

Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ»**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΝΤΑΝΑΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ Α.Μ. 35411

ΠΑΥΛΟΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ Α.Μ. 35421

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:

Δρ. Μηχ. ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΣΑΓΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο την εφαρμογή της αντίστροφης μηχανικής για την ολοκληρωμένη παραγωγή μηχανολογικών αντικειμένων. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μελέτη σε δυο αντικείμενα καθημερινής χρήσης (βάση ηλιακού λαμπτήρα και εξάρτημα από καζανάκι), τα οποία έχουν υποστεί θραύση και κατόπιν της αποτύπωσής τους με μετρήσεις δημιουργούνται τα σχεδιαστικά τους μοντέλα σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Στη συνέχεια, γίνονται υπολογισμοί με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και τέλος ακολουθεί η προσπάθεια παραγωγής των αντικειμένων με χρήση προσθετικής κατεργασίας. Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι να γίνει εφαρμογή της μεθοδολογίας της αντίστροφης μηχανικής σε αντικείμενα καθημερινής χρήσης, ώστε να συζητηθούν οι δυσκολίες που εμφανίζονται κατά τη χρήση της.

ABSTRACT

This present thesis is concerned with the application of reverse engineering process for integrated production of mechanical objects. More specifically, the study carried out in two objects of daily use (solar lamp base and enhancement of the cistern), which have undergone failure and then blotting them with measurements of the physical part are created in three dimensional model. Then we make calculations using finite elements analysis method and finally it take place the attempt to produce objects using prosthetic treatment. The purpose of this thesis project is to apply the reverse engineering methodology to everyday objects in order to discuss the difficulties encountered in using it.

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
1.1 Ορισμός σχεδιομελέτης με χρήση υπολογιστή - CAD	7
1.2 Η τεχνολογία σχεδιομελέτης- παραγωγής με υπολογιστή στην ανάπτυξη του προϊόντος	9
1.2.1 Το στάδιο του προσδιορισμού	9
1.2.2 Το στάδιο της σχεδιομελέτης	10
1.2.3 Το στάδιο του πρωτοτύπου	11
1.2.4 Το στάδιο της παραγωγής	11
1.2.5 Παράλληλη μηχανική	11
1.2.6 Επίδραση στην παραγωγή προϊόντων	12
1.3 Τομείς χρήσης τεχνολογίας CAD-CAM	14
1.4 Εργαλεία CAD για τη σχεδιομελέτη και παραγωγή	17
1.4.1 Αντίστροφη σχεδίαση	18
1.4.2 Μοντελοποίηση -Σχεδίαση - Προσομοίωση	26
1.4.3 Ανάλυση	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	37
2.1 Θεμελίωση της ΜΠΣ με τη μέθοδο των μετατοπίσεων	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Εφαρμογή μεθόδου αντίστροφης μηχανικής σε δοκίμια	40
3.1 Χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενου εκτυπωτή	40
3.2 Χρησιμοποιούμενο υλικό ABS	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.ΔΟΚΙΜΙΟ 1:ΕΞΑΡΤΗΜΑ ΑΠΟ ΚΑΖΑΝΑΚΙ	43
4.1 Σχεδιασμός δοκιμίου σε SOLIDWORKS 2016.....	43
4.2 Υπολογιστική προσομοίωση δοκιμίου 1 με Solidworks 2016	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΟΚΙΜΙΟ 2:ΒΑΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΛΑΜΠΤΗΡΑ	70
5.1 Σχεδιασμός δοκιμίου σε πρόγραμμα AutodeskInventor 2017.....	70

5.2 Υπολογιστική προσομοίωση δοκιμίου 2 με Solidworks 2016	88
5.3 Σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών προγραμμάτων σχεδιασμού	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.	96
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	98
8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	99

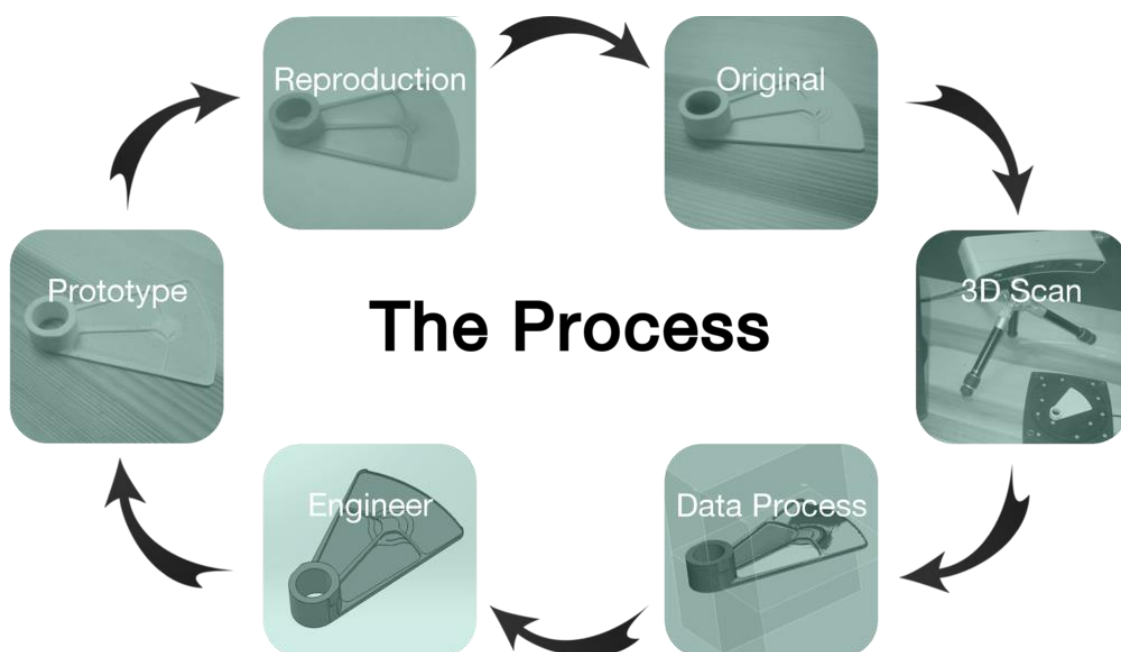
Εισαγωγή

Τη δεκαετία που προηγήθηκε η χρήση της αντίστροφης μηχανικής εφαρμόζεται για την παρουσίαση και αξιολόγηση καινοτόμων μηχανολογικών ιδεών. Είναι εμφανής πλέον η ευρεία ανάπτυξη και εφαρμογή της και επιβεβαιώνεται από τη δημιουργία εξειδικευμένου λογισμικού και κατάλληλα προσαρμοσμένων υπολογιστικών μηχανών. Η Αντίστροφη Μηχανική αποτελεί τεχνική για την παραγωγή τρισδιάστατων γεωμετρικών μοντέλων από αντικείμενα, μετρώντας τις διαστάσεις τους. Η διαδικασία σχεδιασμού αντικειμένων με τη βοήθεια υπολογιστή ξεκινάει με κάποια ιδέα, η οποία εξελίσσεται σε ένα σχεδιαστικό μοντέλο και καταλήγει στο να τροφοδοτήσει τη διαδικασία παραγωγής με το τελικό αντικείμενο. Στην Αντίστροφη Μηχανική το υπάρχον αντικείμενο μετρίεται και τα ψηφιοποιημένα δεδομένα μετατρέπονται σε γεωμετρικό μοντέλο. Τεχνικές παραγωγής με τη βοήθεια υπολογιστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για να κατασκευαστούν νέα αντικείμενα από το γεωμετρικό αυτό μοντέλο. Οι συγκεκριμένες τεχνικές αφορούν τα συστήματα CAD-CAM, τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

Ο όρος αντίστροφη μηχανική ορίζεται ως η τεχνική για την παραγωγή τρισδιάστατων γεωμετρικών μοντέλων, μελετώντας και αποτυπώνοντας με μετρήσεις το πρωτότυπο αντικείμενο.

Με άλλα λόγια είναι η διαδικασία της παραγωγής γνώσης μέσω της έρευνας, της παρατήρησης και της αποσυναρμολόγησης των τμημάτων ενός συστήματος, προκειμένου να διακριθούν τα στοιχεία του σχεδιασμού του, της κατασκευής και της χρήσης του, συχνά με στόχο την παραγωγή ενός υποκατάστατού του.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου υπάρχει η ανάγκη να γίνει παραγωγή ενός υπάρχοντος αντικειμένου χωρίς όμως να υπάρχουν οι απαραίτητες πληροφορίες για αυτό, όπως μηχανολογικά σχέδια, επιμέρους αντικείμενα κ.α. Στην περίπτωση αυτή έρχεται η αντίστροφη μηχανική, να δώσει την λύση. Κατά τη διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής επιτυγχάνεται η δημιουργία ακριβούς αντιγράφου ενός αντικειμένου χωρίς τη χρήση πληροφοριών που αφορούν στη δημιουργία αυτού. Η γέννηση της αντίστροφης μηχανικής οφείλεται στην έλλειψη καινοτόμων ιδεών και απουσίας έμπνευσης, καθώς επίσης και την ανάγκη αντιγραφής αντικειμένων χωρίς τις απαραίτητες βασικές πληροφορίες κατασκευής τους. Με την χρήση της επιτυγχάνεται βελτίωση του ανταγωνιστικού προϊόντος και εξοικονόμηση του χρόνου παραγωγής του. Η αντίστροφη μηχανική έχει μεγάλο εύρος εφαρμογής. Σε οποιοδήποτε αντικείμενο ή κατασκευή, ο μηχανικός μπορεί να χρησιμοποιήσει την αντίστροφη μηχανική για να εξαγάγει τα αποτελέσματα που του χρειάζονται. [7]



Εικόνα 1: Φάσεις της αντίστροφης μηχανικής[1]

Η μεθοδολογία της αντίστροφης μηχανικής απαρτίζεται από τέσσερις φάσεις, τις οποίες αναλύουμε παρακάτω (Εικόνα 1).

Κατά την πρώτη φάση επιτυγχάνεται πλήρης οπτική αξιολόγηση του εξεταζόμενου αντικειμένου, προκειμένου να προσδιοριστούν οι διαστάσεις και τα υλικά. Στη συνέχεια το αντικείμενο αποσυναρμολογείται ούτως ώστε να γίνει εφικτή η συγκέντρωση πληροφοριών για τον τρόπο λειτουργίας του και η ταυτοποίηση των επιμέρους κομματιών που το απαρτίζουν. Εφόσον οι πληροφορίες που θα αποκτήσουμε επαρκούν συνεχίζουμε στην δεύτερη φάση, την δημιουργία τεχνικών δεδομένων.

Η δημιουργία τεχνικών δεδομένων είναι ίσως το πιο ουσιώδες κομμάτι της αντίστροφης μηχανικής, διότι επιτυγχάνεται χωρίς της απαραίτητες πληροφορίες και τεχνικές προδιαγραφές του προϊόντος. Η γενική φιλοσοφία είναι να συγκεντρωθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα που θα καταστήσουν δυνατή την ολοκληρωμένη κατασκευή και παραγωγή του προϊόντος. Στα τεχνικά δεδομένα περιλαμβάνονται τα μηχανολογικά σχέδια, προδιαγραφές, πρότυπα και δοκιμές.

Στην τρίτη φάση, με την βοήθεια των δεδομένων που δημιουργήθηκαν στις προηγούμενες, πραγματοποιείται η σχεδίαση ενός προτύπου και ο έλεγχος καλής λειτουργίας του. Ο έλεγχος του δοκιμίου διεξάγεται με εργαστηριακές δοκιμές και έπειτα με την προσθήκη κριτηρίων για την ολοκλήρωσή του.

Στην τελική φάση εφαρμόζεται η σχεδίαση με αποτέλεσμα την υλοποίηση του προϊόντος, ακολουθούμενο από μια πλήρη έκθεση με τα τεχνικά δεδομένα.

Όλα τα στάδια διεξάγονται με αυστηρό διαχωρισμό μεταξύ τους για τα πιθανά προς μελέτη υποψήφια στοιχεία. Αυτή η διαδικασία τυπικά απευθύνεται στη βελτίωση της γραμμής παραγωγής και των βιομηχανικών δυνατοτήτων.

Ο ακριβής σχεδιασμός των δεδομένων για την μακροπρόθεσμη συντήρηση και υποστήριξη μιας τεχνικής δυνατότητας, είναι ο ακρογωνιαίος λίθος της αντίστροφης μηχανικής. Αυτή η διαδικασία παρέχει ένα επίπεδο τεχνικής υποστήριξης. Όποτε η αντίστροφη μηχανική απαιτεί την επένδυση κεφαλαίων τα σχέδια της οποίας θα πρέπει εύκολα να διαχωρίζονται για να εξασφαλίσουν μεγάλη πιθανότητα επιτυχίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Ορισμός σχεδιομελέτης με χρήση υπολογιστή - CAD

Ως σχεδιομελέτη και παραγωγή με χρήση υπολογιστή ορίζεται η χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών σε όλα τα στάδια ανάπτυξης του προϊόντος και ιδιαίτερα στη δημιουργία, μεταβολή, ανάλυση, βελτιστοποίηση της μορφής και τον προγραμματισμό των παραγωγικών διαδικασιών του προϊόντος. Στηρίζεται κυρίως στην τεχνολογία των γραφικών, των βάσεων δεδομένων, της μαθηματικής μοντελοποίησης, της προσομοίωσης και του ελέγχου των δεδομένων, και αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου του προϊόντος, που περιγράφει όλο τον κύκλο ανάπτυξης και εισαγωγής του προϊόντος στην αγορά. Βασικός παράγοντας στη διαδικασία της σχεδιομελέτης είναι η δημιουργία του γραφικού μοντέλου του προϊόντος, με τα συστήματα μοντελοποίησης με υπολογιστή (Computer Aided Design-CAD), που στη συνέχεια θα χρησιμοποιηθεί σε μια σειρά από κάθετες εφαρμογές, όπως:

- Παρουσίαση του προϊόντος στον πελάτη με χρήση τεχνικών φωτορεαλισμού. Στο Ψηφιακό προϊόν μπορεί να γίνει απόδοση της υφής και του χρώματος των επιφανειών, να γίνει προσομοίωση σε υπολογιστή των συνθηκών λειτουργίας και φωτισμού και να ενοποιηθεί στον τελικό χώρο λειτουργίας με χρήση εικόνων ή άλλων μοντέλων αντικειμένων από το φυσικό ή το τεχνητό περιβάλλον.

- Προγραμματισμό των παραγωγικών διαδικασιών, κυρίως σε μηχανές ψηφιακής καθοδήγησης (Computer Numerical Control-CNC), με χρήση των συστημάτων σχεδιασμού παραγωγής με χρήση υπολογιστή (Computer Aided and Manufacture-CAM). Τα συστήματα CAM μπορούν να προσομοιώσουν την κίνηση του κοπτικού εργαλείου της εργαλειομηχανής και να ελέγξουν τη μορφή του μοντέλου και την ακρίβεια της κατεργασίας πριν από την πραγματική εκτέλεση των κατεργασιών στην εργαλειομηχανή.

-Ανάλυση και βελτιστοποίηση μορφής και λειτουργίας με χρήση των συστημάτων μοντελοποίησης και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (Computer Aided Engineering-CAE, Finite Elements Modelling-FEM) για μια πληθώρα εφαρμογών, όπως τον έλεγχο αντοχής, τη συμπεριφορά σε ροή, την κατεργασιμότητα, κ.λ.π. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται γραφικά στην οθόνη, για αξιολόγηση του αποτελέσματος και βελτιστοποίηση της μορφής ή των λειτουργικών χαρακτηριστικών του προϊόντος, ή της κατεργασίας παραγωγής του.

-Ταχεία παραγωγή πρωτοτύπου και παραγωγή του προϊόντος (Rapid Prototyping and Manufacturing). Παραγωγή πρωτοτύπων ή τελικών προϊόντων άμεσα από το τρισδιάστατο μοντέλο CAD, με χρήση ειδικών μηχανών και σε μικρή ποσότητα παραγωγής, με σκοπό την παρουσίαση ή τη δοκιμή του πρωτοτύπου, ή την παραγωγή μικρών ποσοτήτων παραγωγής.

-Ανάλυση της λειτουργικότητας του πρωτοτύπου με τη χρήση τεχνικών εικονικής πραγματικότητας (εικονικό ή πλασματικό πρωτότυπο -Virtual Prototype), με κύριο στόχο τη μείωση ή ακόμα και εξάλειψη του αριθμού των απαιτούμενων φυσικών πρωτοτύπων καθώς και για την αξιολόγηση των τεχνικών λύσεων σε πρώιμο στάδιο. Η ανάλυση αυτή μπορεί να συνδυαστεί με άλλα συστήματα ανάλυσης και συστήματα φωτορεαλισμού για την προσομοίωση και αξιολόγηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του πρωτοτύπου.

-Επικοινωνία μεταξύ συνεργαζόμενων ομάδων σε τοπικό ή σε απομακρυσμένο δίκτυο. Η ανάπτυξη του προϊόντος είναι αποτέλεσμα συλλογικής δράσης ομάδων εργασίας που μπορεί να μη βρίσκονται στον ίδιο χώρο εργασίας. Οι εφαρμογές αυτές συνεισφέρουν στην καλύτερη επικοινωνία της ομάδας και προσφέρουν ανταλλαγή δεδομένων για τη μεταφορά των μοντέλων, ανταλλαγή εικόνων, μεταφορά αποτελεσμάτων και απομακρυσμένη χρήση ειδικών προγραμμάτων, μεταξύ διαφορετικών χρηστών, ομάδων ή διαφορετικών συστημάτων.

-Ανάλυση της μεθόδου παραγωγής, με τη χρήση τεχνικών εικονικής πραγματικότητας (εικονική ή πλασματική παραγωγή και συναρμολόγηση, virtual manufacturing και virtual assembly), όπου μπορεί να γίνει προσομοίωση όλης της γραμμής παραγωγής ή της γραμμής συναρμολόγησης, για την αξιολόγηση της μεθόδου παραγωγής ή της δυνατότητας συναρμολόγησης σε πρώιμο στάδιο πριν από κάθε παραγγελία οδηγών, σφικτήρων, ιδιοσυσκευών ή εργαλείων και άλλων αυτοματοποιημένων συστημάτων.

Βασικός σκοπός της χρήσης όλων των συστημάτων σχεδιομελέτης και παραγωγής με υπολογιστή είναι η ανάπτυξη των «σωστών» προϊόντων από την αρχή, στον ελάχιστο δυνατό χρόνο ανάπτυξης. Η χρήση τους, σε συνδυασμό με τις συγγενείς προς αυτά τεχνολογίες και μεθοδολογίες για την ανάπτυξη του προϊόντος, μπορεί να μειώσει τον αριθμό των σφαλμάτων και των μη επιθυμητών διορθώσεων και επαναλήψεων σε όλη τη διαδικασία ανάπτυξης, να βελτιώσει τον έλεγχο του προϊόντος σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης, πριν από την εισαγωγή του στην αγορά και τη χρήση του από τον πελάτη,

συνδυάζοντας μείωση του κόστους και του χρόνου ανάπτυξης. Αποτελούν ίσως την πιο σημαντική και απαραίτητη τεχνολογία για την ανάπτυξη κάθε προϊόντος.

1.2 Η τεχνολογία σχεδιομελέτης- παραγωγής με υπολογιστή στην ανάπτυξη του προϊόντος

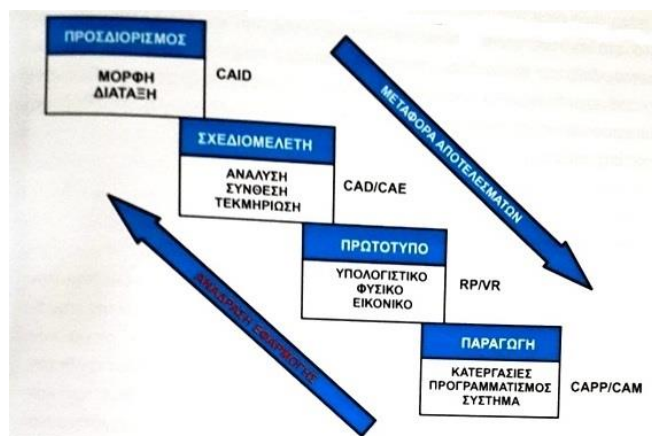
Η ανάπτυξη ενός προϊόντος είναι μια σύνθετη διαδικασία που ακόμα και για σχετικά απλά προϊόντα διαρκεί μεγάλο χρονικό διάστημα και συνήθως εκτελείται από μια διατμηματική ομάδα ανάπτυξης, ώστε να παραχθεί το σωστό προϊόν πριν από την εισαγωγή του στην αγορά. Στην ανάπτυξη ενός προϊόντος χρησιμοποιούνται διάφορα εργαλεία λογισμικού, πολλά από τα οποία αποτελούν και προϊόν ίδιας ανάπτυξης από τις εταιρείες που αναπτύσσουν τα προϊόντα. Σε μεγάλα έργα αναφέρονται περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται περισσότερα από 100 εργαλεία λογισμικού. Η τεχνολογία του CAD/CAM, ξεκίνησε άλλωστε και αυτή από την ίδια ανάπτυξη των εταιρειών και στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι ειδικευμένες εταιρείες παροχής των συστημάτων. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι οι μεγαλύτεροι προμηθευτές συστημάτων είναι η ήταν θυγατρικές εταιρειών αυτοκινητοβιομηχανίας, αεροπορικής βιομηχανίας ή ηλεκτρονικών (CATIA-DASSAULT, UG –MCDONNELL, SIEMENS, κ.α.).

Τα στάδια ανάπτυξης ενός προϊόντος φαίνονται στο Σχήμα 1.1, όπου διακρίνονται τέσσερις κύριες φύσεις, **ο προσδιορισμός, η σχεδιομελέτη, το πρωτότυπο και η παραγωγή του προϊόντος**. Τα τέσσερα αυτά στάδια δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Υπάρχει επικάλυψη και συνεχής ανταλλαγή πληροφόρησης, τόσο προς τα μετέπειτα στάδια, όσο και από τα μετέπειτα προς τα προηγούμενα στάδια μετά την ολοκλήρωσή τους. Αποφάσεις και επιλογές που λαμβάνονται στα πρώτα στάδια επηρεάζουν τις εργασίες στα επόμενα στάδια, και συχνά από την εκτέλεση των τελευταίων εργασιών πρέπει να αλλάξουν οι αρχικές αποφάσεις και επιλογές, όπως υλικά, ακρίβεια, ανοχές κ.λ.π. Όσο περισσότερο προχωράει η διαδικασία της ανάπτυξης τόσο περισσότερο είναι και το τεχνικό έργο που απαιτείται και τόσο πιο έντονη είναι η χρήση ειδικευμένων εργαλείων σχεδιομελέτης με υπολογιστή.

1.2.1 Το στάδιο του προσδιορισμού

Στο στάδιο του προσδιορισμού, δημιουργείται η πρώτη μορφή και η διάταξη του προϊόντος που αντιστοιχεί στη νέα ιδέα που υφίσταται και που έχει αξιολογηθεί θετικά για περαιτέρω ανάπτυξη ή την αλλαγή/διόρθωση/εξέλιξη ενός υπάρχοντος προϊόντος. Συνήθως περιλαμβάνει την έρευνα αγοράς, την καταγραφή των απαιτήσεων του πελάτη της, τη σύνταξη προδιαγραφών, τη μελέτη του ανταγωνισμού, την ανάπτυξη εναλλακτικών μορφών του προϊόντος, την επιλογή της βέλτιστης μορφής σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πελάτη και τη δημιουργία της διάταξης του προϊόντος σε επίπεδο υποσυστημάτων και διεπαφών σύμφωνα με τη στρατηγική της εταιρείας για επέκταση του εύρους του προϊόντος. Σημαντική

συνεισφορά έχει το τμήμα του βιομηχανικού σχεδιασμού με τη συνεργασία του εμπορικού, της μελέτης και της παραγωγής.



ΣΧΗΜΑ 1.1 : Ο αναλυτικός κύκλος ανάπτυξης του προϊόντος και τα στάδια επεξεργασίας[2]

1.2.2 Το στάδιο της σχεδιομελέτης

Το στάδιο της σχεδιομελέτης περιλαμβάνει τον ακριβή προσδιορισμό της μορφής του προϊόντος, τη μελέτη, την ανάπτυξη και την τεκμηρίωσή του. Ολοκληρώνεται σε δύο κύκλους, οι οποίοι όμως δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και οι οποίοι είναι και η σύνθεση και η ανάλυση. Στη σύνθεση γίνεται η μοντελοποίηση και προσομοίωση του προϊόντος. Δημιουργείται στον υπολογιστή η μορφή του κάθε εξαρτήματος και όλης της συναρμολόγησης και γίνεται προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας. Γίνεται κυρίως με τα συστήματα CAD. Στην ανάλυση υλοποιείται η προσομοίωση της συμπεριφοράς του προϊόντος, όπου χρησιμοποιούνται μοντέλα προσομοίωσης, τόσο υπολογιστικά όσο και πρωτότυπα. Γίνεται κυρίως με τα συστήματα CAE. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της μελέτης και στην τροποποίηση της μορφής του προϊόντος. Στο τέλος γίνεται η τεκμηρίωση της μελέτης με σχέδια, έντυπα, μοντέλα, κ.ά., και η διαδικασία καταμερισμού του στα αρμόδια άτομα.

1.2.3 Το στάδιο του πρωτοτύπου

Στο στάδιο του πρωτοτύπου γίνεται ο έλεγχος της σχεδιομελέτης και της λειτουργίας του προϊόντος. Υπάρχουν διάφορα πρωτότυπα, όπως, φυσικά, υπολογιστικά, εικονικά, και αφορούν ή όλο το προϊόν ή τμήμα αυτού. Τα φυσικά μπορούν να κατασκευαστούν με παραδοσιακές μεθόδους ή με μεθόδους ταχείας παραγωγής πρωτοτύπων.

1.2.4 Το στάδιο της παραγωγής

Η παραγωγή περιλαμβάνει τον προγραμματισμό των κατεργασιών, την παραγγελία των υλικών, των εργαλείων, την εκτέλεση και τον έλεγχο της παραγωγής. Στον προγραμματισμό των κατεργασιών αποφασίζεται η σειρά των κατεργασιών που θα εκτελεστούν, των μηχανών που θα χρησιμοποιηθούν, τα εργαλεία με τα οποία θα γίνει η κάθε κατεργασία και οι συνθήκες των κατεργασιών. Στην εκτέλεση της παραγωγής συντάσσονται τα προγράμματα καθοδήγησης των εργαλειομηχανών ψηφιακής καθοδήγησης για καθεμιά από τις κατεργασίες και στη συνέχεια γίνεται ο έλεγχος της κατεργασίας στην οθόνη του υπολογιστή ή σε εικονικό περιβάλλον. Στη δραστηριότητα της παραγωγής, όλα σχεδόν τα βήματα μπορούν να εξυπηρετηθούν από προϊόντα λογισμικού CAD/CAM.

1.2.5 Παράλληλη μηχανική

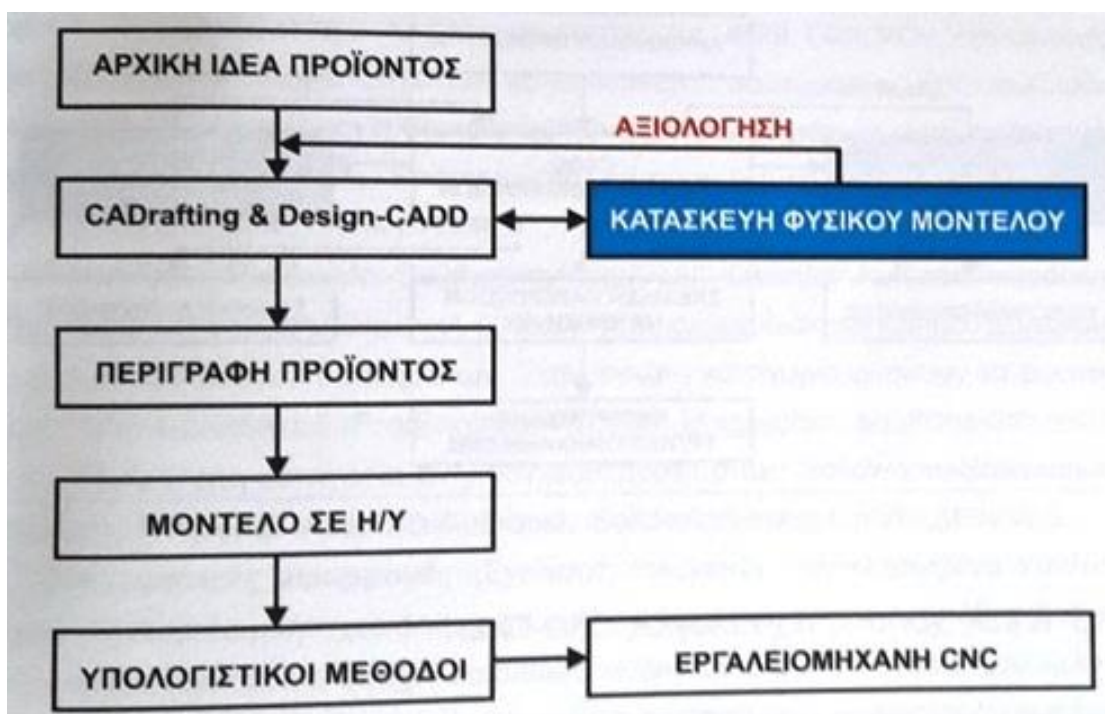
Το Σχήμα 1.1 δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι αποτελεί μια σειριακή διαδικασία εκτέλεσης των διαφόρων σταδίων. Αντίθετα, υπάρχει μεταφορά αποτελεσμάτων, υπό τη μορφή σχεδίων και αρχείων, από το ένα στάδιο στο επόμενο, ανάδραση των αποτελεσμάτων προς τα προηγούμενα στάδια και παράλληλη εκτέλεση των διαφόρων σταδίων από ομάδα εργασίας. Η όλη διαδικασία δεν πρέπει να είναι σειριακή και επομένως να πρέπει να τελειώσει ένα στάδιο για να αρχίσει το επόμενο, ιδιαίτερα για μεγάλα έργα, αλλά να υπάρχουν ομάδες που εκτελούν εργασίες παράλληλα και να υπάρχει συνεργασία και συντονισμός των ομάδων για την εκτέλεση κάθε σταδίου, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι αλλαγές που απαιτούνται να γίνουν στα τελευταία στάδια της ανάπτυξης του προϊόντος. Η τάση αυτή ξεκίνησε από τους μεγάλους χρήστες συστημάτων που σχεδιάζουν και παράγουν σύνθετα προϊόντα και στη συνέχεια επεκτάθηκε και σε άλλους τομείς. Αυτή η μεθοδολογία εργασίας ονομάζεται παράλληλη μηχανική (Concurrent Engineering). Με τη μεθοδολογία αυτή, η μελέτη και ανάπτυξη ενός προϊόντος δεν είναι αποκλειστική μέριμνα του τμήματος μελέτης, αλλά και τα υπόλοιπα τμήματα της εταιρείας πρέπει να συμμετάσχουν ενεργά σε όλα τα στάδια. Τα τμήματα τα οποία πρέπει απαραίτητα να συνεργάζονται είναι το εμπορικό, της μελέτης και της παραγωγής, και να υποστηρίζονται από τα τμήματα της κοστολόγησης, των προμηθειών, του λογιστηρίου, της διοίκησης, κ.λ.π.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι η συνεργασία των προμηθευτών και των πωλητών του προϊόντος. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η διατήρηση και αναδρομή όλων των εμπλεκόμενων σε μια ενιαία αναφορά στο προϊόν, που γίνεται σήμερα με τα συστήματα CAD και τα συστήματα Διαχείρισης Κύκλου Ζωής Προϊόντων (PLM-Product Lifecycle Management). Τα συστήματα PLM, που υφίστανται σήμερα, καταγράφουν τον όλο κύκλο ανάπτυξης του προϊόντος, συνεργάζονται με τα συστήματα CAD και επιπλέον παρέχουν δρομολόγηση καθηκόντων (Workflow), συνεργασία ομάδων στην ίδια επιχείρηση ή σε διαφορετικές επιχειρήσεις (Collaboration) και ανταλλαγή δεδομένων μέσω του διαδικτύου. Σκοπός είναι η ταχύτερη ανάπτυξη του προϊόντος, η κοινή χρήση των δεδομένων και η αξιολόγηση του κύκλου ζωής του προϊόντος.

1.2.6 Επίδραση στην παραγωγή προϊόντων

Με την τεχνολογία της σχεδιομελέτης και παραγωγής με χρήση υπολογιστή, αλλάζει η συμβατική διαδικασία παραγωγής προϊόντων. Στη συμβατική παραγωγή στο στάδιο της αρχικής ιδέας του προϊόντος δημιουργείται ένα φυσικό πρωτότυπο (clay model) από εύπλαστο υλικό (π.χ. ξύλο, άργιλος, κ.λπ.), συνήθως υπό κλίμακα (1:10 ή 1:4), ιδιαίτερα για μεγάλα προϊόντα. Το πρωτότυπο αυτό χρησιμοποιείται για παρουσίαση της μορφής του, για τις πρώτες δοκιμές λειτουργικής ανάλυσης, κ.λ.π., και σε αυτό γίνονται οι απαραίτητες αλλαγές μέχρι να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό πρωτότυπο. Στη συνέχεια, στο τελικό σχέδιο που προκύπτει, πρέπει να γίνει η πλήρης τεκμηρίωσή του, σε μορφή σχεδίων, αρχείων κ.λ.π. Η τεκμηρίωση αυτή μπορεί να γίνει με ψηφιοποίηση του φυσικού πρωτοτύπου, δημιουργείται δηλαδή μια τρισδιάστατη αναπαράσταση της μορφής του στον υπολογιστή με ένα νέφος XYZ σημείων. Υπάρχουν, διάφοροι μέθοδοι ψηφιοποίησης που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Έπειτα οι σχεδιαστές παράγουν τα απαραίτητα σχέδια (blueprints) για την παραγωγή των λειτουργικών πρωτοτύπων. Τα σχέδια αυτά χρησιμοποιούνται από ειδικούς τεχνίτες για την παραγωγή των μοντέλων αντιγραφής (copy models), που δημιουργούνται από ξύλο ή άλλο εύκαμπτο υλικό. Τα μοντέλα αντιγραφής χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των καλουπιών και γι' αυτό πρέπει να έχουν στις περισσότερες περιπτώσεις πολύ καλή τελική επιφάνεια. Το μοντέλο αντιγραφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης σε φρέζα αντιγραφής για την παραγωγή της κοιλότητας του καλουπιού.

Στην κατασκευή με χρήση υπολογιστή, στην ιδανική του εφαρμογή, δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο, παρουσιάζεται και επιθεωρείται στην οθόνη, ή σήμερα με ειδικά εξοπλισμό εικονικής πραγματικότητας για μεγαλύτερη δραστηριότητα και καλύτερη οπτικοποίηση, αναλύεται με τη χρήση κατάλληλων προγραμμάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή) και, τέλος, χρησιμοποιείται για την καθοδήγηση των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου και την οπτικοποίηση της παραγωγής (Σχήμα 1.2).



ΣΧΗΜΑ 1.2: Μέθοδος καταργασίας με χρήση ψηφιακού μοντέλου του προϊόντος[2]

Στην κατασκευή με χρήση υπολογιστή, το φυσικό μοντέλο δημιουργείται για λόγους επιθεώρησης κυρίως και όχι για την ψηφιοποίηση ή την παραγωγή των εργαλείων και την αναπαραγωγή της μορφής του προϊόντος.

Όμως ακόμα και σήμερα, ιδιαίτερα στο στάδιο της αρχικής ιδέας, φυσικά πρωτότυπα χρησιμοποιούνται ακόμα και για μεγάλα προϊόντα, επειδή πολλές τεχνικές και μέθοδοι ψηφιοποίησης δεν είναι κατάλληλες για την πλήρη απεικόνιση της μορφής των αντικειμένων. Συνεπώς, χρησιμοποιείται ένα ενδιάμεσο μοντέλο λειτουργίας (Σχήμα 1.3).



ΣΧΗΜΑ 1.3: Μέθοδος καταργασίας με χρήση συμβατικών μεθόδων και μεθόδων CAD[2]

1.3 Τομείς χρήσης τεχνολογίας CAD-CAM

Αρχικά, η τεχνολογία της σχεδιομελέτης-παραγωγής με χρήση υπολογιστή ξεκίνησε για μηχανολογικές εφαρμογές ως εργαλείο για δισδιάστατη σχεδίαση. Στη συνέχεια, η εφαρμογή της έχει επεκταθεί και σε άλλες εφαρμογές, όπως κατασκευές, ηλεκτρολογία και ηλεκτρονική, και σε ειδικές εφαρμογές για ένδυμα, υπόδημα, ύφασμα, κ.λ.π. Συνεχώς αναπτύσσονται εργαλεία για ειδικές εφαρμογές, και σε ορισμένους τομείς η χρήση τους είναι απόλυτα απαραίτητη. Οι γενικοί τομείς χρήσης είναι:

-Μηχανολογικές εφαρμογές (αεροπορική βιομηχανία, ναυπηγο-επισκευαστική βιομηχανία, αυτοκινητοβιομηχανία, μεταλλοβιομηχανία, προϊόντα συσκευασίας, κατασκευή μηχανών, κ.λπ.). Η τεχνολογία του CAD/CAM κυρίως ως ξεκίνησε από τους μεγάλους χρήστες του κλάδου. Τα πρώτα συστήματα σχεδιομελέτης με υπολογιστή αναπτύχθηκαν εσωτερικά από εταιρείες όπως McDonell Douglas, Lockheed, Boeing, Renault, Citroen, DASSAULT, κ.ά. που στη συνέχεια εξελίχθηκαν σε ειδικευμένες εταιρείες παροχής τέτοιων συστημάτων. Οι περισσότερες από τις μηχανολογικές εφαρμογές απαιτούν τρισδιάστατη απεικόνιση με στερεά ή επιφάνειες, δυνατότητα απεικόνισης επιφανειών ελεύθερης μορφής, διαχείριση συναρμολογήσεων και σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλων συναρμολογήσεων με εκατοντάδες ή και χιλιάδες διακριτά εξαρτήματα, εκτεταμένη χρήση βιβλιοθηκών-αντικειμένων, έξοδο σε σύστημα σχεδίασης και εκτύπωσης για την παραγωγή των κατασκευαστικών σχεδίων και της τεκμηρίωσης του προϊόντος, σύνδεση με συστήματα CAM, CAE και εργαλειομηχανές ψηφιακής καθοδήγησης, σύνδεση με συστήματα MRPII, ERP, PDM, επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και επικοινωνία συστημάτων μέσω του διαδικτύου.

Υπάρχουν πολλοί προμηθευτές διεθνώς, και κυριότερα συστήματα είναι: CATIA-DASSAULT, Pro/Engineer-PTC, Unigraphics solutions- SIEMENS/UG, Solidworks-Solidworks/ DASSAULT, Inventor/Autocad-Autodesk, Solidesign-Intergraph/ SIEMENS/UG κ.ά. Γίνεται ακόμα διάκριση μεταξύ μεγάλων, μεσαίων και μικρών συστημάτων. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα CATIA-DASSAULT, Pro/Engineer-PtC, και Unigraphics solutions-SIEMENS/UG. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν συστήματα όπως Solidworks-Solidworks/ DASSAULT, Inventor/AutoCAD-Autodesk, Solidesign-Intergraph/ SIEMENS/UG.

-Ηλεκτρονικές εφαρμογές (Σχεδίαση πλακετών, ολοκληρωμένα κυκλώματα, ηλεκτρολογική σχεδίαση, κ.λπ.). Η αυτοματοποίηση της σχεδίασης ηλεκτρονικών (Electronic design automation-EDA) είναι μια κατηγορία εργαλείων για τη σχεδίαση και παραγωγή ηλεκτρονικών συστημάτων, από τα τυπωμένα κυκλώματα (printed circuit boards-PCBS) μέχρι τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (integrated circuits). Τα μεγάλα κυκλώματα είναι πολύ πολύπλοκα για να σχεδιαστούν με το χέρι. Η εφαρμογή τους έχει αυξηθεί πολύ γρήγορα λόγω της συνεχούς μεγέθυνσης του κλάδου. Τα πρώτα εργαλεία ήταν

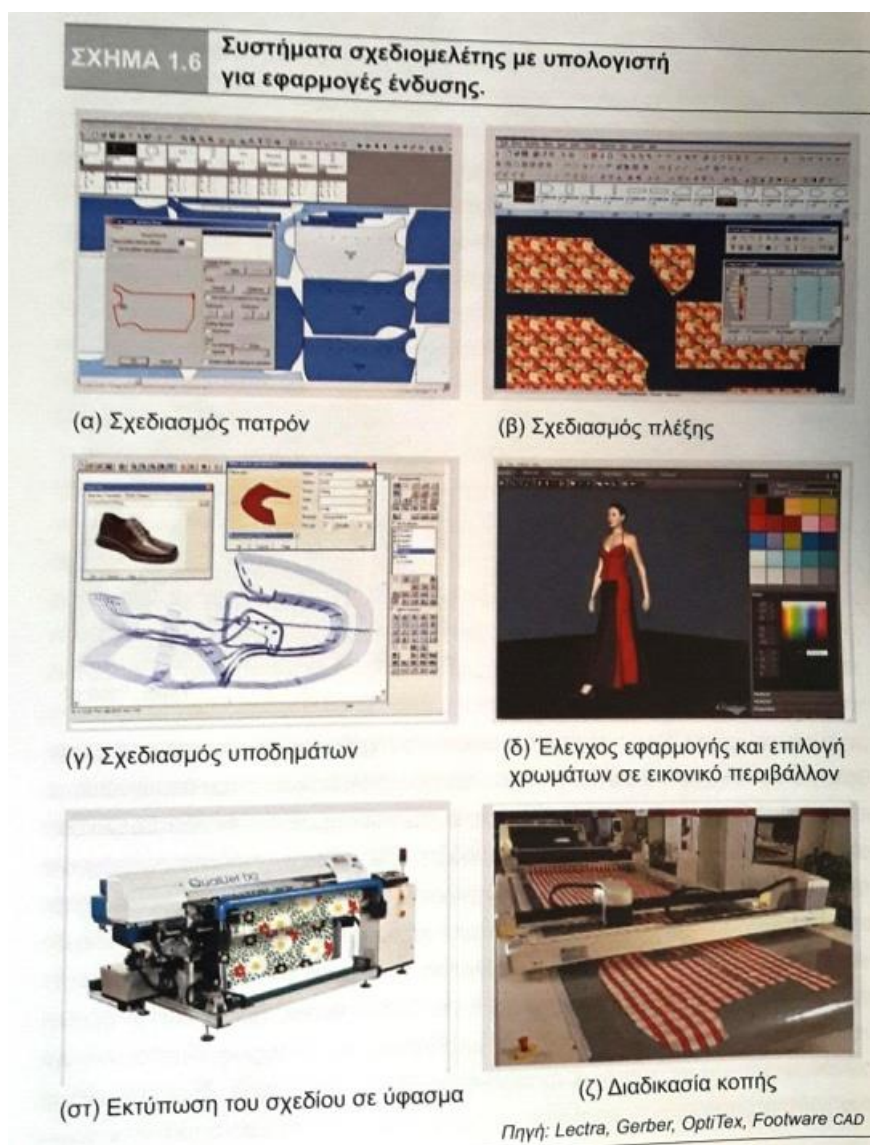
ακαδημαϊκά και ελεύθερα, όπως το "Berkeley VLSI Tools Tarball" και ένα σημαντικό στάδιο ήταν η δημιουργία του MOSIS-Metal Oxide Semiconductor Implementation Service, μια κοινοπραξία πανεπιστημίων και εταιρειών που ανέπτυξαν μια οικονομική μέθοδο εκπαίδευσης σχεδιαστών κυκλωμάτων μέσω της παραγωγής πραγματικών κυκλωμάτων. Συνήθως είναι ένα σύστημα δύο διαστάσεων.

Αρχικά ήταν εργαλεία διάταξης για πλακέτες με τυπωμένα κυκλώματα και ολοκληρωμένα κυκλώματα, στις αρχές 1980. Τα πρώτα συστήματα ηλεκτρονικής σχεδίασης αναπτύχθηκαν εσωτερικά από εταιρείες όπως Hewlett Packard, Tektronix και Intel. Οι πρώτες ειδικευμένες εταιρείες ήταν θυγατρικές αυτών, όπως Daisy Systems, Mentor Graphics, και Valid Logic Systems και σύντομα δημιουργήθηκαν και πολλές άλλες. Η Cadence Design Systems δημιουργήθηκε στα μέσα του 1980 και ειδικεύτηκε στον φυσικό σχεδιασμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η Synopsys την ίδια περίοδο ειδικεύτηκε στη σύνθεση των λογικών πύλων. Στη συνέχεια όλες αναπτύχθηκαν και παρέχουν όλη την γκάμα των εφαρμογών. Η Magma Design Automation, που ιδρύθηκε το 1997, εκμεταλλεύεται τις απλοποιήσεις που είναι πιθανές στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος από την αρχή. Η ηλεκτρονική σχεδίαση διαιρείται σε πολλές και επικαλυπτόμενες υπο-περιοχές, που αποσκοπούν στη σύνδεση της σχεδίασης με την παραγωγή. Όλα τα συστήματα ηλεκτρονικής σχεδίασης πρέπει να συνεργάζονται και να έχουν άμεση σύνδεση με μηχανολογικό σύστημα, για να ελέγχουν τη δυνατότητα συναρμολόγησης του προϊόντος.

-Κατασκευαστικός τομέας (AEC). Εφαρμογές στην αρχιτεκτονική, στην εσωτερική διαμόρφωση, στην κατασκευή κτιρίων και σε άλλα έργα πολιτικού μηχανικού, όπως οδοποιία, σιδηρόδρομο και τούνελ, ύδρευση, δίκτυα, τοπογραφία, διάταξη χώρου, αερισμός και ψύξη, κ.ά. (Σχήμα 1.4). Απαιτούν σε πολλές περιπτώσεις τρισδιάστατη μοντελοποίηση, δυνατότητα διαχείρισης έργων (project management), χρήση βιβλιοθηκών-αντικειμένων, έξοδος απαραίτητα σε σχέδιο, δυνατότητα ψηφιοποίησης, πολύ καλή γραφική απεικόνιση και συνεργασία με συστήματα χαρτογράφησης (συστήματα GIS). Συνήθως απαιτούνται ειδικό προγράμματα για καθεμία από τις παραπάνω εφαρμογές.

- Ειδικές εφαρμογές (ένδυμα - δέρμα). Η βιομηχανία ένδυσης και υπόδησης στην αρχή αλλά και όλες οι εργασίες στην κλωστοϋφαντουργία σήμερα χρησιμοποιούν τεχνολογία σχεδιομελέτης και παραγωγής με υπολογιστή. Σήμερα επικρατεί κυρίως σχεδίαση σε δύο διαστάσεις, ενώ η τρισδιάστατη απεικόνιση αρχίζει και αποκτά ενδιαφέρον και εφαρμογές, ιδιαίτερα για την υποδηματοποιία. Η εφαρμογή της τρισδιάστατης μοντελοποίησης στη βιομηχανία ένδυσης είναι σε ερευνητικό επίπεδο ακόμα. Τα συστήματα σχεδιασμού ένδυσης είναι σχετική ακριβιά, επειδή χρησιμοποιούν εξειδικευμένο εξοπλισμό, όπως μεγάλους σχεδιογράφους, κοπτικά εργαλεία για πατρόν και αυτόματες μηχανές κοπής υφάσματος. Η εφαρμογή τους ποικίλει από το σχέδιο μόδας μέχρι και την κατασκευή. Η μεγαλύτερη χρήση των συστημάτων αφορά το σχεδιασμό του πατρόν, το μεγεθολόγιο και το κατάλληλο στρώσιμο του πατρόν στο ύφασμα, όπου επιτυγχάνεται και η μεγαλύτερη οικονομία, καθώς εξοικονομείται σημαντική

ποσότητα υλικού, οικονομία που δικαιολογεί την όλη επένδυση. Επίσης τα συστήματα αυτά έχουν τη δυνατότητα να παράγουν μια ολόκληρη συλλογή σε χαρτί, εξοικονομώντας τα σημαντικά ποσά από τη φυσική δειγματοληψία, και πολύ συχνά είναι συνδεδεμένα με ειδικούς εκτυπωτές ψεκασμού μελάνης, που έχουν τη δυνατότητα εκτύπωσης σε ύφασμα, για γρήγορη δειγματοληψία. Ακόμη τα συστήματα CAD μπορούν να συνδεθούν με αυτόματες μηχανές πλεξίματος και κοπής υφάσματος και να συνδυαστούν με το σύστημα τροφοδοσίας και αποθήκευσης, δημιουργώντας ένα ευέλικτο σύστημα παραγωγής. Σήμερα, η δυνατότητα χειρισμού ηλεκτρονικών πατρών είναι απόλυτα απαραίτητη για όλες τις εταιρείες που αναλαμβάνουν υπεργολαβία για λογαριασμό μεγάλων παραγωγών. Υπάρχουν λίγοι προμηθευτές διεθνώς και πολλοί σε τοπική κλίμακα, Κυριότερα συστήματα είναι τα LECTRA-Lectra systems, GERBER-Gerber, POLYPATRON-Πολύτροπο, κ.α.



Σχήμα 1.4 : Συστήματα σχεδιομελέτης με υπολογιστή για εφαρμογές ένδυσης[2]

1.4 Εργαλεία CAD για τη σχεδιομελέτη και παραγωγή

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία εργαλείων CAD που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία ανάπτυξης και παραγωγής του προϊόντος. Τα εργαλεία αυτά κατατάσσονται στις παρακάτω κύριες κατηγορίες:

- Εργαλεία σύλληψης του προϊόντος: βιομηχανικός σχεδιασμός και αντίστροφη σχεδίαση. Ονομάζονται και συστήματα Computer Aided Industrial Design-CAID ή Computer Aided Styling-CAS. Εφαρμόζονται κυρίως για σχεδίαση, μοντελοποίηση και προσομοίωση χωρίς να μας ενδιαφέρει η ακρίβεια του δημιουργούμενου μοντέλου και χωρίς να υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις για κάθετες εφαρμογές.
- Εργαλεία για σχεδίαση, μοντελοποίηση με απόδοση της ακριβούς μορφής των αντικειμένων, δημιουργίας συναρμολογήσεων και προσομοίωσης. Αποτελούν και τον κύριο κορμό των συστημάτων σχεδιομελέτης και είναι αυτά που ονομάζονται και συστήματα CAD. Η έμφαση στα συστήματα αυτά είναι στην ακρίβεια και στην πληρότητα του μοντέλου, γιατί το μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια σε όλες τις κάθετες εφαρμογές.
- Εργαλεία για ανάλυση συμπεριφοράς σε συνθήκες λειτουργίας. Είναι τα συστήματα μοντελοποίησης και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία —Finite Element Modelling και Finite Element Analysis. Ονομάζονται και συστήματα ανάλυσης — Computer Aided engineering (CAE).
- Εργαλεία για μελέτη και προσομοίωση παραγωγής. Οι κατεργασίες για την παραγωγή του προϊόντος προγραμματίζονται με τα συστήματα σχεδιασμού κατεργασιών με χρήση υπολογιστή-Computer Aided Process Planning-CAPP και ο προγραμματισμός των εργαλειομηχανών ψηφιακής κακαθοδήγησης με τα συστήματα παραγωγής με χρήση υπολογιστή-Computer Aided Manufacture-CAM.
- Εργαλεία για ειδικές εφαρμογές, όπως μελέτη ανοχών, επικοινωνίας με άλλα συστήματα σχεδιασμού, συστήματα διαχείρισης του κύκλου ζωής και συστήματα συνεργατικής σχεδίασης.
- Εργαλεία δημιουργίας του πλασματικού πρωτότυπου και της πλασματικής παραγωγής που συνδυάζουν τα συστήματα σχεδιομελέτης και παραγωγής με τα συστήματα εικονικής πραγματικότητας. Κάνουν χρήση ειδικού εξοπλισμού και λογισμικού, και χρησιμοποιούνται για την αλληλεπίδραση του χρήστη με το πρωτότυπο ή την παραγωγή και τη συναρμολόγηση του προϊόντος.

Συνοψίζοντας, η εφαρμογή των συστημάτων CAD σε όλη τη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος γίνεται ως εξής:

- η μορφή του προϊόντος αποδίδεται στο στάδιο της σύλληψης του προϊόντος με τη βοήθεια συστήματος Computer Aided Industrial Design, ή με αντιγραφή του πρωτότυπου (reverse engineering),

- η μορφή μεταφέρεται σε σύστημα μοντελοποίησης Computer Aided Design, όπου συμπληρώνεται και τελειώνει η μορφή του, η συναρμολόγησή του και δημιουργείται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων,
- το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων μεταφέρεται σε σύστημα ανάλυσης Computer Aided engineering και σε συστήματα ειδικών εφαρμογών,
- το αρχείο CAD μεταφέρεται στο σύστημα Computer Aided Process Planning, για την προετοιμασία του πλάνου κατεργασίας και στη συνέχεια γίνεται ο προγραμματισμός των εργαλειομηχανών ψηφιακής καθοδήγησης με τα συστήματα Computer Aided Manufacture,
- εξετάζεται η συμπεριφορά του προϊόντος σε σχεδόν πραγματικές συνθήκες εργασίας, η δυνατότητα συναρμολόγησής του και η παραγωγή του προϊόντος στο σύστημα παραγωγής με τα συστήματα πλασματικού πρωτοτύπου και πλασματικής παραγωγής.

1.4.1 Αντίστροφη σχεδίαση

Ξεκίνησε ως διαδικασία επανασχεδίασης ή αντιγραφής προϊόντων και σήμερα έχει εξελιχθεί σε μια ολοκληρωμένη επιστήμη. Η επανασχεδίαση αρχίζει με την παρατήρηση και δοκιμή του προϊόντος. Μετά αποσυναρμολογείται και για τα διάφορα εξαρτήματα αναλύεται η μορφή τους, η λειτουργία τους, οι ανοχές συναρμολόγησης και η διαδικασία παραγωγής. Σκοπός είναι η πλήρης κατανόηση του προϊόντος και του τρόπου λειτουργίας. Με βάση αυτή την κατανόηση, παράγεται ένα βελτιωμένο προϊόν, είτε στο επίπεδο του υποσυστήματος (προσαρμοστικά) ή στο επίπεδο του εξαρτήματος (διαφοροποίηση).

Σήμερα, όλες οι εταιρείες έχουν μελετήσει τη διαδικασία της αντίστροφης σχεδίασης, έχουν αναπτύξει ισχυρά εργαλεία που τις διευκολύνουν να συμπίεζον τον κύκλο ανάπτυξης του προϊόντος. Χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία εφαρμογών, όπως παραγωγή, βιομηχανικό σχεδιασμό, ιατρικές εφαρμογές, αποτύπωση εκθεμάτων πολιτιστικής κληρονομιάς κ.ά. Για παράδειγμα, όταν ένα νέο μοντέλο αυτοκινήτου εισάγεται στην αγορά, οι ανταγωνιστές μπορεί να αγοράσουν ένα και να το αποσυναρμολογήσουν για να μάθουν πώς έχει κτιστεί και πώς δουλεύει. Στη δημιουργία λογισμικού, ένας καλός πηγαίος κώδικας μπορεί να είναι μια παραλλαγή ενός άλλου καλού πηγαίου κώδικα. Σε ορισμένες εφαρμογές, όπως το styling των αυτοκινήτων, οι σχεδιαστές μπορεί να μορφοποιήσουν τις ιδέες τους με μαλακά/εύπλαστα υλικά, όπως πηλός, πλαστελίνη, ξύλο, αφρώδες ελαστικό, αλλά το μοντέλο CAD είναι απαραίτητο στη συνέχεια. Όσο περισσότερη οργανική μορφή έχει ένα προϊόν, τόσο πιο δύσκολη και αποδοτική είναι η απόδοση της μορφής

του από το σύστημα CAD. Το τελικό μοντέλο στον υπολογιστή μπορεί να μην έχει την ακριβή επιθυμητή μορφή. Οι διαδικασίες αυτές έχουν επίσης σημασία και για εταιρείες που αναπαράγουν εξαρτήματα άμεσα από λειτουργικά δοκίμια. Ανταλλακτικά για παρωχημένα μηχανήματα, αντίγραφα παλαιών εργαλείων, ή επανασχεδίαση ξένων προϊόντων με νέα μορφή, είναι περιπτώσεις χρήσης της αντίστροφης σχεδίασης. Η λύση σε όλες αυτές τις περιπτώσεις είναι η αντίστροφη μηχανική, δηλαδή η διαδικασία χρήσης του φυσικού πρωτοτύπου ως αποκλειστική πηγή πληροφόρησης για τη δημιουργία του ψηφιακού πρωτοτύπου.

Συνοψίζοντας, οι κυριότεροι λόγοι χρήσης μεθόδου αντίστροφης μηχανικής είναι:

- Ο αρχικός παραγωγός δεν είναι διαθέσιμος, αλλά ένας πελάτης ζητάει το προϊόν, π.χ. ανταλλακτικά πλοίων, αεροπλάνων, κ.λπ., όταν το σκάφος έχει αποσυρθεί.
- Ο αρχικός παραγωγός δεν υφίσταται, π.χ. το προϊόν έχει αποσυρθεί.
- Η τεκμηρίωσή του δεν υφίσταται ή έχει χαθεί.
- Επιθεώρηση ή ποιοτικός έλεγχος, σύγκριση ενός κατεργασμένου εξαρτήματος με τις πραγματικές του διαστάσεις, όπως λαμβάνονται από ένα σύστημα.
- Μερικά από τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά του αντικειμένου πρέπει να απαλειφθούν.
- Ενίσχυση των καλών χαρακτηριστικών σε ορίζοντα χρόνου.
- Ανάλυση των καλών και των κακών χαρακτηριστικών στα προϊόντα των ανταγωνιστών.
- Δημιουργία νέων μεθόδων βελτίωσης της διαδικασίας ανάπτυξης των προϊόντων.
- Δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου από αγάλματα για τη δημιουργία, μεγέθυνση και κίνηση σε παιχνίδια και ταινίες ή για αναπαραγωγή του μοντέλου.
- Αρχιτεκτονικές εφαρμογές καθώς και τεκμηρίωση και μετρήσεις.
- Προσαρμογή ρούχων, υποδημάτων σε ανθρωποειδή και αποτύπωση των ανθρωπομορφικών χαρακτηριστικών ενός πληθυσμού.
- Εφαρμογή σε προσθετικές χειρουργικές επεμβάσεις (κρανιακά, οδοντικά κ.ά. εμφυτεύματα), με τη χρήση ιατρικών δεδομένων (π.χ. δεδομένα από αξονικό ή μαγνητικό τομογράφο) για τη σχεδίαση εμφυτευμάτων προσαρμοσμένων ειδικά στην περίπτωση κάθε ασθενή και τη μοντελοποίηση ανθρώπινων μελών για την κατάστροψη των χειρουργικών επεμβάσεων (Σχήμα 1.5).

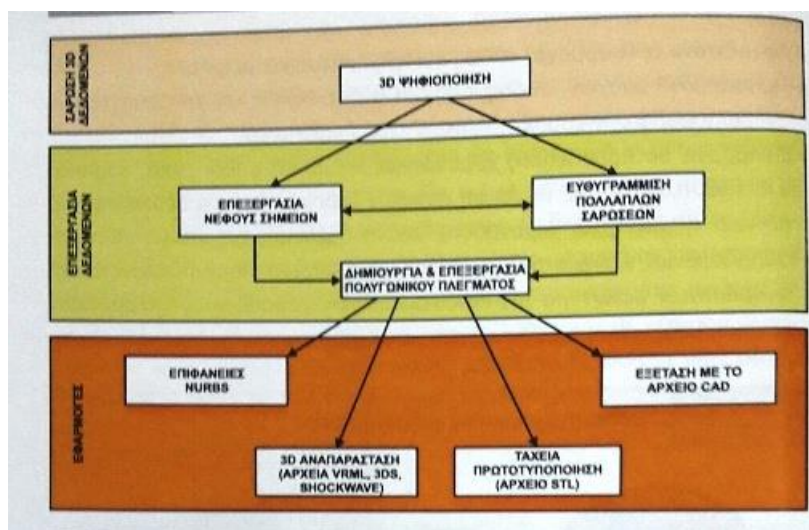


Σχήμα 1.5: Σχεδίαση κρανιακού εμφυτεύματος[2]

Ο υπολογιστής χρησιμοποιείται για τη σύλληψη της γεωμετρίας του εξαρτήματος, την παρουσίαση της τρισδιάστατης μορφής, την εκτέλεση των απαιτούμενων αλλαγών στο μοντέλο, τη δοκιμή της απόδοσης και την προσομοίωση της διαδικασίας παραγωγής και ελέγχου, χωρίς την παραγωγή του πραγματικού πρωτοτύπου.

Η γενικευμένη διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Εκτελείται σε 3 στάδια:

- **Στάδιο 1: Σάρωση και Συλλογή 3D Δεδομένων**
- **Στάδιο 2: Επεξεργασία των Δεδομένων Σάρωσης**
- **Στάδιο 3: Εφαρμογές**



Σχήμα 1.6: Η γενικευμένη διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής[2]

Η στρατηγική για την αντίστροφη μηχανική πρέπει να περιλαμβάνει:

- ✓ Αιτίες για τη χρήση της.
- ✓ Αριθμό αντικειμένων που θα σαρωθούν σε μία ή περισσότερες σαρώσεις.
- ✓ Μέγεθος αντικειμένου, μικρό -μεγάλο.
- ✓ Πολυπλοκότητα, πολύπλοκο- απλό.
- ✓ Υλικό, σκληρό- μαλακό.
- ✓ Εξωτερική επιφάνεια, στιλπνή-λαμπερή.
- ✓ Γεωμετρία, οργανική- πρισματική, εσωτερική -εξωτερική,
- ✓ Απαιτούμενη ακρίβεια, γραμμική -ογκομετρική.

Στο πρώτο στάδιο της σάρωσης επιλέγεται η κατάλληλη τεχνική γι' αυτή, προετοιμάζεται το αντικείμενο για τη σάρωση και στη συνέχεια εκτελείται η σάρωση, που πρέπει να καλύπτει όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου, όπως σκαλοπάτια, αυλάκια, εσοχές, οπές. Η σάρωση γίνεται με τρισδιάστατους σαρωτές, που είναι δύο ειδών: σάρωση με αισθητήριο επαφής, ή οπτική σάρωση χωρίς επαφή.



Σχήμα 1.7 : Η διαδικασία της ψηφιοποίησης, με οπτική σάρωση (α) και (β) με επαφή [2]

Στην πρώτη περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εργαλειομηχανή μέτρησης συντεταγμένων (coordinate measuring machine-CMM) για την αποτύπωση της επιφάνειας του εξαρτήματος (Σχήμα 1.7β), όταν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις, όπως είναι οι εφαρμογές ποιοτικού ελέγχου, ή μια απλή εργαλειομηχανή CNC στην οποία έχει προσαρμοστεί η ακίδα επαφής, όταν οι απαιτήσεις ακρίβειας δεν είναι πολύ μεγάλες. Η ακίδα ακολουθεί αυτόματα το περίγραμμα του αντικειμένου. Η ακρίβεια αυτών των ακίδων είναι σε μηχανές CMM της τάξης +0,01 έως 0,02 mm. Η μέθοδος αυτή εξαρτάται από το μέγεθος του αντικειμένου που θα σαρωθεί και η διαδικασία σάρωσης μπορεί να είναι εξαιρετικά χρονοβόρα. Επίσης, η ακίδα πιέζει το αντικείμενο για να μετρήσει τις συντεταγμένες του κάθε σημείου. Η πίεση αυτή, παρότι είναι μικρή, μπορεί να καταστήσει τη μέθοδο αυτή ακατάλληλη για μαλακά ή ελατά υλικά, όπως π.χ., τα ελαστικά.

Στη δεύτερη μέθοδο, το σύστημα ελέγχου οδηγεί το σύστημα σάρωσης σε συνεχή πορεία και συλλέγει εκατοντάδες ή χιλιάδες ανεξάρτητα σημεία για να ορίσει την πραγματική γεωμετρία του εξαρτήματος. Όσο περισσότερα σημεία συλλέγονται, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακρίβεια αναπαράστασης. Τα συστήματα σάρωσης χωρίς επαφή μπορεί να είναι laser ή οπτικά, μπορεί να είναι γρήγορα στη σάρωση ακόμα και για πολύπλοκα και μεγάλα αντικείμενα, αλλά παρουσιάζουν και ορισμένους περιορισμούς, όπως: Τυπική ακρίβεια $\pm 0,025$ έως 0,2 mm.

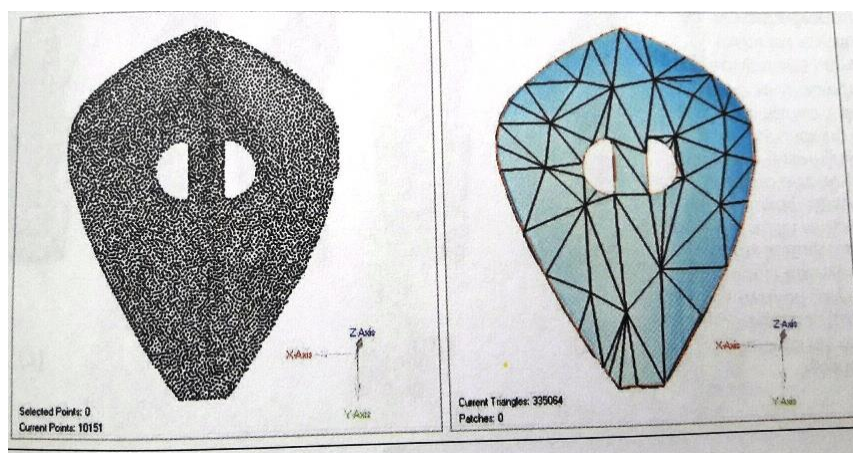
Μερικές συσκευές έχουν πρόβλημα δημιουργίας δεδομένων που περιγράφουν επιφάνειες που είναι παράλληλες προς τον άξονα του laser.

Τα περισσότερα συστήματα εκπέμπουν φως το οποίο μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα όταν προσπίπτει πάνω σε λαμπερές επιφάνειες, με αποτέλεσμα να απαιτείται μια προεργασία στην επιφάνεια πριν από τη σάρωση.

Πολλά εξαρτήματα, ανάλογα με τη διαμόρφωση, απαιτούν την επανατοποθέτηση ή την περιστροφή του αντικειμένου σε διάφορες θέσεις, ώστε να αποτυπωθεί μια εσοχή ή ένα χαρακτηριστικό που έχει πασαλειφθεί στις αρχικές σαρώσεις. Αυτοί οι προβληματισμοί περιορίζουν τη χρήση των συσκευών σε εφαρμογές μηχανικού, όπου η ακρίβεια είναι δευτερεύουσας σημασίας σε σχέση με την ταχύτητα. Όμως οι συσκευές αυτές βελτιώνονται συνεχώς σε όλα τα παραπάνω προβλήματα.

Στο δεύτερο στάδιο γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων της σάρωσης. Γίνεται σε δύο φάσεις: επεξεργασία του νέφους σημείων και επεξεργασία του πολυγωνικού πλέγματος που προκύπτει. Οι βασικές λειτουργίες στην πρώτη φάση είναι η ένωση των πολλαπλών σαρώσεων και η εφαρμογή ειδικών φίλτρων για την απαλοιφή του θορύβου, των απομακρυσμένων σημείων και τη μείωση του αριθμού των σημείων. Το αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας είναι ένα καθαρό, ενωμένο σύνολο σημείων στην πιο κατάλληλη μορφή, το οποίο οδηγεί σε ένα μοντέλο πολυγωνικού πλέγματος. Η δεύτερη φύση περιλαμβάνει, λειτουργίες εφαρμογής φίλτρων για την εξάλειψη ανεπιθύμητων κορυφών, την εξομάλυνση επιφάνειας, τη μείωση θορύβου, τη μείωση του αριθμού πολυγώνων, καθώς και

λειτουργίες για το κλείσιμο των οπών και τη δημιουργία του τελικού μοντέλου κλειστής επιφανείας (Σχήμα 1.8). Σε περιπτώσεις που ο σαρωτής, αντί για σημεία, παράγει σαρώσεις σε μορφή έτοιμων πολυγωνικών επιφανειών, η φάση 1 μπορεί να παραλειφθεί και η ένωση των σαρώσεων να γίνει κατευθείαν στη φάση 2. Υπάρχουν αρκετά προϊόντα λογισμικού που σχεδόν αυτοματοποιούν αυτή τη διαδικασία, αλλά ο χρήστης οφείλει να έχει κατανοήσει αρκετό καλά τη λειτουργία των ειδικών φίλτρων που χρησιμοποιούνται και στις 2 φάσεις.

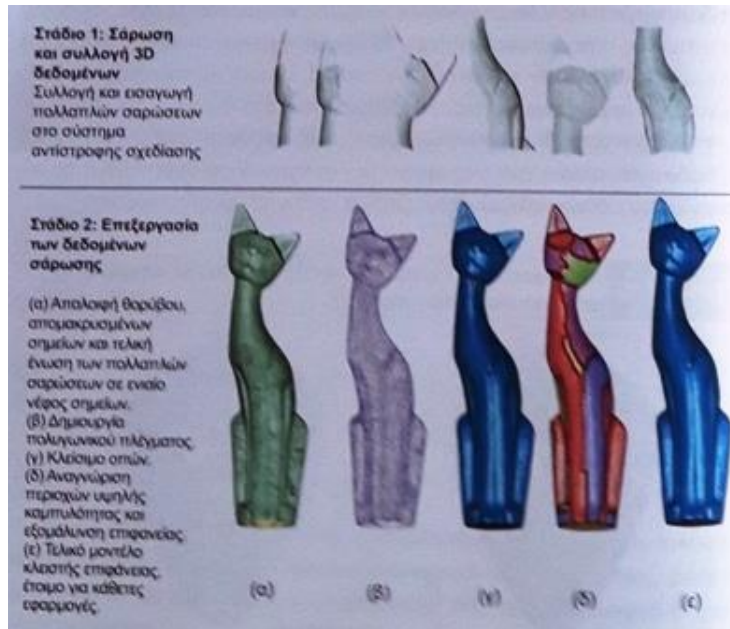


Σχήμα 1.8: Το νέφος των σημείων και η δημιουργία της επιφάνειας από το νέφος των σημείων[2]

Η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής δεν είναι απλή, τα περισσότερα συμβατικά συστήματα CAD/CAM δεν είναι προσαρμοσμένα σε αυτού του είδους τις λειτουργίες και στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται ειδικά προγράμματα λογισμικού, όπως Scan Tools-PTC, Surfacer-Imageware/ SDRC, SurfaceStudio-Alias/Wavefront, Raindrop Geomagic, Rapidform κ.α.

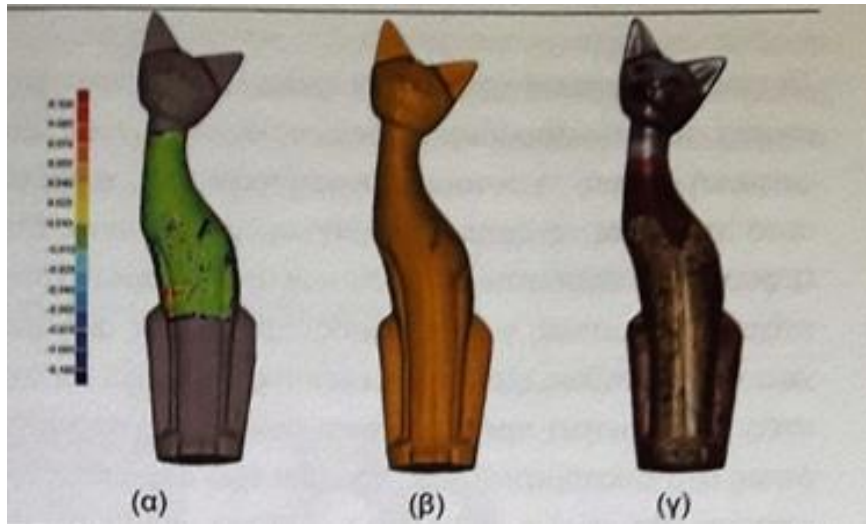
Στο τρίτο στάδιο, το είδος του μοντέλου που θα παραχθεί εξαρτάται από τη χρήση που θα έχει στη συνέχεια. Το αρχείο που θα δημιουργηθεί μπορεί να είναι IGES, VDA-FS, ISO G-Code, DFX, ASCII, STL, VRML, ή σε μορφή άμεσα συνδεδεμένη με σύστημα CAD/CAM.

Το λογισμικό πρέπει να έχει τις παρακάτω δυνατότητες, που δείχνουν και την πορεία εκτέλεσης της λειτουργίας ενός συστήματος αντίστροφης σχεδίασης (Πίνακας 1.1- Geomatic Studio).

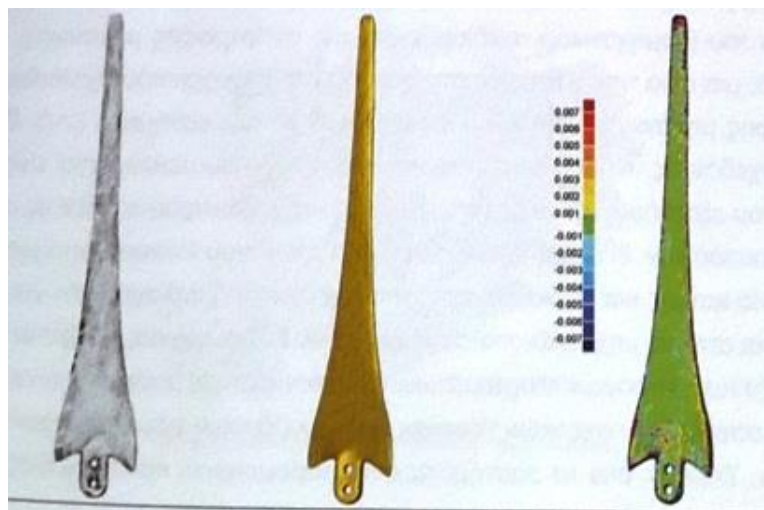


ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1: Τυπική πορεία λειτουργιών στην αντίστροφη σχεδίαση και δυνατότητες συστημάτων[2]

Μια σημαντική λειτουργία των συστημάτων αντίστροφης μηχανικής είναι η αντιπαραβολή του αρχικού νέφους σημείων με την τελική γεωμετρία που παράγει το σύστημα και η παρουσίαση των αποκλίσεων σε γραφική μορφή (Σχήμα 1.9). Στην εφαρμογή αυτή έχει γίνει σάρωση ενός περυγίου ανεμογεννήτριας και η δημιουργία του νέφους σημείων (αριστερό μοντέλο), το αντίστοιχο μοντέλο επιφανειών CAD (μεσαίο μοντέλο) και σύγκριση της γεωμετρίας του τελικού μοντέλου CAD με το αρχικό νέφος σημείων (δεξιό μοντέλο).



ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2- Στάδιο 3: Εφαρμογές (α) Εξέταση της ποιότητας της επιφάνειας με μέτρηση της απόκλισης από τα δεδομένα σάρωσης, (β) Μοντέλο STL για εφαρμογές ταχείας πρωτοτυποποίησης, (γ) Εφαρμογή τρισδιάστατης φωτορεαλιστικής απεικόνισης για εικονικό έκθεμα (VMRL,3DS). [2]



Σχήμα 1.9: Αρχικό νέφος σημείων, μοντέλο CAD και έγχρωμη αποτύπωση της απόκλισης της γεωμετρίας του μοντέλου CAD από το αρχικό νέφος σημείων.

1.4.2 Μοντελοποίηση -Σχεδίαση - Προσομοίωση

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως στη λεπτομερή μελέτη του προϊόντος, που περιλαμβάνει τη δημιουργία της τελικής μορφής του προϊόντος σε ψηφιακή μορφή, τη συναρμολόγησή του και την κινηματική ανάλυση. Στο στάδιο αυτό απαιτείται να έχουμε ακριβή και έγκυρη μοντελοποίηση του προϊόντος. Η έμφαση εδώ είναι στην ακρίβεια των υπολογισμών και σε θέματα όπως ανοχές, πάχος τοιχωμάτων, γωνίες κλίσης, αποστάσεις ασφαλείας, κ.λπ. (δηλαδή στοιχεία που συνήθως ξέρουν οι μελετητές μηχανικοί και όχι οι βιομηχανικοί σχεδιαστές). Η γεωμετρία πρέπει να είναι κλειστή στα περισσότερα αντικείμενα, και όχι όπως στα συστήματα CAID, που δεν έχει σημασία εάν μεταξύ δύο επιφανειών υπάρχει ένα κενό ή το μοντέλο από την ψηφιοποίηση δεν καλύπτει περιοχές που δεν έχουν σαρωθεί και που έχουν γεμίσει κατά προσέγγιση. Η απεικόνιση είναι συνήθως με στερεό και λιγότερο με επιφάνειες, με δυνατότητα δημιουργίας συναρμολόγησης, απόδοση της κίνησης, κυλά γραφικά και σύνδεση με κάθετες εφαρμογές (Σχήμα 1.10). Αποτελούν και την πλειοψηφία των εμπορικών εφαρμογών και στον τομέα αυτό έχουμε και τα περισσότερα συστήματα. Τυπικά συστήματα CATIA (DASSAULT) Pro/Engineer (PTC), Solidworks (DASSAULT), Inventor (Autodesk) κ.λπ.

Το κάθε εξάρτημα ενός τελικού προϊόντος σχεδιάζεται ανεξάρτητα. Η σχεδίαση αυτή μπορεί να είναι εξαρχής για νέα εξαρτήματα μπορεί να προέρχεται από αναθεώρηση παλαιών μοντέλων τα οποία τροποποιούνται για να ανταποκριθούν στις νέες απαιτήσεις του νέου προϊόντος, ή μπορεί να προέρχεται από το στάδιο του βιομηχανικού σχεδιασμού ή της αντίστροφης μηχανικής. Για το λόγο αυτό, μια από τις απαιτήσεις στα συστήματα βιομηχανικού σχεδιασμού και αντίστροφης μηχανικής είναι και η επικοινωνία με τα συστήματα CAD. Βέβαια, σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις επικοινωνίας, αυτό που μεταφέρεται είναι η γεωμετρία του εξαρτήματος, χωρίς τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και τις σχέσεις μεταξύ διαστάσεων. Η συμπλήρωση των στοιχείων που λείπουν από μια τέτοια επικοινωνία καθώς και οι διορθώσεις από σφάλματα ή αλλαγές στη γεωμετρία αποτελούνται από το μηχανικό στο σύστημα CAD. Στη συνέχεια, ορίζονται οι σχέσεις μεταξύ των διαφόρων εξαρτημάτων. Οι σχέσεις αυτές μπορεί να είναι μεταξύ των διαστάσεων, των σχετικών θέσεων, των συνδέσμων που υπάρχουν μεταξύ τους, κ.λπ.

Σήμερα, όλα τα συστήματα είναι παραμετρικά, και ο ορισμός αυτών των σχέσεων είναι εύκολος. Στη συνέχεια δημιουργείται η συναρμολόγηση των υποσυστημάτων και του τελικού προϊόντος. Τα πρώτα συστήματα είχαν τη δυνατότητα διαχείρισης μικρών συναρμολογήσεων (λίγες

εκατοντάδες εξαρτήματα), ενώ τα σημερινά συστήματα μπορούν να διαχειριστούν μεγάλες και πολύ μεγάλες συναρμολογήσεις (μερικές χιλιάδες εξαρτήματα).



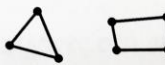


Σχήμα 1.10: Παραδείγματα μοντελοποίησης[2]

Το πλεονέκτημα χρήσης των συστημάτων CAD είναι ότι υλοποιείται εύκολα μια αλλαγή σ ένα εξάρτημα και αυτόματα η αλλαγή αυτή περνάει και σε όλα τα συνδεδεμένα (μέσω των σχέσεων που έχουν οριστεί) εξαρτήματα και σε όλη τη συναρμολόγηση.

1.4.3 Ανάλυση

Γίνεται με ειδικά προγράμματα ανάλυσης που βασίζονται στα πεπερασμένα στοιχεία και αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής. Πρόκειται για ειδικευμένα προγράμματα βελτιστοποίησης ανάλογα με το υλικό (πλαστικά, μέταλλα, σύνθετα υλικά, κ.λπ.) και το είδος της εφαρμογής (ροή, θερμότητα, αντοχή, έγχυση κ.λ.π.). Με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να διαχειριστούμε κάθε μορφή γεωμετρίας του αντικειμένου, όλα τα υλικά από τα οποία μπορεί να αποτελείται, όλες τις οριακές συνθήκες και όλες τις συνθήκες φόρτισης στις οποίες υπόκειται. Σε προβλήματα στα οποία δεν υφίστανται αναλυτικές εξισώσεις επίλυσης μπορεί να εφαρμοστεί η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, που επιτυγχάνει μια προσεγγιστική λύση, επιλύοντας γνωστές εξισώσεις στα πεπερασμένα στοιχεία στα οποία έχουμε διαιρέσει το αντικείμενο και στη συνέχεια συνθέτει τις επιμέρους λύσεις για να επιλύσει το ολικό πρόβλημα. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της επίλυσης απαιτεί μια πολύ καλή γνώση της μηχανικής του εκάστοτε επιλυόμενου προβλήματος, δηλαδή, γραμμική/μη γραμμική μηχανική, μετάδοση θερμότητας, ρευστομηχανική, δυναμική, χύτευση, κ.λ.π.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3
Η γεωμετρία των βασικών στοιχείων

Διάσταση	Είδος στοιχείου	Γεωμετρία
Σημείο	Μάζα	•
Γραμμή	Ελατήριο, δέσμη, ράβδος, διάκενο, στρέψη	—
Επιφάνεια	Ομογενές 2Δ, αξονοσυμμετρικό, επίπεδο κέλυφος	
Καμπύλη επιφάνεια	Κέλυφος	
Όγκος	Ομοιογενής 3Δ	

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3: Η γεωμετρία των βασικών στοιχείων[2]

Στη λειτουργία του συστήματος, μια βασική επιλογή που κάνει κάθε χρήστης είναι η επιλογή του είδους των στοιχείων που θα χρησιμοποιήσει για να ενώσει τους κόμβους που θα ορίσει στο

μοντέλο. Τα βασικά είδη στοιχείων είναι 5 και φαίνονται στον Πίνακα 1.3, και για το καθένα αναφέρεται και το είδος των αντικειμένων για το οποίο είναι κατάλληλο.

Ο χρήστης μπορεί να συνδυάσει διάφορα στοιχεία για την επίλυση του προβλήματος. Για καθεμιά κατηγορία μπορούν να υπάρξουν και πολλές παραλλαγές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11, ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων που απαιτούνται για τον ορισμό τους.

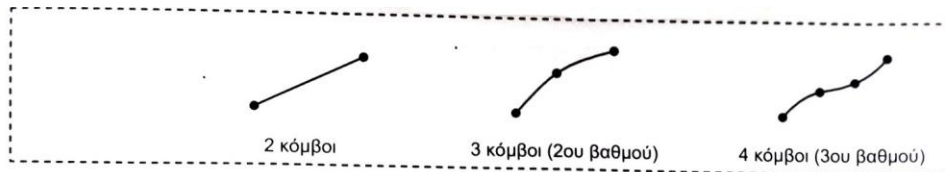
Τα στοιχεία μίας διάστασης (1D), Σχήμα 1.11(α) χρησιμεύουν για τη μοντελοποίηση τμημάτων ενός προβλήματος που είναι 1D (π.χ. ελατήριο στην άκρη μιας δοκού). Τα στοιχεία δύο διαστάσεων (2D), Σχήμα 1.11(β), είναι τρίγωνα ή τετράπλευρα. Τα τρίγωνα στοιχεία μπορεί να έχουν από 3 μέχρι 10 κόμβους. Το πιο απλό είναι το τρίγωνο με 3 κόμβους, ενώ το τρίγωνο των 10 κόμβων έχει εννέα εξωτερικούς κόμβους και ένα εσωτερικό κόμβο μέσα στο τρίγωνο. Τα τετράπλευρα στοιχεία έχουν από 4 μέχρι 12 κόμβους. Τα στοιχεία δύο διαστάσεων μπορούν να μοντελοποιήσουν προβλήματα επίπεδης τάσης και παραμόρφωσης και αξονοσυμμετρικά σχήματα, δηλαδή σώματα 2D και 2 1/2D.

Τα στοιχεία 3D μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διακριτοποίηση των στερεών 3D σωμάτων. Η δημιουργία ενός τρισδιάστατου πλέγματος είναι επίπονη και χρονοβόρα και πρέπει να γίνεται με τη χρήση του προ-επεξεργαστή (pre-processors). Οι εξωτερικοί κόμβοι κάθε στοιχείου είναι δύο τύπων, γωνιακοί και ενδιάμεσοι. Οι γωνιακοί είναι απαραίτητοι για τον ορισμό του στοιχείου, ενώ οι ενδιάμεσοι αποδίδουν καλύτερα τη γεωμετρία του στοιχείου και τη συνέχεια μεταξύ διαδοχικών στοιχείων. Τα στοιχεία που υποστηρίζει κάθε πρόγραμμα ανάλυσης αποτελούν τη βιβλιοθήκη των στοιχείων, και όσο πιο εκτενής είναι αυτή η βιβλιοθήκη, τόσο πιο ευέλικτο είναι το πρόγραμμα και μπορεί να επιλύσει πιο πολλά προβλήματα. Στην πράξη, παρόλο που όλα τα σώματα είναι τριών διαστάσεων, προσπαθούμε να τα προσεγγίσουμε στην ανάλυση με απλούστερα στοιχεία (1D ή 2D) και με όσο το δυνατόν λιγότερους κόμβους, για να προκύψει σύστημα μικρότερου μεγέθους που μπορεί να επιλυθεί πιο γρήγορα.

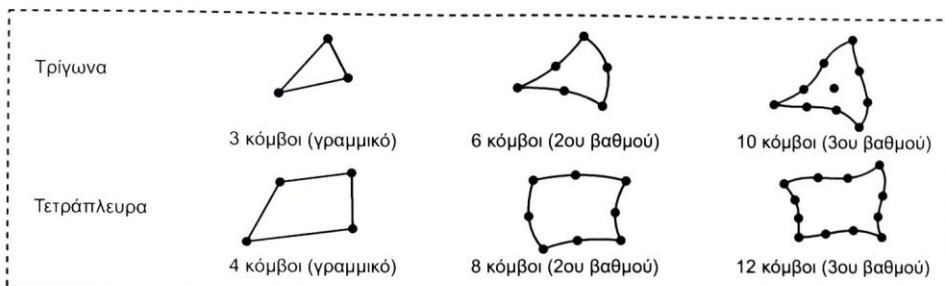
Συνήθως, κάθε σύστημα μοντελοποίησης διαθέτει έναν τελικό επεξεργαστή (post processor) που χωρίζει το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία. Το μοντέλο αυτό τροφοδοτείται στο σύστημα ανάλυσης, που διαθέτει έναν προ-επεξεργαστή (pre-processor) για να διαβάσει το μοντέλο. Η προ-επεξεργασία περιλαμβάνει:

-Τον τύπο της ανάλυσης (π.χ. στατική και δυναμική ανάλυση κατασκευών, ταλαντώσεις, ανάλυση κάμψης, θερμική ανάλυση στατική και δυναμική).

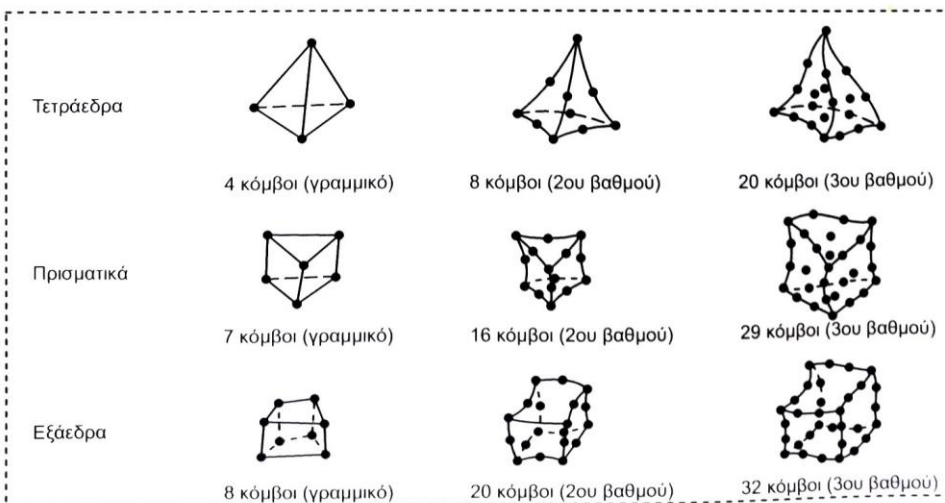
-Επιλογή του είδους του υλικού με τις ιδιότητές του. Η επιλογή αυτή γίνεται μετά τη δημιουργία των στοιχείων. Σε καθένα από τα στοιχεία προσδιορίζονται οι ιδιότητες του υλικού και οι οριακές συνθήκες. Προσδιορίζοντας διαφορετικές ιδιότητες υλικού για διαφορετικά στοιχεία μπορούν να



(α) Στοιχεία μίας διάστασης - 1D



(β) Στοιχεία δύο διαστάσεων - 2D



(γ) Στοιχεία τριών διαστάσεων - 3D

Σχήμα 1.11 : Διάφοροι τύποι πεπερασμένων στοιχείων και οι διαστάσεις τους [2]

αναλυθούν αντικείμενα που αποτελούνται από διάφορα υλικά. Οι ιδιότητες αυτές είναι συνήθως το μέτρο Young και ο λόγος Poisson για προβλήματα μηχανικής. Επιπλέον, το πάχος του κελύφους και του επιπέδου στοιχείου είναι ιδιότητες υλικού και όχι γεωμετρία (για να μην επιλύονται προβλήματα σε 3 διαστάσεις όταν δεν απαιτείται). Άλλες ιδιότητες υλικού είναι η θερμική αγωγιμότητα και το ιξώδες για άλλου τύπου προβλήματα. Στα σύνθετα υλικά, η διεπαφή μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων είναι πολύ σημαντική.

-Δημιουργία κόμβων. Στο αντικείμενο ορίζεται μια σειρά σημείων, κόμβοι, που όταν συνδεθούν μεταξύ τους θα μας δώσουν τα στοιχεία.

-Δημιουργία στοιχείων από τη σύνδεση των κόμβων. Βασική απαίτηση είναι να μην υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των στοιχείων και να είναι μόνον εφαπτόμενα. Το σύνολο των κόμβων με τα στοιχεία συνιστούν το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Ο αριθμός των κόμβων και των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν επαφίεται στην κρίση του μηχανικού. Ο γενικός κανόνας είναι ότι όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα, τόσο πιο ακριβή τα αποτελέσματα της ανάλυσης, αλλά και τόσο πιο χρονοβόρα η επίλυση. Υπάρχει και ένα όριο στην ανάλυση, που είναι για κάθε εφαρμογή διαφορετικό, πέραν του οποίου η διαφορά στα αποτελέσματα δεν έχει καμία έννοια.

-Εφαρμογή των οριακών συνθηκών και των φορτίων. Το φορτίο μπορεί να είναι σημειακό (δύναμη, ροπή, κ.ά.) ή κατανεμημένο (κατανεμημένη δύναμη, ροπή, ροή θερμότητας, υγρού, κ.ά.). Η εφαρμογή των συγκεντρωμένων δυνάμεων απαιτεί τη δημιουργία ενός κόμβου στο σημείο εφαρμογής της δύναμης. Μερικές φορές απαιτείται να εφαρμόζεται η δύναμη σε περισσότερους του ενός κόμβους. Τα κατανεμημένα φορτία εφαρμόζονται αυτόματα από τις κατάλληλες εξισώσεις των οριακών στοιχείων και ο χρήστης πρέπει να δώσει την πυκνότητα των κατανεμημένων φορτίων και τους κόμβους στους οποίους εφαρμόζονται.

Ακολουθεί η ανάλυση και βελτιστοποίηση της μορφής. Η επίλυση χωρίζεται στα παρακάτω στάδια:

Προσέγγιση της επίλυσης στο επίπεδο του στοιχείου. Η ζητούμενη παράμετρος (field variable) προσεγγίζεται στο κάθε στοιχείο με ένα πολυώνυμο. Η παράμετρος μπορεί να είναι μια τιμή (π.χ. θερμοκρασία) ή ένα διάνυσμα (π.χ μετατόπιση). Ο βαθμός της πολυωνυμικής προσέγγισης εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων σε κάθε στοιχείο, τον αριθμό των αγνώστων (στοιχεία

της παραμέτρου) σε κάθε κόμβο, και από ορισμένες συνθήκες συνέχειας μεταξύ των ορίων των στοιχείων.

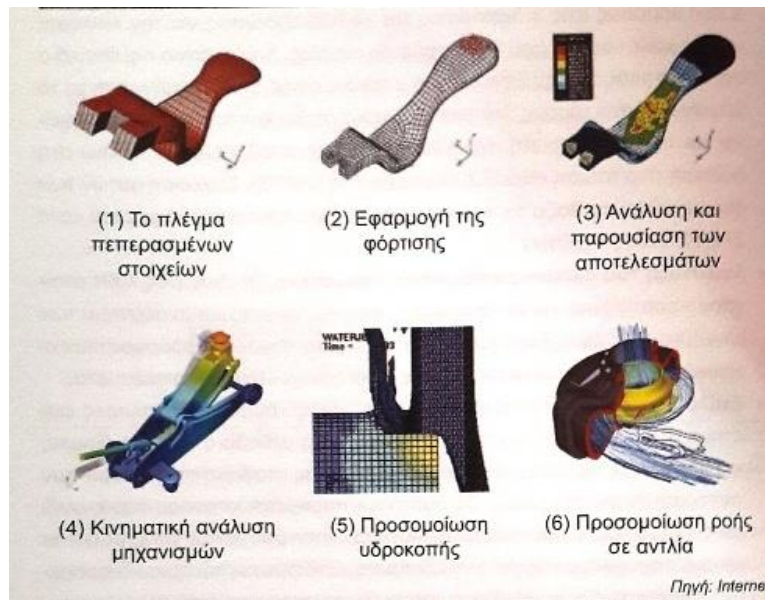
Ανάπτυξη πινάκων, στοιχείων και εξισώσεων. Αναπτύσσονται οι πίνακες του κάθε στοιχείου. (στιβαρότητας,μάζας, κ.ο.κ.) με τη χρήση διαφόρων μεθόδων (άμεση, παραμετρική κ.ά.). Καθεμιά είναι και πιο ενδεδειγμένη για διαφορετικές εφαρμογές. Επίσης, οι εξισώσεις ισορροπίας μεταφράζονται από το επίπεδο του σώματος στο επίπεδο του στοιχείου. Το μέγεθος των πινάκων επηρεάζεται από το είδος των στοιχείων και από τη ζητούμενη ανάλυση. Για παράδειγμα, έστω ότι ένα σώμα μπορεί να μοντελοποιηθεί με απλά στοιχεία 2D. Έστω ότι έχουμε ορίσει 20 κόμβους σε κάθε διάσταση, δηλαδή 400 κόμβους συνολικά. Επιπλέον απαιτούνται να προσδιοριστούν 2 παράμετροι ανά κόμβο. Συνεπώς, απαιτούνται να δημιουργηθούν 800 εξισώσεις. Για ισοδύναμο πρόβλημα που έχουμε χρησιμοποιήσει 3D στοιχεία, με 20 κόμβους ανά διάσταση, συνολικά υπάρχουν 8.000 κόμβους στις 3 διαστάσεις και 24.000 εξισώσεις για την επίλυση, καθώς κάθε κόμβος έχει 3 βαθμούς ελευθερίας. Άρα αυξάνει σημαντικά ο υπολογιστικός όγκος. Επιπλέον, ο υπολογιστικός όγκος αυξάνει και με το τετράγωνο του εύρους του μισού πίνακα στιβαρότητας που δημιουργείται και που στην πρώτη περίπτωση είναι 40 μεταβλητές (20×2) ενώ στη δεύτερη περίπτωση είναι 1.200 μεταβλητές ($20^2 \times 3$). Σύγκριση αυτών των δύο μεγεθών ανεβάζει τη πολυπλοκότητα του υπολογιστικού φόρτου κατά 27.000 φορές περίπου.

-Ανάπτυξη του ολικού συστήματος εξισώσεων. Οι εξισώσεις κάθε στοιχείου προστίθενται για να προκύψει ο πλήρης πίνακας και το σύστημα των αλγεβρικών εξισώσεων. Πριν από την επίλυση πρέπει να εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες, διαφορετικά μπορεί να έχουμε λάθος αποτελέσματα.

-Επίλυση για τη ζητούμενη παράμετρο στους κόμβους. Το πλήρες σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων επιλύεται με τη μέθοδο απαλοιφής Gauss, και παίρνουμε τις τιμές των παραμέτρων στους κόμβους στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Οι τιμές των παραμέτρων και οι παράγωγοι τους σχηματίζουν την πλήρη επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων του αρχικού προβλήματος για το αντικείμενο. Ενδιάμεσες τιμές, σε διαφορετικά σημεία από τους κόμβους, μπορούν να υπολογιστούν, αλλά δεν συνηθίζεται.

-Ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται γραφικά και αναλύονται από τον ειδικό μηχανικό (Σχήμα 1.12).

Το κλειδί για μια έγκυρη και αποτελεσματική ανάλυση είναι ο καθορισμός του σωστού τύπου στοιχείων, ο χωρισμός των πεπερασμένων στοιχείων (πλεγματοποίηση), η απόδοση των σωστών οριακών συνθηκών και φορτίσεων, η συνεπής χρήση μονάδων μέτρησης από τον ειδικό μηχανικό. Η πλεγματοποίηση και το είδος των στοιχείων είναι οι δύο κύριοι παράγοντες που μπορεί να εισάγουν σφάλματα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, δεδομένου ότι είναι μια προσεγγιστική μέθοδος επίλυσης. Μετά την επίλυση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, προτείνονται ορισμένες αλλαγές στη μορφή, στη διαδικασία παραγωγής, στις διαστάσεις, στο υλικό, κ.λ.π. από τον ειδικό μηχανικό στο μελετητή, και οι αλλαγές αυτές συνήθως υλοποιούνται στο σύστημα CAD, ώστε να υπάρχει μια ενιαία βάση δεδομένων για την τελική μορφή

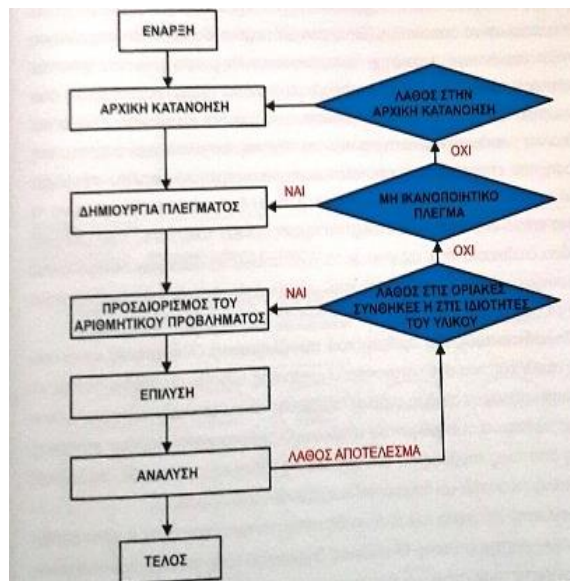


Σχήμα 1.12: Παραδείγματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία[2]

του κάθε εξαρτήματος. Τα συστήματα ανάλυσης από μόνα τους παρέχουν δυνατότητες μοντελοποίησης και αλλαγής της μορφής, ώστε να επιταχύνεται η επαναληπτική διαδικασία της ανάλυσης, αλλά οι τελικές προτεινόμενες αλλαγές πρέπει να τεκμηριωθούν και στο σύστημα σχεδιομελέτης (CAD).

Πρέπει να τονιστεί ότι τα περισσότερα από τα παραπάνω στάδια έχουν κωδικοποιηθεί στα εμπορικά συστήματα και ενώ η διαδικασία είναι σχεδόν αυτοματοποιημένη θα πρέπει να ελέγχεται από ειδικό μηχανικό. Τα περισσότερα συστήματα έχουν και δυνατότητες μοντελοποίησης, αλλά η συνήθης πρακτική είναι να επικοινωνεί το σύστημα ανάλυσης με το σύστημα CAD. Ορισμένα συστήματα επικοινωνούν άμεσα με το σύστημα CAD και άλλα μέσω μετάφρασης τύπου IGES. Συνήθως η άμεση χρήση του μοντέλου CAD μπορεί να μην είναι επιθυμητή, γιατί ένα μοντέλο που είναι πλήρες για το σχεδιαστή μπορεί να περιέχει σφάλματα για το μηχανικό που θα κάνει την ανάλυση, και πολλά συστήματα εκτελούν μια απλοποίηση της γεωμετρίας. Πολλές φορές λεπτομέρειες που περιέχονται σε ένα σύστημα CAD δεν είναι απαραίτητες για το σύστημα ανάλυσης και πρέπει να απαλειφθούν, π.χ. στρογγυλεύσεις ή άλλα χαρακτηριστικά που δεν επηρεάζουν την ανάλυση. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο πολλές φορές η σχεδίαση και η ανάλυση δεν χρησιμοποιούν το ίδιο μοντέλο και η άμεση μεταφορά δεν είναι αποδοτική.

Η όλη διαδικασία που ακολουθεί ο μηχανικός στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία φαίνεται στο Σχήμα 1.13 και αποτελείται από τα παρακάτω στάδια:

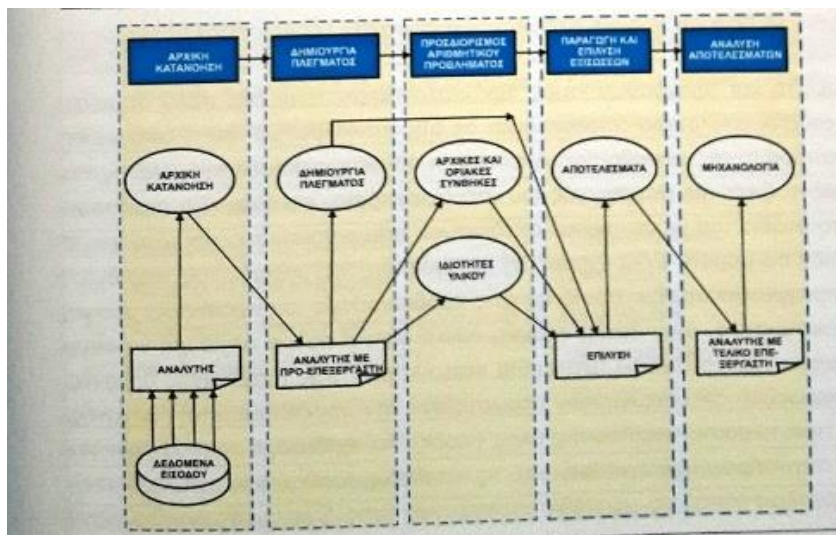


Σχήμα 1.13 :Τα στάδια στη διαδικασία της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία[2].

- ✓ **Αρχική κατανόηση:** Είναι βασικό στάδιο στο οποίο ο μηχανικός πρέπει να κατανοήσει το πρόβλημα που έχει να επιλύσει και να το έχει κατά κάποιο τρόπο «λύσει ήδη μέσα στο μυαλό του» χωρίς να έχει αγγίξει τον υπολογιστή του. Δηλαδή, έχει κατανοήσει το σχήμα του αντικειμένου, το πρόβλημα που έχει να επιλύσει, τη συμπεριφορά του στις φορτίσεις, τα φορτία που ασκούνται και έχει συλλέξει τις ιδιότητες του υλικού. Πληροφορίες μπορεί να αντλήσει από άλλους μηχανικούς ή από τη βιβλιογραφία.
- ✓ **Δημιουργία πλέγματος:** Στο στάδιο αυτό, ο μηχανικός πρέπει να αποφασίσει για τον αριθμό των κόμβων και των στοιχείων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μπορεί να πάρει τη γεωμετρία από το σύστημα σχεδιομελέτης ή να τη δημιουργήσει άμεσα στο σύστημα ανάλυσης. Ο μηχανικός πρέπει να εξετάσει το αντικείμενο και να διακρίνει τις ζώνες που θα παρουσιάσουν απότομες αλλαγές στη ζητούμενη παράμετρο (π.χ. ζώνες συγκέντρωσης τάσης) και που απαιτούν πυκνότερο πλέγμα (μεγαλύτερο αριθμό κόμβων και στοιχείων) και άλλες που δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα. Η διαδικασία αυτή καλείται κλιμάκωση πλέγματος. Μια άλλη παράμετρος είναι η ύπαρξη ασυνέχειας στο υλικό, στη φόρτιση, στη μορφή που επηρεάζουν τα αποτελέσματα, και ο μηχανικός πρέπει να ελέγξει καλά το πλέγμα για να αποφύγει τα σφάλματα. Η διαδικασία αυτή επιβαρύνει το χρόνο και το φόρτο της ανάλυσης. Η δημιουργία του πλέγματος είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που, αν γίνει με το χέρι, μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα. Στα σύγχρονα ειδικευμένα συστήματα, η διαδικασία αυτή έχει αυτοματοποιηθεί (pre-processors).
- ✓ **Προσδιορισμός του αριθμητικού προβλήματος:** Οι φορτίσεις και οι οριακές συνθήκες που είχε κατανοήσει ο μηχανικός στο πρώτο στάδιο πρέπει να κωδικοποιηθούν σε αυτό το στάδιο. Το μέγεθος και η θέση κάθε φόρτισης ή συνθήκης πρέπει να αποδοθούν σε κόμβους. Ο pre-processor παράγει συνήθως, εκτός από τους κόμβους, τα στοιχεία και τις ιδιότητες των υλικών, τις οριακές συνθήκες, τα φορτία και δημιουργεί και το αντίστοιχο αρχείο.
- ✓ **Επίλυση:** Το αρχείο του πλέγματος εισάγεται αυτόματα στον κώδικα ανάλυσης, PEA, για την επίλυση. Ο κώδικας δημιουργεί τους πίνακες των στοιχείων, υπολογίζει τις τιμές στους κόμβους και καταχωρεί τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα είναι κυρίως σε αριθμητική μορφή και συνίστανται από τις τιμές της ζητούμενης παραμέτρου σε όλους τους κόμβους του πλέγματος και τα παράγωγά της (π.χ. μετατόπιση κόμβων και τάσεις στα στοιχεία, θερμοκρασία κόμβου και ροή θερμότητας στο στοιχείο).

- ✓ **Ανάλυση:** Τα αποτελέσματα επεξεργάζονται από τον Τελικό Επεξεργαστή (Post Processor) και παρουσιάζονται σε γραφική μορφή. Η επεξεργασία είναι αυτόματη και δεν απαιτεί παρεμβολή του χρήστη. Δημιουργούνται καμπύλες και περιγράμματα της παραμέτρου και παρουσιάζονται στην οθόνη, μετατοπίσεις μπορεί να παρουσιαστούν σε αντιπαράθεση με το αρχικό σώμα, ανάλογα με την εφαρμογή. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορεί να οδηγήσουν σε αναθεώρηση τόσο του αριθμητικού προβλήματος, ή του πλέγματος στην περίπτωση που οι υποθέσεις δεν είναι σωστές, ή ακόμα και στη μορφή του αντικειμένου, εφόσον προκύψει κάποια λάθος διάσταση.

Στο Σχήμα 1.14 φαίνεται η αλληλεπίδραση του χρήστη με ένα σύστημα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Η αλληλεπίδραση είναι στα στάδια της δημιουργίας του πλέγματος, του προσδιορισμού του αριθμητικού προβλήματος, της επίλυσης και της ανάλυσης. Στο πρώτο στάδιο της αρχικής κατανόησης, ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από τον προ-επεξεργαστή, τον αναλυτή (solver) και τον τελικό επεξεργαστή. Ο προ-επεξεργαστής καλύπτει την πλεγματοποίηση και τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών και φορτίσεων, ο αναλυτής την επίλυση και ο τελικός επεξεργαστής την ανάλυση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 1.14: Αλληλεπίδραση του χρήστη με το σύστημα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία[2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ανάλυση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με βασικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί φυσιολογική προσομοίωση των πλαισίων, καθώς αυτά αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Σε μία συνεχή όμως κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή πεπερασμένα στοιχεία είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα. Για να γίνει χρήση μητρικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις.

Με αυτό τον τρόπο οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρ' όλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρικές) μεθόδους.

Για να επιτευχθεί ακριβής λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβιβαστότητας στο εσωτερικό των στοιχείων αλλά και στα σύνορά τους. Οι απαιτήσεις αυτές ανάγονται στην ικανοποίηση τεσσάρων συνθηκών. Μία διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί όμως να αποδώσει με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξαρτήτως του αριθμού των διακριτών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται. Υπάρχει δηλαδή πάντοτε ένα σφάλμα, το οποίο όμως μπορεί να περιορισθεί και να γίνει αμελητέο και τοπικό. Δεν είναι συνεπώς δυνατόν να ικανοποιηθούν όλες οι προαναφερθείσες συνθήκες με απόλυτη ακρίβεια, έστω και αν γίνει χρήση

μεγάλου αριθμού στοιχείων. Είναι όμως δυνατό, με σωστή επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και κατάλληλη διακριτοποίηση, να περιορισθεί το αριθμητικό σφάλμα. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των στοιχείων αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια διατύπωσης μιας λύσης. Θα πρέπει τότε να γίνεται αυτό έτσι ώστε να ικανοποιούνται επαρκώς οι συνθήκες συμβιβαστότητας χωρίς να χρειασθεί να γίνει χρήση υπερβολικά μικρών στοιχείων. Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους. Με άλλα λόγια, προκαθορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των διαφόρων μεταβλητών. Το αποτέλεσμα είναι ότι, παρ όλο που οι συνθήκες ισορροπίας και συμβιβαστότητας ικανοποιούνται μόνο στους κόμβους, η προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξασφαλίζει ότι η συμβιβαστότητα ικανοποιείται επαρκώς στο εσωτερικό και στα σύνορά τους. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι απαιτείται προσοχή κατά την υποδιαίρεση (διακριτοποίηση) της κατασκευής, καθώς επίσης και κατά την επιλογή της συνάρτησης που περιγράφει τη συμπεριφορά στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων, ή καλύτερα, των κόμβων. Όσο αυξάνεται όμως ο αριθμός των στοιχείων, τόσο αυξάνονται ο χρόνος υπολογισμού και το κόστος. Σε πολλές περιπτώσεις η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιείται για να αποκτηθεί ακριβέστερη εικόνα της τοπικής συμπεριφοράς (σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ανοίγματα, κοντά στο σημείο εφαρμογής του εξωτερικού φορτίου, κλπ). Η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων είναι ένας εφικτός τρόπος ελάττωσης του κόστους χωρίς να μειωθεί η ακρίβεια της λύσης του προβλήματος. Λόγω όμως της μεγάλης ποικιλίας κατασκευών και φορτίσεων δεν είναι δυνατό να δοθεί γενικός κανόνας σχετικά με τον αριθμό ή το μέγεθος των στοιχείων ή τον τρόπο διακριτοποίησης που απαιτούνται για επαρκή ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος διακριτοποίησης πρέπει να βασίζεται στην εμπειρία συμπεριφοράς και μελέτης παρόμοιων κατασκευών. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό πρέπει να επιλυθεί σειρά προβλημάτων με διαφορετικές διακριτοποιήσεις και να υπολογισθεί ο βαθμός σύγκλισης στην ακριβή λύση. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ακρίβεια της λύσης για το συγκεκριμένο πρόβλημα. [6]

2.1. Θεμελίωση της ΜΠΣ με τη μέθοδο των μετατοπίσεων

Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος διατύπωσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για γραμμικά στατικά προβλήματα βασίζεται στη μέθοδο των μετατοπίσεων. Άλλοι τρόποι κάνουν χρήση της ισορροπίας δυνάμεων, ή άλλων υβριδικών ή και μικτών μεθόδων. Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι:

1. Η προσομοίωση (διακριτοποίηση) της κατασκευής με ένα σύνολο στοιχείων που συνδέονται σε συνοριακούς κόμβους.
2. Ο προσδιορισμός των γενικευμένων (άγνωστων) μετατοπίσεων που θα καθορίσουν πλήρως την απόκριση της κατασκευής.
3. Η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν στις άγνωστες κομβικές μετατοπίσεις και η επίλυσή τους.
4. Ο υπολογισμός των εσωτερικών κατανομών των τάσεων των στοιχείων, για δεδομένες μετατοπίσεις στους κόμβους.
5. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, (μετατοπίσεις και τάσεις), με βάση τις δεδομένες παραδοχές του προβλήματος.

Κατά την πρακτική μελέτη της συμπεριφοράς κατασκευών, από τα πιο σημαντικά βήματα της όλης διαδικασίας είναι η κατάλληλη διακριτοποίηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Για να επιτευχθεί σωστή διακριτοποίηση πρέπει να θεωρηθούν διάφορα μοντέλα, το οποία σταδιακά γίνονται περισσότερο σύνθετα.

Το γενικό μητρώο ακαμψίας που αντιστοιχεί στο σύνολο των στοιχείων της κατασκευής, αποκτάται με τη μέθοδο της άμεσης σύνθεσης των ακαμψιών, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{K} = \sum_m \mathbf{K}^{(m)}$$

Για να αποκτηθεί το άθροισμα των ακαμψιών οι ακαμψίες των επί μέρους στοιχείων διατυπώνονται ως μητρώα ίδιας τάξης με το γενικό μητρώο ακαμψίας της κατασκευής, στα οποία οι όροι που αντιστοιχούν με τα υπόλοιπα στοιχεία είναι ίσοι με μηδέν. [6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εφαρμογή μεθόδου αντίστροφης μηχανικής σε δοκίμια

3.1 Χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενου εκτυπωτή

Για την παραγωγή του αντικειμένου μας θα χρησιμοποιήσουμε τον CubePro 3D Printer ο οποίος αποτελεί την νεότερη λύση της 3D Systems στην κατηγορία προσιτών 3D Printers, για επαγγελματικές εφαρμογές.

Μπορεί να εκτυπώσει τρισδιάστατα, πλαστικά αντικείμενα από ABS, PLA και Nylon υλικά.

Οι μέγιστες διαστάσεις εκτύπωσης μοντέλου φτάνουν έως 285 x 270 x 230 mm . Η παραπάνω επιφάνεια εκτύπωσης μπορεί να αξιοποιηθεί για ιδιαίτερα μεγάλα μοντέλα μιας και ο 3D Printer διαθέτει θερμαινόμενο θάλαμο εκτύπωσης. Δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις συντήρησης και ο 3D Printer μπορεί να λειτουργήσει σε συνθήκες γραφείου.[8]



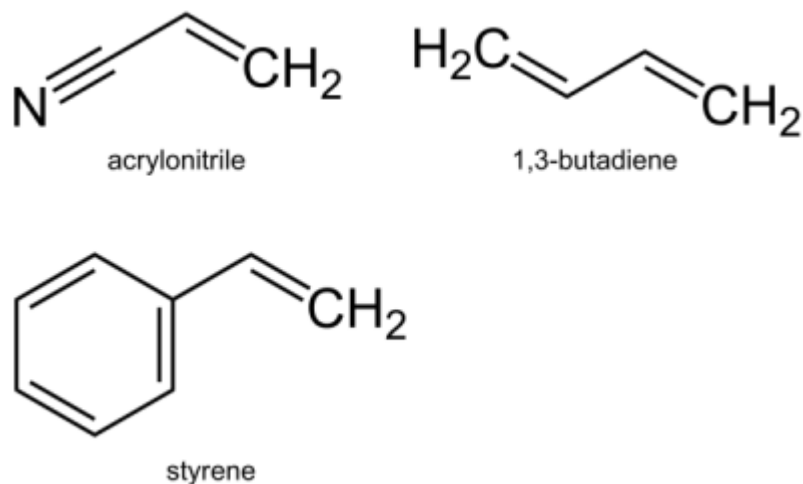
Εικόνα 2: CubePro 3D Printer

3.2 Χρησιμοποιούμενο υλικό ABS

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία το υλικό από το οποίο αποτελούνται τα δύο εξεταζόμενα δοκίμια, είναι το **ABS (Συμπολεμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου)**.

Το συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS) είναι ένα άμορφο πολυμερές που παρασκευάζεται με τεχνολογία πολυμερισμού γαλακτώματος ή μάζας ακρυλονιτριλίου και στυρολίου υπό την παρουσία πολυβουταδιενίου. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες του ABS είναι η αντοχή σε κρούση και η ανθεκτικότητα.

Οι κυριότεροι παρασκευαστές του συμπολυμερούς ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS) είναι οι Trinseo, LG Chem, Chi-Mei και Styrolution. Οι περισσότεροι παραγωγοί ABS χρησιμοποιούν γενικά τεχνολογία πολυμερισμού γαλακτώματος, αλλά η Trinseo χρησιμοποιεί τεχνολογία συνεχούς πολυμερισμού μάζας.



Εικόνα 3: Χημικοί μοριακοί τύποι μονομερών ABS

Το ABS χαρακτηρίζεται συνήθως από τρεις βασικές ιδιότητες:

- Ρευστότητα
- Αντοχή στη θερμότητα
- Αντοχή σε κρούση

Το μονομερές στυρολίου παρέχει στο ABS καλή επεξεργασιμότητα, το ακρυλονιτρίλιο παρέχει, αντοχή σε θερμότητα και χημική αντίσταση, ενώ το βουταδιένιο κάνει το προϊόν πιο σκληρό και ανθεκτικό ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αλλάζοντας τις αναλογίες των συστατικών του ABS και εισάγοντας ειδικά πρόσθετα, παράγονται διαφορετικές ποιότητες με συγκεκριμένες ιδιότητες. Το ABS δεν είναι ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες και ως εκ τούτου συνιστάται για εφαρμογές εσωτερικού χώρου και μόνο.

Το συμπολυμερές ακρυλονιτρίλιου-βουταδιενίου-στυρενίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί γενικά σε θερμοκρασίες από -20°C έως 80°C . Το ABS είναι ανθεκτικό σε υδατικά οξέα, αλκάλια, συμπυκνωμένα υδροχλωρικά και φωσφορικά οξέα, αλκοόλες και ζωικά, φυτικά και ορυκτά έλαια, αλλά προσβάλλεται από συμπυκνωμένα θειικά και νιτρικά οξέα. Το συμπολυμερές ακρυλονιτρίλιου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS) είναι διαλυτό σε εστέρες, κετόνες, διχλωριούχο αιθυλένιο ή ακετόνη.

Το ABS μπορεί να υποστεί επεξεργασία μέσω διαδικασίας χύτευσης με έγχυση ή εξέλαση. Οι συνηθέστερες εφαρμογές του ABS (συμπολυμερές ακρυλονιτρίλιου βουταδιενίου στυρολίου) είναι:

- ✓ Γενικές: παιχνίδια, καταναλωτικά προϊόντα, τηλέφωνα, κράνη ασφαλείας
- ✓ Αυτοκίνητα: εσωτερικά πάνελ θυρών, κολόνες, διακοσμητικά καλύμματα καθισμάτων, γρίλιες, πίνακες οργάνων, περιβλήματα καθρεπτών
- ✓ Οικιακές συσκευές: περιβλήματα οικιακών συσκευών κουζίνας, περιβλήματα ηλεκτρικής σκούπας, πίνακες ελέγχου για λευκά προϊόντα [9]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΔΟΚΙΜΙΟ 1- ΕΞΑΡΤΗΜΑ ΑΠΟ ΚΑΖΑΝΑΚΙ

4.1 Σχεδιασμός δοκιμίου σε SOLIDWORKS 2016

Προτού προχωρήσει ο σχεδιασμός του πρώτου δοκιμίου, πραγματοποιήθηκαν κάποιες μετρήσεις με σκοπό την διαστασιολόγησή του. Καθώς το δοκίμιο είναι αρκετά μικρό και η μορφολογία του ιδιαίτερα πολύπλοκη, οι μετρήσεις με παχύμετρο και μικρόμετρο δεν ήταν εφικτές. Συνεπώς η διαδικασία που ακολουθήσαμε ήταν η εξής:

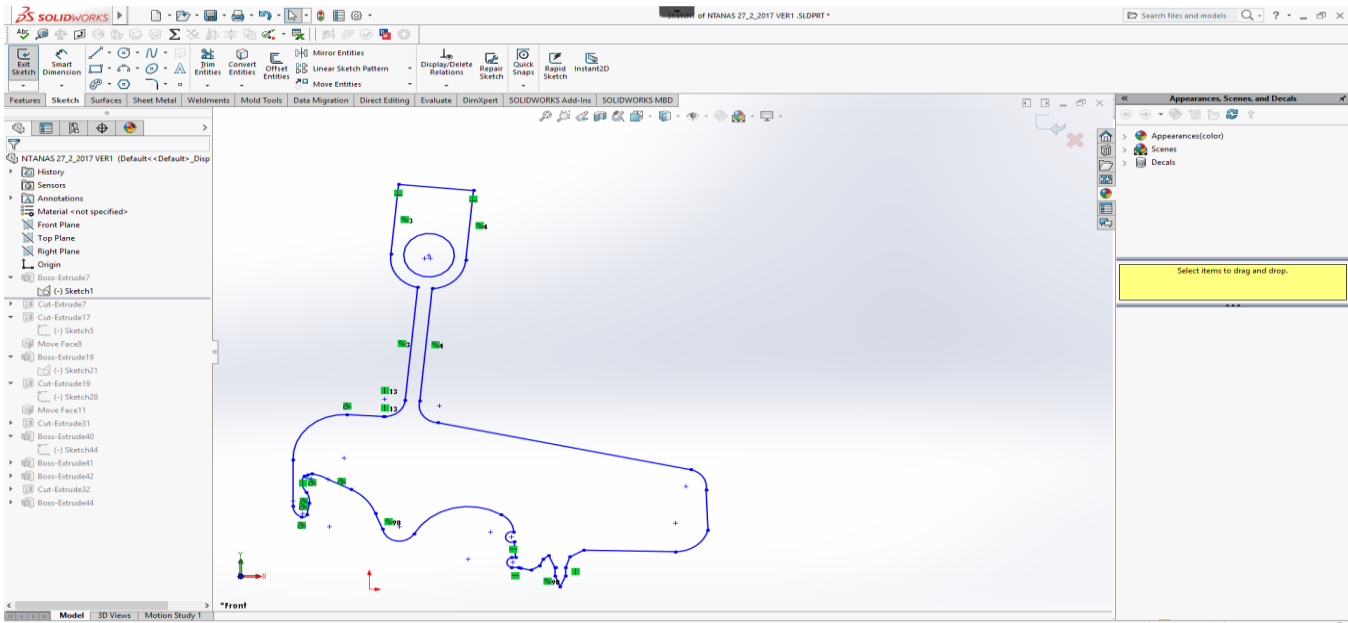
- Πραγματοποιήθηκε scanning του αντικειμένου με σκοπό την αποτύπωσή του.
- Τοποθετήθηκε το αποτέλεσμα σε μιλιμετρέ χαρτί.
- Υπολογίσθηκαν στη συνέχεια όλες οι διαφοροποιήσεις της επιφάνειας του αντικειμένου καθώς και τις ακτίνες των τόξων.
- Με την χρήση γραμμών, τόξων και κύκλων στο Solidworks σχεδιάστηκε το πρώτο sketch βάσει των μετρήσεων.

Στη συνέχεια με τις κατάλληλες εντολές στο πρόγραμμα επιτυγχάνεται η 3D αποτύπωση του αντικειμένου μας και το σχέδιο απεικονίζεται σε όλες τις όψεις του. Ακολουθεί η υπολογιστική του προσομοίωση επιλέγοντας 3 επιφάνειες στήριξης και εισάγοντας δεδομένα για την εξωτερική του φόρτιση. Η πυκνότητα του πλέγματος δεν είναι η ίδια για όλο το αντικείμενο. Στα σημεία που έχουμε αλλαγή γεωμετρίας ή στα σημεία με μεγάλη καμπυλότητα η πυκνότητα του πλέγματος είναι μεγαλύτερη και έτσι απεικονίζονται καλύτερα οι λεπτομέρειες με σκοπό να έχουμε ακριβέστερα αποτελέσματα.

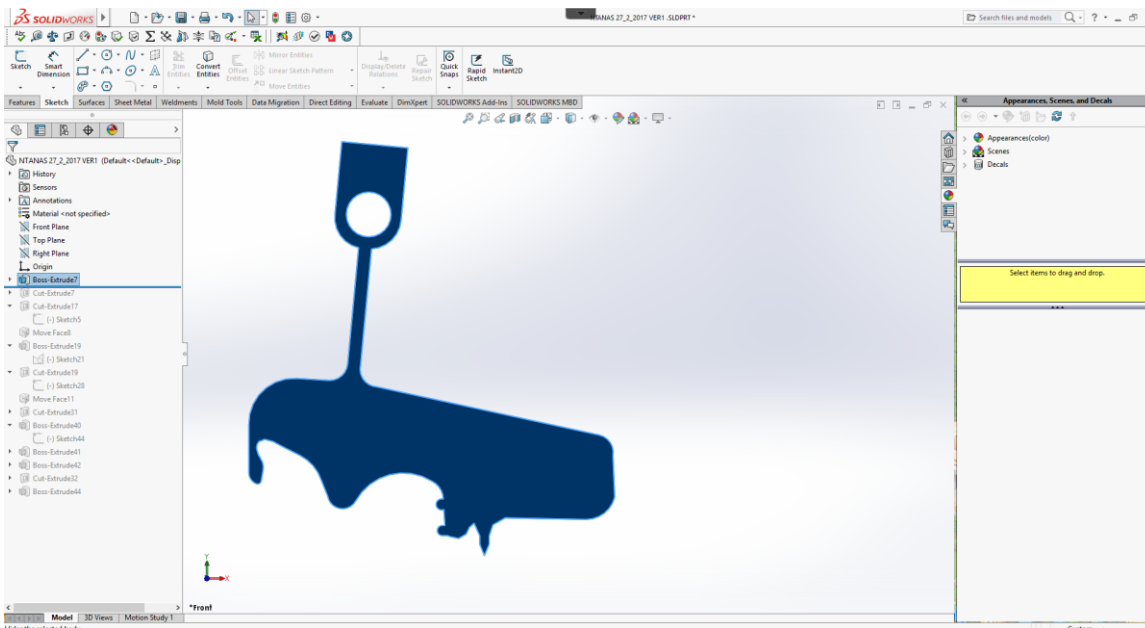
Στη συνέχεια και αφού έχει επιλεγθεί το κατάλληλο υλικό, πραγματοποιείται δοκιμή καταπόνησης και κάνουμε το διάγραμμα με τις μετατοπίσεις και τις ανηγμένες παραμορφώσεις με ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να προσδιοριστούν τα επικίνδυνα σημεία. Τέλος ακολουθεί η μελέτη για την επιλογή του συντελεστή ασφαλείας.

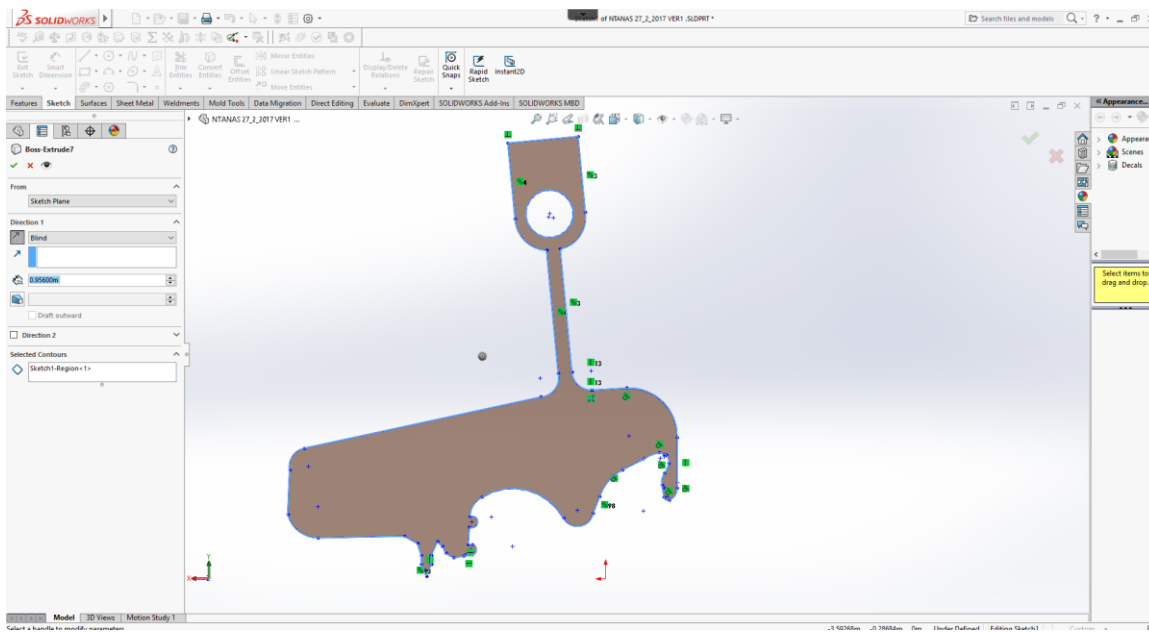
Παρακάτω ακολουθούν αναλυτικά όλες οι εντολές που δώθηκαν βήμα-βήμα στο Solidworks :

Sketch (1): Έχοντας επιλέξει το επίπεδο σχεδίασης ξεκίνησε ο σχεδιασμός του πρώτου sketch με την βοήθεια εντολών, όπως line, arc, circle δημιουργώντας έτσι το αρχικό δισδιάστατο μοντέλο.

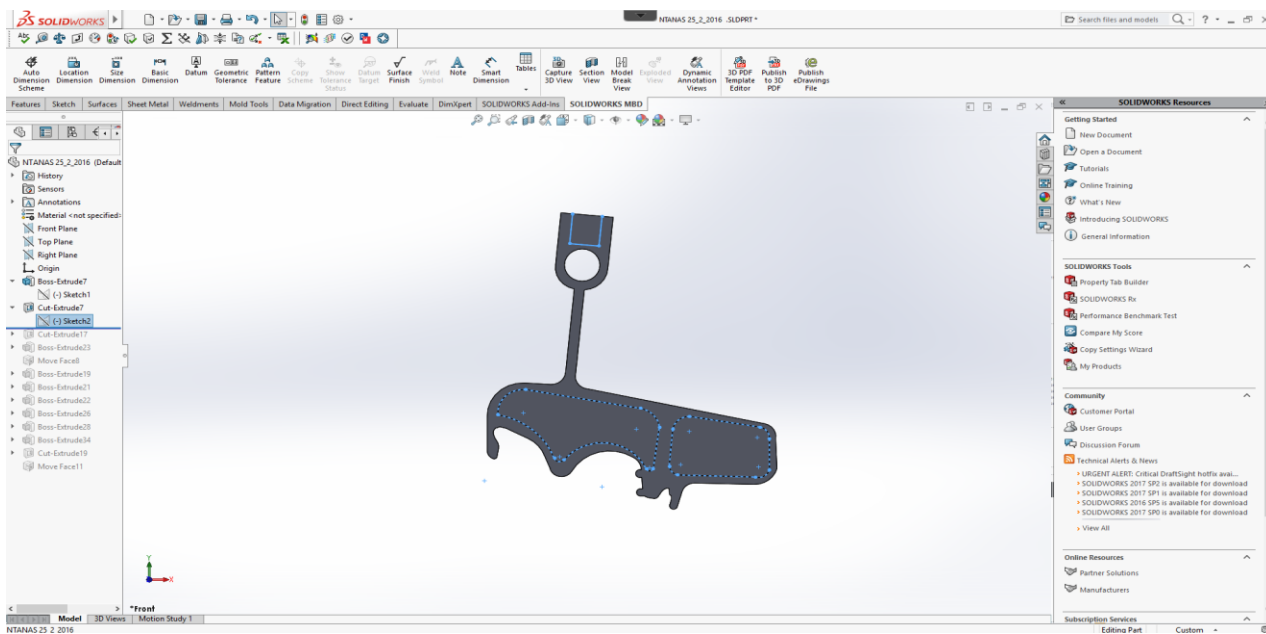


Boss Extrude(7): Χρησιμοποιείται η εντολή Boss Extrude, επιλέγοντας το σχέδιο για να δοθεί ο απαιτούμενος όγκος με τις απαραίτητες διαστάσεις.

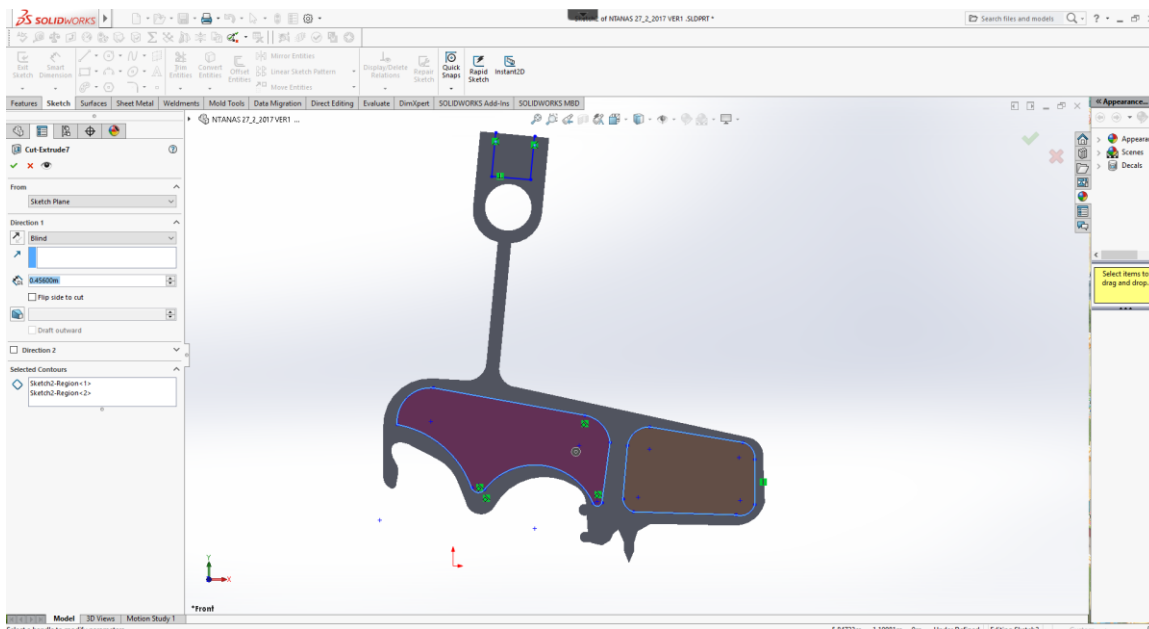
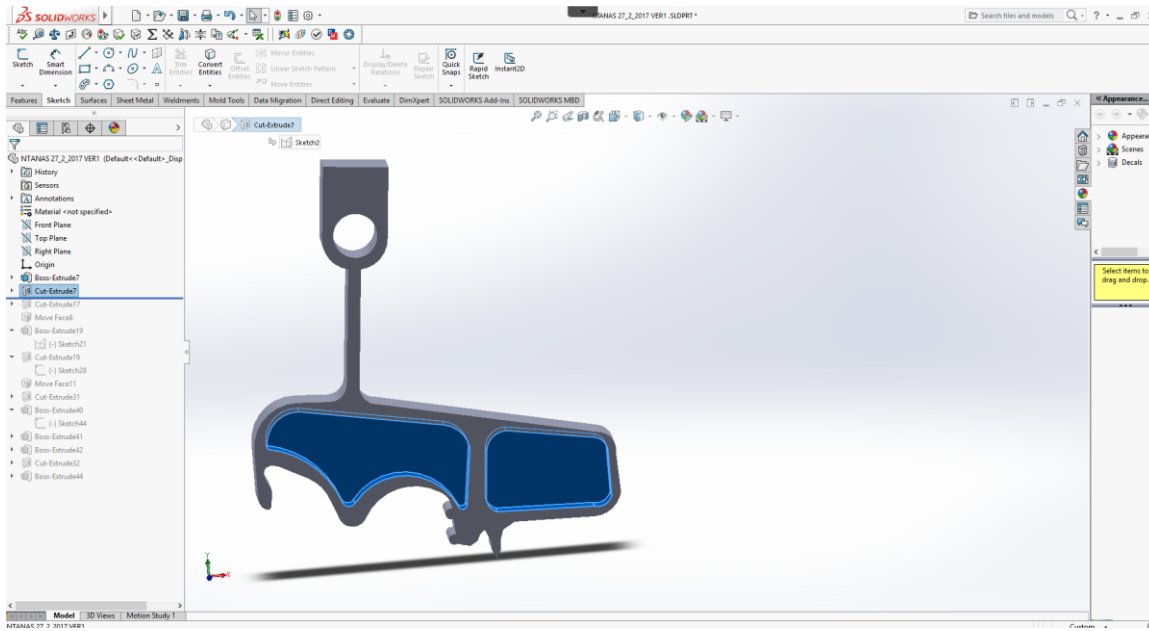


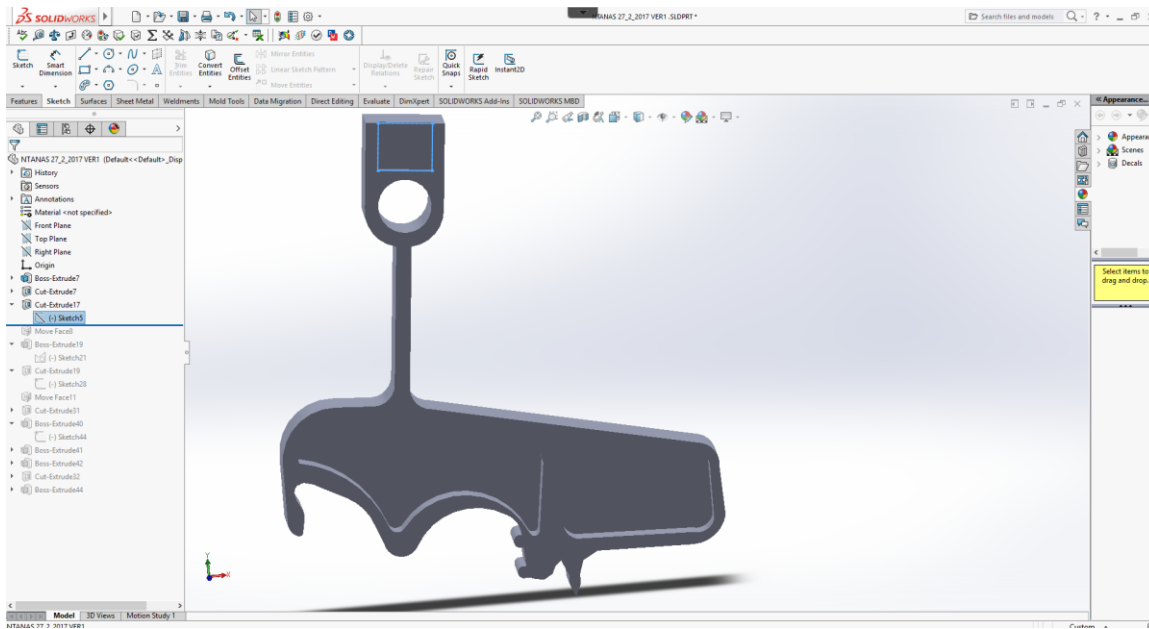
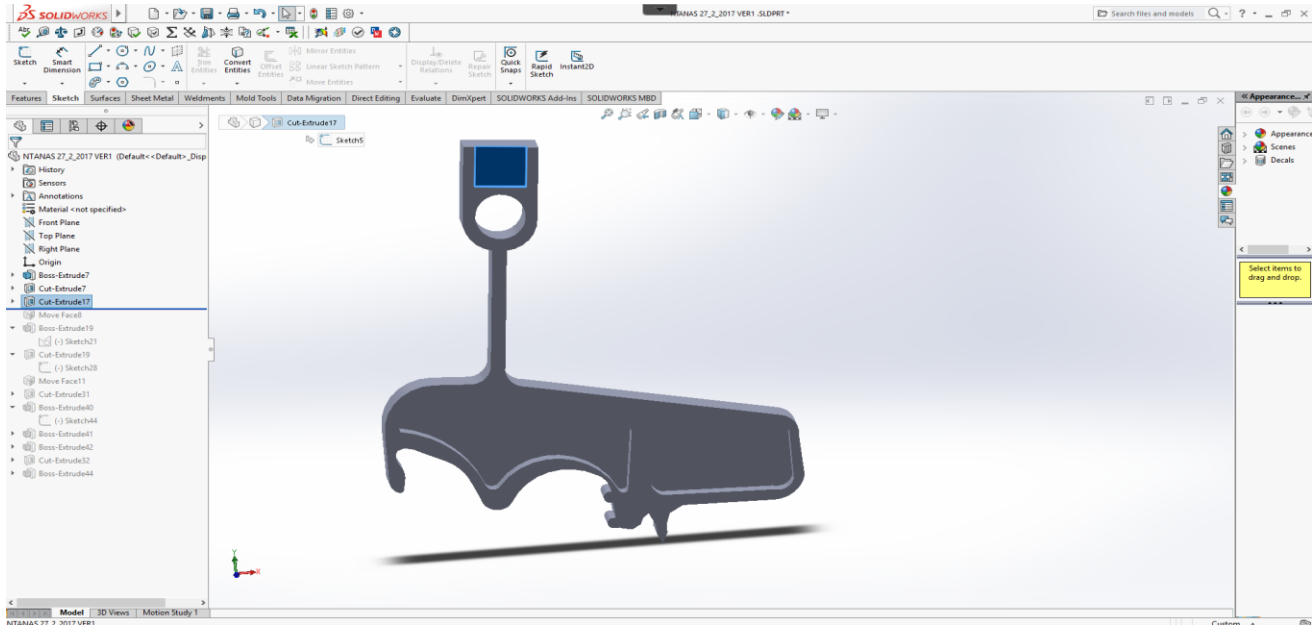


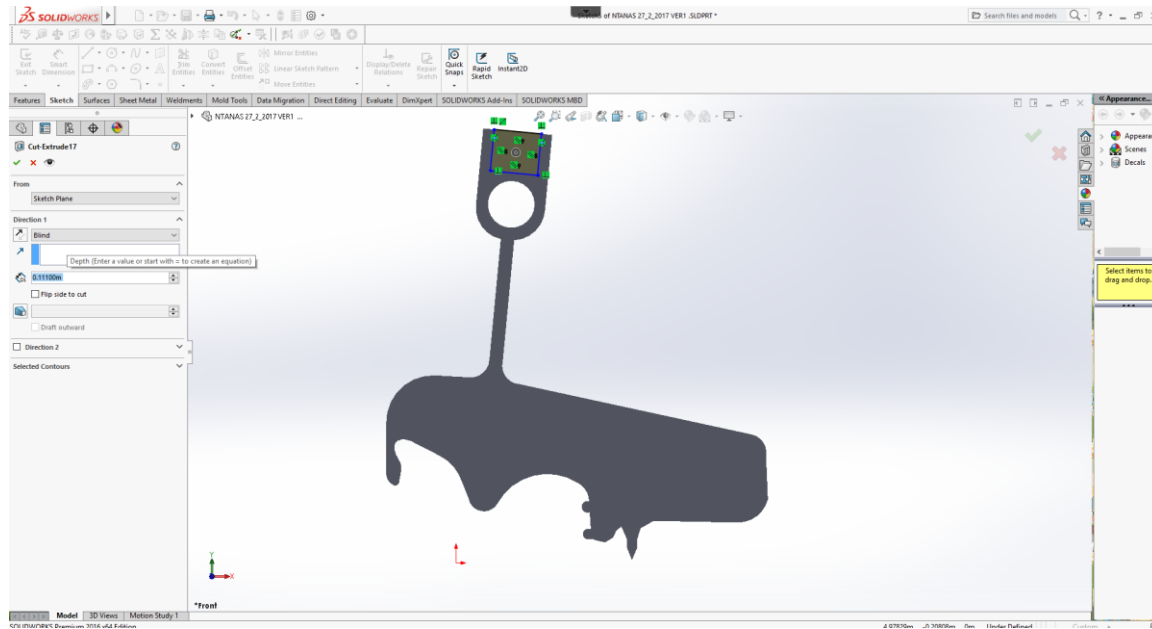
Sketch (2): Σχεδιάζεται το δεύτερο sketch βάσει των μετρήσεών μας.



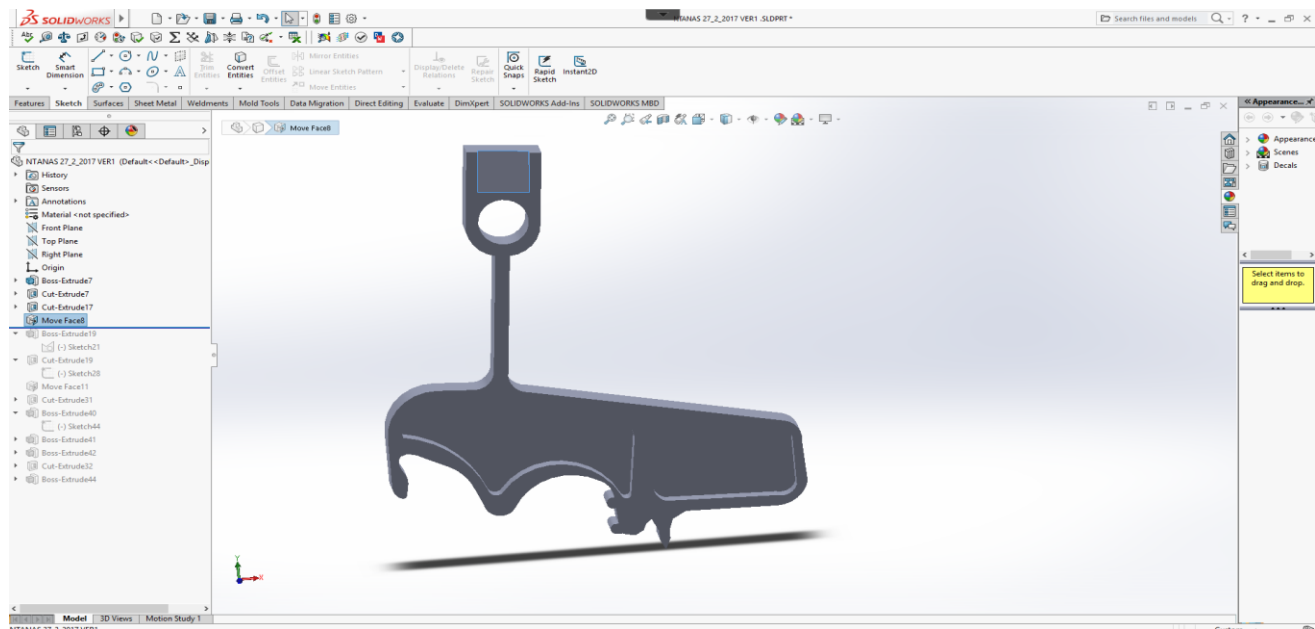
Cut Extrude(7): Επιλέγεται η εντολή Cut Extrude εισάγοντας στο πεδίο της εντολής blind το ζητούμενο βάθος.

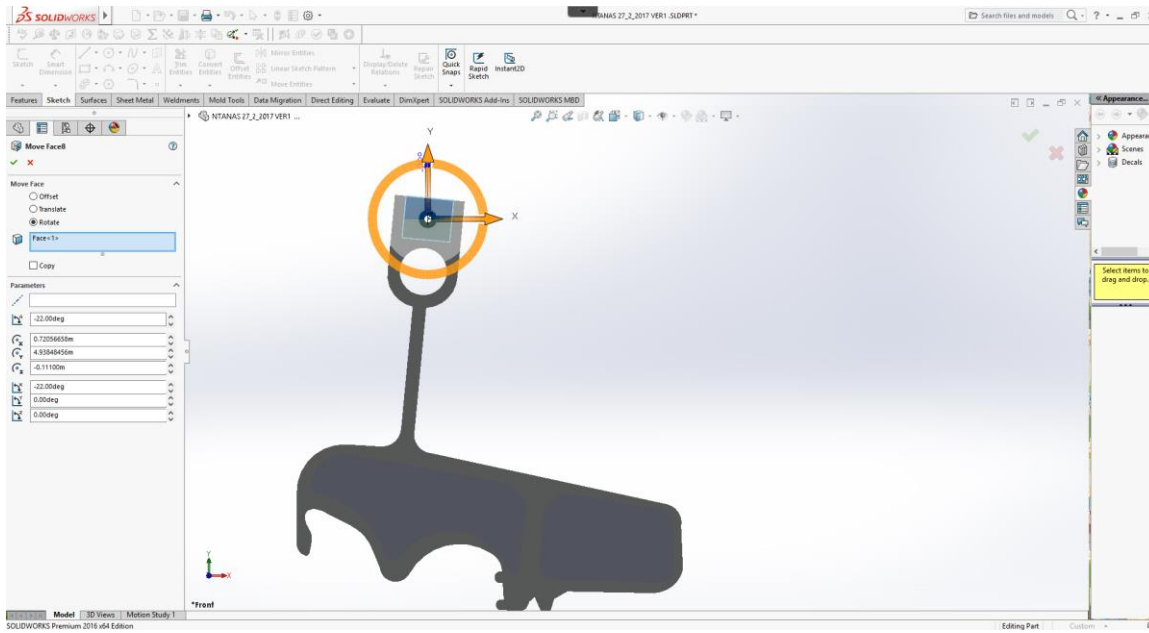


Sketch (5): Δημιουργία νέου sketch.**Cut Extrude(17):** Επιλέγεται η εντολή Cut Extrude για να αφαιρεθεί υλικό.

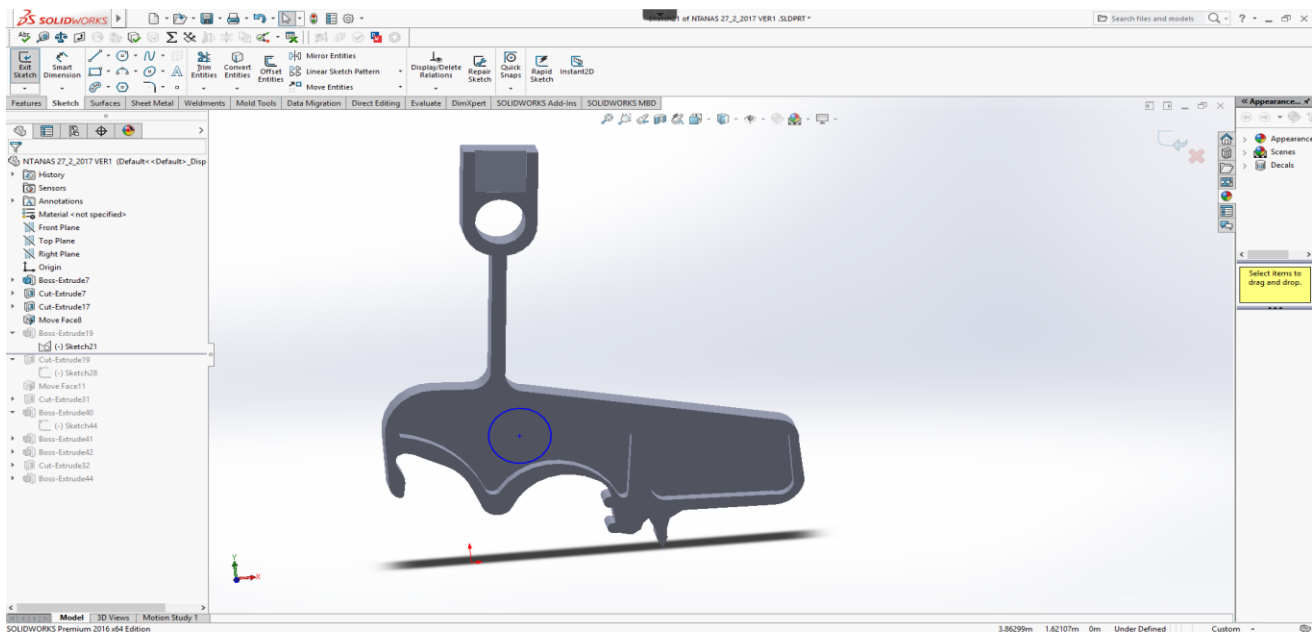


Move Face (8): Με την εντολή Move Face επιλέγεται το επιθυμητό επίπεδο, μαρκάροντας την επιλογή rotate και εισάγονται οι κατάλληλες μοίρες για την δημιουργία κλίσης.

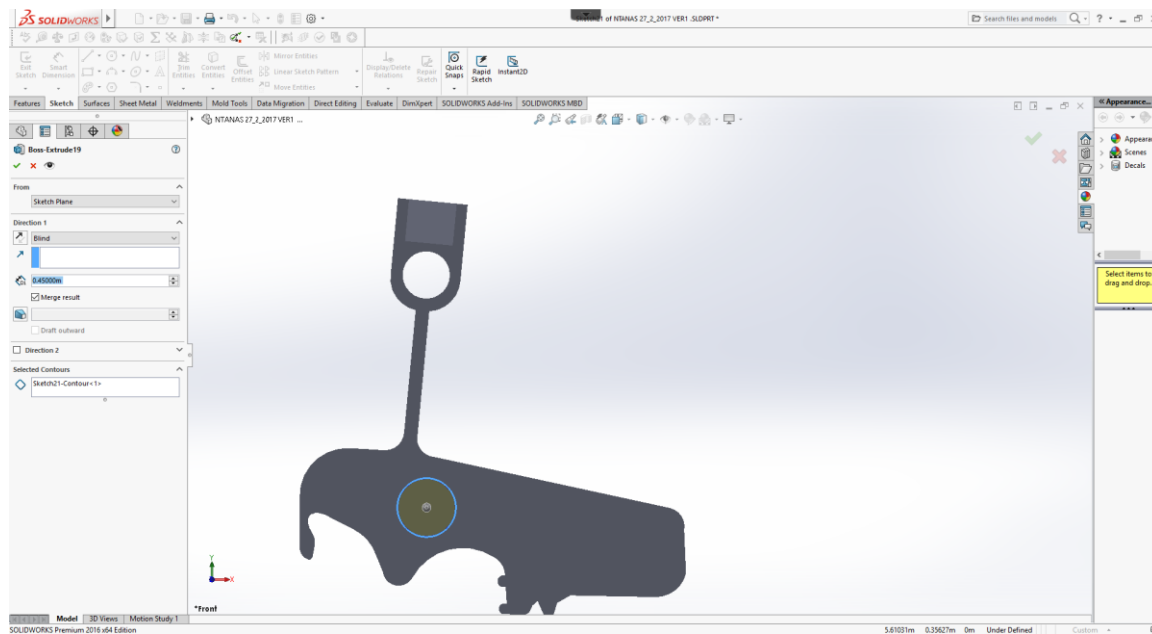
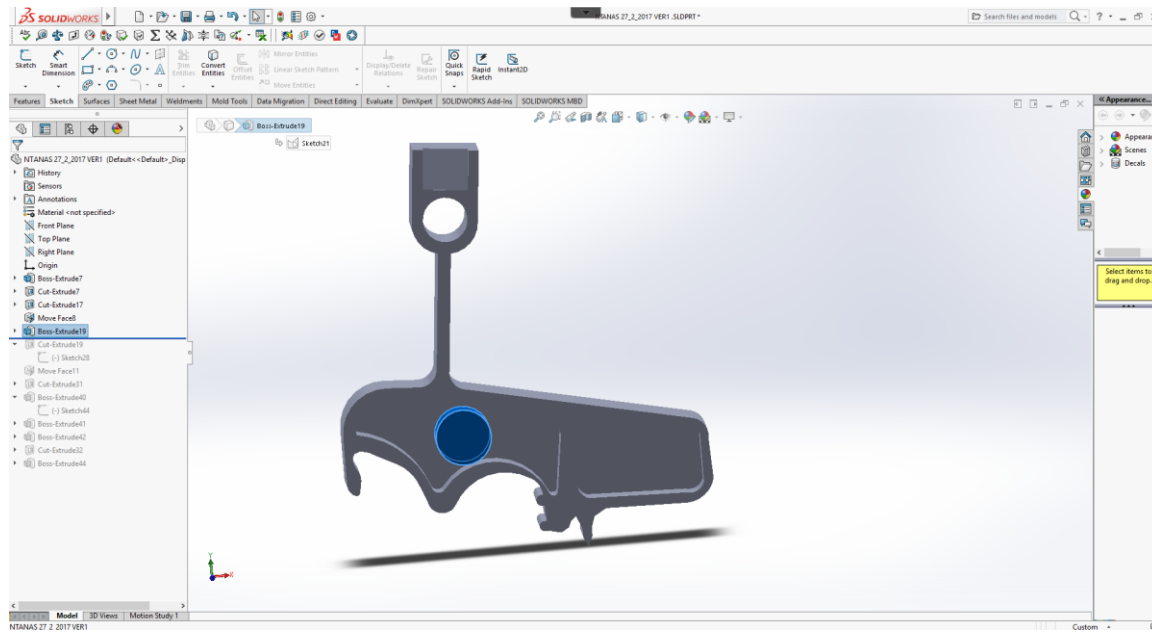




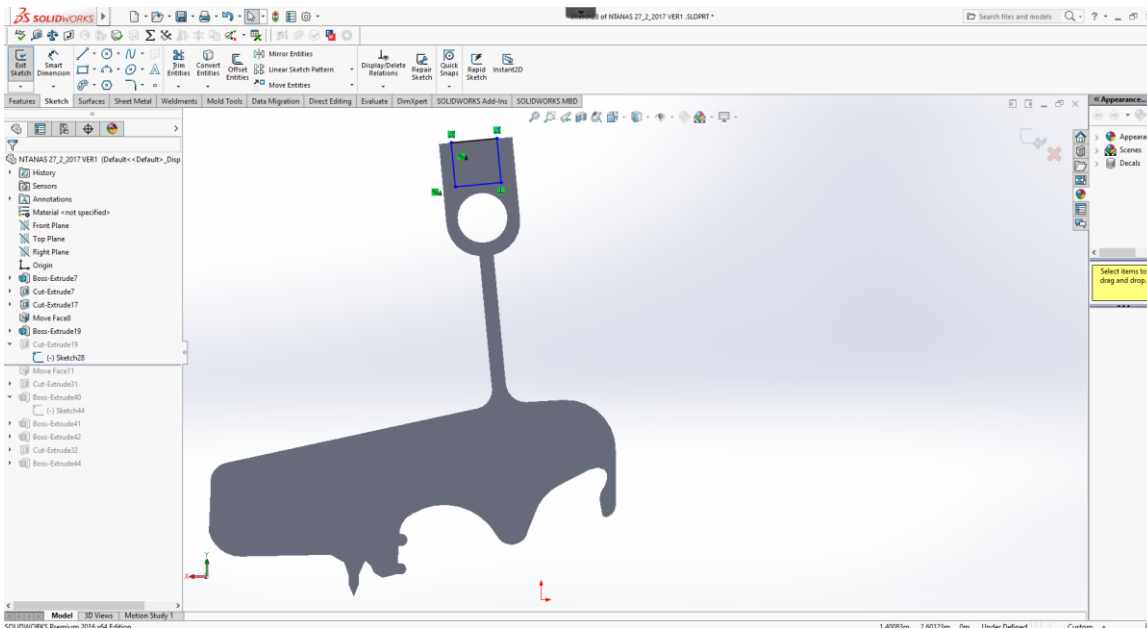
Sketch (21): Δημιουργία νέου sketch με την εντολή circle.



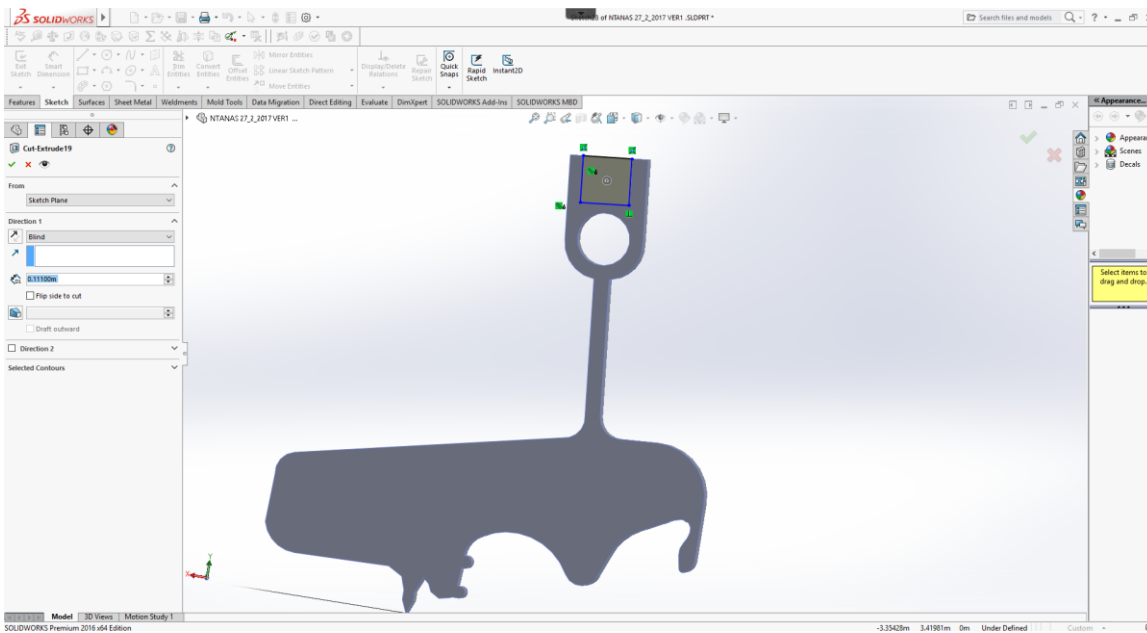
Boss Extrude(19): Εκτέλεση της εντολής Boss Extrude με την ανάλογη απόσταση.



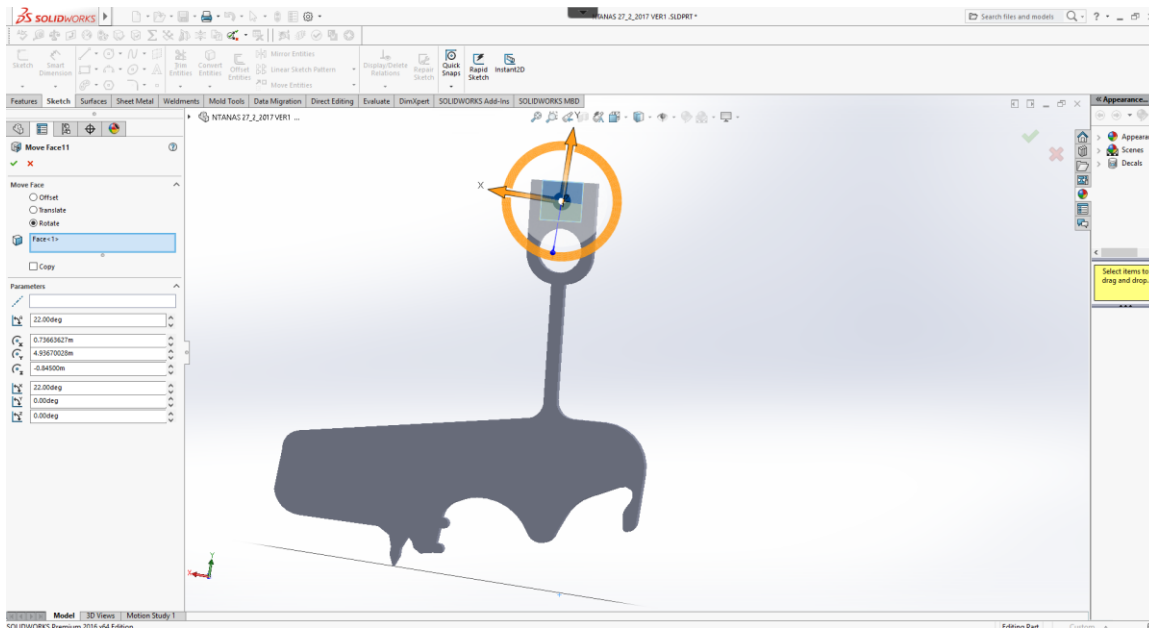
Sketch (26): Επανάληψη της ανάλογης διαδικασίας για την άλλη πλευρά.



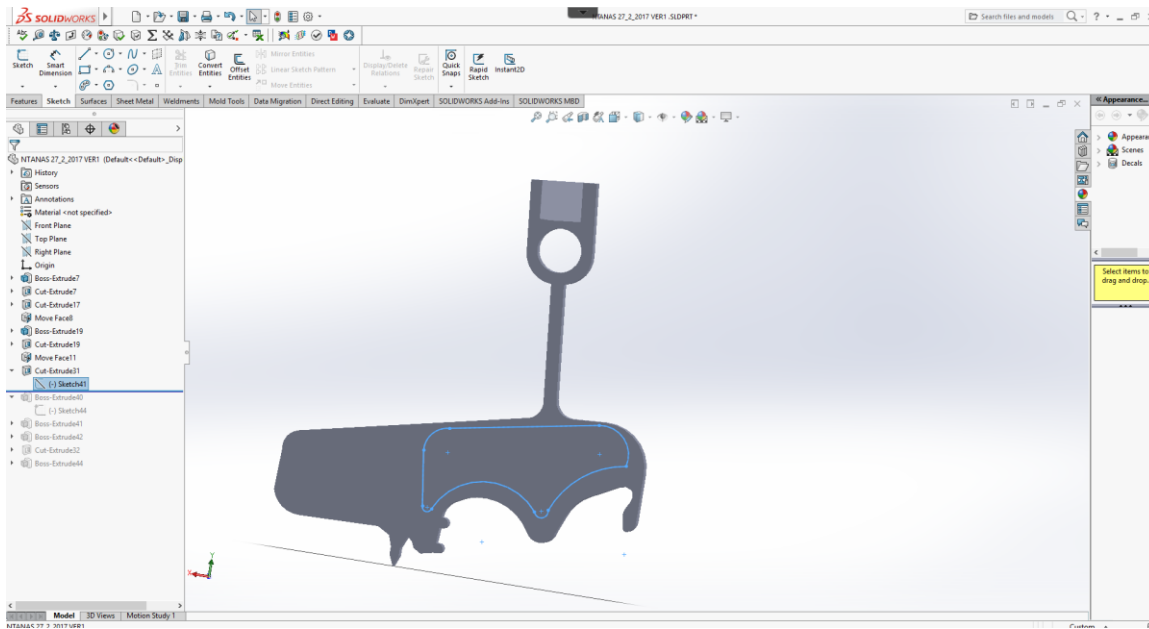
Cut Extrude(19):



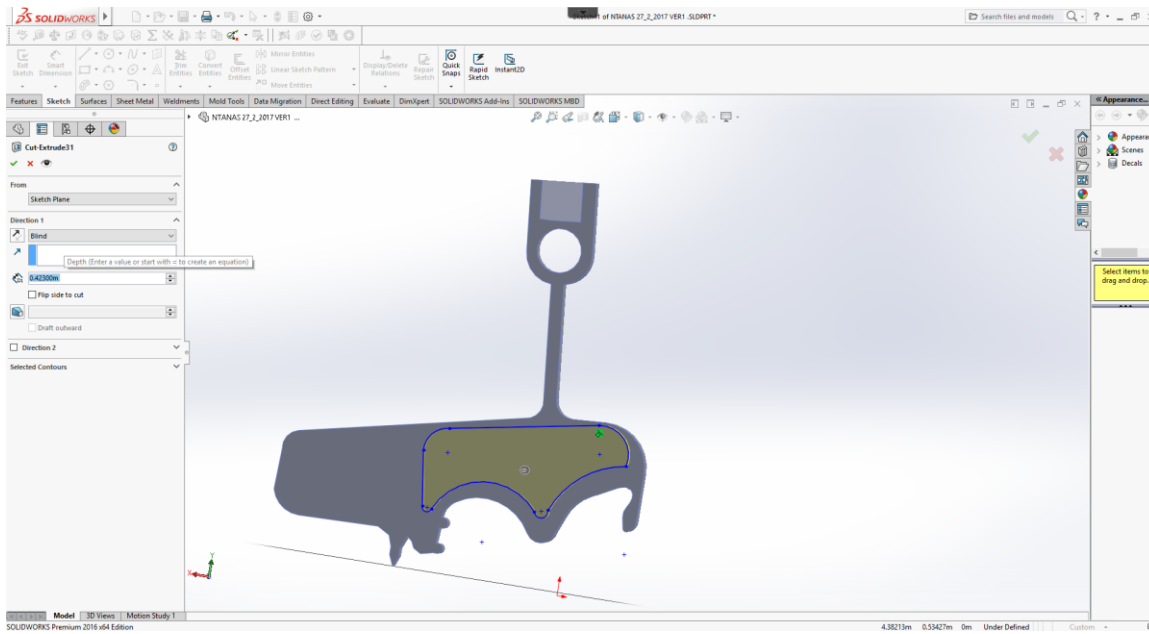
Move Face (11):



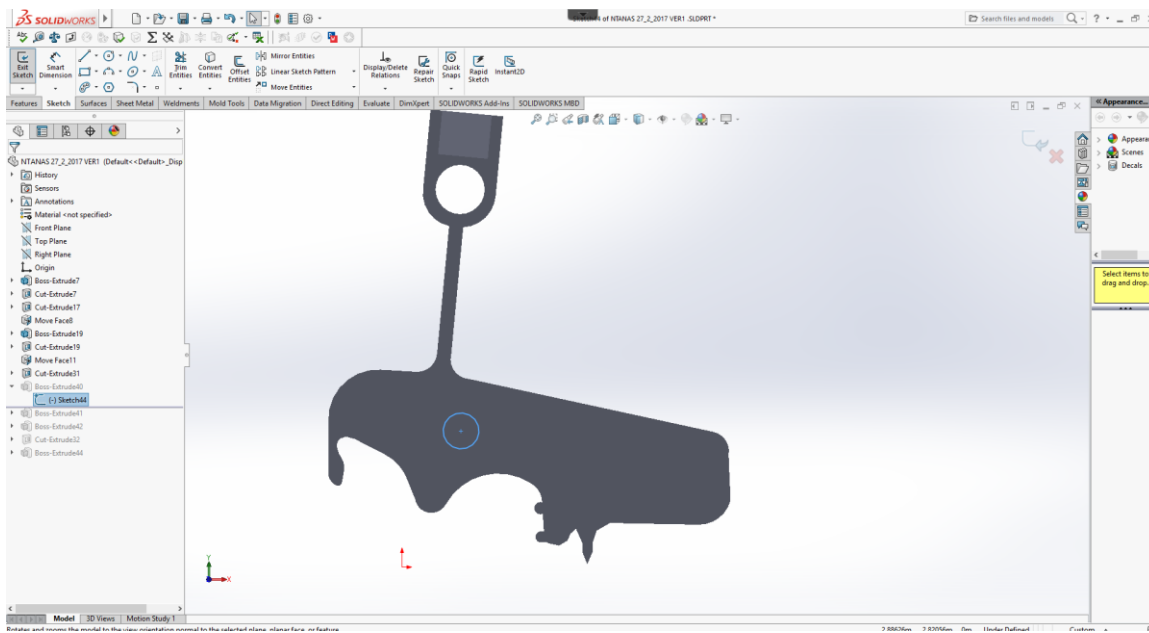
Sketch (41):



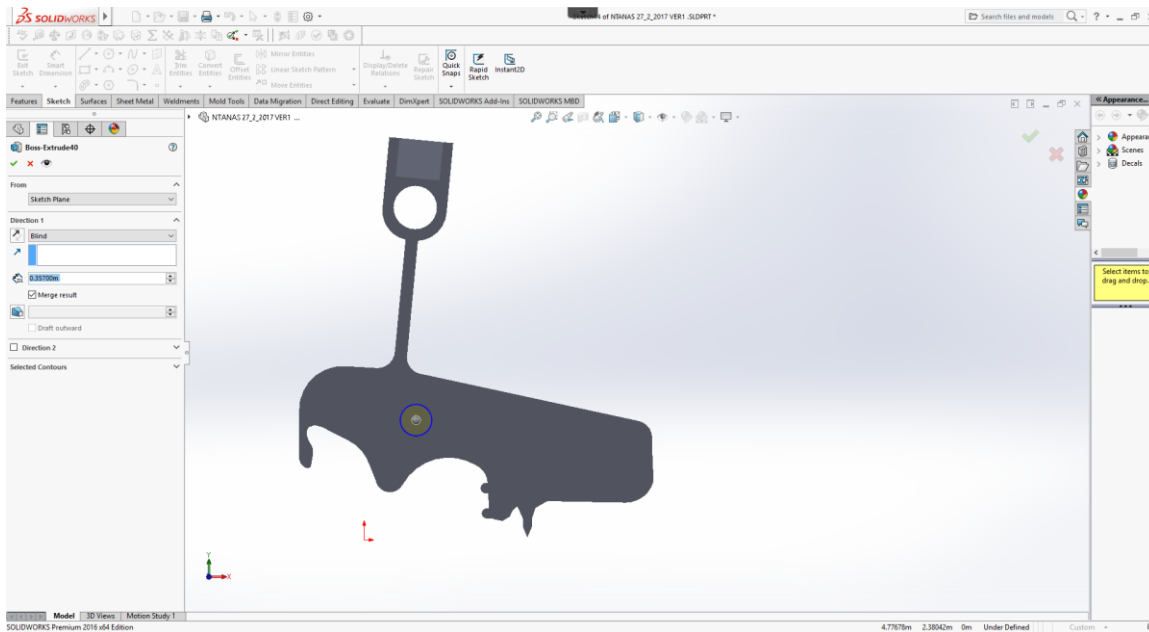
Cut Extrude(31):



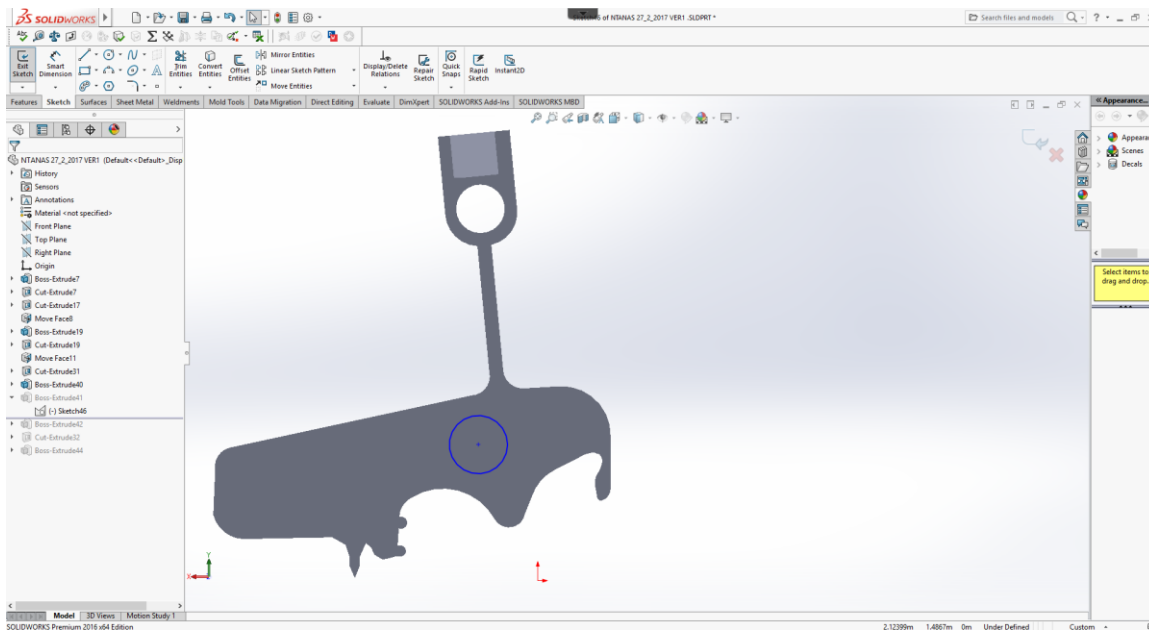
Sketch (41): Πραγματοποιείται αναστροφή δοκιμίου για την προσθήκη νέου ομόκεντρου κύκλου.



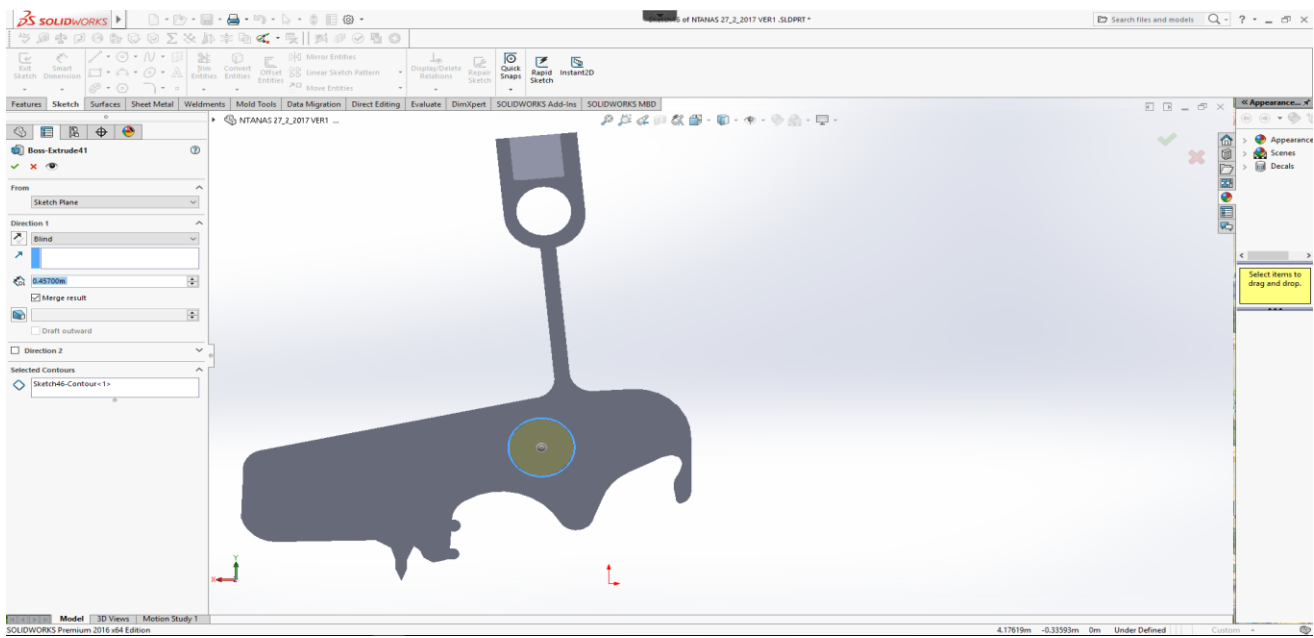
Boss Extrude(40): Με την εντολή Boss Extrude δίδεται όγκος στο νέο κύκλο.



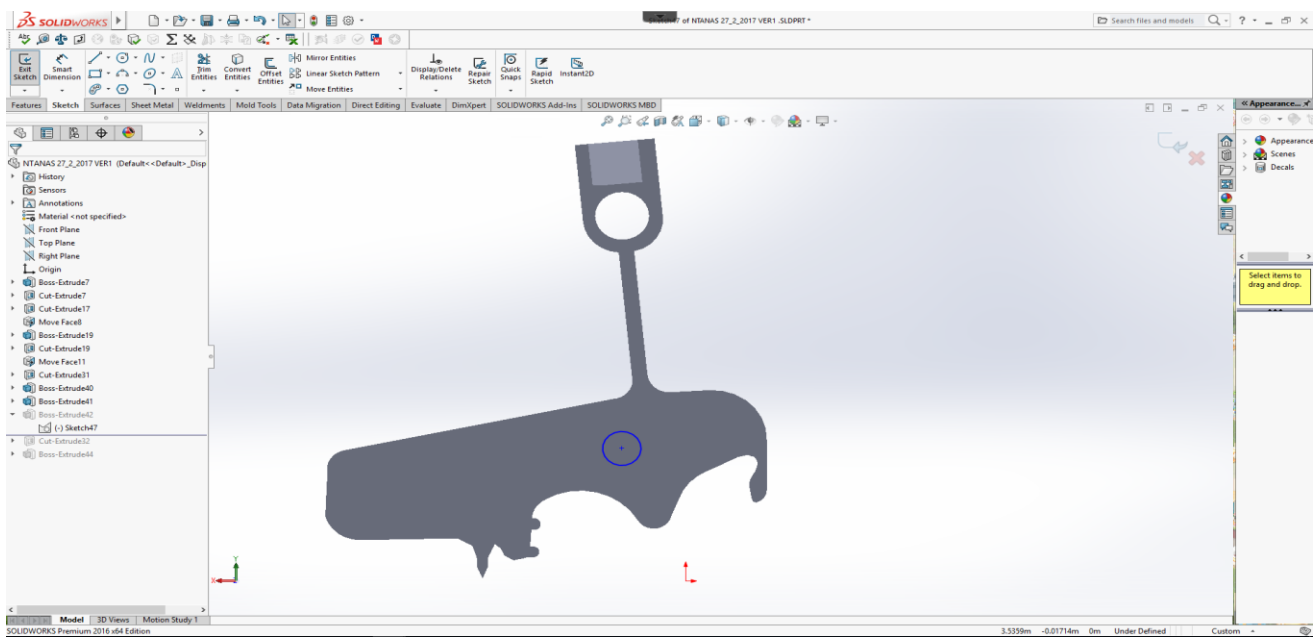
Sketch (46): Προσθήκη κύκλου και στην αντίθετη πλευρά.



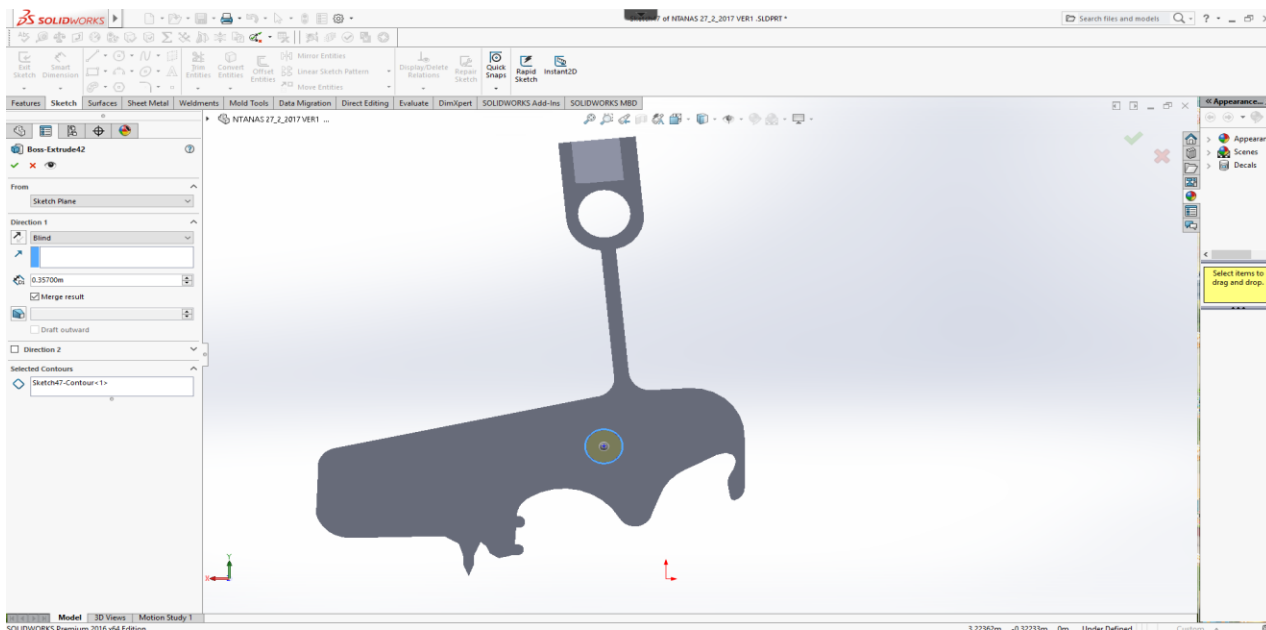
Boss Extrude(41): Χρήση της εντολής Boss Extrude.



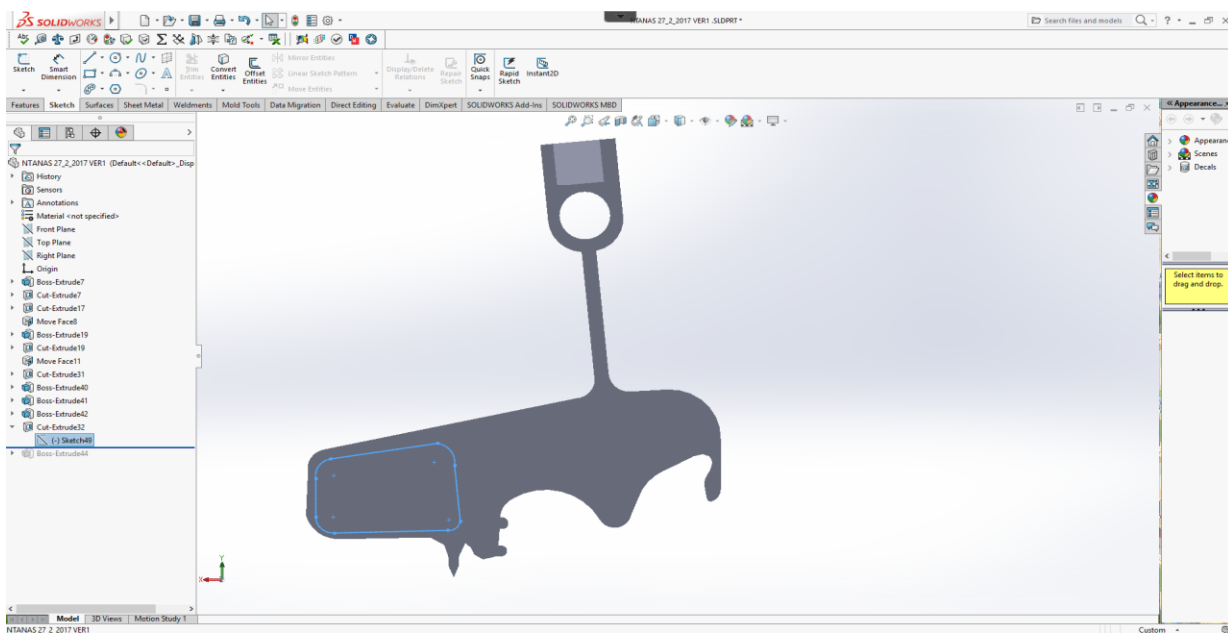
Sketch (47): Δημιουργία ομόκεντρου κύκλου.



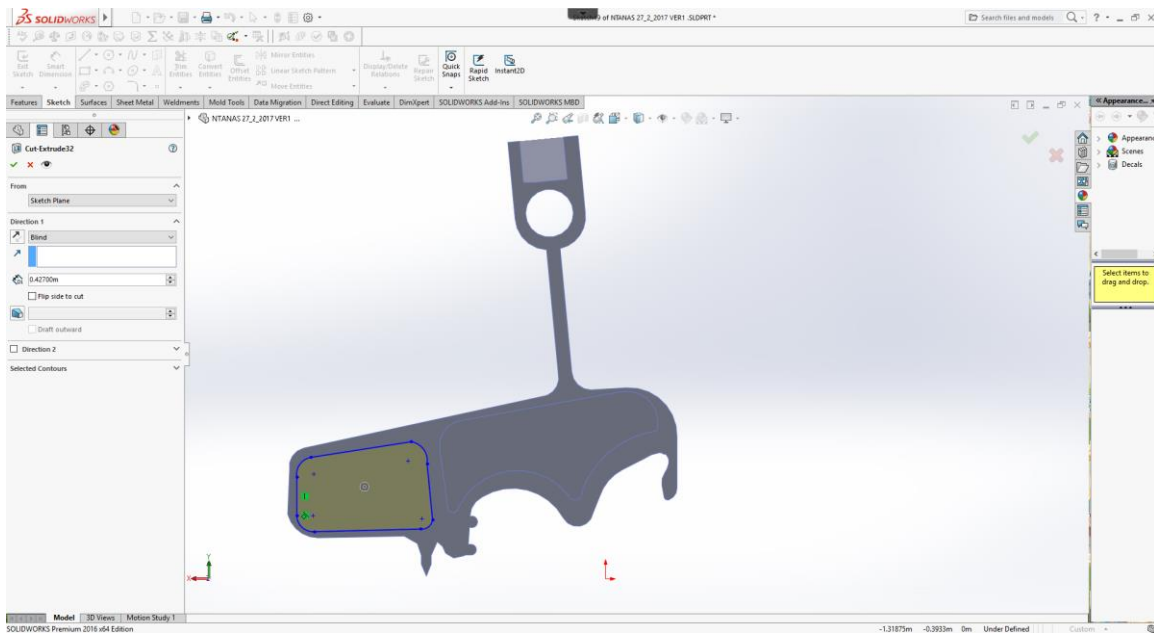
Boss Extrude(42): Χρήση της εντολής Boss Extrude.



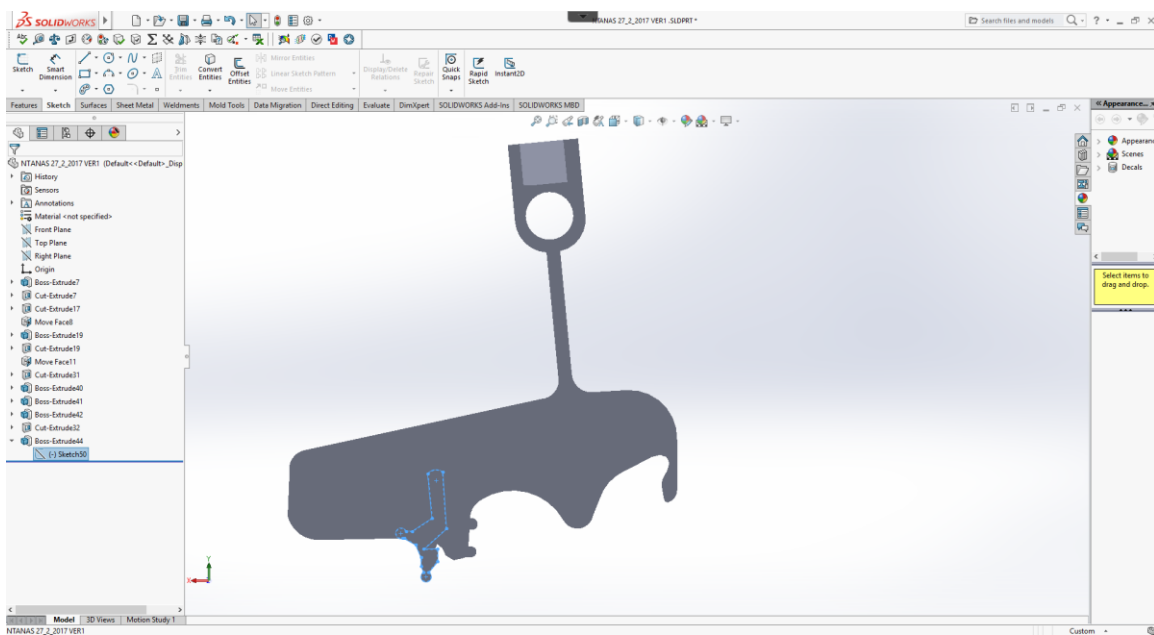
Sketch (49): Δημιουργία νέου sketch.



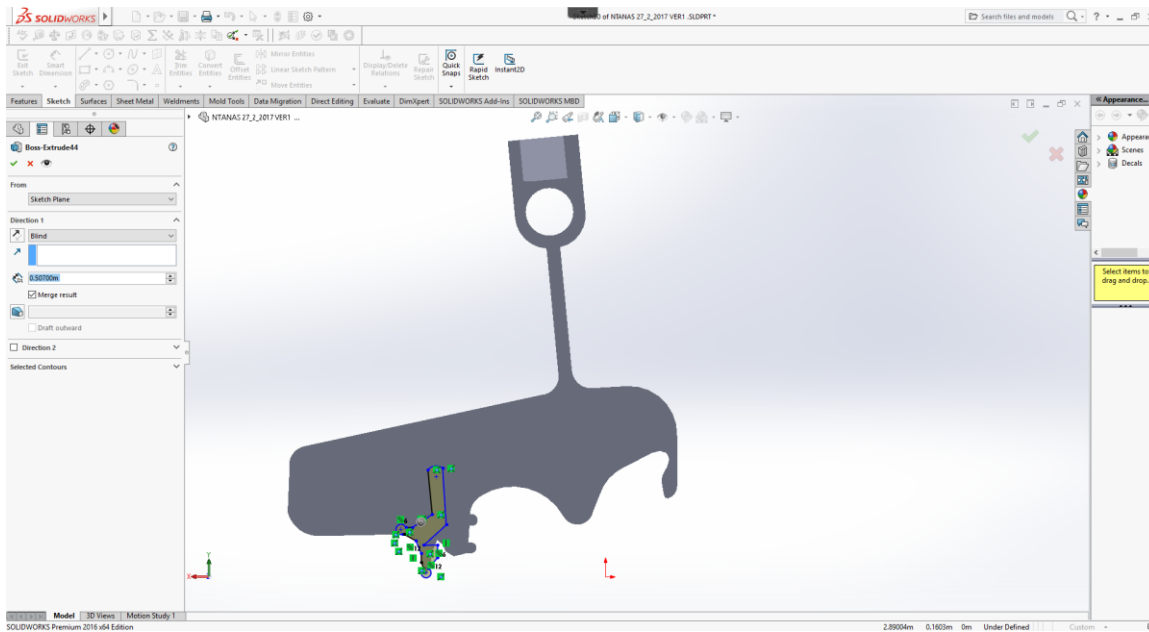
Cut Extrude(32): Επιλέγεται η εντολή Cut Extrude για να αφαιρεθεί υλικό.



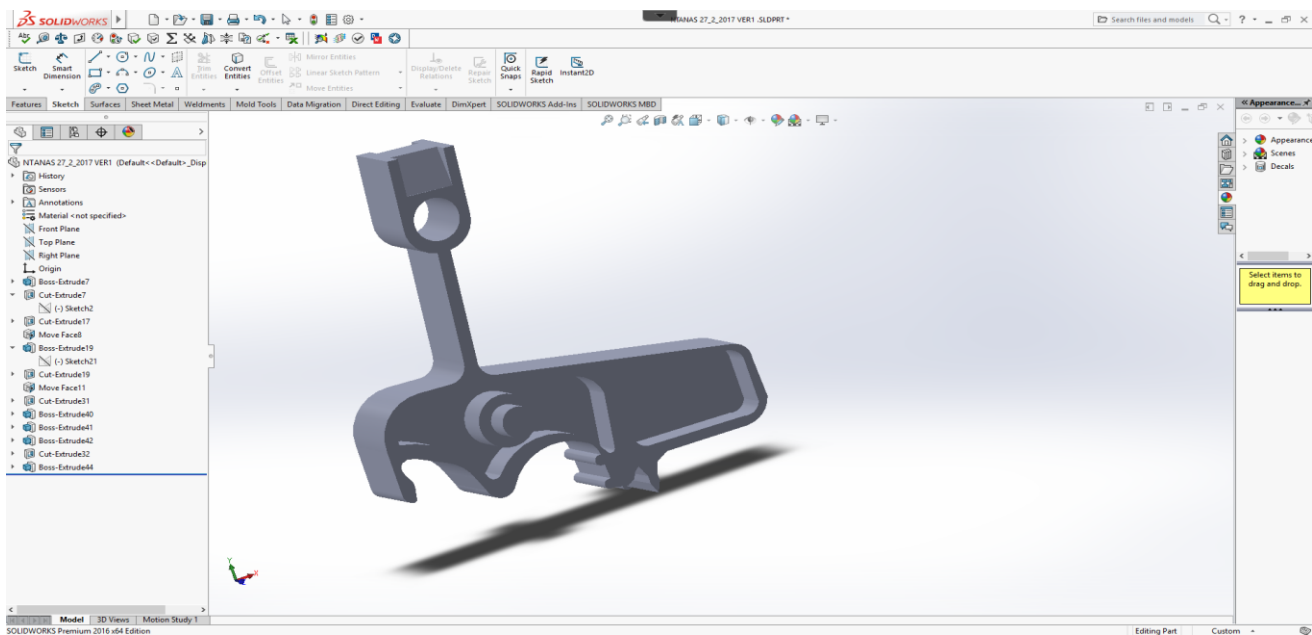
Sketch (50): Σχεδιασμός νέου sketch βάσει του πρωτότυπου δοκιμίου.

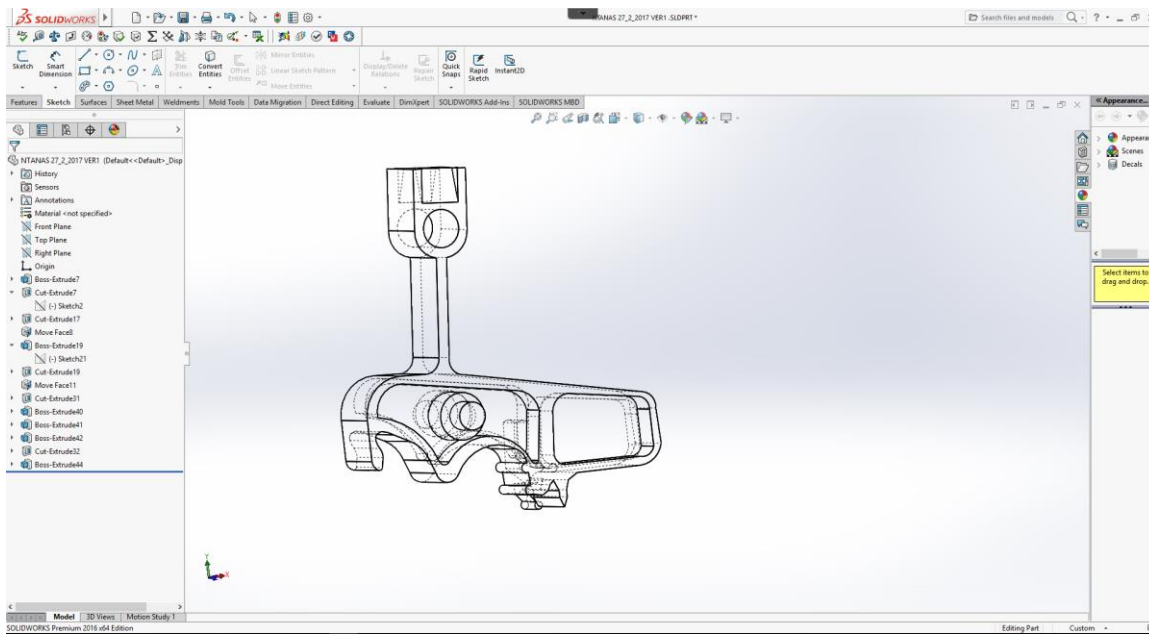
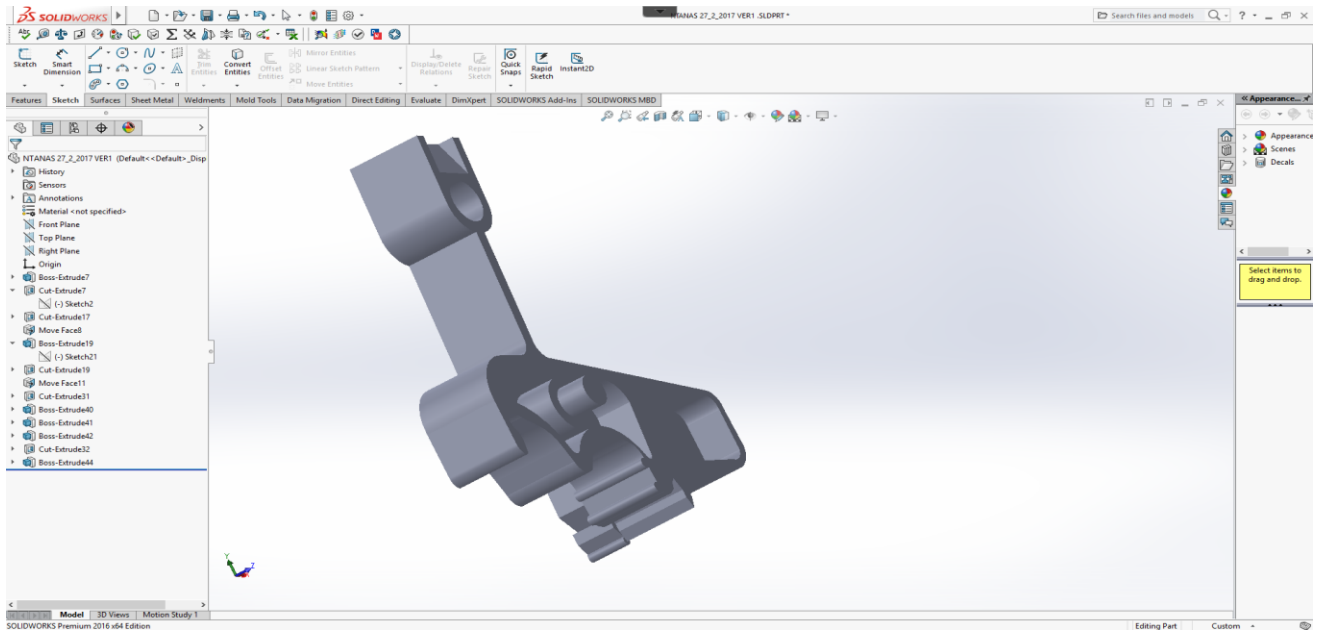


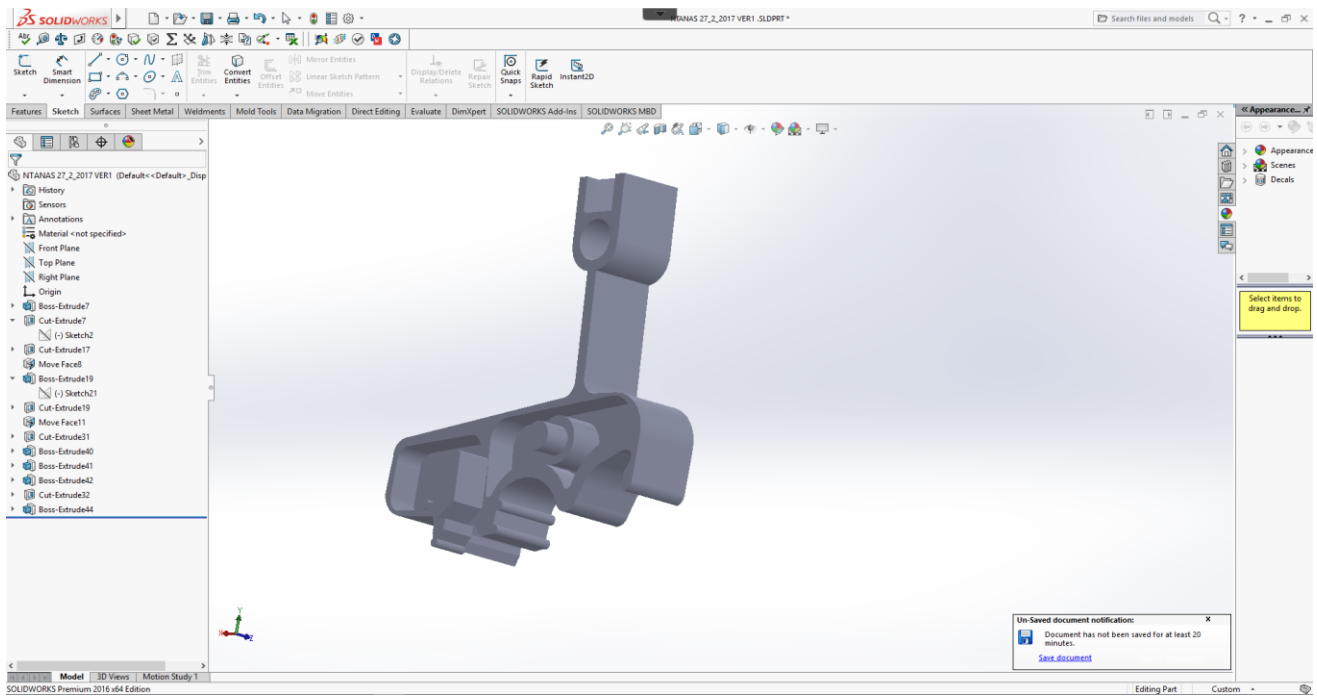
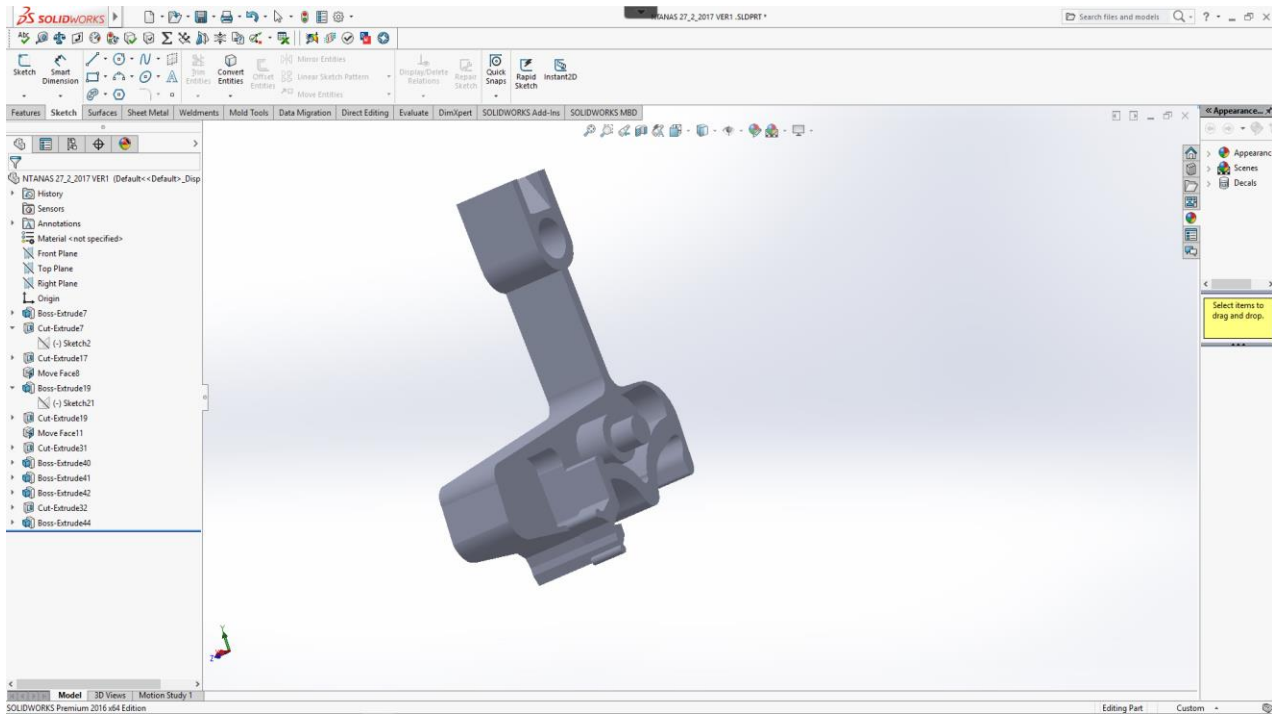
Boss Extrude(44): Δίδεται ο απαραίτητος όγκος με την εντολή Boss Extrude.

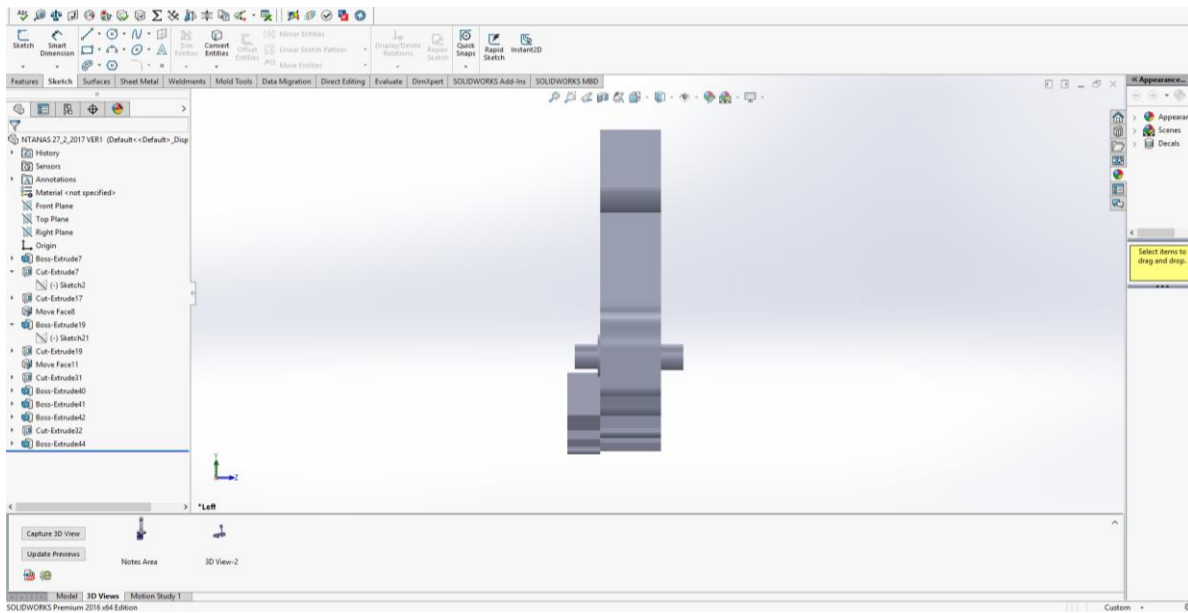
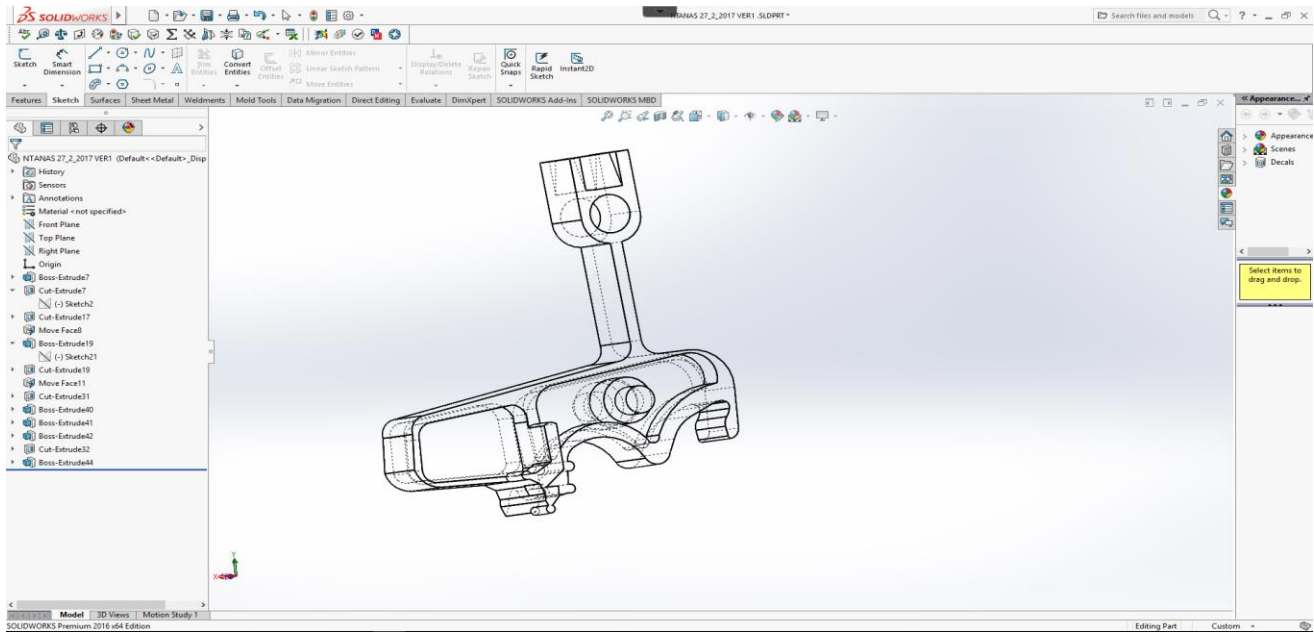


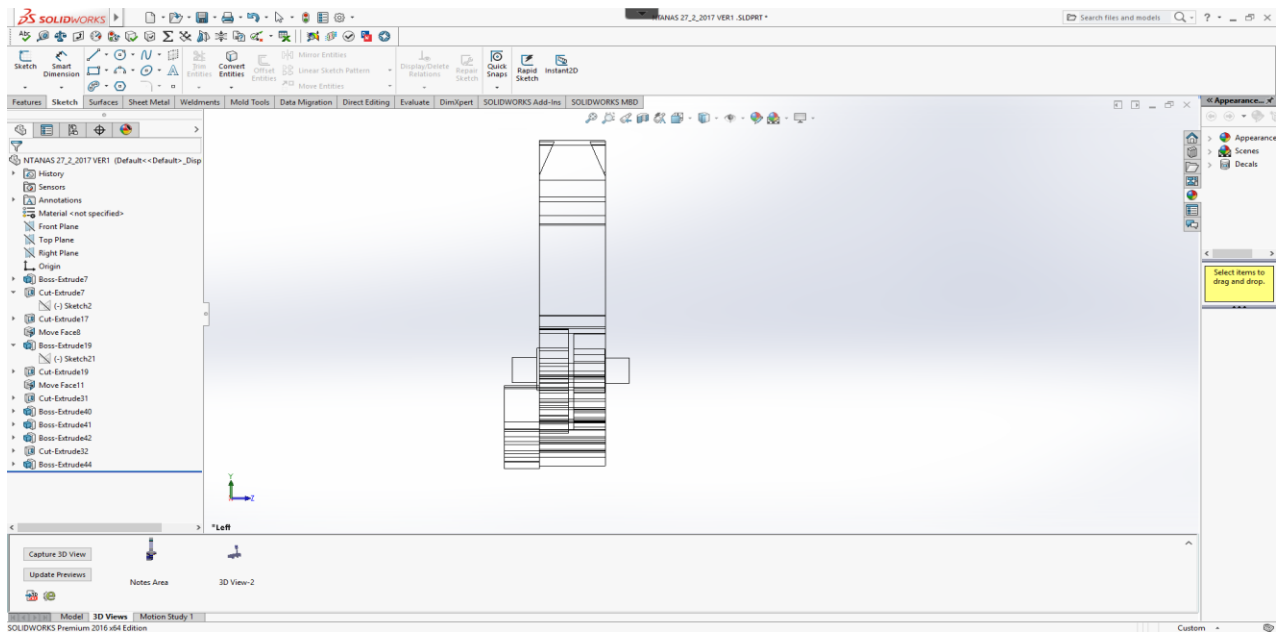
Ολοκληρωμένη απεικόνιση σχεδίου (3D σε όλες τις όψεις):





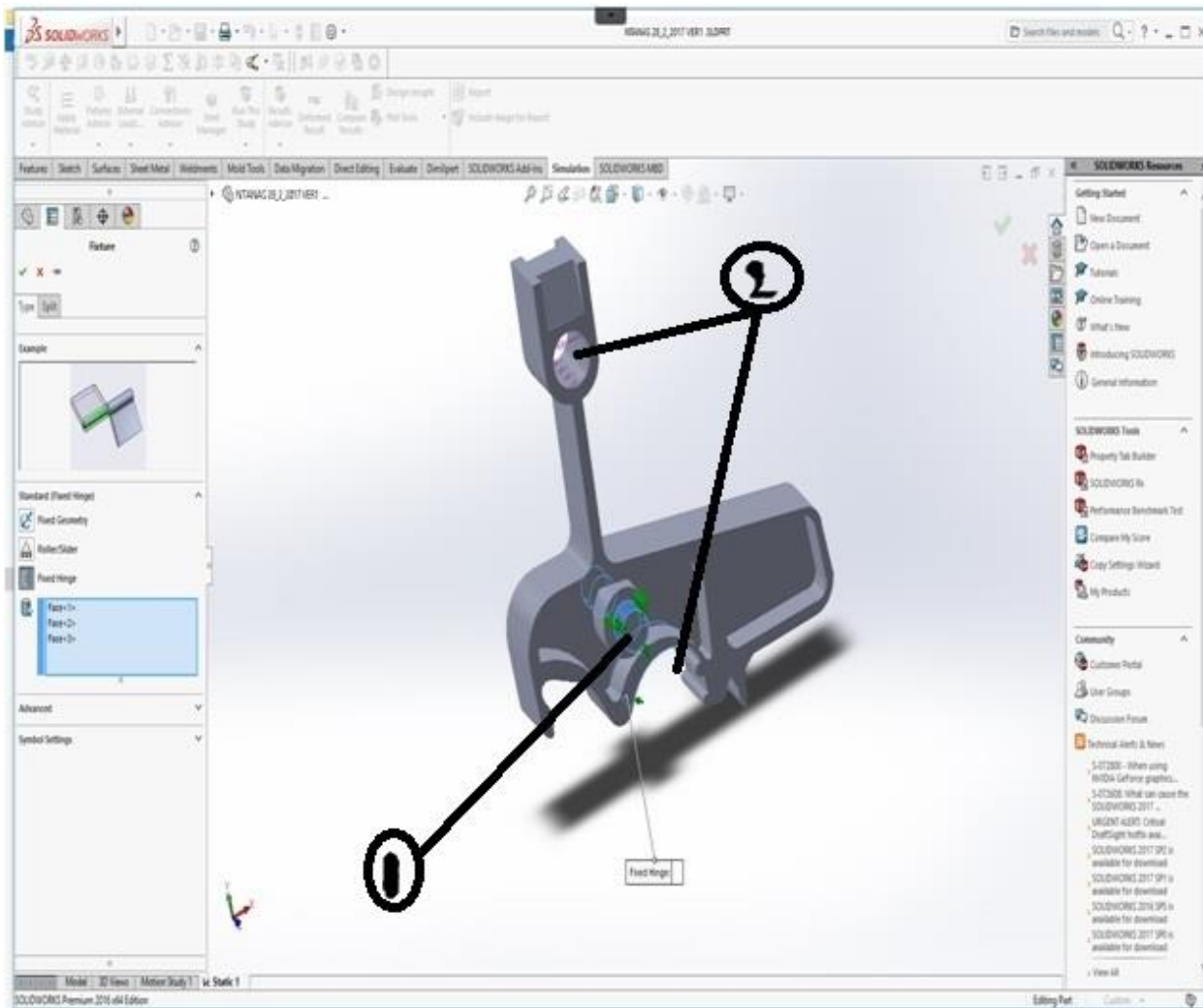




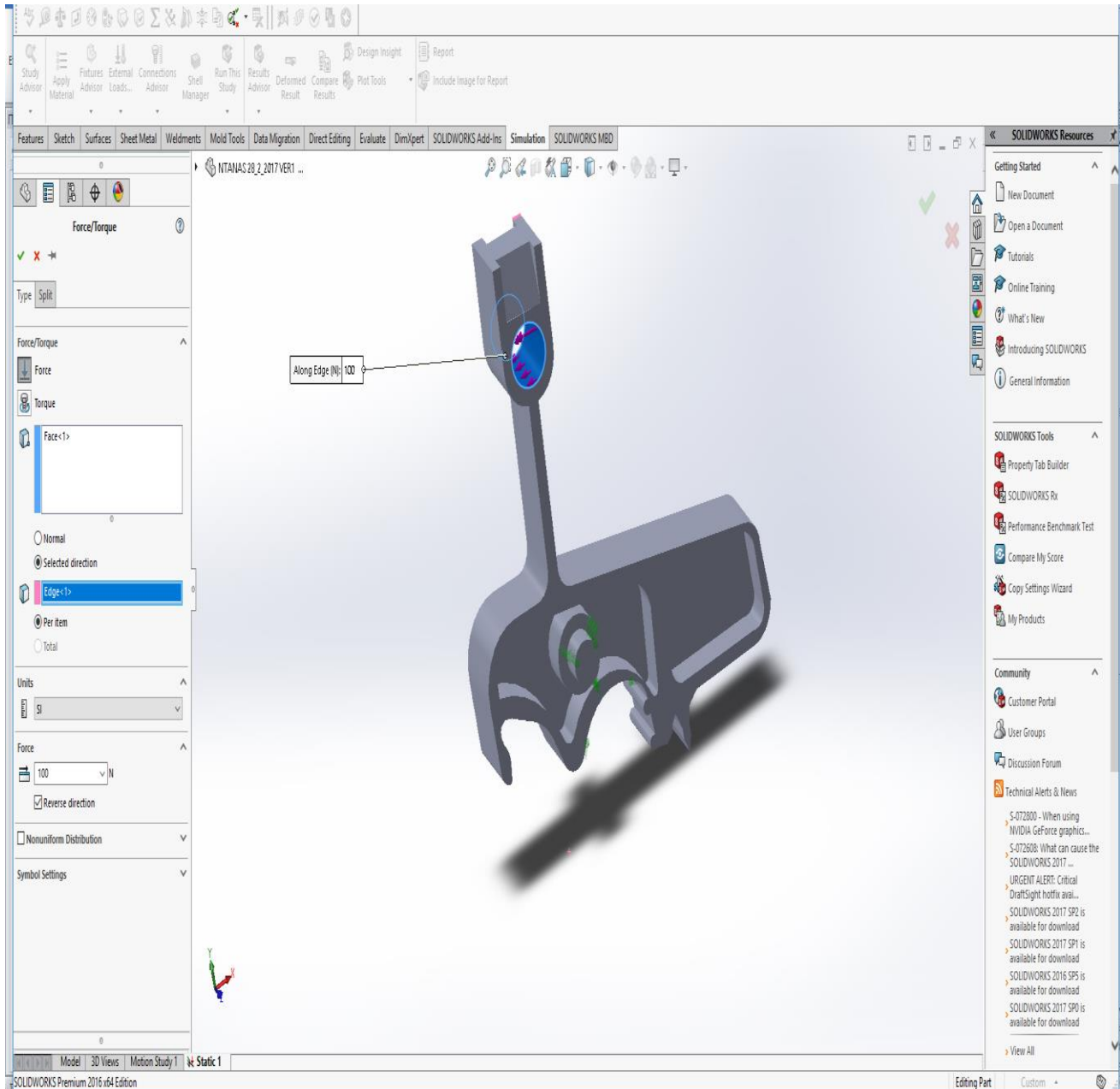


4.2 Υπολογιστική προσομοίωση δοκιμίου 1 με Solidworks 2016

Ξεκινώντας την προσομοίωση επιλέγονται τρεις επιφάνειες στήριξης βάσει της λειτουργίας του αντικειμένου.



Εισαγωγή Δύναμης: Εισάγεται η τιμή της δύναμης $F=100\text{N}$ και η φορά που ασκείται στο αντικείμενο. Η δύναμη επιδρά κατά μήκος του κυκλικού διάκενου με φορά προς τα αριστερά, όπως φαίνεται στην εικόνα.



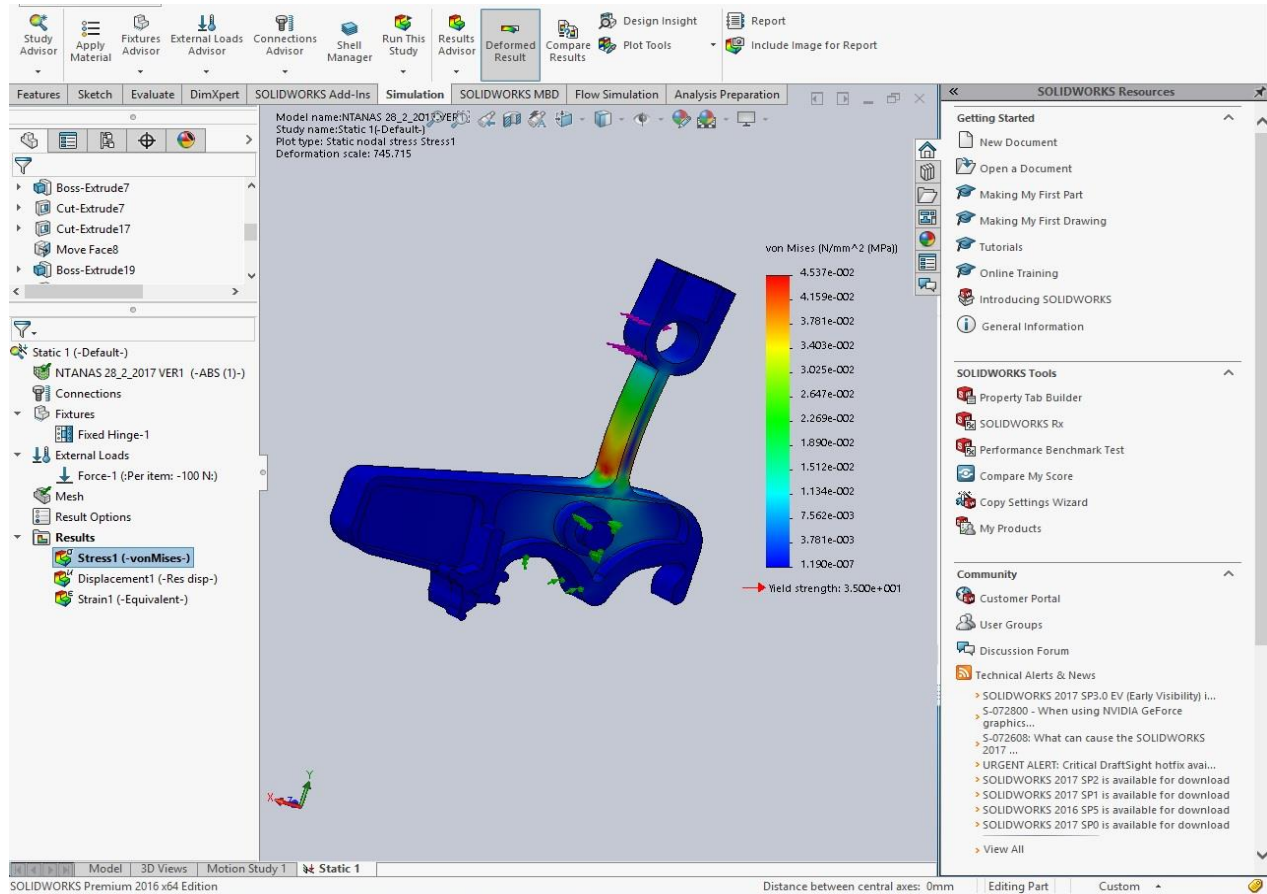
Choose material :Επιλέγεται το υλικό (ABS) απο την βιβλιοθήκη υλικών του solidworks. Καθώς το υλικό δεν περιέχει τιμή στο πεδίο Yield Strength, εισάγεται από τη πλευρά μας κάνοντας αντιγραφή του υλικού ABS ως νέο υλικό (Yield Strength = 40 N/m²).

The screenshot displays the SolidWorks Material Properties dialog box for a custom material named 'ABS 1'. The dialog box is open over a 3D model of a mechanical part. The Material Properties dialog shows the following properties:

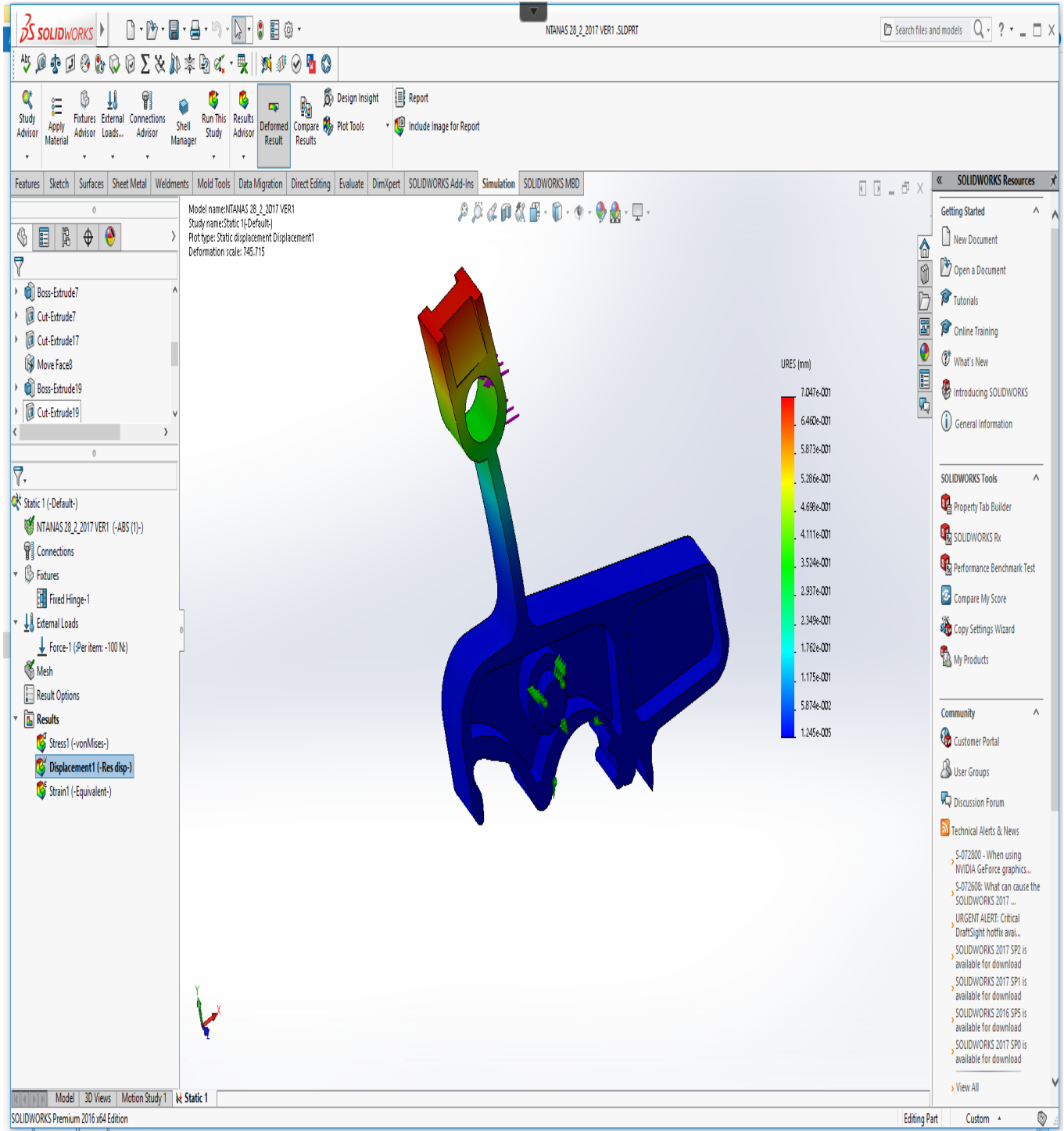
Property	Value	Units
Elastic Modulus	200000000	N/m ²
Poisson's Ratio	0.394	N/A
Shear Modulus	318000000	N/m ²
Mass Density	1020	kg/m ³
Tensile Strength	30000000	N/m ²
Compressive Strength		N/m ²
Yield Strength	40	N/m ²
Thermal Expansion Coefficient		1/K
Thermal Conductivity	0.2256	W/(m-K)

The dialog box also shows the Material Type (Linear Elastic Isotropic), Units (SI - N/m² (Pa)), Category (ABS1), and Name (ABS 1). The Yield Strength field is highlighted in red. The 3D model in the background shows a grey mechanical part with a green mesh overlaying a section of it. The SimulationXpress interface is visible on the right side of the screen, showing a progress bar with steps 1-6, and a warning message: 'Warning: SimulationXpress assumes that the material deforms in a linear fashion with increasing load. Nonlinear materials (such as many plastics) require the use of Simulation Premium.'

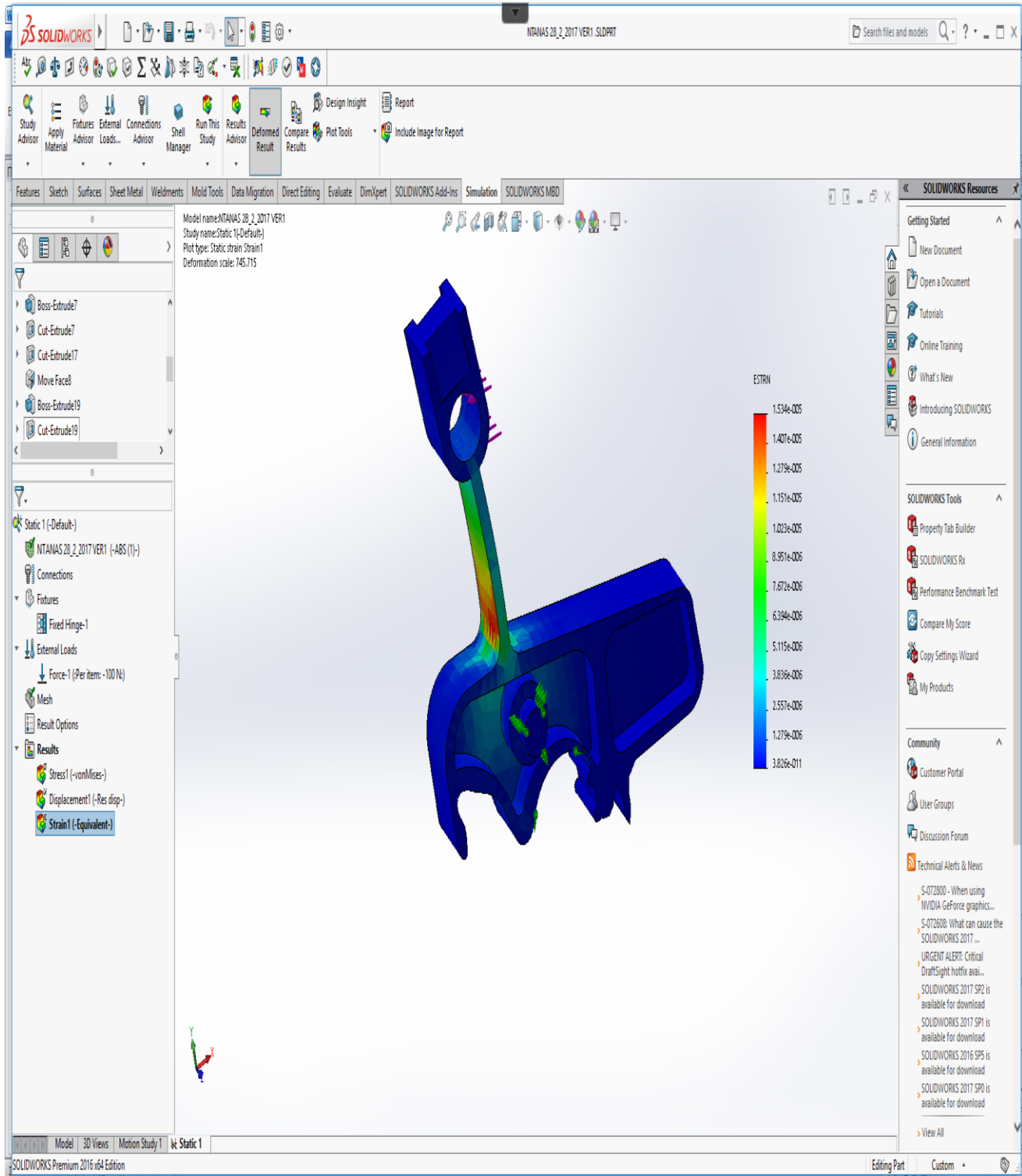
Stress: Πραγματοποιείται δοκιμή καταπόνησης στο αντικείμενο.



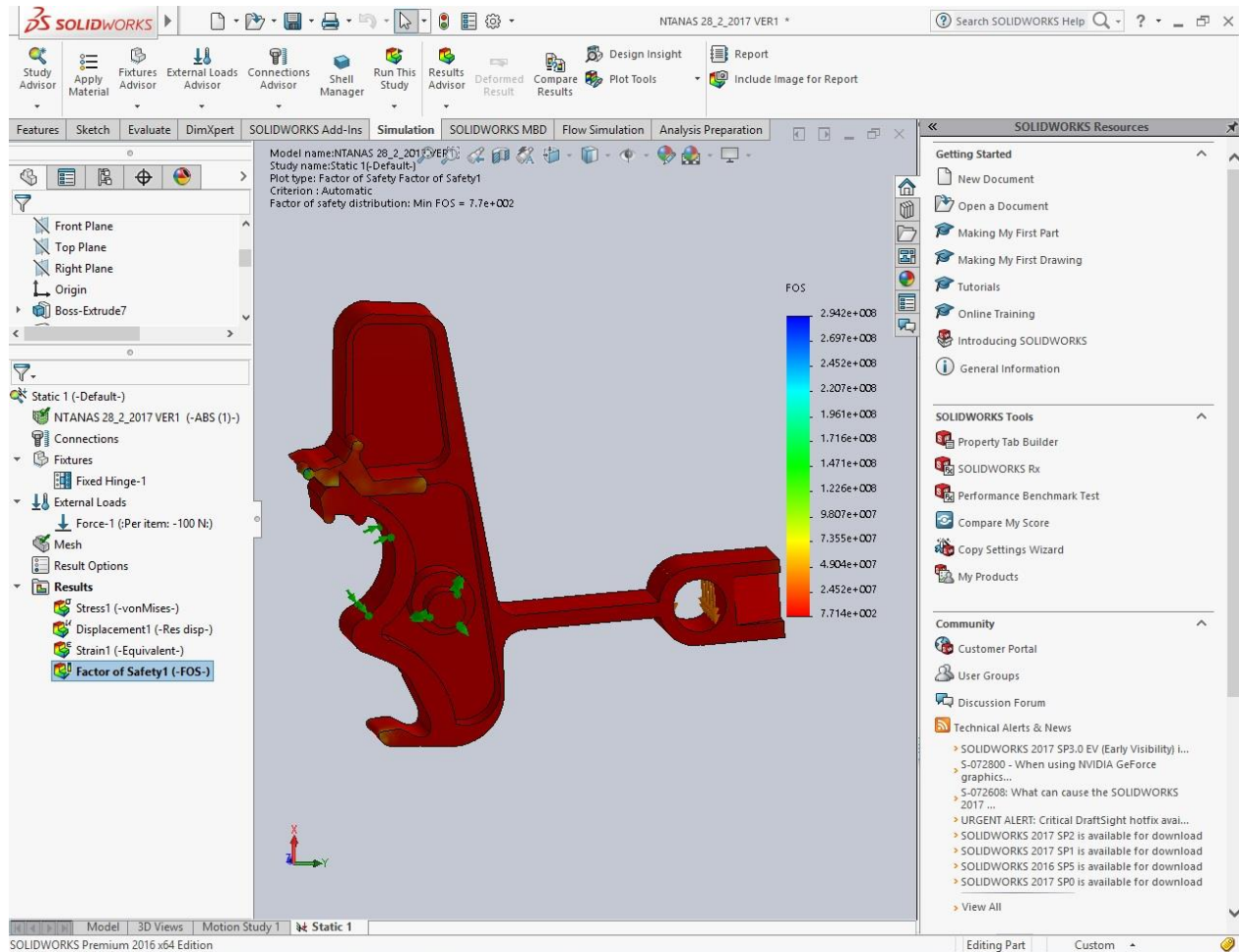
Displacement: Στη συνέχεια εντοπίζεται το σημείο που δέχεται την μεγαλύτερη μετατόπιση.



Strain: Με την εντολή strain φαίνεται το σημείο όπου εμφανίζεται το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων



Factor Of Safety : Ακολουθεί μελέτη του συντελεστή ασφαλείας



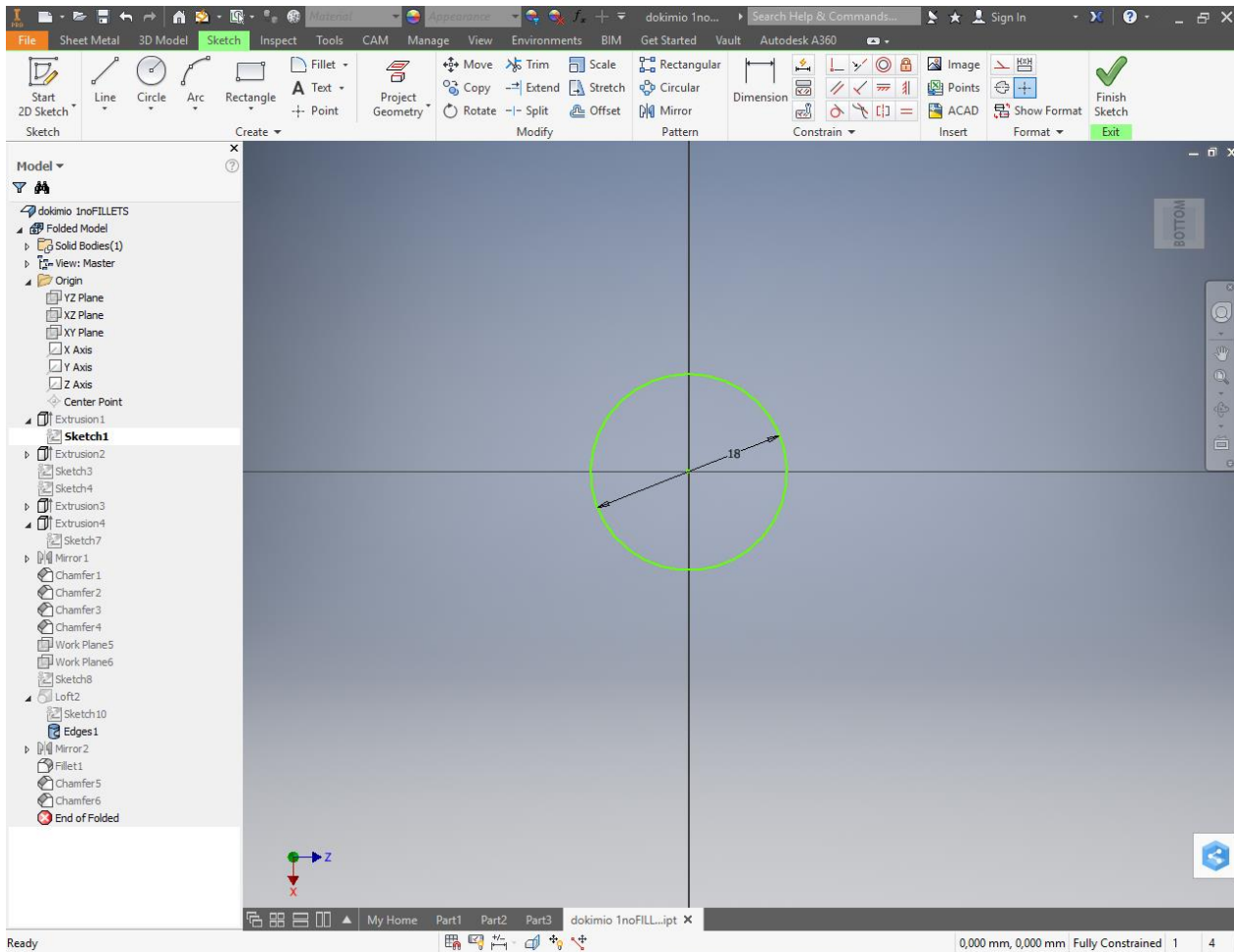
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :ΔΟΚΙΜΙΟ 2- ΒΑΣΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΛΑΜΠΤΗΡΑ

5.1 Σχεδιασμός δοκιμίου σε πρόγραμμα Autodesk Inventor 2017

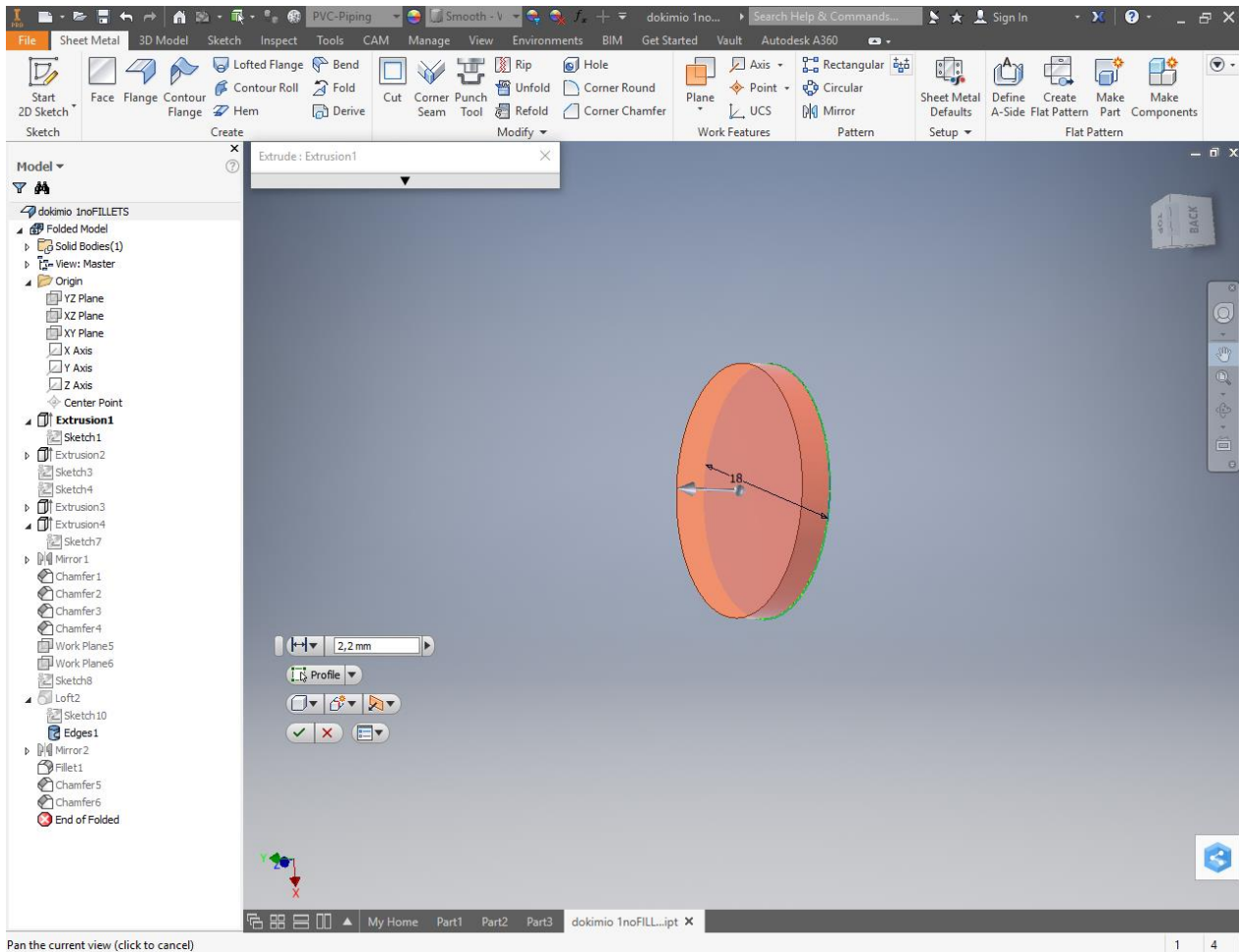
Ομοίως με το πρώτο δοκίμιο, με τις κατάλληλες εντολές στο πρόγραμμα Autodesk Inventor 2017 φτάνουμε στη 3D αποτύπωση του αντικειμένου μας και το σχέδιο απεικονίζεται σε όλες τις όψεις του. Ακολουθεί η υπολογιστική του προσομοίωση επιλέγοντας 3 επιφάνειες στήριξης και εισάγοντας δεδομένα για την εξωτερική του φόρτιση. Στη συνέχεια και αφού έχουμε επιλέξει το κατάλληλο υλικό, κάνουμε δοκιμή καταπόνησης και κάνουμε το διάγραμμα με τις μετατοπίσεις και τις ανηγμένες παραμορφώσεις με ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να προσδιορίσουμε τα επικίνδυνα σημεία. Τέλος ακολουθεί η μελέτη για την επιλογή του συντελεστή ασφαλείας.

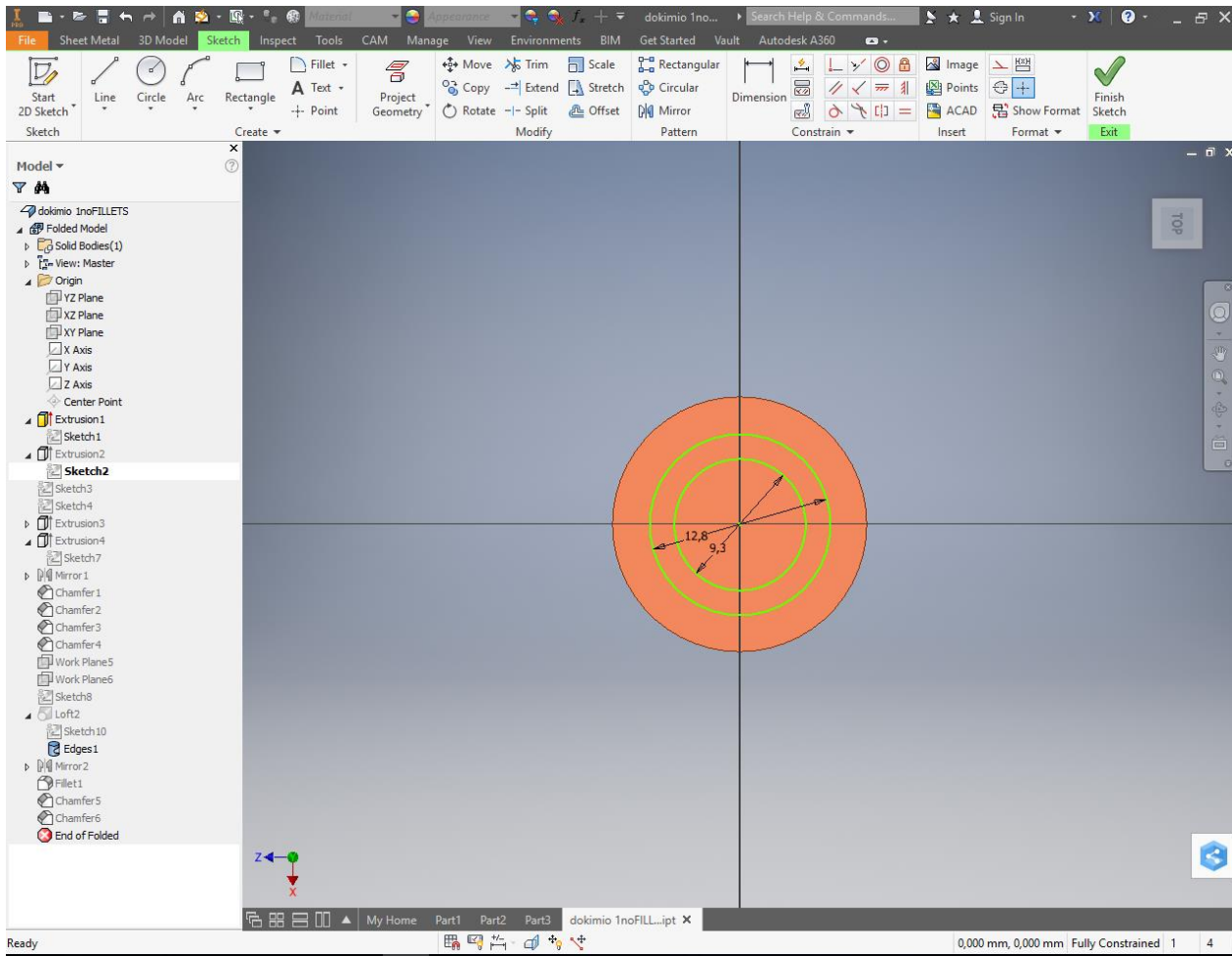
Παρακάτω ακολουθούν αναλυτικά όλες οι εντολές που δώσαμε βήμα-βήμα στο Autodesk Inventor 2017 :

Sketch (1): Δημιουργία πρώτου sketch με τον σχεδιασμό κύκλου.

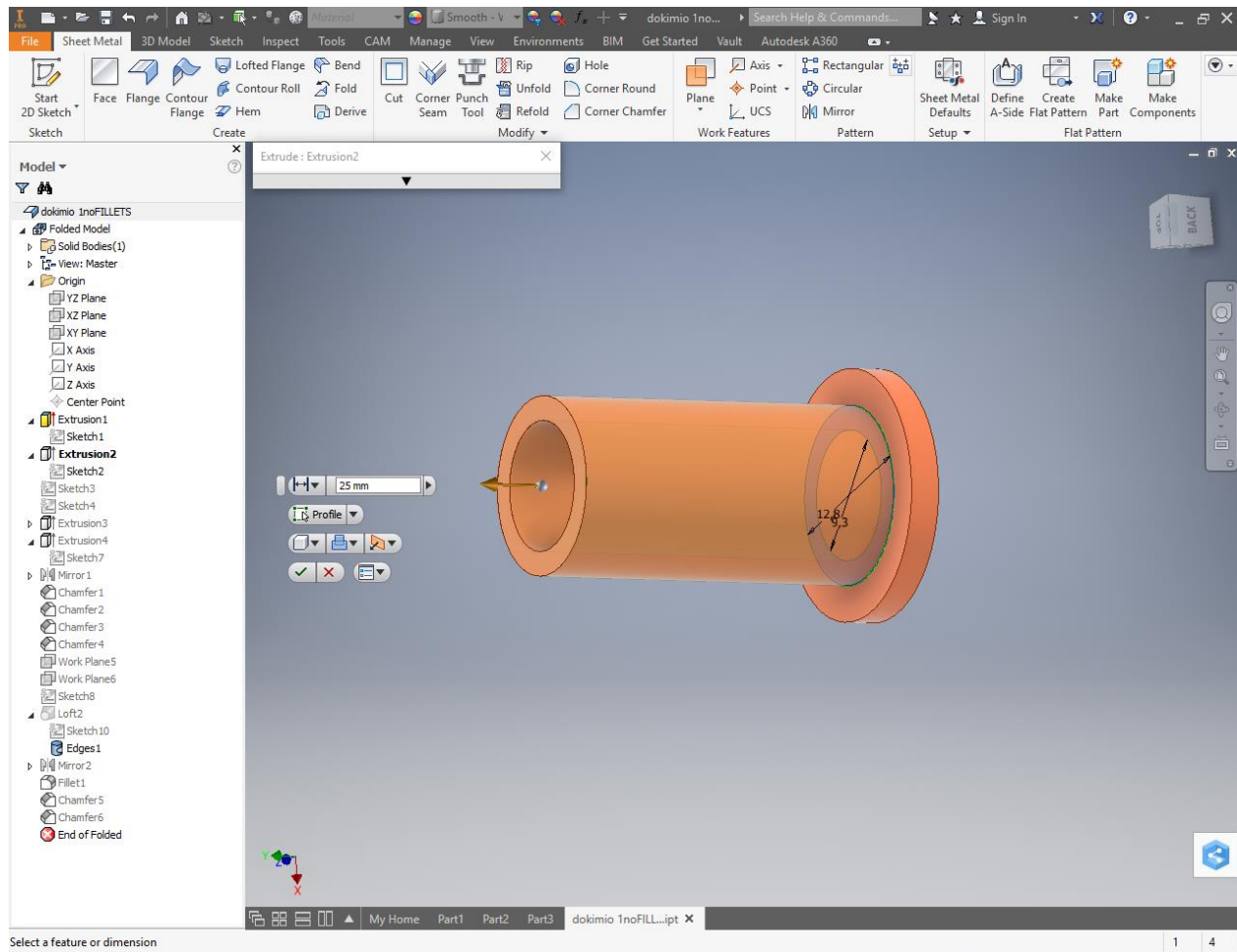


Extrusion(1): Με την εντολή extrude δίδεται ο απαραίτητος όγκος στον κύκλο.

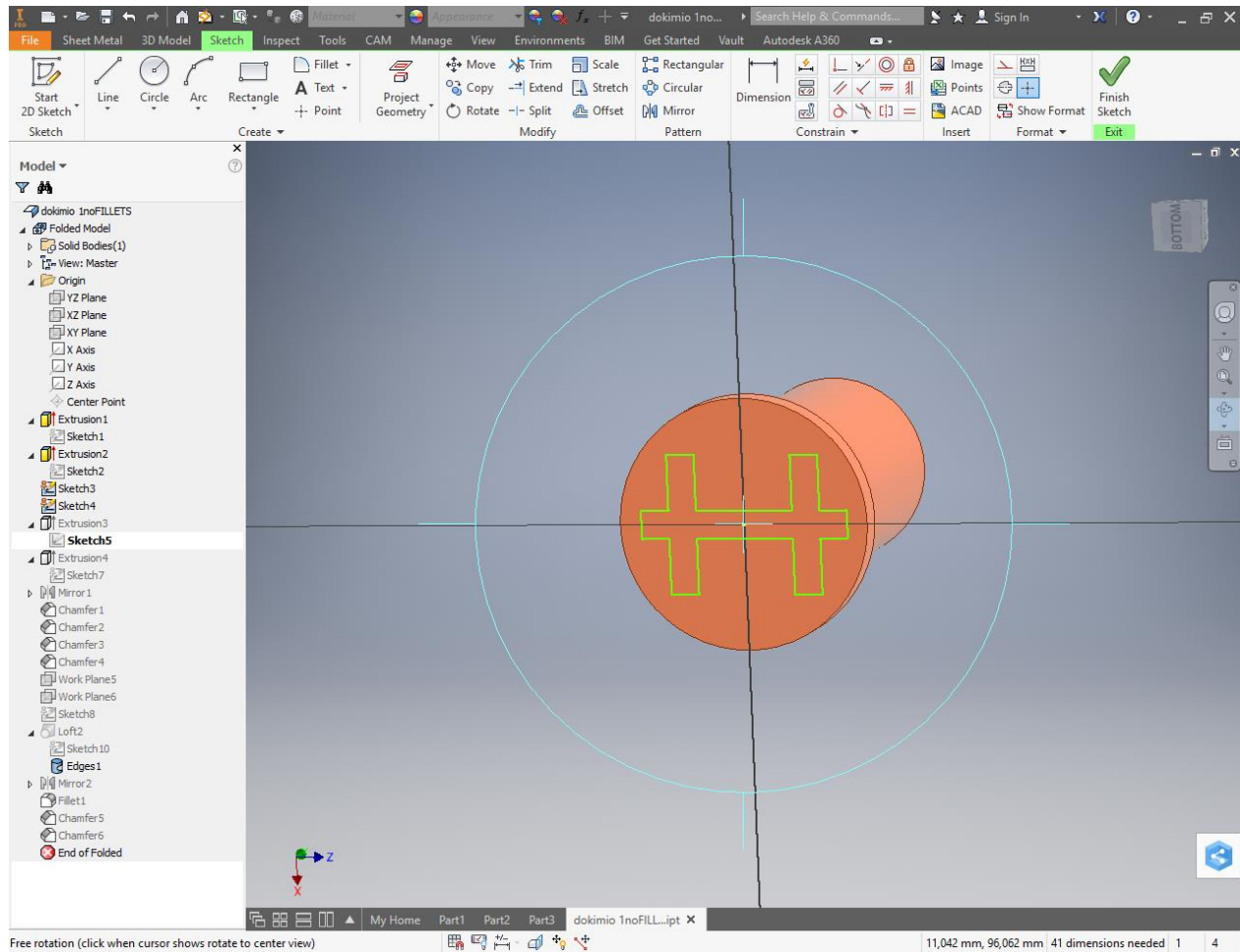


Sketch (2): Σχεδιασμός δύο ομόκεντρων κύκλων.

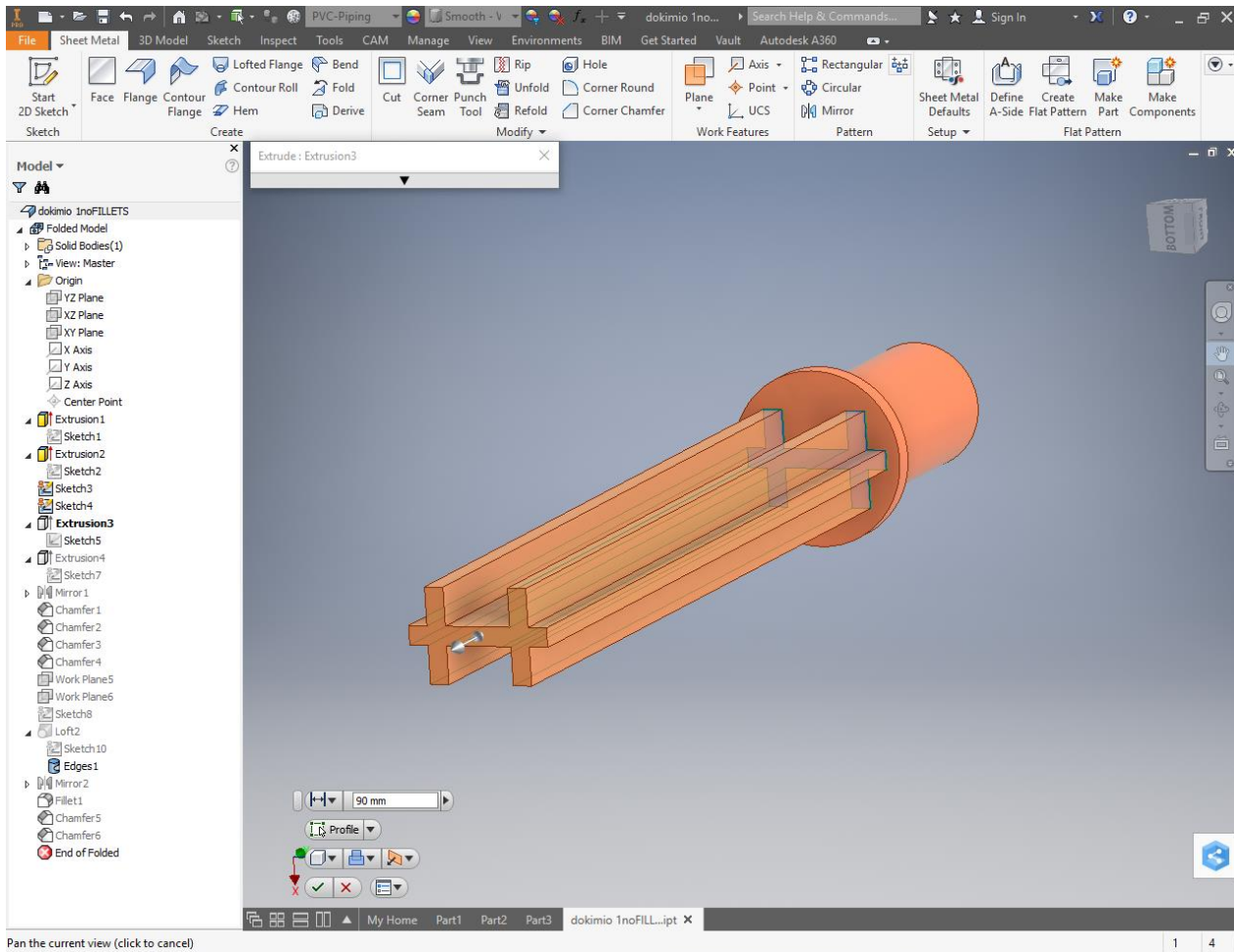
Extrusion(2): Με την εντολή extrude δίδεται όγκος στους δύο ομόκεντρους κύκλους, δημιουργώντας οπή.



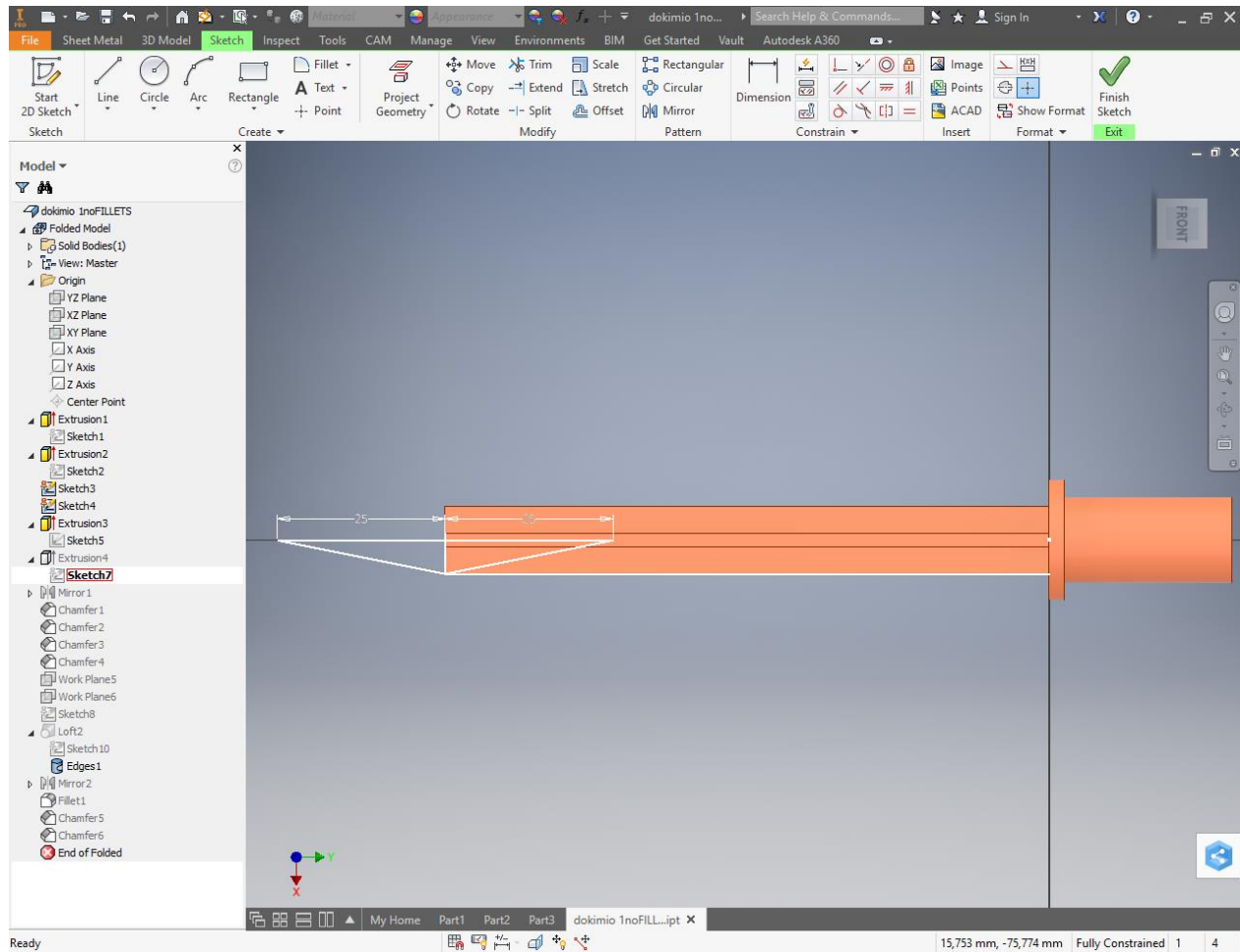
Sketch(5): Με την εντολή line δημιουργείται το σχήμα από το οποίο θα προέλθει η επόμενη εντολή.



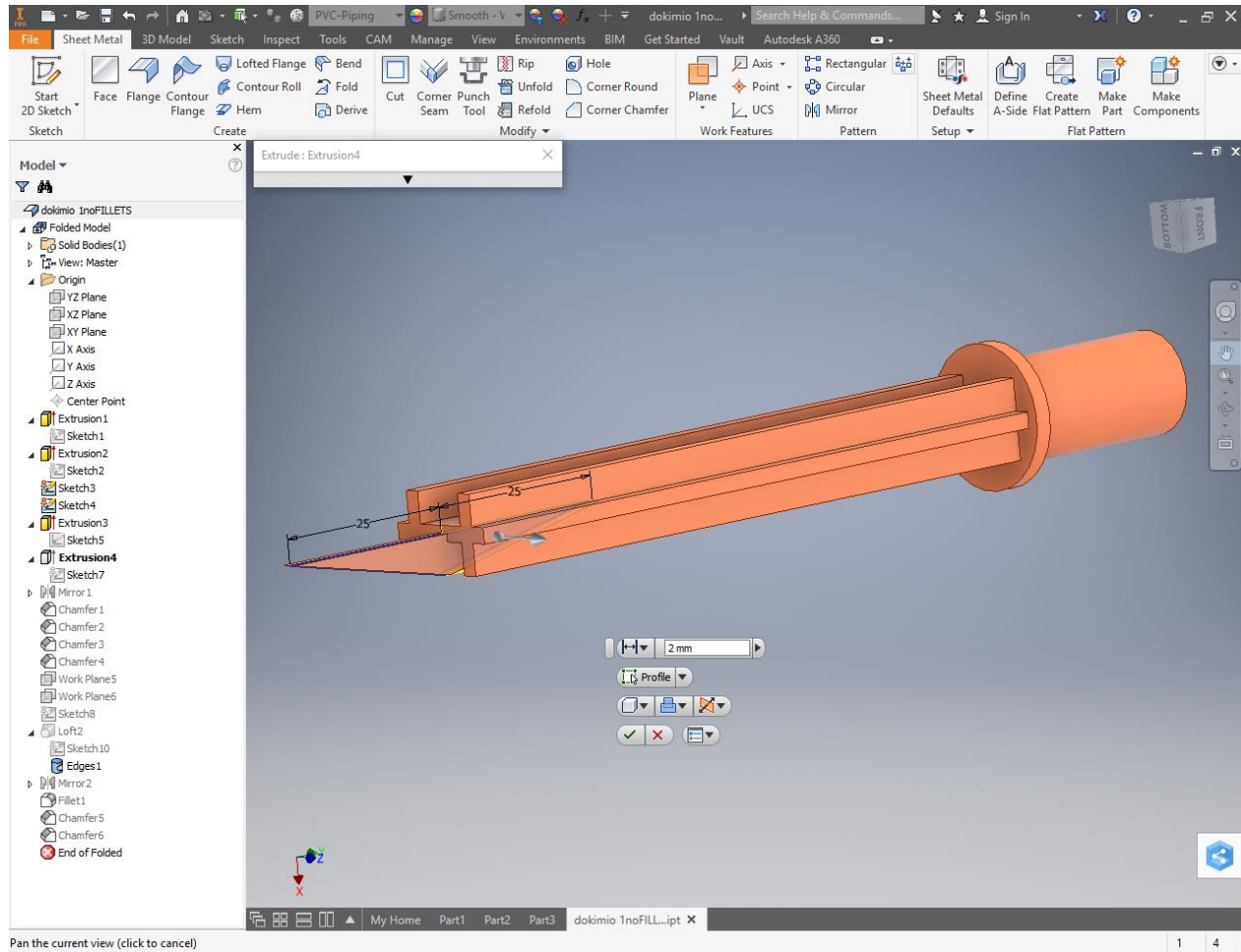
Extrusion(3): Επιλέγοντας την εντολή extrude δίδεται όγκος στο σχήμα του προηγούμενου sketch.



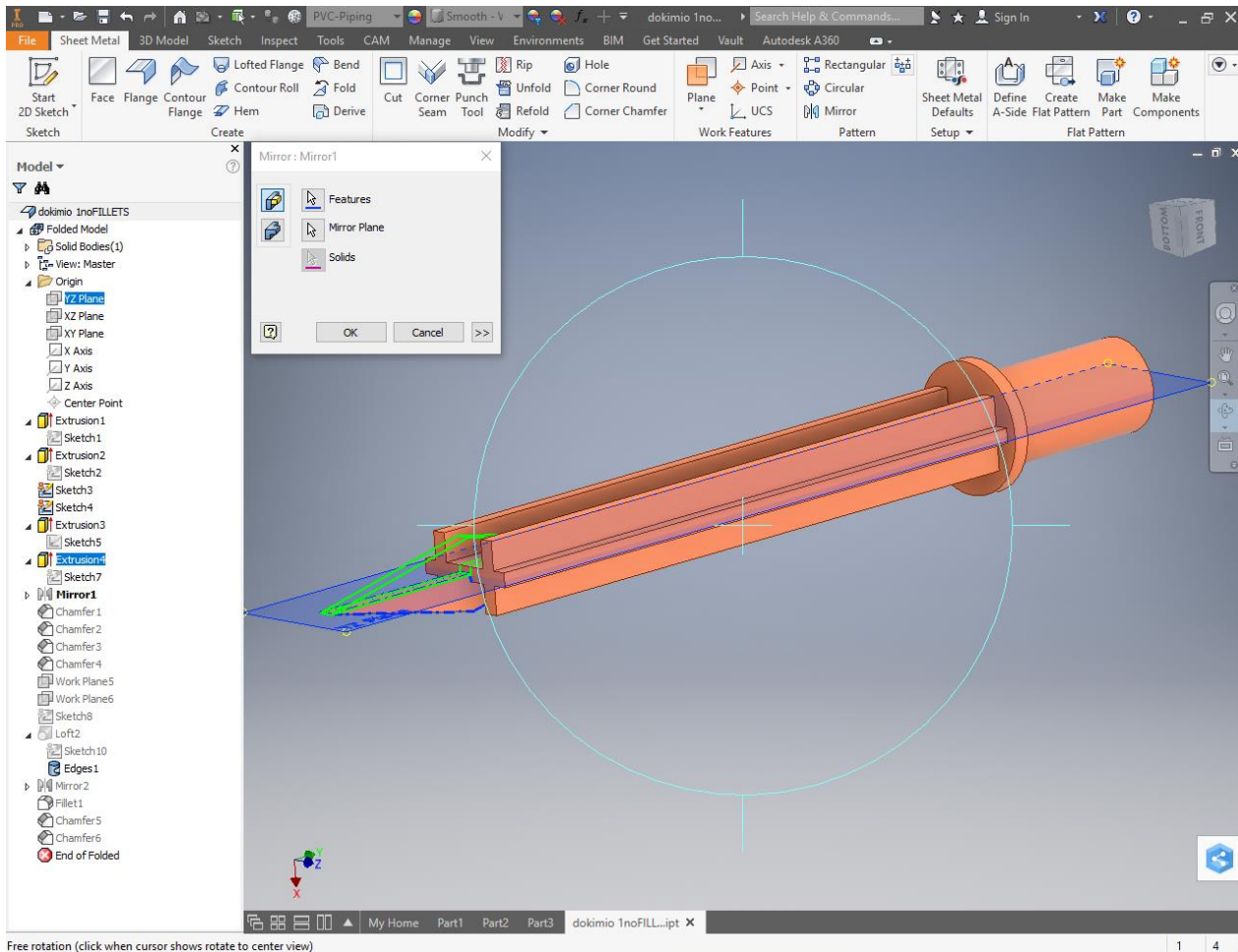
Sketch(7): Έχοντας επιλέξει το ανάλογο work plane, σχεδιάζεται ένα ισοσκελές τρίγωνο βάσει του πρωτότυπου αντικειμένου.



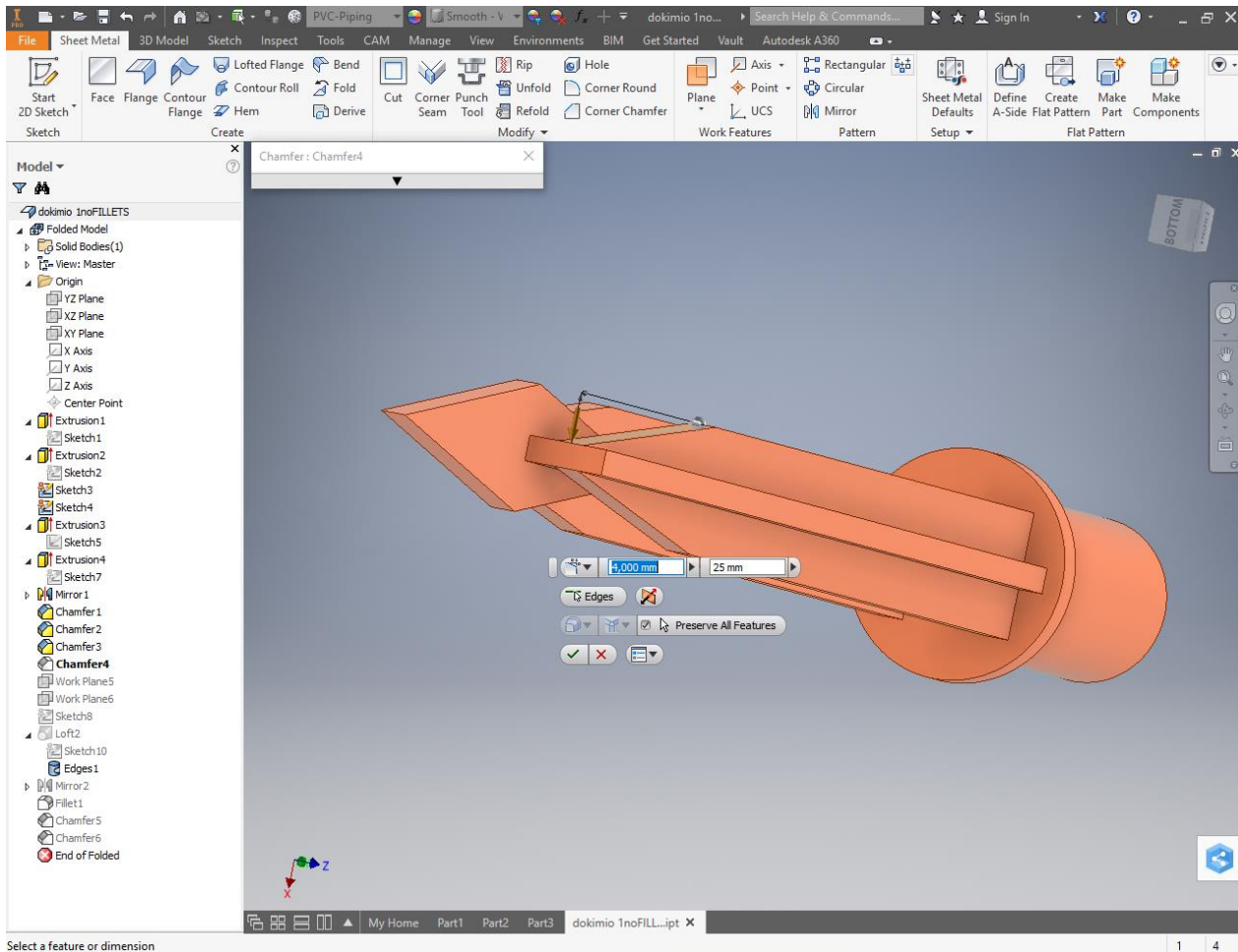
Extrusion(4): Με την εντολή extrude δημιουργείται τρισδιάστατη μορφή στο τρίγωνό μας.



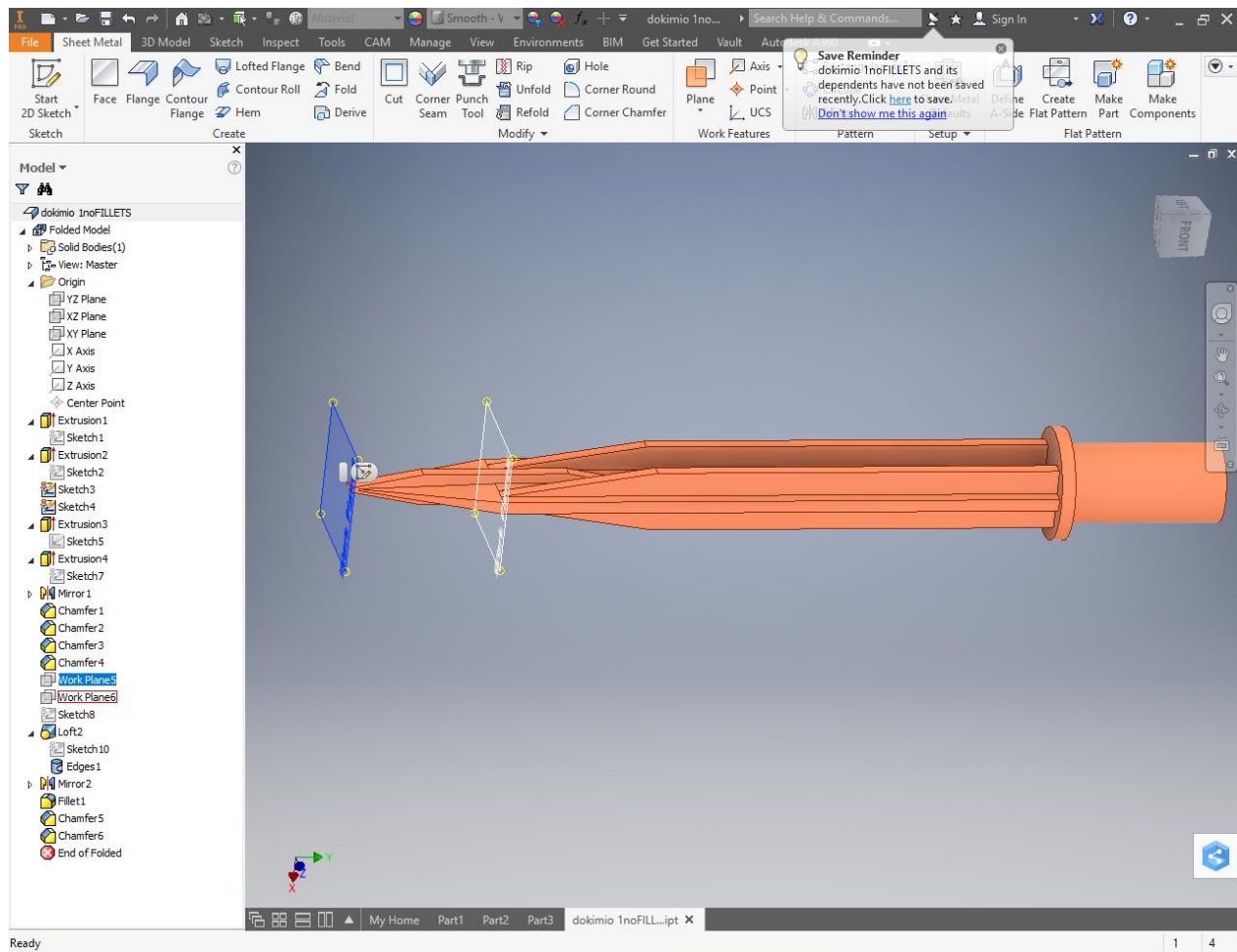
Mirror(1): Επιλέγεται η εντολή mirror με σκοπό την δημιουργία πανομοιότυπου τριγώνου στην απέναντι πλευρά του επιλεγμένου work plane.



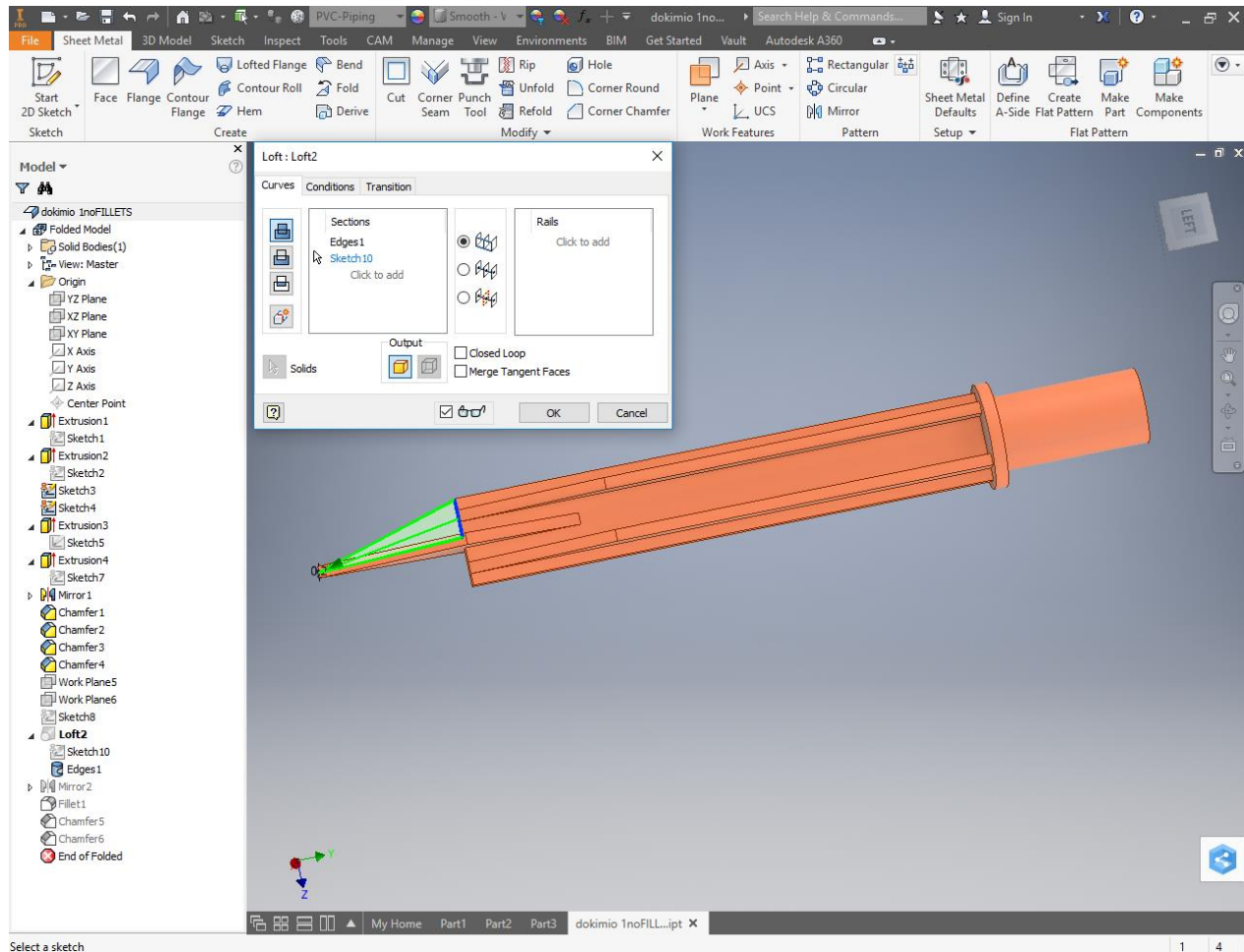
Chamfer(1-2-3-4): Χρησιμοποιώντας την εντολή chamfer, αφαιρείται το απαραίτητο υλικό υπό γωνία. Γίνεται επανάληψη της εντολής και στα υπόλοιπα αντίστοιχα σημεία.



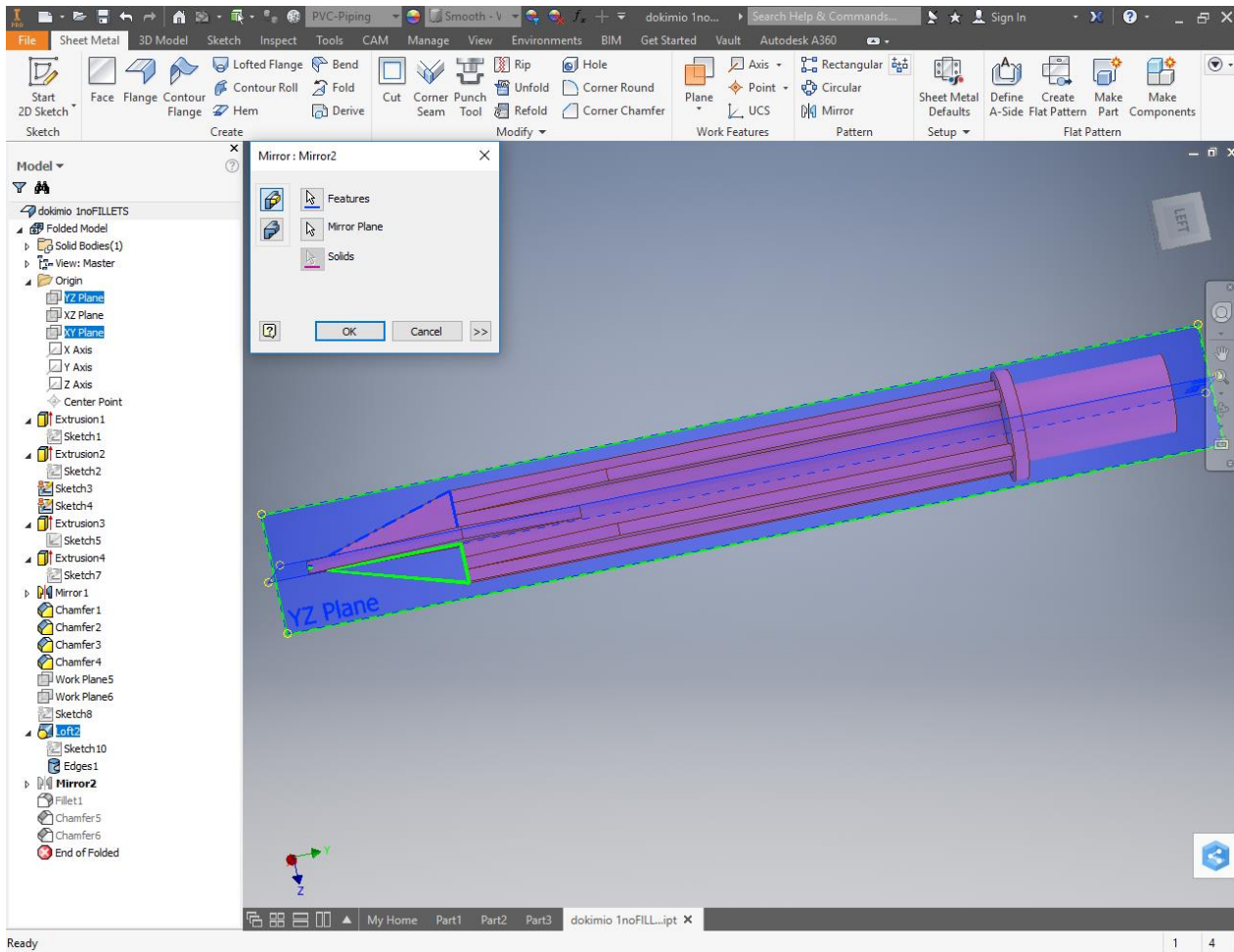
Work plane (5-6): Με την εντολή offset from plane, εισάγονται δύο work planes σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους.



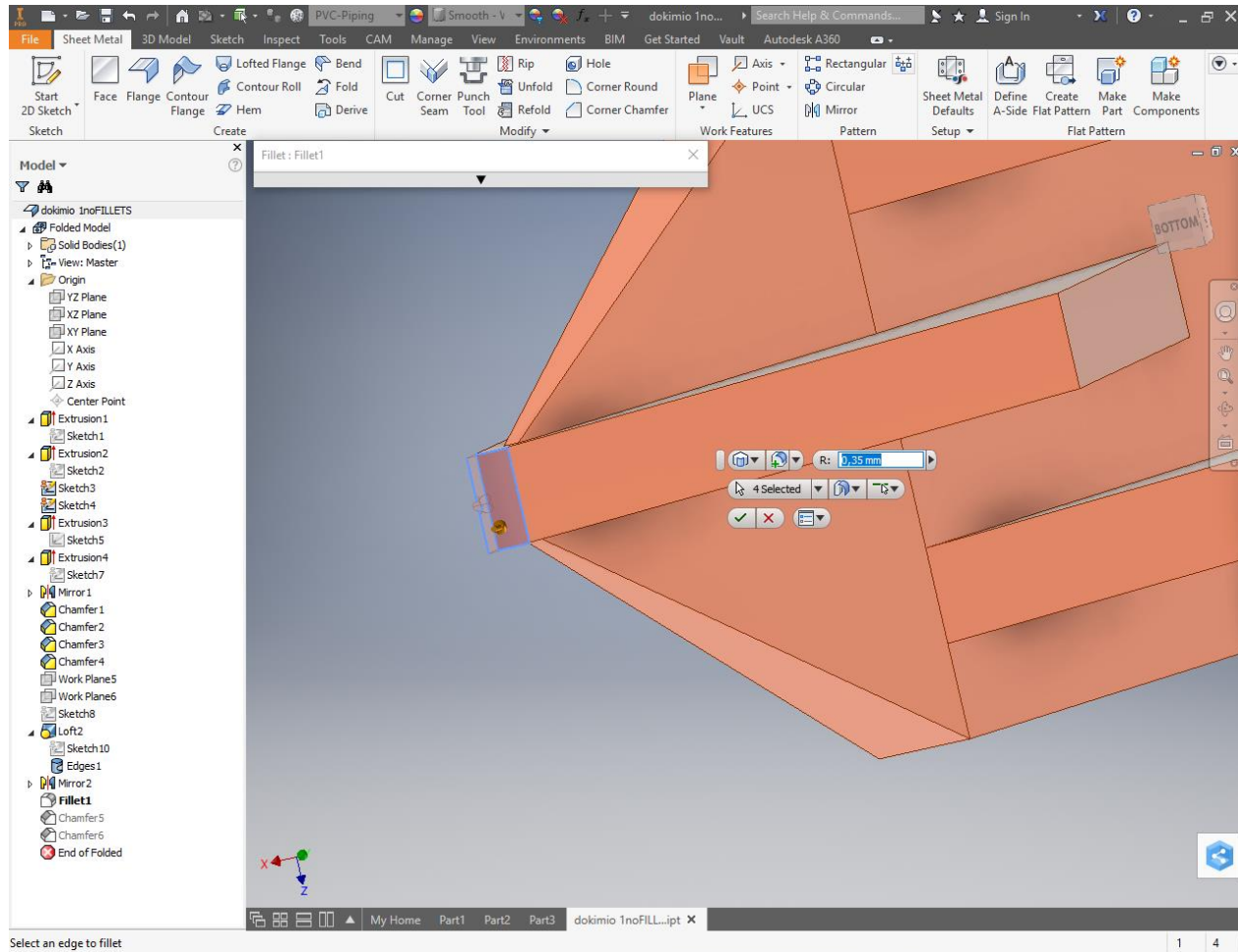
Loft: Με την εντολή loft και την βοήθεια των δύο προηγούμενων work planes δημιουργείται το παρακάτω τρισδιάστατο σχέδιο.



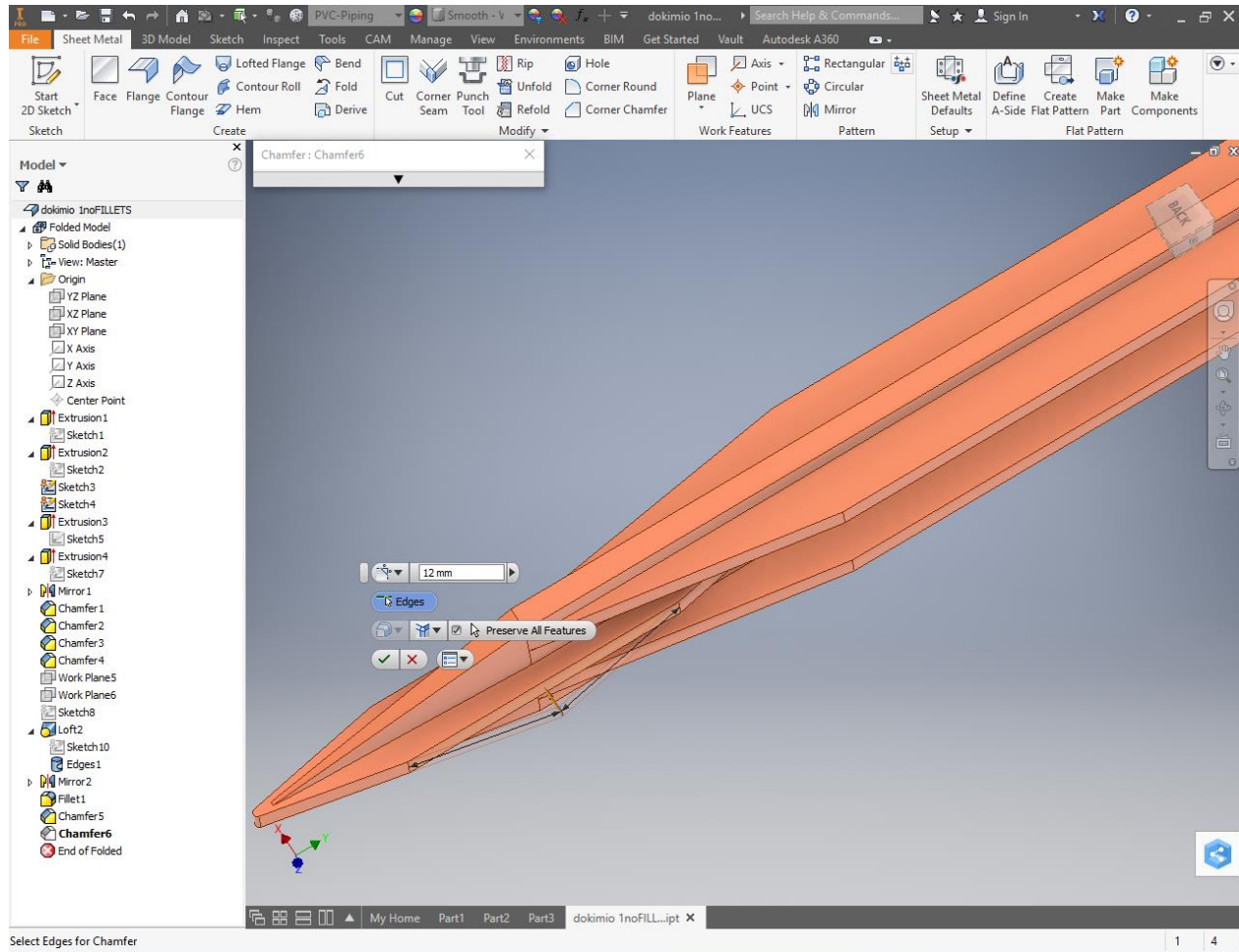
Mirror(2): Με την εντολή mirror αντιγράφεται στην απέναντι πλευρά πανομοιότυπο σχήμα με την επιλογή του κατάλληλου plane.



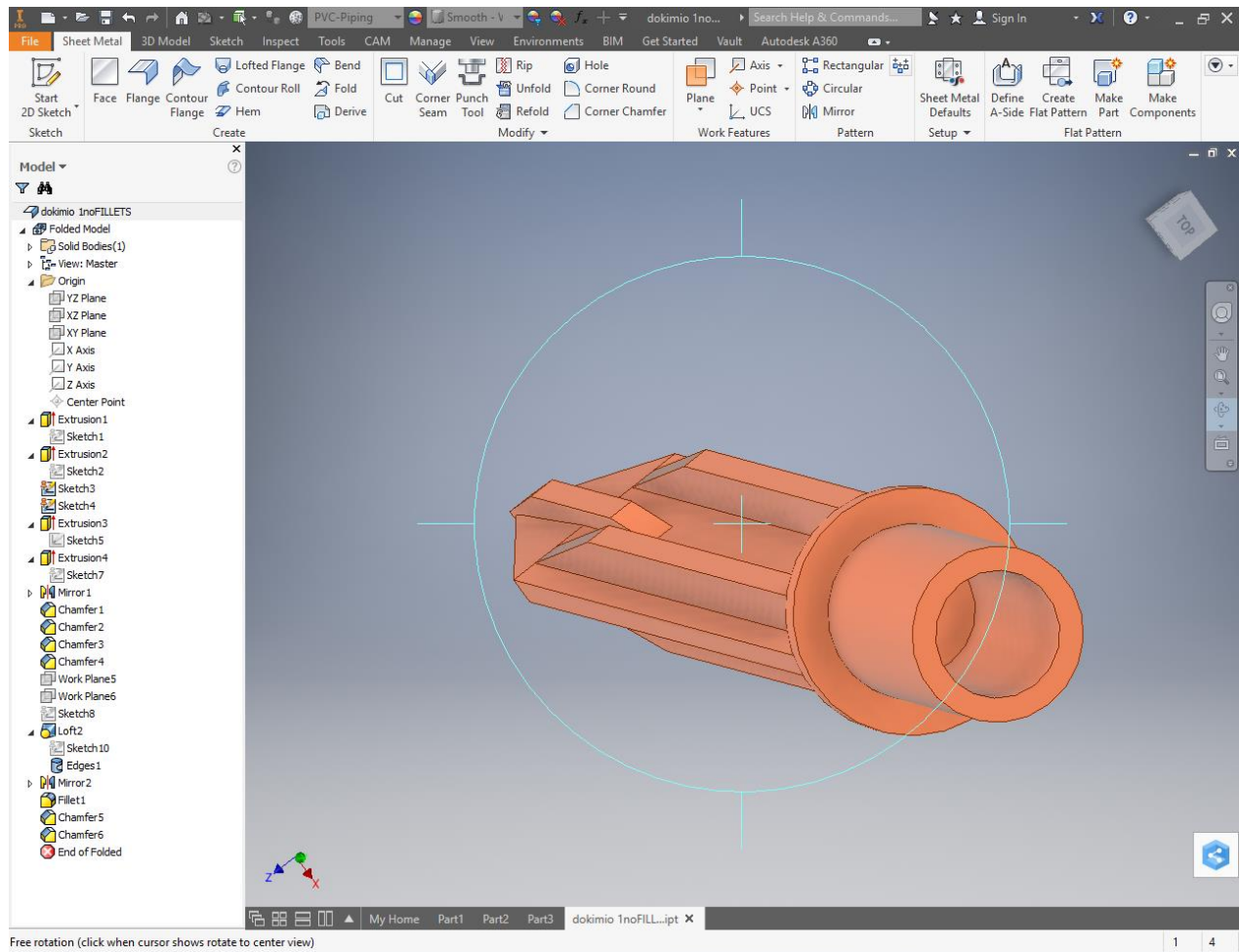
Fillet(1): Επιλέγοντας την εντολή fillet καμπυλώνεται το εμπρόσθιο μέρος του δοκιμίου.

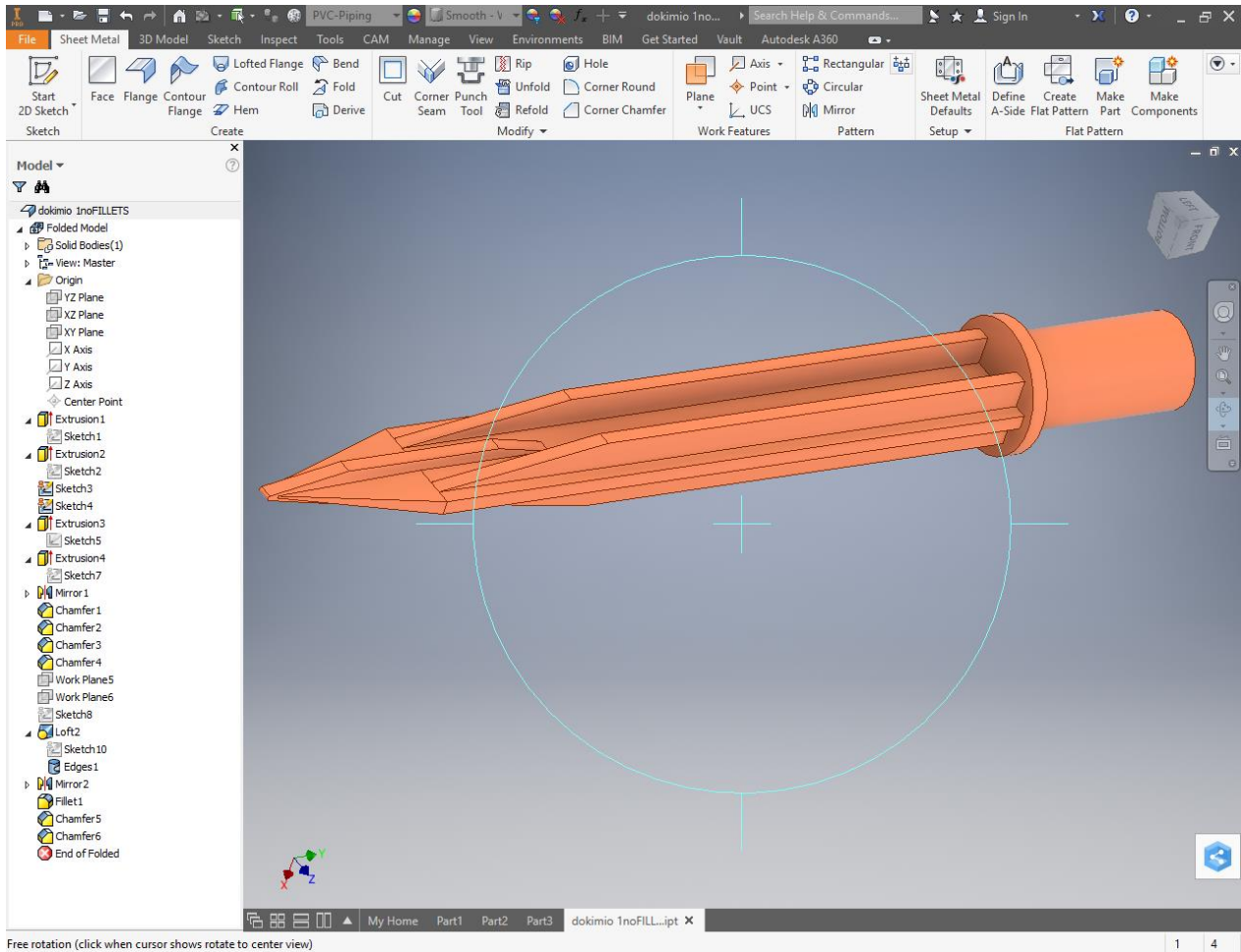


Chamfer 5-6: Με την εντολή chamfer αφαιρείται το απαραίτητο υλικό υπό γωνία και στις δύο πλευρές



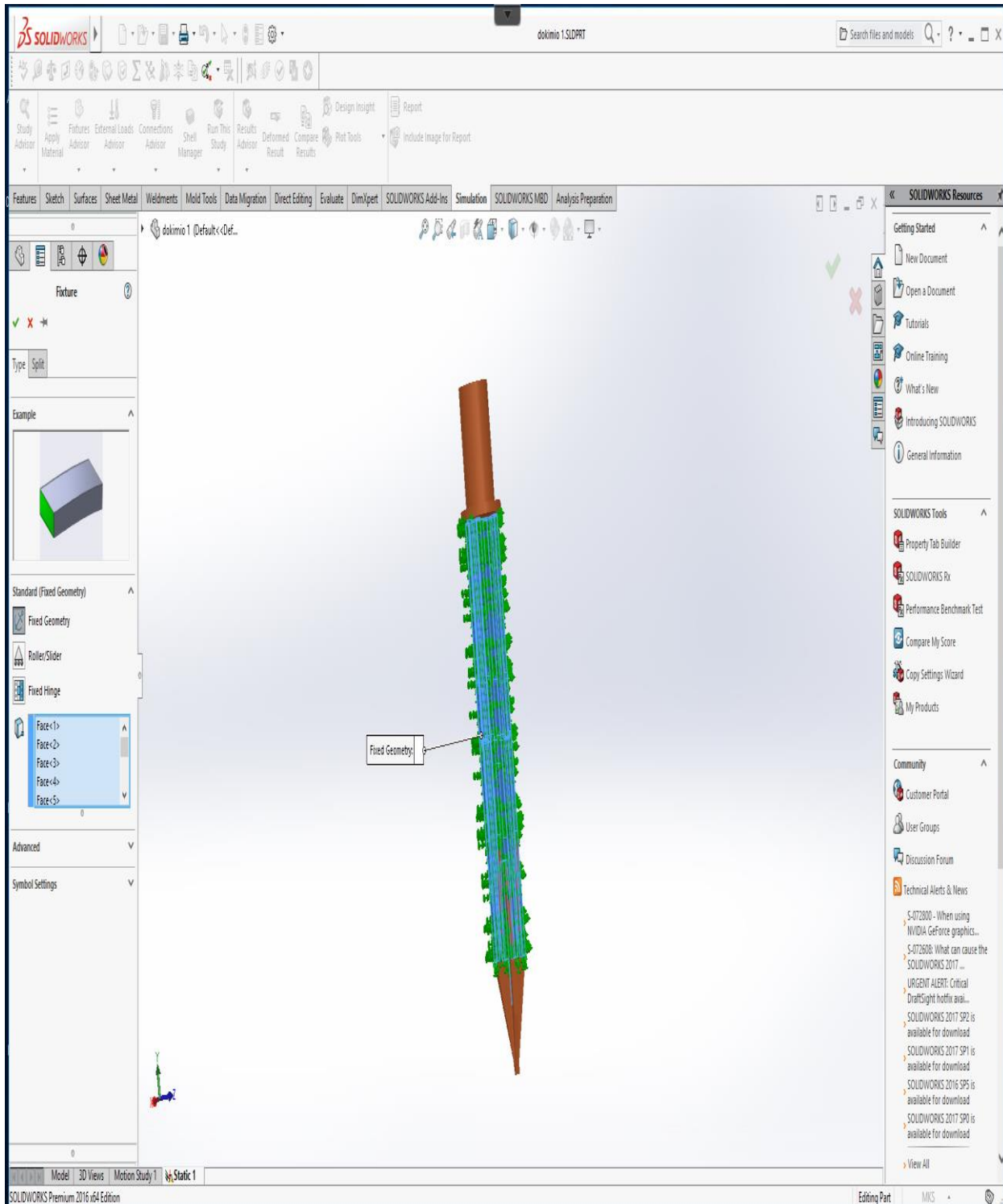
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΕΣ ΟΥΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ:



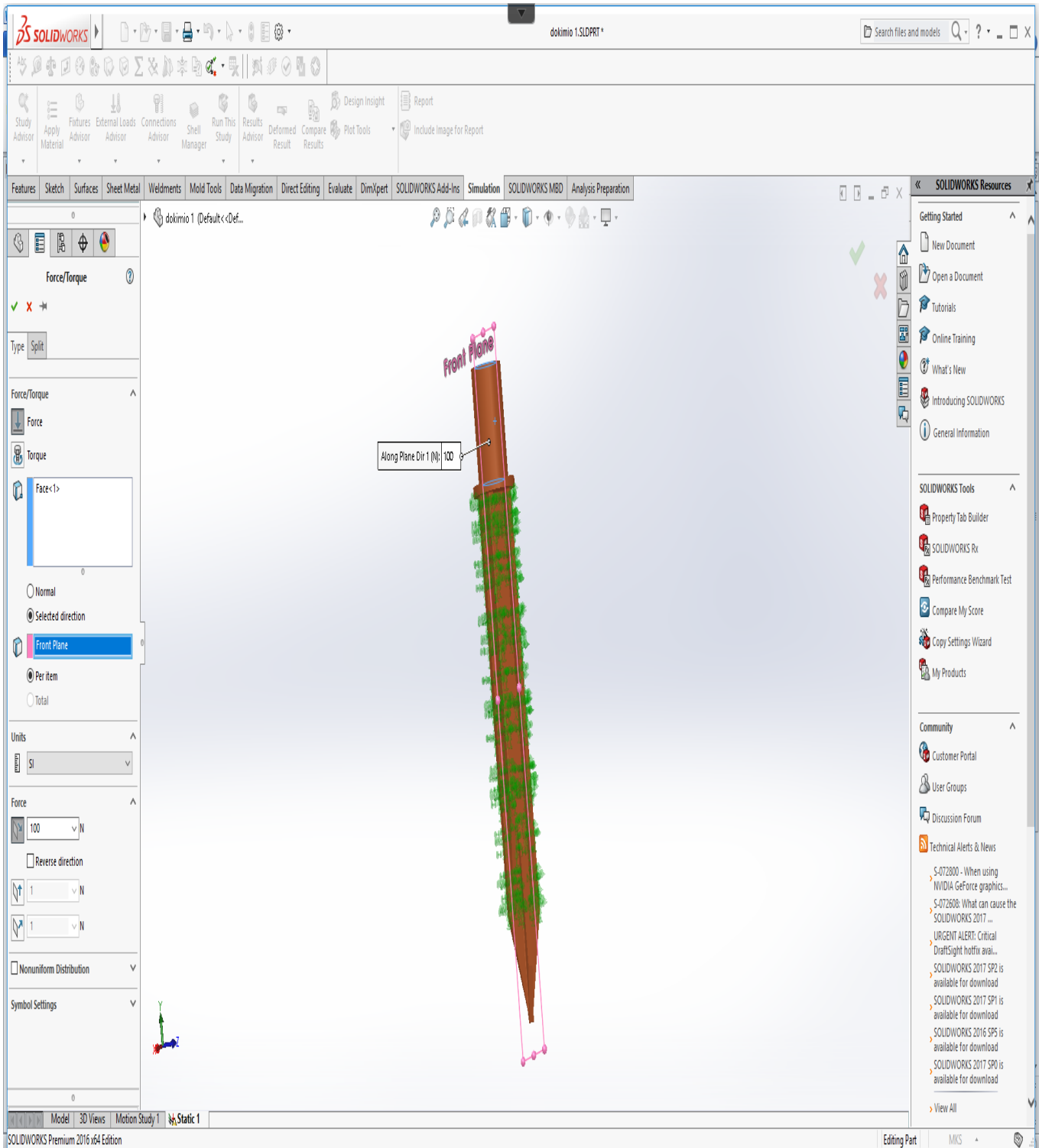


5.2 Υπολογιστική προσομοίωση δοκιμίου 2 με Solidworks 2016

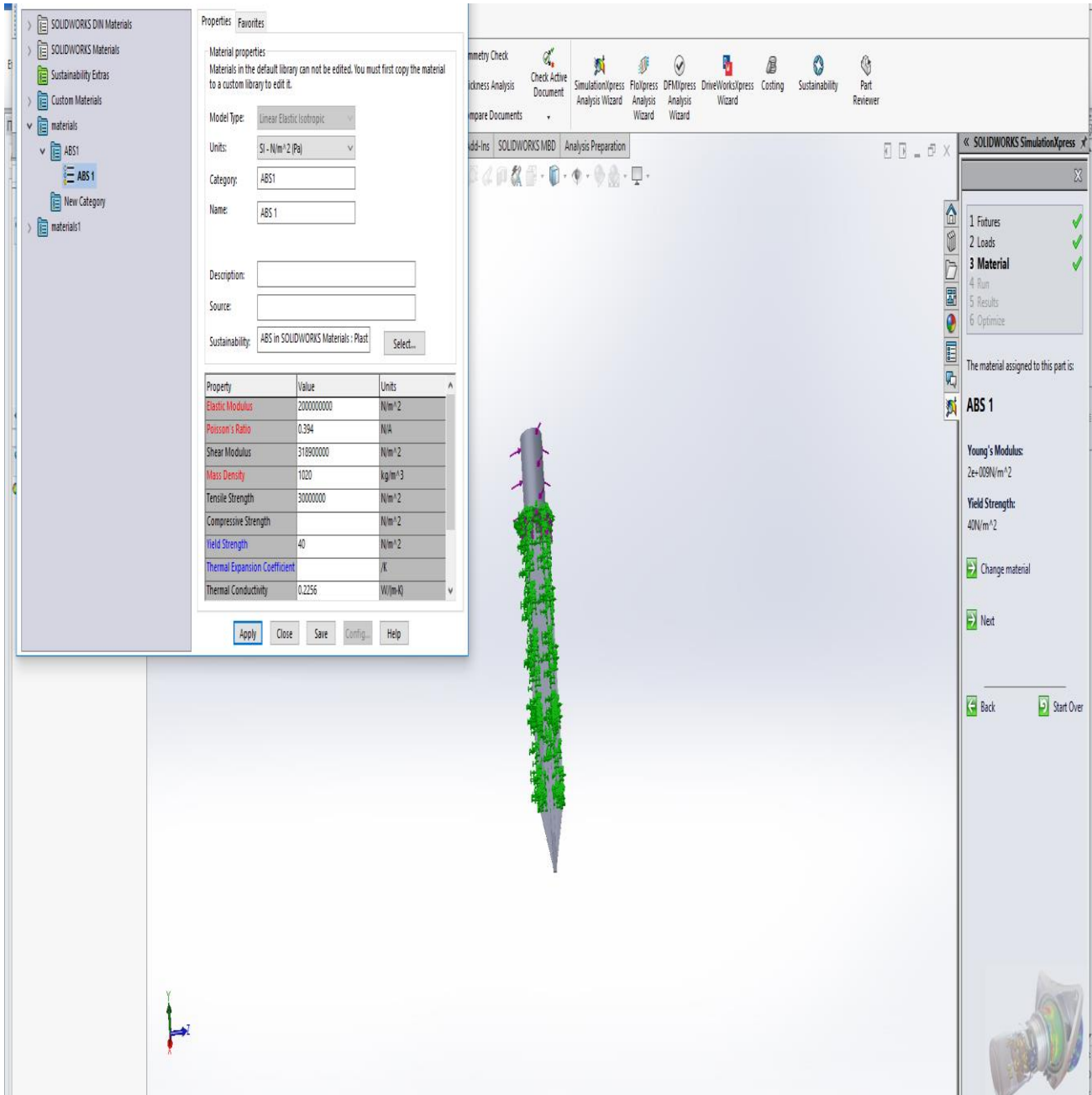
Λόγω του τρόπου λειτουργίας του αντικειμένου, κατά τον οποίο το αντικείμενο εισχωρεί στο έδαφος έτσι ώστε το πάνω μέρος να στηρίζει τον ηλιακό λαμπτήρα, επιλέγονται τα κατάλληλα επίπεδα ως σημεία στήριξης.



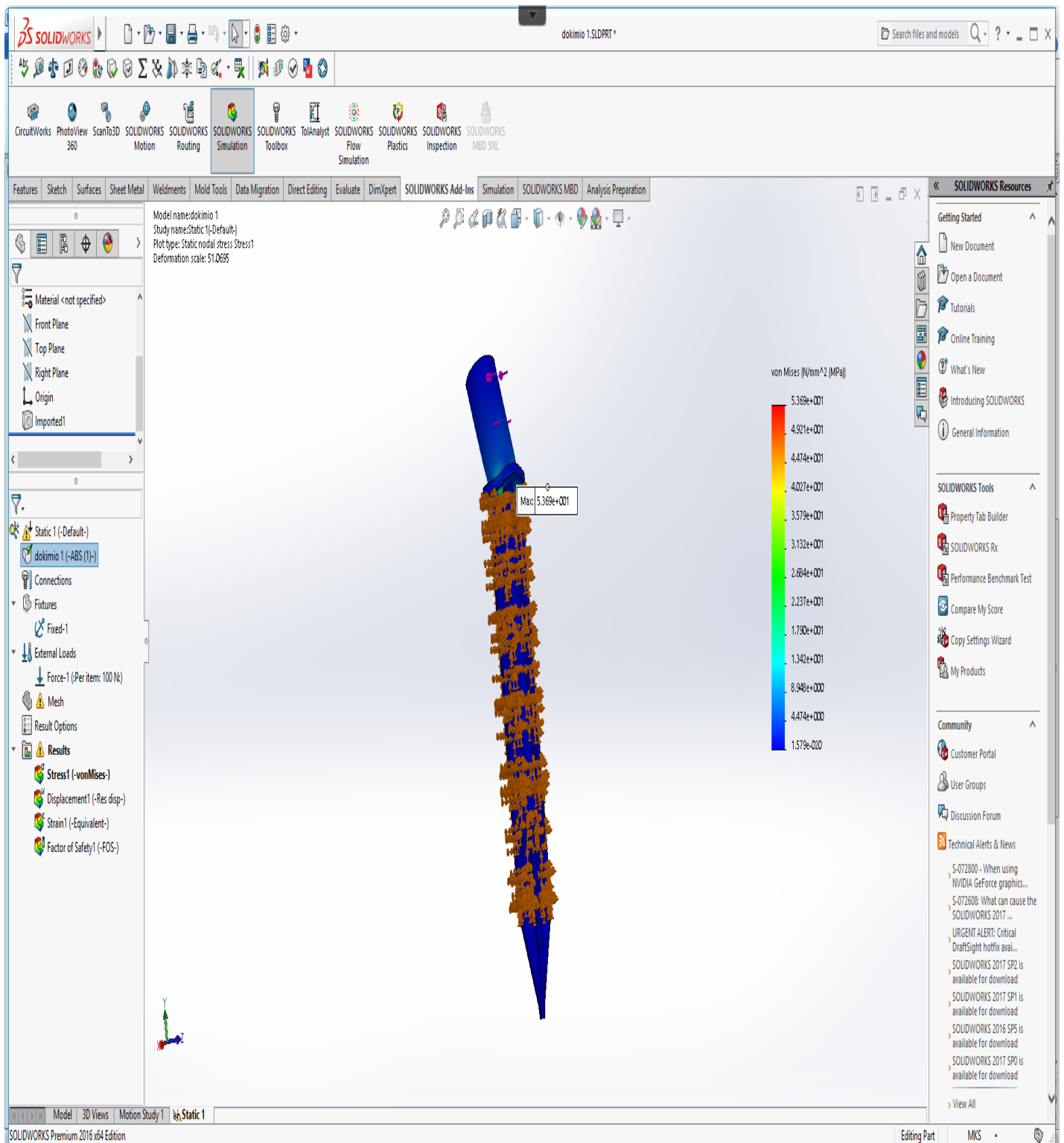
Εισαγωγή Δύναμης: Στη συνέχεια καθορίζεται η τιμή και το σημείο που ασκείται δύναμη από τον ηλιακό λαμπτήρα ($F = 100\text{N}$).



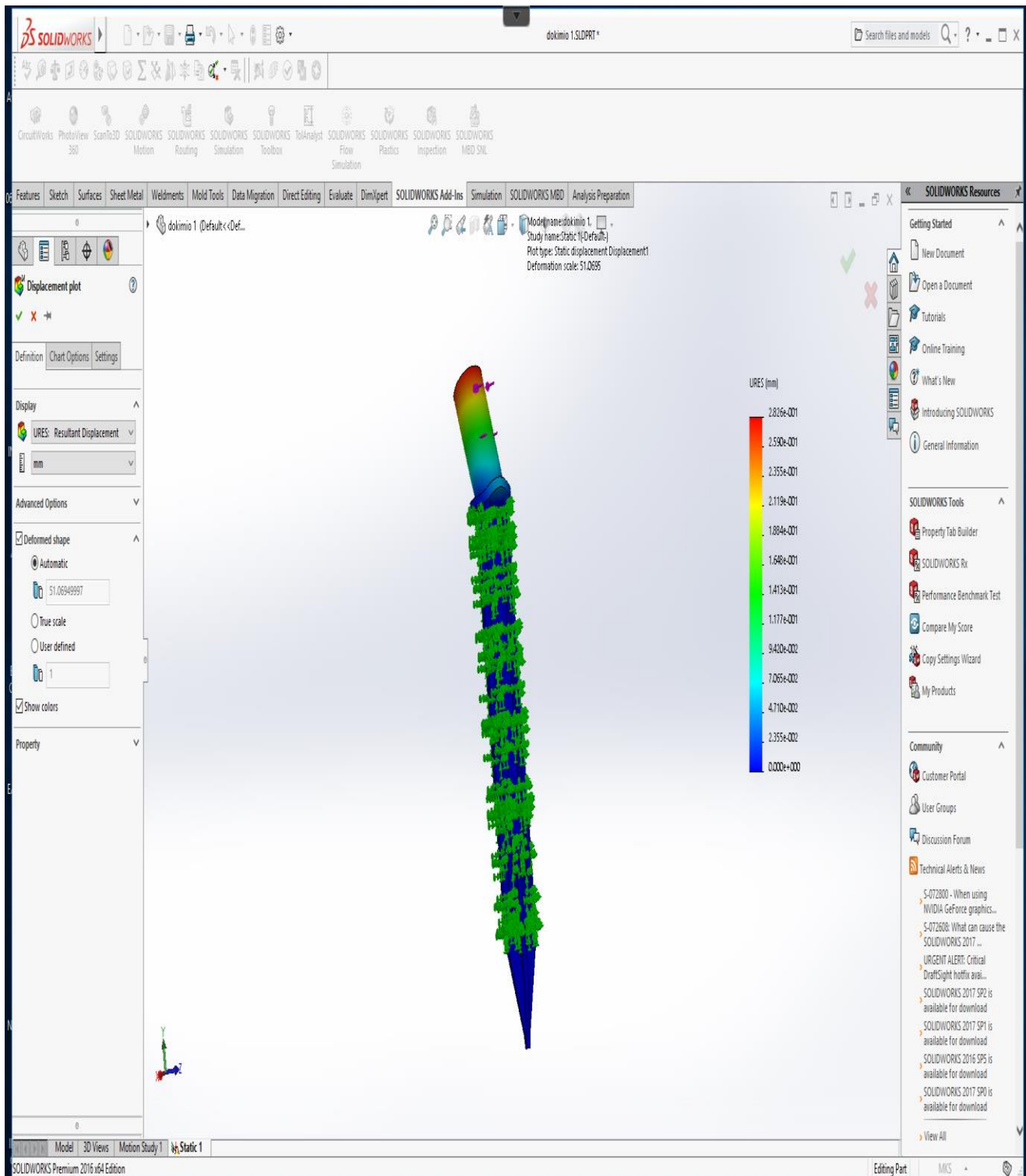
Εισαγωγή Υλικού: Έπειτα αντιγράφεται το υλικό ABS από την βιβλιοθήκη υλικών του solidworks δημιουργώντας ένα νέο με σκοπό την εισαγωγή τιμής στο πεδίο Yield Strength (YieldStrength = 40 N/m²).



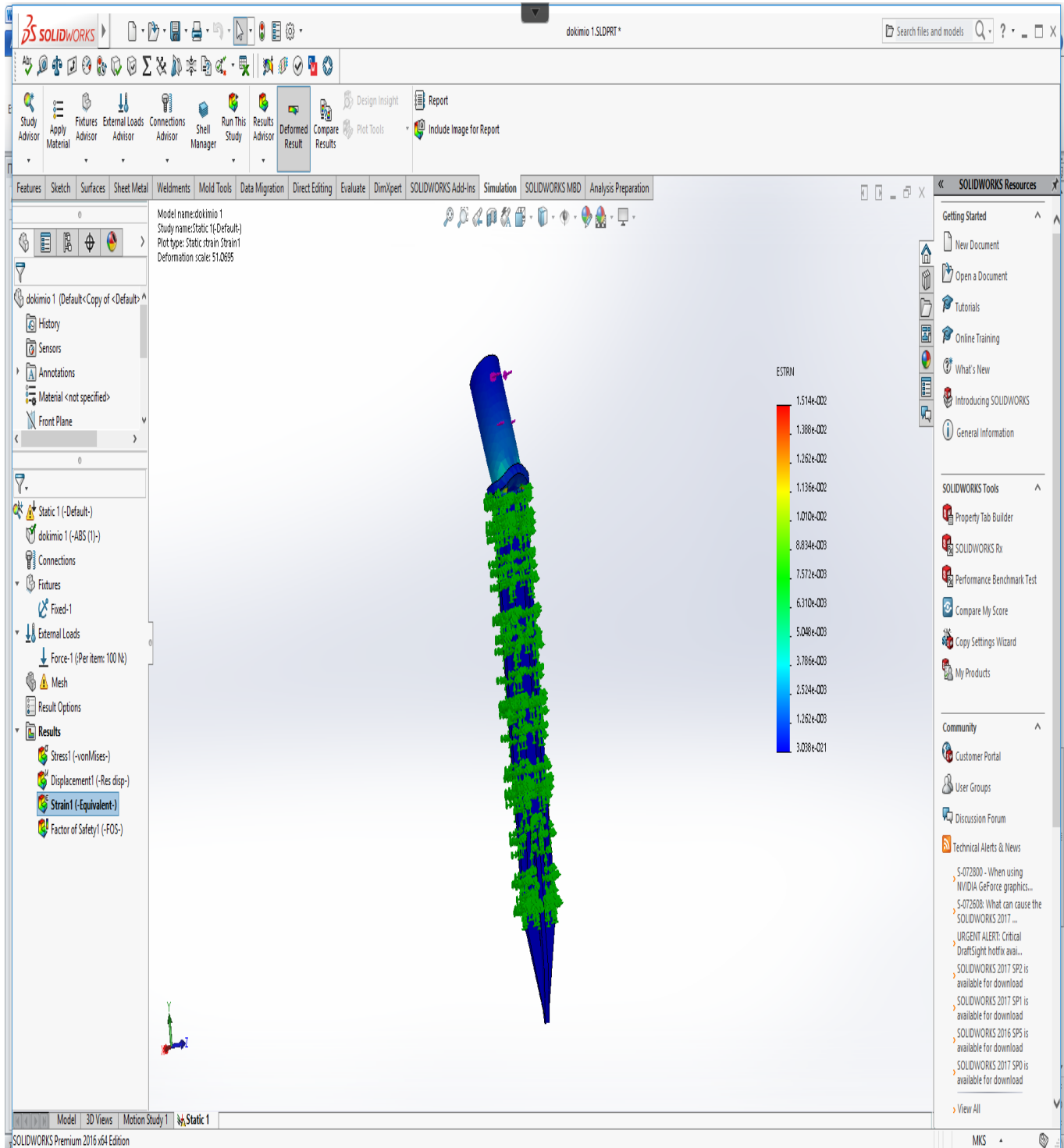
Stress: Πραγματοποιείται δοκιμή καταπόνησης στο αντικείμενο.



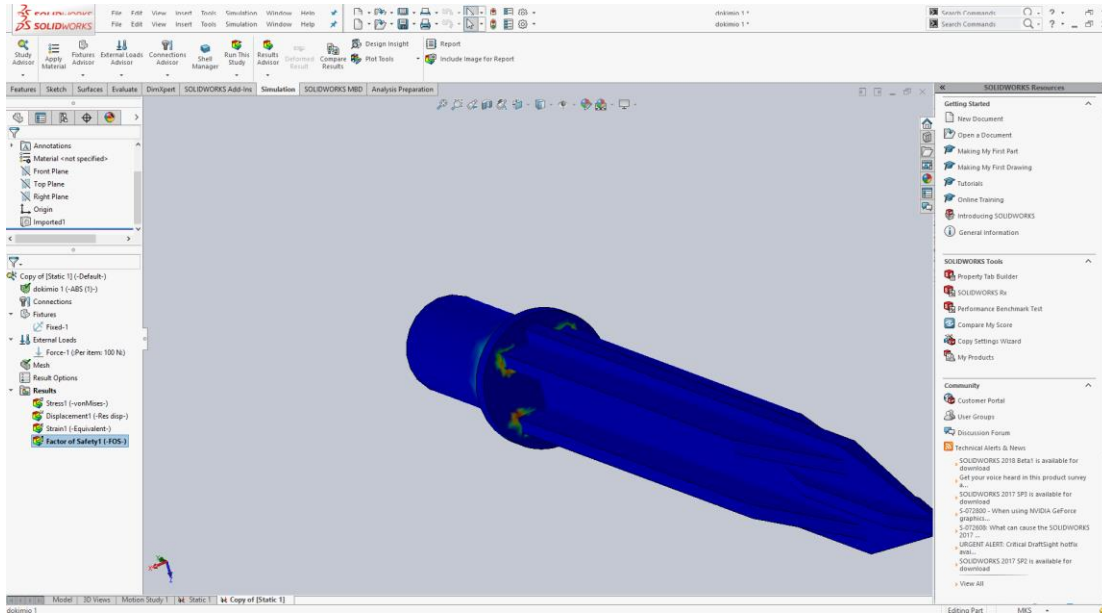
Displacement: Στη συνέχεια φαίνεται το σημείο που δέχεται την μεγαλύτερη μετατόπιση.



Strain: Με την εντολή strain εντοπίζουμε το σημείο όπου εμφανίζεται το διάγραμμα των ανηγμένων παραμορφώσεων



Factor Of Safety : Ακολουθεί η μελέτη του συντελεστή ασφαλείας του αντικειμένου.



5.3 Σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών προγραμμάτων σχεδιασμού

Ακολουθεί η σύγκριση μεταξύ των δύο προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τα 2 δοκίμιά μας.

Το SOLIDWORKS 2016 θεωρούμε ότι παρέχει περισσότερες δυνατότητες και επιλογές όσον αφορά στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (FEA Analysis) και κρίνεται περισσότερο αξιόπιστο στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Επίσης χρησιμοποιεί τον ίδιο κώδικα ανάλυσης FEA με το ANSYS , που θεωρείται το κορυφαίο από ειδικούς πρόγραμμα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και μπορεί ο χρήστης να κάνει «input» τα αρχεία ANSYS στο SOLIDWORKS.

Επίσης το πρόγραμμα παρέχει μεγάλη γκάμα εφαρμογών στην 3D σχεδίαση και ανάλυση πολύπλοκων γεωμετριών και το περιβάλλον είναι πολύ φιλικό στο χρήστη.

Παρουσιάζει κάποιες διαφορές στο «command line» σε σχέση με το Autodesk Inventor 2017, που θεωρείται πιο εύχρηστο.

Από την άλλη πλευρά το Inventor 2017 θεωρείται η πρώτη επιλογή σε 2D,3D ανάλυση καθώς παρέχει πληθώρα εργαλείων και επιλογών στο «advance dimension tool» με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές, αλλά θεωρείται πιο «αδύναμο» στην ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Στις εφαρμογές που σχεδιάσαμε και αναλύσαμε και με τα 2 προγράμματα και με βάση την μικρή μας εμπειρία δεν αντιμετωπίσαμε κανένα πρόβλημα και ήταν ιδιαίτερα βοηθητική η επιλογή του εγχειριδίου βοήθειας και στα 2 προγράμματα.

Γενικά και τα δύο προγράμματα θεωρούνται πολύ αξιόπιστα και κορυφαία στο χώρο και μόνο κάποιος χρήστης με εμπειρία δεκαετίας και στα δύο προγράμματα μπορεί να απαντήσει με σιγουριά ποιο από τα δύο θεωρείται καλύτερο. Εξάλλου μια τέτοια ερώτηση είναι σχετική, καθώς η απάντηση έχει να κάνει πάντα με το είδος της εφαρμογής και του προβλήματος προς επίλυση (2D ή 3D ανάλυση) , τη πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και την εμβάθυνση που θέλουμε να κάνουμε κάθε φορά. Συμπερασματικά η επιλογή του προγράμματος σχεδίασης εξαρτάται κάθε φορά από το πρόβλημα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

Κατά την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας συναντήσαμε αρκετές δυσκολίες, οι οποίες στο μεγαλύτερο ποσοστό τους οφείλονται στο μέγεθος των εξεταζόμενων αντικειμένων. Αρχικά στο πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των δυο αντικειμένων με σκοπό τον σχεδιασμό τους με CAD. Η μέτρηση του δεύτερου δοκιμίου (βάση ηλιακού λαμπτήρα) έγινε με παχύμετρο και δεν είχε ιδιαίτερες δυσκολίες, καθώς το αντικείμενο δεν παρουσίαζε μεγάλη πολυπλοκότητα. Η μέτρηση του πρώτου δοκιμίου (εξάρτημα από καζανάκι) εξελίχθηκε σχεδόν αδύνατη με παχύμετρο καθώς και με 3D scanner, αφού το αντικείμενο ήταν αρκετά μικρό σε μέγεθος και ιδιαίτερα πολύπλοκο στην μορφολογία του. Έτσι καταλήξαμε στην επιλογή ενός απλού scanner-εκτυπωτή (πολυμηχάνημα), όπου πραγματοποιήθηκε scanning του αντικειμένου και μέτρησή του σε μιλιμετρέ χαρτί.

Στην συνέχεια προχωρήσαμε στον σχεδιασμό των αντικειμένων επιλέγοντας δύο διαφορετικά σχεδιαστικά προγράμματα για κάθε αντικείμενο. Το πρώτο αντικείμενο (εξάρτημα από καζανάκι) σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα Solidworks 2016 και το δεύτερο (βάση ηλιακού λαμπτήρα) με το πρόγραμμα Inventor Autodesk 2017 με σκοπό τη σύγκρισή τους. Έπειτα με τις κατάλληλες εντολές στα σχεδιαστικά προγράμματα φτάσαμε στη 3D αποτύπωση των αντικειμένων μας. Ακολούθησε η υπολογιστική τους προσομοίωση με επιλογή κατάλληλων επιφανειών στήριξης αλλά και τιμών εξωτερικής φόρτισης. Στη συνέχεια και αφού επιλέξαμε το κατάλληλο υλικό, κάναμε δοκιμή καταπόνησης και λάβαμε το διάγραμμα με τις μετατοπίσεις και τις ανηγμένες παραμορφώσεις με ανάλυση μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για να προσδιορίσουμε τα επικίνδυνα σημεία. Τέλος ακολούθησε η μελέτη για την επιλογή του συντελεστή ασφαλείας και για τα 2 δοκίμια.

Καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το πρόγραμμα Inventor Autodesk 2017 ήταν πιο εύχρηστο, καθώς διαθέτει πληθώρα εντολών και αναλυτική επεξήγηση της κάθε εντολής. Παρόλα αυτά οι υπολογισμοί με χρήση πεπερασμένων στοιχείων, των καταπονήσεων των αντικειμένων, πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα Solidworks 2016 καθώς η χρηστικότητά του στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων μας φάνηκε αρκετά αξιόλογη. Ειδικότερα με τη βοήθεια του module (εργαλείου) “*Simulation Express Analysis Wizard*” του Solidworks 2016, πραγματοποιείται ανάλυση καταπονήσεων καθοδηγούμενη από βοηθητικό οδηγό βήμα προς

βήμα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων, το κέντρο των καταπονήσεων συμπίπτει με το σημείο των αντικειμένων μας και η περιοχή εμφάνισης μέγιστης τάσης είναι στο σημείο θραύσης του αντικειμένου κατά τη λειτουργία του.

Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών, η οριζόμενη δύναμη των 100 N δεν ήταν αρκετή για να επιφέρει τη θραύση τους. Οπότε συμπεραίνουμε ότι αυτή προήλθε από κόπωση λόγω της χρόνιας χρήσης για το πρώτο δοκίμιο. Πιο συγκεκριμένα για το πρώτο δοκίμιο ο συντελεστής ασφαλείας επιλέχθηκε σε πολύ χαμηλή τιμή, της τάξης του $\nu=0,001$, ενώ για το δεύτερο δοκίμιο επιλέχθηκε στη τιμή του $\nu=5$. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε ότι για ασφάλεια ο μηχανικός χρησιμοποιεί το λεγόμενο συντελεστή ασφαλείας, ο οποίος είναι πάντοτε μεγαλύτερος της μονάδας, ώστε να ελαττωθεί η πιθανότητα αστοχίας υλικού σε περίπτωση καταπόνησης που θα ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπτή λόγω βλάβης, λάθους ή ατυχήματος. Επομένως για το δεύτερο δοκίμιο η τιμή επιλογής του συντελεστή ασφαλείας ($\nu=5 >1$) μας οδηγεί στο συμπέρασμα της επιτυχημένης επιλογής του υλικού του δοκιμίου σε σχέση με τη τιμή της εξωτερικής καταπόνησης σε αντίθεση με το πρώτο δοκίμιο και τη πολύ χαμηλή τιμή του ($\nu=0,001 <1$), που δηλώνει την αποτυχία επιλογής του υλικού σε σχέση με την εξωτερική τιμή της δύναμης.

Τέλος πραγματοποιήθηκε προσπάθεια παραγωγής των αντικειμένων με χρήση προσθετικής κατεργασίας σε τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου (CubePro 3D Printer). Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας εκτύπωσης διαπιστώθηκε ότι η παραγωγή των αντικειμένων δεν ήταν εφικτή, λόγω του πολύ μικρού μεγέθους και της πολυπλοκότητας του σχήματος τους. Μια λύση που θα μπορούσε να προταθεί για το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η χρήση εκτυπωτή υγρής ρητίνης που πετυχαίνει μέγιστη ανάλυση σε πολύ μικρά αντικείμενα.

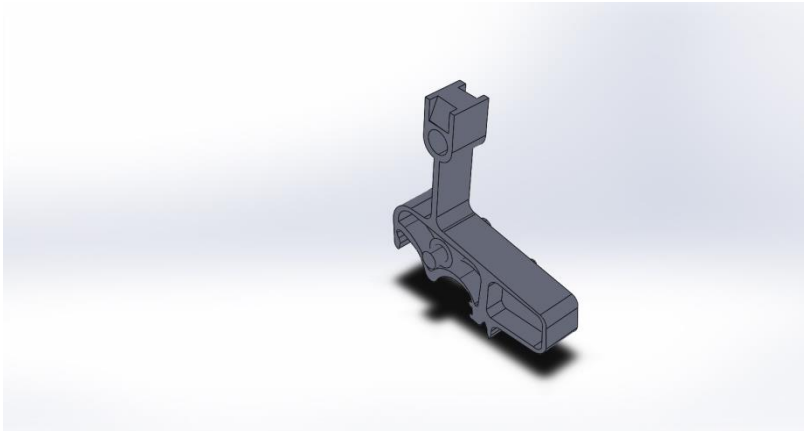
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] K. A. Ingle, “Reverse Engineering”, McGraw-Hill, Inc.,1994
- [2] Νικόλαος Μπιλάλης και Εμμανουήλ Μαραβελακης , “Συστήματα CAD/CAM και Τρισδιάστατη μοντελοποίηση”, Εκδόσεις ΚΡΙΤΙΚΗ,2009
- [3] Gergely Erdelyi, February 2002, Introduction to Reverse Engineering
- [4]Bathe K.J. Finite Element Procedures. Prentice Hall Inc, New Jersey, 1996.
- [5]Hughes O. Ship Structural Design: A rationally-based, computer-aided optimization procedure. SNAME, New York, 1996.
- [6] Γ.Ι.Τσαμασφύρος και Ε.Ε.Θεοτόκογλου, “Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων Ι”, Ε.Μ.Π.,Αθήνα 2000,
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_engineering
- [8] <http://www.3dsystems.com/shop/cubepro>
- [9] <http://www.resinex.gr/typon-polymeroy/abs.html>
- [10] <http://www.engineering-dictionary.org/>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΔΟΚΙΜΙΟ 1

Εξαγωγή των αποτελεσμάτων από το simulation 1



Simulation of VER1

Designer: Solidworks

Study name: SimulationXpress Study

Analysis type:Static

Table of Contents

Model Information 100

Material Properties 101

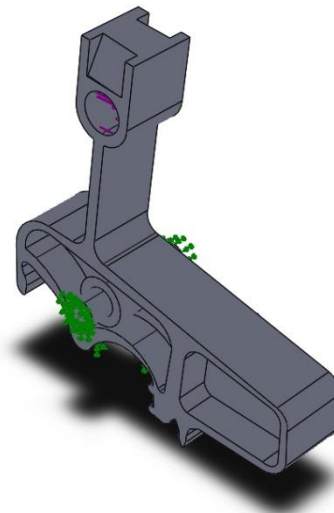
Loads and Fixtures 102

Mesh information 102

Study Results 104

Conclusion

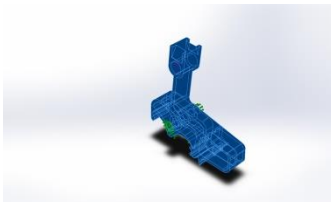
Model Information



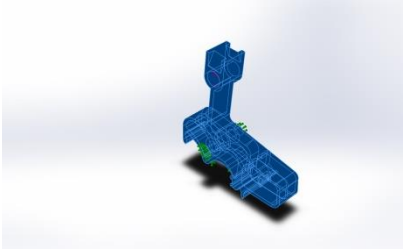
Model name: DOKIMIO VER1

Current Configuration: Default

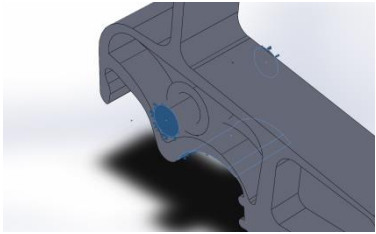
Solid Bodies

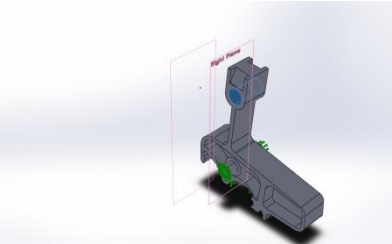
Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	
Boss-Extrude44 	Solid Body	Mass:3840.59 kg Volume:3.76528 m ³ Density:1020 kg/m ³ Weight:37637.8 N	

Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<p>Name: ABS</p> <p>Model type: Linear Elastic Isotropic</p> <p>Default failure criterion: Unknown</p> <p>Yield strength: 4e-005 N/mm²</p> <p>Tensile strength: 30 N/mm²</p>	<p>SolidBody 1(Boss-Extrude44)(D OKIMIO VER1)</p>

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Fixed-1		Entities: 3 face(s) Type: Fixed Geometry

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Reference: Right Plane Type: Apply force Values: ---, ---, 22.4809 lbf

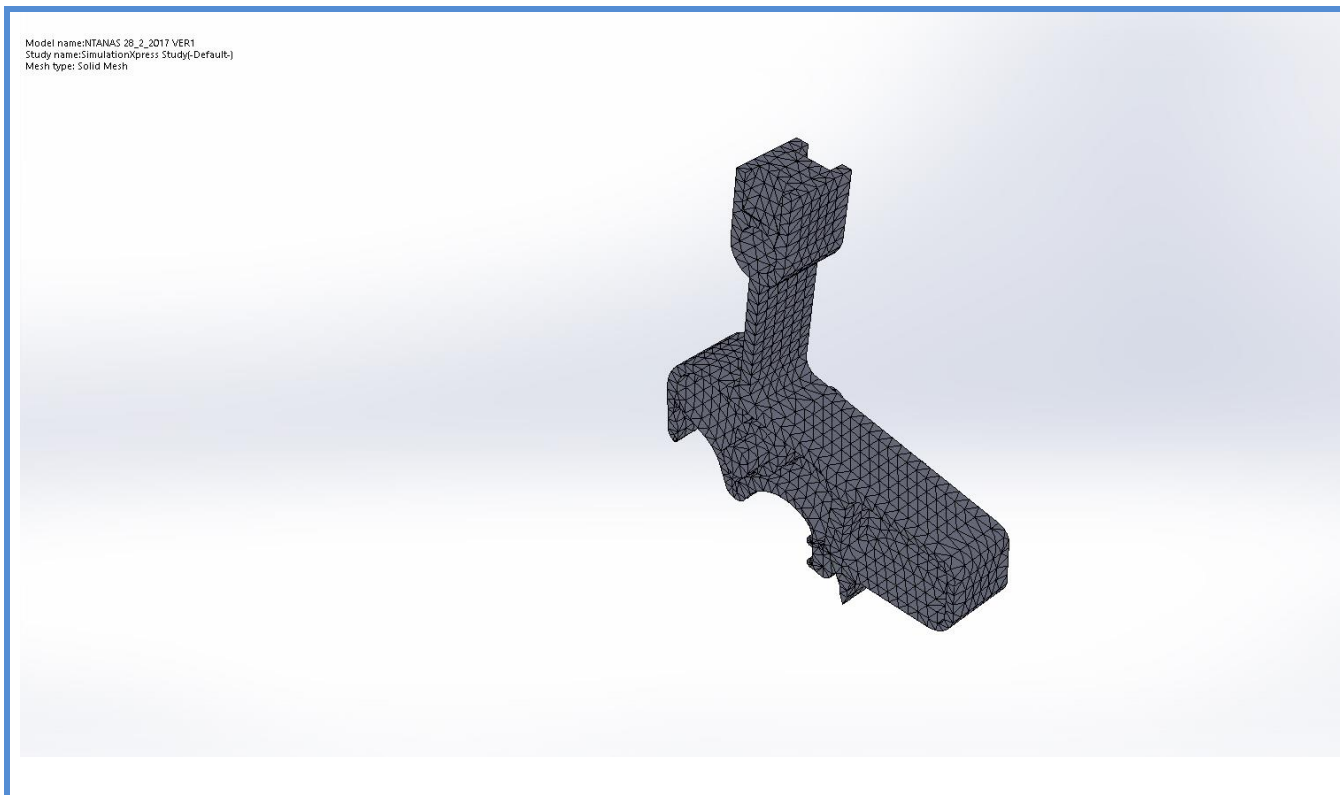
Mesh information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off

Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Element Size	0.155566 m
Tolerance	0.00777828 m
Mesh Quality	High

Mesh information - Details

Total Nodes	19109
Total Elements	10557
Maximum Aspect Ratio	15.967
% of elements with Aspect Ratio < 3	96.1
% of elements with Aspect Ratio > 10	0.18
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:01



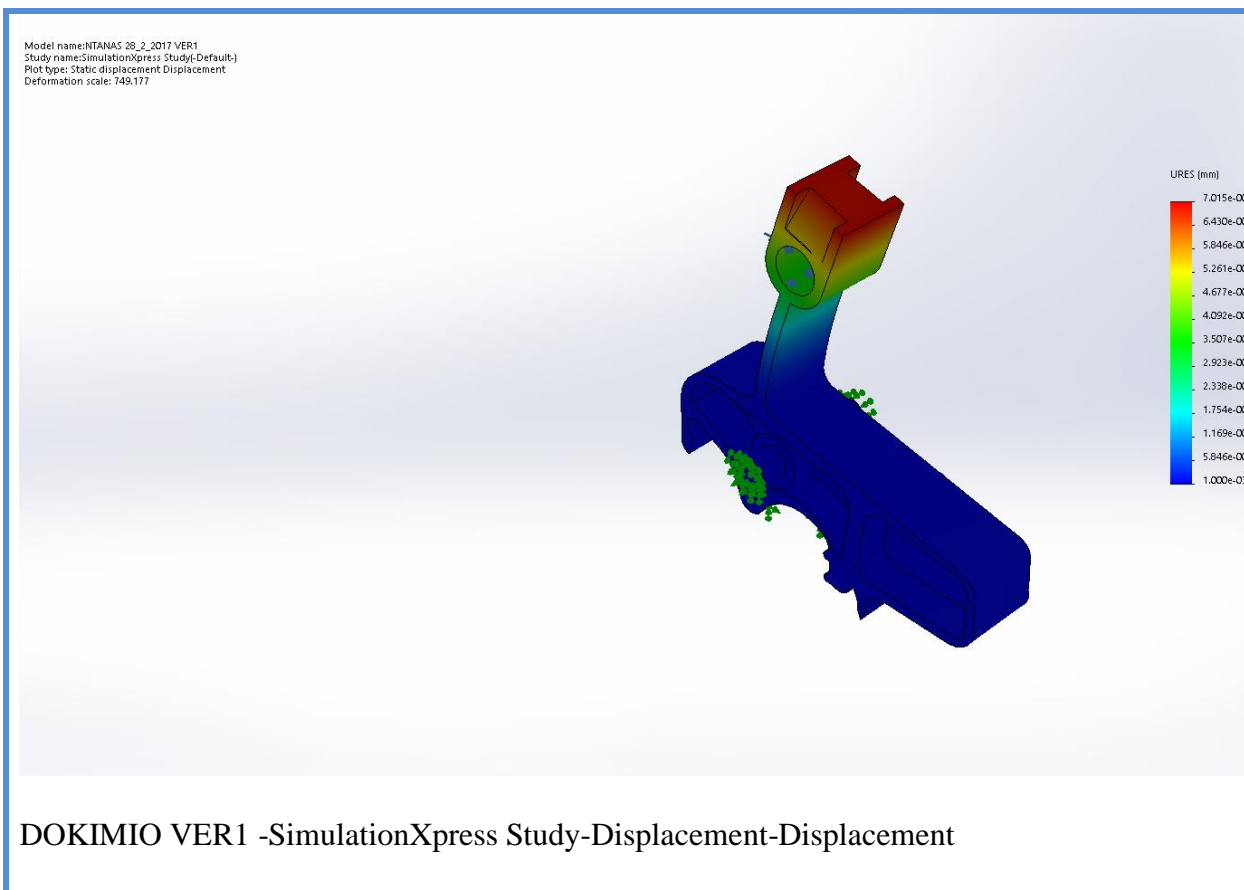
Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress	VON: von Mises Stress	1.65611e-007 N/mm ² (MPa) Node: 18994	0.0450336 N/mm ² (MPa) Node: 11219

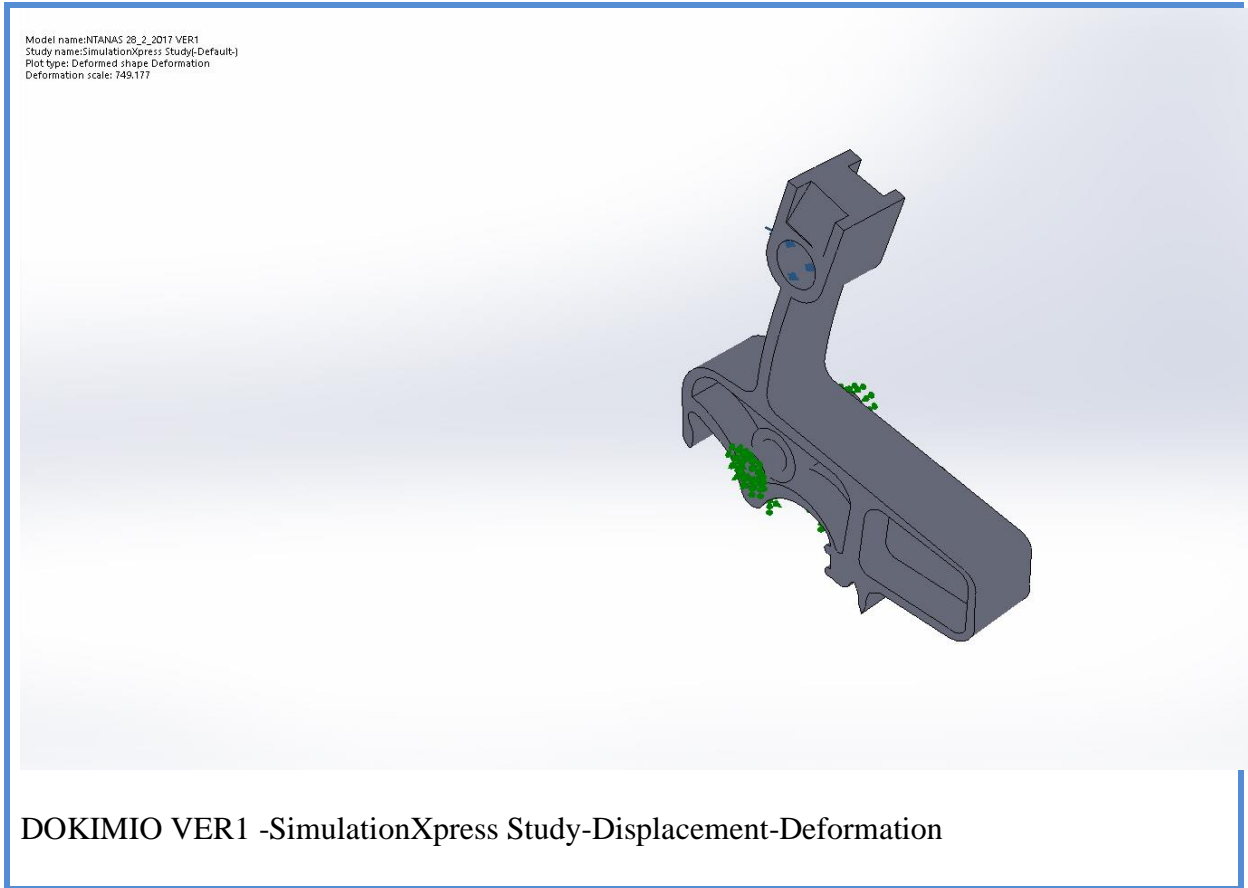


DOKIMIO VER1 -SimulationXpress Study-Stress-Stress

Name	Type	Min	Max
Displacement	URES: Resultant Displacement	0 mm	0.7014
		Node: 39	95
			mm
			Node:
			409

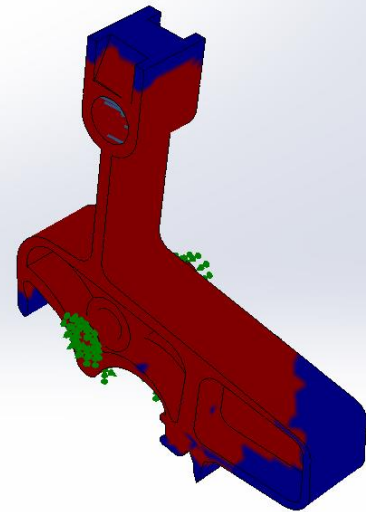


Name	Type
Deformation	Deformed shape



Name	Type	Min	Max
Factor of Safety	Max von Mises Stress	0.0008882 26 Node: 11219	241.53 Node: 18994

Model name: NTANAS_28_2_2017_VER1
 Study name: SimulationXpress: Study-(Default)
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety
 Criterion: Max von Mises Stress
 Red < FOS = 1 < Blue



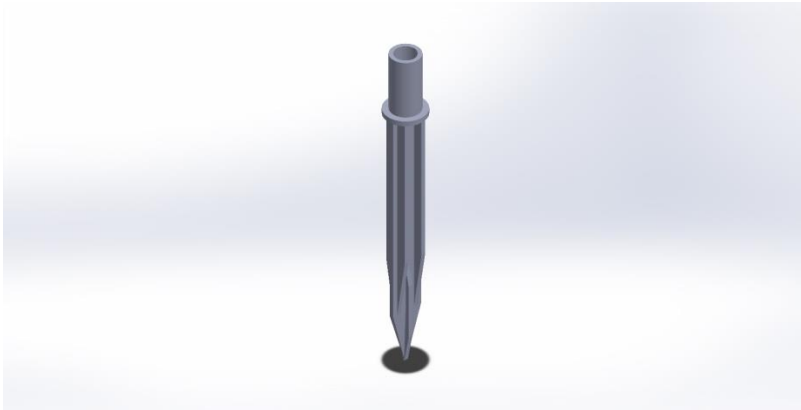
DOKIMIO VER1 -SimulationXpress Study-Factor of Safety-Factor of Safety

Conclusion**Forces Resulting In a Certain Factor of Safety**

$$\text{Current Factor of Safety} \times \text{Current Force Applied} = \text{Force that will cause part to yield}$$

Forces Resulting In a Certain Factor of Safety

$$\text{Force that will cause part to yield} \div \text{Desired minimum factor of safety} = \text{Maximum force your part can handle}$$

ΔΟΚΙΜΙΟ 2**Εξαγωγή από Simulation 2**

Simulation of Part1

Designer: Solidworks

Study name: SimulationXpress Study

Analysis type:Static

Table of Contents

Model Information 111

Material Properties 112

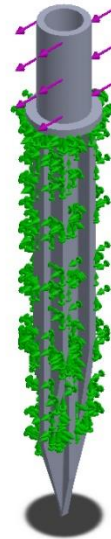
Loads and Fixtures 112

Mesh information 113

Study Results 115

Conclusion 120

Model Information

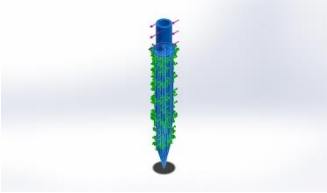


Model name: Part1

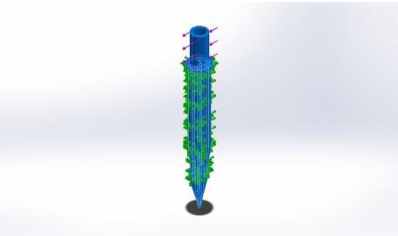
Current Configuration: Default

Solid Bodies

Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified


<p>Fillet1</p> 	<p>Solid Body</p>	<p>Mass:0.00793799 kg Volume:7.78235e-006 m³ Density:1020 kg/m³ Weight:0.0777923 N</p>	
--------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

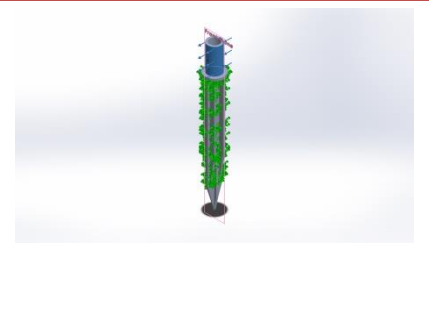
Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<p>Name: ABS 1</p> <p>Model type: Linear Elastic Isotropic</p> <p>Default failure criterion: Unknown</p> <p>Yield strength: 4e-005 N/mm²</p> <p>Tensile strength: 30 N/mm²</p>	<p>SolidBody 1(Fillet1)(Part1)</p>

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details

Fixed-1		Entities: 53 face(s) Type: Fixed Geometry
---------	-----------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		Entities: 1 face(s), 1 plane(s) Reference: Front Plane Type: Apply force Values: ---, ---, 100 N

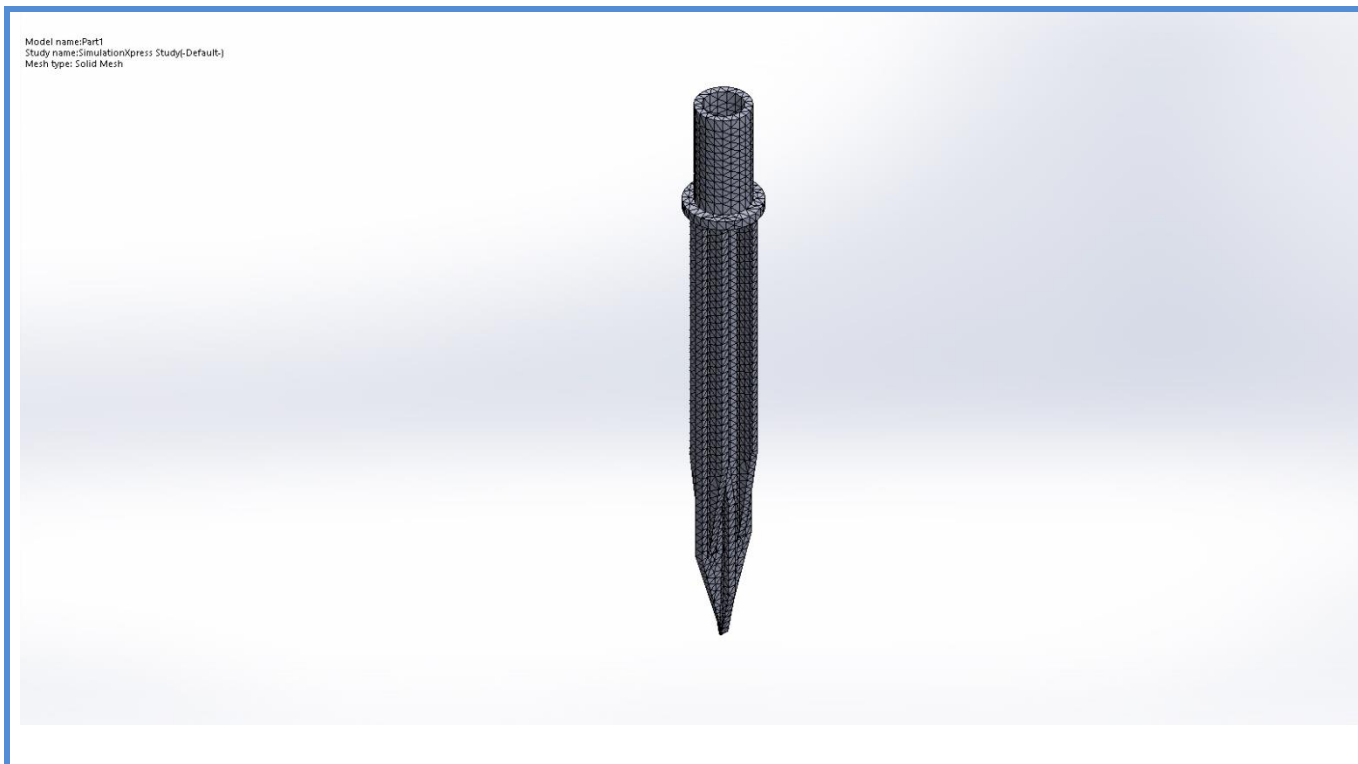
Mesh information

Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off

Jacobian points	4 Points
Element Size	0.00198246 m
Tolerance	9.91231e-005 m
Mesh Quality	High

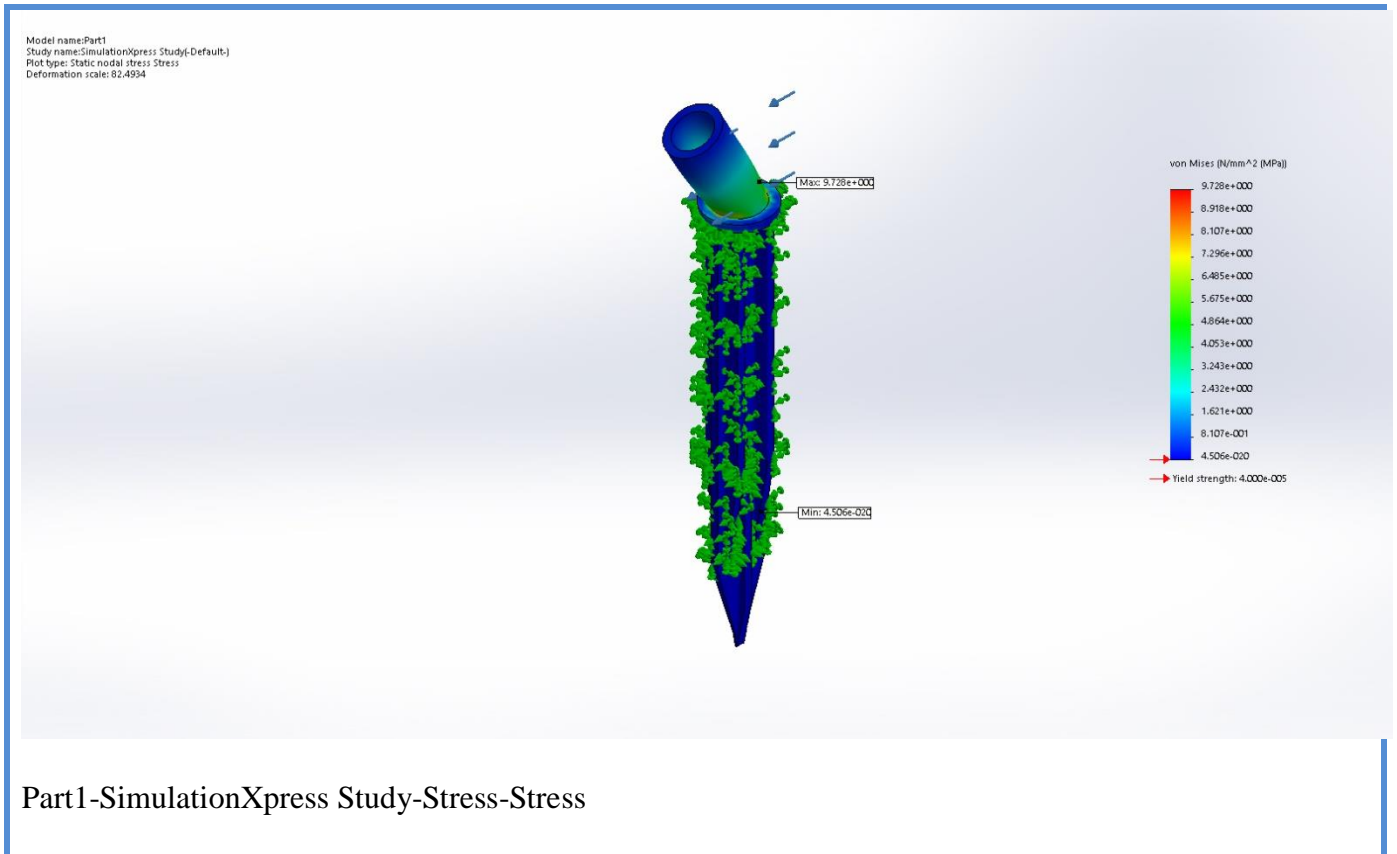
Mesh information - Details

Total Nodes	23233
Total Elements	13151
Maximum Aspect Ratio	13.299
% of elements with Aspect Ratio < 3	80.9
% of elements with Aspect Ratio > 10	0.0304
% of distorted elements(Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:02

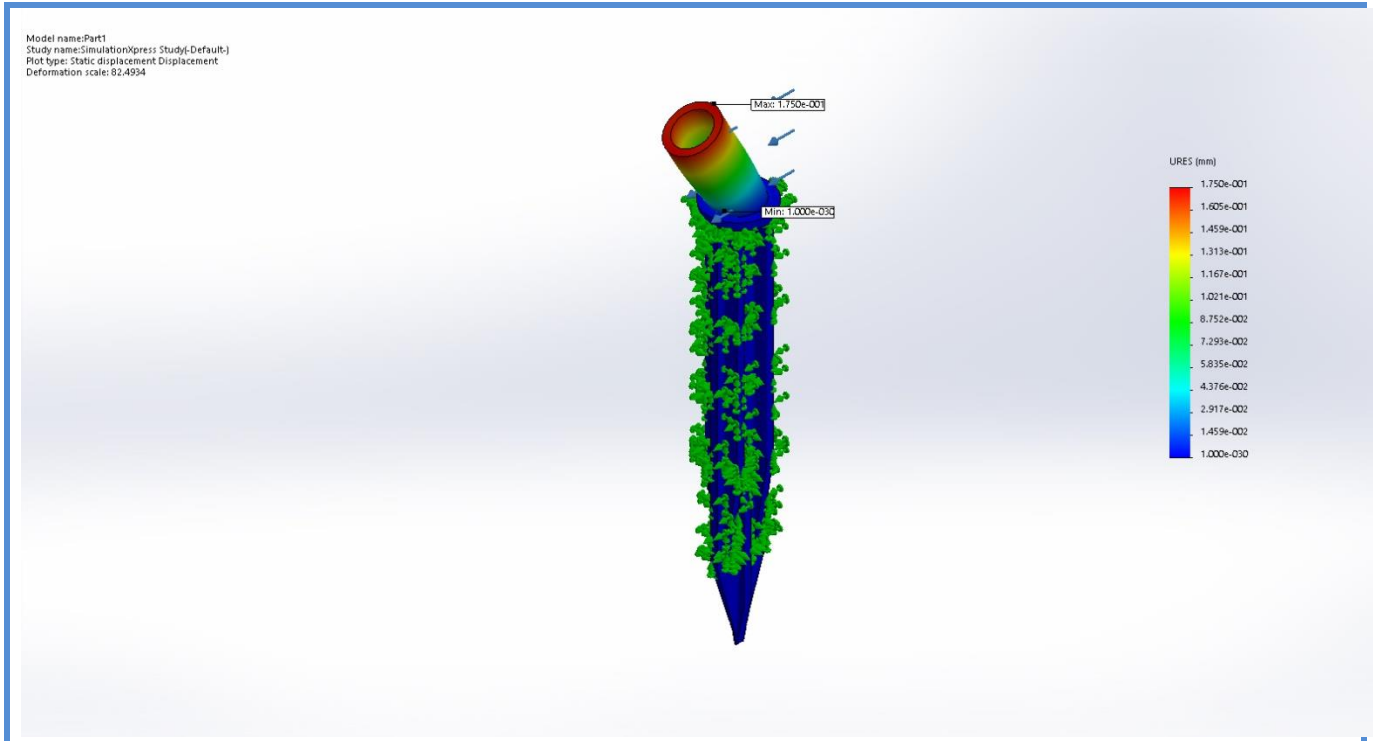


Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress	VON: von Mises Stress	4.50589e-020 N/mm ² (MPa)	9.72824 N/mm ² (MPa)
		Node: 13630	Node: 21235

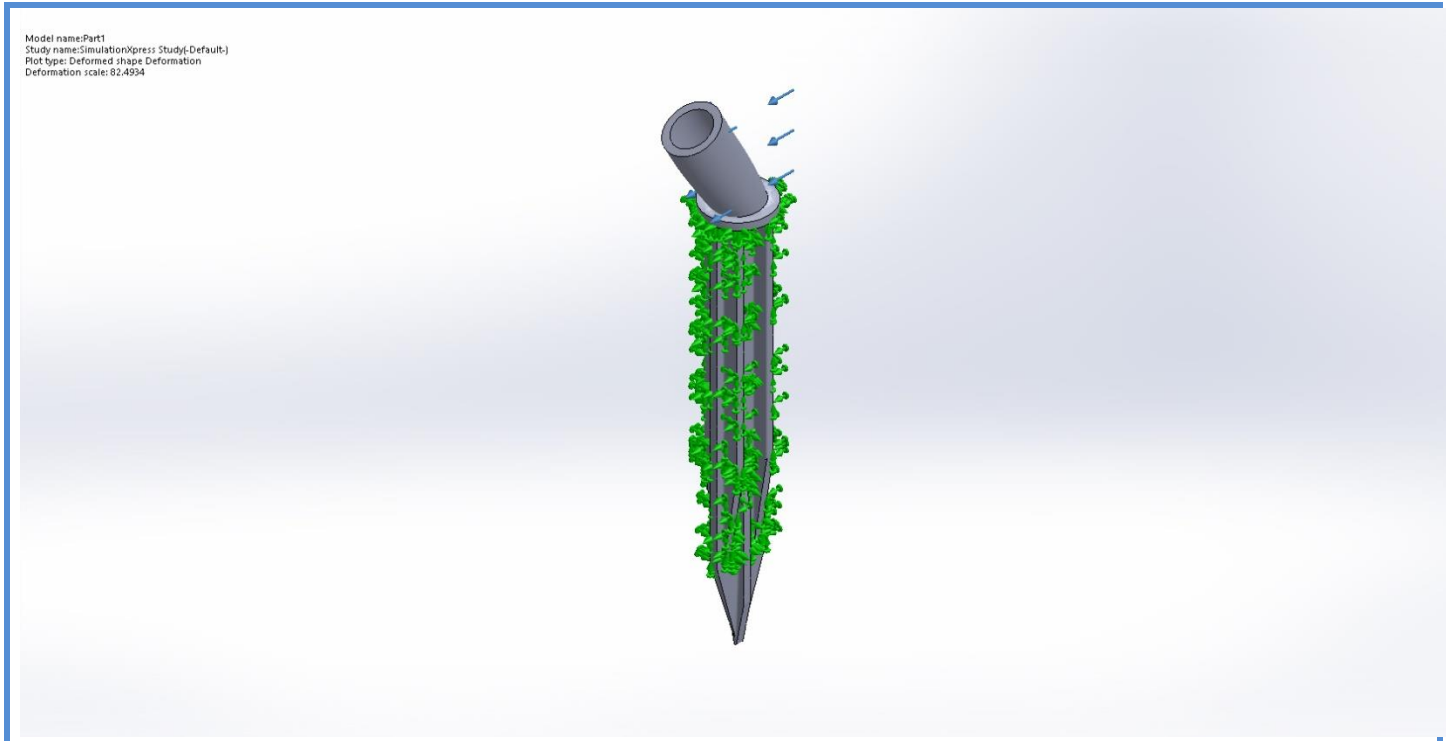


Name	Type	Min	Max
Displacement	URES: Resultant Displacement	0 mm	0.175037 mm
		Node: 357	Node: 253



Part1-SimulationXpress Study-Displacement-Displacement

Name	Type
Deformation	Deformed shape

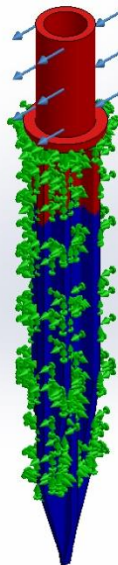


Part1-SimulationXpress Study-Displacement-Deformation

Name	Type	Min	Max
------	------	-----	-----

Factor of Safety	Max von Mises Stress	4.11174e-006	8.87727e+014
		Node: 21235	Node: 13630

Model name: Part1
 Study name: SimulationXpress Study-(Default-)
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety
 Criterion: Max von Mises Stress
 Red < FOS = 1 < Blue



Part1-SimulationXpress Study-Factor of Safety-Factor of Safety

Conclusion**Forces Resulting In a Certain Factor of Safety**

$$\text{Current Factor of Safety} \times \text{Current Force Applied} = \text{Force that will cause part to yield}$$

Forces Resulting In a Certain Factor of Safety

$$\text{Force that will cause part to yield} \div \text{Desired minimum factor of safety} = \text{Maximum force your part can handle}$$