13 παρουσιάζεται η συσχέτιση του κόστους προμήθειας με την ενέργεια κατεργασιμότητας. Από το διάγραμμα αυτό μπορεί αποκτηθεί μια γενική εικόνα για τα τελικά κόστη της ζάντας το οποίο προκύπτει από τον συνδυασμό του κόστους προμήθειας με το κόστος της ενέργειας που απαιτείται για την κατεργασία μορφοποίησης.



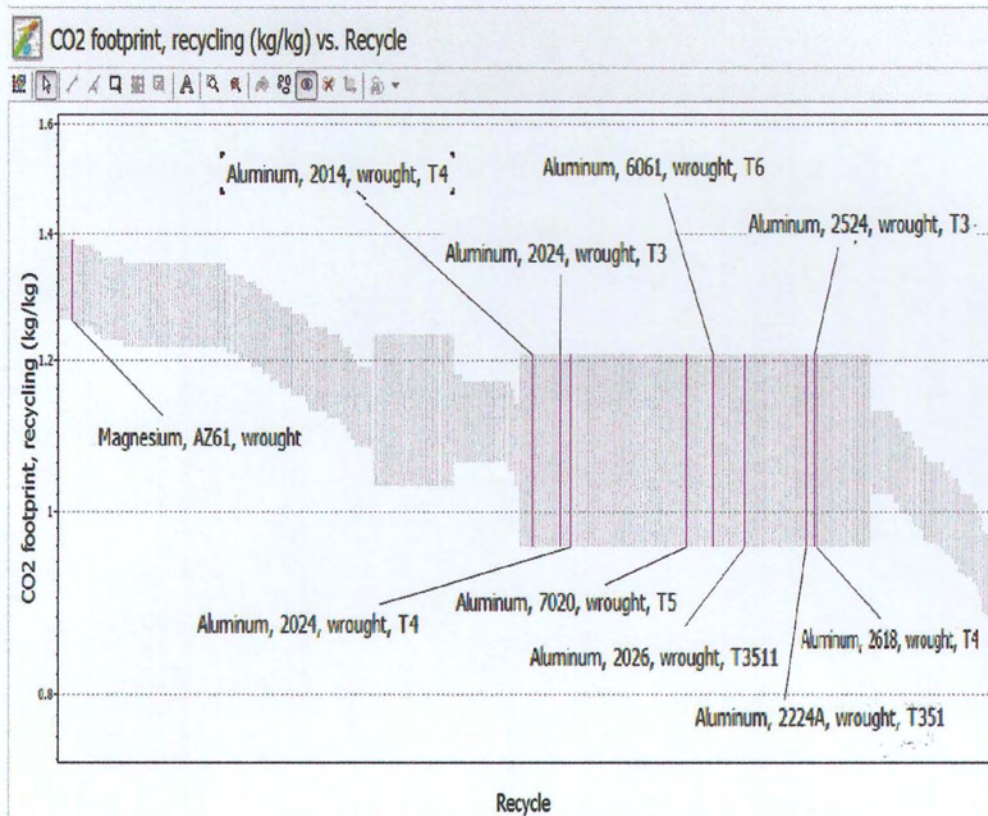
Σχήμα 13 : Τιμή προμήθειας-ενέργεια σφυρηλάτησης

Από τα υλικά του Πίνακα 3 ξεχωρίζει το κράμα αλουμινίου 6061 T6 που παρουσιάζει την χαμηλότερη ενέργεια για μορφοποίηση σε συνδυασμό με την χαμηλότερη τιμή. Από τα κράματα μαγνησίου την καλύτερη σχέση κατεργασιμότητας και τιμής παρουσιάζει το κράμα AZ61.



### 3.3.4 Βήμα Επιλογής 4 - Ανακυκλωσιμότητα-εκπομπές CO<sub>2</sub>

Στο διάγραμμα του Σχήματος 14 παρατηρείται η ανακυκλωσιμότητα καθώς και οι εκπομπές CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα κατά την ανακύκλωση των 10 υλικών του Πίνακα 3. Από το διάγραμμα προκύπτουν συμπεράσματα για την φιλικότητα ή μη των 10 υλικών ως προς το περιβάλλον.



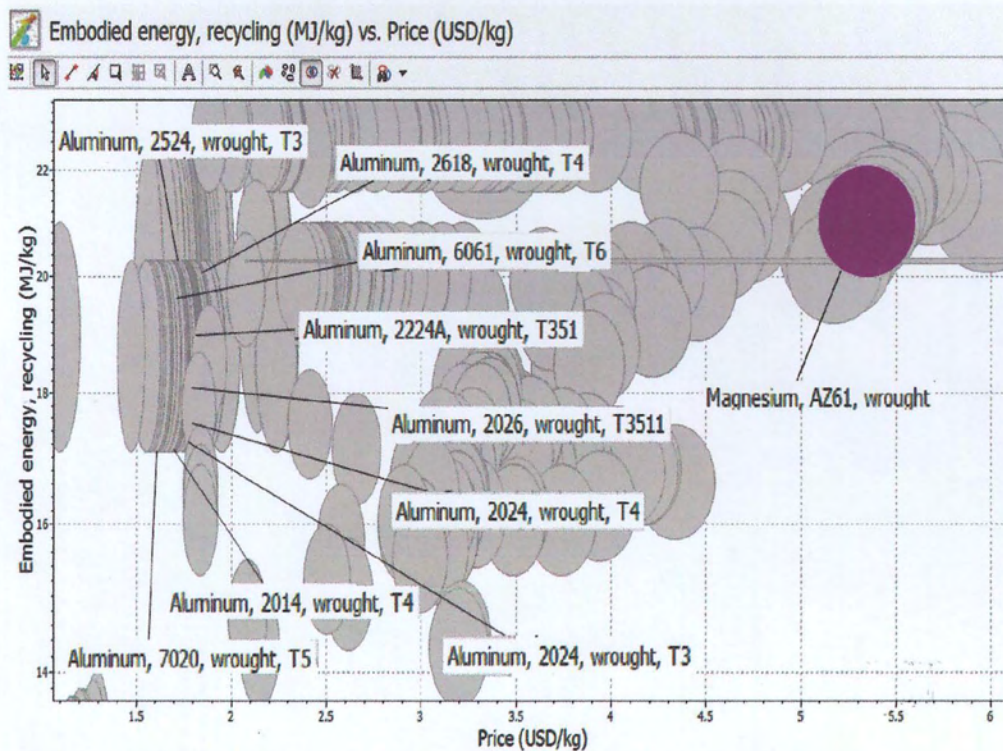
Σχήμα 14: Αποτύπωμα CO<sub>2</sub> ως προς την ανακύκλωση-ανακυκλωσιμότητα

Από τα υλικά του Πίνακα 3 την χειρότερη συμπεριφορά παρουσιάζει το κράμα μαγνησίου AZ61 που έχει τα υψηλότερα επίπεδα εκπομπών CO<sub>2</sub>. Τα υπόλοιπα κράματα έχουν τις ίδιες εκπομπές ρύπων, ενώ παρατηρείται πως όλα τα υλικά είναι ανακυκλώσιμα.



### 3.3.5 Βήμα Επιλογής 5 - Ενέργεια ανακύκλωσης-κόστος

Στο διάγραμμα του Σχήματος 15 παρουσιάζεται η συσχέτιση του κόστους προμήθειας με την ενέργεια ανακύκλωσης. Από το διάγραμμα αυτό μπορεί κανείς να αποκτήσει μια εικόνα για την ενέργεια που απαιτείται για ανακύκλωση, δηλαδή ουσιαστικά για το κόστος της ανακύκλωσης των 10 υλικών του Πίνακα 3, καθώς και για την τιμή προμήθειας αυτών.



Σχήμα 15: Ενέργεια για ανακύκλωση σε σύγκριση με την τιμή προμήθειας

Από τα υλικά του Πίνακα 3 ξεχωρίζει το κράμα μαγνησίου που παρουσιάζει τα υψηλότερα επίπεδα ενέργειας ανακύκλωσης σε σχέση με τα κράματα αλουμινίου, τα οποία απαιτούν την ίδια ενέργεια ανακύκλωσης, γεγονός που το καθιστά ελάχιστα πιο κοστοβόρο σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά ως προς στην ανακύκλωση του.

### 3.4 Συμπέρασμα Ανάλυσης

Από τα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας προκύπτει ότι υπάρχει δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε αρκετά υλικά που ικανοποιούν τα κριτήρια σχεδιασμού που τέθηκαν στην ανάλυση.

Ανάμεσα στα κράματα αλουμινίου το υλικό που παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση ιδιοτήτων - κόστους - φιλικότητας προς το περιβάλλον είναι το κράμα 6061 T6, ενώ εναλλακτικά πολύ κοντά σε απόδοση είναι κράματα αλουμινίου όπως τα 2024 T3 και 2618 T4. Εάν το βασικό κριτήριο επιλογής είναι η αντοχή σε υψηλές καταπονήσεις τότε καλή επιλογή αποτελεί το κράμα 7020 T5 με υψηλότερο όριο διαρροής και το όριο θραύσης.

Όσον αφορά τα κράματα μαγνησίου την καλύτερη απόδοση ιδιοτήτων - κόστους-φιλικότητας προς το περιβάλλον παρουσιάζει το κράμα AZ61. Επίσης είναι αρκετά πιο ελαφρύ σε σχέση με τα αλουμίνιο σε ποσοστό έως και 30%, αλλά η 4 φορές υψηλότερη τιμή του σε συνδυασμό με τις υποδεέστερες μηχανικές ιδιότητες το καθιστούν δυσκολότερη επιλογή σε σχέση με τα κράματα αλουμινίου, και έτσι περιορίζεται αποκλειστικά σε εφαρμογές που το βάρος παίζει καθοριστικό ρόλο (οχήματα αγωνιστικά ή αυτοκίνητα τύπου Formula κτλ).

Οι χαλύβδινες ζάντες αν και υπερτερούν σε κόστος, υστερούν σε σχέση με τα ελαφρύτερα μεταλλικά κράματα σε θέματα που έχουν να κάνουν με το βάρος και την απόδοση, όπως την απαγωγή της θερμότητας για την καλύτερη απόδοση των φρένων.

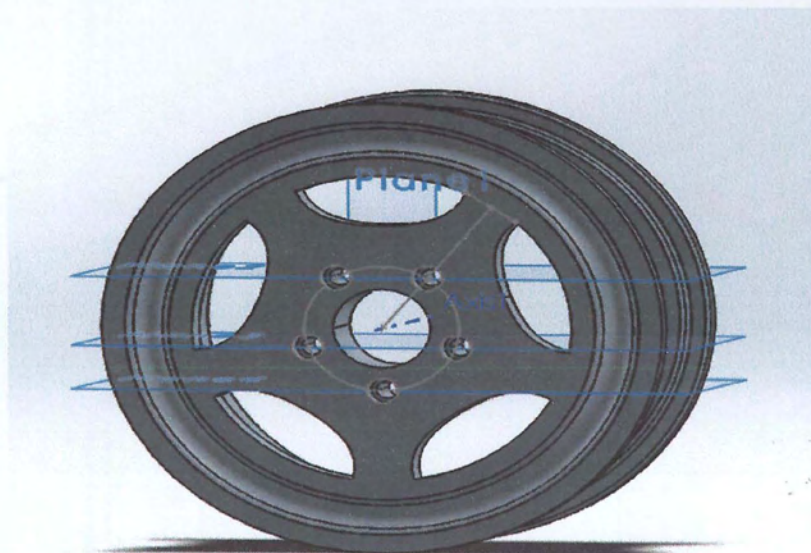


## Κεφάλαιο 4 Ανάλυση Τάσεων & Παραμορφώσεων Ζάντας

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται μία ανάλυση με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (ANSYS) για την εκτίμηση του συντελεστή ασφάλειας στον σχεδιασμό της ζάντας. Η μελέτη αφορά την ανάλυση της ζάντας σε στατική και κρουστική φόρτιση θεωρώντας γραμμική ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν στον καθορισμό των ορίων των μηχανικών ιδιοτήτων στο Κεφάλαιο 3.

### 4.1 Σχεδιασμός στο SOLIDWORKS

Σε πρώτο στάδιο σχεδιάστηκε η ζάντα του Σχήματος 16 με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που δίνονται στον Πίνακα 4.



Σχήμα 16 : Η ζάντα που σχεδιάστηκε στο SOLIDWORKS

Πίνακας 4: Τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών ζάντας

Χαρακτηριστικό μέγεθος ζάντας	Τιμή διάστασης
Πλάτος ζάντας	140 mm
Διάμετρος ζάντας	360 mm
P.C.D	100 mm
Offset	25 mm
Well	70.81 mm
Hub	63 mm
Axel Pad	140 mm

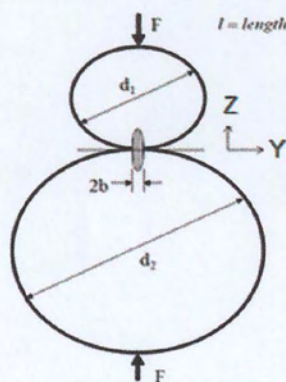


Ο όγκος της ζάντας είναι  $\text{Volume}=3304762.57 \text{ mm}^3$ , και το βάρος της ζάντας, ανάλογα με την πυκνότητα του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί, προκύπτει από τον τύπο  $m=\rho \cdot v$ .

#### 4.2 Υπολογισμός τάσεων χρησιμοποιώντας την αναλυτική λύση Hertz

Στο κεφάλαιο αυτό θα υπολογιστούν οι ισοδύναμες τάσεις Von Mises που αναπτύσσονται από την επαφή δυο κυλίνδρων, εκ των οποίων ο ένας προσομοιάζει το πέλμα της ζάντας που έρχεται σε επαφή με το έδαφος, και ο δεύτερος κύλινδρος άπειρης ακτίνας, προσομοιάζει το έδαφος.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται βασίζονται στην ανάλυση κατά Hertz, παρουσιάζονται στο Σχήμα 17 και στους Πινάκες 5,6 και είναι οι ακόλουθες :



Σχήμα 17: Σχηματική αναπαράσταση των δυο κυλίνδρων σε επαφή

Πίνακας 5: Εξισώσεις υπολογισμού τάσεων κατά Hertz

2		Calculation for cylindrical contact	
2.1	Contact half-width	$b$	$b = \sqrt{\frac{2F(1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2}{\pi l (1/d_1 + 1/d_2)}}$
2.2	Maximum pressure	$p_{max}$	$p_{max} = \frac{2F}{\pi b l}$
2.3	Principal stress	$\sigma_x$	$\sigma_x = -2\nu p_{max} \left[ \sqrt{\left(1 + \frac{z^2}{b^2}\right)} - \left \frac{z}{b}\right  \right]$
2.4	Principal stress	$\sigma_y$	$\sigma_y = -p_{max} \left[ \frac{1 + 2\frac{z^2}{b^2}}{\sqrt{\left(1 + \frac{z^2}{b^2}\right)}} - 2\left \frac{z}{b}\right  \right]$
2.5	Principal stress	$\sigma_z$	$\sigma_z = \frac{-p_{max}}{\sqrt{\left(1 + \frac{z^2}{b^2}\right)}}$
2.6	Shear stress	$\tau_{xz}$	$\tau_{xz} = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}$
2.7	Shear stress	$\tau_{yz}$	$\tau_{yz} = \frac{\sigma_y - \sigma_z}{2}$

Πίνακας 6: Εξίσωση υπολογισμού ισοδύναμης τάσης Von Mises

$$\sigma_{eq} = \left\{ \frac{[\sigma_{xx} - \sigma_{yy}]^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}{2} \right\}^{1/2}$$

Τα δεδομένα για την αναλυτική λύση είναι τα ακόλουθα:

	Κύλινδροι
Μέτρο Ελαστικότητας	E=69 GPa
Λόγος Poisson	0.33
Δύναμη	2941 N
Διάμετρος ζάντας	360mm
Διάμετρος κυλίνδρου που προσομοιάζει το έδαφος	άπειρο
Πέγμα ζάντας	10mm

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει ότι:

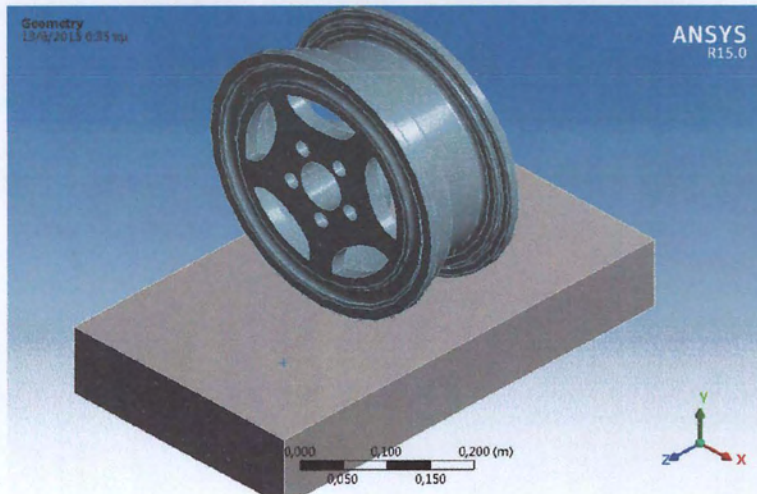
Pmax	142 MPa
Πλάτος επαφής κυλίνδρων 2b	2.42 mm
$\sigma_x$ (στο z=0)	93.72 MPa
$\sigma_y$ (στο z=0)	142 MPa
$\sigma_z$ (στο z=0)	142 MPa
$\tau_{yz} = 0,3 * Pmax$ (στο z=0)	42.6 MPa
$\tau_{xz}, \tau_{xy}$ (στο z=0)	Θεωρούνται μηδενικά
$\sigma_{eq}$ (στο z=0)	48.2 MPa

Από την παραπάνω αναλυτική λύση παρατηρούμε πως οι τιμές των μέγιστων τάσεων  $\sigma_{eq}$  (στο z=0) που προκύπτουν από την αναλυτική λύση είναι 48.2 MPa.



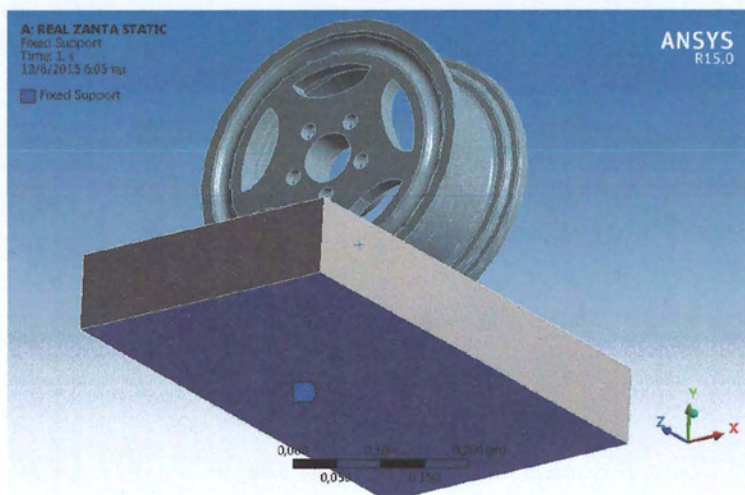
### 4.3 Ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σε στατική φόρτιση

Στην πρώτη ανάλυση θεωρήθηκε στατικό φορτίο στην ζάντα, η οποία βρίσκεται σε επαφή με ένα μπλοκ το οποίο προσομοιάζει το οδόστρωμα. Το φορτίο είναι ισοκατανεμημένο (τύπου bearing load) στα 5 μπουλόνια της ζάντας, μεγέθους 2941N που αντιστοιχεί στο  $\frac{1}{4}$  του βάρους ενός συμβατικού αυτοκινήτου 1200 κιλών. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με σκοπό έναν πρώτο υπολογισμό των τάσεων σε στατική καταπόνηση και των κρίσιμων περιοχών καταπόνησης της ζάντας.



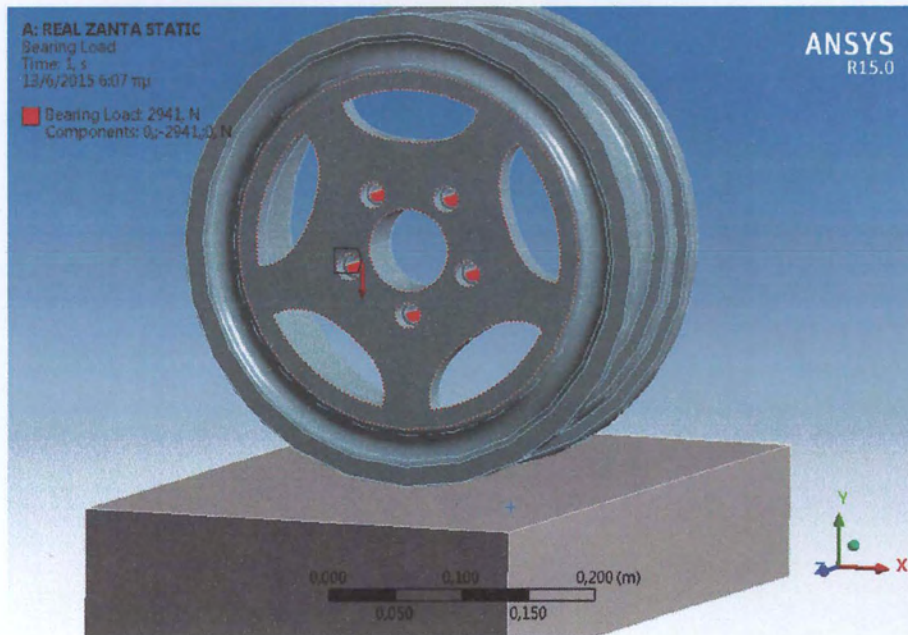
#### 4.3.1 Οριακές συνθήκες του προβλήματος

- 1) Πάκτωση του εδάφους στην αντίθετη πλευρά από αυτήν που υπάρχει επαφή των 2 σωμάτων όπως φαίνεται παρακάτω.

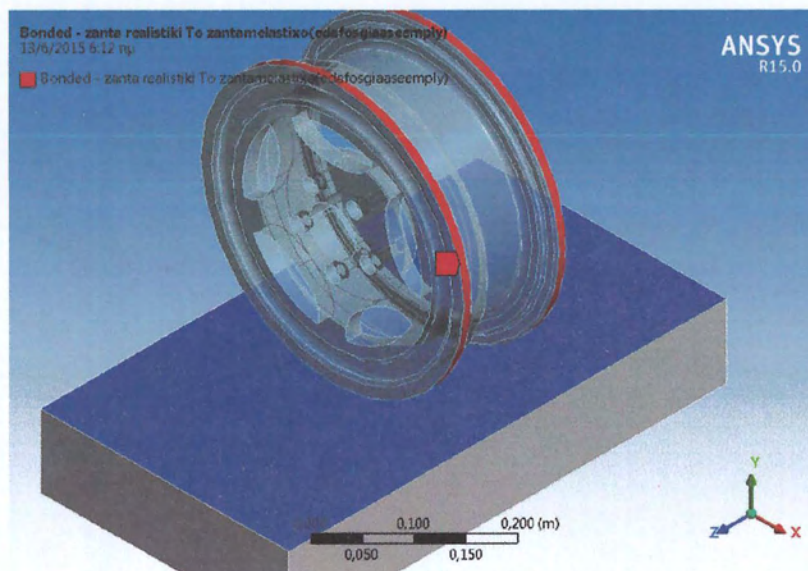




- 2) Ισοκατανεμημένο φορτίο (τύπου bearing load) στα 5 μπουλόνια της ζάντας, μεγέθους 2941N που αντιστοιχεί στο  $\frac{1}{4}$  του βάρους ενός συμβατικού αυτοκινήτου 1200 κιλών.

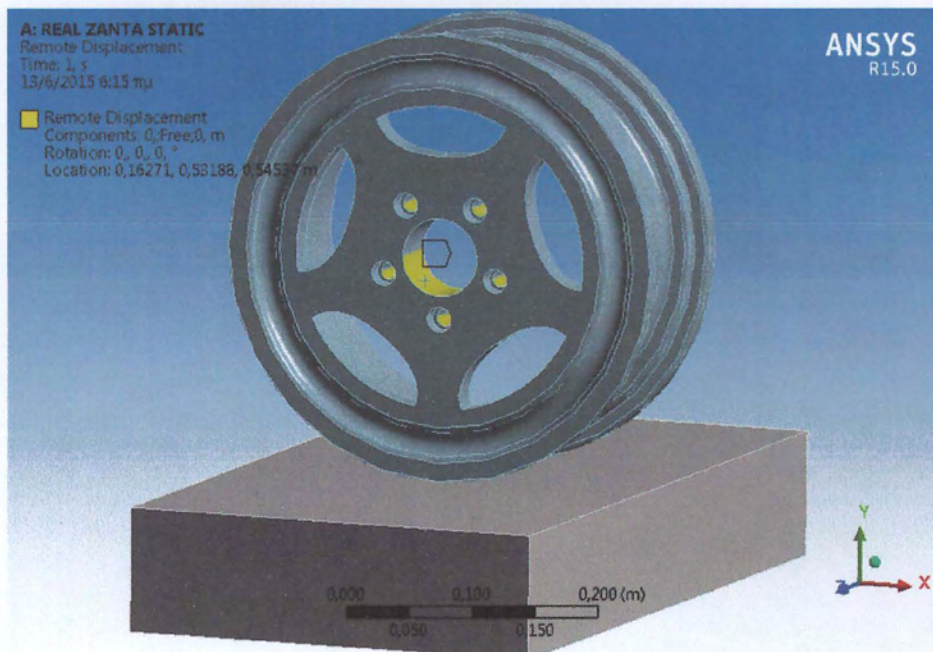


- 3) Επαφή ζάντας-εδάφους με τύπο επαφής 'Bonded' Bonded : Και οι δύο επιφάνειες συνδέονται σαν κόλλα . Δεν επιτρέπεται να διαχωριστούν. Δεν επιτρέπεται να γλιστρήσουν . Οι επιφάνειες θα είναι μαζί, ανεξάρτητα από - κενό , διείσδυση , τη φόρτωση και τη συμπεριφορά των άλλων τμημάτων/επαφών.





- 4) Περιορισμός κίνησης των κιτρινωμένων περιοχών (μπουλονιών και κεντρική οπή) μόνο κατά τον άξονα Y, χωρίς μετακίνηση ή περιστροφή σε κάποιον άλλο άξονα, θέλοντας έτσι να προσομοιάσουμε καλύτερα την στατική συμπεριφορά του τροχού.



#### 4.3.2 Παραδοχές και υλικά

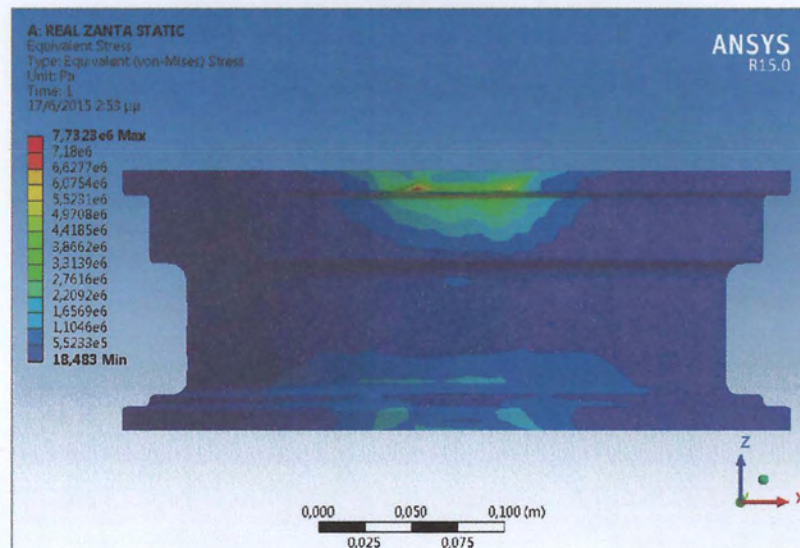
Στο πρόβλημα που αναλύουμε γίνεται υπερεκτίμηση των τάσεων – παραμορφώσεων καθώς δεν λαμβάνεται υπόψη η παρουσία του ελαστικού υπό πίεση. Η παραδοχή αυτή προφανώς δεν είναι ρεαλιστική και οδηγεί σε μικρότερο συντελεστή ασφάλειας κατά τον σχεδιασμό. Ας σημειωθεί εδώ ότι ο σκοπός της εργασίας δεν ήταν η δημιουργία ενός λεπτομερούς μοντέλου που να λαμβάνει υπόψη την μεταβολή της πίεσης του αέρα κατά την διάρκεια του αύξησης του στατικού φορτίου και την συμπεριφορά ελαστικού-ζάντας, αλλά μία εκτίμηση των συνθηκών καταπόνησης για χρήση στο πρόγραμμα επιλογής υλικού CES. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη του παραπάνω προβλήματος δίνονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη στο ANSYS

Ζάντα	Αλουμίνιο 6061 T6
Έδαφος	Τσιμέντο

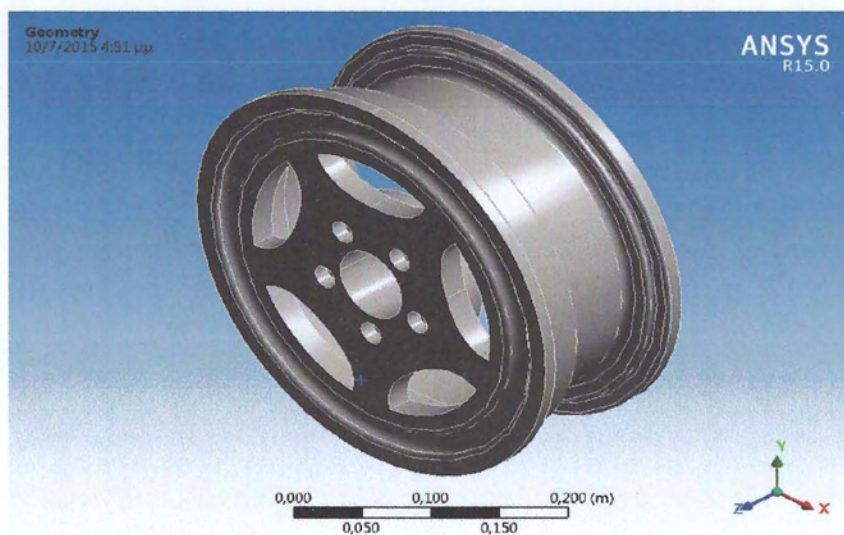


Πραγματοποιώντας τώρα ανάλυση τάσεων (Σχήμα 18) παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τάσεις που υπολογιστήκαν στο πέλμα της ζάντας (7,73MPa) έχουν πάρα πολύ μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις τάσεις της αναλυτικής λύσης Hertz που υπολογιστήκαν στο Κεφάλαιο 4.2, και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως δεν ξέρουμε τις ακριβείς συνθήκες επαφής της ζάντας με το έδαφος, όπως για παράδειγμα τον συντελεστή τριβής. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα είναι ανακριβή.



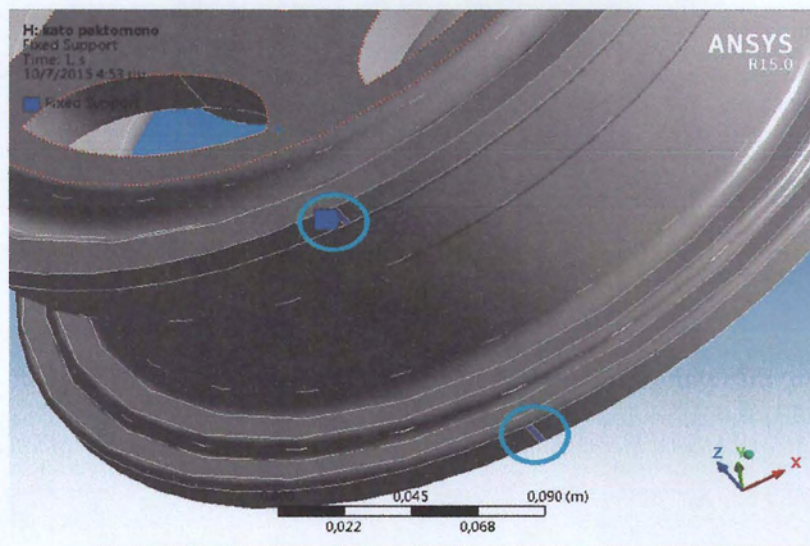
Σχήμα 18 : Κατανομή τάσεων ζάντας, Κάτω όψη

Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μια δεύτερη πιο εξιδανικευμένη ανάλυση. Στην ανάλυση αυτή θεωρήθηκε στατικό φορτίο στην ζάντα, η οποία είναι πακτωμένη σε δυο πρόσωπα στο κάτω μέρος της έτσι ώστε να προσομοιάζεται η επαφή με το έδαφος. Το φορτίο είναι ανακατανομημένο (τύπου bearing load) στα 5 μπουλόνια της ζάντας, μεγέθους 2941N που αντιστοιχεί στο ¼ του βάρους ενός συμβατικού αυτοκινήτου 1200 κιλών. Οι τάσεις αναφέρονται στο υλικό Αλουμίνιο 6061 T6.





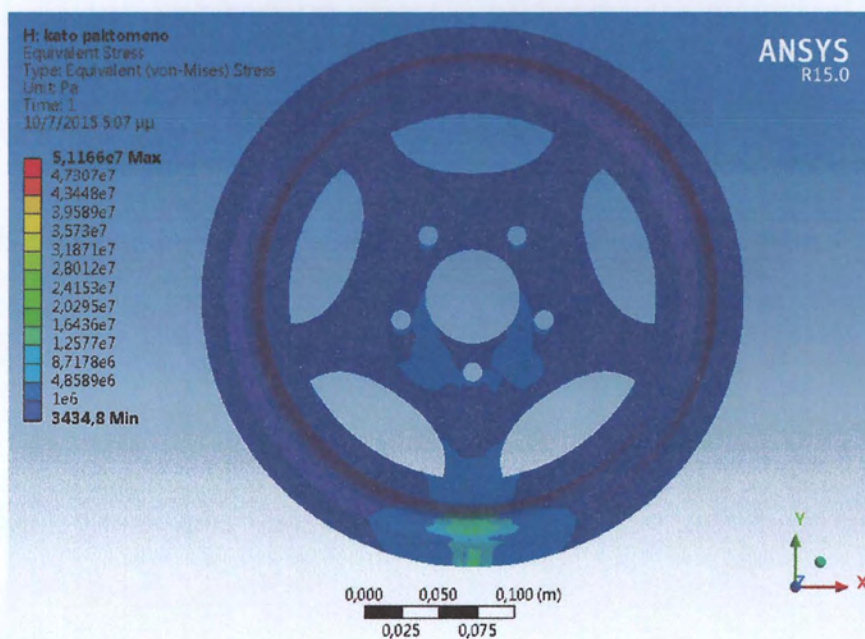
Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος αυτού είναι ίδιες με τις οριακές συνθήκες της πρώτης ανάλυσης, με μόνη διαφορά πως τώρα δεν υπάρχει έδαφος και η επαφή ζάντας – εδάφους έχει αντικατασταθεί με πάκτωση της ζάντας σε δυο πρόσωπα (πλάτους  $2b=2.4$  mm όπως αυτό υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 4.2) στο κάτω μέρος της, προσομοιάζοντας την επαφή με το έδαφος, όπως φαίνεται παρακάτω.



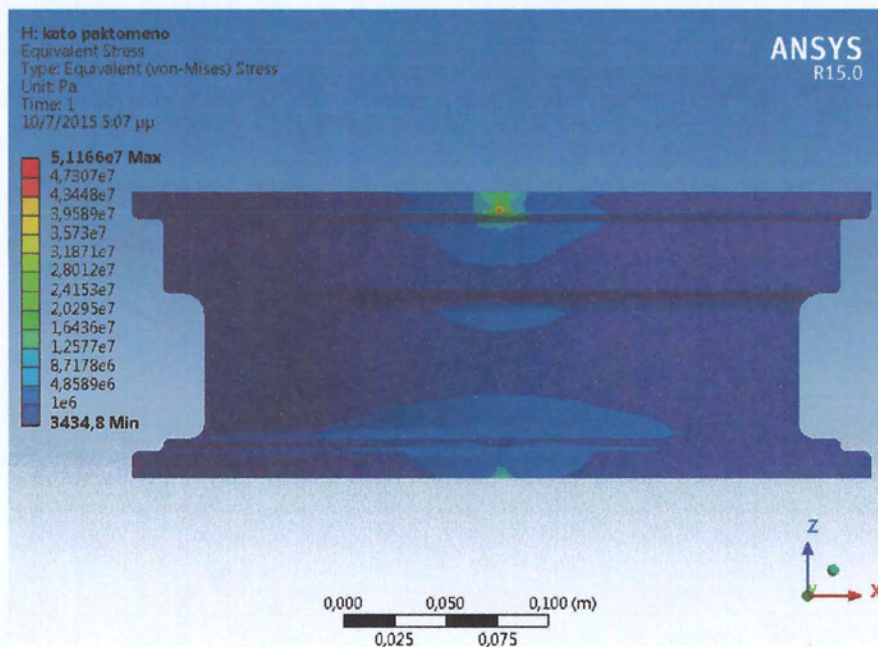
### 4.3.3 Κατανομή τάσεων

Στα Σχήματα 19,20,21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατανομής της ισοδύναμης τάσης Mises. Η μέγιστη τιμή τάσης που υπολογίσθηκε για το φορτίο 2941 N ανέρχεται στα 51,1 MPa.

Στο Σχήμα 21 δίνεται η κατανομή τάσεων στα μπουλόνια. Τοπικά η τάση Mises αποκτάει μέγιστη τιμή ίση με 1,65 MPa.

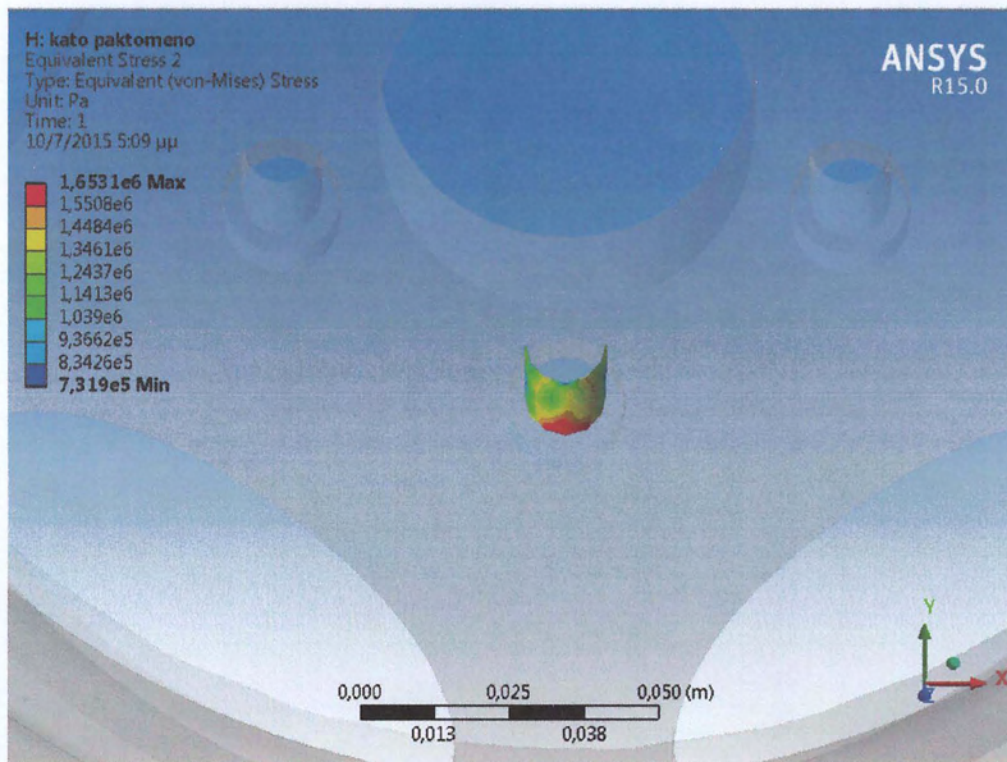


Σχήμα 19: Κατανομή τάσεων ζάντας, Μπροστινή όψη



Σχήμα 20: Κατανομή τάσεων ζάντας, Κάτω όψη





Σχήμα 21: Κατανομή τάσεων, κάτω μπουλόνι

Στο Σχήμα 19 παρατηρούμε την κατανομή των τάσεων από την μπροστινή όψη της ζάντας. Στο Σχήμα 20 παρατηρούμε την κατανομή των τάσεων στην πλευρά που έρχεται σε επαφή με το έδαφος ενώ στο Σχήμα 21 παρατηρούμε την κατανομή των τάσεων στην περιοχή του μπουλονιού, που απέχει την μικρότερη απόσταση από το έδαφος.

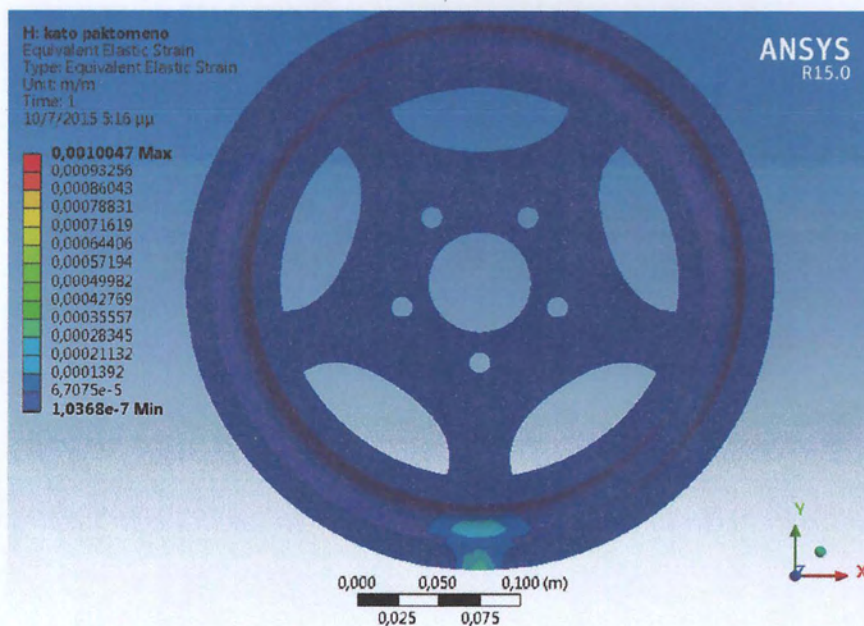
Από τα αποτελέσματα της κατανομής των τάσεων, παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τάσεις εμφανίζονται στο κάτω σημείο των δύο πελμάτων της ζάντας, εκεί όπου ουσιαστικά υπάρχει επαφή της ζάντας με το έδαφος, και παρουσιάζουν πάρα πολύ μικρή απόκλιση με τις τάσεις των 48,2 MPa που υπολογίστηκαν με την αναλυτική λύση Hertz στο Κεφάλαιο 4.2.



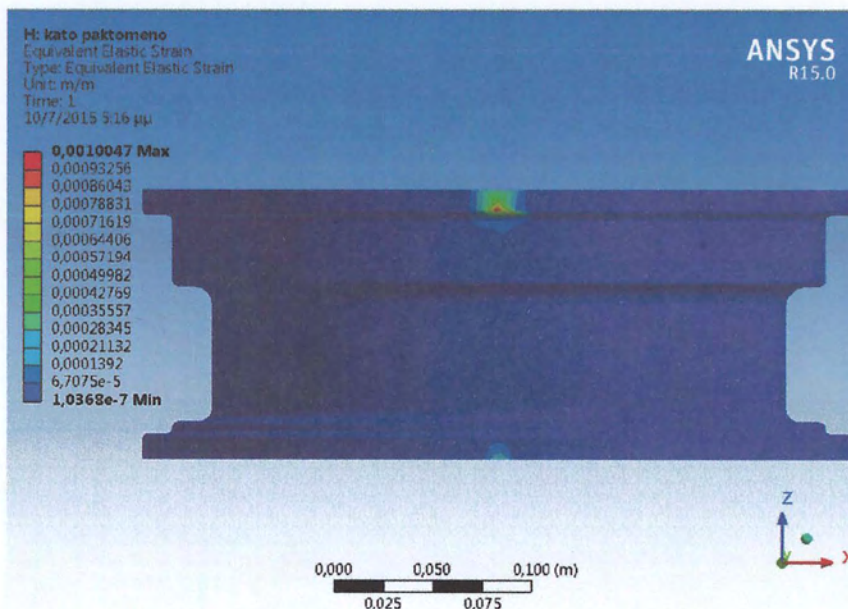
#### 4.3.4 Κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων

Στα Σχήματα 22,23,24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατανομής των ελαστικών παραμορφώσεων. Η μέγιστη τιμή ελαστικής παραμόρφωσης που υπολογίσθηκε για το φορτίο 2941 N ανέρχεται στα 0,0010047 m/m.

Στο Σχήμα 23 δίνεται η κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων στα μπουλόνια. Τοπικά η ελαστική παραμόρφωση αποκτάει μέγιστη τιμή ίση με  $2,41e^{-5}$  m/m.

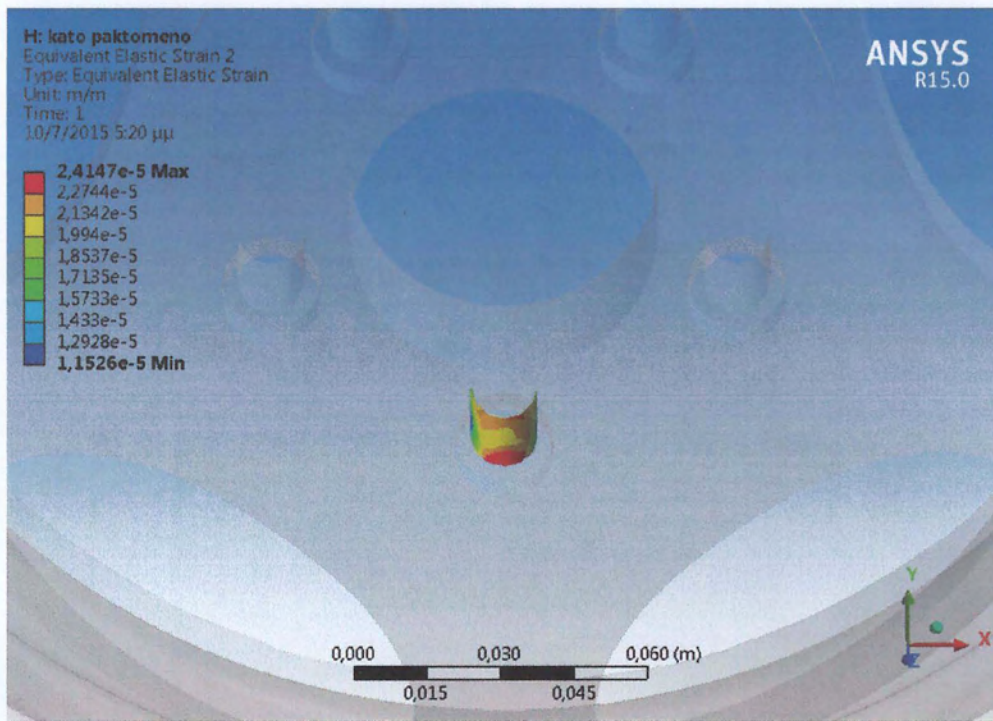


Σχήμα 22: Κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων ζάντας, Μπροστινή όψη



Σχήμα 23: Κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων ζάντας, Κάτω όψη





Σχήμα 24: Κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων ζάντας, Κάτω μπουλόνι

Στο Σχήμα 22 παρατηρούμε την κατανομή των ελαστικών παραμορφώσεων από την μπροστινή όψη της ζάντας. Στο Σχήμα 23 παρατηρούμε την κατανομή των ελαστικών παραμορφώσεων στην πλευρά που έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Στο Σχήμα 24 παρατηρούμε την κατανομή των ελαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή του μπουλονιού, που απέχει την μικρότερη απόσταση από το έδαφος.

Από τα αποτελέσματα της κατανομής των ελαστικών παραμορφώσεων, παρατηρούμε ότι οι μέγιστες ελαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται στις περιοχές της ζάντας όπου οι τάσεις λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους.

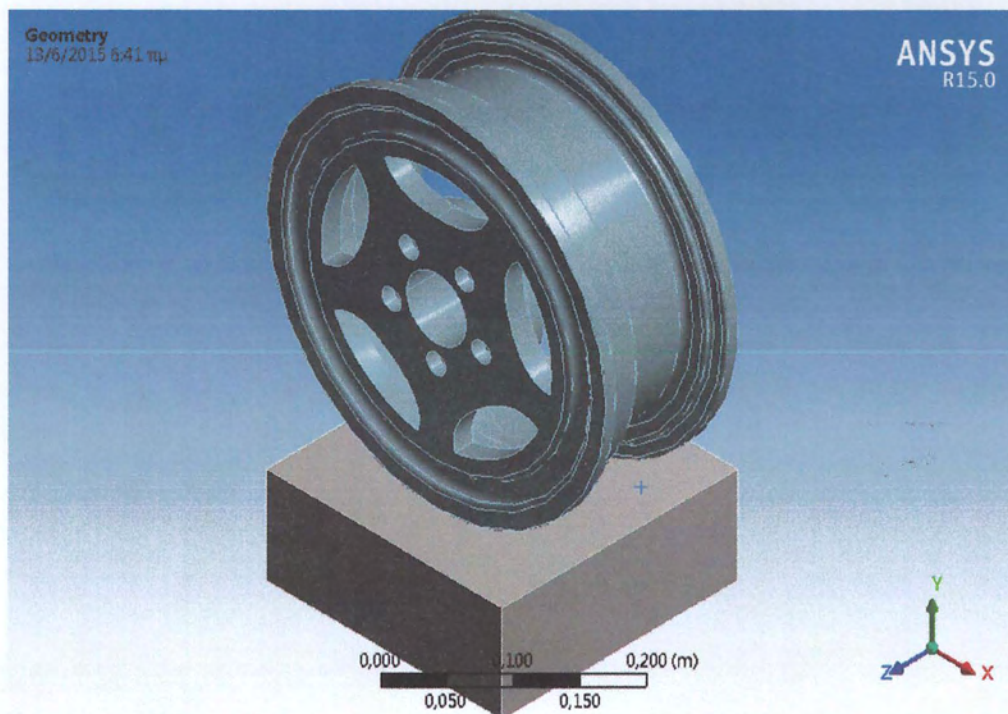
#### 4.3.5 Συμπεράσματα

Παρατηρούμε πως στην στατική φόρτιση της ζάντας με φορτίο 300 kg, τόσο οι τιμές των τάσεων όσο και οι τιμές των παραμορφώσεων σε κάθε περιοχή της ζάντας βρίσκονται σε πάρα πολύ χαμηλά επίπεδα σε σχέση με τα όρια αντοχής των υλικών τα οποία πρόεκυψαν από το CES, άρα σε στατική φόρτιση έχουμε έναν μεγάλο βαθμό ασφαλείας. Έτσι κρίνεται αναγκαία η μελέτη της ζάντας σε ένα κρουστικό φορτίο, μελέτη που πραγματοποιείται αμέσως μετά. Παρατηρούμε επίσης στα Σχήματα 20 και 23, πως η κατανομή των τάσεων και των ελαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή επαφής της ζάντας με το έδαφος, είναι μεγαλύτερη στην μια πλευρά επαφής σε σχέση με την άλλη. Το γεγονός αυτό είναι απολύτως λογικό καθώς η στατική φόρτιση δεν ασκείται στο κέντρο της ζάντας αλλά στην περιοχή των μπουλονιών. Επίσης η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη στιβαρότητα λόγω των ακτινών.



#### 4.4 Ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων σε κρουστική φόρτιση

Στην ενότητα αυτή έγινε μία απλοποιημένη προσομοίωση του φαινομένου της κρούσης μίας ζάντας βάρους 8,92 κιλών σε ένα τμήμα εδάφους 15 κιλών. Στόχος είναι ο προσδιορισμός της αύξησης των τάσεων λόγω μία δυναμικής καταπόνησης που ενδέχεται να δεχτεί η ζάντα κατά την διάρκεια λειτουργίας της. Στην μελέτη χρησιμοποιείται γραμμική-ελαστική συμπεριφορά υλικού και εντοπίζονται οι κρίσιμες περιοχές και οι τάσεις στις περιοχές αυτές. Σημαντική επισήμανση εδώ είναι ότι η ανάλυση γίνεται χωρίς την παρουσία του ελαστικού, η παρουσία του οποίου αναμένεται να μειώσει σημαντικά τις εφαρμοζόμενες τάσεις καταπόνησης. Ο χρόνος που λαμβάνει χώρα η ανάλυση είναι 0,001 sec. Τα Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδια με αυτά του Πινάκα 7.





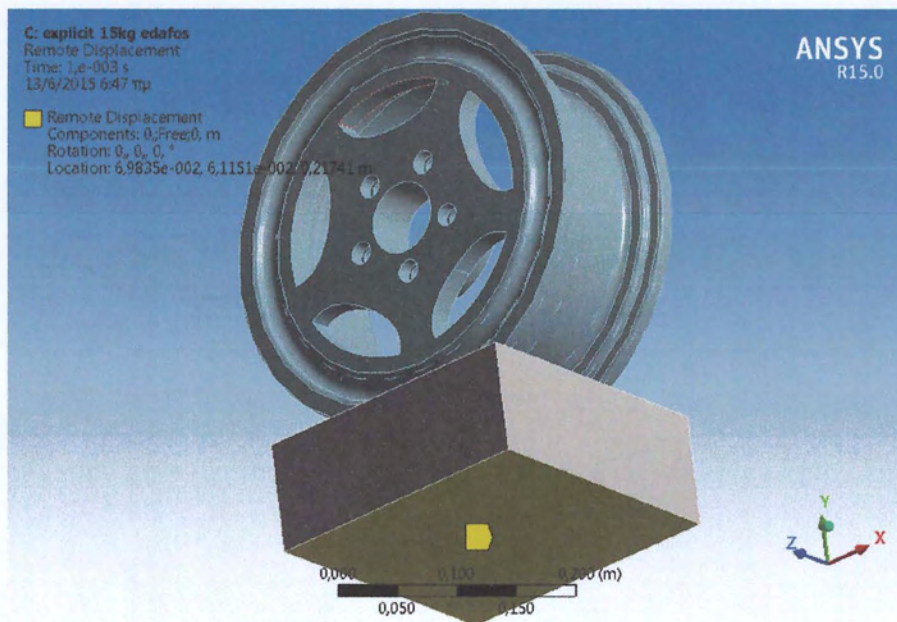
#### 4.4.1 Οριακές συνθήκες του προβλήματος

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση είναι οι ακόλουθες:

- 1) Πάκτωση των μπουλονιών και της κεντρικής οπής (μπλε περιοχές), προσομοιάζοντας τις 'ακίνητες' περιοχές κατά την διάρκεια μια κρούσης.

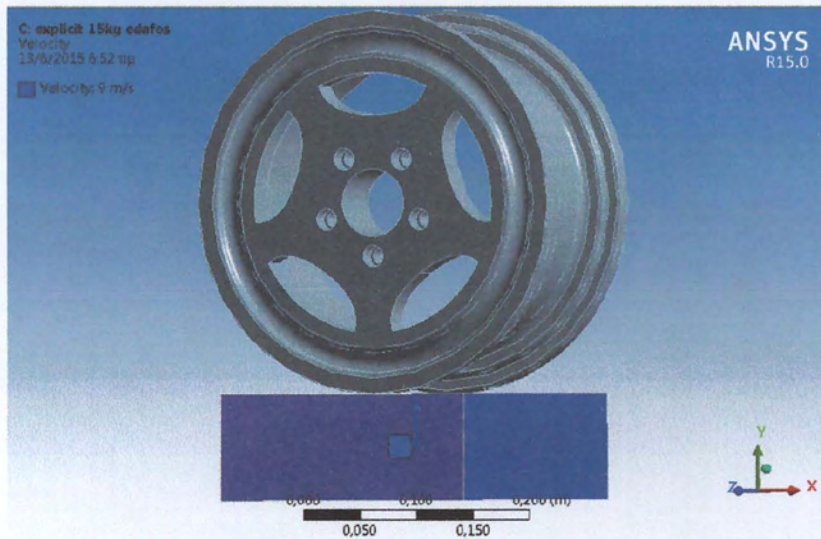


- 2) Περιορισμός κίνησης του κάτω προσώπου του εδάφους (κίτρινη περιοχή) μόνο κατά τον άξονα Y, χωρίς μετακίνηση ή περιστροφή σε κάποιον άλλο άξονα, θέλοντας έτσι να προσομοιάσουμε καλύτερα την κρουστική συμπεριφορά του block στον τροχό.



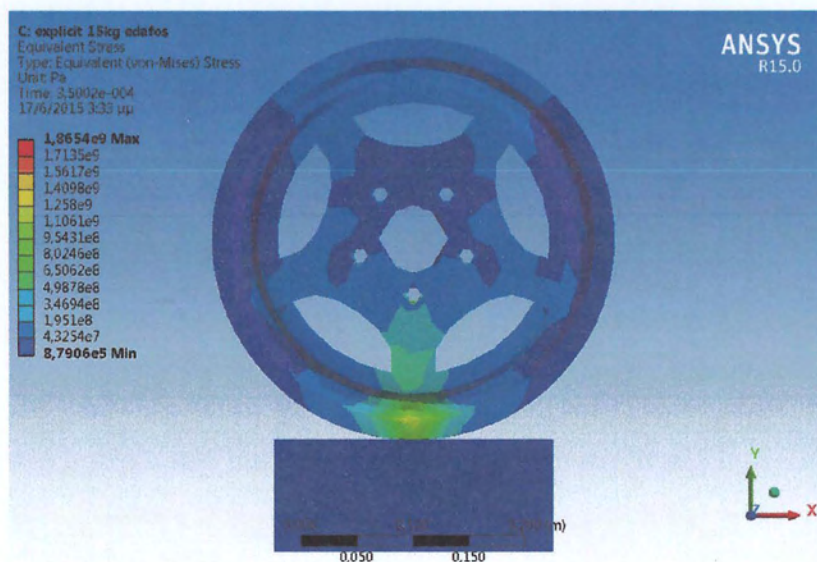


- 3) Η ταχύτητα με την οποία έρχεται σε επαφή το block βάρους 15 κιλών με την ζάντα είναι 9m/s, με θετική φορά ως προς τον άξονα Y.



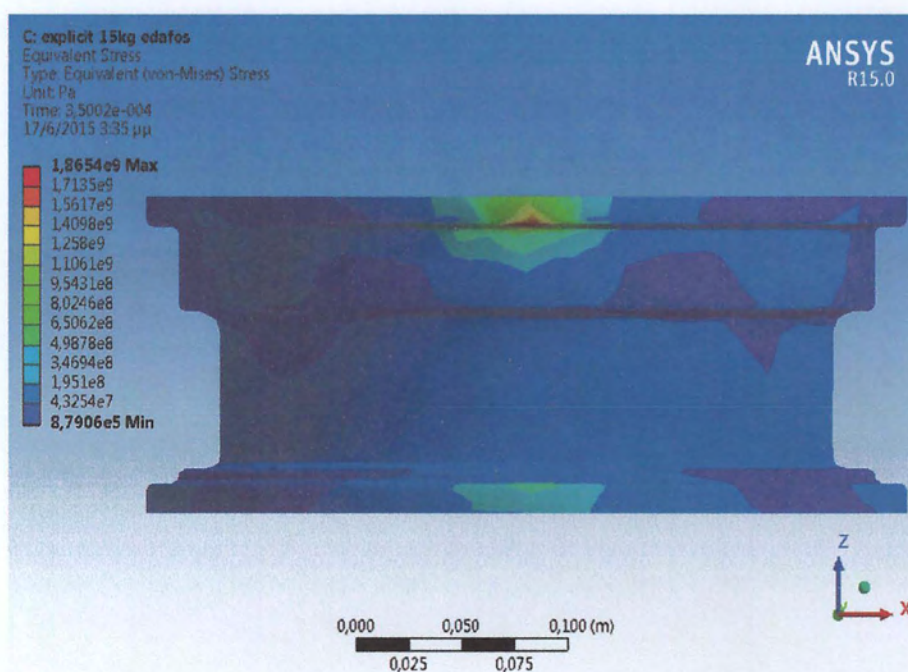
#### 4.4.2 Κατανομή τάσεων

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί πως οι τάσεις οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται στην χρονική στιγμή όπου οι τιμές τους, στις αντίστοιχες περιοχές, παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους. Δηλαδή αναφερόμαστε στην πιο δυσμενή κατάσταση. Επίσης αναφέρονται στο υλικό Αλουμίνιο 6061 T6.

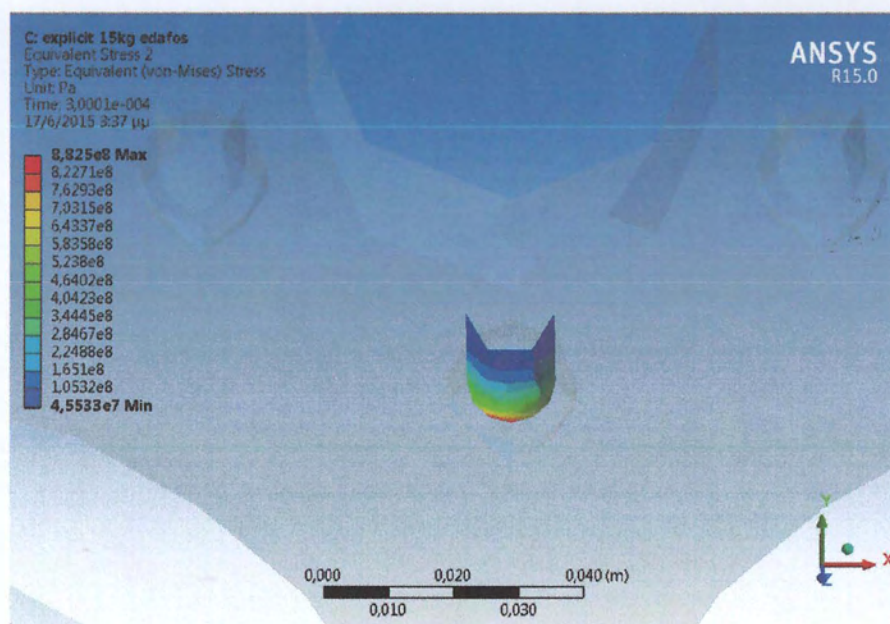


Σχήμα 24: Κατανομή τάσεων ζάντας, Μπροστινή όψη





Σχήμα 25: Κατανομή τάσεων ζάντας, Κάτω όψη



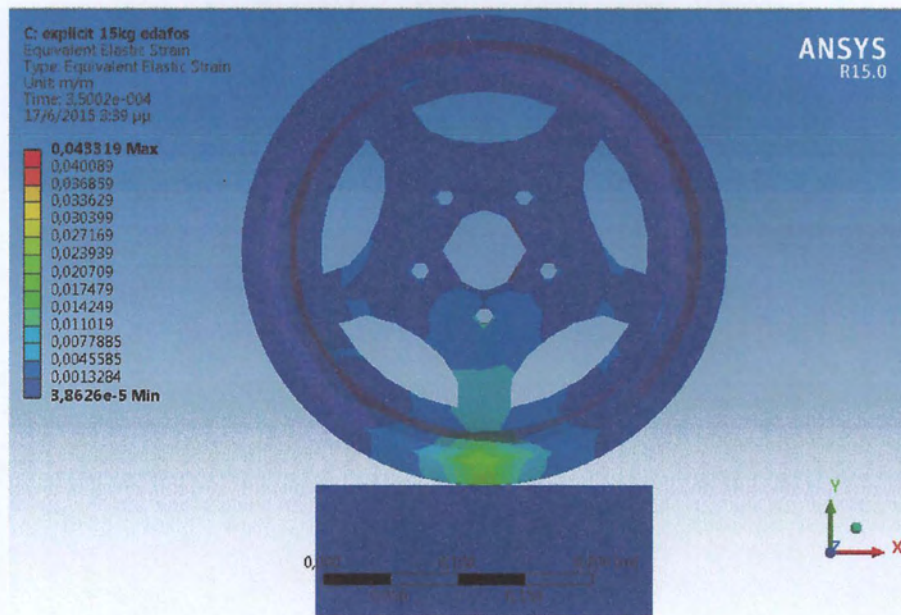
Σχήμα 26: Κατανομή τάσεων ζάντας, Μπουλόνια

Στο Σχήμα 24 παρατηρούμε την κατανομή των τάσεων από την μπροστινή όψη της ζάντας. Στο Σχήμα 25 παρατηρούμε την κατανομή των τάσεων στην πλευρά που έρχεται σε επαφή με το έδαφος ενώ στο Σχήμα 26 παρατηρούμε την κατανομή των τάσεων στην περιοχή του μπουλονιού, που απέχει την μικρότερη απόσταση από το έδαφος.

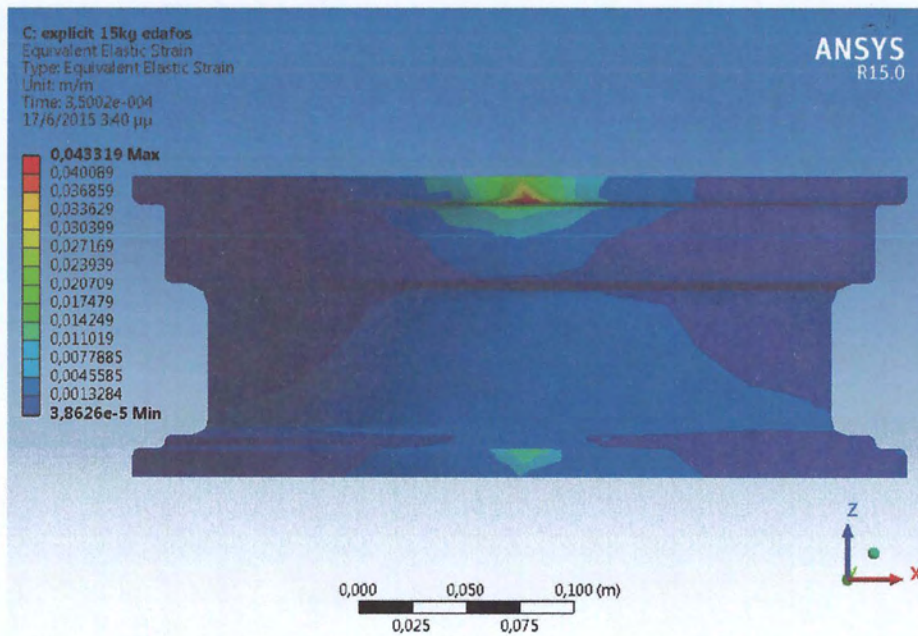


#### 4.4.3 Κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί πως οι τάσεις οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται στην χρονική στιγμή όπου οι τιμές τους, στις αντίστοιχες περιοχές, παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους. Δηλαδή αναφερόμαστε στην πιο δυσμενή κατάσταση.

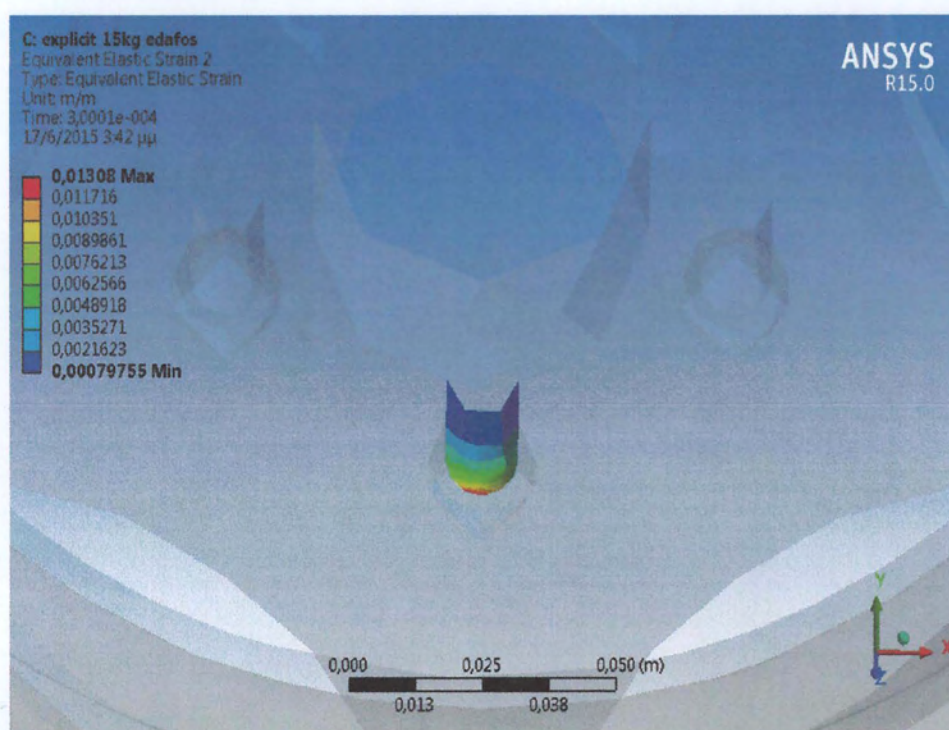


Σχήμα 27: Κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων ζάντας, Μπροστινή όψη



Σχήμα 28: Κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων ζάντας, Κάτω όψη





Σχήμα 29: Κατανομή ελαστικών παραμορφώσεων ζάντας, Μπουλόνια

Στο Σχήμα 27 παρατηρούμε την κατανομή των ελαστικών παραμορφώσεων από την μπροστινή όψη της ζάντας. Στο Σχήμα 28 παρατηρούμε την κατανομή των ελαστικών παραμορφώσεων στην πλευρά που έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Στο Σχήμα 29 παρατηρούμε την κατανομή των ελαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή του μπουλονιού, που απέχει την μικρότερη απόσταση από το έδαφος.

#### 4.4.4 Συμπεράσματα

Παρατηρούμε πως στην κρουστική φόρτιση της ζάντας, τόσο οι τιμές των τάσεων όσο και οι τιμές των παραμορφώσεων στην περιοχή πρόσκρουσης του block με την ζάντα, παίρνουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές από τα όρια αντοχής και των δυο υλικών που πέρασαν το CES test ειδικά στην περιοχή γύρω από το σημείο κρούσης. Μια ηπιότερη κατάσταση παρατηρείται στην περιοχή των μπουλονιών, αλλά και εκεί υπάρχουν περιοχές όπου οι τάσεις και οι παραμορφώσεις ξεπερνούν τα όρια αντοχής των υλικών, και έτσι έχουμε μηδενικό συντελεστή ασφαλείας. Παρατηρούμε επίσης στα Σχήματα 25 και 28, πως η κατανομή των τάσεων και των ελαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή επαφής της ζάντας με το έδαφος, είναι μεγαλύτερη στην μια πλευρά επαφής σε σχέση με την άλλη. Το γεγονός αυτό είναι απολύτως λογικό καθώς η ζάντα δεν είναι πακτωμένη στο κέντρο της αλλά στην περιοχή των μπουλονιών. Επίσης η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη στιβαρότητα λόγω των ακτινών.



## Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παραπάνω κεφαλαίων, μπορεί κανείς να βγάλει σημαντικά συμπεράσματα. Αρχικά μπορούμε να πούμε πως η επιλογή υλικού για μια ζάντα αυτοκινήτου είναι ένα πρόβλημα πολλών μεταβλητών καθώς μεγέθη όπως η ασφάλεια, οι μηχανικές ιδιότητες, η χρηστικότητα ή το κόστος είναι υψηλής σημασίας. Προφανώς έγκειται στην 'φιλοσοφία' κάθε εταιρίας παραγωγής το γεγονός να καθορίσει τα όρια αυτών των μεταβλητών. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας παρατηρούμε πως τα κράματα αλουμινίου, ορισμένα εκ των οποίων το 6061 T6 και το 2024 T3, και τα κράματα μαγνησίου όπως το AZ61 αποτελούν τις καλύτερες επιλογές υλικού για ζάντα αυτοκινήτου. Τα πρώτα μεν παρουσιάζουν όχι μόνο χαμηλή τιμή αλλά και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, για αυτό και χρησιμοποιούνται στα περισσότερα συμβατικά αυτοκίνητα. Τα δεύτερα δε έχουν πολύ χαμηλότερο βάρος και συγκριτικά καλές μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα αλουμίνια, αλλά λόγω του υψηλού κόστους τους χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές που το βάρος παίζει κρίσιμο ρόλο (οχήματα αγωνιστικά ή αυτοκίνητα τύπου Formula κτλ). Τέλος οι χαλύβδινες ζάντες μπορεί να είναι οι φτηνότερες αλλά φυσικές ιδιότητες, όπως το υψηλό βάρος, και θερμικές ιδιότητες όπως η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, τις καθιστά με το πέρασ των χρόνων, τελευταία επιλογή για τα συμβατικά αυτοκίνητα της σύγχρονης αυτοκινητοβιομηχανίας.

## Κεφάλαιο 6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, έγινε η βασική παραδοχή της απουσίας ελαστικού και συνεπώς της απουσίας αέρα, γεγονός που κάνει την παραπάνω έρευνα όχι τόσο εξειδικευμένη, καθώς οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στην ζάντα θα ήταν μικρότερες, με την παρουσία ελαστικού και αέρα, καθώς πολύ μικρότερες τάσεις θα καταπονούσαν την ζάντα. Συνεπώς πρόταση για μελλοντική έρευνα είναι να συμπεριληφθεί στην παραπάνω έρευνα και αυτή η συνθήκη.



## Βιβλιογραφία

1. Dr. Suwarna Torgla, Swati Mishra - STRESS ANALYSIS OF WHEEL RIM, International Journal of Mechanical Engineering and Research , Volume 1 Issue 1
2. Sourav Das, (CAE Analyst) – DESIGN AND WEIGHT OPTIMIZATION OF ALUMINIUM ALLOY WHEEL, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 4, Issue 6
3. K. Venkateswara Rao, Dr. T. Dharmaraju – ANALYSIS OF WHEEL RIM USING FINITE ELEMENT METHOD, International Journal of Engineering Research & Technology, Volume 3, Issue 1
4. Zhanbiao Li, Sante DiCecco, William Altenhof, Mark Thomas, Richard Banting, Henry Hu – STRESS AND FATIGUE LIFE ANALYSIS OF A FIVE-PIECE RIM AND THE PROPOSED OPTIMIZATION WITH A TWO-PIECE RIM, Journal of Terramechanics
5. J. Stearns, T.S. Srivatsan, A. Prakash, P.C. Lam – MODELING THE MECHANICAL RESPONSE OF AN ALUMINIUM ALLOY AUTOMOTIVE RIM, Materials Science & Engineering
6. Y.H. Kim, T.K. Ryou, H.J. Choi, B.B. Hwang – AN ANALYSIS OF THE FORGING PROCESSES FOR 6061 ALUMINUM ALLOY WHEELS, Journal of Materials Processing Technology
7. P. Meghashyam, S. Girivardhan Naidu, N. Sayed Bada – DESIGN AND ANALYSIS OF WHEEL RIM USING CATIA & ANSYS, International Journal Of Application or Innovation in Engineering & Management, Volume 2, Issue 8
8. William D. Calister, JR – ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ, Εκδόσεις Τζιόλα
9. Michael Ashby, Hugh Shercliff, David Cebon – ΥΛΙΚΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗ, ΕΠΙΣΤΗΜΗ, ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
10. [http://en.wikipedia.org/wiki/Rim\\_\(wheel\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Rim_(wheel))
11. <http://www.formula1-dictionary.net/wheels.html>
12. [http://www.ehow.com/facts\\_6362708\\_car-rims-made-of\\_.html](http://www.ehow.com/facts_6362708_car-rims-made-of_.html)
13. <http://www.autoblog.gr/2012/10/17/carbon-revolution-cr9-wheels>



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125699