

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ – ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΡΠΑΓΑΣ
ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντωνίου Κωνσταντίνος

A.M :2009010104

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμα:

τον καθηγητή μου, Δρ. Σταυρουλάκη Γεώργιο, που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Για την αμερίστη βοήθεια του και τη στήριξη του, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τους φίλους και συμφοιτητές τους οι οποίοι με στήριξαν στις δυσκολίες που βρέθηκαν μπροστά μου και κατάφερα να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Τέλος την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρονιά.

Περίληψη

Τα τελευταία χρονιά, η χρήση των ρομποτικών βραχιόνων στις βιομηχανίες αυξάνεται όλο και περισσότερο. Τα ρομποτικά συστήματα χρησιμοποιούνται σε μεγάλος εύρος εργασιών όπως η βαφή , η συναρμολόγηση , η τοποθέτηση , ο έλεγχος προϊόντων και οι δοκιμές.

Η συνεχής κατανάλωση πρώτων υλών έχει οδηγήσει την ανθρωπότητα στο να κατασκευάζει προϊόντα με υψηλές μηχανικές ιδιότητες και με τη λιγότερη δυνατή κατανάλωση πρώτης ύλης. Σε αυτό το σημείο εισάγεται η τυπολογική βελτιστοποίηση, μέσω της χρήση της οι μηχανικοί μπορούν να σχεδιάσουν και να αφαιρέσουν το υλικό το οποίο δεν είναι απαραίτητο για την χρήση του αντικειμένου.

Ο σχεδιασμός και η τυπολογική βελτιστοποίηση της άρπαγας του ρομποτικού βραχίονα που θα μελετήσουμε παρακάτω έγινε μέσω του προγράμματος Solidworks. Τα εξερχόμενα αποτελέσματα από το λογισμικό αποτέλεσαν βάση για την εύρεση της βέλτιστης μορφής της άρπαγας. Τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να αναδείξουν την αξία της εφαρμογή του βέλτιστου σχεδιασμού σε μεγάλο φάσμα εξαρτημάτων και κατασκευών.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή	6
--------------------	---

Κεφάλαιο 2

2.1 Ιστορική αναδρομή	8
2.2 Εφαρμογές ρομποτικής.....	9
2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ρομποτικών βραχιόνων.	10
2.4 Τύποι ρομποτικού βραχίονα.....	12

Κεφάλαιο 3

3.1 Διαδικασία Τοπολογικής Βελτιστοποίησης.....	15
3.2 Γενικευμένο Πρόβλημα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης.....	19
3.3 Μέθοδος Τοπολογικής Βελτιστοποίησης SIMP	20

Κεφάλαιο 4

4.1 Σχεδιασμός της Άρπαγα του βραχίονα.....	25
4.2 Σχεδιασμός και συναρμολόγηση του Βραχίονα.....	28

Κεφάλαιο 5

5.1 Επίλυση σε CAE λογισμικό.....	30
5.2 Ανάλυση άρπαγας στο Solidworks.....	30

Κεφάλαιο 6

6.1 Συμπεράσματα.....	51
-----------------------	----

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	52
-------------------	----

Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή

Βελτιστοποίηση και Προσθετική Κατασκευή στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος.

Στη σύγχρονη βιομηχανία, το όριο ζωής ενός προϊόντος έχει ελαττωθεί δραματικά, λόγω του υψηλού ανταγωνισμού, καθώς και των συνεχών εξελίξεων στους τομείς της τεχνολογίας και της επιστήμης, με αποτέλεσμα να έχει καθοριστικό ρόλο και να κρίνεται απαραίτητο η γρήγορη μετάβαση του προϊόντος στη μαζική παραγωγή από τη στιγμή που θα γίνει η σύλληψη της αρχικής ιδέας και η δημιουργία του πρωτοτύπου.

Στο παρελθόν για να φτάσουμε στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα η διαδικασία ήταν πολύ διαφορετική, καθώς η ανάπτυξη του προϊόντος βασιζόταν κυρίως στην εμπειρία την γνώση και την κρίση του μηχανικού . Επιπλέον, αποτελούνται από μία επαναλαμβανομένη διαδικασία δοκιμών, όπου οι αστοχίες γίνονταν αντιληπτές με μεγάλη καθυστέρηση σε αρκετές περιπτώσεις, κάποιες φορές ακόμα και στο στάδιο της μαζικής παραγωγικής διαδικασίας, ως αποτέλεσμα η επίτευξη του τελικού προϊόντος με τα βέλτιστα τεχνικά χαρακτηριστικά και απόδοση να χρειάζεται μεγάλα χρονικά διαστήματα με αυτά να φτάνουν από μήνες έως χρονιά. Παράλληλα σημαντικό κομμάτι στη διαδικασία παίρνει και η μέθοδος κατασκευής των εκάστοτε προτύπων ,ο οποίος πραγματοποιείται κυρίως από επιδέξιους τεχνίτες που χρησιμοποιούν όμως μεγάλης διάρκειας και εντατικής εργασίας τεχνικές κατασκευής.

Στις μέρες μας, η διαδικασία μαζικής παραγωγής και εισαγωγής ενός νέου προϊόντος στην αγορά μπορεί να γίνει με μεγαλύτερη ταχύτητα , με μικρότερο κόστος και έχοντας βέλτιστα σχεδιαστικά αποτελέσματα με αρκετά μεγάλη διαστασιολογική ακρίβεια, λόγω της ανάπτυξης που έχει προηγηθεί τα τελευταία είκοσι χρονιά στην τεχνολογία και το κόστος των προσωπικών ηλεκτρονικών υπολογιστών, όσον αφορά τις υπολογιστικές ικανότητες και την ταχύτητα επεξεργασίας δεδομένων σε συνδυασμό με την βελτιστοποίηση των σχεδιαστικών/λογισμικών πακέτων που βασίζονται στη χρήση των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΠΣ). Οι συγκεκριμένες συνθήκες έδωσαν ώθηση σε πολλούς μηχανικούς να επενδύσουν σε τεχνικές Δομικής Βελτιστοποίησης (Structural Optimization) στον τομέα της σχεδίασης κατά τη διαδικασία ανάπτυξης καινούριων προϊόντων, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε εύρη φάσμα στην αγορά την τελευταία δεκαετία και φαίνεται να παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα και δυνατότητες.

Η Δομική Βελτιστοποίηση είναι ένα σημαντικό εργαλείο στη διαδικασία σχεδιασμού δομών που υπόκεινται σε συγκεκριμένες φορτίσεις και περιορισμούς, το οποίο έχει σκοπό στη βέλτιστη λύση σχεδιασμού για δημιουργία ελαφρών κατασκευών, καλύπτοντάς παράλληλα κριτήρια και περιορισμούς που είναι ορισμένα από τον σχεδιαστή/μηχανικό που αφορούν την λειτουργικότητα, την αντοχή των τελικών προϊόντων που οδηγούνται στην αγορά . Μία από τις πιο συνήθεις μεθόδους Δομικής Βελτιστοποίησης είναι η Τοπολογική Βελτιστοποίηση (Topology Optimization). Η μέθοδος αυτή σήμερα είναι ενσωματωμένη στα περρισότερα εμπορικά υπολογιστικά λογισμικά (CAE software), τα οποία κυκλοφορούν ευρέως στην αγορά.

Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι συνηθώς οι βέλτιστες λύσεις που δίνονται μέσω της χρήσης της μεθόδου Τοπολογικής Βελτιστοποίησης (TB) οδηγούν σε αντικείμενα τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή δομική απόδοση έχοντας το ελάχιστο δυνατό βάρος αλλά η πολυπλοκότητα τα κάνει αδύνατον να κατασκευαστούν από τις κλασσικές διαδικασίες κατασκευής όσον αφορά την τελική γεωμετρία τους. Επομένως, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η ικανότητα κατασκευής (manufacturability) των δοκιμίων που προκύπτουν είναι μία αντίστοιχα σημαντική παράμετρος που πρέπει να συμπεριληφθεί στη διαδικασία .

Η συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία της Προσθετικής Κατασκευής, κοινώς γνωστή και ως Τρισδιάστατη Εκτύπωση, δίνει λύση σε αυτό το ζήτημα, καθώς έχει αυξήσει σε σημαντικό βαθμό τα όρια της κατασκευασιμότητας. αυτή βασίζεται στη συνεχόμενη πρόσθεση στρώσεων υλικού της μίας πάνω στην άλλη απευθείας από κάποιο CAD μοντέλο, δίνοντας τη δυνατότητα δημιουργίας αρκετά πολύπλοκων γεωμετρικών κατασκευών που δεν αυξάνουν όμως το κόστος της εκάστοτε τελικής δομής του προϊόντος. Επομένως, η δυνατότητα που δίνει η τεχνολογία της Προσθετικής Κατασκευής για σχεδιαστική ελευθερία κάνει εφικτή τη δημιουργία δοκιμίων και συναρμογών, τα οποία προέρχονται από την TB και έχουν θεωρητικά το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα.

Ο συνδυασμός της Τοπολογικής Βελτιστοποίησης ως εργαλείο σχεδιασμού σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Προσθετικής Κατασκευής ως μεθόδου κατασκευής επιτρέπει να επέλθει μία νέα επανάσταση στον σχεδιασμό και στην κατασκευή νέων πρωτοτύπων προϊόντων για τη σύγχρονη βιομηχανία και για αυτό το λόγο αποτελεί αντικείμενο εκτενής μελέτης τα τελευταία χρόνια σε διάφορα πεδία εφαρμογής, όπως π.χ. στην ιατρική, αεροδιαστημική, αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, κ.ά.

Κεφάλαιο 2

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η λέξη ρομπότ πηγάζει από το robota της σλάβικης γλώσσας και σημαίνει εργασία. Η λέξη καθιερώνει τη σημερινή της σημασία μέσα από το θεατρικό έργο "R.U.R." (Rossum's Universal Robots).

Από τα πρώτα ρομπότ που γνωρίσαμε σαν ανθρωπότητα μέσα από την λογοτεχνία είναι ο Ταλως από την ελληνική μυθολογία ως φύλακα του βασιλιά της Κρήτης Μίνωα και ήταν κατασκευασμένος από τον θεό Ήφαιστο. Στην επιστημονική φαντασία τα ρομπότ εμφανίζονται να έχουν ανθρωπόμορφη μορφή και ονομάζονται ανδροειδή.

Σπουδαία θέση στη συνεισφορά στη διάδοση της εννοίας των ρομπότ είχε ο Ισαάκ Ασίμωφ μέσα από το διήγημα του "Runaround" (1942) που διατύπωσε τους τρεις νομούς της ρομποτικής:

1. Το ρομπότ δε θα κάνει κακό σε άνθρωπο, ούτε με την αδράνειά του θα επιτρέψει να βλαφτεί ανθρώπινο όν.
2. Το ρομπότ πρέπει να υπακούει τις διαταγές που του δίνουν οι άνθρωποι, εκτός αν αυτές οι διαταγές έρχονται σε αντίθεση με τον πρώτο νόμο.
3. Το ρομπότ οφείλει να προστατεύει την ύπαρξή του, εφόσον αυτό δεν συγκρούεται με τον πρώτο και τον δεύτερο νόμο.

Η πρώτη εταιρία που άρχισε να παράγει ρομποτικά συστήματα είναι η Animation το 1956. Με το τέλος της δεκαετίας του 70 ξεκινούν οι πρώτες ιαπωνικές εταιρίες την είσοδο τους στην κατασκευή και πώληση αυτών στην αγορά.

Η ανακάλυψη τους αποτέλεσε την καινοτομία του 20ού αιώνα. Το 1961 κατασκευάζεται και μπαίνει σε λειτουργία το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ. Με την έλευση της δεκαετίας του 80 και την ανάπτυξη του κλάδου της τεχνητής νοημοσύνης δημιουργήθηκαν νέες προοπτικές στην εφαρμογή της ρομποτικής. Ωστόσο ουσιαστική εξέλιξη επιτεύχθηκε την δεκαετία του 90 όπου άρχισαν να εμφανίζονται τα πρώτα ζωόμορφα και ανθρωπόμορφα ρομπότ.

2.2 Εφαρμογές ρομποτικής

Αποτέλεσμα της ραγδαίας εξέλιξης του τομέα τα τελευταία χρονιά ότι οι εφαρμογές της ρομποτικής είναι πάρα πολλές. Αποτέλεσμα αυτής της εξέλιξης είναι η χρήση της από την βιομηχανία και τις επιστημονικές εφαρμογές έως την καθημερινή ζωή. Η ρομποτική εφαρμόζεται σήμερα στη :

- Στη βιομηχανία στις γραμμές παραγωγής σε ένα εργοστάσιο με την μορφή βραχιόνων σαν αυτό που σχεδιάστηκε για να κάνει μια συγκεκριμένη κίνηση επαναλαμβανόμενα.

- Στην ιατρική συμβάλει σε δύσκολες χειρουργικές επεμβάσεις όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια.
- Στις κατασκευαστικές εταιρίες από τον χειρισμό γερανών έως και εκτυπωτές 3D για την δημιουργία ενός ολοκληρώου κτηρίου.
- Στο τομέα της κτηνοτροφίας για σίτιση και πότισμα των ζώων.
- Στην εξερεύνηση του αφιλόξενου περιβάλλοντος διαστήματος για παράδειγμα το Curiosity που πλέον βρίσκεται στο κρατήρα Γκέιλ στον Άρη, για να διερευνήσει την γεωλογία και την ατμόσφαιρα του Άρη.
- Στην εξερεύνηση του βυθού της θάλασσας ο οποίος είναι ένα από τα πιο αντιξοά περιβάλλοντα στη γη.
- Στις οικίες πολιτών για καθαριότητα και ασφάλεια της οικείας.
- Στην διασκέδαση με χρήση drones στη φωτογραφεία και την βιντεοσκόπηση και τηλεχειριζόμενα οχήματα.
- Στη κινηματογραφική βιομηχανία όπου χρησιμοποιούμε τηλεχειριζόμενους γερανούς και drones με ενσωματωμένη κάμερα .

2.3 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των ρομποτικών βραχιόνων.

Στη καθημερινότητα των ανθρώπων η τεχνολογία αποτελεί κεντρικό πυλώνα της ζωή μας διότι μας επιτρέπει να δουλέψουμε πιο αποτελεσματικά με μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η αυτοματοποίηση είναι πλέον βασικό μέρος των ιδιωτικών επιχειρηματικών δραστηριοτήτων, μπορούμε να εκτιμήσουμε ότι τα ρομποτικά συστήματα σε μικρό χρονικό διάστημα από σήμερα θα αντικαταστήσουν την ανθρώπινη χειρωνακτική εργασία σε μεγάλο βαθμό. Η μεγάλη αυτοματοποίηση που έχει γίνει από τις ιδιωτικές επιχειρήσεις βρίσκονται στην αυγή της ρομποτικής εποχής, ας εξετάσουμε λοιπόν τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα που έχει επιφέρει η αλλαγή αυτή στις επιχειρήσεις.

• **Πλεονεκτήματα**

- 1) Το πρώτο και το σημαντικότερο θετικό της εγκατάστασης ρομποτικών συστημάτων στις βιομηχανικές παράγωγες είναι το κόστος τους. Τα ρομποτικά συστήματα έχουν μικρότερο κόστος από τους ανθρώπους και η συνεχιζόμενη παραγωγή και εγκατάσταση τους μειώνει το κόστος τους διαρκώς.
- 2) Τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να φέρουν εις πέρας συγκεκριμένες εργασίες με μεγαλύτερη ταχύτητα και πιο αποδοτικά από τους ανθρώπους, καθώς έχουν κατασκευαστεί για να εκτελούν τα καθήκοντα τους σε μεγαλύτερο επίπεδο ακρίβειας.

- 3) Οι άνθρωποι είναι υποχρεωτικό να κάνουν παύσεις, έχουν διάσπαση της προσοχής τους και ο ρυθμός εργασίας μειώνεται. Ενώ ένα ρομποτικό σύστημα μπορεί να συνεχίζει να ασταμάτητα και να αποδίδει στο 100%. Συνήθως αν αντικατασταθεί ένα άτομο σε μια διαδικασία της γραμμής παραγωγής με ένα ρομποτικό σύστημα, με τις ίδιες ώρες εργασίας, η παραγωγή θα αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό επειδή ένα ρομποτικό σύστημα έχει μεγαλύτερη αντοχή και δεν σταματά ποτέ.
- 4) Με την χρήση των ρομποτικών συστημάτων για την αυτοματοποίηση διαδικασιών που στο παρελθόν θα μπορούσαν να έχουν χρησιμοποιήσει περισσότερο χρόνο και πόρους, έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνει ραγδαία την απόδοση της γραμμής παράγωγης
- 5) Τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να λειτουργούν σε οποιαδήποτε περιβαλλοντική συνθήκη είτε αυτό είναι το αφιλόξενο περιβάλλον του διαστήματος, είτε υποθαλάσσια, αλλά και σε ακραίες θερμοκρασίες, θυελλώδεις ανέμους. Τα ρομποτικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλα τα σημεία που δραστηριοποιείται ο άνθρωπος ώστε να μην μειώσει τους κινδύνους από την έκθεση του σε μη ασφαλείς συνθήκες εργασίας.
- 6) Η τήρηση προτύπων ποιότητάς οδηγεί στην δημιουργία μαζικών προϊόντων υψηλότερης ποιότητας, έχοντας σαν αποτέλεσμα να μειωθεί το κόστος τους και να περιορίσει την ακρίβεια.

- **Μειονεκτήματα:**

- 1) Μπορεί τα ρομποτικά συστήματα να αυξάνουν την αποδοτικότητα στη παραγωγική διαδικασία σε πολλές εταιρίες, ωστόσο αυξάνουν συστηματικά όμως και το ποσοστό ανεργίας. Λόγω των ρομποτικών συστημάτων, η χειρωνακτική εργασία των ανθρώπων κρίνεται μη απαραίτητη, πλέον σε πολλές βιομηχανίες και σε γραμμές παραγωγής, έχοντας σαν αποτέλεσμα οι θέσεις εργασίας που χάνονται κάθε χρόνο να είναι πολλές και να φτωχοποιούνται ολόκληρες περιοχές που αναπτύχθηκαν γύρω από την βιομηχανική παραγωγή.
- 2) Ενώ τα ρομποτικά συστήματα είναι ιδανικά για να εκτελούν πολλές εργασίες, όπως συμβαίνει με οποιοδήποτε άλλο είδος τεχνολογίας, χρειάζονται μεγαλύτερη κατάρτιση και εξειδίκευση για την εξαρχής εγκατάστασή τους.
- 3) Τα τελευταία χρόνια ο αριθμός των ρομποτικών συστημάτων και οι χώροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυξήθηκαν με ραγδαίο ρυθμό. Ωστόσο, παρόλη την τεχνολογική εξελέγη των ημέρων υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί στη εργασίες που μπορούν

να εκτελέσουν. Μπορούν να φέρουν εις πέρας τα προκαθορισμένα καθήκοντά τους, αλλά συνήθως δεν μπορούν να διαχειριστούν μη βέλτιστες καταστάσεις.

4) Η εισαγωγή της τεχνητής νοημοσύνης στα ρομποτικά συστήματα, αύξησε την ικανότητα προσαρμογής τους σε μη βέλτιστες συνθήκες αλλά δεν μπορούν να φτάσουν το επίπεδο των ανθρώπων. Δεν βελτιώνονται στην εργασία που εκτελούν μέσω της εμπειρίας που θεωρητικά αποκτούν σε αντίθεση με του ανθρώπους που συνεχώς βελτιώνονται.

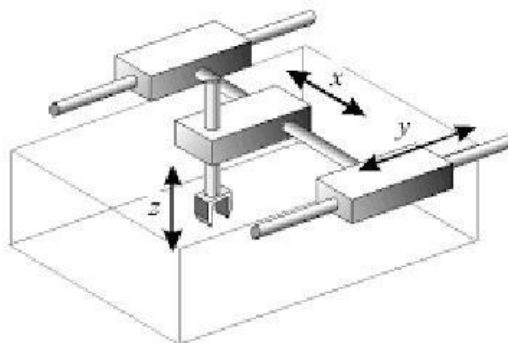
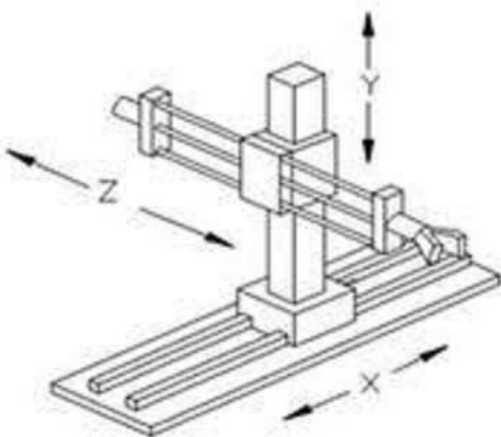
5) Μια βιομηχανική γραμμή παραγωγής εκτός από ρομποτικά συστήματα για την εκτέλεση των εργασιών, είναι απαραίτητη η χειρωνακτική εργασία. Η συνύπαρξη ρομποτικών συστημάτων και ανθρώπων κάνει την εκπαίδευση των εργαζομένων απαραίτητη για το πως θα συνυπάρξουν στους χώρους εργασίας.

6) Για την βέλτιστη λειτουργία των ρομποτικών συστημάτων απαιτείται συντήρηση σε τακτά χρονικά διαστήματα, και αναβαθμίσεις καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται.

2.4 Τύποι ρομποτικού βραχίονα.

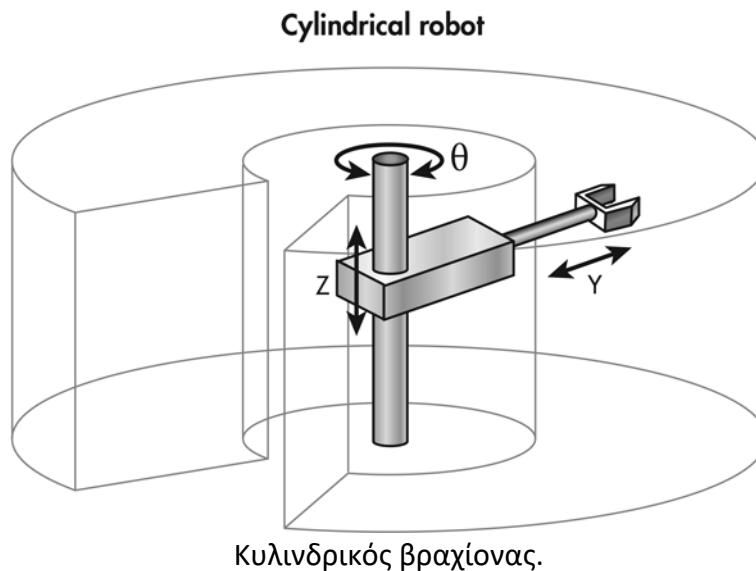
Ο συνδυασμός των αρθρώσεων που απαρτίζουν την συναρμογή των βραχιόνων και ο χώρος εργασίας που καταλαμβάνουν δημιουργούν τα είδη των ρομποτικών βραχιόνων. Υπάρχουν πέντε βασικά είδη βραχιόνων που χρησιμοποιούνται :

- 1) Καρτεσιανός βραχίονας/Βραχίονας Gantry: Αποτελείται από τρεις γραμμικούς άξονες ελέγχου οι οποίοι όταν τοποθετηθούν σχηματίζουν γωνία 90 μοιρών μεταξύ τους. Οι καρτεσιανοί βραχίονες όταν πραγματοποιούν κάποια εργασία καταλαμβάνουν χώρο σχήματος ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου και η εφαρμογή τους είναι συγκεκριμένη λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας κίνησης που έχει. Τα κυριότερα πεδία εφαρμογής είναι τα CNC μηχανήματα κατεργασίας, οι 3D εκτυπωτές, οι γερανογέφυρες και τα μηχανήματα εκτύπωσης τύπου plotter.

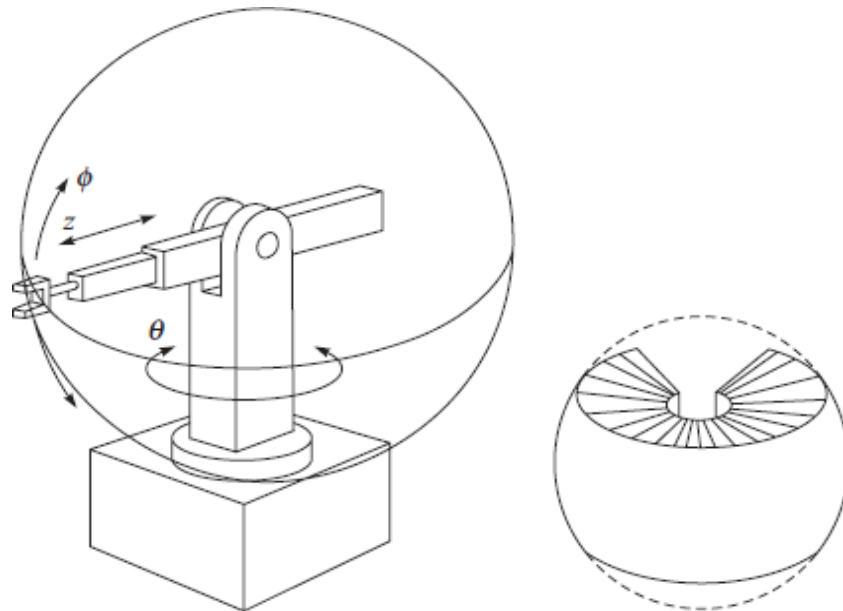


Καρτεσιανοί βραχίονες.

2) Κυλινδρικός βραχίονας: Αυτός το είδος ρομποτικού βραχίονα έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας. Ο βραχίονας κάνει δύο γραμμικές κινήσεις που σχηματίζουν 90 μοίρες μεταξύ τους, και μια κίνηση περιστροφής στην βάση του βραχίονα. Οι κυλινδρικοί βραχίονες όταν πραγματοποιούν κάποια εργασία καταλαμβάνουν χώρο που είναι κυλινδρικός και το σημαντικότερο του μειονέκτημα είναι ότι βρίσκεται εντός του χώρου εργασίας. Στις παραγωγικές διαδικασίες το χρησιμοποιούμε σε εργασίες συγκόλλησης, συναρμολόγησης μεταφοράς αντικειμένων.

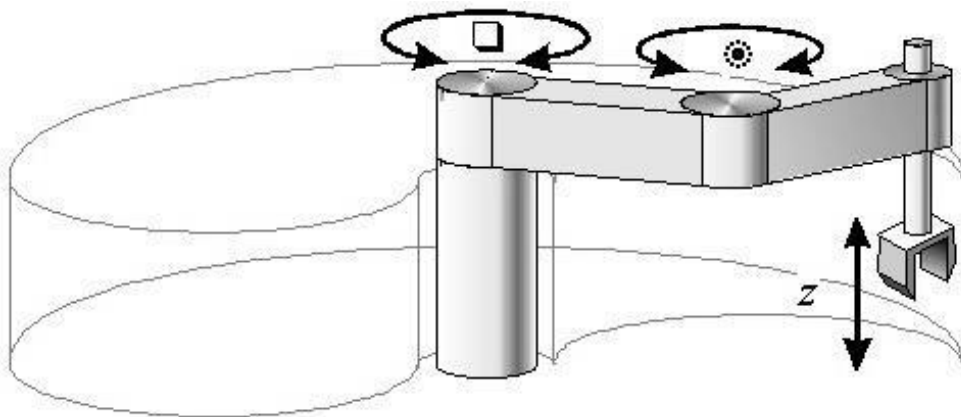


3) Σφαιρικός βραχίονας: Ευρέως γνωστός και ως ρομποτικός βραχίονας πολικών συντεταγμένων. Εκτελεί δυο περιστροφικές κινήσεις και μία γραμμική. Ο σφαιρικός βραχίονας όταν πραγματοποιεί κάποια εργασία καταλαμβάνει χώρο της μορφής μίας μερικής σφαίρας και έχει ακτίνες διαφόρου μήκους. Η βάση του σφαιρικού βραχίονα και σε αυτήν την περίπτωση τοποθετείται στον χώρο εργασίας. Οι βασικές χρήσεις του στη βιομηχανική παραγωγή είναι οι μεταφορές αντικειμένων, συγκολλήσεις και συναρμολογήσεις.



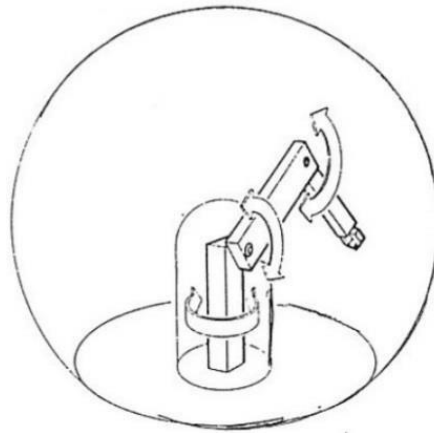
Σφαιρικός βραχίονας.

4) Βραχίονας SCARA: Και σε αυτή την περίπτωση πρόκειται για άλλο ένα είδος βραχίονα με τρεις βαθμούς ελευθερίας, με μια γραμμική και δυο κινήσεις περιστροφής. Η κυρία διαφορά όμως με το προαναφερθέν είδος βραχίονα που αναλύσαμε, είναι ότι οι αρθρώσεις περιστροφής του είναι τοποθετημένες παράλληλα μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ακρίβεια κινήσεων κατά την υλοποίηση της εργασίας.



Βραχίονας SCARA.

5) Ανθρωπόμορφος βραχίονας: Είναι ο πιο δημοφιλής βραχίονας, αφού βρίσκει χρήση σε περισσότερες περιοχές εφαρμογής και δίνει ακριβέστερες κινήσεις από τους υπολοίπους τύπους. Μια περιστροφική άρθρωση συνδέει τον βραχίονα με την βάση. Με περιστροφικές αρθρώσεις συνδέονται και οι σύνδεσμοι του βραχίονα. Με ελεύθερες ή σφαιρικές αρθρώσεις μπορούν να αντικατασταθούν οι περιστροφικές αρθρώσεις ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερος βαθμός ελευθέριας. Οι ανθρωπόμορφοι βραχίονες όταν πραγματοποιούν κάποια εργασία καταλαμβάνουν χώρο της μορφής ενός τμήματος σφαίρας. Οι βαθμοί ελευθέριας των βιομηχανικών ανθρωπόμορφων βραχιόνων είναι συνήθως τέσσερις με έξι.



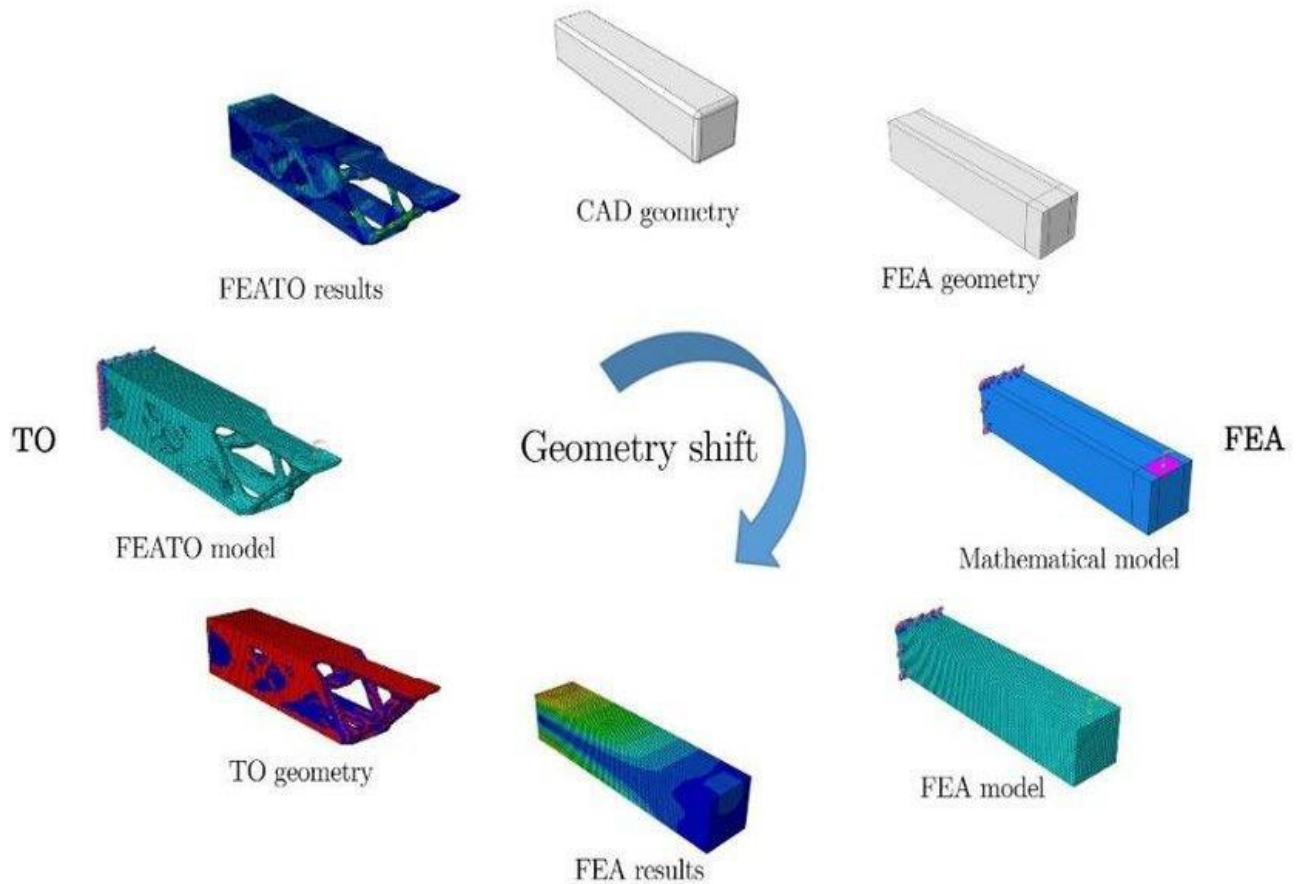
Ανθρωπόμορφος βραχίονας.

Κεφάλαιο 3

3.1 Διαδικασία Τοπολογικής Βελτιστοποίησης

Η επαναλαμβανομένη μεθοδολογία ανάλυσης φτιαγμένη ώστε να προσαρμοστεί στα ψηφιακά μέσα σχεδιασμού και μελέτης ονομάζεται τυπολογική βελτιστοποίηση (Topology Optimization-TO). Βασικός σκοπός αυτής της μεθόδου είναι η καλύτερη δομική απόδοση (performance), η βέλτιστη κατανομή του υλικού βρίσκεται μέσα στο διαθέσιμο όγκο ενός αντικειμένου σχετικά με τις δυνάμεις, τους περιορισμούς και τις οριακές συνθήκες που δίδονται κατά την μελέτη από τον υπεύθυνο μηχανικό. Κατά την διάρκεια της τοπολογικής βελτιστοποίησης το μέγεθος, η τοπολογία και το σχήμα αλλάζει της κυρίας μορφής ώστε να εκπληρωθούν συγκεκριμένες συνθήκες μάζας, αντοχής και στιβαρότητας ενός αντικειμένου. Εάν στην παραδοσιακή ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων ενσωματώσουμε την τοπολογική βελτιστοποίηση, μπορούμε να χωρίσουμε την διαδικασία σε 8 στάδια όπως παρατηρούμε στην εικόνα 1.

Εικόνα 1 :Μετάβαση από το αρχικό μοντέλο σε μοντέλο TO.



Το σχήμα απεικονίζει πως μετατρέπεται η γεωμετρία μιας δοκού από την μορφή που σχεδιάστηκε, στη τοπολογία βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο CAD εφαρμόζεται στο πρώτο στάδιο. Προκειμένου να απλοποιηθεί το αρχικό πρόβλημα η αρχική γεωμετρία τροποποιείται, ωστόσο το στάδιο της απλοποίησης της γεωμετρίας είναι δύσκολο να τυποποιηθεί διότι βασίζεται στην εφαρμογή της εμπειρίας και της κρίσης του υπευθύνου μηχανικού. Ωστόσο, το βασικότερο βήμα στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι ο ορισμός του προβλήματος και το αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο με όλες τις απαιτούμενες παραμέτρους (ιδιότητες υλικών, φορτία και περιορισμούς).

Μέσω της διακριτοποίησης (meshing) του μοντέλου και της επαναλαμβανόμενης μέθοδου σύγκλισης προκύπτουν τα βέλτιστα αποτελέσματα. Είναι βασικό να εμπεριέχει προκαθορισμένους στόχους για το τελικό μοντέλο της δοκού που θα προκύψει για να μπορεί να έχει υπόσταση ο ορός της σύγκλισης, η διαδικασία προετοιμασίας της τοπολογικής

βελτιστοποίησης. Έτσι προτού αρχίσει η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης πρέπει να καθορίσουμε συγκεκριμένους στόχους όπως:

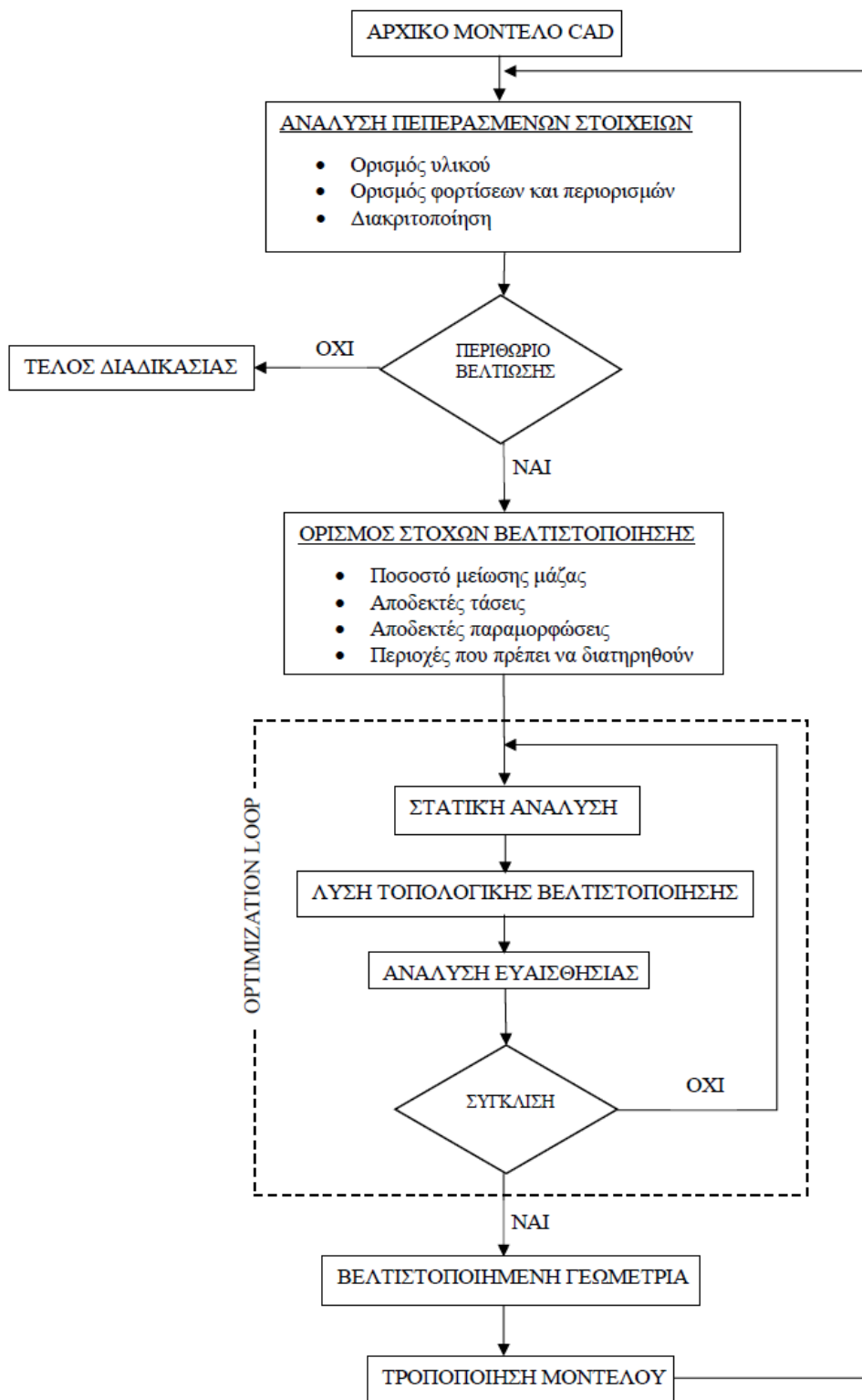
- Το αρεστό ποσοστό ελαττώσεις της μάζας
- Οι μέγιστες τάσεις εντός ορίων.
- Η μέγιστη επιτρεπτή παραμόρφωση
- Οι περιοχές του αντικειμένου που πρέπει να μείνουν ανεπηρέαστες ώστε να είναι λειτουργικό
- Ο συντελεστής ασφαλείας
- Μέγιστο ή ελάχιστο αποδεκτό πάχος τοιχωμάτων
- Γεωμετρικοί στόχοι που ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες μεθόδους κατασκευής (κατεργασία κοπής, χύτευση, 3D Printing)

Τα τελικά αποτελέσματα της τοπολογικής βελτιστοποίησης έχουν μια βασική προϋπόθεση τη διαδικασία διακριτοποίησης. Ο χρόνος ολοκλήρωσης της ανάλυσης είναι άμεσα συσχετισμένος με τις λεπτομέρειες του mesh (διαστάσεις, πυκνότητα και γεωμετρία πεπερασμένων στοιχείων). Για να γίνει ο απαραίτητος υπολογισμός των αποτελεσμάτων πρέπει να λάβουμε υπόψιν το μέγεθος της λεπτομέρειας του mesh, όσο πιο μεγάλα είναι τα στοιχεία που απαρτίζουν το διακριτοποιημένο σώμα, τόσο λιγότερος χρόνος και επεξεργαστική ισχύς χρειάζεται. Η απαίτηση για λεπτομερέστατο mesh είναι μικρή και εμφανίζεται σχεδόν ελάχιστη διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων για συγκεκριμένο εύρος διαστάσεων των στοιχείων κατά την αρχική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων του αρχικού μοντέλου CAD. Οπότε κατά κύριο λόγο η αρχική μελέτη FEA πρέπει να πραγματοποιείται με σημαντική λεπτομέρεια διακριτοποίησης αλλά όχι υπερβολική εφόσον στοιχίζει σε χρόνο και επεξεργαστική ισχύ και δεν επιφέρει μεγαλύτερο ποσό πληροφοριών από την πλευρά των αποτελεσμάτων.

Αντίθετα, η λεπτομερέστερη διακριτοποίηση επιτρέπει στον αλγόριθμο να διερευνήσει σε μεγαλύτερο βάθος τις απαιτήσεις του εκάστοτε αντικειμένου και να προτείνει πιο λεπτομερές λύσεις για την περίπτωση της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Ο αριθμός των εναλλακτικών επιλογών για τον αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος προσδιορίζονται από όσο μικρότερα σε μέγεθος είναι τα στοιχεία που αποτελούν ένα μοντέλο. Η τυπολογική βελτιστοποίηση έχει πολύ υψηλό κόστος σε χρόνο και επεξεργαστική ισχύ ακόμα και για αρκετά βασικά προβλήματα εξαιτίας της επαναλαμβανομένης διαδικασίας συγκλήσεων καθώς και της υποχρεωτικής λεπτομέρειας στη διακριτοποίηση, η τοπολογική βελτιστοποίηση έχει πολύ μεγάλο κόστος σε χρόνο και υπολογιστική ισχύ ακόμα και για αρκετά απλά προβλήματα. Η αξιοποίηση της γεωμετρικής συμμετρίας είναι ένας τρόπος για να επιλυθεί μερικώς αυτός ο

περιορισμός για όσα αντικείμενα το επιτρέπουν. Για αντικείμενα που εμπεριέχουν από ένα και περισσότερα επίπεδα συμμετρίας, η διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μπορεί να επιλυθεί παράλληλα σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Έτσι, ένα αντικείμενο με ένα επίπεδο ολόκληρης συμμετρίας μπορεί να εξετασθεί κατά το ήμισυ ($1/2$ επεξεργαστικής ισχύς και του χρονικού διαστήματος διευθέτησης) και με τα κατάλληλα ορίσματα να λυθεί ως ολόκληρο. Βασικό παράδειγμα συμμετρικών σωμάτων με μεγάλη δυνατότητα μείωσης των υπολογιστικών απαιτήσεων είναι όσα δημιουργούνται με περιστροφή και διακρίνονται εξ ολοκλήρου από ομοιομορφία. Στο ενδεχόμενο αυτό το εξάρτημα δύναται να χωρισθεί στον απαιτούμενο αριθμό επιπέδων και να ερευνηθεί σε λιγότερο χρονικό διάστημα συγκριτικά με το ολόκληρο αντικείμενο.

Τη νέα βελτιστοποιημένη γεωμετρία με σημαντική μειωμένη μάζα που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως ένα καινούριο σημείο αναφοράς για την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι αποτέλεσμα της μεθόδου της τυπολογικής βελτιστοποίησης. Πρέπει να ξανά σχεδιαστεί το αρχικό CAD μοντέλο για να απεικονίζει τα γνωρίσματα της συνισταμένης βελτιστοποιημένης γεωμετρίας για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε περεταίρω ανάλυση είναι απαραίτητο. Όπως ειπώθηκε παραπάνω, το μοντέλο που δημιουργείται από την διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης βρίσκεται σε μορφή διακριτοποιημένου σώματος (mesh body) και δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε άμεσα για περεταίρω μελέτη πεπερασμένων στοιχείων. Τα λογισμικά CAD δίνουν τη δυνατότητα και τα εργαλεία εξαγωγής μορφών για αξιοποίηση (solid body, surface body) ώστε να μειώσουν τη δυσκολία της διαδικασίας σχεδιασμού από την αρχή του μοντέλου και μεταβολή τους. Το αντικείμενο όταν βρίσκεται στη μορφή του mesh body μπορεί να αποθηκευτεί και σε μορφή STL αρχείο ώστε να μπορούμε να το κατασκευάσουμε με την τεχνολογία του 3D Printing. Για να μπορέσει να έχει πρακτική εφαρμογή κάτι τέτοιο, απαιτείται πολύ μεγάλη λεπτομέρεια στην αρχική διακριτοποίηση του εξαρτήματος πριν από την λύση της τοπολογικής βελτιστοποίησης, έτσι ώστε να δημιουργηθούν ολοκληρωμένες και λείες επιφάνειες στο τελικό αντικείμενο. Τέλος, αφού γίνει η αποπεράτωση των μετατροπών του αρχικού σχεδίου είμαστε σε θέση να κάνουμε επόμενη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στη νέα βελτιστοποιημένη γεωμετρία για να εκτιμηθεί η θ έκβαση της μελέτης και η εκπλήρωση των αρχικών στόχων της ερευνας. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζεται ολόκληρη η διαδικασία βελτιστοποίησης.



3.2 Γενικευμένο Πρόβλημα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης

Η γενική μαθηματική λύση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με συνεχή δεδομένα προσπαθεί να επιτύχει την ελάχιστη (top down) ή την μέγιστη (bottom up) τιμή μιας συνάρτησης $f(x)$ και του σχετικού μεταβλητού διανύσματος της $x=(x_1,...,x_n) \in IR^n$ σχετικά με πιθανές συνθήκες και ορια. Η f μπορεί να ονομαστεί συνάρτηση στόχου και αντίστοιχα οι ποσότητες $x_i, i = 1,...,n$ μεταβλητές σχεδιασμού και n ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού. Οι μεταβλητές σχεδιασμού έχει σχέση από την ισότητα μεταξύ των ορίων, οπότε μπορεί να γίνει η εικασία ότι ο πραγματικός χώρος σχεδιασμού είναι ένας υποχώρος του IR^n , όπου η διάστασή του θα είναι n μείον τον αριθμό των ανεξάρτητων ορίων ισότητας. Αρα, το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να το παραθεσουμε ως:

$f(x)$	Μείωση συνάρτησης στόχου
$h_j(x) = 0,$	$j = 1,...,n_h$ όριο ισότητας
$g_k(x) \leq 0,$	$j = 1,...,n_g$ όριο ανισότητας
$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u,$	$i = 1,...,n$ μεταβλητές σχεδιασμού

Το σύνολο των μεταβλητών σχεδίασης που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς ορίζεται ως εφικτός τομέας και αντίστοιχα ανέφικτος τομέας το σύνολο αυτών που δεν ικανοποιούν τουλάχιστον ένα. Ως εκ τούτου, αναφερόμαστε είτε σε προβλήματα γραμμικής βελτιστοποίησης, όπου οι περιορισμοί στην ισότητα αλλά και στην ανισότητα είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδιασμού, είτε προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης, όπου τουλάχιστον ένας από τα όρια είναι μια μη γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών σχεδιασμού.

Το σύνολο των μεταβλητών σχεδίασης που ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς ορίζεται ως εφικτός τομέας και αντίστοιχα μη εφικτός τομέας το σύνολο αυτών που δεν ικανοποιούν τουλάχιστον ένα.

3.3 Μέθοδος SIMP

3.3.1 Ανάλυση Μεθόδου

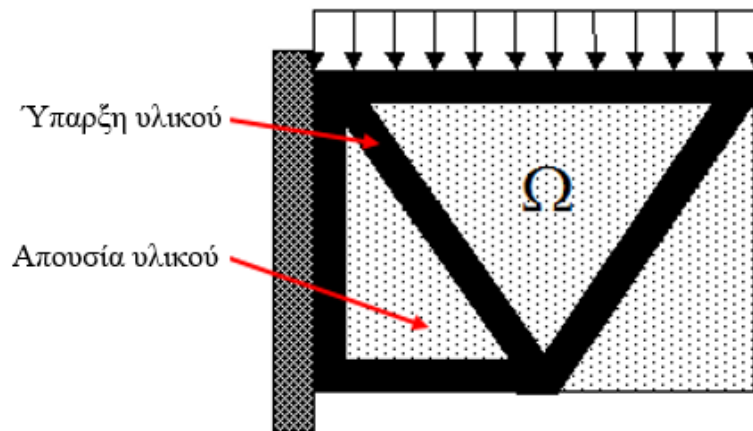
Η σύγχρονη βιομηχανία έχει και απαιτεί τη δυνατότητα της βελτιστοποίησης των προϊόντων προκειμένου να επιτυγχάνει τις επιθυμητές επιδόσεις και αποδόσεις. Παράλληλα υπάρχει σφοδρό ενδιαφέρον από ένα αυξανόμενο κομμάτι της πανεπιστημιακής κοινότητας το πρόβλημα της τοπολογικής βελτιστοποίησης και γενικότερα η έννοια της βελτιστοποίησης. Έτσι, τα τελευταία 30 χρόνια τόσο επιστημονικές ομάδες της πανεπιστημιακής κοινότητάς όσο και ομάδες των βιομηχανικών τμημάτων R&D, έχουν αναπτύξει αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις και μεθοδολογίες για την αντιμετώπιση και επίλυση προβλημάτων τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Η πιο δημοφιλής μαθηματική μέθοδος για προβλήματα βελτιστοποίησης της τοπολογίας είναι η Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP), που αρχικά διατυπώθηκε από τους Bendsoe & Kikuchi (1988) και Rozvany & Zhou (1992). Με τη μέθοδο SIMP προβλέπεται η βέλτιστη κατανομή υλικού εντός ενός συγκεκριμένου χώρου σχεδίασης, για ορισμένες περιπτώσεις φορτιού, περιορισμούς κατασκευής, απαιτήσεις συστήματος και οριακές συνθήκες.

Σύμφωνα με τον Bendsoe (1989), η βελτιστοποίηση σχήματος στην πιο γενική της μορφή πρέπει να περιλαμβάνει πληροφορίες για κάθε σημείο του χώρου αναφοράς, προσδιορίζοντας την ύπαρξη υλικού ή μη στο δεδομένο σημείο. Η διακριτοποίηση ενός τομέα (domain) σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζονται ιστροπικές στερεές μικροδομές είναι η κλασική προσέγγιση στη βελτιστοποίηση τοπολογίας. Κάθε στοιχείο είναι χωρίς υλικό για τις περιοχές που μπορεί να αφαιρεθεί το υλικό (ή που αντιπροσωπεύει κενά), ή γεμάτες υλικό για περιοχές όπου απαιτούν υλικό (ή που αντιπροσωπεύει κενά). Η κατανομή πυκνότητας υλικού σε έναν τομέα σχεδίασης, ρ , σε κάθε στοιχείο λαμβάνει μια δυαδική τιμή και είναι διακριτή :

- $\rho(e) = 1$ όπου απαιτείται υλικό (μαύρο)
- $\rho(e) = 0$ όπου αφαιρείται υλικό (άσπρο)

Παραδείγματος χάριν, στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η βελτιστοποιημένη διάταξη υλικού μιας φορτισμένης δοκού. Τα στερεά στοιχεία με πυκνότητα $\rho(e) = 1$ εμφανίζονται με μαύρο, ενώ τα κενά στοιχεία με $\rho(e) = 0$ αφαιρούνται.

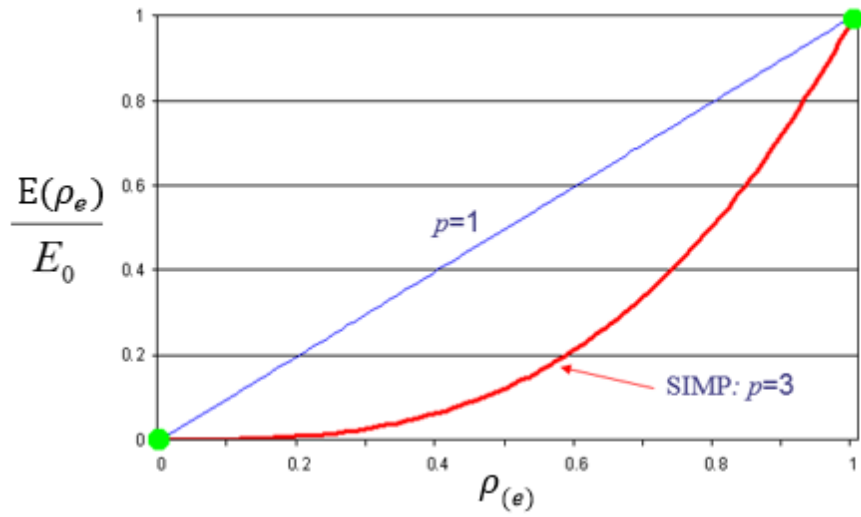


Εικόνα : Διάταξη υλικού βελτιστοποιημένης φορτισμένης δοκού

Η δυαδική, on-off φύση του προβλήματος μπορεί να αποφευχθεί με την εισαγωγή μιας συνεχούς κατανομής της σχετικής πυκνότητας. Για κάθε στοιχείο, η εκχωρούμενη σχετική πυκνότητα μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής ρ_{\min} και 1, η οποία επιτρέπει την εκχώρηση ενδιάμεσης πυκνότητας για στοιχεία που μπορούν να χαρακτηριστούν ως πορώδη. Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της σχετικής πυκνότητας για κενά στοιχεία που είναι μεγαλύτερα από το μηδέν είναι η ρ_{\min} . Η αριθμητική σταθερότητα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων διασφαλίζεται από αυτήν την τιμή της πυκνότητας.

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η σχετική πυκνότητα υλικού μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς, ο συντελεστής ελαστικότητας Young σε κάθε στοιχείο μπορεί επίσης να μεταβάλλεται αντίστοιχα. Για κάθε στοιχείο e , η σχέση μεταξύ του συντελεστή σχετικής πυκνότητας υλικού ρ_e και του συντελεστή ελαστικότητας Young του εκχωρημένου μοντέλου ισотροπικού υλικού E_0 υπολογίζεται από τον νόμο:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p E_0$$



Ο παράγοντας ποινής p (penalty factor) ελαττώνει τη συμβολή των στοιχείων με ενδιαμέσες πυκνότητες (γκρίζα στοιχεία) στη συνολική δυσκαμψία. Ο παράγοντας ποινής κατευθύνει τη λύση βελτιστοποίησης σε στοιχεία που είναι είτε ενιαίο μαύρο ($\rho_e = 1$) είτε άδειο λευκό ($\rho_e = \rho_{\min}$). Τα αριθμητικά πειράματα αποδεικνύουν ότι είναι κατάλληλη μια τιμή συντελεστή ποινής $p = 3$.

Η ελάττωση του μέτρου ελαστικότητας του στοιχείου οδηγεί σε ελάττωση της δυσκαμψίας των στοιχείων. Σύμφωνα με τη μέθοδο SIMP, η ολική δυσκαμψία διαμορφώνεται σύμφωνα με:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{\min} + (1 - \rho_{\min}) \rho_e^p] K_e$$

Όπου K_e είναι η μήτρα δυσκαμψίας των στοιχείων, το ρ_{\min} είναι η ελάχιστη σχετική πυκνότητα, το ρ_e είναι η σχετική πυκνότητα του στοιχείου, το p είναι ο παράγοντας ποινής και το N είναι ο αριθμός των στοιχείων στον τομέα σχεδίασης.

3.3.2 Στόχος Μεγιστοποίησης Δυσκαμψίας

Ένας συνηθισμένος στόχος τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής δυσκαμψίας μιας δομής, ή η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας της με δεδομένη ποσότητα αφαίρεσης μάζας. Η ενδοτικότητα είναι ένα μέτρο της συνολικής ευκαμψίας μιας δομής και είναι το αντίστροφο της δυσκαμψίας. Η συνολική ενδοτικότητα ισούται με την αθροιστική ενέργεια παραμόρφωσης των στοιχείων. Η ελαχιστοποίηση της συνολικής ενδοτικότητας, C , ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση της συνολικής δυσκαμψίας. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης, μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας, επιδιώκει να επιλύσει τις πυκνότητες στοιχείων (που είναι οι μεταβλητές σχεδιασμού βελτιστοποίησης) που ελαχιστοποιούν την συνολική ενδοτικότητα της δομής.

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p [u_e]^T [K_e] [u_e]$$

Το $[u_e]$ είναι το διάνυσμα μετατόπισης του στοιχείου e , $[K_e]$ είναι η δυσκαμψία του στοιχείου e και το διάνυσμα $\{\rho\}$ περιέχει τις σχετικές πυκνότητες των στοιχείων ρ_e . Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης βελτιστοποίησης, ο περιορισμός μάζας στόχου, η συνολική ισορροπία δύναμης-δυσκαμψίας και οι απαιτούμενοι λειτουργικοί περιορισμοί πρέπει να ικανοποιούνται:

$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T \rho_e \leq M_{target}$$

V_e είναι ο όγκος των στοιχείων και το M_{target} είναι η μάζα στόχος της βελτιστοποίησης.

$$[K\{\rho\}]\{u\} = \{F\}$$

Το $[K\{\rho\}]$ είναι η μήτρα συνολικής δυσκαμψίας που διαμορφώνεται από το διάνυσμα σχετικών πυκνοτήτων, το $\{u\}$ είναι το διάνυσμα μετατόπισης και το $\{F\}$ είναι το διάνυσμα εξωτερικής δύναμης.

$$\theta(\{\rho\}, \{u\})_1 \leq \theta_1^*, \theta(\{\rho\}, \{u\})_2 \leq \theta_2^*, \dots$$

Ο παραπάνω τύπος περιέχει περιορισμούς σχεδιαστικής απόκρισης, όπως όρια στις τάσεις, μετατοπίσεις, ιδιοσυχνότητες κ.λπ.

3.3.3 Ανάλυση Ευαισθησίας

Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εκτελεί ανάλυση ευαισθησίας, για να αξιολογήσει τον αντίκτυπο που έχει η διακύμανση της πυκνότητας του υλικού στα αποτελέσματα της συνάρτησης στόχου για τη μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας. Μαθηματικά, η ανάλυση ευαισθησίας εκφράζεται ως παράγωγος της συνάρτησης στόχου σε σχέση με τις πυκνότητες υλικού:

$$\frac{dC}{d\rho_e} = -p(\rho_e)^{p-1} [u_e]^T [K_e] [u_e]$$

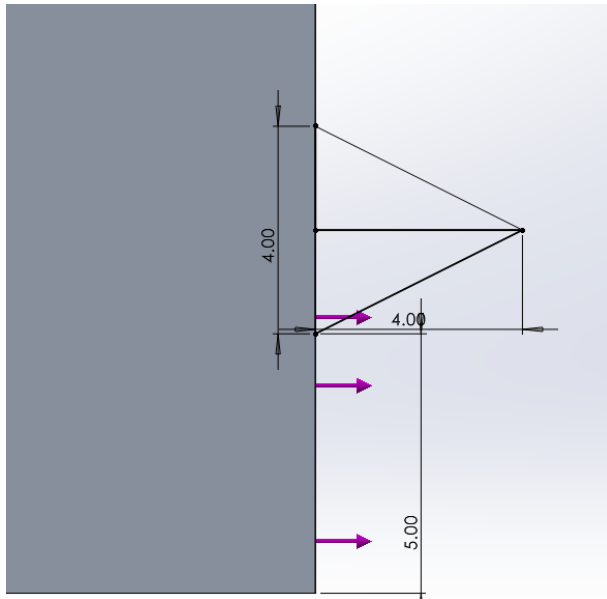
Κατά τη διάρκεια μιας ανάλυσης ευαισθησίας, τα στοιχεία που αξιολογούνται με χαμηλούς συντελεστές πυκνότητας υλικού τελικά χάνουν τη δομική τους υπόσταση και εξαλείφονται κατά τη διάρκεια περαιτέρω επαναλήψεων.

Εάν πραγματοποιηθεί υπολογισμός της ευαισθησίας για κάθε στοιχείο ανεξάρτητα και δεν ληφθεί υπόψη η συνδεσιμότητα μεταξύ των στοιχείων, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ασυνέχεια υλικού και σε όγκους που δεν θα συνδέονται με την κύρια γεωμετρία. Αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο σκακιέρας (chessboard effect). Για να μειωθεί το φαινόμενο σκακιέρας, ένα σχήμα φιλτραρίσματος εφαρμόζει μια ακτίνα επιρροής στοιχείων, και εξισορροπεί τις ευαισθησίες κάθε στοιχείου εντός της περιοχής επιρροής του.

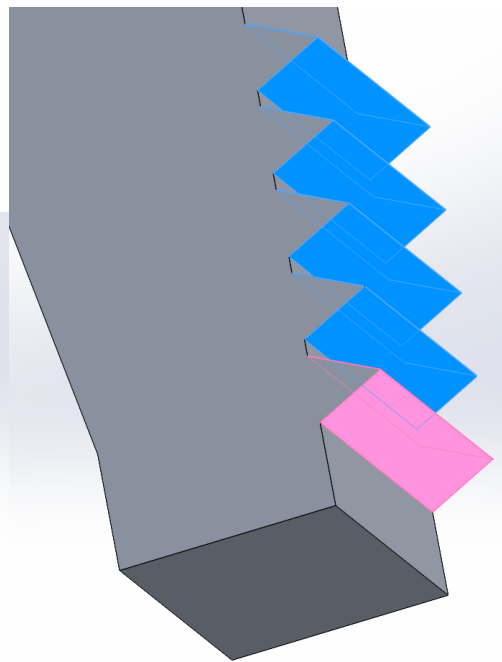
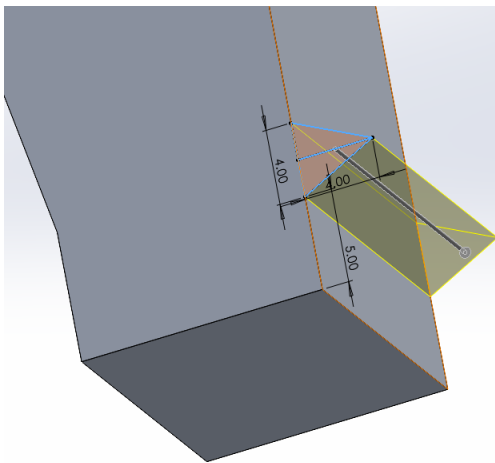
Οι επαναλήψεις βελτιστοποίησης συνεχίζονται έως ότου οι παραλλαγές της συνάρτησης στόχου συγκλίνουν και οι επαναλήψεις ικανοποιήσουν τα κριτήρια που έχουν τεθεί.

Εικόνα 2

Επόμενο βήμα είναι να σχεδιάσουμε την πρώτη οδόντωση της άρπαγας, επιλέγουμε μια από της επιφάνειες επιλέγουμε την εντολή sketch και σχεδιάζουμε την οδόντωση στην άκρη της (Εικόνα 3) . Με την εντολή extrude δίνουμε στην οδόντωση τρισδιάστατη μορφή(Εικόνα 4) και με την εντολή linear pattern δημιουργούμε τις υπόλοιπες κατά μήκος ώστε να μην χρειαστεί να της σχεδιάσουμε κάθε μια μεμονωμένα(Εικόνα 5).



Εικόνα 3

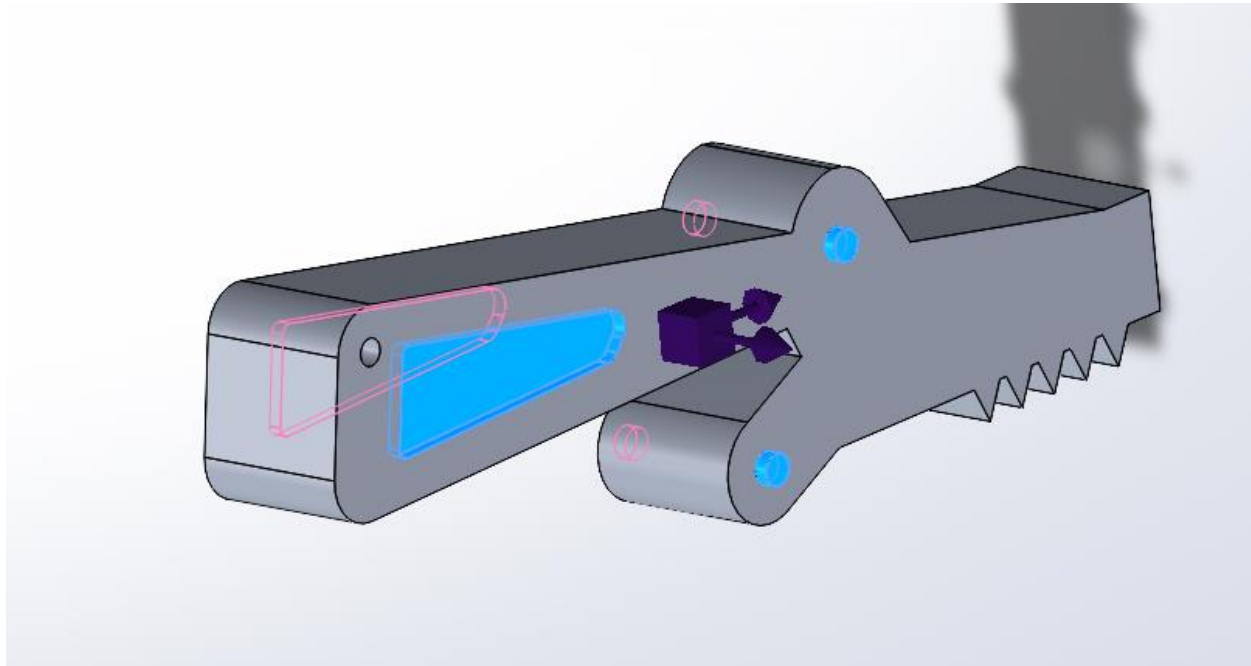


Εικόνα 4 & 5

Με την εντολή fillet εξομαλύνουμε τις γωνίες για οικιστικούς λογούς, επιλέγοντας στο πρώτο extrude την εντολή sketch δημιουργούμε 3 κύκλους και ένα τρίγωνο , από αυτούς στον πρώτο με την εντολή Extruded Cut κάνουμε αφαίρεση υλικού και κατασκευάζουμε τον αρμό της συναρμογής με τον υπόλοιπο βραχίονα. Τους υπολοίπους δυο κύκλους που δημιουργήσαμε με την χρήση της εντολής extrude δημιουργούμε δυο κυλίνδρους για εικαστικούς λογούς. Πάλι με την εντολή extruded cut αφού έχουμε επιλέξει το τρίγωνο που σχεδιάσαμε αφαιρούμε υλικό στην σχεδιασμένη περιοχή.

Τέλος για να επιτύχουμε ομοιομορφία και στις δυο πλευρές με την εντολή mirror και επιλέγοντας τις εντολές που επιθυμούμε και την πλευρά που είναι μη επεξεργασμένη αντιγράφουμε όλες τις διαφοροποιήσεις χωρίς να χρειάζεται να γίνει μεμονωμένα .

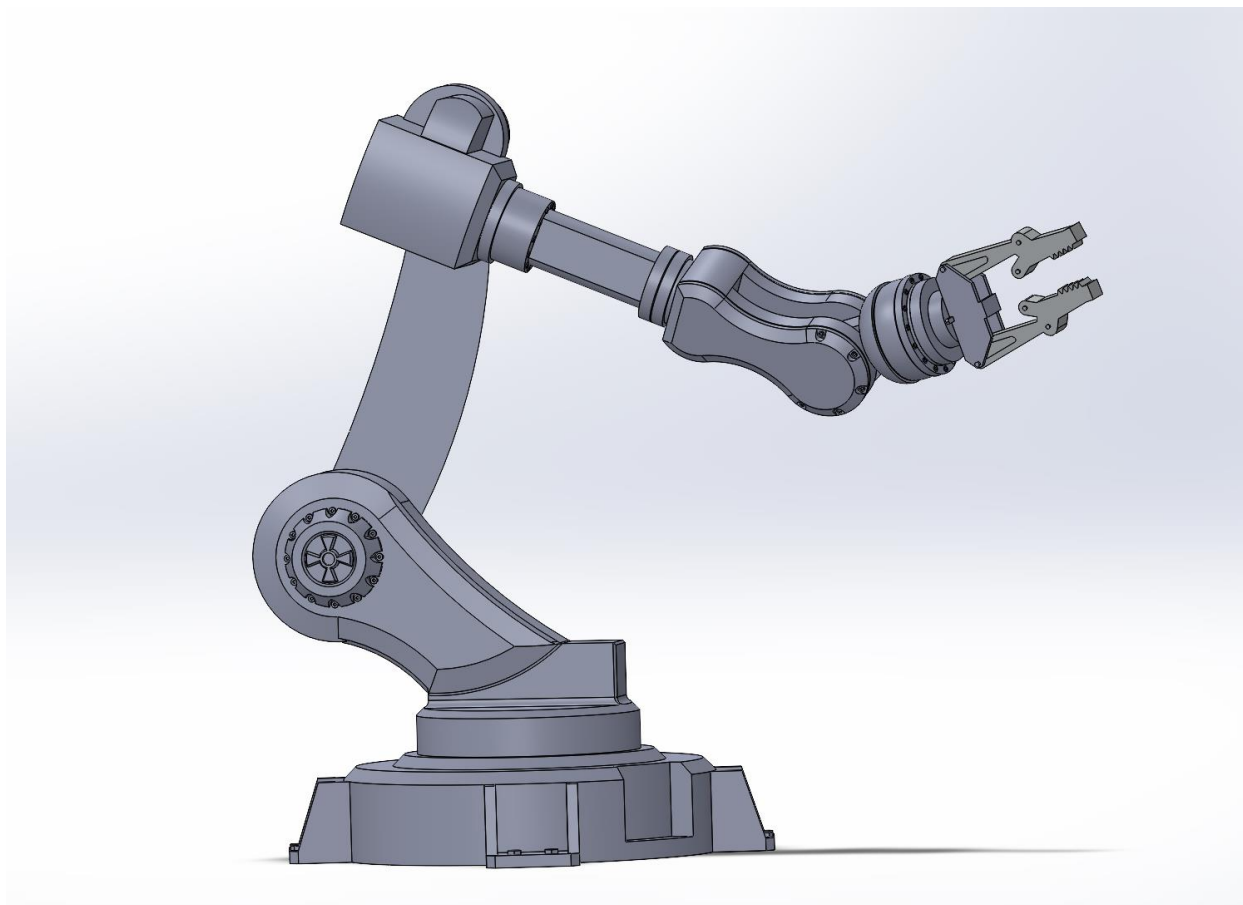
Το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει παρουσιάζεται παρακάτω.(Εικόνα 6)



Εικόνα 6

4.2 Σχεδιασμός και συναρμολόγηση του Βραχίονα.

Για εκμάθηση του προγράμματος έγινε σχεδιασμός ολοκλήρου του βραχίονα ο οποίος αποτελείται από 9 κομμάτια και η συναρμολόγηση του στο περιβάλλον του προγράμματος. (Εικόνα 7)



Εικόνα 7

Κεφάλαιο 5

5.1 Επίλυση σε CAE λογισμικό.

Το Solidworks είναι είναι μια αμερικάνικη εταιρία που ιδρύθηκε το 1993 από Jon Hirschtick. Αναπτύσσει και εμπορεύεται λογισμικό προσομοίωσης μηχανικής και φυσικής για σχεδιασμό προϊόντων, προσομοιώσεις και διάφορες λειτουργίες και δίνει τα προϊόντα και τις υπηρεσίες της σε πελάτες σε όλο το κόσμο.

Στο Solidworks οι αναλύσεις δημιουργούνται σχεδιάζοντας το μοντέλο σε parts. Όσον αφορά τις φορτίσεις δημιουργούνται και μελετώνται στο υποπρόγραμμα του Solidworks το Simulation.

Ανοίγουμε το αρχείο που σχεδιάσαμε, επιλέγουμε το simulation στη καρτέλα Solidworks Add-Ins. Στην παρούσα εφαρμογή θα εισάγουμε την άρπαγα , η σχεδίαση της οποίας παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιγραμματικά, τα στάδια ανάλυσης της άρπαγας είναι τα εξής:

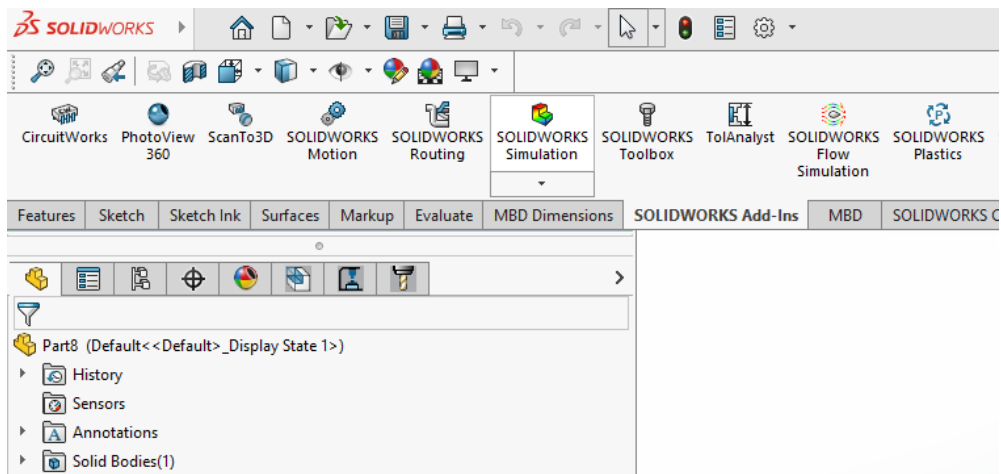
1. Ορισμός είδους ανάλυσης.
2. Ορίζουμε το υλικό της άρπαγας και των μηχανικών ιδιοτήτων.
3. Ορίζουμε την σταθερή γεωμετρία.
4. Εφαρμογή οριακών συνθηκών και φορτίσεων.
5. Ορισμός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.
6. Δημιουργία εργασίας τοπολογικής βελτιστοποίησης.
7. Επισκόπηση αποτελεσμάτων.

Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστεί η εφαρμογή των παραπάνω βημάτων.

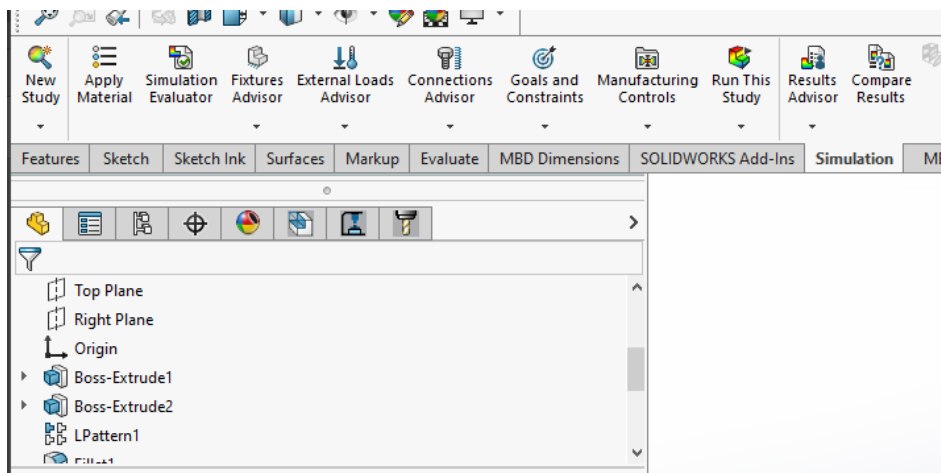
5.2 Ανάλυση άρπαγας στο Solidworks.

5.2.1 Ορισμός είδους ανάλυσης.

Ανοίγοντας το αντικείμενο που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε και επιλέγοντας την καρτέλα Solidworks Add-Ins επιλέγουμε από το ribbon το solidworks simulation(Εικόνα 8) και στη συνέχεια επιλέγουμε την πάλι στο ribbon τη καρτέλα simulation.(Εικόνα 9)

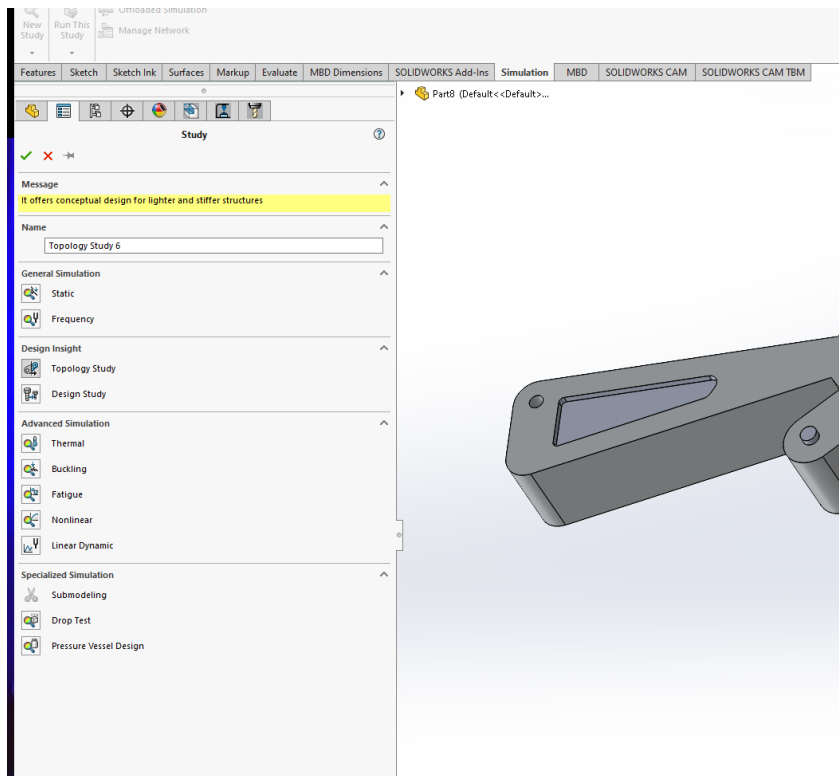


Εικόνα 8



Εικόνα 9

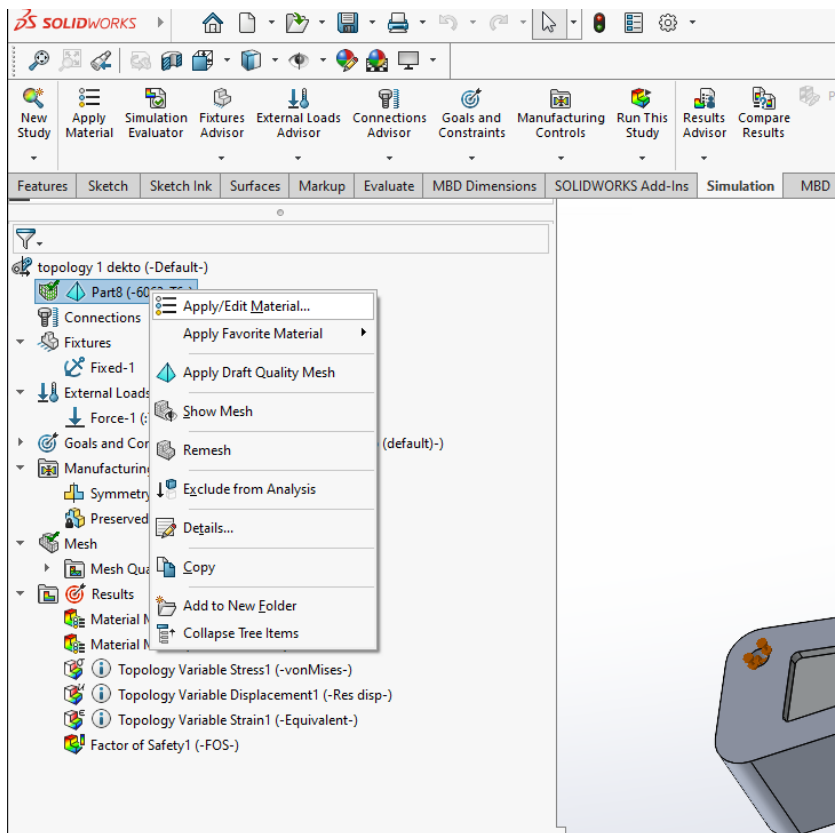
Από την καρτέλα simulation επιλέγουμε το New Study. Στο παράθυρο που εμφανίζεται διαλέγουμε το είδος της μελέτης που θέλουμε να κάνουμε στο αντικείμενο μας στη προκειμένη περίπτωση επιλέγουμε την τυπολογική μελέτη(topology study). (Εικόνα 10)



Εικόνα 10

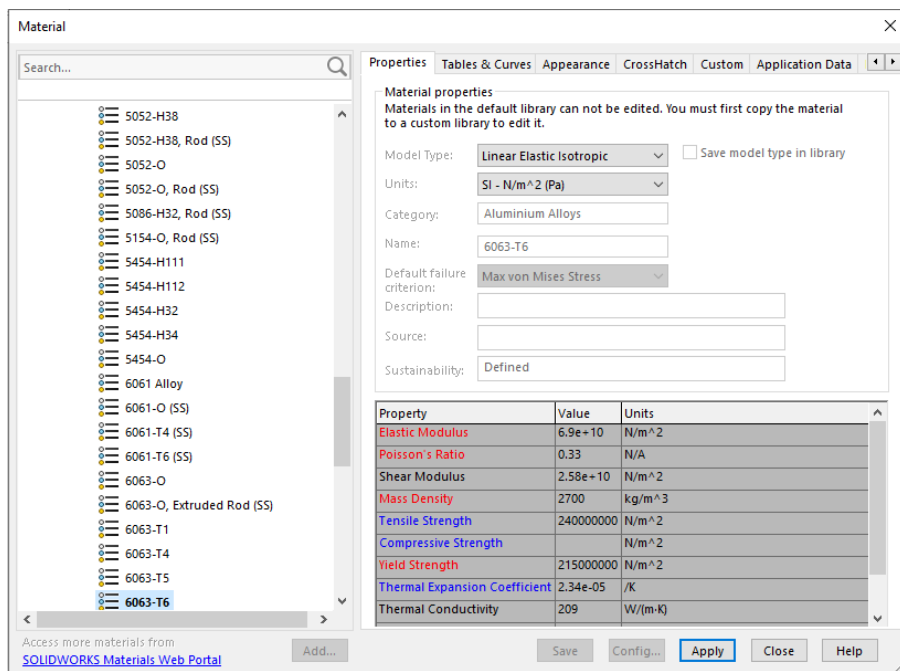
5.2.2 Ορίζουμε το υλικό της άρπαγας και των μηχανικών ιδιοτήτων

Για να ορίσουμε το υλικό στο μενού που εμφανίζεται κάνουμε δεξί κλικ στο εικονίδιο part, επιλέγουμε το Apply/Edit Material.(Εικόνα 11)



Εικόνα 11

Από το παράθυρο που ανοίγει, αναζητούμε και διαλέγουμε υλικό που θέλουμε και το πρόγραμμα μας εμφανίζει και τις μηχανικές ιδιότητες.(Εικόνα 12)



Εικόνα 12

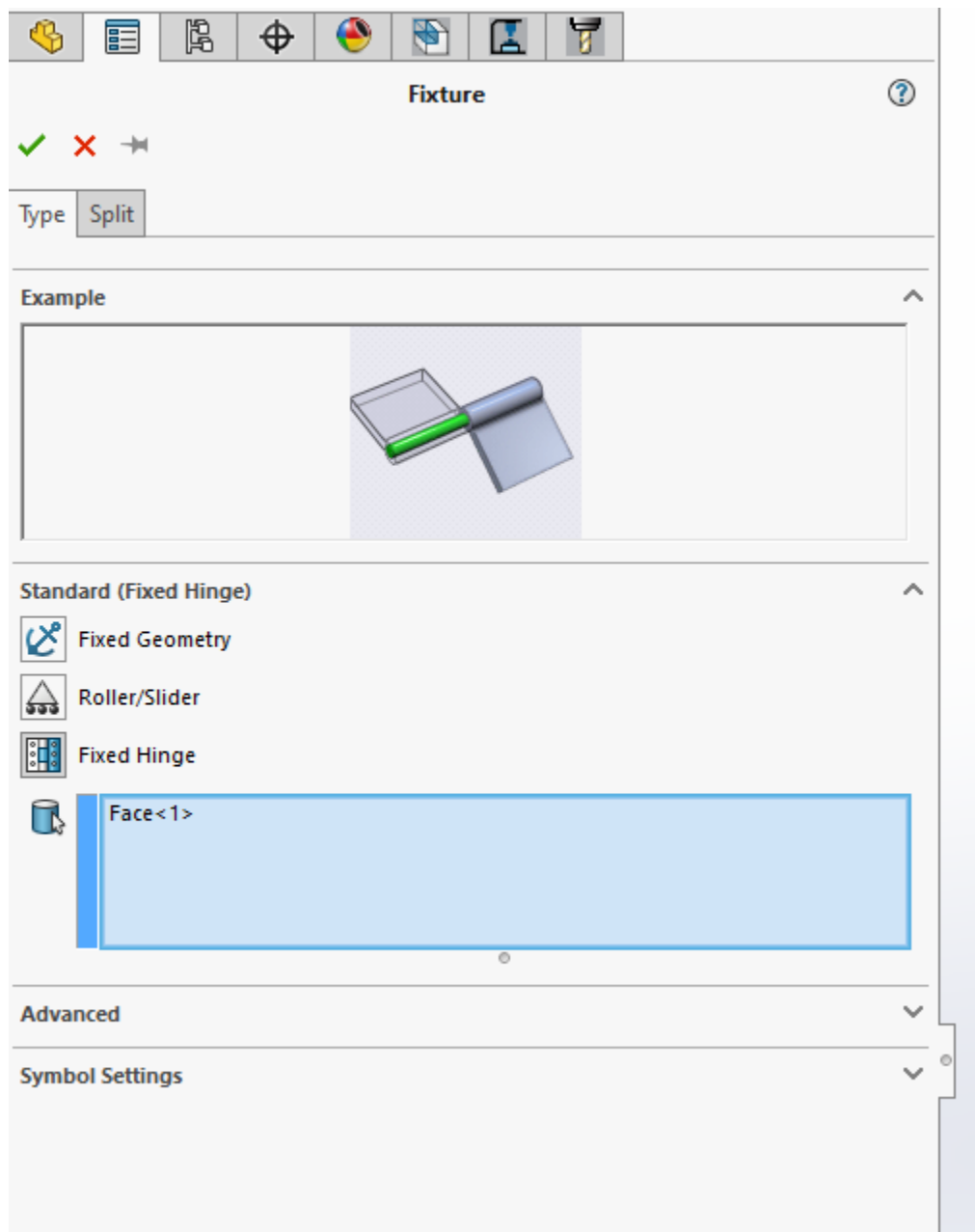
5.2.3 Ορισμός σταθερής γεωμετρίας

Στο στάδιο αυτό ορίζουμε ένα σημείο ως σταθερό δηλαδή μηδενίζουμε τους βαθμούς ελευθέριας, αυτό μας επιτρέπει να βελτιστοποιήσουμε το αντικείμενο μας χωρίς να επηρεαστεί η γεωμετρία του σε αυτό το σημείο. Στη προκείμενη περίπτωση σαν σταθερό σημείο τέθηκε ο αρμός σύνδεσης της άρπαγας με την προηγούμενη άρθρωση του ρομποτικού βραχίονα.(Εικόνα 13)



Εικόνα 13

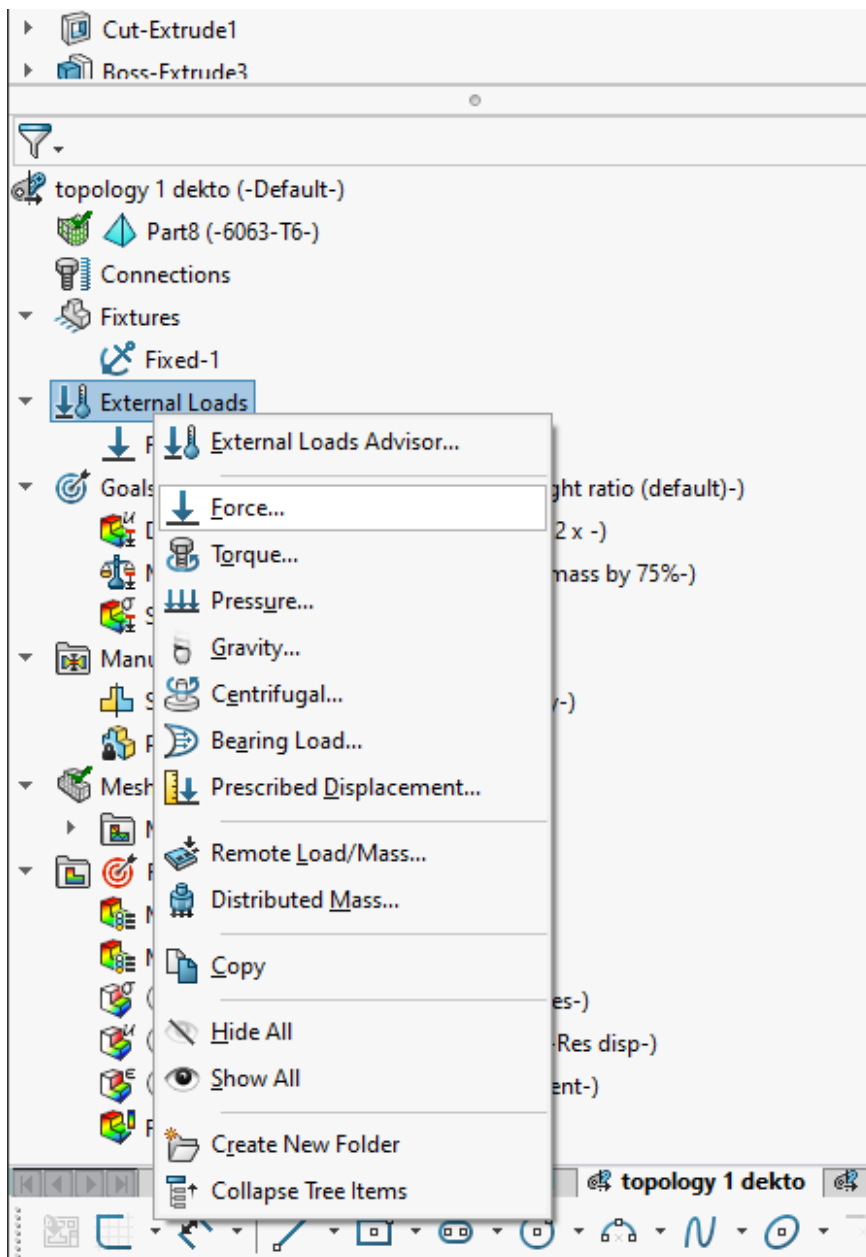
Για να επιλέξουμε το σημείο της σταθερής γεωμετρίας όπως και πριν πηγαίνουμε στο μενού δεξιά στην επιλογή fixtures ,κάνουμε δεξί κλικ και επιλέγουμε το fixed geometry.Ανοίγει το μενού διαλέγουμε ένα από τα τρία είδη που διαθέτει το πρόγραμμα , στη προκείμενη περίπτωση Fixed Hinge και την περιοχή που θα εφαρμοστέ η συνθήκη.(Εικόνα 14)



Εικόνα 14

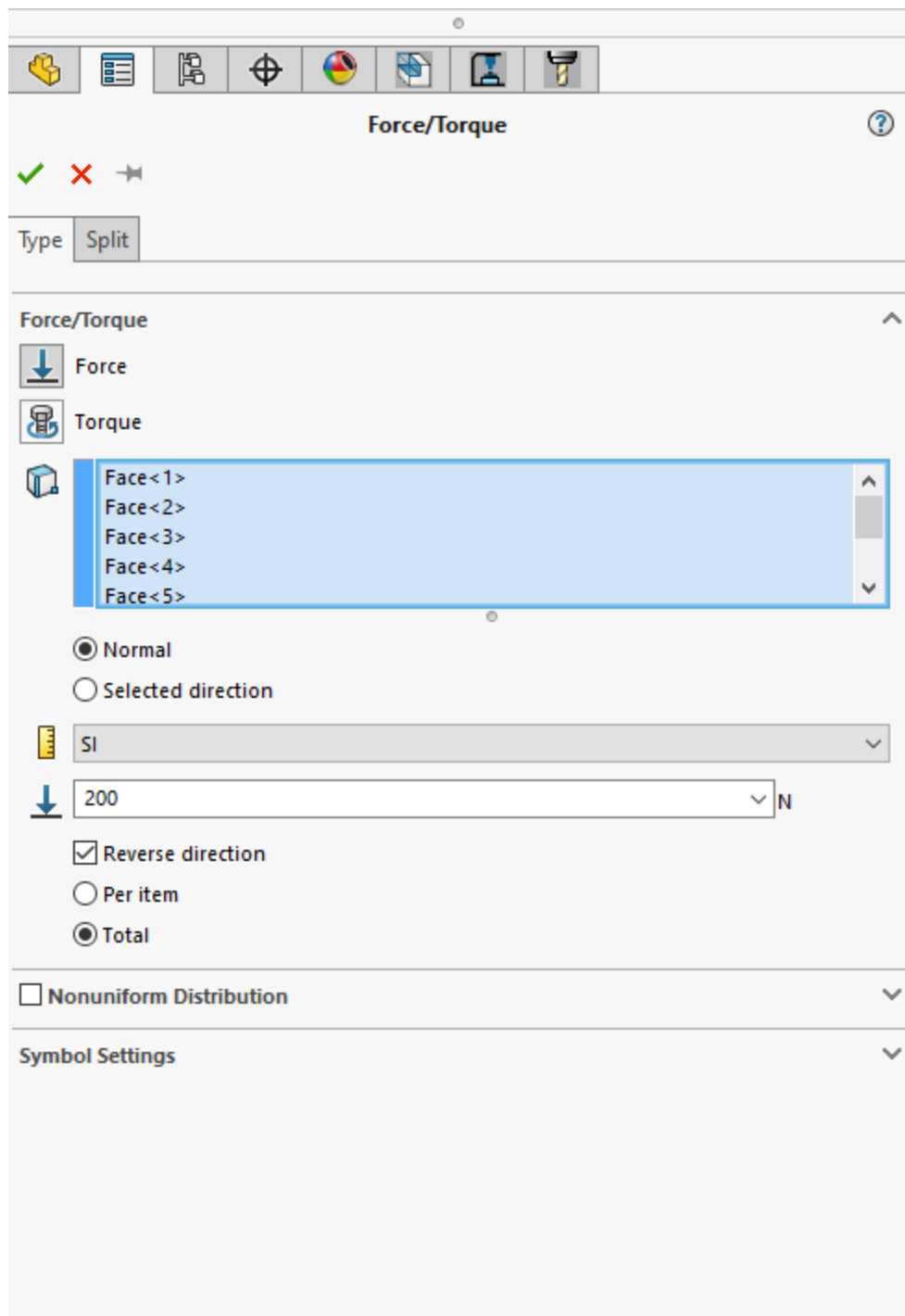
5.2.4 Εφαρμογή οριακών συνθηκών και φορτίσεων.

Για την προσθήκη φορτίσεων στο μενού το εικονίδιο external loads με δεξί κλικ επιλέγουμε την κατηγορία force.(Εικόνα 15)



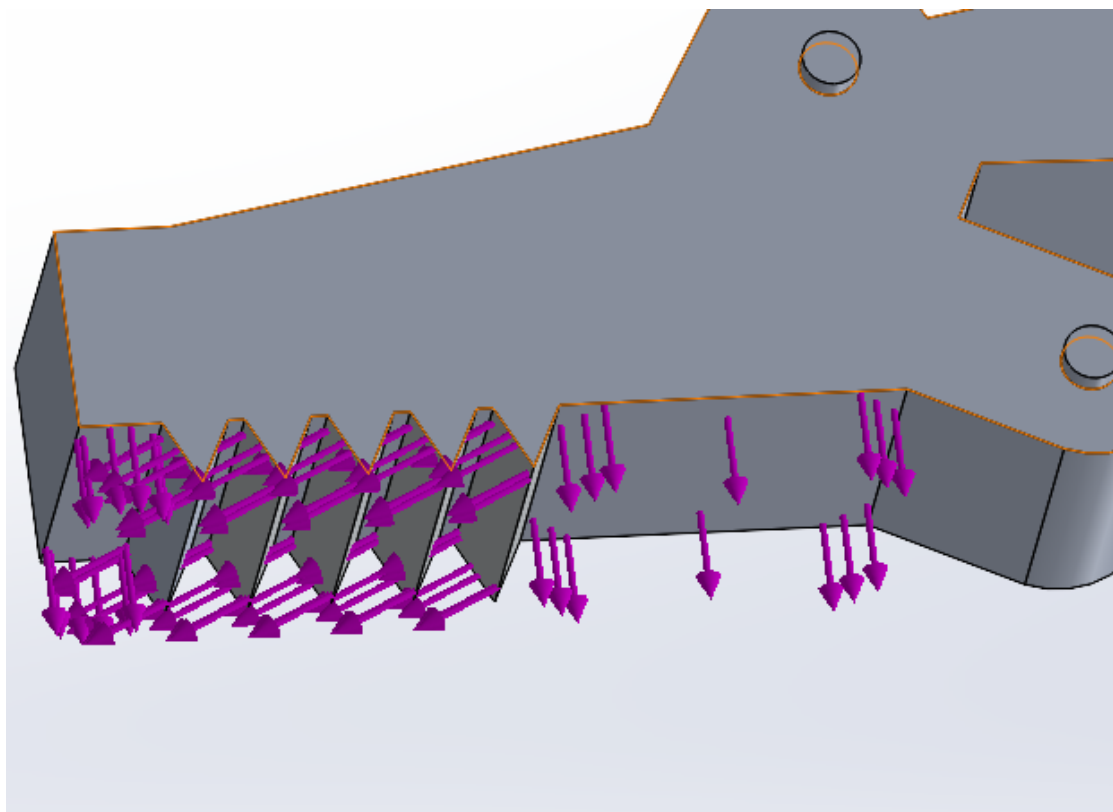
Εικόνα 15

Στο νέο παράθυρο που ανοίγει επιλέγουμε τις επιφάνειες που ασκείται η δύναμη ,τη φορά της και το μέγεθος της.(Εικόνα 16 &17)



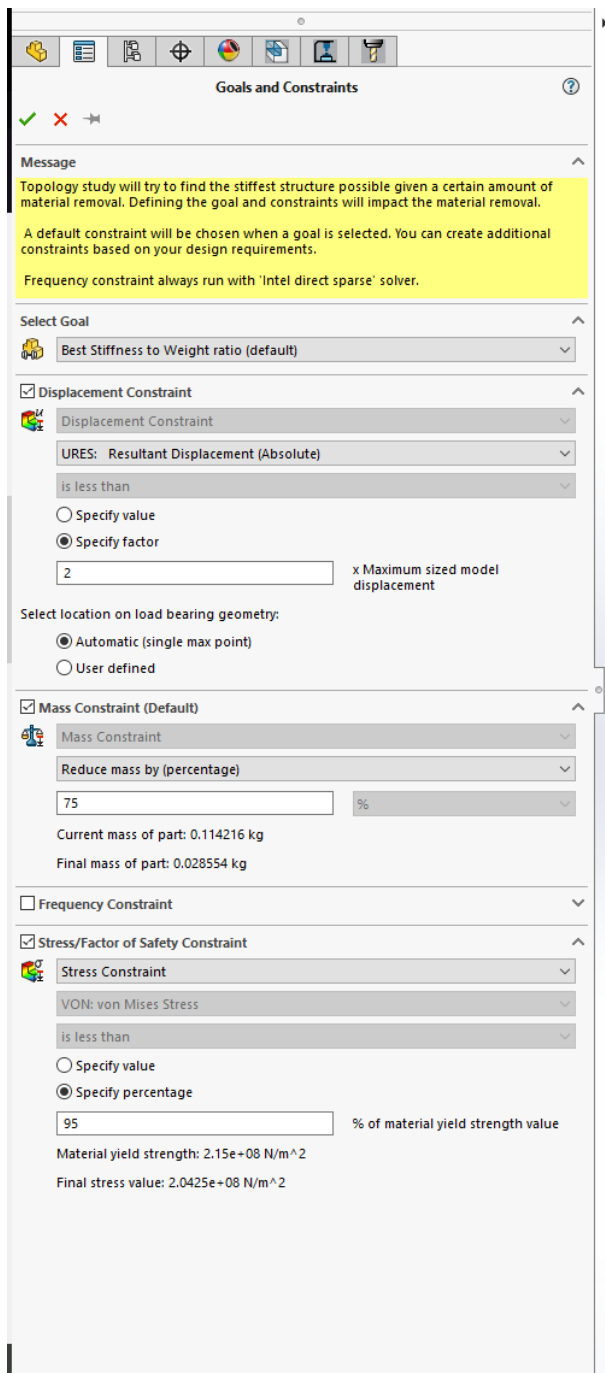
Εικόνα 16

Η συνολική δύναμη που ασκείται είναι 200 N



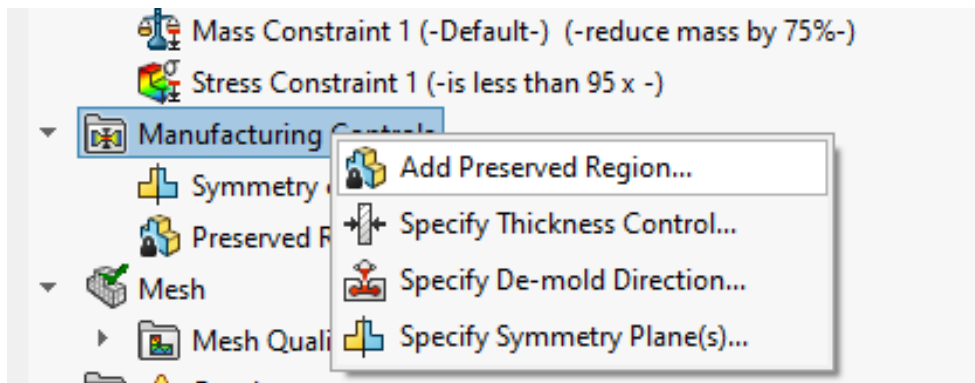
Εικόνα 17

Σε αυτό το σημείο ορίζουμε τις οριακές συνθήκες με βάση τις οποίες θα κάνουμε την τυπολογική μελέτη. Έχουμε τις εξής επιλογές «Best Stiffness to Weight Ratio, Minimize Maximum Displacement & Minimize Mass». Διαλέγουμε το «Best Stiffness to Weight Ratio», στο μενού που εμφανίζεται καταχωρούμαι όρια για το Displacement, Mass και Stress/Factor of Safety Constrain όπως απεικονίζεται στη εικόνα 18.

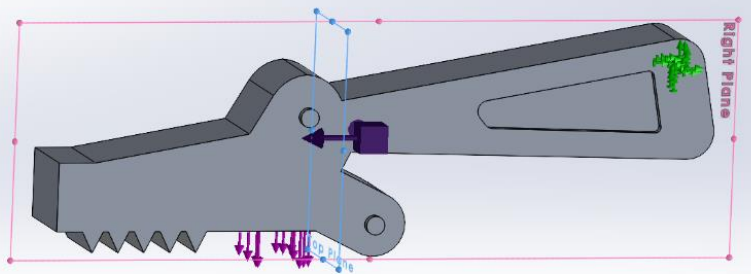
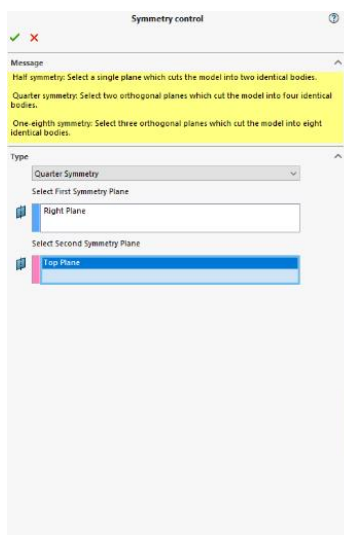


Εικόνα 18

Μια ακόμα οριακή συνθήκη που χρησιμοποιούμε είναι αυτή που διασφαλίζει τη κατασκευή του αντικειμένου που μελετάμε ως προς την γεωμετρία(Εικόνα 19), δηλαδή να μπορεί να εξαχθεί από κάποιο καλούπι αν είναι χυτό ή να κατασκευαστεί με κάποια άλλη διαδικασία. Στη περίπτωση της άρπαγας έχω διαλέξει το « Symmetry Control & Preserved Region».Αυτές οι δυο συνθήκες μου εξασφαλίζουν τη συμμετρική αφαίρεση υλικού και την διατήρηση του σχήματος της άρπαγας.(Εικόνα 20 & 21)

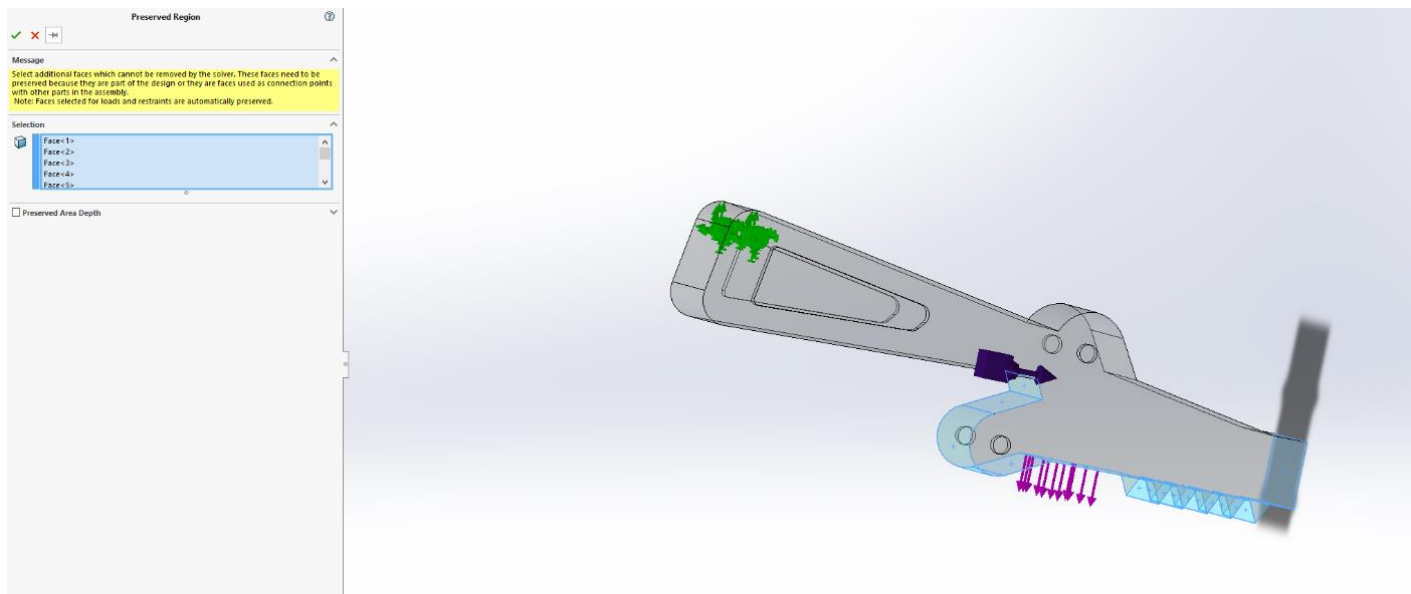


Εικόνα 19



Εικόνα 20

Οι διατηρημένες περιοχές είναι αυτές που στο αντικείμενο εμφανίζονται με χρώμα γαλάζιο στη εικόνα.

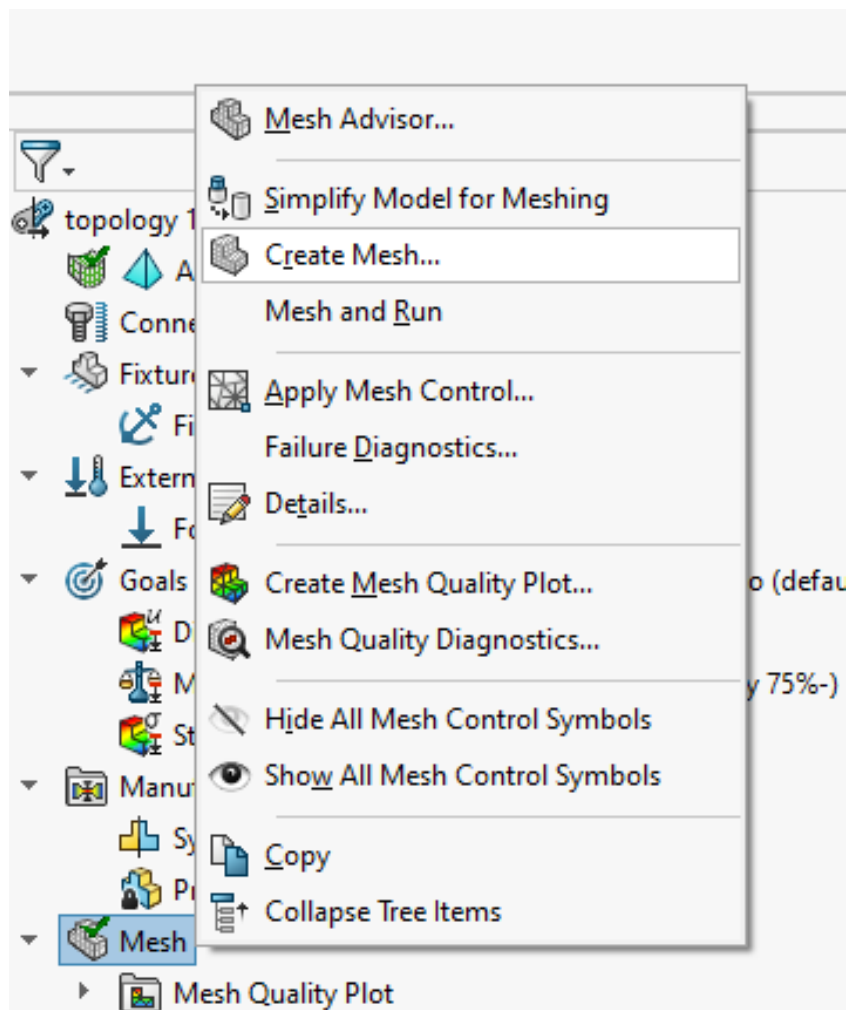


Εικόνα 21

5.2.5 Ορισμός πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

Η δημιουργία του πλέγματος στο πρόγραμμα με πολύ απλό τρόπο στο μενού δεξί κλικ στο mesh επιλογή Create Mesh.

Στην καρτέλα Mesh έχει επιλογές για να βελτιώσουν την ακρίβεια του πλέγματος(κι άρα των αποτελεσμάτων), όπου αλλάζουμε έτσι το είδος διακριτών τμημάτων(πχ τετράεδρά) και το πλήθος αυτών αντίστοιχα.(Εικόνα 22,23&24)



Εικόνα 22

Mesh ?



✓ ✗

Definition Mesh Quality

Message ^

A high quality mesh is recommended for a Stress/Factor of Safety constraint

Mesh Density ^

  **Fine**


Coarse Reset


☒ **Mesh Parameters** ^


☐ Blended curvature-based mesh


☒ Curvature-based mesh


☐ Standard mesh

 mm ▼

 0.76556185mm ▼ ▲

 0.76556185mm ▼ ▲

 8 ▼ ▲

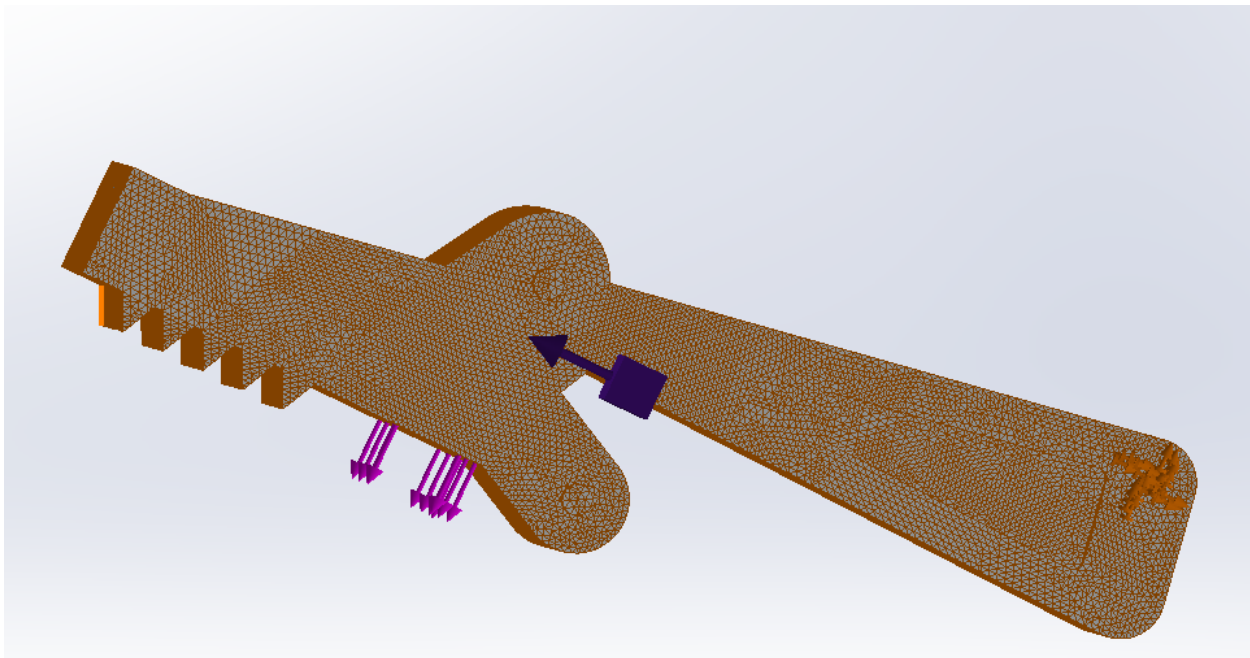
 1.4 ▼ ▲

Options ^

☐ Save settings without meshing

☐ Run (solve) the analysis

Εικόνα 23



Εικόνα 24

5.2.6 Δημιουργία εργασίας τυπολογικής βελτιστοποίησης.

Στο σημείο αυτό αφού έχουμε ορίσει όλες τις συνθήκες και τα όρια αυτό που απομένει να πράξουμε για να ξεκινήσει η διαδικασία είναι να πατήσουμε το εικονίδιο Run This Study στο ribbon.

5.2.7 Επισκόπηση αποτελεσμάτων.

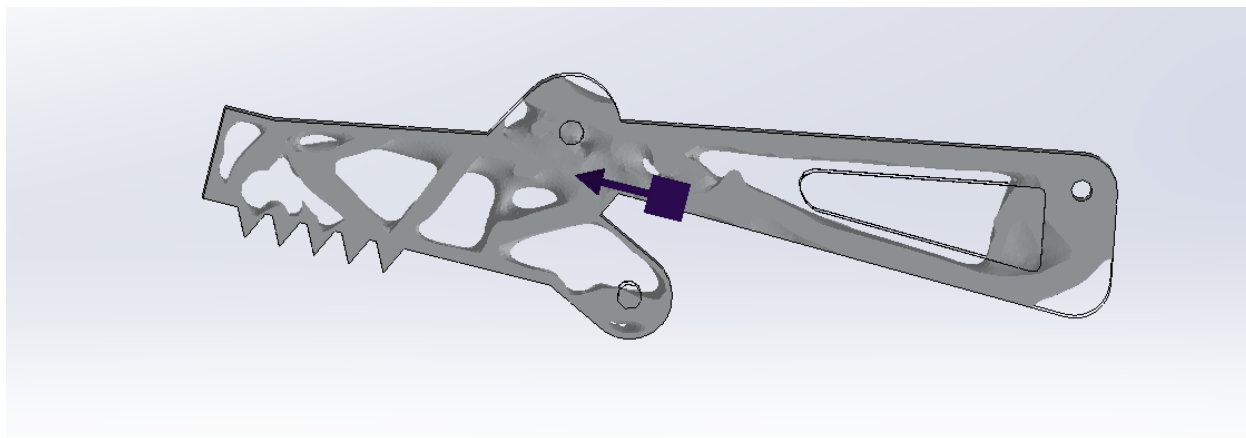
Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της ανάλυσης τα αποτελέσματα μπορούμε να τα εξάγουμε από το φάκελο results. Στη καρτέλα Material Mass θα βρούμε την άρπαγα μας στη βελτιστοποιημένη της μορφή πλέον με το υλικό που έχει αφαιρεθεί.

Στις παρακάτω εικόνες από το 25 έως 28 βλέπουμε το τελικό αντικείμενο μας έχει εξωτερικά ίδιες διαστάσεις μήκους και πλάτους. Επιπροσθέτως παρατηρούμε τροποποιήσεις τόσο στην εσωτερική επιφάνεια αλλά και στην εξωτερική.

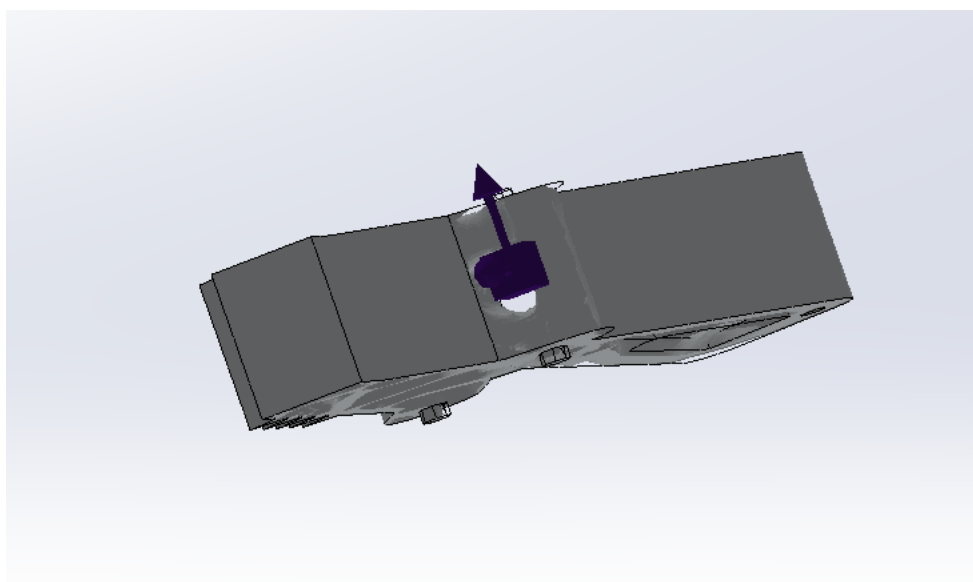
Στις εικόνες 29 έως 31 παρουσιάζετε το αρχικό σχέδιο της άρπαγας και τα μέρη τα οποία μπορούμε να αφαιρέσουμε και να είναι χρηστικό το αντικείμενο μας.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων μας παρουσιάζει ότι η μεγαλύτερη αναπτυσσόμενη τάση είναι 63,4MPa με το όριο ελαστικότητας να είναι στα 215 MPa, και η μέγιστη μετατόπιση 0,294 mm.

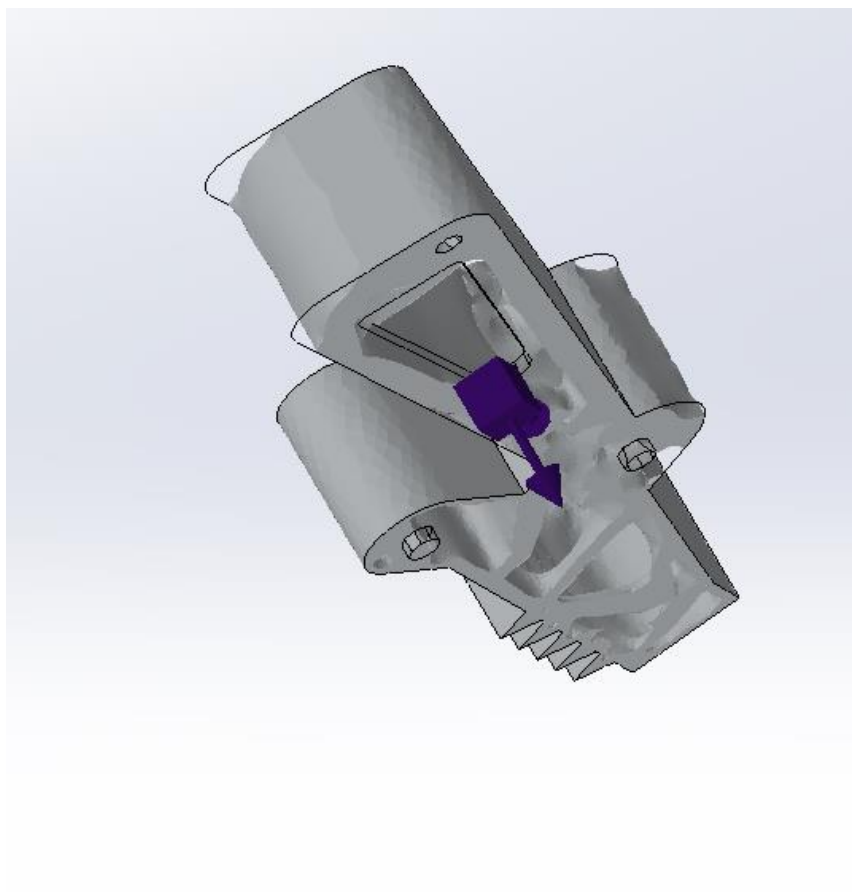
Εφόσον οι περιορισμοί και οι συνθήκες φόρτισης από την στατική ανάλυση που κάναμε στο προηγούμενο βήμα παραμείνουν σταθεροί, θα οριστούν οι στόχοι που θα ισχύσουν για την τυπολογική βελτιστοποίηση ξεκινώντας με ποσοστό μείωσης της μάζας στο 75% και την μέγιστη μετατόπιση να μην είναι μεγαλύτερη από 1.2 φορές. Αφού κάνουμε την διακριτοποίηση και την επίλυση. Η γεωμετρία που προτείνεται είναι αυτή που απεικονίζεται στην εικόνα 25 και γίνεται ένας ξεκάθαρος χρωματικός διαχωρισμός αναμεσά στα σημεία της άρπαγας στα οποία μπορούμε να αφαιρέσουμε υλικό και σε εκείνα που θα παραμείνει σταθερό. Η διαφοροποίηση των χρωμάτων γίνεται ως εξής με κίτρινο απεικονίζονται οι περιοχές που είναι απαραίτητες για να είναι χρηστικό το εξάρτημα μας και μωβ και μπλε αυτές που θα αφαιρεθούν και δεν επηρεάζουν το εξάρτημα. Στις εικόνες 29 έως 31 παρουσιάζεται τη καλύτερη απεικόνιση της προτεινόμενης γεωμετρίας. Εφόσον ορίσαμε το ποσοστό ελάττωσης της μάζας στο 75% αυτής το πρόγραμμα μπορεί να μας εμφανίσει το δοκίμιο με μεγαλύτερο ή μικρότερο ποσοστό μάζας χωρίς να επαναλάβουμε την διαδικασία της επίλυσης όπως φαίνεται στις εικόνες 32 & 33.



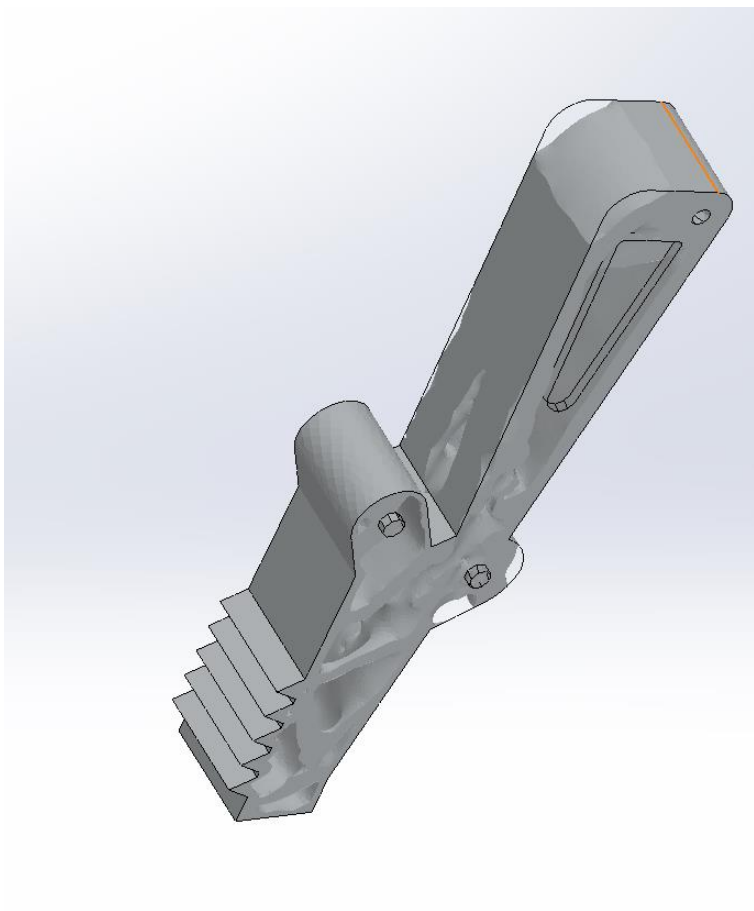
Εικόνα 25



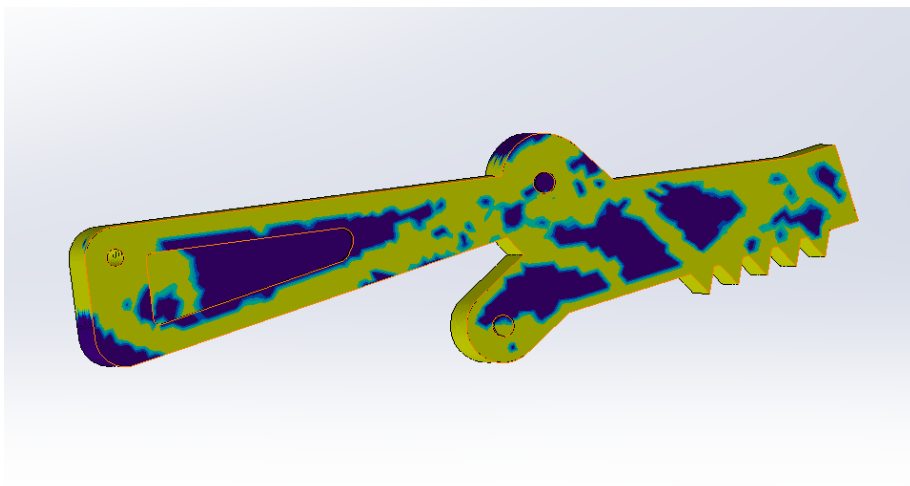
Εικόνα 26



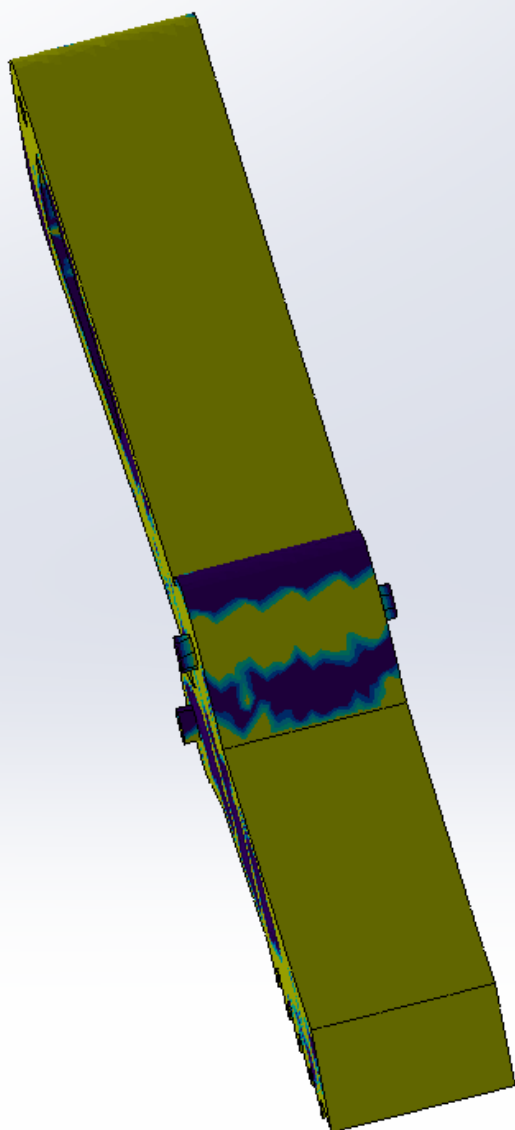
Εικόνα 27



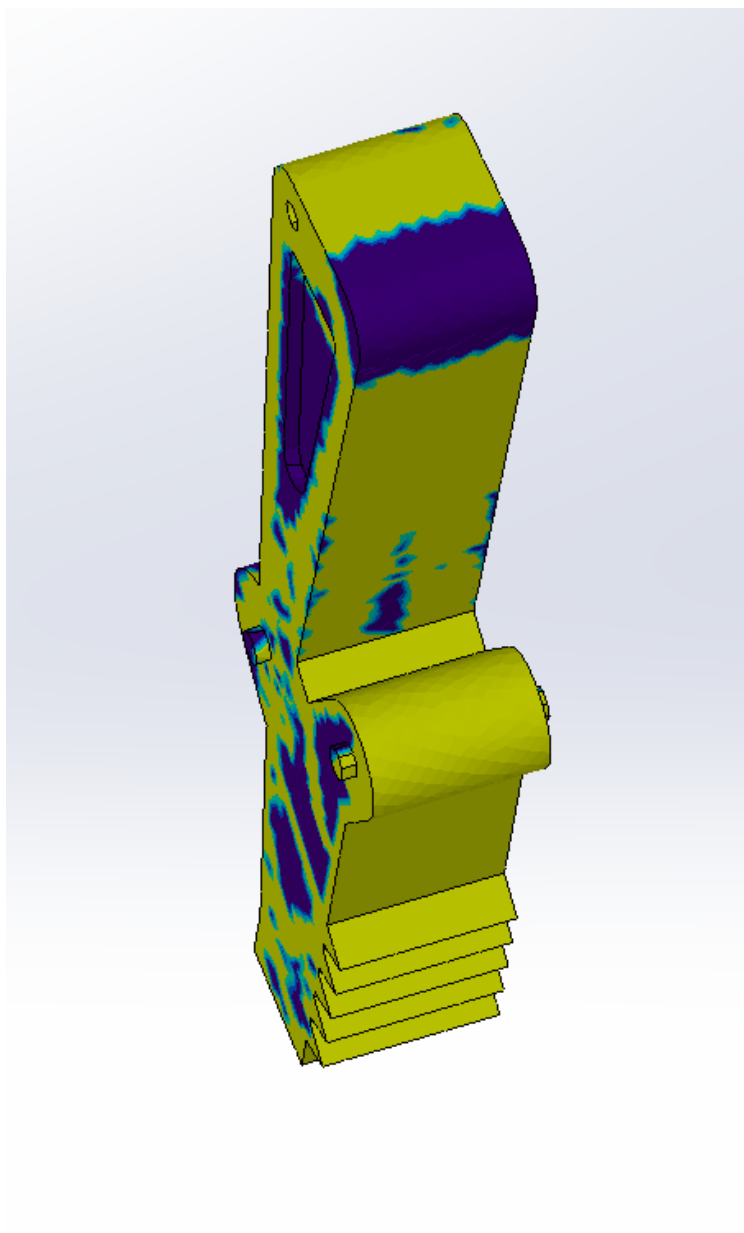
Εικόνα 28



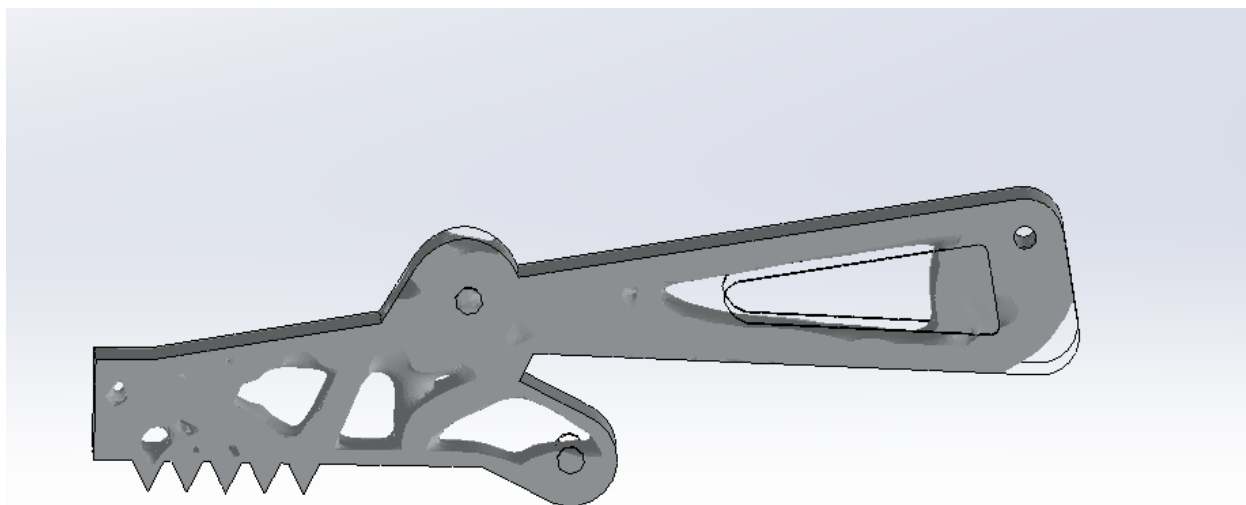
Εικόνα 29



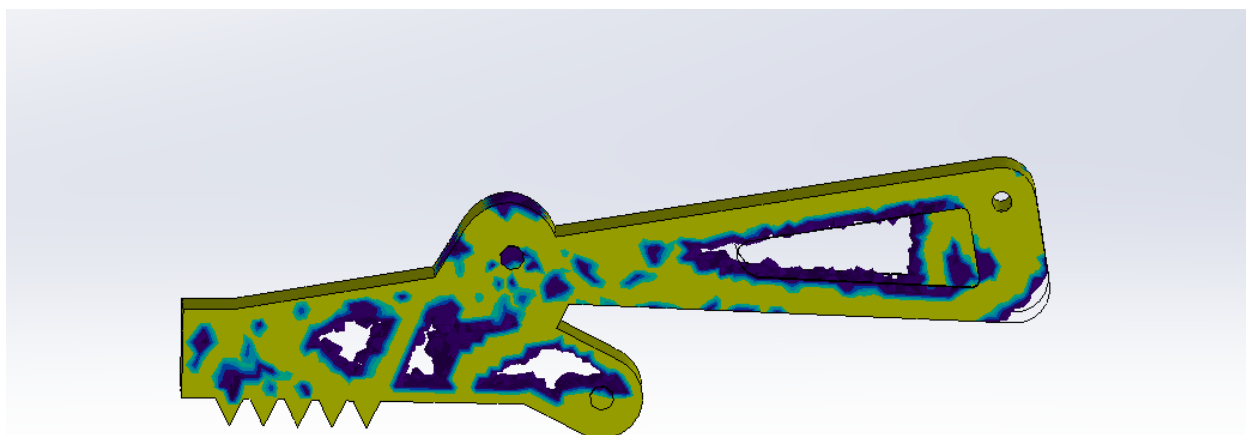
Εικόνα 30



Εικόνα 31



Εικόνα 32



Εικόνα 33

Κεφάλαιο 6

6.1 Συμπεράσματα.

Μέσω της ερευνάς που διεξήχθη κάτσει αδιαμφισβήτητα προφανές ότι η τοπολογική βελτιστοποίηση θα πρέπει να είναι πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας για την δημιουργία ενός νέου προϊόντος ή μεταποίησης των υπάρχων ώστε να αυξάνεται η απόδοση τους και να μειώνεται η μάζα τους. Η τυπολογική βελτιστοποίηση προσφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με άλλους μεθόδους μιας και λαμβάνει υπόψιν της όλες τις παραμέτρους που προσδιορίζουν τη γεωμετρία και τις ιδιότητες του εξαρτήματος αλλά και τις καταπονήσεις του. Η όλη διαδικασία που ακολουθήσε στο πλαίσιο της εργασίας μας δείχνει την ανάγκη της σύγχρονης βιομηχανίας για μικρούς χρόνους ανάπτυξης αγαθών με την μεγαλύτερη δυνατή απόδοση.

Ο ακριβής σχεδιασμός και η ανάλυση έχουν καταστεί απαραίτητη πριν το στάδιο της παραγωγής για αυτό το λόγο είναι αναγκαίο να υπάρχουν και να είναι διαθέσιμα για τους μηχανικούς εξειδικευμένα προγράμματα σχεδίασης και μελέτης αλλά και κατασκευαστικές τεχνολογίες. Η ύπαρξη της τυπολογικής βελτιστοποίησης εντός των user interface των προγραμμάτων CAD τα έχει αναγάγει από περιπλοκά υπολογιστικά μαθηματικά μοντέλα σε ευχάριστα εργαλεία στην εξυπηρέτηση των αναγκών των μηχανικών για την αύξηση της απόδοσης τους κατά την ερεύνα νέων αντικειμένων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “International Federation of Robotics (IFR).” [Online]. Available: ifr.org.
- [2] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics: Modelling, Planning and Control*. London: Springer-Verlag, 2009.
- [3] M. C. Bahadir and S. I. Satoglu, “A Decision Support System for Robot Selection based on Axiomatic Design Principles,” in *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2012, no. August 2015, pp. 674–683.
- [4] H. Yin, S. Huang, M. He, and J. Li, “An overall structure optimization for a light-weight robotic arm,” in *IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2016, pp. 1765–1770.
- [5] M. Grujicic et al., “APPLICATION OF TOPOLOGY, SIZE AND SHAPE OPTIMIZATION METHODS IN POLYMER METAL HYBRID STRUCTURAL LIGHTWEIGHT ENGINEERING,” *Multidiscip. Model. Mat. Str.*, vol. 4, 2008.
- [6] “Solidworks manual, Dassault Systèmes,” 2021.
- [7] K. Saitou, K. Izui, S. Nishiwaki, and P. Papalambros, “A survey of structural optimization in mechanical product development,” *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 214–226, 2005.
- [8] A. Povilionis and A. Bargelis, “Structural optimization in product design process,” *Mechanika*, vol. 81, no. 1, pp. 66–70, 2010.
- [9] T. Stangl, M. Pribek, and S. Wartzack, “Integration of structural optimization in the engineering design process,” *Proceedings of International Design Conference, DESIGN*, pp. 1989–1998, 2014.
- [10] A. M. Paterson, R. J. Bibb, and R. I. Campbell, “Evaluation of a digitized splinting approach with multiple-material functionality using additive manufacturing technologies,” *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2012*, pp. 656–672, 2012.
- [11] I. Campbell, D. Bourell, and I. Gibson, “Additive manufacturing: Rapid prototyping comes of age,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 255–258, Jun. 2012.
- [12] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, 2nd ed. New York, NY: Springer New York, 2015.
- [13] “ASTM F2792-12a, Standard terminology for additive manufacturing technologies (Withdrawn 2015).” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

- [14] N. Oxman, S. Keating, and E. Tsai, "Functionally graded rapid prototyping," in *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*, London: CRC Press, 2011, pp. 483–489.
- [15] N. Hopkinson, R. J. M. Hague, and P. M. Dickens, *Rapid manufacturing: An industrial revolution for the digital age*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2006.
- [16] <https://hightechjournal.org/index.php/HIJ/article/view/15>
- [17] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836812002338>
- [18] https://www.researchgate.net/publication/281336204_Simulation_and_experimental_validation_of_powertrain_mounting_bracket_design_obtained_from_multi-objective_topology_optimization
- [19] <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-021-03019-6>
- [20] <https://mae.ufl.edu/nkim/Papers/paper87.pdf>
- [21] https://www.researchgate.net/publication/334974685_State_of_the_art_of_generative_design_and_topology_optimization_and_potential_research_needs
- [22] https://dione.lib.unipi.gr/xmlui/bitstream/handle/unipi/13437/Savourdos_TMD1918.pdf?sequence=1
- [23] https://help.solidworks.com/2019/English/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm