

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ : Τρισδιάστατη σχεδίαση γραναζιών σε συνεργασία
(εποπτικό μέσο για το Σχέδιο Γ' Εξαμήνου)
(CAD)**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΜΠΕΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΟΥΠΑΡΑΝΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ**

ΝΕΑ ΜΗΧΑΝΙΩΝΑ

2013

**ΑΚΑΔΗΜΙΑ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ : Τρισδιάστατη σχεδίαση γραναζιών σε συνεργασία
(εποπτικό μέσο για το Σχέδιο Γ' Εξαμήνου)
(CAD)**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΜΠΕΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ
ΑΜ:4211**

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ :

Βεβαιώνεται η ολοκλήρωση της παραπάνω πτυχιακής εργασίας

Ο καθηγητής

Περίληψη

Η σχεδίαση των υπό σχεδίαση δοκιμίων έγινε με πρόγραμμα πλατφόρμα τρισδιάστατης σχεδίασης. Η χρήση του προγράμματος έγινε από μηνιαία μακέτα free trial. Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα, σχεδίασης, συναρμολόγησης, μηχανικής κίνησης και δοκιμασίες αντοχής.

Κατά την διαδικασία σχεδιασμού των εν λόγο δοκιμίων, έγιναν πολλές δοκιμές διαφόρων σχεδιασμών. Τα τελικά σχέδια που επιλέχθηκαν και σχεδιάστηκαν είναι γρανάζια ναυτικών μηχανών. Πέρα από την σχεδίαση της και την συναρμολόγησή αυτών, έγινε δοκιμασία μηχανικής κίνησης (animation). Έγινε σχεδιασμός των μερών (Parts) και η συναρμολόγηση τους.

Σκοπός της εργασίας είναι η γενική περιγραφή γραναζιών που χρησιμοποιούνται σε ναυτικές μηχανές, αφού αυτό μπορεί να αποτελέσει ένα εποπτικό μέσο για την διδασκαλία των ναυτικών μαθημάτων. Αυτή η γενική περιγραφή με τις ανάλογες τομές και η μηχανική αντοχή αποτελεί το βασικό εργαλείο για την επίτευξη της αποτελεσματικής κατανόησης από τους μαθητές της Ακαδημίας.

Μετά την σχεδίαση στον ηλεκτρονικό υπολογιστή με την βοήθεια του λογισμικού επιτυγχάνεται αρχικά η εκ νέου σχεδίαση κάποιων τεμαχίων ούτως ώστε να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία τους. Σε δεύτερη φάση γίνεται ακριβής και στοχευόμενη κατασκευή τους, αφού κάποιος μπορεί να περάσει την γεωμετρία στο CAM (Computer Aided Manufacturing) και να εισάγει τον κώδικα σε αυτόματη εργαλειομηχανή CNC (Computer Numerical Control).

Abstract

The design and the assembly of gears connecting system were conducted with a CAD platform software. The software was downloaded from the official website and it is a student (free) version. By using this software, there is capability of design, assembly and simulate the function of the parts of the system, as well as their strength animations.

During the design of the system, various drawings were tested. The final result was the planning of evolving gear system of an engine ship. Except of the design and the assembly of the system, many strength animations were carried out.

The aim of these investigations is the description of the system, taking into account that this is going to be a useful supervisory tool for the teaching of the corresponding lesson. This description in addition with the cross sections plus the animation, will be the key for the fully comprehension from the students of the Academy.

After designing on Personal Computer with help of the software, initially some pieces are re-designed so they would be able to be optimized. In the second phase their construction will be targeted and precise so that someone can pass this geometry in a CAM system (Computer Aided Manufacturing) and enter the extracted code in an automatic machine tool CNC (Computer Numerical Control).

Πρόλογος

Η σχεδίαση ενός απλού εξαρτήματος, μίας απλής κατασκευής είναι μία πρόκληση για ένα σχεδιαστή μηχανικό, αφού του δίνεται η δυνατότητα να δει, να συγκρίνει και να διακρίνει οντότητες, οι οποίες είναι δύσκολο να τις φανταστεί στο επίπεδο. Αυτό είναι πολύ περισσότερο δύσκολο σε μία συναρμολογημένη διάταξη με πολλά εξαρτήματα.

Στην σημερινή εποχή δίνεται η δυνατότητα με την ευρεία χρήση των υπολογιστών και των προγραμμάτων που έχουν ανακαλυφθεί για την καλύτερη – ποιοτικότερη και αποδοτικότερη εργασία των μηχανικών.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται με την τρισδιάστατη σχεδίαση διαφόρων γραναζιών που χρησιμοποιούνται σε ναυτικές μηχανές, δίνοντας με τον τρόπο αυτό και στον πιο δύσκολο αναγνώστη μία εύκολη παρουσίαση της εικόνα των γραναζιών .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΟΡΙΣΜΟΙ, ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ, ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

1. ΤΥΠΟΙ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ

1.1 ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΓΕΝΙΚΑ

Οι οδοντωτοί τροχοί, είναι στοιχεία μηχανών που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση περιστροφικής κινήσεως και την μεταφορά ισχύος από κινητήρια σε κινούμενη άτρακτο, μέσω διαδοχικής εμπλοκής συνεργαζόμενων οδόντων. Οι οδόντες είναι σχηματισμοί αλληπάληλων εσοχών και προεξοχών στην περιφέρεια ενός οδοντωτού τροχού, τέτοιες ώστε να είναι δυνατή η συνεργασία της εσοχής του ενός τροχού με την προεξοχή του συνεργαζόμενου οδοντωτού τροχού και κατασκευάζονται με διάφορα προφίλ κατατομών, όπως αυτό της εξελιγμένης, της ορθοκυκλοειδούς, της επικυκλοειδούς, της περικυκλοειδούς και της υποκυκλοειδούς καμπύλης, ή τόξου κύκλου, ή ακόμα και σπείρας. Συνηθέστερη μεταξύ αυτών είναι η κατατομή της εξελιγμένης, η οποία είναι η καμπύλη εκείνη που διαγράφει ένα σημείο ευθείας κυλιόμενης χωρίς ολίσθηση επί κύκλου.

Στους περισσότερους τύπους οδοντωτών τροχών οι οδόντες δεν είναι θεωρητικά απαραίτητοι για την μετάδοση περιστροφικής κινήσεως. Όμως, η ανάγκη μεταφοράς μεγάλης στρεπτικής ροπής και σταθερής μετάδοσης κίνησης(δηλαδή σταθερών σχέσεων μεταδόσεως στροφών) από την κινητήρια στην κινούμενη άτρακτο καθιστά αναγκαία την ύπαρξη οδόντων. Απο κινηματικής πλευράς βέβαια, δύο συνεργαζόμενοι μετωπικοί οδοντωτοί τροχοί ισοδυναμούν με δύο κυλινδρικούς τροχούς χωρίς οδόντες, που έχουν ως άξονες περιστροφής τους ίδιους τους άξονες των οδοντωτών τροχών και μπορούν να περιστραφούν παραμένοντας σε επαφή χωρίς να ολισθαίνουν ο ένας ως προς τον άλλον.

1.2 ΜΕΤΩΠΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

Τα γρανάζια αυτού του τύπου μεταδίδουν την κίνηση μεταξύ παραλλήλων αξόνων. Η αρχική μεταλλική επιφάνεια από την κατεργασία της οποίας προκύπτουν τα μετωπικά γρανάζια έχει κυλινδρική μορφή. Τα δόντια των γραναζιών μπορούν να είναι είτε παράλληλα, είτε κεκλιμένα προς τον άξονα τους, είτε να σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία. Τα παράλληλα τοποθετημένα γρανάζια μπορούν να είναι σε επαφή είτε εξωτερικά είτε εσωτερικά (δηλαδή το ένα να είναι μέσα στο άλλο), ενώ η κεκλιμένη οδόντωση μπορεί να είναι είτε απλή είτε διπλή. Τα γρανάζια με κεκλιμένα ή ελικοειδή δόντια υπερτερούν των γραναζιών με ευθεία δόντια διότι έχουν μεγαλύτερη αντοχή και προκαλούν λιγότερο θόρυβο κατά τη λειτουργία τους.

Οι διάφοροι τύποι μειωτήρων καθορίζονται από τη μετατροπή της κίνησης που είναι επιθυμητή και αξιοποιούν διάφορους τύπους γραναζιών από αυτούς που προαναφέρθηκαν προκειμένου να επιτύχουν τη ζητούμενη σχέση μετάδοσης. Στους διάφορους τύπους άλλωστε των μειωτήρων χρησιμοποιούνται και οι αντίστοιχοι τύποι γραναζιών. Για παράδειγμα σε ένα ευθύγραμμο μειωτήρα που είναι μειωτήρας παράλληλων αξόνων χρησιμοποιούνται μετωπικά γρανάζια, ενώ στους γωνιακούς μειωτήρες χρησιμοποιούνται κωνικά γρανάζια ή γρανάζια ατέρμονα κοχλία κορώνας.

1.3 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ

Τα κωνικά γρανάζια χρησιμοποιούνται για μεταδόσεις κίνησης σε άξονες είτε τεμνόμενους, είτε ασύμβατους. Η αρχική μεταλλική επιφάνεια από την κατεργασία της οποίας προκύπτουν τα κωνικά γρανάζια έχει μορφή κόλουρου κώνου. Στα γρανάζια που μεταδίδουν κινήσεις μεταξύ αξόνων οι οποίοι τέμνονται υπό τυχούσα γωνία τα δόντια τους είναι είτε ευθεία, είτε ελικοειδή. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται κωνικά γρανάζια με δόντια που έχουν καμπύλη μορφή, είτε αυτά είναι τόξα κύκλου είτε τμήματα σπειροειδών καμπυλών. Στα γρανάζια που μεταδίδουν κινήσεις μεταξύ αξόνων οι οποίοι είναι ασύμβατοι τα δόντια τους είναι ελικοειδή. Χρησιμοποιούνται πάντως για τη μετάδοση της κίνησης σε ασύμβατους άξονες οι οποίοι έχουν μικρή σχετικά μεταξύ τους απόσταση.

Τα κωνικά γρανάζια που μεταδίδουν κίνηση σε ασύμβατους άξονες έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης από εκείνα που μεταδίδουν κίνηση σε τεμνόμενους άξονες διότι κατά τη λειτουργία τους αναπτύσσονται επ αυτών αυξημένες δυνάμεις τριβής ολίσθησης. Για τη μετάδοση των κινήσεων σε ασύμβατους άξονες χρησιμοποιούνται

και τα κοχλιωτά γρανάζια. Ωστόσο αυτά βρίσκουν κυρίως εφαρμογή σε μικρές σχετικά φορτίσεις αλλά και μικρότερες σχέσεις μετάδοσης.

1.4 ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΚΑΝΟΝΑΣ

Ο οδοντωτός κανόνας συνιστά ένα γρανάζι το οποίο προέκυψε από την κατεργασία μιας μεταλλικής επιφάνειας που είχε μορφή διαμήκους ράβδου. Τα δόντια του δεν είναι διαταγμένα επί κύκλου, αλλά επί ευθείας. Επιτυγχάνει μια μετάδοση κίνησης «μετωπικού τύπου» και καταφέρνει να μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε ευθύγραμμη και το αντίστροφο.

1.5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΤΕΡΜΟΝΑ – ΚΟΡΩΝΑΣ

Μια άλλη διάταξη μετάδοσης κίνησης μεταξύ ασύμβατων αξόνων με κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις είναι το σύστημα ατέρμονα κοχλία γραναζιού. Εδώ έχουμε έναν ατέρμονα κοχλία που φέρει κεκλιμένα δόντια και λειτουργεί σαν γρανάζι. Ο άξονας του ατέρμονα εφάπτεται στην περιφέρεια του γραναζιού στο οποίο μεταδίδεται η κίνηση. Αυτός ο τύπος μετάδοσης κίνησης έχει μικρό σχετικά βαθμό απόδοσης, αλλά προσφέρει το πλεονέκτημα της αθόρυβης λειτουργίας γιατί επιτυγχάνει απορρόφηση των δονήσεων.

1.6 ΕΠΙΚΥΚΛΙΚΗ ΟΔΟΝΤΩΣΗ

Στη διάταξη αυτού του τύπου που προσομοιάζει στο πλανητικό σύστημα έχουμε ένα κεντρικό γρανάζι που καταλαμβάνει τη θέση του ήλιου και μια σειρά γραναζιών πλανητών που συνδέονται με τα δόντια του κεντρικού γραναζιού. Η πλανητική διάταξη προσφέρει τη δυνατότητα για μετάδοση μεγάλης ισχύος καθώς επίσης και για μεγάλες σχέσεις μετάδοσης.

Οι πλανητικές οδοντώσεις έχουν λίγο μεγαλύτερο κόστος από τις άλλες γιατί περιλαμβάνουν μεγαλύτερο αριθμό γραναζιών, έχουν όμως παράλληλα το πλεονέκτημα ότι συχνά καταλαμβάνουν μικρό χώρο και έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης.

1.7 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

Έστω δύο τροχοί πλήθους οδόντων Z_1 και Z_2 . Η γωνία περιστροφής του πρώτου ϕ_1 , δεν αντιστοιχεί σε γωνία περιστροφής του δεύτερου $\phi_2 = \phi_1(Z_1/Z_2)$, όπως προβλέπεται θεωρητικά, αλλά σε κάποια κοντινή της τιμή. Η διαφορά μεταξύ της

προβλεπόμενης τιμής για τη ϕ_2 και της πραγματικής καλείται σφάλμα μετάδοσης (transmission error).

Οι αιτίες μπορεί να είναι:

- α) τα όποια κατασκευαστικά σφάλματα του τροχού, και ακόμα
- β) η πιθανή παραμόρφωση του οδόντα υπό καθεστώς φόρτισης.

Το σφάλμα μετάδοσης είναι η κύρια πηγή διέγερσης των προκαλούμενων κραδασμών, οι οποίοι ευθύνονται για τη δυναμική φόρτιση των οδοντωτών τροχών, όπως προέκυψε από την πειραματική παρατήρηση του φαινομένου.

Όσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα μετάδοσης, τόσο εντονότερη είναι η εμφάνιση θορύβου και κραδασμών, που σαφώς επιδρά αρνητικά στην αντοχή των μηχανικών μερών και την απόδοση της μετάδοσης της κίνησης. Εδώ υπεισέρχεται ο έλεγχος ποιότητας, η μέθοδος δηλαδή εξασφάλισης ενός μέγιστου επιπέδου σφάλματος, σύμφωνα με ό,τι απαιτούν οι προδιαγραφές της εκάστοτε εφαρμογής.

1.8 ΕΙΔΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Κατασκευαστικά σφάλματα:

- α) κατατομής κοπτικού εργαλείου
- β) τοποθέτησης
 - ανισομέρειες στο βήμα
 - οδοντώσεις στραμμένες κατά ορισμένη γωνία σε σχέση με την προβλεπόμενη (λάθος γωνία)
 - εσφαλμένη κατατομή πάχους οδόντα (έκκεντρη ή λανθασμένη απόσταση κοπτικού)

Απλά σφάλματα:

- Βήμα (στον αρχικό ή στο βασικό κύκλο)
- Πάχος οδόντα
- Κατατομή
- Εκκεντρότητα

Η υπέρθεση των ανωτέρω σφαλμάτων αποτελεί το σύνθετο σφάλμα

Βλάβες οδοντωτών τροχών

Αιτίες που προκαλούν τις βλάβες οδοντωτών τροχών:

Μερικές από τις αιτίες που προκαλούν την αστοχία των οδοντωτών τροχών είναι:

- Η σημειακή υπερφόρτιση των κατατομών, η οποία είναι το αποτέλεσμα κρουστικών φορτίων. Σαν αποτέλεσμα αυτής έχουμε την δημιουργία ραβδώσεων επί των κατατομών του οδοντωτού τροχού που απογυμνώνουν τον οδόντα.
- Η υπερβολική ταχύτητα περιστροφής(πέραν του επιτρεπτού): Το αίτιο αυτό ισχύει για μηχανισμούς, οι οποίοι δεν έχουν συστήματα μέτρησης και ελέγχου της ταχύτητας. Οι τροχοί αυτοί λοιπόν, είναι πιθανό να εργάζονται σε στροφές μεγαλύτερες του επιτρεπτού ορίου.
- Τα ξένα σωματίδια: Η ύπαρξη οιοδήποτε ξένου σωματιδίου στις συνεργαζόμενες κατατομές δημιουργεί επαφή στερεού με στερεό, η οποία προκαλεί τοπική συγκόλληση και φυσικά πρέπει να αποφεύγεται.
- Η ακατάλληλη θερμική κατεργασία: Οι οδόντες συνήθως υφίστανται επιφανειακή σκλήρυνση, η οποία όμως θα είναι ακατάλληλη αν το πάχος σκληρύνσεως προκύψει ανομοιόμορφο επί της επιφάνειας των οδόντων του τροχού. Η ακατάλληλη λίπανση στις οδοντώσεις: Γενικά στους οδοντωτούς τροχούς συνίσταται η χρήση λιπαντικού κατάλληλου για υψηλές πιέσεις, διότι η επαφή των κατατομών είναι συνήθως μόνο γραμμική. Το σύστημα λιπάνσεως, θα πρέπει να μπορεί να λιπώνει όλες τις θέσεις εργασίας, το δε λιπαντικό θα πρέπει να παραμένει επί της κατατομής του οδόντος μέχρι την στιγμή της επαφής των κατατομών. Εάν κάτι τέτοιο δεν καθίσταται δυνατόν και η λειτουργία της βαθμίδας γίνεται χωρίς την χρήση του απαραίτητου λιπαντικού, τότε η λίπανση είναι ακατάλληλη. Μέσα από το λιπαντικό μεταφέρονται και τα ξένα σωματίδια για τα οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως. Είναι απαραίτητο λοιπόν, το λιπαντικό φιλτράρεται και να είναι απαλλαγμένο από οιαδήποτε πρόσμιξη που αποτελεί απειλή για τα γρανάζια. Ακόμα, η θερμοκρασία του θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να απομακρύνει από τις θέσεις εργασίας των κατατομών το παραγόμενο, λόγω τριβής, ποσό θερμότητας.
- Η ακατάλληλη κατασκευή: Οι κατατομές των δοντιών πρέπει να έχουν κατασκευασθεί με ακρίβεια, τα δε fillets(πόδες) των οδόντων πρέπει να είναι τα προβλεπόμενα.
- Η ακατάλληλη συναρμολόγηση.

Οι περισσότερες των περιπτώσεων που έχουν σχέση με την κακή συναρμολόγηση των οδοντωτών τροχών αναφέρονται παρακάτω:

A) Χαλαρή πρόσδεση, των τροχών στους άξονες, των αξόνων στα ρουλεμάν ή των ρουλεμάν στο κέλυφος, μπορούν να προκαλέσουν μεταξύ των άλλων και δονήσεις από αζυγοσταθμία.

B) Κακή ευθυγράμμιση.

Γ) Λάθος απόσταση μεταξύ των κέντρων των συνεργαζόμενων τροχών, που δημιουργεί απρόβλεπτες δυνάμεις που προκαλούν βλάβη στα γρανάζια. Η μελέτη και η κατασκευή μιας διάταξης, η οποία θα αυξομειώνει με μεγάλη ακρίβεια την απόσταση των κέντρων μεταξύ των οδοντωτών τροχών, έτσι ώστε να εξυπηρετείται η εναλλαξιμότητα μεταξύ των διάφορων συνεργαζόμενων γραναζιών(τα οποία θα έχουν υποστεί εξαρχής κάποιες «τεχνητές» βλάβες.

Δ) Η κακή σχεδιομελέτη. Στην κατασκευή των οδοντωτών τροχών, ο μελετητής θα πρέπει να ακολουθήσει την καλύτερη διαθέσιμη τεχνική για να εφοδιάσει τους τροχούς με ακριβή και κατάλληλα μεγέθη, όπως διάμετρο αρχικού κύκλου, πλάτος, υλικό και επιφανειακές κατεργασίες (π.χ θερμική). Πρέπει να μελετηθεί επίσης προσεκτικά, η εκλογή του κατάλληλου ζεύγους οδοντωτών τροχών και να γίνει λεπτομερής ανάλυση των δυνάμεων, πριν αρχίσει η διαδικασία κατασκευής του μηχανισμού.

1.9 ΓΕΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ

Είναι εύκολα κατανοητό ότι η καλή και αποδοτική λειτουργία μιας βαθμίδας οδοντωτών τροχών εξαρτάται από το αν λειτουργεί σύμφωνα(ή με μικρές ανοχές) ή όχι με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Αυτά είναι:

A) Η απώλεια ισχύος. Η λόγω τριβής απώλεια ισχύος και η μετατροπή της σε θερμότητα είναι μια καλή ένδειξη για τον τρόπο λειτουργίας των τροχών. Αυτό το ποσό της θερμότητας μετράται και συγκρίνεται με το προϋπολογισθέν. Η μετρηθείσα θερμότητα πρέπει να είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με την προϋπολογισθείσα για να λέμε ότι ο μηχανισμός λειτουργεί αποδοτικά.

B) Οι ταλαντώσεις. Ένα κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να παράγει ταλαντώσεις μέσα σε προβλεπόμενα όρια. Η δυναμική ζυγοστάθμιση είναι από τις πρώτες ενέργειες που θα γίνουν για τα περιστρεφόμενα μέρη του κιβωτίου. Προβλήματα ταλαντώσεων μπορούν να δημιουργήσουν τα εξής:

1. Ένας ελαστικός σύνδεσμος που κολλάει σε μια μη ζυγοσταθμισμένη θέση.
2. Κατασκευαστικά σφάλματα ή λειτουργικά λάθη των κατατομών.
3. Η κακή συναρμολόγηση ή ευθυγράμμιση των εξαρτημάτων του κιβωτίου.

Βεβαία, η καλή ή η κακή λειτουργία ενός στοιχείου μηχανής μπορεί να διαπιστωθεί με την βοήθεια των συστημάτων παρακολούθησης - μέτρησης, ύστερα (πάντα) από επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και παρακολουθήσεις. Τέτοιες μετρήσεις είναι:

Μέτρηση των κρουστικών παλμών.

- Παρακολούθηση του επιπέδου δονήσεων-κραδασμών.
- Ανίχνευση βλαβών με θερμογράφηση.
- Μελέτη των ιδιοτήτων του λιπαντικού
- Μέτρηση των παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας.
- Οπτική επιθεώρηση.
- Άλλες μη καταστροφικές τεχνικές δοκιμών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ ΣΤΑ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΠΛΟΙΑ

2.1 ΑΝΤΛΙΕΣ

Αντλίες γενικά ονομάζονται μηχανήματα, που αναρροφούν υγρό από ένα χώρο και το καταθλίβουν με πίεση σε άλλο. Για να πραγματοποιήσουν το σκοπό τους καταναλώνουν μηχανικό έργο και δημιουργούν δυναμική ή κινητική ενέργεια στο υγρό. Γι' αυτό χαρακτηρίζονται ως εργομηχανές, σε αντιδιαστολή με τις γνωστές μας κινητήριες μηχανές.

Για τη λειτουργία των αντλιών χρησιμοποιούνται μηχανήματα, που την κινούν και λέγονται κινητήρια μηχανήματα της αντλίας. Αυτά μπορεί να είναι ατμομηχανές, ατμοστρόβιλοι, μηχανές Diesel ή αεροστρόβιλοι, βενζινομηχανές και σε μεγάλη κλίμακα ηλεκτροκινητήρες. Μπορεί όμως μία αντλία μικρής παροχής να είναι και χειροκίνητη.

Όταν μία αντλία κινείται από ανεξάρτητο μηχανήμα ονομάζεται ανεξάρτητη. Όταν όμως κινείται από κινητό μέρος της κύριας μηχανής μέσω οδοντωτών τροχών, ιμάντα, διατάξεως έκκεντρου και διωστήρα ή ζυγού, τότε καλείται εξαρτημένη.

Οι αντλίες αποτελούν σπουδαιότατα μηχανήματα των ναυτικών εγκαταστάσεων. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί με επαρκή λεπτομέρεια και τις αναγκαίες από τις γνώσεις της Υδραυλική για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας των αντλιών.

2.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ

Οι αντλίες των ναυτικών εγκαταστάσεων κατατάσσονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Τις αντλίες εκτοπίσεως και τις κεντρόφυγες αντλίες.

α) Αντλίες εκτοπίσεως.

Σ' αυτές το υγρό μετακινείται από την αναρρόφηση προς την κατάθλιψη με μηχανική μεταβολή του όγκου ενός ή περισσοτέρων θαλάμων.

Υποδιαιρούνται:

Στις **εμβολοφόρες**, στις οποίες ένα έμβολο μηχανικά κινούμενο παλινδρομεί μέσα στον κύλινδρο του υγρού.

Στις **περιστροφικές**, στις οποίες το υγρό συμπιέζεται μέσα στον κύλινδρο ή κέλυφος της αντλίας από κατάλληλα περιστρεφόμενους λοβούς ή έμβολα.

β) Αντλίες κεντρόφυγες.

Σ' αυτές το υγρό μετακινείται με την κεντρόφυγα δύναμη, η οποία μεταδίδεται σ' αυτό από κατάλληλο περιστρεφόμενο στροφέιο ή στροφέια, μέσω των οποίων το υγρό ρέει από την αναρρόφηση στην κατάθλιψη.

Κατ' άλλη κατάταξη οι αντλίες υποδιαιρούνται σε **παλινδρομικές** και **περιστροφικές**.

Ως παλινδρομικές νοούνται οι **εμβολοφόρες εκτοπίσεως**.

Οι περιστροφικές εξάλλου υποδιαιρούνται σε:

I) Περιστροφικές αντλίες εκτοπίσεως, που καλούνται και ογκομετρικού τύπου ή ογκομετρικές (volumetric type) και

II) Περιστροφικές αντλίες ροής. Οι τελευταίες υποδιαιρούνται σε:

-Περιστροφικές ακτινικής ροής (π.χ. σε φυγοκεντρικές) και

-Περιστροφικές αξονικής ροής (π.χ. οι αντλίες με έλικα).

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο κατατάξεως που ακολουθεί κανείς, στις επόμενες παραγράφους θα περιγράψουμε τις αντλίες κατά την ακόλουθη σειρά:

α) Εμβολοφόρες παλινδρομικές,

β) περιστροφικές ογκομετρικού τύπου,

γ) φυγοκεντρικές και αντλίες με έλικα.

2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ

Κάθε αντλία χαρακτηρίζεται από ορισμένα βασικά στοιχεία, που προσδιορίζουν τις ικανότητες της. Τα στοιχεία αυτά είναι:

α) Τα διάφορα ύφη της αντλίας.

β) Η παροχή της.

γ) Οι διάφοροι βαθμοί αποδόσεως και το έργο της.

δ) Η ισχύς ή ιπποδύναμη που απαιτείται για την κίνηση της.

Από τα στοιχεία αυτά θα εξετασθούν αμέσως όσα αφορούν τα διάφορα ύψη των αντλιών. Τα αναφερόμενα στην παροχή, βαθμούς αποδόσεως, έργο και ισχύ των αντλιών θα αναπτυχθούν μετά την ολοκλήρωση της περιγραφής των διαφόρων τύπων αντλιών.

2.4 Η ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ

Η αναρρόφηση της αντλίας οφείλεται στο κενό που δημιουργεί η αντλία μέσα στο θάλαμο της. Το κενό αυτό είναι, κατά τα γνωστά, μία απόλυτη πίεση μικρότερη από εκείνη που επικρατεί στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού και η οποία συνήθως είναι η ατμοσφαιρική ή ορθότερα η κάθε φορά βαρομετρική πίεση. Έτσι το υγρό λόγω της διαφοράς αυτής των πιέσεων αναγκάζεται να κινηθεί μέσα στη σωλήνωση της αναρροφήσεως από το χώρο της ψηλότερης πίεσεως, δηλαδή της ατμοσφαιρικής, προς το χώρο της χαμηλότερης, δηλαδή προς το θάλαμο αναρροφήσεως της αντλίας.

Η διαφορά όμως αυτή των πιέσεων μπορεί να φθάσει το πολύ την τιμή της μιας ατμόσφαιρας ή της εκάστοτε βαρομετρικής πίεσεως και αυτό, αν υποθεθεί ότι η υποπίεση που δημιουργεί η αντλία, φθάνει στο τέλειο κενό. Αυτό όμως είναι σχεδόν αδύνατο στην πράξη.

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι το μέγιστο θεωρητικό ύψος, από το οποίο θα μπορούσε να αναρροφήσει μία αντλία είναι 10,33 m ή 34,5 ft.

Το πραγματικό όμως ύψος αναρροφήσεως της, από το οποίο νοείται η πραγματική ικανότητα της αντλίας για αναρρόφηση, είναι αισθητά μικρότερο από το θεωρητικό, δεδομένου ότι η ικανότητα αυτή της αντλίας επηρεάζεται κατά ποικίλους τρόπους από διάφορους παράγοντες όπως:

α) Από τη θερμοκρασία του υγρού

Όσο θερμότερο είναι το υγρό, τόσο δυσκολότερα το αναρροφά η αντλία. Αυτό συμβαίνει γιατί κάτω από την επήρεια του κενού στην αναρρόφηση διευκολύνεται η εξάτμιση του υγρού, ώστε να δημιουργούνται ατμοί, που καταλαμβάνουν χώρο και εμποδίζουν την αναρρόφηση. Η εξάτμιση αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι και η θερμοκρασία του υγρού.

Το φαινόμενο έχει ιδιαίτερη σημασία σε περιπτώσεις αντλήσεως ορισμένων υγρών καυσίμων, τα οποία και σε χαμηλές έστω θερμοκρασίες αναδίδουν μεγάλη ποσότητα πτητικών, οπότε αν η παραγωγή ατμών είναι μεγάλη, δυσχεραίνεται η άντληση τόσο πολύ ώστε και να διακόπτεται καμιά φορά η φλέβα της αναρροφήσεως.

Σε περιπτώσεις, όπου η θερμοκρασία του υγρού που αναρροφάται είναι μεγάλη, η αντλία εγκαθίσταται πολύ χαμηλά, καμιά φορά και χαμηλότερα από τη στάθμη του προς αναρρόφηση υγρού' έτσι θα έχουμε εξασφαλισμένη ικανότητα αναρροφήσεως, οπότε και το στατικό ύψος αναρροφήσεως θα είναι αρνητικό. Αυτό συμβαίνει π.χ. στις αντλίες συμπυκνώματος του ψυγείου ή στις αντλίες τροφοδοτικού νερού λεβήτων, που αναρροφούν από την εξαεριστική δεξαμενή (deaerator) καθώς και σε άλλες παρόμοιες περιπτώσεις.

β) Από το ειδικό βάρος του υγρού

Από αυτό εξαρτάται το βάρος του υγρού που περιέχεται στη στήλη της αναρροφήσεως και συνεπώς επηρεάζεται ανάλογα η ικανότητα αναρροφήσεως της αντλίας. Αντιλαμβανόμαστε ότι όσο ειδικά ελαφρότερο είναι το υγρό, τόσο ευκολότερα το αναρροφά η αντλία και αντίστροφα.

γ) Από το ιξώδες του υγρού

Αυτό όπως γνωρίζουμε αποτελεί το μέτρο της ρευστότητας ενός υγρού και με βάση το συντελεστή ιξώδους τους χαρακτηρίζονται τα υγρά ως παχύρρευστα και λεπτόρρευστα. Εύκολα αντιλαμβανόμαστε ότι όσο πιο λεπτόρρευστο είναι ένα υγρό, τόσο ευκολότερα το αναρροφά η αντλία, και αντίστροφα.

δ) Από τις αντιστάσεις στη σωλήνωση της αναρροφήσεως

Όσο λιγότερες είναι οι αντιστάσεις, τόσο ευκολότερα αναρροφά η αντλία. Οι αντιστάσεις αυτές είναι πάντοτε μικρότερες, όταν η διάμετρος του σωλήνα είναι μεγαλύτερη, επίσης όταν οι σωλήνες είναι ίσοι χωρίς πολλές καμπύλες και λείοι εσωτερικά, ώστε να μη δημιουργούνται δυνάμεις τριβής του υγρού με τα τοιχώματά τους, ή όταν παρεμβάλλονται στη σωλήνωση τα λιγότερα κατά το δυνατόν όργανα ρυθμίσεως και ελέγχου. Οι αντιστάσεις αυτές υπολογίζονται πειραματικά και με εμπειρικούς τύπους κάθε φορά και εκφράζονται σε m ή ft στήλης ύδατος.

ε) Από τις βαλβίδες της αντλίας

Σε αντλίες που φέρουν βαλβίδες, όπως οι εμβολοφόρες, η ροή του υγρού είναι τόσο ευκολότερη, όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των βαλβίδων.

στ) Από τη στεγανότητα του σωλήνα αναρροφήσεως και του όλου μηχανισμού της αντλίας

Όσο καλύτερη είναι η στεγανότητα του σωλήνα αναρροφήσεως, των βαλβίδων και των εμβόλων της εμβολοφόρας αντλίας ή όσο μικρότερα είναι τα διάκενα του στροφείου μιας περιστροφικής, τόσο καλύτερα αναρροφούν αυτές το υγρό.

ζ) Από διάφορες άλλες αιτίες που εξαρτώνται από τον τύπο της αντλίας

Έτσι π.χ. ο μεγάλος αριθμός εμβολισμών στις εμβολοφόρες αντλίες ή οι πολλές στροφές ανά λεπτό στις φυγόκεντρες επηρεάζουν δυσμενώς την ικανότητα αναρροφήσεως τους. Η αναρρόφηση δυσκολεύεται επίσης, όταν ο επιζήμιος χώρος, δηλαδή το διάκενο μεταξύ εμβόλου (όταν αυτό βρίσκεται στα νεκρά σημεία της διαδρομής του) και του πώματος, είναι μεγάλος. Σε παρόμοια περίπτωση, για να διευκολύνεται η αναρρόφηση πρέπει η αντλία να γεμίζει με υγρό, ώστε να γεμίζουν και οι επιζήμιοι χώροι' επίσης να ανοίγεται ο κρουνός που υπάρχει μεταξύ βαλβίδων αναρροφήσεως και καταθλίψεως, για την έξοδο του ατμοσφαιρικού αέρα. Για να μη διακοπεί η φλέβα, η σωλήνωση αναρροφήσεως εφοδιάζεται και με μια ποδοβαλβίδα. Στις φυγόκεντρικές αντλίες, όπου δεν υπάρχουν βαλβίδες, έμβολα κλπ., δεν υφίσταται θέμα διακοπής της φλέβας. Πάντως αυτές τοποθετούνται κατά κανόνα χαμηλότερα από τη στάθμη αναρροφήσεως. Όταν όμως είναι τοποθετημένες ψηλότερα, εγκαθίσταται διάταξη που διευκολύνει την αρχική αναρρόφηση, π.χ. ποδοβαλβίδα, ή διάταξη πληρώσεως του σωλήνα αναρροφήσεως (όπως και στις εμβολοφόρες), ή τέλος σύστημα εξαερισμού και πληρώσεως (priming) της γραμμής της αναρροφήσεως.

2.5 Η ΚΑΤΑΘΛΙΨΗ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ

Αυτή μπορεί θεωρητικά τουλάχιστον να πραγματοποιείται σε απεριόριστο ύψος καταθλίψεως. Στην πράξη το ύψος αυτό εξαρτάται από το είδος της αντλίας και τα ειδικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της, τα χαρακτηριστικά της σωληνώσεως και τις αντιστάσεις.

Μεγάλα ύψη καταθλίψεως πάντως επιτυγχάνονται με αντλίες εκτοπίσεως έμβολοφόρες ή περιστροφικές, ενώ στις φυγόκεντρες το ύψος καταθλίψεως σε μονάδες πίεσεως δεν μπορεί να υπερβεί τις 10 At περίπου. Γι' αυτό σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι πολυβάθμιες φυγόκεντρικές αντλίες, όταν χρειάζονται μεγαλύτερες πιέσεις καταθλίψεως.

2.6 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΕΚΤΟΠΙΣΕΩΣ

Οι περιστροφικές αντλίες εκτοπίσεως ονομάζονται και αντλίες ογκομετρικού τύπου (volumetric type) ή και ογκομετρικές αντλίες, εκτοπίζουν δε το υγρό και το αναγκάζουν να ρέει υπό πίεση. Η λειτουργία τους είναι η ίδια με τις εμβολοφόρες παλινδρομικές αντλίες με τη διαφορά ότι στις εμβολοφόρες το κινητό μέρος εκτελεί παλινδρομική κίνηση, ενώ στις περιστροφικές περιστροφική.

Αποτελούνται κατά κανόνα από κέλυφος, μέσα στο οποίο περιστρέφονται τα κινητά μέρη της αντλίας με πολύ μικρά διάκενα μεταξύ αυτών και του περιβλήματος. Έτσι το υγρό παγιδεύεται μέσα σε μικρούς περιστρεφόμενους ή περιφερόμενους χώρους που σχηματίζονται μεταξύ κελύφους και στροφείου, και συμπιεζόμενο οδηγείται υπό πίεση προς την κατάθλιψη.

Το στροφείο μπορεί να αποτελείται από ζεύγος οδοντωτών τροχών, κοχλιών, πτερυγίων, λοβών ή εμβόλων που ολισθαίνουν κλπ., όπως θα δούμε παρακάτω.

Τα γενικά χαρακτηριστικά τους είναι:

α) Το εκτόπισμα της αντλίας

Είναι ο όγκος του υγρού που εκτοπίζουν τα στρεφόμενα μέρη της αντλίας μετά από κάθε στροφή του άξονα. Ο όγκος αυτός αποτελεί κατά κάποιο τρόπο τη θεωρητική παροχή της αντλίας, υπό την προϋπόθεση ότι όλοι οι χώροι της αντλίας έχουν γεμίσει τελείως και δεν υπάρχουν απώλειες.

β) Η ολίσθηση

Αυτή αντιπροσωπεύει την ποσότητα του υγρού που βραχυκυκλώνεται (δεν επιστρέφει) από την κατάθλιψη στην αναρρόφηση μέσω των διακένων της αντλίας. Αυξάνεται με την πίεση καταθλίψεως και μειώνεται με το ιζώδες του υγρού.

γ) Η παροχή

Αυτή είναι ίση με τη διαφορά των δυο προηγούμενων και από αυτή υπολογίζεται και ο καλούμενος ογκομετρικός βαθμός αποδόσεως, ως πηλίκο της πραγματικής δια της θεωρητικής παροχής. Τη μετρούμε ή με υγρομετρικές ή με καταμετρήσεις σε δεξαμενή του παρεχόμενου όγκου υγρού σε δεδομένο χρόνο.

Οι συνθήκες, κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται η αναρρόφηση και η κατάθλιψη, επιδρούν απόλυτα στην παροχή της αντλίας. Το ιξώδες του υγρού, η τάση των δημιουργούμενων ατμών στην αναρρόφηση, η ποσότητα του εγκλωβισμένου ή σε διάλυση στο υγρό αέρα, και το υπερβολικό ολικό ύψος είναι παράγοντες που προκαλούν τη μείωση της παροχής. Είναι γεγονός ότι οι περιστροφικές αντλίες εκτοπίσεως μπορούν να αντιμετωπίσουν διάφορα μανομετρικά ύψη χωρίς σοβαρή μεταβολή της παροχής τους. Όταν όμως το ολικό ύψος υπερβεί τη μέγιστη πίεση, στην οποία η αντλία μπορεί να διατηρήσει στεγανότητα ανάλογα με το τύπο της, τότε ελαττώνεται η παροχή του υγρού.

2.7 ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ - ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥΣ

Ανάλογα με τον τύπο του στροφείου τους οι περιστροφικές αντλίες είναι:

- Οδοντωτές με παράλληλα ή ελικοειδή δόντια.
- Κοχλιοειδείς.
- Περιστρεφόμενων εμβόλων ή λοβών.
- Πτερυγιοφόρες.
- Με υγρά έμβολα.
- Με έμβολα μεταβλητής διαδρομής, κινούμενα αξονικά ή ακτινικά.

Οι χρήσεις τους στα πλοία είναι πολλές και ποικίλες. Χρησιμοποιούνται ως αντλίες πετρελαίου λεβήτων, μεταγγίσεως, αποστραγγίσεως δεξαμενών, λαδιού λιπάνσεως και μεταγγίσεως του, βενζίνης, φορτοεκφορτώσεων νερού, κινήσεως των υδραυλικών πηδαλίων και βαρούλκων κλπ. Είναι κατά κανόνα ατμοστροθλοκίνητες ή ηλεκτροκίνητες, σε ορισμένες δε περιπτώσεις φορητών κυρίως αντλιών συναντώνται και ως πετρελαιοκίνητες.

Εξοπλίζονται συνήθως με ρυθμιστή σταθερού αριθμού στροφών και ρυθμιστή επιταχύνσεως ή ορίου ταχύτητας. Επίσης με ρυθμιστή ελέγχου της πίεσεως, ασφαλιστική βαλβίδα, εξαεριστικό κρουνό και κρουνών εκκενώσεως της αντλίας.

Τα υλικά, από τα οποία κατασκευάζονται οι περιστροφικές αντλίες εκτοπίσεως, είναι κατά το πλείστο και ανάλογα με τον προορισμό της αντλίας τα εξής:

A) Το κέλυφος από χυτοσίδηρο, χυτοχάλυβα ή ορείχαλκο.

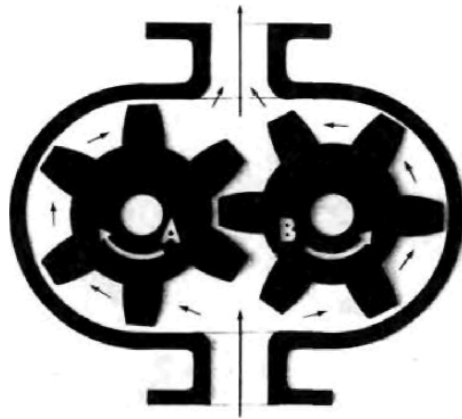
B) Το στροφέιο από συνθετικό ελαστικό σε ειδικές περιπτώσεις, από χυτοχάλυβα ή σφυρήλατο χάλυβα ή από ορείχαλκο.

2.8 ΑΝΤΛΙΑ ΜΕ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΣ (EXTERNAL GEAR PUMP)

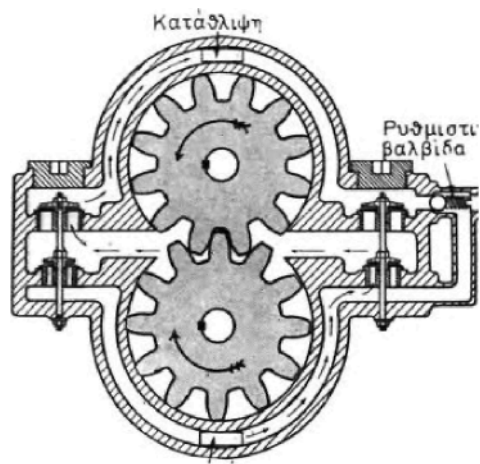
Ονομάζεται και γραναζωτή αντλία. Αποτελείται (Εικόνα 2.8.1) από δυο οδοντωτούς τροχούς Α και Β αντίθετα περιστρεφόμενους. Οι δυο άξονες των τροχών φέρουν στα άκρα τους οδοντωτούς τροχούς. Από αυτούς ο ένας κινείται από τον άξονα του κινητήριου μηχανήματος της αντλίας ή από άξονα της μηχανής, από την οποία κινείται η αντλία (όταν είναι εξαρτημένη). Ο οδοντωτός αυτός τροχός προκαλεί την κίνηση και του άλλου τροχού έτσι, ώστε οι δυο τροχοί Α και Β του στροφείου να περιστρέφονται, χωρίς να εφάπτονται μεταξύ τους.

Με την περιστροφή των δυο τροχών του στροφείου δημιουργείται κενό μέσα στο κέλυφος, λόγω του οποίου το υγρό εισέρχεται στην αντλία και μετακινείται περιμετρικά προς την κατάθλιψη κατά την έννοια των βελών του σχήματος.

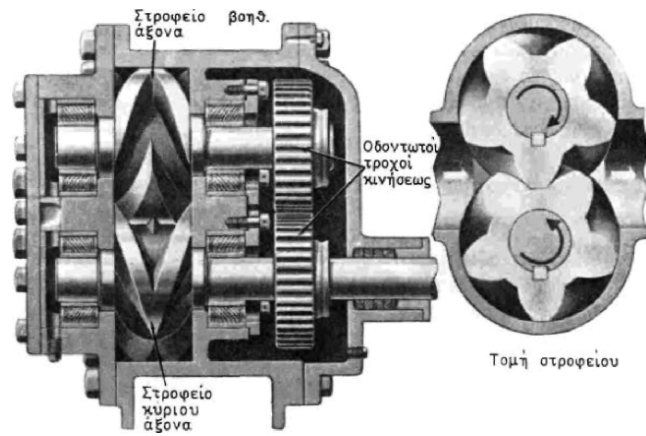
Η εικόνα 2.8.2 παριστάνει όμοια αντλία με κοίλους οχετούς στο κέλυφος για την αναρρόφηση και την κατάθλιψη και δύο ζεύγη βαλβίδων. Αυτή χρησιμοποιείται ως αντλία λαδιού λιπάνσεως σε αναστρεφόμενη μηχανή. Τα ζεύγη των βαλβίδων συνεργάζονται χιαστί για την αναρρόφηση και την κατάθλιψη, όπως φαίνεται στο σχήμα, ανάλογα με τη φορά πρόσω ή ανάποδα της μηχανής. Διακρίνονται επίσης η ρυθμιστική βαλβίδα της πιέσεως καταθλίψεως του λαδιού, με την οποία ρυθμίζεται η ποσότητα λαδιού, που από τη κατάθλιψη επιστρέφει στην αναρρόφηση. Οι οδοντωτοί τροχοί του στροφείου μπορεί να είναι ευθείς ή ελικοειδείς ή σχήματος ψαροκόκαλου (herringbone). Στην Εικόνα 2.8.3 απεικονίζεται αντλία γραναζωτή με οδοντωτούς τροχούς στροφείου διπλής ελικώσεως. Η διπλή ελικώση χρησιμεύει για να εξουδετερώνεται η αξονική ώση του στροφείου.



Εικόνα 2.8.1: Γραναζωτή αντλία

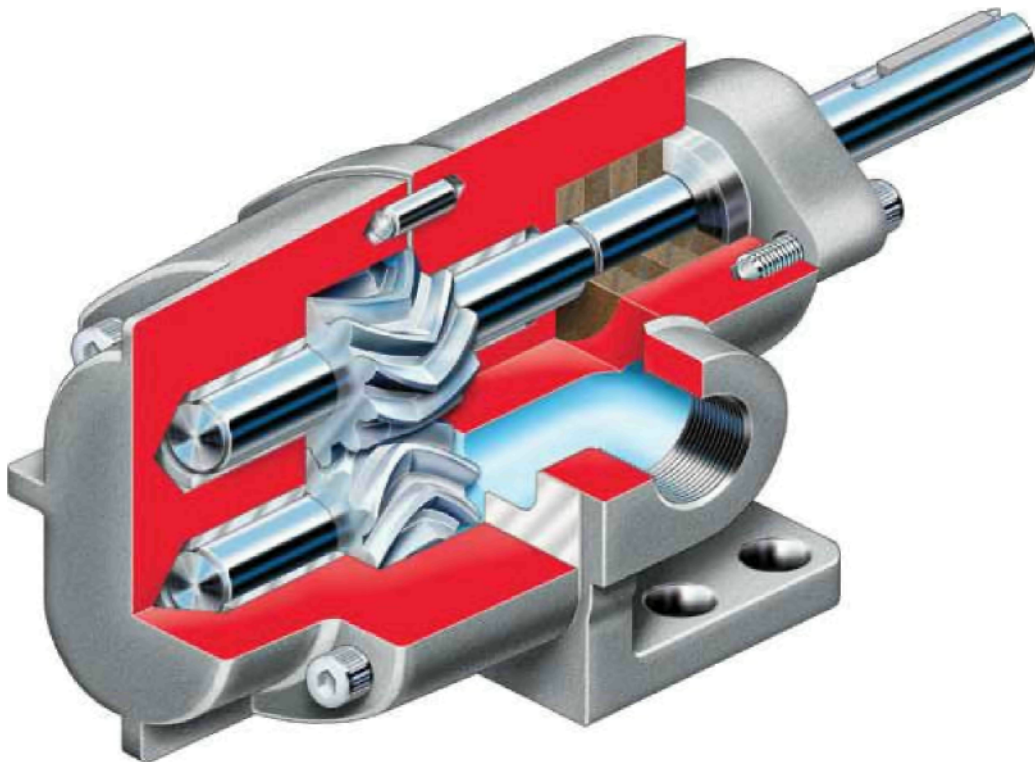


Εικόνα 2.8.2: Γραναζωτή αντλία με κοίλους οχετούς στο κέλυφος για την αναρρόφηση και την κατάθλιψη και δύο ζεύγη βαλβίδων



Εικόνα 2.8.3: Γραναζωτή αντλία με οδοντωτούς τροχούς στροφέιου διπλής ελικώσεως

Μεγάλη σημασία για την καλή λειτουργία αυτών των αντλιών έχουν το διάκενο μεταξύ των τροχών του στροφέιου και το διάκενο μεταξύ των τροχών μεταδόσεως της κινήσεως. Το τελευταίο πρέπει να είναι μικρότερο του πρώτου για να μην εφάπτονται μεταξύ τους οι τροχοί του στροφέιου. Για την ικανοποιητική κατάθλιψη και απόδοση της αντλίας πάντως πρέπει και το διάκενο μεταξύ των τροχών του στροφέιου και το διάκενο μεταξύ αυτών και του κελύφους να είναι όσο το δυνατό μικρότερα.



Εικόνα 2.8.4: Γραναζωτή αντλία με οδοντωτούς τροχούς στροφέιου διπλής ελικώσεως 3D

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

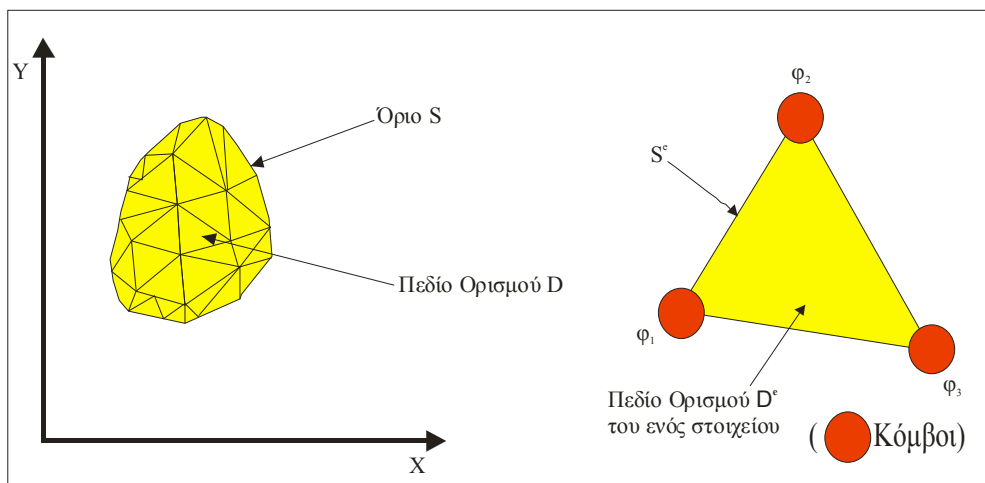
Η Μέθοδος των Πεπερασμένων στοιχείων είναι μια τεχνική αριθμητικής ανάλυσης η οποία χρησιμοποιείται από μηχανικούς, επιστήμονες και μαθηματικούς με σκοπό τη λύση διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν (ή περιγράφουν σε πολύ μεγάλο βαθμό) ένα ευρύ φάσμα φυσικών (ή και μη φυσικών) προβλημάτων. Αυτά, ποικίλουν όπως προβλήματα στερεών, ρευστών, ηλεκτρομαγνητικά ή δυναμικά.

Η βασική αρχή της μεθόδου βασίζεται στο ότι τα σύνθετα προβλήματα μπορούν να υποδιαιρεθούν σε μια σειρά μικρότερων υποπροβλημάτων, τα οποία περιγράφονται από διαφορικές εξισώσεις και τελικά επιλύονται. Καταstrώνοντας το σύστημα των εξισώσεων για κάθε ένα από τα υποπροβλήματα, περιγράφεται η συμπεριφορά ολόκληρου του προβλήματος.

Κάθε ένα από τα πεδία αυτά ορίζεται ως **ένα στοιχείο (element)** και η διαδικασία της υποδιαίρεσης σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων καλείται **διακριτοποίηση (discretization)**. Τα στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους με συγκεκριμένα σημεία, που καλούνται **κόμβοι (nodes)**. Η διαδικασία συναρμολόγησης των στοιχείων προϋποθέτει ότι η λύση είναι συνεχής κατά μήκος των κοινών ορίων γειτονικών στοιχείων.

3.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Κάθε φορά που χρησιμοποιείται η μέθοδος των Πεπερασμένων στοιχείων, η λύση χωρίζεται σε μικρότερα πεδία λύσεων που καλούνται στοιχεία και η λύση προσδιορίζεται από κάποιες βασικές τιμές των μεταβλητών φ στους κόμβους (π.χ. μετατοπίσεις σε κατευθύνσεις x , y , z). Ο αριθμός των αγνώστων μεταβλητών των πεδίων αποτελούν τους βαθμούς ελευθερίας για κάθε κόμβο. Στο ακόλουθο παράδειγμα κάθε ένας κόμβος έχει έναν βαθμό ελευθερίας (Σχήμα 1 Αριστερά). Η διαφορική εξίσωση εφαρμόζεται στο πεδίο ορισμού ενός απλού στοιχείου (Σχήμα 1 δεξιά). Στο επίπεδο στοιχείο, η λύση της εξίσωσης αντικαθίστανται από μια συνεχόμενη συνάρτηση, προσεγγίζοντας την κατανομή της φ (η οποία ορίζεται στο πεδίο D_e). Η επίλυση φ είναι εκφρασμένη σε σχέση με τις άγνωστες τιμές φ_1 , φ_2 φ_3 .

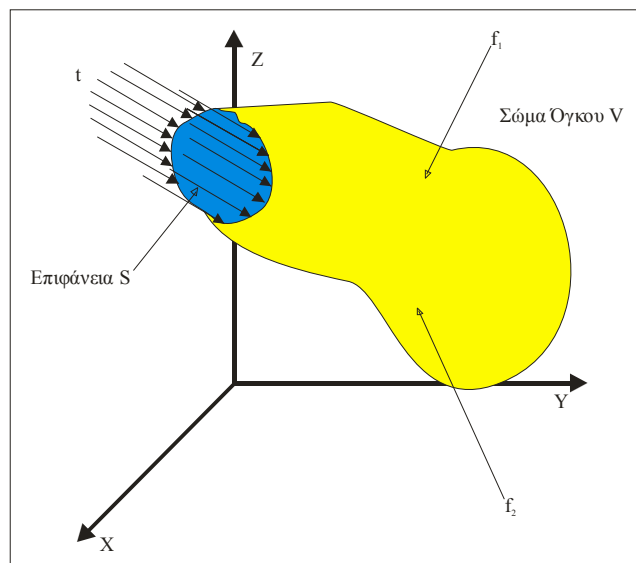


Σχήμα 3.2.1: Διακριτοποίηση μιας τυχαίας περιοχής σε πεδίο ορισμού D (αριστερά) και ανάλυση ενός στοιχείου με πεδίο ορισμού D_e

Το σύστημα των εξισώσεων που αφορούν τις φ_1 , φ_2 και φ_3 σχηματίζεται για το κάθε στοιχείο. Μόλις προσδιοριστούν όλες οι εξισώσεις του στοιχείου, αυτά συναρμολογούνται με σκοπό να σχηματίσουν ολόκληρο το πεδίο ορισμού D . Η λύση $\varphi(x, y)$ είναι εκφρασμένη με τις τιμές στους κόμβους της επίλυσης φ και το πρόβλημα λύνεται με παραγωγή. Η διαδικασία συναρμολόγησης εξάγει ένα γραμμικό σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Για τα συνηθισμένα προβλήματα της μηχανικής, είναι συνηθισμένο το μέγεθος του συστήματος να είναι χιλιάδες εξισώσεις, θεωρώντας εντελώς απαραίτητο εργαλείο την χρησιμοποίηση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή για την επίλυσή τους.

3.3 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Η θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων εξετάζει μια γενική περίπτωση ενός στερεού τριών διαστάσεων (Σχήμα 3.3.1). Οι εξωτερικές σημειακές δυνάμεις συμβολίζονται με f και η καταναμημένη φόρτιση με t (πίεση) και δρα σε ένα μέρος της εξωτερικής επιφάνειας, S_1 , του δοκιμίου. Οι τάσεις μέσα στο στερεό σώμα είναι το αποτέλεσμα των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν πάνω στην επιφάνεια του σώματος (δύναμη επιφανείας) και των δυνάμεων που δρουν σε όλο τον όγκο (εσωτερικές δυνάμεις). Παραδείγματα αυτών των δυνάμεων είναι η βαρύτητα και η επιτάχυνση. Κάτω από την επίδραση των εφαρμοζόμενων δυνάμεων, το στερεό θα παραμορφωθεί. Είναι δεδομένο ότι αυτό συμπεριφέρεται ελαστικά και επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση μετά την αφαίρεση της εφαρμοζόμενης φόρτισης. Ένα μέτρο της σχετικής παραμόρφωσης του στερεού αναφέρεται στην **ανοιγμένη παραμόρφωση ϵ (strain)**. Σε καρτεσιανό σύστημα αναφοράς, τα στοιχεία ορίζονται όπως δείχνονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3.3.1: Στερεό όγκου V παραμορφώνεται ελαστικά κάτω από την επίδραση της πίεσης t και της εξωτερικής δύναμης f

Η **ορθή ανοιγμένη παραμόρφωση** ορίζεται ως η μεταβολή των μετατοπίσεων (Σχέση 1):

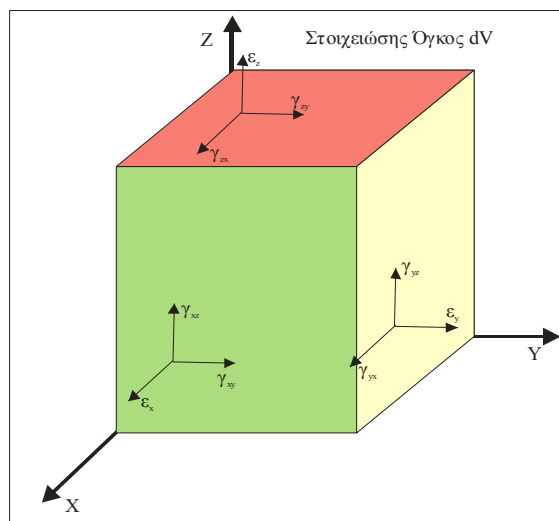
$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (\text{Σχέση 1})$$

Ενώ η **διατμητική ανοιγμένη παραμόρφωση** όπως δείχνεται στη Σχέση 2.

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (\text{Σχέση 2})$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$



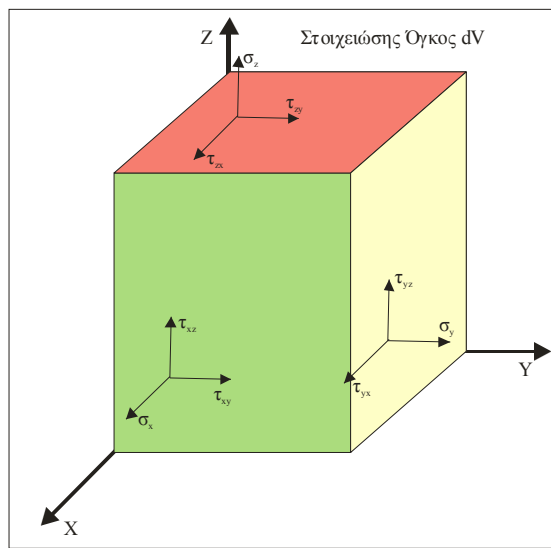
Σχήμα 3.3.2: Ορθή – Διατμητική ανοιγμένη παραμόρφωση

Σε ένα κάποιο σημείο, μέσα στο στερεό σώμα, μπορεί να υπολογιστεί η ανοιγμένη παραμόρφωση ε ως συνάρτηση των συνιστωσών του εκτοπίσματος u, v, w . Θεωρώντας ότι οι ανοιγμένη παραμόρφωση είναι αρκετά μικρή ο δεύτερος όρος των τύπων 1, 2 να είναι αμελητέος, καταστρώνονται οι εξισώσεις της ανοιγμένης παραμόρφωσης συναρτήσει της μετατόπισης. Η ορθή ανοιγμένη παραμόρφωση στους τρεις άξονες x, y, z είναι $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ και ε_z αντίστοιχα και ορίζονται ως το μέτρο επιμήκυνσης του σώματος στο εξεταζόμενο σημείο κατά την κατεύθυνση των αντιστοιχών $x, y,$ και z παράλληλο στους κύριους άξονες. Η ανοιγμένη παραμόρφωση οφειλόμενη στη διάτμηση μετράει την στρέβλωση της γωνίας μεταξύ των διαφόρων επιπέδων. Για παράδειγμα, το γ_{xy} μετράει τη στρέβλωση της περιστροφής των επιπέδων $x - z$ και $y - z$. Γενικεύοντας τα παραπάνω οι σχέσεις μπορούν να γραφούν σε ένα μητρώο (Σχέση 3).

$$\varepsilon(x, y, z) = B\delta(x, y, z) \quad (\text{Σχέση 3})$$

Η τάση στο συγκεκριμένο σημείο παριστάνεται από την ορθή τάση σ_x , σ_y και σ_z και από τις έξι συνιστώσες της διατμητικής τάσης τ_{yx} , τ_{xy} , τ_{zx} , τ_{xz} , τ_{yz} και τ_{zy} . Σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, οι συνιστώσες αυτές είναι προσαρμοσμένες πάνω σε ένα στοιχείο του όγκου V , και σχετίζονται με την ανοιγμένη παραμόρφωση (Σχέσεις 4) (π.χ. Νόμος του Hook), όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, ν είναι ο λόγος Poisson και G είναι το μέτρο δυσκαμψίας.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} & \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz} \quad (\text{Σχέσεις 4}) \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} & \gamma_{zx} &= \frac{1}{G} \tau_{zx} \end{aligned}$$



Σχήμα 3.3.3: Απεικόνιση ορθών (σ_x , σ_y , σ_z) – Διατμητικών (τ_{yx} , τ_{xy} , τ_{zx} , τ_{xz} , τ_{yz} , τ_{zy}) τάσεων

Γενικεύοντας τη σχέση τάσης παραμόρφωσης σε ένα μητρώο για ιδιότητες διαφορετικών υλικών εξάγεται (Σχέση 5):

$$\sigma(x, y, z) = C\varepsilon(x, y, z) \quad (\text{Σχέση 5})$$

3.4 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Για μια δεδομένη συνάρτηση μετατόπισης, η ανοιγμένη παραμόρφωση ε υπολογίζεται σε ολόκληρο το σώμα του στερεού με τη βοήθεια των τάσεων (Σχέσεις 4). Είναι προφανές ότι μια διαφορετική συνάρτηση μετατόπισης θα αποφέρει διαφορετική κατανομή τάσεων. Για το ίδιο σώμα υπάρχει ένας άπειρος αριθμός συναρτήσεων των γεωμετρικών πιθανών μετατοπίσεων αλλά υπάρχει και μια μοναδική συνάρτηση μετατόπισης που περιγράφει φυσικά την παραμόρφωση η οποία οφείλεται σε μια ομάδα δυνάμεων και ικανοποιεί τις εξισώσεις ισορροπίας αυτών.

Αυτή η συνάρτηση προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπόψη την Ελάχιστη Δυναμική Ενέργεια. Το Π αντιπροσωπεύει τη συνολική ενέργεια του συστήματος εκφρασμένη ως $\Pi = U - V$.

Όπου το U αντιπροσωπεύει την εσωτερική ενέργεια παραμόρφωσης και V αντιπροσωπεύει την εξωτερική ενέργεια που δαπανήθηκε πάνω στο σώμα από τις ασκούμενες δυνάμεις. Η αρχή διατήρησης της ενέργειας δηλώνει ότι η μετατόπιση (u, v, w), που εξασφαλίζει την ισορροπία των δυνάμεων σε ολόκληρο το σώμα θα παράγει μια ελάχιστη δυναμική ενέργεια. Η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης U της συνέχειας, βρίσκεται από τη Σχέση 6.

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV \quad (\text{Σχέση 6})$$

Η συνολική ενέργεια παραμόρφωσης εκφράζεται ως συνάρτηση της μετατόπισης, εάν χρησιμοποιηθεί η γενική σχέση μεταξύ τάσης παραμόρφωσης, ανοιγμένης παραμόρφωσης και της συνάρτησης μετατόπισης οπότε εξάγεται η Σχέση 7.

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V \underline{\boldsymbol{\delta}}(x, y, z)^T \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} \underline{\boldsymbol{\delta}}(x, y, z) dV \quad (\text{Σχέση 7})$$

Το συνολικό παραγόμενο έργο (Σχέση 8) των εξωτερικών δυνάμεων ισούται με το άθροισμα όλων των τιμών της κάθε μιας δύναμης και των αντιστοίχων μετατοπίσεων στα σημεία εφαρμογής τους.

$$V = \iint_{S_1} \underline{\boldsymbol{\delta}}(x, y, z)^T \mathbf{t}(x, y, z) dS_1 + \sum_{i=1}^{n_f} (d_i^T - f_i) \quad (\text{Σχέση 8})$$

όπου

$\underline{\boldsymbol{\delta}}(x, y, z)$: Η ακριβής συνάρτηση μετατόπισης πάνω στην επιφάνεια S_1

$\mathbf{t}(x, y, z)$: Το διάνυσμα πίεσης στην επιφάνεια

\mathbf{f}_i : Εξωτερικό διάνυσμα της δύναμης

\mathbf{d}_i : Το διάνυσμα μετατόπισης στο σημείο όπου ασκείται η \mathbf{f}_i

n_f : Αριθμός των εξωτερικών σημείων εφαρμογής των δυνάμεων

Συνδυάζοντας τις Σχέσεις 6, 7, 8 εξάγεται τελικά η ελάχιστη δυναμική ενέργεια λειτουργίας (Σχέση 9).

$$\pi = \frac{1}{2} \iiint_V \underline{\boldsymbol{\delta}}(x, y, z)^T \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B} \underline{\boldsymbol{\delta}}(x, y, z) dV + \dots - \iint_{S_1} \underline{\boldsymbol{\delta}}(x, y, z)^T \mathbf{t}(x, y, z) dS_1 - \sum_{i=1}^{n_f} (d_i^T - f_i) \quad (\text{Σχέση 8})$$

Η αρχή της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας διατυπώνεται ως εξής:

Η συνάρτηση μετατόπισης $\underline{\boldsymbol{\delta}}(x, y, z)$ που ελαχιστοποιεί την συνολική δυναμική ενέργεια, Π , είναι λύση της μετατόπισης που ικανοποιεί τις συνθήκες ισορροπίας και θα είναι η πραγματική μετατόπιση λόγω των εφαρμοζόμενων δυνάμεων.

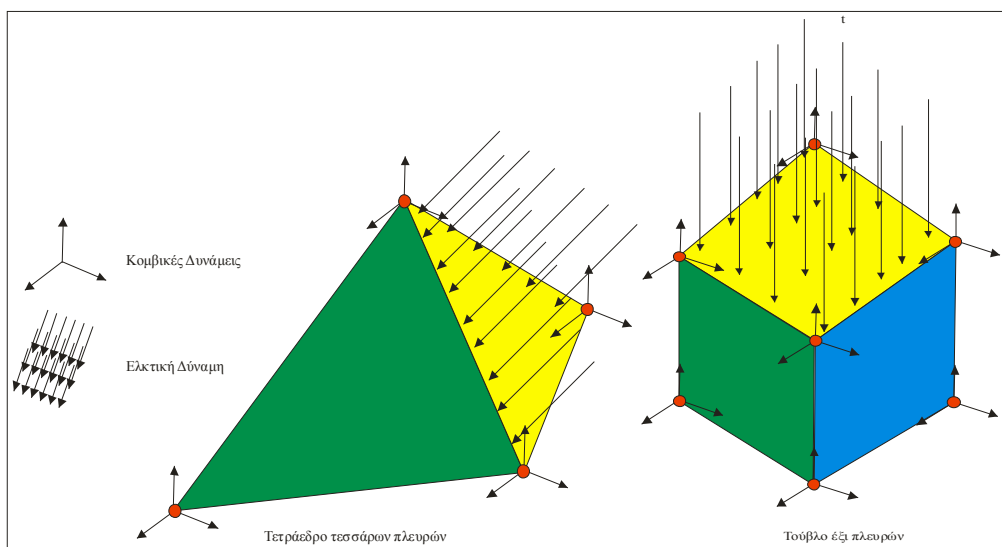
Έτσι ζητείται η συνάρτηση που θα ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση Π . Σε μια ακραία περίπτωση η συνάρτηση θα πέσει μέσα στο πεδίο ανάλυσης των μεταβολών. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι απίθανο να προσδιοριστεί μια συγκεκριμένη συνάρτηση και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές μέθοδοι. Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης Π διεξάγεται χρησιμοποιώντας την ενεργειακή προσέγγιση με τη βοήθεια της διατύπωσης των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων σχηματίζει τις εξισώσεις από απλά σχήματα, στα οποία άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους.

3.5 ΜΗΤΡΩΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

Κάνοντας την παραδοχή ότι ένα σώμα χωρίζεται σε στοιχεία έτσι ώστε να επιβάλλεται μεταξύ αυτών η συνέχεια των μετατοπίσεων, τότε η συνολική δυναμική ενέργεια ολόκληρου του στερεού είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών του κάθε στοιχείου. Για τον αριθμό m των στοιχείων, η συνολική ενέργεια διατυπώνεται στη Σχέση 10:

$$\Pi = \sum_{e=1 \dots m} \Pi(e) \quad (\text{Σχέση 10):}$$

Στο **Σχήμα 5** παρουσιάζονται οι δύο τύποι των στερεών στοιχείων: τετράεδρο και τούβλο (εξετάζοντας τη συνολική δυναμική ενέργεια για ένα στοιχείο). Οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά χαρακτηρίζονται είτε ως συγκεντρωμένες δυνάμεις των κόμβων ή δυνάμεις πίεσης επί των εξωτερικών επιφανειών του στοιχείου. Για μεγαλύτερη σαφήνεια, σε μια ενιαία επιφάνεια εμφανίζονται να ενεργούν μόνο δυνάμεις πίεσης.



Σχήμα 3.5.1: Δύο τύποι στοιχείων α) Τετράεδρο τεσσάρων πλευρών και β) Τούβλο 6 πλευρών

Η ακριβής συνάρτηση μετατόπισης, $\delta_e(x, y, z)$ (Σχέση 11), προσεγγίζεται κατά μήκος του στοιχείου με παρεμβολή μεταξύ των μετατοπίσεων των κόμβων,

$$\underline{\delta}_e(x, y, z) \approx N(x, y, z)\delta_e \quad (\text{Σχέση 11})$$

όπου $N(x, y, z)$ είναι η συνάρτηση του σχήματος υπό μορφή μητρώου και δ_e είναι το άγνωστο διάνυσμα της μετατόπισης των κόμβων. Επαναδιατυπώνοντας τη συνολική ενέργεια για το ένα στοιχείο χρησιμοποιώντας τις Σχέσεις 9, 10 και 11 εξάγεται η Σχέση 12:

$$\pi^{(e)} \approx \frac{1}{2} \iiint_{V^e} \delta_e^T N(x, y, z)^T B^T CBN(x, y, z) \delta_e dV^e - \iint_{S_1^e} \delta_e^T N(x, y, z)^T t(x, y, z) dS_1^e - \delta_e^T f_e \quad (\text{Σχέση 12})$$

όπου V_e αντιπροσωπεύει τον όγκο του στοιχείου και των S_1^e αντιπροσωπεύει την επιφάνεια στην οποία εφαρμόζονται οι πιέσεις. Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης είναι το εσωτερικό γινόμενο των μετατοπίσεων των κόμβων και των διανυσμάτων δύναμης, δ_e και f_e , αντίστοιχα.

Για να ελαχιστοποιηθεί η συνολική δυναμική ενέργεια, Π , για ολόκληρο το στερεό, το $\Pi(e)$ πρέπει να ελαχιστοποιείται για κάθε στοιχείο.

Κατόπιν αναζητείται ένα σύστημα εξισώσεων που περιγράφει τις μετατοπίσεις στους κόμβους για κάθε στοιχείο και θα ελαχιστοποιήσει το $\Pi(e)$. Παρατηρείται επίσης ότι οι συναρτήσεις $\Pi(e)$ αποτελούν τελικά συναρτήσεις μόνον των μετατοπίσεων των κόμβων. Χρησιμοποιώντας την ανάλυση των μέτρων μεταβολών των συναρτήσεων, παρουσιάζεται ένα ακρότατο του $\Pi(e)$ όταν το

διάνυσμα των πρώτων μερικών παραγώγων ως προς το δ_e είναι μηδέν: $\frac{\partial \pi^{(e)}}{\partial \delta_e} = 0$ Διαφοροποιώντας

τη συνάρτηση της ενέργειας ως προς το δ_e εξάγεται η σχέση 13:

$$\frac{\partial \pi^{(e)}}{\partial \delta_e} = \iiint_{V^e} N(x, y, z)^T B^T CBN(x, y, z) \delta_e dV^e - \iint_{S_1^e} N(x, y, z)^T t(x, y, z) dS_1^e - f_e \quad (\text{Σχέση 13})$$

Δεδομένου ότι δ_e δεν αποτελεί συνάρτηση της θέσης, μπορεί να ληφθεί έξω από το ολοκλήρωμα. Εξισώνοντας την σχέση 13 με το μηδέν, η εξίσωση του στοιχείου που αντιστοιχεί στην ελάχιστη ενέργεια θα δίνεται από τη σχέση 14.

$$K_e \delta_e = f_e + \iint_{S_1^e} N(x, y, z)^T t(x, y, z) dS_1^e \quad (\text{Σχέση 14})$$

όπου K_e είναι το μητρώο δυσκαμψίας του στοιχείου δίνεται από τη σχέση 15

$$K_e = \iiint_{V^e} N(x, y, z)^T B^T CBN(x, y, z) dV^e \quad (\text{Σχέση 15})$$

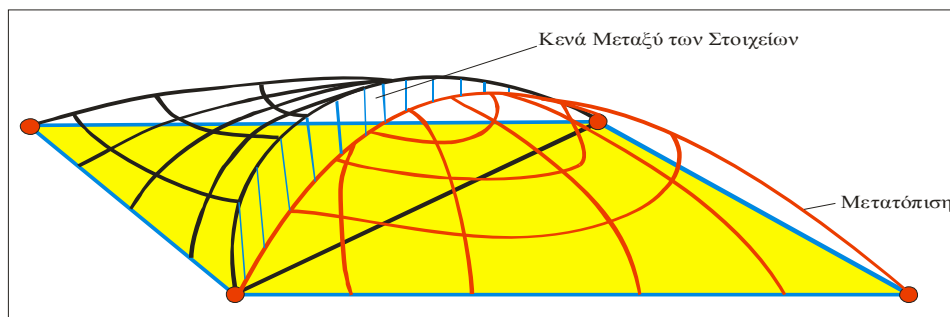
Επειδή η ενέργεια ανοιγμένης μετατόπισης δεν μπορεί να είναι αρνητική, το μητρώο δυσκαμψίας πρέπει να είναι θετικά ορισμένο. Επιπλέον, η K_e είναι συμμετρική, λόγω της συμμετρικής φύσης του μητρώου που παράγεται από την εξίσωση.

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν για όλα τα ελαστικά πεπερασμένα στοιχεία. Μετά την κατάστρωση των εξισώσεων των στοιχείων, ο όρος της πίεσης $t(x, y, z)$ θα εμφανίζεται μόνο για τα στοιχεία των οποίων οι επιφάνειες βρίσκονται εξωτερικά του συναρμολογημένου συνεχούς μέσου. Το τμήμα αυτό έχει εξάγει τις εξισώσεις στατικής των πεπερασμένων στοιχείων σε μια γενική μορφή, που ισχύουν για κάθε τύπο στοιχείου σε ένα ελαστικό συνεχές μέσο. Χρησιμοποιώντας την αρχή της ελάχιστης συνολικής δυναμικής ενέργειας, αναπτύχθηκε μια συνάρτηση $\Pi(e)$ όσον αφορά τις μετατοπίσεις κόμβων. Για μια συγκεκριμένη συνάρτηση του σχήματος ενός στοιχείου, υπάρχει μια σειρά μετατοπίσεων των κόμβων που θα ελαχιστοποιήσει τις συναρτήσεις τόσο σε επίπεδο στοιχείων όσο και σε συνολικό επίπεδο του συνεχούς μέσου.

3.6 ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

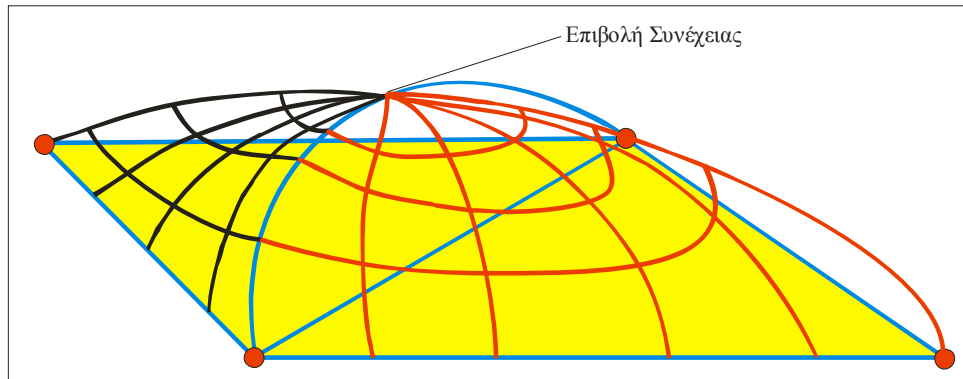
3.6.1 ΒΗΜΑ 1^ο ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ

Για ένα συνεχόμενο πεδίο ορισμού όπως είναι ένα στερεό δεν μπορεί να υπάρξει φυσική υποδιαίρεση, έτσι ώστε το χώρισμα (mesh) στο στερεό θα φαίνεται ότι έγινε κάπως αυθαίρετα. Το συνεχόμενο αυτό μέσο θα πρέπει να αντικατασταθεί από μια σειρά απλών στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους και οι χαρακτηριστικές τους δυνάμεις – μετατοπίσεις θα πρέπει να είναι εύκολες στον υπολογισμό τους.



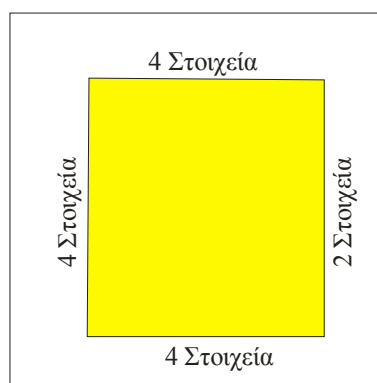
Σχήμα 3.6.1: Παραμόρφωση δύο στοιχείων με κομβική ένωση

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί η παραδοχή που γίνεται ότι τα στοιχεία συνδέονται μόνο με τους κόμβους τους. Στην πραγματικότητα, αυτά τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους κατά μήκος των συνόρων τους. Στο Σχήμα 6 φαίνεται η παραμόρφωση δύο στοιχείων με κομβική ένωση. Αξιοσημείωτη είναι η υπερβολική ελαστικότητα του πλέγματος. Αυτό το είδος της ευελιξίας όμως μειώνει σημαντικά την ακρίβεια της προσέγγισης. Ωστόσο, οι παρεκκλίσεις του πλέγματος είναι οι ίδιες κατά μήκος της διεπαφής ενός στοιχείου (για τα γειτονικά στοιχεία) λόγω της επιβολής της συνέχειας (Σχήμα 3.6.2) και αυτό αποτελεί μια βασική απαίτηση στο πλαίσιο της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα στοιχεία ενός στερεού αποτελούν ειδικούς τύπους στοιχείων που είναι δεσμευμένα να διατηρούν τη συνολική συνέχεια του στερεού.



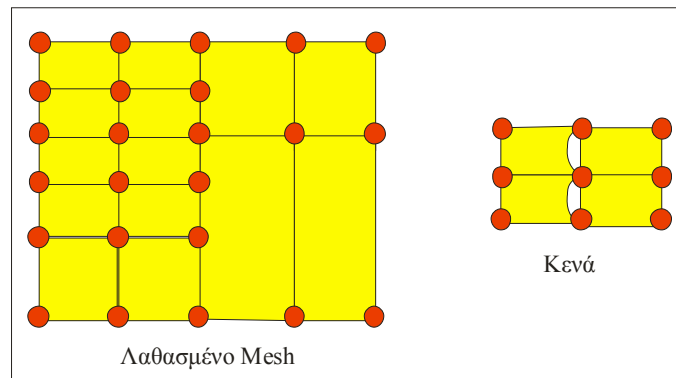
Σχήμα 3.6.2: Επιβολή της συνέχειας σε γειτονικά στοιχεία

Μια μεγάλη ποικιλία τύπων των στοιχείων έχουν καθιερωθεί και τεκμηριωθεί για μία, δύο και τρεις διαστάσεις. Εναπόκειται στον αναλυτή να καθορίσει όχι μόνο το είδος των στοιχείων που είναι κατάλληλα για το πρόβλημα αλλά και την πυκνότητα που απαιτείται για την προσέγγιση μιας επαρκούς λύσης. Η κρίση των μηχανικών αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι στη λύση του προβλήματος. Ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων μιας συνεχούς περιοχής δεν πρέπει να παρουσιάζει κενά λόγω ακατάλληλων συνδεδεμένων στοιχείων. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι κάποιος ενδιαφέρεται για τη διακριτοποίηση μιας ορθογώνιας περιοχής που έχει τον ακόλουθο αριθμό στοιχείων σχετικά με τα όρια: Εντός του χώρου (Πεδίο Ορισμού), η μετάβαση από τα τέσσερα στοιχεία στα αριστερά απαιτεί μόνο τα δύο στοιχεία στα δεξιά Σχήμα 3.6.3. Στο Σχήμα 3.6.4 δείχνεται ένα λανθασμένο χώρισμα του πλέγματος χρησιμοποιώντας τετράπλευρα στοιχεία τεσσάρων κόμβων.



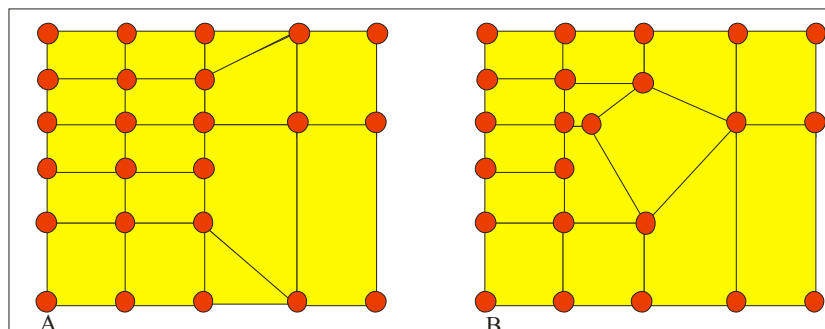
Σχήμα 3.6.3: Διακριτοποίηση ορθογώνιας περιοχής

Τα κενά δημιουργούνται στο παραπάνω αποτέλεσμα του χωρίσματος του πλέγματος επειδή επιχειρείται να ενωθεί ένας κόμβος σε μια ακμή ενός στοιχείου, αντί του κόμβου του άλλου στοιχείου. Προκειμένου να εξαλειφθούν τα κενά, τα στοιχεία θα έπρεπε να ενώνονται από κόμβο σε κόμβο.



Σχήμα 3.6.4: Το Λαθασμένο Mesh έχει ως αποτέλεσμα τα δημιουργούμενα κενά

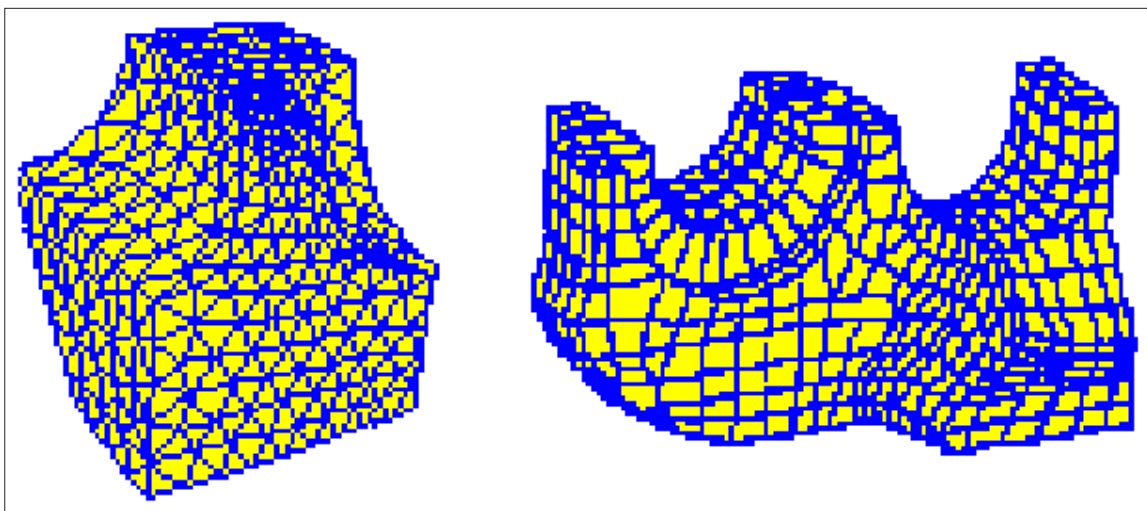
Στις δύο προτεινόμενες λύσεις (Σχήμα 10) υπάρχει η σύνδεση μεταξύ των κόμβων, η απαίτηση της συνέχειας με την ταυτόχρονη εξαφάνιση των κενών.



Σχήμα 3.6.5: Δύο προτεινόμενες λύσεις που αποτρέπουν το πρόβλημα των κενών

Διόρθωση χωρίσματος του πλέγματος

Στο Σχήμα 3.6.4 παρατίθεται ένα λανθασμένο (χώρισμα) meshing τεσσάρων κόμβων τετράπλευρων στοιχείων. Η διακριτοποίηση των ακανόνιστων σχημάτων πραγματοποιείται από τα σχέδια με το χέρι. Τα πακέτων λογισμικού τελευταίας τεχνολογίας αυτοματοποιούν την διαδικασία του χωρίσματος του πλέγματος (meshing) Σχήμα 3.6.6. Με οποιοδήποτε λογισμικό νέας γενιάς όσον αφορά το χώρισμα (mesh), είναι εντελώς απαραίτητη τόσο η κρίση του χρήστη όσο και η εμπειρία του. Μόλις δημιουργηθεί ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να ελέγχεται για να εξασφαλιστεί ότι κάθε στοιχείο πληρεί ορισμένα κριτήρια για την αποδοχή του ή όχι. Για παράδειγμα όταν υπάρχει μια στρέβλωση σε ένα στοιχείο, μπορεί να δημιουργήσει ανακριβή αποτελέσματα.



Σχήμα 3.6.6: Τα πακέτα λογισμικού νέας γενιάς αναλαμβάνουν να δημιουργήσουν πλέγμα σε οποιαδήποτε σχήματα ακανόνιστων στερεών ακόμα και σε τρεις διαστάσεις

3.6.2 ΒΗΜΑ 2: ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ

Μόλις επιλεγεί το σχήμα του στοιχείου, θα πρέπει να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο αποκλίνουν οι μεταβλητές του πεδίου κατά μήκος των στοιχείων σε ολόκληρο το πεδίο ορισμού. Αυτό γίνεται παραστατικά ή προσεγγιστικά.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται μια πολυωνυμική συνάρτηση παρεμβολής. Ο αριθμός των κόμβων σε ένα στοιχείο προσδιορίζεται από την τάξη της συνάρτησης παρεμβολής που χρησιμοποιείται. Οι συναρτήσεις παρεμβολής αναφέρονται επίσης ως συναρτήσεις σχήματος ή προσεγγιστικές συναρτήσεις. Εάν κάποιος αναλυτής χρησιμοποιεί ένα υπάρχων πακέτο πεπερασμένων στοιχείων, τότε πιθανότατα η επιλογή της συνάρτησης παρεμβολής προκύπτει εμμέσως από την επιλογή του τύπου του στοιχείου.

Συναρτήσεις Σχήματος

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων περιγράφει τη συμπεριφορά μιας συνέχειας χρησιμοποιώντας την διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου σε μικρότερες, διαχειρίσιμες περιοχές και αυτές ονομάζονται στοιχεία. Οι άγνωστες μεταβλητές (π.χ. οι μετατοπίσεις), για τις οποίες επιδιώκεται η λύση, εκφράζονται σε σχέση με έναν διακριτό αριθμό αγνώστων σε κάθε κόμβο. Δεδομένου ότι παρουσιάζεται μια συνεχής λύση σε ολόκληρο το πρόβλημα, συνεπώς η λύση πρέπει επίσης να είναι συνεχής για κάθε στοιχείο χωριστά. Η μέθοδος προσέγγισης της λύσης απέναντι σε κάθε στοιχείο αναφέρεται και ως παρεμβολή στοιχείου. Ο βαθμός στον οποίο η προσεγγιστική λύση επαρκεί, είναι η ακρίβεια με την οποία σχηματίζεται το πρόβλημα και επηρεάζεται από το είδος της παρεμβολής ή από τη συνάρτηση σχήματος που χρησιμοποιείται. Η απλούστερη μέθοδος της προσέγγισης της λύσης είναι μια γραμμική κατανομή της άγνωστης συνάρτησης εντός του πεδίου ορισμού του στοιχείου. Οι περισσότερες μονοδιάστατες συναρτήσεις μπορούν να εκπροσωπούνται ως σειρές από ευθείες γραμμές. Όσο μικρότερα είναι τα τμήματα της γραμμής, τόσο πιο ακριβής θα είναι η λύση. Αντίθετα, όσο μεγαλύτερα είναι τα τμήματα της γραμμής, τόσο λιγότερο ακριβής θα είναι η λύση. Το υπολογιστικό κόστος, από την άλλη πλευρά, ενδέχεται να αυξηθεί σημαντικά, καθώς ο αριθμός των στοιχείων θα αυξηθεί σε ένα μοντέλο. Έτσι, είναι πιο πρακτικό κάπου να χρησιμοποιούνται λιγότερα στοιχεία ενώ σε σημεία μεγαλύτερου ενδιαφέροντος να χρησιμοποιούνται περισσότερα στοιχεία (μεγαλύτερη ακρίβεια).

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα είναι ότι στα περισσότερα προβλήματα η λύση μπορεί να απαιτήσει τη συνέχεια της πρώτης παραγώγου του πεδίου των μεταβλητών (π.χ. ανοιγμένη μετατόπιση) όπως ακριβώς και των ίδιων των μεταβλητών (π.χ. μετατόπιση).

Η βασική περιγραφή της μεθοδολογίας υποστηρίζει ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε για να βρεθεί μια λύση σε ένα διανυσματικό πεδίο μετατόπισης χρησιμοποιώντας μια παρεμβολή μεταξύ των διακριτών μετατοπίσεων σε κάθε κόμβο. Ειδικότερα, η μετατόπιση δύο διαστάσεων (μόνο σε x, y) ενός στοιχείου μπορεί να εκφραστεί από τη Σχέση 16.

$$\underline{u}_e(x, y) \approx u_e(x, y) = \sum_i N(x, y)_i u_i \quad (\text{Σχέση 16})$$

όπου η υπογραμμισμένη συνάρτηση, $\underline{u}_e(x, y)$, δηλώνει την ακριβή συνιστώσα της μετατόπισης στον x και, u_i , υποδηλώνει τη μετατόπιση x του κόμβου i . Οι μετατοπίσεις μπορεί να γενικευθούν ώστε να συμπεριλάβουν κάθε είδους βαθμωτής ποσότητας πεδίου ϕ . Ορίζοντας ως $\phi(x, y)$ την προσέγγιση στην ακριβή συνάρτηση γίνεται η παραδοχή της Σχέσης 17.

$$\underline{\phi}(x, y) \approx \phi(x, y) \quad (\text{Σχέση 17})$$

Έτσι, για ένα συγκεκριμένο στοιχείο η προσέγγιση $\phi(x, y)$ μπορεί να προσδιοριστεί από τη Σχέση 18.

$$\phi_e(x, y) = \sum_i N(x, y)_i \phi_{e_i} \quad (\text{Σχέση 18})$$

όπου $i=1 \dots$ Αριθμός των κόμβων ανά στοιχείο, όπου $\phi_e(x, y)$ είναι η προσέγγιση της περιοχής απέναντι από το στοιχείο, $N(x, y)_i$, i συνάρτηση σχήματος και ϕ_{e_i} είναι η άγνωστη ποσότητα στον κόμβο i . (Ισχύει στην περίπτωση που δεν ορίζεται, διαφορετικά οι συναρτήσεις θα απεικονίζονται στον x και στον y).

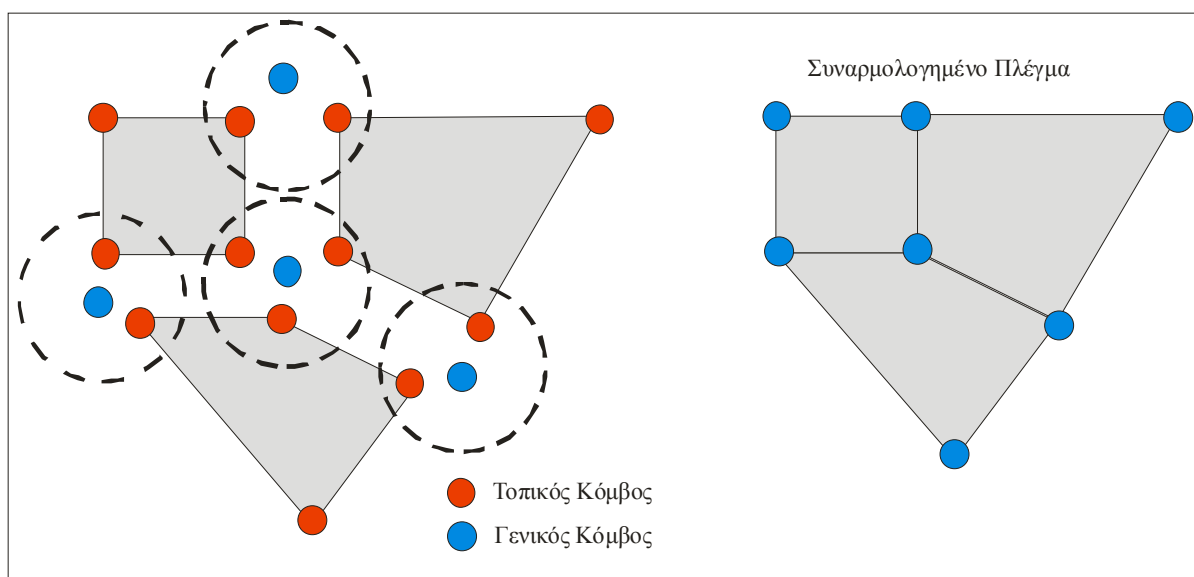
3.6.3 ΒΗΜΑ 3: ΕΥΡΕΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Μόλις επιλεγούν οι συναρτήσεις παρεμβολής, προσδιορίζεται η προσέγγιση $\phi(x, y)$ της μεταβλητής στο πεδίο ορισμού του στοιχείου σε σχέση με τις διακριτές τιμές των κόμβων. Κατά συνέπεια, οι ιδιότητες των στοιχείων όσον αφορά τις ποσότητες των κόμβων εκφράζονται από ένα σύστημα εξισώσεων.

Για παράδειγμα, σε στατική ανάλυση μιας κατασκευής, οι εξισώσεις των στοιχείων συσχετίζουν τις κομβικές δυνάμεις με τις κομβικές μετατοπίσεις.

3.6.4 ΒΗΜΑ 4: ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΩΝΤΑΣ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η διαδικασία συναρμολόγησης προϋποθέτει τον υπολογισμό των μεταβλητών κάθε στοιχείου (όπως ορίστηκε στα προηγούμενα βήματα), για να σχηματιστεί μια προσέγγιση της συμπεριφοράς του στερεού (με ξεχωριστά βήματα). Η συναρμολόγηση επιτυγχάνεται με τον ακόλουθο βασικό κανόνα της συμβατότητας: Οι τιμές των μεταβλητών του πεδίου σε έναν κόμβο, πρέπει να είναι οι ίδιες για κάθε στοιχείο που μοιράζεται αυτόν τον κόμβο (Σχήμα 12). Αυτό το βήμα είναι αυτοματοποιημένο σε οποιοδήποτε πακέτο των πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.6.4.1: Διαδικασία συναρμολόγησης πλέγματος με τη ενοποίηση τοπικών κόμβων

3.6.5 ΒΗΜΑ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Το γενικό σύστημα των εξισώσεων που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα δεν μπορεί να επιλυθεί, αν δεν έχουν οριστεί οι συνοριακές συνθήκες. Μαθηματικά, πριν από την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών, το σύστημα των εξισώσεων είναι αόριστο και δεν έχει μια μοναδική λύση. Για το λόγο αυτό μια κατασκευή πρέπει να είναι στερεωμένη σε κάποια σημεία για να αποτραπεί από την οποιαδήποτε μετακίνηση, με την εφαρμογή μιας δύναμης, Ένας κόμβος επίσης πρέπει να στερεώνεται και να είναι ακλόνητος.

Στην ορολογία των πεπερασμένων στοιχείων, ένας κόμβος είναι προκαθορισμένος εάν η τιμή της μεταβλητής του πεδίου είναι ήδη γνωστή. Για παράδειγμα, μια προκαθορισμένη μηδενική κομβική μετατόπιση έχει τοποθετηθεί σε σταθερή στήριξη μιας κατασκευής. Σε μια θερμική ανάλυση, η θερμοκρασία προκαθορίζεται σε έναν ή περισσότερους κόμβους. Συνήθως, αυτές οι κόμβοι βρίσκονται στα όρια των χωρισμάτων των πεπερασμένων στοιχείων.

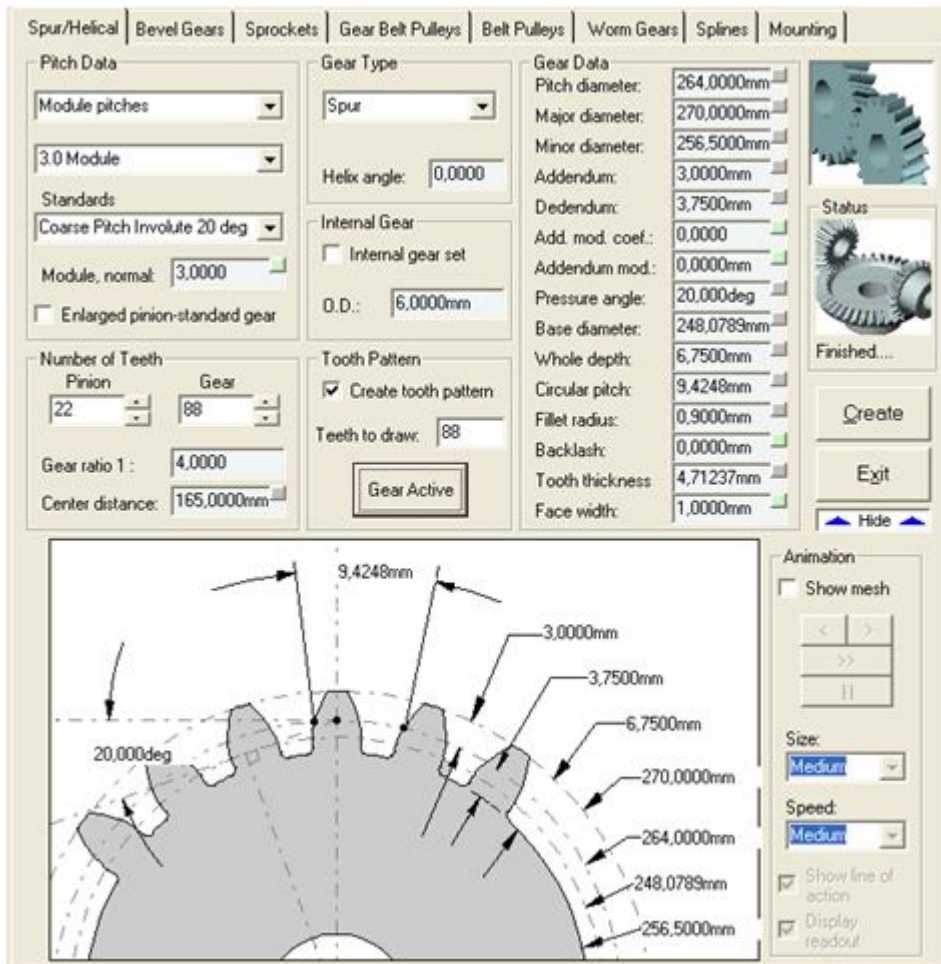
3.6.6 ΒΗΜΑ 6: ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Μόλις εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες στο συναρμολογημένο μητρώο των εξισώσεων, χρησιμοποιούνται τυποποιημένες αριθμητικές τεχνικές για την επίλυση της άγνωστης μεταβλητής σε κάθε κόμβο. Εάν το σύστημα των εξισώσεων είναι γραμμικό, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος απαλοιφής Gaussian ή ανάλυσης Cholesky. Σε αναλύσεις κατασκευών, το μητρώο εξισώσεων που προκύπτει από τη διαδικασία πεπερασμένων στοιχείων είναι συχνά απλοποιημένο και συμμετρικό. Οι ιδιότητες αυτές χρησιμοποιούνται από πολλές μεθόδους λύσεων για το γρήγορο και αποτελεσματικό υπολογισμό των αλγορίθμων οι οποίοι εφαρμόζονται ήδη σε όλα σχεδόν τα πακέτα πεπερασμένων στοιχείων. Στην δυναμική ανάλυση, το μητρώο εξίσωσης μπορεί να μειωθεί σε ένα υποσύνολο, εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι είναι το χαμηλότερο των φυσικών συχνοτήτων, αποτελείται κυρίως από τα κατασκευαστικά κομμάτια που έχουν την υψηλότερη αναλογία μάζας προς δυσκαμψία. Όταν το σύνολο των εξισώσεων είναι μη γραμμικές, τότε η διαδικασία επίλυσης είναι πιο δύσκολη. Η επιλογή της μεθόδου της λύσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του προβλήματος, καθώς και το είδος της ανάλυσης.

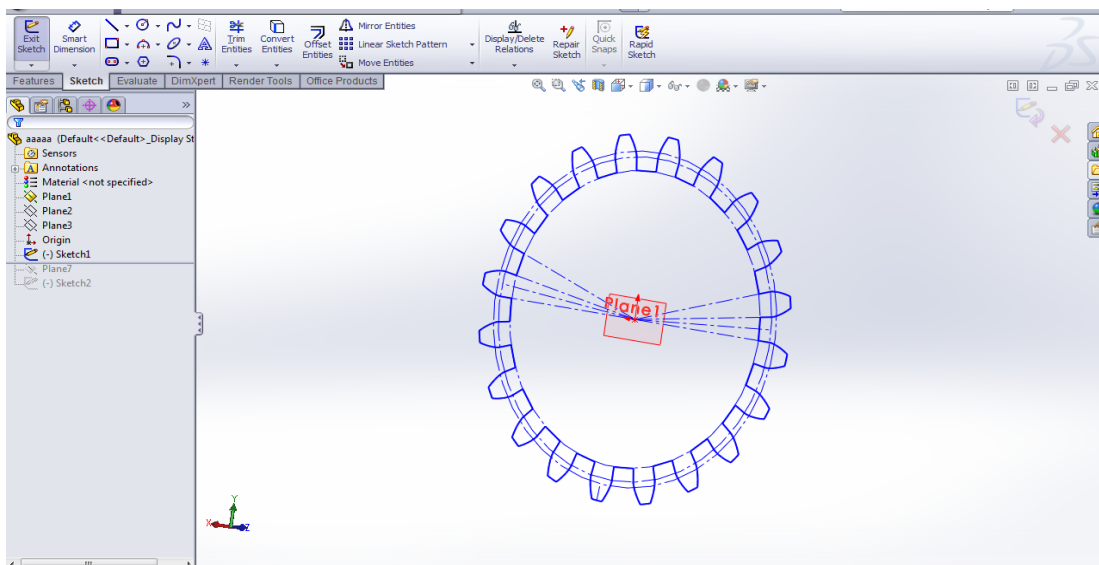
3.6.7 ΒΗΜΑ 7: ΚΑΝΟΝΤΑΣ ΠΡΟΣΘΕΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ

Οι επιπλέον υπολογισμοί περιλαμβάνουν τον υπολογισμό των κύριων τάσεων, της ενέργειας παραμόρφωσης και της δυναμικής αντίδρασης σε ανάλυση μιας κατασκευής. Επίσης μπορεί να γίνει υπολογισμός της διάρκειας ζωής της κατασκευής καθώς και τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας αυτής.

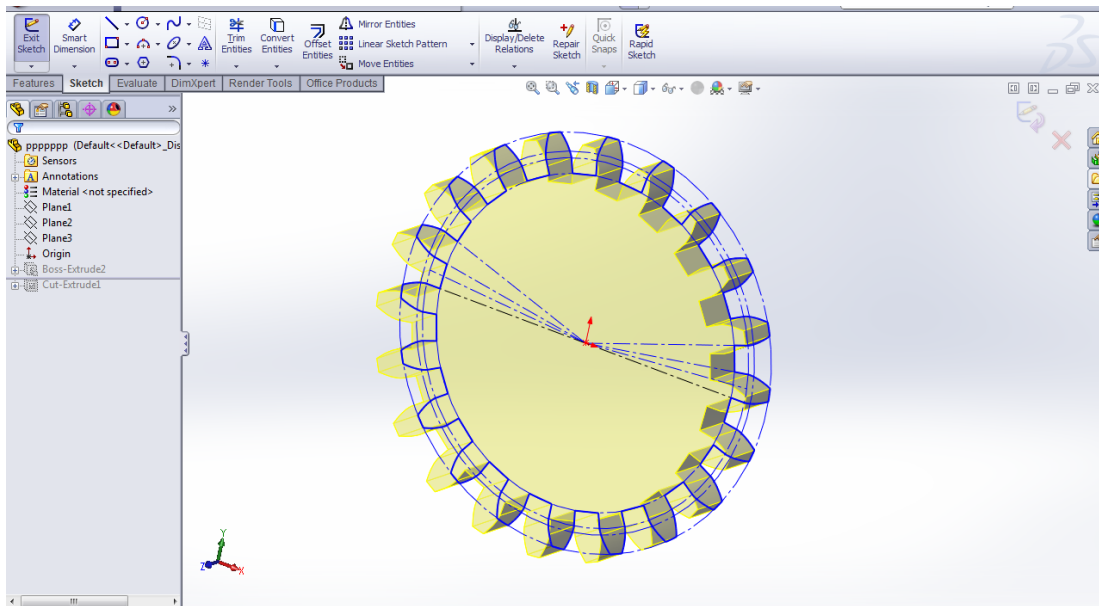
Κεφάλαιο 4^ο Σχεδιασμός Γραναζιών



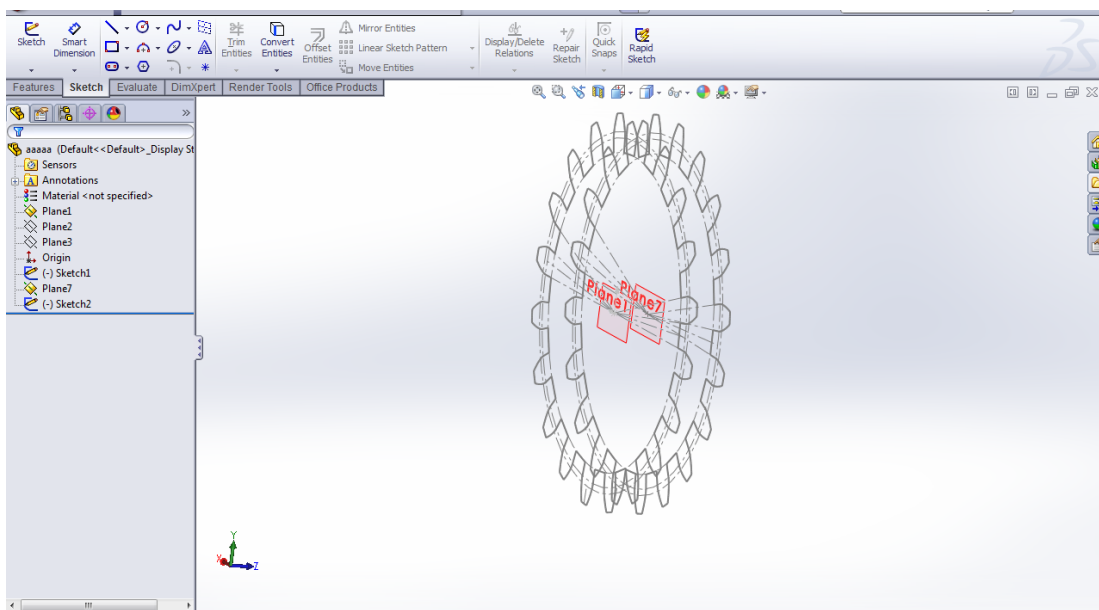
ΕΙΚΟΝΑ 4.1: Πλατφόρμα σχεδίασης γραναζιών



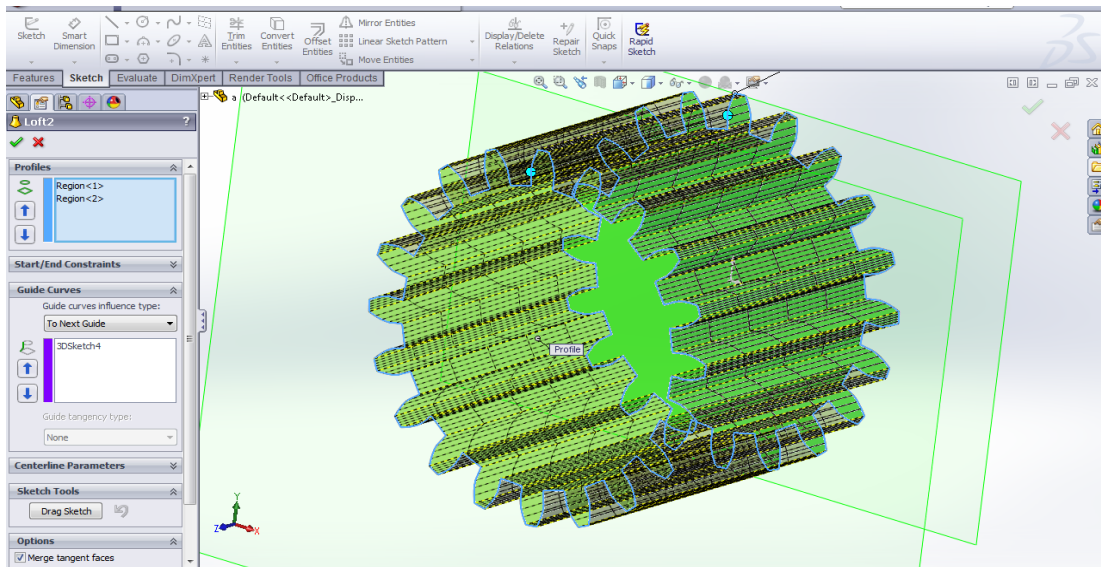
ΕΙΚΟΝΑ 4.2: Σχεδιασμός γραναζιού δημιουργώντας έκκεντρους κύκλους, και τη γραμμή του μισού δοντιού.



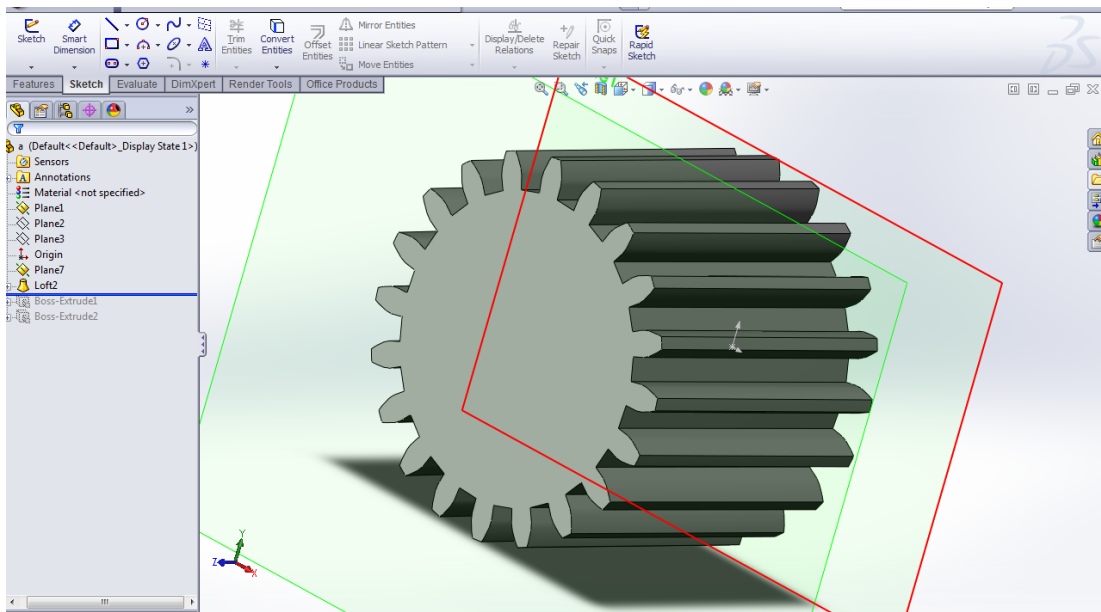
ΕΙΚΟΝΑ 4.3: Με την εντολή Circular Pattern δημιουργείται ολόκληρο το δόντι και πολλαπλασιάζεται επί 20 δόντια.



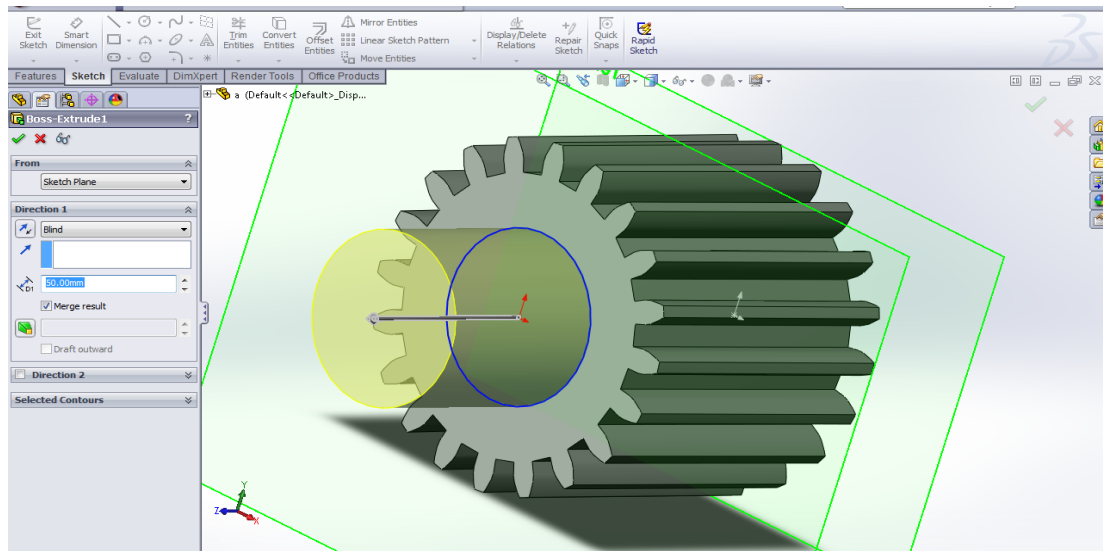
ΕΙΚΟΝΑ 4.4: Το επόμενο βήμα είναι η αντιγραφή του σχεδίου ακριβώς σε διπλανό επίπεδο



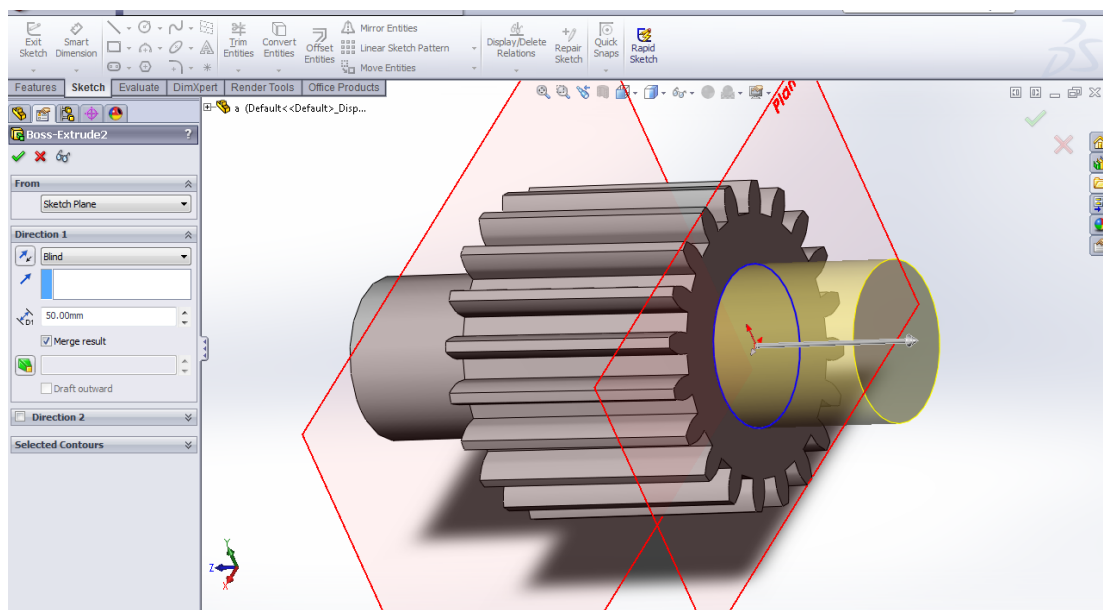
ΕΙΚΟΝΑ 4.5: Σχεδιασμός γραναζιού 3D με τη την εντολή loft



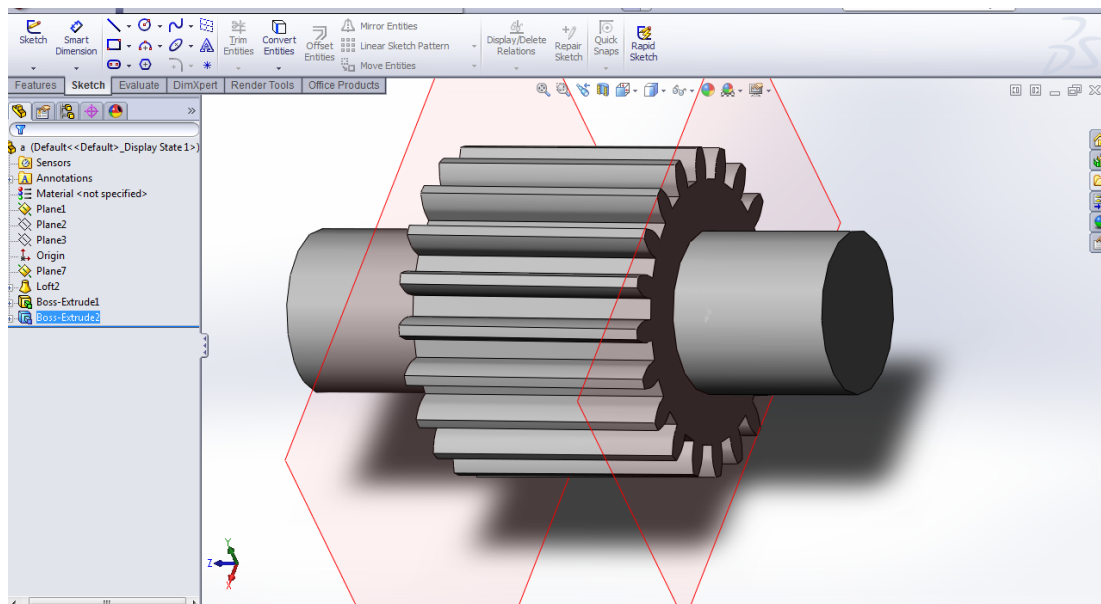
ΕΙΚΟΝΑ 4.6: Το γρανάζι μετά τη μέθοδο loft



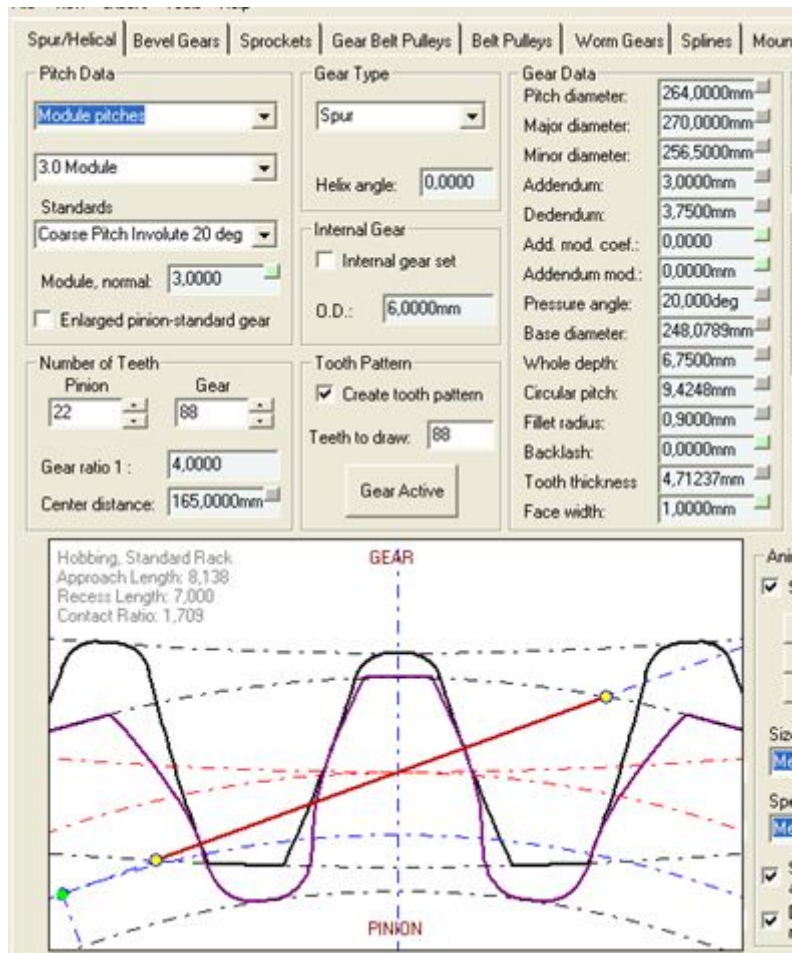
ΕΙΚΟΝΑ 4.7: Δημιουργία κύκλου και μετά κυλίνδρου – άξονα με τη μέθοδο extruded boss



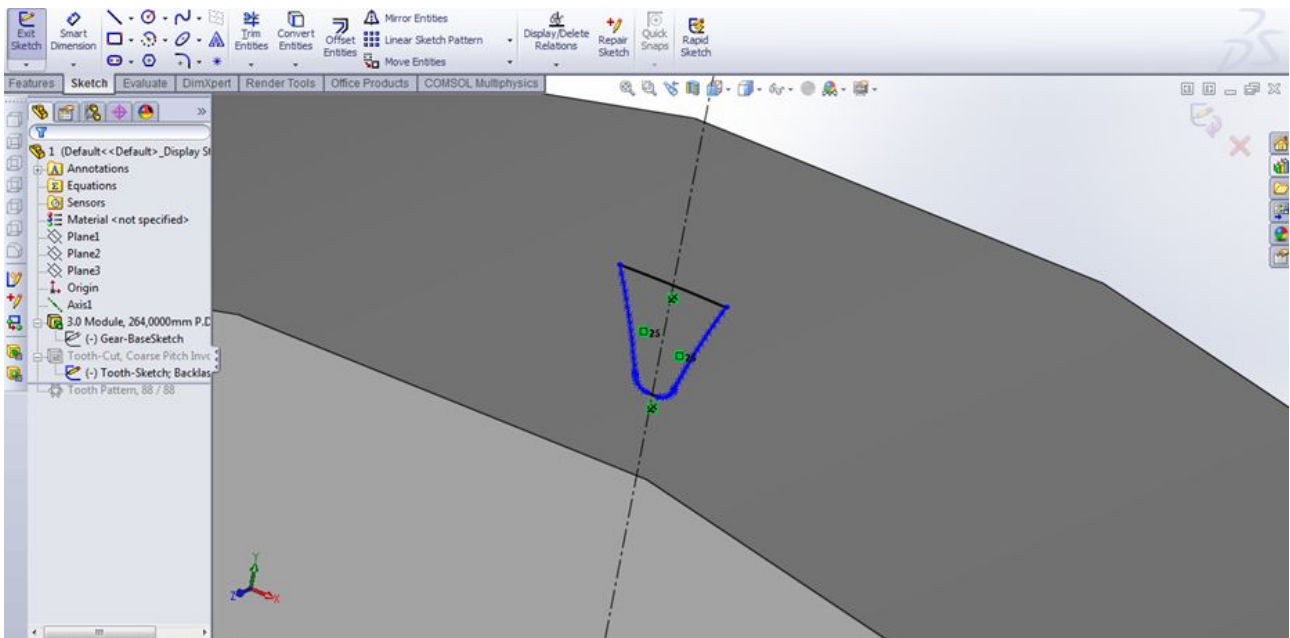
ΕΙΚΟΝΑ 4.8: Δημιουργία 2^{ου} άξονα σχεδιάζοντας κύκλο και μετά κύλινδρο – άξονα με τη μέθοδο extruded boss



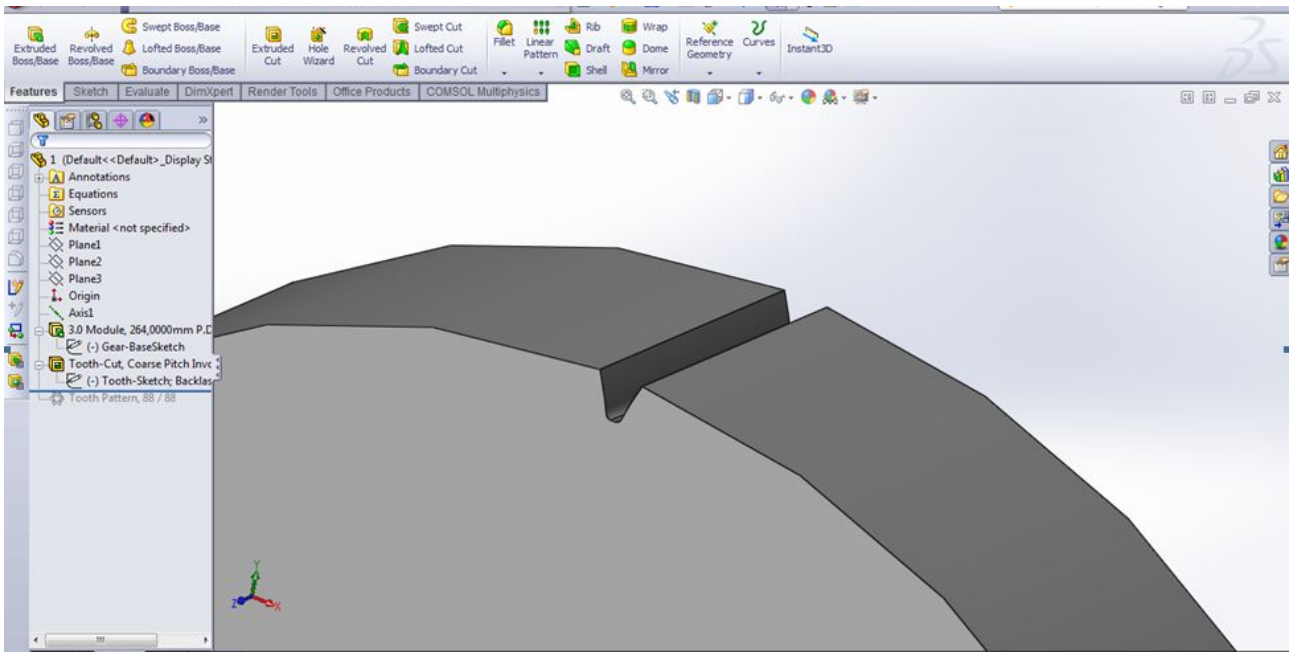
ΕΙΚΟΝΑ 4.9: Γρανάζι μαζί με άξονες



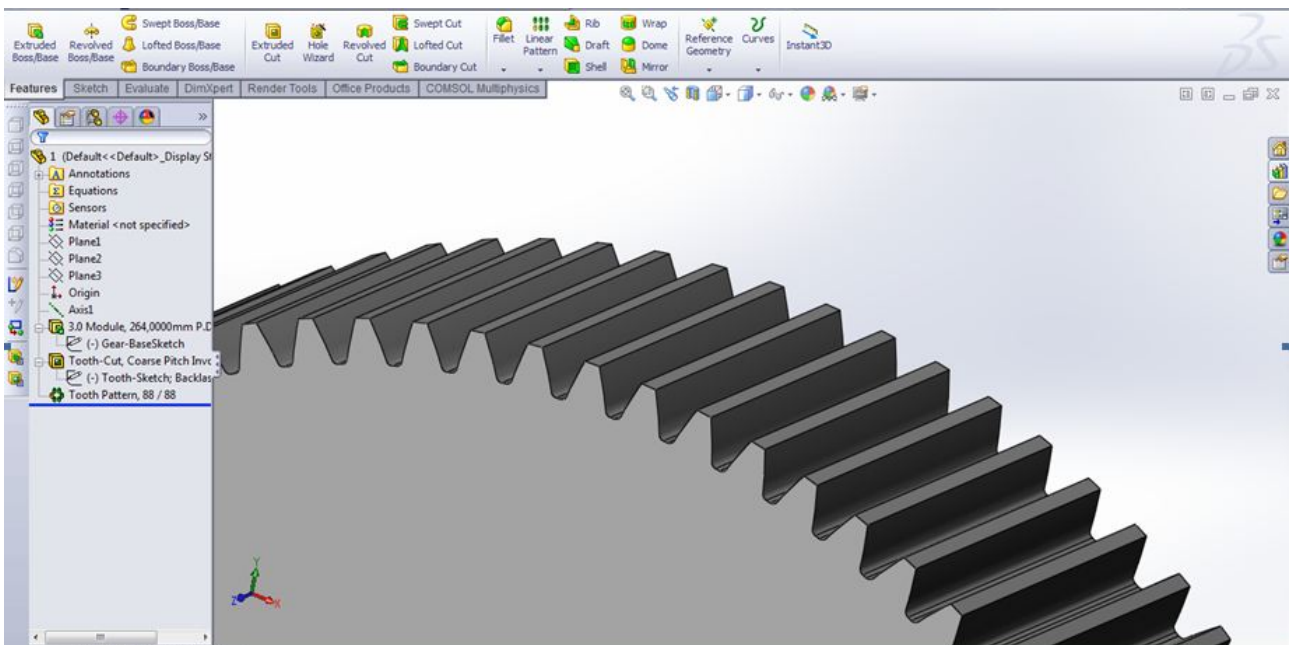
ΕΙΚΟΝΑ 4.10: Πλατφόρμα σχεδίασης δοντιών



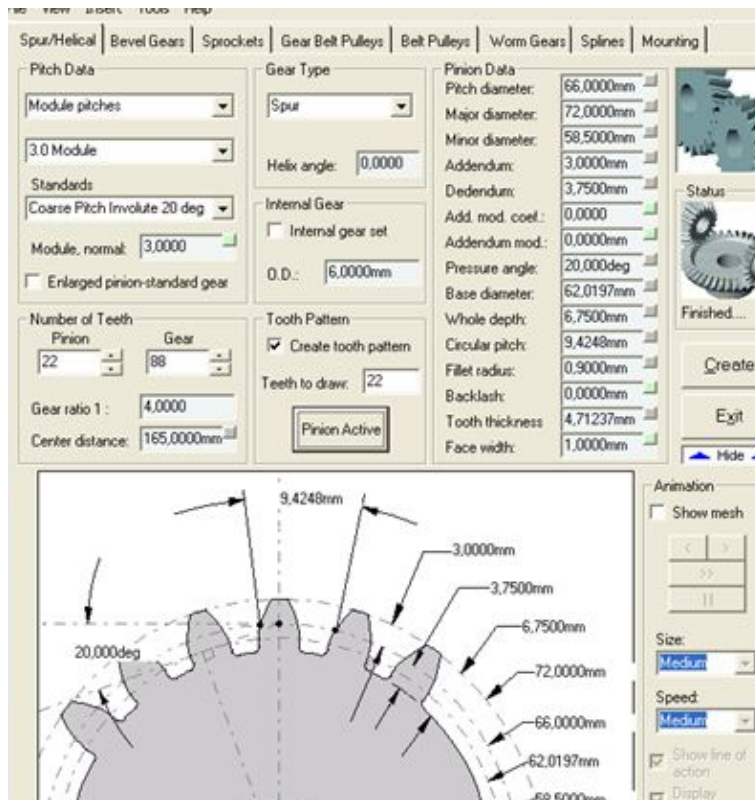
ΕΙΚΟΝΑ 4.11: Τρισδιάστατος σχεδιασμός γραναζιού (πινιόν) με μέτρο οδόντωσης $m = 3 \text{ mm}$ και εξωτερική διάμετρο 270 mm (pitch diameter 269 mm)



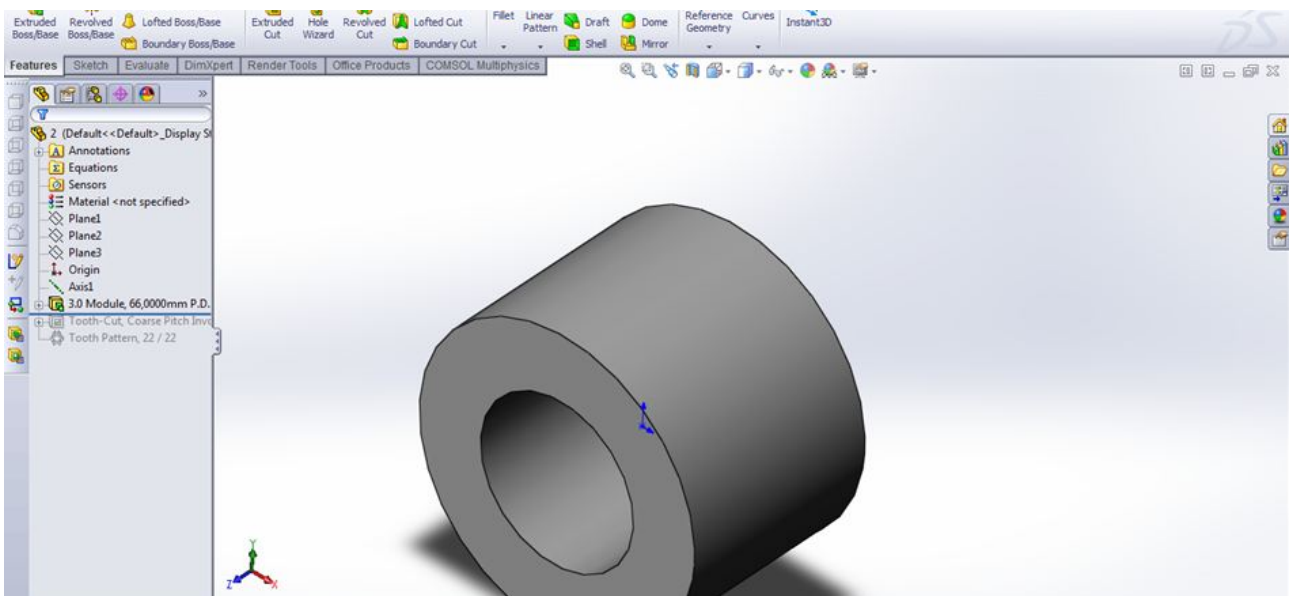
ΕΙΚΟΝΑ 4.12: Δημιουργία ενός οδόντα



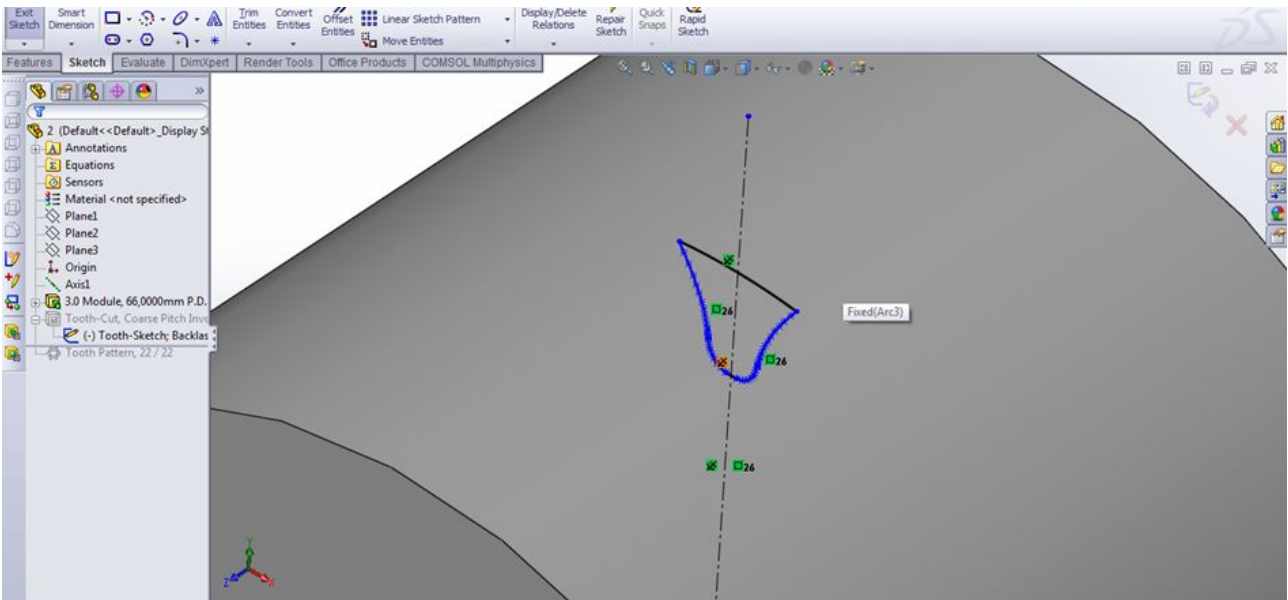
ΕΙΚΟΝΑ 4.13: Πολλαπλασιασμός δοντιών (88 δόντια)



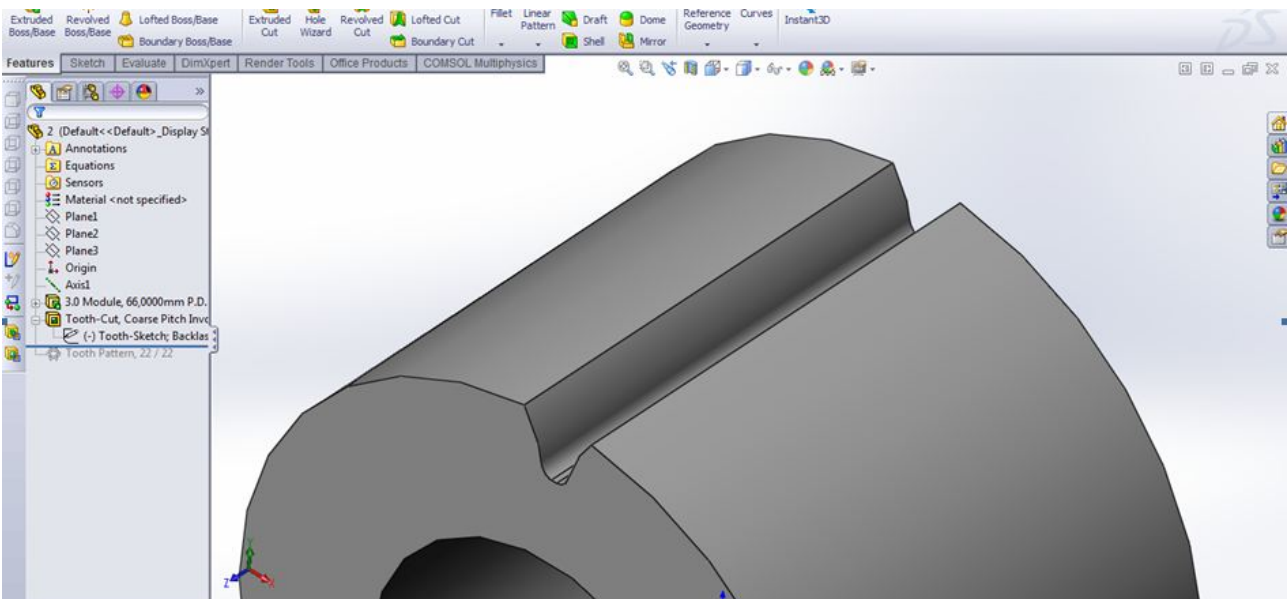
ΕΙΚΟΝΑ 4.14: Πλατφόρμα σχεδίασης δοντιών



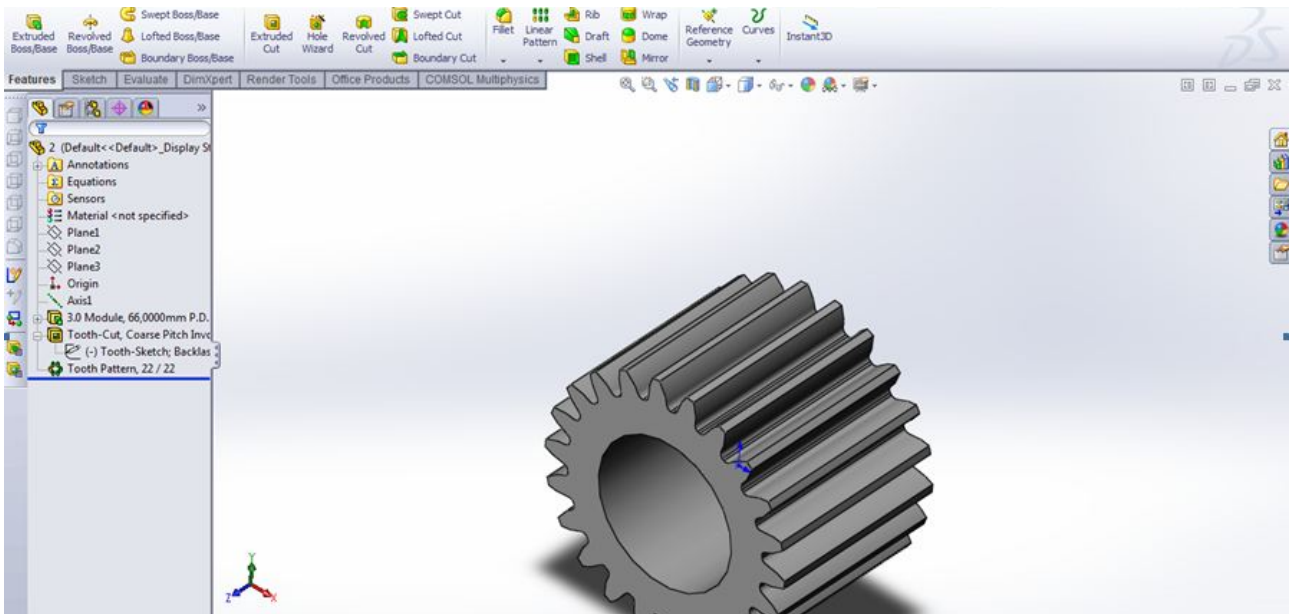
ΕΙΚΟΝΑ 4.15: Τρισδιάστατος σχεδιασμός γραναζιού (κινητήριο) με μέτρο οδόντωσης $m = 3 \text{ mm}$ και εξωτερική διάμετρο 72 mm (pitch diameter 66 mm)



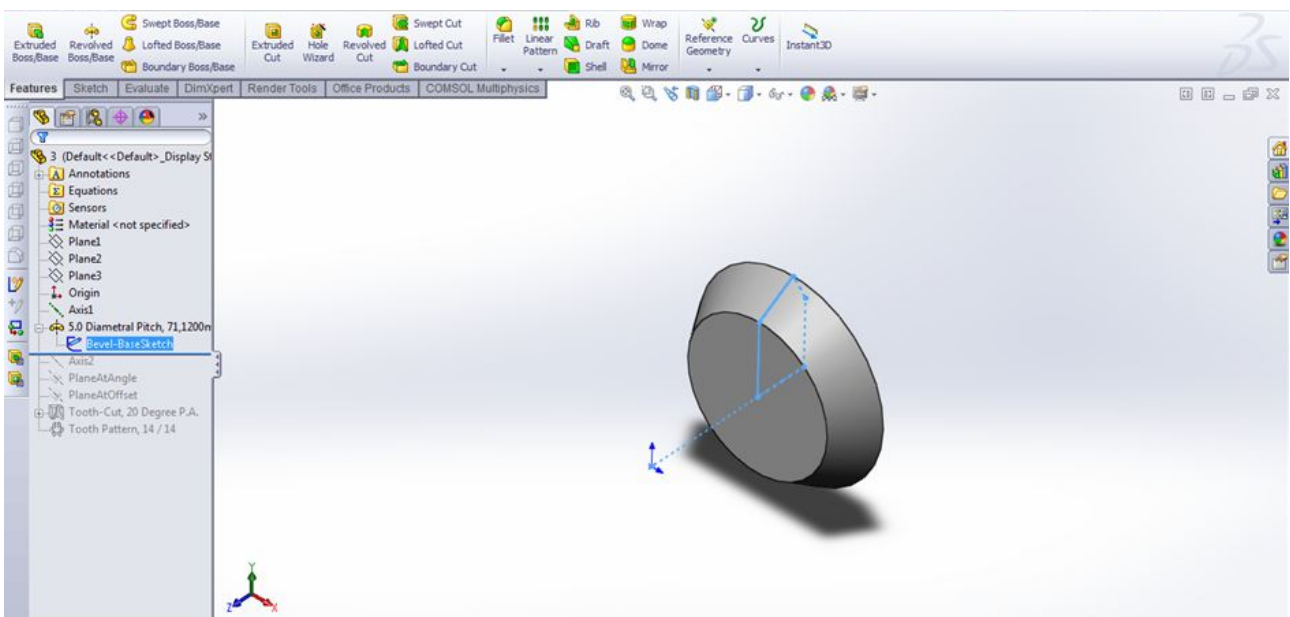
ΕΙΚΟΝΑ 4.16: Δημιουργία ενός οδόντα



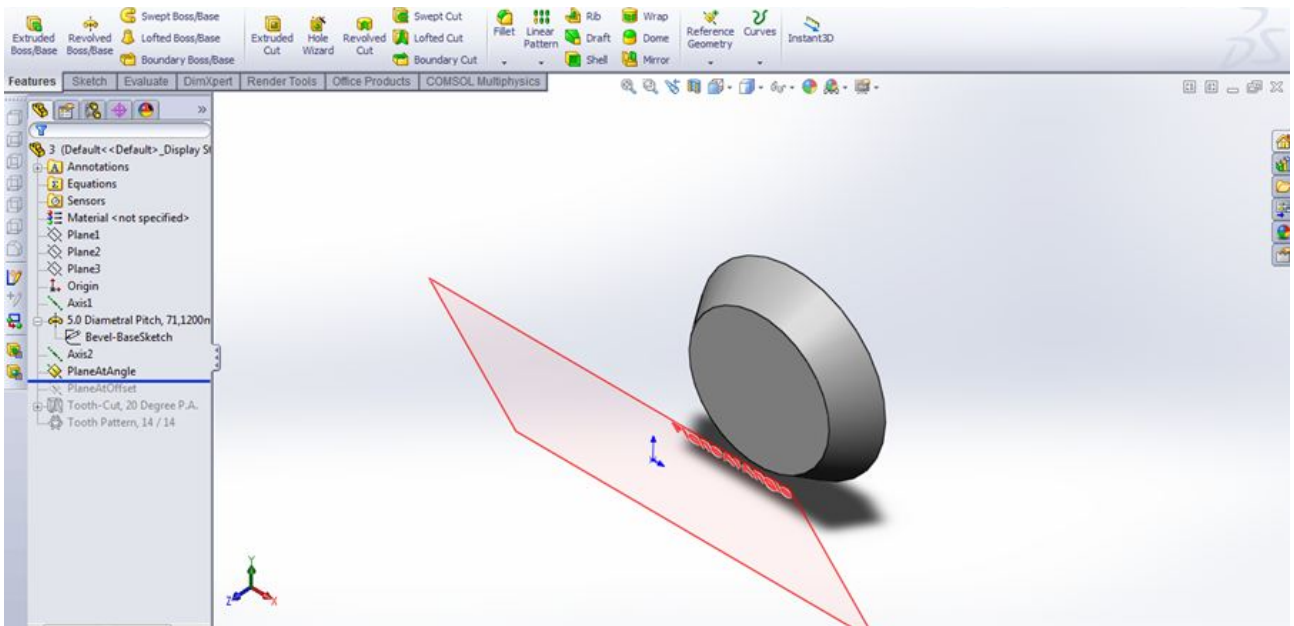
ΕΙΚΟΝΑ 4.17: Δημιουργία ενός οδόντα μετά την εφαρμογή Extrude



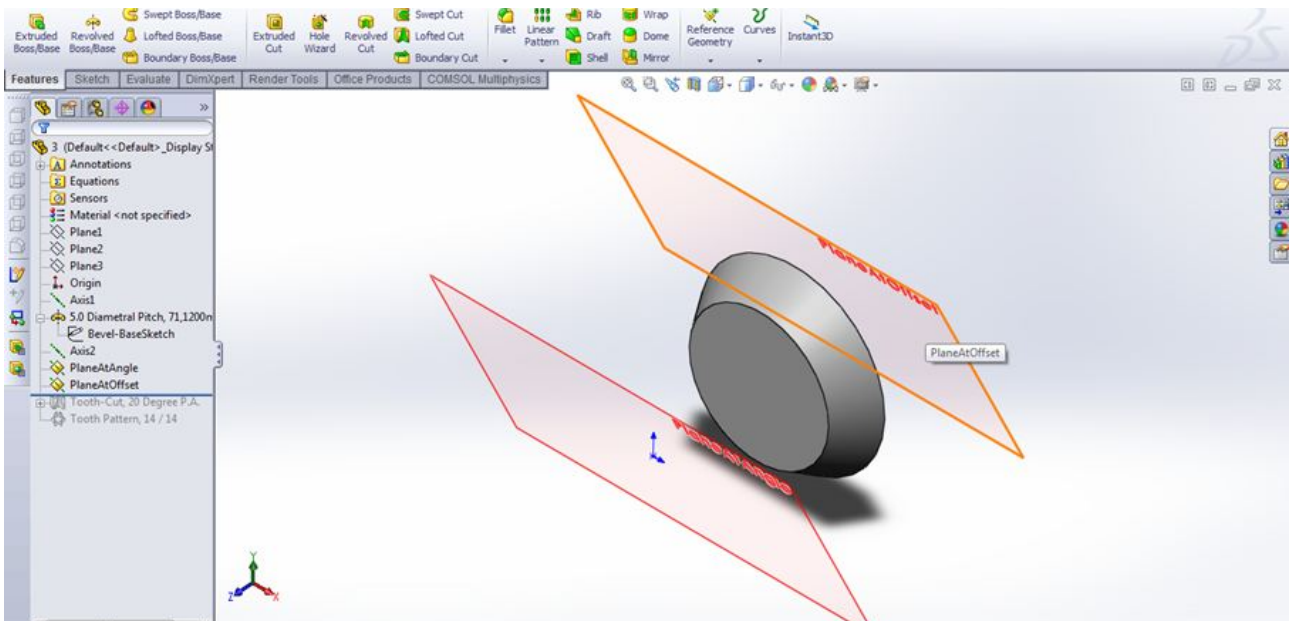
ΕΙΚΟΝΑ 4.18: Πολλαπλασιασμός δοντιών (66 δόντια)



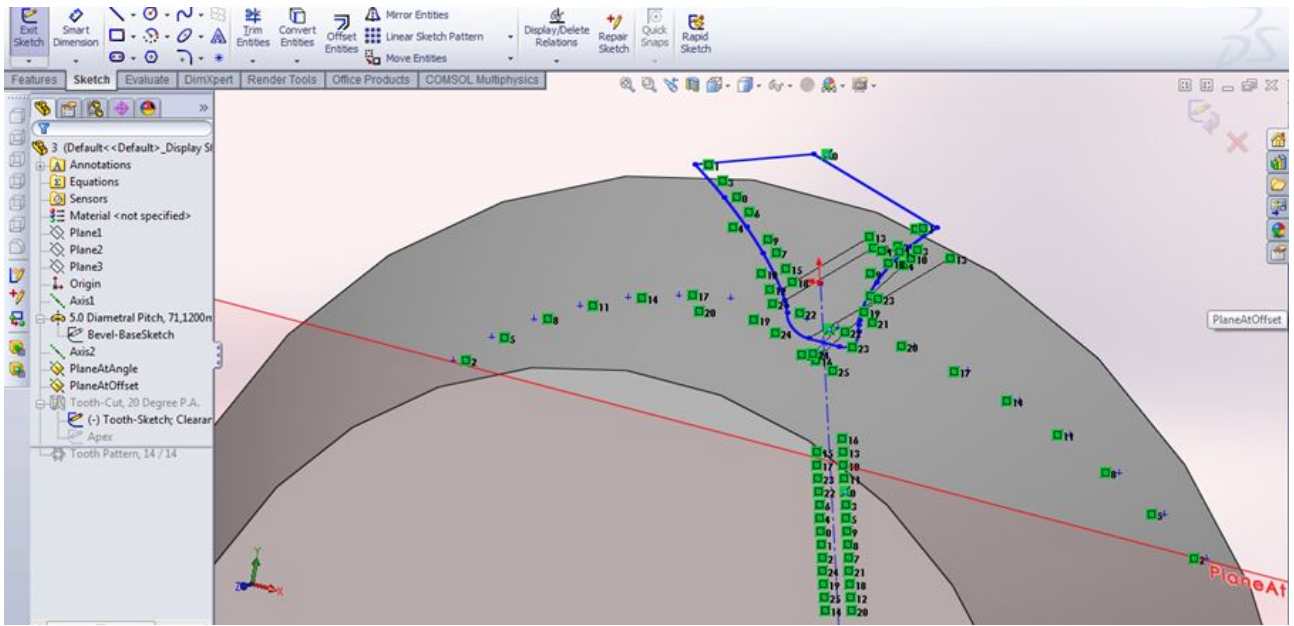
ΕΙΚΟΝΑ 4.19: Δημιουργία κωνικού οδοντωτού τροχού (πινιόν) με μέτρο οδόντωσης 5 mm



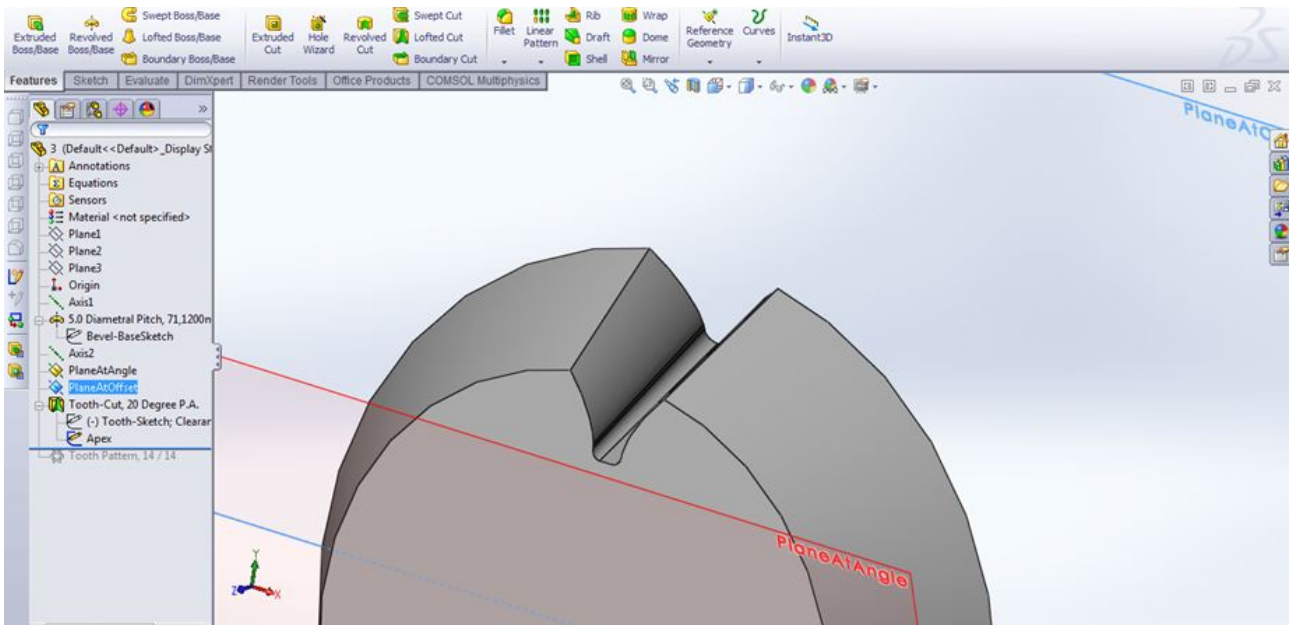
ΕΙΚΟΝΑ 4.20: Δημιουργία πλάγιου επιπέδου



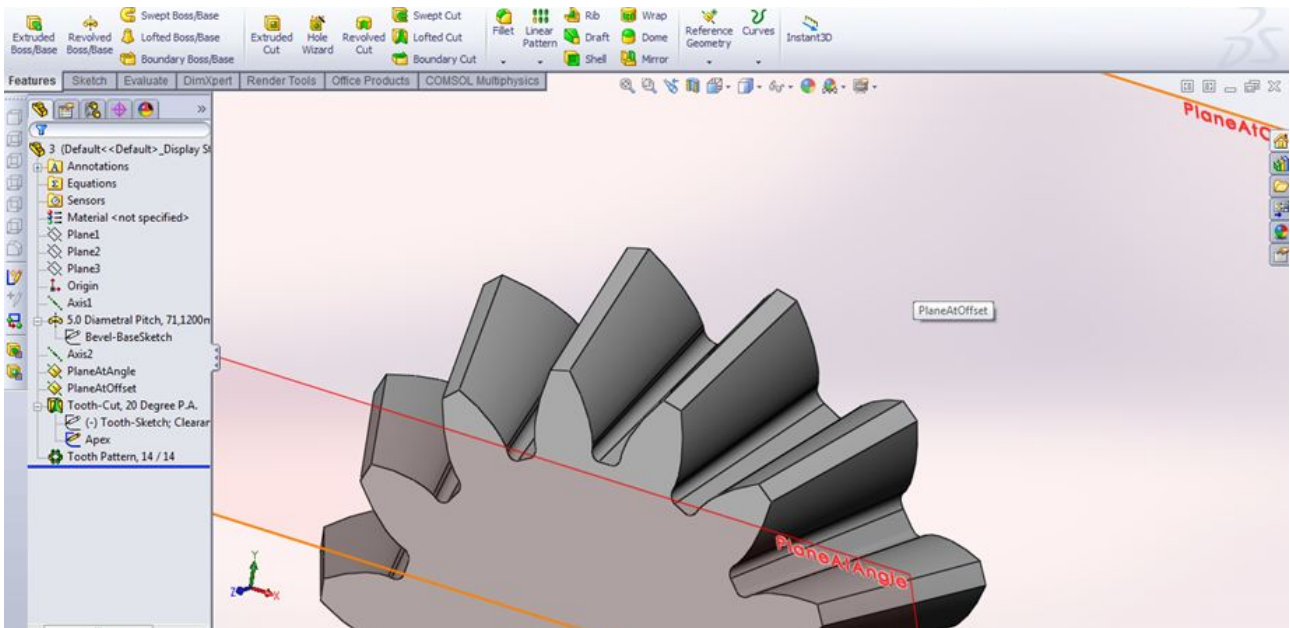
ΕΙΚΟΝΑ 4.21: Δημιουργία επιπέδου παράλληλου στο πλάγιο



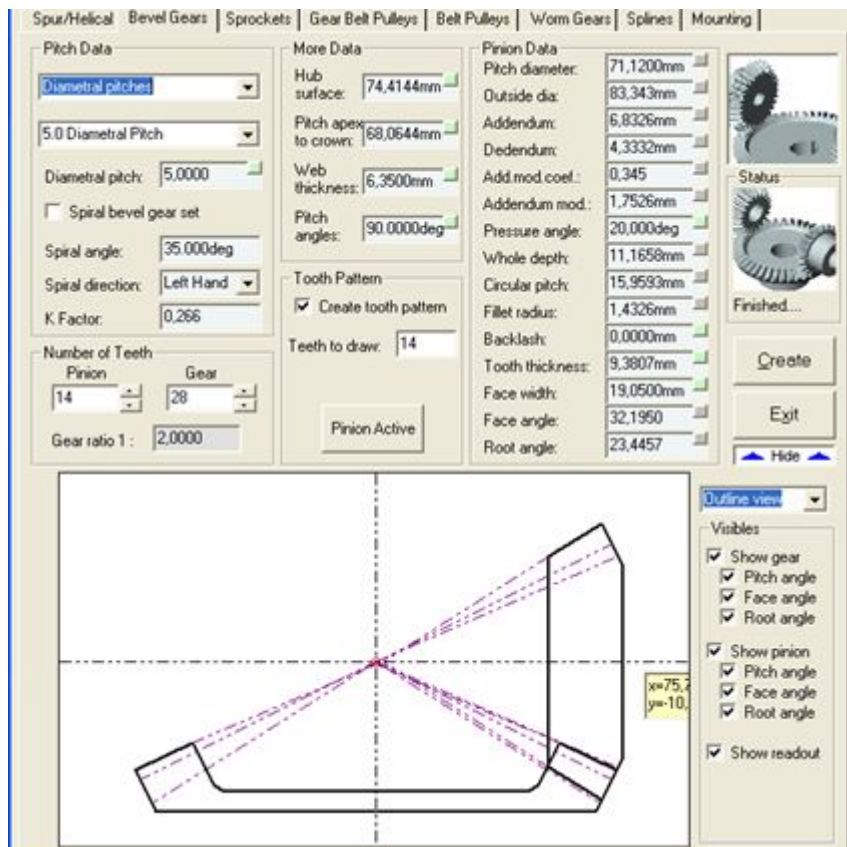
ΕΙΚΟΝΑ 4.22: Δημιουργία ενός οδόντα



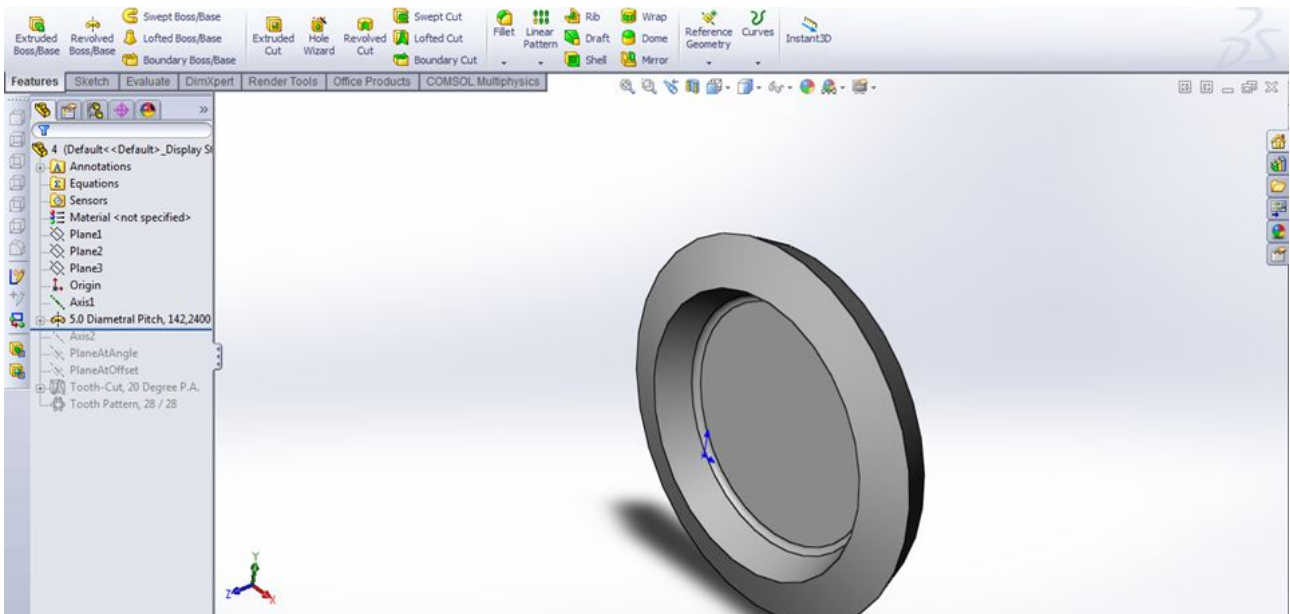
ΕΙΚΟΝΑ 4.23: Δημιουργία ενός οδόντα μετά την εφαρμογή Extrude



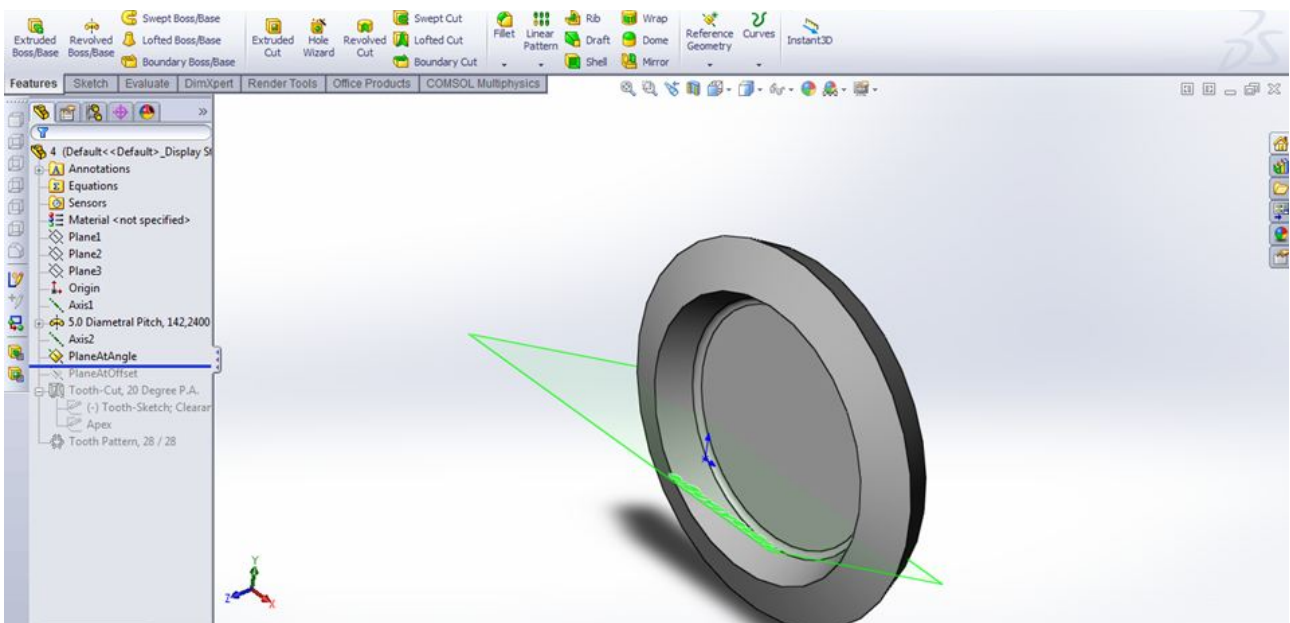
ΕΙΚΟΝΑ 4.24: Πολλαπλασιασμός δοντιών (14 δόντια)



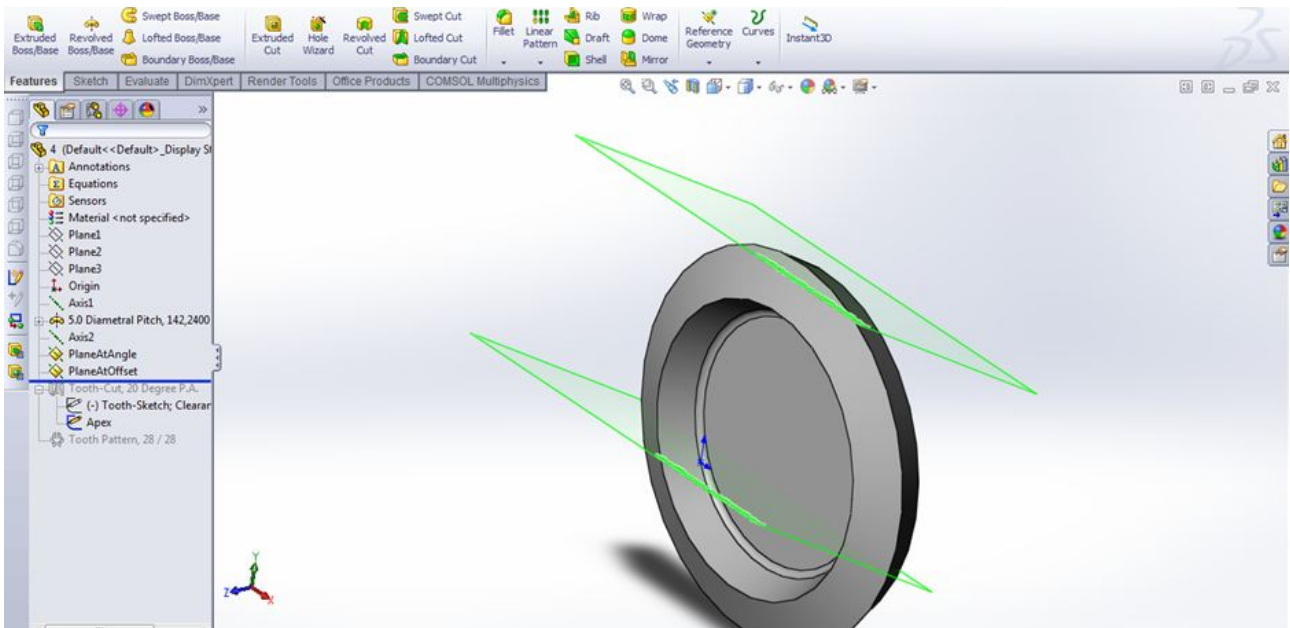
ΕΙΚΟΝΑ 4.25: Πλατφόρμα σχεδίασης γραναζιών



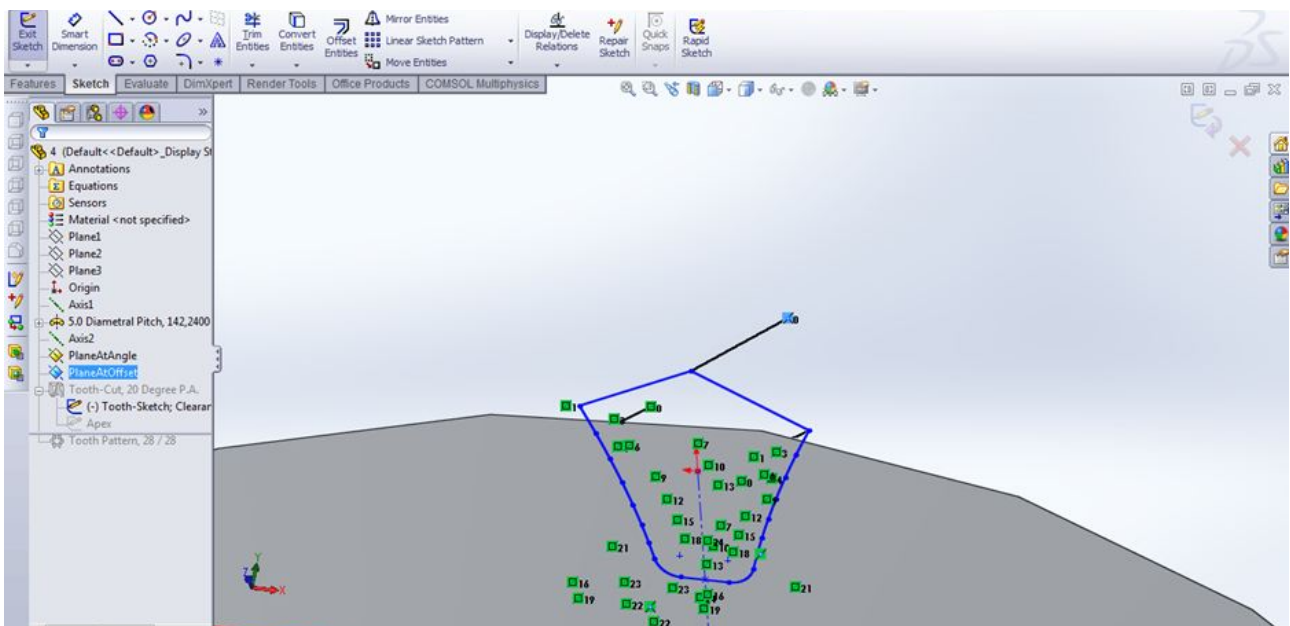
ΕΙΚΟΝΑ 4.26: Δημιουργία κωνικού οδοντωτού τροχού (κινητήριο) με μέτρο οδόντωσης 5 mm



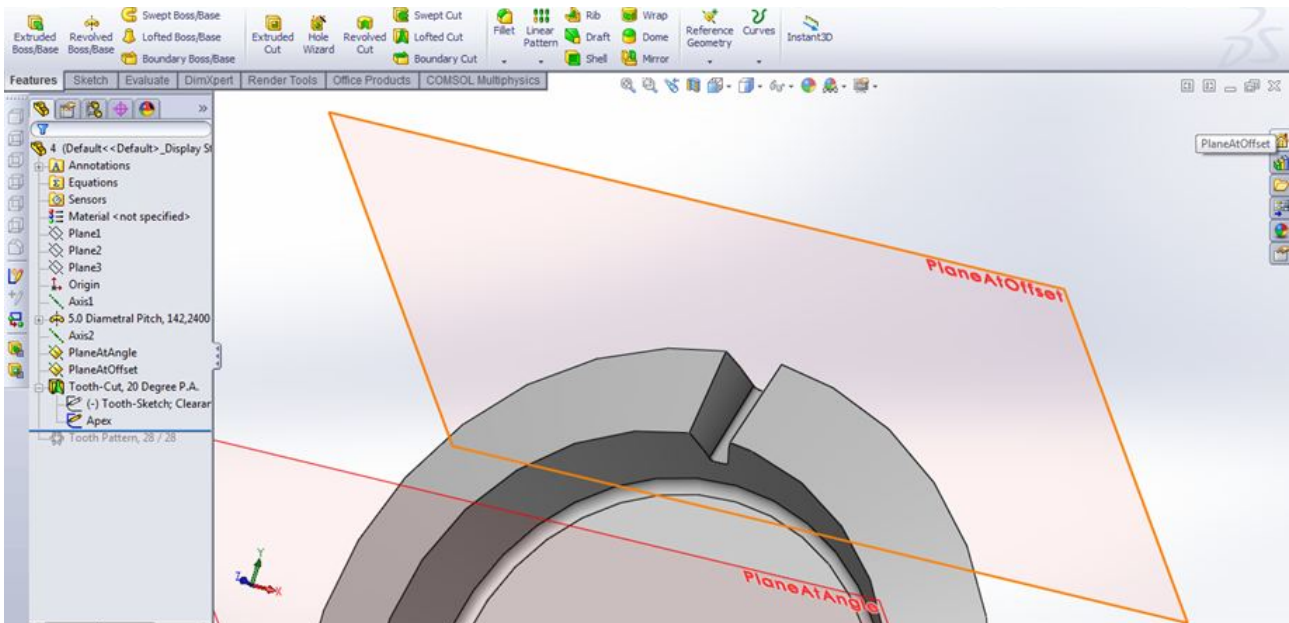
ΕΙΚΟΝΑ 4.27: Δημιουργία επιπέδου υπό γωνία



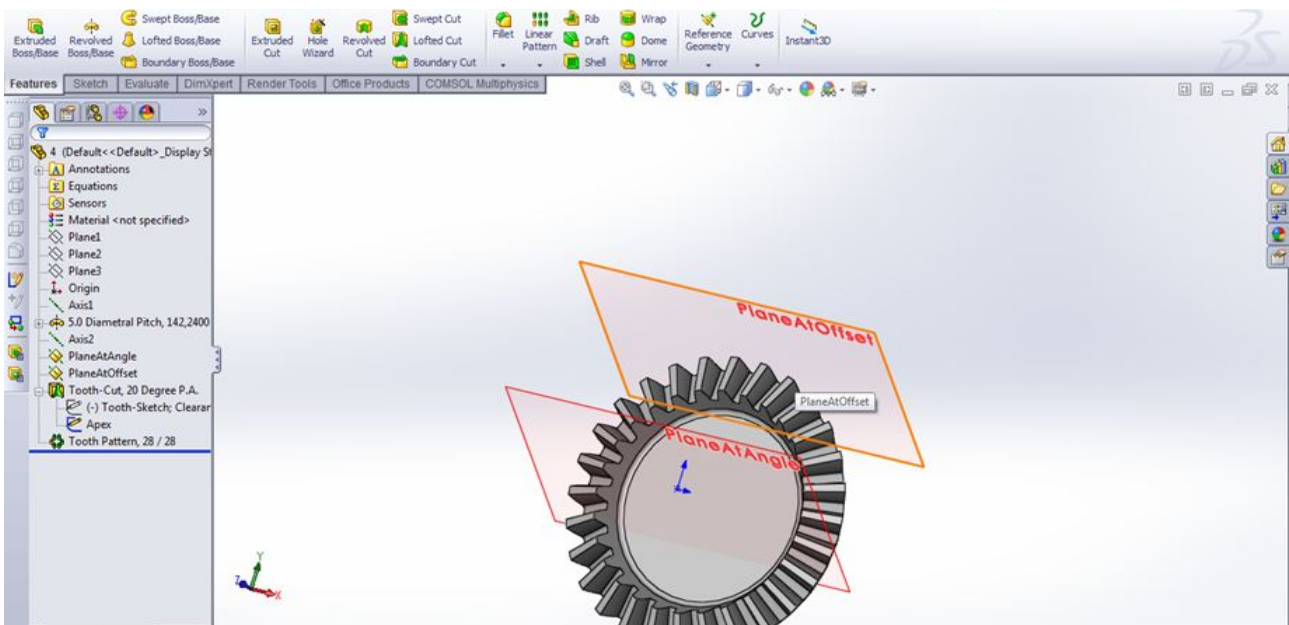
ΕΙΚΟΝΑ 4.28: Δημιουργία επιπέδου παράλληλου σε επίπεδο υπό γωνία επαπτόμενο σε επιφάνεια



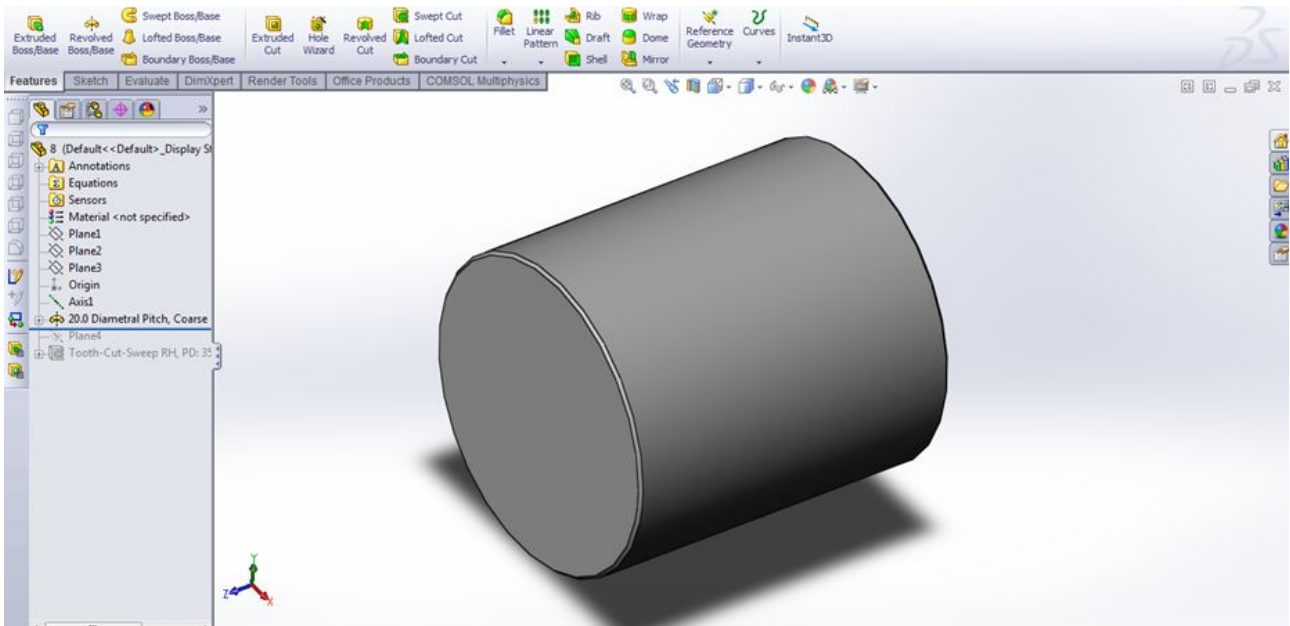
ΕΙΚΟΝΑ 4.29: Δημιουργία ενός οδόντα



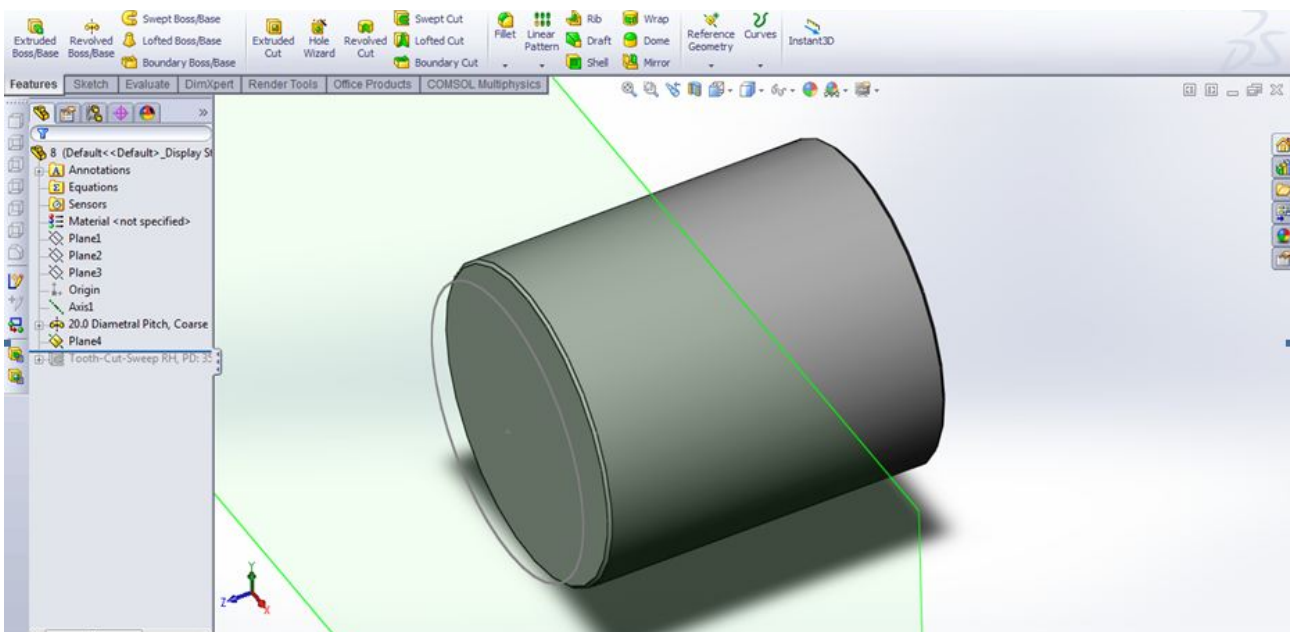
ΕΙΚΟΝΑ 4.30: Δημιουργία ενός οδόντα μετά την εφαρμογή Extrude



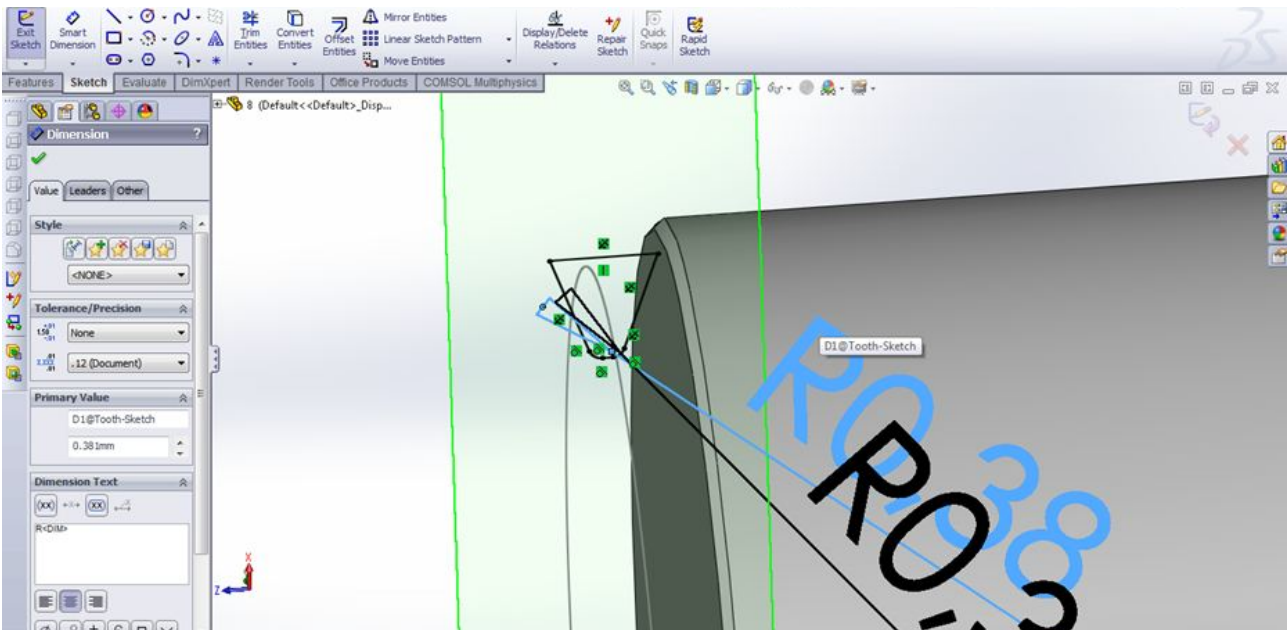
ΕΙΚΟΝΑ 4.31: Πολλαπλασιασμός δοντιών 28 δόντια



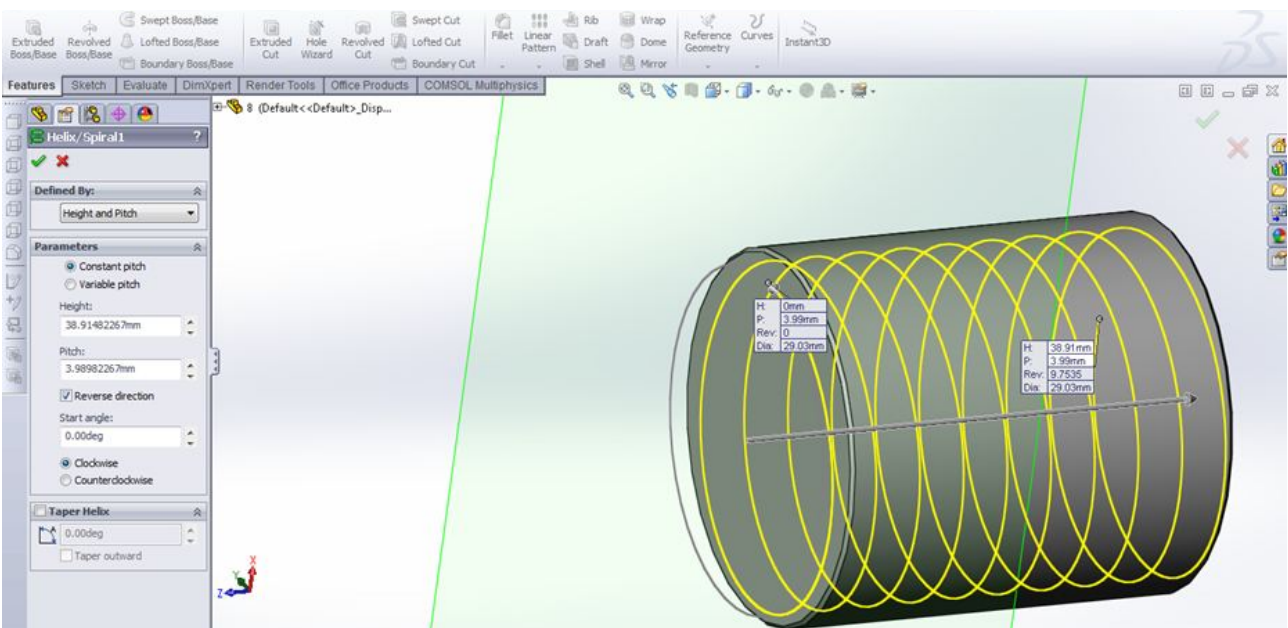
ΕΙΚΟΝΑ 4.32: Δημιουργία αρχικού κυλίνδρου



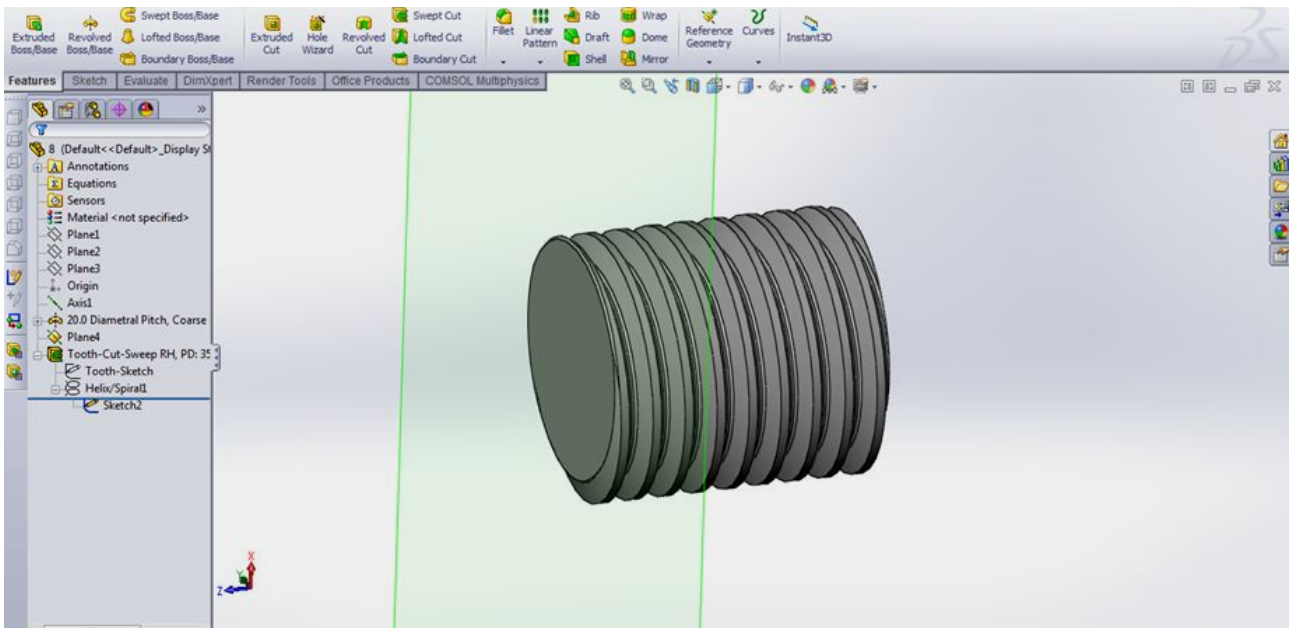
ΕΙΚΟΝΑ 4.33: Δημιουργία μίας σπείρας



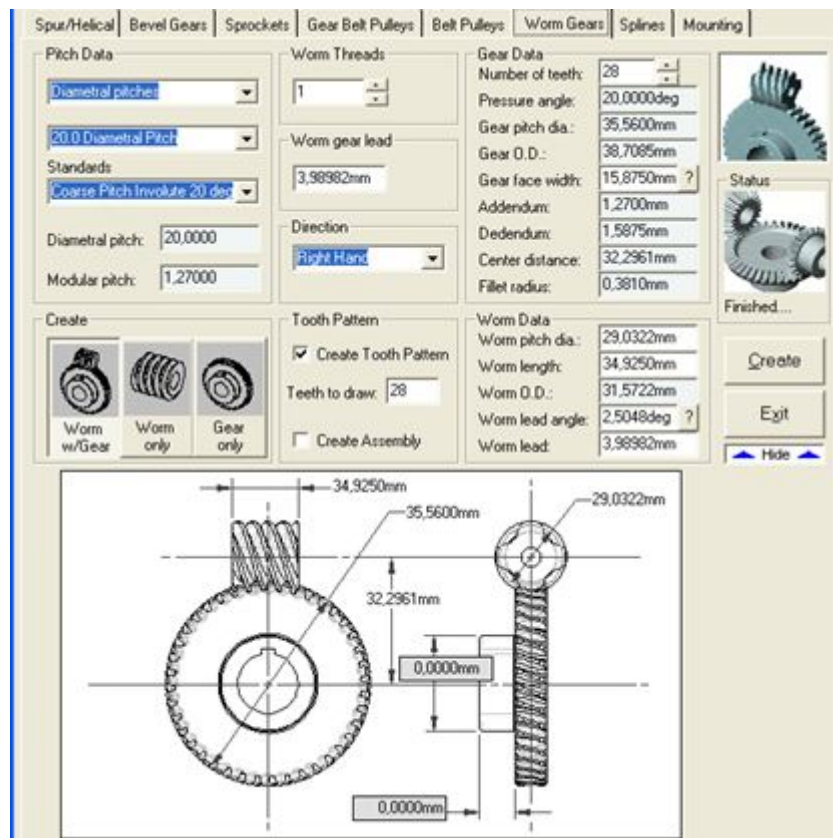
ΕΙΚΟΝΑ 4.34: Δημιουργία προφίλ δοντιού



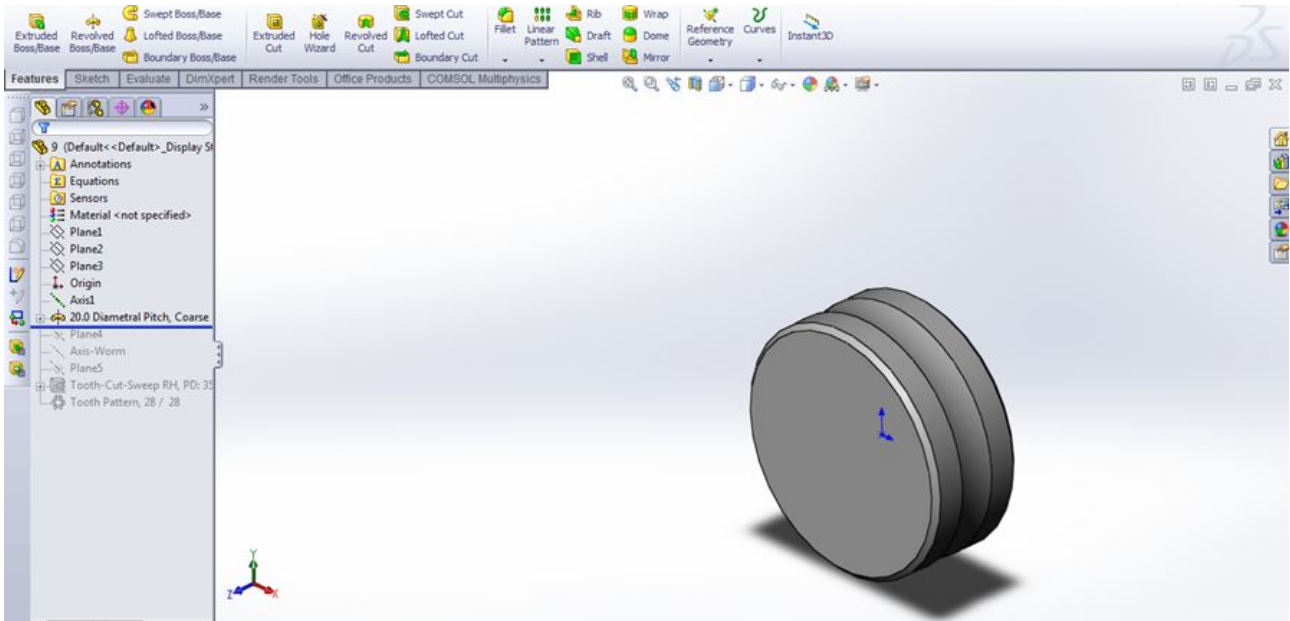
ΕΙΚΟΝΑ 4.35: Δημιουργία σπείρας με βήμα 3.99mm και ύψος 38,91 mm



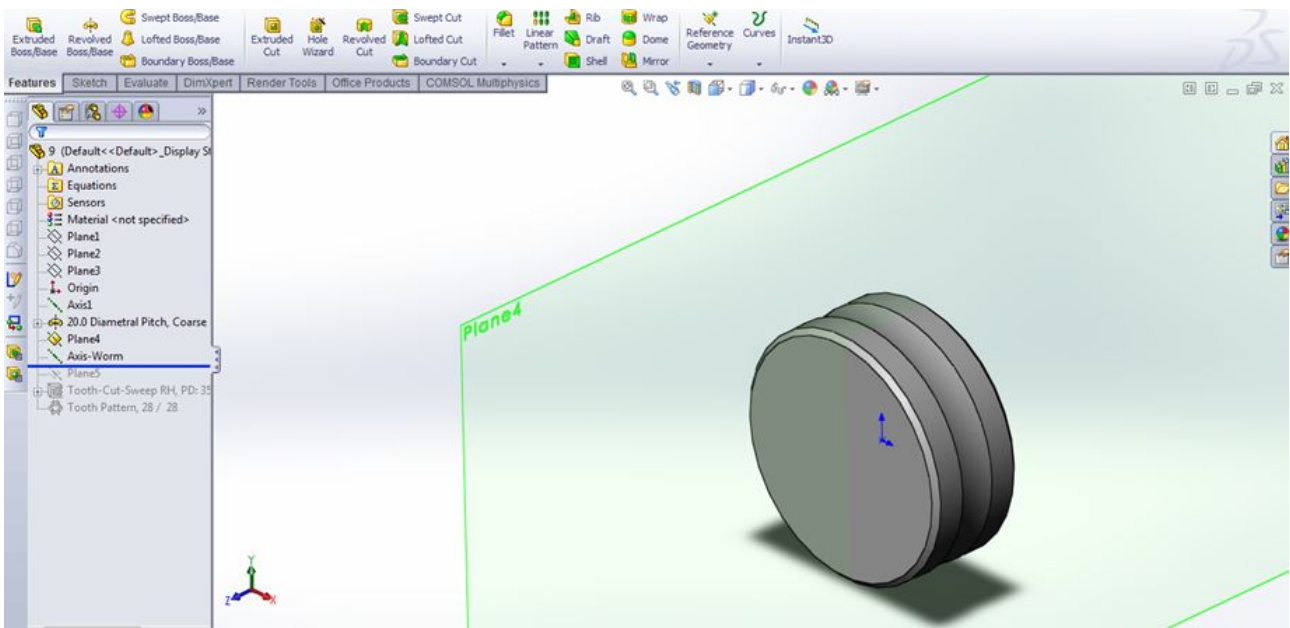
ΕΙΚΟΝΑ 4.36: Δημιουργία ατέρμονα κοχλία συνεργαζόμενο με γρανάζι



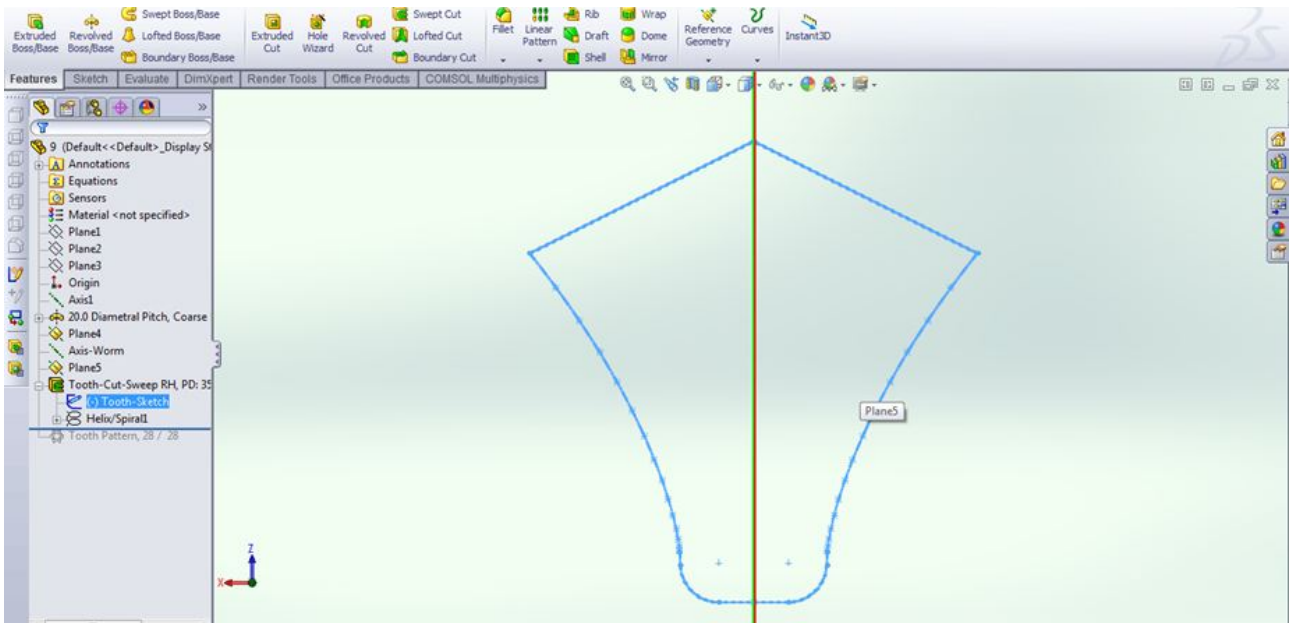
ΕΙΚΟΝΑ 4.37: Πλατφόρμα σχεδίασης κοχλία - γραναζιού



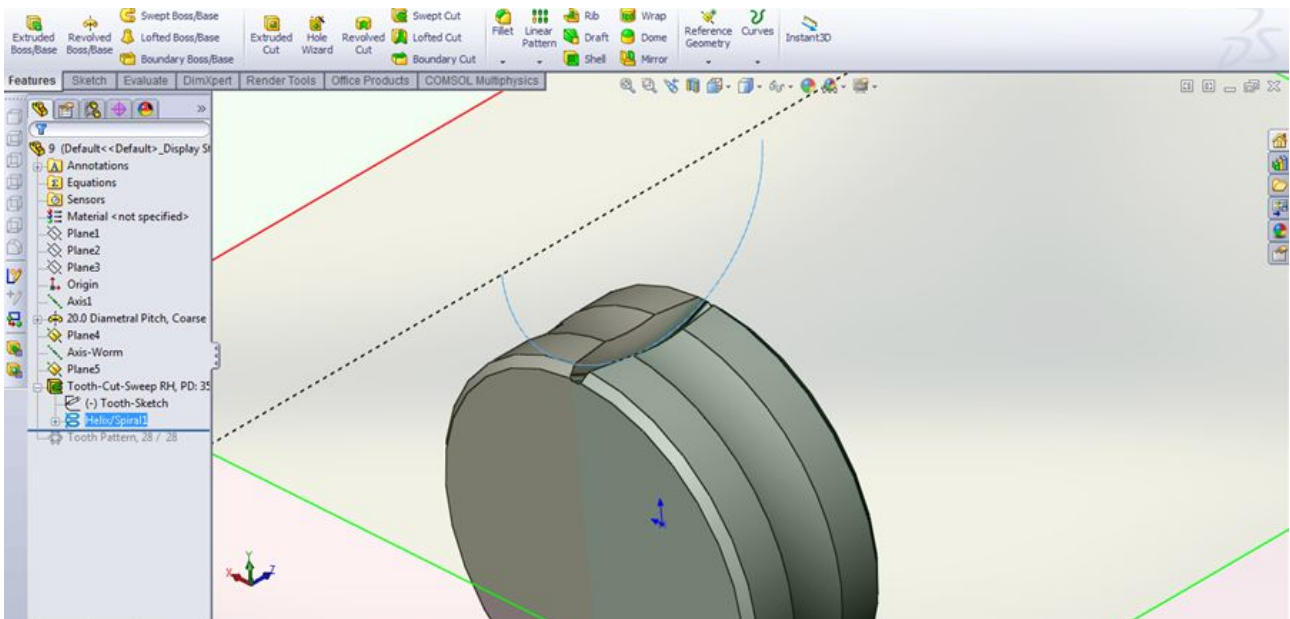
ΕΙΚΟΝΑ 4.38: Δημιουργία αρχικού σώματος γραναζιού με την εντολή revolve



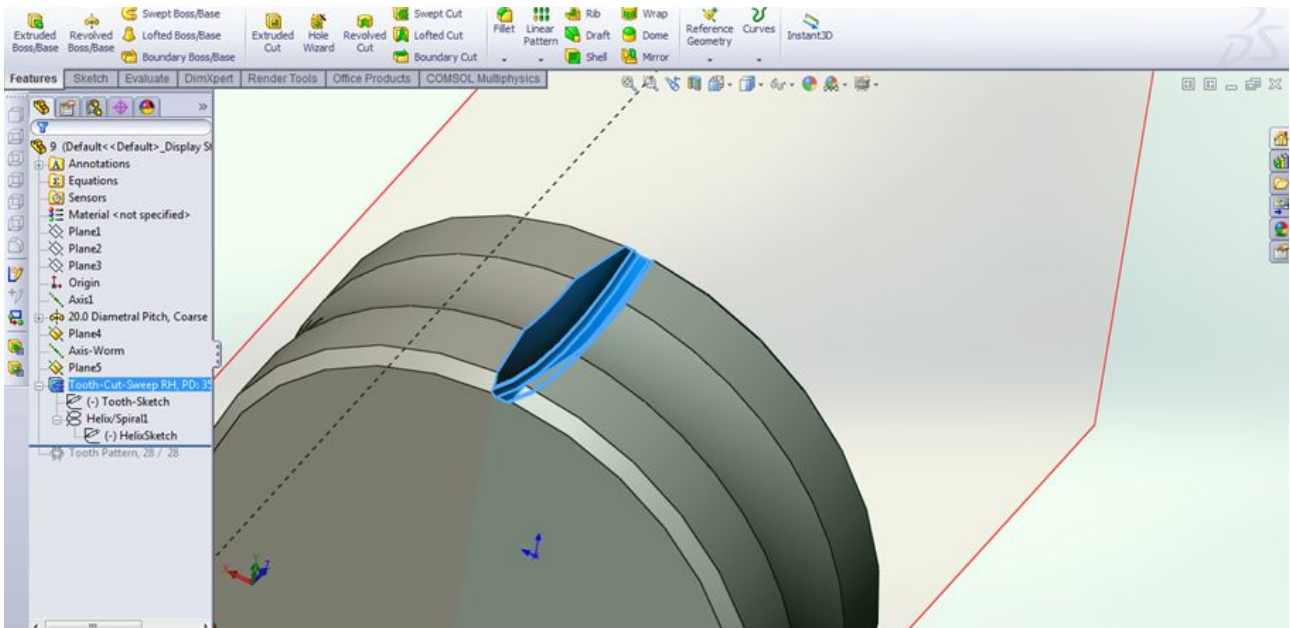
ΕΙΚΟΝΑ 4.39: Επιλογή επιπέδου



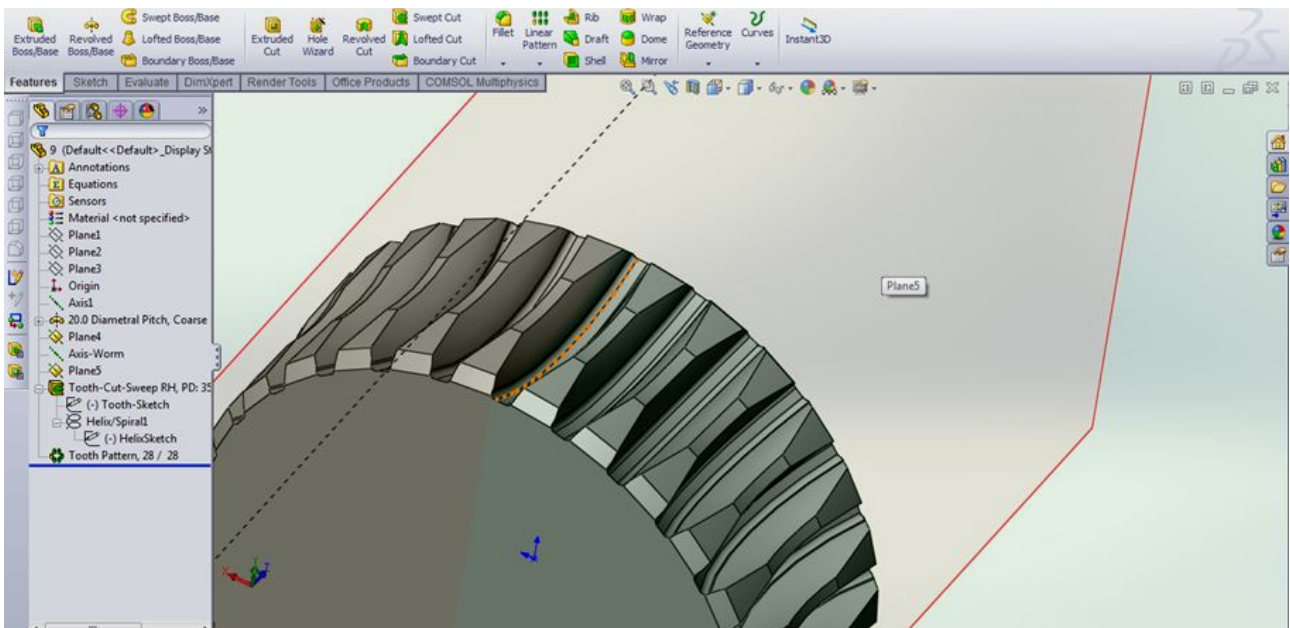
ΕΙΚΟΝΑ 4.40: Δημιουργία μορφής οδόντα σε επίπεδο κάθετο με το επιλεγόμενο



ΕΙΚΟΝΑ 4.41: Δημιουργία μισής έλικας και αφαίρεση υλικού από το σώμα του γραναζιού με την εντολή Cut Sweep

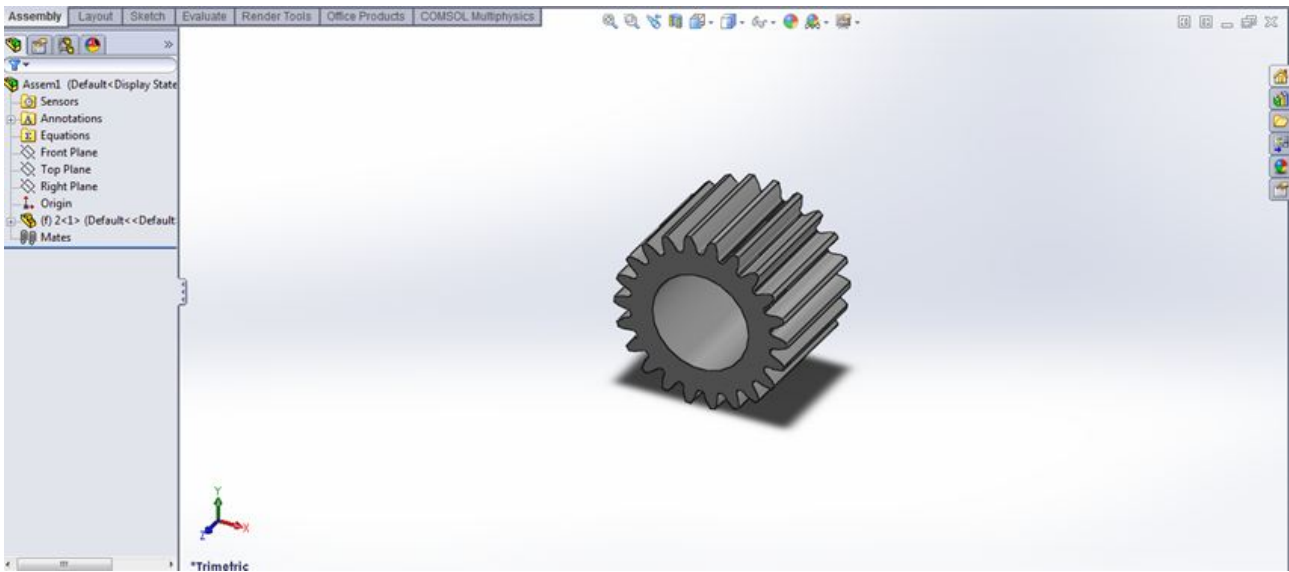


ΕΙΚΟΝΑ 4.42: Επιλογή επιπέδου προκειμένου να πολλαπλασιαστεί το δημιουργούμενο κενό

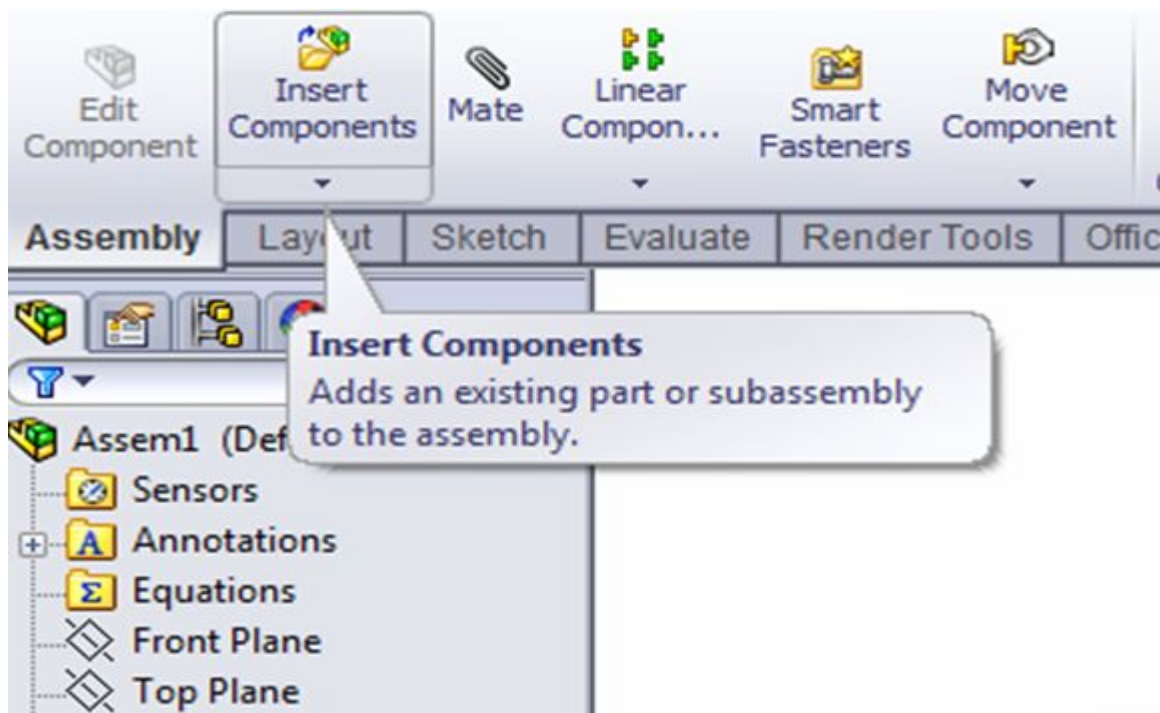


ΕΙΚΟΝΑ 4.43: Τελική μορφή γραναζιού

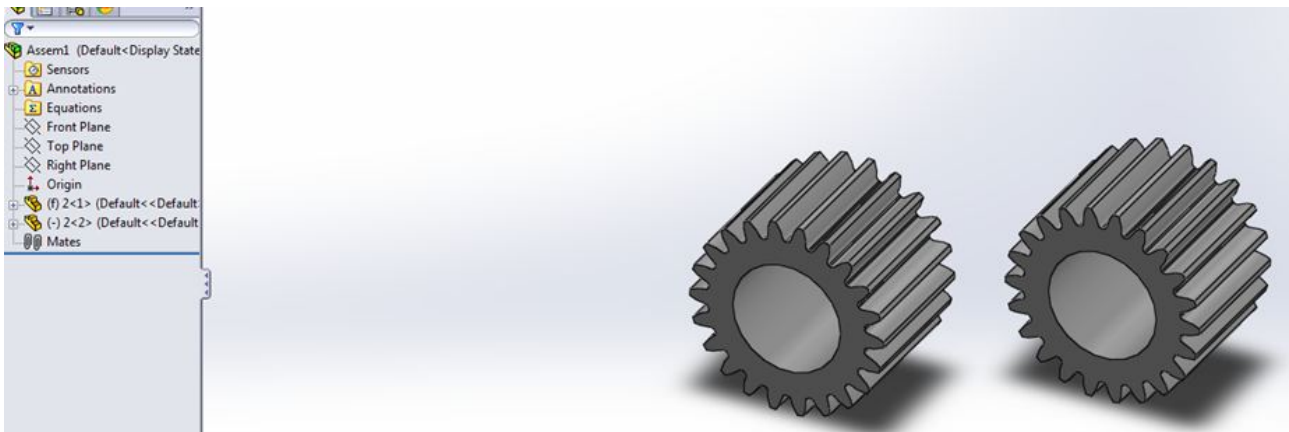
Συναρμολόγηση – συνεργασία γραναζιών



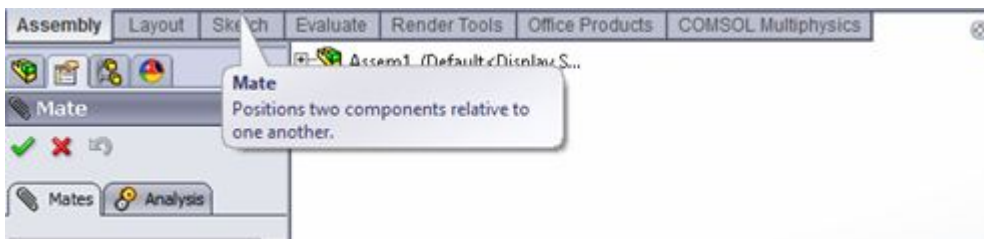
ΕΙΚΟΝΑ 4.44: Αρχική εισαγωγή γραναζιού στο πρόγραμμα



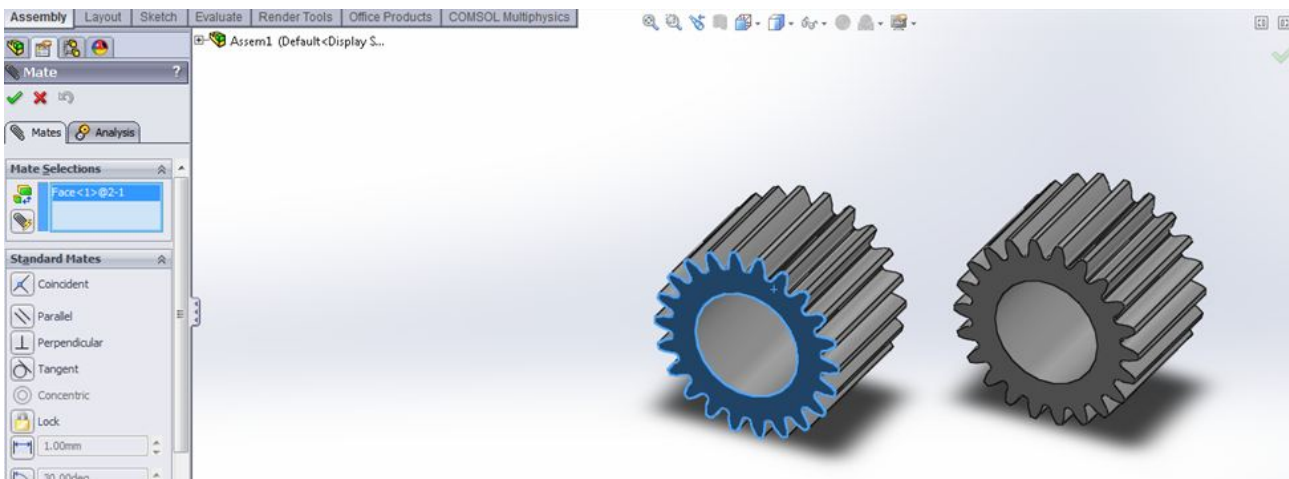
ΕΙΚΟΝΑ 4.45: Αρχική εισαγωγή γραναζιών στο πρόγραμμα



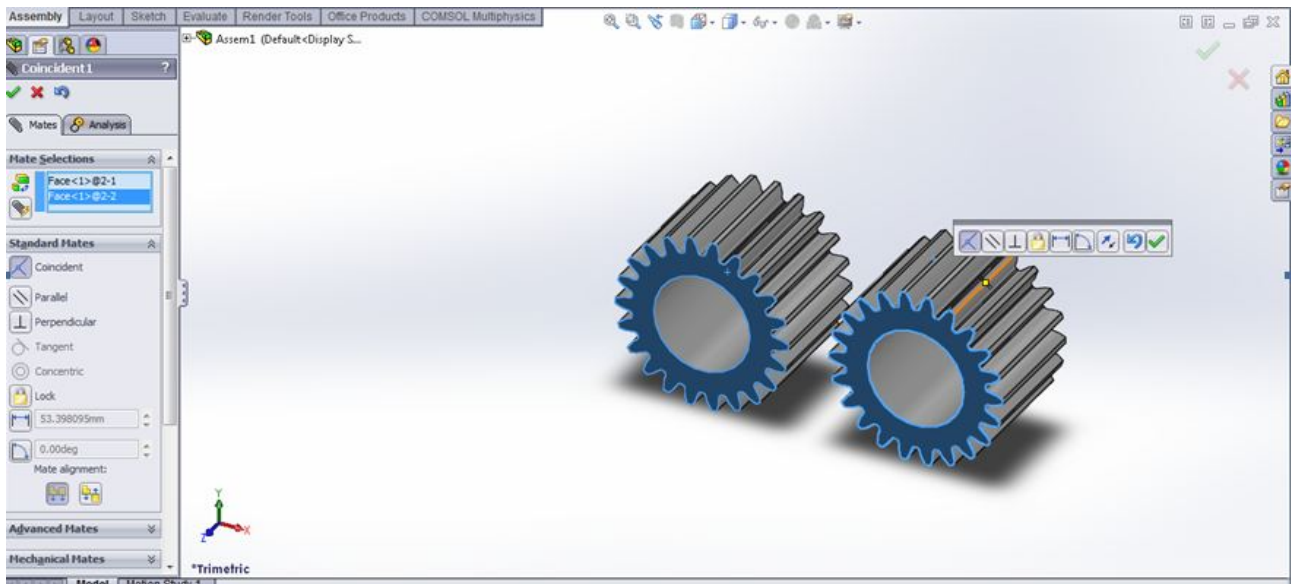
ΕΙΚΟΝΑ 4.46: Αρχική εισαγωγή γραναζιών στο πρόγραμμα



ΕΙΚΟΝΑ 4.47: Αρχική εισαγωγή γραναζιών στο πρόγραμμα



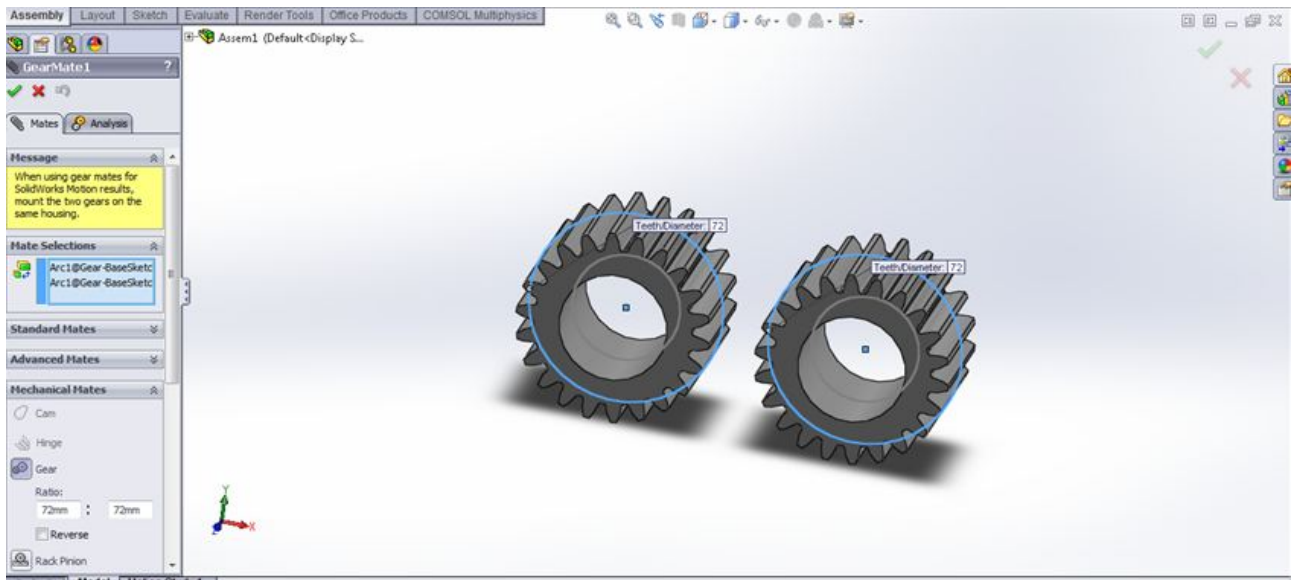
ΕΙΚΟΝΑ 4.48: Τοποθέτηση των γραναζιών σε συγκεκριμένες θέσεις



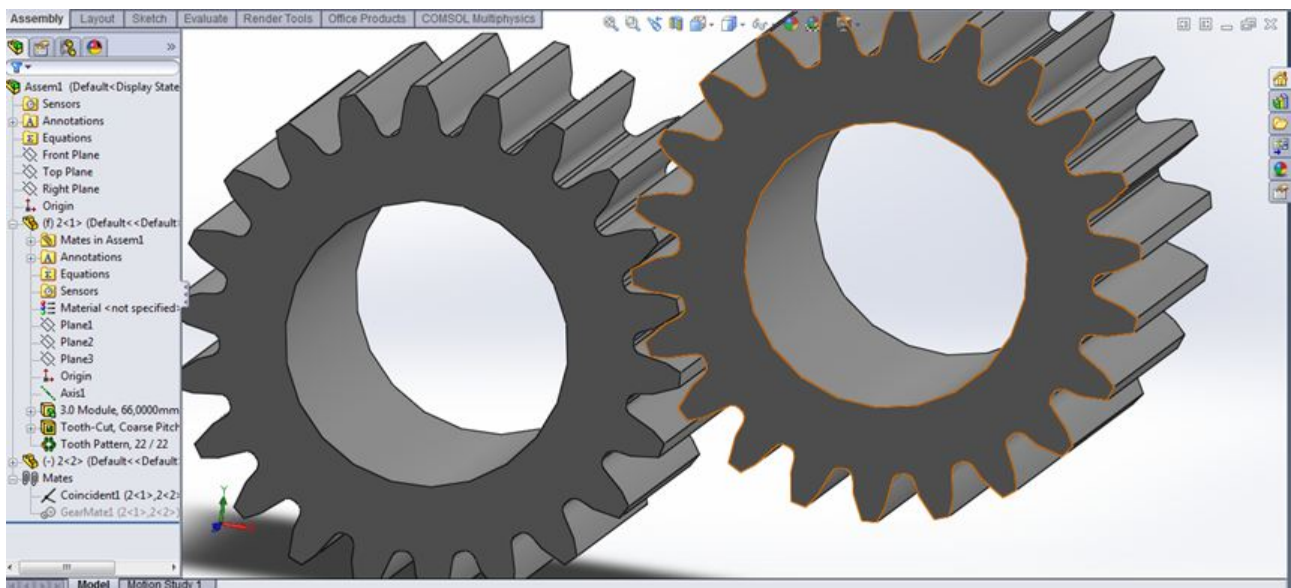
ΕΙΚΟΝΑ 4.49: Τοποθέτηση γραναζιών σε παράλληλο επίπεδο (μεταξύ τους).



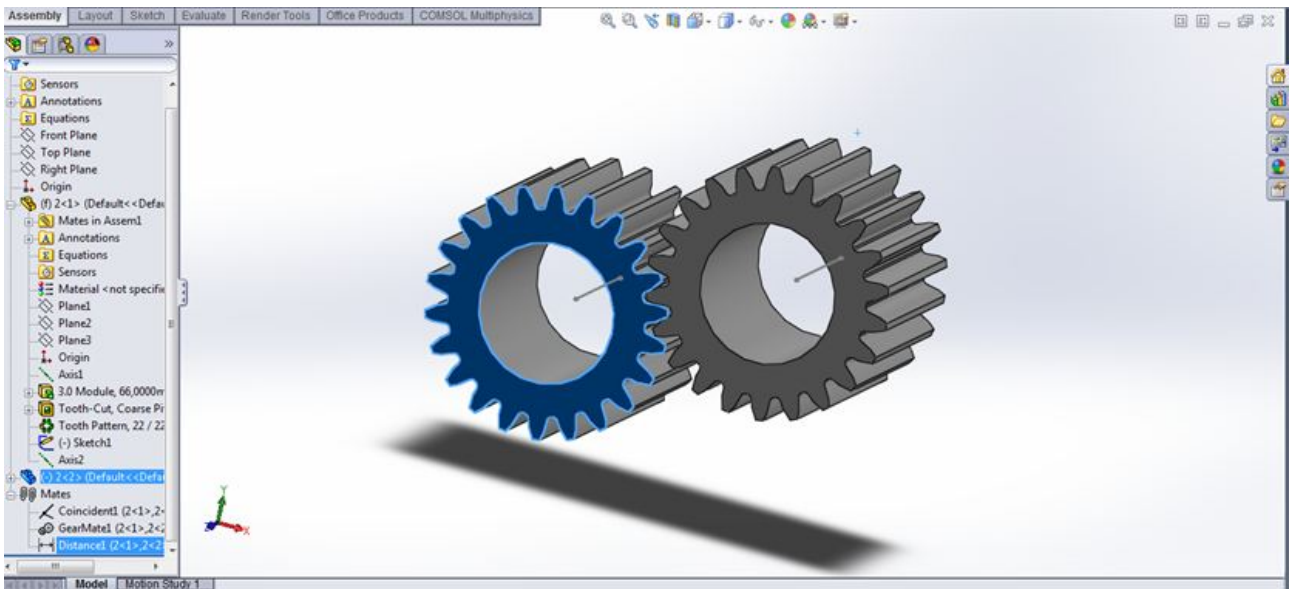
ΕΙΚΟΝΑ 4.50: Καθορισμός λειτουργίας γραναζιών.



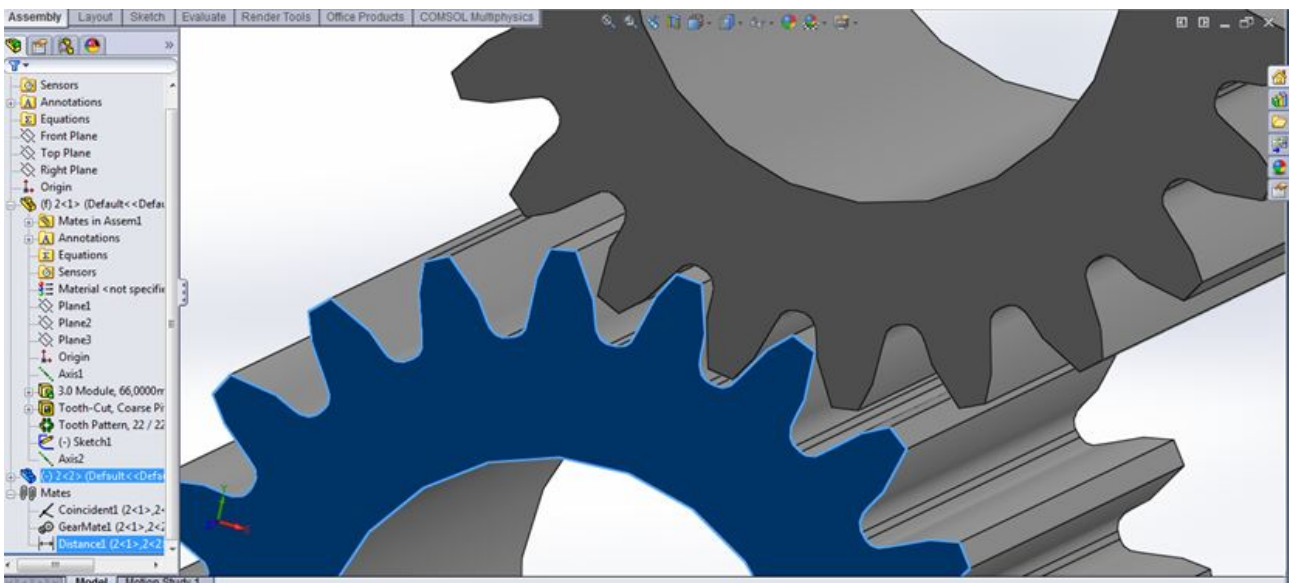
ΕΙΚΟΝΑ 4.51: Καθορισμός λειτουργίας γραναζιών. Σχέση μετάδοσης ίση με 1 (ένα)



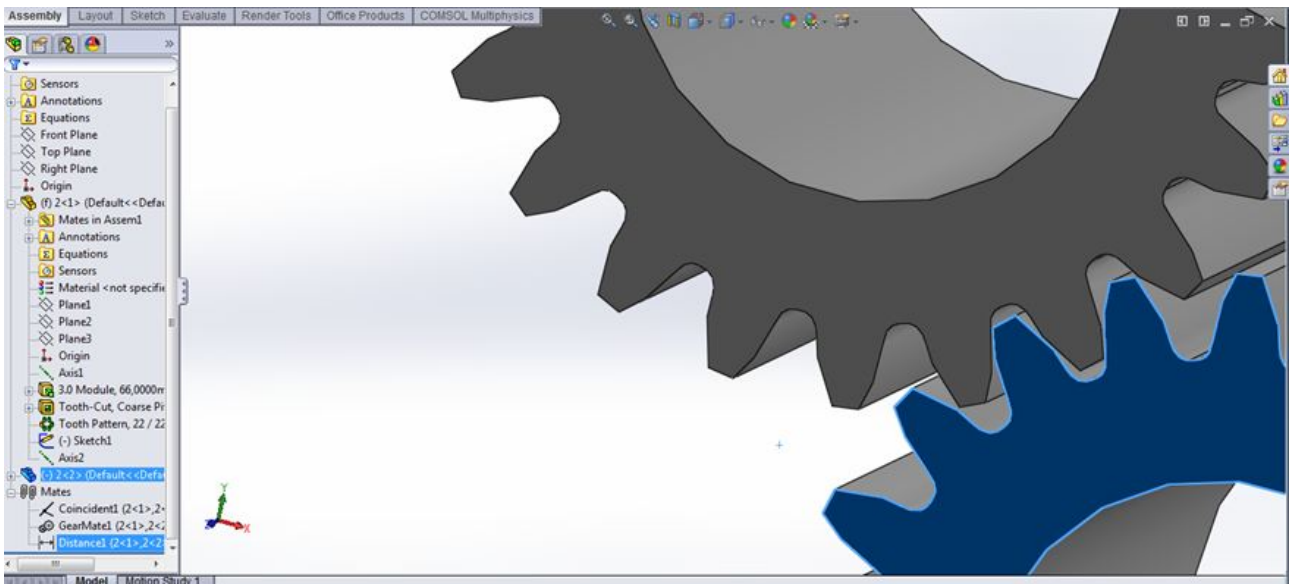
ΕΙΚΟΝΑ 4.52: Καθορισμός λειτουργίας γραναζιών. Τελική τοποθέτηση



ΕΙΚΟΝΑ 4.53: Τοποθέτηση γραναζιών σε συγκεκριμένη απόσταση



ΕΙΚΟΝΑ 4.54: Τελική συνεργασία δοντιών



ΕΙΚΟΝΑ 4.55: Τελική συνεργασία δοντιών

Οι βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται στην παρακάτω ενότητα.

Τρισδιάστατη σχεδίαση και ενοποίηση των εξαρτημάτων

- **Boss extrude:** Κάνει εξώθηση κάποιας δισδιάστατης γεωμετρίας
- **Cut extrude:** Κάνει εξώθηση και ταυτόχρονα κόβει κάποιας δισδιάστατης γεωμετρίας
- **Revolve:** Κάνει περιστροφή κάποιας δισδιάστατης γεωμετρίας σε σχέση με κάποια αξονική
- **Sweep:** Κάνει τρισδιάστατη οντότητα κάποιας γεωμετρίας (όπως ο κύκλος) δημιουργούμενη από μία γραμμή (όπως η έλικα)
- **Boss extrude:** Κάνει εξώθηση κάποιας δισδιάστατης γεωμετρίας
- **Cut extrude:** Κάνει εξώθηση και ταυτόχρονα κόβει κάποιας δισδιάστατης γεωμετρίας
- **Shell:** Δημιουργεί κέλυφος
- **Sweep:** Κάνει τρισδιάστατη οντότητα κάποιας γεωμετρίας (όπως ο κύκλος) δημιουργούμενη από μία γραμμή (όπως η έλικα)
- **Fillet:** Δημιουργεί καμπυλότητα σε ένα στερεό
- **Distance:** τοποθετεί το εξάρτημα σε κάποια συγκεκριμένη απόσταση σε σχέση με κάποιο άλλο εξάρτημα
- **Concentric:** τοποθετεί το εξάρτημα ομοκεντρικά με κάποιο άλλο
- **Coincident:** τοποθετεί το εξάρτημα να συμπίπτει με κάποιο άλλο εξάρτημα
- **Angle:** τοποθετεί το εξάρτημα σε συγκεκριμένη γωνία σε σχέση με κάποιο άλλο εξάρτημα

Τα αποτελέσματα της σχεδίασης παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.

Επίλογος – Συμπεράσματα

Για την πραγματοποίηση της τρισδιάστατης σχεδίασης ενός συστήματος γρاناζιών σε συνεργασία, χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα 3D σχεδίασης CAD free trial 2012. Μία από τις χρησιμότητες του προγράμματος είναι ότι σε ένα ήδη κατασκευασμένο εξάρτημα μπορεί να γίνει (πολυεπεξεργασία και πιστή αντιγραφή) ακόμα και μετά την ολοκλήρωση του. Επίσης, διάφορα γρανάζια που σχεδιάστηκαν υπάρχει η δυνατότητα συναρμολόγησης τους με αποτέλεσμα το επιθυμητό τρισδιάστατο σχέδιο. Μία ακόμα σημαντική δυνατότητα του προγράμματος είναι ότι μπορεί και επεξεργάζεται το τελικό σχέδιο σε animation π.χ. (αν το τελικό σχέδιο είναι ένα σύστημα γρاناζιών υπάρχει η δυνατότητα να το δούμε και πώς λειτουργεί ένας μειωτήρας), μπορεί να το δει κάποιος μέσα από συγκεκριμένο επίπεδο τομής ή και ακόμα σε διάγραμμα αντοχής υλικού, ώστε να φανεί σε ποια σημεία καταπονείται η εξεταζόμενη διάταξη (δυσμενέστερη περίπτωση). Η σχεδίαση γίνεται σε CAD απ' το οποίο το τελικό σχέδιο μπορεί να εισαχθεί και σε πρόγραμμα CAM και να προκύψει ο G κώδικας βάσει του οποίου θα υλοποιηθεί σε αυτόματο κέντρο κατεργασίας C.N.C.

Βιβλιογραφία

Βιβλία

1. Στοιχεία μηχανών ΙΙ - Μετάδοση κίνησης, οδοντωτοί τροχοί, μάντες, αλυσίδες, Στεργίου Ιωάννης
2. Εγχειρίδιο Solidworks
3. Μηχανολογικό σχέδιο, Μελέτιος Βούλγαρης
4. Cook R.D, Malkus D.S, and Plesha M. E., Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 3rd
5. Ed., John Wiley and Sons, 1989.
6. Huebner K.H., Thornton E.A., The Finite Element Method for Engineers, Second Edition, John Wiley and Sons, 1982.

Ιστοσελίδες

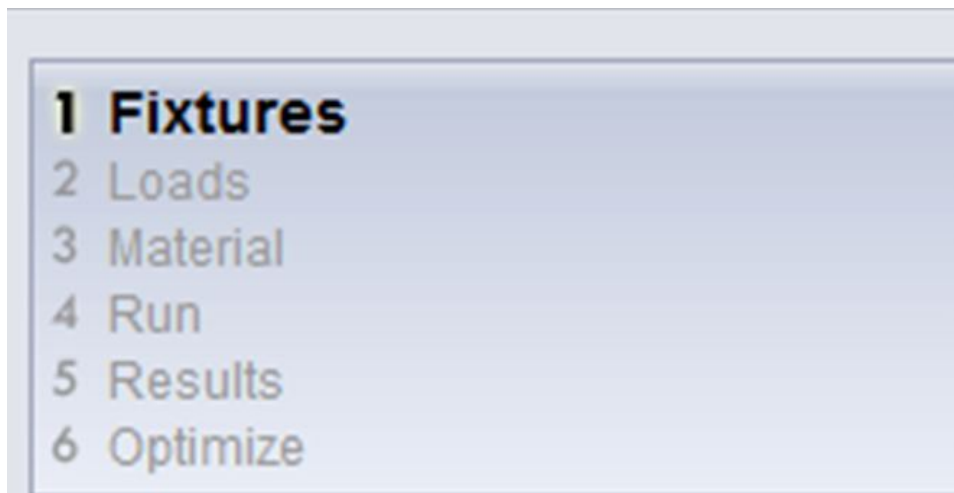
Google Photos

<http://www.google.com/>

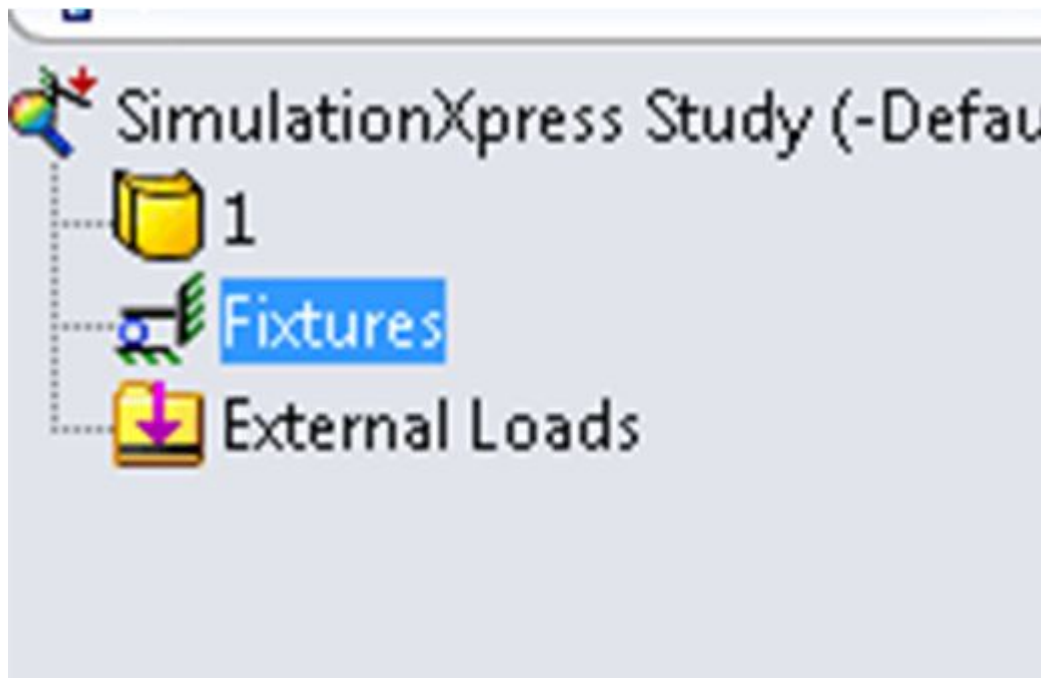
Wikipedia

<http://el.wikipedia.org/>

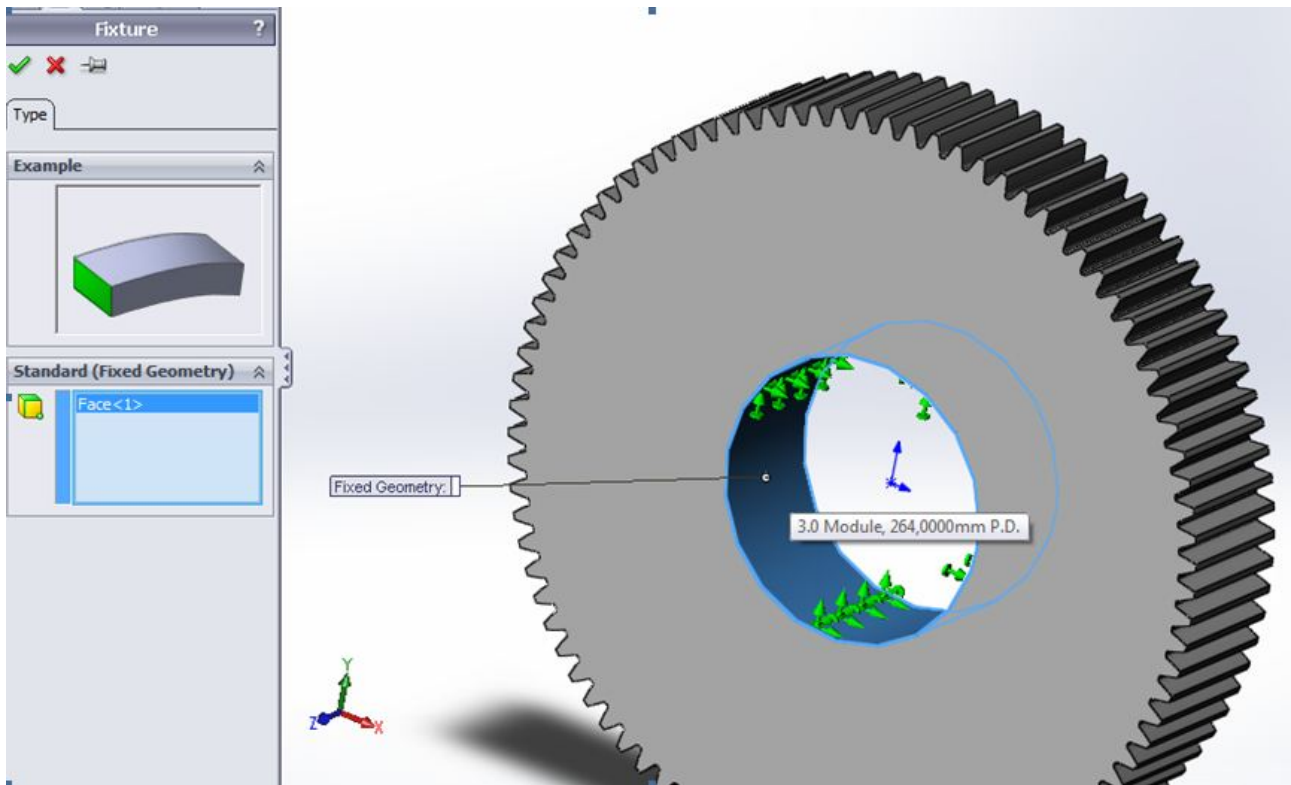
Παράρτημα



Σχήμα Π1: Εισαγωγή στηρίξεων



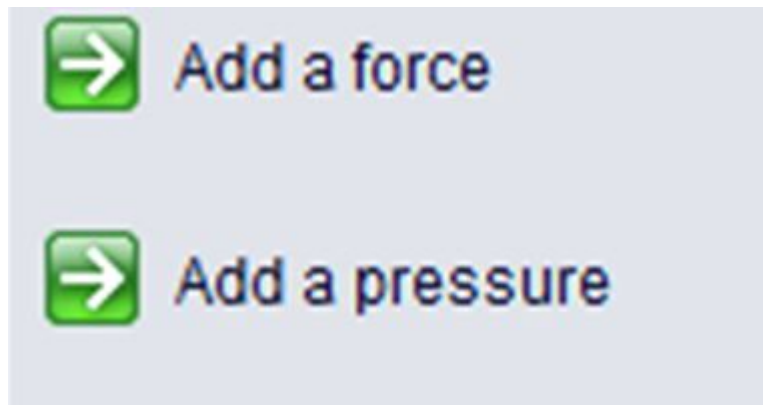
Σχήμα Π2: Εισαγωγή στηρίξεων Πάκτωση



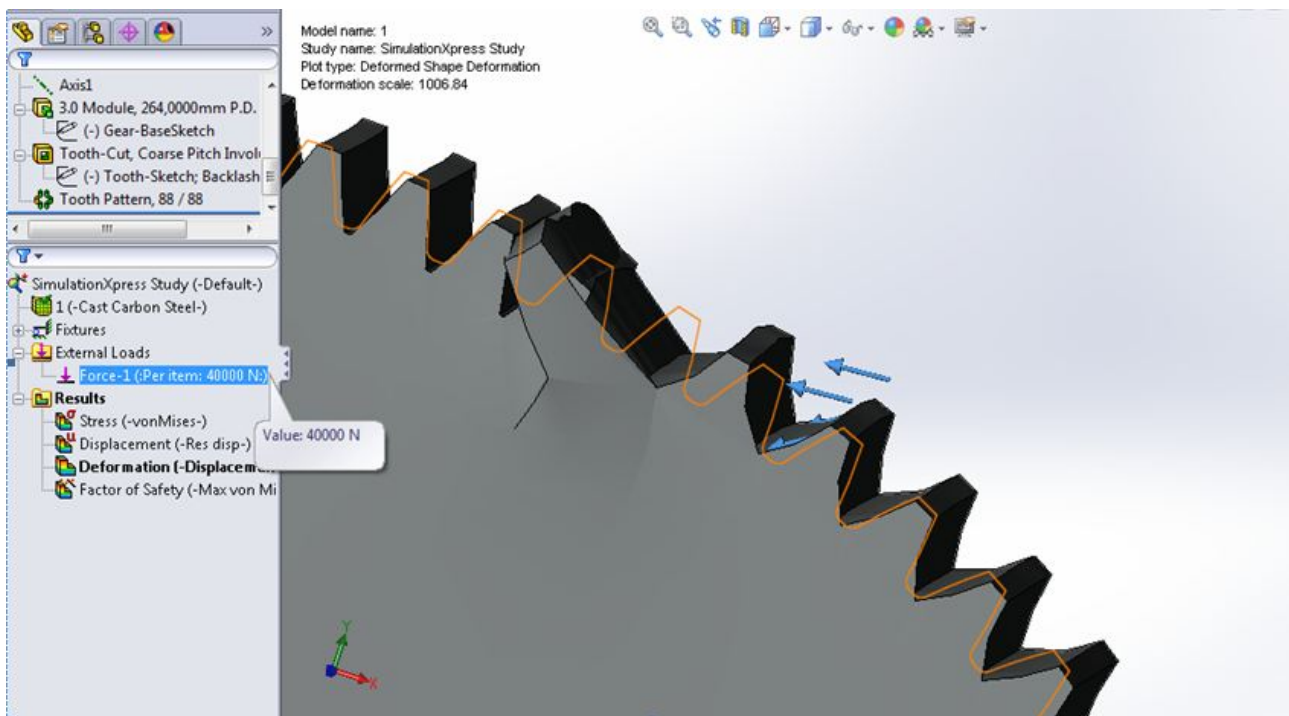
Σχήμα Π3: Εισαγωγή στηρίξεων Πάκτωση



Σχήμα Π4: Εισαγωγή εξωτερικών δυνάμεων

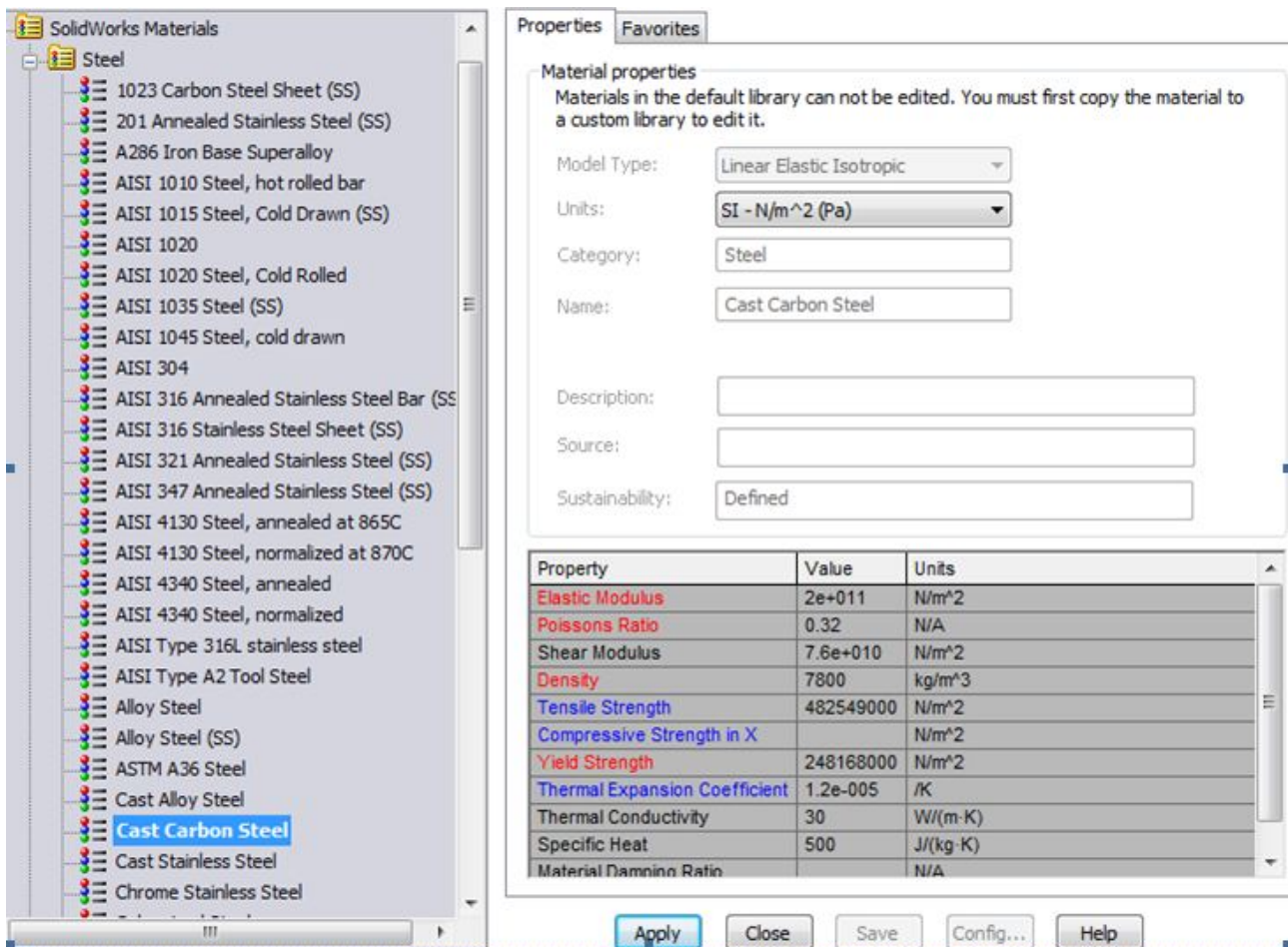


Σχήμα Π5: Εισαγωγή εξωτερικών δυνάμεων ($F = 40000\text{Nt}$)



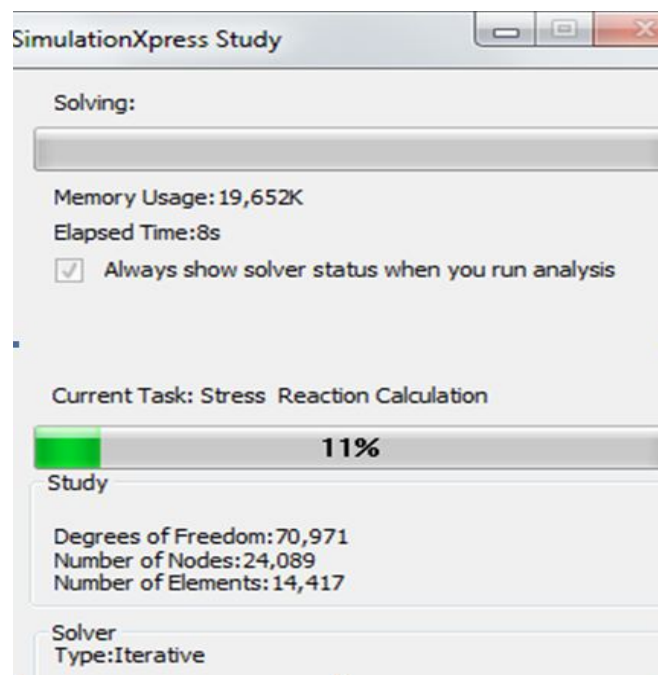
- 1 Fixtures
- 2 Loads
- 3 Material**
- 4 Run
- 5 Results

Σχήμα Π6: Εισαγωγή υλικού (Cast Carbon Steel)

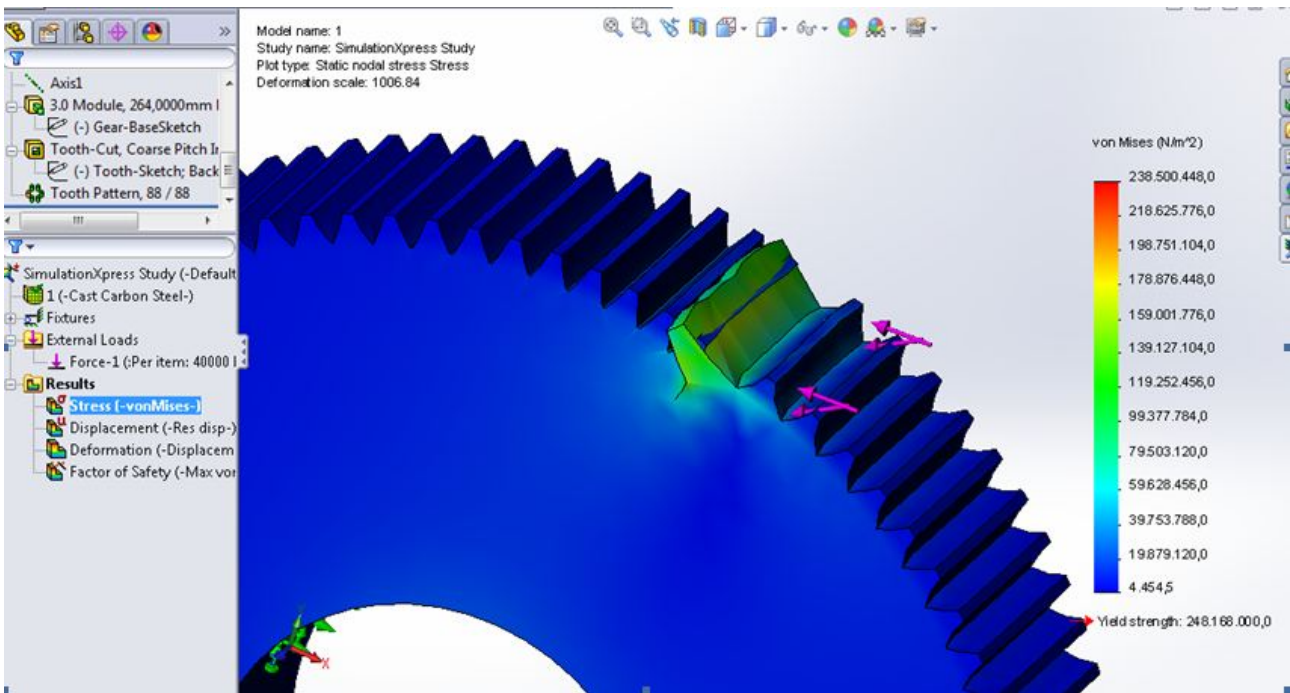


Σχήμα Π7: Εισαγωγή υλικού (Cast Carbon Steel)

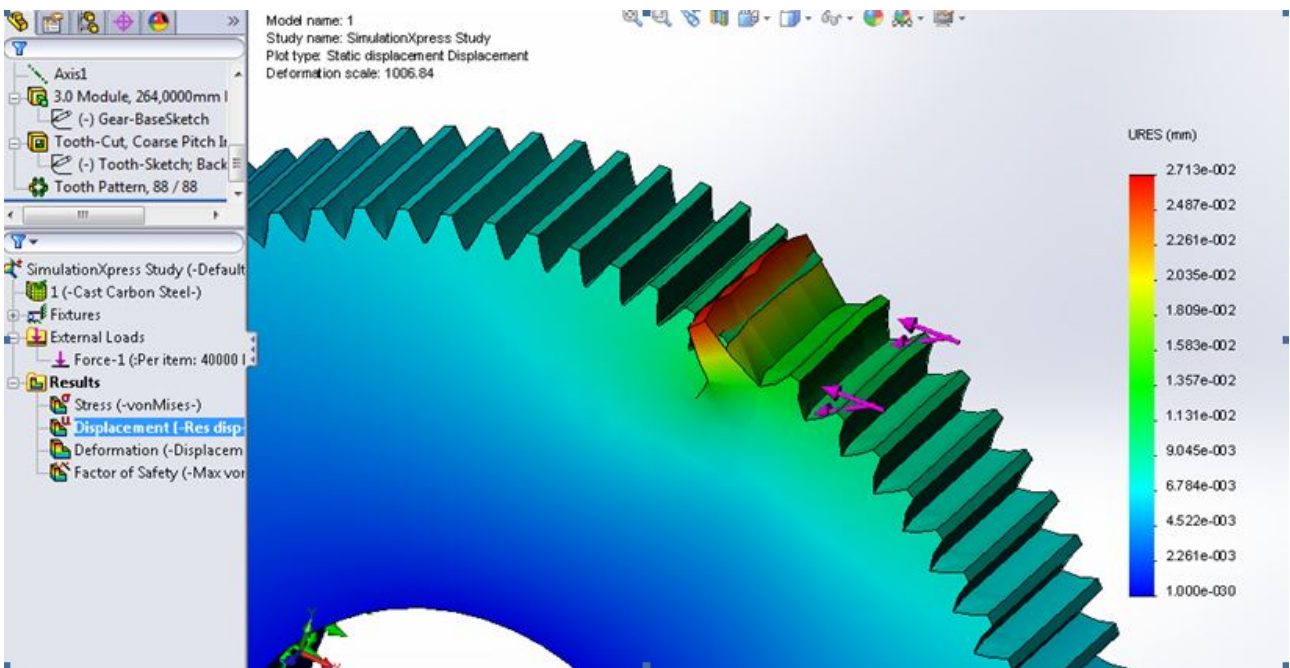
Προσομοίωση



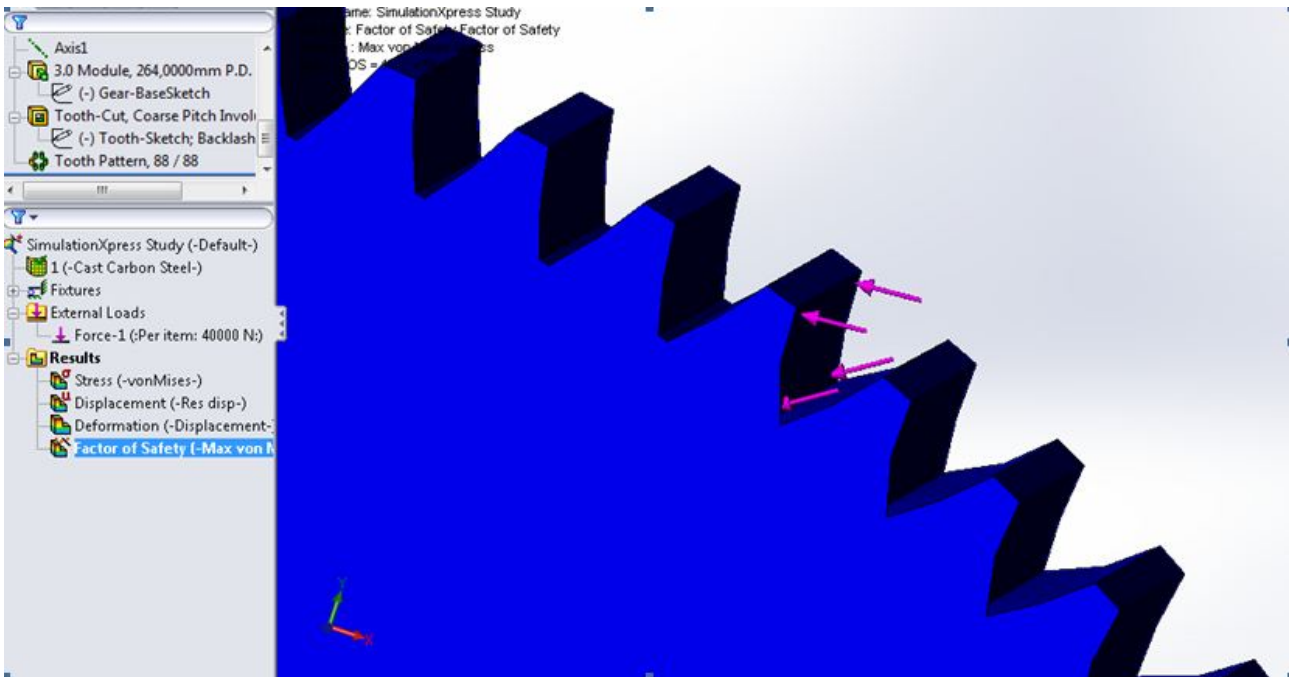
Σχήμα Π8: Προσομοίωση - τρέξιμο προγράμματος



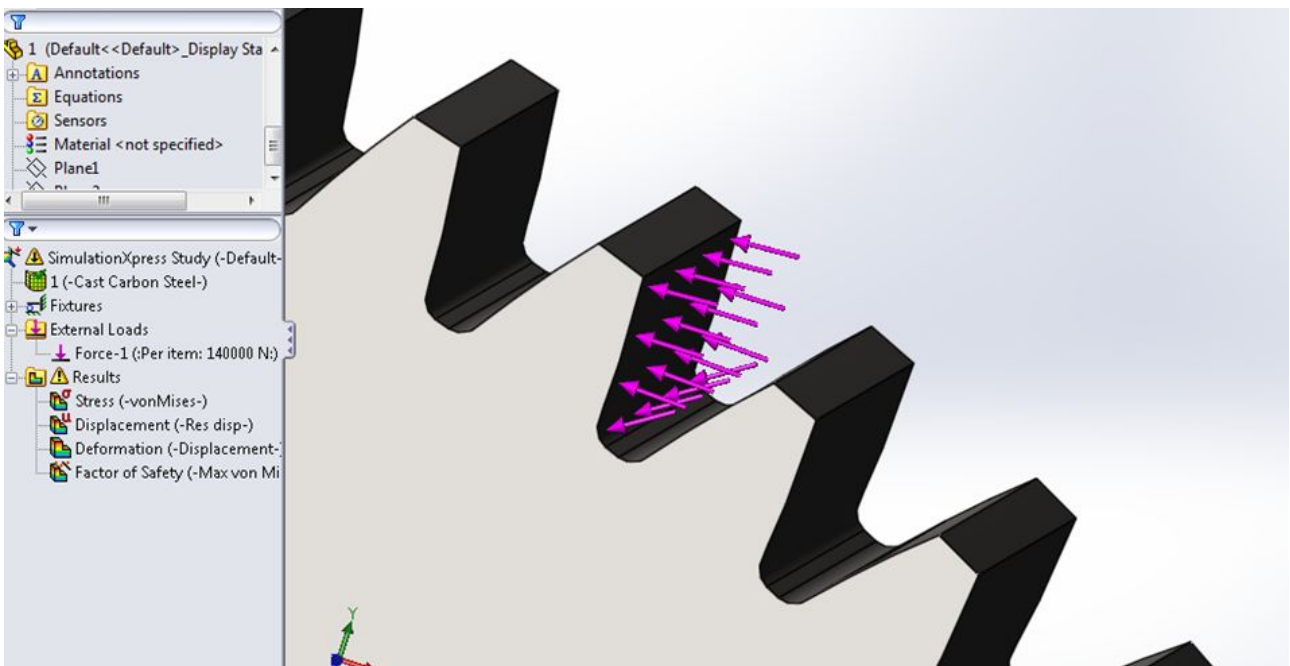
Σχήμα Π9: Αποτέλεσμα - ισοδύναμη τάση



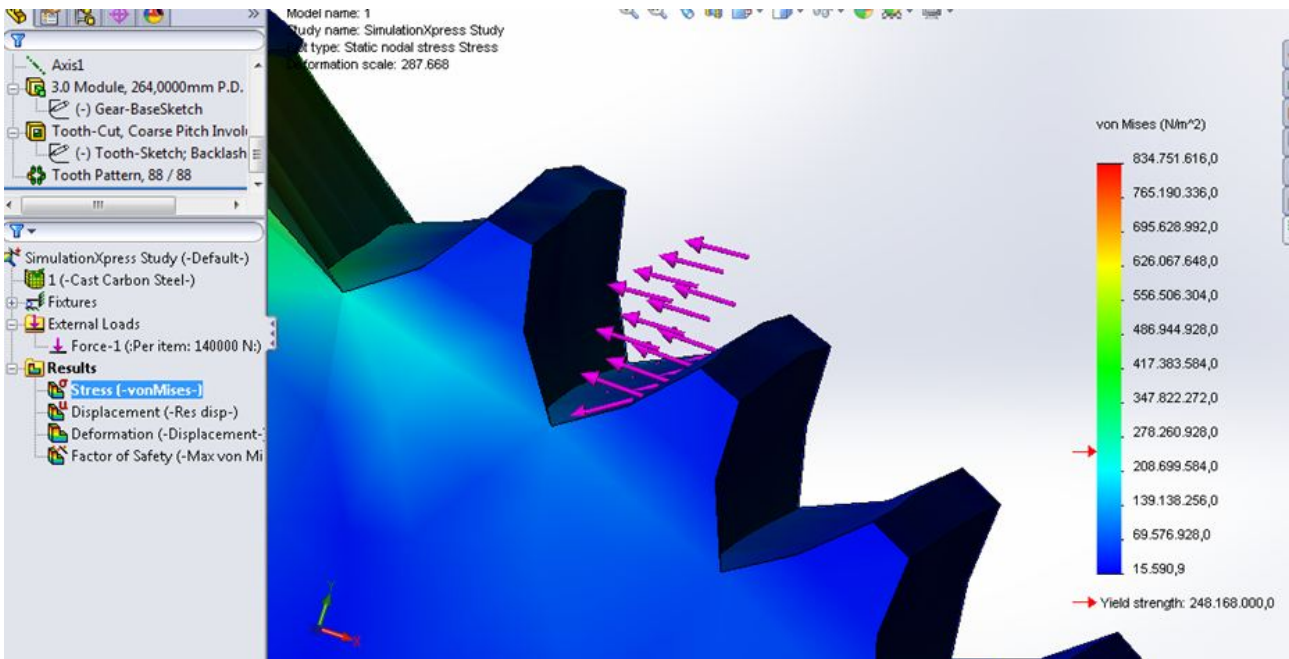
Σχήμα Π10: Αποτέλεσμα - ισοδύναμη μετατόπιση



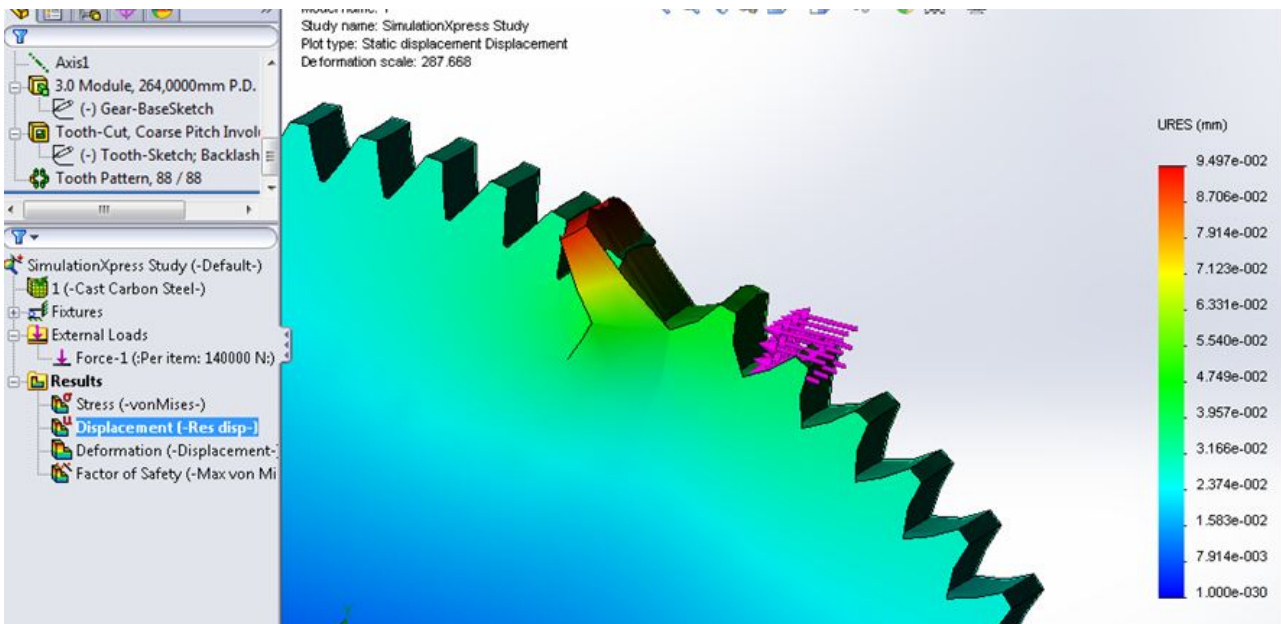
Σχήμα Π11: Αποτέλεσμα - συντελεστής ασφάλειας



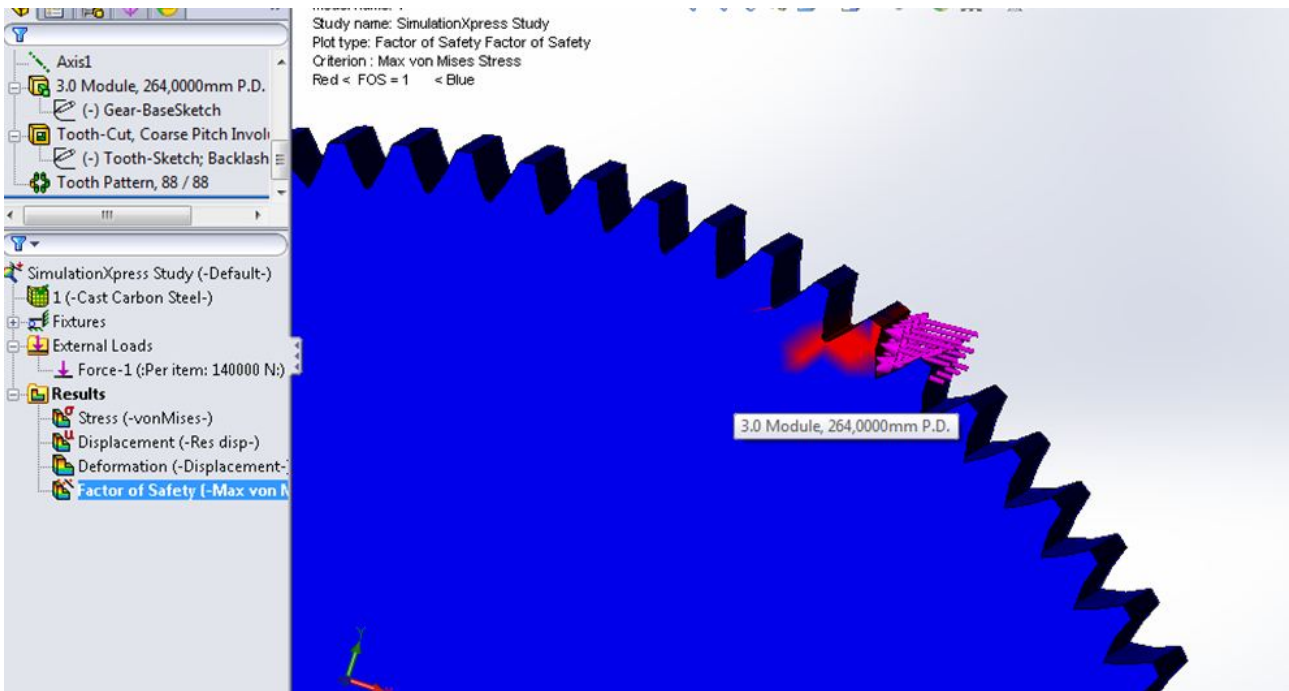
Σχήμα Π12: Εφαρμογή δύναμης 140000Nt



Σχήμα Π13: Αποτέλεσμα - ισοδύναμη τάση



Σχήμα Π14: Αποτέλεσμα - ισοδύναμη μετατόπιση



Σχήμα Π15: Αποτέλεσμα - συντελεστής ασφάλειας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	σελ. 2
Abstract.....	σελ. 3
Πρόλογος.....	σελ.4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΟΡΙΣΜΟΙ, ΔΙΑΚΡΙΣΕΙΣ, ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ

1. ΤΥΠΟΙ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ.....	σελ.5
1.1 ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ ΓΕΝΙΚΑ.....	σελ.6
1.2 ΜΕΤΩΠΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.....	σελ.6
1.3 ΚΩΝΙΚΟΙ ΟΔΟΝΤΩΤΟΙ ΤΡΟΧΟΙ.....	σελ.7
1.4 ΟΔΟΝΤΩΤΟΣ ΚΑΝΟΝΑΣ.....	σελ.7
1.5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΤΕΡΜΟΝΑ – ΚΟΡΩΝΑΣ.....	σελ.7
1.6 ΕΠΙΚΥΚΛΙΚΗ ΟΔΟΝΤΩΣΗ.....	σελ.7
1.7 ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΟΔΟΝΤΩΤΩΝ ΤΡΟΧΩΝ.....	σελ.7
1.8 ΕΙΔΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ.....	σελ.8
1.9 ΓΕΝΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ.....	σελ.10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ ΣΤΑ ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΠΛΟΙΑ

2.1 ΑΝΤΛΙΕΣ.....	σελ.12
2.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ.....	σελ.12
2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ.....	σελ.13
2.4 Η ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ.....	σελ.14
2.5 Η ΚΑΤΑΘΛΙΨΗ ΤΗΣ ΑΝΤΛΙΑΣ.....	σελ.16
2.6 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΕΚΤΟΠΙΣΕΩΣ.....	σελ.17
2.7 ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ - ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥΣ.....	σελ.18
2.8 ΑΝΤΛΙΑ ΜΕ ΟΔΟΝΤΩΤΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΟΔΟΝΤΩΣΕΩΣ (EXTERNAL GEAR PUMP).....	σελ.19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	σελ.22
3.2 ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	σελ.23
3.3 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	σελ.24
3.4 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	σελ.26
3.5 ΜΗΤΡΩΟ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ.....	σελ.28
3.6 ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ. .σελ.30	
3.6.1 ΒΗΜΑ 1 ^ο ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΕΧΟΜΕΝΟΥ ΜΕΣΟΥ.....	σελ.30
3.6.2 ΒΗΜΑ 2: ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ	σελ.33
3.6.3 ΒΗΜΑ 3: ΕΥΡΕΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	σελ.35
3.6.4 ΒΗΜΑ 4: ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΩΝΤΑΣ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	σελ.35
3.6.5 ΒΗΜΑ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ.....	σελ.36
3.6.6 ΒΗΜΑ 6: ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....	σελ.36
3.6.7 ΒΗΜΑ 7: ΚΑΝΟΝΤΑΣ ΠΡΟΣΘΕΤΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ.....	σελ.37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΡΑΝΑΖΙΩΝ.....	σελ.38
ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	σελ.66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	σελ.67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	σελ.68