



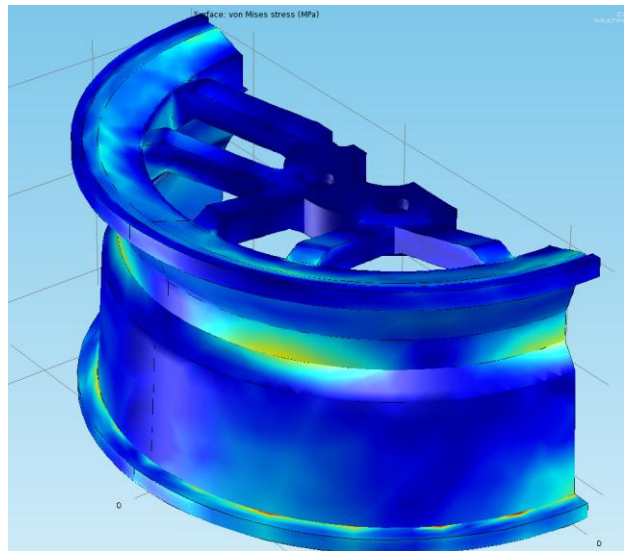
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Δ.Π.Μ.Σ. «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΕ  
ΖΑΝΤΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ**



**ΜΠΕΧΡΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**Επιβλέπων καθηγητής: Μανωλάκος Δημήτριος**

**Αθήνα 2013**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται, όπως μαρτυρά και ο τίτλος της, την προσομοίωση της στατικής μελέτης μια ζάντας αυτοκινήτου. Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των όσων περιλαμβάνει η παρούσα εργασία.

Στο πρώτο κεφάλαιο υπάρχει μια μικρή εισαγωγή του προβλήματος που απασχολεί την παρούσα διπλωματική. Συγκεκριμένα την προσομοίωση της στατικής μελέτης με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων.

Αντικείμενο του δεύτερου κεφαλαίου είναι η πλήρη περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών και των προδιαγραφών μιας ζάντας. Στο τρίτο κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βασικές θεωρίες των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη εισαγωγή στο Solidworks με τη χρήση του οποίου θα υλοποιηθεί η σχεδίαση της ζάντας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται οι τεχνικές προσομοίωσης και παρουσιάζεται το πρόγραμμα Comsol Multiphysics με τη βοήθεια του οποίου πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της στατικής μελέτης της ζάντας. Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό πριν συνεχίσουμε με το κύριο μέρος της εργασίας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέπων καθηγητή της διπλωματικής εργασίας κ. Δημήτρη Μανωλάκο καθώς και του Δρ. Γεώργιου Κούζιλου για την πολύτιμη υποστήριξη και βοήθεια του.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου από την οποία έχω την αδιάκοπη και ουσιώδη στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Μπεχρακής Γεώργιος

## ABSTRACT

The present thesis deals with the simulation of the stationary study of a car rim. A brief description of what is concluded in the current study follows below.

In the first chapter there is a brief introduction of the problem that is concerned in this thesis. Specifically the simulation of the stationary problem with of finite elements.

The second chapter includes a complete description of the technical characteristics and requirements of a car rim. In the third chapter the basis theories of the finite elements will be studied, as for the forth chapter a brief introduction to Solidworks is carried out with the use of the design of the car rim will be performed.

In the fifth chapter the simulation techniques are stated and the use of Comsol Multiphysics is presented with which the stationary study of the car rim is going to be solved. In the last chapter the final results are being presented as well as the conclusions that derive from the simulation.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	2
ΑΒSTRACT.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
2. ΖΑΝΤΕΣ .....	8
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	8
2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ .....	11
2.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	15
3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	19
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	19
3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ CAD.....	20
3.3 ΟΡΙΣΜΟΣ CAE .....	21
3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	22
3.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	24
3.4.2 ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	28
3.4.3 ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	45
4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΖΑΝΤΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SOLIDWORKS.....	48
4.1 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 3D CAD SOLIDWORKS .....	48
4.1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	48
4.1.2 ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΜΕΝΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟ SOLIDWORKS .....	50
4.1.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΓΡΑΦΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (GUI) ΤΟΥ SOLIDWORKS .....	53
4.1.4 ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ .....	57
4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΖΑΝΤΑΣ .....	61
5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ COMSOL MULTIPHSYSICS .....	69
5.1 ΤΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ COMSOL MULTIPHYSICS .....	69

5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ COMSOL MULTIPHYSICS .....	72
5.2.1 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΔΙΑΡΟΗΣ VON MISES STESSES .....	72
5.3 ΞΕΚΙΝΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ .....	73
5.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ COMSOL .....	75
5.4.1 ΓΕΝΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ (GLOBAL DEFINITIONS) .....	76
5.4.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 1 (GEOMETRY 1) .....	76
5.4.3 ΥΛΙΚΑ (MATERIALS) .....	79
5.4.4 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΤΕΡΑΙΩΝ (SOLID MECHANICS) .....	79
5.4.5 ΠΛΕΓΜΑ 1 (MESH 1) .....	82
5.4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (RESULTS) .....	84
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	89



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει μια αναλυτική αναφορά των χαρακτηριστικών καθώς και των προδιαγραφών μια ζάντας. Η καλή γνώση τόσο της γεωμετρίας όσο και των χαρακτηριστικών της ζάντας θα βοηθήσει τόσο στον ορθό σχεδιασμό της όσο και στην πιο αντικειμενική προσομοίωση της στατικής της μελέτης. Η σχεδίαση ενός τρισδιάστατου μοντέλου σε ένα 3D CAD πρόγραμμα όπως το SOLIDWORKS απαιτεί εξοικείωση με το γραφικό του περιβάλλον, με τις εντολές και τα εργαλεία σχεδίασης. Πολλές φορές χρειάζεται να πραγματοποιηθούν αρκετές δοκιμές και αρκετά μοντέλα ώστε να επιλεγεί το καταλληλότερο για την προσομοίωση.

Ομοίως για το COMSOL είναι απαραίτητη η εξοικείωση με αυτό. Σημαντική είναι η κατανόηση του φυσικού και μαθηματικού προβλήματος, οι παράμετροι των οποίων πρέπει να εισαχθούν ορθά, έτσι ώστε η προσομοίωση να προσεγγίζει την πραγματικότητα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την στατική μελέτη της ζάντας περιγράφεται στα επόμενα κεφάλαια, ξεκινώντας με το προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μια ζάντας στο επόμενο κεφάλαιο.



## 2. ΖΑΝΤΕΣ

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μια σωστά κατασκευασμένη ζάντα θα πρέπει να αντέχει στις καταπονήσεις, να διαθέτει μικρό βάρος και να είναι ορθά σχεδιασμένη ώστε οι ακτίνες τους να διευκολύνουν την ροή του αέρα για την ικανοποιητική ψύξη των φρένων. Οι απότομες μεταβολές της ταχύτητας στις στροφές επιφέρουν την εναλλασσόμενη φόρτιση των ζαντών. Άρα μια ζάντα για να είναι ανθεκτική θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα ενισχυμένη;

Τα πράγματα δεν έχουν ακριβώς έτσι διότι το αυξημένο βάρος επηρεάζει αρνητικά τον τομέα της κατανάλωσης ενώ καταπονεί περισσότερο τους συνδέσμους των αναρτήσεων. Για αυτούς, αλλά και άλλους λόγους, οι κατασκευαστές ζαντών έχουν πάντα στο νου τους την διατήρηση του βάρους στα δυνατά χαμηλότερα επίπεδα καθώς οι τροχοί, όπως και οι αναρτήσεις, αποτελούν μη αναρτώμενη μάζα. Όσο μικρότερο είναι το βάρος των τροχών, τόσο αυτοί εμφανίζουν μικρότερη αδράνεια με αποτέλεσμα να ταλαντώνονται λιγότερο σε κάθε ανωμαλία του οδοστρώματος και να κυλούν πιο ομαλά στον δρόμο, βελτιώνοντας τον οδικό χαρακτήρα του αυτοκινήτου.

Πρέπει να σημειωθεί πως η μείωση του βάρους της ζάντας συνδράμει στην διατήρηση του συνολικού βάρους του αυτοκινήτου σε χαμηλά επίπεδα. Άποψη η οποία ενισχύεται από την υιοθέτηση του τροχού ασφαλείας, χωρίς βέβαια να ξεχνά κανείς το μεγαλύτερο κόστος και χώρο που καταλαμβάνει στο πορτμπαγκάζ ένα κανονικός τροχός. Πολλές φορές ξεχνάμε ότι στο αυτοκίνητο μας υπάρχει και πέμπτος τροχός, εκτός και αν ο κατασκευαστής διαθέτει κιτ επισκευής. Η ευρέως γνωστή ρεζέρβα, συνήθως είναι ατσάλινη και μπορεί να έχει κανονικές διαστάσεις ή τροχό ασφαλείας με πολύ μικρό πλάτος πέλματος που επιτρέπει μέγιστη ταχύτητα κίνησης περίπου 80χλμ/ώρα. Η μείωση του πλάτους του αποσκοπεί επίσης στην οικονομία χώρου στο πορτμπαγκάζ και αφετέρου στην μείωση του βάρους και κατά συνέπεια της κατανάλωσης καυσίμου.

Χάρη στην πρόοδο της μεταλλουργίας, το υλικό κατασκευής ζαντών που έχει επικρατήσει τις τελευταίες δεκαετίες είναι το αλουμίνιο. Σαν υλικό διαθέτει σημαντικά μικρότερο βάρος από το ατσάλι το οποίο όμως είναι αντέχει μεγαλύτερα φορτία ενώ σε περίπτωση που μια χαλύβδινη ζάντα στρεβλωθεί υπάρχει η δυνατότητα επαναφοράς της στην αρχική κατάσταση. Ωστόσο, η προσθήκη κραματικών στοιχείων ισχυροποίησαν τους δεσμούς μεταξύ των κόκκων του αλουμινίου αυξάνοντας σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού αλλά, αναπόφευκτα, και το κόστος παραγωγής. Μέσα από σειρά τυποποιημένων δοκιμασιών ειδικές εγκρίσεις πιστοποιούν την ποιότητα κατασκευής και υλικών της ζάντας. Τα τεστ, στα οποία υποβάλλεται μια ζάντα, αφορούν στην αντοχή της στην οξείδωση και στο αλάτι, στην εξακρίβωση της ποιότητας βαφής και κατεργασίας, στην δοκιμασία της σε συνεχείς αλλαγές φορτίου και στην δοκιμασία της σε πίεση και κρούση, προκειμένου να διαπιστωθεί η αξιοπιστία της στην καθημερινή χρήση, όπως χτυπήματα σε λακκούβες, πεζοδρόμια κ.α. Σε εξεζητημένες περιπτώσεις, όπως είναι οι αγώνες, στο κράμα αλουμινίου προστίθενται διάφορα υλικά όπως το μαγνήσιο, το τιτάνιο ή ανθρακόνημα εκτινάσσοντας το κόστος σε εξωτικές τιμές.

Οι ζάντες που διατίθενται στην αγορά ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις ατσάλινες και τις αλουμινένιες. Ο απλούστερος τύπος ζάντας αφορά σε αυτές που αποτελούνται από χάλυβα, κατασκευάζονται με υπό πίεση μεθόδους χύτευσης και χαρακτηρίζονται από το αυξημένο βάρος τους. Εύκολα μπορεί κανείς να τις αντιληφθεί από την άκομψη χαρακτηριστική εμφάνιση τους την οποία καλούνται να ομορφύνουν τα κλασικά τάσια. Ωστόσο, ο δημοφιλέστερος τύπος ζαντών αφορά στις αλουμινένιες οι οποίες τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο από τους κατασκευαστές αυτοκινήτων χωρίς να απατώνται πλέον μόνο στις κορυφαίες εκδόσεις των μοντέλων τους. Σε σχέση με τις ατσάλινες, η σχεδίαση τους επιτρέπει την καλύτερη ψύξη των φρένων, είναι ελαφρύτερες και περισσότερο καλαίσθητες. Μια ατσάλινη ζάντα, αποτελείται από δύο κυρίως πρεσαρισμένα μέρη, την στεφάνη στην οποία εφαρμόζουν τα «χειίλη» του ελαστικού και τον δίσκο που συνδέεται στην πλήμνη του τροχού.

Οι διαστάσεις (διάμετρος, πλάτος και ύψος) της ζάντας είναι τυποποιημένες ώστε να υποδέχονται συγκεκριμένους τύπους ελαστικών ανάλογα με την διάμετρο των τελευταίων. Στην περίπτωση που η στεφάνη στραβώσει τότε δεν χρειάζεται να αλλάξει όλη η ζάντα παρά μόνο το «τραυματισμένο» τμήμα ενώ αν χρειασθεί να αυξομειώσουμε το νούμερο του ελαστικού υπάρχει η λύση της αντικατάστασης μόνο της δίσκου της ζάντας που συνδέεται με την πλήμνη ενώ καλή θα είναι η ζυγοστάθμιση κάθε περίπου 20.000 χιλιόμετρα. Αν χρειασθεί για οποιοδήποτε λόγο η αντικατάσταση της ζάντας θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το καρέ της ζάντας (η απόσταση και ο αριθμός των μπουλονιών), οι διαστάσεις της και το προφίλ των ελαστικών ώστε να μην μεταβληθεί η διάμετρος του τροχού και κατά συνέπεια η γεωμετρία του εκτός και αν προβλέπεται από τον κατασκευαστή του αυτοκινήτου. Μια ζάντα μπορεί να είναι κατασκευασμένη από ιδιαίτερα στιβαρό υλικό προσφέροντας καλύτερο κράτημα. Στα αυτοκίνητα παραγωγής οι περισσότεροι κατασκευαστές υιοθετούν την πιο «μαλακή» λύση ώστε σε περίπτωση χτυπήματος η ζάντα να μην είναι ψαθυρή (να είναι περισσότερο όλκιμη, δηλαδή να μην σπάει εύκολα) και να διατηρείται η σωστή επαφή του ελαστικού χωρίς να διαφεύγει ο αέρας.

## 2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

- ΚΑΡΕ ή WHEEL ADAPTER

Το καρέ βρίσκεται σε κάθε αυτοκίνητο και φυσικά δεν είναι μέρος της ζάντας. Όμως λόγω του ότι είναι το σημείο εκείνο που βιδώνεται η ζάντα και ουσιαστικά είναι ο συνδετικός κρίκος με το αυτοκίνητο, θεωρήσαμε σωστό να γίνει μια τυπική αναφορά. Το εξάρτημα αυτό είναι στην άκρη κάθε άξονα και η δουλειά του είναι να συγκρατεί την ζάντα τοποθετημένη σωστά πάνω στο αυτοκίνητο. Είναι κατασκευασμένο εργοστασιακά από σίδηρο συνήθως και ενώ είναι συμπαγές και ενιαίο μπορούμε να εντοπίσουμε τα τμήματά του στις τρύπες του έχει για να βιδωθεί στον άξονα και στις βίδες που εξέχουν για να βιδωθεί η ζάντα. Στο κέντρο υπάρχει υποδοχή για να «κάτσει» η ζάντα ακριβώς στο κέντρο του. [1]



Σχήμα 2.1 : Καρέ ζάντας

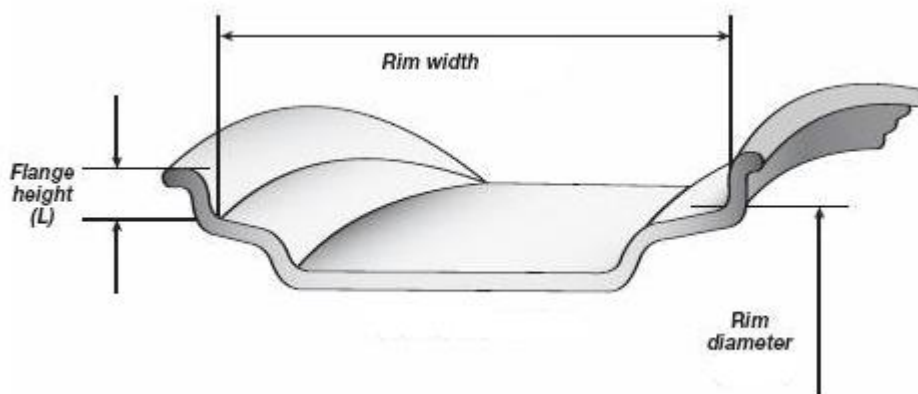
- PCD

Το PCD (Pitch Circle Diameter) δεν είναι τίποτα άλλο από τον αριθμό των τρυπών που έχει η ζάντα για να τοποθετείται στο καρέ του κάθε αυτοκινήτου. Αυτό το στοιχείο φυσικά δεν είναι μεταβαλλόμενο ή επιλέξιμο από τον τελικό αγοραστή γιατί ο κατασκευαστής του αυτοκινήτου έχει επιλέξει το σωστό καρέ για κάθε αυτοκίνητο βάση του βάρους του και πως αυτό θα κατανέμεται στην ζάντα. Το PCD

αποτελείται από δυο αριθμούς (π.χ. 5x120) και ο πρώτος είναι ο αριθμός των θέσεων για τα μπουλόνια του καρέ ενώ ο δεύτερος είναι η απόσταση (mm) μεταξύ των τρυπών, αν τα κέντρα τους ήταν σε ευθεία με το κέντρο της ζάντας. Στην Γερμανία το pcd αναφέρεται συνήθως ως E. T.[ 1],[2]

- ΦΑΡΔΟΣ ΖΑΝΤΑΣ - RIM WIDTH

Το φάρδος της ζάντας είναι η απόσταση μεταξύ των ακρών της ζάντας στην επιφάνεια που πατάει το ελαστικό (rim width) αλλά όχι το συνολικό πλάτος της ζάντας. Αξίζει να σημειωθεί ότι το όταν έχουμε μια ζάντα με 7" πλάτος ,ουσιαστικά το συνολικό της φάρδος από άκρη σε άκρη είναι 8". Αυτό οφείλεται στο ότι ο κατασκευαστής δεν συμπεριλαμβάνει στο rim width το πλάτος από τα «αυτάκια» της ζάντας όπου χωνεύει το ελαστικό και συνήθως αυτό είναι 0,5". [1],[2],[3]



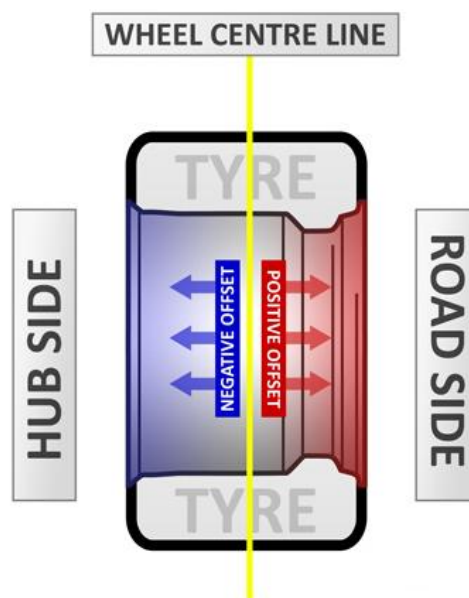
Σχήμα 2.2 : Πλάτος ζάντας

- BACKSPACING

Το backsparing είναι ένα στοιχείο που συνήθως δεν αναφέρεται στα στοιχεία μιας ζάντας. Πάρα ταύτα είναι ένα βασικό στοιχείο για τον υπολογισμό του offset που θα αναλυθεί παρακάτω. Το μέγεθος αυτό μετράει την απόσταση από το πίσω μέρος της ζάντας μέχρι και το κέντρο της. [2]

- OFFSET

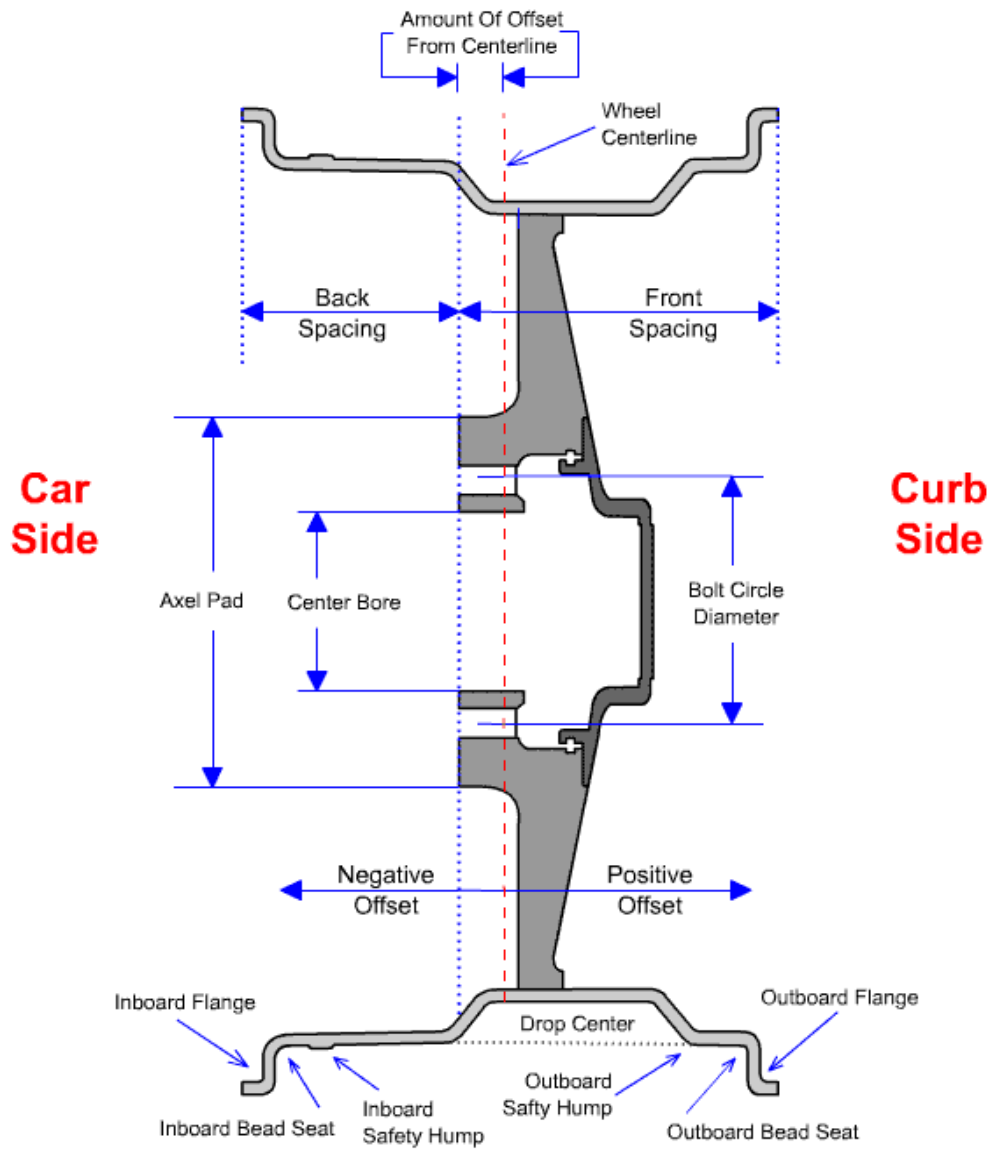
Το offset είναι μια παράμετρος που προσδιορίζει την απόσταση από τον κεντρικό άξονα της ζάντας μέχρι την επιφάνεια που τοποθετείται το καρέ. Το offset μπορεί να είναι θετικό, αρνητικό ή μηδενικό. Ο λόγος που είναι τόσο σημαντικό το offset σαν παράμετρος έγκειται στο γεγονός ότι η λάθος επιλογή του θα οδηγήσει σε δυσκολία κατά την οδήγηση. Δηλαδή είτε το τιμόνι θα είναι υπερβολικά σκληρό και δεν θα στρίβει είτε θα είναι πολύ ελαφρύ επομένως το αυτοκίνητο θα παρεκκλίνει εύκολα από την πορεία του. Το μέγεθος αυτό είναι η διαφορά του μισού πλάτους της ζάντας (rim width) από την απόσταση του που πίσω μέρους της (backspace) μέχρι το κέντρο της. [1],[2],[3]



Σχήμα 2.3 : Αντιστάθμιση (Offset)

Το μηδενικό offset συνήθως χρησιμοποιείται από αγωνιστικά αυτοκίνητα πίστας. Ενώ τα θετικά χρησιμοποιούνται από τους περισσότερους κατασκευαστές αυτοκινήτων και σε παρά πολύ μεγάλο ποσοστό στα αυτοκίνητα με κίνηση στους εμπρός τροχούς. Ο υπολογισμός του Offset γίνεται με τον τύπο :

$$\text{OFFSET} = \text{BACKSPACE} - \frac{1}{2}(\text{RIM WIDTH})$$



Σχήμα 2.4 : Συγκεντρωτικά στοιχεία ζάντας

## 2.3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

### ❖ Ατσάλινες ζάντες

Από πολύ παλιά το ατσάλι (χάλυβας) είναι για την αυτοκινητοβιομηχανία το υλικό που λύνει τα περισσότερα προβλήματα. Έχει μεγάλη αντοχή, ενώ δεν είναι ιδιαίτερα βαρύ ούτε και ακριβό, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα. Μετά το 1960 άρχισε να αντικαθίσταται με άλλα κράματα της ίδιας αντοχής, αλλά με καλύτερες ιδιότητες. Στις ζάντες όμως εξακολουθεί να δεσπόζει και δεν υπάρχει μικρό και μεσαίο αυτοκίνητο που να μην εφοδιάζεται με ελάχιστες εξαιρέσεις με χαλύβδινες ζάντες.

Δύο είναι οι τρόποι που παράγονται οι ατσάλινες ζάντες. Σαν πρεσαριστές, που προέρχονται από κομμάτια μετάλλου τα όποια πρεσάρονται σε κατάλληλα καλούπια, και σα χυτές, που χύνονται σε ειδικά καλούπια και μετά περνούν μια ειδική κατεργασία στα διάφορα σημεία, ώστε να πάρουν την τελική τους μορφή. Οι χυτές έχουν καλύτερες ιδιότητες, δε χρειάζονται μεγάλη και πολυδάπανη μηχανουργική και θερμική κατεργασία και έχουν πιο προσεγμένο φινίρισμα. Όπως σημειώσαμε ο λόγος που οδηγεί ορισμένους κατασκευαστές στην αντικατάσταση των ατσάλινων είναι το βάρος τους. Χωρίς να είναι υπερβολικό αποδεικνύεται μεγαλύτερο, συνήθως, από τις ζάντες που χρησιμοποιούν κράματα αλουμινίου.[3],[4]

### ❖ Ελαφρές ζάντες

Σαν πρώτη λύση στο πρόβλημα μείωσης του αναρτώμενου βάρους χρησιμοποιήθηκαν οι ακτινωτές ζάντες. Με σημαντικά μικρότερο βάρος και καλύτερη εμφάνιση από τις νορμάλ αποδείχτηκαν πολύπλοκες κατασκευαστικά και κόστιζαν τόσο, ώστε τελικά να περιοριστούν σε ελάχιστα αυτοκίνητα. Έτσι την προτίμηση των κατασκευαστών συγκέντρωσαν ελαφρότερα κράματα, όπως το αλουμίνιο, που ζυγίζει τρεις φορές λιγότερο από το σίδηρο, το μαγνήσιο, που κοστίζει αρκετά περισσότερο από το αλουμίνιο και το τιτάνιο, που εδώ και χρόνια βρίσκει εφαρμογή στην αεροναυπηγική.



Οι πρώτες αλουμιένιες ζάντες κατασκευάζονταν πρεσαριστές επειδή τα κράματα του αλουμινίου δεν ήταν ακόμη κατάλληλα για να χυθούν. Τέτοιες ζάντες κατασκεύαζε μέχρι το 1972 η Φορντ. Η βελτίωση όμως των διαδικασιών και μεθόδων παραγωγής οδήγησε στην κατασκευή χυτών αλουμινοτροχών και τον περιορισμό των πρεσαριστών σε ειδικές μόνο περιπτώσεις.

Τα πρώτα μίγματα που χρησιμοποιήθηκαν στις χυτές ζάντες, αποδείχτηκαν ανέκανα να εξασφαλίσουν τις απαραίτητες προδιαγραφές ασφάλειας και εγκαταλείφθηκαν γρήγορα. Οι προσπάθειες βελτίωσης περιλάβαιναν αλλαγές στη μικροδομή και τη σύνθεση του αλουμινοκράματος (συνδυασμό τιτανίου και βορίου και προσθήκη μεταλλικού νατρίου) που τελικά έγινε περισσότερο λεπτοδιαμερισμένο και ομοιόμορφο σα μίγμα αποκτώντας καλύτερες ιδιότητες μήκυνσης και μεγαλύτερη αντοχή.

Τα αλουμινοκράματα που χρησιμοποιούνται σήμερα στις χυτές ζάντες αλουμινίου έχουν τη χημική σύνθεση του πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 2.1 Χημική σύνθεση ζάντας αλουμινίου

<b>Σύνθεση αλουμινοκράματος τυπικής ελαφριάς ζάντας αλουμινίου</b>	
<b>Υλικό</b>	<b>Ποσοστό (%)</b>
Πυρίτιο	7,5 - 8,5
Χαλκός	0,1max
Νάτριο	0,1max
Σίδηρος	0,3max
Ψευδάργυρος	0,1max
Μαγγάνιο	0,1max
Τιτάνιο	0,2max
Άλλα	0,05max
Αλουμίνιο	Υπόλοιπο

Συνήθως γιατί υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα κράματα για μεγαλύτερη αντοχή και μικρότερο βάρος έχουν περισσότερο μαγνήσιο και τιτάνιο. Οι διαφορές βάρους ανάμεσά τους δεν είναι καθόλου ευκαταφρόνητες. Μια καλή αλουμιένια π.χ. 5 ½ X13, ζυγίζει 5,30 κιλά και μία αντίστοιχη μαγνησίου 4,60 κιλά. Η αντίστοιχη ζάντα του κατασκευαστή ζυγίζει γύρω στα 7,00 κιλά. Υπάρχουν όμως και βαριές (!) ελαφρές ζάντες, που ζυγίζουν το ίδιο σχεδόν με τις ατσάλινες του αυτοκινήτου σας. Στην περίπτωση αυτή ψάξτε για ελαφρότερες ή μην τις αλλάξετε καθόλου, γιατί μην

ξεχνάτε πως έχουν βάρος και τα ελαστικά. Τοποθετώντας δύο διαστάσεις μεγαλύτερα ελαστικά χωρίς να μειωθεί το βάρος της ζάντας, δεν κάνετε τίποτε άλλο παρά να αυξάνετε το αναρτώμενο βάρος, πράγμα καθόλου ευχάριστο για την οδική συμπεριφορά.[ 3],[ 4],[ 5]

## Συνθήκες για την επιλογή υλικού

### ❖ Σκληρότητα

Σκληρότητα της κατασκευής (εξαρτάται από το σχεδιασμό) είναι η βασική τιμή κατά το σχεδιασμό μιας ζάντας από αλουμίνιο για να επιτευχθεί τουλάχιστον η ίδια συμπεριφορά στο οχήμα όπως με την αντίστοιχη χαλύβδινη ζάντα. Ωστόσο, η σκληρότητα του υλικού (Young's modulus) εξαρτάται πολύ λίγο από το κράμα.

### ❖ Στατική συμπεριφορά

Η ζάντα είναι σχεδιασμένη ώστε να μην παραμορφώνεται τόσο κάτω από μέγιστα αξονικά φορτία (επιτάχυνση και πέδηση) όσο και από ακτινικά (κατά την περιστροφή). Δοκιμές γίνονται υπό πίεση για να ελέγξουν την στατική συμπεριφορά.

### ❖ Συμπεριφορά στην κόπωση

Αυτή η παράμετρος είναι σημαντική για την διαστασιολόγηση. Λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται συστηματικά κατά τον σχεδιασμό. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται λογισμικά για τον υπολογισμό των αξονικών τάσεων. Στη συνέχεια γίνονται δοκιμές για την επαλήθευση αυτών των υπολογισμών.

### ❖ Ψύξη

Όποιος και αν είναι ο τύπος του ζάντα, το αλουμίνιο διαχέει τη θερμότητα πιο γρήγορα από το ατσάλι. Επιπλέον, οι ζάντες αλουμινίου ενεργεί ως ένα πολύ αποτελεσματικό απαγωγέα θερμότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σημαντική βελτίωση στη πέδηση, και μειωμένο κίνδυνο υπερθέρμανσης των ελαστικών.

❖ Διαστασιολόγηση

Μια τέλεια ισορροπία μάζας είναι μια βασική παράμετρος για την αποφυγή σημαντικών δονήσεις. Ως αποτέλεσμα, η χύτευση και σφυρηλάτηση των τροχών πραγματοποιείται μηχανικά. Μια ελαφριά ζάντα επίσης μειώνει τους κραδασμούς από οι ζάντες αλουμινίου φύλλο

❖ Διάβρωση

Οι χυτευμένες και οι σφυρήλατες ζάντες βράφονται ή περνιέται βερνίκι μετά από χημική κατεργασία. [6]

### 3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

#### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ραγδαία εξέλιξη των τελευταίων ετών στη Μηχανολογία οφείλεται, χωρίς αμφιβολία, στην εισαγωγή των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε όλους τους επιμέρους τομείς της. Σε σχέση με τις κατασκευαστικές επιστήμες, η δυνατότητα “απεικόνισης” της γεωμετρίας μιας μηχανολογικής κατασκευής στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, καθώς και η δυνατότητα “προσομοίωσης” της στατικής, δυναμικής, θερμικής, ρευστοδυναμικής, κλπ. συμπεριφοράς της, αποτελούν επιτεύγματα των τελευταίων ετών και αλλάζουν σημαντικά τόσο την εκπαίδευση όσο και την επαγγελματική πράξη του μηχανολόγου μηχανικού.

- ✓ Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού.
- ✓ Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Η κυρίαρχη μέθοδος CAE είναι αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM).

## 3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ CAD

Η σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Design: CAD) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί Η/Υ για την υποβοήθηση της δημιουργίας, τροποποίησης και βελτιστοποίησης ενός σχεδιασμού. Με τον όρο CAD εννοούμε τη δημιουργία γεωμετρικών απεικονίσεων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Προφανώς δεν περιοριζόμαστε στην γνωστή διαδικασία αντικατάστασης του drafting, δηλ. του δισδιάστατου (2-D) παραδοσιακού σχεδίου του μηχανικού, αλλά κυρίως στην περίπτωση τρισδιάστατης (3-D) απεικόνισης κατασκευών ή δομών, όπου χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένες διαδικασίες προσέγγισης επιφανειών (μέσω των παρεμβολών Coons, Bezier και Nurbs) ή/και όγκων. Έτσι, είναι πολύ ευκολότερη και ελέγξιμη η αλλαγή της γεωμετρίας ενός μηχανολογικού εξαρτήματος μέχρις ότου ο μελετητής καταλήξει σε μία καταρχήν αποδεκτή κατασκευαστική λύση. Επιπλέον, όλα τα συστήματα CAD διαθέτουν κατάλληλα φίλτρα – interfaces (DXF, IGES, STEP) που δίνουν τη δυνατότητα μεταφοράς της γεωμετρικής πληροφορίας από το ένα σύστημα στο άλλο (εναλλαξιμότητα).

Τα εργαλεία CAD μπορούν να ποικίλουν μεταξύ γεωμετρικών εργαλείων διαχείρισης σχημάτων (ένα άκρο), μέχρι εξειδικευμένα προγράμματα εφαρμογών όπως ανάλυση και βελτιστοποίηση (άλλο άκρο). Μεταξύ αυτών των δύο άκρων, τυπικά εργαλεία που είναι διαθέσιμα επί του παρόντος, περιλαμβάνουν ανάλυση ανοχών, υπολογισμούς ιδιοτήτων μάζας (κέντρα βάρους, ροπές αδρανείας, κλπ.), μοντελοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (FEM) και οπτικής απεικόνισης (visualization) των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, μεταξύ άλλων. Ο σημαντικότερος ρόλος του CAD είναι ο καθορισμός της γεωμετρίας του υπό σχεδιασμό προϊόντος που είναι ουσιώδης σε όλες τις επόμενες φάσεις του κύκλου. Στη συνέχεια, η εν λόγω γεωμετρία αξιοποιείται από το CAE.[7],[8]

### 3.3 ΟΡΙΣΜΟΣ CAE

Η ανάλυση με τη βοήθεια Η/Υ (Computer-Aided Engineering: CAE) είναι μια τεχνολογία που ασχολείται με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων για την ανάλυση γεωμετρίας CAD, που επιτρέπει στον σχεδιαστή να προσομοιώσει και μελετήσει τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφερθεί το προϊόν έτσι ώστε ο σχεδιασμός να επιδέχεται εύκολα αποπεράτωση και βελτιστοποίηση. Τα εργαλεία CAE διατίθενται σε ευρεία κλίμακα αναλύσεων. Κινηματικά προγράμματα, για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση λειτουργίας μηχανών. Προγράμματα δυναμικής ανάλυσης μεγάλων μετατοπίσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σύνθετων συναρμολογημένων δομών όπως λ.χ. τα οχήματα ή συσκευασιών σε πτώση επί του εδάφους.

Μεταξύ των πλέον διαδεδομένων μεθόδων ανάλυσης είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method: FEM) που επιτρέπει τη στατική και δυναμική ανάλυση τάσεων και μετατοπίσεων, θερμική ανάλυση, ρευστομηχανική και αεροδυναμική ανάλυση, ακουστική ανάλυση, κατανομή μαγνητικού πεδίου ή και άλλων πεδίων. Η εφαρμογή της FEM απαιτεί τη χρήση ενός απλουστευμένου αφαιρετικού μοντέλου που πρέπει να γεννηθεί είτε με αλληλεπίδραση του χρήστη ή και αυτόματα. Το λογισμικό που καθιστά δυνατή την κατασκευή του αφαιρετικού μοντέλου και τη γένεση των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί τους προεπεξεργαστές (pre-processors). Μετά την εκτέλεση της ανάλυσης σε κάθε στοιχείο, ο Η/Υ συγκεντρώνει τα αποτελέσματα και τα εμφανίζει με ευανάγνωστο οπτικό τρόπο. Περιοχές υψηλών τάσεων μπορεί να παριστάνονται με κόκκινο χρώμα για παράδειγμα. Το λογισμικό τέτοιων απεικονίσεων αποτελεί τους λεγόμενους μεταεπεξεργαστές (post-processors).

Επίσης, είναι διαθέσιμα πολλά εργαλεία βελτιστοποίησης σχεδιασμού. Παρόλο που τα εργαλεία βελτιστοποίησης μπορούν να θεωρηθούν σαν εργαλεία CAE, συνήθως ταξινομούνται με ξεχωριστό τρόπο. Διάφορες ερευνητικές προσπάθειες εξελίσσονται προς την κατεύθυνση αυτόματου σχεδιασμού με ολοκλήρωση των διαδικασιών βελτιστοποίησης και ανάλυσης. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, γίνεται η παραδοχή ενός απλού αρχικού σχήματος σχεδιασμού, όπως ένα ορθογώνιο

παραλληλόγραμμο για δισδιάστατο εξάρτημα που αποτελείται από μικρά στοιχεία διαφορετικών πυκνοτήτων. Κατόπιν, εκτελείται η διαδικασία βελτιστοποίησης προς υπολογισμό των βέλτιστων τιμών αυτών των πυκνοτήτων που αποβλέπει στην επίτευξη ενός στόχου με παράλληλη ικανοποίηση των συνθηκών τάσεων ή/και μετατοπίσεων. Συνήθως ο στόχος είναι η επίτευξη του ελάχιστου βάρους. Με βάση τις βέλτιστες τιμές πυκνοτήτων, το βέλτιστο σχήμα του σχεδιασμού λαμβάνεται με απαλοιφή των στοιχείων χαμηλής πυκνότητας.

Η γοητεία των μεθόδων ανάλυσης και βελτιστοποίησης είναι ότι επιτρέπουν στον μηχανικό να δει τον τρόπο με τον οποίο το προϊόν θα συμπεριφερθεί και του επιτρέπει να επισημάνει τα όποια λάθη έχουν γίνει μέχρι τη στιγμή εκείνη, προτού προχωρήσει σε χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου φυσικών πρωτοτύπων. Επειδή το κόστος μελέτης μεταβάλλεται εκθετικά στα τελευταία στάδια ανάπτυξης και παραγωγής του προϊόντος, η πρόωμη βελτιστοποίηση και εξευγενισμός που επιτυγχάνεται από την ανάλυση CAE τελικά αποπληρώνεται με μείωση χρόνου και κόστους. [8],[9]

### **3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Ένα από τα πρώτα μελήματα του μηχανικού όταν αυτός αναλάβει την ανάπτυξη ενός μοντέλου είναι η επιλογή των κατάλληλων πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη και σε δισδιάστατες κατασκευές η χρήση τριγωνικών στοιχείων τριών κόμβων και τετραπλευρικών στοιχείων τεσσάρων κόμβων δεν είναι η μόνη επιλογή του, ανάλογα με τις δυνατότητες του διαθέσιμου λογισμικού. Πράγματι, μια από τις κρισιμότερες αποφάσεις είναι η επιλογή των κατάλληλων στοιχείων με τον κατάλληλο αριθμό κόμβων από την διαθέσιμη βιβλιοθήκη στοιχείων. Επιπρόσθετα, το πλήθος των στοιχείων (με άλλα λόγια το μέσο μέγεθος των στοιχείων) που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος είναι αποτέλεσμα της κρίσης του μηχανικού. Σαν γενικός κανόνας, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των κόμβων και των στοιχείων (στην h version) ή όσο μεγαλύτερος ο βαθμός πολυωνύμου της συνάρτησης μορφής (στην p version), τόσο ακριβέστερη είναι η λύση των πεπερασμένων στοιχείων, αλλά επίσης τόσο πιο δαπανηρή είναι η

επίλυση. Οι διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων εισάγονται παρακάτω. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η γένεση πλέγματος του υπό ανάλυση αντικειμένου, ειδικά όταν έχει περίπλοκο γεωμετρικό σχήμα. Η δημιουργία τρισδιάστατων πλεγμάτων είναι μια διαδικασία που απαιτεί πολλές εργατοώρες και είναι επιρρεπής σε σφάλματα. Γίνονται πολλές προσπάθειες αυτόματης γένεσης πλεγμάτων που να συνδέονται με συστήματα μοντελοποίησης όγκου (solid modeling).

Στην κλασική μέθοδο (στην h version) εάν  $n$  είναι το πλήθος των κόμβων τότε το πλήθος των βαθμών ελευθερίας είναι  $2n$  και  $3n$  για δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα, αντίστοιχα.

Σημειώσεις:

- Στην κλασική μορφή των πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζεται h-version, χρησιμοποιούνται πολυώνυμα ορισμένου βαθμού οπότε η αύξηση της ακρίβειας επιτυγχάνεται με μείωση της μέσης διάστασης (π.χ. της ακτίνας,  $h$ , του περιγεγραμμένου κύκλου) των στοιχείων, με άλλα λόγια με αύξηση του πλήθους των αυτών (πύκνωση πλέγματος).
- Στην λεγόμενη p-version, χρησιμοποιείται ένα σταθερό πλέγμα αλλά επιτρέπεται η αύξηση του πολυωνυμικού βαθμού  $p$  της συνάρτησης μορφής. Στην p-version, οι συντελεστές του εν λόγω υψηλού βαθμού πολυωνύμου είναι επίσης άγνωστοι που υπολογίζονται σαν τμήμα της διαδικασίας επίλυσης.



### 3.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ – ΤΥΠΟΙ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το σύνολο των απαραίτητων διαδικασιών για την ανάπτυξη ενός πλήρους μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, δηλ. η εισαγωγή της γεωμετρίας, η γένεση του πλέγματος, η επιβολή στηρίξεων και φόρτισης αποτελούν αυτό που συνοπτικά ονομάζεται μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων (finite-element modeling), η οποία συνήθως εκτελείται με τη βοήθεια κατάλληλου προ-επεξεργαστή. Πολύ παλαιότερα, η εισαγωγή των δεδομένων δινόταν με γραμμές εντολών με τη βοήθεια ενός αυτόνομου αρχείου δεδομένων (batch file).

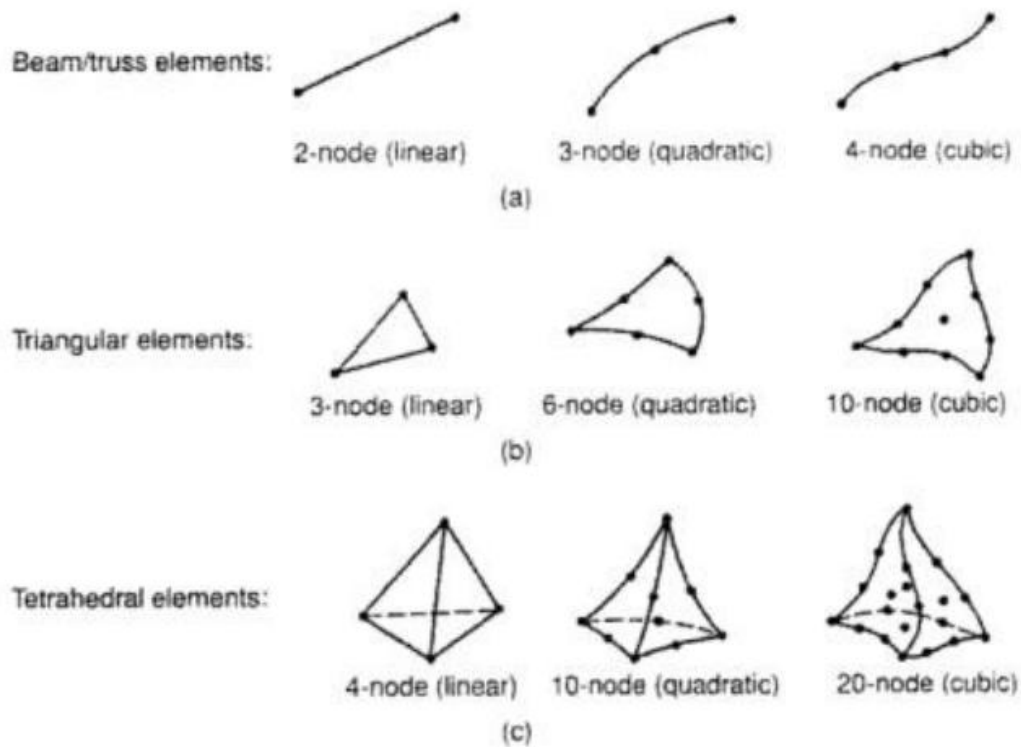
Ο προ-επεξεργαστής (pre-processor) ξεκινάει από τη γεωμετρία του αντικείμενου ή του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Παραδοσιακά συστήματα FEA (Finite Element Analysis) είχαν μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες μοντελοποίησης, αλλά σήμερα τα περισσότερα είτε προσφέρουν προηγμένες δυνατότητες ή έχουν στενούς δεσμούς με συστήματα CAD (μερικές φορές και τα δύο). Συστήματα που στηρίζονται σε γεωμετρική μοντελοποίηση CAD είτε εργάζονται απευθείας με το μοντέλο CAD ή μεταφράζουν και εισάγουν τη γεωμετρία. Η απευθείας σύνδεση με CAD κερδίζει όλο και μεγαλύτερο έδαφος διότι εξαλείφει τα βήματα μετάφρασης την απώλεια δεδομένων και μικραίνει τον κύκλο σχεδιασμού-ανάλυσης-αλλαγής.[9]

Περαιτέρω, η χρήση συστήματος CAD διευκολύνει τη μοντελοποίηση και παρέχει πιο ισχυρές λειτουργίες δημιουργίας και αλλαγής σύνθετης γεωμετρίας. Πράγματι, σήμερα τα περισσότερα υβριδικά συστήματα μοντελοποίησης (με ολοκληρωμένη μοντελοποίηση όγκου, επιφάνειας και wireframe, και παραμετρικών μεθόδων που στηρίζονται σε features) μπορούν να κτίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία απαιτείται για ανάλυση. Τα περισσότερα συστήματα FEA δίνουν επίσης έμφαση στη δυνατότητα που έχουν να εισάγουν τη γεωμετρία, είτε μέσω τυποποιήσεων όπως το IGES ή απευθείας από συγκεκριμένα συστήματα CAD. Ωστόσο, η απευθείας χρήση δεν είναι πάντα άμεσα εφαρμόσιμη. Το μοντέλο μπορεί να φαίνεται στο μάτι ότι είναι τέλειο αλλά μπορεί στην πραγματικότητα να έχει σφάλματα που αποκαλύπτονται στο σύστημα FEA, κυρίως κατά την διαδικασία γένεσης πλέγματος. Μερικά συστήματα προσφέρουν λειτουργίες που μπορούν να «καθαρίσουν» την εισαγόμενη γεωμετρία.

Επιπλέον, ακόμη και αν η γεωμετρία CAD δεν περιέχει σφάλματα, η ανάλυση δεν απαιτεί όλες τις λεπτομέρειές του, οπότε μερικές από αυτές (π.χ. ένα fillet) θα μπορούσαν να απαλειφθούν. Μερικά συστήματα διαθέτουν τέτοιες αυτόματες δυνατότητες απενεργοποίησης γεωμετρικών οντοτήτων.

Το επόμενο στάδιο είναι η δημιουργία πλέγματος και κατανομής κόμβων. Όταν σε κάθε πλέγμα αποδίδονται κόμβοι, τότε αυτό μετατρέπεται σε πεπερασμένο στοιχείο. Η γένεση πλέγματος είναι το πλέον σημαντικό και δύσκολο στάδιο της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Για τη διευκόλυνση αυτού του σταδίου, σήμερα όλα τα συστήματα προσφέρουν δυνατότητες αυτόματης γένεσης πλέγματος. Η τυπική προσέγγιση είναι να προσφέρουν αυτόματο πλέγμα τετραεδρικών στοιχείων για στερεή γεωμετρία και τετραπλευρικά ή τριγωνικά στοιχεία για επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο (κελύφη, επίπεδη εντατική ή επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Πολλά συστήματα επιτρέπουν στους χρήστες να επέμβουν στις παραμέτρους αυτόματης γένεσης πλέγματος όπως η πυκνότητα πλέγματος. Αυτές επιπλέον επιτρέπουν τοπική επέμβαση σε κρίσιμες περιοχές. Πολλά συστήματα επιτρέπουν τη διασύνδεση πλέγματος με τη γεωμετρία έτσι ώστε κάθε αλλαγή αυτής να αντανakλάται αυτόματα στο πλέγμα. [8],[9]

Τα διάφορα στοιχεία που υποστηρίζονται από ένα σύστημα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν τη λεγόμενη βιβλιοθήκη στοιχείων (element library). Όσο πιο μεγάλο το είδος των στοιχείων τόσο περισσότερα είδη προβλημάτων μπορούν να επιλυθούν. Το Σχήμα 3.1 δείχνει τυπικά πεπερασμένα στοιχεία που υποστηρίζονται από τους περισσότερους κώδικες. Να σημειωθεί ότι το ίδιο πλέγμα μπορεί να αντιστοιχεί σε διαφορετικά πεπερασμένα στοιχεία ανάλογα με τον αριθμό κόμβων που αποδίδονται σε αυτό. Τέλος, οι ζώνες στις οποίες αναμένεται απότομη μεταβολή στη συμπεριφορά των προς επίλυση αγνώστων (όπως συγκέντρωση τάσεων γύρω από οπές) πρέπει να διακριτοποιηθούν από στοιχεία μεγαλύτερης πυκνότητας πλέγματος από εκείνες που εμφανίζουν προοδευτική μεταβολή.



Σχήμα 4.1: Τύποι πεπερασμένων στοιχείων για (a) μονοδιάστατα, (b) δισδιάστατα και (c) τρισδιάστατα προβλήματα

Μια διαφορετική προσέγγιση στο δίλημμα του πλέγματος είναι η χρήση της p-version μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή στηρίζεται σε ένα απλούστερο, αυτόματα γεννημένο πλέγμα, αλλά κατόπιν μεταβάλλει αυτόματα τον πολυωνυμικό βαθμό των συναρτήσεων μορφής. Παρόλο που σήμερα είναι διαθέσιμα πολλά τέτοια προγράμματα FEA, δύο προγράμματα (PTC's Pro/MECHANICA και CADSI's PolyFEM) σχεδιάστηκαν ειδικά για ανάλυση τύπου p-version. Επιπλέον από το εύκολο πλέγμα, τα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι η ικανότητα να καθορίσουν όρια ακρίβειας και πλησιέστερης προσέγγισης της γεωμετρίας του μοντέλου CAD. Χρησιμοποιώντας χαμηλότερο επίπεδο ακρίβειας, ο σχεδιαστής μπορεί να πάρει γρήγορα αποτελέσματα ανάλυσης στο προκαταρκτικό στάδιο σχεδιασμού.

Αφού επιλεγεί η διάταξη των στοιχείων, καθορίζεται ο τύπος της ανάλυσης (π.χ., στατική ή δυναμική, γραμμική ή μη-γραμμική, επίπεδη εντατική κατάσταση, και επίπεδη παραμορφωσιακή κατάσταση). Επίσης, οι άγνωστοι ή αλλιώς οι βαθμοί

ελευθερίας συσχετίζονται με τους κόμβους. Οι άγνωστοι περιέχουν μετατοπίσεις, περιστροφές, θερμοκρασία, ροή θερμότητας, κ.ο.κ. Κατόπιν καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Οριακές συνθήκες όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, και θερμοκρασίες συνήθως είναι γνωστές για το συνεχές τμήμα του συνόρου του αντικειμένου. Αυτές οι οριακές συνθήκες πρέπει να εκφραστούν σαν ένα σύνολο τιμών μετατοπίσεων, δυνάμεων, ή θερμοκρασιών σε συγκεκριμένους κόμβους των πεπερασμένων στοιχείων. Ωστόσο, μερικές φορές τα πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να γεννηθούν χωρίς να έχουν οριακές συνθήκες. Εάν πρόκειται να εισαχθούν σημειακά φορτία, πρέπει να δημιουργηθούν κόμβοι στα αντίστοιχα σημεία εφαρμογής τους. Τα περισσότερα συστήματα που είναι συνδεδεμένα με CAD επιτρέπουν στο χρήστη να ορίσει τις οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, και σε αυτή την περίπτωση οι οριακές συνθήκες μετατρέπονται σε ισοδύναμες οριακές συνθήκες στους κόμβους του πλέγματος από το ίδιο το σύστημα. Οι περισσότεροι μοντελοποιητές πεπερασμένων στοιχείων επίσης παρέχουν έναν αριθμό τρόπων εύκολου καθορισμού των φορτίσεων και των οριακών συνθηκών για το χειρισμό ευρείας κλίμακας προβλημάτων και ρεαλιστικών συνθηκών.

Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο πρέπει επίσης να αποδοθούν ιδιότητες υλικού. Αυτές οι ιδιότητες είναι τυπικά το μέτρο ελαστικότητας του Young, και ο λόγος του Poisson (για ελαστικές κατασκευές). Το πάχος στοιχείων κελύφους και πλακών διαχειρίζεται περισσότερο σαν ιδιότητα του υλικού παρά σαν γεωμετρική ιδιότητα για την αποφυγή επίλυσης του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις. Άλλες ιδιότητες υλικών περιλαμβάνουν θερμικές ιδιότητες (ειδική θερμότητα, συντελεστής αγωγιμότητας, λανθάνουσα θερμότητα, κλπ), ιξωδοελαστικότητα, κλπ, για άλλου τύπου προβλήματα. Γίνεται μόνο μια απλή παραδοχή: σε διαφορετικές περιοχές στοιχείων αποδίδονται διαφορετικές ιδιότητες υλικών. Αυτό λ.χ. δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αναλύσει ένα αντικείμενο κατασκευασμένο από σύνθετο υλικό. Ένα κρίσιμο ζήτημα στην ανάλυση σύνθετων υλικών είναι η διαχείριση της διεπιφάνειας μεταξύ των στρώσεων προκειμένου να υπολογισθεί η αποκόλληση (delamination).

Από τη στιγμή που ορισθεί το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων επιλέγοντας όλες τις παραμέτρους του πλέγματος, το μοντέλο εισάγεται στον κώδικα που εκτελεί την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Μετά την αριθμητική επίλυση, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε ένα στάδιο που παραδοσιακά ονομάζεται μετα-

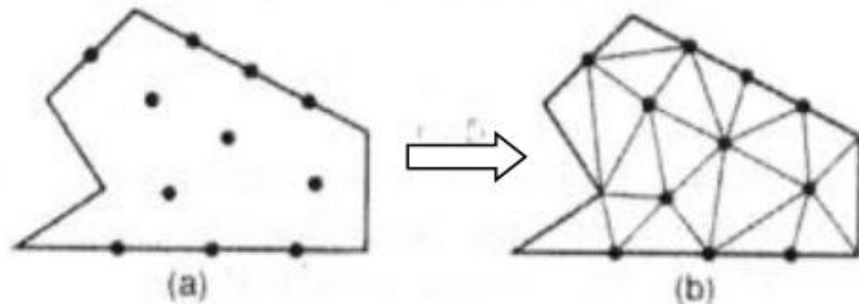
επεξεργαστής (post-processor). Τα περισσότερα πακέτα προσφέρουν ποικίλους τρόπους καταλογοποίησης, εκτίμησης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων, τα οποία τυπικά περιλαμβάνουν τάσεις, παραμορφώσεις, και παραμορφωμένο σχήμα της κατασκευής. Ο παραδοσιακός τρόπος είναι υπό μορφή ζωνών «ισοτασικών» επιφανειών κυρίως με χρήση χρωματικής κλίμακας. Στην περίπτωση δυναμικής ανάλυσης όλα τα πακέτα διαθέτουν animation, τόσο για την εποπτεία των ιδιόμορφων ταλάντωσης όσο και για την προσφερόμενη χρονική ολοκλήρωση που είναι το μοναδικό εργαλείο στην περίπτωση μη-γραμμικών αναλύσεων. Επίσης, πολλά συστήματα διαθέτουν τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε μορφή που μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω, σαν κείμενα, παρουσιάσεις, videos, e-mail, ή αποστολή στο διαδίκτυο.[10],[9]

### **3.4.2 ΑΥΤΟΜΑΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ**

Η γένεση πλέγματος συνεπάγεται τη δημιουργία κομβικών συντεταγμένων και στοιχείων. Περιλαμβάνει επίσης την αυτόματη αρίθμηση των κόμβων και στοιχείων βασισμένων στην ελάχιστη αλληλεπίδραση με τον χρήστη. Έτσι, υποτίθεται ότι οι μέθοδοι αυτόματης γένεσης πλέγματος απαιτούν μόνο το γεωμετρικό μοντέλο (γεωμετρία και τοπολογία) του προς διακριτοποίηση αντικειμένου, τα χαρακτηριστικά του πλέγματος όπως πυκνότητα πλέγματος και τύπος στοιχείου, και τις οριακές συνθήκες, περιλαμβάνοντας σαν είσοδο συνθήκες φόρτισης. Άλλες μέθοδοι που απαιτούν πρόσθετη είσοδο, όπως υποδιαίρεση του αντικειμένου σε υποχωρία ή υποπεριοχές, ταξινομούνται σαν ημιαυτόματες μέθοδοι. Εν συντομία, εισάγουμε τις μεθόδους γένεσης πλέγματος με βάση την ταξινόμηση που πρότεινε ο Ho-Le (1988). [11]

- **Μέθοδος Σύνδεσης Κόμβων (N.C.A.)**

Η μέθοδος σύνδεσης κόμβων (node connection approach) προκειμένου να παράγουν πλέγμα είναι πολύ δημοφιλής διότι είναι πολύ απλή στη σύλληψη της. Οι δύο κύριες φάσεις αυτής της προσέγγισης είναι (i) η γένεση κόμβων που δείχνονται στο Σχήμα 4.2 (a), και (ii) η γένεση στοιχείων στο Σχήμα 3.2 (b).

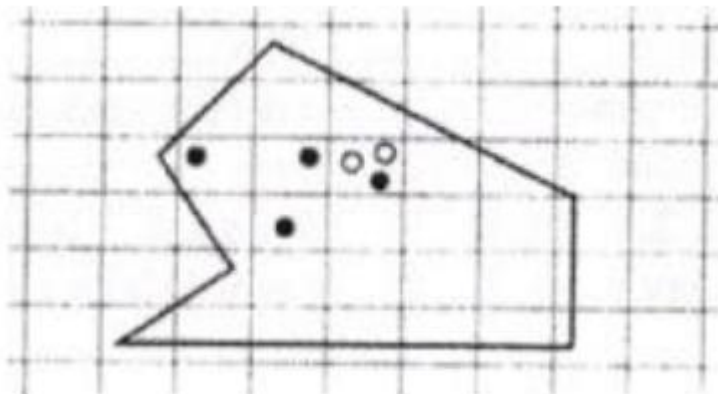


Σχήμα 3.2: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων

- ✓ **Γένεση κόμβων:** Δημοσιευμένα έργα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα.
  - **Μέθοδος του Cavendish (1974).** Σε αυτή τη μέθοδο, εισάγονται αρχικά κόμβοι στο σύνορο του αντικειμένου με το χέρι του χρήστη (manually). Κατόπιν οι εσωτερικοί κόμβοι γεννώνται αυτόματα έτσι ώστε να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις πυκνότητας πλέγματος. Το αντικείμενο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος ζωνών διαφορετικών επιθυμητών μεγεθών στοιχείων. Στη ζώνη  $i$ , υπερτίθεται ένα τετραγωνικό grid βήματος  $r(i)$ . Το Σχήμα 3.3 δείχνει ένα υπερτιθέμενο μονό grid, που βασίζεται στην παραδοχή ότι είναι επιθυμητή η ομοιόμορφη πυκνότητα πλέγματος. Για κάθε τετράγωνο του grid, γεννιέται με τρόπο τυχαίο ένας εσωτερικός κόμβος. Αυτό μπορεί να γίνει παράγοντας τυχαίους αριθμούς μεταξύ 0 και 1 δύο φορές, μια για την κατεύθυνση  $x$  και μια για την κατεύθυνση  $y$ , και υπολογίζοντας την ισοδύναμη θέση των τιμών  $x$  και  $y$ . Εάν ο παραγόμενος κόμβος πέφτει μέσα στο αντικείμενο και έχει απόσταση από

το σύνορο μεγαλύτερη από το  $r(i)$ , αλλά και από τους προηγούμενα παραγόμενους κόμβους, τότε γίνεται αποδεκτός. Εάν όχι, ένας άλλος κόμβος παράγεται τυχαία και ελέγχεται. Εάν δεν καταστεί δυνατόν να βρεθεί ένας αποδεκτός κόμβος μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών (ας πούμε, πέντε), τότε το εν λόγω τετράγωνο παραλείπεται και θεωρείται το επόμενο. Η μέθοδος αυτή είναι επεκτάσιμη και στις 3 διαστάσεις, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται τρισδιάστατο grid.[12]

- **Μέθοδος του Shimada (1995).** Αυτή η μέθοδος γεμίζει το εσωτερικό του προς διακριτοποίηση αντικειμένου με «φυσαλίδες» όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, και λαμβάνει τα κέντρα τους σαν κόμβους. Το μέγεθος κάθε φυσαλίδας προσδιορίζεται από την κατανομή θερμοκρασίας που αντιστοιχεί στην επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν οι θέσεις των φυσαλίδων προσδιορίζονται από την ικανοποίηση της ισορροπίας των εσωτερικών δυνάμεων μεταξύ αυτών.[13]



Σχήμα 3.3: Μέθοδος γένεσης κόμβων κατά Cavendish

- ✓ **Γένεση στοιχείων:** Σε αυτή τη δεύτερη φάση, κόμβοι που γεννήθηκαν στην προηγούμενη φάση συνδέονται για να αποτελέσουν στοιχεία έτσι ώστε να μην επικαλύπτονται και να καλύπτεται ολόκληρο το χωρίο. Αναφερόμαστε στη μέθοδο του Lee διότι αυτή μπορεί να οδηγήσει σε τετραπλευρικά στοιχεία. Ωστόσο, η μέθοδος τριγωνοποίησης του Delaunay είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος σύνδεσης κόμβων. Στις επεξηγήσεις που ακολουθούν, θεωρούμε στοιχεία που έχουν κόμβους μόνο στις κορυφές τους. Εάν επιθυμούμε στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους, τότε αυτοί προκύπτουν εύκολα από τους γωνιακούς.[14],[15]

- **Μέθοδος Lee (1983)**. Σε αυτή τη μέθοδο, επί του αντικειμένου υπερτίθεται ένα τετραγωνικό πλέγμα υποβάθρου (grid) του οποίου το βήμα είναι ίσο προς το επιθυμητό μέγεθος στοιχείων. Κατόπιν οι κόμβοι που παρήχθησαν στην προηγούμενη φάση συσχετίζονται με τα κελιά του πλέγματος υποβάθρου. Τα κελιά και οι αντίστοιχοι κόμβοι επισκέπτονται στήλη-προς-στήλη από αριστερά προς τα δεξιά και, μέσα στην ίδια στήλη, από τα κάτω προς τα πάνω. Μέσα σε ένα κελί, οι κόμβοι διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τετμημένης  $x$ . Κόμβοι με την ίδια τετμημένη  $x$ , διατάσσονται κατά σειρά αύξουσας τεταγμένης  $y$ . Οι κόμβοι επισκέπτονται κατά σειρά και, για κάθε κόμβο, οι γειτονικοί κόμβοι βρίσκονται έτσι ώστε να διαμορφώνουν τους κόμβους ενός καλοσχηματισμένου τετραπλεύρου. Στην περίπτωση αδυναμίας σχηματισμού καλώς ορισμένου τετραπλεύρου, δημιουργείται αντίστοιχο τριγωνικό στοιχείο.
- **Μέθοδος τριγωνοποίησης Delaunay**. Αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος γένεσης τριγώνων που συνδέει δεδομένους κόμβους διότι μεγιστοποιεί το άθροισμα των μικρότερων γωνιών σε όλα τα τρίγωνα που δημιουργούνται. Έτσι, αποφεύγονται τα λεπτά τρίγωνα.

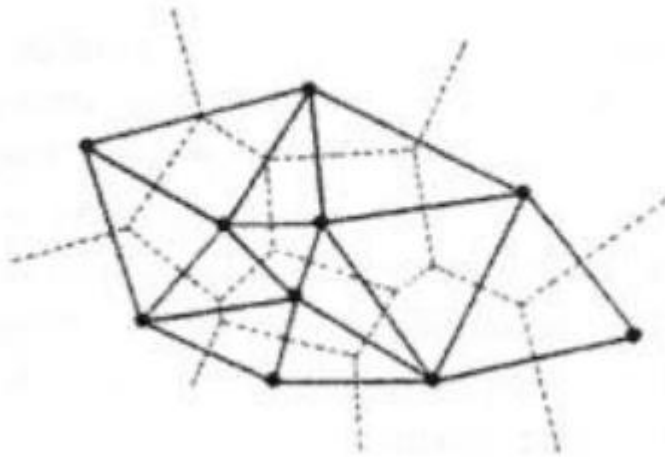
Μια τυπική τριγωνοποίηση Delaunay ξεκινάει από ένα διάγραμμα Voronoi ή Dirichlet tessellation. Ένα διάγραμμα Voronoi ενός συνόλου  $N$  σημείων,  $P_i (i=1,2,\dots,N)$ , αποτελείται από  $N$  πολύγωνα (πολύεδρα στις 3 διαστάσεις),  $V_i$  καθένα των οποίων έχει κέντρο το σημείο  $P_i$  έτσι ώστε ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του επιπέδου (του χώρου στις 3 διαστάσεις) που είναι πλησιέστερα στον κόμβο  $i$ , να περιλαμβάνονται στον  $V_i$ . Μαθηματικά, το  $V_i$  (επιφάνεια ή όγκος) εκφράζεται ως:

$$V_i = \{x: |x - P_i| < |x - P_j| \text{ για όλα τα } j \neq i\}$$

όπου  $|\dots|$  συμβολίζει το μέτρο του διανύσματος εντός του και κάθε  $V_i$  είναι ένα κυρτό πολύγωνο (πολύεδρο) που περιβάλλεται από γραμμές (επίπεδα) τέμνοντα κάθετα τις γραμμές μεταξύ  $P_i$  και των γειτονικών του κόμβων. Αυτή η διαίρεση του (δισδιάστατου ή τρισδιάστατου) χώρου από ένα σύνολο  $V_i$  καλείται Dirichlet tessellation. Κάθε πολύγωνο (πολύεδρο)



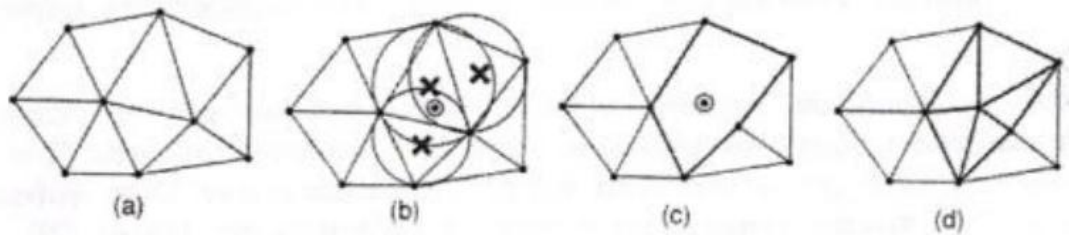
Voronoi έχει έναν κόμβο που συνδέεται με αυτό. Μετά τη γένεση του διαγράμματος Voronoi, μπορούμε να δημιουργήσουμε τριγωνικά (τετραεδρικά, στις 3 διαστάσεις) στοιχεία συνδέοντας τα σημεία που σχετίζονται με γειτονικά πολύγωνα (πολύεδρα) Voronoi. Το Σχήμα 3.4 δείχνει το διάγραμμα Voronoi και την αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay για 10 κόμβους στη δισδιάστατη περίπτωση.[16]



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα Voronoi και η αντιστοιχούσα τριγωνοποίηση Delaunay

Η τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να γεννηθεί απευθείας από το δεδομένο σύνολο σημείων (κόμβων) χωρίς να είναι απαραίτητη πρώτα να έχει γίνει το διάγραμμα Voronoi, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Watson για τη δισδιάστατη τριγωνοποίηση. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, ένα τρίγωνο διαμορφώνεται από τρία μη-συνευθειακά σημεία όταν ένας κύκλος που περνάει από αυτά, και ονομάζεται περιγεγραμμένος του τριγώνου, δεν περιλαμβάνει καθόλου άλλα σημεία. Ο αλγόριθμος υλοποιείται ως ακολούθως. Στην αρχή διαμορφώνεται ένα τρίγωνο  $T_0$ , που περιέχει όλους τους κόμβους· μπορεί να πρέπει να εισαχθούν επιπλέον σημεία στις κορυφές του  $T_0$ . Τότε εισάγουμε κόμβους από ένα δεδομένο σύνολο, έναν προς ένα, και βρίσκουμε τα τρίγωνα έκαστο των οποίων ο περιγεγραμμένος

κύκλος περικλείει τον κόμβο. Αυτά τα πολύγωνα, που ονομάζονται τεμνόμενα πολύγωνα (intersection polygons), απαλείφονται. Στο Σχήμα 3.5 (b), τα τεμνόμενα πολυώνυμα συμβολίζονται με  $\times$  όταν ένας νέος κόμβος  $\odot$  εισάγεται στα υπάρχοντα τρίγωνα, όπως στο Σχήμα 3.5 (a), που γεννώνται από τους ήδη εισαχθέντες κόμβους. Το Σχήμα 3.5 (c) δείχνει το αποτέλεσμα μετά την απαλοιφή των τεμνόμενων αυτών πολυγώνων. Κατόπιν, νέα τρίγωνα διαμορφώνονται συνδέοντας τον νέο κόμβο με τις κορυφές των τεμνόμενων επιπέδων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5 (d). Τελικά, τα τρίγωνα που είναι συνδεδεμένα με τα επιπλέον σημεία που διαμορφώνουν το  $T_0$ , απαλείφονται. Αυτή η διαδικασία μπορεί εύκολα να επεκταθεί για τρισδιάστατη γένεση πλεγμάτων στοιχείων χρησιμοποιώντας περιγεγραμμένες σφαίρες από 4 κόμβους αντί περιγεγραμμένους κύκλους από 3 κόμβους. Ωστόσο, η τρισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay μπορεί να περιέχει πολύ λεπτά τετράεδρα, ενώ η δισδιάστατη τριγωνοποίηση Delaunay είναι, με κάποια έννοια, η βέλτιστη τριγωνοποίηση για ένα δεδομένο σύνολο σημείων.[14],[15],[17]

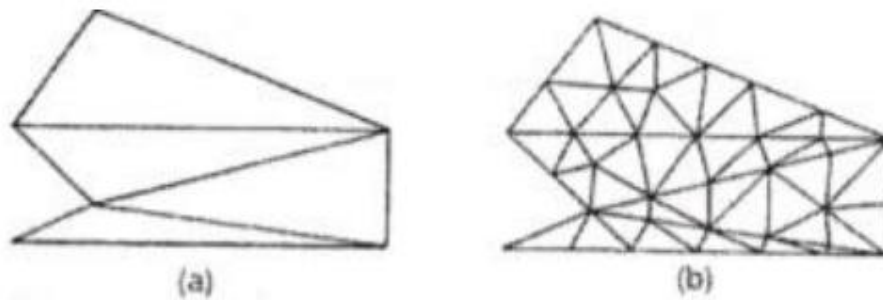


Σχήμα 3.5: Αλγόριθμος τριγωνοποίησης του Watson

- **Μέθοδος Αποσύζευξης Τοπολογίας (T.D.A.)**

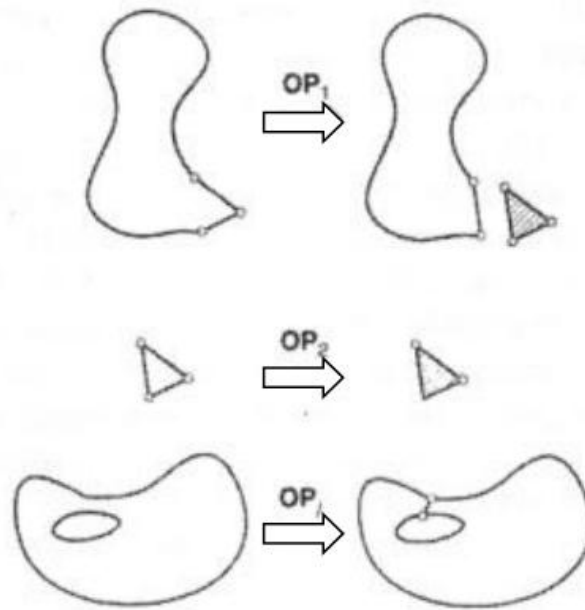
Η δισδιάστατη μέθοδος αποσύζευξης τοπολογίας (topology decomposition approach) αναπτύχθηκε από τον Wordenweber (1984). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύγωνο και το τελευταίο κατακερματίζεται σε ένα σύνολο μεγάλων στοιχείων συνδέοντας τις κορυφές προς διαμόρφωση τριγώνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 (a). Κατόπιν, αυτά

τα μεγάλα στοιχεία εκλεπτόνονται ώστε να ικανοποιήσουν την απαιτούμενη πυκνότητα κατανομής πλέγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 (b). Το μέγεθος των στοιχείων και το σχήμα τους δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν εξωτερικά διότι τα μεγάλα στοιχεία προσδιορίζονται μόνο τους από την αρχική τοπολογία του αντικειμένου, ιδιαίτερα από την κατανομή των κορυφών. Οι κορυφές που ανήκουν στο ίδιο μεγάλο στοιχείο μπορούν να προσδιορισθούν από τη μέθοδο τριγωνοποίησης Delaunay που περιγράφηκε σε παραπάνω ενότητα.



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα μεθόδου τοπολογικής αποσύζευξης

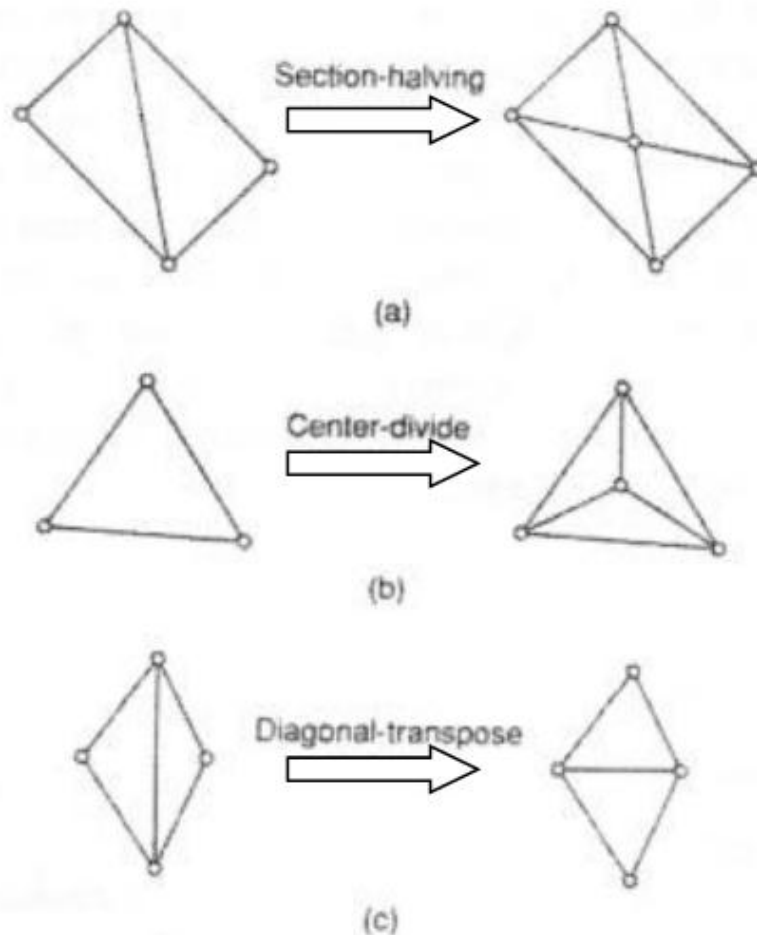
Κατά τη διαδικασία γένεσης ενός συνόλου τριγώνων από τις κορυφές, ο Wordenweber εισήγαγε και εφάρμοσε επίσης τους λεγόμενους τελεστές Euler με τον τρόπο που αυτοί χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση όγκων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7, πρώτος εφαρμόζεται ο τελεστής Wordenweber (1984)  $OP_j$  για να απαλείψει τις τρύπες στο αντικείμενο. Κατόπιν διαμορφώνονται τα τρίγωνα από τις κορυφές και αποχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας επαναληπτικά τον τελεστή  $OP_1$  μέχρις ότου απομείνουν μόνον 3 κορυφές. Τελικά, εφαρμόζεται ο τελεστής  $OP_2$  για να διαμορφώσει το τελευταίο τρίγωνο.



Σχήμα 3.7: Τελεστές που χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν τρίγωνα

Μόλις το αντικείμενο μετατραπεί σε ένα σύνολο μεγάλων τριγώνων, κάθε τρίγωνο εκλεπτύνεται έτσι ώστε να υπακούει στην απαιτούμενη πυκνότητα πλέγματος. Για την εκλέπτυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες τρεις μέθοδοι που δείχνονται στο Σχήμα 3.8. Το Σχήμα 3.8 (a) δείχνει μια μέθοδο που εφαρμόζεται όταν δύο λεπτά τρίγωνα συναντώνται κατά μήκος της μακρύτερης πλευράς τους. Δηλαδή, προστίθεται ένας κόμβος στην κοινή ακμή, και τα γειτονικά στοιχεία υποδιαιρούνται συνδέοντας τους κόμβους τους με τον νέο κόμβο. Σχήμα 3.8 (b), ένα μεγάλο τριγωνικό στοιχείο υποδιαιρείται προσθέτοντας ένα νέο κόμβο στο κέντρο βάρους του. Όταν το υποδιαιρέσουμε με τους τρόπους που περιγράψαμε παραπάνω, μπορεί να συναντήσουμε λεπτά τρίγωνα όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.8 (c). Αυτά τα τρίγωνα είναι ήδη αρκετά μικρά για τη δοθείσα πυκνότητα πλέγματος.

Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα του πλέγματος στρίβοντας τη διαγώνιο του τετραπλεύρου που διαμορφώνεται από τις κορυφές των δύο αρχικών τριγώνων. Παρατηρείστε ότι το αποτέλεσμα της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να μην είναι αρκετά ακριβές εάν υπάρχουν πάρα πολλά λεπτά στοιχεία. [18]



Σχήμα 3.8: Μέθοδοι εκλέπτυνσης τριγώνων

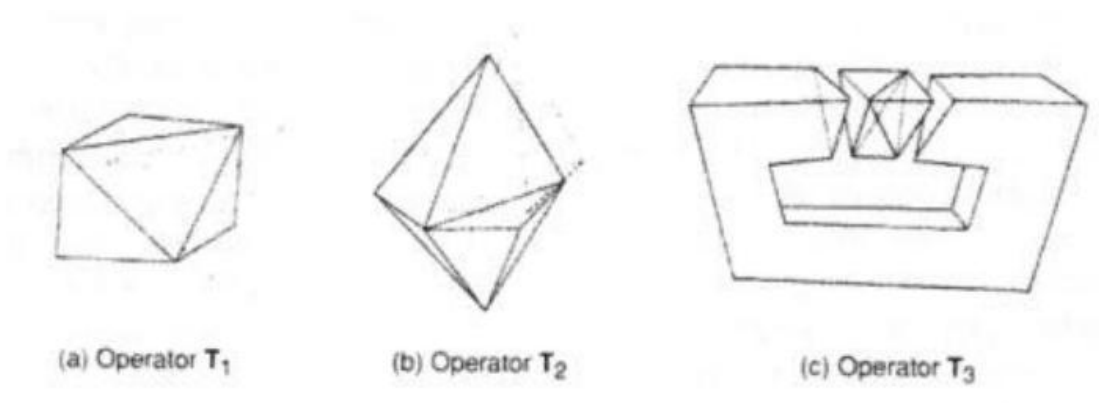
Η μέθοδος της τοπολογικής αποσύζευξης μπορεί να επεκταθεί στην τρισδιάστατη γένεση πλέγματος. Το αντικείμενο προσεγγίζεται από ένα πολύεδρο, και το πολύεδρο κατατέμνεται σε τετραεδρικά στοιχεία συνδέοντας τις κορυφές τους. Κατόπιν, τα τετραεδρικά στοιχεία εκλεπτύνονται με υποδιαίρεση. Οι Woo και Thomasma (1984) πρότειναν τελεστές παραπλήσιους με αυτούς που

πρότεινε ο Wordenweber για να διευκολύνει τον σχηματισμό των τετραεδρικών στοιχείων. Αυτοί οι τελεστές, που δείχνονται στο Σχήμα 3.9, χρησιμοποιούνται για τον σχηματισμό τετραέδρων ως εξής:

Πρώτα, εφαρμόζεται ο τελεστής  $T_3$  για να απαλείψει τις οπές του αντικειμένου αποτέμοντας το κατάλληλο τμήμα του έτσι ώστε η οπή να αποκαλυφθεί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9 (c). Σημειώστε ότι σε αυτό το στάδιο τρία τετράεδρα διαμορφώνονται σαν αποτέλεσμα παράπλευρης διαδικασίας.

Κατόπιν, οι κυρτές κορυφές στις οποίες όπου συναντώνται τρεις ακμές, που καλούνται convex trivalent vertices (κορυφές), διαχωρίζονται από το αντικείμενο εφαρμόζοντας τον τελεστή  $T_1$ , όπως εικονίζεται στο Σχήμα 3.9 (a). Αυτός ο τελεστής εφαρμόζεται επαναληπτικά μέχρις ότου δεν υπάρξει καμία κυρτή trivalent κορυφή. Εάν όλες οι κορυφές που απομένουν δεν είναι convex trivalent, τότε ο τελεστής  $T_2$  εφαρμόζεται για να σκάψει ένα τετράεδρο, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 3.9 (b). Αυτός ο τελεστής παρέχει τις νέες convex trivalent κορυφές και έτσι ο  $T_1$  εφαρμόζεται ξανά.[18]

Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου το αντικείμενο περιορισθεί σε ένα μόνο τετράεδρο.

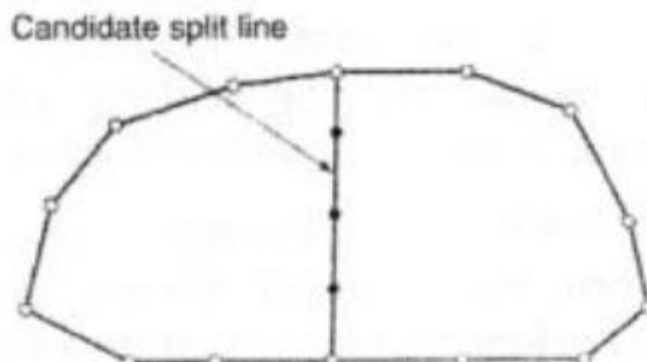


Σχήμα 3.9: Τελεστές αποσύζευξης γεωμετρίας στις 3 διαστάσεις

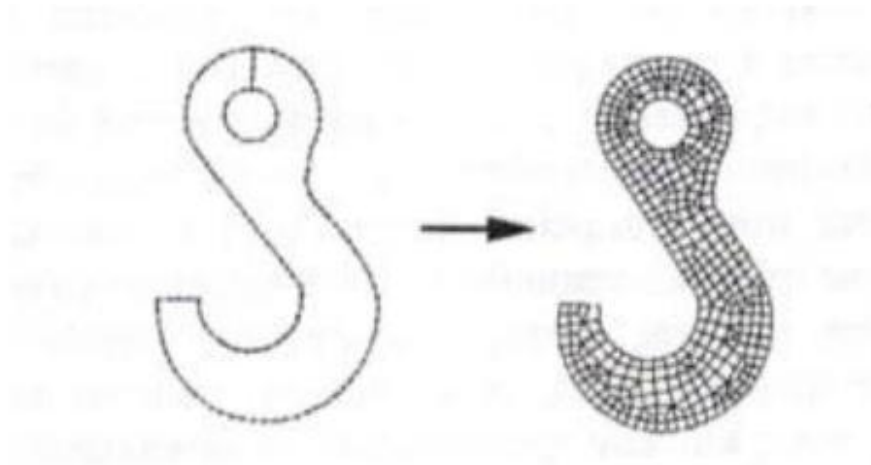
- **Μέθοδος Αποσύζευξης Γεωμετρίας (G.D.A.)**

Οι μέθοδοι αποσύζευξης γεωμετρίας (geometry decomposition approaches) εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που βασίζονται σε αναδρομές και αυτές που βασίζονται σε επαναλήψεις. Στη συνέχεια επεξηγούμε μόνο τη μέθοδο αναδρομής καθώςον αυτή είναι επεκτάσιμη στις τρεις διαστάσεις.

Η μέθοδος αναδρομικής αποσύζευξης (recursive geometry decomposition method) γεννά τριγωνικά και τετρακομβικά στοιχεία στις 2 διαστάσεις με τον ακόλουθο τρόπο. Πρώτα, το αρχικό αντικείμενο διαιρείται σε κυρτά μέρη είτε με το χέρι ή αυτόματα. Αυτόματη αποσύζευξη αντικειμένου σε κυρτά τμήματα περιγράφεται από τον Bykat (1976). Για κάθε κυρτό τμήμα, εισάγονται κόμβοι στο σύνορο του έτσι ώστε να ικανοποιήσει την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος. Κατόπιν, κάθε κυρτό τμήμα υποδιαιρείται προσεγγιστικά στο μέσον του «μακρύτερου άξονα», όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Στη συνέχεια, εισάγονται περισσότεροι κόμβοι κατά μήκος της διαχωριστικής γραμμής σύμφωνα με τις απαιτήσεις της πυκνότητας πλέγματος, και τα δύο ήμισυ υποδιαιρούνται επαναληπτικά μέχρις ότου γίνουν τρίγωνα ή τετράπλευρα. Μερικές μέθοδοι επαναλαμβάνουν την υποδιαίρεση μέχρις ότου μέχρις ότου καταλήξει σε εξάγωνα ή οκτάγωνα και παράγουν τριγωνικά και τετραπλευρικά στοιχεία από αυτά σύμφωνα με προ-αποθηκευμένα πρότυπα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να πάρουμε περισσότερα τριγωνικά ή τετραπλευρικά στοιχεία. Το Σχήμα 3.11 δείχνει ένα παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου.



Σχήμα 3.10: Υποδιαίρεση με διαχωριστική γραμμή (split line)



Σχήμα 3.11: Παράδειγμα γένεσης πλέγματος με χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου

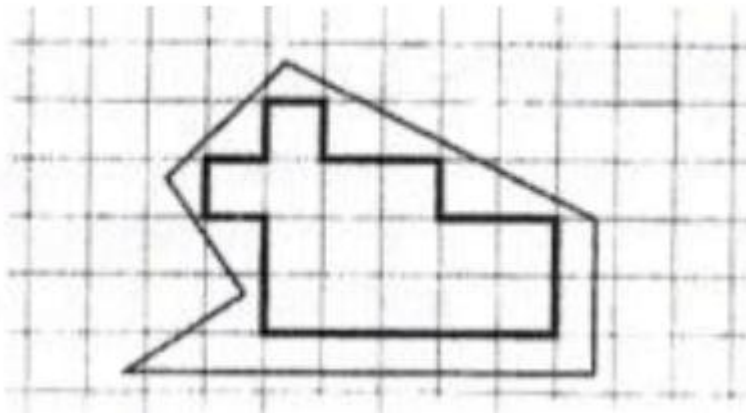
Η βασική μέθοδος που περιγράφηκε παραπάνω μπορεί να επεκταθεί και στη γένεση τρισδιάστατου πλέγματος. Σε αυτή την περίπτωση το αντικείμενο υποδιαιρείται σε δύο υπο-όγκους μέσω ενός διαχωριστικού επιπέδου, μέχρις ότου όλοι οι όγκοι περιορισθούν σε τετράεδρα. Σε αντίθεση με τη δισδιάστατη περίπτωση όπου μπορούν να παραχθούν τετράπλευρα, δεν είναι δυνατόν να γεννηθούν τετράεδρα με απευθείας τρόπο. Ωστόσο, κάθε τετράεδρο μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 4 εξάεδρα, ή στοιχεία brick, εάν είναι επιθυμητό. [19]

- **Μέθοδος Βάσει Πλέγματος (G.B.A.)**

Η μέθοδος βάσει πλέγματος (grid-based approach) προκύπτει από την παρατήρηση ότι ένα grid μοιάζει με ένα πλέγμα και ότι αυτό μπορεί να μετασχηματισθεί στο τελευταίο υπό την προϋπόθεση ότι τα κελιά του grid κατά μήκος του συνόρου του αντικειμένου μπορούν να μετασχηματιστούν σε στοιχεία.



Η μέθοδος των Thacker, Gonzalez και Putland (1980) είναι ίσως η πρώτη σχετική δημοσίευση που έκανε χρήση της μεθόδου βάσει grid. Σε αυτή τη μέθοδο ένα αντικείμενο αρχικά επικαλύπτεται από ένα τριγωνικό grid και τα σημεία του grid που πέφτουν εκτός αντικειμένου εξαλείφονται, αφήνοντας ένα σύνορο μορφής zigzag. Το σημεία του grid που βρίσκονται πάνω στο zigzag σύνορο μετακινούνται προς το σύνορο του αντικειμένου ώστε να αποτελέσουν το τελικό πλέγμα. Οι διαφοροποιήσεις αυτής έγκειται στον τρόπο διαχείρισης του συνόρου. [20] Ο Kikuchi (1986) επέκτεινε τη μέθοδο έτσι ώστε εκτός από κυρίως τετράπλευρα να περιλαμβάνει ακόμη και μερικά τρίγωνα, χρησιμοποιώντας ορθογωνικό grid, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Ένα πρόβλημα και των δύο αυτών μεθόδων είναι ότι μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, με πολύ μικρές ακμές σε σχέση με το βήμα του grid, χάνονται. Σε άλλες μεθόδους τα σημεία του zigzag συνόρου δεν μετακινούνται στο σύνορο του αντικειμένου. Αντ' αυτού, δημιουργούνται τριγωνικά στοιχεία στην περιοχή μεταξύ zigzag και συνόρου αντικειμένου μέσω ενός αλγορίθμου τριγωνοποίησης.[21]



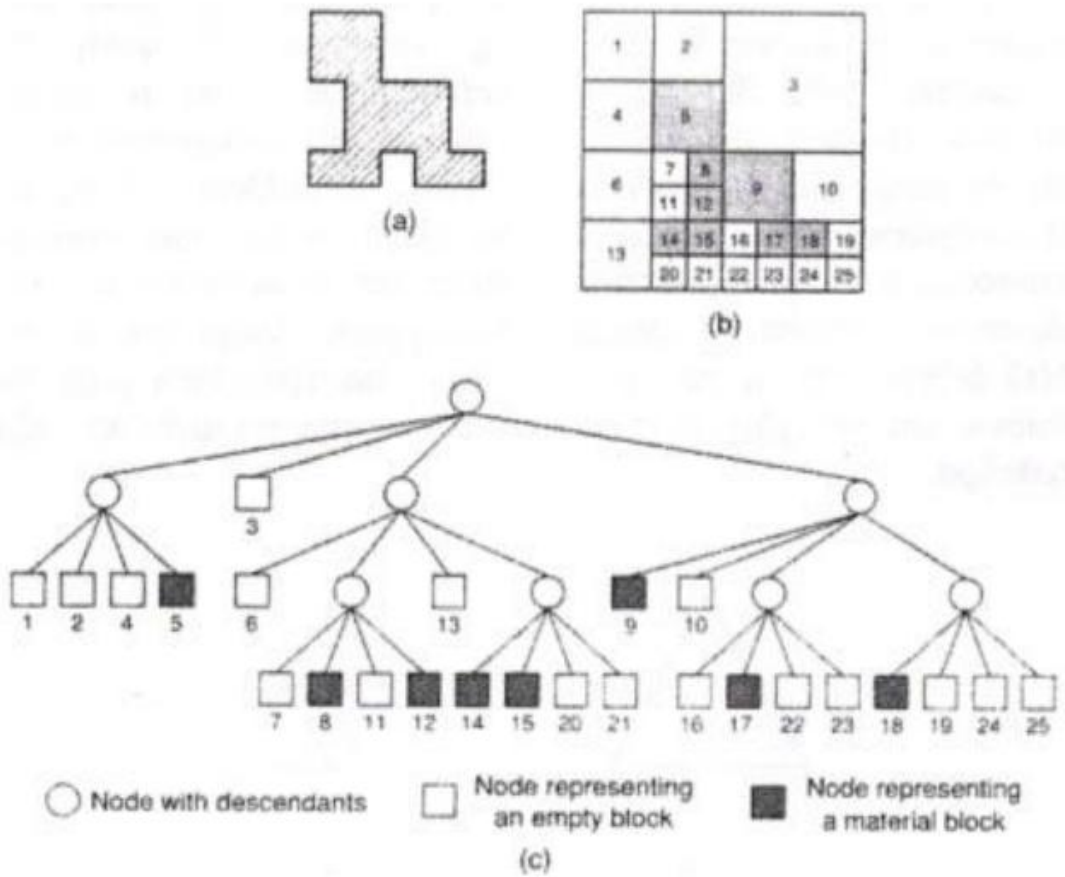
Σχήμα 3.12: Χρήση ορθογωνικού grid για τη μέθοδο “grid-based”

Οι Yerry και Shephard (1984) χρησιμοποίησαν μια δενδριτική (quadree) αναπαράσταση του αντικειμένου για τη γένεση πλεγμάτων. Ένα quadree είναι το δισδιάστατο ανάλογο του octree. Παριστά ένα δισδιάστατο αντικείμενο, σαν αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 3.13 (a), σαν ένα σύνολο τετραγώνων έκαστο διαφορετικού μεγέθους με επαναληπτική υποδιαίρεση της root square που

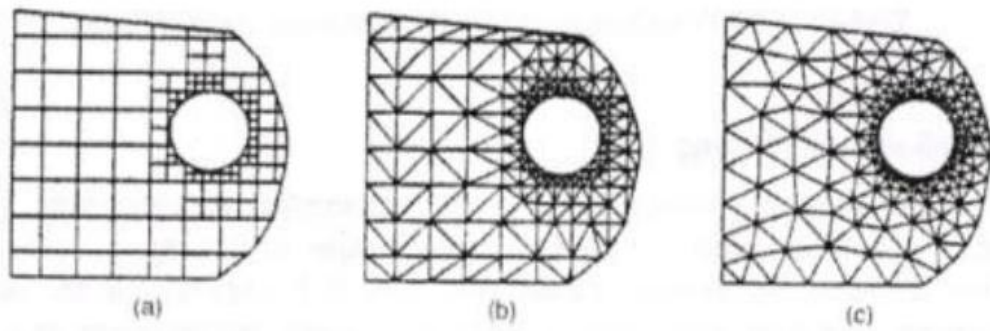
περικλείει το αντικείμενο. Το Σχήμα 3.13 (b) δείχνει τη διαδικασία υποδιαίρεσης του αντικειμένου, και το Σχήμα 3.13 (c) δείχνει την αναπαράσταση quadtree αυτής της υποδιαίρεσης. Τα πλέγματα γεννώνται ως εξής:

Βήμα 1: Δημιουργείται ένα root square που περικλείει το αντικείμενο και υποδιαιρείται σε τέσσερα τέταρτα (quadrants) υποδιπλασιάζοντας τις πλευρές του. Κατόπιν κάθε τέταρτο ταξινομείται ανάλογα με τη σχετική θέση του ως προς το αντικείμενο. Εάν το τέταρτο δεν είναι ούτε πλήρως εντός αλλά ούτε και πλήρως εκτός του αντικειμένου, τότε αυτό διαιρείται ξανά. Αυτή η διαδικασία υποδιαίρεσης επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ικανοποιηθεί η κατανομή πυκνότητας πλέγματος και τα τέταρτα βρεθούν είτε πλήρως εντός ("completely inside") αντικειμένου ή επικαλύπτονται ("overlapping"). Έτσι, το αντικείμενο που θα παριστάνεται από τη συλλογή των πλήρως εντός και των τροποποιημένων επικαλυπτόμενων τετάρτων θα φαίνεται όπως στο Σχήμα 3.14 (a).

Βήμα 2: Κάθε τροποποιημένο επικαλυπτόμενο τέταρτο διαιρείται μέσα στα τριγωνικά στοιχεία χρησιμοποιώντας το αποθηκευμένο πρότυπο (prestored template) που βασίζεται στο σχήμα του τετάρτου. Κατόπιν, το «εντελώς εντός» τέταρτο επίσης υποδιαιρείται ώστε να ικανοποιήσει την προσαρμογή του πλέγματος με τα γειτονικά πλέγματα. Δυο γειτονικά στοιχεία ονομάζονται συμβατά (conforming) εάν μοιράζονται μια πλήρη ακμή (μια ολόκληρη έδρα σε 3-D στοιχεία). Το Σχήμα 3.14 (b) δείχνει το αποτέλεσμα της γένεσης πλέγματος.



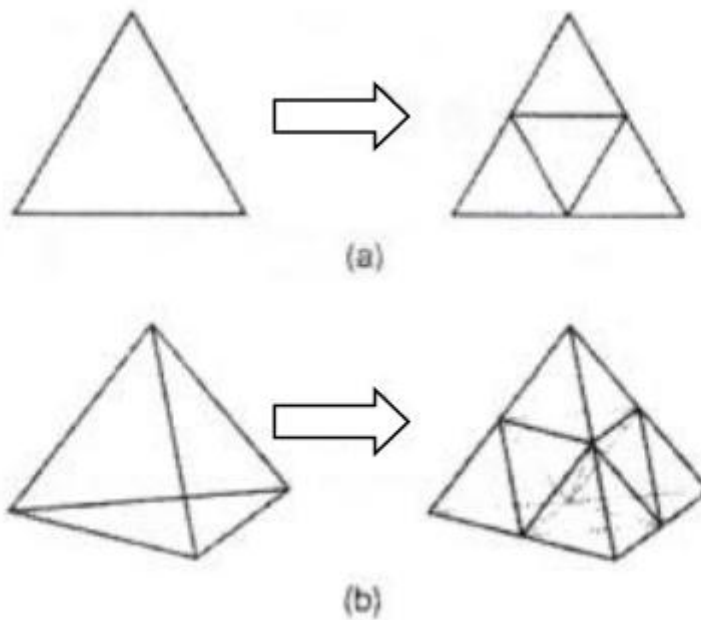
Σχήμα 3.13: Μέθοδος σύνδεσης κόμβων



Σχήμα 3.14: Γένεση πλέγματος με χρήση παράστασης quadtree

Βήμα 3: Οι κόμβοι των στοιχείων μετακινούνται ελαφρώς (adjustment) έτσι ώστε να βελτιώσουν τα σχήματα των πλεγμάτων. Το Σχήμα 3.14 (c) δείχνει το αποτέλεσμα της εξομάλυνσης του πλέγματος. Η μέθοδος εξομάλυνσης αναφέρεται αργότερα. Αυτή η μέθοδος έχει επεκταθεί και στις 3 διαστάσεις χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση octree. Στις τρεις διαστάσεις, τα «επικαλυπτόμενα» όγδοα (octants) τροποποιούνται έτσι ώστε να καταλαμβάνουν μόνον τον εσωτερικό χώρο του αντικειμένου και κατόπιν διασπάζεται σε τετράεδρα όπως τα τροποποιημένα επικαλυπτόμενα τέταρτα διασπώνται σε τρίγωνα στις δύο διαστάσεις. Το τροποποιημένο επικαλυπτόμενο όγδοο πρέπει να διασπασθεί σε τετράεδρα που ικανοποιούν την συμβιβαστικότητα του πλέγματος με τα γειτονικά όγδοα. Θεωρώντας όλες τις ειδικές περιπτώσεις, αυτό απαιτεί ένα περίπλοκο αλγόριθμο. Πράγματι, ούτε και η διάσπαση του τροποποιημένου τετάρτου στις δύο διαστάσεις είναι εύκολο πρόβλημα. [22]

Οι Jung και Lee (1996) πρότειναν μια νέα μέθοδο, αρχίζοντας από τη τριγωνική ρίζα (τετράεδρη ρίζα στις 3 διαστάσεις) αντί της τετραγωνικής ρίζας (κυβικής ρίζας) για να αποφύγουν τη δυσκολία που μόλις αναφέραμε. Σε αυτή τη μέθοδο, η παράσταση quadree ενός δισδιάστατου αντικειμένου είναι η προσέγγιση του αντικειμένου σαν σύνολο τριγώνων. Παρόμοια, η αναπαράσταση octree ενός τρισδιάστατου αντικειμένου θα ήταν ένα σύνολο τετραέδρων. Έτσι μπορούμε να λάβουμε τα πλέγματα συλλέγοντας τα «εντελώς εντός» και «επικαλυπτόμενα» τρίγωνα (τετράεδρα στις τρεις διαστάσεις) μετά από μετακίνηση των κορυφών των «επικαλυπτόμενων» τριγώνων (τετράεδρα) στο αρχικό σύνορο του αντικειμένου. Το Σχήμα 3.15 (a) δείχνει τον τρόπο με τον οποίο μια τριγωνική ρίζα διασπάζεται σε τέσσερα τρίγωνα, και το Σχήμα 3.15 (b) δείχνει πως μια τετραεδρική ρίζα διασπάζεται σε οκτώ τετράεδρα. [23]



Σχήμα 3.15: Υποδιαίρεση του τριγώνου και τετραέδρου

- **Μέθοδος Απεικόνισης**

Η μέθοδος απεικόνισης χρησιμοποιείται στις περισσότερες εμπορικές γεννήτριες πλέγματος. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την υποδιαίρεση του προς διακριτοποίηση αντικειμένου σε περιοχές ειδικής τοπολογίας. Στις 2 διαστάσεις, αυτές οι περιοχές έχουν τέσσερις πλευρές· στις τρεις διαστάσεις, αυτές οι περιοχές είναι μορφής «κουτιού» (boxlike). Μέσα σε κάθε περιοχή, το πλέγμα παράγεται αυτόματα με απεικόνιση της περιοχής προς ένα κανονικοποιημένο χωρίο αναφοράς (ένα κανονικό τρίγωνο ή τετράπλευρο στις δύο διαστάσεις και ένα κύβο στις τρεις διαστάσεις), δημιουργώντας διακριτοποίηση στο κανονικοποιημένο χωρίο με βάση την επιθυμητή πυκνότητα πλέγματος, και επαναπεικόνιση του διακριτοποιημένου χωρίου προς την αρχική περιοχή του πραγματικού αντικειμένου. Κατόπιν, το τελικό πλέγμα προκύπτει από συνένωση των περιοχών που διακριτοποιήθηκαν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι κοινές πλευρές που μοιράζονται σε γειτονικές περιοχές πρέπει να έχουν τον ίδιο αριθμό κόμβων έτσι ώστε να ικανοποιούν το συμβιβαστό του πλέγματος (mesh conformity). Η απαίτηση αυτή μπορεί να επιβληθεί με επέμβαση του χρήστη ή

αλγοριθμικά την ώρα που παράγονται τα πλέγματα γειτονικών περιοχών. Πολλές μέθοδοι απεικόνισης μπορούν να εφαρμοσθούν.

- **Βελτίωση Ποιότητας Πλέγματος**

Μερικές μέθοδοι γένεσης πλέγματος, κυρίως εκείνες που βασίζονται στην προσέγγιση κατακερματισμού της τοπολογίας, δεν παράγουν αρχικό πλέγμα επαρκές για την περαιτέρω ανάλυση. Έτσι, πρέπει να ακολουθήσουμε μια πορεία τριών βημάτων ώστε να το βελτιώσουμε: [24]

- Εάν τα στοιχεία που παράγονται δεν είναι του επιθυμητού τύπου, τότε τα υποδιαιρούμε στον επιθυμητό τύπο.
- Εάν τα στοιχεία δεν έχουν μεγέθη συμβατά με την επιθυμητή κατανομή πυκνότητας πλέγματος, τότε τα εκλεπτύνουμε.
- Εάν τα στοιχεία δεν είναι καλοσχηματισμένα, τότε εφαρμόζουμε μια τεχνική εξομάλυνσης (smoothing technique).

### **3.4.3 ΕΙΔΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Οι δυνατότητες των πακέτων πεπερασμένων στοιχείων είναι πολλές. Εκτός από τις τετριμμένες ελαστικές αναλύσεις, σε πολλά από αυτά τα πακέτα υπάρχουν δυνατότητες επίλυσης ποικίλων άλλων προβλημάτων σε μεγάλο τμήμα των εξισώσεων που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα: θερμικά, ακουστικά, ηλεκτρικά, μαγνητικά (δινορεύματα: eddy-current), ηλεκτρομαγνητικά, υδροδυναμικά, ρευστομηχανικά, περιγραφής διάβρωσης υλικών, κλπ. Το σύνολο αυτό των δυνατοτήτων συνήθως αποδίδεται με τον όρο “Multi-Physics”, δηλαδή επίλυση των ποικίλων εξισώσεων της Φυσικής.

- **Καθορισμός του Είδους Ανάλυσης**

Παρόλο που δεν είναι δυνατόν να κωδικοποιήσουμε τον τρόπο ανάλυσης, στη συνέχεια θα δώσουμε κάποιες γενικές κατευθύνσεις.

Η πλέον αρχική επιλογή είναι ο καθορισμός του φυσικού φαινομένου, το οποίο καλείται ο μελετητής να προσομοιώσει. Για παράδειγμα, ελαστική ανάλυση (elastic analysis) ή πρόβλημα δυναμικού (potential problem). Τα προβλήματα δυναμικού αφορούν την επίλυση των εξισώσεων Laplace και Poisson που διέπουν τη μηχανική ατρίβους ρευστού, μετάδοση θερμότητας, κοκ.

Μια δεύτερη επιλογή που καλείται να κάνει ο μελετητής είναι ο καθορισμός του προβλήματος σαν:

Στατικό πρόβλημα (static analysis), δηλαδή μη-εξαρτημένο από το χρόνο, ή Δυναμικό πρόβλημα (dynamic analysis), δηλαδή χρονικά εξαρτώμενο.

Παραδείγματα είναι η ταλάντωση μιας μηχανής, ο ερπυσμός και η χαλάρωση, η διάδοση ήχου στον αέρα ή σε άλλο μέσον, κλπ. Μια άλλη κατάταξη αφορά στο εάν το πρόβλημα είναι γραμμικό (linear) ή μη-γραμμικό (nonlinear)

Γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο εάν διπλασιασθεί το μέγεθος των εξωτερικών δράσεων (π.χ. δυνάμεων) τότε διπλασιάζεται το μέγεθος του αποτελέσματος (π.χ. μετατοπίσεων). Τα περισσότερα προβλήματα της πράξης είναι (ή μάλλον θεωρούνται) γραμμικά.

Μη γραμμικό λέγεται ένα πρόβλημα στο οποίο δεν ισχύει η αναλογία που αναφέρθηκε προηγουμένα. Σε «ελαστικά» προβλήματα η μη-γραμμικότητα μπορεί να οφείλεται στο ελαστοπλαστικό υλικό (material nonlinearity) ή στην μεταβαλλόμενη επαφή μεταξύ δύο ή περισσότερων σωμάτων (geometrical nonlinearity). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, το μητρώο δυσκαμψίας δεν είναι σταθερό αλλά είναι συνάρτηση των μετατοπίσεων. Μη-γραμμικότητες υπάρχουν και σε προβλήματα δυναμικού, π.χ. όταν ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας.[9]

- **Στάδια Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων**

Για τη μοντελοποίηση μιας κατασκευής με πεπερασμένα στοιχεία διακρίνουμε τα ακόλουθα στάδια:

1<sup>ο</sup> Στάδιο → Κατασκευή της γεωμετρίας.

2<sup>ο</sup> Στάδιο → Επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων και διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία.

3<sup>ο</sup> Στάδιο → Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών (μπορεί να γίνει και σε προηγούμενο στάδιο) και επιβολή των οριακών συνθηκών.

4<sup>ο</sup> Στάδιο → Επιλογή του τρόπου επίλυσης (γραμμικό – μη γραμμικό μεταβατικό – υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων κ.α.) και επίλυση.



## 4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΖΑΝΤΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SOLIDWORKS

### 4.1 ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ 3D CAD SOLIDWORKS

#### 4.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για την δημιουργία και επεξεργασία μοντέλων αντικειμένων σε περιβάλλον CAD 3D της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SolidWorks.

Το SolidWorks είναι ένα πλήρες 3D μηχανολογικό εργαλείο για σχεδιασμό προϊόντων, προσφέροντας στη σχεδιαστική ομάδα όλα τα απαραίτητα εργαλεία για μηχανολογικό σχεδιασμό, επικύρωση, προσομοίωση κίνησης μηχανισμών, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (αντοχής και ροής), φωτορεαλισμό, διαχείριση δεδομένων από ομάδες και τα πολλά εργαλεία επικοινωνίας. Εξάγει τα γεωμετρικά δεδομένα σε πληθώρα ουδέτερων πρωτοκόλλων επικοινωνίας (IGES, STEP, PARASOLID, VRML, STL κ.α.), δίνοντας τη δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία τους και με άλλα λογισμικά εργαλεία, ή ακόμα και κατασκευής τους σε διατάξεις ΤΚΠ.

Με το SolidWorks όλα τα σχεδιαστικά δεδομένα του υπό σχεδίαση αντικειμένου ή μηχανολογικού συνόλου είναι 100% παραμετρικά, επεξεργάσιμα και τροποποιήσιμα, η δε διασύνδεση ανάμεσα στα 3D μοντέλα (parts), συναρμολογήματα (assemblies) και 2D σχέδια (drawings) που τα απαρτίζουν είναι πάντα άμεση και ανταποκρίνεται σε κάθε αλλαγή που γίνεται. Επίσης, η διασύνδεση με λογισμικά εργαλεία τρίτων εταιριών λογισμικού (π.χ. CAE, CAM, Flow), είναι δυνατή και άμεση μέσα από το ίδιο το γραφικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης (GUI) του ίδιου του προγράμματος. Με το SolidWorks μειώνονται τα βήματα σχεδιασμού και οι περιττές κινήσεις μέσα από μία πληθώρα καινοτόμων εργαλείων «εξοικονόμησης χρόνου». Η αναζήτηση παλιότερων σχεδίων είναι πολύ εύκολη και η επαναχρησιμοποίηση τμημάτων των σχεδίων αυτών μας επιτρέπει να σχεδιάζουμε πιο αποδοτικά.

Με το SolidWorks μπορούν να αυτοματοποιηθούν επαναλαμβανόμενες σχεδιαστικές διαδικασίες και να δημιουργηθούν διαφορετικοί συνδυασμοί πολλών παραμέτρων.[7],[8][25]

Το περιβάλλον SolidWorks παρέχει συνοπτικά και κωδικοποιημένα τις εξής δυνατότητες :

- Αυτόματη δημιουργία κατασκευαστικών σχεδίων (2D drawings).
- Συμφωνία με τα πρότυπα και την υπάρχουσα τυποποίηση μηχανολογικού σχεδιασμού (DIN , ISO κλπ).
- Αυτόματες λίστες υλικών (BOM) με τα χαρακτηριστικά τους.
- Αμφίδρομη συμβατότητα και ενημέρωση με το αντίστοιχο 3D συναρμολόγημα.
- Πλήρη και αυτόματη διαστασιολόγηση.
- Σύγκριση μοντέλων και κατασκευαστικών σχεδίων.
- Δυνατότητα κίνησης σε 2D σκαριφήματα (sketch blocks) και εξακρίβωση της σωστής λειτουργίας ενός μηχανισμού, πριν η σχεδίαση προχωρήσει στον τρισδιάστατο σχεδιασμό.
- Συνδυασμός ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών από διαφορετικά SolidWorks αρχεία και διατήρηση των «παλιών» ρυθμίσεων κατά τη δημιουργία νέων αντικειμένων.
- Γρήγορη δημιουργία συναρμολογημάτων με τη χρήση έξυπνων κανόνων συναρμογών και γειτνίασης (smart mates). Με κάθε αλλαγή ενός εξαρτήματος στο συναρμολόγημα (assembly),τα υπόλοιπα εξαρτήματα προσαρμόζονται αυτόματα στις νέες διαστάσεις των εξαρτημάτων.
- Προσομοίωση ρεαλιστικής μετάδοσης κίνησης και μηχανικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των στερεών σωμάτων με μοναδικές δυνατότητες φυσικών συνθηκών (π.χ. επίδραση βαρύτητας). Προσομοίωση κινήσεων ιμάντων , αλυσίδων και οδοντωτών τροχών.

## 4.1.2 ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΜΕΝΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟ SOLIDWORKS

Με το SolidWorks μπορούν να αποτυπωθεί και να τροποποιηθεί μια αρχική ιδέα με τις προχωρημένες δυνατότητες 3D sketching (τρισδιάστατο σκαρίφημα). Με την εντολή Freeform (ελεύθερη διαχείριση επιφανειών), μπορούν να δημιουργηθούν πολύπλοκες επιφάνειες σύροντας προκαθορισμένα σημεία τους στο χώρο, κατασκευάζοντας καθ' αυτό τον τρόπο αντικείμενα ανώτερης αισθητικής ποιότητας και μηχανολογικής ακρίβειας.

Το SolidWorks προσφέρει επίσης την τεχνολογία SWIFT , η οποία απλοποιεί το σχεδιασμό με προχωρημένες τεχνικές σχεδιασμού. Για παράδειγμα, η εντολή Instant 3D, επιτρέπει την αλλαγή διαστάσεων σε πραγματικό χρόνο επιλέγοντας και σύροντας επιφάνειες του μοντέλου. Επίσης μας παρέχει ενσωματωμένα εργαλεία συγκολλήσεων και μεταλλικών κατασκευών , ενσωματωμένα εργαλεία σχεδίασης μεταλλικών επιφανειών (sheet metal) και δημιουργία αναπτυγμάτων με ένα κλικ. Επιπλέον ενσωματώνει εργαλεία για σχεδίαση καλουπιών με πολύπλοκες επιφάνειες. Τα εργαλεία αυτά αυτοματοποιούν τη δημιουργία μητρών καλουπιού με βάση τη γεωμετρία του τελικού προϊόντος.

Το SolidWorks ενσωματώνει το λογισμικό COSMOSWorks για ανάλυση κατασκευών με πεπερασμένα στοιχεία. Το λογισμικό αυτό περιλαμβάνει εργαλεία για στατική & δυναμική ανάλυση, υπολογισμό θερμικών καταπονήσεων, ανάλυση κραδασμών, βελτιστοποίηση κατασκευών, υπολογισμό αντοχής κατασκευών σε κόπωση κτλ.

Για δυναμική/κινηματική ανάλυση και ρευστομηχανικά προβλήματα προσφέρονται τα ακόλουθα λογισμικά :

COSMOSMotion: Προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων στα κινητά μέρη ενός μηχανισμού και υπολογισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται. Σε συνδυασμό με το

COSMOSWorks μας προσφέρεται ένα ολοκληρωμένο πακέτο για ανάλυση κατασκευών.

COSMOSFlowWorks: Είναι ένα πλήρως ενσωματωμένο λογισμικό για ρευστομηχανική και θερμική ανάλυση. Υποστηρίζει μια μεγάλη γκάμα ρευστών (Νευτώνεια και μη) τόσο για εξωτερικές όσο και για εσωτερικές ροές.

Το SolidWorks παρέχει επίσης τα εξής εργαλεία για μεγαλύτερη παραγωγικότητα:

- SolidWorks Routing: Εξειδικευμένα εργαλεία και βιβλιοθήκες για το σχεδιασμό καλωδιώσεων & σωληνώσεων με έξυπνο τρόπο.
- Toolbox: Βιβλιοθήκες κατά ANSI, BSI, CISC, DIN, ISO, JIS, GB, όπου περιλαμβάνουν τυποποιημένα εξαρτήματα συναρμογών (π.χ. ρουλεμάν, κοχλίες, περικόχλια, ροδέλες, κτλ.), εξαρτήματα μετάδοσης ισχύος (οδοντωτούς τροχούς, μάντες, αλυσίδες, έκκεντρα) και διατομές δοκών.
- TolAnalyst: Εργαλεία για εμπειριστατωμένο υπολογισμό ανοχών ολόκληρων μηχανισμών.
- DriveWorks: Εύχρηστο εργαλείο για αυτοματοποίηση επαναλαμβανόμενων σχεδιαστικών εργασιών.
- CircuitWorks: Για αποτύπωση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (PCB). Πλήρης ενσωμάτωση ηλεκτρονικού και μηχανολογικού σχεδίου, καθώς και εξαγωγή καταλόγου υλικών.
- DFMPress: Για τον έλεγχο εάν το προ-κατεργασία εξάρτημα κατασκευάζεται εύκολα κατά συνέπεια οικονομικά με βάση τις παραμέτρους όπου εμείς ορίζουμε.
- PhotoWorks: Δημιουργία εντυπωσιακών φωτορεαλιστικών απεικονίσεων.
- FeatureWorks: Αναγνώριση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (features) κατά την εισαγωγή αρχείων από άλλα CAD συστήματα, μειώνοντας καθεαυτό τον τρόπο το χρόνο επαναδημιουργίας παραμετρικών μοντέλων.
- Design Checker: Για έλεγχο συμβατότητας των σχεδίων με τα πρότυπα σχεδιασμού όπου εμείς ορίζουμε.
- 3D Instant Website: Για τη δημοσίευση σχεδίων στο διαδίκτυο και τη γνωστοποίηση τους σε συνεργάτες και προμηθευτές.
- 3D Content Central: Δυνατότητα λήψης μοντέλων (parts) και συναρμολογημάτων (assemblies) από τη μεγαλύτερη δικτυακή/εικονική βιβλιοθήκη εξαρτημάτων παγκοσμίως.

Το SolidWorks περιλαμβάνει επίσης το προϊόν 3Dvia Product Doc , το οποίο αυτοματοποιεί εύκολα και γρήγορα τη δημιουργία εγγράφων για οδηγίες χρήσης προϊόντων. Ενδεικτικά μπορεί κανείς να δημιουργήσει οδηγίες συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης, τεχνικές λεπτομέρειες σε συνδυασμό με 3D απεικονίσεις – animations , εκπαιδευτικό υλικό, παρουσιάσεις για marketing, τις πωλήσεις κτλ. Κατ' αυτό τον τρόπο εξοικονομείται χρόνος και χρήμα ενώ παράλληλα βελτιώνονται οι τεχνικές πληροφορίες που δίνονται στον πελάτη.

Το 3Dvia Composer διαβάζει αρχεία SolidWorks, CATIA, Pro-E κ.α. Δυνατότητα λήψης μοντέλων (parts) και συναρμολογημάτων (assemblies) από τη μεγαλύτερη δικτυακή/εικονική βιβλιοθήκη εξαρτημάτων παγκοσμίως. Το SolidWorks παρέχει στο χρήστη τα λογισμικά της σειράς SolidWorks DWGseries, τα οποία δημιουργήθηκαν με σκοπό χρήστες του AutoCAD να ανοίγουν, να επεξεργάζονται, να δημιουργούν και να μοιράζονται DWG/DXF με το Solidworks δεδομένα με αποτελεσματικότητα χωρίς να απαιτείται αναβάθμιση του AutoCAD. Η σειρά DWGseries προσφέρεται δωρεάν και περιλαμβάνει τα ακόλουθα λογισμικά:

- DWGgateway: Επιτρέπει να ανοίγονται DWG σχέδια από την έκδοση AutoCAD v.14 και να αποθηκεύονται έως την πιο πρόσφατη.
- DGWviewer και SolidWorks eDrawings: Για να ανοίγονται και να παρουσιάζονται DWG/DXF αρχεία.
- DWGEDitor: Δυνατότητα επεξεργασίας και δημιουργίας αρχείων DWG και DXF.
- Μετάβαση από το 2D στο 3D CAD, γρήγορα και εύκολα: Για τη δημιουργία 3D μοντέλων στο SolidWorks από 2D σχέδια του AutoCAD.

Το SolidWorks τέλος παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης τεχνικών δεδομένων εν ονόματι SolidWorks Product Data Management Software ή PDMWorks. Πρόκειται για λογισμικό τύπου PDM με το οποίο καθ' όλη τη φάση ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου προϊόντος οργανώνονται τεχνικά δεδομένα, με τη δημιουργία ροών εργασίας για αυτόματη ηλεκτρονική διακίνηση δεδομένων και την γνωστοποίηση τεχνογνωσίας εντός μιας επιχείρησης. Το PDMWorks εμπεριέχει ένα ηλεκτρονικό «θησαυροφυλάκιο» με την επωνυμία VAULT , το οποίο κατοχυρώνει την ασφάλεια των δεδομένων μιας επιχείρησης. [8]

### 4.1.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΓΡΑΦΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (GUI) ΤΟΥ SOLIDWORKS

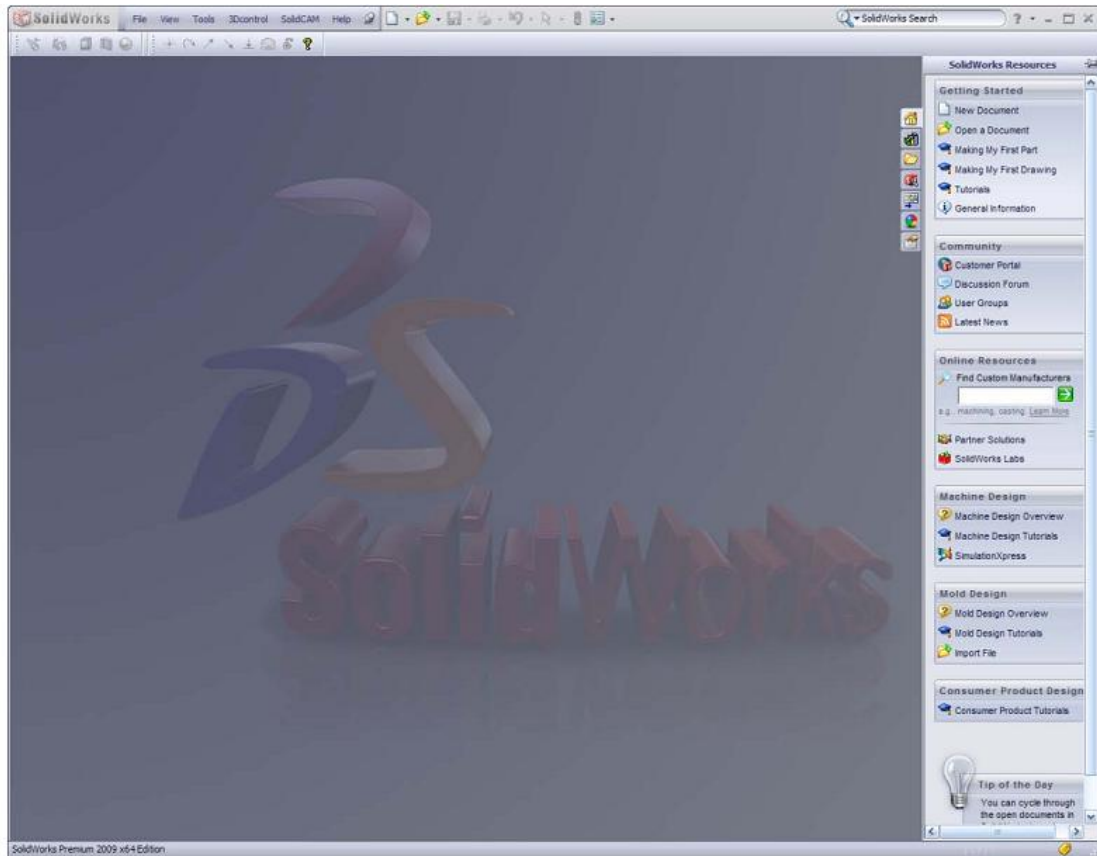
Στο γραφικό περιβάλλον του SolidWorks, το βασικό μενού περιλαμβάνει στη γνωστή από τα Windows οριζόντια δομή τα παρακάτω μενού:

- File
- Edit
- View
- Insert
- Tools

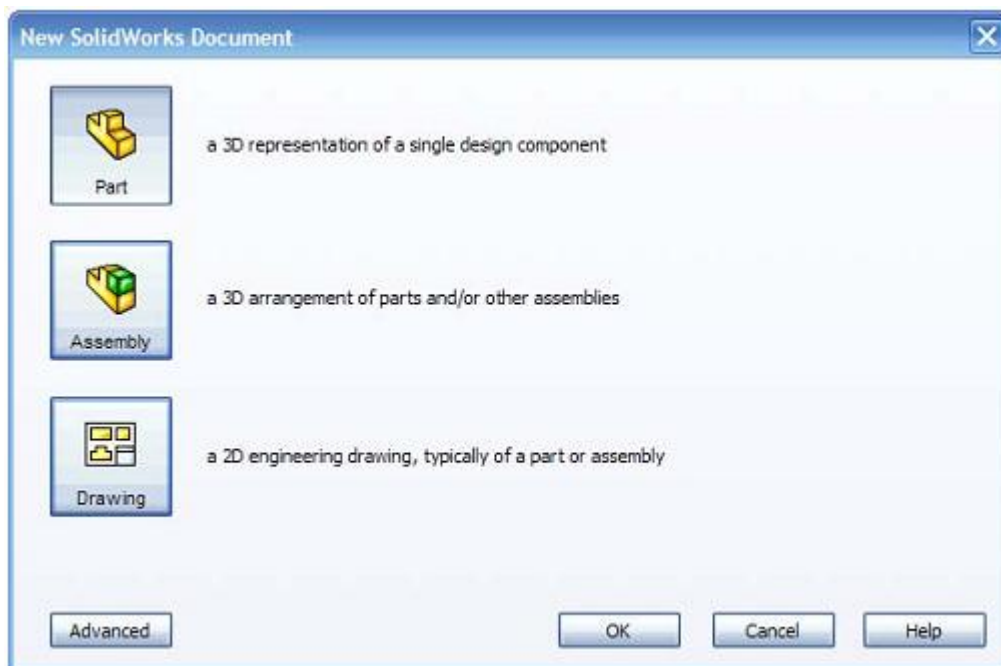


Σχήμα 4.1 Βασικό μενού του SolidWorks

Αναλόγως του τι θέλουμε να δημιουργήσουμε, από τη μπάρα εργασίας μπορούμε να επιλέξουμε File > New > Part , Assembly ή Drawing. Αν ήδη δουλεύουμε ένα «ανοικτό» αρχείο, μπορούμε από τα υπόλοιπα μενού ή από «κουμπιά» σε μπάρες εντολών να επιτελέσουμε οποιαδήποτε από τις προσφερόμενες εντολές, σχεδίασης, επεξεργασίας, ανάλυσης κλπ.[26]

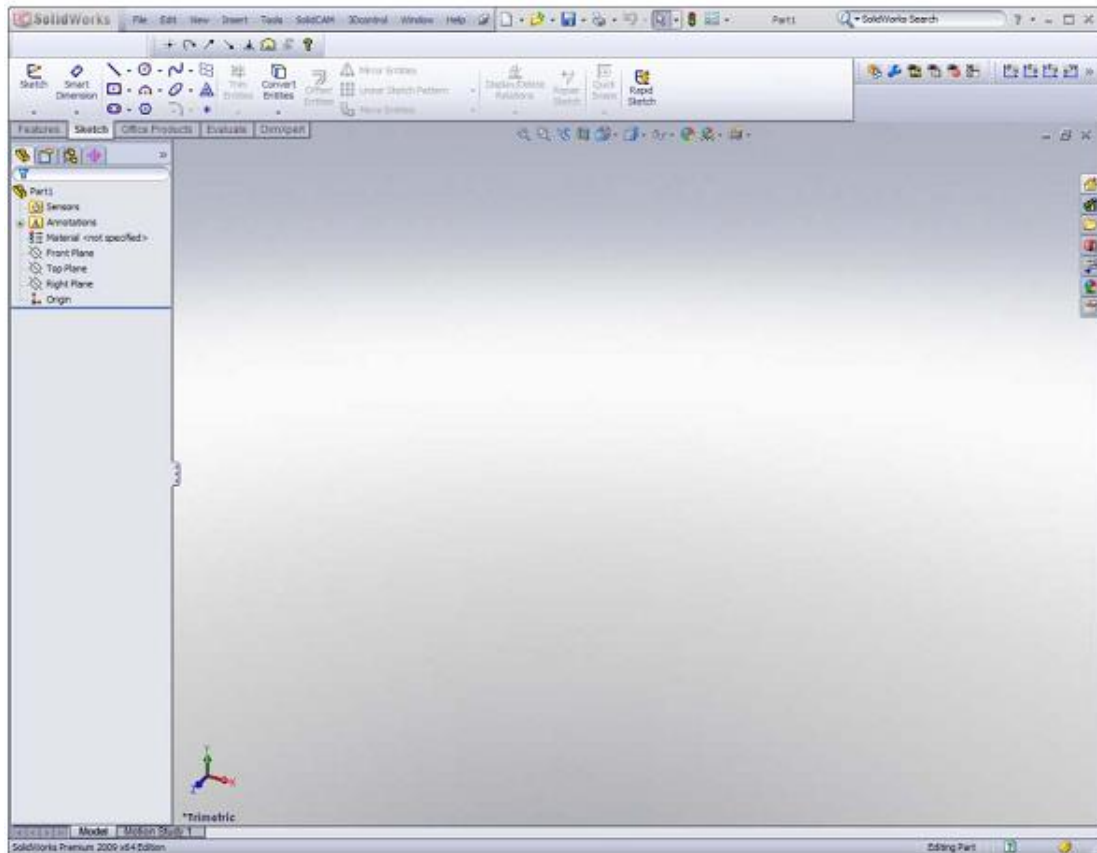


Σχήμα 4.2 Αρχικό γραφικό περιβάλλον του SolidWorks



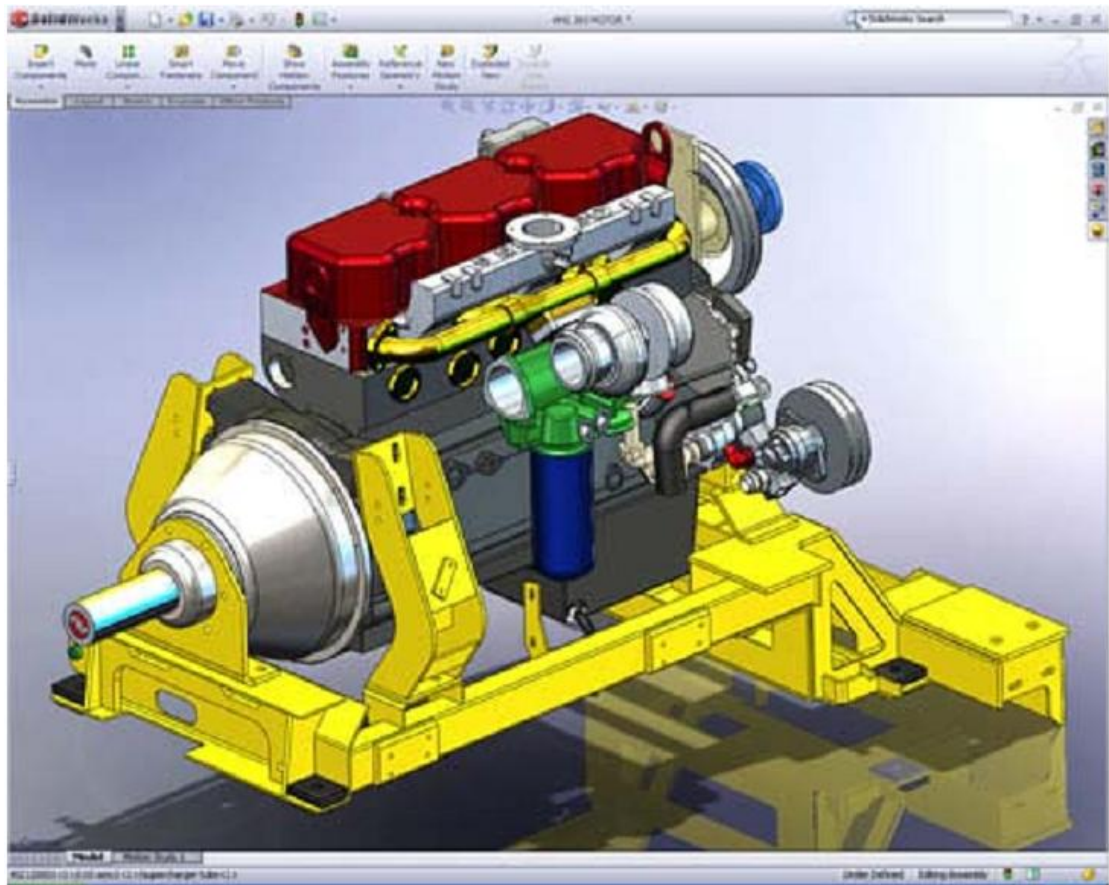
Σχήμα 4.3 Δημιουργία Part , assembly ,Drawing

Επιλέγοντας π.χ. Part για νέο αντικείμενο (Σχήμα 4.13), εμφανίζεται το πλήρες γραφικό περιβάλλον του Solidworks, του οποίου μπορούμε να ρυθμίσουμε τα εργαλεία ώστε να εμφανίζονται τα απαραίτητα, ανάλογα με τις σχεδιαστικές μας ανάγκες.



Σχήμα 4.4 Γραφικό περιβάλλον σχεδίασης του SolidWorks



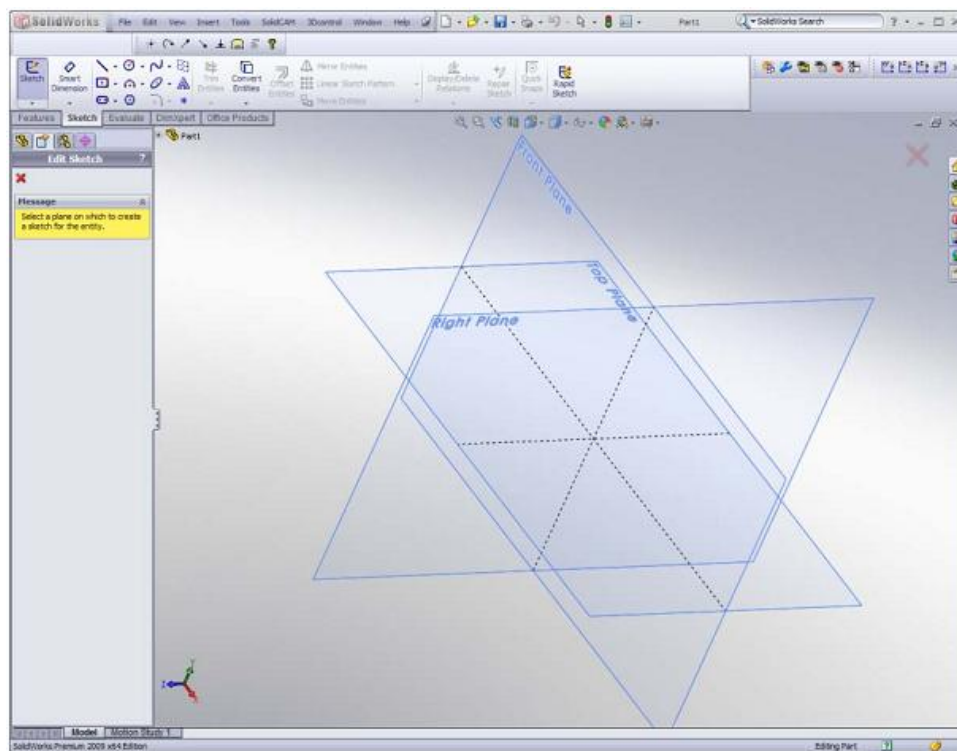


Σχήμα 4.5 Δημιουργία σύνθετων συναρμολογημάτων με χρήση του SolidWorks

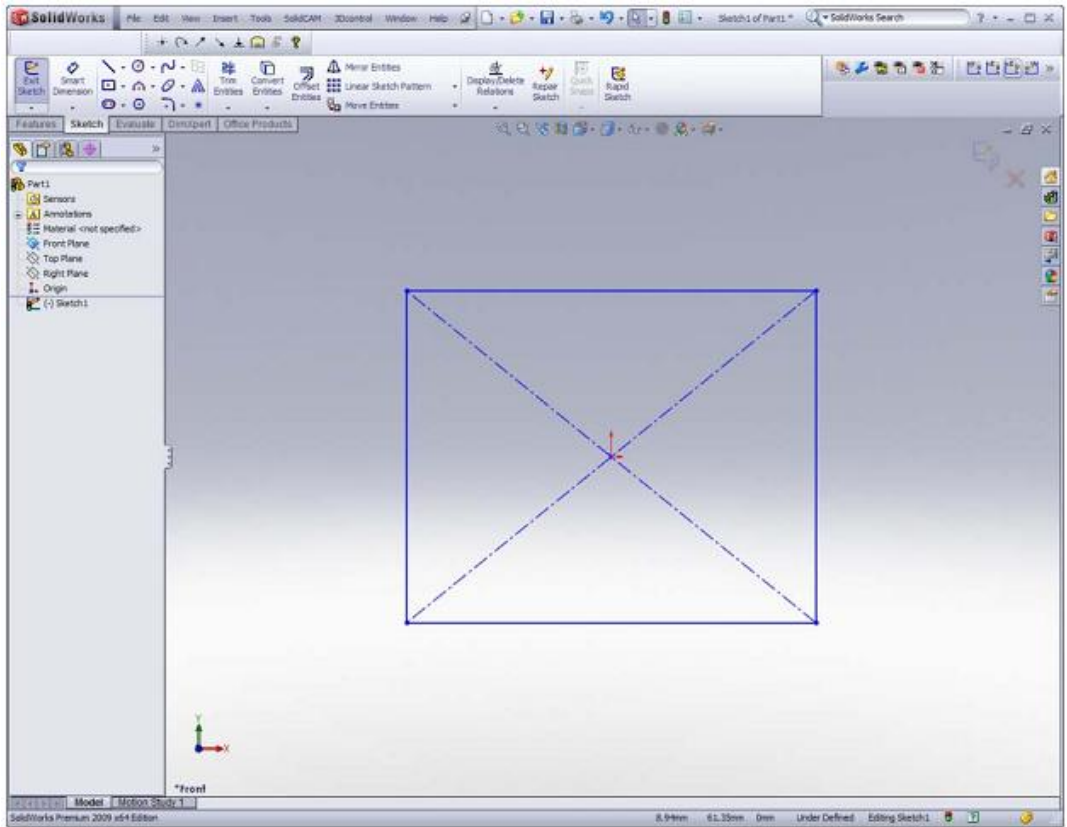
## 4.1.4 ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Παρακάτω καταγράφονται σε ένα απλό παράδειγμα τα πιο βασικά βήματα που συνήθως ακολουθούνται για τη δημιουργία ενός στερεού μοντέλου (solid part) . Το λογισμικό Solidworks περιλαμβάνει πληθώρα σχεδιαστικών εργαλείων με τα οποία μπορεί κανείς να σχεδιάσει πολλές και σύνθετες γεωμετρίες.[27]

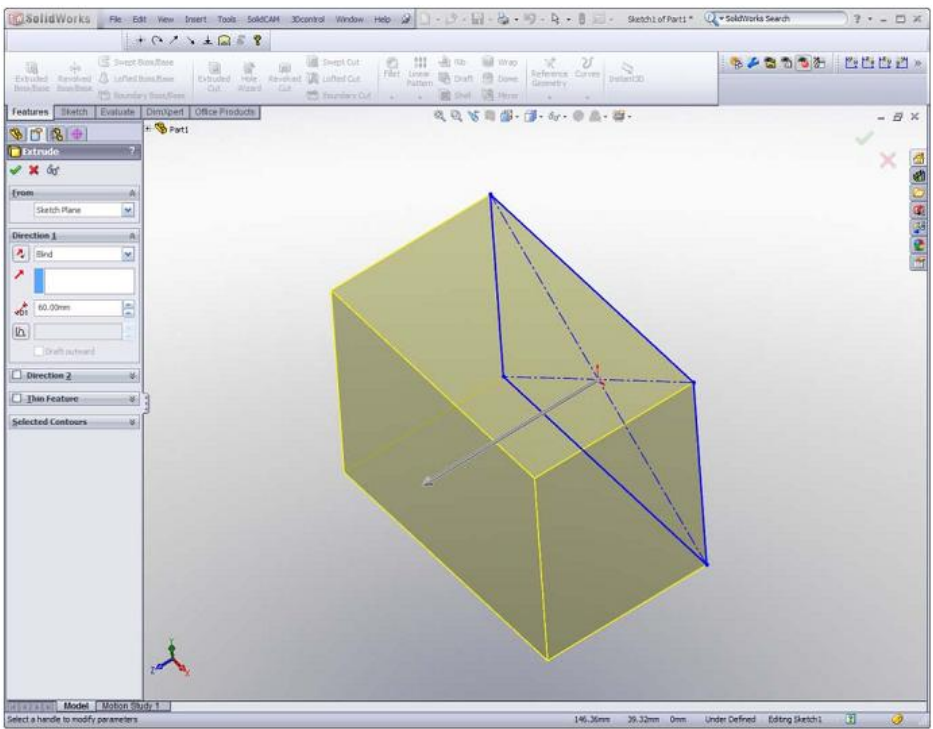
1.Επιλέγουμε επίπεδο εργασίας-σχεδίασης (επίπεδα XY , XZ , YZ)



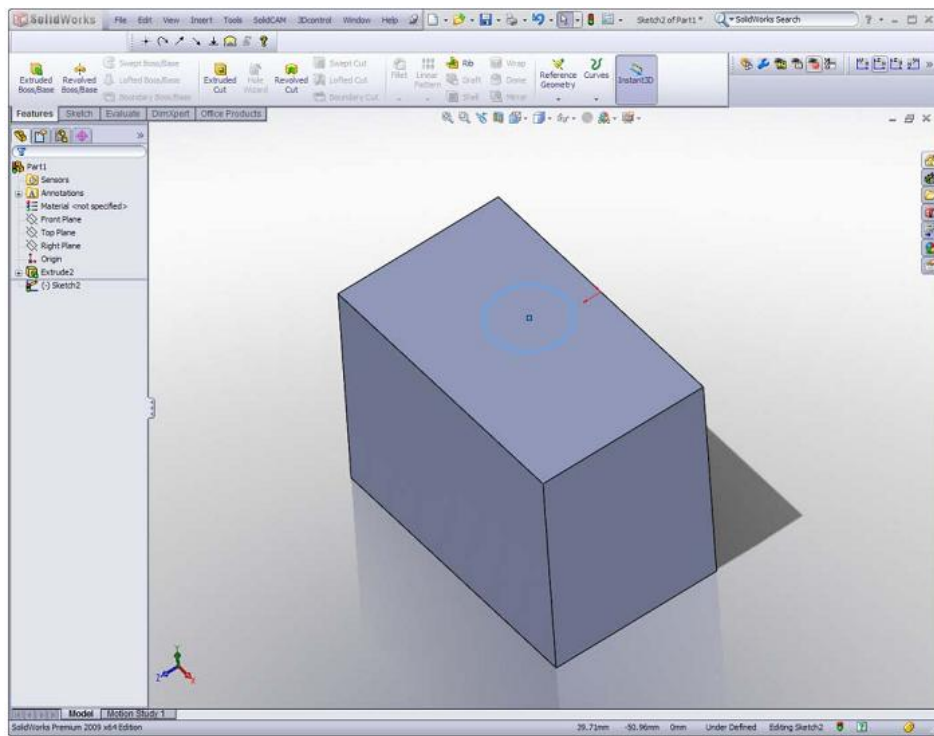
2. Σχεδίαση 2D περιγράμματος , καμπυλών κτλ



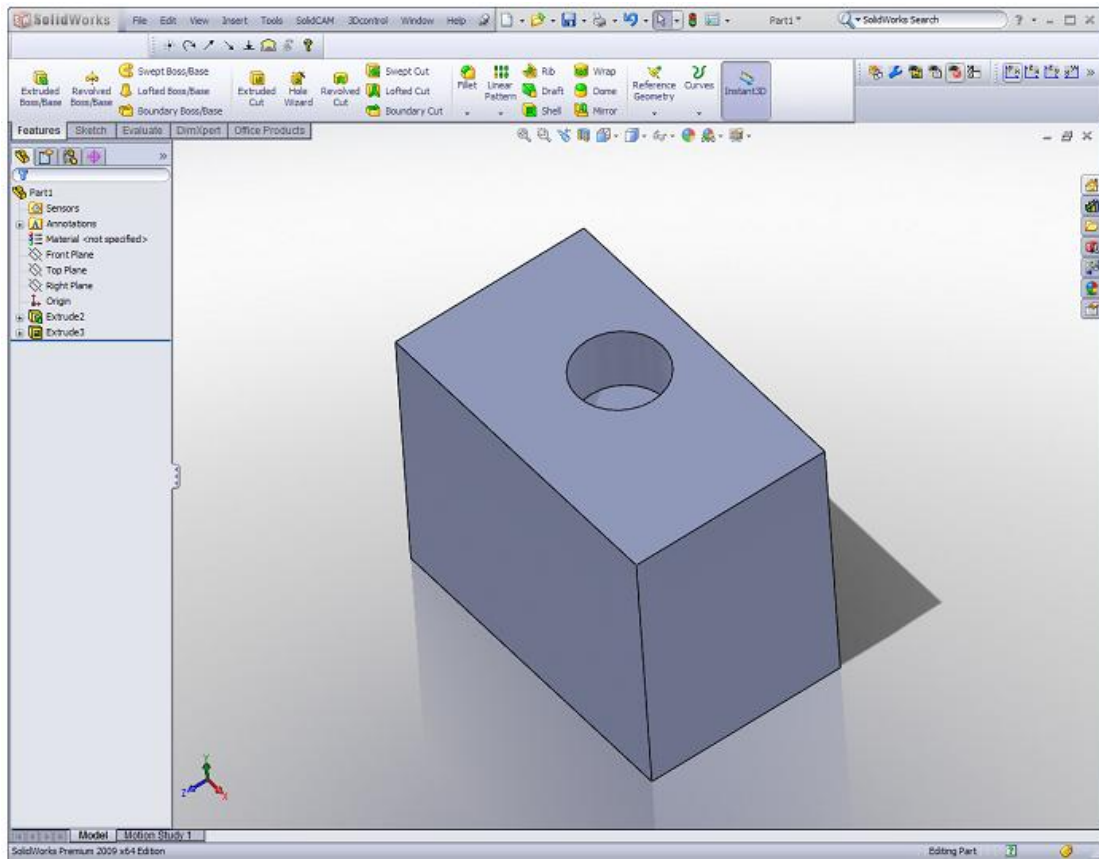
3. Εξώθηση στο χώρο για τη δημιουργία του βασικού στερεού π.χ. με προβολή κατά Z (Εδώ κατά π.χ. 60mm).



4. Επιλογή επιφάνειας του βασικού στερεού και δημιουργία σκίτσου 2D για δημιουργία μορφολογικού στοιχείου 3D. (sketch στο παραγόμενο τεμάχιο, π.χ. μπλε κύκλος).



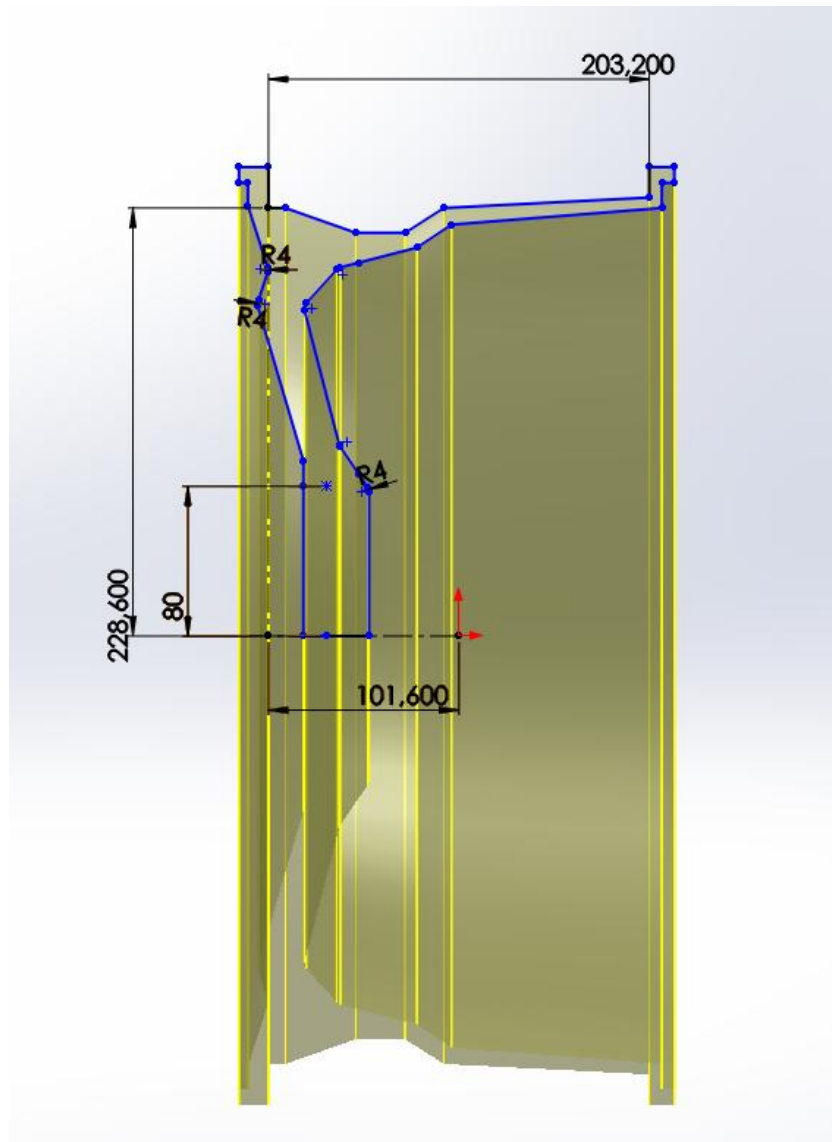
5. Δημιουργία μορφολογικού στοιχείου τυφλής οπής (Extruded cut) στον άξονα Y κατά π.χ. 20mm



Στην αγορά υπάρχει πληθώρα συγγραμμάτων και ηλεκτρονικών μέσων με τα οποία μπορεί κανείς να εκπαιδευτεί στο εν λόγω λογισμικό CAD.

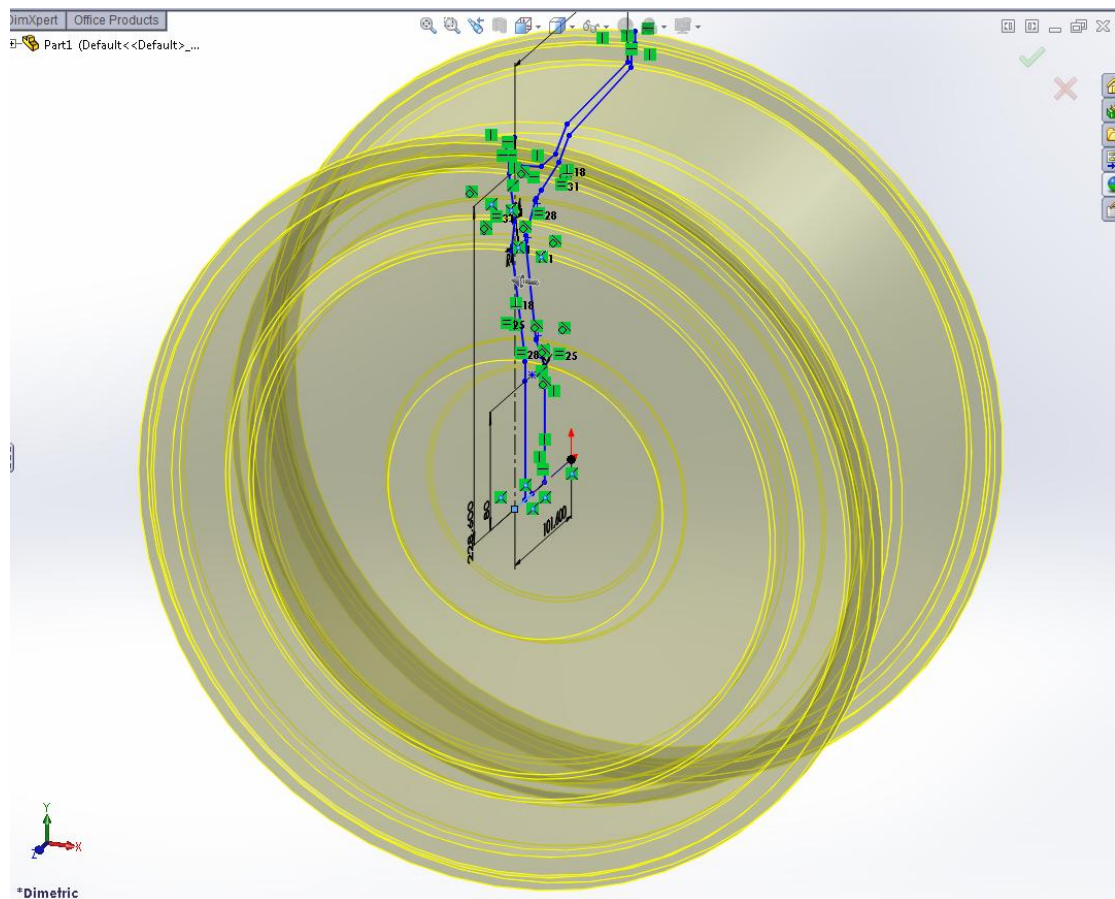
## 4.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΖΑΝΤΑΣ

Στην παρούσα εργασία η ζάντα προς σχεδιασμό είναι 8x18 5x120 ET45. Δηλαδή πρόκειται για μια ζάντα διαμέτρου 18” και φάρδους 8” που έχει 5 μπουλόνια με PCD 120 mm. Για να σχεδιαστεί η ζάντα χρησιμοποιήθηκε το σχήμα 2.4 όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6.



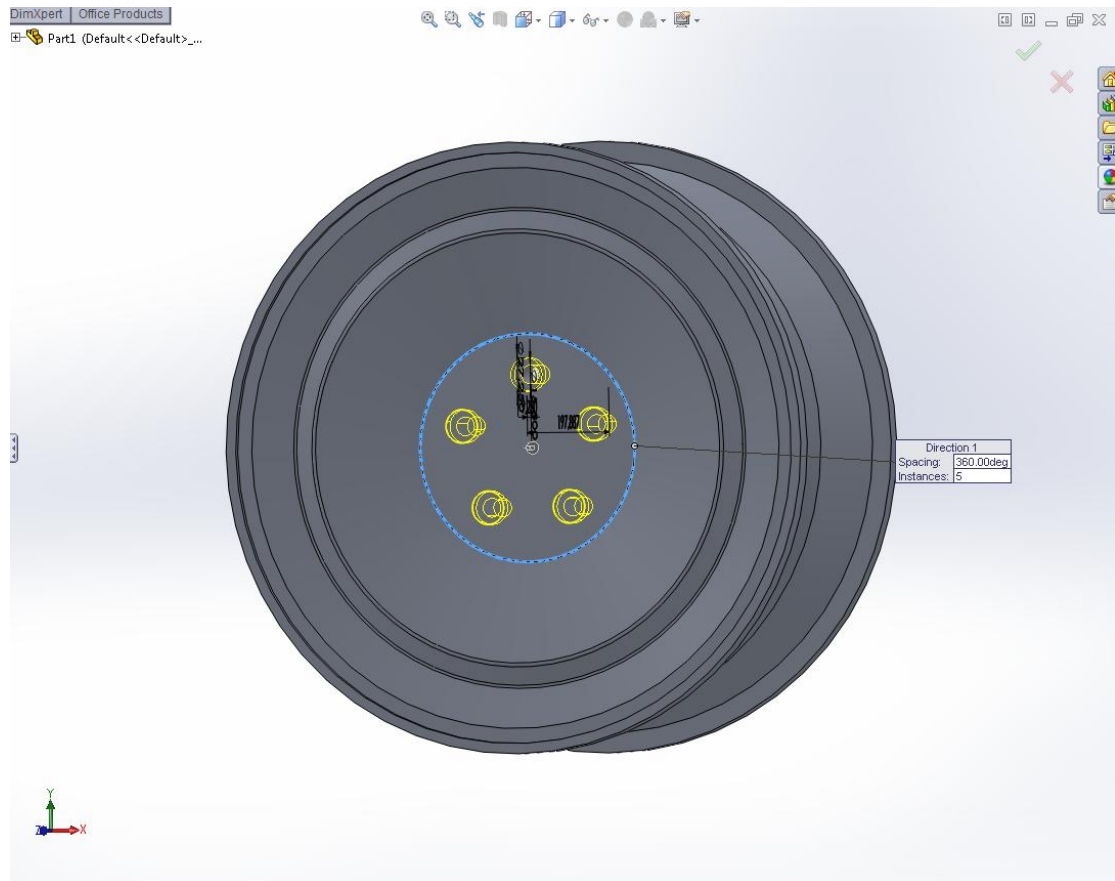
Σχήμα 5.6 Διαστάσεις περιγράμματος της ζάντας

Στη συνέχεια περιστρέφεται χρησιμοποιώντας την εντολή revolve ώστε να δημιουργηθεί το κύριο σώμα της ζάντας όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Κύριο σώμα της ζάντας

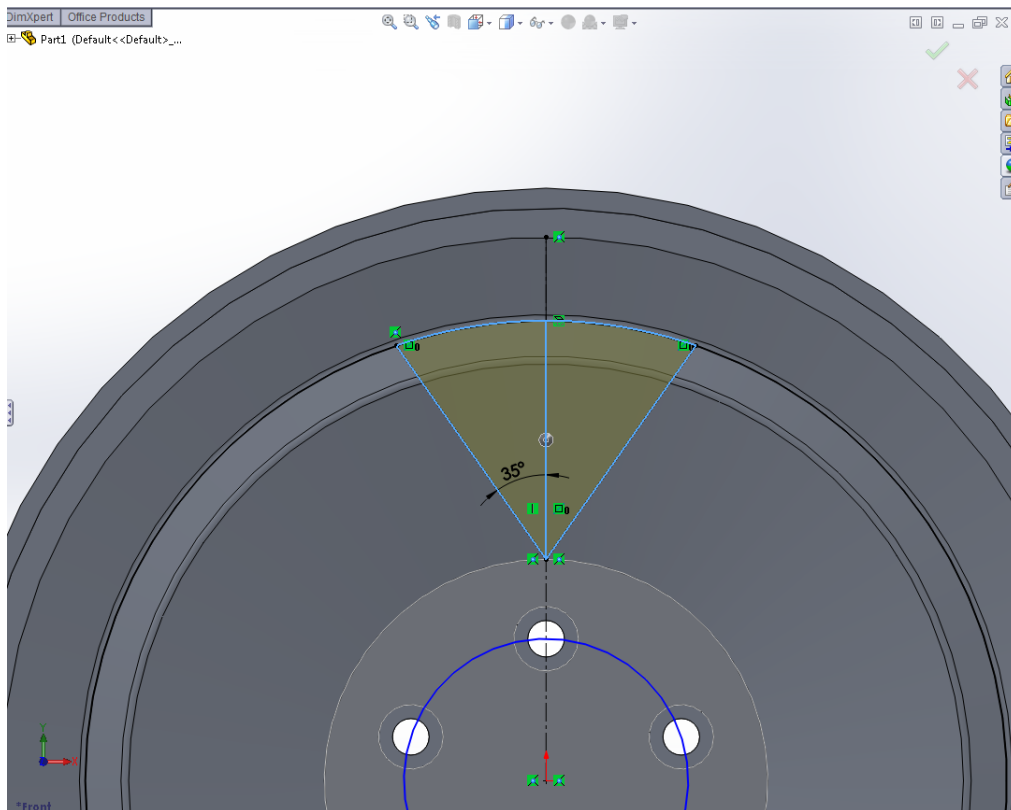
Στην συνέχεια σχεδιάστηκαν οι τρύπες για μπουλόνια. Συγκεκριμένα πρώτα πραγματοποιήθηκε η μια τρύπα με εντολή Hole wizard και επιλέχθηκε ως τύπος τρύπας να είναι counterbore και το μέγεθος να είναι M14. Έπειτα με την εντολή circular pattern επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διεργασία και ως αποτέλεσμα λαμβάνονται 5 τρύπες που τα κέντρα τους εφάπτονται σε κύκλο διαμέτρου 120mm, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8.



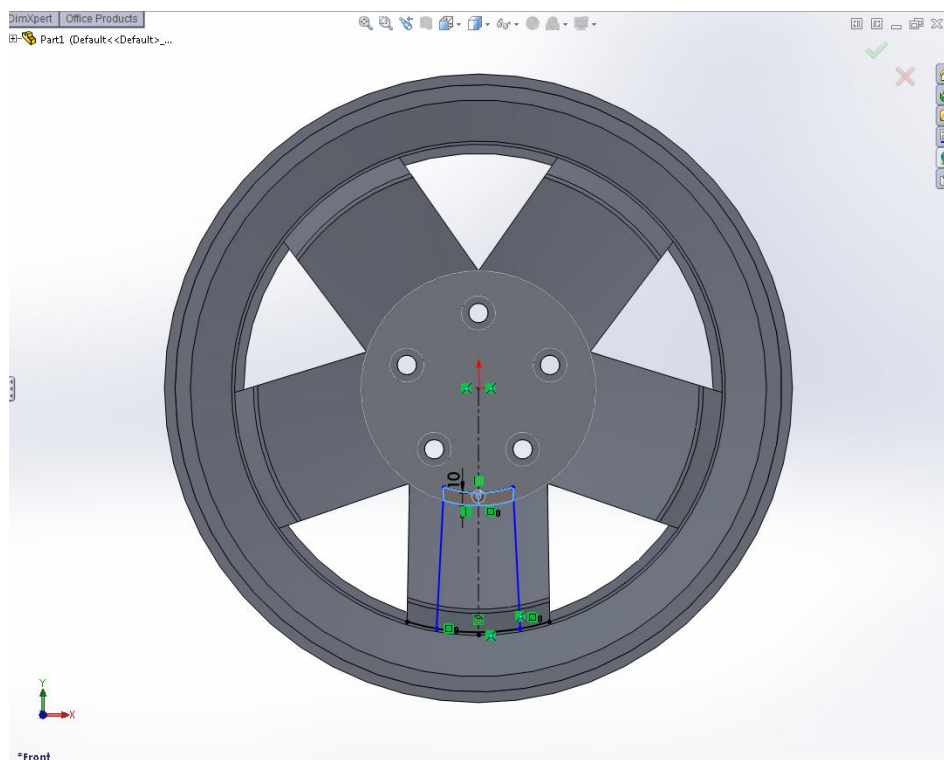
Σχήμα 4.8 Δημιουργία μπουλονίων

Έπειτα στην μπροστινή επιφάνεια της ζάντας σχεδιάζεται το σχέδιο του σχήματος 4.9 και με την εντολή *extruded cut* αφαιρείται το κομμάτι από την ζάντα. Με την εντολή *circular pattern* επαναλαμβάνεται η διεργασία όπως προηγουμένως. Η ζάντα μετά από τις παραπάνω διεργασίες απεικονίζεται στο σχήμα 4.10.



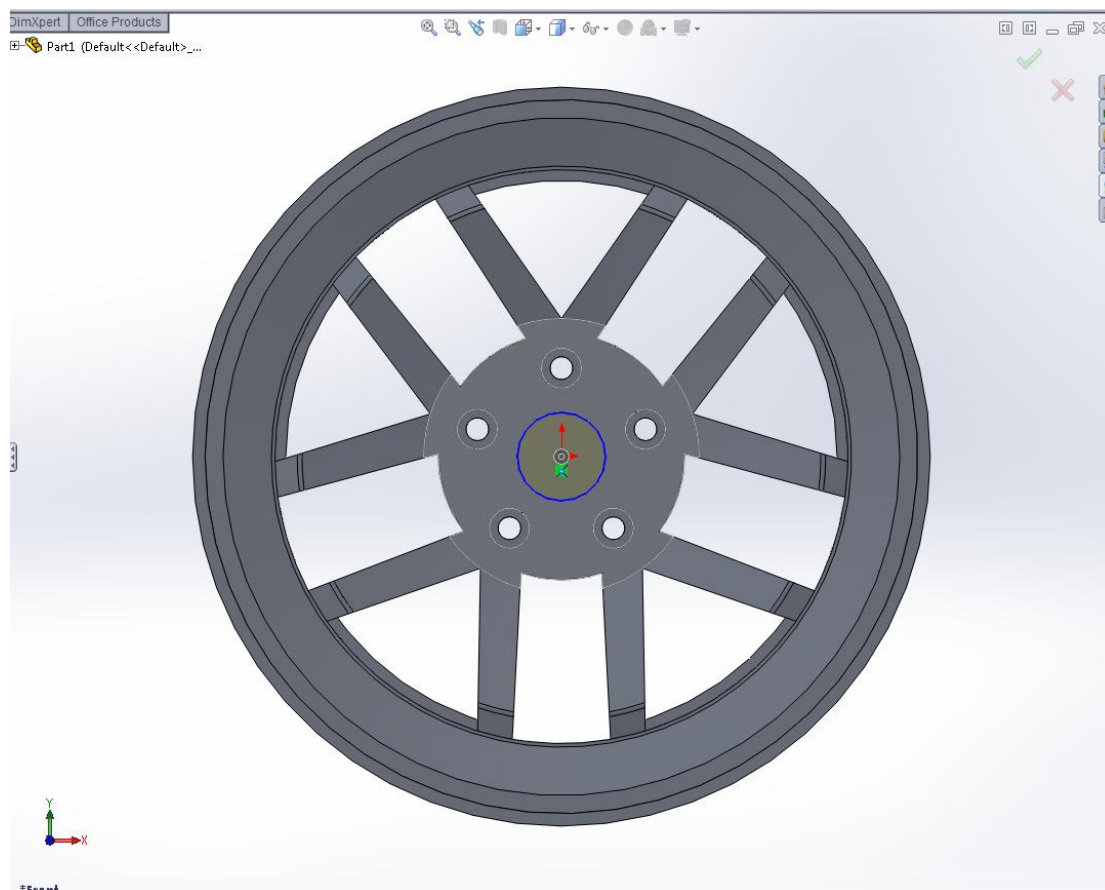


Σχήμα 4.9 Δημιουργία της πρώτης λεπτομέρειας



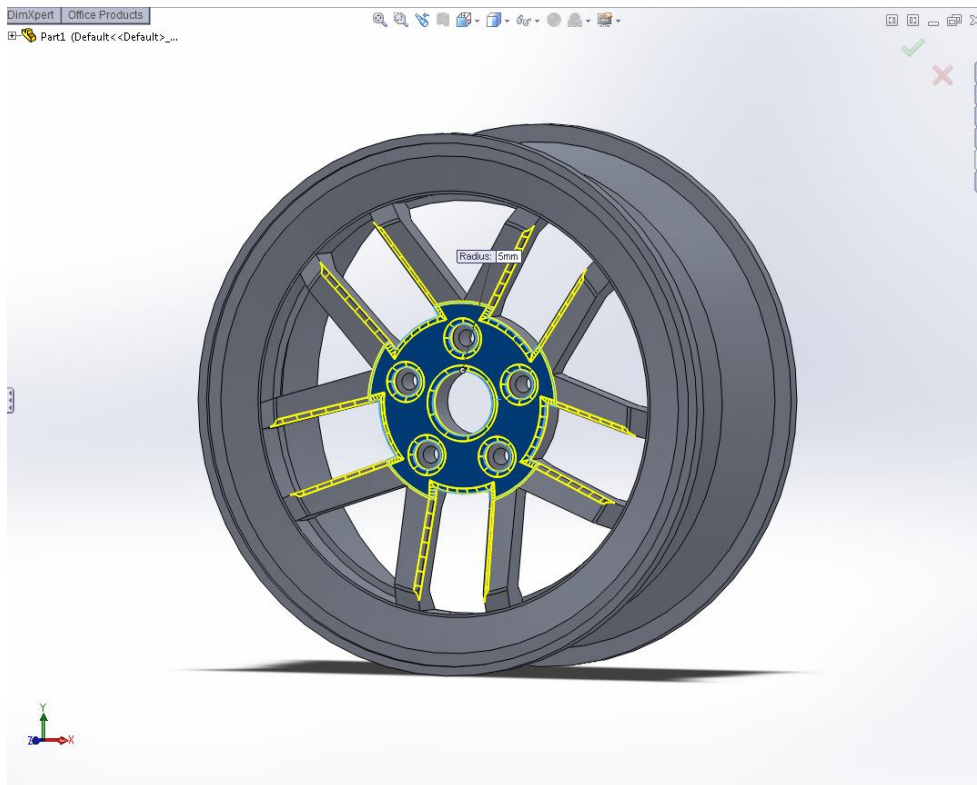
Σχήμα 4.10 Δημιουργία της δεύτερης λεπτομέρειας

Έπειτα επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διεργασία για το σχέδιο που βρίσκεται στο σχήμα 4.10 και μετά δημιουργείται μια τρύπα στο κέντρο της ζάντας, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11

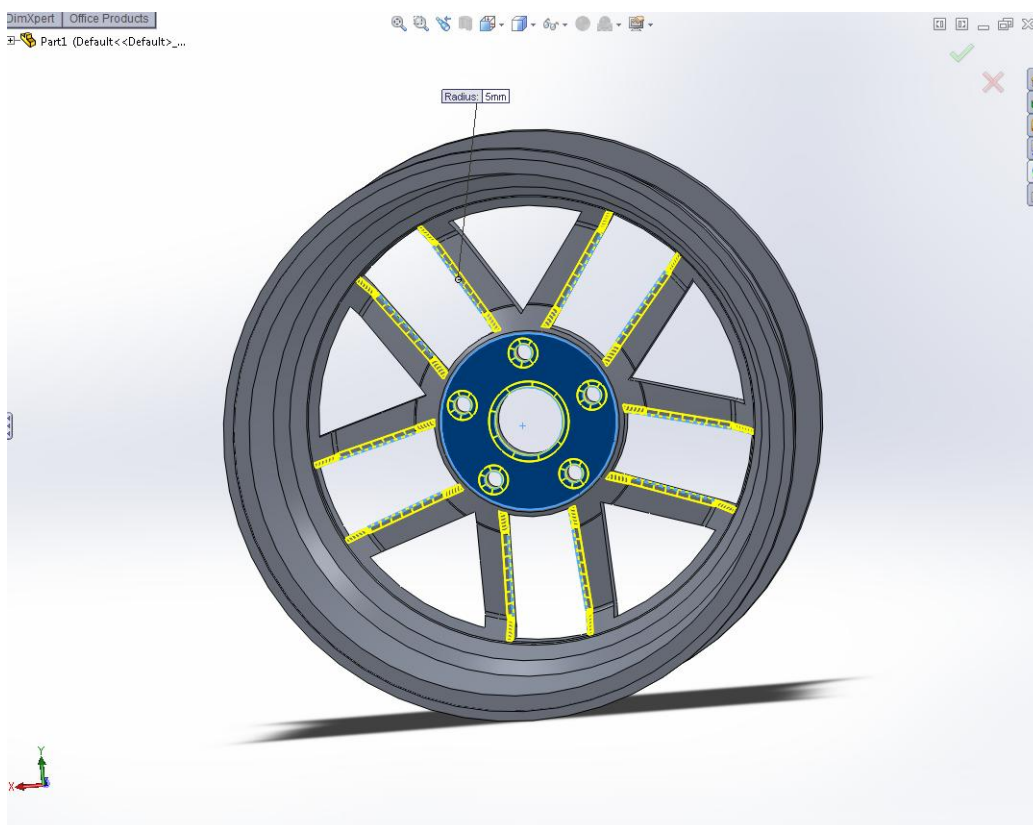


Σχήμα 4.11 Δημιουργία κεντρικής οπής

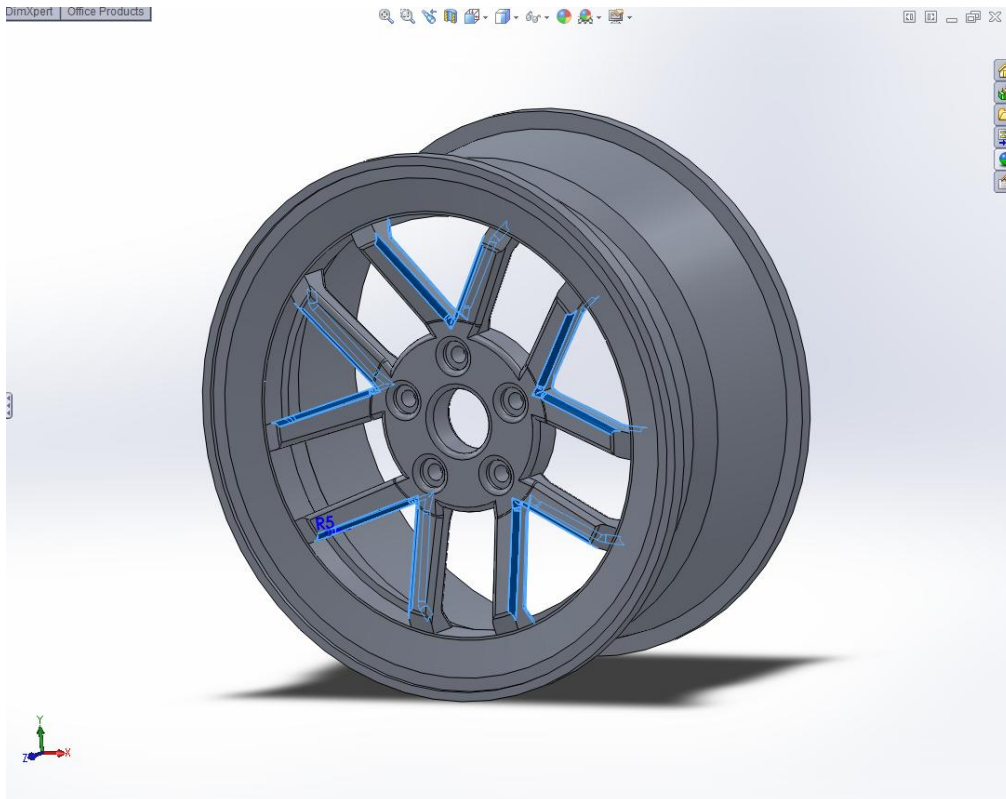
Στην συνέχεια με την εντολή fillet δημιουργούνται κυρτές επιφάνειες στις περιοχές που φαίνονται στα σχήματα 4.12, 4.13, 4.14 και η τελική μορφή της ζάντας φαίνεται στο σχήμα 4.15. Η διεργασία αυτή δεν συμπεριλήφθη στο μοντέλο για προσομοίωση διότι οι κυρτές αυτές επιφάνειες παρουσιάζουν συχνά σφάλμα στην ανάλυση της γεωμετρίας και όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για να είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αντικειμενικά πρέπει το μοντέλο να είναι απλοποιημένο χωρίς πολλές λεπτομέρειες. Επομένως το σχήμα 4.15 η ρεαλιστική απεικόνιση της ζάντας, ενώ το σχήμα 4.16 η ζάντα που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση.



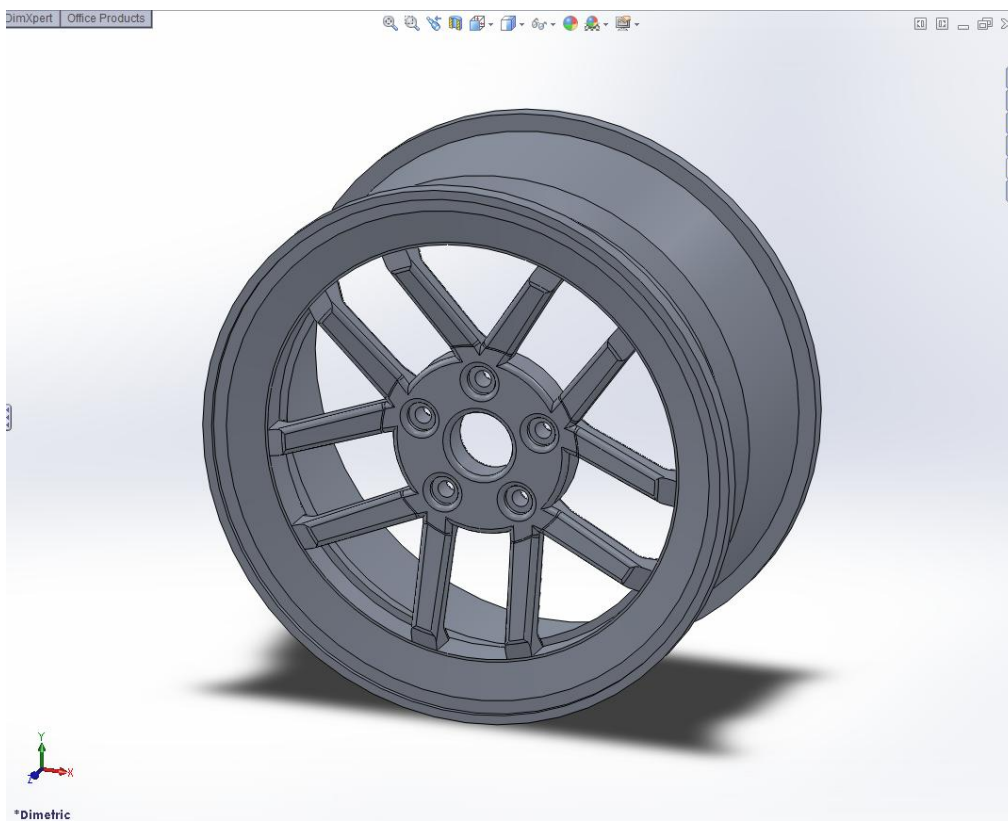
Σχήμα 4.12 Δημιουργία κυρτών επιφανειών στο εξωτερικό τμήμα της ζάντας



Σχήμα 4.13 Δημιουργία κυρτών επιφανειών στο εσωτερικό τμήμα της ζάντας



Σχήμα 4.14 Δημιουργία κυρτών επιφανειών στο εξωτερικό τμήμα της ζάντας



Σχήμα 4.15 Τελική μορφή της ζάντας



Σχήμα 4.16 Ζάντα για προσομοίωση

## **5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ COMSOL MULTIPHYSICS**

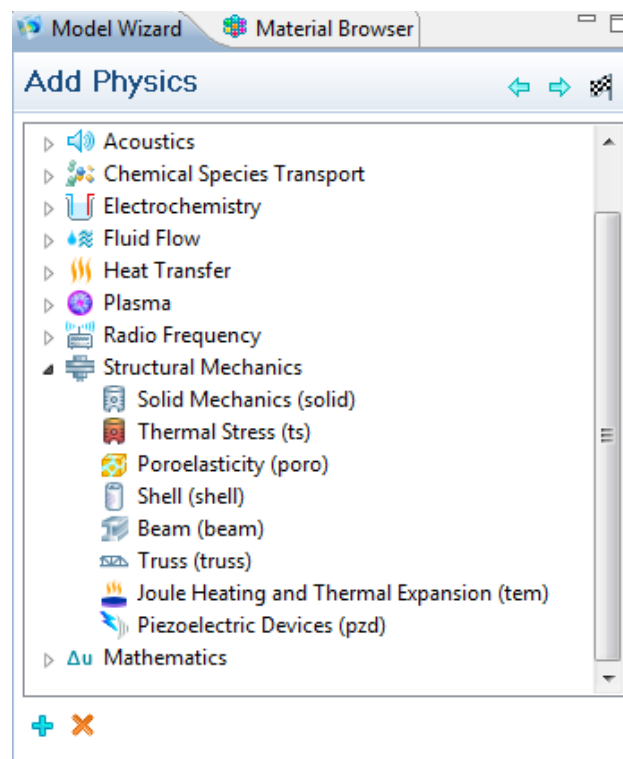
### **5.1 ΤΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ COMSOL MULTIPHYSICS**

Το COMSOL Multiphysics είναι ένα ισχυρό διαδραστικό περιβάλλον για τη μοντελοποίηση και την επίλυση όλων των ειδών επιστημονικών και τεχνικών προβλημάτων που περιγράφονται από μερικές διαφορικές εξισώσεις (ΜΔΕ). Οι ΜΔΕ αποτελούν τη βάση για πολλούς από τους νόμους της επιστήμης και της φυσικής και παρέχουν τη βάση για τη μοντελοποίηση ευρέος φάσματος φαινομένων στις επιστήμες της φυσικής και της μηχανικής. Κατά την επίλυση των ΜΔΕ, το COMSOL Multiphysics χρησιμοποιεί την ιδιαίτερα επιτυχημένη και διαδεδομένη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Σημαντικό πλεονέκτημα του COMSOL είναι η δυνατότητα αλληλεπίδρασής του με το MATLAB πράγμα που μας διευκολύνει πάρα πολύ, καθώς είναι εφικτή η αποθήκευση ενός υπολογιστικού μοντέλου σε μορφή κώδικα, στον οποίο μπορεί εύκολα να γίνονται αλλαγές και τροποποιήσεις.

Εν γένει, η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τα διάφορα τεχνικά προβλήματα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου τα προβλήματα είναι πάρα πολύ απλής μορφής. Όμως, η ανάγκη επίλυσης προβλημάτων πιο σύνθετης μορφής οδήγησε στην ανάπτυξη διαφόρων προσεγγιστικών μεθόδων, μία εκ των οποίων είναι και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να είναι προσεγγιστική αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και να εφαρμοστεί σε πολύ μεγαλύτερο εύρος προβλημάτων, ανεξαρτήτως γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Το μόνο μειονέκτημα που έχει είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα προβλήματα, κάτι το οποίο έχει μειωθεί στο ελάχιστο λόγω της αξιοσημείωτης ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. [9],[10]

Το COMSOL διαθέτει μοντέλα που χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένους τομείς και είναι διαθέσιμα στην περιοχή add-on modules:

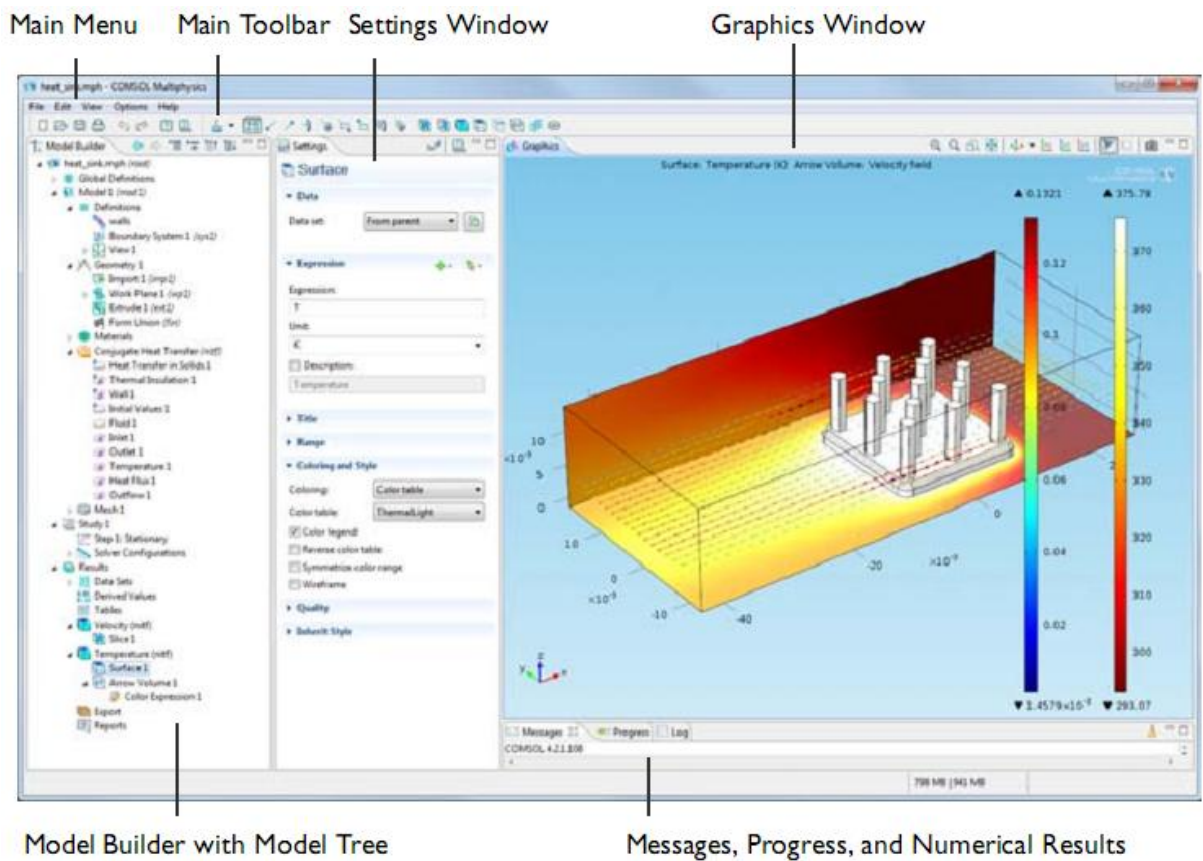
- Ενότητα AC/DC
- Ακουστική Ενότητα
- Ενότητα Χημικών Μηχανικών
- Ενότητα Επιστημών της Γης
- Ενότητα Μετάδοσης Θερμότητας
- Ενότητα MEMS
- Ενότητα RF
- Ενότητα Μηχανικής Κατασκευών



Σχήμα 5.1 Φυσικά μοντέλα του Comsol

Εκτός από τις απλές προσομοιώσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν ακόμη και πολύπλοκα ή σύνθετα προβλήματα. Με σωστό σχεδιασμό και χρήση των παραπάνω ενοτήτων μπορούν να λυθούν σύνθετα προβλήματα.[10]

Το γραφικό περιβάλλον του Comsol είναι αρκετά εύχρηστο. Όλες οι λειτουργίες και εντολές είναι σωστά οργανωμένες. Το κεντρικό παράθυρο αποτελείται από μικρότερα που μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2 Παράδειγμα γραφικού περιβάλλοντος προσομοίωσης



## **5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟ COMSOL MULTIPHYSICS**

Για την επιτυχή δημιουργία ενός μοντέλου θα πρέπει να γίνουν με τη σειρά με την οποία παρουσιάζονται, οι παρακάτω διαδικασίες:

1. Κατασκευή της γεωμετρίας
2. Προσδιορισμός της φυσικής του προβλήματος-οριακές συνθήκες
3. Δημιουργία του πλέγματος (meshing)
4. Επίλυση του προβλήματος (solving)
5. Μεταεπεξεργασία των αποτελεσμάτων (post-processing).

Στη συνέχεια της παραγράφου θα γίνει εκτενής περιγραφή των παραπάνω διαδικασιών με τη χρήση του Comsol Multiphysics και θα δοθούν σχήματα από την ανάλυση του μοντέλου. Επίσης θα δοθεί έμφαση σε ορισμένα σημεία, στα οποία θα πρέπει να υπάρξει ιδιαίτερη προσοχή για τη δημιουργία ενός επιτυχούς μοντέλου.

### **5.2.1 ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΔΙΑΡΟΗΣ VON MISES STESSES**

Ο κύριος σκοπός της προσομοίωσης είναι ο προσδιορισμός του πότε και που, θα αστοχήσει ένα υλικό, κατασκευή. Θεωρίες αστοχίας υλικών δεν θα αναπτυχθούν εδώ, αλλά αναφέρουμε απλώς ότι, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας είναι, για τα όλκιμα υλικά, αυτό του Von Mises. Στο πρόγραμμα του COMSOL υπάρχει η δυνατότητα του υπολογισμού αυτών των τάσεων. Πιο συγκεκριμένα τα σημεία όπου καταπονούνται περισσότερο από τάσεις θα είναι ευδιάκριτα στο τρισδιάστατο μοντέλο καθώς θα υπάρχει διαφορετικός χρωματισμός σε αυτά.

Το κριτήριο του Von Mises λέει ότι, ένα όλκιμο υλικό αρχίζει να διαρρέει όταν, η ενέργεια παραμόρφωσης ανά μονάδα όγκου, φτάνει μια κρίσιμη τιμή. Αυτό οδηγεί στο παρακάτω κριτήριο διαρροής

$$\begin{aligned} \sigma_E &\equiv \sqrt{I_1^2 - 3I_2} \\ &= \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{yy}\sigma_{zz} - \sigma_{zz}\sigma_{xx} + 3\sigma_{xy}^2 + 3\sigma_{yz}^2 + 3\sigma_{zx}^2} = S_Y \end{aligned} \quad (5.1)$$

όπου  $S_Y$  είναι η τάση διαρροής σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Η ποσότητα  $\sigma_E$  είναι γνωστή ως ισοδύναμη εφελκυστική τάση ή Von Mises τάση.[28]

### 5.3 ΞΕΚΙΝΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Στην ανάλυση τάσεων, είναι κοινό ότι οι περιοχές με υψηλές τάσεις είναι μικρές όταν συγκρίνονται με την ολόκληρη την κατασκευή. Μερικές φορές δεν είναι εφικτό να έχουμε ένα πλέγμα το οποίο την ίδια στιγμή καταγράφει την συνολική συμπεριφορά και επιλύει τις συγκεντρώσεις τάσεων με υψηλή ακρίβεια. Αυτό είναι ιδιαίτερα αληθές σε μη γραμμικά ή δυναμικά προβλήματα.

Τέτοια προβλήματα επιλύονται με μια τεχνική γνωστή ως submodeling. Πρώτα επιλύεται το πλήρες μοντέλο με ένα πλέγμα που αρκεί για να καταγραφεί η ακαμψία της δομής του. Σε μια δεύτερη ανάλυση δημιουργείται ένα τοπικό μοντέλο (υπομοντέλο) στην περιοχή συγκέντρωσης των τάσεων με ένα λεπτό πλέγμα, και επιλύεται χρησιμοποιώντας την μετατόπιση από το συνολικό μοντέλο ως οριακές συνθήκες.

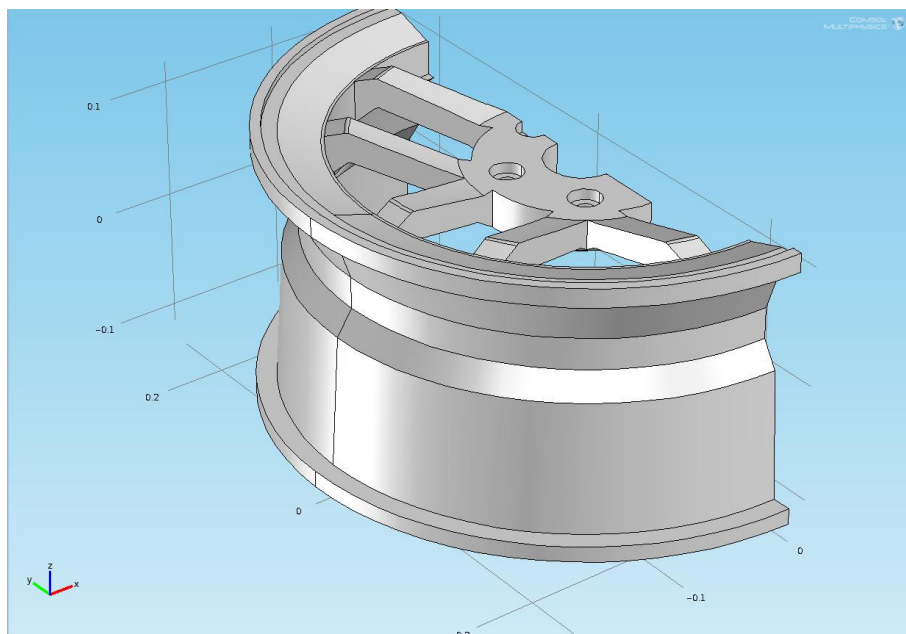
Υπάρχουν μια σειρά από βασικές παραδοχές όταν χρησιμοποιούνται υπομοντέλα:

- Το συνολικό μοντέλο είναι αρκετά ακριβείς για να δώσει σωστές μετατοπίσεις στο όριο στο υπομοντέλο.
- Οι βελτιώσεις που γίνονται στο υπομοντέλο είναι τόσο μικρές που δεν εισαγάγουν σημαντικές αλλαγές στην ακαμψία στο συνολικό επίπεδο.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτό, θα μπορούσε ακόμα είναι δυνατόν να εισαχθεί ένα μη γραμμικό υλικό τοπικά στο υπομοντέλο.

### ➤ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η ζάντα για την ανάλυση, όπου τα σχεδιαστικά στοιχεία της γεωμετρίας προκαλούν το πεπερασμένο πλέγμα του στοιχείο να γίνει είναι αρκετά μεγάλο. Το φορτίο στο ελαστικό αποτελείται τόσο από την πίεσης των ελαστικών και από ένα φορτίο που μεταφέρεται από το δρόμο μέσω του ελαστικού στη ζάντα. Σε αυτή την περίπτωση θα μελετηθεί μόνο μία κατάσταση φόρτισης η οποία είναι συμμετρική σε σχέση με τη γεωμετρία, οπότε αρκεί η χρήση του μισό της γεωμετρίας του μοντέλου όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3 Γεωμετρία της ζάντας για προσομοίωση

### ➤ ΥΛΙΚΟ

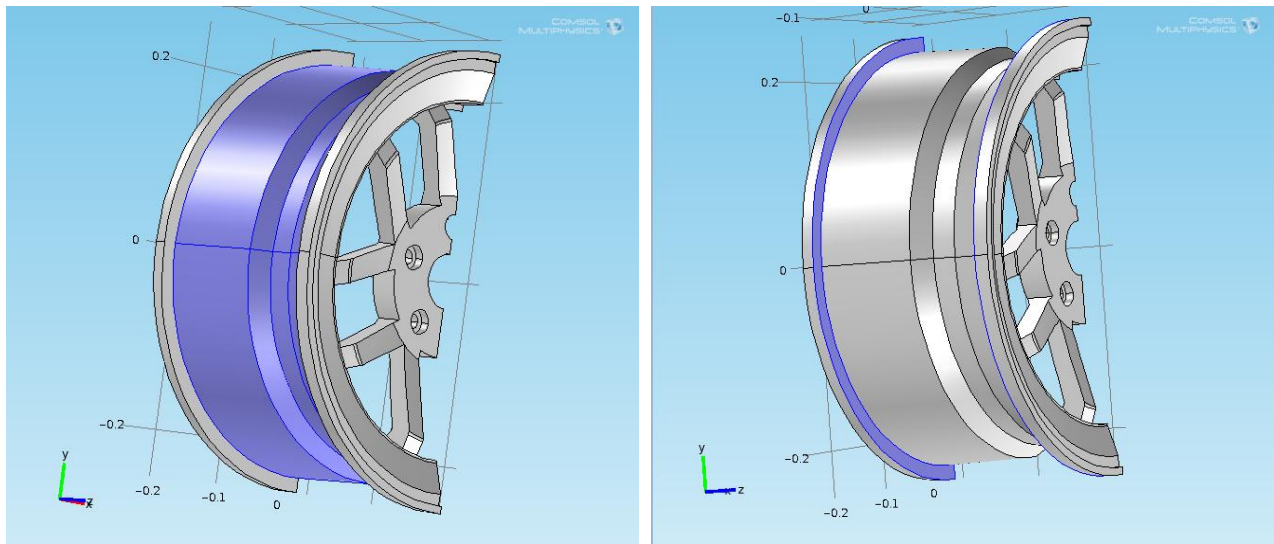
Αλουμινίου με  $E = 70 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0,33$ .

### ➤ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

- Η περιοχή γύρω από κάθε σπή της κοχλία είναι σταθερό.
- Κατάσταση Συμμετρίας (κανονική μετατόπιση καθορίζεται) στο επίπεδο συμμετρίας.

## ➤ ΦΟΡΤΙΟ

- Η πίεση των ελαστικών: Η υπερπίεση είναι 2 bar = 200 kPa.
- Το συνολικό φορτίο μεταφέρεται από το τροχό αντιστοιχεί σε ένα βάρος 1120 kg. Εφαρμόζεται σαν μία πίεση στην επιφάνεια της ζάντας όπου το ελαστικό εφαρμόζει. Έστω ότι το φορτίο διανομής στην περιφερειακή κατεύθυνση μπορεί να προσεγγιστεί ως  $p = p_0 \cos(3\theta)$ , όπου  $\theta$  είναι η γωνία από το σημείο επαφής μεταξύ του δρόμου και του ελαστικού. Η φορτωμένη περιοχή εκτείνεται έτσι  $30^\circ$  σε κάθε κατεύθυνση.



Σχήμα 5.4, 5.5 Περιοχή που εφαρμόζεται το φορτίο

## 5.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΟ COMSOL

Ξεκινώντας το λογισμικό COMSOL πρέπει να οριστεί το είδος του προβλήματος προς λύση. Το μοντέλο που μας ενδιαφέρει είναι 3 διαστάσεων στην έναρξη της προσομοίωσης στο οδηγό μοντέλου (MODEL WIZARD) στο πεδίο space dimension επιλέγουμε 3D. Στη συνέχεια, στο ίδιο μενού επιλέγεται Structural Mechanics→Solid Mechanics (solid). Έπειτα στο ίδιο πεδίο στο Studies tree, επιλέγουμε Preset Studies→Stationary και στην συνέχεια Finish.

## 5.4.1 ΓΕΝΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ (GLOBAL DEFINITIONS)

### Παράμετροι (Parameters)

Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο Global Definitions και επιλέγουμε Parameters. Έπειτα μεταβαίνουμε στο παράθυρο των ρυθμίσεων (Settings) για επιλογή παραμέτρων (Parameters). Εντοπίζουμε την ενότητα των Παράμετρων. Και στον πίνακα Παραμέτρων (Parameters table), εισάγουμε τις ακόλουθες ρυθμίσεις:

Πίνακας 5.1 Παράμετροι

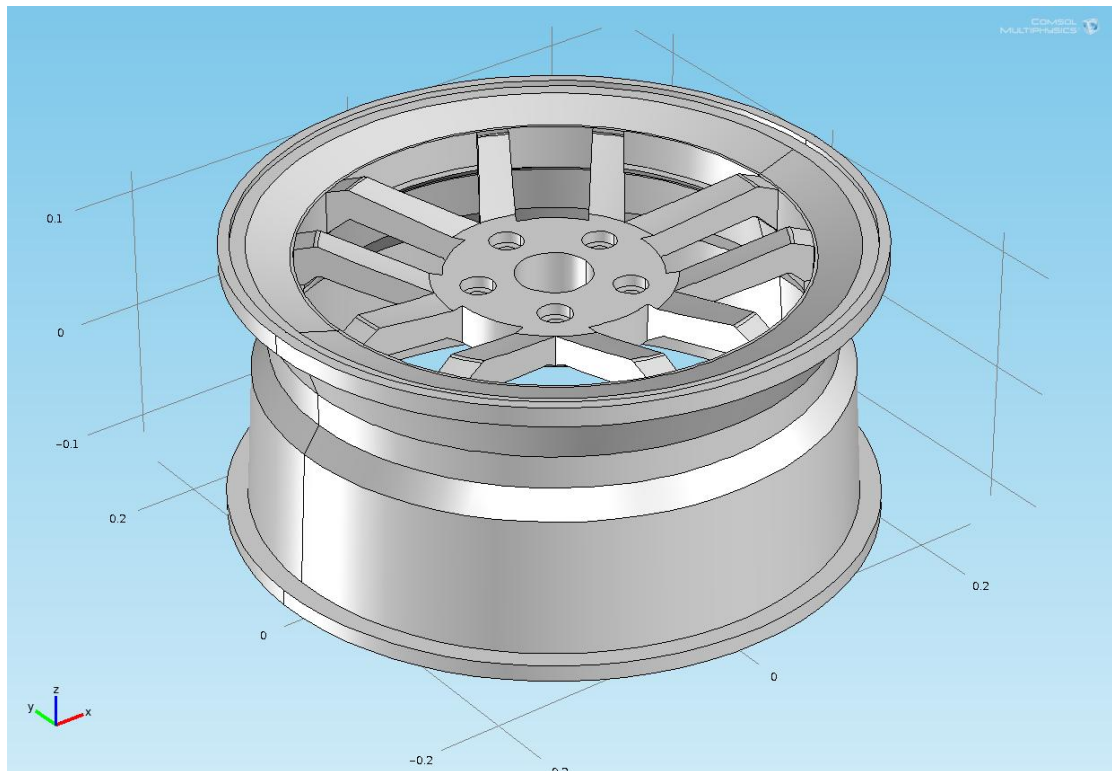
NAME	EXPRESSION	DESCRIPTION
p_infl	2[bar]	Inflation pressure
F_tire	5.194[MPa]	Peak tire load on rim

## 5.4.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 1 (GEOMETRY 1)

### Import 1

Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ Model 1→Geometry 1 επιλέγουμε Import. Στην συνέχεια μεταβαίνουμε στο παράθυρο των ρυθμίσεων (Settings) και εντοπίζουμε την επιλογή Import. Κάνουμε κλικ στην επιλογή Browse ώστε να αναζητήσουμε το μοντέλο που έχουμε σχεδιάσει για την προσομοίωση και κάνουμε κλικ στην επιλογή Import.

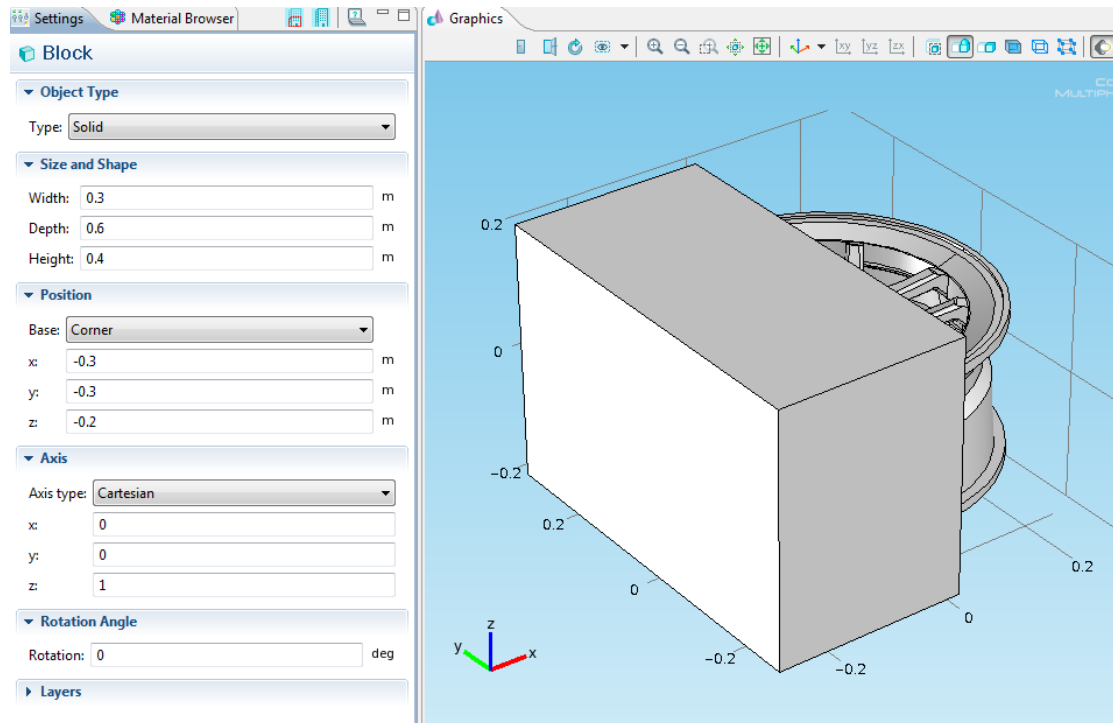
Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως θα μελετηθεί μόνο μία κατάσταση φορτισης η οποία είναι συμμετρική σε σχέση με τη γεωμετρία, οπότε αρκεί η χρήση του μισό της γεωμετρίας του μοντέλου. Επομένως πρέπει να δημιουργηθεί ένα υπομοντέλο. Ο τρόπος που έχει επιλεγεί είναι ο εξής. Θα δημιουργήσουμε ένα κουτί (Block) που θα περικλείει το μισό της ζάντας το οποίο και θα μελετηθεί στη συνέχεια.



Σχήμα 5.6 Απεικόνιση ολόκληρης της γεωμετρίας της ζάντας

## Block 1

Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ Geometry 1→Block και στην συνέχεια ορίζουμε τις διαστάσεις και το σημείο αναφοράς του κουτιού τα δεδομένα παρουσιάζονται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 Δημιουργία κουτιού και τα χαρακτηριστικά του

## Intersection 1

Στο παράθυρο του Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ Geometry 1→Boolean Operations→Intersection και επιλέγουμε την ζάντα και το κουτί.

## Form Union

Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ Form Union και επιλέγουμε Build Selected. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο σχήμα 5.3.

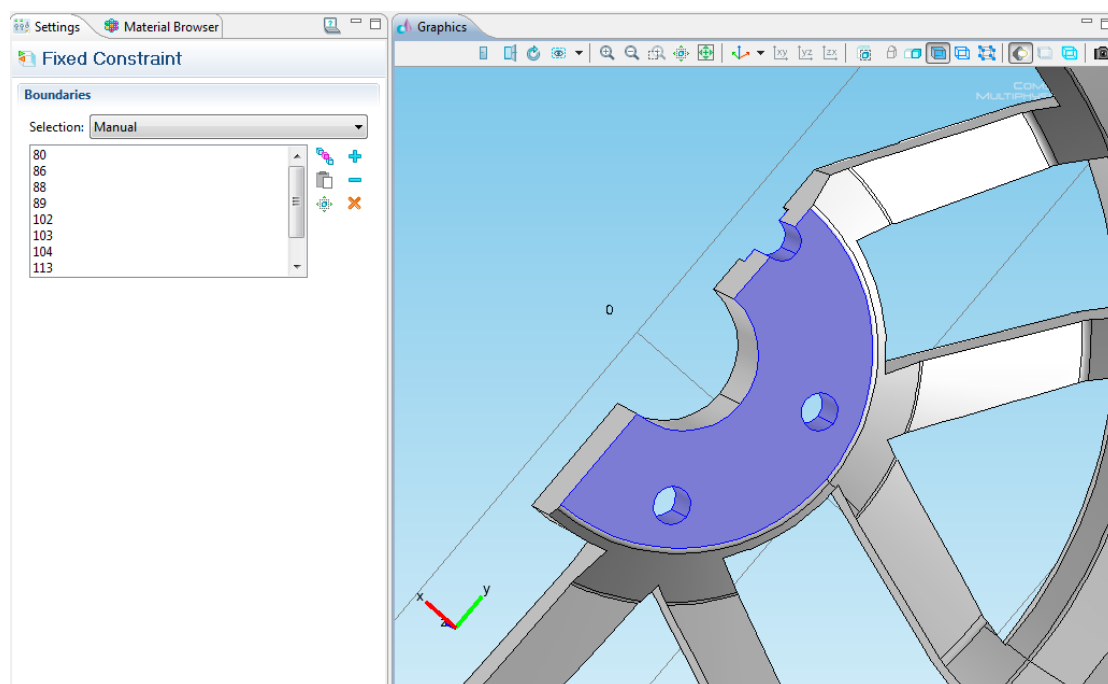
### 5.4.3 ΥΛΙΚΑ (MATERIALS)

Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ Model 1→Materials και επιλέγουμε Open Material Browser. Στο παράθυρο Material Browser εντοπίστε την ενότητα Υλικών, επιλέγουμε Built-In→Aluminum. Έπειτα κάνουμε δεξί κλικ και επιλέγουμε Add Material (Προσθήκη Υλικού) στο μοντέλο από το μενού.

### 5.4.4 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΤΕΡΑΙΩΝ (SOLID MECHANICS)

#### Fixed Constraint 1

Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο Model 1→ Solid Mechanics και επιλέγουμε Fixed Constraint. Ορίζουμε τα όρια όπως στο σχήμα 5.8.

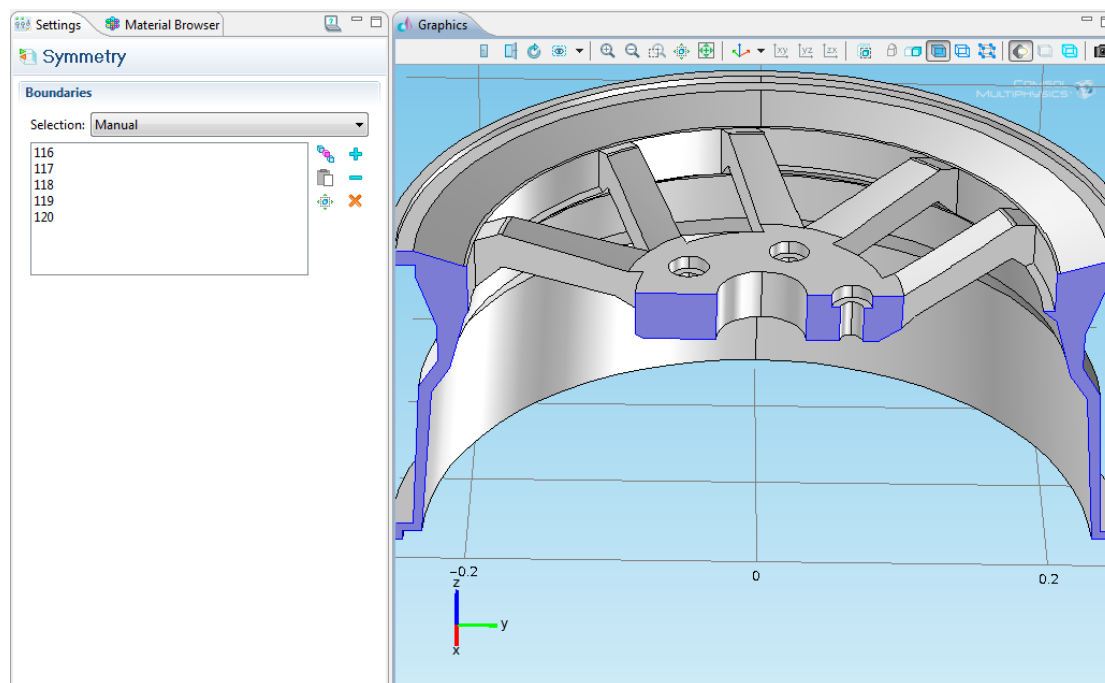


Σχήμα 5.8 Απεικόνιση περιοχών για τον περιορισμό



## Symmetry 1

Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ Solid Mechanics και επιλέγουμε Symmetry. Οι περιοχές που πρέπει να επιλεγθούν παρουσιάζονται στο σχήμα 5.9.



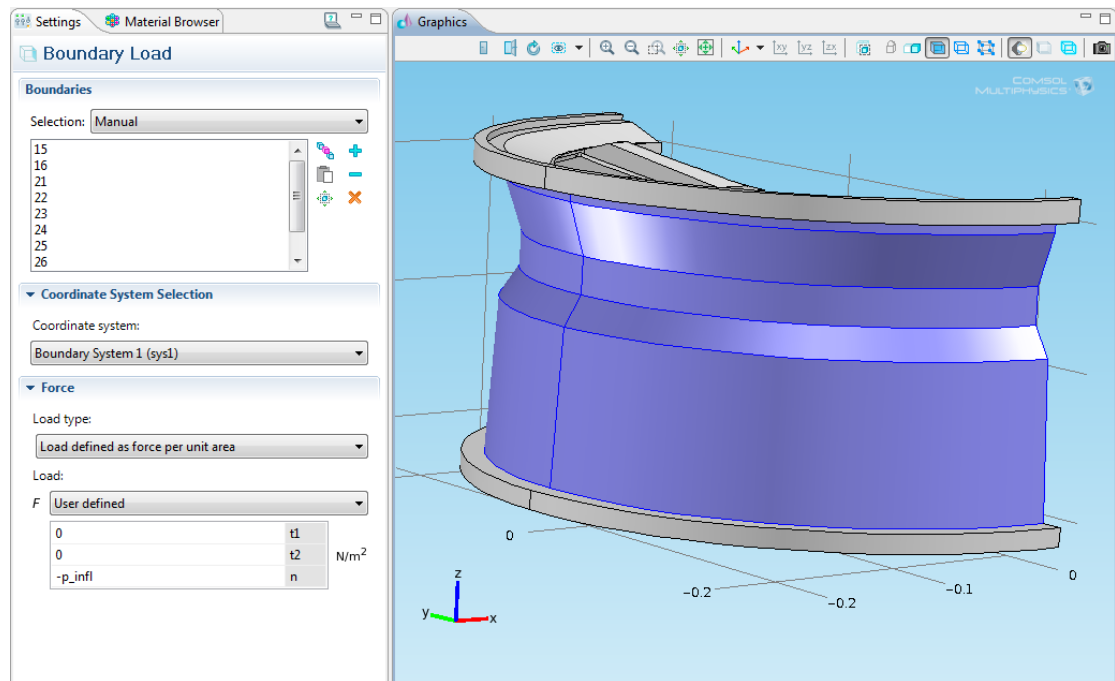
Σχήμα 5.9 Απεικόνιση περιοχών συμμετρίας

## Boundary Load 1

Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο Solid Mechanics και επιλέγουμε Load Boundary. Έπειτα πρέπει να επιλεγθούν οι περιοχές όπου ασκεί πίεση το ελαστικό όπως φαίνεται στο σχήμα 6.10. Στην συνέχεια εντοπίζουμε το τμήμα επιλογής συντεταγμένων του συστήματος (Coordinate System Selection) και από τη λίστα σύστημα συντεταγμένων επιλέγουμε System Boundary 1 (sys1). Τέλος στο τμήμα Force ορίζουμε το διάνυσμα  $F$  ως :

Πίνακας 5.2 Διάνυσμα του πρώτου φορτίου

0	t1
0	t2
-p_infl	n



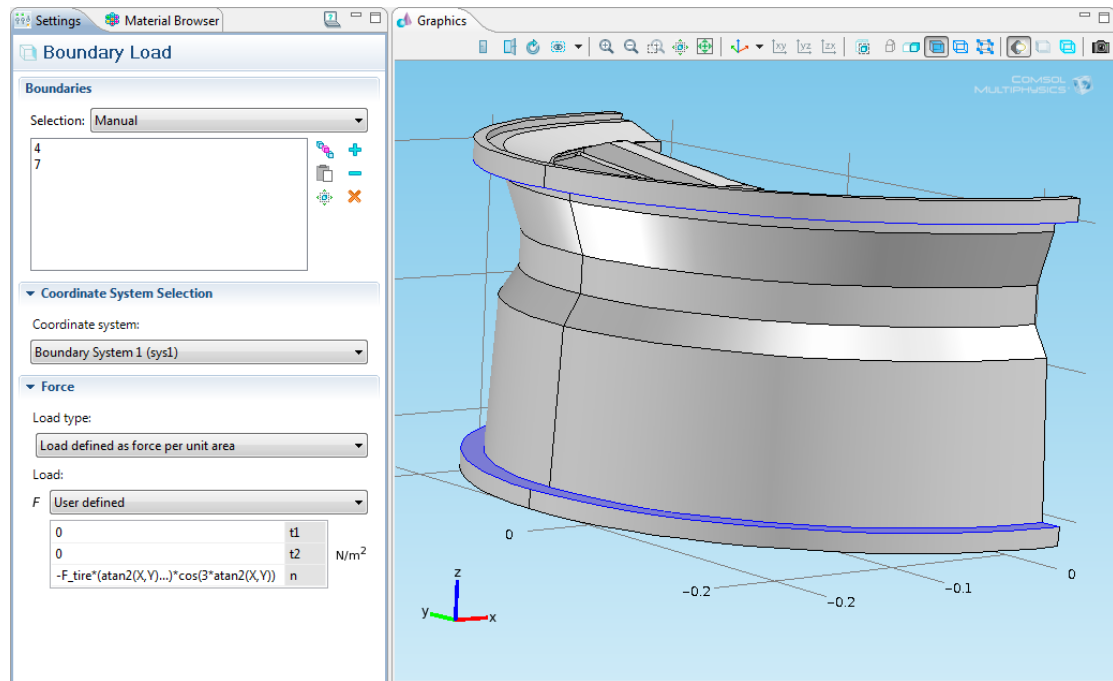
Σχήμα 5.10 Περιοχή συνοριακών συνθηκών για το πρώτο φορτίο

### Boundary Load 2

Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ Solid Mechanics και επιλέξτε Load Boundary. Έπειτα επιλέγουμε τις πλαϊνές περιοχές που εφάπτεται η ζάντα με το ελαστικό όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11. Στη συνέχεια στο παράθυρο των Ρυθμίσεων το τμήμα επιλογής συντεταγμένων του συστήματος (Coordinate System Selection), επιλέγουμε System Boundary 1 (sys1) από τη λίστα σύστημα συντεταγμένων. Τέλος στο τμήμα Force ορίζουμε διάνυσμα F ως:

Πίνακας 5.3 Διάνυσμα του δεύτερου φορτίου

0	t1
0	t2
$-F\_tire*(atan2(X,Y)<pi/6)*cos(3*atan2(X,Y))$	n



Σχήμα 5.11 Περιοχή συντοριακών συνθηκών για το δεύτερο φορτίο

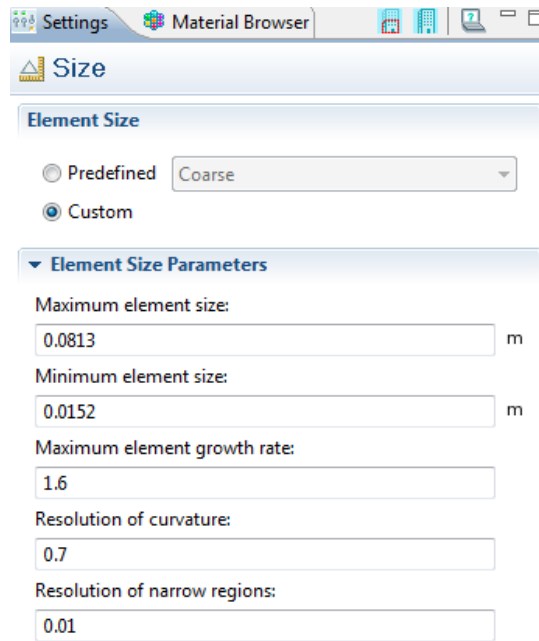
## 5.4.5 ΠΛΕΓΜΑ 1 (MESH 1)

### Size

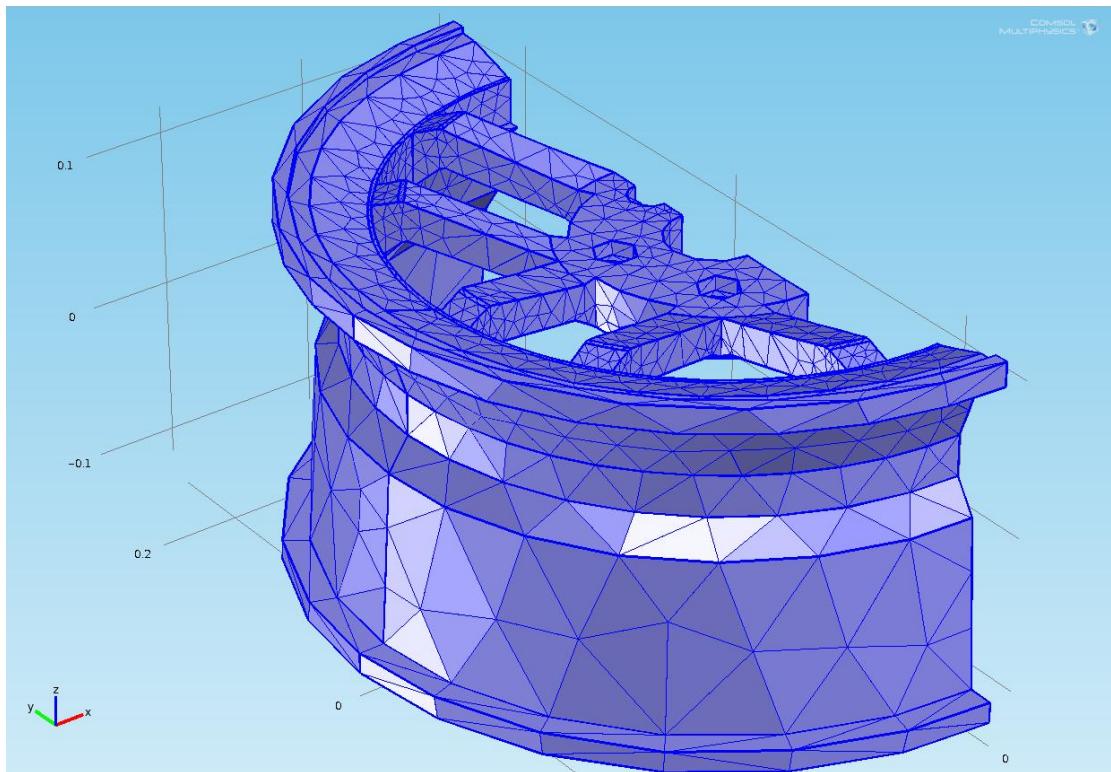
Στο παράθυρο Model Builder, επεκτείνουμε Model 1→Mesh 1, κάνουμε κλικ στην επιλογή Size. Έπειτα στο παράθυρο των ρυθμίσεων (Settings) εντοπίζουμε την ενότητα Element Size. Από την προκαθορισμένη λίστα, επιλέγουμε Coarse. Στο παράθυρο Model Builder, Size κάνουμε κλικ στην επιλογή Προσαρμογή (Custom). Εντοπίζουμε το τμήμα Element Size Parameters και πληκτρολογούμε την τιμή 0.01 Resolution of narrow regions, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.12.

### Free Tetrahedral 1

Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ στο Mesh 1 (πλέγμα 1) και επιλέγουμε Free Tetrahedral. Κάνουμε δεξί κλικ στο Free Tetrahedral 1 και επιλέγουμε Build All. Το πλέγμα (Mesh) απεικονίζεται στο σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.12 Παράμετροι πλέγματος



Σχήμα 5.13 Πλέγμα

## 5.4.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (RESULTS)

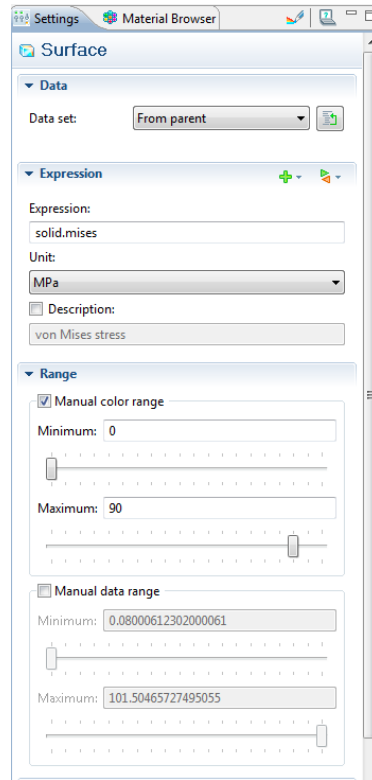
### ΜΕΛΕΤΗ 1 (STUDY 1)

Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε δεξί κλικ Study 1 και επιλέγουμε Compute.

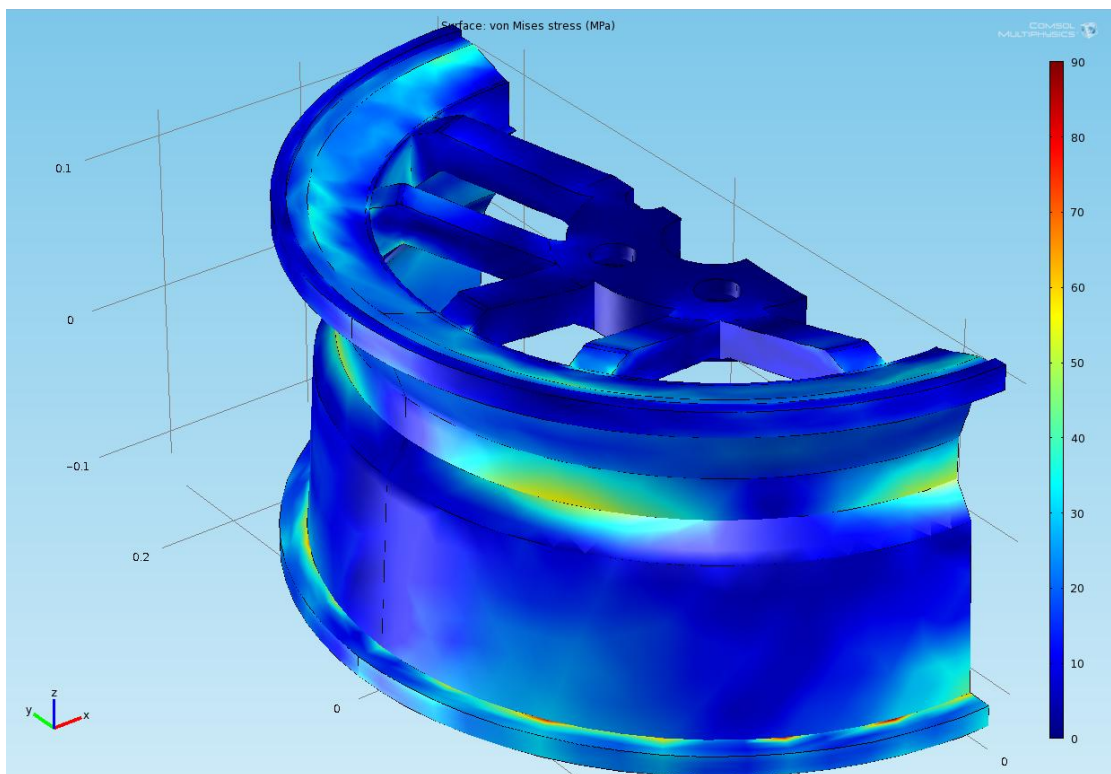
### 3D Plot Group 1

Στο παράθυρο Model Builder, επεκτείνουμε το 3D Plot Group 1, στη συνέχεια, κάνουμε κλικ στην επιλογή Surface 1. Μεταβαίνουμε στο παράθυρο των ρυθμίσεων (Settings), Surface. Στην επάνω δεξιά γωνία της ενότητας Expression, κάνουμε κλικ στην επιλογή Replace Expression. Από το μενού, επιλέγουμε Solid Mechanics→von Mises stress (solid.mises), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.14.

Στο παράθυρο Model Builder, κάνουμε κλικ στην επιλογή Surface 1. Στην ενότητα Expression από τη λίστα με τις μονάδες (Units), επιλέγουμε MPa. Κάνουμε κλικ για να αναπτύξουμε την ενότητα Range. Επιλέγουμε το κουτί Manual color range check και ως ελάχιστη τιμή πληκτρολογούμε το 0, ενώ ως μέγιστη τιμή πληκτρολογούμε το 90. Τέλος κάνουμε κλικ στο κουμπί Plot για να εμφανιστεί το αποτέλεσμα που απεικονίζεται στο σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.14 Εισαγωγή του von Mises stress



Σχήμα 5.15 Αποτέλεσμα της στατικής ανάλυσης

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

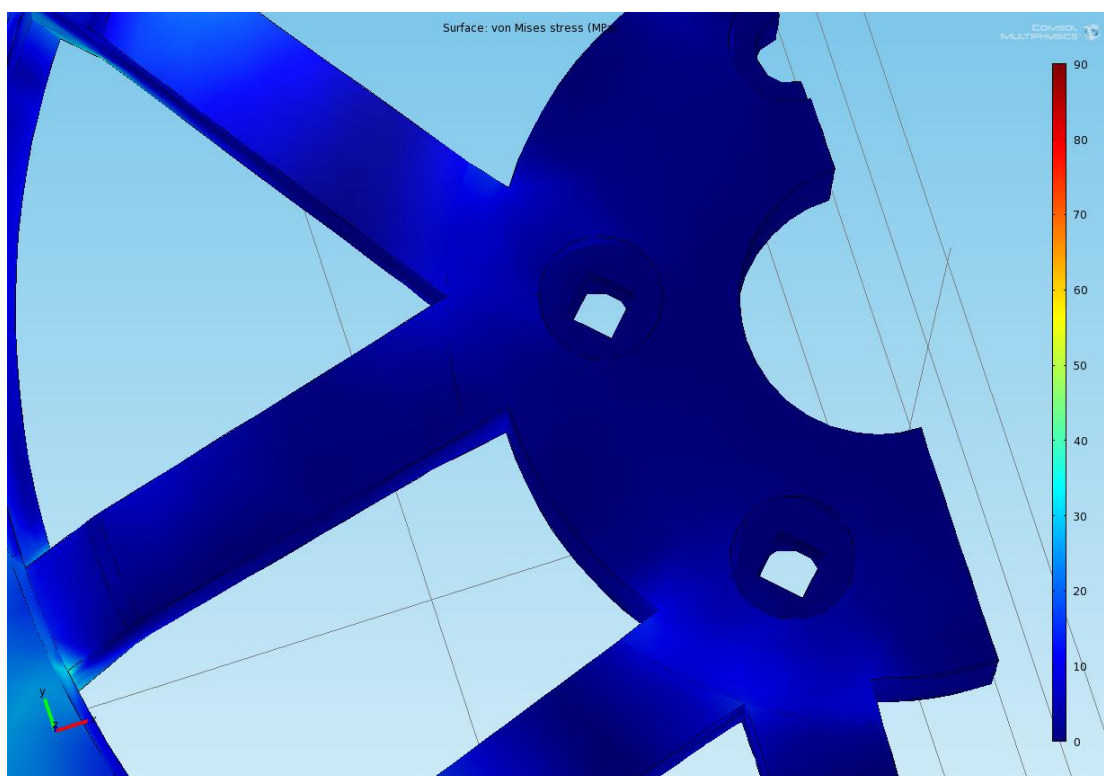
Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη της στατικής συμπεριφοράς σε μια ζάντα. Η ζάντα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση 8x18 5x120 ET45. Δηλαδή πρόκειται για μια ζάντα διαμέτρου 18” και φάρδους 8” που έχει 5 μπουλόνια με PCD 120 mm. Η ζάντα σχεδιάστηκε στο λογισμικό SOLIDWORKS. Ο βασικότερος στόχος ήταν να γίνει σωστή κατασκευή της ζάντας βάση των προδιαγραφών που να αναφέρονται στα προηγούμενα κεφάλαια όσο και μια αξιόπιστη προσομοίωση που να προσεγγίζει τα πραγματικά δεδομένα. Είναι γνωστό ότι η ανάλυση τρισδιάστατων μοντέλων με πεπερασμένα στοιχεία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες και περίπτωση σφάλματος χρειάζεται να επαναληφθεί η διαδικασία από την αρχή.

Το αποτέλεσμα είναι αρκετά ικανοποιητικό δεδομένου ότι δεν εμφανίζονται αρκετές περιοχές όπου ασκούνται μεγάλες τάσεις. Επιπλέον οι διαστάσεις της ζάντας που επιλέχθηκαν για αυτήν την εργασία αντιστοιχούν σε ζάντα για μεγάλο και βαρύ αυτοκίνητο συγκεκριμένα οι διαστάσεις και προδιαγραφές για την εν λόγω ζάντα αντιστοιχούν σε μια ζάντα αυτοκινήτου τύπου Audi, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.1 Ζάντα Audi

Στο σχήμα 5.15 παρατηρείται ότι οι περιοχές που καταπονούνται περισσότερο είναι κυρίως περιοχές που αλλάζει απότομα η καμπυλότητα ή το πάχος τους είναι μικρότερο σχέση με την υπόλοιπη κατασκευή. Πρέπει να σημειωθεί ότι η περιοχή στο καρέ της ζάντας που απεικονίζεται στο σχήμα 6.2 παρουσιάζει σχεδόν μηδενική καταπόνηση. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την σχεδίαση της ζάντας η περιοχή αυτή ενισχύθηκε επειδή επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο αυτοκίνητο.



Σχήμα 6.2 Αποτέλεσμα στο καρέ της ζάντας

Από προηγούμενες μελέτες έχει βρεθεί ότι οι ζάντες από αλουμίνιο παρουσιάζουν μικρότερες καταπονήσεις και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η περιοχή που καταπονείται περισσότερο είναι η περιοχή που μπαίνουν τα μπουλόνια. Βέβαια οι περιοχές αυτές είναι μικρές, διακρίνονται δύσκολα και ποικίλουν ανάλογα με την κατασκευή και σχεδίαση της ζάντας.[29],[30],[31]



Η προσομοίωση μπορεί να υποδείξει τις περιοχές που καταπονούνται περισσότερο με σκοπό να βελτιωθούν και επιτευχτεί καλύτερη συμπεριφορά της κατασκευής ως προς τις καταπονήσεις καθώς και να παραταθεί ο χρόνος ζωής της. Για να γίνει αυτό είναι αναγκαίο να διεξαχθούν αρκετές δοκιμές και να γίνουν πολλά πειράματα. Τέλος η προσομοίωση με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αξιόπιστη μέθοδος και πολύ αποτελεσματική για τον υπολογισμό μια στατικής μελέτης.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] SAE Handbook J175, Wheels-impact test procedures-road vehicles, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, 2001.
- [2] SAE Handbook J328, Wheels-passenger car and light truck performance requirements and test procedures, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, 2001.
- [3] Mohl Zul Hazmi Bin Mhd Fauzy, Finite Elements Analysis of car alloy wheel, Faculty of Manufacturing Engineering, April 2008
- [4] M. Riesner, R.I. DeVries, Finite element analysis and structural optimization of vehicle wheels, SAE Technical Paper 830133 (1983) 1-18.
- [5] Y.C. Yu, Hot workability of aluminum alloy, KOSEF Report, 1985, pp. 20–32.
- [6] T. Lyman, Metals Handbook, Vol. 1, Properties and Selection of Metals, American Society for Metals, Ohio, 1961, pp. 54–55.
- [7] SolidWorks User's Guide, SolidWorks Corporation, 2009
- [8] Matt Lombard: "SolidWorks 2007 Bible", Wiley Publishing, Inc 2007
- [9] Introduction to Comsol Multiphysics, 2011
- [10] Comsol Multiphysics Modeling Guide, 2008
- [11] K. Ho-Le, Finite element mesh generation methods: a review and classification, Computer-Aided Design, Volume 20, Issue 1, January–February 1988, Pages 27–38
- [12] James C. Cavendish, Automatic triangulation of arbitrary planar domains for the finite element method, Int. J. Num. Meth. Eng. , Vol. 8, Is. 4, pg 679–696, 1974
- [13] Kenji Shimada and David C. Gossard, Bubble mesh: automated triangular meshing of non-manifold geometry by sphere packing, Pages 409-419, 1995

- [14] Houman Borouchaki, Patrick Laug, Paul-Louis George, Parametric surface meshing using a combined advancing-front generalized Delaunay approach, *Int. J. for Num. Meth. in Eng.*, Vol. 49, Is. 1-2, pg 233–259, 10 - 20 September 2000
- [15] W. J. Schroeder and M. S. Shephard, A combined octree/delaunay method for fully automatic 3-D mesh generation, *Int. J. for Num. Meth. in Eng.*, Vol. 29, Is. 1, pg 37–55, January 1990
- [16] V. A. Luchnikov, N. N. Medvedev, A. Appelhagen and A. Geiger, Medium-range structure of amorphous silicon studied by the Voronoi—Delaunay method, *Molecular Physics: An International Journal at the Interface Between Chemistry and Physics*, Vol. 88, Is. 5, pg 1337-1348, 1996
- [17] S Rebay, Efficient unstructured mesh by means of Delaunay Triangulation and Bowyer-Watson Algorithm, *Journal of Computational physics*, 106, pg 125-138, 1993
- [18] B. Wördenweber, Finite element mesh generation, *Computer-Aided Design*, Vol. 16, Is. 5, September 1984, Pg 285–291
- [19] A. Bykat, Design of a recursive, shape controlling mesh generator, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 19, Issue 9, pages 1375–1390, September 1983
- [20] W.C Thacker, A Gonzalez, G.E Putland, A method for automating the construction of irregular computational grids for storm surge forecast models, *Journal of Computational Physics*, Volume 37, Issue 3, October 1980, Pages 371–387
- [21] N. Kikuchi, *Finite Element Methods in Mechanics*, Cambridge University press 1986
- [22] M. A. Yerry, M. S. Shephard, Automatic three-dimensional mesh generation by the modified-octree technique, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 20, Is. 11, pg 1965–1990, November 1984
- [23] K.-H. Jung and C. W. Lee, Image compression using projection vector quantization with quadtree decomposition, *Signal Processing: Image Communication* Volume 8, Issue 5, July 1996, Pages 379–386

- [24] Huebner H. Kenneth, The Finite Element Method for Engineers, pp. 3- 8, John Wiley & Sons, Canada, 2001
- [25] SolidWorks Reference Guide, SolidWorks Corporation, 2009
- [26] William E. Howard, Joseph C. Musto: “Introduction to solid modeling using Solidworks”, Mc Graw Hill 2006
- [27] David C.Planchard and Marie P.Planhard: “Drawing and Detailing with SolidWorks 2006”, Schroff Development Corporation 2006
- [28] Teaching Von Mises Sress from principal axes tononprincipal axes, American Society for Engineering Education, 2009
- [29] N. Satyanarayana and Ch.Sambaiah, Fatigue Analysis of Aluminum Alloy Wheel Under Radial Load, Int. J Mech Eng & Ind Eng, 2012
- [30] C.L. Chang and S.H. Yang, Finite element simulation of wheel impact test, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol 28, Is 2, June 2008
- [31] S V. Deepak<sup>1</sup>, C Naresh<sup>1</sup> and S. A. Hussain, Modelling and analysis of alloy wheel for four wheeler vehicle, Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. 2012