

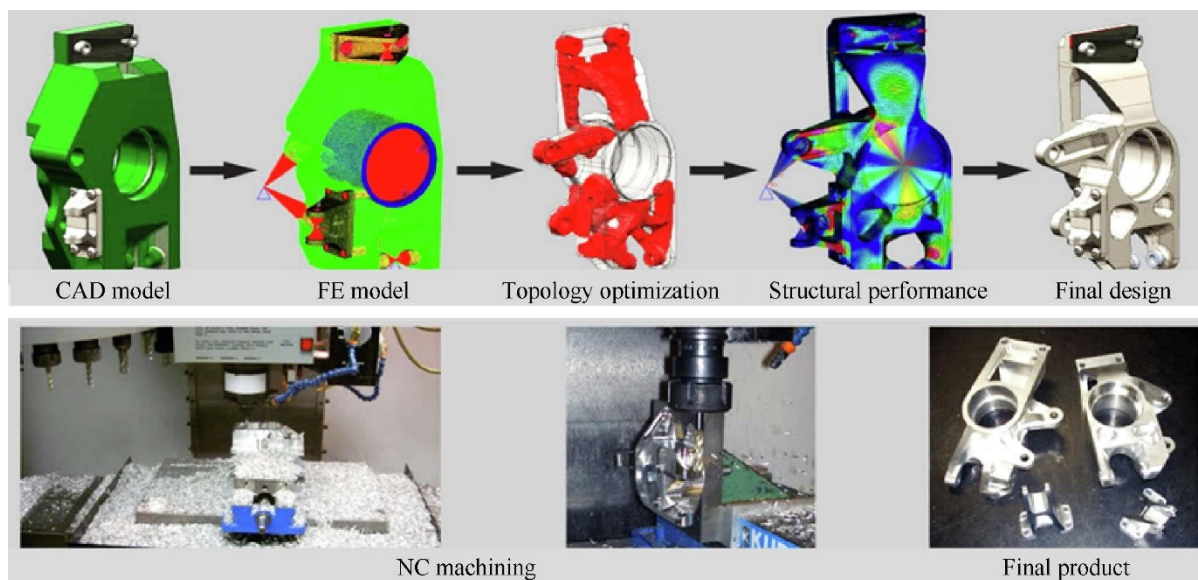


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ



Δυνατότητες εφαρμογής τοπολογικής βελτιστοποίησης σε μηχανολογικά εξαρτήματα

Potential applications of topology optimization in mechanical components

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γεώργιος Μαυρογένης

AM: 2023019035

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής, Σταυρουλάκης Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής, Αντωνιάδης Αριστομένης

Επίκουρος Καθηγητής, Αλευράς Παναγιώτης

Ιούλιος 2025

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην αξιοποίηση της μεθόδου τοπολογικής βελτιστοποίησης για τη σχεδίαση εξαρτημάτων. Η πλειονότητα της επιστημονικής βιβλιογραφίας περιορίζεται στη χρήση μεθόδων προσθετικής κατασκευής για την παραγωγή τοπολογικά βελτιστοποιημένων εξαρτημάτων, λόγω της πολυπλοκότητάς τους.

Παρόλο που οι μέθοδοι προσθετικής κατασκευής έχουν γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη και το κόστος παραγωγής έχει μειωθεί σημαντικά, οι κλασσικές μέθοδοι παραγωγής όπως χύτευση υπό πίεση, προοδευτική διαμόρφωση με καλούπι κ.α., εξακολουθούν να αποτελούν τις κυριότερες μεθόδους παραγωγής εξαρτημάτων σε παραγωγές μεγάλης κλίμακας.

Στη διπλωματική αυτή θα εφαρμοστεί η μέθοδος της τοπολογικής βελτιστοποίησης σε εξαρτήματα, λαμβάνοντας ως περιορισμό τη δυνατότητα παραγωγής τους με κλασσικές μεθόδους παραγωγής. Λογισμικά που αξιοποιούνται στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής αποτελούν το Solidworks για τη σχεδίαση των εξαρτημάτων και την τοπολογική βελτιστοποίηση τους και το Ansys, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η παραμετρική βελτιστοποίηση και η κατασκευή των μεταμοντέλων, αξιοποιώντας το πακέτο Ansys OptiSlang.

Η ροή της μελέτης ξεκινά με την τοπολογική βελτιστοποίηση, μέσα από την οποία εξάγονται οι περιοχές του εξαρτήματος από τις οποίες δύναται να αφαιρεθεί υλικό. Στη συνέχεια το εξάρτημα εισάγεται στο λογισμικό Ansys, όπου σχεδιάζονται οι περιοχές αφαίρεσης υλικού, βάσει των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά την τοπολογική βελτιστοποίηση. Οι περιοχές αφαίρεσης υλικού σχεδιάζονται παραμετρικά, ώστε να είναι δυνατόν μέσω επαναληπτικής διαδικασίας παραμετρικής βελτιστοποίησης, να εξαχθούν οι βέλτιστοι παράμετροι. Στη συνέχεια ορίζεται το εύρος των σετ παραμέτρων και το μοντέλο εισάγεται στο Ansys OptiSlang. Πραγματοποιείται επίλυση του πλήρους μοντέλου για ένα πλήθος σετ γεωμετρικών παραμέτρων, διαδικασία που είναι απαραίτητη για την κατασκευή του μεταμοντέλου. Με την ολοκλήρωση της κατασκευής του μεταμοντέλου η επαναληπτική διαδικασία παραμετρικής βελτιστοποίησης πραγματοποιείται για χιλιάδες διαφορετικά σετ παραμέτρων, από τα οποία εξάγεται η βέλτιστη γεωμετρία. Η χρήση του μεταμοντέλου επιτρέπει την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας για χιλιάδες σετ γεωμετρικών παραμέτρων σε πολύ μικρό χρόνο και με πολύ μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις. Η επίδοση της βέλτιστης γεωμετρίας που εξάγεται από την προσομοίωση του μεταμοντέλου επιβεβαιώνεται με την επίλυση του πλήρους μοντέλου.

Λέξεις κλειδιά: Τοπολογική βελτιστοποίηση, Παραμετρική βελτιστοποίηση, Ανάλυση με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, Μεταμοντέλα

Abstract

This thesis is focused on the application of topology optimization in the design of mechanical components. Most of the scientific literature is limited on using Additive Manufacturing for producing topology optimized parts, due to their complexity.

Although the Additive Manufacturing Methods have experienced significant growth and the cost of production has been extensively lowered, the traditional manufacturing methods as die-casting, progressive die forming and others, continue to constitute the main methods of producing parts in large scale productions.

In this thesis the topology optimization method will be applied in parts, taking into consideration the manufacturability of them with traditional methods of manufacturing. Two main software will be used in this thesis, Solidworks for designing the parts and conducting the topology optimization and Ansys for the parametric optimization and the construction of the metamodel, utilizing Ansys OptiSlang.

The workflow of the study starts with the topology optimization, from which the regions of the part that mass can be removed are identified. Then the part is imported into Ansys, on which the removal regions are modelled in a parametric way, so that a parametric optimization can be conducted and the best performing parameter set can be identified. After that the range of the parameters is defined and the model is imported into Ansys OptiSlang. The full fidelity model is simulated for a number of parameters set, a process that is necessary so that the metamodel can be build. After the successful build of the metamodel, the parametric optimization is conducted using the metamodel and evaluating the performance of thousands of parameter sets. The use of the metamodel allows for the completion of the parametric optimization by evaluating the performance of thousands of parameters sets in a short time period with very minimal computational needs. Finally, the performance of the best design extracted from the simulation of the metamodel is verified by comparing it with the high-fidelity model.

Key words: Topology optimization, parametric optimization, Finite Element Analysis, Metamodels

Θα ήθελα να ευχαριστώ τον κύριο Γ. Σταυρουλάκη για την υποστήριξη και την καθοδήγησή του, καθ' όλη την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω και να αφιερώσω την εργασία αυτή στην οικογένειά μου, τους γονείς μου και τον αδερφό μου, που αποτελούν στήριγμα και έμπνευση για μένα.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Κατάλογος Εικόνων	6
Κατάλογος Πινάκων	10
1. Υπολογιστική μηχανική	11
1.1 Εισαγωγή στην Υπολογιστική Μηχανική	11
1.2 Τοπολογική Βελτιστοποίηση	14
1.3 Γενετικός-Παραγωγικός σχεδιασμός	17
1.4 Σύγκριση Topology Optimization & Generative Design	19
1.5 Metamodels & Reduced-order analysis	20
2. Μέθοδοι παραγωγής	23
2.1 Εισαγωγή	23
2.2 Χύτευση υπό πίεση (Die Casting)	25
2.4 Προοδευτική διαμόρφωση με καλούπι (Progressive Die Stamping)	28
2.5 Προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing)	30
3. Υπολογιστική μελέτη	32
3.1 Εισαγωγή	32
3.2 Γεωμετρία No. 1 παραγομένη με μέθοδο προοδευτικής κοπής	34
3.2.1 Περιγραφή	34
3.2.2 Σχεδιασμός γεωμετρίας	34
3.2.3 Τοπολογική βελτιστοποίηση στο περιβάλλον του Solidworks	37
3.2.4 Εισαγωγή αρχικής γεωμετρίας στο Ansys	43
3.2.5 Διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang	47
3.2.6 Αποτελέσματα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang	56
3.2.7 Τοπολογική Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία	59
3.3 Γεωμετρία No. 2 παραγόμενη με μέθοδο κατεργασίας CNC	60
3.3.1 Περιγραφή	60
3.3.2 Σχεδιασμός γεωμετρίας	61
3.3.3 Τοπολογική βελτιστοποίηση στο περιβάλλον του Solidworks	64
3.3.4 Εισαγωγή αρχικής γεωμετρίας στο Ansys	71
3.3.5 Διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang	76
3.3.6 Αποτελέσματα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang	84
3.3.7 Τοπολογική Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία	88
3.4 Γεωμετρία No. 3 παραγόμενη με χύτευση υπό πίεση	90
3.4.1 Περιγραφή	90

3.4.2. Σχεδιασμός γεωμετρίας	90
3.4.3. Τοπολογική βελτιστοποίηση στο περιβάλλον του Solidworks	93
3.4.4. Εισαγωγή αρχικής γεωμετρίας στο Ansys	99
3.4.5. Διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang.....	104
3.4.6. Αποτελέσματα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang.....	111
3.4.7. Τοπολογική Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία	115
4. Συμπεράσματα.....	116
Βιβλιογραφία	117

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 - Διάγραμμα ροής σχεδιασμού προϊόντων [2]	11
Εικόνα 2 - Βήματα Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων [3].....	12
Εικόνα 3 - Τύποι στοιχείων υπολογιστικού πλέγματος [4].....	12
Εικόνα 4 - Διαφορές πύκνωσης υπολογιστικού πλέγματος [4].....	13
Εικόνα 5 - Τοπολογική βελτιστοποίηση δικτυώματος, (A) Αρχική γεωμετρία, (B) Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία [6].....	14
Εικόνα 6 - Τοπολογική βελτιστοποίηση δισδιάστατης γεωμετρίας [7]	14
Εικόνα 7 - Τοπολογική βελτιστοποίηση τρισδιάστατης γεωμετρίας [6].....	14
Εικόνα 8 - Μέθοδος SIMP [8].....	15
Εικόνα 9 - Level Set Method (α) Level Set function, (b) Γεωμετρία τοπολογικά βελτιστοποιημένη με Level Set Method [8]	15
Εικόνα 10 - ESO Method - Επαναληπτική διαδικασία αφαίρεσης υλικού [11]	16
Εικόνα 11 - Διάγραμμα ροής Generative Design [13].....	17
Εικόνα 12 - Ροή εργασία για Autodesk Generative Design [13]	17
Εικόνα 13 - Αριστερά: Αρχική Γεωμετρία, Δεξιά: Γεωμετρία εξαγωγής από Generative Design [14]..	18
Εικόνα 14 - (α) Αρχική γεωμετρία, (b) Γεωμετρία από Topology Optimization, (c) Γεωμετρία από Generative Design [15].....	19
Εικόνα 15 - Ansys OptiSlang [35].....	21
Εικόνα 16 - Ansys OptiSlang - Metamodel of Optimal Prognosis [35]	21
Εικόνα 17 – Πίνακας επιλογής μεθόδου παραγωγής PRIMA [18].....	23
Εικόνα 18 - Χύτευση υπό πίεση [18].....	25
Εικόνα 19 - CNC Τόρνος [18]	26
Εικόνα 20 - CNC Φρέζα [18]	27
Εικόνα 21 - Διαδικασία της προσθετικής διαμόρφωσης με καλούπι [23]	28
Εικόνα 22 - Διαδοχικές διαμορφώσεις [24].....	29
Εικόνα 23 - Διαδικασία παραγωγής εξαρτήματος με προσθετική κατασκευή [27]	30
Εικόνα 24 - Κατηγορίες Προσθετικής Κατασκευής [27]	31
Εικόνα 25 – (α) αρχική γεωμετρία, (b)-(f) Γεωμετρίες παραγόμενες αποκλειστικά με μέθοδο προσθετικής κατασκευής [38]	32
Εικόνα 26 - Προτεινόμενο διάγραμμα ροής για βέλτιστο σχεδιασμό γεωμετριών	33
Εικόνα 27 - Μοντέλο No.1 [39]	34

Εικόνα 28 - Βήμα 1 σχεδιασμού.....	34
Εικόνα 29 - Βήμα 2 σχεδιασμού.....	35
Εικόνα 30 - Βήμα 3 σχεδιασμού.....	35
Εικόνα 31 - Βήμα 4 σχεδιασμού.....	36
Εικόνα 32 - Τελική μορφή γεωμετρίας	36
Εικόνα 33 - Ανάπτυγμα Γεωμετρίας Νο. 1	37
Εικόνα 34 - Solidworks Topology Study.....	37
Εικόνα 35 - Μηχανικές ιδιότητες υλικού	38
Εικόνα 36 - Στήριξη της γεωμετρίας	38
Εικόνα 37 - Εντολή Split	39
Εικόνα 38 - Φόρτιση γεωμετρίας.....	39
Εικόνα 39 - Στόχος της τοπολογικής βελτιστοποίησης	40
Εικόνα 40 - Preserved Regions	40
Εικόνα 41 - Symmetry Control	41
Εικόνα 42 - Υπολογιστικό πλέγμα γεωμετρίας	41
Εικόνα 43 - Σύγκλιση υπολογιστικού μοντέλου.....	42
Εικόνα 44 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία.....	42
Εικόνα 45 - Static Structural	43
Εικόνα 46 - Engineering Data	43
Εικόνα 47 - Εισαγωγή γεωμετρίας.....	44
Εικόνα 48 - Υπολογιστικό πλέγμα	44
Εικόνα 49 – Συνθήκες στήριξης και φόρτισης	45
Εικόνα 50 - Deformation and Stress Results	45
Εικόνα 51 - Safety Factor Results	46
Εικόνα 52 - Area of Minimum Safety Factor	46
Εικόνα 53 - Νέο project.....	47
Εικόνα 54 - Εισαγωγή γεωμετρίας στο Ansys	47
Εικόνα 55 – Περιοχή 1: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	48
Εικόνα 56 - Περιοχή 2: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	49
Εικόνα 57 - Περιοχή 3: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	49
Εικόνα 58 - Περιοχή 4: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	50
Εικόνα 59 – Γεωμετρία, Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	50
Εικόνα 60 - Παράμετροι για περιοχές αφαίρεσης υλικού	51
Εικόνα 61 - Ορισμός μάζας γεωμετρίας ως παράμετρο	51
Εικόνα 62 - Διακριτοποίηση γεωμετρίας.....	52
Εικόνα 63 - Model Tree	52
Εικόνα 64 - Ansys OptiSlang Sensitivity Module	53
Εικόνα 65 - Εύρος παραμέτρων σχεδίασης	54
Εικόνα 66 - Στόχος και Κριτήριο της επαναληπτικής διαδικασίας.....	54
Εικόνα 67 - Επιλογή Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis	55
Εικόνα 68 - Αποτελέσματα επαναληπτικής διαδικασίας.....	56
Εικόνα 69 - Βέλτιστη γεωμετρία	56
Εικόνα 70 - Coefficient of Prognosis.....	57

Εικόνα 71 - Optimization Module	57
Εικόνα 72 - Optimization Wizard.....	58
Εικόνα 73 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & πλήρους μοντέλου	58
Εικόνα 74 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία.....	59
Εικόνα 75 - Μοντέλο No. 2 [40]	60
Εικόνα 76 - Βασικό sketch γεωμετρίας	61
Εικόνα 77 - Extrude No. 1.....	61
Εικόνα 78 - Extrude No. 2.....	62
Εικόνα 79 – Shell	62
Εικόνα 80 - Cut Extrude.....	62
Εικόνα 81 - Boss Extrude.....	63
Εικόνα 82 - Hole Wizard	63
Εικόνα 83 – Fillets	64
Εικόνα 84 - Solidworks Topology Study.....	64
Εικόνα 85 - Μηχανικές ιδιότητες υλικού	65
Εικόνα 86 - Στήριξη της γεωμετρίας	65
Εικόνα 87 - Γωνία επιβολής φόρτισης	66
Εικόνα 88 - Επιβολή φόρτισης	66
Εικόνα 89 - Στόχος της τοπολογικής βελτιστοποίησης	67
Εικόνα 90 - Preserved Regions.....	67
Εικόνα 91 - Symmetry Plane	68
Εικόνα 92 - Υπολογιστικό πλέγμα γεωμετρίας	69
Εικόνα 93 - Σύγκλισης τοπολογικής βελτιστοποίησης.....	69
Εικόνα 94 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία.....	70
Εικόνα 95 - Static Structural	71
Εικόνα 96 - Engineering Data	72
Εικόνα 97 - Εισαγωγή γεωμετρίας.....	72
Εικόνα 98 - Υπολογιστικό πλέγμα	73
Εικόνα 99 - Συνθήκες στήριξης και φόρτισης	73
Εικόνα 100 - Deformation and Stress Results	74
Εικόνα 101 - Safety Factor Results	75
Εικόνα 102 - Area of Minimum Safety Factor	75
Εικόνα 103 - Νέο project.....	76
Εικόνα 104 - Εισαγωγή γεωμετρίας στο Ansys	76
Εικόνα 105 - Περιοχή 1: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	77
Εικόνα 106 - Περιοχή 2: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	77
Εικόνα 107 - Περιοχή 3: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	78
Εικόνα 108 - Περιοχή 4: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	78
Εικόνα 109 - Γεωμετρία, Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	78
Εικόνα 110 - Παράμετροι για περιοχές αφαίρεσης υλικού	79
Εικόνα 111 - Ορισμός μάζας γεωμετρίας ως παράμετρο	79
Εικόνα 112 - Διακριτοποίηση γεωμετρίας	80
Εικόνα 113 - Model Tree	81

Εικόνα 114 - Ansys OptiSlang Sensitivity Module	82
Εικόνα 115 - Εύρος παραμέτρων σχεδίασης	82
Εικόνα 116 - Στόχος και Κριτήριο της επαναληπτικής διαδικασίας.....	83
Εικόνα 117 - Επιλογή Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis	84
Εικόνα 118 - Αποτελέσματα επαναληπτικής διαδικασίας.....	85
Εικόνα 119 - Βέλτιστη γεωμετρία	85
Εικόνα 120 - Coefficient of Prognosis	86
Εικόνα 121 - Optimization Module	87
Εικόνα 122 - Optimization Wizard.....	87
Εικόνα 123 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & πλήρους μοντέλου	88
Εικόνα 124 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία.....	89
Εικόνα 125 - Μοντέλο No. 3 [41]	90
Εικόνα 126 - Βασικό sketch γεωμετρίας	91
Εικόνα 127 - Extrude No. 1	91
Εικόνα 128 - Extrude No. 2	92
Εικόνα 129 – Ράδια	92
Εικόνα 130 - Solidworks Topology Study.....	93
Εικόνα 131 - Μηχανικές ιδιότητες υλικού	94
Εικόνα 132 - Στήριξη της γεωμετρίας	94
Εικόνα 133 - Γωνία επιβολής φόρτισης	95
Εικόνα 134 - Επιβολή φόρτισης	95
Εικόνα 135 - Στόχος της τοπολογικής βελτιστοποίησης	96
Εικόνα 136 - Preserved Regions.....	96
Εικόνα 137 – De mold Control	97
Εικόνα 138 - Υπολογιστικό πλέγμα γεωμετρίας	97
Εικόνα 139 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία.....	98
Εικόνα 140 - Static Structural.....	99
Εικόνα 141 - Engineering Data	100
Εικόνα 142 - Εισαγωγή γεωμετρίας.....	100
Εικόνα 143 - Υπολογιστικό πλέγμα	101
Εικόνα 144 - Συνθήκες στήριξης και φόρτισης	101
Εικόνα 145 - Deformation and Stress Results	102
Εικόνα 146 - Safety Factor Results	102
Εικόνα 147 - Area of Minimum Safety Factor	103
Εικόνα 148 - Νέο project.....	104
Εικόνα 149 - Εισαγωγή γεωμετρίας στο Ansys	104
Εικόνα 150 - Περιοχή 1: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys	105
Εικόνα 151 - Τελική γεωμετρία προς παραμετρική βελτιστοποίηση	105
Εικόνα 152 - Παράμετροι για περιοχές αφαίρεσης υλικού	106
Εικόνα 153 - Ορισμός μάζας γεωμετρίας ως παράμετρο	106
Εικόνα 154 - Διακριτοποίηση γεωμετρίας.....	107
Εικόνα 155 - Model Tree	108
Εικόνα 156 - Ansys OptiSlang Sensitivity Module	109
Εικόνα 157 - Εύρος παραμέτρων σχεδίασης	109
Εικόνα 158 - Στόχος και Κριτήριο της επαναληπτικής διαδικασίας.....	110
Εικόνα 159 - Επιλογή Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis.....	110
Εικόνα 160 - Αποτελέσματα επαναληπτικής διαδικασίας.....	111

Εικόνα 161 - Βέλτιστη γεωμετρία	111
Εικόνα 162 - Coefficient of Prognosis	112
Εικόνα 163 - Optimization Module	113
Εικόνα 164 - Optimization Wizard.....	113
Εικόνα 165 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & πλήρους μοντέλου	114
Εικόνα 166 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία.....	115

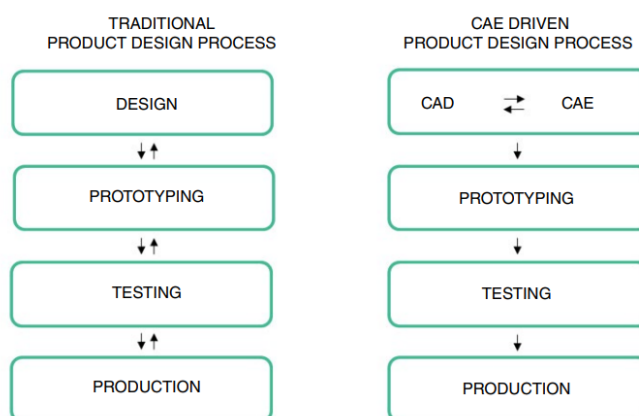
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 - Σύγκριση αρχικής και τελικής μάζας γεωμετρίας	42
Πίνακας 2 - Στοιχεία αρχικής γεωμετρίας.....	47
Πίνακας 3 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & Πλήρους μοντέλου	58
Πίνακας 4 - Σύγκριση αρχικής και τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας.....	59
Πίνακας 5 - Σύγκριση αρχικής και τελικής μάζας γεωμετρίας	71
Πίνακας 6 - Στοιχεία αρχικής γεωμετρίας.....	76
Πίνακας 7 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & Πλήρους μοντέλου	88
Πίνακας 8 - Σύγκριση αρχικής και τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας.....	89
Πίνακας 9 - Σύγκριση αρχικής και τελικής μάζας γεωμετρίας	98
Πίνακας 10 - Στοιχεία αρχικής γεωμετρίας.....	103
Πίνακας 11 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & Πλήρους μοντέλου	114
Πίνακας 12 - Σύγκριση αρχικής και τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας.....	115

1. Υπολογιστική μηχανική

1.1 Εισαγωγή στην Υπολογιστική Μηχανική

Η υπολογιστική μηχανική – Computer Aid Engineering (CAE) αποτελεί χρήσιμο εργαλείο στη διαδικασία σχεδιασμού και παραγωγής προϊόντων. Με τη βοήθεια πακέτων υπολογιστικής μηχανικής, ο σχεδιαστής είναι σε θέση να αξιολογήσει την επίδοση ενός εξαρτήματος κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού και να εφαρμόσει αλλαγές πριν την παραγωγή του [1].

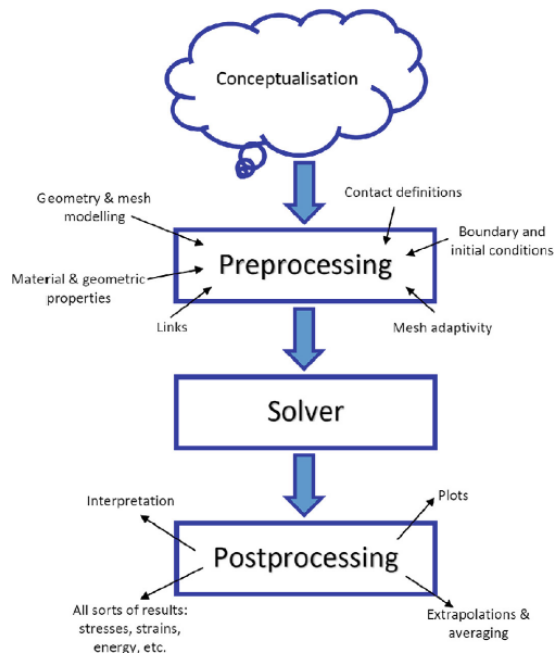


Εικόνα 1 - Διάγραμμα ροής σχεδιασμού προϊόντων [2]

Τα υπολογιστικά πακέτα CAE αξιοποιούν υπολογιστικές μεθόδους, οι οποίες πρώτο-διατυπώθηκαν κατά το 1700 και αναπτύχθηκαν περαιτέρω στο δεύτερο μισό του 1900 [3]. Τέτοιοι μέθοδοι αποτελούν οι μέθοδοι πεπερασμένου όγκου – Finite Volume Method (FVM) και μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων – Finite Element Method (FEM). Πιο συνήθης υπολογιστική μέθοδος αποτελεί η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM), κατά την οποία διακριτοποιείται το πρόβλημα – γεωμετρία σε πολλαπλά πεπερασμένα στοιχεία, καθένα για το οποίο ορίζεται η βασική διαφορική εξίσωση. Το σύνολο των διαφορικών αυτών εξισώσεων στοιχειοθετεί το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος, με την επίλυση του οποίου εξάγεται η προσομοίωση του μοντέλου με πολύ καλή ακρίβεια.

Βασικά βήματα των αλγορίθμων που βασίζονται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν:

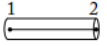
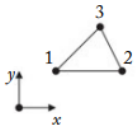
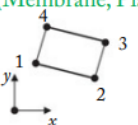
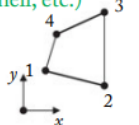
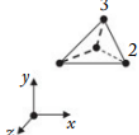
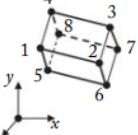
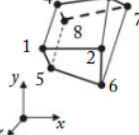
1. Προεπεξεργασία – Preprocessing: Στο βήμα αυτό ορίζεται η γεωμετρία και πραγματοποιείται η διακριτοποίηση της στα επιμέρους στοιχεία. Επιπλέον επιβάλλονται οι συνοριακές συνθήκες και ορίζονται τα στοιχεία της γεωμετρίας (υλικό).
2. Επίλυση: Το σύνολο των διαφορικών εξισώσεων για τα επιμέρους στοιχεία επιλύονται σε αυτό το βήμα.
3. Μετεπεξεργασία – Postprocessing: Στο βήμα αυτό εξάγονται τα δεδομένα και δημιουργούνται γραφήματα για το μοντέλο.



Εικόνα 2 - Βήματα Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων [3]

Πρακτική εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) αποτελεί η ανάλυση με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων – Finite Element Analysis (FEA). Η πλειονότητα των λογισμικών σχεδίασης (CAD) ενσωματώνουν πακέτα FEA (Solidworks, Autodesk Fusion 360, Siemens NX κ.α.). Επιπλέον διατίθενται μεμονωμένα υπολογιστικά πακέτα FEA (ANSYS, Abaqus, Nastran κ.α.).

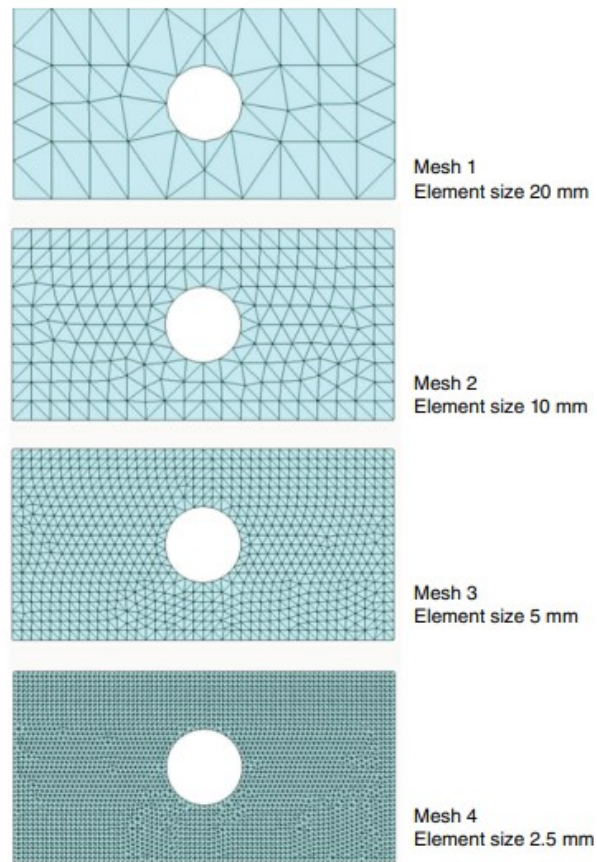
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η δημιουργία πλέγματος – meshing, αποτελεί βασικό τμήμα της προεπεξεργασίας του μοντέλου. Ανάλογα τον τύπο ανάλυσης μπορούν να αξιοποιηθούν στοιχεία μίας, δύο ή τριών διαστάσεων [4].

Type	Elements (nodes)		
1D (line)	 Line element (Spring, Bar, Truss, Beam, Pipe, etc.)		
2D (plane)	 Triangular	 Rectangular (Membrane, Plate, Shell, etc.)	 Quadrilateral
3D (solid)	 Tetrahedral	 Regular hexahedral	 Irregular hexahedral

Εικόνα 3 - Τύποι στοιχείων υπολογιστικού πλέγματος [4]

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων εξαρτώνται σημαντικά από την πυκνωση και την ποιότητα του πλέγματος. Για το λόγο αυτό η επιλογή του κατάλληλου τύπου και πυκνωσης πλέγματος αποτελεί σημαντικό βήμα για την εξαγωγή αξιόπιστων δεδομένων. Ένα υπολογιστικό πλέγμα θεωρείται ικανοποιητικό όταν έχει συγκλίνει το σφάλμα διακριτοποίησης.

Στόχος αποτελεί η επίτευξη υπολογιστικής λύσης κατά την οποία τα εξαγόμενα δεδομένα δεν μεταβάλλονται σημαντικά κατά την αλλαγή των ιδιοτήτων του πλέγματος [4].

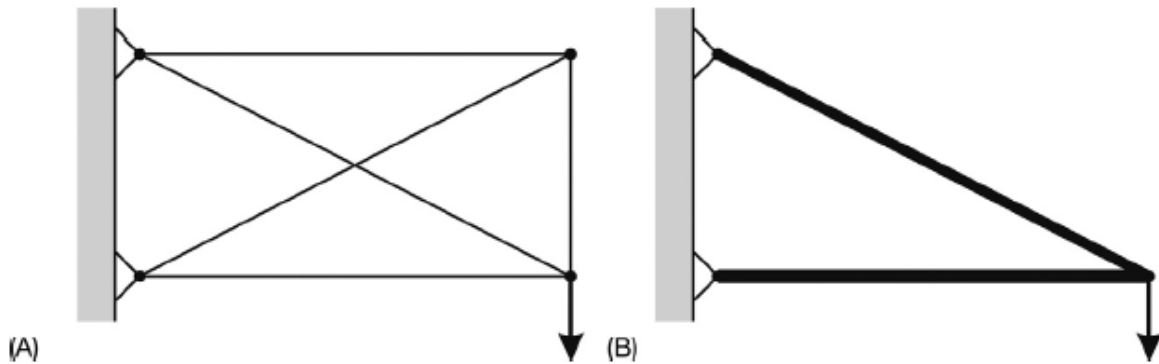


Εικόνα 4 - Διαφορές πύκνωσης υπολογιστικού πλέγματος [4]

1.2. Τοπολογική Βελτιστοποίηση

Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποτελεί ισχυρό εργαλείο για τη βέλτιστη κατανομή υλικού σε μια γεωμετρία, η οποία υπόκειται σε φορτία και συνοριακές συνθήκες στήριξης [5]. Στόχος της τοπολογικής βελτιστοποίησης μεταξύ άλλων είναι η ελαχιστοποίηση της μάζας, η μεγιστοποίηση της ακαμψίας, η ελαχιστοποίησης τάσεων και παραμορφώσεων κ.α. [6].

Σε διακριτές γεωμετρίες όπως τα δικτυώματα, η τοπολογική βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται επιτρέποντας σε γεωμετρίες σχεδιασμού, όπως η διατομή μελών, να έχουν μηδενική τιμή.



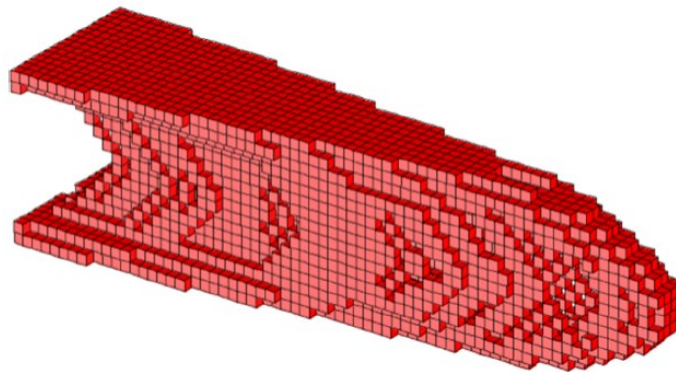
Εικόνα 5 - Τοπολογική βελτιστοποίηση δικτυώματος, (Α) Αρχική γεωμετρία, (Β) Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία [6]

Σε συνεχείς – δισδιάστατες γεωμετρίες, η τοπολογική βελτιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί, επιτρέποντας στο πάχος του υλικού να δεχθεί μηδενικές τιμές σε διάφορες περιοχές του, σχηματίζοντας κοιλότητες (οπές).



Εικόνα 6 - Τοπολογική βελτιστοποίηση δισδιάστατης γεωμετρίας [7]

Σε τρισδιάστατες γεωμετρίες η τοπολογική βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται επιτρέποντας σε παραμέτρους που σχετίζονται με τη πυκνότητα να πάρουν οποιαδήποτε τιμή έως και μηδενική.

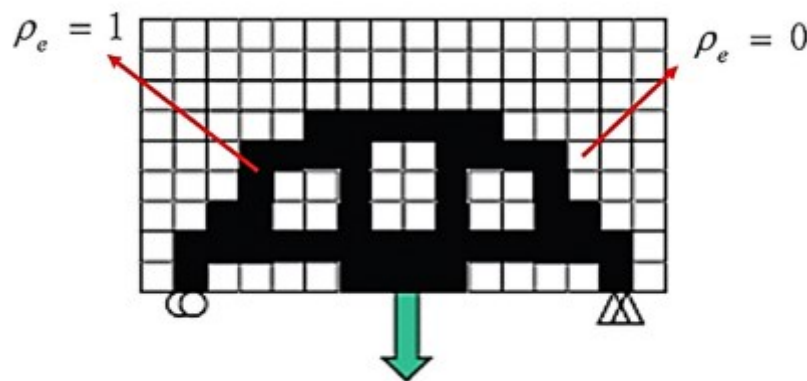


Εικόνα 7 - Τοπολογική βελτιστοποίηση τρισδιάστατης γεωμετρίας [6]

Δύο βασικά χαρακτηριστικά της τοπολογικής βελτιστοποίησης αποτελούν ότι η ελαστική ιδιότητα του υλικού ως συνάρτηση της πυκνότητας μεταβάλλεται στον όγκο της γεωμετρίας και ότι μέρος του υλικού μπορεί να αφαιρεθεί από τη γεωμετρία [6].

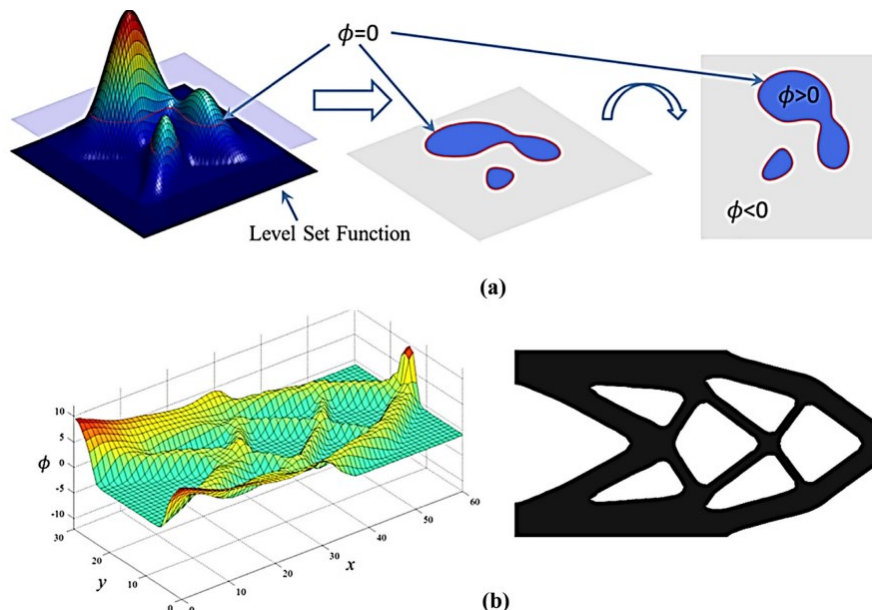
Πρωτοπόροι στην μέθοδο της τοπολογικής βελτιστοποίησης ήταν οι Bendsloe και Kikuchi [8], οι οποίοι σε άρθρο τους το 1988 εισήγαγαν μέθοδο βελτιστοποίησης σχήματος βασιζόμενοι σε μέθοδο ομογενοποίησης [9]. Το 1988 οι Oshen και Sethian [10] εισήγαγαν τη μέθοδο level set και το 1993 οι Xie et. al. εισήγαγαν τη evolutionary structural optimization (ESO) method [11]. Στη συνέχεια το 1994 ο Sigmund εισήγαγε τη μέθοδο Solid Isotropic Material with Penalty (SIMP) method.

Η μέθοδος Solid isotropic material with penalty method (SIMP) χωρίζει τη γεωμετρία σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων. Η τοπική ψευδο-πυκνότητα ρ_e λαμβάνει τιμές 0 ή 1 ανάλογα αν στο στοιχείο αυτό υπάρχει ή όχι υλικό, σε αντίθεση με την αρχική πρόταση των Bendsloe et. al [8], βάσει της οποίας η τοπική πυκνότητα λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ του 0 και 1.



Εικόνα 8 - Μέθοδος SIMP [8]

Κατά την Level Set Method [10] η τοπολογία αλλάζει εντοπίζοντας την διεπιφάνεια των γραμμών μηδενικού περιγράμματος.



Εικόνα 9 - Level Set Method (α) Level Set function, (b) Γεωμετρία τοπολογικά βελτιστοποιημένη με Level Set Method [8]

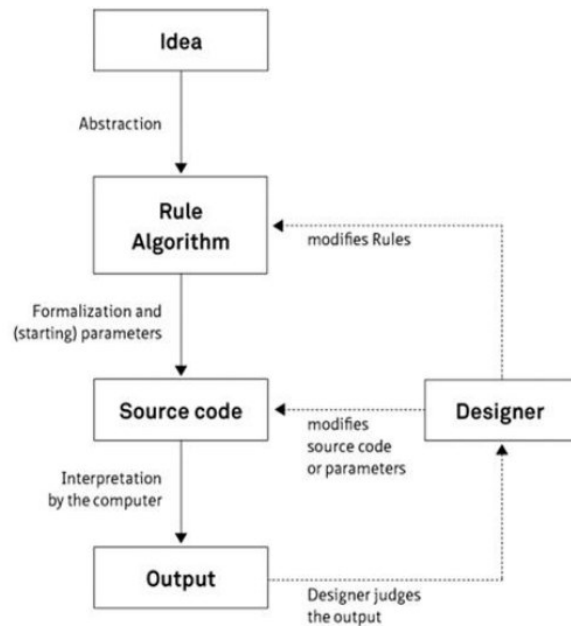
Η Evolutionary structural optimization method (ESO) [11] βασίζεται στην σταδιακή αφαίρεση υλικού από περιοχές χαμηλών τάσεων. Η τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία επιτυγχάνεται έπειτα από έναν αριθμό επαναλήψεων.



Εικόνα 10 - ESO Method - Επαναληπτική διαδικασία αφαίρεσης υλικού [11]

1.3. Γενετικός-Παραγωγικός σχεδιασμός

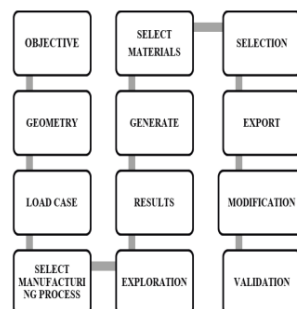
Ο γενετικός – παραγωγικός σχεδιασμός διατυπώθηκε θεωρητικά κατά το 1980 [15] και αποτελεί διαδικασία σχεδιασμού κατά την οποία η μορφή της γεωμετρίας καθορίζεται μέσω αλγορίθμου [12]. Ως είσοδοι στο λογισμικό σχεδίασης ορίζονται χαρακτηριστικά όπως το υλικό και περιορισμοί που αφορούν την επίδοση, το τρόπο παραγωγής και το κόστος της γεωμετρίας [13]. Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού της αρχικής γεωμετρίας και τον ορισμό των εισόδων, το λογισμικό σχεδίασης ξεκινά μια επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού, μέσα από την οποία διαφοροποιείται σταδιακά το σχέδιο, αξιολογώντας ποιες αλλαγές οδηγούν προς τη βελτίωση της επίδοσης της γεωμετρίας, βάσει του στόχου που έχει οριστεί από τον σχεδιαστή.



Εικόνα 11 - Διάγραμμα ροής Generative Design [13]

Τα λογισμικά σχεδίασης αξιοποιούν τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI) και μηχανικής μάθησης (Machine Learning – ML) στη διαδικασία του Generative Design. Ουσιαστικά το AI επιλέγει την κατάλληλη αρχική γεωμετρία και το Machine Learning συνεχίζει τη βελτιστοποίηση αυτού του σχεδίου [13]. Μερικά από τα γνωστότερα λογισμικά σχεδίασης που παρέχουν τη δυνατότητα Generative Design μεταξύ άλλων είναι τα Fusion 360, Creo, CATIA και Siemens NX.

Ενδεικτικά παρατίθεται η ροή εργασίας για το λογισμικό Autodesk Fusion 360.



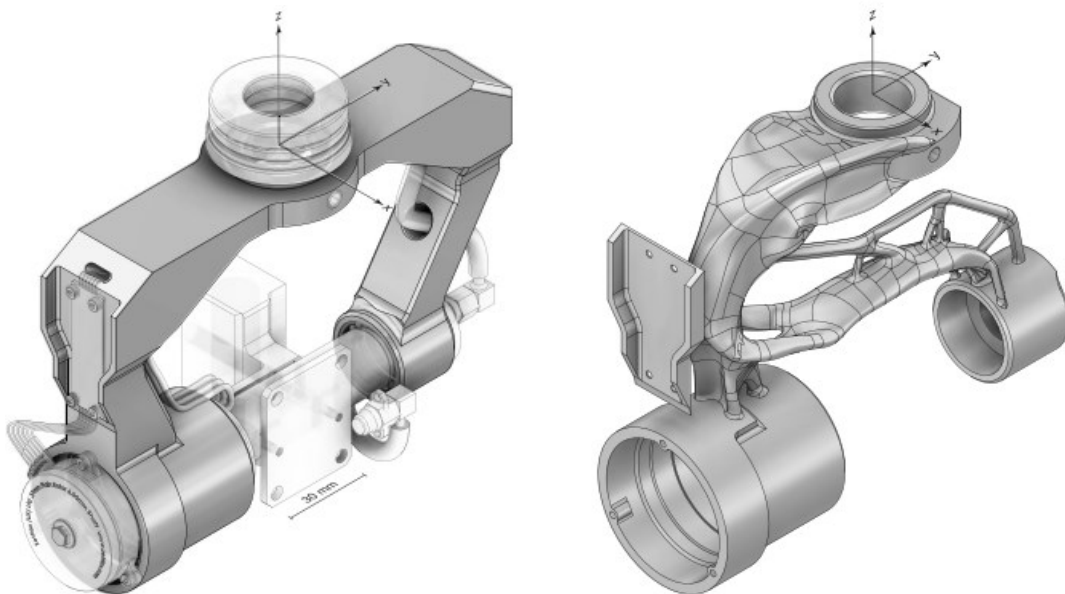
Εικόνα 12 - Ροή εργασίας για Autodesk Generative Design [13]

Όσον αφορά τις εισόδους των λογισμικών Generative Design, αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής [13]:

- Στόχος – Ορίζεται το επιθυμητό αποτέλεσμα για την επαναληπτική διαδικασία. Ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει μεταξύ της ελαχιστοποίησης της μάζας ή της μεγιστοποίησης της ακαμψίας.
- Γεωμετρία – Ορίζονται περιοχές της γεωμετρίας οι οποίες είναι απαραίτητο να διατηρηθούν στην τελική γεωμετρία.
- Φορτίσεις και συνοριακές συνθήκες – Ορίζονται οι φορτίσεις και οι στηρίξεις της γεωμετρίας.
- Μέθοδος παραγωγής – Εισάγεται περιορισμός σχετικά με τη μέθοδο παραγωγής (π.χ. CNC Machining, Additive Manufacturing κ.α.).
- Επιλογή υλικού – Ορίζονται οι ιδιότητες του υλικού.
- Αποτελέσματα – Εξάγονται οι τελικές γεωμετρίες έπειτα από την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας.
- Εξαγωγή – Η επιλεγθείσα γεωμετρία εξάγεται και προαιρετικά υφίσταται μικρές τροποποιήσεις από τον σχεδιαστή.

Η μεγάλη ανάπτυξη στο χώρο της προσθετικής κατασκευής – Additive Manufacturing τα τελευταία χρόνια [12] έχει συμβάλει στην ευρεία υιοθέτηση του Generative Design στον σχεδιασμό προϊόντων. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι οι γεωμετρίες που συνήθως εξάγονται από λογισμικά Generative Design είναι αρκετά σύνθετες για να παραχθούν με κλασσικές μεθόδους παραγωγής, αλλά είναι απολύτως εφικτές να παραχθούν μέσω Additive Manufacturing.

Ενδεικτικά παρατίθεται γεωμετρία που εξήχθη από λογισμικό Generative Design από άρθρο του 2022 [14].



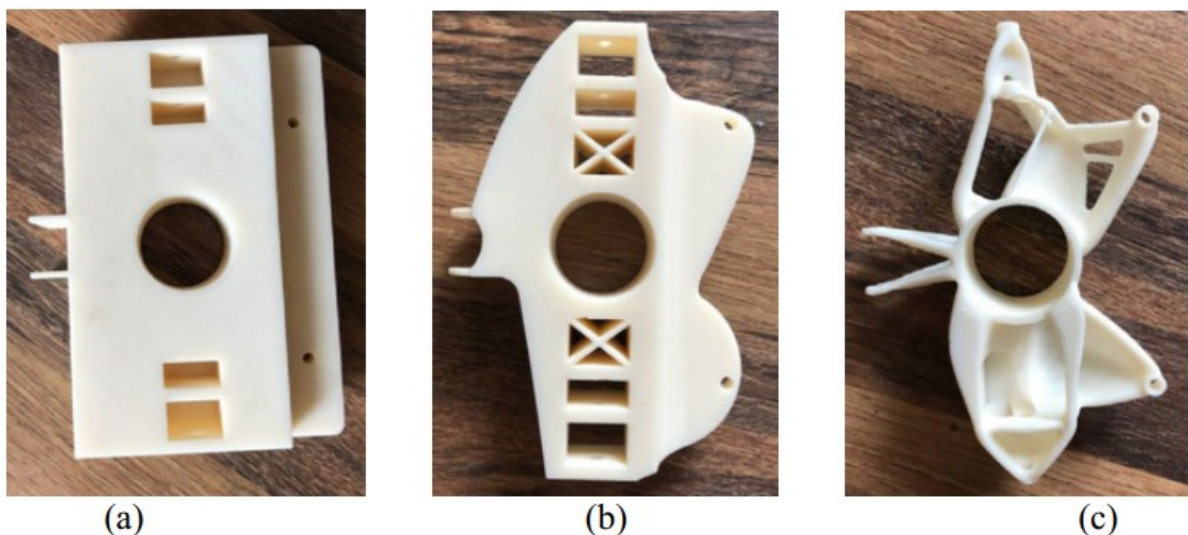
Εικόνα 13 - Αριστερά: Αρχική Γεωμετρία, Δεξιά: Γεωμετρία εξαγωγής από Generative Design [14]

1.4. Σύγκριση Topology Optimization & Generative Design

Οι έννοιες της τοπολογικής βελτιστοποίησης – Topology Optimization και της παραγωγής σχεδίασης – Generative Design συχνά συγχέονται, λόγω του ότι στόχος και των δύο είναι η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας [13].

Βασική διαφορά των δύο μεθόδων αποτελεί ότι η τοπολογική βελτιστοποίηση βασίζεται στην αφαίρεση υλικού από την αρχική γεωμετρία, ενώ η παραγωγική σχεδίαση χτίζει-παράγει τις περιοχές υλικού της γεωμετρίας. Επιπλέον, χαρακτηριστική διαφορά των δύο μεθόδων αποτελεί ότι η τοπολογική βελτιστοποίηση εξάγει μία γεωμετρία ως τελικό αποτέλεσμα, σε αντίθεση με το generative design που παράγει πλήθος γεωμετριών, από τις οποίες ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει την επιθυμητή γεωμετρία. Διαφορά αποτελεί και το γεγονός ότι η γεωμετρία που εξάγεται από λογισμικά Topology Optimization είναι σε μορφή πλέγματος και απαιτείται μετεπεξεργασία (post-processing) για την εξαγωγή της τελικής γεωμετρίας.

Σε άρθρο του 2022 [15] πραγματοποιήθηκε σύγκριση της επίδοσης των μεθόδων του Topology Optimization και Generative Design, με τη γεωμετρία που εξήχθη μέσω Generative Design να παρουσιάζει σημαντικά μειωμένη μάζα, διατηρώντας τον συντελεστή ασφαλείας στα όρια που τέθηκαν από τον σχεδιαστή.



Εικόνα 14 - (α) Αρχική γεωμετρία, (β) Γεωμετρία από Topology Optimization, (γ) Γεωμετρία από Generative Design [15]

Δημοσίευση του 2025 [16] σύγκρινε την επίδοση του Topology Optimization και του Generative Design σε δοκό. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τη σύγκριση των δύο μεθόδων είχαν παρόμοια συμπεριφορά με άλλες αντίστοιχες δημοσιεύσεις, με το Generative Design να εξάγει καλύτερες γεωμετρίες ως προς τη μείωση της μάζας, αλλά πιο δύσκολες στην παραγωγή και πιο κοστοβόρες.

Η μέθοδος του Generative Design σύμφωνα με άρθρο του 2022 [17] αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο κατά το στάδιο ανάπτυξης προϊόντων, λόγω των πολλαπλών γεωμετριών που εξάγονται ως αποτελέσματα. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα έναντι του Topology Optimization, μέσω του οποίου εξάγεται μοναδική γεωμετρία, και έτσι το Generative Design μπορεί να συμβάλει δημιουργικά στη διαδικασία σχεδιασμού του προϊόντος. Από την άλλη μεριά, η μέθοδος της τοπολογικής βελτιστοποίησης μπορεί να δώσει την κατεύθυνση στον σχεδιαστή για την τροποποίηση της γεωμετρίας, αρχή που θα αξιοποιηθεί στη συνέχεια της διπλωματικής αυτής.

1.5. Metamodels & Reduced-order analysis

Τις τελευταίες δεκαετίες, η εξέλιξη στον τομέα της υπολογιστικής μηχανικής είναι ραγδαία, με την ταυτόχρονη ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος που είναι διαθέσιμη [28]. Παρόλα αυτά σε συγκεκριμένες περιπτώσεις η διαθέσιμη υπολογιστική ισχύς δεν είναι επαρκής για την ακριβή διεξαγωγή προσομοιώσεων ψηφιακών διδύμων.

Υπάρχουν δύο δυνατές λύσεις σε τέτοιες περιπτώσεις προσομοιώσεων υψηλών απαιτήσεων, η χρήση υπολογιστών υψηλή ισχύος – High Performance Computing (HPC) ή χρήση μεταμοντέλων - μοντελοποιήσεων μειωμένης τάξης – Reduced Order Modeling (ROM).

Το High Performance Computing (HPC) παρόλο που είναι σε θέση να παρέχει την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ για την πλήρη προσομοίωση μοντέλων, συνήθως απαιτεί υψηλό αρχικό κεφάλαιο και μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας.

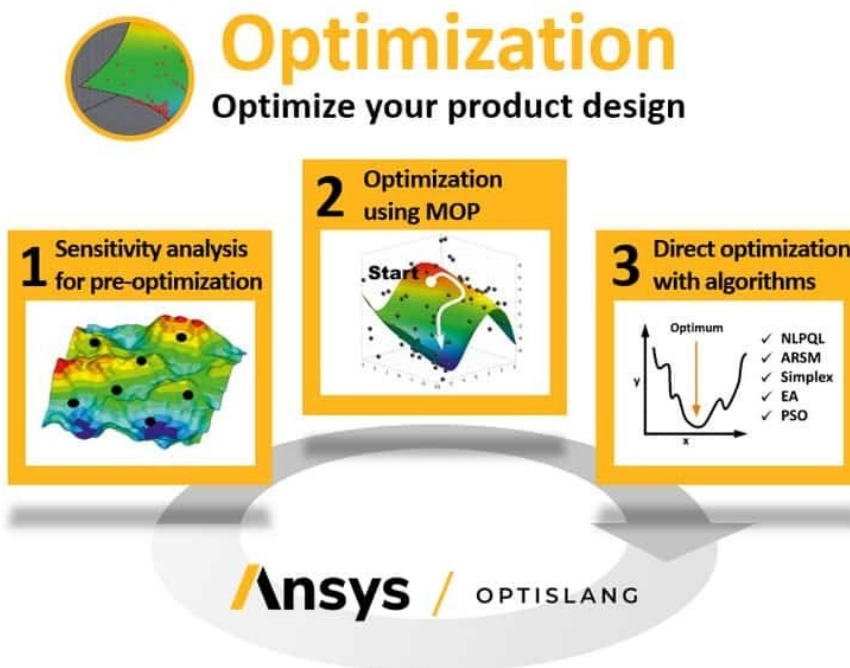
Η ανάγκη για εύρεση μεθόδων μείωσης της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος για την υπολογιστική προσομοίωση πολύπλοκων μοντέλων είχε διατυπωθεί πρώτη φορά σε άρθρο του 2008 [30]. Η μείωση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος έρχεται με την απλούστευση του αρχικού μοντέλου [31]. Δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων μείωσης της πολυπλοκότητας μοντέλων αποτελούν η Intrusive Model Order Reduction και η Non-intrusive Model Order Reduction. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων εντοπίζεται στο ότι στις μεθόδους Intrusive Model Order Reduction ελέγχονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις (governing equations), ενώ στις Non-intrusive Model Order Reduction μεθόδους υπάρχει έλεγχος μόνο των δεδομένων προσομοίωσης [28].

Οι Non-intrusive Model Order Reduction μέθοδοι αξιοποιούν ως βασική αρχή τους την προσομοίωση με προσεγγιστικό μοντέλο (surrogate model) – μεταμοντέλο [29, 31]. Αυτή η διαδικασία είναι που επιτρέπει τη μείωση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος. Οι πιο συνηθισμένες τεχνικές για την μετάβαση στο surrogate model – μεταμοντέλο είναι οι:

- Polynomial regression – Πολυωνυμική παλινδρόμηση
- Gaussian Process Regression – Γκαουσιανή παλινδρόμηση
- Radial Basis Functions – Συναρτήσεις ακτινικής βάσης
- Moving Least Squares – Κινούμενη παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων
- Support Vector Regression – Παλινδρόμηση με διανυσματική υποστήριξη
- Artificial Neural Networks – Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

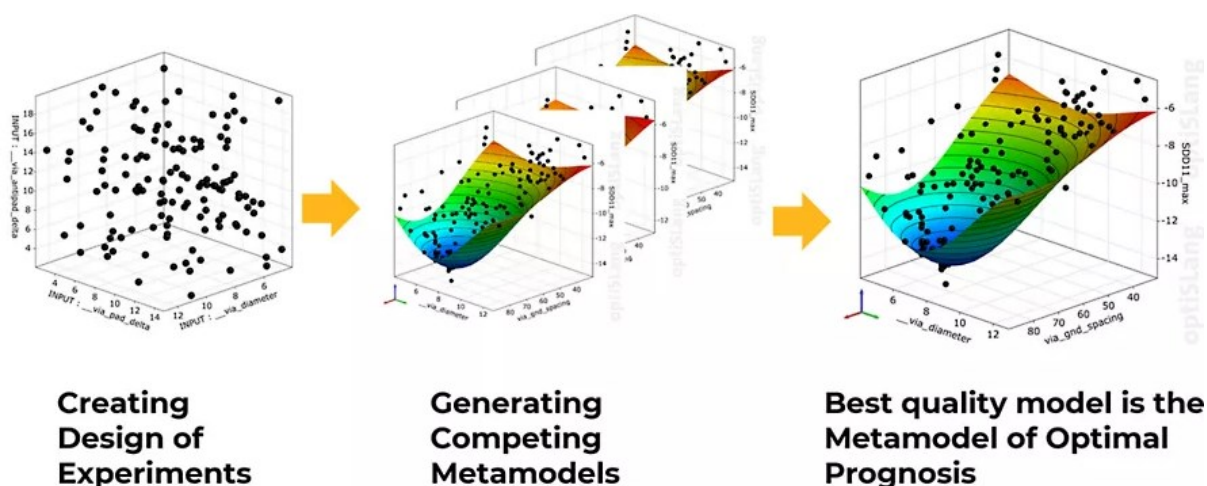
Στην διπλωματική εργασία αυτή θα αξιοποιηθεί το λογισμικό ANSYS OptiSlang. Το λογισμικό αυτό αξιοποιεί τη χρήση surrogate model / μεταμοντέλου για την μείωση του υπολογιστικού κόστους της προσομοίωσης [32, 33]. Το Ansys OptiSlang αποτελεί πολύ χρήσιμο λογισμικό για την σχεδίαση ενός προϊόντος, καθώς αξιοποιώντας τις δυνατότητές του, είναι εφικτό να εξαχθεί η βέλτιστη γεωμετρία ενός εξαρτήματος ανάλογα με το στόχο της βελτιστοποίησης. Ο χρήστης είναι σε θέση να ορίσει παραμετρικά διαστάσεις του μοντέλου και με την ολοκλήρωση της διαδικασίας του Ansys OptiSlang θα εξαχθούν οι βέλτιστες διαστάσεις.

Πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του λογισμικού Ansys OptiSlang αποτελεί το γεγονός ότι πραγματοποιείται υπολογιστική προσομοίωση του πλήρους μοντέλου για έναν συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων (και αντίστοιχο αριθμό σετ παραμέτρων που σχετίζονται με διαστάσεις της γεωμετρίας). Το μεγαλύτερο μέρος των επιλύσεων του μοντέλου βασίζονται στην επίλυση του μεταμοντέλου, όπως αναλύεται παρακάτω.



Εικόνα 15 - Ansys OptiSlang [35]

Η βασική αρχή λειτουργίας του Ansys OptiSlang είναι ως εξής. Ο χρήστης εισάγει το πλήρες μοντέλο στο Ansys Workbench, έχοντας ορίσει παραμετρικά τις διαστάσεις, για τις οποίες είναι επιθυμητό να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση. Επιλέγεται το πλήθος των Design of Experiments (DOE), δηλαδή το πλήθος των επαναλήψεων προσομοίωσης του πλήρους μοντέλου (High Fidelity), από τις οποίες θα συλλεχθεί η πληροφορία για την κατασκευή του μεταμοντέλου. Έπειτα πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για την επίδραση συγκεκριμένων εισόδων στα δεδομένα εξόδου. Στη συνέχεια μέσω του Metamodel of Optimal Prognosis (MOP), επιλέγεται η κατάλληλη μέθοδος σύνθεσης του μεταμοντέλου – surrogate model [34]. Για την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου σύνθεσης του μεταμοντέλου αξιοποιούνται τεχνικές Artificial Intelligence (AI) και Machine Learning (ML).



Εικόνα 16 - Ansys OptiSlang - Metamodel of Optimal Prognosis [35]

Το Coefficient of Prognosis (CoP) αποτελεί το μέγεθος αξιολόγησης της απόδοσης και της ακρίβειας του μεταμοντέλου. Για τη σύνθεση του Coefficient of Prognosis (CoP), το Ansys OptiSlang δημιουργεί επιφάνεια απόκρισης (response surfaces) μέσω των Design of Experiments (DOE).

Έπειτα μέσω του module “Optimization” πραγματοποιείται η προσομοίωση του Reduced Order Model – μεταμοντέλου για μεγάλο πλήθος σετ παραμέτρων (χιλιάδες σετ), χωρίς να επιλύεται το πλήρες μοντέλο και άρα χρησιμοποιώντας πολύ μικρότερη υπολογιστική ισχύ. Τέλος πραγματοποιείται επιβεβαίωση της αξιοπιστίας του μεταμοντέλου μέσω του module “Validation”, το οποίο συγκρίνει την επίδοση του μεταμοντέλου σε σχέση με την επίλυση του πλήρους μοντέλου.

2. Μέθοδοι παραγωγής

2.1 Εισαγωγή

Ο όρος “μέθοδοι παραγωγής” αναφέρεται στις κύριες μεθόδους μορφοποίησης εξαρτημάτων όπως η χύτευση (casting) , οι μέθοδοι διαμόρφωσης (forming processes), οι μέθοδοι που αφορούν τα πλαστικά και τα σύνθετα υλικά, οι μέθοδοι κατεργασίας και οι μη συμβατικοί μέθοδοι [18].

Η επιλογή της μεθόδου παραγωγής για ένα εξάρτημα σχετίζεται με πλήθος παραγόντων, σημαντικοί από τους οποίους είναι η ποσότητα παραγωγής, η πρώτη ύλη του εξαρτήματος, το κόστος και η διαθεσιμότητα εξοπλισμού, το κόστος των εργαλείων, οι χρόνοι επεξεργασίας, το εργατικό κόστος, οι απαιτήσεις των ανοχών κ.α.

Ο πίνακας επιλογής PRIMA [18] αποτελεί πολύ χρήσιμο εργαλείο στην επιλογή της μεθόδου παραγωγής ενός εξαρτήματος. Τα 2 βασικά στοιχεία που οδηγούν στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μέσω της PRIMA είναι η ποσότητα παραγωγής και το υλικό του εξαρτήματος.

MATERIAL QUANTITY	IRONS	STEEL (carbon)	STEEL (tool, alloy)	STAINLESS STEEL	COPPER & ALLOYS	ALUMINIUM & ALLOYS	MAGNESIUM & ALLOYS	ZINC & ALLOYS	TIN & ALLOYS	LEAD & ALLOYS	NICKEL & ALLOYS	TITANIUM & ALLOYS	THERMOPLASTICS	THERMOSETS	FR COMPOSITES	CERAMICS	REFRACTORY METALS	PRECIOUS METALS
VERY LOW 1 TO 100	[3.5][3.6] [3.7][6M] [7.1][7.4]	[3.5][3.7] [4.10] [6M][7.1] [7.5][7.6]	[3.1][3.5] [3.7][4.10] [6M][7.1] [7.5][7.6][7.7]	[3.5][3.7] [4.7][4.10] [6M][7.1] [7.5][7.6]	[3.5][3.7] [4.10][6M] [7.1]	[3.5][3.7] [4.7][4.10] [6M][7.5]	[3.6][3.7] [4.10][6M] [7.5]	[3.1][3.7] [4.10][6M] [7.5]	[3.1][3.7] [4.10][6M] [7.5]	[3.1][4.10] [6M][7.5]	[3.5][3.7] [4.10][6M] [7.1][7.5][7.6]	[3.1][3.6][4.7] [4.10][6M] [7.1][7.5] [7.6][7.7]	[5.5] [5.7]	[5.5] [7.7]	[5.2] [5.8] [7.7]	[5.5] [5.8] [7.7]	[5.5] [5.8] [7.7]	[7.5]
LOW 100 TO 1,000	[3.2][3.5] [3.6][3.7] [6M][7.1] [7.3][7.4]	[3.2][3.5] [3.7][4.10] [6M][7.1] [7.3][7.4]	[3.1][3.2] [3.7][6M][7.1] [7.3][7.4][7.5] [7.6][7.7]	[3.2][3.7] [4.7][4.10] [6M][7.1] [7.3][7.4][7.5]	[3.2][3.5][3.7] [3.8][4.5] [4.10][6M] [7.1][7.3][7.5]	[3.2][3.5][3.7] [3.8][4.5] [4.10][6M] [7.3][7.4][7.5]	[3.6][3.7] [3.8][4.10] [6M][7.5]	[3.1][3.7] [3.8][4.10] [6M][7.5]	[3.1][3.7] [3.8][4.10] [6M][7.5]	[3.1][3.8] [4.10][6M] [7.5]	[3.2][3.5][3.7] [4.10][6M] [7.1][7.5] [7.4][7.5]	[3.1][3.6][4.7] [4.10][6M] [7.1][7.5] [7.6][7.7]	[5.3] [5.5] [5.7]	[5.3] [5.5] [7.7]	[5.2] [5.3] [7.7]	[5.2] [5.3] [7.7]	[5.2] [5.3] [7.7]	[7.3] [7.5] [7.7]
LOW TO MEDIUM 1,000 TO 10,000	[3.2][3.3] [3.5][3.6] [3.7][4.11] [6A][7.2]	[3.2][3.3] [3.5][3.6] [3.7][4.11] [6A][7.2]	[3.2][3.5] [3.7][4.11] [4.1][6A][7.2] [7.3][7.4][7.5]	[3.2][3.5] [4.1][4.3] [4.10][4.11] [6A][7.2]	[3.2][3.3] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A][7.2]	[3.2][3.3] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A][7.2]	[3.3][3.6] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A][7.2]	[3.3][3.6] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A][7.2]	[3.3][3.6] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A][7.2]	[3.3][3.8] [4.3][4.10] [6A][7.5]	[3.3][3.8] [4.3][4.10] [6A][7.5]	[3.2][3.3] [3.5][3.6] [3.7][4.11] [6A][7.2]	[4.1][4.7] [4.10][4.11] [6A][7.2] [7.3]	[5.3] [5.5] [5.7]	[5.3] [5.5] [7.7]	[5.2] [5.3] [7.7]	[5.2] [5.3] [7.7]	[7.2] [7.3] [7.5]
MEDIUM TO HIGH 10,000 TO 100,000	[3.2] [3.3] [4.11] [6A]	[3.2] [3.3] [4.11] [6A]	[4.1][4.4] [4.5][4.11] [4.12][4.13] [6A][7.2]	[3.9][4.11] [4.4][4.5] [4.12][4.13] [6A]	[3.2][3.3] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.2][3.3] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.3][3.4] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.3][3.4] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.3][3.4] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.3][3.4] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.1][3.3] [3.5][4.11] [4.12][4.13] [6A][7.2]	[4.1][4.4] [4.10][4.11] [6A][7.2] [7.3]	[5.1] [5.3] [5.5] [5.7]	[5.1] [5.3] [5.5] [7.7]	[5.1] [5.3] [5.5] [7.7]	[5.1] [5.3] [5.5] [7.7]	[4.11] [4.12] [4.13] [4.14]	[4.5] [4.12] [4.13] [4.14]
HIGH 100,000+	[3.2] [3.3] [4.11] [6A]	[3.2] [3.3] [4.11] [6A]	[4.12] [6A]	[3.9][4.2] [4.3][4.12] [6A]	[3.2][3.3] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.2][3.3] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.3][3.4] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.3][3.4] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.3][3.4] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[3.3][3.4] [3.8][4.11] [4.10][4.11] [6A]	[4.2][4.3] [4.12][6A]	[4.12] [6A]	[5.1] [5.3] [5.5] [5.7]	[5.1] [5.3] [5.5] [7.7]	[5.1] [5.3] [5.5] [7.7]	[5.1] [5.3] [5.5] [7.7]	[4.11] [4.12] [4.13] [4.14]	[4.5] [4.12] [4.13] [4.14]
ALL QUANTITIES	[3.1]	[3.1][3.6] [4.6][4.8] [4.9]	[3.6][4.5]	[3.1][3.6] [4.6][4.8] [4.9]	[3.1][3.6] [4.6][4.8] [4.9]	[3.1][3.6] [4.6][4.8] [4.9]	[3.1][3.6] [4.6][4.8] [4.9]	[3.1][3.6] [4.6][4.8] [4.9]	[3.1][3.6] [4.6][4.8] [4.9]	[3.1][3.6] [4.6][4.8] [4.9]	[3.1][3.6] [4.6][4.8] [4.9]	[4.8][4.9]				[7.5]	[3.6]	[3.6]

KEY TO MANUFACTURING PROCESS PRIMA SELECTION MATRIX:

CASTING PROCESSES	FORMING PROCESSES	PLASTIC & COMPOSITE PROCESSING	MACHINING PROCESSES	NON-TRADITIONAL MACHINING PROCESSES
[3.1] SAND CASTING	[4.1] FORGING	[5.1] INJECTION MOULDING	[6A] AUTOMATIC MACHINING	[7.1] ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM)
[3.2] SHELL MOULDING	[4.2] ROLLING	[5.2] REACTION INJECTION MOULDING	[6M] MANUAL MACHINING	[7.2] ELECTROCHEMICAL MACHINING (ECM)
[3.3] GRAVITY DIE CASTING	[4.3] DRAWING	[5.3] COMPRESSION MOULDING		[7.3] ELECTRON BEAM MACHINING (EBM)
[3.4] PRESSURE DIE CASTING	[4.4] COLD FORMING	[5.4] RESIN TRANSFER MOULDING		[7.4] LASER BEAM MACHINING (LBM)
[3.5] CENTRIFUGAL CASTING	[4.5] COLD HEADING	[5.5] VACUUM FORMING		[7.5] CHEMICAL MACHINING (CM)
[3.6] INVESTMENT CASTING	[4.6] SWAGING	[5.6] BLOW MOULDING		[7.6] ULTRASONIC MACHINING (USM)
[3.7] CERAMIC MOULD CASTING	[4.7] SUPERPLASTIC FORMING	[5.7] ROTATIONAL MOULDING		[7.7] ABRASIVE JET MACHINING (AJM)
[3.8] PLASTER MOULD CASTING	[4.8] SHEET-METAL SHEARING	[5.8] CONTACT MOULDING		
[3.9] SQUEEZE CASTING	[4.9] SHEET-METAL FORMING	[5.9] PULTRUSION		
	[4.10] SPINNING	[5.10] CONTINUOUS EXTRUSION (PLASTICS)		
	[4.11] POWDER METALLURGY			
	[4.12] METAL INJECTION MOULDING			
	[4.13] CONTINUOUS EXT (METALS)			

Εικόνα 17 – Πίνακας επιλογής μεθόδου παραγωγής PRIMA [18]

Η κατηγοριοποίηση της ποσότητας παραγωγής βάσει των ετήσιων τεμαχίων παραγωγής είναι ως εξής:

- Πολύ χαμηλός όγκος παραγωγής: 1 – 100 τεμάχια
- Χαμηλός όγκος παραγωγής: 100 – 1.000 τεμάχια
- Μεσαίος όγκος παραγωγής: 1.000 – 10.000 τεμάχια
- Μεσαίος προς μεγάλος όγκος παραγωγής: 10.000 – 100.000 τεμάχια
- Μεγάλος όγκος παραγωγής: 100.000 + τεμάχια
- Όλες οι ποσότητες

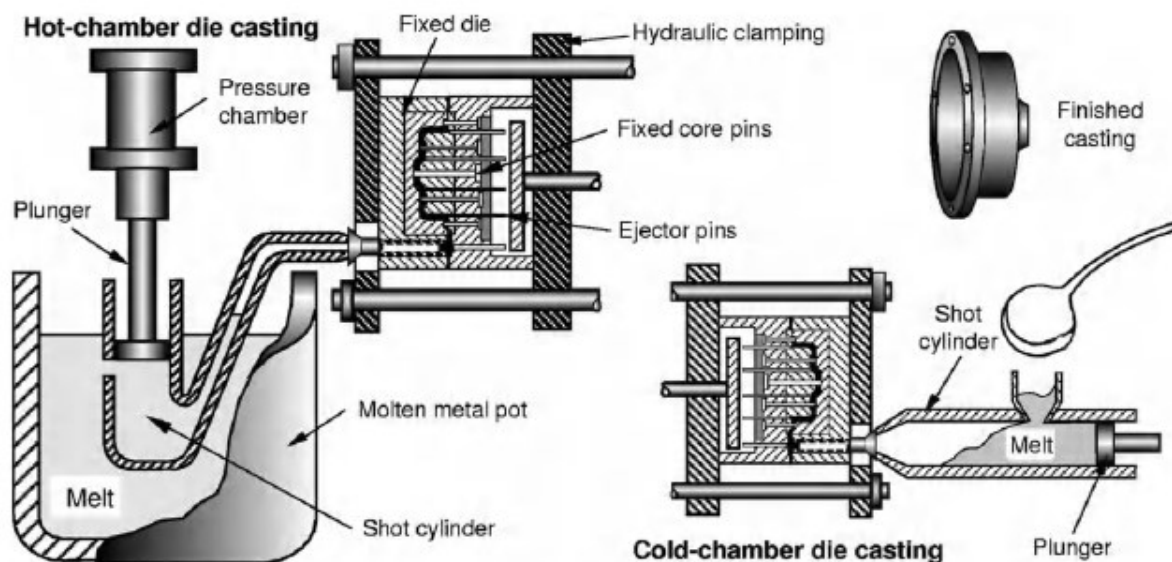
Όσον αφορά το υλικό του εξαρτήματος, αυτό επηρεάζει άμεσα την επιλογή της μεθόδου παραγωγής, καθώς μέρος των μεθόδων παραγωγής εφαρμόζεται σε συγκεκριμένου είδους υλικά.

Οι βασικοί μέθοδοι παραγωγής που θα αναλυθούν στην συνέχεια είναι οι εξής:

- Χύτευση υπό πίεση (Die casting)
- Κατεργασία με εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (CNC Machining)
- Προοδευτική διαμόρφωση με καλούπι (Progressive Die Stamping)
- Προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing)

2.2 Χύτευση υπό πίεση (Die Casting)

Η χύτευση υπό πίεση αποτελεί μια ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδο παραγωγής μεταλλικών εξαρτημάτων. Το μέταλλο αφού υποστεί τήξη, εισέρχεται σε μεταλλικό καλούπι υπό πολύ υψηλές πιέσεις (άνω των 100 bar) και στερεοποιείται παίρνοντας την μορφή της κοιλότητας του καλουπιού. Με την ολοκλήρωση του κύκλου το καλούπι ανοίγει και το χυτό εξάρτημα εξέρχεται μέσω των εξολκίων (ejector pins).



Εικόνα 18 - Χύτευση υπό πίεση [18]

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτού του είδους την μέθοδο παραγωγής είναι μη μαγνητικά όπως κράματα ψευδαργύρου, αλουμινίου, μαγνησίου κ.α. Η έκθεση των καλουπιών σε κύκλους υψηλών θερμοκρασιών μειώνει τη διάρκεια ζωής τους.

Η μέθοδος της χύτευσης υπό πίεση παρέχει δυνατότητα υψηλού όγκου παραγωγής με ταυτόχρονα χαμηλό εργατικό κόστος. Από την άλλη όμως απαιτεί μηχανές (χυτόπρεσες) υψηλού κόστους και παραγωγή καλουπιών για κάθε εξάρτημα. Ως αποτέλεσμα ο χρόνος υστέρησης (lead time) είναι υψηλός.

Τα καλούπια των εξαρτημένων που παράγονται με τη μέθοδο χύτευσης υπό πίεσης αποτελούνται από δύο μέρη [19], το σταθερό μέρος (cover die) και το κινητό μέρος (ejector die), στην ένωση των οποίων σχηματίζεται η γραμμή διαχωρισμού (parting line). Το κινητό μέρος ενσωματώνει τους πείρους εξαγωγής (ejector pins) που «σπρώχνουν» τα εξαρτήματα από τις κοιλότητες.

Τα εξαρτήματα που παράγονται μέσω χύτευσης υπό πίεσης υπόκεινται υπό συγκεκριμένων σχεδιαστικών περιορισμών. Η πολυπλοκότητα ενός καλουπιού (υποκοπές - undercuts, ένθετα - inserts κ.α.) αυξάνουν το κόστος παραγωγής του. Συνήθης σχεδιαστικός περιορισμός αποτελεί η γωνία απόκλισης (draft angle) από 0,25° έως 3° για την ευκολότερη αφαίρεση των εξαρτημάτων από το καλούπι.

Επιπλέον, ένα από τα σχεδιαστικά ζητήματα είναι η σχεδίαση του εξαρτήματος με την πρόβλεψη της γραμμής διαχωρισμού (parting line).

Ως προς τις εφικτές ανοχές των εξαρτημάτων που παράγονται με τη μέθοδο της χύτευσης υπό πίεση, αυτές συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 0,25 – 0,8mm.

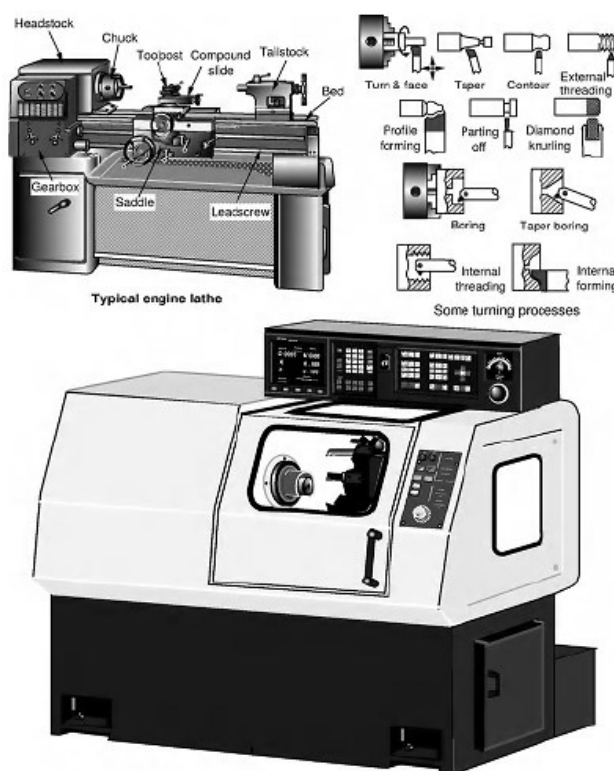
2.3 Κατεργασία με εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (CNC Machining)

Μια μέθοδος παραγωγής που αξιοποιείται συχνά σε γραμμές παραγωγής αποτελεί η κατεργασία με εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (CNC Machining). Η ανάπτυξη αυτής της μεθόδου παραγωγής ξεκίνησε το 1940, με τη σταδιακή ενσωμάτωση ηλεκτροκινητήρων σε κλασσικές μηχανές όπως τόννοι - lathes και φρέζες - mills [20]. Ο έλεγχος των κινητήρων αυτών ξεκίνησε με αναλογικές μεθόδους και σταδιακά ενσωματώθηκαν ψηφιακά υπολογιστικά συστήματα.

Ο προγραμματισμός και η λειτουργία των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου βασίζεται σε τυποποιημένο κώδικα (G-CODE). Μέσω του κώδικα αυτού ελέγχονται παράμετροι όπως η ταχύτητα περιστροφής - speed, η ταχύτητα πρόωσης – feed rate, η επιλογή του εργαλείου κ.α. Η συγγραφή του κώδικα G-CODE συνήθως πραγματοποιείται μέσω λογισμικό CAM (Computer Aided Manufacturing), αφού έχει ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του εξαρτήματος σε λογισμικό CAD (Computer Aided Design).

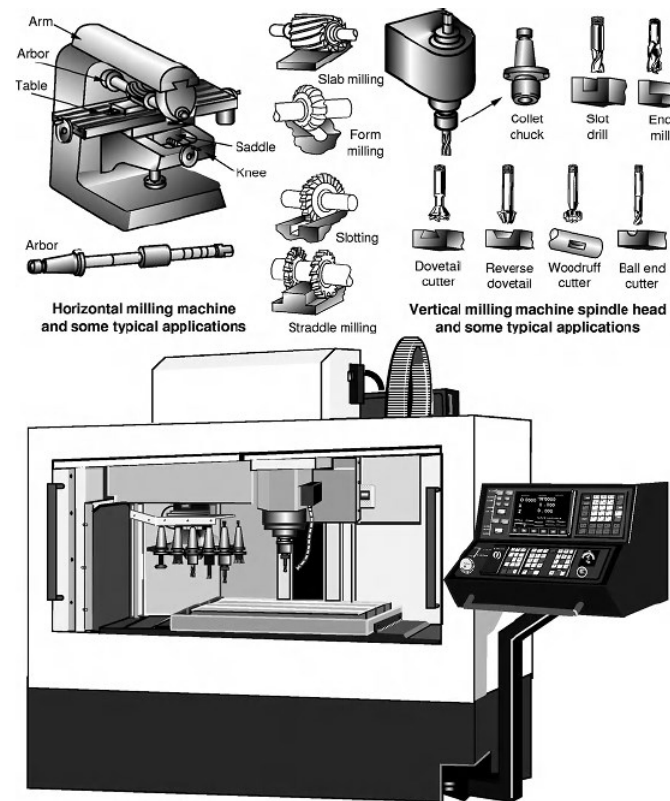
Τα υλικά που δύναται να κατεργαστούν μέσω εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου είναι όλα τα μέταλλα και μέρος των πλαστικών και κεραμικών εξαρτημάτων.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των εργαλειομηχανών αριθμητικού ελέγχου που έχει συμβάλει στην ευρεία ενσωμάτωση τέτοιων μηχανών στην παραγωγική διαδικασία αποτελεί η δέσμευση του προσωπικού για πολύ περιορισμένο χρονικό διάστημα, καθώς η διαδικασία της κατεργασίας είναι αυτοματοποιημένη [20]. Συνήθως, ο χειριστής παρευρίσκεται στην εργαλειομηχανή κατά τον πρώτο-δοκιμαστικό κύκλο λειτουργίας, ώστε να επιβεβαιωθεί για την ορθότητα του G-CODE. Επιπλέον, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί ο χαμηλός χρόνος υστέρησης (lead time) για την παραγωγή των εξαρτημάτων και η μεγάλη ευελιξία που προσφέρουν τέτοιου είδους μηχανήματα, να παράγουν διαφορετικά εξαρτήματα με χαμηλή παρεμβατικότητα και μικρούς χρόνους setup.



Εικόνα 19 - CNC Τόρνος [18]

Σχετικά με τους CNC τóρνους, η δυναμικότητα των εργαλειομηχανών αυτών κυμαίνεται μεταξύ 10 έως 1000 τεμαχίων ανά ώρα, καθιστώντας την επιλογή των CNC τóρνων οικονομικά εφικτή συνήθως για παραγωγές άνω των 1000 τεμαχίων. Παρόλα αυτά CNC τóρνοι χρησιμοποιούνται και για παραγωγές πολύ μικρού όγκου, ακόμη και ενός τεμαχίου. Οι σχεδιαστικοί περιορισμοί για εξαρτήματα που παράγονται μέσω CNC τóρνων σχετίζονται με τη περιστροφική συμμετρία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κατεργασιών [18].



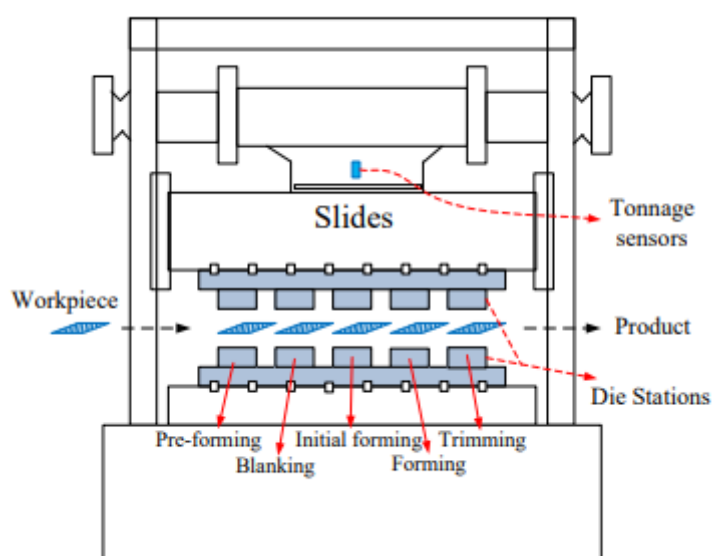
Εικόνα 20 - CNC Φρέζα [18]

Σχετικά με τις CNC φρέζες, η δυναμικότητα των εργαλειομηχανών αυτών κυμαίνεται μεταξύ 10 έως 100 τεμαχίων ανά ώρα, καθιστώντας την επιλογή τους οικονομικά εφικτή συνήθως για παραγωγές χαμηλού όγκου, ακόμη και για μεμονωμένη παραγωγή. Οι σχεδιαστικοί περιορισμοί για εξαρτήματα που παράγονται μέσω φρέζας CNC σχετίζονται με τα προφίλ των εργαλείων κοπής. Συνήθως προτιμώνται τυποποιημένες διαστάσεις και γεωμετρίες κοπής.

2.4 Προοδευτική διαμόρφωση με καλούπι (Progressive Die Stamping)

Η μέθοδος παραγωγής της προοδευτικής διαμόρφωσης με καλούπι (Progressive Die Stamping) αποτελεί πολύ συνηθισμένη διαδικασία παραγωγής εξαρτημάτων από φύλλο μετάλλου [21]. Τα τελευταία 70 χρόνια αυτή η μέθοδος παραγωγής έχει επεκταθεί ευρέως σε πλήθος βιομηχανιών όπως η αυτοκινητοβιομηχανία κ.α. [22]. Μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου παραγωγής αποτελεί το γεγονός ότι το εξάρτημα υπόκειται σε πολλαπλές φάσεις διαμόρφωσης και κοπής εντός ενός καλουπιού.

Η διαδικασία της παραγωγής μέσω προοδευτικής διαμόρφωσης ξεκινά με τη πρώτη ύλη, συνήθως σε μορφή ρολού χάλυβα, να εισέρχεται στην πρέσα. Έπειτα το εξάρτημα υπόκειται σε διαδοχικές διαμορφώσεις, παίρνοντας σταδιακή την επιθυμητή μορφή.



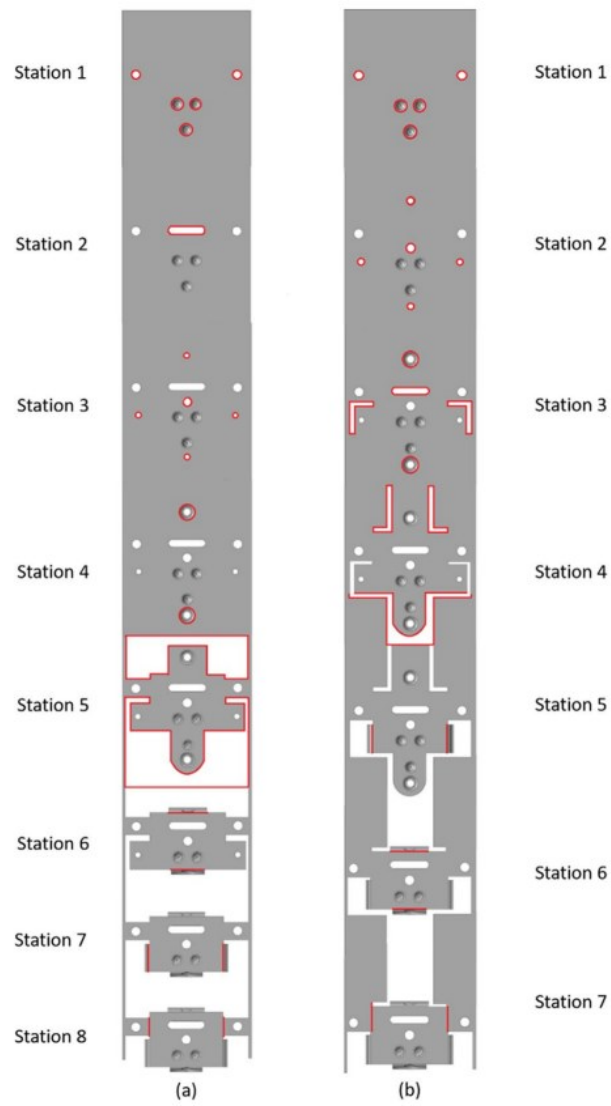
Εικόνα 21 - Διαδικασία της προοδευτικής διαμόρφωσης με καλούπι [23]

Τα εξαρτήματα των προοδευτικών καλουπιών κατασκευάζονται από κατάλληλα υλικά, ανθεκτικά στην επαναλαμβανόμενη φόρτιση που υπόκεινται κατά τους κύκλους της πρέσας, όπως εργαλειακός χάλυβας (tool steel) [25].

Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου παραγωγής αποτελεί η πολύ υψηλή δυναμικότητα, με ρυθμούς παραγωγής άνω των 10.000 τεμαχίων ανά ώρα για μικρά εξαρτήματα. Επιπλέον, η διαδικασία παραγωγής είναι σε μεγάλο βαθμό αυτοματοποιημένη και αντίστοιχα το εργατικό κόστος χαμηλό.

Το υψηλό κόστος των μηχανημάτων (υδραυλικές πρέσες) και το κόστος και ο χρόνος κατασκευής των προοδευτικών καλουπιών χρειάζεται να συνυπολογιστούν κατά την διαδικασία επιλογής της μεθόδου παραγωγής.

Σημαντικός σχεδιαστικός περιορισμός για τα εξαρτήματα που παράγονται με προοδευτική διαμόρφωση με καλούπι αποτελεί το γεγονός ότι η αφαίρεση του υλικού αφορά το σύνολο του πάχους του εξαρτήματος [18]. Επιπλέον, το μέγιστο πάχος του υλικού περιορίζεται στα 13mm.

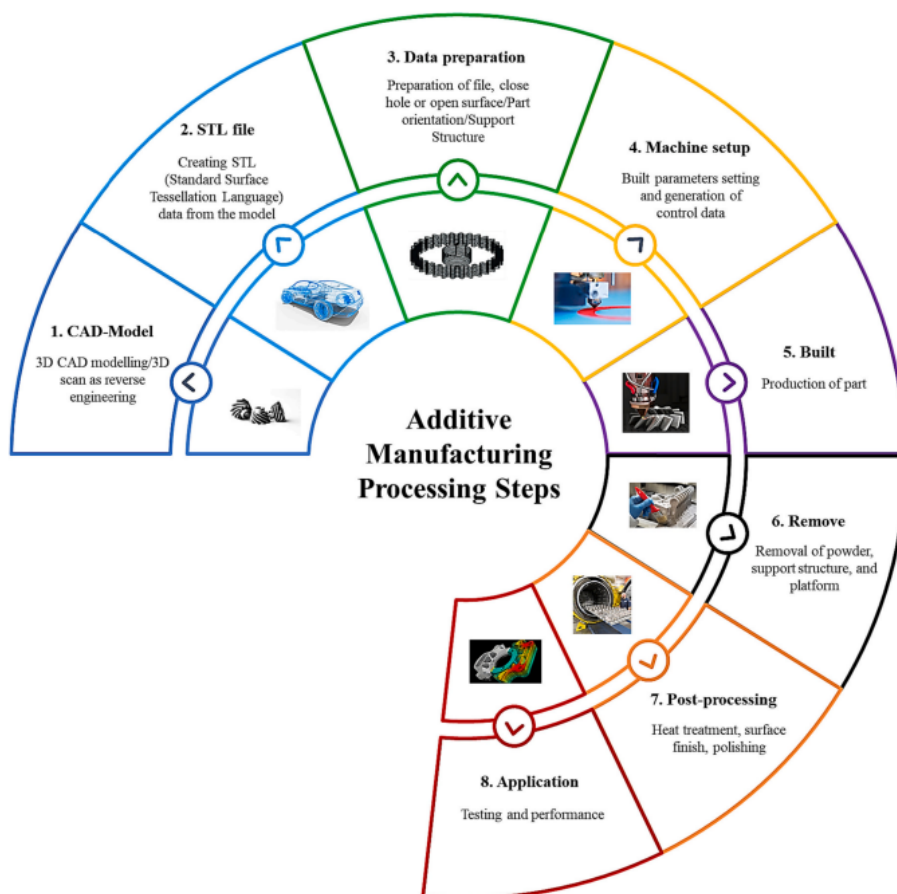


Εικόνα 22 - Διαδοχικές διαμορφώσεις [24]

2.5 Προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing)

Η προσθετική κατασκευή – Additive Manufacturing αποτελεί διαδικασία παραγωγής που αξιοποιεί μηχανές που εναποθέτουν στρώσεις υλικού, η μία πάνω στην άλλη, για τον σχηματισμό της γεωμετρίας [26]. Πρόκειται για μία μέθοδο παραγωγής που ανακαλύφτηκε το 1986 και έκτοτε έχει αναπτυχθεί με πολύ γρήγορο ρυθμό [27]. Η διαδικασία της παραγωγής εξαρτημάτων με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής δύναται να διακριθεί σε 7 διαφορετικά τμήματα:

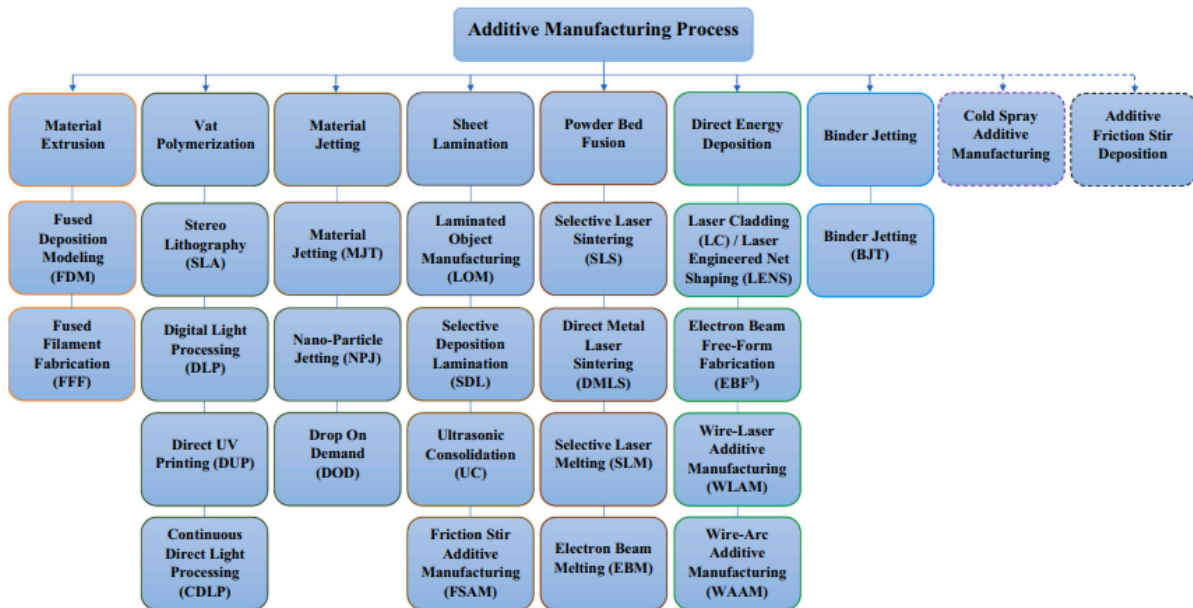
1. Σχεδιασμός της γεωμετρίας στο λογισμικό CAD
2. Εξαγωγή του αρχείου σε μορφή αρχείου στερεολιθογραφίας (STL), μορφή συμβατή με λογισμικά προσθετικής κατασκευής
3. Προετοιμασία του αρχείου εκτύπωσης, όπως προσανατολισμός γεωμετρίας, τοποθέτηση στηρίξεων (supports) κ.α.
4. Προετοιμασία της μηχανής προσθετικής κατασκευής, όπως ορισμός παραμέτρων εκτύπωσης (ταχύτητα, infill) κ.α.
5. Παραγωγή της γεωμετρίας από τη μηχανή προσθετικής κατασκευής
6. Αφαίρεση της γεωμετρίας από την μηχανή προσθετικής κατασκευής
7. Μετεπεξεργασία της γεωμετρίας, όπως αφαίρεση στηρίξεων, θερμική ή επιφανειακή κατεργασία κ.α.



Εικόνα 23 - Διαδικασία παραγωγής εξαρτήματος με προσθετική κατασκευή [27]

Υπάρχει πλήθος υποκατηγοριών προσθετικής κατασκευής, που σχετίζονται με την αρχή λειτουργίας των τεχνικών παραγωγής. Για παράδειγμα η κατηγορία της διέλασης υλικού εμπεριέχει τις μηχανές που βασίζονται στο Fused deposition modelling (FDM), μια πολύ διαδεδομένη τεχνική εκτύπωσης,

που βασίζεται στη θέρμανση ενός νήματος υλικού για την δημιουργία της γεωμετρίας στρώση-στρώση.



Εικόνα 24 - Κατηγορίες Προσθετικής Κατασκευής [27]

Ανάλογα τη τεχνική της προσθετικής κατασκευής υπάρχουν πολλαπλά διαθέσιμα υλικά προς χρήση, όπως πολυμερή / σύνθετα υλικά (ABS, PLA), μέταλλα και κράματα μετάλλων (Stainless Steel), κεραμικά κ.α.

Σημαντικό πλεονέκτημα της παραγωγής με προσθετική κατασκευή αποτελεί η ευκολία της παραμετροποίησης της γεωμετρίας, χωρίς να χρειάζονται δομικές αλλαγές σε εξοπλισμό (π.χ. καλούπια) όπως σε άλλες μεθόδους παραγωγής. Για αυτόν το λόγο η μέθοδος της προσθετικής κατασκευής αποτελεί πολύ καλή επιλογή για παραγωγές μικρής κλίμακας.

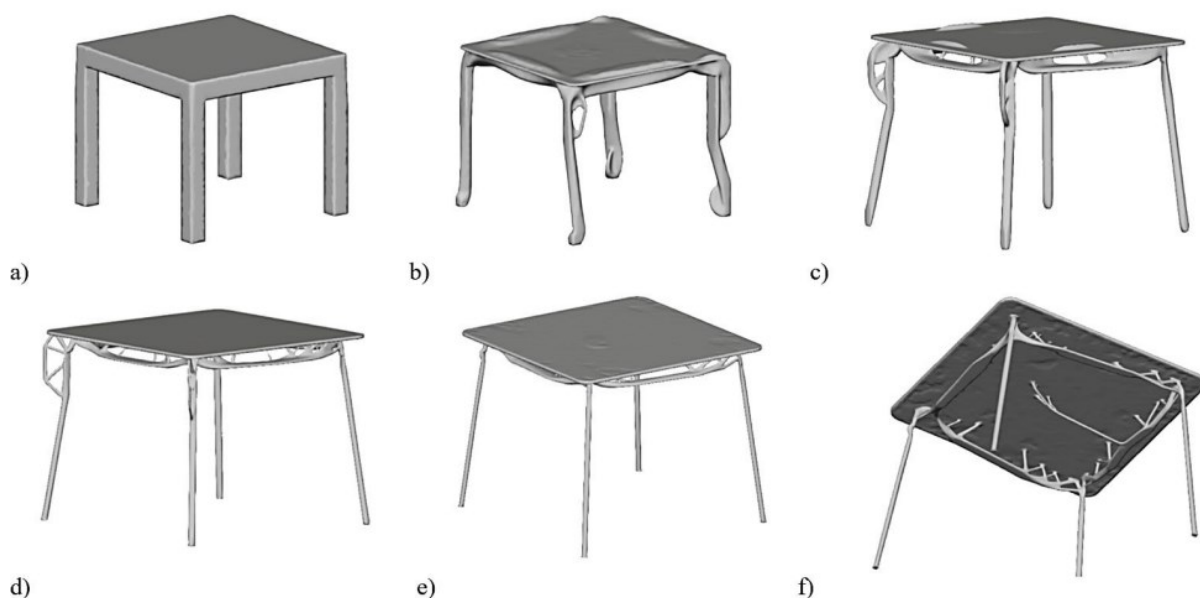
Το υψηλό κόστος των υλικών που χρησιμοποιούνται στις διάφορες τεχνικές προσθετικής κατασκευής έχει ως αποτέλεσμα άλλες μέθοδοι παραγωγής να είναι πιο οικονομικά συμφέρουσες για μεγάλους όγκους παραγωγής.

3. Υπολογιστική μελέτη

3.1. Εισαγωγή

Η τοπολογική βελτιστοποίηση (Topology Optimization) και ο παραγωγικός σχεδιασμός (Generative Design) αποτελούν πολύ χρήσιμα εργαλεία στη διαδικασία σχεδιασμού προϊόντων. Μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας επικεντρώνεται στη χρήση μεθόδων προσθετικής κατασκευής για παραγωγή γεωμετριών που εξάγονται από τη διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης [36, 37]. Ο λόγος της άμεσης συσχέτισης του Topology Optimization με το Additive Manufacturing εντοπίζεται στην πολυπλοκότητα των γεωμετριών αυτών.

Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά πολύ δύσκολη τη χρήση κλασικών μεθόδων παραγωγής (όπως χύτευση υπό πίεση κ.α.) για την παραγωγή εξαρτημάτων που έχουν εξαχθεί από διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα ο τοπολογικά βέλτιστος σχεδιασμός της γεωμετρίας του άρθρου του 2020 [38], παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά ως προς τη μείωση συσσώρευσης τάσεων, αλλά είναι εφικτό να παραχθεί αποκλειστικά με μέθοδο προσθετικής κατασκευής.



Εικόνα 25 – (a) αρχική γεωμετρία, (b)-(f) Γεωμετρίες παραγόμενες αποκλειστικά με μέθοδο προσθετικής κατασκευής [38]

Ταυτόχρονα όπως αναλύθηκε στην ενότητα 2, η προσθετική κατασκευή, παρόλο που έχει αναπτυχθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες και το κόστος παραγωγής προοδευτικά έχει μειωθεί, εξακολουθεί να μην είναι η πιο βέλτιστη οικονομικά επιλογή για παραγωγές μεγάλης κλίμακας.

Αυτός ο περιορισμός αποτελεί την ιδέα της διπλωματικής αυτής. Σκοπός της εργασίας είναι να αξιοποιηθεί η μέθοδος της τοπολογικής βελτίωσης σε συνδυασμό με τη μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας μοντέλα μικρότερης τάξης (μεταμοντέλα) για τη βελτιστοποίηση εξαρτημάτων, τα οποία είναι εφικτό να παραχθούν με κλασικές μεθόδους παραγωγής

Πρόταση λοιπόν αυτής της διπλωματικής είναι η αξιοποίηση της τοπολογικής βελτιστοποίησης για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα σημεία που μπορεί να αφαιρεθεί υλικό από την αρχική γεωμετρία.

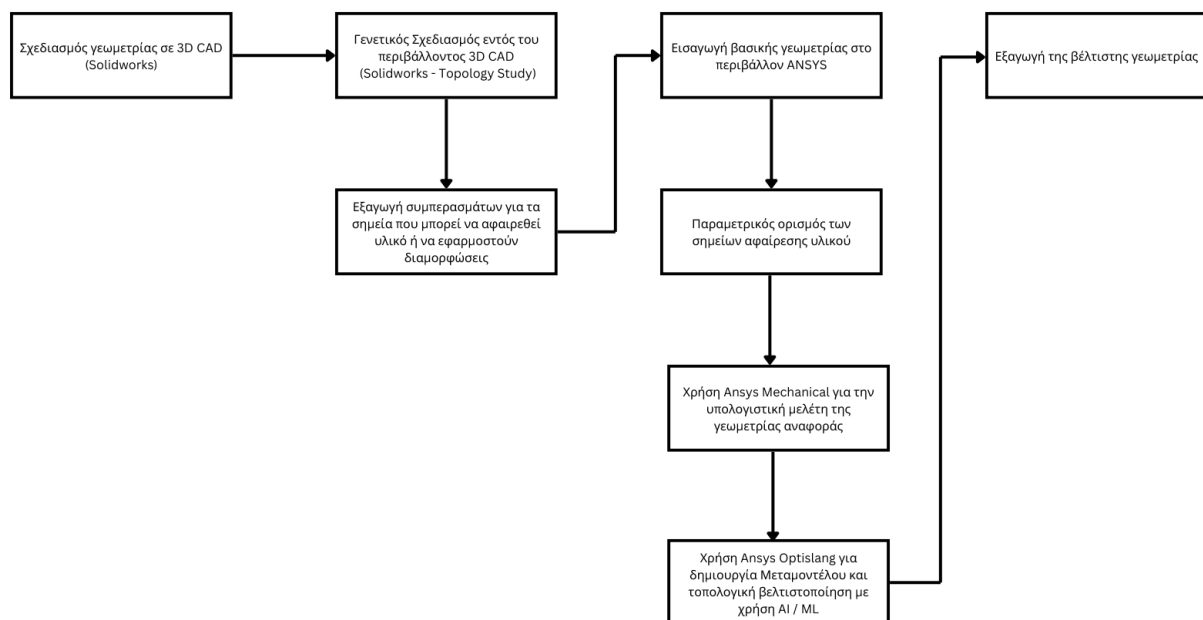
Έπειτα από την εξαγωγή των συμπερασμάτων, η γεωμετρία εισάγεται στο περιβάλλον του Ansys και τα σημεία αφαίρεσης υλικού ή οι διαμορφώσεις εκφράζονται παραμετρικά, ώστε να μπορούν οι

παράμετροι σχεδίασης να προσαρμόζονται αυτόματα. Ο σχεδιασμός των περιοχών αφαίρεσης υλικού και των διαμορφώσεων πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό της αντίστοιχης μεθόδου παραγωγής που εξετάζεται κάθε φορά.

Έπειτα μέσω του Ansys OptiSlang πραγματοποιείται η επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης των παραμέτρων σχεδίασης, επιλύοντας αρχικά τα πλήρη μοντέλα για έναν αριθμό στοιχείων (Design of Experiments) και έπειτα προσομοιώνοντας πολύ μεγάλο αριθμό σετ παραμέτρων για γεωμετρίες, αξιοποιώντας το μεταμοντέλο.

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας εξάγεται η γεωμετρία, η οποία παρουσιάζει τη βέλτιστη συμπεριφορά ως προς τον στόχο που έχει τεθεί (π.χ. ελαχιστοποίηση μάζας) και ταυτόχρονα είναι δυνατόν να παραχθεί με κλασσικές μεθόδους παραγωγής.

Η διαδικασία που θα ακολουθηθεί στην υπολογιστική μελέτη των εξαρτημάτων της εργασίας αποτυπώνεται στην ακόλουθη εικόνα.

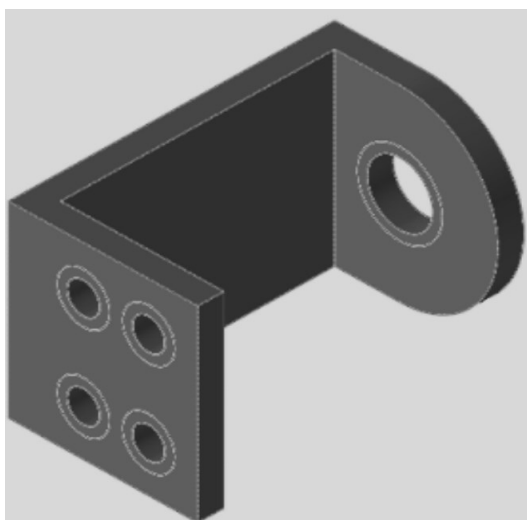


Εικόνα 26 - Προτεινόμενο διάγραμμα ροής για βέλτιστο σχεδιασμό γεωμετριών

3.2. Γεωμετρία No. 1 παραγομένη με μέθοδο προοδευτικής κοπής

3.2.1. Περιγραφή

Η γεωμετρία No. 1 προς μελέτη αφορά βάση στήριξης που χρησιμοποιείται στην αυτοκινητοβιομηχανία. Ο συγκεκριμένος τύπος εξαρτήματος έχει ήδη μελετηθεί σε άρθρο του 2020 [39], με τη διαφορά όμως ότι στο άρθρο ο προτεινόμενος τρόπος παραγωγής της τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας ήταν η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing). Η μελέτη της τρέχουσας διπλωματικής λαμβάνει υπόψιν τον περιορισμό ότι η προτεινόμενη – τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία είναι δυνατόν να παράγεται σε μεγάλη κλίμακα με κλασσικές μεθόδους παραγωγής και συγκεκριμένα με κοπή φύλλων μετάλλου με προοδευτική διαμόρφωση με καλούπι.

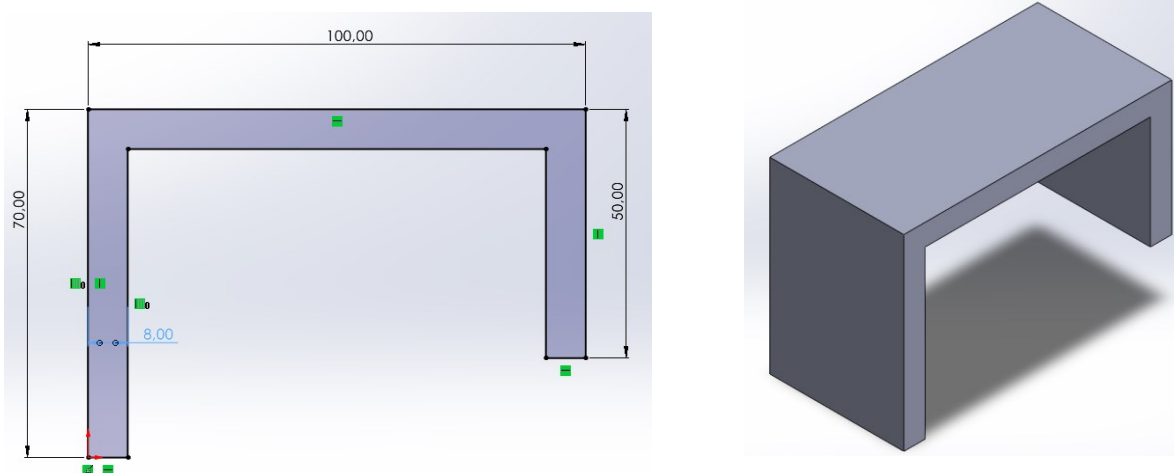


Εικόνα 27 - Μοντέλο No.1 [39]

3.2.2. Σχεδιασμός γεωμετρίας

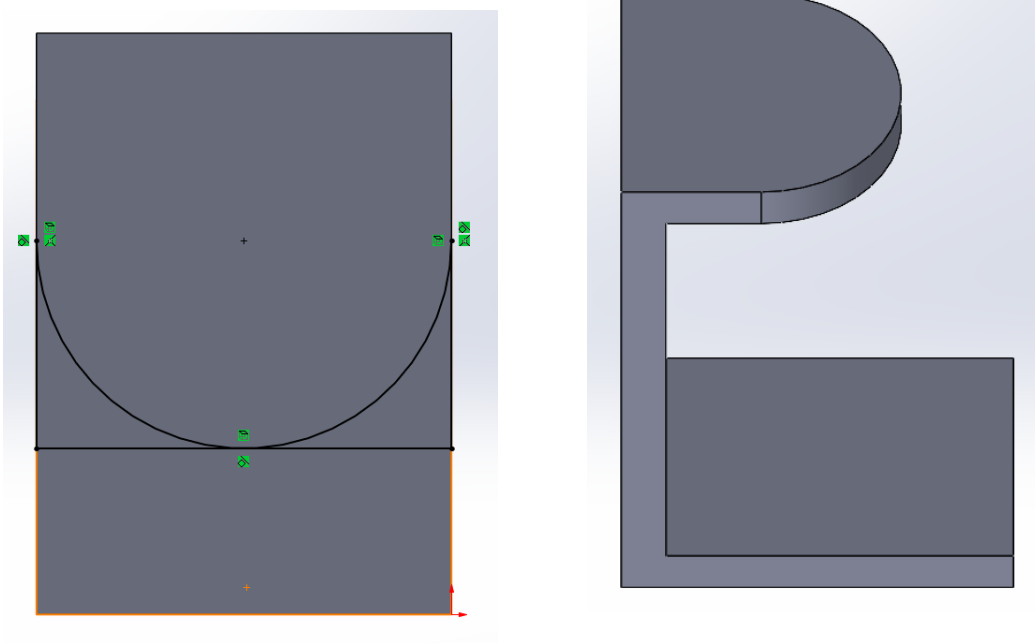
Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα τρισδιάστατου σχεδιασμού 3D CAD Solidworks.

Αρχικά σχεδιάζεται ο βασικός όγκος της γεωμετρίας όπως αποτυπώνεται παρακάτω μέσω Extrude.



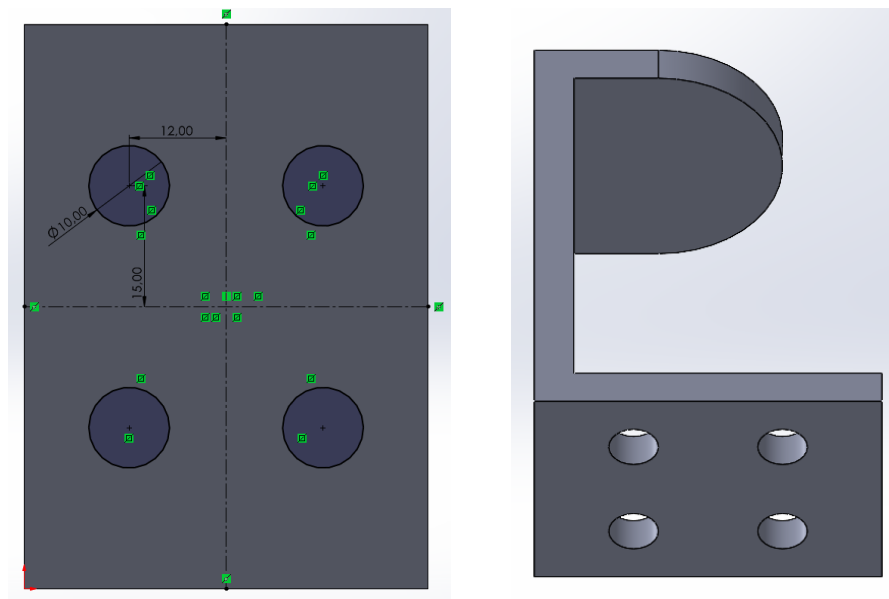
Εικόνα 28 - Βήμα 1 σχεδιασμού

Έπειτα περικόπτεται μέρος της άνω επιφάνειας της βάσης στήριξης για να αποδοθεί η καμπύλη μορφή.



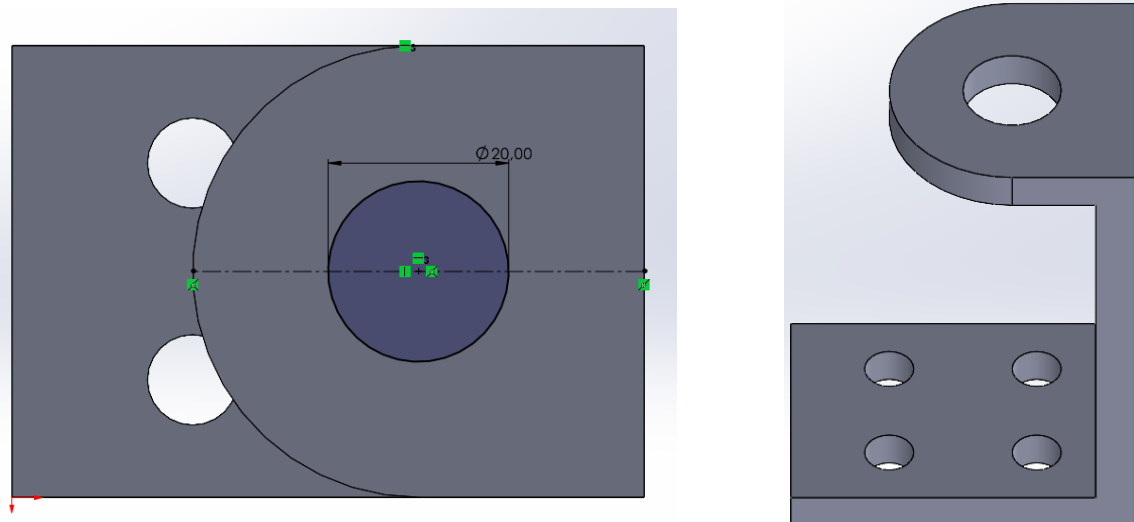
Εικόνα 29 - Βήμα 2 σχεδιασμού

Ακολουθεί η δημιουργία των τεσσάρων οπών στο κάτω μέρος της βάσης στήριξης.



Εικόνα 30 - Βήμα 3 σχεδιασμού

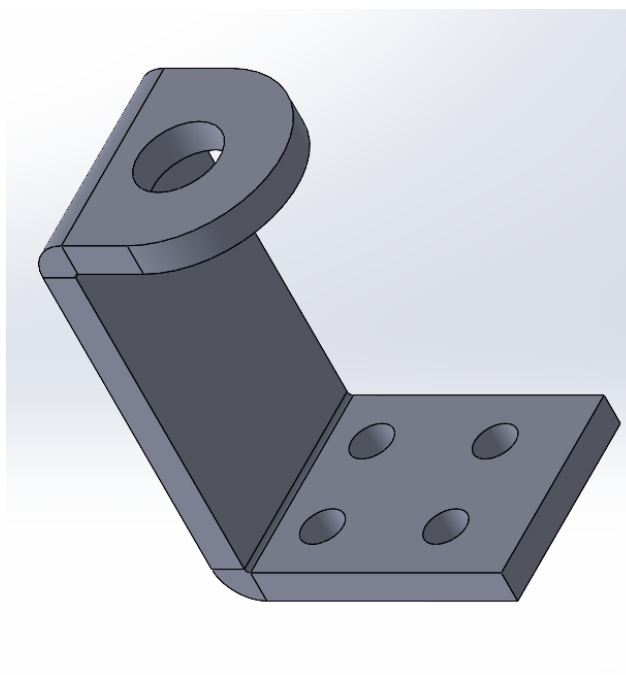
Και αντίστοιχα για την οπή στο άνω μέρος.



Εικόνα 31 - Βήμα 4 σχεδιασμού

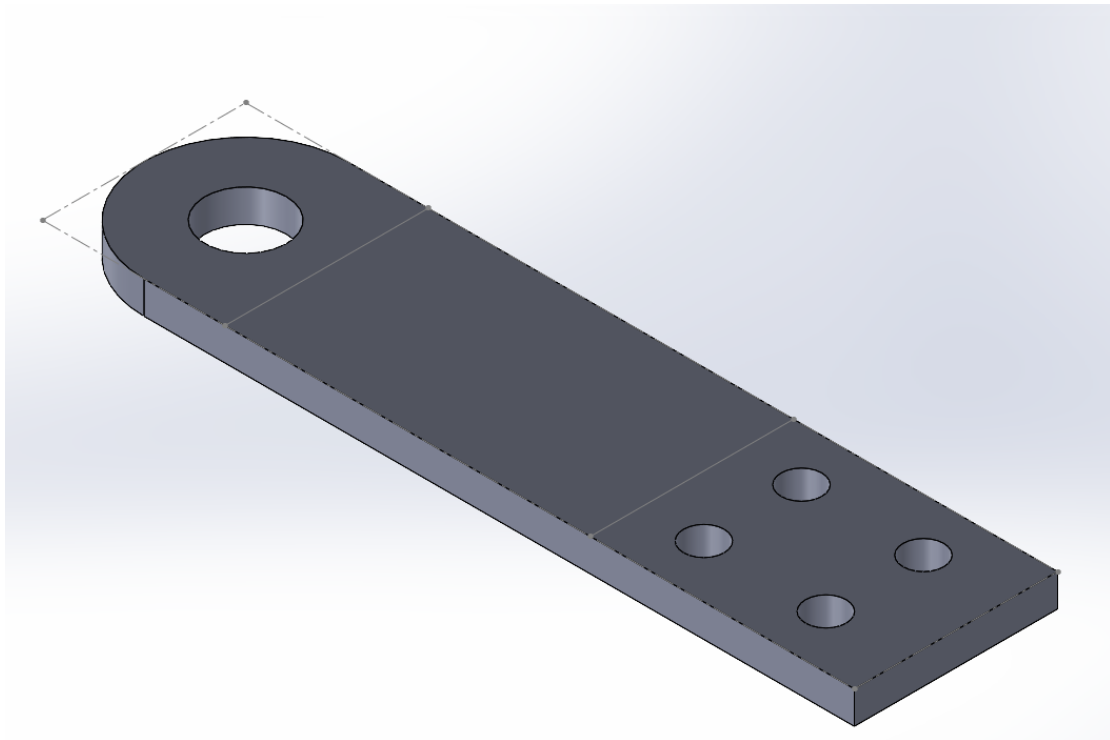
Έπειτα μέσω της λειτουργίας Sheet Metal του Solidworks εισάγονται τα κατάλληλα ράδια στις ακμές, στις οποίες το ανάπτυγμα του φύλλου χάλυβα θα διαμορφωθεί (στραντζάρισμα).

Η τελική μορφή της γεωμετρίας είναι η παρακάτω.



Εικόνα 32 - Τελική μορφή γεωμετρίας

Και αντίστοιχα το ανάπτυγμα της γεωμετρίας είναι ως εξής.



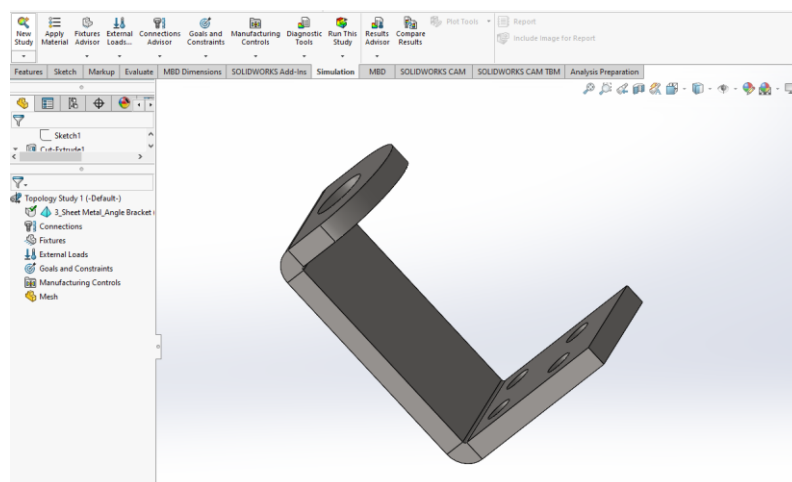
Εικόνα 33 - Ανάπτυγμα Γεωμετρίας Νο. 1

3.2.3. Τοπολογική βελτιστοποίηση στο περιβάλλον του Solidworks

Με την ολοκλήρωση του σχεδιασμού της γεωμετρίας στο 3D CAD, ακολουθεί η τοπολογική βελτιστοποίηση εντός του περιβάλλοντος του Solidworks. Το αποτέλεσμα της τοπολογικής μελέτης θα παρέχει την κατάλληλη πληροφορία για τις περιοχές που είναι δυνατόν να αφαιρεθεί υλικό. Η τελική τοπολογική μελέτη θα πραγματοποιηθεί στο περιβάλλον του Ansys OptiSlang, λαμβάνοντας υπόψη ως περιορισμό τη μέθοδο παραγωγής της γεωμετρίας.

Ακολουθεί η διαδικασία της τοπολογικής μελέτης στο περιβάλλον Solidworks.

Από το μενού Topology Study, εισάγεται η γεωμετρία προς μελέτη.



Εικόνα 34 - Solidworks Topology Study

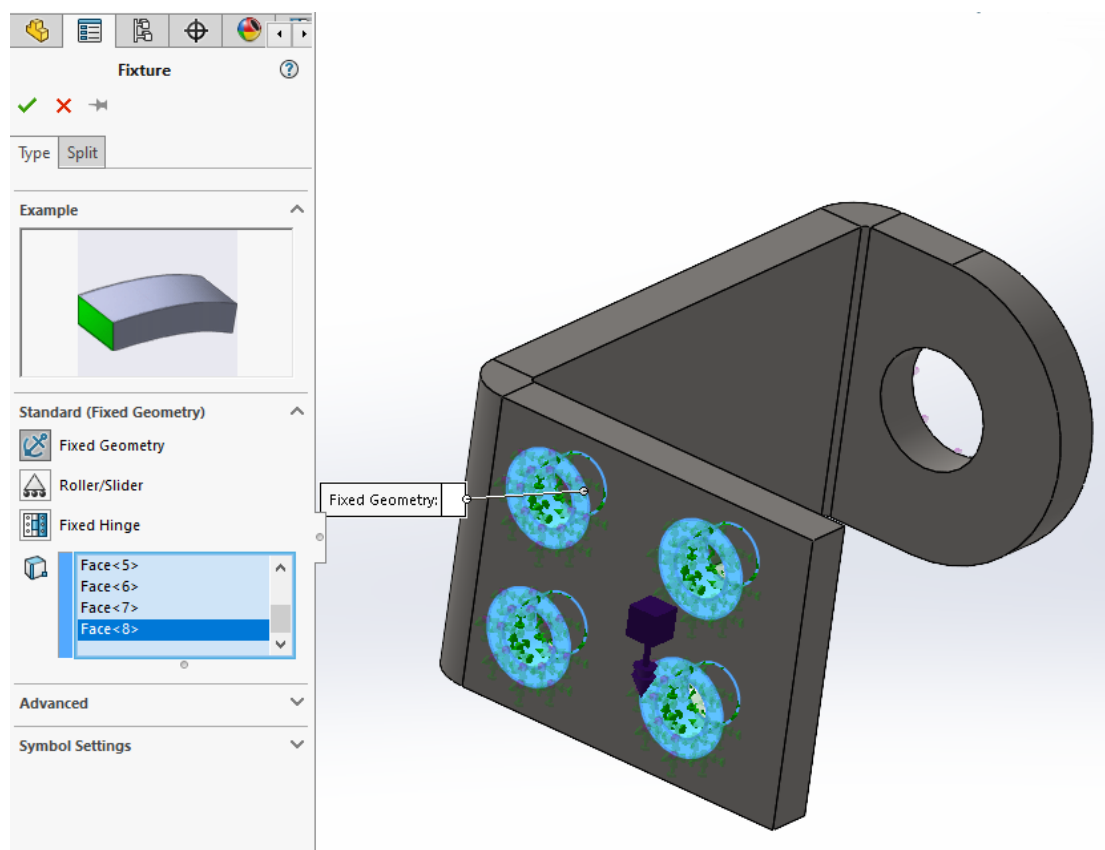
Ως υλικό ορίζεται ο χάλυβας – Plain Carbon Steel, με τις παρακάτω μηχανικές ιδιότητες.

ASTM A36 Steel		
Cast Alloy Steel		
Cast Carbon Steel		
Cast Stainless Steel		
Chrome Stainless Steel		
Galvanized Steel		
Plain Carbon Steel		
Stainless Steel (ferritic)		
Wrought Stainless Steel		
Iron		
Aluminium Alloys		
Copper Alloys		

Property	Value	Units
Elastic Modulus	2.1e+11	N/m ²
Poisson's Ratio	0.28	N/A
Shear Modulus	7.9e+10	N/m ²
Mass Density	7800	kg/m ³
Tensile Strength	399826000	N/m ²
Compressive Strength		N/m ²
Yield Strength	220594000	N/m ²
Thermal Expansion Coefficient	1.3e-05	/K
Thermal Conductivity	43	W/(m·K)
Specific Heat	440	J/(kg·K)
Material Damping Ratio		N/A

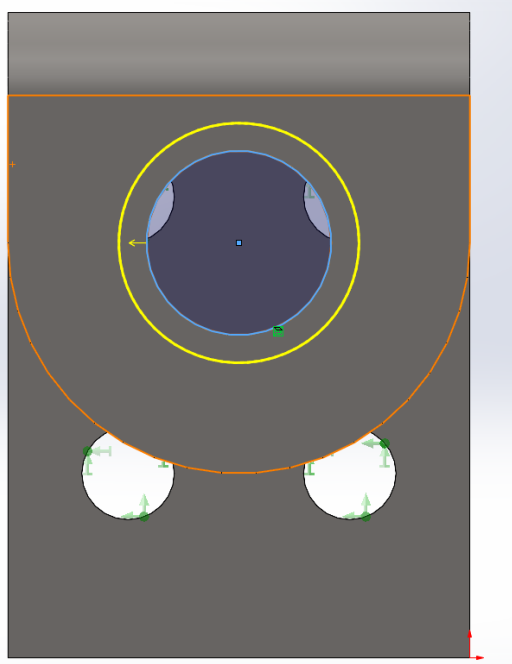
Εικόνα 35 - Μηχανικές ιδιότητες υλικού

Ορίζεται η στήριξη στις επιφάνειες των τεσσάρων οπών στο κάτω μέρος της βάσης.



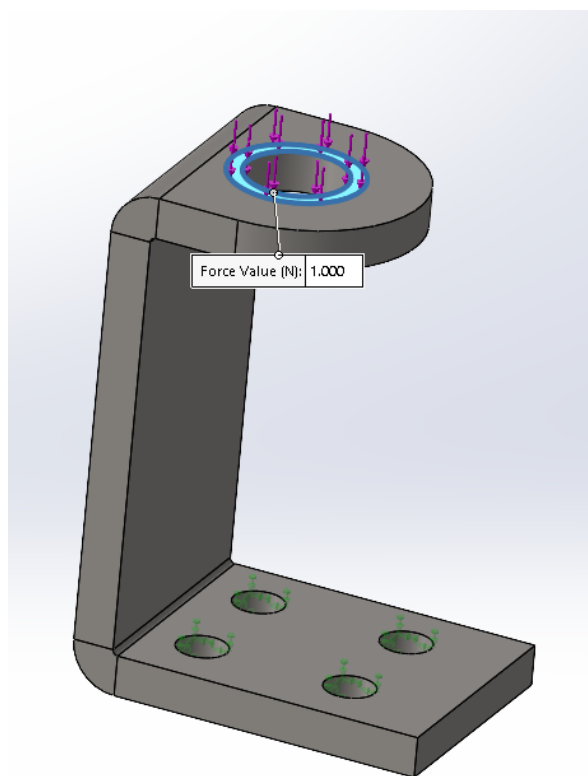
Εικόνα 36 - Στήριξη της γεωμετρίας

Για τον ορισμό της φόρτισης της γεωμετρίας επιλέγεται η εντολή Split, μέσω της οποίας ορίζεται μια κυκλική επιφάνεια 3mm περιμετρικά της υπάρχουσας οπής στο άνω μέρος της βάσης στήριξης.



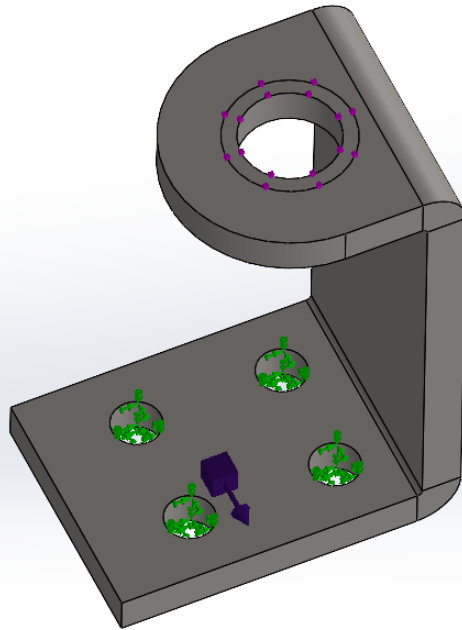
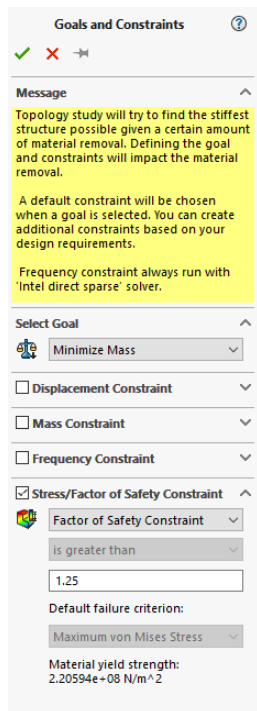
Εικόνα 37 - Εντολή Split

Στην βοηθητική επιφάνεια που δημιουργήθηκε επιλέγεται φόρτιση 1000N.



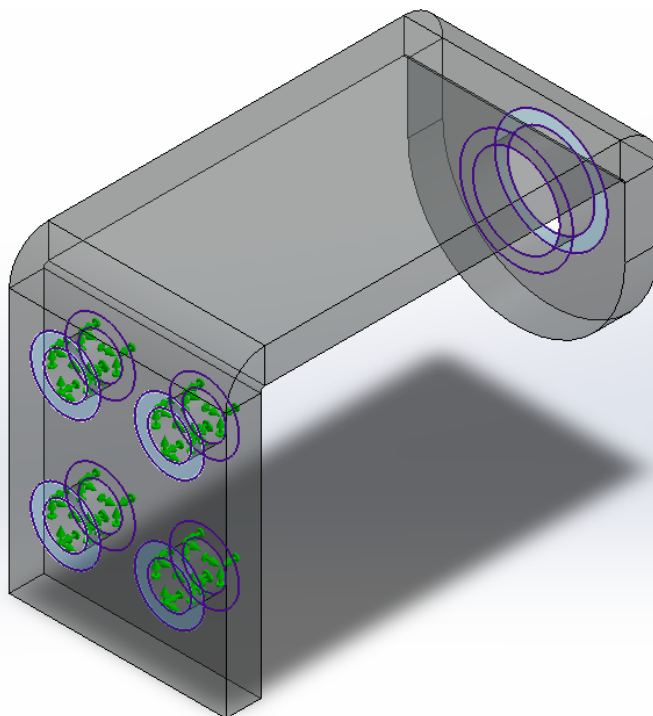
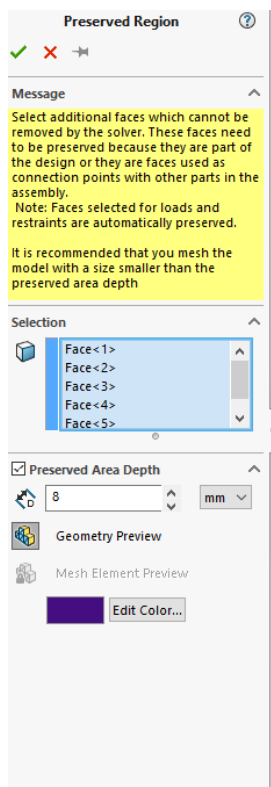
Εικόνα 38 - Φόρτιση γεωμετρίας

Ως στόχος της τοπολογικής μελέτης ορίζεται το “Minimize Mass” και ταυτόχρονα το “Factor of Safety Constrain > 1,25”, δηλαδή η ελαχιστοποίηση της μάζας και η διατήρηση βαθμού ασφαλείας μεγαλύτερου του 1,25.



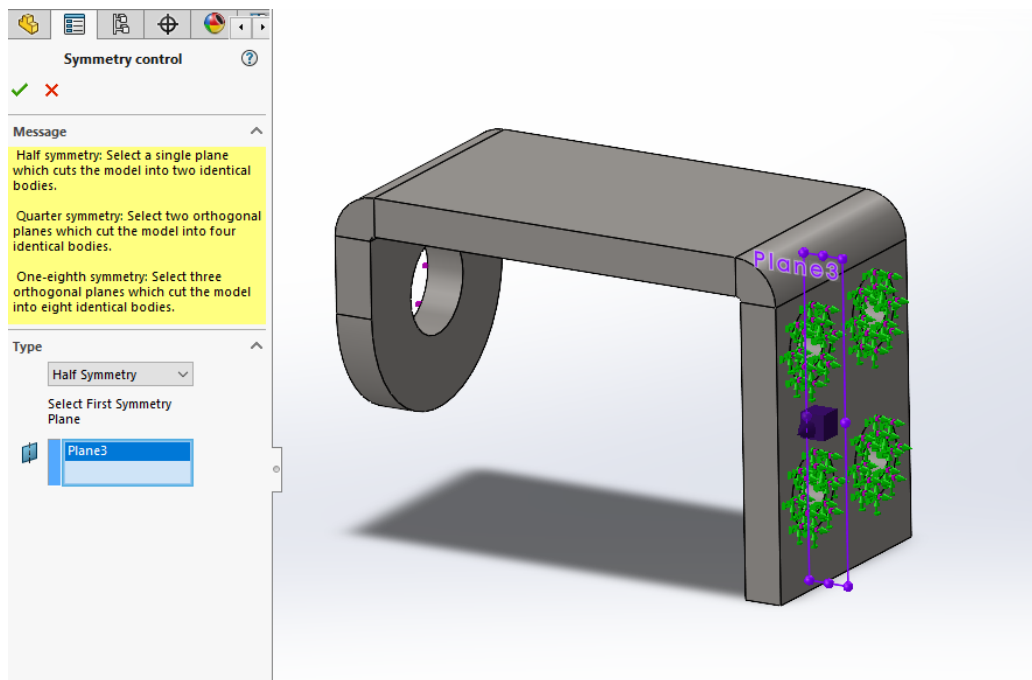
Εικόνα 39 - Στόχος της τοπολογικής βελτιστοποίησης

Από το μενού “Manufacturing Controls → Preserved Regions” εισάγονται οι επιφάνειες της γεωμετρίας, οι οποίες είναι απαραίτητο να διατηρηθούν.



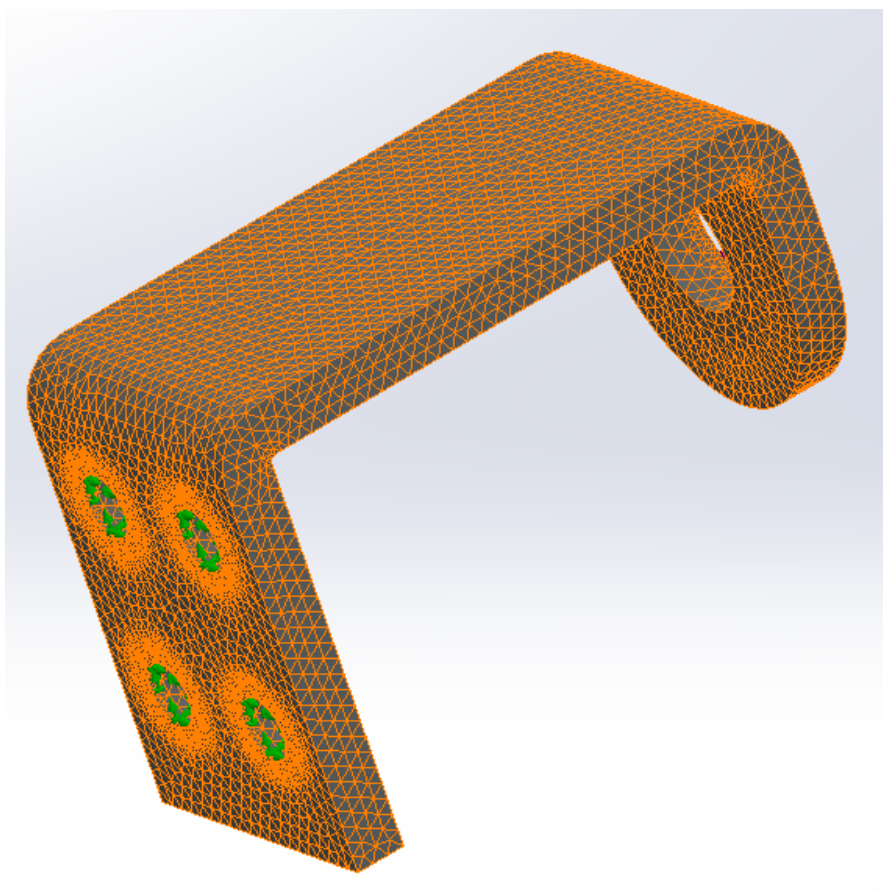
Εικόνα 40 - Preserved Regions

Επίσης, ως περιορισμός εισάγεται η συμμετρία του εξαρτήματος κατά το επίπεδο που αποτυπώνεται παρακάτω.



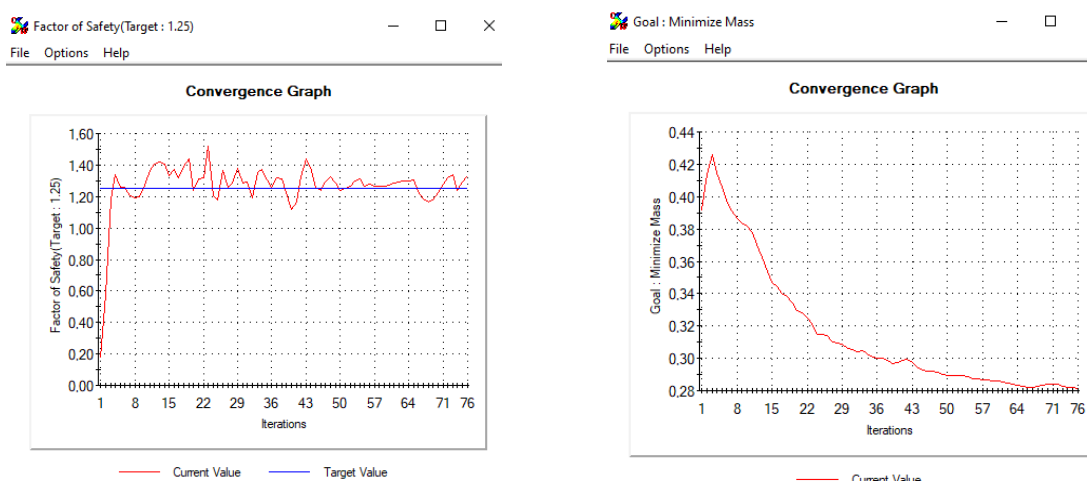
Εικόνα 41 - Symmetry Control

Ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος για την υπολογιστική μελέτη. Στις επιφάνειες κοντά στα σημεία ορισμού των στηρίξεων και της φόρτισης, πραγματοποιήθηκε refinement του υπολογιστικού πλέγματος, όπως αποτυπώνεται στην εικόνα παρακάτω.



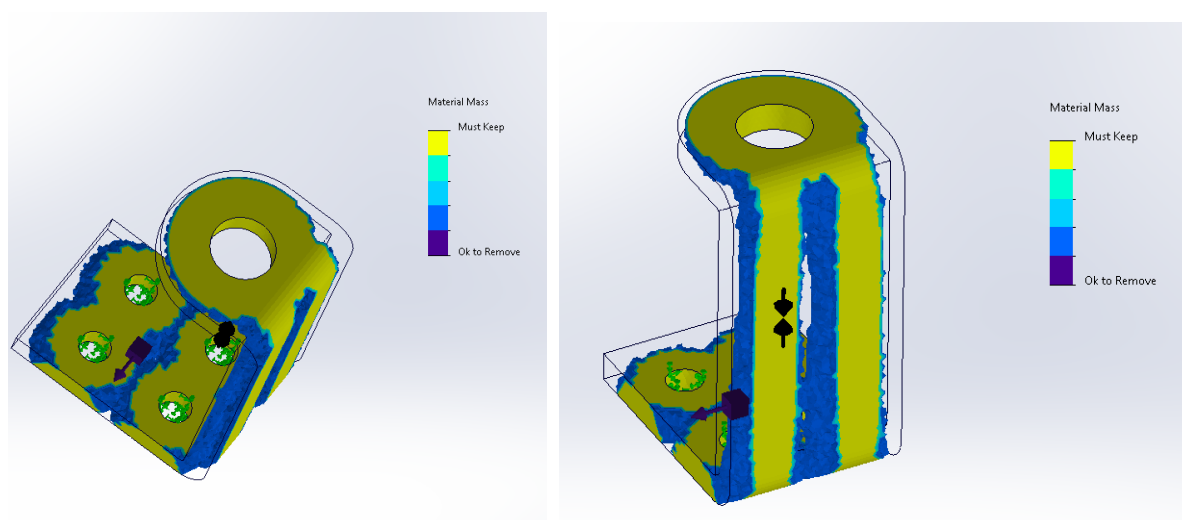
Εικόνα 42 - Υπολογιστικό πλέγμα γεωμετρίας

Η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης σύγκλινε έπειτα από 76 επαναλήψεις.



Εικόνα 43 - Σύγκλιση υπολογιστικού μοντέλου

Το αποτέλεσμα της τοπολογικής μελέτης μέσω του περιβάλλοντος του Solidworks είναι ως εξής:



Εικόνα 44 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία

Η γεωμετρία που εξήχθη από την τοπολογική μελέτη του Solidworks παρουσιάζει σημαντικά μειωμένη μάζα σε σχέση με την αρχική γεωμετρία, όπως αποτυπώνεται στον παρακάτω πίνακα.

Αρχική μάζα (kg)	Τελική μάζα (kg)
0,56714	0,29801

Πίνακας 1 - Σύγκριση αρχικής και τελικής μάζας γεωμετρίας

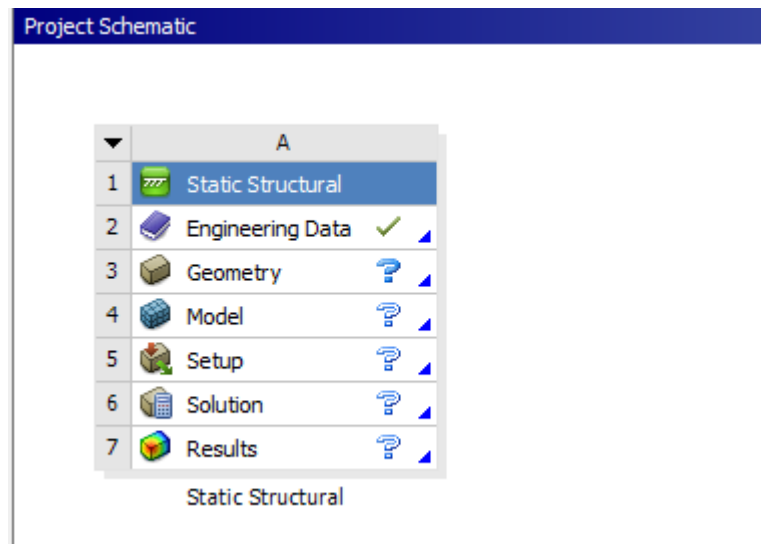
Βέβαια, το μοντέλο που εξήχθη από την τοπολογική μελέτη δεν είναι εφικτό να παραχθεί με τη μέθοδο παραγωγής που έχει επιλεγεί, λόγω πολυπλοκότητας. Παρόλα αυτά εξάγεται πολύ σημαντική πληροφορία σχετικά με τις περιοχές της αρχικής γεωμετρίας, που δύναται να αφαιρεθούν χωρίς να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η αξιοπιστία της γεωμετρίας με στόχο την ελαχιστοποίηση της μάζας.

3.2.4. Εισαγωγή αρχικής γεωμετρίας στο Ansys

Έχοντας λοιπόν την πληροφορία σχετικά με τις περιοχές που δύναται να αφαιρεθούν από την αρχική γεωμετρία, εισάγεται η γεωμετρία στο υπολογιστικό πακέτο Ansys.

Θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση για την αρχική γεωμετρία (πριν τη αφαίρεση υλικού), ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση αρχικής και τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας.

Η υπολογιστική μελέτη πραγματοποιείται μέσω του συστήματος ανάλυσης “Static Structural”.



Εικόνα 45 - Static Structural

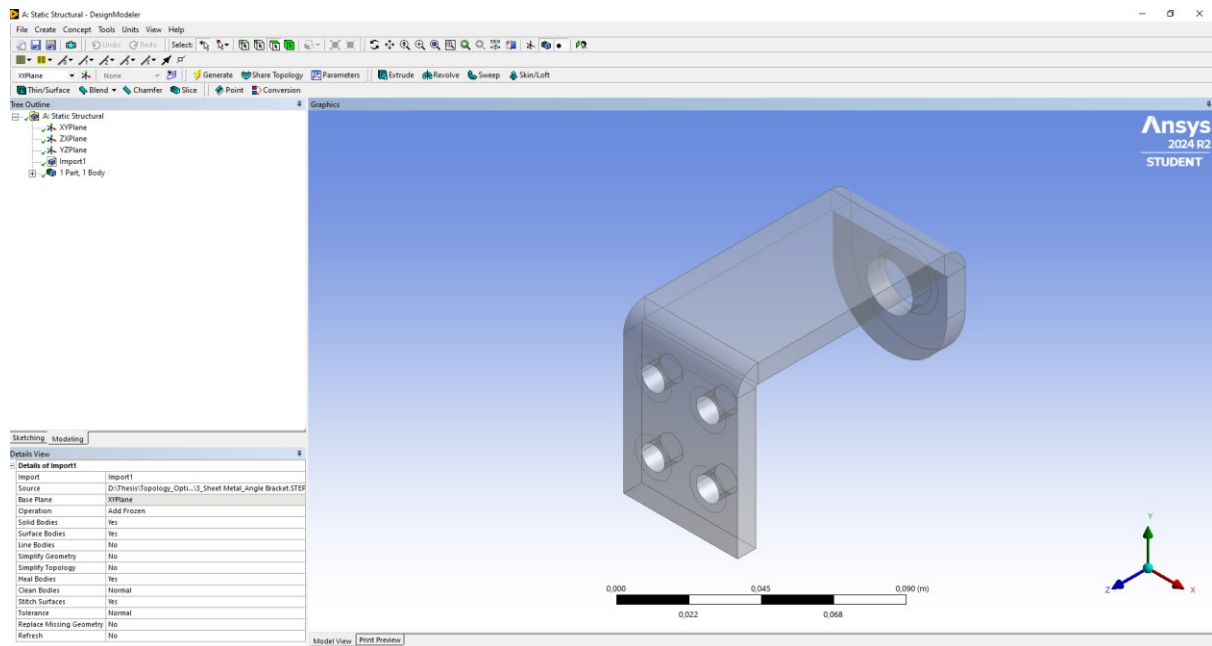
Ως υλικό επιλέγεται το “Structural Steel, S275N”, το οποίο αποτελεί σύνηθες υλικό φύλλων χάλυβα.

Outline of Schematic A2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			Source
2	Material			Description
3	Structural steel, S275N		Granta_Design_	Structural steel, S275N, normalized Data compiled by Ansys Granta , incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS, Inc. provides no warranty for this data.
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: Structural steel, S275N		
	A	B
1	Property	Value
2	Material Field Variables	Table
3	Density	7850
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,196E-05
6	Isotropic Elasticity	
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...
8	Young's Modulus	2,1E+11
9	Poisson's Ratio	0,3046
10	Bulk Modulus	1,7912E+11
11	Shear Modulus	8,0484E+10
12	Tensile Yield Strength	Tabular
13	Tensile Ultimate Strength	Tabular

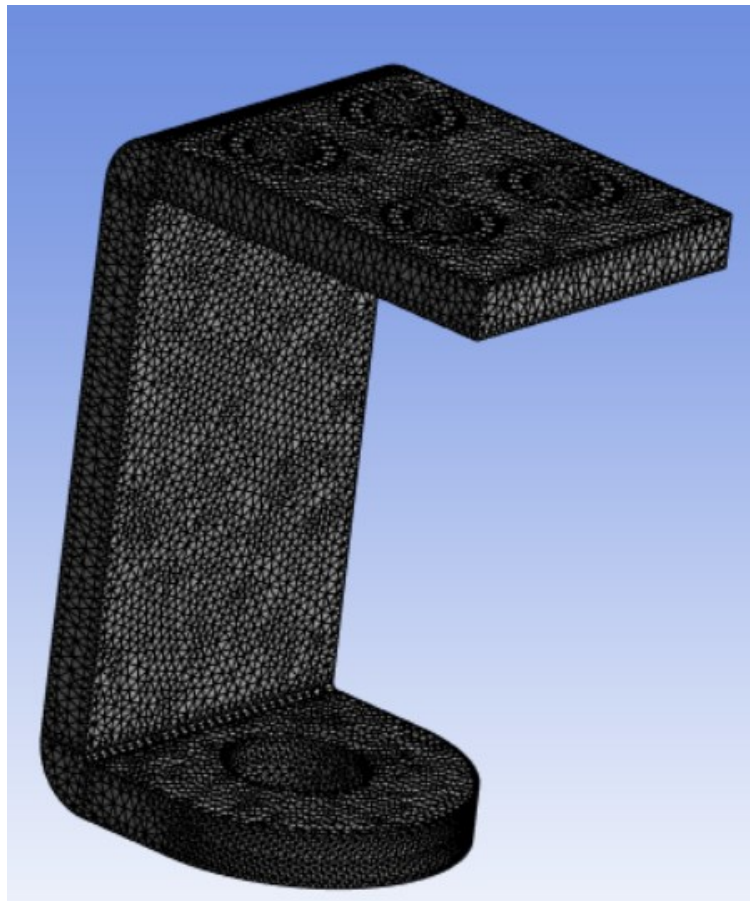
Εικόνα 46 - Engineering Data

Μέσω του “Geometry” εισάγεται η αρχική γεωμετρία υπό μορφή αρχείου step που δημιουργήθηκε στο Solidworks.



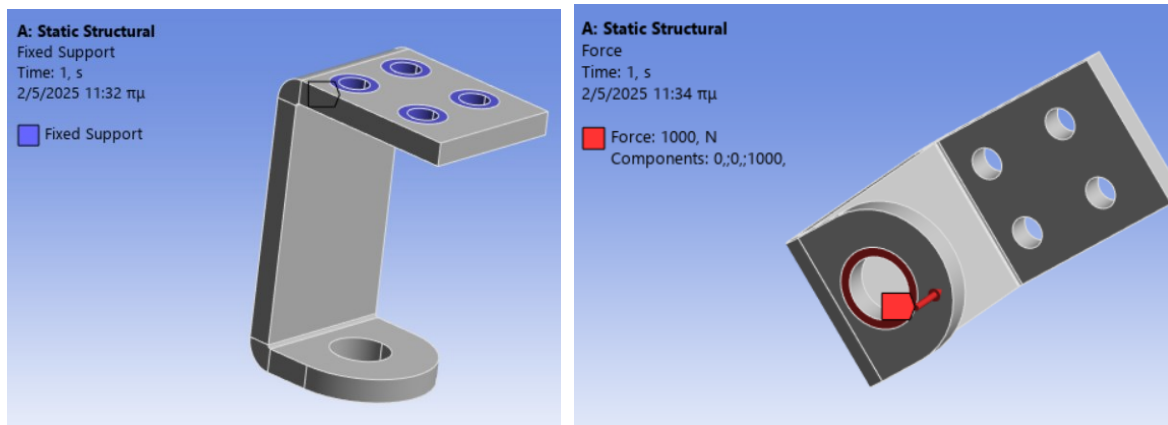
Εικόνα 47 - Εισαγωγή γεωμετρίας

Δημιουργείται υπολογιστικό πλέγμα από στοιχεία μεγέθους 0,9mm.



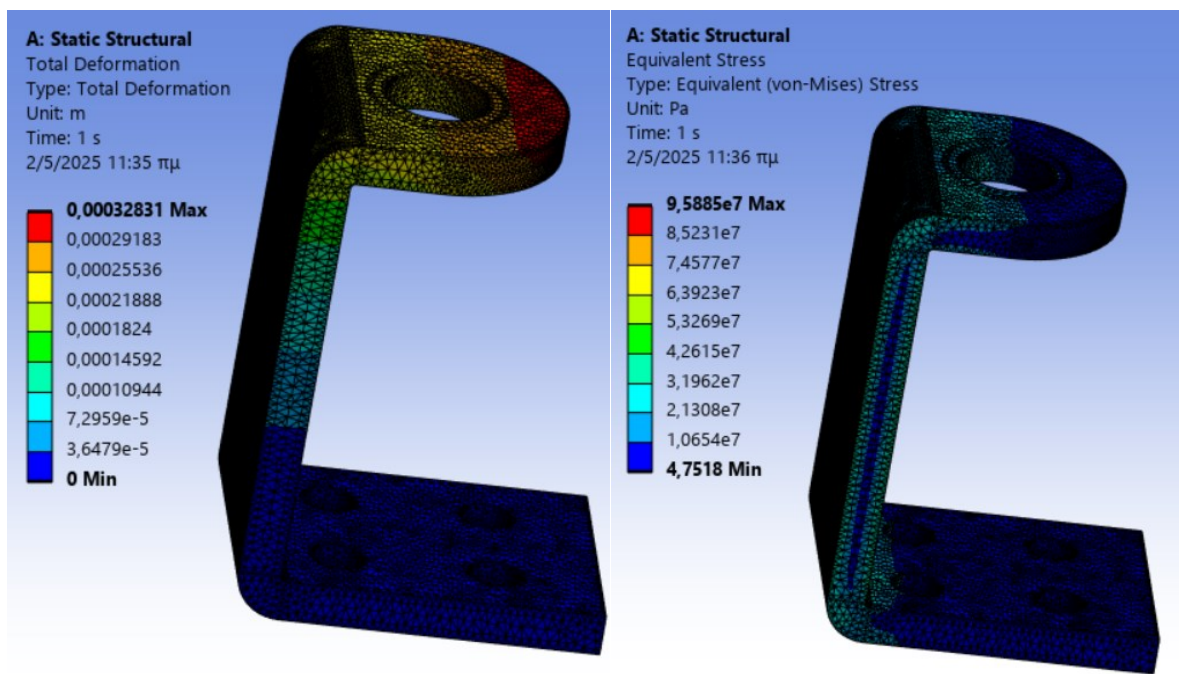
Εικόνα 48 - Υπολογιστικό πλέγμα

Στη συνέχεια επιβάλλονται οι συνθήκες στήριξης και φόρτισης, με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε στο περιβάλλον του Solidworks.

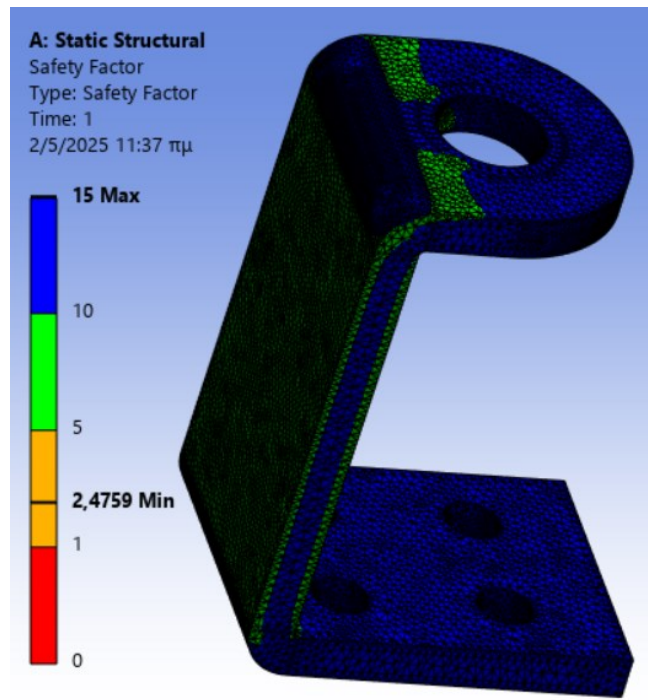


Εικόνα 49 – Συνθήκες στήριξης και φόρτισης

Έπειτα από την υπολογιστική προσομοίωση του μοντέλου λαμβάνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα.

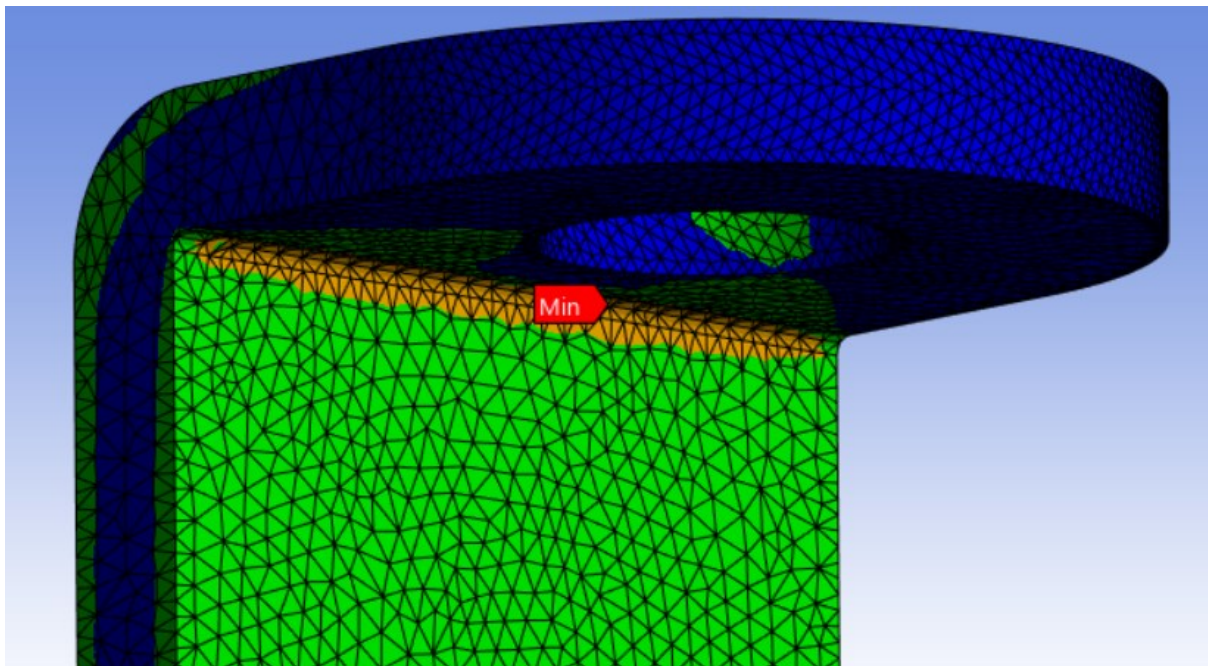


Εικόνα 50 - Deformation and Stress Results



Εικόνα 51 - Safety Factor Results

Παρατηρείται ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 2,4759 και ότι η περιοχή με τη μέγιστη τάση είναι στο ράδιο του στρατζαρίσματος. Σε μεγάλο μέρος της γεωμετρίας ο συντελεστής ασφαλείας είναι 15. Άρα πράγματι υπάρχει δυνατότητα αφαίρεσης τμήματος της μάζας της αρχικής γεωμετρίας.



Εικόνα 52 - Area of Minimum Safety Factor

Παρακάτω είναι συνοπτικά τα αποτελέσματα για την αρχική γεωμετρία:

Μάζα	0,57078 kg (*)
Maximum Equivalent Stress (von-Mises)	95,885 MPa
Safety Factor	2,4759

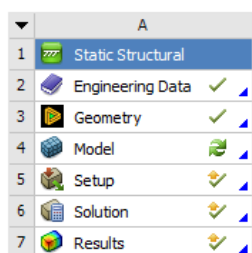
Πίνακας 2 - Στοιχεία αρχικής γεωμετρίας

(*) εντοπίζεται μικρή διαφορά στον υπολογισμό της μάζας μεταξύ Solidworks και Ansys και αυτό οφείλεται σε μικρή διαφορά των ιδιοτήτων των υλικών μεταξύ των 2 λογισμικών πακέτων. Βάση για σύγκριση της αρχικής και τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας θα αποτελεί η μάζα που εξάγεται από το Ansys.

3.2.5. Διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang

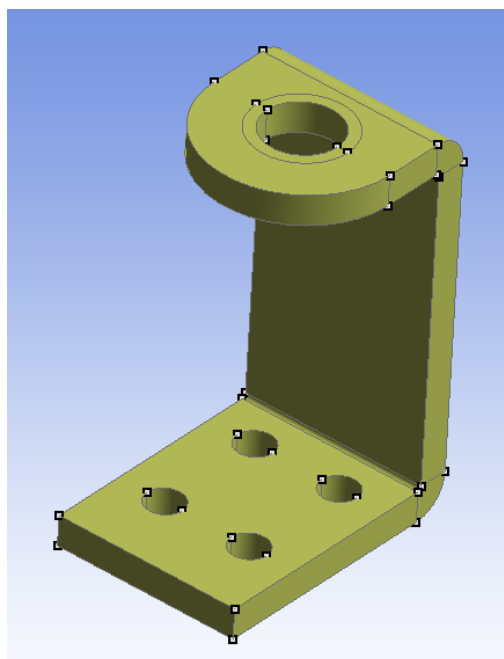
Η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης της γεωμετρίας θα πραγματοποιηθεί μέσω του πακέτου Ansys OptiSlang.

Δημιουργείται ξεχωριστό project στο λογισμικό Ansys και εισάγεται το module “Static Structural”.



Εικόνα 53 - Νέο project

Εισάγεται η αρχική γεωμετρία στο Ansys.



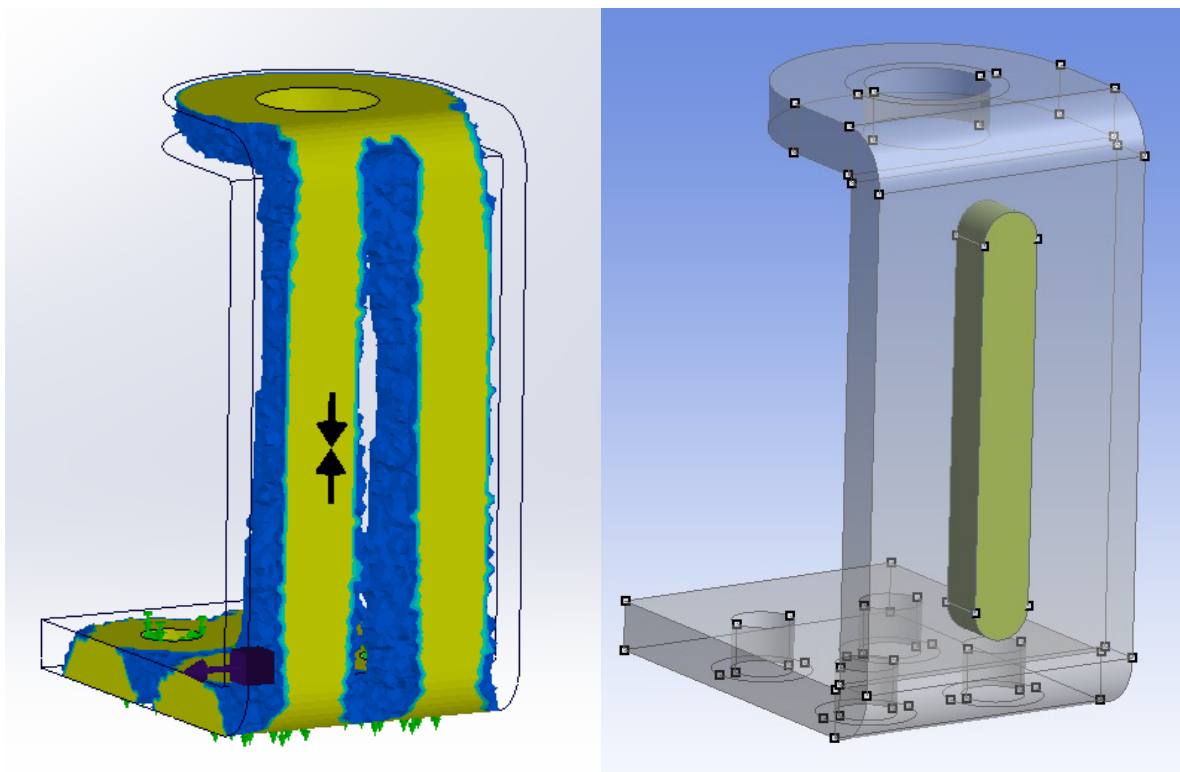
Εικόνα 54 - Εισαγωγή γεωμετρίας στο Ansys

Στη συνέχεια δημιουργούνται sketches πάνω στις επιφάνειες της γεωμετρίας, ούτως ώστε να αφαιρεθεί υλικό από αυτήν, στις περιοχές που ενδείκνυται αφαίρεση μάζας, σύμφωνα με τη διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του Solidworks.

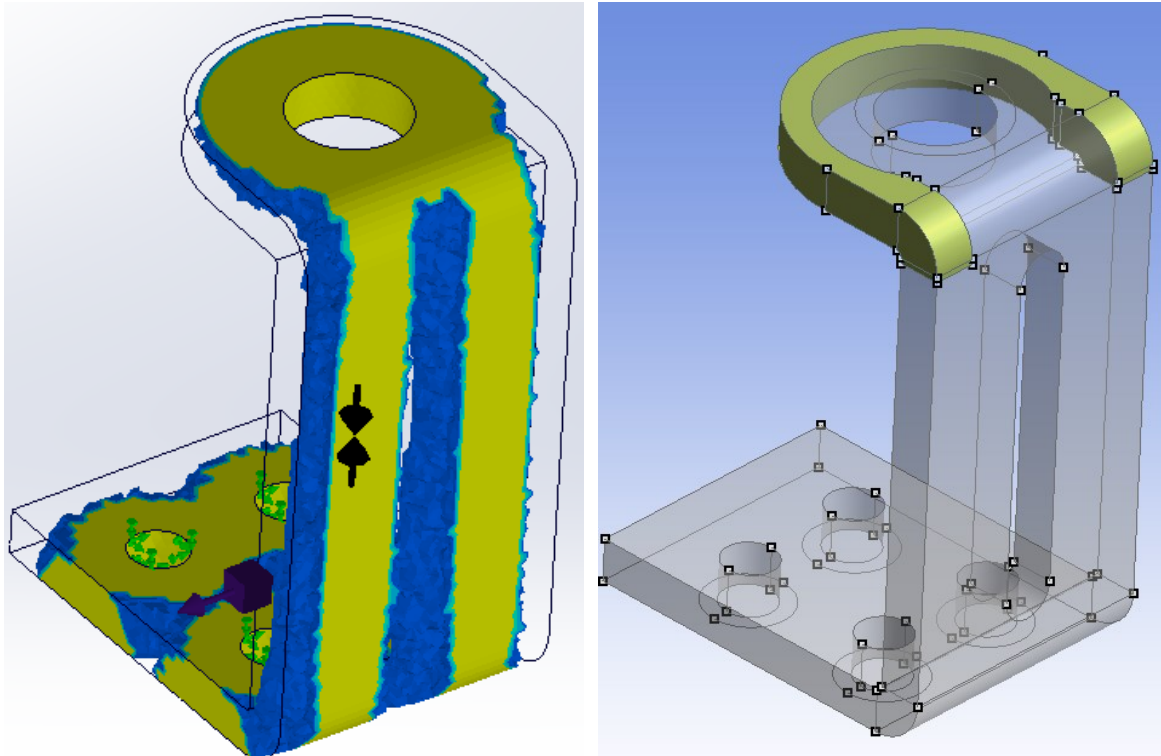
Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού των sketches στις επιφάνειες της γεωμετρίας που πρόκειται να αφαιρεθούν, λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός του τρόπο παραγωγής της γεωμετρίας, δηλαδή στην περίπτωση αυτής της γεωμετρίας η προοδευτική διαμόρφωση με καλούπι.

Σημείωση: Η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί αξιοποιώντας διεπαφή μεταξύ του Ansys και του Solidworks, η οποία επιτρέπει την άμεση επικοινωνία των δύο λογισμικών. Έτσι οι παράμετροι σχεδίασης θα μπορούσαν να εκφραστούν παραμετρικά απευθείας στο Solidworks. Η λειτουργία αυτή δεν είναι διαθέσιμη στη ακαδημαϊκή έκδοση του Ansys.

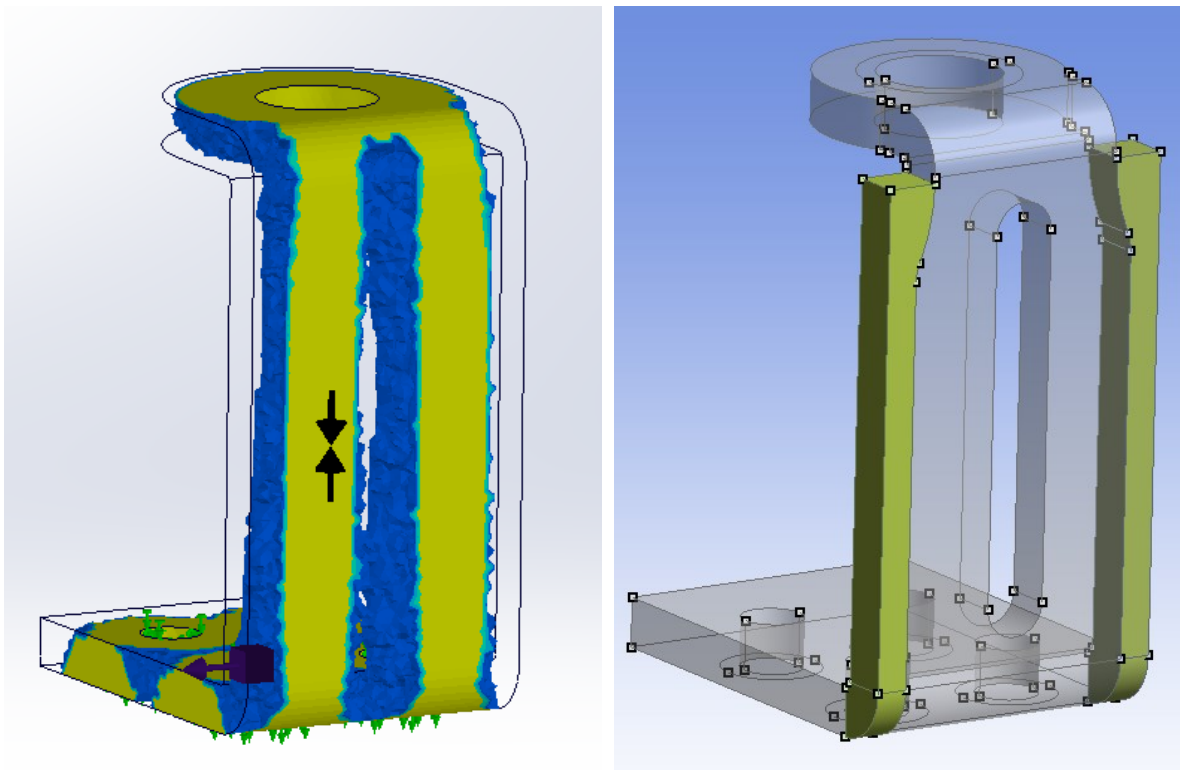
Ακολουθεί η διαδικασία του σχεδιασμού των σημείων αφαίρεσης υλικού από την αρχική γεωμετρία:



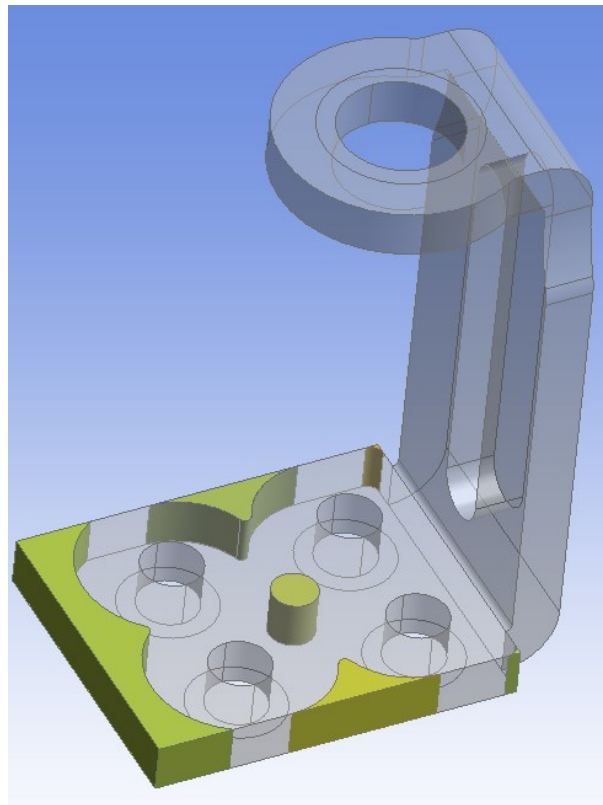
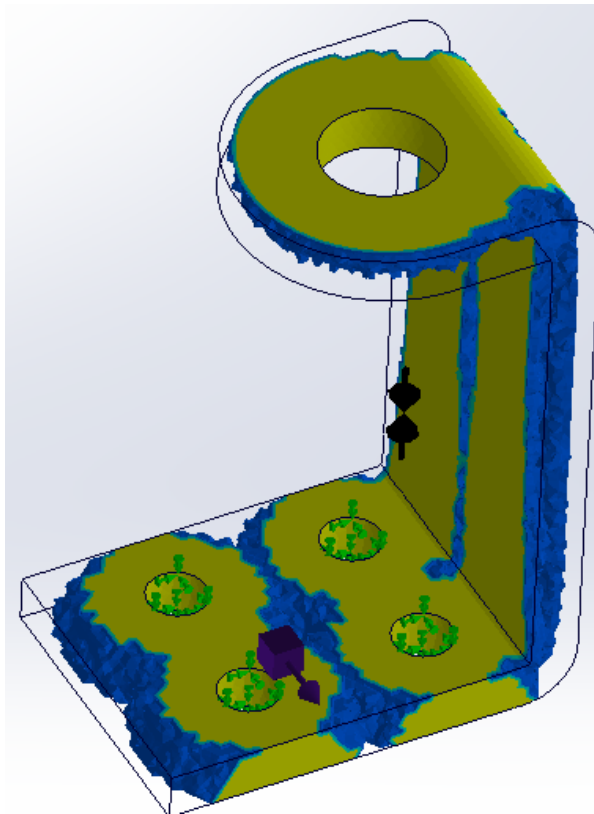
Εικόνα 55 – Περιοχή 1: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys



Εικόνα 56 - Περιοχή 2: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys

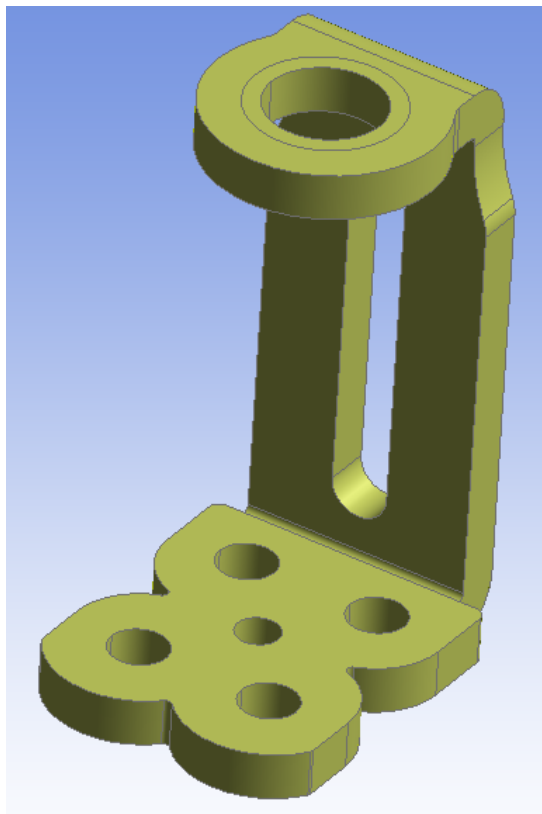
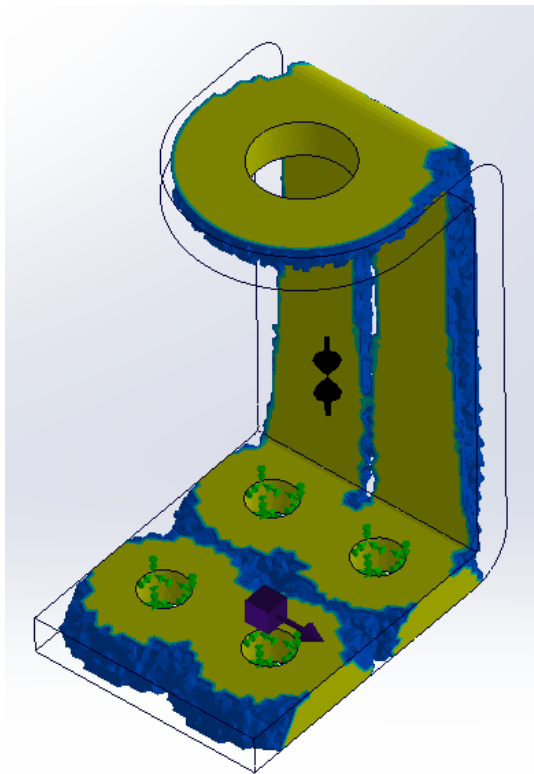


Εικόνα 57 - Περιοχή 3: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys



Εικόνα 58 - Περιοχή 4: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys

Η γεωμετρία αποκτά την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 59 – Γεωμετρία, Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys

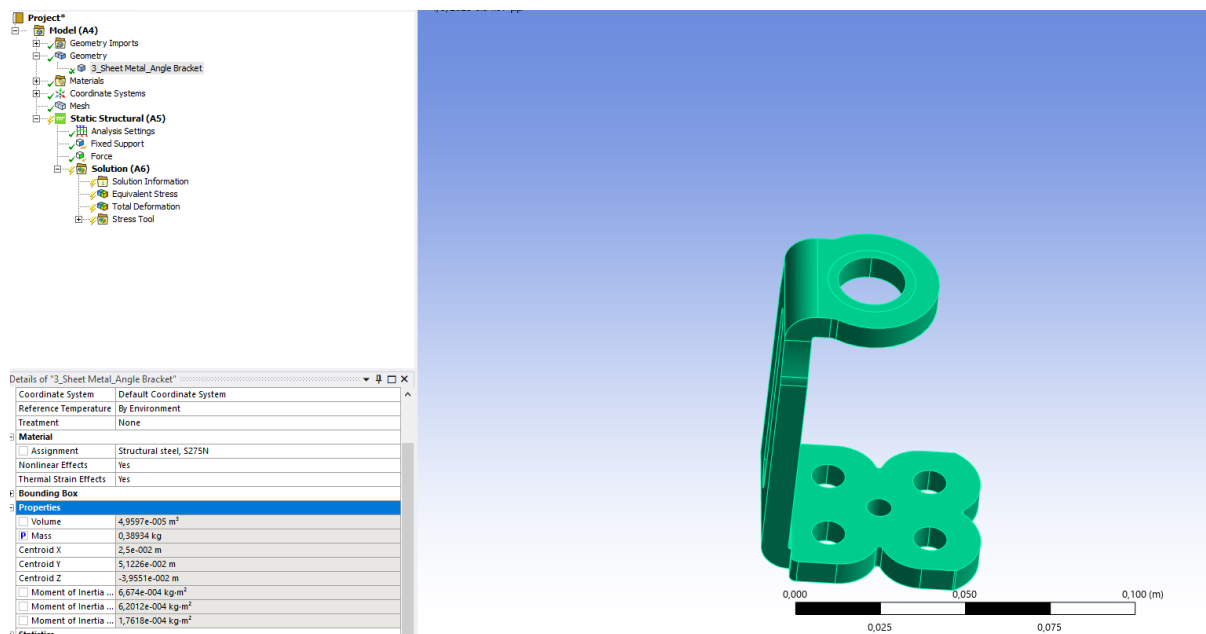
Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι οι διαστάσεις των sketches, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η αφαίρεση υλικού από τη γεωμετρία στο Ansys, είναι ορισμένες παραμετρικά. Με αυτόν τον τρόπο θα πραγματοποιηθεί αυτόματα η διαδικασία της μεταβολής των σχεδιαστικών παραμέτρων από το λογισμικό.

Parameter Editor			
	Name	Value	Type
✓	Oval_Width	0,01 m	Length
✓	Oval_Height	0,06 m	Length
✓	Upper_HoleDia	0,04 m	Length
✓	Middle_Esoxh_Ypsos	0,0125 m	Length
✓	Lower_Base_CenterDia	0,0075 m	Length
✓	Lower_Base_Esochi1	0,0125 m	Length
✓	Lower_Base_CornerFillet	0,002 m	Length
✓	Lower_Base_Radius	0,015 m	Length

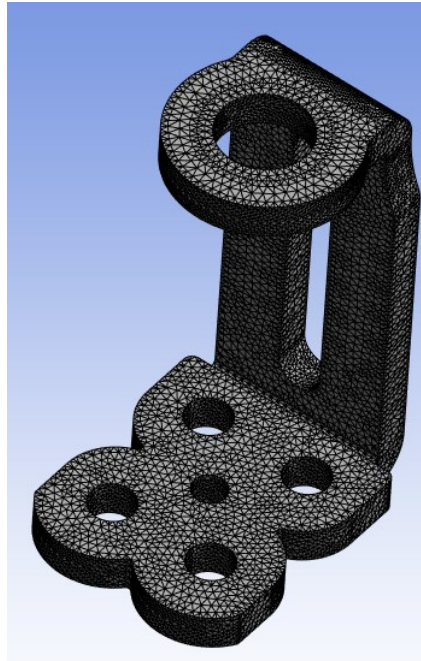
Εικόνα 60 - Παράμετροι για περιοχές αφαίρεσης υλικού

Στη συνέχεια μέσω του μενού “Model” ορίζεται το υπολογιστικό πλέγμα και οι συνθήκες στήριξης και φόρτισης, με την ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υπολογιστική μελέτη της αρχικής γεωμετρίας στο Ansys.

Επιπλέον, ορίζεται η μάζα της γεωμετρίας ως παράμετρος εξόδου, η οποία θα αξιοποιηθεί ως κριτήριο για κατά την επαναληπτική διαδικασία της παραμετρικής βελτιστοποίησης.

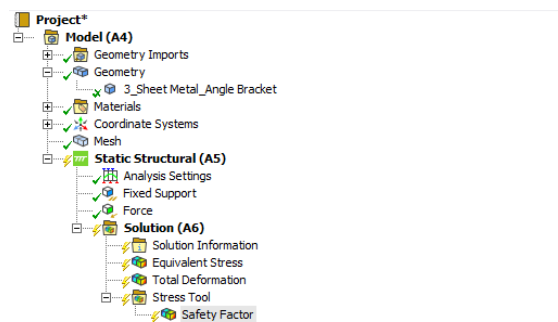


Εικόνα 61 - Ορισμός μάζας γεωμετρίας ως παράμετρο



Εικόνα 62 - Διακριτοποίηση γεωμετρίας

Ως έξοδος της υπολογιστικής προσομοίωσης του μοντέλου ορίζεται και ο Συντελεστής Ασφαλείας, μέγεθος το οποίο θα αξιοποιηθεί στην επαναληπτική διαδικασία.

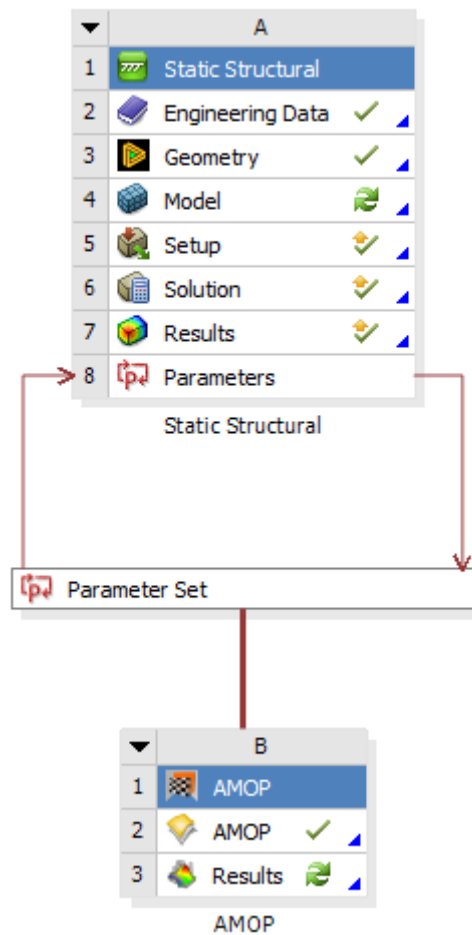


Details of "Safety Factor"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Safety Factor
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Separate Data by Entity	No
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
P Minimum	
Minimum Occurs On	
Information	

Εικόνα 63 - Model Tree

Η διαδικασία της προετοιμασίας για την επαναληπτική διαδικασία παραμετρικής βελτιστοποίησης εντός του Ansys έχει ολοκληρωθεί. Ακολουθεί η διαδικασία setup για το σύστημα Ansys OptiSlang, μέσω του οποίου θα εξαχθεί η βέλτιστη γεωμετρία.

Εισάγεται το Module “Sensitivity” του Ansys OptiSlang στο project και συνδέεται με τις παραμέτρους εισόδου και εξόδου που έχουν οριστεί κατά την παραπάνω διαδικασία.



Εικόνα 64 - Ansys OptiSlang Sensitivity Module

Από το μενού “Parameter” εισάγεται το εύρος των παραμέτρων σχεδίασης.

AMOP [Academic]

Parameter	Start designs	Criteria	Adaption	MOP	Other	Result designs
Name	Parameter type	Reference value	Constant	Resolution	Range	Range plot
1 Oval_Width_P1	Optimization	0.01	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.01 0.02	
2 Lower_Base_CornerFillet_P9	Optimization	0.002	<input checked="" type="checkbox"/>	Continuous	0.0018 0.0022	
3 Oval_Height_P2	Optimization	0.06	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.06 0.07	
4 Upper_HoleDia_P3	Optimization	0.04	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.035 0.045	
5 Middle_Esoxh_Ypsos_P6	Optimization	0.0125	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.005 0.0125	
6 Lower_Base_CenterDia_P7	Optimization	0.0075	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.006 0.008	
7 Lower_Base_Esochi1_P8	Optimization	0.0125	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.0075 0.015	
8 Lower_Base_Radius_P10	Optimization	0.015	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.01375 0.016	
9 FBlend1.FD1_P18	Optimization	0.001	<input checked="" type="checkbox"/>	Continuous	0.0009 0.0011	

Εικόνα 65 - Εύρος παραμέτρων σχεδίασης

Σημείωση: Οι παράμετροι που έχουν επιλεγεί ως σταθεροί (constant) είναι βοηθητικοί και δεν συμμετέχουν στην επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης των σετ γεωμετρικών παραμέτρων.

Ως στόχος (Objective) της επαναληπτικής διαδικασίας ορίζεται η ελαχιστοποίηση της μάζας. Επιπλέον ορίζεται ως περιορισμός (Constraint) ο συντελεστής ασφαλείας να είναι μεγαλύτερος του 1,5.

AMOP [Academic]

Parameter

Name	Value
FBlend1.FD1_P18	0.001
Lower_Base_CenterDia_P7	0.0075
Lower_Base_CornerFillet_P9	0.002
Lower_Base_Esochi1_P8	0.0125
Lower_Base_Radius_P10	0.015
Middle_Esoxh_Ypsos_P6	0.0125
Oval_Height_P2	0.06
Oval_Width_P1	0.01
Upper_HoleDia_P3	0.04

Responses

Name	Value
_3_Sheet_Metal_Angle_Bracket_Mass_P11	0.406333
Safety_Factor_Minimum_P12	1.72984

Criteria

Name	Type	Expression	Criterion	Limit	Evaluated expression
obj_3_Sheet_Metal_Angle_Bracket_Mass_P11	Objective	_3_Sheet_Metal_Angle_Bracket_Mass_P11	MIN		0.406333
constr_Safety_Factor_Minimum_P12	Constraint	Safety_Factor_Minimum_P12	≥	1.5	1.72984 ≥ 1.5
new					

Create new

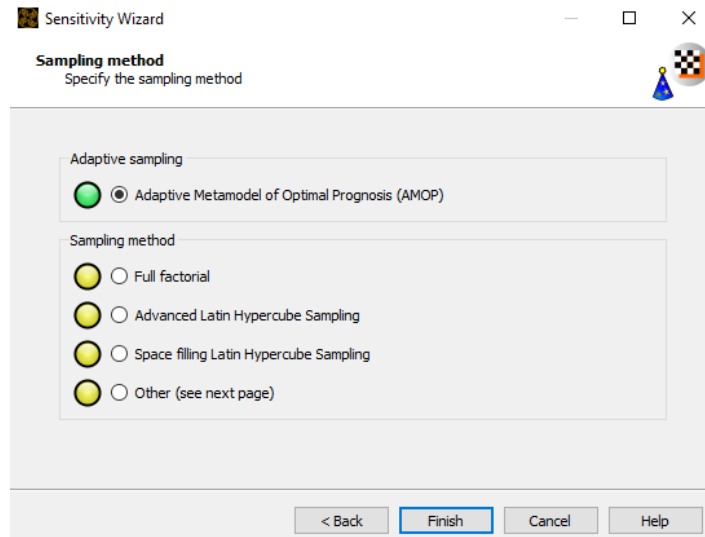
Variable
 Objective
 Constraint
 Limit state

☐ Prefer Criteria from Upstream Component
 ☐ Instant visualization
 ☐ Import criteria from system

☒ Show additional options
 OK Cancel Apply

Εικόνα 66 - Στόχος και Κριτήριο της επαναληπτικής διαδικασίας

Σημαντικό σημείο του setup του Ansys OptiSlang αποτελεί η επιλογή της χρήσης Adaptive Sampling και συγκεκριμένα του Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis (AMOP), επιλογή που θα επιτρέψει στη συνέχεια την κατασκευή μεταμοντέλου για την επαναληπτική διαδικασία της υπολογιστικής προσομοίωσης της γεωμετρίας. Δηλαδή αντί να επιλύεται το πλήρες μοντέλο, το Ansys OptiSlang με χρήση τεχνολογίας Machine Learning και Artificial Intelligence επιλέγει κατασκευάζει με τον βέλτιστο τρόπο μοντέλο μειωμένης τάξης - μεταμοντέλο.



Εικόνα 67 - Επιλογή Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της προσομοίωσης του πλήρους μοντέλου για 100 διαφορετικές υποπαραλλάγες της γεωμετρίας, δηλαδή 100 διαφορετικά σεντ παραμέτρων για τα σημεία αφαίρεσης υλικού. Αυτές οι 100 προσομοιώσεις αποτελούν τα Design of Experiments (DOE), δηλαδή τα δεδομένα που θα αξιοποιηθούν για την κατασκευή του μεταμοντέλου και στη συνέχεια την προσομοίωση του μεταμοντέλου για χιλιάδες διαφορετικά σεντ γεωμετρικών παραμέτρων.

3.2.6. Αποτελέσματα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang

Με την ολοκλήρωση της πλήρους υπολογιστικής προσομοίωσης για 100 διαφορετικά σετ παραμέτρων, εξάγεται ο πίνακας (Design Table) με τα στοιχεία για αυτά τα 100 μοντέλα.

Στην 3^η στήλη περιλαμβάνεται η μάζα του κάθε μοντέλου και στην 4^η στήλη ο συντελεστής ασφαλείας. Τα κελιά με κόκκινο χρώμα υποδεικνύουν την μη ικανοποίηση του περιορισμού για συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο του 1.5, ενώ αντίστοιχα με πράσινο υποδηλώνεται η ικανοποίηση του περιορισμού αυτού. Στις επόμενες στήλες περιλαμβάνονται οι παράμετροι σχεδίασης των περιοχών αφαίρεσης υλικού.

Designable									
	Id	Feasible	Metal_Angle_Bra	constr_Safety_Factor_Minimum_P12	Lower_Base_CenterDia_P7	Lower_Base_CornerFillet_P9	Lower_Base_Esochi1_P8	Lower_Base_Radius_P10	Middle_Esoch_Ypsos_P6
1	0.1	true	0.379932	1.58037 \geq 1.5	0.00711	0.002	0.0110625	0.0137612	0.0116375
2	0.2	false	0.272411	0.53172 \geq 1.5	0.00715	0.002	0.0130125	0.0147287	0.0111125
3	0.3	false	0.313343	0.974917 \geq 1.5	0.00709	0.002	0.0124125	0.0156512	0.0105125
4	0.4	false	0.320077	1.25518 \geq 1.5	0.00737	0.002	0.0148875	0.0149088	0.0124625
5	0.5	false	0.370365	1.42795 \geq 1.5	0.00655	0.002	0.0095625	0.0152462	0.0070625
6	0.6	false	0.335791	1.25739 \geq 1.5	0.00665	0.002	0.0135375	0.0145937	0.0073625
7	0.7	false	0.311463	0.821049 \geq 1.5	0.00799	0.002	0.0109875	0.0149313	0.0066125
8	0.8	false	0.371217	1.49155 \geq 1.5	0.00787	0.002	0.0097125	0.0137837	0.0081875
9	0.9	false	0.349894	1.41187 \geq 1.5	0.00739	0.002	0.0079875	0.0143237	0.0084125
10	0.10	false	0.345271	1.4141 \geq 1.5	0.00733	0.002	0.0082875	0.0158312	0.0090125
11	0.11	true	0.390593	1.5932 \geq 1.5	0.00691	0.002	0.0081375	0.0141438	0.0065375
12	0.12	false	0.350261	1.38744 \geq 1.5	0.00793	0.002	0.0109125	0.0140762	0.0114875
13	0.13	false	0.362681	1.43496 \geq 1.5	0.00771	0.002	0.0129375	0.0156062	0.0051875
14	0.14	false	0.354061	1.07351 \geq 1.5	0.00705	0.002	0.0082125	0.0150887	0.0117125
15	0.15	false	0.352714	1.09784 \geq 1.5	0.00781	0.002	0.0092625	0.0159212	0.0103625
16	0.16	true	0.392971	1.51195 \geq 1.5	0.00775	0.002	0.0114375	0.0144137	0.0088625
17	0.17	true	0.377977	1.51887 \geq 1.5	0.00651	0.002	0.0089625	0.0158762	0.0123125
18	0.18	true	0.378245	1.52353 \geq 1.5	0.00645	0.002	0.0142875	0.0151787	0.0111875
19	0.19	false	0.327867	1.16492 \geq 1.5	0.00777	0.002	0.0100125	0.0146387	0.0105875
20	0.20	false	0.348063	1.35502 \geq 1.5	0.00761	0.002	0.0128625	0.0159887	0.0107375

Εικόνα 68 - Αποτελέσματα επαναληπτικής διαδικασίας

Ως βέλτιστη γεωμετρία επιλέγεται αυτόματα από το Ansys OptiSlang η γεωμετρία “Design 50” με μάζα 0.361052kg και συντελεστή ασφαλείας 1.61397.

Hide design selection

Select best design(s) (Design 50)

Select all

Invert selection

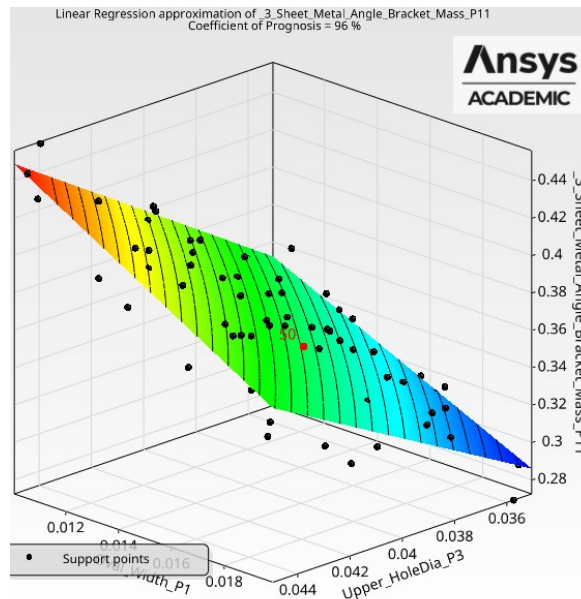
Design selection: 50;

Designable

	Id	Feasible	Metal_Angle_Bra	constr_Safety_Factor_Minimum_P12	Lower_Base_CenterDia_P7	Lower_Base_CornerFillet_P9	Lower_Base_Esochi1_P8	Lower_Base_Radius_P10	Middle_Esoch_Ypsos_P6	
	50	0.50	true	0.361052	1.61397 \geq 1.5	0.00719	0.002	0.0122625	0.0149762	0.0115625

Εικόνα 69 - Βέλτιστη γεωμετρία

Η απόδοση για την κατασκευή του μεταμοντέλου κρίνεται ιδιαίτερα καλή και ακριβής, καθώς επετεύχθη ακρίβεια 96% για τον υπολογισμό της μάζας. Το Ansys OptiSlang αναφέρει αυτόν τον δείκτη ακρίβειας του μεταμοντέλου ως Coefficient of Prognosis (COP).

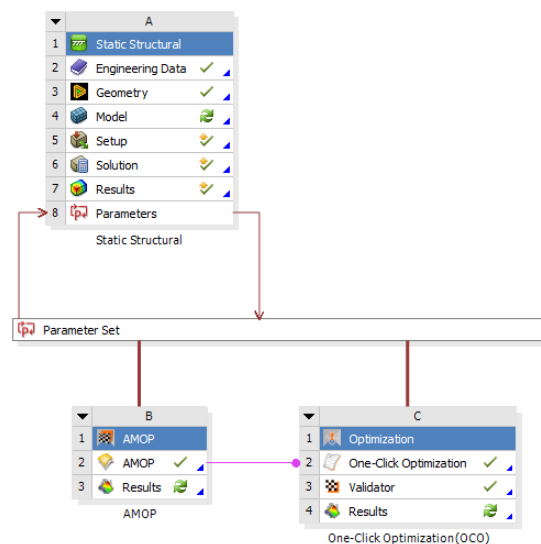


Εικόνα 70 - Coefficient of Prognosis

Με την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας της προσομοίωσης των 100 πλήρων μοντέλων, ακολουθεί η επίλυση του μεταμοντέλου για χιλιάδες διαφορετικά σεντ γεωμετρικών παραμέτρων.

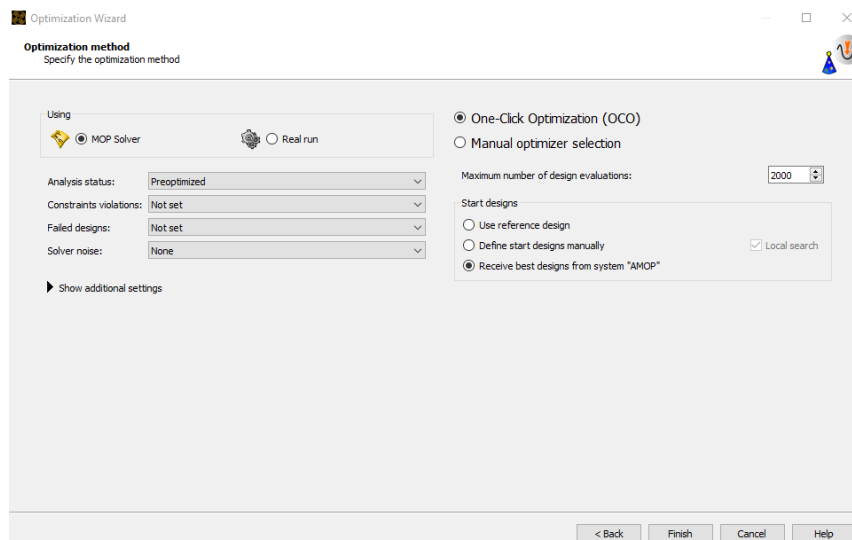
Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Στο ίδιο project εισάγεται το Module “Optimization” του Ansys OptiSlang, το οποίο δέχεται ως είσοδο τα δεδομένα που δημιουργήθηκαν κατά την επαναληπτική διαδικασία, δηλαδή τα Design of Experiments.



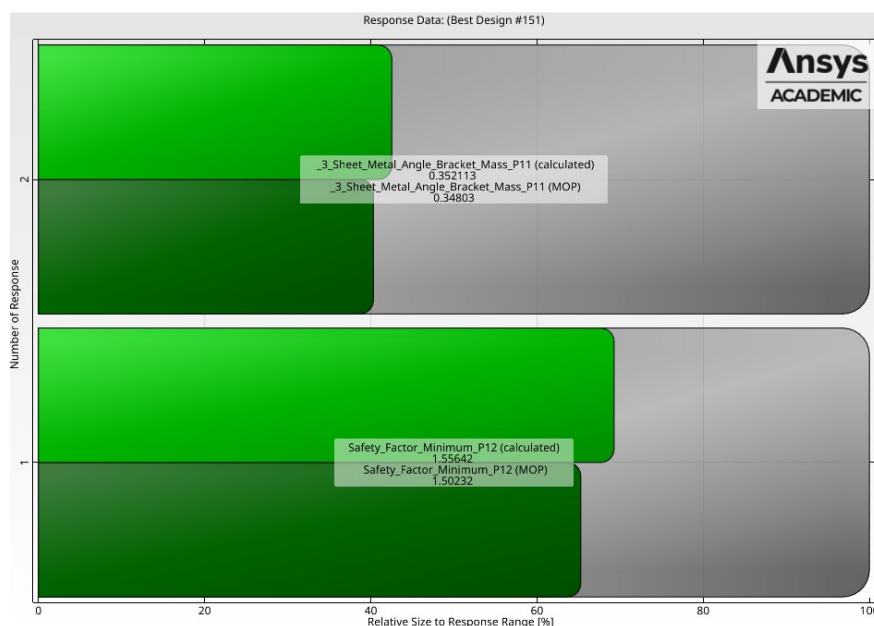
Εικόνα 71 - Optimization Module

Στις ρυθμίσεις του Optimization, επιλέγεται η χρήση των δεδομένων των DOE.



Εικόνα 72 - Optimization Wizard

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας του “Optimization” μελετώνται χιλιάδες διαφορετικά σετ γεωμετρικών παραμέτρων, επιλύοντας το μεταμοντέλο. Από τα μοντέλα που προσομοιώθηκαν, επιλέγεται το μοντέλο με τη βέλτιστη απόδοση (best design) και πραγματοποιείται επίλυση του πλήρους μοντέλου για αυτή τη γεωμετρία. Στο ακόλουθο διάγραμμα συγκρίνονται τα δεδομένα που εξήχθησαν από την επίλυση του μεταμοντέλου συγκριτικά με τα αντίστοιχα δεδομένα από την επίλυση του πλήρους μοντέλου, το οποίο επιβεβαιώνει την πολύ καλή απόδοση του μεταμοντέλου.



Εικόνα 73 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & πλήρους μοντέλου

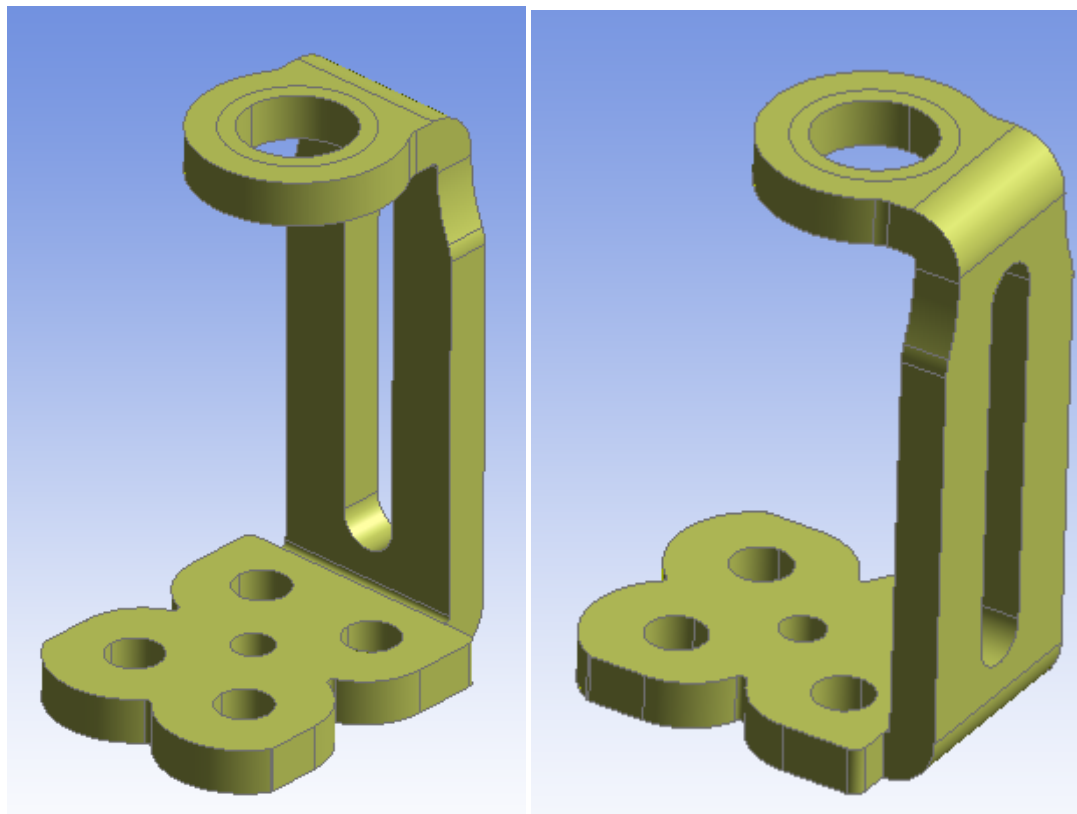
Μέγεθος	Πλήρες Μοντέλο	Μεταμοντέλο	% Απόκλιση
Μάζα (kg)	0,352113	0,34803	-1,16%
Συντελεστής Ασφαλείας	1,55642	1,50232	-3,48%

Πίνακας 3 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & Πλήρους μοντέλου

Επιβεβαιώνεται λοιπόν η πολύ μικρή απόκλιση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων που εξάγονται από την επίλυση του μεταμοντέλου σε σχέση με την επίλυση του πλήρους μοντέλου.

3.2.7. Τοπολογική Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία

Η τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία που εξήχθη από τη διαδικασία βελτιστοποίησης μέσω του Ansys OptiSlang είναι η παρακάτω.



Εικόνα 74 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία

Ακολουθεί η σύγκριση των μεγεθών – κριτηρίων για την αρχική και την τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία.

Μέγεθος	Αρχική Γεωμετρία	Τοπολογικά Βέλτιστη	% Διαφορά
Μάζα (kg)	0,57078	0,35211	-38,31%
Συντελεστής Ασφαλείας	2,4759	1,55642	-37,14%

Πίνακας 4 - Σύγκριση αρχικής και τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας

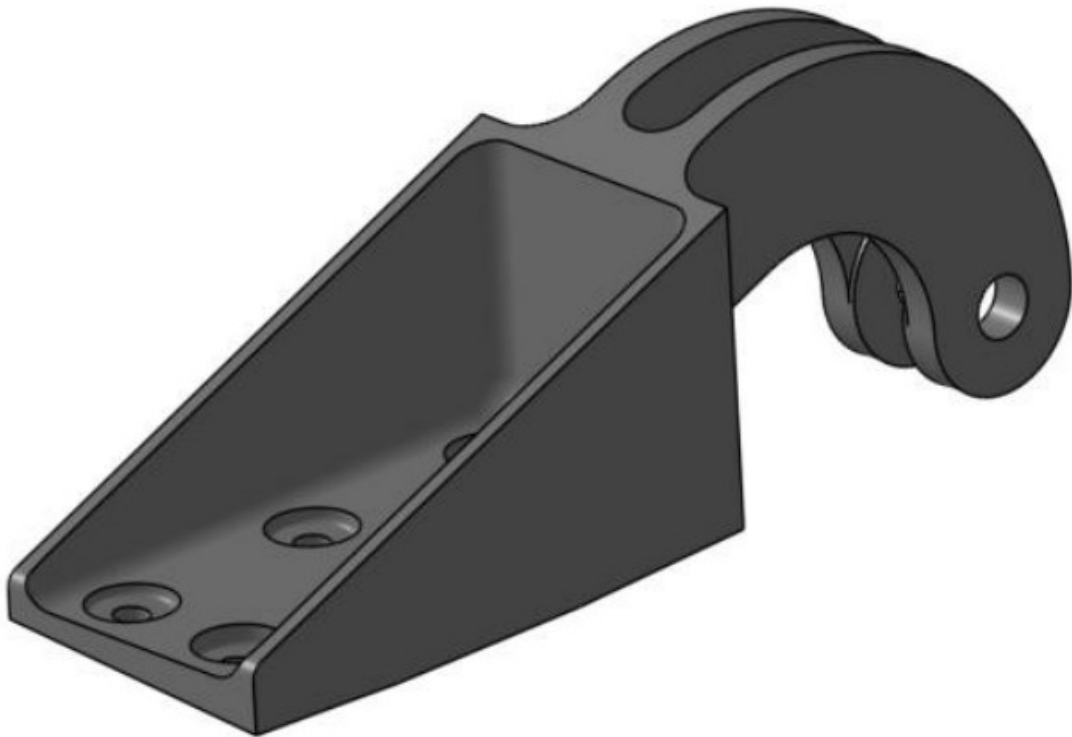
Ο στόχος της τοπολογικής βελτιστοποίησης επετεύχθη, δηλαδή μειώθηκε η μάζα της γεωμετρίας σημαντικά (-38,31%), διατηρώντας ταυτόχρονα τον συντελεστής ασφαλείας μεγαλύτερο του 1,5.

Επιπλέον, η γεωμετρία είναι εφικτό να κατασκευαστεί με τη μέθοδο της προσδευτικής διαμόρφωσης με καλούπι, καθώς οι περιοχές αφαίρεσης υλικού σχεδιάστηκαν με γνώμονα αυτόν τον περιορισμό.

3.3. Γεωμετρία No. 2 παραγόμενη με μέθοδο κατεργασίας CNC

3.3.1. Περιγραφή

Το μοντέλο No. 2 αφορά βάση στήριξης αεροσκάφους Airbus A320 και έχει ήδη μελετηθεί σε άρθρο του 2011 [40]. Στόχος του άρθρου ήταν η τοπολογική βελτιστοποίηση της βάσης στήριξης, λαμβάνοντας υπόψη ότι το εξάρτημα αυτό θα παραχθεί με μέθοδο προσθετικής παραγωγής (Additive Manufacturing). Στην περίπτωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, ως μέθοδος παραγωγής του εξαρτήματος ορίζεται η κατεργασία σε εργαλειομηχανή CNC (CNC Milling), διαδικασία που είναι πιο συνήθης για εξαρτήματα παραγωγής.

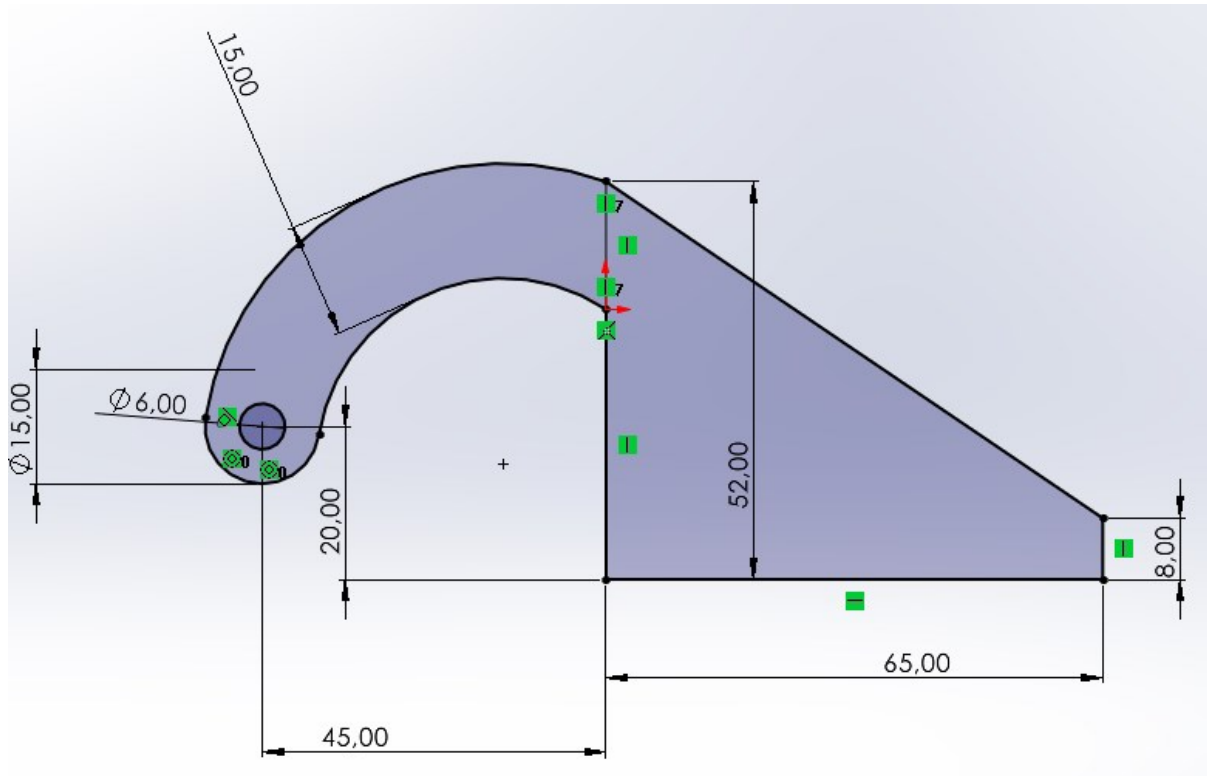


Εικόνα 75 - Μοντέλο No. 2 [40]

3.3.2. Σχεδιασμός γεωμετρίας

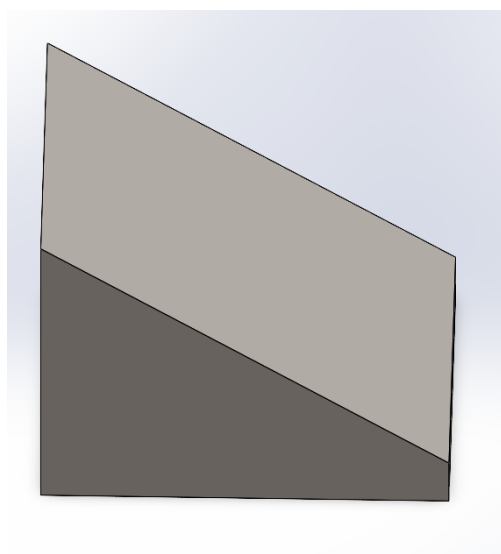
Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα τρισδιάστατου σχεδιασμού 3D CAD Solidworks. Ακολουθεί η διαδικασία σχεδιασμού της γεωμετρίας.

Αρχικά σχεδιάζεται το βασικό sketch της γεωμετρίας.

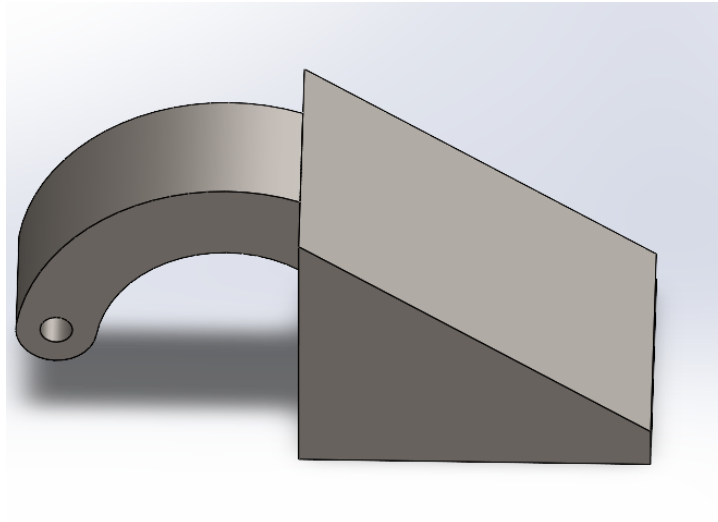


Εικόνα 76 - Βασικό sketch γεωμετρίας

Ακολουθούν τα extrude βάσει του παραπάνω sketch, ώστε να σχηματιστεί ο βασικός όγκος της γεωμετρίας.

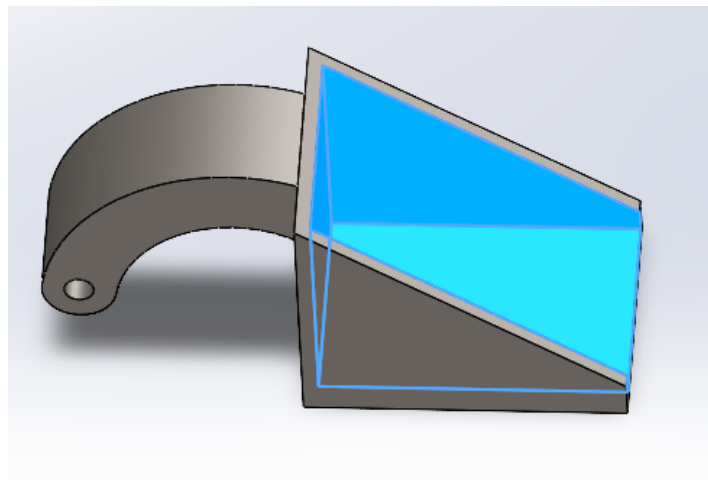


Εικόνα 77 - Extrude No. 1



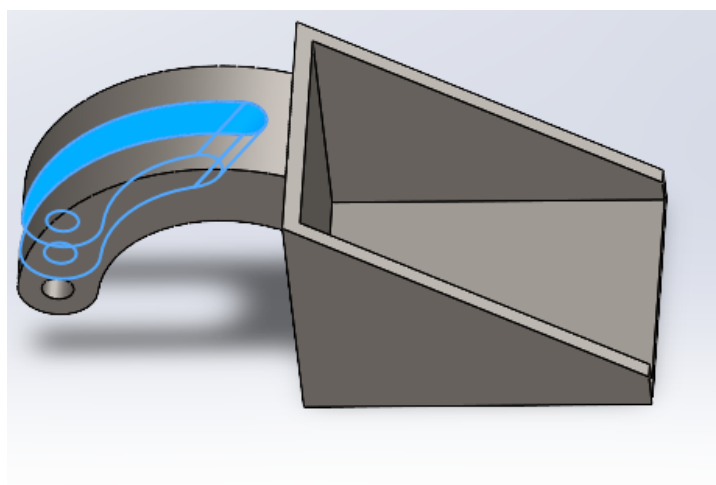
Εικόνα 78 - Extrude No. 2

Με την εντολή Shell αφαιρείται υλικό από το μοντέλο.



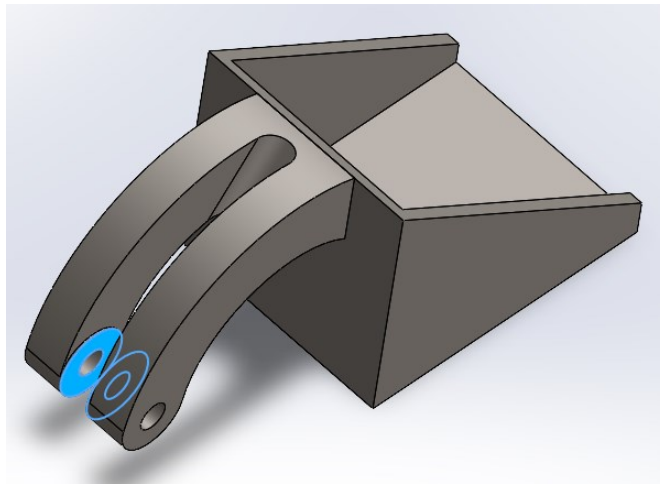
Εικόνα 79 – Shell

Στη συνέχεια αφαιρείται υλικό με την εντολή Cut-Extrude.



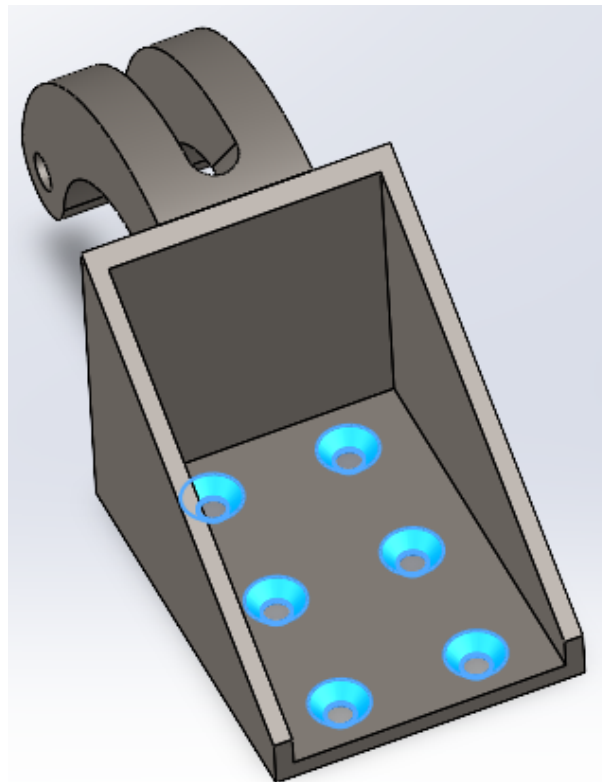
Εικόνα 80 - Cut Extrude

Έπειτα με Boss-Extrude προστίθεται υλικό στην περιοχή πρόσδεσης του εξαρτήματος.



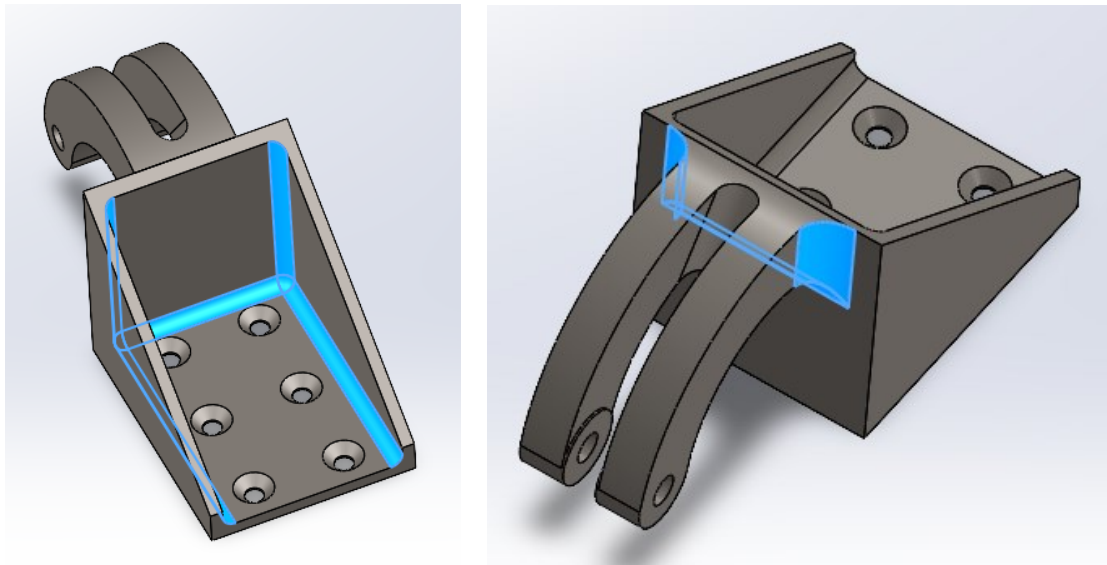
Εικόνα 81 - Boss Extrude

Δημιουργούνται 6 φρεζάτες σπές M4 για την στερέωσης της βάσης με την εντολή Hole Wizard.



Εικόνα 82 - Hole Wizard

Τέλος προστίθενται ράδια - fillets όπως και στο μοντέλο του άρθρου [40].



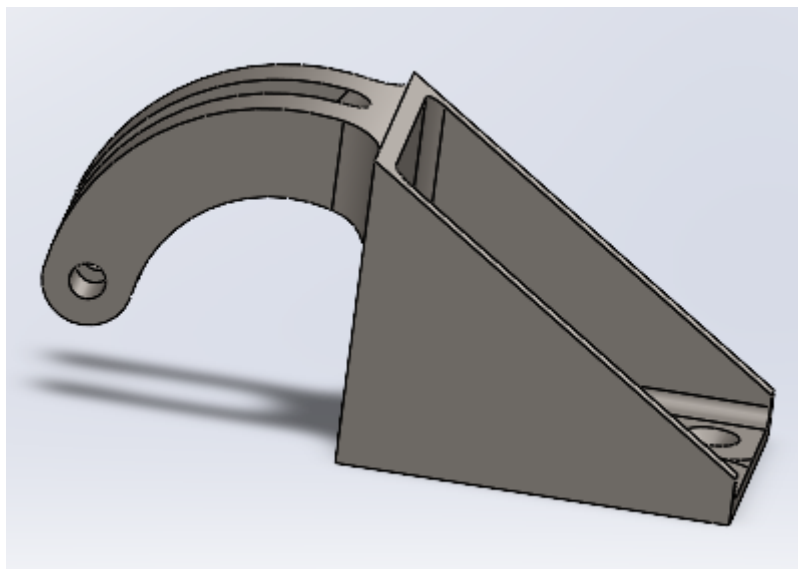
Εικόνα 83 – Fillets

3.3.3. Τοπολογική βελτιστοποίηση στο περιβάλλον του Solidworks

Αντίστοιχα με την περίπτωση της γεωμετρίας Νο.1, θα ακολουθηθεί η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης της γεωμετρίας στο περιβάλλον του Solidworks. Μέσω αυτής της διαδικασίας θα εξαχθεί η κατάλληλη πληροφορία για τις περιοχές που είναι δυνατόν να αφαιρεθεί υλικό στη συνέχεια, μέσω του λογισμικού Ansys OptiSlang, λαμβάνοντας υπόψη ως περιορισμό τη μέθοδο παραγωγής του υλικού.

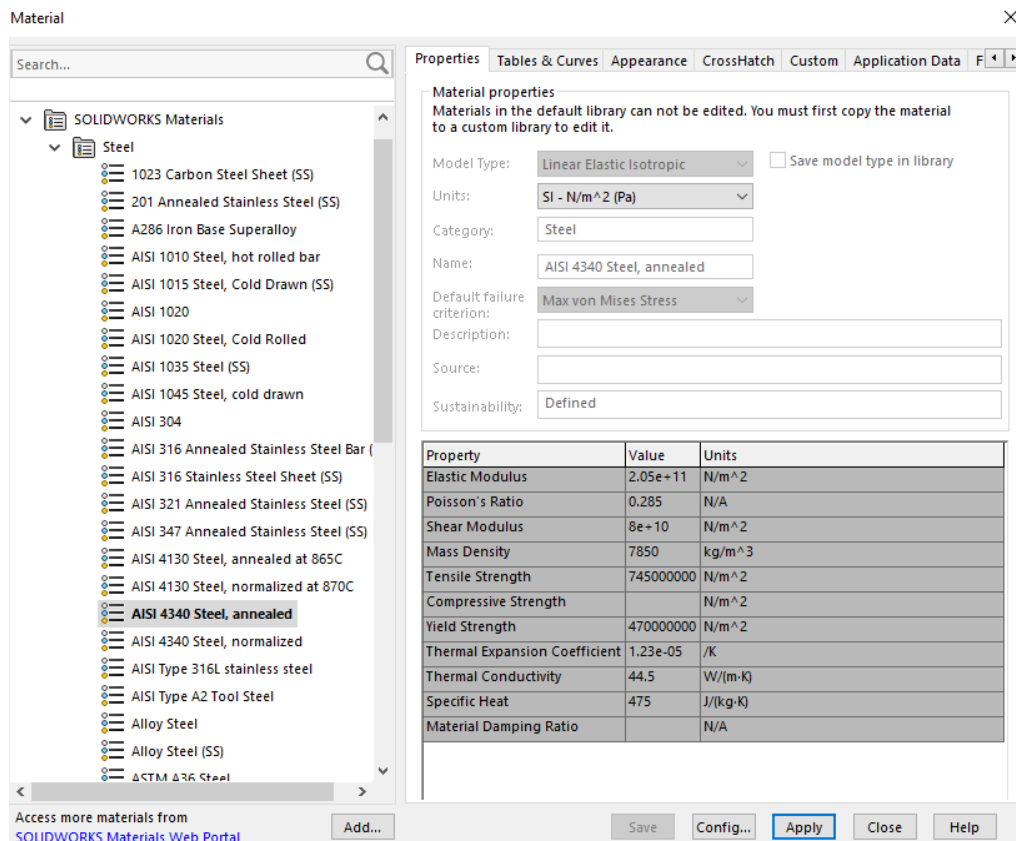
Ακολουθεί η διαδικασία της τοπολογικής μελέτης στο περιβάλλον Solidworks.

Από το μενού Topology Study εισάγεται η γεωμετρία προς μελέτη.



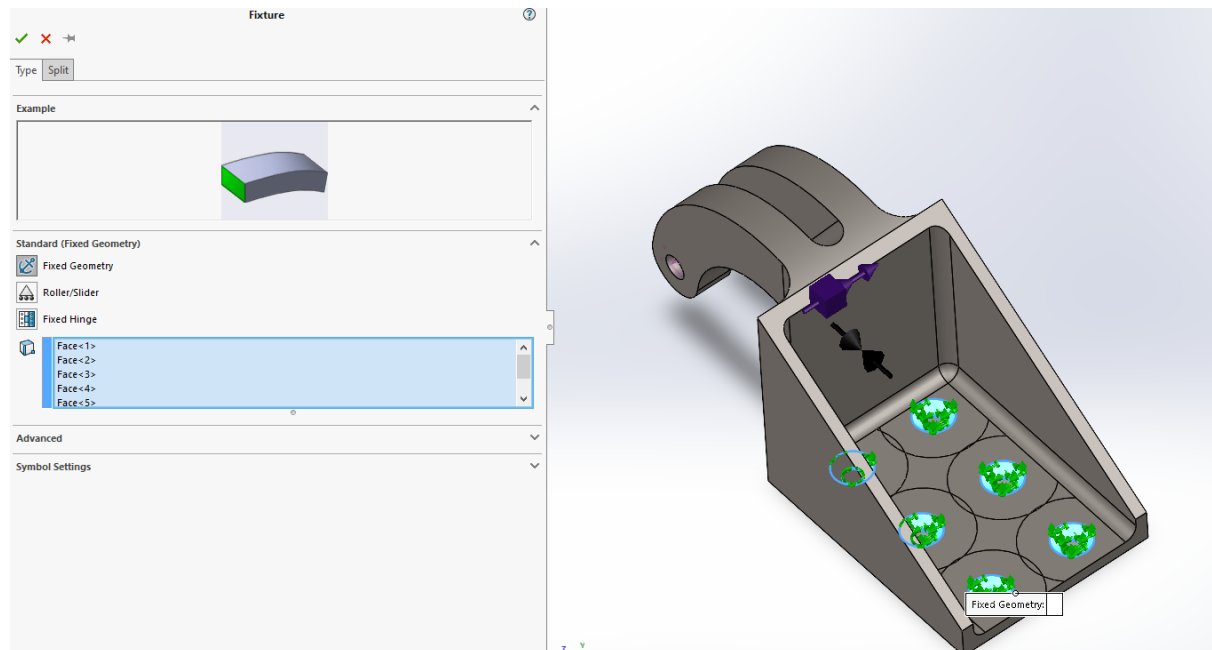
Εικόνα 84 - Solidworks Topology Study

Ως υλικό ορίζεται ο χάλυβας 4340 (AISI 4340 Steel), με τις παρακάτω μηχανικές ιδιότητες.



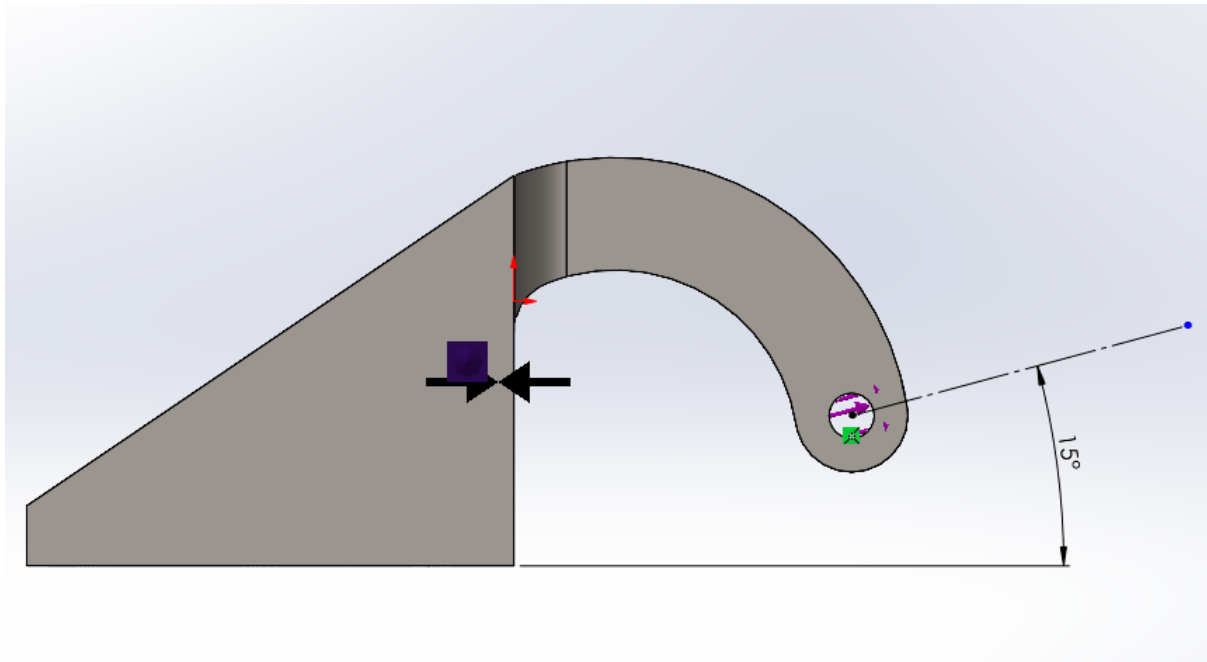
Εικόνα 85 - Μηχανικές ιδιότητες υλικού

Επιλέγεται ως στήριξη οι επιφάνειες των φρεζών στις οποίες θα στερεωθεί η βάση.



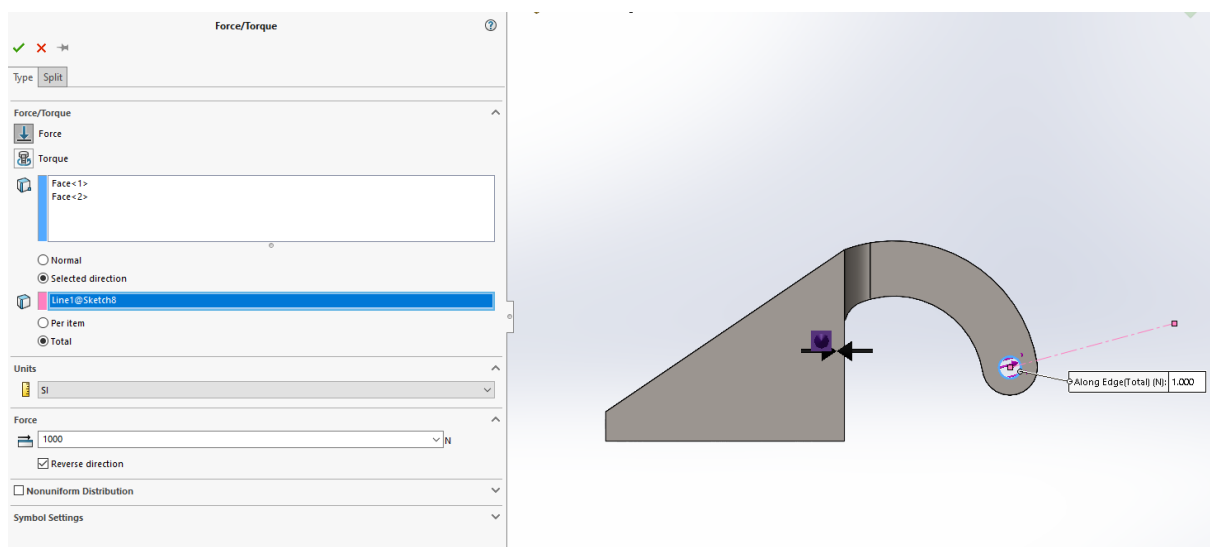
Εικόνα 86 - Στήριξη της γεωμετρίας

Για τον ορισμό της φόρτισης, δημιουργείται ένα βοηθητικό Sketch, στο οποίο σχεδιάζεται γραμμή κλίσης 15° σε σχέση με την οριζόντια επιφάνεια της γεωμετρίας.



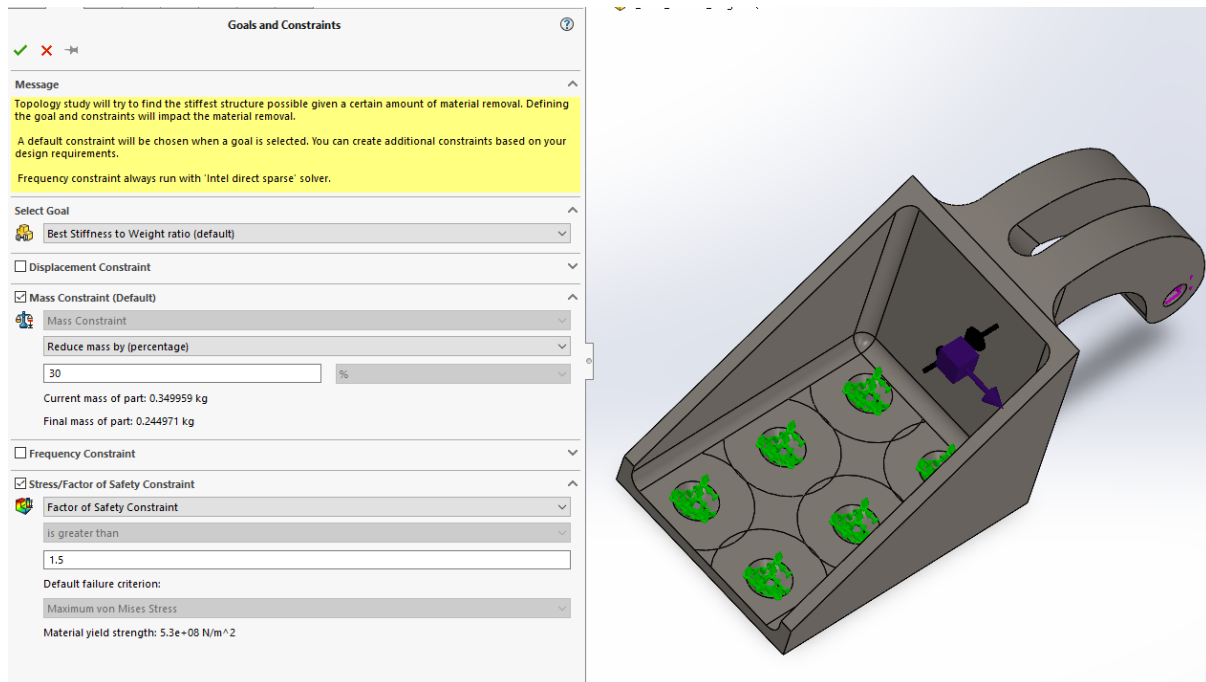
Εικόνα 87 - Γωνία επιβολής φόρτισης

Εισάγεται φόρτιση 1000N παράλληλη με την βοηθητική γραμμή που εισήχθη παραπάνω.



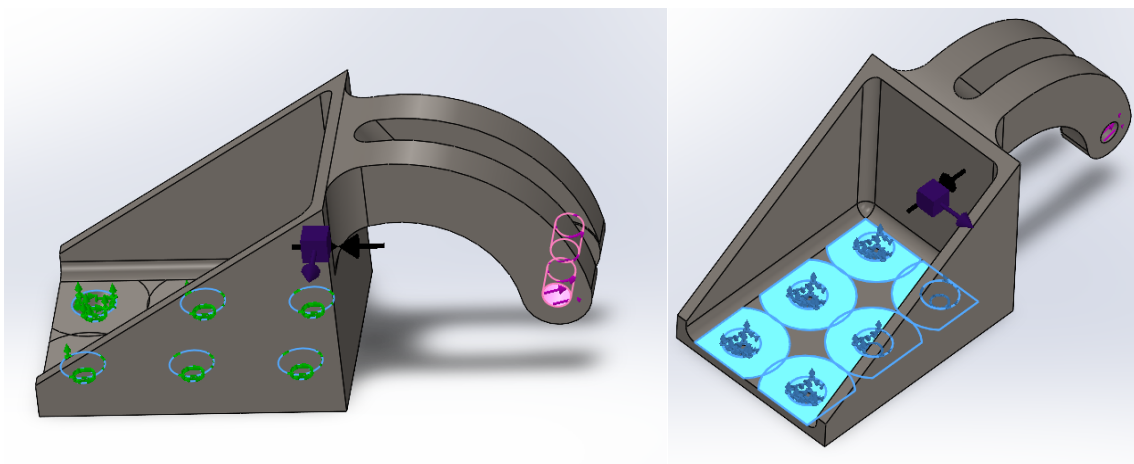
Εικόνα 88 - Επιβολή φόρτισης

Ως στόχος της τοπολογικής μελέτης ορίζεται το “Best Stiffness to Weight Ratio” και ταυτόχρονα το “Factor of Safety Constrain > 1,5”, δηλαδή η βέλτιστη δυσκαμψία σε σχέση με το βάρος και η διατήρηση του βαθμού ασφαλείας μεγαλύτερου του 1,5.



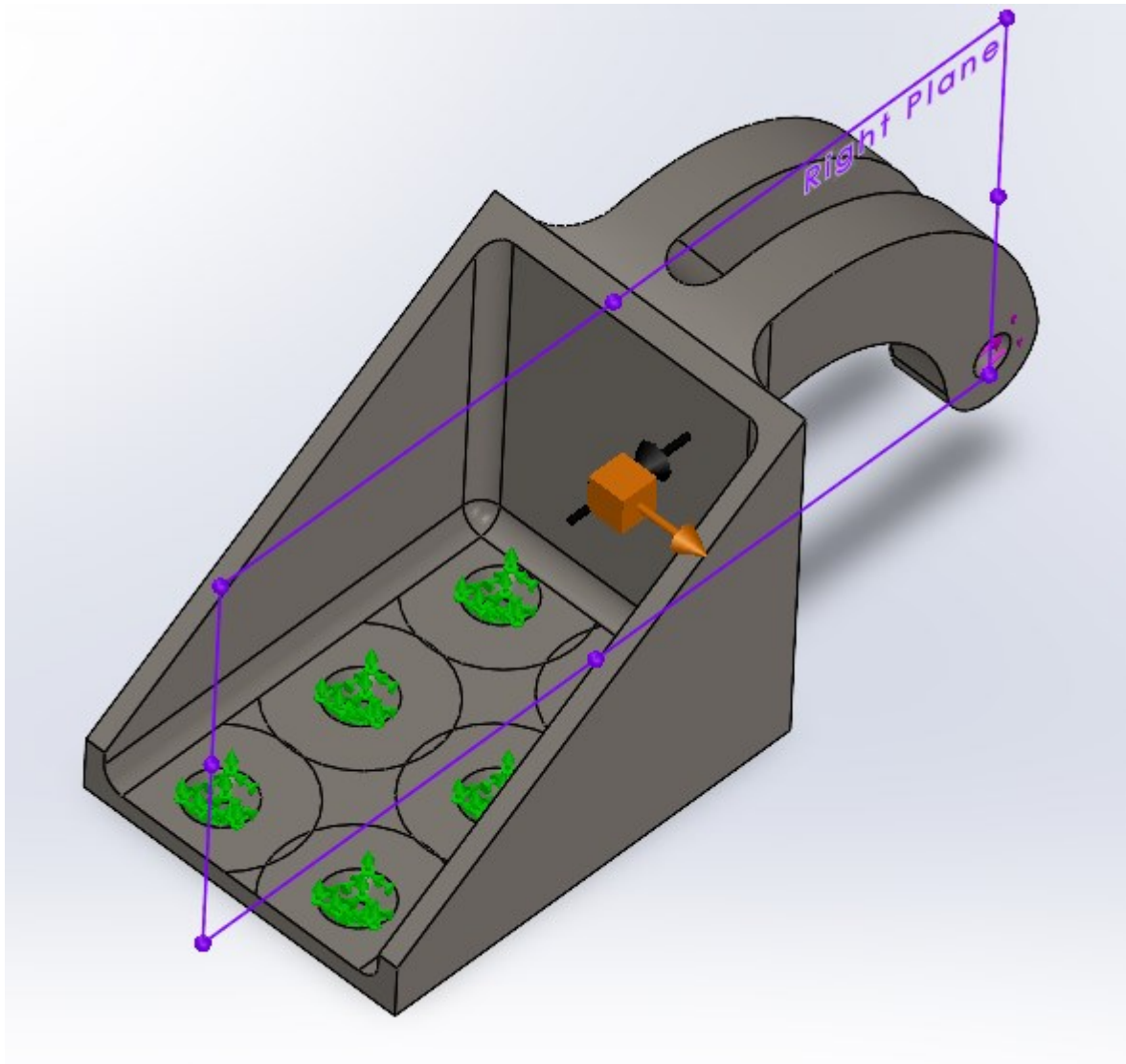
Εικόνα 89 - Στόχος της τοπολογικής βελτιστοποίησης

Από το μενού “Manufacturing Controls → Preserved Regions” εισάγονται οι επιφάνειες της γεωμετρίας, που είναι απαραίτητο να διατηρηθούν. Οι περιοχές αυτές είναι τα σημεία επιβολής φόρτισης και στήριξης.



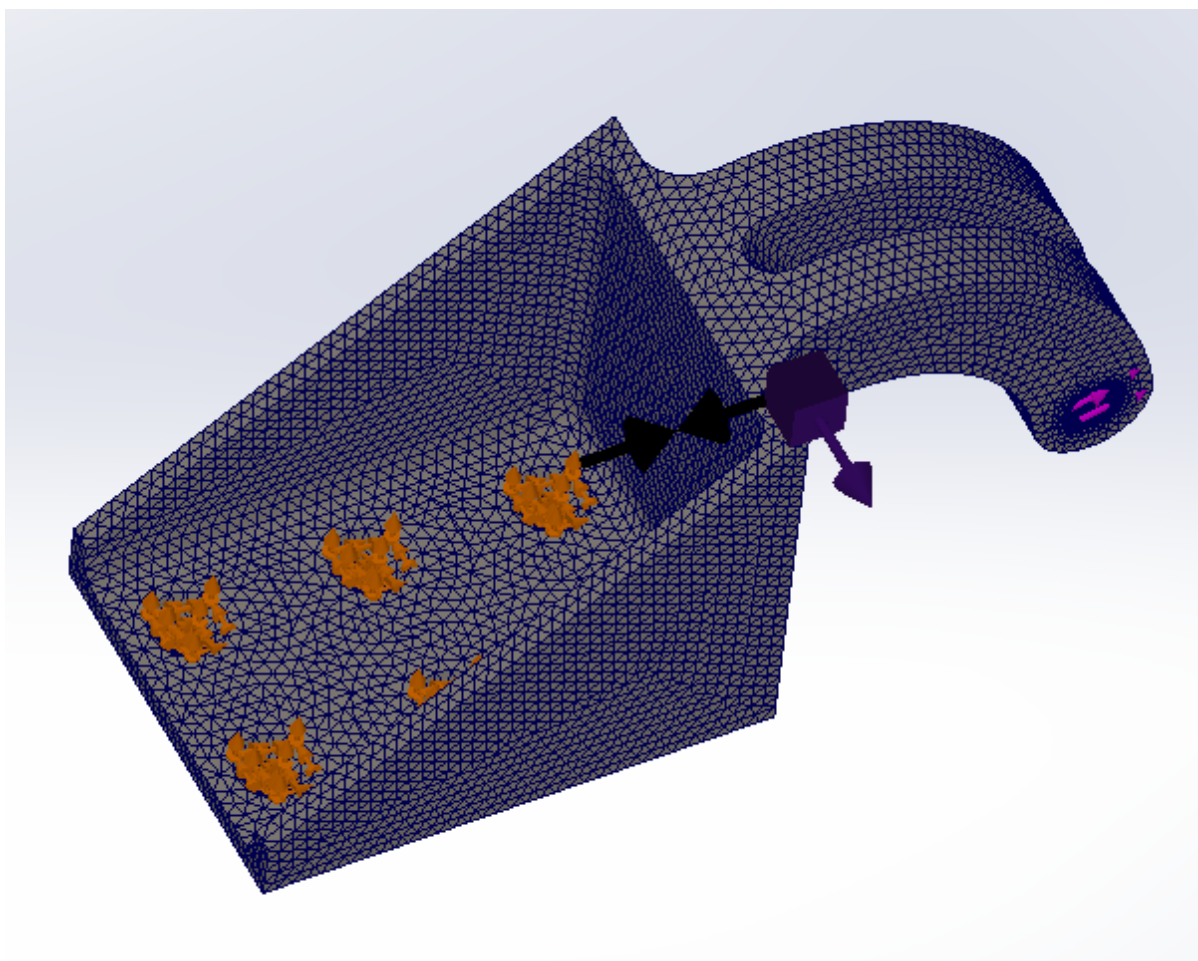
Εικόνα 90 - Preserved Regions

Επίσης εισάγεται περιορισμός σχετικά με τη συμμετρία του εξαρτήματος όπως αποτυπώνεται παρακάτω.



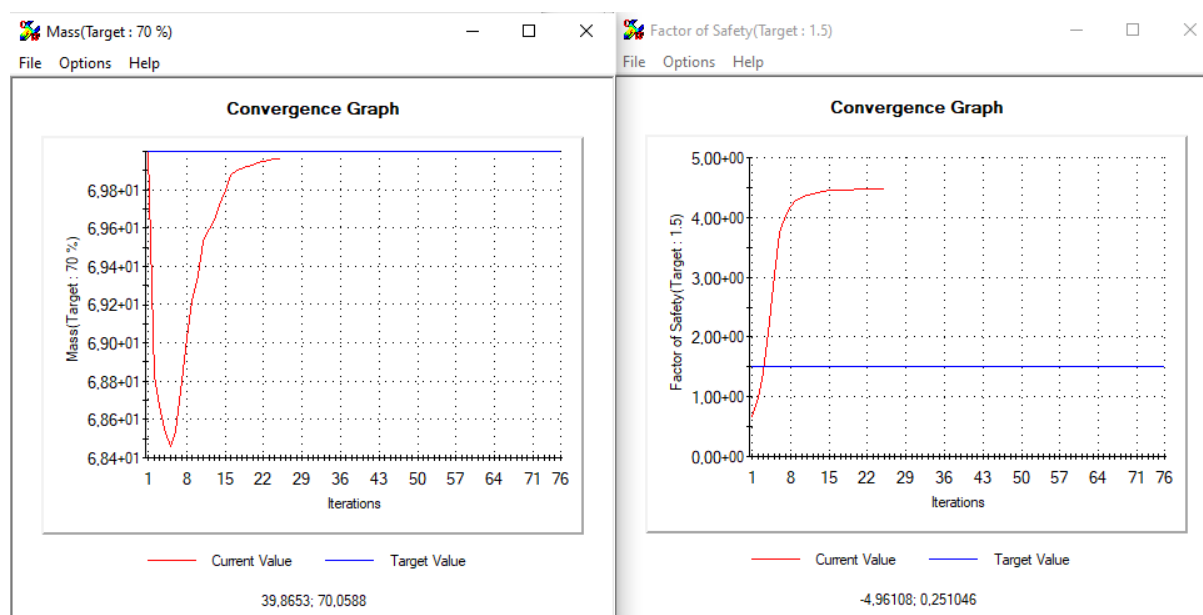
Εικόνα 91 - Symmetry Plane

Ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος για την υπολογιστική μελέτη.



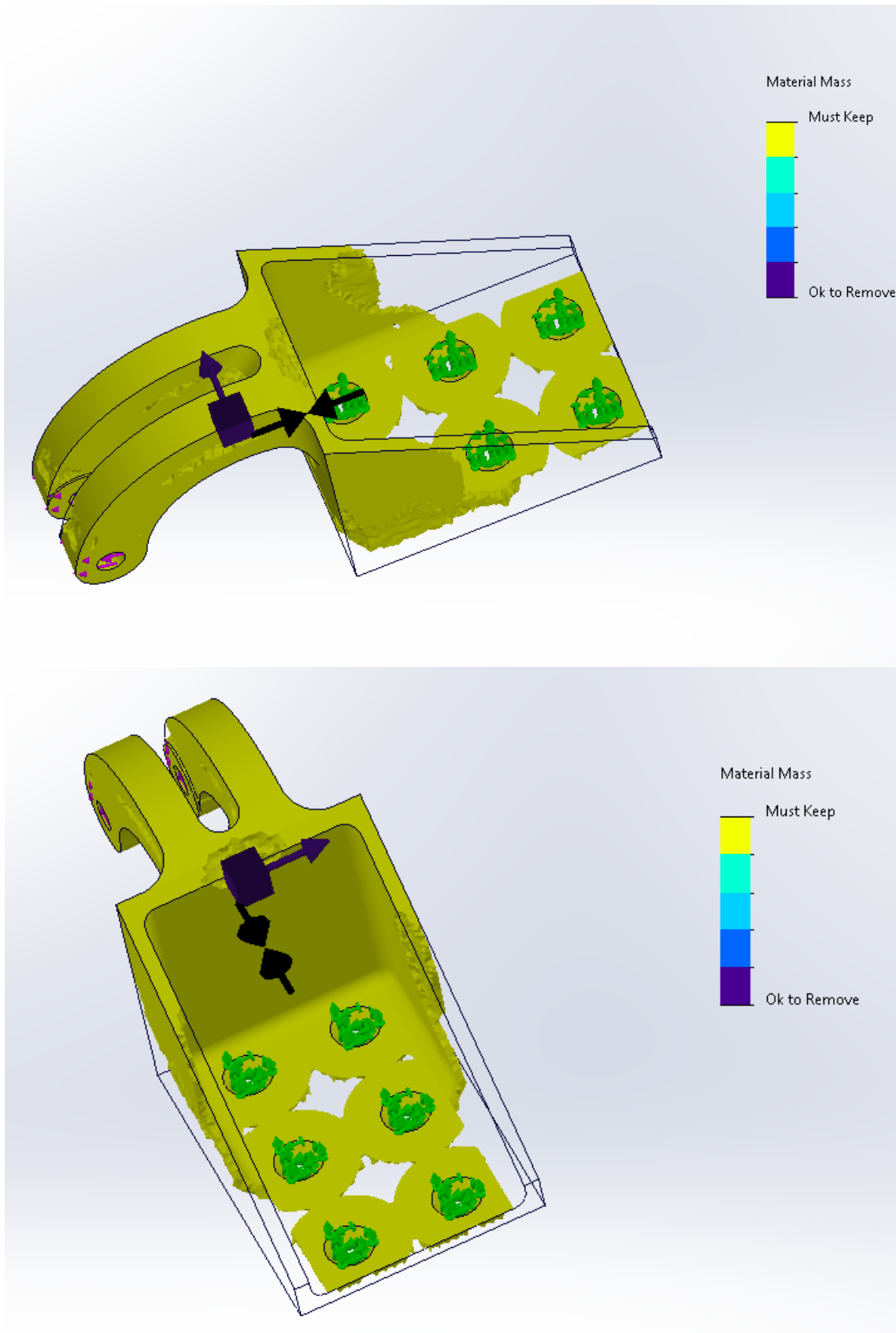
Εικόνα 92 - Υπολογιστικό πλέγμα γεωμετρίας

Η επαναληπτική διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης σύγκλινε μετά από 30 επαναλήψεις.



Εικόνα 93 - Σύγκλιση τοπολογικής βελτιστοποίησης

Το αποτέλεσμα της τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω του περιβάλλοντος του Solidworks είναι ως εξής:



Εικόνα 94 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία

Αρχική μάζα (kg)	Τελική μάζα (kg)
0,34996	0,22337

Πίνακας 5 - Σύγκριση αρχικής και τελικής μάζας γεωμετρίας

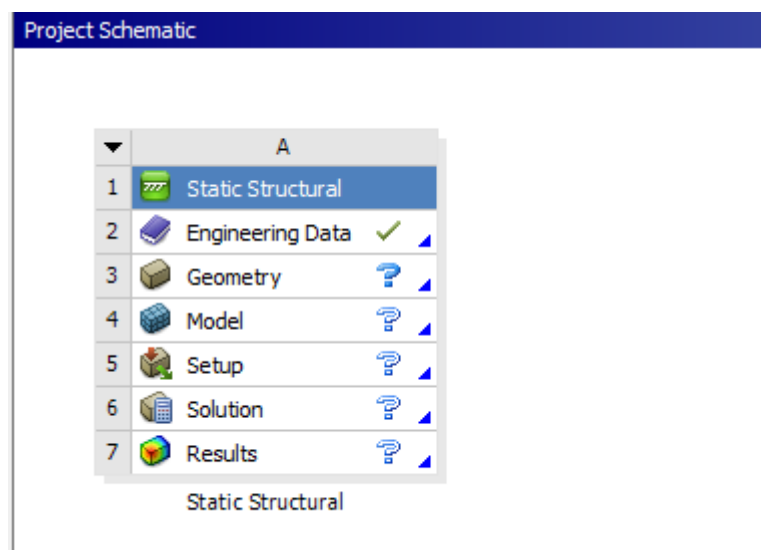
Το μοντέλο που εξήχθη από το 3D CAD Solidworks δεν είναι δυνατόν να παραχθεί με τη μέθοδο παραγωγής που έχει επιλεγθεί (CNC Milling), λόγω πολυπλοκότητας. Παρόλα αυτά είναι πολύ χρήσιμη η πληροφορία που παρέχει, δηλαδή τις περιοχές της αρχικής γεωμετρίας, που δύναται να αφαιρεθούν χωρίς να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η αξιοπιστία της γεωμετρίας με στόχο την ελαχιστοποίηση της μάζας της.

3.3.4. Εισαγωγή αρχικής γεωμετρίας στο Ansys

Έχοντας λοιπόν την πληροφορία σχετικά με τις περιοχές που δύναται να αφαιρεθούν από την αρχική γεωμετρία, εισάγεται η γεωμετρία στο υπολογιστικό πακέτο Ansys.

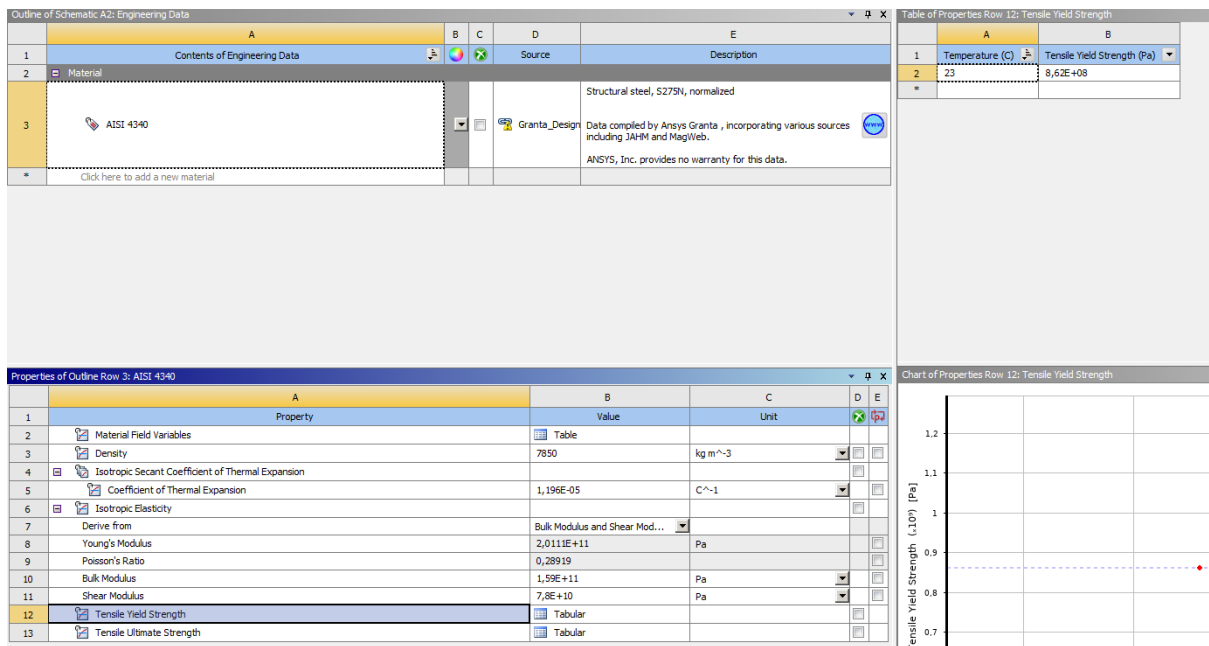
Θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση για την αρχική γεωμετρία (πριν τη αφαίρεση υλικού), ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση αρχικής και τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας.

Η υπολογιστική μελέτη πραγματοποιείται μέσω του συστήματος ανάλυσης “Static Structural”.



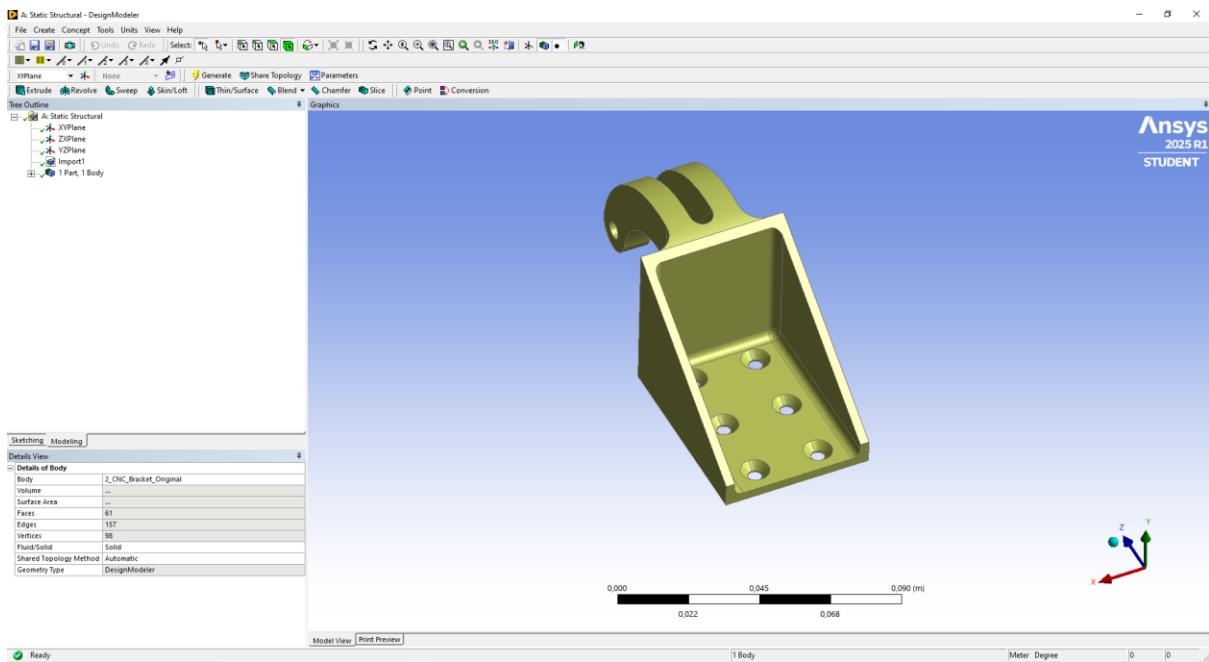
Εικόνα 95 - Static Structural

Ως υλικό ορίζεται το “Steel AISI 4340”, το οποίο αποτελεί υλικό που χρησιμοποιείται σε κατεργασίες με CNC φρέζες και χαρακτηρίζεται από υψηλή αντοχή, ιδανική για αεροπορικές κατασκευές.



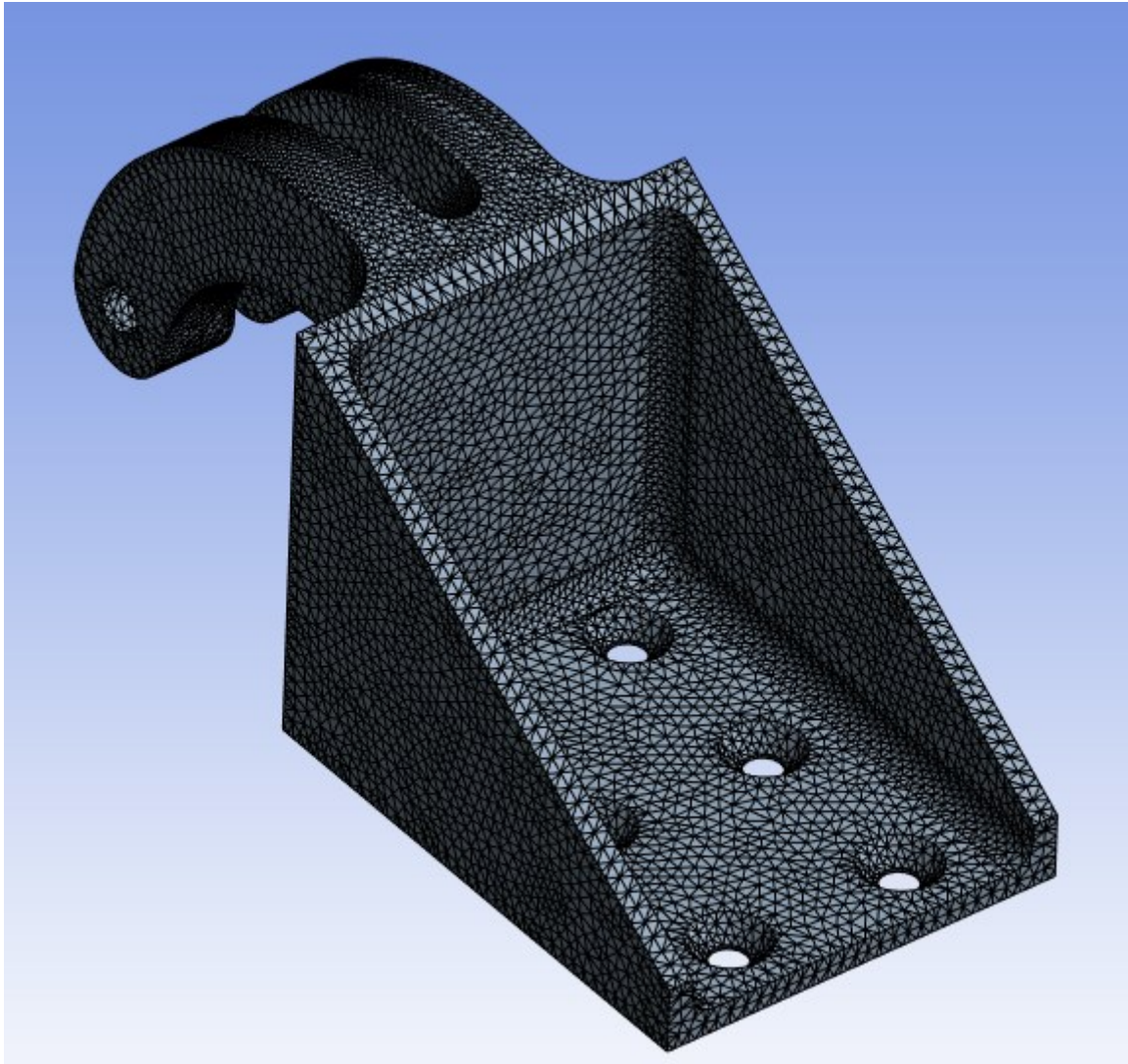
Εικόνα 96 - Engineering Data

Μέσω του “Geometry” εισάγεται η αρχική γεωμετρία υπό μορφή αρχείου step που δημιουργήθηκε στο Solidworks.



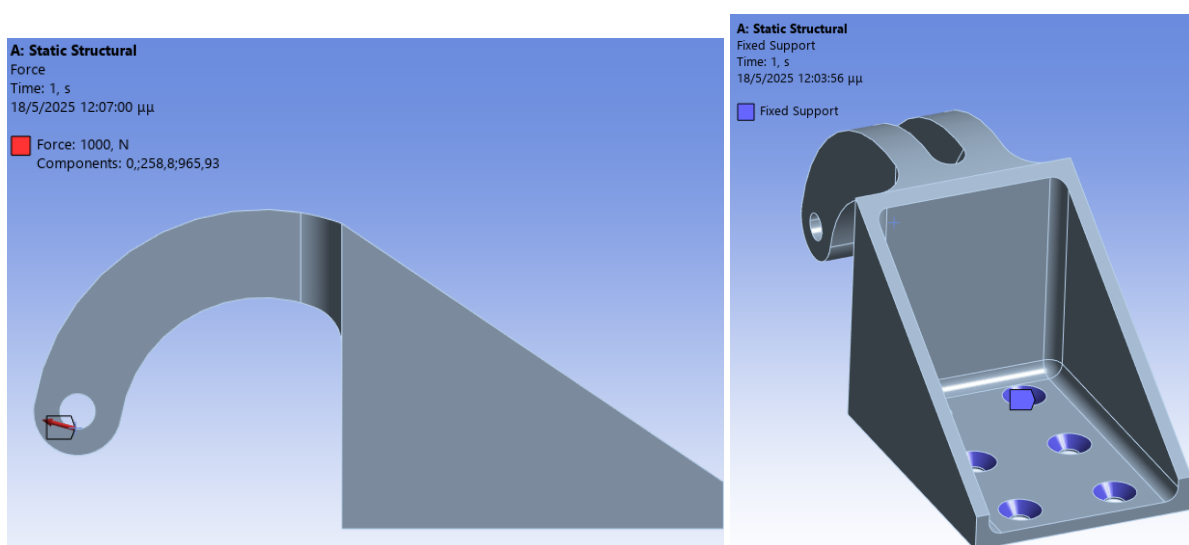
Εικόνα 97 - Εισαγωγή γεωμετρίας

Δημιουργείται υπολογιστικό πλέγμα από στοιχεία μεγέθους 0,9mm.



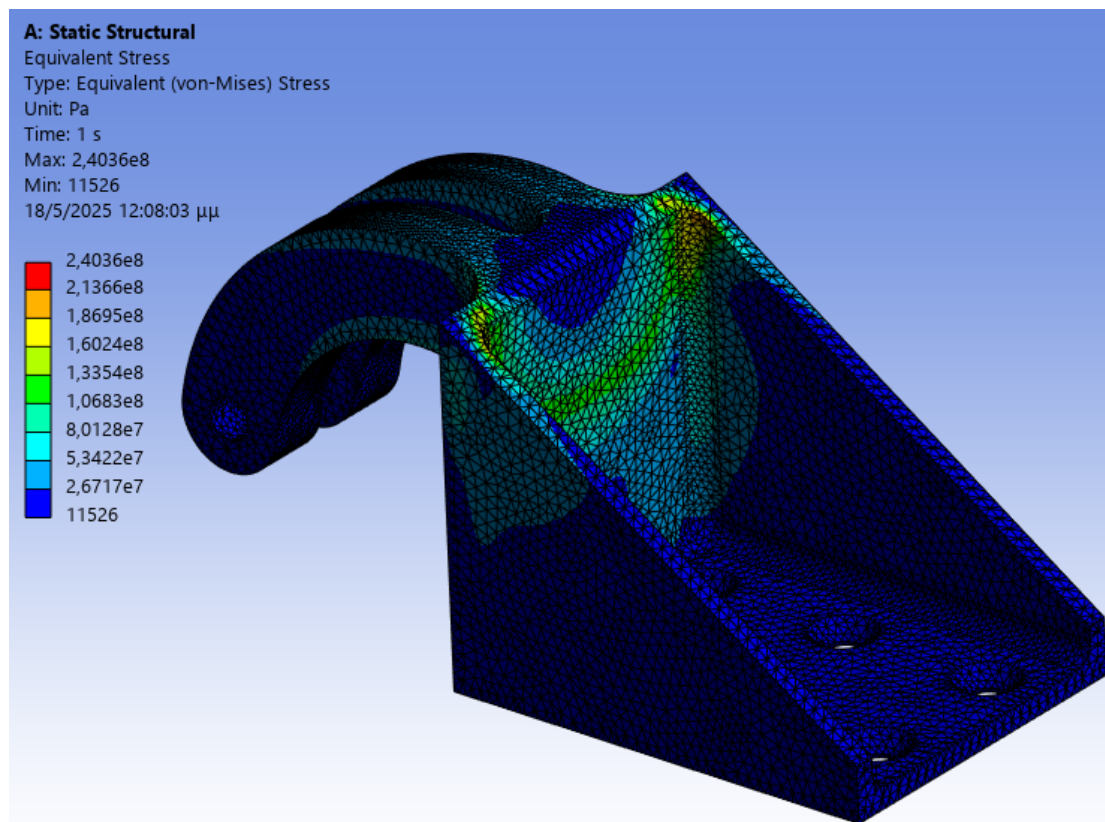
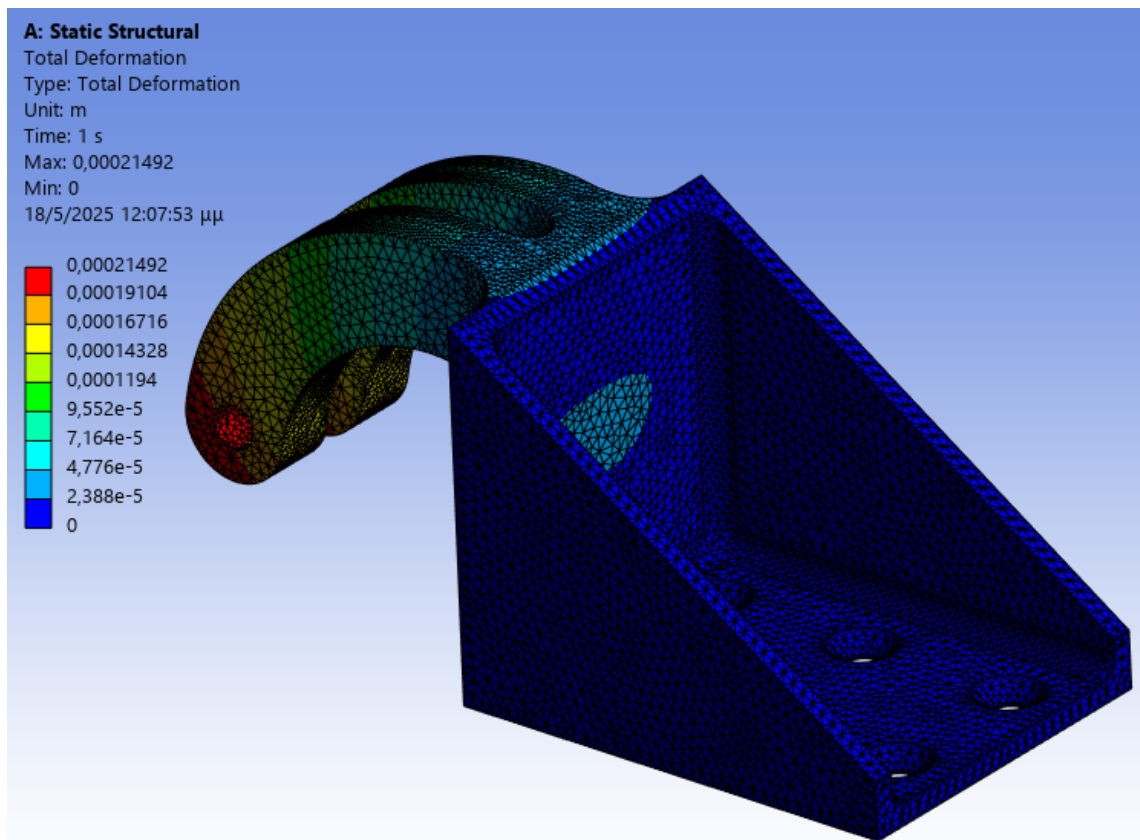
Εικόνα 98 - Υπολογιστικό πλέγμα

Στη συνέχεια επιβάλλονται οι συνθήκες στήριξης και φόρτισης, με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε στο περιβάλλον του Solidworks.

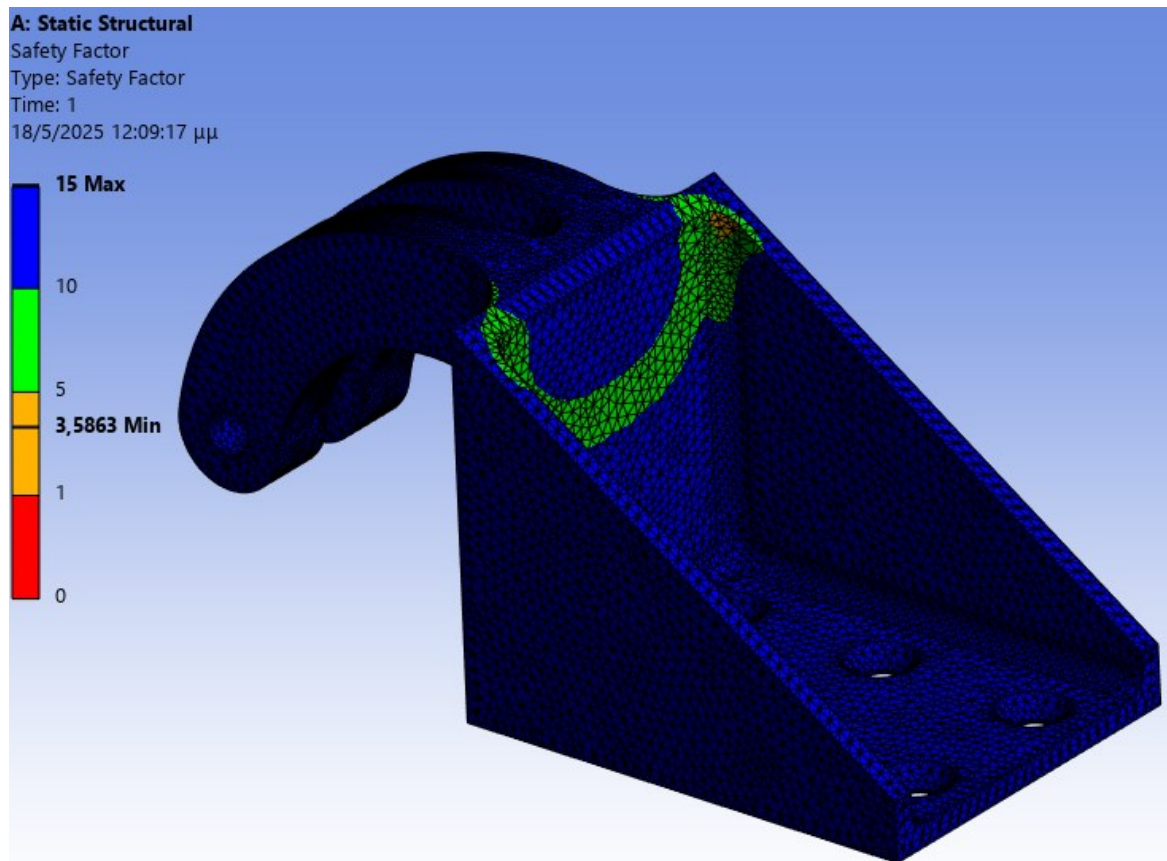


Εικόνα 99 - Συνθήκες στήριξης και φόρτισης

Έπειτα από την υπολογιστική προσομοίωση του μοντέλου λαμβάνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα.

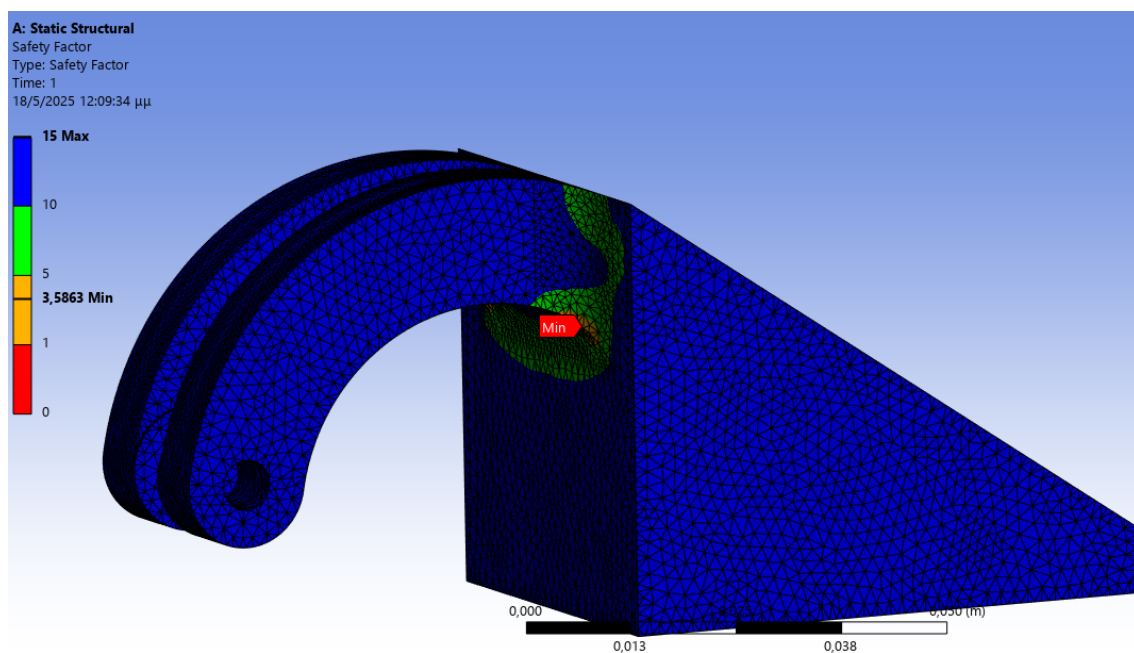


Εικόνα 100 - Deformation and Stress Results



Εικόνα 101 - Safety Factor Results

Παρατηρείται ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 3,5863 και ότι η περιοχή με τη μέγιστη τάση είναι στο ράδιο ένωσης τμημάτων της γεωμετρίας. Σε μεγάλο μέρος της γεωμετρίας ο συντελεστής ασφαλείας είναι 15. Άρα πράγματι υπάρχει δυνατότητα αφαίρεσης τμήματος της μάζας της αρχικής γεωμετρίας.



Εικόνα 102 - Area of Minimum Safety Factor

Παρακάτω είναι συνοπτικά τα αποτελέσματα για την αρχική γεωμετρία:

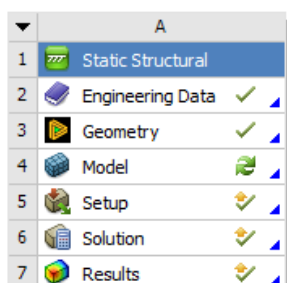
Μάζα	0,34996 kg
Maximum Equivalent Stress (Von-Mises)	240,36 MPa
Safety Factor	3,5863

Πίνακας 6 - Στοιχεία αρχικής γεωμετρίας

3.3.5. Διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang

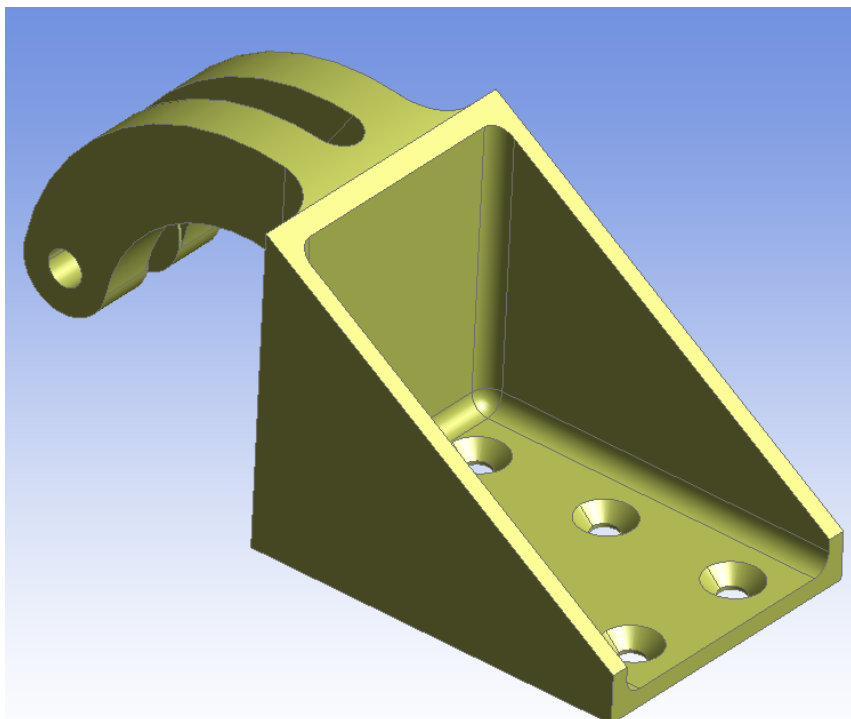
Η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης της γεωμετρίας θα πραγματοποιηθεί μέσω του πακέτου Ansys OptiSlang, με αντίστοιχη διαδικασία όπως και στην περίπτωση της γεωμετρίας Νο. 1.

Δημιουργείται ξεχωριστό project στο πρόγραμμα Ansys και εισάγεται το module “Static Structural”.



Εικόνα 103 - Νέο project

Εισάγεται η αρχική γεωμετρία στο Ansys.

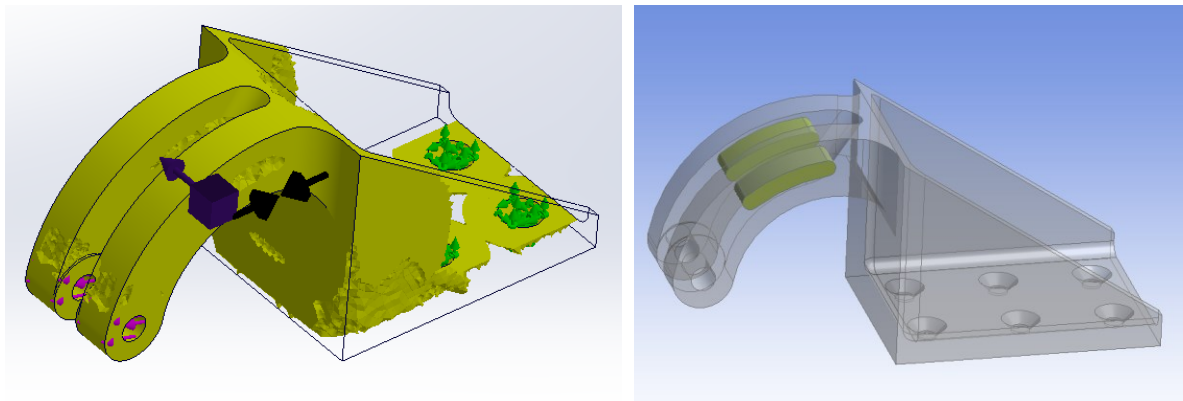


Εικόνα 104 - Εισαγωγή γεωμετρίας στο Ansys

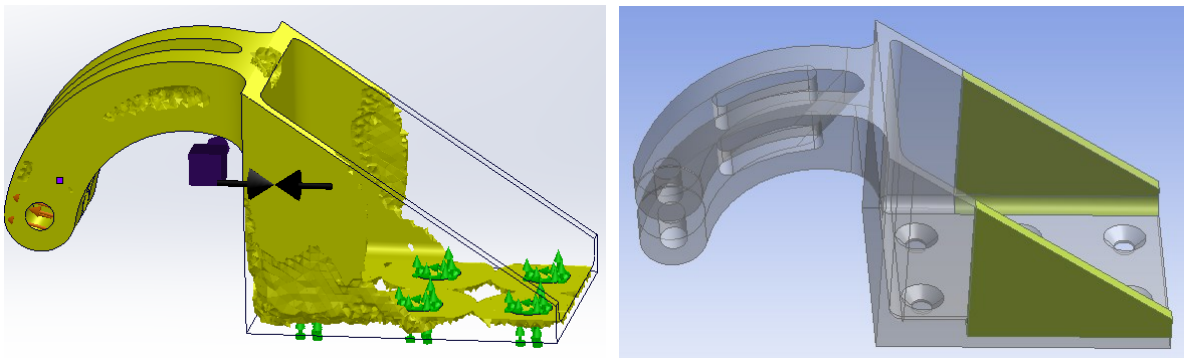
Στη συνέχεια δημιουργούνται sketches πάνω στις επιφάνειες της γεωμετρίας, ούτως ώστε να αφαιρεθεί υλικό από αυτήν, στις περιοχές που ενδείκνυται αφαίρεση μάζας, σύμφωνα με τη διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του Solidworks.

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού των sketches στις επιφάνειες της γεωμετρίας που πρόκειται να αφαιρεθούν, λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός του τρόπο παραγωγής της γεωμετρίας, δηλαδή στην περίπτωση αυτής της γεωμετρίας η κατεργασία μέσω CNC φρέζας (CNC Milling).

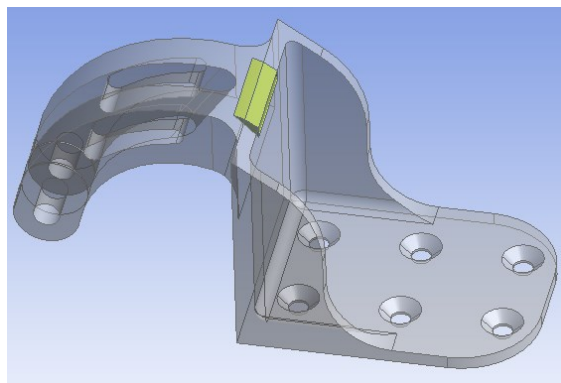
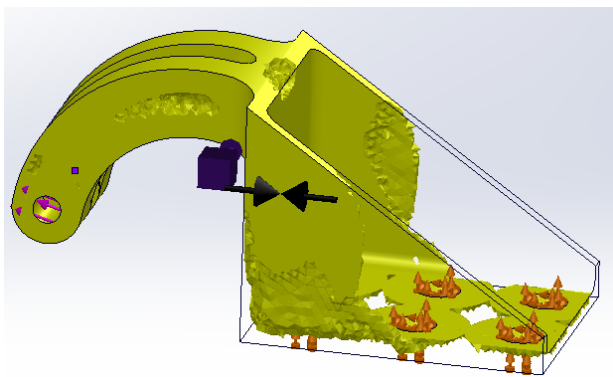
Ακολουθεί η διαδικασία του σχεδιασμού των σημείων αφαίρεσης υλικού από την αρχική γεωμετρία:



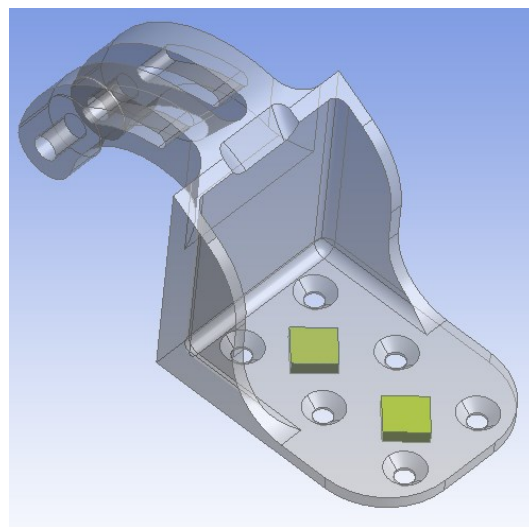
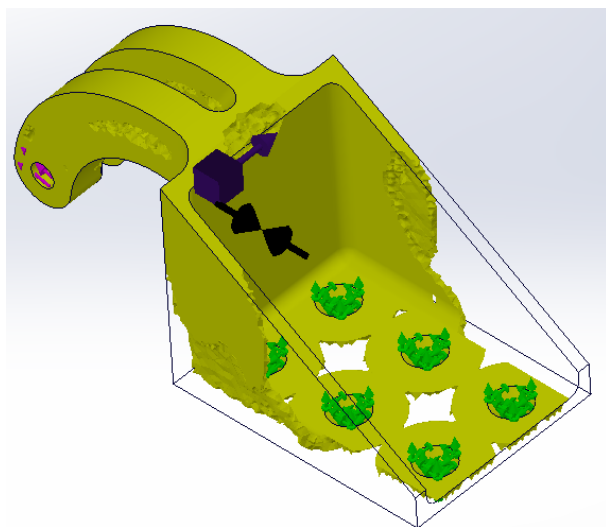
Εικόνα 105 - Περιοχή 1: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys



Εικόνα 106 - Περιοχή 2: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys

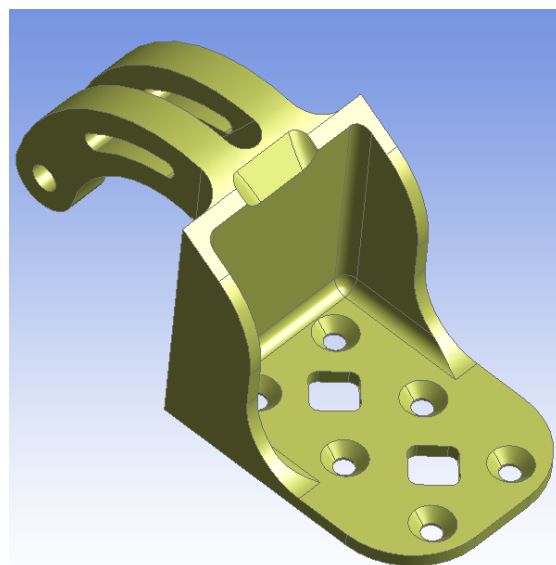
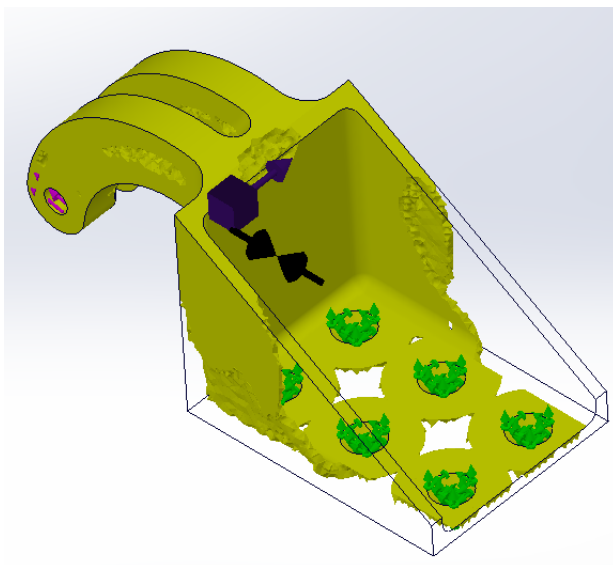


Εικόνα 107 - Περιοχή 3: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys



Εικόνα 108 - Περιοχή 4: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys

Η γεωμετρία αποκτά την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 109 - Γεωμετρία, Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys

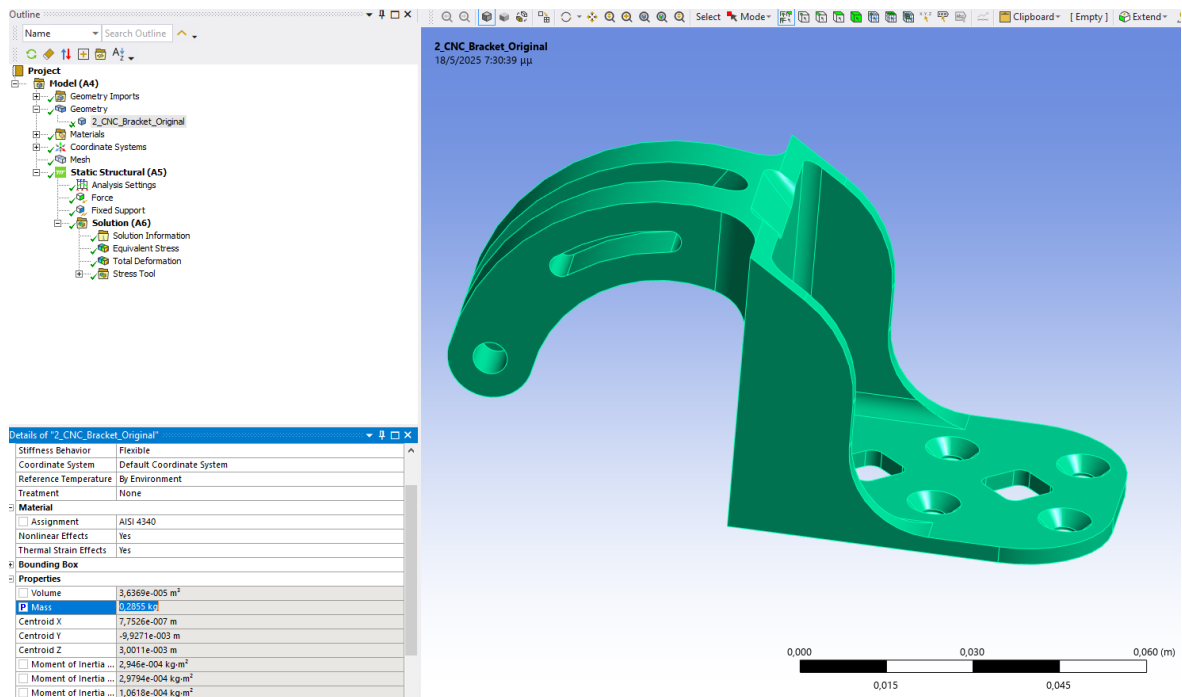
Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι οι διαστάσεις των sketches, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η αφαίρεση υλικού από τη γεωμετρία στο Ansys, είναι ορισμένες παραμετρικά. Με αυτόν τον τρόπο θα πραγματοποιηθεί επαναληπτική διαδικασία εντός του περιβάλλοντος του Ansys, ώστε να βρεθούν οι βέλτιστοι παράμετροι για τις περιοχές αφαίρεσης υλικού.

Parameter Editor			
	Name	Value	Type
✓	Oval_Oph_Mhkos	0,02 m	Length
✓	Oval_Oph_Radius	0,002 m	Length
✓	Base_Cut_Distance	0,02 m	Length
✓	Anw_Radio	0,0225 m	Length
✓	Radio_Vashs	0,0175 m	Length
✓	Katw_Radio	0,015 m	Length
✓	Chamfer_Length	0,01 m	Length
✓	Base_Cut_Length	0,01 m	Length

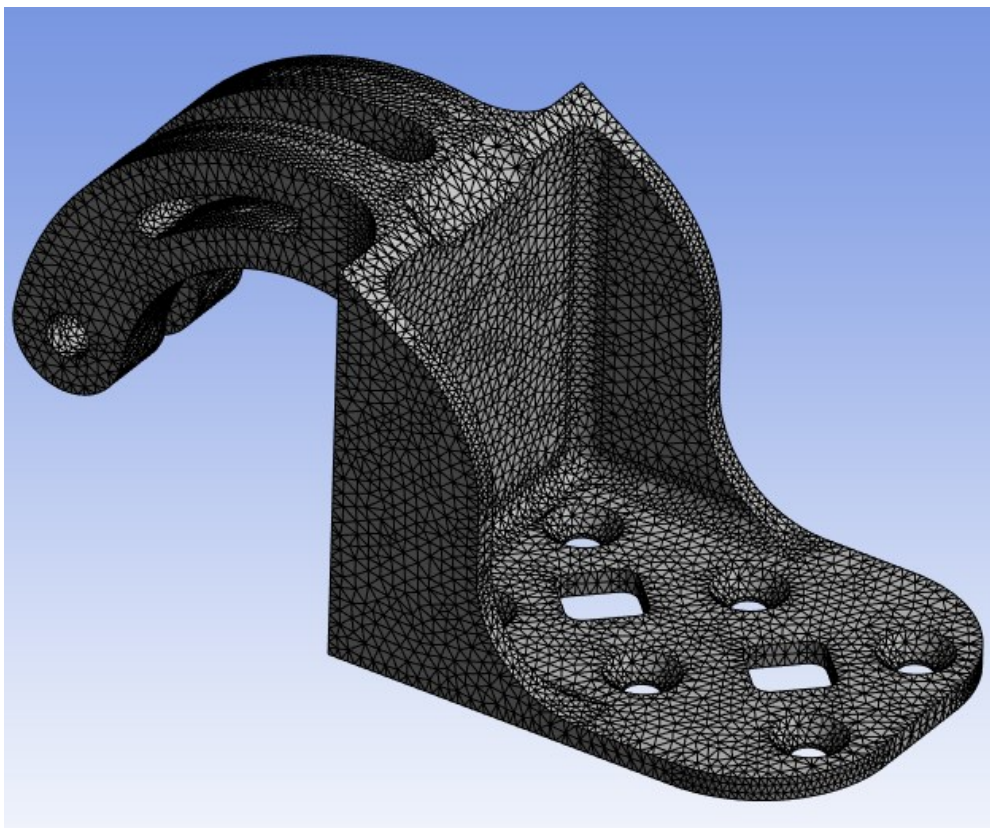
Εικόνα 110 - Παράμετροι για περιοχές αφαίρεσης υλικού

Στη συνέχεια μέσω του μενού “Model” ορίζεται το υπολογιστικό πλέγμα και οι συνθήκες στήριξης και φόρτισης, με την ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υπολογιστική μελέτη της αρχικής γεωμετρίας στο Ansys.

Επιπλέον, ορίζεται η μάζα της γεωμετρίας ως παράμετρος εξόδου, η οποία θα αξιοποιηθεί ως κριτήριο κατά την επαναληπτική διαδικασία της παραμετρικής βελτιστοποίησης.

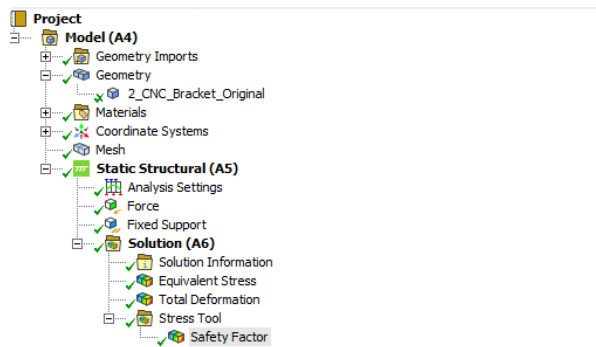


Εικόνα 111 - Ορισμός μάζας γεωμετρίας ως παράμετρο



Εικόνα 112 - Διακριτοποίηση γεωμετρίας

Ως έξοδος της υπολογιστικής προσομοίωσης του μοντέλου ορίζεται και ο Συντελεστής Ασφαλείας, μέγεθος το οποίο θα αξιοποιηθεί στην επαναληπτική διαδικασία.

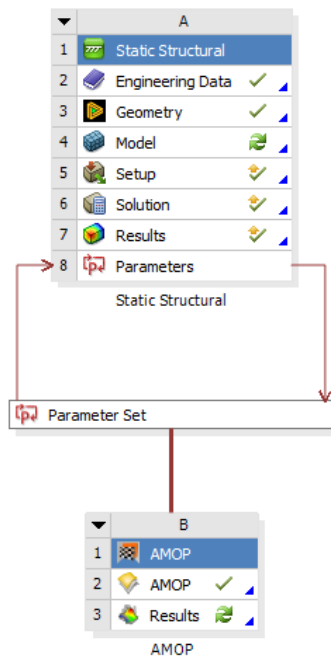


Details of "Safety Factor"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
Definition	
Type	Safety Factor
By	Time
<input type="checkbox"/> Display Time	Last
Separate Data by Entity	No
Calculate Time History	Yes
Identifier	
Suppressed	No
Integration Point Results	
Display Option	Averaged
Average Across Bodies	No
Results	
P Minimum	3,5473
Minimum Occurs On	2_CNC_Bracket_Original
Information	

Εικόνα 113 - Model Tree

Η διαδικασία της προετοιμασίας για την επαναληπτική διαδικασία παραμετρικής βελτιστοποίησης εντός του Ansys έχει ολοκληρωθεί. Ακολουθεί η διαδικασία setup για το πακέτο Ansys OptiSlang, μέσω του οποίου θα εξαχθεί η βέλτιστη γεωμετρία.

Εισάγεται το Module "Sensitivity" του Ansys OptiSlang στο project και συνδέεται με τις παραμέτρους εισόδου και εξόδου που έχουν οριστεί κατά την παραπάνω διαδικασία.



Εικόνα 114 - Ansys OptiSlang Sensitivity Module

Από το μενού “Parameter” εισάγεται το εύρος των παραμέτρων σχεδίασης.

Sensitivity Wizard

Parametrize Inputs

Parametrize the inputs

	Name	Parameter type	Reference value	Constant	Resolution	Range		Range plot
1	Oval_Oph_Mhkos_P1	Optimization	0.02	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.015	0.025	
2	Base_Cut_Length_P9	Optimization	0.01	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.01	0.0125	
3	Oval_Oph_Radius_P2	Optimization	0.002	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.0015	0.0025	
4	Base_Cut_Distance_P3	Optimization	0.02	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.02	0.025	
5	Anw_Radio_P4	Optimization	0.0225	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.02	0.025	
6	Radio_Vashs_P5	Optimization	0.0175	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.015	0.02	
7	Katw_Radio_P6	Optimization	0.015	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.01	0.02	
8	Chamfer_Length_P7	Optimization	0.01	<input type="checkbox"/>	Continuous	0.0075	0.01	

Εικόνα 115 - Εύρος παραμέτρων σχεδίασης

Ως στόχος (Objective) της επαναληπτικής διαδικασίας ορίζεται η ελαχιστοποίηση της μάζας. Επιπλέον ορίζεται ως περιορισμός (Constraint) ο συντελεστής ασφαλείας να είναι μεγαλύτερος του 1,5.

Sensitivity Wizard

Criteria
Specify the algorithm criteria

Parameter

Name	Value
Anw_Radio_P4	0.0225
Base_Cut_Distance_P3	0.02
Base_Cut_Length_P9	0.01
Chamfer_Length_P7	0.01
Katw_Radio_P6	0.015
Oval_Oph_Mhkoss_P1	0.02
Oval_Oph_Radius_P2	0.002
Radio_Vashs_P5	0.0175


Responses


Name	Value
_2_CNC_Bracket_Original_Mass_P10	0.2855
Safety_Factor_Minimum_P11	3.54726


Criteria


Name	Type	Expression	Criterion	Limit	Evaluated expression
...	Objective	_2_CNC_Bracket_Original_Mass_P10	MIN		0.2855
...	Constraint	Safety_Factor_Minimum_P11	\geq	1.5	$3.54726 \geq 1.5$
new					

☐ Create new

 Variable

 Objective

 Constraint

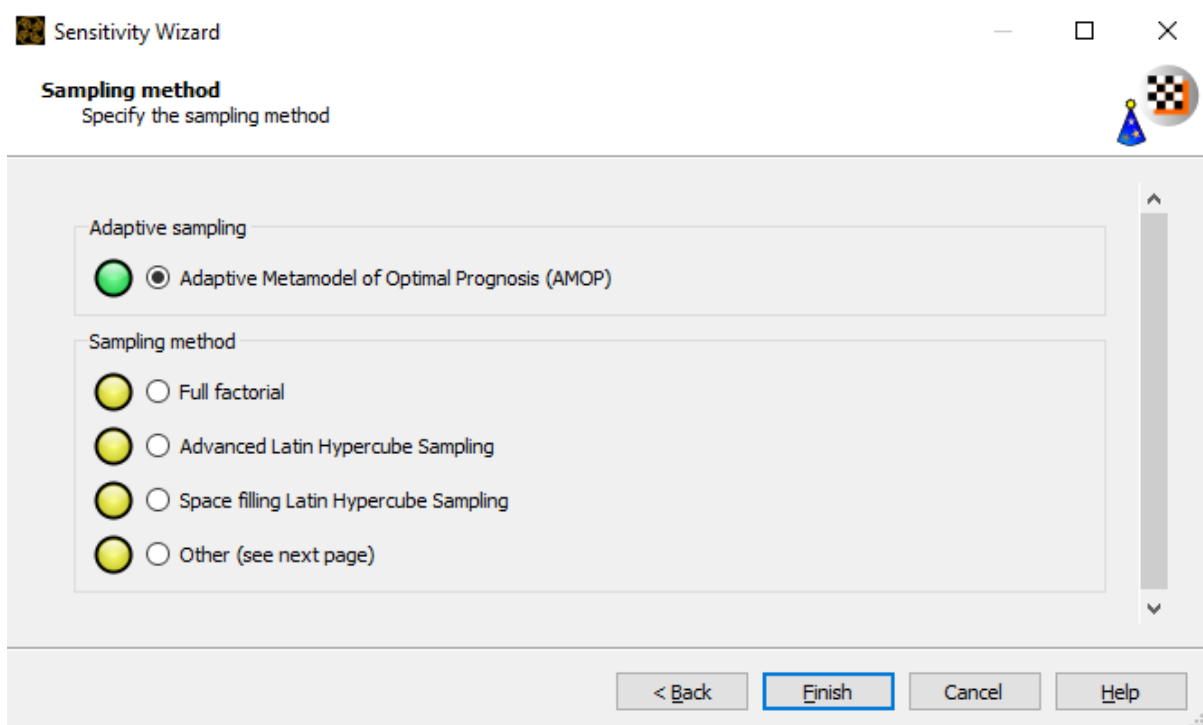
 Limit state

☐ Instant visualization Import criteria from system

< Back Next > Cancel Help

Εικόνα 116 - Στόχος και Κριτήριο της επαναληπτικής διαδικασίας

Όπως και στη περίπτωση της μελέτης της γεωμετρίας No.1., επιλέγεται η χρήση Adaptive Sampling και συγκεκριμένα του Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis (AMOP), επιλογή η οποία θα επιτρέψει τη χρήση μεταμοντέλου στην προσομοίωση του μοντέλου.



Εικόνα 117 - Επιλογή *Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis*

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της προσομοίωσης του πλήρους μοντέλου για τα έως 300 διαφορετικά μοντέλα με αντίστοιχα σεντ γεωμετρικών παραμέτρων, που αποτελούν τα Design of Experiments. Μέσω αυτών των επαναλήψεων συλλέγεται η κατάλληλη πληροφορία που θα οδηγήσει στην ακριβέστερη κατασκευή του μεταμοντέλου και στην μελέτη χιλιάδων διαφορετικών σεντ γεωμετρικών παραμέτρων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και με πολύ μικρότερη υπολογιστική ισχύ σε σχέση με τις αντίστοιχες ανάγκες που θα υπήρχαν σε περίπτωση επίλυσης του πλήρους μοντέλου για τον ίδιο αριθμό σεντ γεωμετρικών παραμέτρων.

3.3.6. Αποτελέσματα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang

Με την ολοκλήρωση της υπολογιστικής προσομοίωσης των έως 300 Design of Experiments λαμβάνουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Στην 3^η στήλη περιλαμβάνεται η μάζα του κάθε μοντέλου και στην 4^η στήλη ο συντελεστής ασφαλείας.

Designable						
	Id	Feasible	obj_2_CNC_Bracket_Original_Mass_P10	constr_Safety_Factor_Minimum_P11	Anw_Radio_P4	Base_Cut_Distance_P3
1	0.1	true	0.290941	$3.54008 \geq 1.5$	0.023825	0.024675
2	0.2	true	0.291958	$3.52997 \geq 1.5$	0.023175	0.024925
3	0.3	true	0.290619	$3.53089 \geq 1.5$	0.024275	0.020325
4	0.4	true	0.283513	$3.52683 \geq 1.5$	0.023625	0.020375
5	0.5	true	0.288723	$3.54305 \geq 1.5$	0.020075	0.024175
6	0.6	true	0.287923	$3.52868 \geq 1.5$	0.022425	0.021525
7	0.7	true	0.285461	$3.55165 \geq 1.5$	0.023275	0.022175
8	0.8	true	0.28659	$3.52602 \geq 1.5$	0.020125	0.020725
9	0.9	true	0.28319	$3.57076 \geq 1.5$	0.022925	0.022375
10	0.10	true	0.296685	$3.55679 \geq 1.5$	0.020875	0.024775
11	0.11	true	0.286982	$3.51952 \geq 1.5$	0.020175	0.020475
12	0.12	true	0.289731	$3.533 \geq 1.5$	0.023125	0.022275
13	0.13	true	0.285072	$3.55166 \geq 1.5$	0.024375	0.020575
14	0.14	true	0.289961	$3.5577 \geq 1.5$	0.024975	0.022625
15	0.15	true	0.28956	$3.51805 \geq 1.5$	0.022525	0.020775
16	0.16	true	0.29136	$3.53901 \geq 1.5$	0.022775	0.024375
17	0.17	true	0.291274	$3.53188 \geq 1.5$	0.021325	0.023025
18	0.18	true	0.286488	$3.53563 \geq 1.5$	0.021925	0.020675
19	0.19	true	0.288102	$3.5419 \geq 1.5$	0.020325	0.022425
20	0.20	true	0.289332	$3.54601 \geq 1.5$	0.023675	0.021475
21	0.21	true	0.280009	$3.53521 \geq 1.5$	0.023425	0.020925
22	0.22	true	0.294417	$3.51249 \geq 1.5$	0.021225	0.024575
23	0.23	true	0.289662	$3.54223 \geq 1.5$	0.024175	0.024225
24	0.24	true	0.283783	$3.50784 \geq 1.5$	0.022325	0.020125

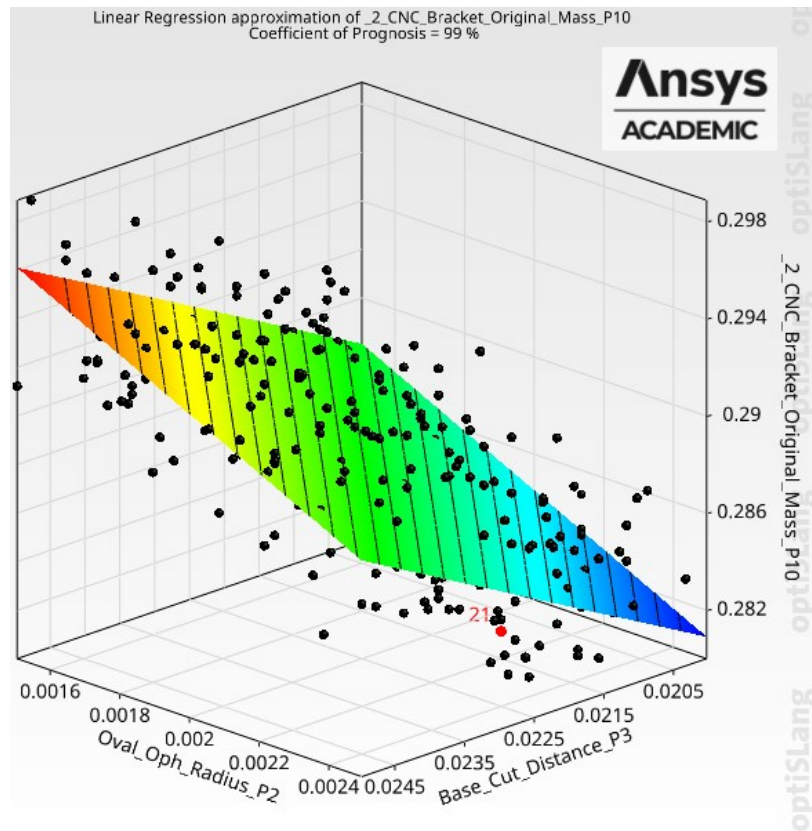
Εικόνα 118 - Αποτελέσματα επαναληπτικής διαδικασίας

Ως βέλτιστη γεωμετρία επιλέγεται αυτόματα από το Ansys OptiSlang η γεωμετρία “Design 21” με μάζα 0.280009kg και συντελεστή ασφαλείας 3.53521.

Designable				
	Id	Feasible	obj_2_CNC_Bracket_Original_Mass_P10	constr_Safety_Factor_Minimum_P11
21	0.21	true	0.280009	$3.53521 \geq 1.5$

Εικόνα 119 - Βέλτιστη γεωμετρία

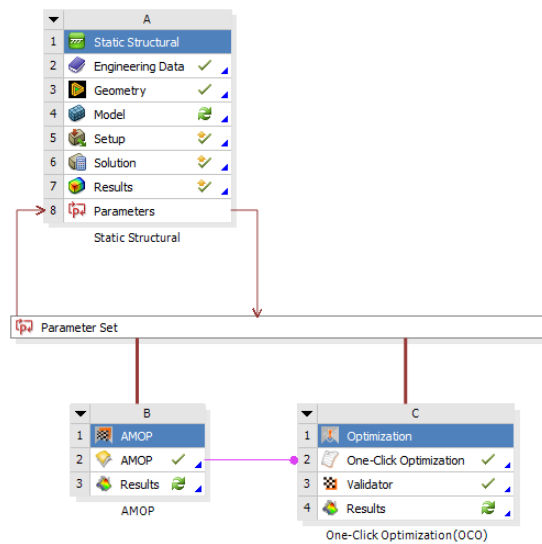
Το Ansys OptiSlang κατασκεύασε το μεταμοντέλο για τη γεωμετρία αυτή με ακρίβεια 99% για τον υπολογισμό της μάζας. Το Ansys OptiSlang αναφέρει αυτόν τον δείκτη ακρίβειας του μεταμοντέλου ως Coefficient of Prognosis (COP).



Εικόνα 120 - Coefficient of Prognosis

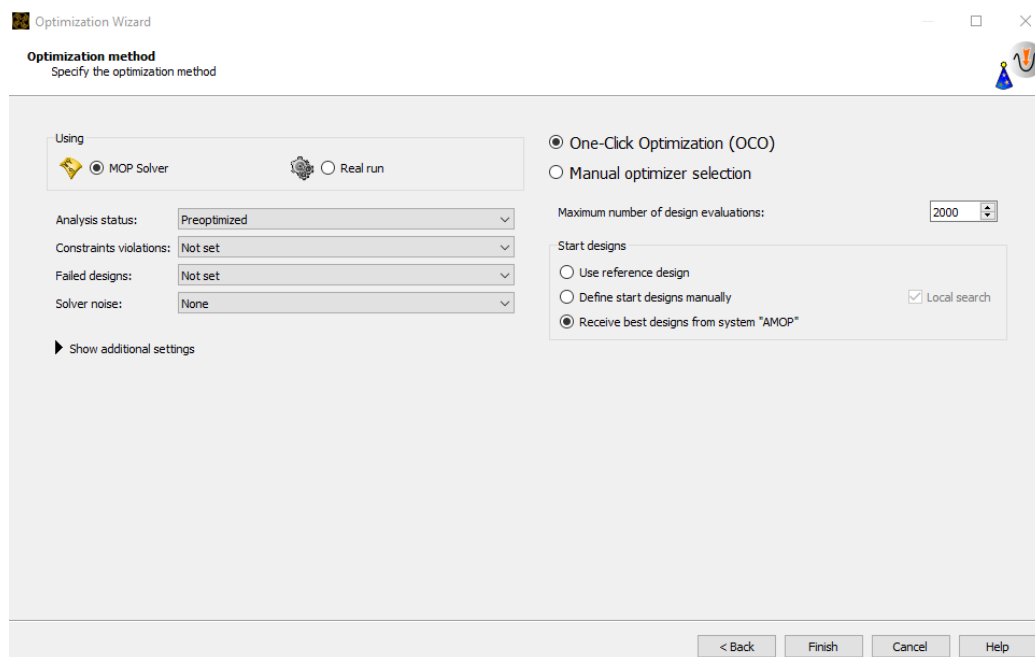
Με την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας της προσομοίωσης των Design Of Experiments, ακολουθεί η επίλυση χιλιάδων διαφορετικών σετ γεωμετρικών παραμέτρων, αξιοποιώντας το μεταμοντέλο που δημιουργήθηκε.

Στο ίδιο project εισάγεται το Module "Optimization" του Ansys OptiSlang, το οποίο δέχεται ως είσοδο τα δεδομένα που δημιουργήθηκαν κατά την επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης.



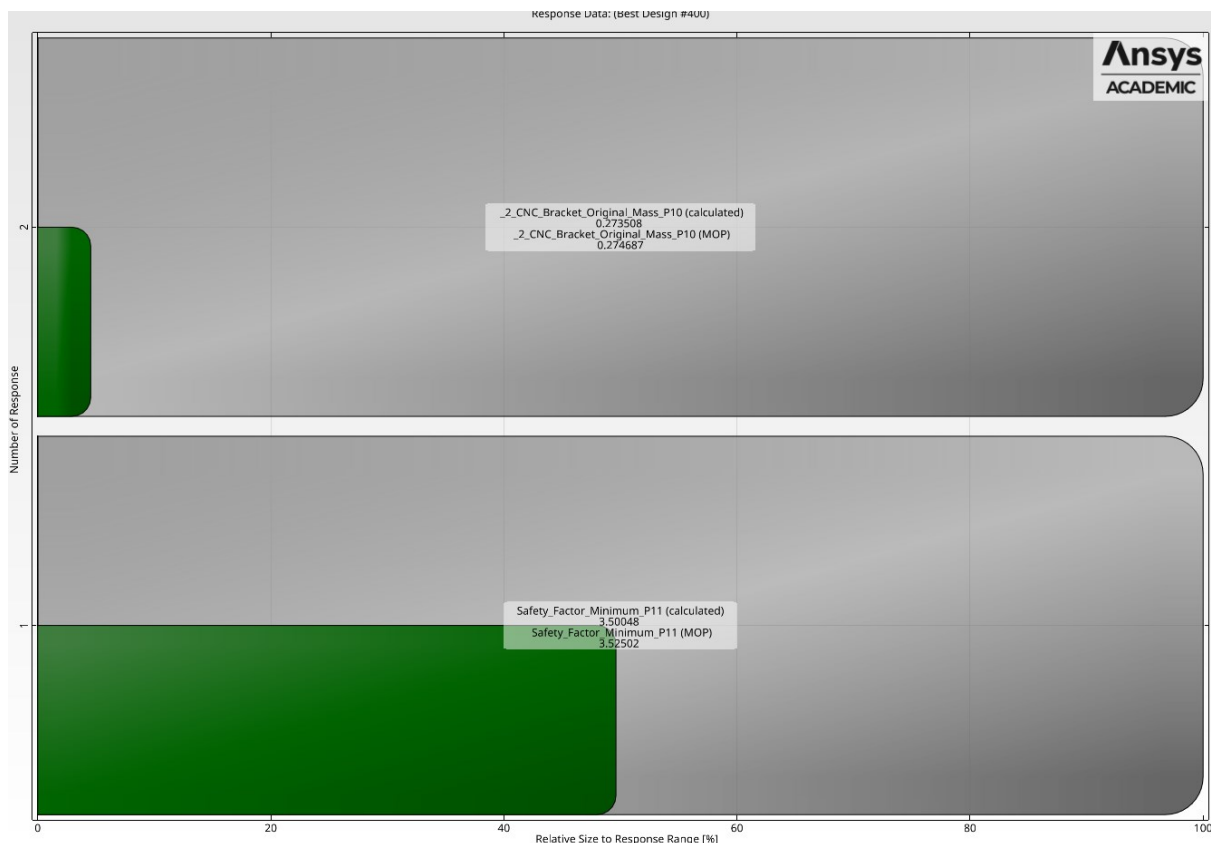
Εικόνα 121 - Optimization Module

Στις ρυθμίσεις του Optimization, επιλέγεται η χρήση των δεδομένων και της βέλτιστης γεωμετρίας από τα Design of Experiments.



Εικόνα 122 - Optimization Wizard

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας του "Validation" λαμβάνεται το ακόλουθο διάγραμμα, το οποίο επιβεβαιώνει την πολύ καλή απόδοση του μεταμοντέλου. Συγκρίνεται το αποτέλεσμα για την μάζα και τον συντελεστή ασφαλείας που εξήχθη από την επίλυση του μεταμοντέλου και του πλήρους μοντέλου αντίστοιχα.



Εικόνα 123 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & πλήρους μοντέλου

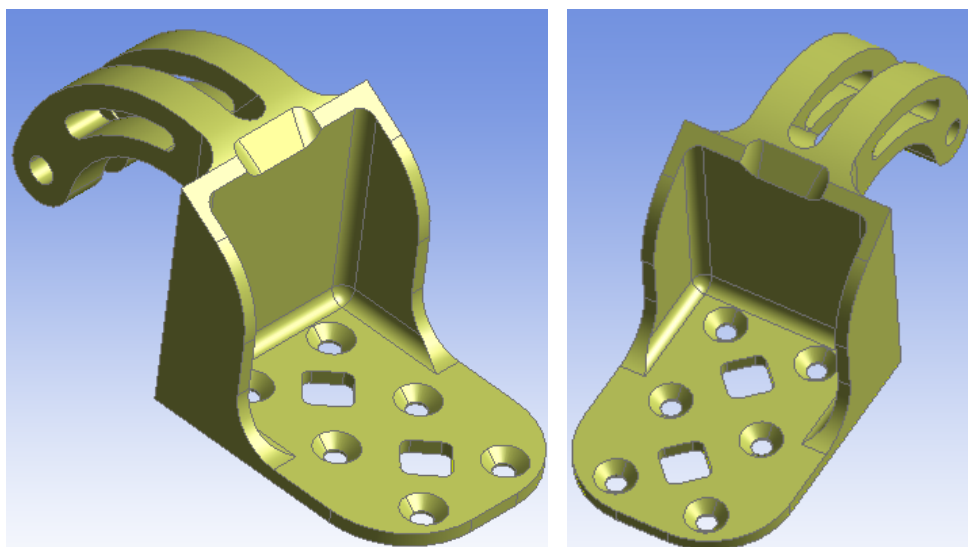
Μέγεθος	Πλήρες Μοντέλο	Μεταμοντέλο	% Απόκλιση
Μάζα (kg)	0,273508	0,274687	-0,43%
Συντελεστής Ασφαλείας	3,50048	3,52502	-0,7%

Πίνακας 7 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & Πλήρους μοντέλου

Επιβεβαιώνεται η πολύ μικρή απόκλιση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων που εξάγονται από την επίλυση του μεταμοντέλου σε σχέση με την επίλυση του πλήρους μοντέλου.

3.3.7. Τοπολογική Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία

Η τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία που εξήχθη από τη διαδικασία βελτιστοποίησης με την επίλυση του μεταμοντέλου μέσω του Ansys OptiSlang είναι η παρακάτω.



Εικόνα 124 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία

Ακολουθεί η σύγκριση των μεγεθών – κριτηρίων για την αρχική και την τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία.

Μέγεθος	Αρχική Γεωμετρία	Τοπολογικά Βέλτιστη	% Διαφορά
Μάζα (kg)	0,34996	0,273508	-21,85%
Συντελεστής Ασφαλείας	3,5863	3,50045	-2,39%

Πίνακας 8 - Σύγκριση αρχικής και τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας

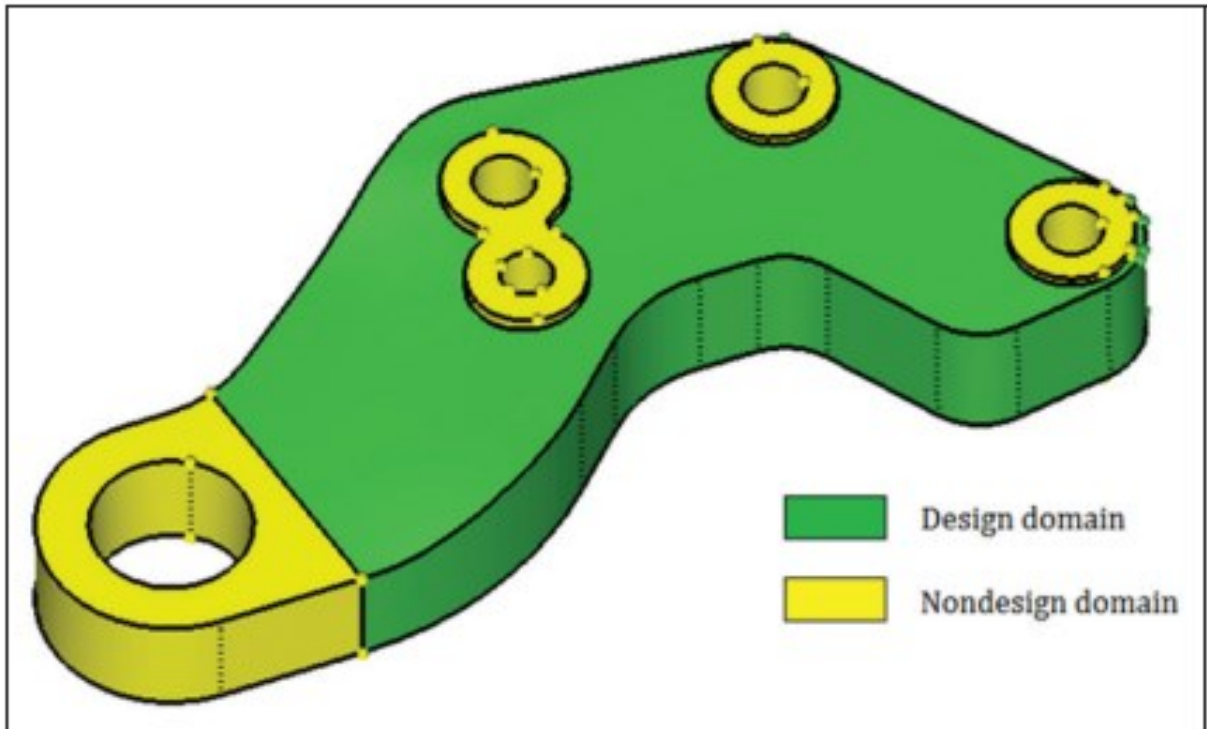
Ο στόχος της τοπολογικής βελτιστοποίησης επετεύχθη, δηλαδή μειώθηκε η μάζα της γεωμετρίας σημαντικά (-21,85%), διατηρώντας ταυτόχρονα τον συντελεστής ασφαλείας κατά πολύ μεγαλύτερο του 1,5.

Επιπλέον, η γεωμετρία είναι εφικτό να παραχθεί με εργαλειομηχανή CNC (CNC Mill), καθώς οι περιοχές αφαίρεσης υλικού σχεδιάστηκαν με γνώμονα αυτόν τον περιορισμό.

3.4. Γεωμετρία No. 3 παραγόμενη με χύτευση υπό πίεση

3.4.1. Περιγραφή

Η Γεωμετρία No. 3 αφορά βάση στήριξης κινητήρα αυτοκινήτου και έχει ήδη μελετηθεί σε άρθρο του 2015 [41]. Στόχος του άρθρου ήταν η τοπολογική βελτιστοποίηση, λαμβάνοντας υπόψη ότι το εξάρτημα αυτό θα παραχθεί με χύτευση, ίδια δηλαδή μέθοδο με αυτή που θα μελετηθεί στη τρέχουσα διπλωματική.

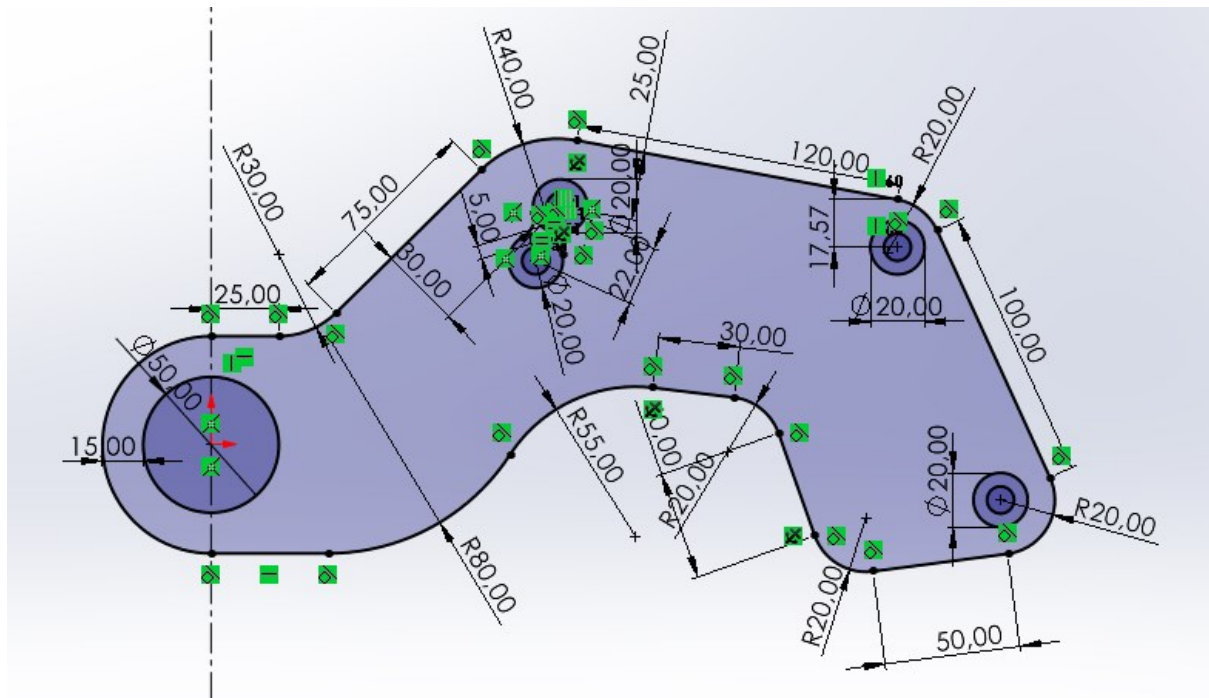


Εικόνα 125 - Μοντέλο No. 3 [41]

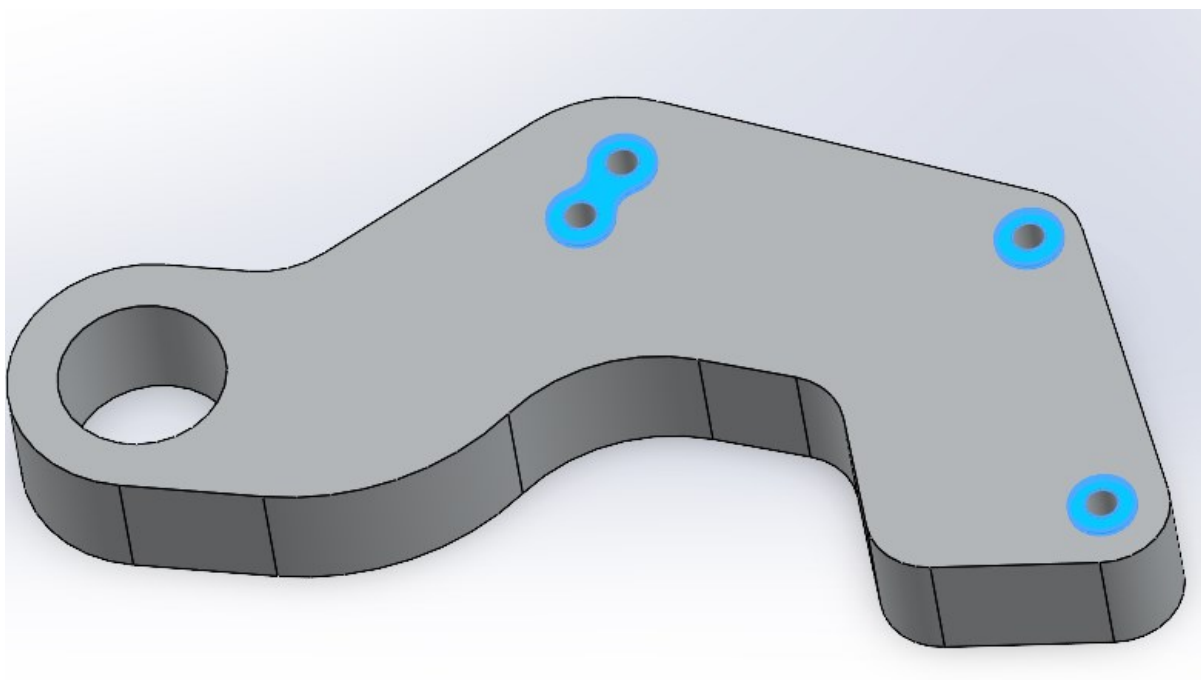
3.4.2. Σχεδιασμός γεωμετρίας

Ο σχεδιασμός της γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα τρισδιάστατου σχεδιασμού 3D CAD Solidworks. Ακολουθεί η διαδικασία σχεδιασμού της γεωμετρίας.

Αρχικά σχεδιάζεται το βασικό sketch της γεωμετρίας.

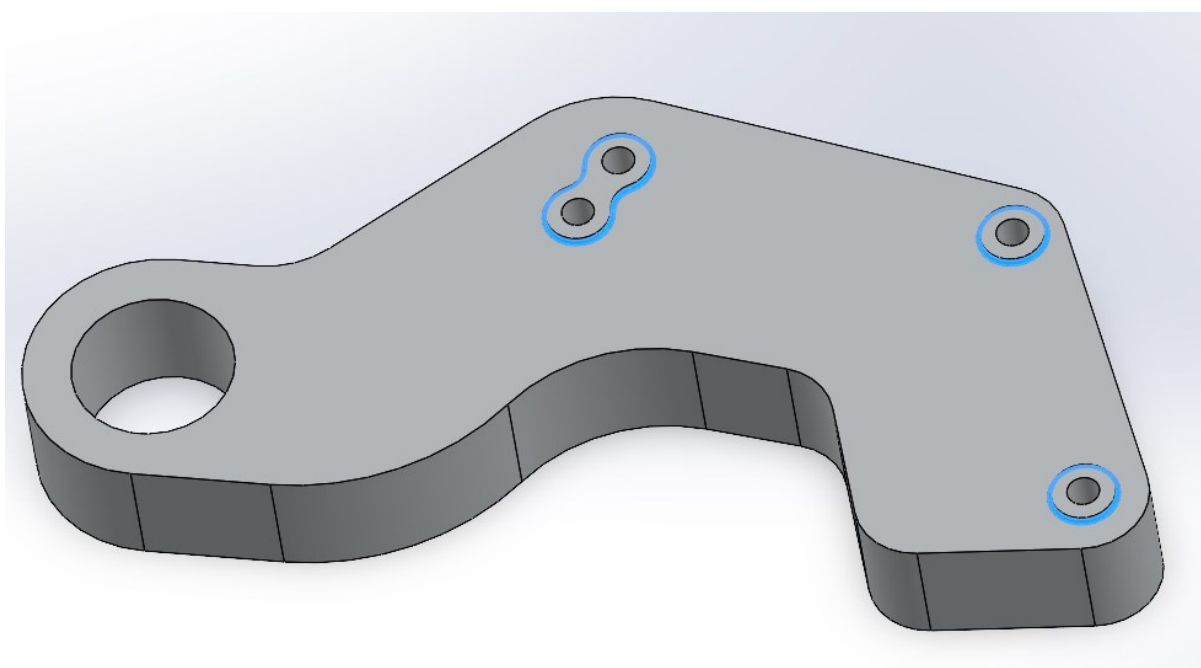


Ακολουθούν τα extrude βάσει του παραπάνω sketch, ώστε να σχηματιστεί ο βασικός όγκος της γεωμετρίας.



Εικόνα 128 - Extrude No. 2

Με την εντολή Fillet δημιουργούνται ράδια σε σημεία συγκέντρωσης τάσεων στο μοντέλο.



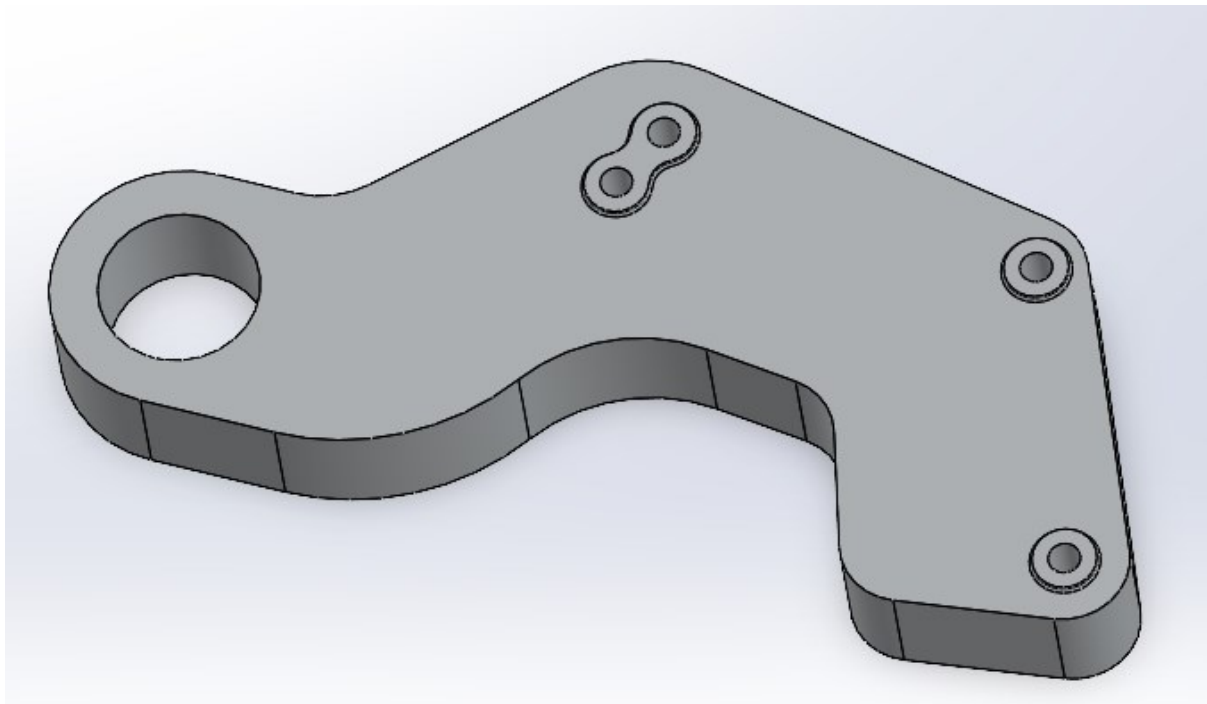
Εικόνα 129 – Ράδια

3.4.3. Τοπολογική βελτιστοποίηση στο περιβάλλον του Solidworks

Αντίστοιχα με την περίπτωση της γεωμετρίας Νο. 1 και Νο. 2, θα ακολουθηθεί η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης της γεωμετρίας στο περιβάλλον του Solidworks. Μέσω αυτής της διαδικασίας θα εξαχθεί η κατάλληλη πληροφορία για τις περιοχές που είναι δυνατόν να αφαιρεθεί υλικό στη συνέχεια, μέσω του λογισμικού Ansys OptiSlang, λαμβάνοντας υπόψη ως περιορισμό τη μέθοδο παραγωγής της γεωμετρίας.

Ακολουθεί η διαδικασία της τοπολογικής μελέτης στο περιβάλλον Solidworks.

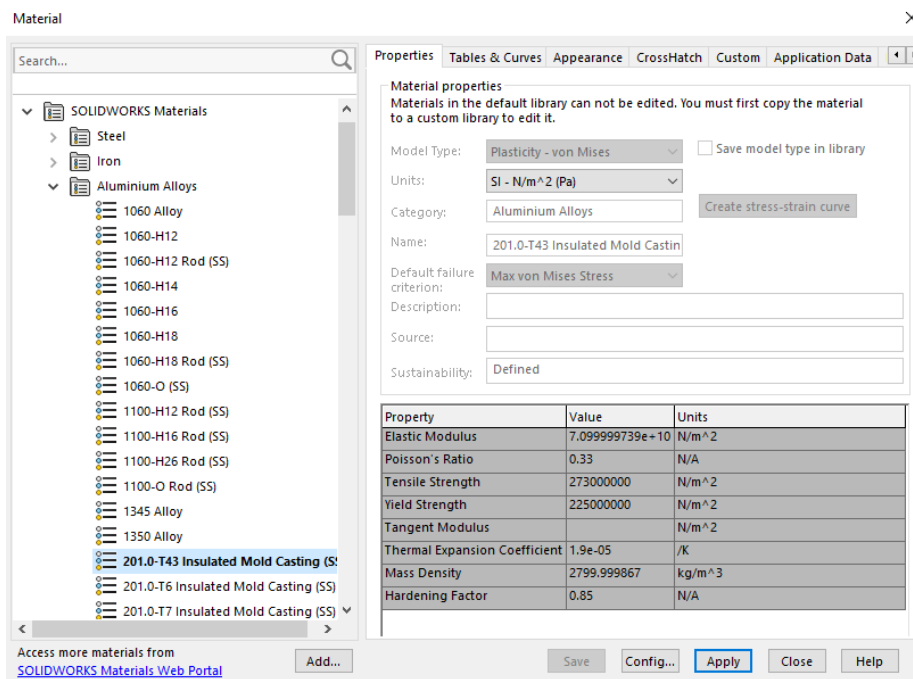
Από το μενού Topology Study εισάγεται η γεωμετρία προς μελέτη.



Εικόνα 130 - Solidworks Topology Study

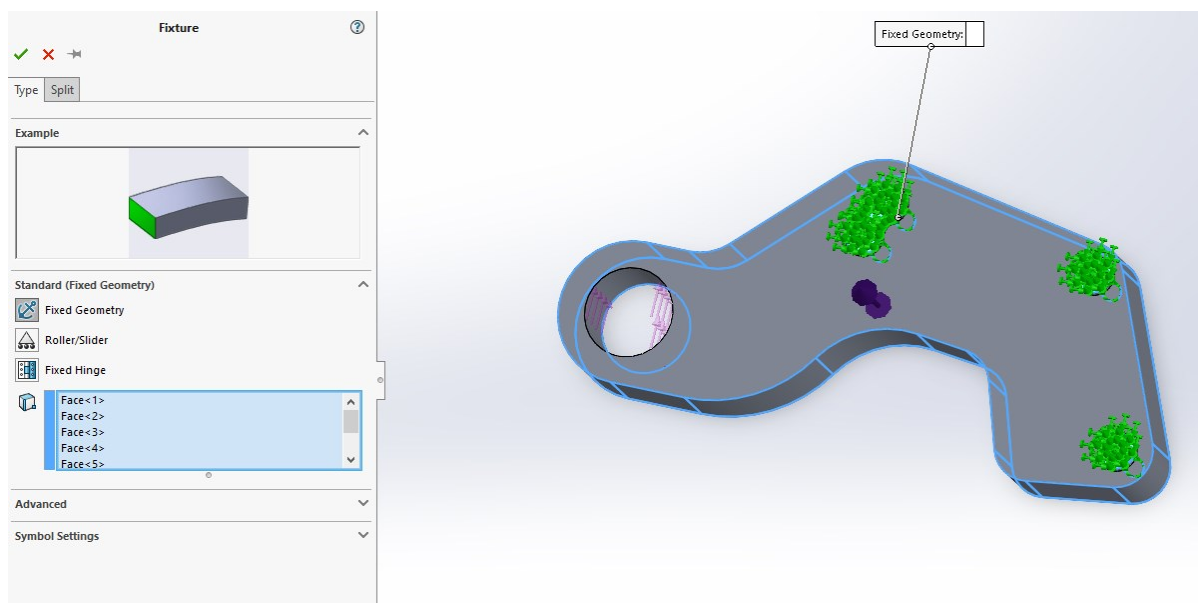
Ως υλικό ορίζεται το κράμα αλουμινίου για χυτεύσεις 201.0-T43 με τις παρακάτω μηχανικές ιδιότητες.

Σημείωση: Στην περίπτωση του άρθρου [41] ως υλικό χύτευσης επιλέγεται το $AlSi9Cu3$. Η βιβλιοθήκη του Solidworks δεν συμπεριλαμβάνει το συγκεκριμένο υλικό και για αυτόν τον λόγο ορίστηκε υλικό παρόμοιων μηχανικών ιδιοτήτων. Στην υπολογιστική μελέτη μέσω του Ansys, θα οριστεί το υλικό $AlSi9Cu3$, με τις ακριβείς μηχανικές ιδιότητές του.



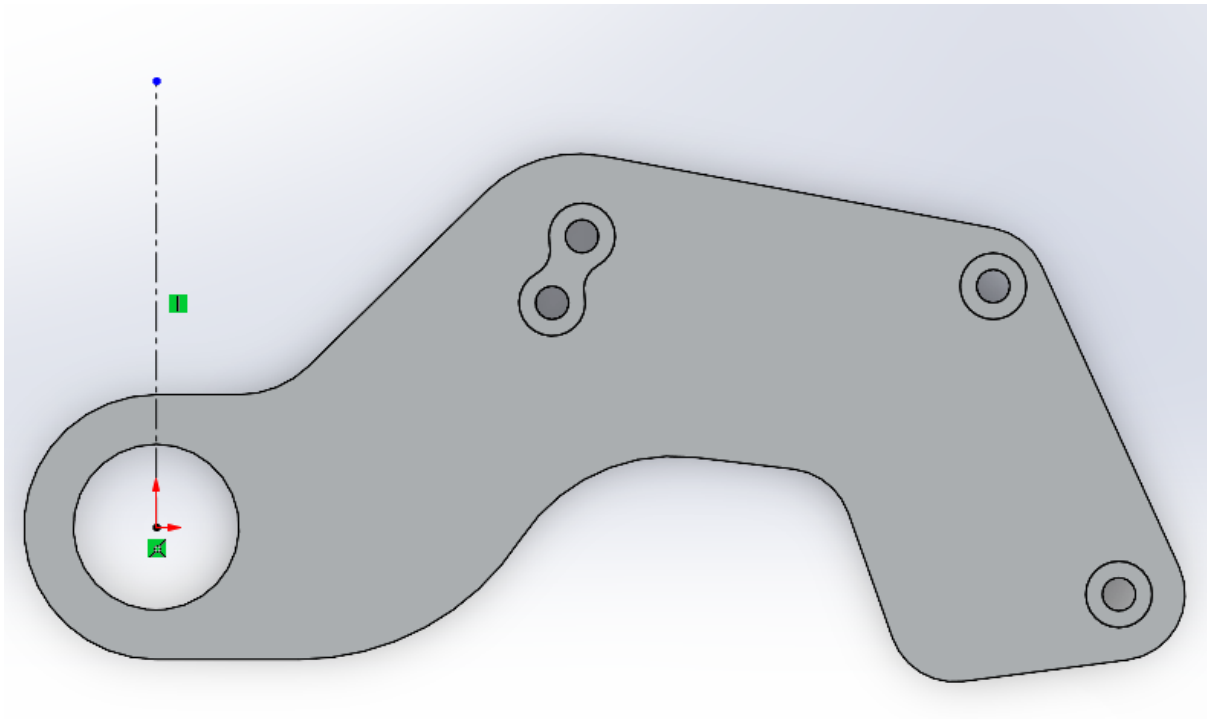
Εικόνα 131 - Μηχανικές ιδιότητες υλικού

Επιλέγεται ως στήριξη οι επιφάνειες των φρεζών στις οποίες θα στερεωθεί η βάση.



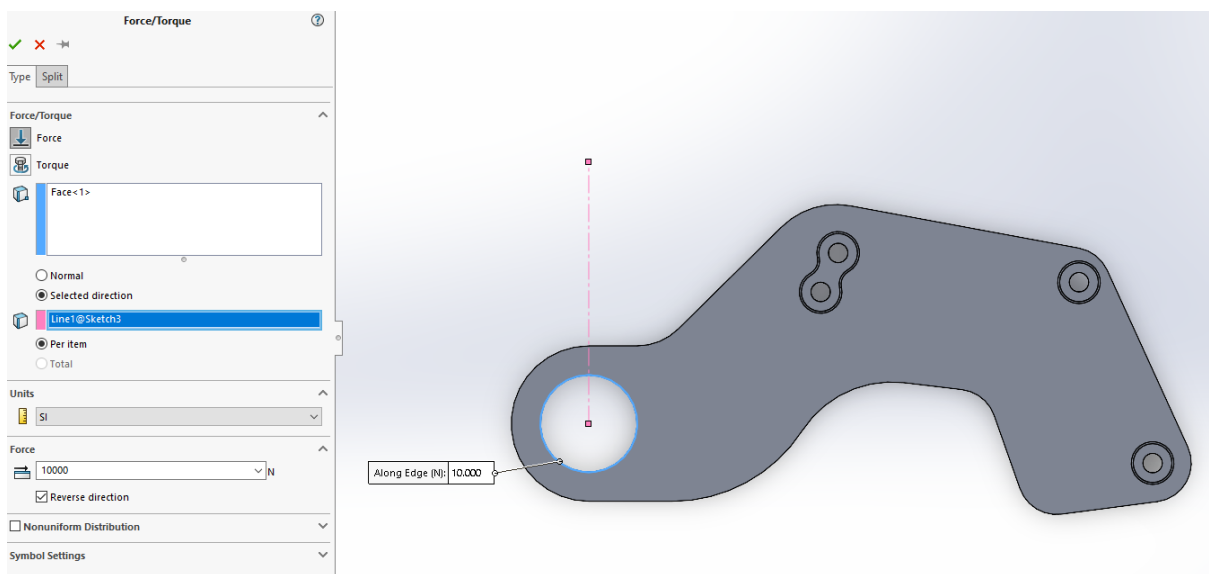
Εικόνα 132 - Στήριξη της γεωμετρίας

Για τον ορισμό της φόρτισης, δημιουργείται ένα βοηθητικό Sketch, στο οποίο σχεδιάζεται γραμμή όπως αποτυπώνεται παρακάτω. Ο τύπος της φόρτισης εξήχθη από τα δεδομένα του άρθρου που βασίζεται η γεωμετρία.



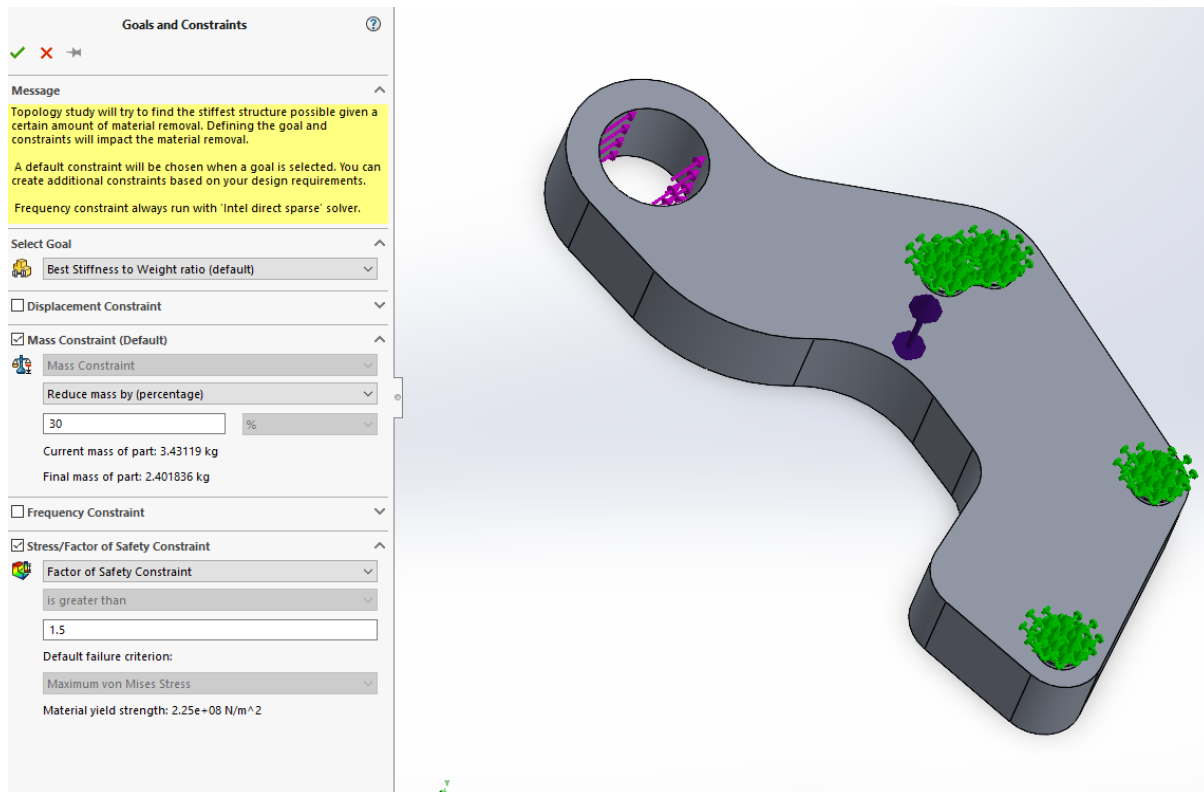
Εικόνα 133 - Γωνία επιβολής φόρτισης

Εισάγεται φόρτιση 10000N παράλληλη με την βοηθητική γραμμή που εισήχθη παραπάνω.



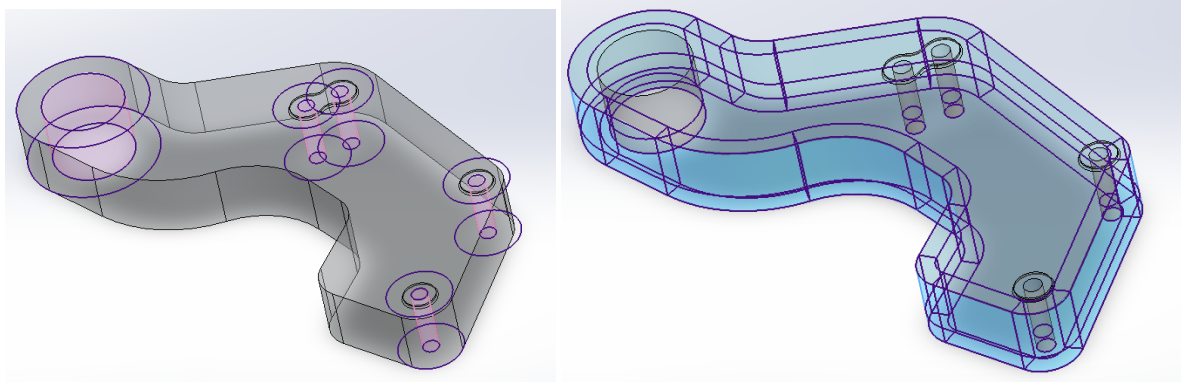
Εικόνα 134 - Επιβολή φόρτισης

Ως στόχος της τοπολογικής μελέτης ορίζεται το “Best Stiffness to Weight Ratio” και ταυτόχρονα το “Factor of Safety Constrain > 1,5”, δηλαδή η βέλτιστη δυσκαμψία σε σχέση με το βάρος και η διατήρηση του βαθμού ασφαλείας μεγαλύτερου του 1,5.



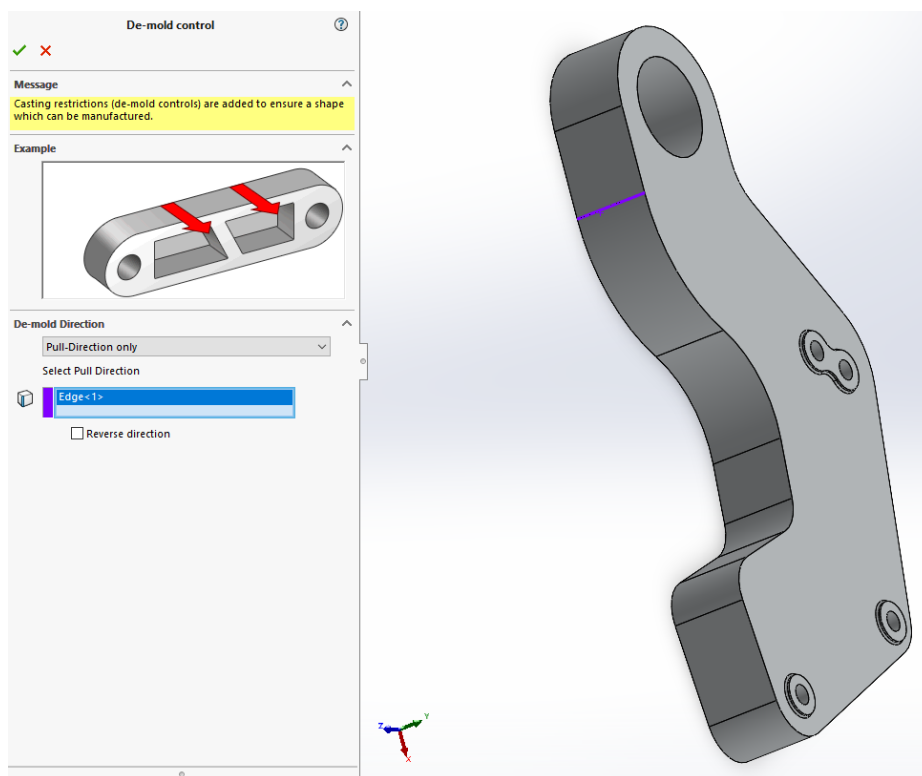
Εικόνα 135 - Στόχος της τοπολογικής βελτιστοποίησης

Από το μενού “Manufacturing Controls → Preserved Regions” εισάγονται οι επιφάνειες της γεωμετρίας, που είναι απαραίτητο να διατηρηθούν. Τέτοιες περιοχές αυτές αποτελούν τα σημεία επιβολής φόρτισης και στήριξης.



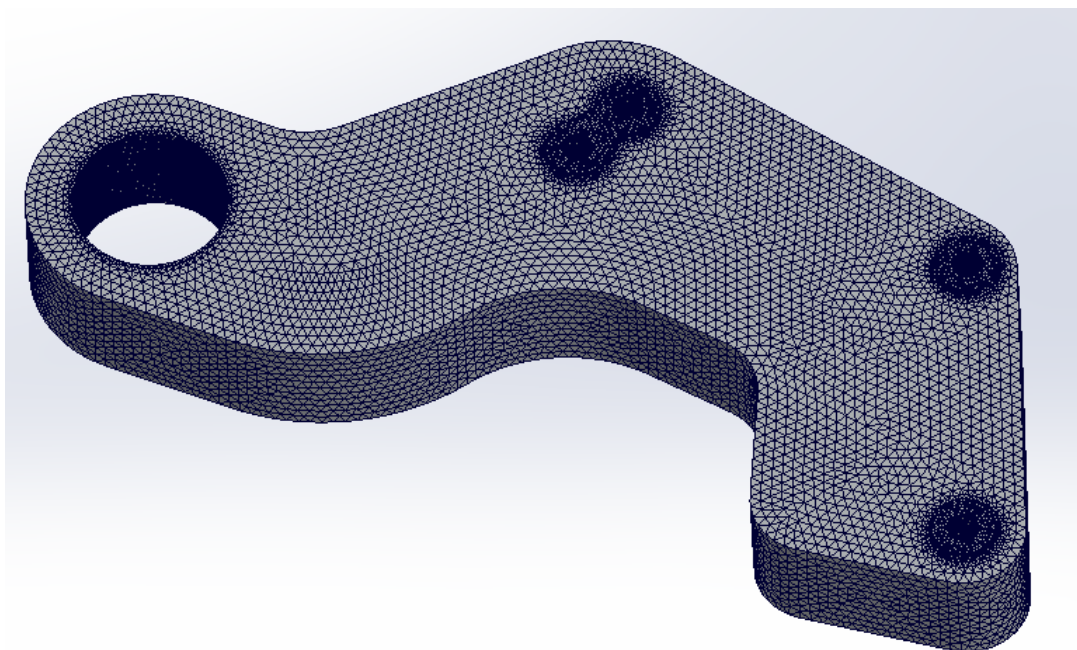
Εικόνα 136 - Preserved Regions

Επίσης εισάγεται περιορισμός για τη διεύθυνση εξόλκευσης της γεωμετρίας κατά τη χύτευση.



Εικόνα 137 – De mold Control

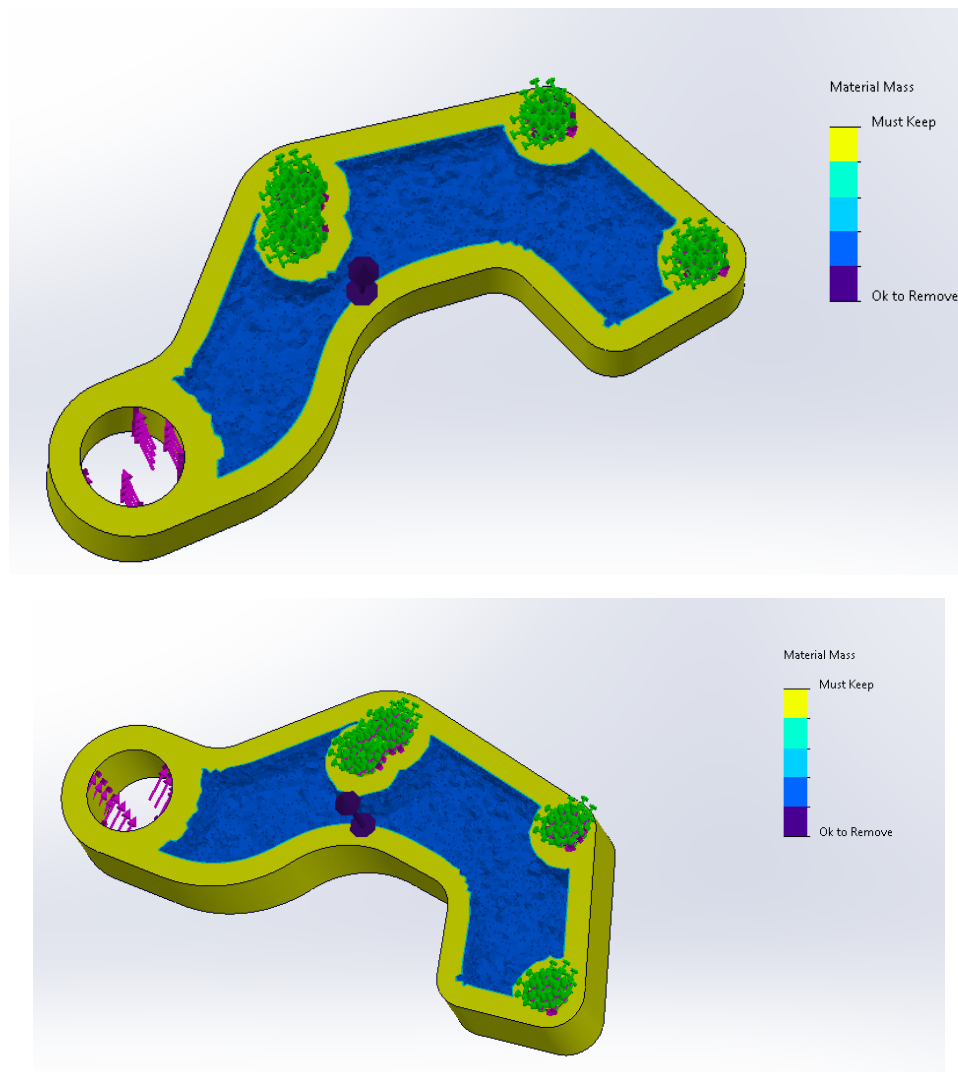
Ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος για την υπολογιστική μελέτη.



Εικόνα 138 - Υπολογιστικό πλέγμα γεωμετρίας

Η επαναληπτική διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης σύγκλινε μετά από 50 επαναλήψεις.

Το αποτέλεσμα της τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω του περιβάλλοντος του Solidworks είναι ως εξής:



Εικόνα 139 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία

Αρχική μάζα (kg)	Τελική μάζα (kg)
3,4312	2,2226

Πίνακας 9 - Σύγκριση αρχικής και τελικής μάζας γεωμετρίας

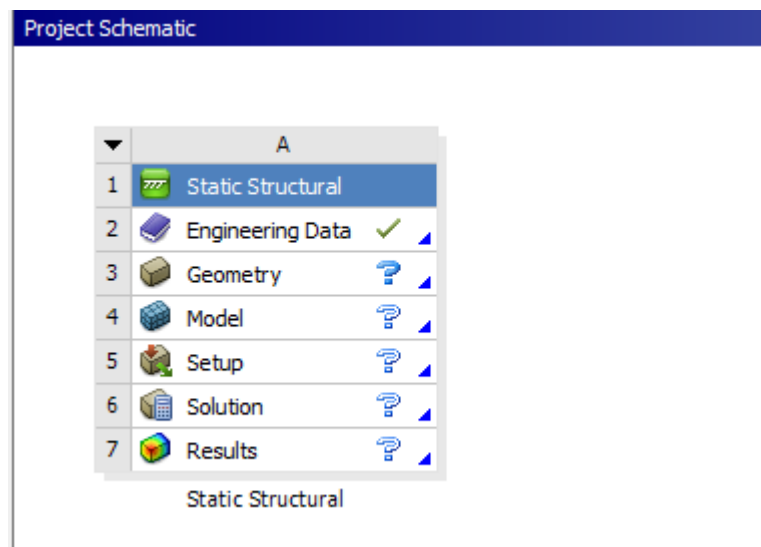
Το μοντέλο που εξήχθη από το 3D CAD Solidworks δεν είναι δυνατόν να παραχθεί με τη μέθοδο παραγωγής που έχει επιλεγεί (χύτευση). Παρόλα αυτά είναι πολύ χρήσιμη η πληροφορία που παρέχει, δηλαδή τις περιοχές της αρχικής γεωμετρίας, που δύναται να αφαιρεθούν χωρίς να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό η αξιοπιστία της γεωμετρίας με στόχο την ελαχιστοποίηση της μάζας.

3.4.4. Εισαγωγή αρχικής γεωμετρίας στο Ansys

Έχοντας λοιπόν την πληροφορία σχετικά με τις περιοχές που δύναται να αφαιρεθούν από την αρχική γεωμετρία, εισάγεται η γεωμετρία στο υπολογιστικό πακέτο Ansys.

Θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση για την αρχική γεωμετρία (πριν τη αφαίρεση υλικού), ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση αρχικής και τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας.









Η υπολογιστική μελέτη πραγματοποιείται μέσω του συστήματος ανάλυσης “Static Structural”.



















Εικόνα 140 - Static Structural

Ως υλικό ορίζεται το “AlSi9Cu3”, το οποίο αποτελεί υλικό που χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις παραγωγής με χύτευση.

Outline of Schematic A2: Engineering Data

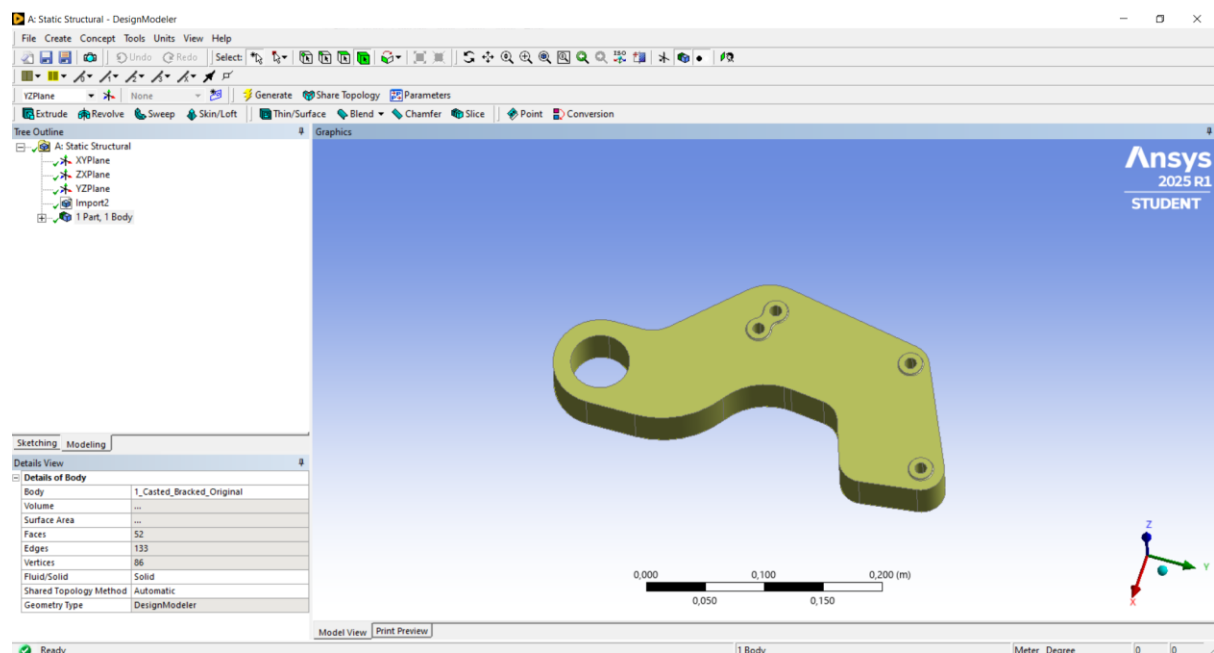
	A	B	C	D	E	
1	Contents of Engineering Data				Source	Description
2	 Material					
3	 AlSi9Cu3				General_M	
*	Click here to add a new material					

Properties of Outline Row 3: AlSi9Cu3

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
3	 Density	2750	kg m ⁻³ 
4	  Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	 Coefficient of Thermal Expansion	1,7E-05	C ⁻¹ 
6	  Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus a... 	
8	Young's Modulus	7,5E+10	Pa 
9	Poisson's Ratio	0,33	
10	Bulk Modulus	7,3529E+10	Pa
11	Shear Modulus	2,8195E+10	Pa
12	 Tensile Yield Strength	1,6E+08	Pa 
13	 Compressive Yield Strength	1,4E+08	Pa 
14	 Tensile Ultimate Strength	2,7E+08	Pa 

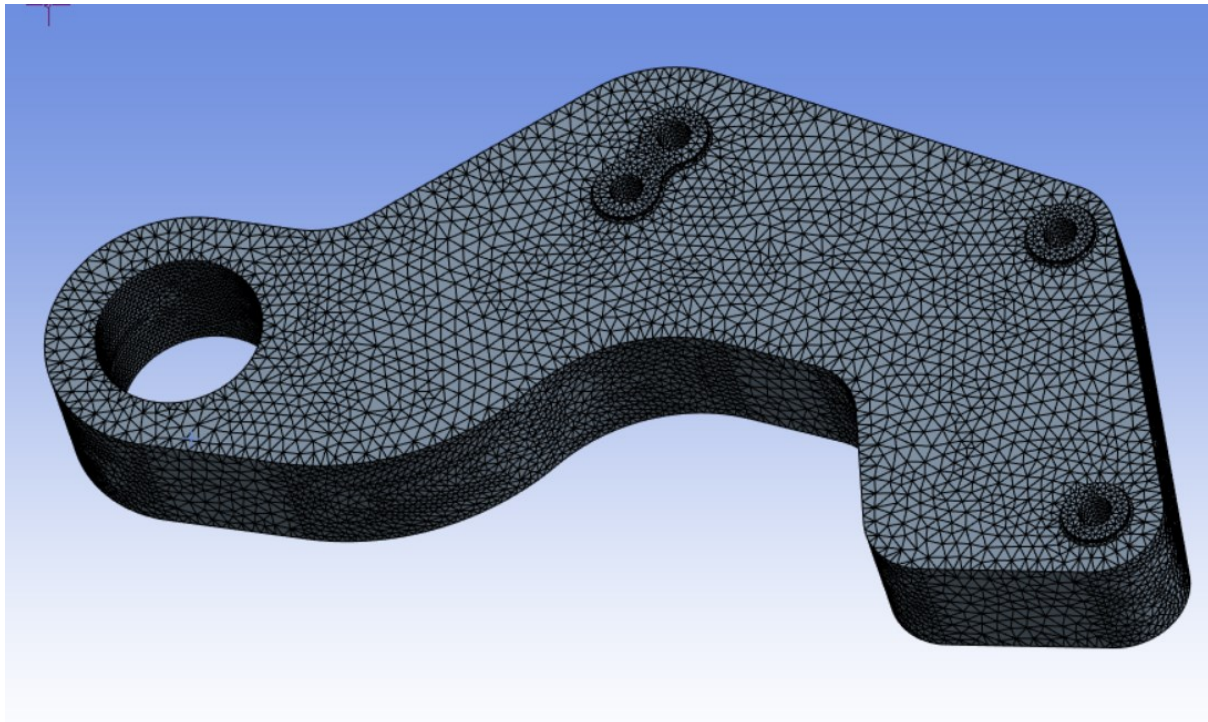
Εικόνα 141 - Engineering Data

Μέσω του “Geometry” εισάγεται η αρχική γεωμετρία υπό μορφή αρχείου step που δημιουργήθηκε στο Solidworks.



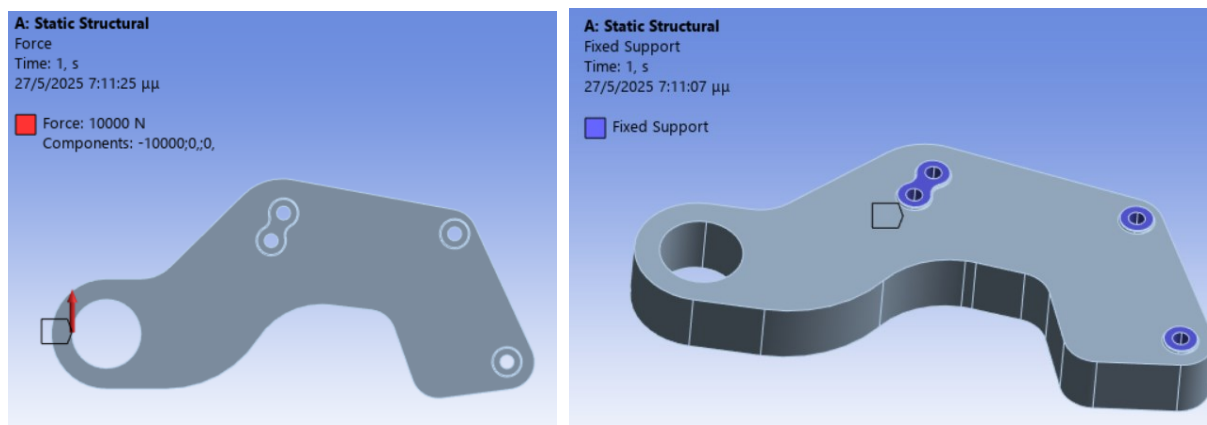
Εικόνα 142 - Εισαγωγή γεωμετρίας

Δημιουργείται υπολογιστικό πλέγμα από στοιχεία μεγέθους 2,5mm με πύκνωση κοντά στα σημεία επιβολής στηρίξεων και φόρτισης



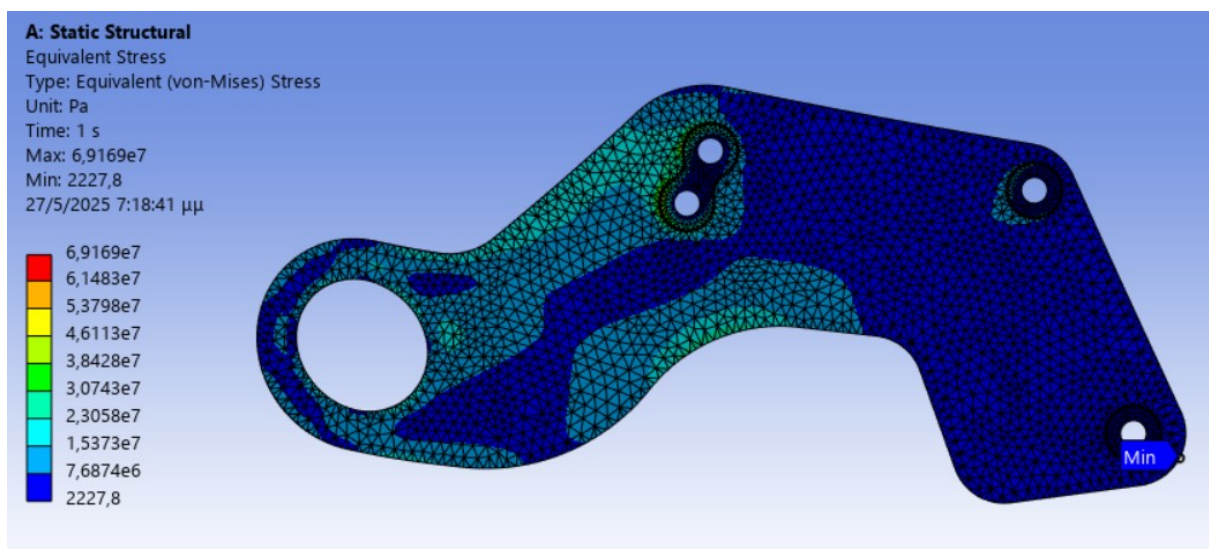
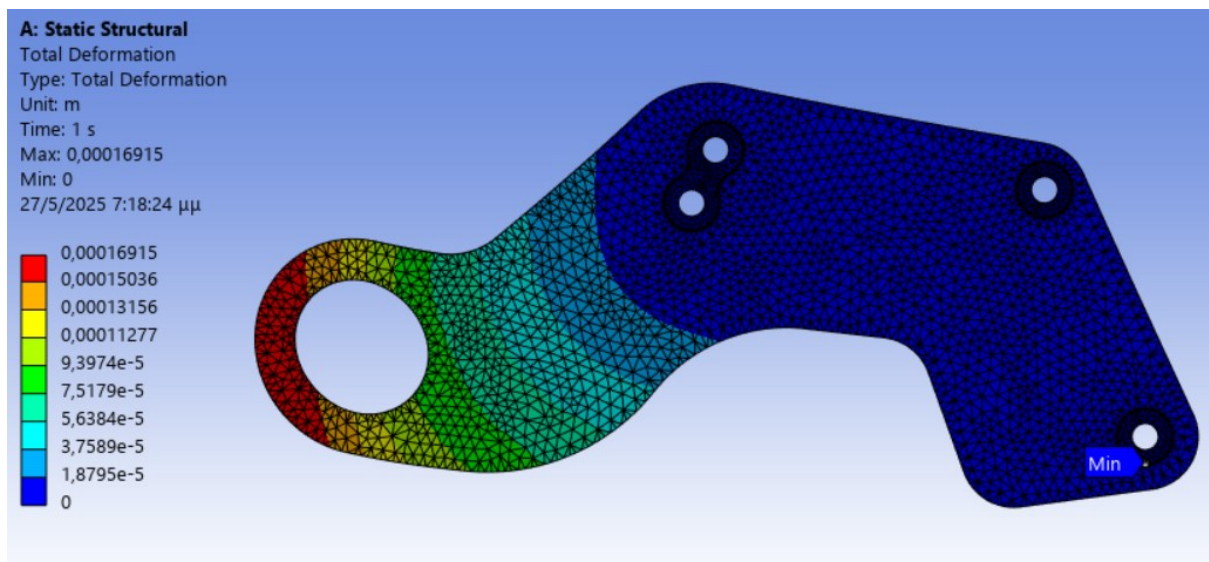
Εικόνα 143 - Υπολογιστικό πλέγμα

Στη συνέχεια επιβάλλονται οι συνθήκες στήριξης και φόρτισης, με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε στο περιβάλλον του Solidworks.

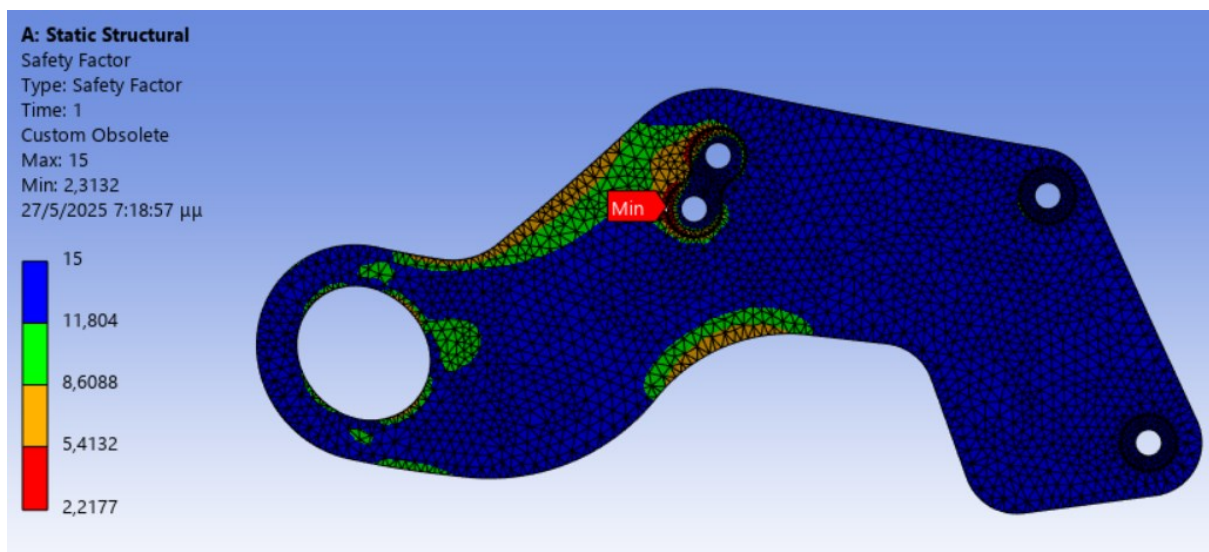


Εικόνα 144 - Συνθήκες στήριξης και φόρτισης

Έπειτα από την υπολογιστική προσομοίωση του μοντέλου λαμβάνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα.

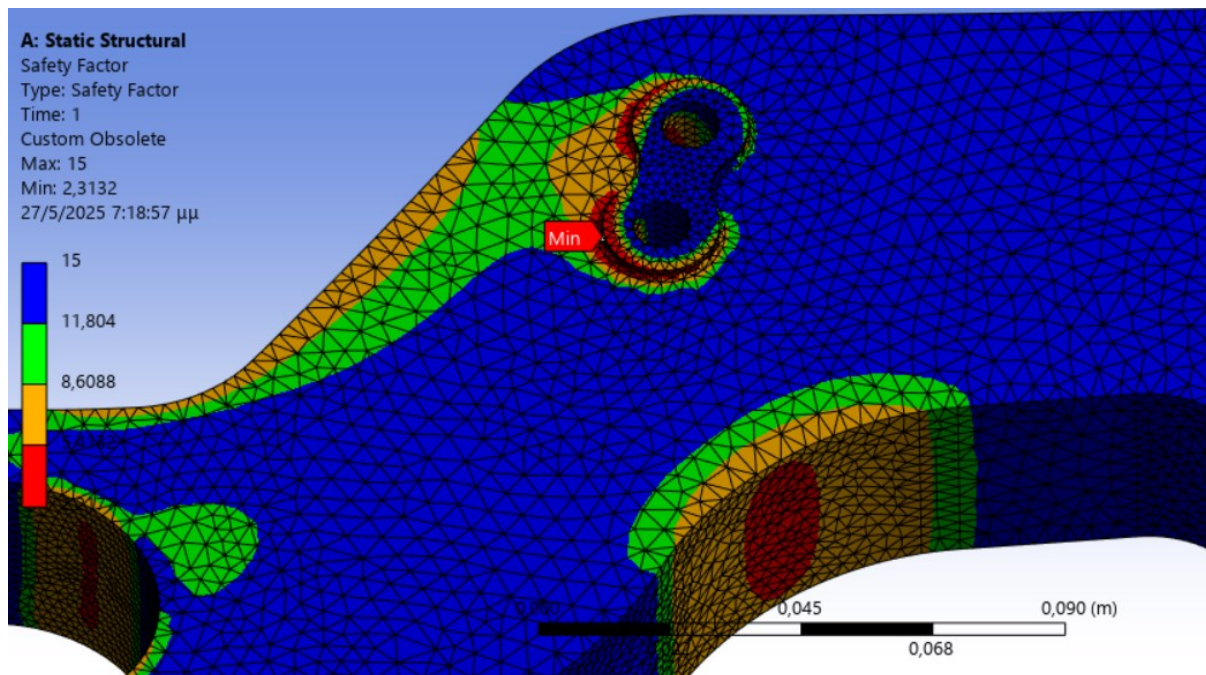


Εικόνα 145 - Deformation and Stress Results



Εικόνα 146 - Safety Factor Results

Παρατηρείται ότι ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 3,5863 και ότι η περιοχή με τη μέγιστη τάση είναι στο ράδιο ένωσης τμημάτων της γεωμετρίας. Σε μεγάλο μέρος της γεωμετρίας ο συντελεστής ασφαλείας είναι 15. Άρα πράγματι υπάρχει δυνατότητα αφαίρεσης τμήματος της μάζας της αρχικής γεωμετρίας.



Εικόνα 147 - Area of Minimum Safety Factor

Παρακάτω είναι συνοπτικά τα αποτελέσματα για την αρχική γεωμετρία:

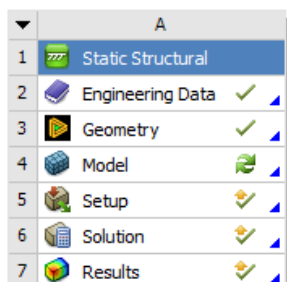
Μάζα	3,3699 kg
Maximum Equivalent Stress (Von-Mises)	69 MPa
Safety Factor	2,3132

Πίνακας 10 - Στοιχεία αρχικής γεωμετρίας

3.4.5. Διαδικασία τοπολογικής βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang

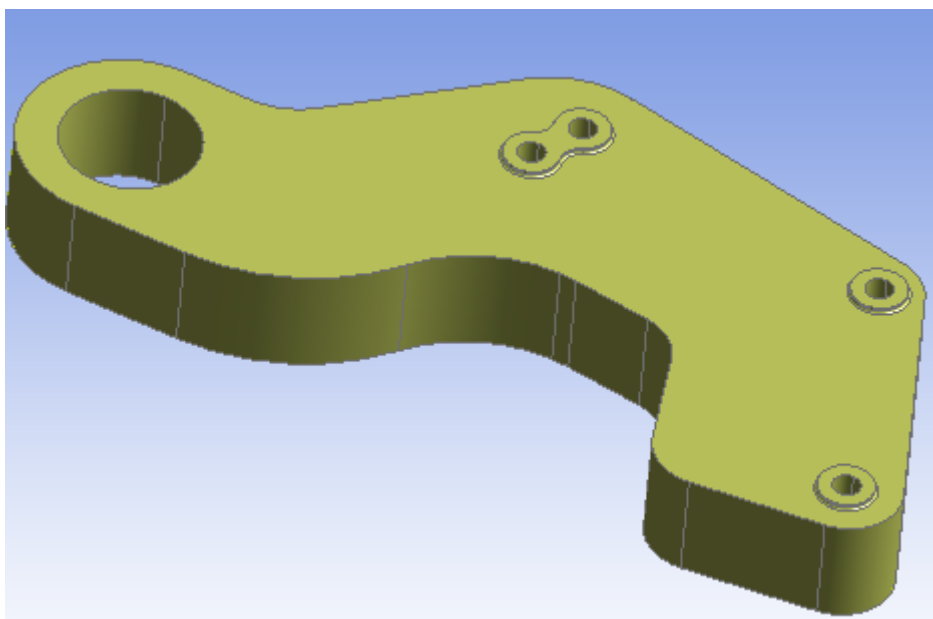
Η διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης της γεωμετρίας θα πραγματοποιηθεί μέσω του πακέτου Ansys OptiSlang, με αντίστοιχη διαδικασία όπως και στην περίπτωση της γεωμετρίας No. 1 και No. 2.

Δημιουργείται νέο project στο λογισμικό Ansys και εισάγεται το module “Static Structural”.



Εικόνα 148 - Νέο project

Εισάγεται η αρχική γεωμετρία στο Ansys.

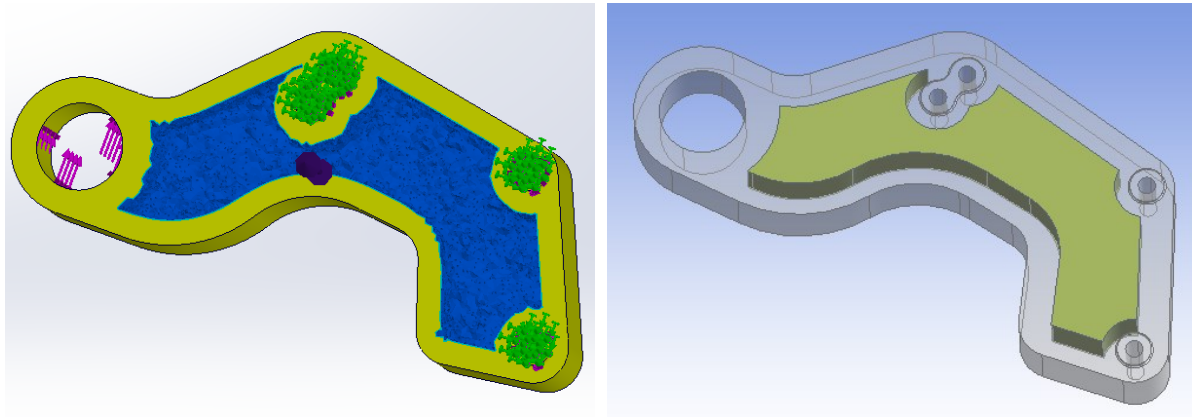


Εικόνα 149 - Εισαγωγή γεωμετρίας στο Ansys

Στη συνέχεια δημιουργούνται sketches πάνω στις επιφάνειες της γεωμετρίας, ούτως ώστε να αφαιρεθεί υλικό από αυτήν, στις περιοχές που ενδείκνυται αφαίρεση μάζας, σύμφωνα με τη διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του Solidworks.

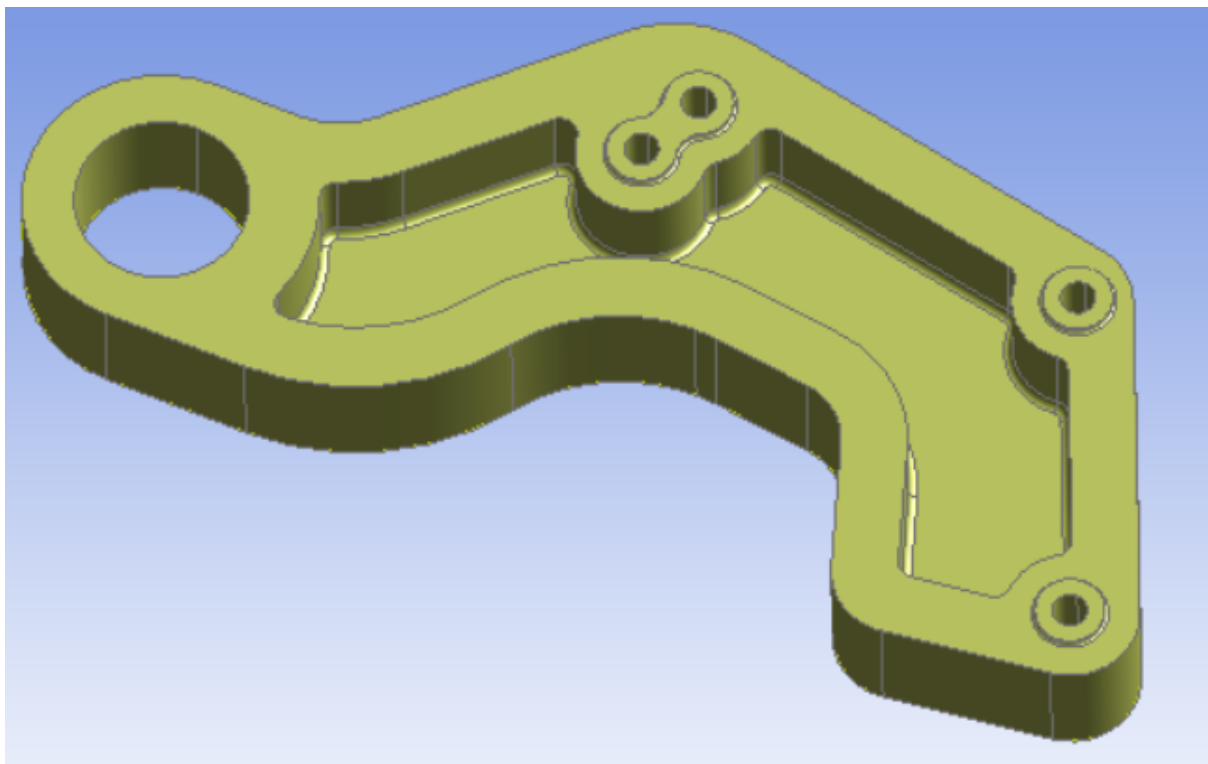
Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού των sketches στις επιφάνειες της γεωμετρίας που πρόκειται να αφαιρεθούν, λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός του τρόπο παραγωγής της γεωμετρίας, δηλαδή στην περίπτωση αυτής της γεωμετρίας η παραγωγή μέσω χύτευσης

Ακολουθεί η διαδικασία του σχεδιασμού των περιοχών αφαίρεσης υλικού από την αρχική γεωμετρία:



Εικόνα 150 - Περιοχή 1: Αριστερά: Topology Optimization Solidworks, Δεξιά: Αφαίρεση υλικού στο Ansys

Επιπλέον εισάγονται ράδια στο εσωτερικό μέρος της βάσης στο κάτω μέρος και στις κάθετες ακμές της προς διευκόλυνση της διαδικασίας της χύτευσης.



Εικόνα 151 - Τελική γεωμετρία προς παραμετρική βελτιστοποίηση

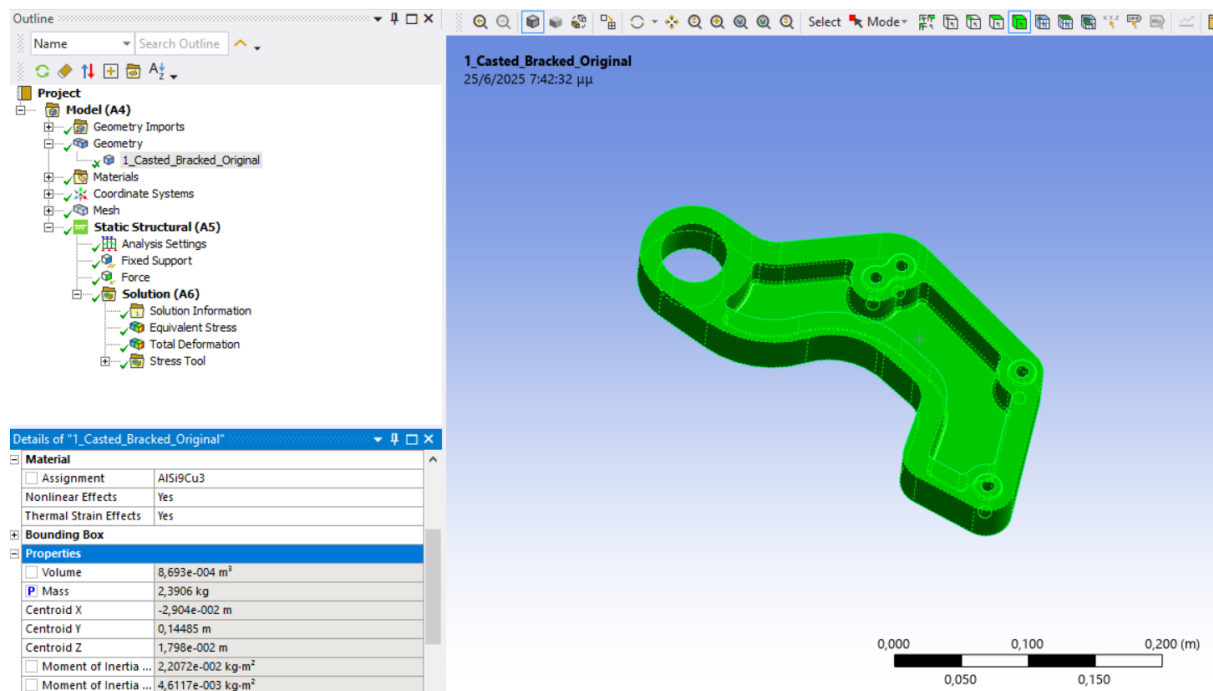
Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι οι διαστάσεις των sketches, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η αφαίρεση υλικού από τη γεωμετρία στο Ansys, είναι ορισμένες παραμετρικά. Με αυτόν τον τρόπο θα πραγματοποιηθεί επαναληπτική διαδικασία εντός του περιβάλλοντος του Ansys, ώστε να βρεθούν οι βέλτιστοι παράμετροι για τις περιοχές αφαίρεσης υλικού.

Parameter Editor			
	Name	Value	Type
✓	Offset_Distance	0,019 m	Length
✓	Radius	0,045 m	Length
✓	Extrude_Distan...	0,03 m	Length
✓	Fillets_Radius	0,005 m	Length
✓	Lower_Fillets_R...	0,0025 m	Length

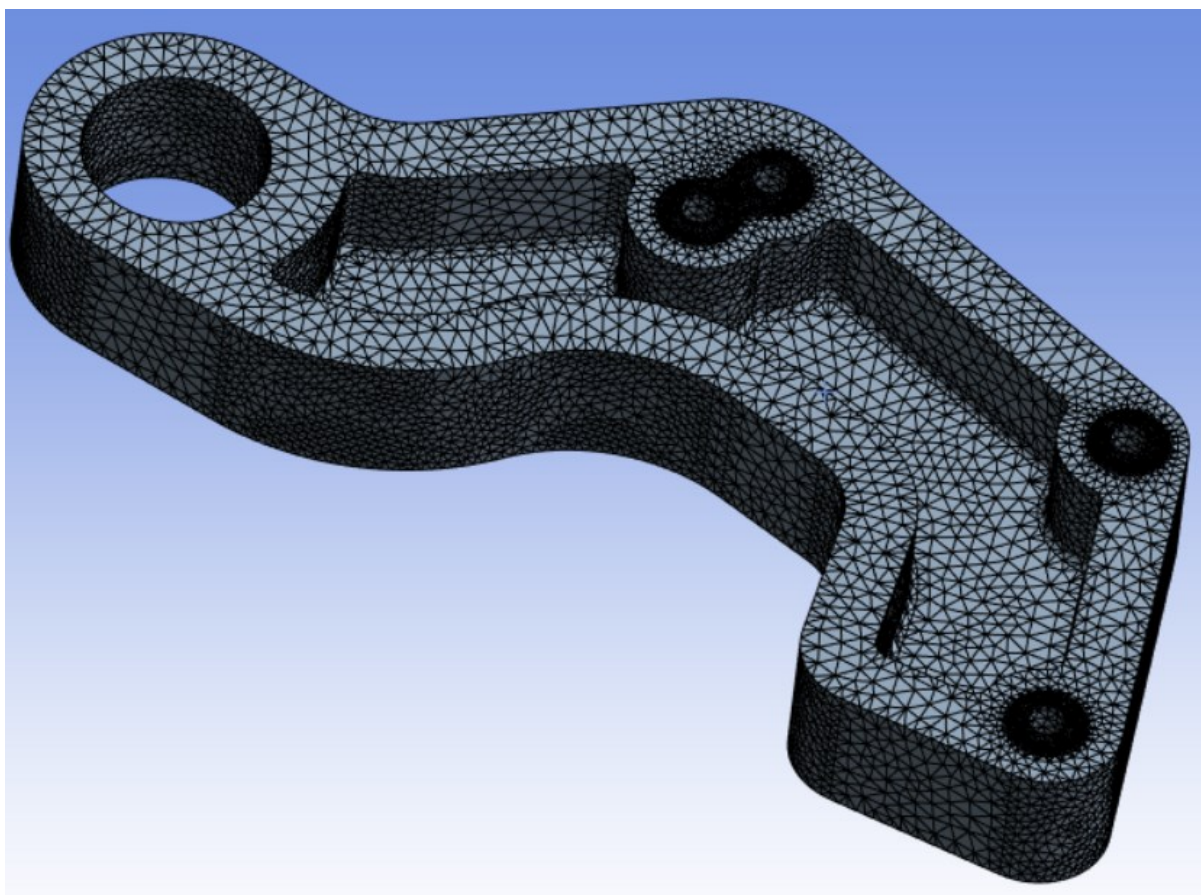
Εικόνα 152 - Παράμετροι για περιοχές αφαίρεσης υλικού

Στη συνέχεια μέσω του μενού “Model” ορίζεται το υπολογιστικό πλέγμα και οι συνθήκες στήριξης και φόρτισης, με την ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υπολογιστική μελέτη της αρχικής γεωμετρίας στο Ansys.

Επιπλέον, ορίζεται η μάζα της γεωμετρίας ως παράμετρος, η οποία θα αξιοποιηθεί ως κριτήριο για κατά την επαναληπτική διαδικασία της παραμετρικής βελτιστοποίησης.

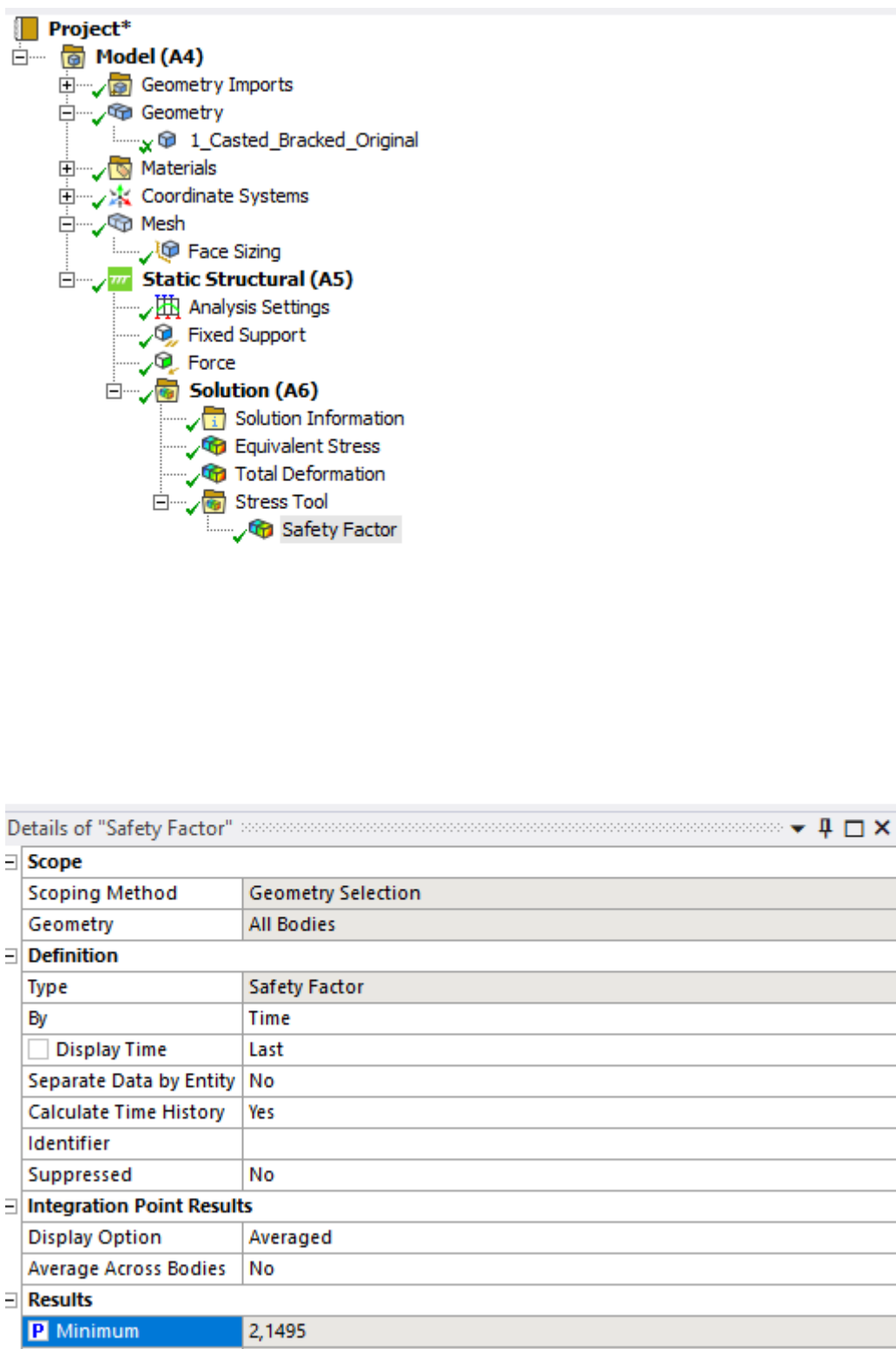


Εικόνα 153 - Ορισμός μάζας γεωμετρίας ως παράμετρο



Εικόνα 154 - Διακριτοποίηση γεωμετρίας

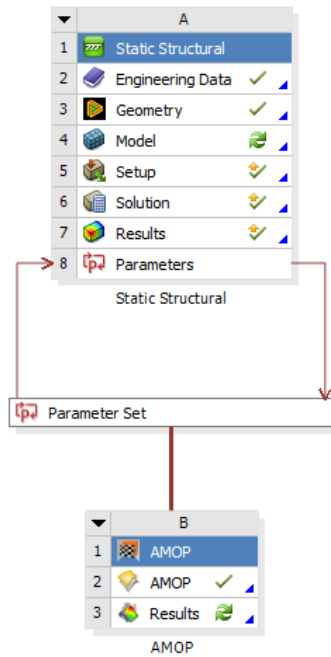
Ως έξοδος της υπολογιστικής προσομοίωσης του μοντέλου ορίζεται και ο Συντελεστής Ασφαλείας, μέγεθος το οποίο θα αξιοποιηθεί ως κριτήριο κατά την επαναληπτική διαδικασία.



Εικόνα 155 - Model Tree

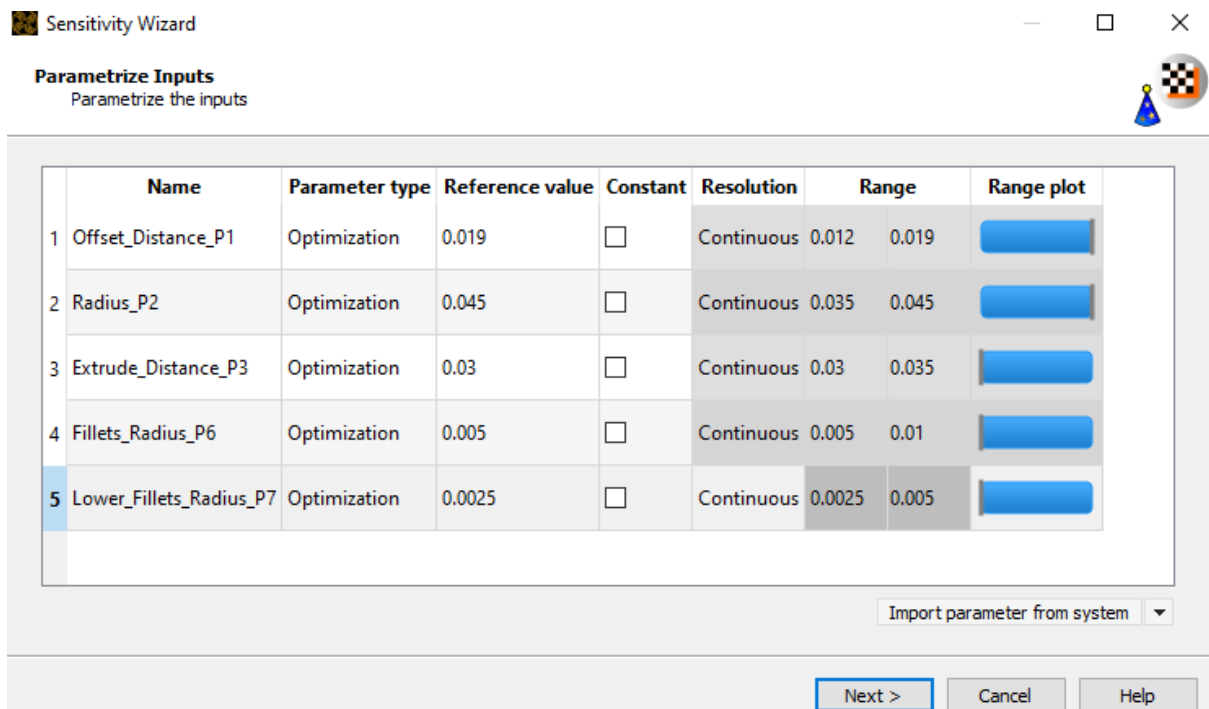
Η διαδικασία της προετοιμασίας για την επαναληπτική διαδικασία παραμετρικής βελτιστοποίησης εντός του Ansys έχει ολοκληρωθεί. Ακολουθεί η διαδικασία setup για το σύστημα Ansys OptiSlang, μέσω του οποίου θα εξαχθεί η βέλτιστη γεωμετρία.

Εισάγεται το Module "Sensitivity" του Ansys OptiSlang στο project και συνδέεται με τις παραμέτρους εισόδου και εξόδου που έχουν οριστεί κατά την παραπάνω διαδικασία.



Εικόνα 156 - Ansys OptiSlang Sensitivity Module

Από το μενού “Parameter” εισάγεται το εύρος των παραμέτρων σχεδίασης.



Εικόνα 157 - Εύρος παραμέτρων σχεδίασης

Ως στόχος (Objective) της επαναληπτικής διαδικασίας ορίζεται η ελαχιστοποίηση της μάζας. Επιπλέον ορίζεται ως περιορισμός (Constraint) ο συντελεστής ασφαλείας να είναι μεγαλύτερος του 1,5.

Sensitivity Wizard





Criteria
Specify the algorithm criteria

Name	Value
Extrude_Distance_P3	0.03
Fillets_Radius_P6	0.005
Lower_Fillets_Radius_P7	0.0025
Offset_Distance_P1	0.019
Radius_P2	0.045

Name	Value
_1_Casted_Bracked_Original_Mass_P4	2.39058
Safety_Factor_Minimum_P5	1.96166

Name	Type	Expression	Criterion	Limit	Evaluated expression
obj__1_Casted_Bracked_Original_Mass_P4	Objective	_1_Casted_Bracked_Original_Mass_P4	MIN		2.39058
constr_Safety_Factor_Minimum_P5	Constraint	Safety_Factor_Minimum_P5	\geq	1.5	$1.96166 \geq 1.5$

Create new

 Variable  Objective  Constraint  Limit state

☐ Instant visualization

< Back **Next >** Cancel Help

Εικόνα 158 - Στόχος και Κριτήριο της επαναληπτικής διαδικασίας

Όπως και στη περίπτωση της μελέτης της γεωμετρίας No.1 και No. 2., επιλέγεται η χρήση Adaptive Sampling και συγκεκριμένα του Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis (AMOP), επιλογή η οποία θα επιτρέψει τη χρήση μεταμοντέλου στην προσομοίωση του μοντέλου.

Sensitivity Wizard

Sampling method
Specify the sampling method

Adaptive sampling

☒ Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis (AMOP)

Sampling method

☐ Full factorial

☐ Advanced Latin Hypercube Sampling

☐ Space filling Latin Hypercube Sampling

☐ Other (see next page)

< Back **Finish** Cancel Help

Εικόνα 159 - Επιλογή Adaptive Metamodel of Optimal Prognosis

3.4.6. Αποτελέσματα Τοπολογικής Βελτιστοποίησης μέσω Ansys OptiSlang

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της προσομοίωσης του πλήρους μοντέλου για τα έως 300 διαφορετικά μοντέλα με αντίστοιχα σετ γεωμετρικών παραμέτρων, που αποτελούν τα Design of Experiments. Μέσω αυτών των επαναλήψεων συλλέγεται η κατάλληλη πληροφορία που θα οδηγήσει στην ακριβέστερη κατασκευή του μεταμοντέλου και στην μελέτη χιλιάδων διαφορετικών σετ γεωμετρικών παραμέτρων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και με πολύ μικρότερη υπολογιστική ισχύ σε σχέση με τις αντίστοιχες ανάγκες που θα υπήρχαν σε περίπτωση επίλυσης του πλήρους μοντέλου για τον ίδιο αριθμό σετ γεωμετρικών παραμέτρων.

Στην 3^η στήλη περιλαμβάνεται η μάζα του κάθε μοντέλου και στην 4^η στήλη ο συντελεστής ασφαλείας. Τα κελιά με κόκκινο χρώμα υποδεικνύουν την μη ικανοποίηση του περιορισμού για συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο του 1.5, ενώ αντίστοιχα με πράσινο υποδηλώνεται η ικανοποίηση του περιορισμού αυτού. Στις επόμενες στήλες περιλαμβάνονται οι παράμετροι σχεδίασης των περιοχών αφαίρεσης υλικού.

Designable						
	Id	Status	obj_1_Casted_Bracked_Original_Mass_P4	constr_Safety_Factor_Minimum_P5	Extrude_Distance_P3	Fillets_Radius_P6
1	0.1	Failed			0.030225	0.005175
2	0.2	Succeeded	2.17044	1.82683 ≥ 1.5	0.032125	0.006425
3	0.3	Failed			0.030075	0.006825
4	0.4	Succeeded	2.07651	1.69927 ≥ 1.5	0.033625	0.006975
5	0.5	Failed			0.032725	0.007775
6	0.6	Failed			0.032175	0.009275
7	0.7	Succeeded	2.13778	1.79503 ≥ 1.5	0.034175	0.006025
8	0.8	Succeeded	2.25259	1.89804 ≥ 1.5	0.033525	0.006725
9	0.9	Failed			0.031275	0.007075
10	0.10	Failed			0.033475	0.007975
11	0.11	Succeeded	2.04267	1.60399 ≥ 1.5	0.034975	0.007725
12	0.12	Succeeded	2.32846	1.94436 ≥ 1.5	0.031725	0.009025
13	0.13	Failed			0.031125	0.006525
14	0.14	Failed			0.034125	0.008875
15	0.15	Succeeded	2.22352	1.75908 ≥ 1.5	0.031925	0.007525
16	0.16	Succeeded	2.30713	1.9297 ≥ 1.5	0.032075	0.007025
17	0.17	Succeeded	2.06376	1.78739 ≥ 1.5	0.034525	0.009575
18	0.18	Failed			0.032425	0.007275
19	0.19	Succeeded	2.26928	1.97652 ≥ 1.5	0.032975	0.009725
20	0.20	Succeeded	2.17826	1.88892 ≥ 1.5	0.033125	0.009475
21	0.21	Succeeded	2.17917	1.93054 ≥ 1.5	0.033725	0.009325
22	0.22	Failed			0.031775	0.005725
23	0.23	Succeeded	2.22412	1.8786 ≥ 1.5	0.030675	0.006675
24	0.24	Failed			0.033825	0.005425
25	0.25	Failed			0.031975	0.005075
26	0.26	Succeeded	2.27481	1.82668 ≥ 1.5	0.032275	0.005125
27	0.27	Succeeded	2.08223	1.77911 ≥ 1.5	0.033225	0.009075

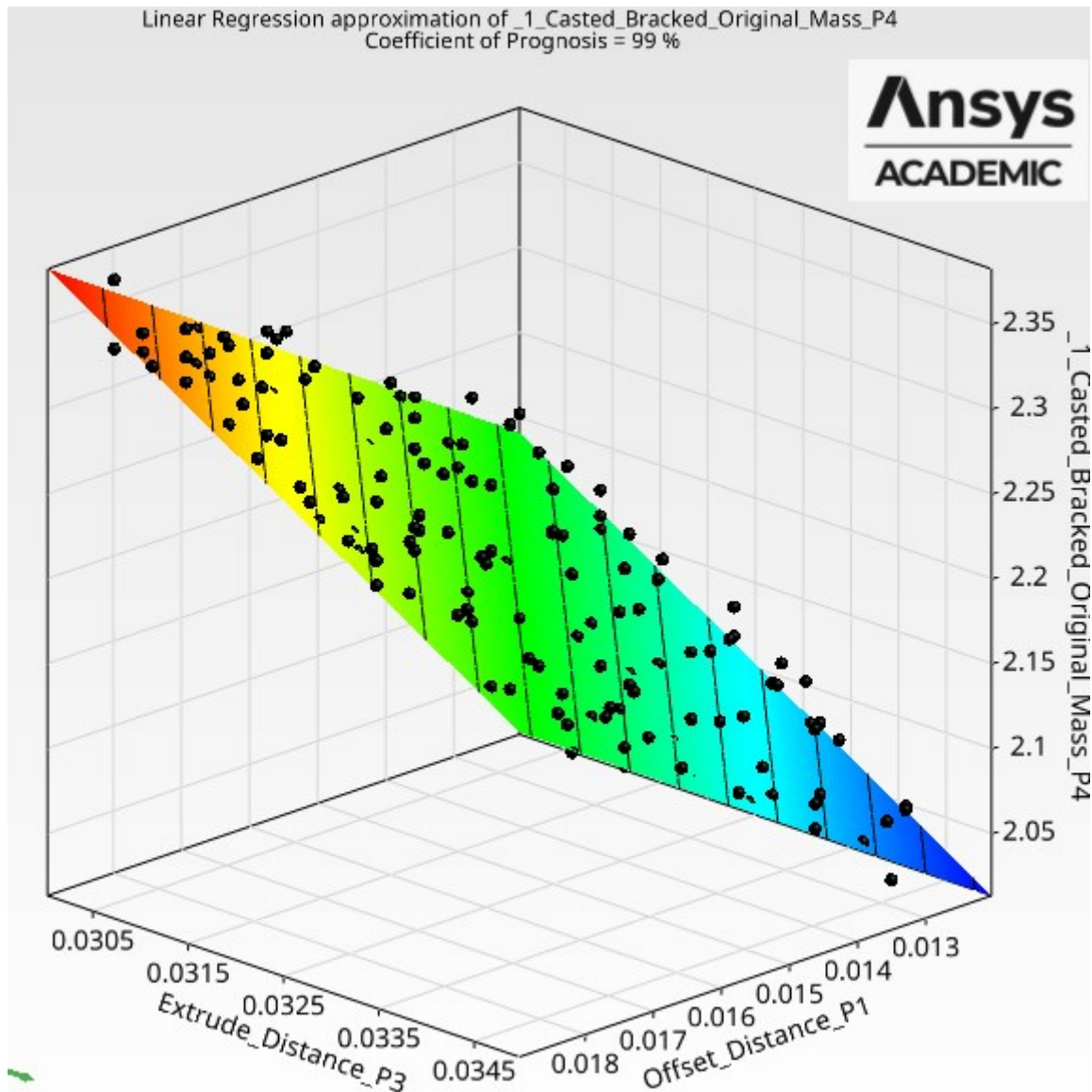
Εικόνα 160 - Αποτελέσματα επαναληπτικής διαδικασίας

Ως βέλτιστη γεωμετρία επιλέγεται αυτόματα από το Ansys OptiSlang η γεωμετρία “Design 261” με μάζα 2.0386 kg και συντελεστή ασφαλείας 1.6264.

	Id	Status	obj_1_Casted_Bracked_Original_Mass_P4	constr_Safety_Factor_Minimum_P5	Extrude_Distance_P3	Fillets_Radius_P6	Lower_Fillets_Radius_P7
261	0.261	Succeeded	2.03806	1.6264 ≥ 1.5	0.034525	0.008725	0.0039625

Εικόνα 161 - Βέλτιστη γεωμετρία

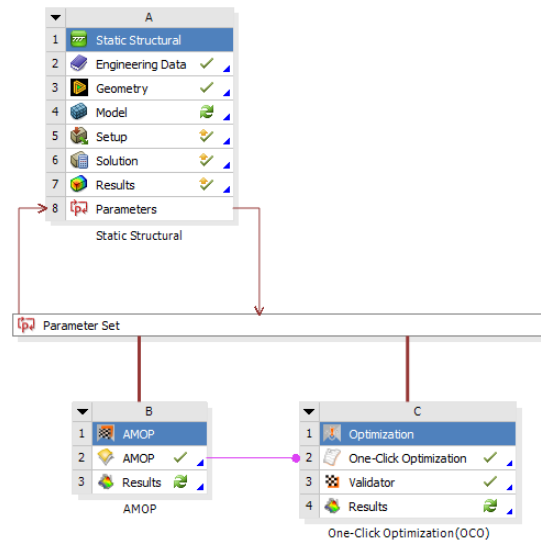
Το Ansys OptiSlang κατασκεύασε το μεταμοντέλο για τη γεωμετρία αυτή με ακρίβεια 99% για τον υπολογισμό της μάζας. Το Ansys OptiSlang αναφέρει αυτόν τον δείκτη ακρίβειας του μεταμοντέλου ως Coefficient of Prognosis (COP).



Εικόνα 162 - Coefficient of Prognosis

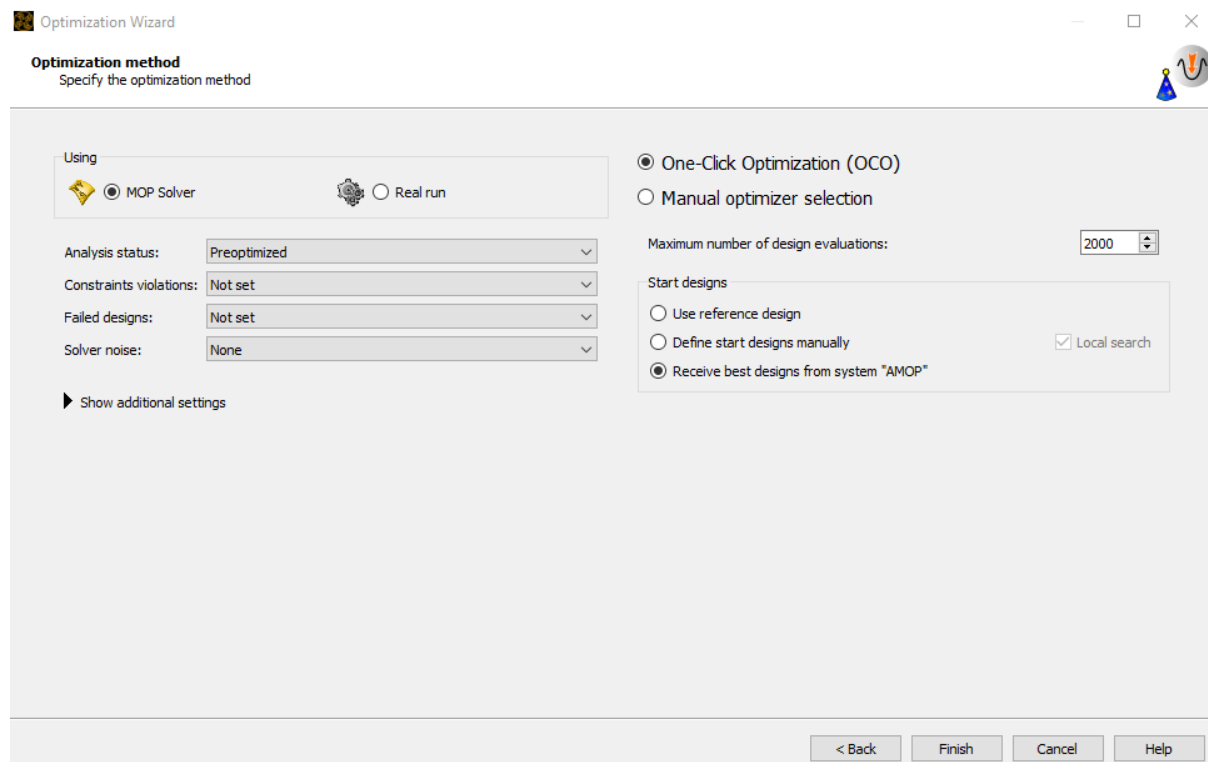
Με την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας της προσομοίωσης των Design Of Experiments, ακολουθεί η επίλυση χιλιάδων διαφορετικών σετ γεωμετρικών παραμέτρων, αξιοποιώντας το μεταμοντέλο που δημιουργήθηκε.

Στο ίδιο project εισάγεται το Module “Optimization” του Ansys OptiSlang, το οποίο δέχεται ως είσοδο τα δεδομένα που δημιουργήθηκαν κατά την επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης.



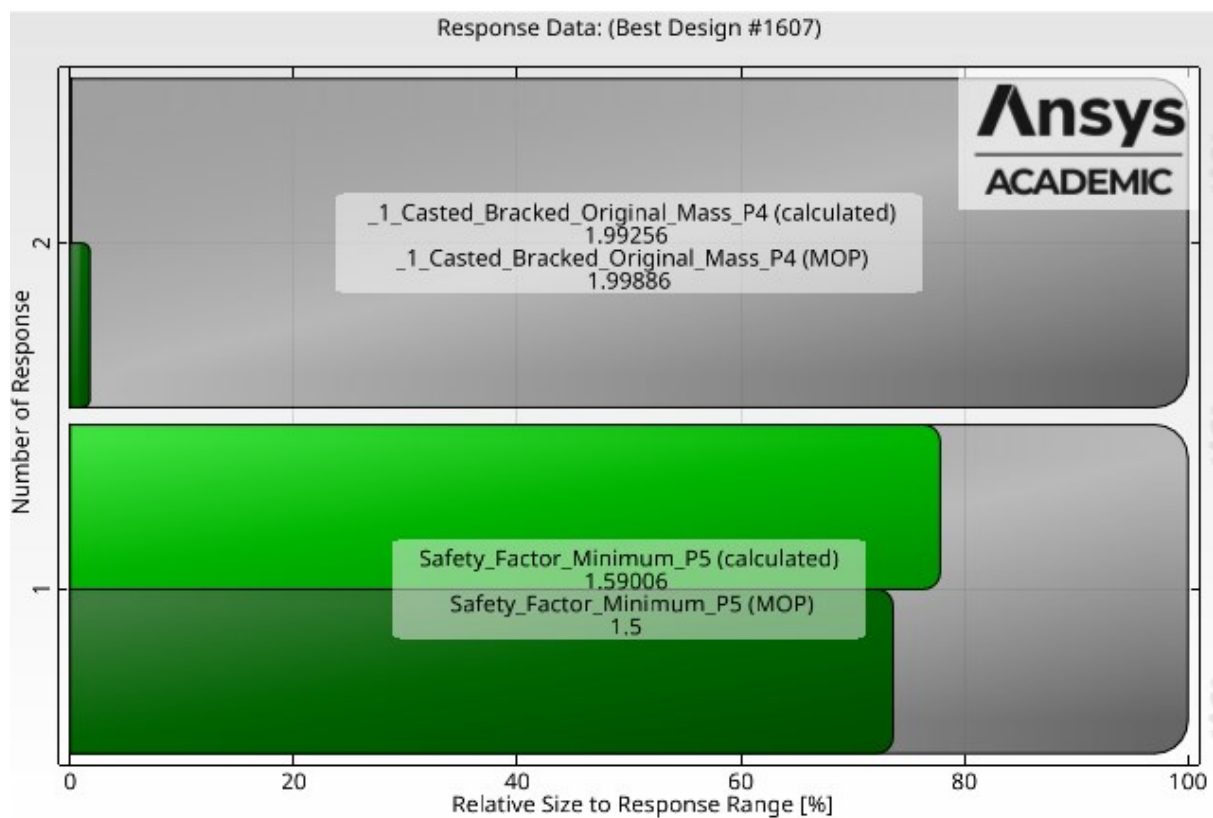
Εικόνα 163 - Optimization Module

Στις ρυθμίσεις του Optimization, επιλέγεται η χρήση των δεδομένων και της βέλτιστης γεωμετρίας από τα Design of Experiments.



Εικόνα 164 - Optimization Wizard

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας του “Validation” λαμβάνεται το ακόλουθο διάγραμμα, το οποίο επιβεβαιώνει την πολύ καλή απόδοση του μεταμοντέλου. Συγκρίνεται το αποτέλεσμα για την μάζα και τον συντελεστή ασφαλείας που εξήχθη από την επίλυση του μεταμοντέλου και του πλήρους μοντέλου αντίστοιχα.



Εικόνα 165 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & πλήρους μοντέλου

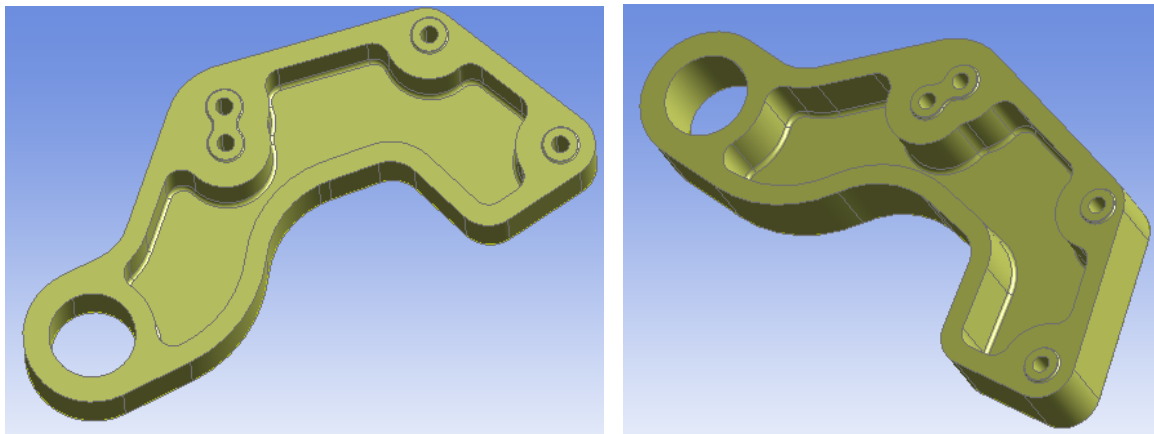
Μέγεθος	Πλήρες Μοντέλο	Μεταμοντέλο	% Απόκλιση
Μάζα (kg)	1,99256	1,99886	-0,31%
Συντελεστής Ασφαλείας	1,59006	1.5	-5,66%

Πίνακας 11 - Σύγκριση Μεταμοντέλου & Πλήρους μοντέλου

Επιβεβαιώνεται η πολύ μικρή απόκλιση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων που εξάγονται από την επίλυση του μεταμοντέλου σε σχέση με την επίλυση του πλήρους μοντέλου.

3.4.7. Τοπολογική Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία

Η τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία που εξήχθη από τη διαδικασία βελτιστοποίησης μέσω του Ansys OptiSlang είναι η παρακάτω.



Εικόνα 166 - Τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία

Ακολουθεί η σύγκριση των μεγεθών – κριτηρίων για την αρχική και την τοπολογικά βέλτιστη γεωμετρία.

Μέγεθος	Αρχική Γεωμετρία	Τοπολογικά Βέλτιστη	% Διαφορά
Μάζα (kg)	3,3699	1,99256	-40,87%
Συντελεστής Ασφαλείας	2,3132	1,59006	-31,26%

Πίνακας 12 - Σύγκριση αρχικής και τοπολογικά βέλτιστης γεωμετρίας

Ο στόχος της τοπολογικής βελτιστοποίησης επετεύχθη, δηλαδή μειώθηκε η μάζα της γεωμετρίας σημαντικά (-40,87%), διατηρώντας ταυτόχρονα τον συντελεστής ασφαλείας μεγαλύτερο του 1,5.

Επιπλέον, η γεωμετρία είναι εφικτό να παραχθεί με την παραγωγική διαδικασία της χύτευσης, καθώς οι περιοχές αφαίρεσης υλικού σχεδιάστηκαν με γνώμονα αυτόν τον περιορισμό.

4. Συμπεράσματα

Παρόλο που η πλειονότητα των επιστημονικών άρθρων που αφορούν την τοπολογική βελτιστοποίηση επικεντρώνονται στην παραγωγή με μεθόδους προσθετικής κατασκευή (Additive Manufacturing), η εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίηση σε συνδυασμό με κλασσικές μεθόδους παραγωγής είναι απολύτως εφικτή.

Ο συνδυασμός της τοπολογικής βελτιστοποίησης με κλασσικές μεθόδους παραγωγής, μπορεί να επιτρέψει τη ευρύτερη υιοθέτηση της τεχνικής αυτής σε περισσότερα εξαρτήματα-προϊόντα. Στην εργασία αυτή η τοπολογική βελτιστοποίηση συνδυάστηκε με την παραμετρική βελτιστοποίηση. Δηλαδή αφού συλλέχθηκε η πληροφορία για τις περιοχές που δύναται να αφαιρεθεί υλικό, σχεδιάστηκε η γεωμετρία παραμετρικά, ώστε η τελική-βέλτιστη γεωμετρία να εξαχθεί με μέθοδο παραμετρικής βελτιστοποίησης. Η παραμετρική βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε αξιοποιώντας το λογισμικό Ansys OptiSlang, το οποίο χρησιμοποιεί μοντέλα μειωμένης τάξης – μεταμοντέλα για τη μείωση του απαιτούμενου χρόνου και της υπολογιστικής ισχύος για την εξαγωγή της βέλτιστης γεωμετρίας.

Η ακρίβεια των μεταμοντέλων στην τρέχουσα εργασία κρίθηκε ιδιαίτερα καλή, με Coefficient of Performance άνω του 99%. Η τόσο υψηλή ακρίβεια στην κατασκευή των μεταμοντέλων αποδεικνύει την μεγάλη συμβολή του Artificial Intelligence και Machine Learning στην διαδικασία αυτή.

Μια τέτοια διαδικασία όπως αυτή που ακολουθήθηκε στην εργασία θα μπορούσε να ενσωματωθεί κατά το σχεδιασμό εξαρτημάτων και να συμβάλει στην εξαγωγή βέλτιστων γεωμετριών.

Βιβλιογραφία

1. M. T. H. Khan, S. Rezwana, (2021), A review of CAD to CAE integration with a hierarchical data format (HDF)-based solution, Journal of King Saud University – Engineering Sciences, doi: [10.1016/j.jksues.2020.04.009](https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.009)
2. P. Kurowski, (2023), Finite Element Analysis for Design Engineers, Third Edition, SAE International
3. W. A. Khan, V. Esat, M. Hammad, H. Ali, M. Q. Zafar, R. Ali, (2025), Computer Aided Engineering Design and Manufacturing, Springer.
4. R. Pidaparti, (2017), Engineering Finite Element Analysis, Morgan & Claypool Publishers
5. J. Guest, T. Igusa, (2007), Structural optimization under uncertain loads and nodal locations, Computational Methods Applied Mechanical Engineering, doi: [10.1016/j.cma.2008.04.009](https://doi.org/10.1016/j.cma.2008.04.009)
6. O. Querin, M. Victoria, C. Alonso, R. Ansola, P. Marti, (2017), Topology Design Methods for Structural Optimization, Elsevier Academic Press
7. M. P. Bendsoe, O. Sigmund, (2003), Topology Optimization Theory, Methods and Applications, Springer
8. S. Liu, Q. Li, J. Hu, W. Chen, Y. Zhang, Y. Luo, Q. Wang, (2024), A Survey of Topology Optimization Methods Considering Manufacturable Structural Feature Constraints for Additive Manufacturing Structures, Additive Manufacturing Frontiers, doi: [10.1016/j.amf.2024.200143](https://doi.org/10.1016/j.amf.2024.200143)
9. M. P. Bendsoe, N. Kikuchi, (1988), Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, doi: [10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
10. S. Oshen, J. Sethian, (1988), Fronts propagating with curvature-dependent speed: Algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations, Journal of Computational Physics, doi: [10.1016/0021-9991\(88\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0021-9991(88)90002-2)
11. Y.M. Xie, G.P. Steven, (1993), A simple evolutionary procedure for structural optimization, Computers & Structures, doi: [10.1016/0045-7949\(93\)90035-C](https://doi.org/10.1016/0045-7949(93)90035-C)
12. S. Junk, L. Burkart, (2021), Comparison of CAD systems for generative design for use with additive manufacturing, CIRP Design Conference, doi: [10.1016/j.procir.2021.05.126](https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.126)
13. J. Srivastava, Dr. H. Kawakami, (2023), Systematic Review of Difference Between Topology Optimization and Generative Design, IFAC Papers, doi: [10.1016/j.ifacol.2023.10.307](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.307)
14. A. N. Pilagati, E. Atzeni, A. Salmi, (2022), Exploiting the generative design potential to select the best conceptual design of an aerospace component to be produced by additive manufacturing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, doi: [10.1007/s00170-023-11259-7](https://doi.org/10.1007/s00170-023-11259-7)
15. J. Coulthard, C. J. Wang, (2022), Generative Design and Topology Optimisation of Products for Additive Manufacturing, Advances in Manufacturing Technology, doi: [10.3233/ATDE220570](https://doi.org/10.3233/ATDE220570)
16. Q. Fossier, (2025), Efficacy of Generative Design and Topology Optimization Compared to Traditional Design Processes Using the Case Study of a Cantilevered Beam, 2025 IL-IN Section conference
17. D. Vlah, R. Zavdi, N. Vukasinovic, (2020), Evaluation of Topology Optimization and Generative Design Tools as Support for Conceptual Design, International Design Conference, doi: [10.1017/dsd.2020.165](https://doi.org/10.1017/dsd.2020.165)
18. K. G. Swift, J. D. Booker, (2013), Manufacturing Process Selection Handbook, Elsevier
19. G. Ringer, T. Wel, S. M. Breivik, (2022), Rapid Manufacturing of Die-casting Tools – a Case Study, Procedia CRP, doi: [10.1016/j.procir.2022.05.192](https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.192)

20. H. S. Chandu, (2024), A Review on CNC Machine Tool Materials and Their Impact on Machining Performance, International Journal of Current Engineering and Technology, doi: [10.14741/ijcet/v.14.5.4](https://doi.org/10.14741/ijcet/v.14.5.4)
21. D. A. Molitor, A. Kokozinski, C. Kubic, V. Arne, C. Veitenheimer, R. Kramer, P. Groche, (2025), Identifying productivity-limiting factors in progressive die stamping: data-driver methodology for process optimization, Production Engineering, doi: [10.1007/s11740-024-01328-5](https://doi.org/10.1007/s11740-024-01328-5)
22. S. Priyadarshi, P. S. Chauha, R. P. Singh, (2020), Design and Analysis of Progressive Die for Manufacturing the Gasket Part, Advances in Industrial Automation and Smart Manufacturing, doi: [10.1007/978-981-15-4739-3_12](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4739-3_12)
23. K. Liu, J. Shi, Xi. Shang, (2015), An Automatic Process Monitoring Method Using Recurrence Plot in Progressive Stamping Process, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, doi: [10.1109/TASE.2015.2468058](https://doi.org/10.1109/TASE.2015.2468058)
24. Y. Yang, S. Hinduja, (2022), Sequence planning of sheet metal parts manufactured using progressive die, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, doi: [10.1007/s00170-022-10389-8](https://doi.org/10.1007/s00170-022-10389-8)
25. V. Kumar, D. Ramegowda, (2015), Design of Progressive Press Tool for an Alpha meter Component, International Journal of Research in Engineering and Technology
26. J. Praneeth, S. Venkatesh, L. S. Krishna, (2023), A Review on Additive Manufacturing Processes, E3S Web of Conferences, doi: [10.1051/e3sconf/202343001282](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343001282)
27. K. Kanishka, B. Acherjee, (2023), Revolutionizing manufacturing: A comprehensive overview of additive manufacturing processes, materials, developments and challenges, Journal of Manufacturing Processes, doi: [10.1016/j.jmapro.2023.10.024](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.024)
28. G. Padula, M. Girfoglio, G. Rozza, (2024), A brief review of reduced order models using intrusive and non-intrusive techniques, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, doi: [10.1002/pamm.202400210](https://doi.org/10.1002/pamm.202400210)
29. H. Khatouri, T. Benamara, P. Breitkopf, J. Demange, (2022), Metamodeling techniques for CPU-intensive simulation-based design optimization: a survey, Advanced Metamodeling and Simulation in Engineering Sciences, doi: [10.1186/s40323-022-00214-y](https://doi.org/10.1186/s40323-022-00214-y)
30. F. Duddeck, (2008), Multidisciplinary optimization of car bodies, Structural Multidisciplinary Optimization, doi: [10.1007/s00158-007-0130-6](https://doi.org/10.1007/s00158-007-0130-6)
31. C. Czech, M. Lesjak, C. Bach, F. Duddeck, (2022), Data-driven models for crashworthiness optimization: intrusive and non-intrusive model order reduction techniques, Structural and Multidisciplinary Optimization, doi: [10.1007/s00158-022-03282-1](https://doi.org/10.1007/s00158-022-03282-1)
32. T. Most, J. Will, (2024), Recent advances in Meta-model of Optimal Prognosis.
33. Ansys OptiSlang Documentation, Ansys Inc.
34. G. Volpe, M. Villani, G. Fabri, L. D. Leonardo, (2019), Design Analysis of a High Speed Copper Rotor Induction motor for a Traction Application, Conference Paper.
35. [Simutech Group Website](https://www.simutechgroup.com/)
36. A.I.R. Prathyusha, G. R. Babu, (2022), A review on additive manufacturing and topology optimization process for weight reduction studies in various industrial applications, Materials Today, doi: [10.1016/j.matpr.2022.02.604](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.604)
37. J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, W. Zhang, (2021), A review on topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges, Chinese Journal of Aeronautics, doi: [10.1016/j.cja.2020.09.020](https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020)
38. I. Ntintakis, G.E. Stavroulakis, N. Plakia, (2020), Topology Optimization by the use of 3D Printing in the Product Design Process, HighTech and Innovation Journal, Vol. 1, No.4, doi: [10.28991/HIJ-2020-01-04-03](https://doi.org/10.28991/HIJ-2020-01-04-03)

39. F. Netsanet, (2020), Topology Optimization of Automotive Sheet Metal Part using Altair Inspire, International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS) Vol. 5. (2020). No. 3, doi: [10.21791/IJEMS.2020.3.15](https://doi.org/10.21791/IJEMS.2020.3.15)
40. M. Tomlin, (2011), Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part, doi: [10.1016/j.matpr.2022.02.074](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.074)
41. Q. Zhao, X. Chen, L. Wang, J. Zhu, Z. Ma, Y. Lin, (2015), Simulation and experimental validation of powertrain mounting bracket design obtained from multi-objective topology optimization, Advances in Mechanical Engineering, doi: [10.1177/1687814015591317](https://doi.org/10.1177/1687814015591317)