



*Department of Mechanical  
Engineering*  
University of Western Macedonia

## **Διπλωματική Εργασία**

**Ο Γενεσιουργός Σχεδιασμός Ως Εργαλείο Παραγωγής Ιδεών Στον  
Μηχανολογικό Σχεδιασμό**

Generative Design as Idea Creation Tool in Mechanical Design

**Ιωάννα Κακαράντζα**

Επιβλέπων Καθηγητής: **Ηρακλής Χατζηπαρασίδης**

Κοζάνη, Ιούλιος 2024



## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια με την εξέλιξη των τεχνολογιών της προσθετικής κατασκευής έχει δοθεί ευκαιρία ανάδειξης και ανάπτυξης των μεθόδων βελτιστοποίησης. Μια από αυτές τις μεθόδους αποτελεί και ο γενεσιουργός σχεδιασμός. Είναι μια επαναληπτική διαδικασία η οποία είναι εμπνευσμένη από την φυσική εξέλιξη, βασίζεται στους γενετικούς αλγορίθμους και στην τεχνητή νοημοσύνη. Μέσω αυτής παράγεται ένα πλήθος σχεδίων, τα οποία πληρούν τα κριτήρια και τους περιορισμούς που έχει καθορίσει ο σχεδιαστής. Οι σχεδιαστικές λύσεις που παράγονται έχουν περίπλοκες γεωμετρίες και δεν θα ήταν εφικτό να επιτευχθούν με κοινές μεθόδους σχεδιασμού από έναν σχεδιαστή.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του γενεσιουργού σχεδιασμού, οι εφαρμογές του στην βιομηχανία και η συμβολή του στην ανάπτυξη μηχανολογικών προϊόντων. Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί η χρήση της μεθόδου ως εργαλείο παραγωγής ιδεών στον μηχανολογικό σχεδιασμό. Έως τώρα κύρια εφαρμογή της μεθόδου αποτελούν οι τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης που επιτρέπουν την κατασκευή εξαρτημάτων με περίπλοκα σχήματα. Παρ' όλα αυτά αυτές οι τεχνολογίες πέρα από τα οφέλη που έχουν, εμφανίζουν αρκετά κατασκευαστικά σφάλματα και το κόστος τους είναι υψηλό. Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας αναλύονται αυτά τα σφάλματα και παρουσιάζονται μοντέλα για τον υπολογισμό του κόστους κατασκευής. Έπειτα, γίνεται αναφορά της πρότασης χρήσης του γενεσιουργού σχεδιασμού για την κατασκευή αντικειμένων με κλασσικές μεθόδους με στόχο την μείωση του κόστους των εξαρτημάτων. Για τον σκοπό αυτό, αναφέρονται μοντέλα κόστους των συμβατικών μεθόδων και παρατίθεται συγκριτική μελέτη κατασκευής καλουπιού με μέθοδο αφαίρεσης υλικού και τρισδιάστατης εκτύπωσης. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τέσσερις μελέτες περίπτωσης κατά τις οποίες γίνεται ανασχεδιασμός αντικειμένων που παρήχθησαν μέσω της μεθόδου του γενεσιουργού σχεδιασμού. Κάθε παράδειγμα ανασχεδιάζεται έχοντας ως οδηγό το αποτέλεσμα του γενεσιουργού σχεδιασμού και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι θα κατασκευαστεί με συμβατικές μεθόδους. Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση του κόστους κάθε εξαρτήματος ως προς την κατασκευαστική μέθοδο. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και παρατίθεται προτεινόμενο διάγραμμα διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος.

**Λέξεις – Κλειδιά:** Γενεσιουργός Σχεδιασμός, Προσθετική Κατασκευή, Συμβατικές μέθοδοι κατασκευής, Μέθοδοι Βελτιστοποίησης, Τεχνητή Νοημοσύνη





## **Abstract**

In recent years, with the evolution of additive manufacturing technologies, there has been an opportunity for the emergence and development of optimization methods. One of these methods is generative design. It is an iterative process inspired by natural evolution, based on genetic algorithms and artificial intelligence. Through this process, a multitude of designs are generated, meeting the criteria and constraints set by the designer. The design solutions produced have complex geometries that would not be achievable with common design methods by a designer.

In the first chapter of this thesis presents the basic principles of generative design, its applications in the industry, and its contribution to the development of mechanical products. The purpose of the study is to investigate the use of the method as a tool for generating ideas in mechanical design. Until now, the main application of the method has been in 3d printing technologies, which allow the construction of parts with complex shapes. However, these technologies, despite their benefits, also exhibit several manufacturing errors, and their cost is high. In the second chapter of the thesis, these errors are analyzed, and models for calculating manufacturing costs are presented. Subsequently, the proposal for using generative design for the construction of objects with conventional methods to reduce the cost of parts is discussed. For this purpose, cost models of conventional methods are mentioned, and a comparative study of mold manufacturing with material removal method and 3d printing is provided. The third chapter presents four case studies in which the redesign of objects produced through the generative design method is carried out. Each example is redesigned with the result of generative design as a guide, considering that it will be manufactured with conventional methods. Following this, the cost of each part is compared concerning the manufacturing method. In the fourth chapter, the conclusions of the thesis are presented, and a proposed product development process diagram is provided.

**Keywords:** Generative Design, Additive Manufacturing, Conventional Manufacturing Methods, Optimization Methods, Artificial Intelligence

## Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο ‘Ο Γενεσιουργός Σχεδιασμός Ως Εργαλείο Παραγωγής Ιδεών Στον Μηχανολογικό Σχεδιασμό’, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του κ. Ηρακλή Χατζηπαρασίδη, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Ηρακλή Χατζηπαρασίδη, για την συνεργασία μας και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη της καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, τους φίλους μου και το αγόρι μου που με βοήθησαν να ξεπεράσω κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την μαμά μου, Ελένη, που ήταν και είναι πάντα δίπλα μου.



## Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων .....	3
Κατάλογος Πινάκων.....	7
Κεφάλαιο 1ο – Εισαγωγή.....	9
1.1 Ιστορική Αναδρομή .....	10
1.2 Εφαρμογές του γενεσιουργού σχεδιασμού .....	11
1.3 Ο γενεσιουργός σχεδιασμός ως εργαλείο για την ανάπτυξη προϊόντων .....	15
1.4 Λογισμικά και βασικές αρχές του γενεσιουργού σχεδιασμού.....	16
1.4.1 Λογισμικά σχεδίασης.....	16
1.4.2 Βασικές αρχές του γενεσιουργού σχεδιασμού με την χρήση του λογισμικού Fusion 360.....	18
1.5 Αντιπαράθεση και σύγκριση των μεθόδων της τοπολογικής βελτιστοποίησης και του γενεσιουργού σχεδιασμού.....	25
Κεφάλαιο 2ο – Τα οφέλη και οι προκλήσεις του γενεσιουργού σχεδιασμού .....	31
2.1 Τα πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής σε συνδυασμό με τον γενεσιουργό σχεδιασμό.....	31
2.1.1 Κατηγορίες της προσθετικής κατασκευής .....	32
2.2 Τα μειονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής .....	34
2.3 Πρόταση χρήσης του γενεσιουργού σχεδιασμού για κατασκευή αντικειμένων με κλασσικές μεθόδους.....	42
2.3.1 Μοντέλα κόστους για την μέθοδο της προσθετικής κατασκευής και των μηχανουργικών κατεργασιών.....	43
2.3.2 Συγκριτική μελέτη κατασκευής καλουπιού με μέθοδο αφαίρεσης υλικού και τρισδιάστατης εκτύπωσης.....	45
Κεφάλαιο 3ο – Μελέτες Περίπτωσης.....	51
3.1 Μηχανικό πεντάλ.....	51
3.1.1 Μελέτη γενεσιουργού σχεδιασμού – Μηχανικό πεντάλ.....	52
3.1.2 Ανασχεδιασμός εξαρτήματος – Μηχανικό πεντάλ .....	53
3.1.3 Έλεγχος αντοχής ανασχεδιασμένου εξαρτήματος – Μηχανικό πεντάλ.....	55
3.2 Στήριγμα .....	56
3.2.1 Μελέτη γενεσιουργού σχεδιασμού – Στήριγμα .....	56
3.2.2 Ανασχεδιασμός εξαρτήματος – Στήριγμα.....	59
3.2.3 Έλεγχος αντοχής outcome – Στήριγμα .....	60

3.2.4 Έλεγχος αντοχής ανασχεδιασμένου εξαρτήματος – Στήριγμα .....	62
3.2.5 Σύγκριση κόστους εξαρτημάτων – Στήριγμα .....	64
3.3 Εξάρτημα συγκράτησης.....	64
3.3.1 Μελέτη γενεσιουργού σχεδιασμού – Εξάρτημα συγκράτησης.....	65
3.3.2 Ανασχεδιασμός εξαρτήματος – Εξάρτημα συγκράτησης.....	68
3.3.3 Έλεγχος αντοχής outcome – Εξάρτημα συγκράτησης.....	70
3.3.4 Έλεγχος αντοχής ανασχεδιασμένου εξαρτήματος – Εξάρτημα συγκράτησης .....	72
3.3.5 Σύγκριση κόστους εξαρτημάτων – Εξάρτημα συγκράτησης.....	74
3.4 Βάση .....	74
3.4.1 Μελέτη γενεσιουργού σχεδιασμού – Βάση .....	74
3.4.2 Ανασχεδιασμός εξαρτήματος – Βάση.....	77
3.4.3 Έλεγχος αντοχής outcome – Βάση.....	79
3.4.4 Έλεγχος αντοχής ανασχεδιασμένου εξαρτήματος – Βάση .....	81
3.4.5 Σύγκριση κόστους εξαρτημάτων – Βάση .....	83
Κεφάλαιο 4ο – Συμπεράσματα.....	85
Βιβλιογραφία .....	89

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Εκδοχές εξαρτήματος [2].....	9
Εικόνα 2: Αποτελέσματα του γενεσιουργού σχεδιασμού για διαφορετικές μεθόδους κατασκευής [3].....	10
Εικόνα 3: Εξάρτημα συστήματος ανάρτησης [4].....	10
Εικόνα 4: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης για διαχωριστικό της Airbus [10].....	12
Εικόνα 5: Ψηφιακή απεικόνιση διαχωριστικού της Airbus [11].....	12
Εικόνα 6: Space Exploration Lander [13].....	13
Εικόνα 7: Βραχίονας τοποθέτησης ζωνών ασφαλείας καθίσματος [15].....	14
Εικόνα 8: Σχέδιο ψαλιδιού για το μοντέλο LS218 [16].....	14
Εικόνα 9: Διάγραμμα ροής διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος [18].....	15
Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος με τη χρήση του γενεσιουργού σχεδιασμού [18].....	16
Εικόνα 11: Διαδικασία εκτέλεσης μεθόδου [20].....	19
Εικόνα 12: Preserved areas.....	20
Εικόνα 13: Obstacles.....	20
Εικόνα 14: Constraints.....	21
Εικόνα 15: Loads.....	21
Εικόνα 16: Objectives and limits.....	22
Εικόνα 17: Study Materials.....	22
Εικόνα 18: Manufacturing.....	23
Εικόνα 19: Outcomes.....	24
Εικόνα 20: Επιλογή βέλτιστου σχεδίου.....	25
Εικόνα 21: Διάγραμμα ροής εργασιών της τοπολογικής βελτιστοποίησης [23].....	26
Εικόνα 22: Παράδειγμα εφαρμογής της τοπολογικής βελτιστοποίησης [24].....	27
Εικόνα 23: Έλεγχος ανασχεδιασμένου μοντέλου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων [24].....	27
Εικόνα 24: Παράδειγμα εφαρμογής του γενεσιουργού σχεδιασμού [24].....	28
Εικόνα 25: Electron Beam Melting (EBM) [27].....	33
Εικόνα 26: Selective Laser Melting (SLM) [28].....	33

Εικόνα 27: Selective Laser sintering (SLS) [29].....	33
Εικόνα 28: Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [27] .....	34
Εικόνα 29: Υποστηρικτικές δομές για την επίτευξη εκτύπωσης της γεωμετρίας [30] .....	35
Εικόνα 30: Αποκόλληση εξαρτήματος από τις υποστηρικτικές δομές [31].....	35
Εικόνα 31: Αποτελέσματα ηλεκτρονικής τομογραφίας σε δείγμα Ti-6Al-4V (Εγκλωβισμός πορώδους, μη ενοποιημένης σκόνης και έλλειψη σύντηξης) [32] .....	36
Εικόνα 32: Μορφολογία ρωγμής κατά την κατασκευή εξαρτήματος τιτανίου με την μέθοδο SLM [34] .....	36
Εικόνα 33: Σχηματισμός Ρωγμών [31].....	37
Εικόνα 34: Η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας στην εμφάνιση του "Balling" κατά την διάρκεια εκτύπωσης Laser-Powder Bed Fusion [35].....	37
Εικόνα 35: Ρωγμές εξαιτίας παραμενουσών τάσεων [31].....	38
Εικόνα 36: Εμφάνιση του φαινομένου του σκαλοπατιού [36].....	38
Εικόνα 37: Ποιότητα επιφάνειας πτερυγίου τρισδιάστατης εκτύπωσης [38] .....	39
Εικόνα 38: Παράδειγμα αστοχίας - Κύρτωση προεξοχής [31] .....	41
Εικόνα 39: Έμμεσα κόστη [41] .....	43
Εικόνα 40: Σύγκριση κόστους για αντίγραφα του ίδιου αντικειμένου και διαφορετικών αντικειμένων [43] .....	44
Εικόνα 41: Τα επαναλαμβανόμενα και μη κόστη του High Speed Machining και του Additive Manufacturing [46].....	44
Εικόνα 42: Καλούπι από ανοξείδωτο χάλυβα [43] .....	46
Εικόνα 43: Τελικό αντικείμενο από σύνθετα υλικά [43] .....	46
Εικόνα 44: Συναρμολόγημα καλουπιού προς εκτύπωση [43].....	47
Εικόνα 45: Εξαρτήματα συναρμολογήματος καλουπιού [43] .....	47
Εικόνα 46: Τελική μορφή καλουπιού μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης [43].....	47
Εικόνα 47: Διαστασιολογική ανάλυση ενός τμήματος του καλουπιού [43] .....	48
Εικόνα 48: Συναρμολόγημα – Μηχανικό πεντάλ [49] .....	52
Εικόνα 49: Ορίσματα μελέτης Generative Design – Μηχανικό πεντάλ [49].....	52
Εικόνα 50: Outcome – Μηχανικό πεντάλ [49].....	53
Εικόνα 51: Ανασχεδιασμός Μηχανικού πεντάλ [49] .....	54
Εικόνα 52: Εναλλακτικός σχεδιασμός Μηχανικού πεντάλ.....	54
Εικόνα 53: Exploded View – Εναλλακτικός σχεδιασμός Μηχανικού πεντάλ.....	55



Εικόνα 54: Κατανομή τάσεων ανασχεδιασμένου Μηχανικού πεντάλ [49] .....	55
Εικόνα 55: Preserved areas – Στήριγμα .....	56
Εικόνα 56: Obstacles – Στήριγμα .....	57
Εικόνα 57: Loads & Constraints – Στήριγμα .....	57
Εικόνα 58: Outcome Στήριγμα – Όψη 1 .....	58
Εικόνα 59: Outcome Στήριγμα – Όψη 2 .....	58
Εικόνα 60: Ανασχεδιασμός Στηρίγματος.....	59
Εικόνα 61: Exploded View – Ανασχεδιασμός Στηρίγματος.....	60
Εικόνα 62: Κατανομή τάσεων outcome Στηρίγματος.....	60
Εικόνα 63: Διάγραμμα μετατόπισης outcome Στηρίγματος .....	61
Εικόνα 64: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας outcome Στηρίγματος.....	62
Εικόνα 65: Κατανομή τάσεων ανασχεδιασμένου Στηρίγματος.....	62
Εικόνα 66: Διάγραμμα μετατόπισης ανασχεδιασμένου Στηρίγματος.....	63
Εικόνα 67: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας ανασχεδιασμένου Στηρίγματος .....	64
Εικόνα 68: Preserved areas – Εξάρτημα συγκράτησης.....	65
Εικόνα 69: Obstacles – Εξάρτημα συγκράτησης .....	65
Εικόνα 70: Starting Shape – Εξάρτημα συγκράτησης .....	66
Εικόνα 71: Loads & Constraints – Εξάρτημα συγκράτησης.....	67
Εικόνα 72: Outcome Εξαρτήματος συγκράτησης – Όψη 1 .....	67
Εικόνα 73: Outcome Εξαρτήματος συγκράτησης – Όψη 2 .....	68
Εικόνα 74: Ανασχεδιασμός Εξαρτήματος συγκράτησης .....	68
Εικόνα 75: Exploded View – Ανασχεδιασμός Εξαρτήματος συγκράτησης / Όψη 1.....	69
Εικόνα 76: Exploded View – Ανασχεδιασμός Εξαρτήματος συγκράτησης / Όψη 2.....	69
Εικόνα 77: Κατανομή τάσεων outcome Εξαρτήματος συγκράτησης .....	70
Εικόνα 78: Διάγραμμα μετατόπισης outcome Εξαρτήματος συγκράτησης.....	71
Εικόνα 79: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας outcome Εξαρτήματος συγκράτησης .....	71
Εικόνα 80: Κατανομή τάσεων ανασχεδιασμένου Εξαρτήματος συγκράτησης .....	72
Εικόνα 81: Διάγραμμα μετατόπισης ανασχεδιασμένου Εξαρτήματος συγκράτησης .....	73
Εικόνα 82: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας ανασχεδιασμένου Εξαρτήματος συγκράτησης .....	73
Εικόνα 83: Preserved Areas – Βάση .....	74

Εικόνα 84: Obstacles – Βάση .....	75
Εικόνα 85: Starting Shape – Βάση .....	75
Εικόνα 86: Loads & Constraints – Βάση .....	76
Εικόνα 87: Outcome Βάση – Όψη 1 .....	77
Εικόνα 88: Outcome Βάση – Όψη 2 .....	77
Εικόνα 89: Ανασχεδιασμός Βάση – Όψη 1 .....	78
Εικόνα 90: Ανασχεδιασμός Βάση – Όψη 2 .....	78
Εικόνα 91: Κατανομή τάσεων outcome Βάση .....	79
Εικόνα 92: Διάγραμμα μετατόπισης outcome Βάση .....	80
Εικόνα 93: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας outcome Βάση .....	80
Εικόνα 94: Κατανομή τάσεων ανασχεδιασμένου Βάση .....	81
Εικόνα 95: Διάγραμμα μετατόπισης ανασχεδιασμένου Βάση .....	82
Εικόνα 96: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας ανασχεδιασμένου Βάση .....	82
Εικόνα 97: Προτεινόμενη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος .....	87

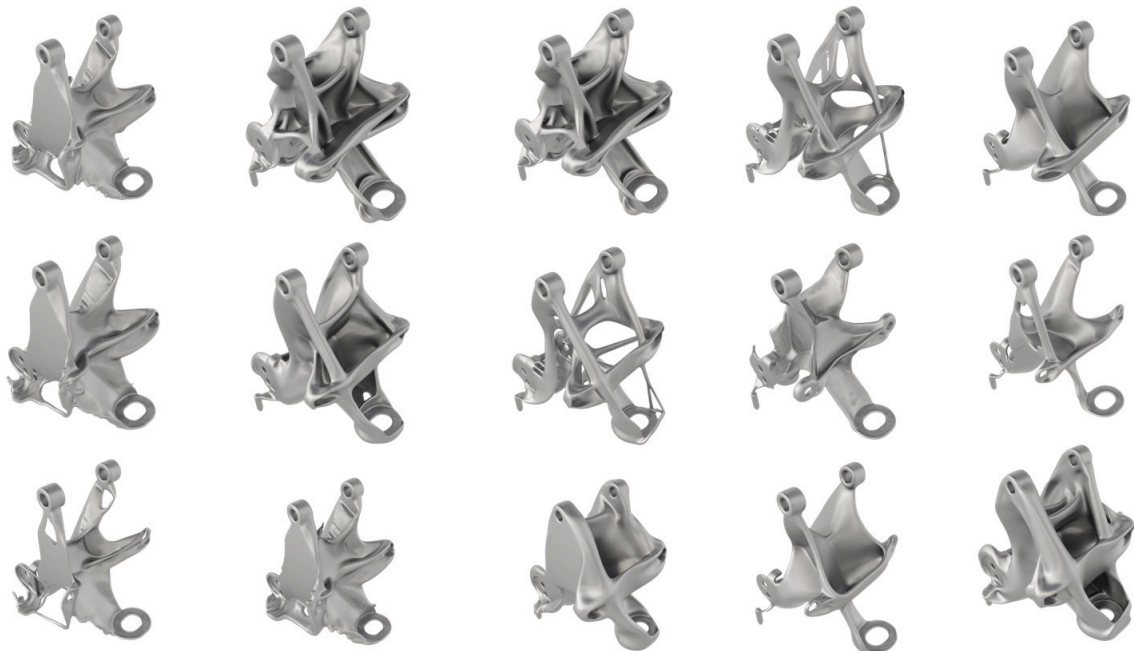
## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση απαιτήσεων και δυνατοτήτων της Τοπολογικής Βελτιστοποίησης και του Γενεσιουργού Σχεδιασμού .....	28
Πίνακας 2: Κόστη μεθόδου αφαίρεσης υλικού [43] .....	49
Πίνακας 3: Κόστη τρισδιάστατης εκτύπωσης [43] .....	50



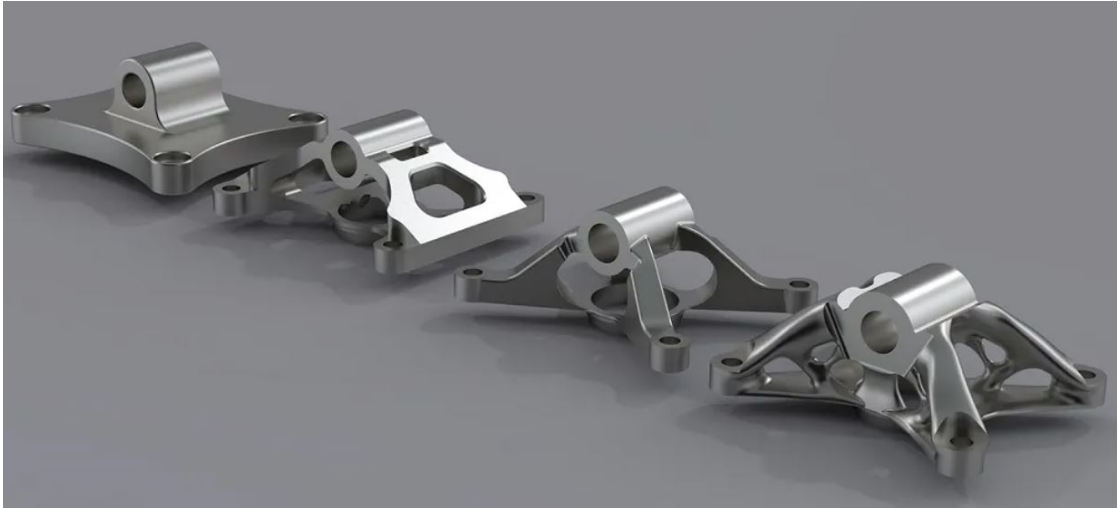
## Κεφάλαιο 1ο – Εισαγωγή

Ο γενεσιουργός σχεδιασμός (Generative Design) είναι μια μέθοδος σχεδιασμού μέσω της οποίας παράγεται ένα σύνολο σχεδίων που πληρούν τα προκαθορισμένα κριτήρια του σχεδιαστή [1]. Είναι μια επαναληπτική διαδικασία που χρησιμοποιεί αλγορίθμους και τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence) και πραγματοποιείται μέσω ενός λογισμικού σχεδίασης. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στους σχεδιαστές να εξερευνούν ένα πλήθος επιλογών, να τις αξιολογούν και να τις βελτιώνουν βασιζόμενοι σε συγκεκριμένες απαιτήσεις, όπως την λειτουργικότητα, την απόδοση και την αισθητική.



Εικόνα 1: Εκδοχές εξαρτήματος [2]

Ο εκάστοτε σχεδιαστής ορίζει τα κριτήρια σχεδιασμού, διάφορες παραμέτρους και περιορισμούς σχετικά με την μέθοδο κατασκευής, τα φορτία, το υλικό, χωρίς όμως να απαιτείται η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου γεωμετρικού μοντέλου. Η διαδικασία που ακολουθείται επαναλαμβάνεται έως ότου όλοι οι περιορισμοί να ικανοποιούνται και οι δυνατές λύσεις να έχουν εξαντληθεί. Μέσω αυτής προκύπτουν λύσεις που δεν θα ήταν εφικτό να πετύχει ο σχεδιαστής με κοινές μεθόδους σχεδιασμού. Ακόμη, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους και τεχνητή νοημοσύνη επιταχύνεται η σχεδιαστική διαδικασία εξοικονομώντας χρόνο και πόρους.



Εικόνα 2: Αποτελέσματα του γενεσιουργού σχεδιασμού για διαφορετικές μεθόδους κατασκευής [3]



Εικόνα 3: Εξάρτημα συστήματος ανάρτησης [4]

## 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Ο γενεσιουργός σχεδιασμός είναι εμπνευσμένος από την φυσική εξέλιξη και βασίζεται σε γενετικούς αλγόριθμους. Οι έρευνες για τον γενεσιουργό σχεδιασμό ξεκίνησαν στις αρχές του 1970. Αρχικά, μεγάλο ενδιαφέρον υπήρξε στον τομέα της αρχιτεκτονικής όπου πρώτος ο Frazer [5] παρουσίασε την εισαγωγή τέτοιων συστημάτων στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Μετέπειτα, ερευνητές και από άλλους τομείς ξεκίνησαν να ερευνούν τις πιθανές δυνατότητες και εφαρμογές της. Στον τομέα του μηχανολογικού σχεδιασμού, ο Sándor Vajna [6] εισήγαγε τη θεωρία του αυτογενετικού σχεδιασμού, όπου διερεύνησε τις ομοιότητες της διαδικασίας σχεδιασμού ως μέρος της ανάπτυξης ενός προϊόντος και της φυσικής διαδικασίας

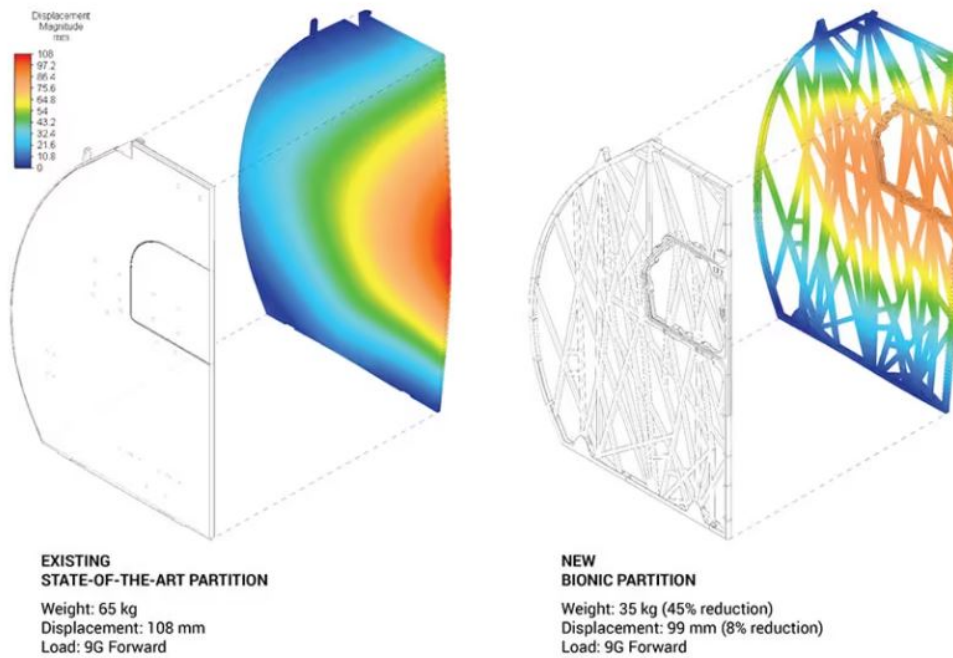
της εξέλιξης. Υποστηρίζει ότι η διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων μπορεί να περιγραφεί ως μια συνεχής βελτιστοποίηση μιας βασικής λύσης με την τήρηση των αρχικών συνθηκών, των οριακών συνθηκών και των περιορισμών. Στα τέλη της δεκαετίας του 1970, ο William J. Mitchell [7] αναφέρθηκε στον γενεσιουργό σχεδιασμό ως ένα σύστημα ικανό να παράγει πιθανές λύσεις σε ένα δεδομένο πρόβλημα. Αργότερα στις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα, ο Thomas Fischer και ο Christiane Herr [8] όρισαν τον γενεσιουργό σχεδιασμό ως μια μεθοδολογία κατά την οποία ο σχεδιαστής δεν αλληλεπιδρά άμεσα με τα υλικά και τα προϊόντα, αλλά μέσω ενός συστήματος παραγωγής. Τέλος, ο Fakhri Bukhari [9] ανέφερε ότι τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν αλγορίθμους για να παράγουν διαφορετικές λύσεις βασιζόμενοι σε ένα πεδίο σχεδιαστικών στόχων και περιορισμών. Μέχρι σήμερα, δεν έχει δοθεί κάποιος σαφής ορισμός του γενεσιουργού σχεδιασμού λόγω του αρκετά μεγάλου πεδίου εφαρμογής του.

## 1.2 Εφαρμογές του γενεσιουργού σχεδιασμού

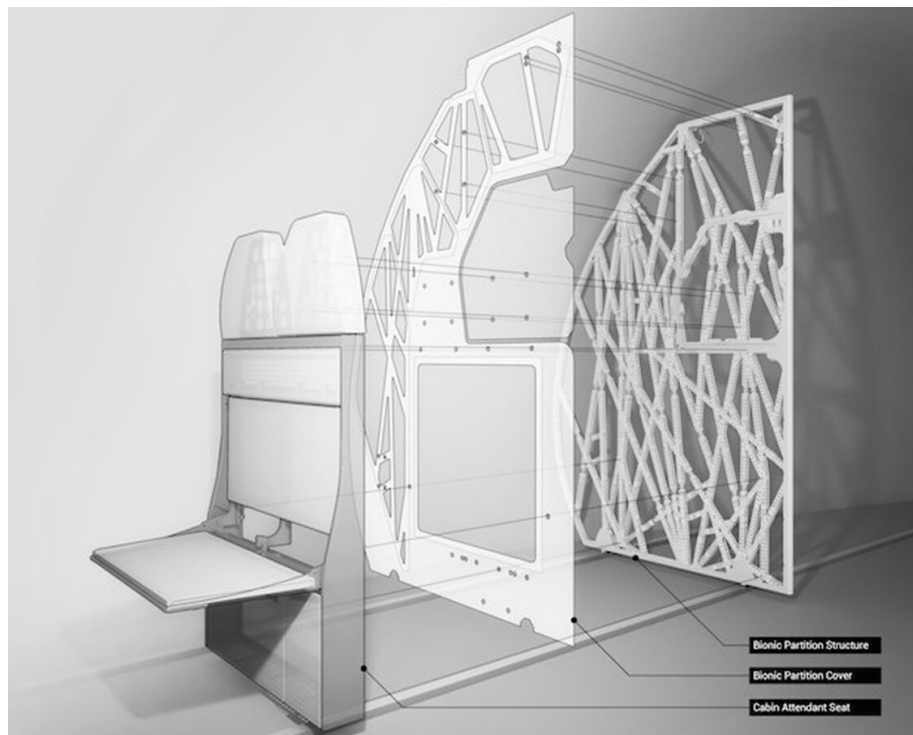
Ο γενεσιουργός σχεδιασμός χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς, όπως στην αρχιτεκτονική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική, στην ρομποτική, αλλά και στον σχεδιασμό μηχανολογικών προϊόντων. Επίσης, στην ιατρική χρησιμοποιείται κυρίως στον σχεδιασμό πρόσθετων μελών. Βασική εφαρμογή αυτής της μεθόδου στον τομέα του μηχανολογικού σχεδιασμού αποτελεί η Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing), διότι επιτρέπει την δημιουργία σύνθετων γεωμετριών που δεν θα μπορούσαν να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθόδους (αφαίρεσης υλικού, παραμόρφωσης, κλπ). Με αυτόν τον τρόπο κατασκευής, επιτυγχάνεται η παραγωγή εξατομικευμένων αντικειμένων με μειωμένο βάρος, αυξημένη αντοχή και ταυτόχρονα ελαχιστοποιείται ο χρόνος και η πολυπλοκότητα κατασκευής. Πολύ συχνά στην αυτοκινητοβιομηχανία και στην αεροδιαστημική βιομηχανία γίνεται χρήση της προσθετικής κατασκευής, όπου προτεραιότητα είναι η ελαχιστοποίηση του βάρους διασφαλίζοντας παράλληλα την αντοχή των εξαρτημάτων. Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες εταιρείες εισάγουν την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής και του γενεσιουργού σχεδιασμού, ώστε να βελτιστοποιήσουν τα προϊόντα τους. Παρακάτω αναφέρονται κάποια παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών.

Η Airbus συνδύασε τον γενεσιουργό σχεδιασμό με την προσθετική κατασκευή και δημιούργησε ένα νέο διαχωριστικό ανάμεσα στα τμήματα της καμπίνας του αεροσκάφους A320. Έτσι, κατάφερε να κατασκευάσει ένα διαχωριστικό 45% ελαφρύτερο και με υψηλότερη αντοχή σε σχέση με το πρωτότυπο. Εκτιμά ότι αν εγκατασταθούν αυτά τα

χωρίσματα σε ολόκληρη την καμπίνα ενός Airbus A320, 4 σε κάθε αεροπλάνο, το βάρος θα μειωθεί κατά 500 κιλά. Κατά συνέπεια, η κατανάλωση των καυσίμων θα περιοριστεί και οι εκπομπές CO<sub>2</sub> θα ελαττωθούν έως και 166 τόνους ανά αεροσκάφος κάθε χρόνο [10].



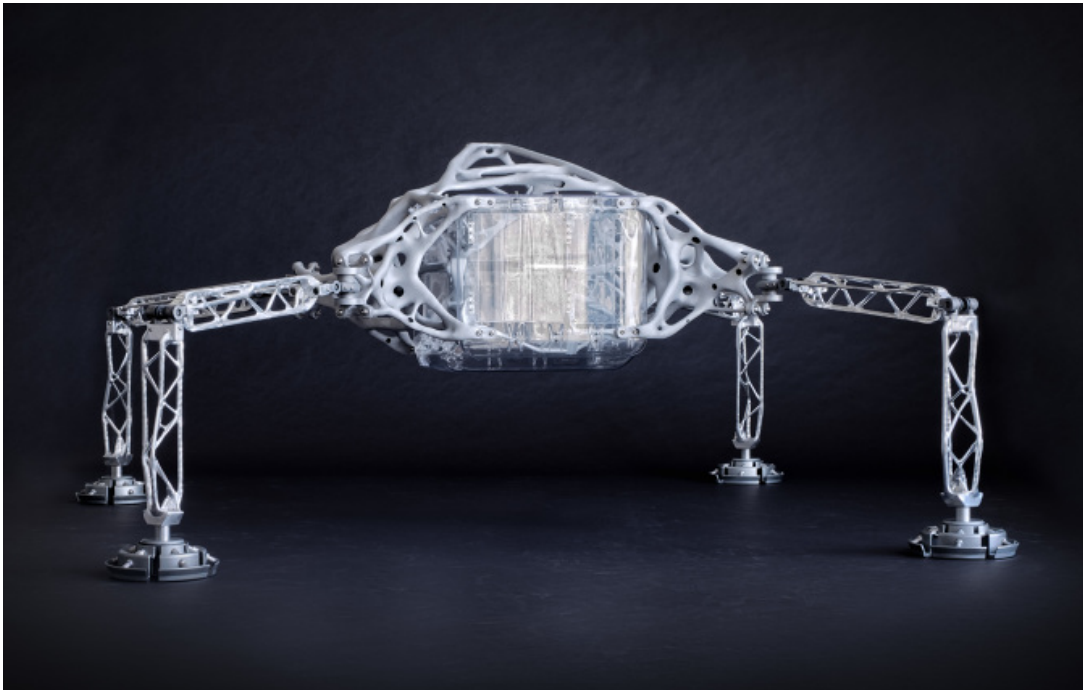
Εικόνα 4: Σύγκριση αποτελεσμάτων μελέτης για διαχωριστικό της Airbus [10]



Εικόνα 5: Ψηφιακή απεικόνιση διαχωριστικού της Airbus [11]

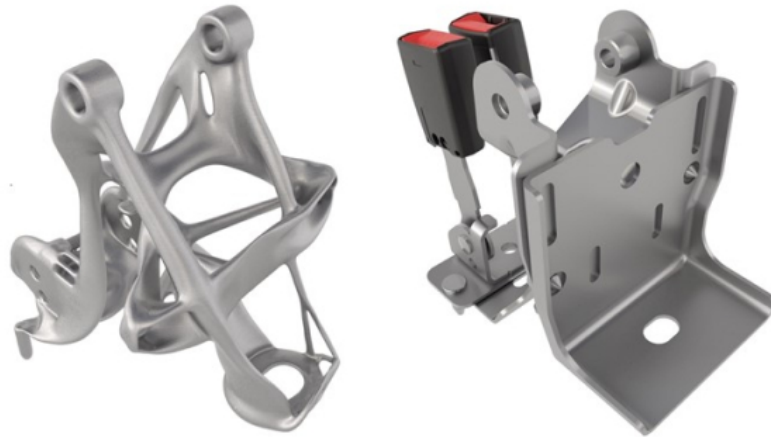


Η NASA χρησιμοποιεί αυτές τις τεχνολογίες σε μεγάλο εύρος των σχεδίων της και για τη δημιουργία κινητήρων για τους πυραύλους με υπέρ-υψηλές ταχύτητες. Το 2018 ανέπτυξε διαπλανητικό αεροσκάφος με σκοπό την προσγείωση του για εξερεύνηση στον Κρόνο και στον Δία. Με τον νέο σχεδιασμό πέτυχε καλύτερη απόδοση και μείωσε το μέγεθός του. Η μάζα της εξωτερικής δομής που συνδέει τα σκέλη με το κύριο μέρος του κατάφεραν να μειωθεί κατά 35% από το αρχικό σχέδιο [12].



*Εικόνα 6: Space Exploration Lander [13]*

Η General Motors χρησιμοποίησε τον γενεσιουργό σχεδιασμό και την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής, έτσι ώστε να μετατρέψει ένα συναρμολόγημα 8 εξαρτημάτων σε ένα συνεχές εξάρτημα [14]. Πρόκειται για τον βραχίονα του καθίσματος ενός αυτοκινήτου, όπου στερεώνονται οι ζώνες ασφαλείας. Με αυτή την προσέγγιση μείωσε την μάζα του κατά 40% και βελτίωσε την αντοχή του κατά 20%.



*Εικόνα 7: Βραχίονας τοποθέτησης ζωνών ασφαλείας καθίσματος [15]*

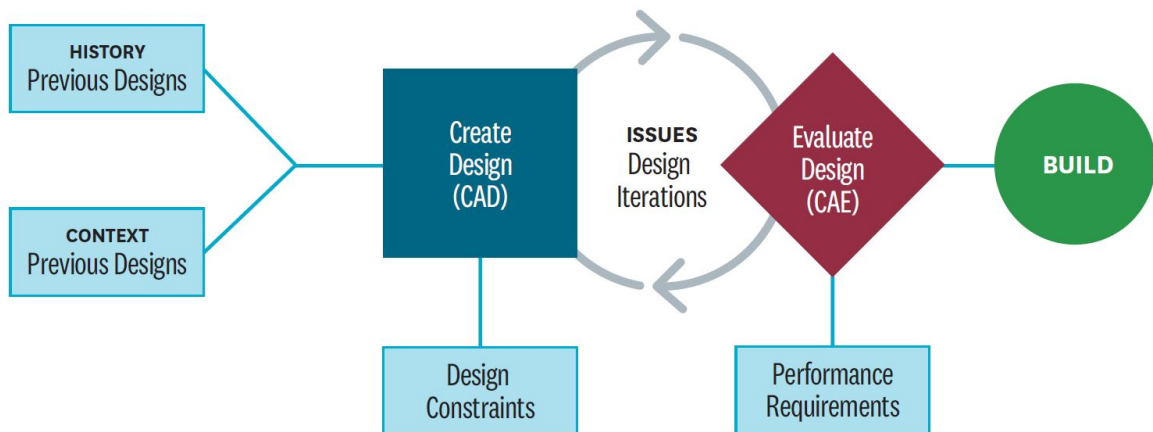
Η εταιρεία Lightning Motorcycles, κατασκευαστής της ταχύτερης ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας στον κόσμο, συνεργάστηκε με τον μηχανικό Andreas Bastian για τον σχεδιασμό νέου ψαλιδιού για το μοντέλο LS-218 [16]. Η μέθοδος που επιλέχθηκε να κατασκευαστεί ήταν η χύτευση και το τελικό ψαλίδι είχε 10% μικρότερη μάζα.



*Εικόνα 8: Σχέδιο ψαλιδιού για το μοντέλο LS218 [16]*

### 1.3 Ο γενεσιουργός σχεδιασμός ως εργαλείο για την ανάπτυξη προϊόντων

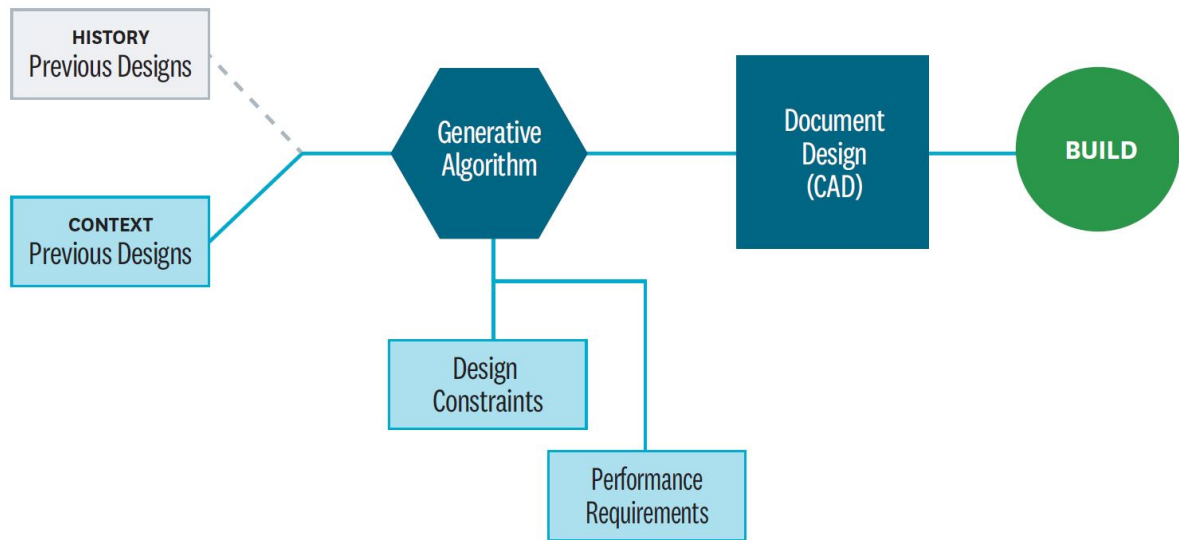
Για δεκαετίες, η διαδικασία δημιουργίας ενός προϊόντος ήταν επίπονη και χρονοβόρα. Οι σχεδιαστές και οι μηχανικοί κατέγραφαν τις απαιτήσεις των πελατών, δημιουργούσαν κάποια αρχικά σχέδια και στη συνέχεια έπρεπε να πειραματιστούν με τα υλικά και τη μορφή του προϊόντος [17]. Έπειτα, δημιουργούσαν ψηφιακά και φυσικά πρωτότυπα, ώστε να ελέγξουν την αντοχή της κατασκευής σε διάφορες συνθήκες. Με τις αλλαγές που έκριναν ότι πρέπει να γίνουν, σχεδίαζαν νέες εκδοχές των εξαρτημάτων και επαναλάμβαναν ξανά την ίδια διαδικασία ελέγχου έως ότου να βρουν την βέλτιστη λύση. Επίσης, για την δημιουργία ενός σχεδίου δεν λάμβαναν υπ' όψιν τους απαραίτητα τη μέθοδο κατασκευής, κάτι το οποίο μπορεί να ανάγκαζε τον σχεδιαστή να τροποποιήσει ξανά το σχέδιο ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί με την εκάστοτε μέθοδο. Με αυτή τη διαδικασία απαιτείται πολύς χρόνος και αυξάνεται το κόστος ανάπτυξης του προϊόντος.



Εικόνα 9: Διάγραμμα ροής διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος [18]

Με την χρήση του γενεσιουργού σχεδιασμού στα πρώτα στάδια σχεδιασμού ενός προϊόντος παρέχονται πολλές σχεδιαστικές λύσεις και μειώνεται ο χρόνος σχεδιασμού. Επίσης, εξαλείφεται η απαίτηση ελέγχου αντοχής μετά από κάθε σχεδιασμό, αφού η μέθοδος δημιουργεί κάθε σχέδιο λαμβάνοντας υπ' όψιν τα κριτήρια επίδοσής του και αναλύει την κατασκευή πριν την εξαγωγή του σχεδίου. Επιπλέον, οι σχεδιαστές δεν χρειάζεται να σχεδιάζουν συνεχώς εναλλακτικές λύσεις, αφού μπορούν απλά να μεταβάλλουν τις παραμέτρους και να παράγονται νέες λύσεις. Ακόμη, μέσω αυτής οι μηχανικοί μπορούν να αφιερώσουν την δημιουργικότητά τους στο πώς θα κατασκευάσουν αυτό το προϊόν και να επικεντρωθούν στις απαιτήσεις των πελατών. Με τον γενεσιουργό σχεδιασμό γίνεται πιο

αντιληπτό ποιοι παράμετροι επηρεάζουν περισσότερο το τελικό σχέδιο και που πρέπει να δοθεί περισσότερη προσοχή [19]. Συγκριτικά με την κλασική μέθοδο σχεδιασμού ενός προϊόντος, μπορεί να συμπεριληφθεί νωρίς στην διαδικασία λήψης αποφάσεων ο τρόπος κατασκευής και έτσι να καθοριστούν κάποιοι σημαντικοί παράμετροι. Τέλος, ο σχεδιαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει τις σχεδιαστικές λύσεις που παρήχθησαν ως πηγή έμπνευσης και να ανασχεδιάσει το τελικό προϊόν με κλασικές μεθόδους σχεδίασης.



Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής διαδικασίας ανάπτυξης προϊόντος με τη χρήση του γενεσιουργού σχεδιασμού [18]

## 1.4 Λογισμικά και βασικές αρχές του γενεσιουργού σχεδιασμού

Στις παρακάτω υποενότητες αρχικά αναφέρονται κάποια λογισμικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή της μεθόδου του γενεσιουργού σχεδιασμού και στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία της σε ένα πραγματικό εξάρτημα μέσω του λογισμικού Fusion 360.

### 1.4.1 Λογισμικά σχεδίασης

Τα πιο γνωστά λογισμικά σχεδίασης τα οποία διαθέτουν την δυνατότητα χρήσης της μεθόδου Generative Design είναι τα παρακάτω:

- Autodesk Fusion 360
- SolidWorks
- Creo Generative Design

- NX from Siemens
- nTop Platform from nTopology
- Ansys Discovery
- Altair Inspire
- Catia Generative Shape design

Τα λογισμικά αυτά συνδυάζουν τον τρισδιάστατο σχεδιασμό με την μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και την τεχνητή νοημοσύνη. Ορισμένα από αυτά βασίζονται στην τεχνολογία του υπολογιστικού νέφους (Cloud Computing) και επιτρέπουν την αποθήκευση των δεδομένων σε «νέφος». Έτσι, τα αποτελέσματα μιας μελέτης του γενεσιουργού σχεδιασμού είναι διαθέσιμα σε πολύ λιγότερο χρόνο.

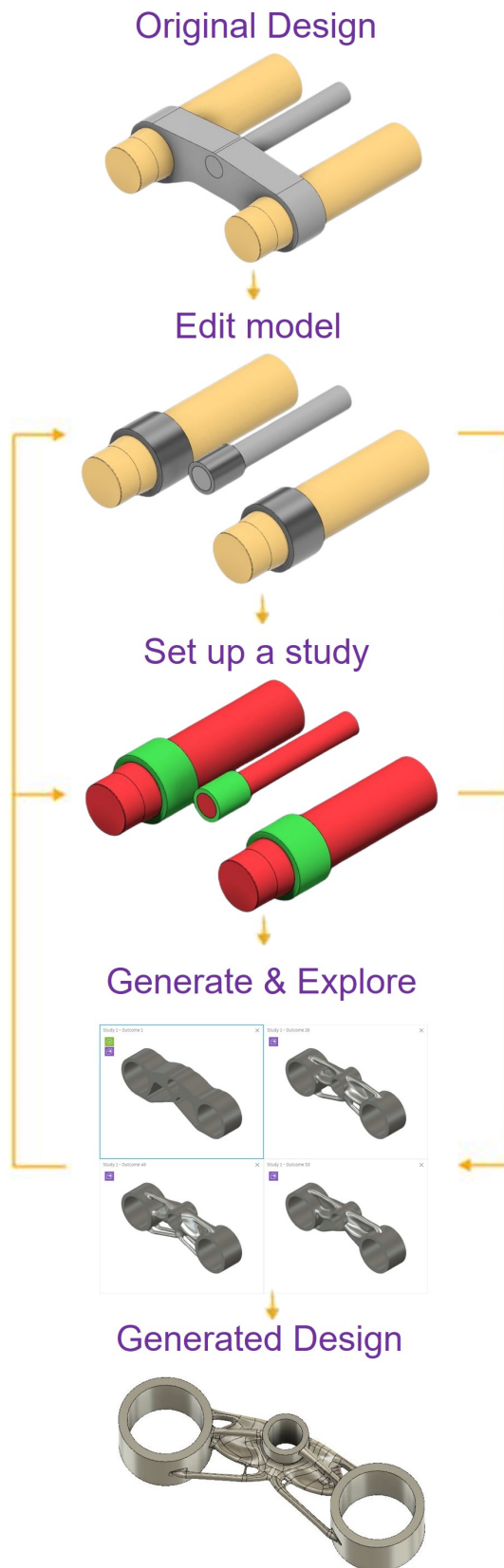
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει χρήση του λογισμικού Fusion 360 της εταιρείας Autodesk. Πρόκειται για ένα λογισμικό σχεδίασης που χρησιμοποιεί την τεχνολογία του υπολογιστικού νέφους και παρέχει τις παρακάτω δυνατότητες:

- Τρισδιάστατη μοντελοποίηση αντικειμένων
- Δημιουργία και διαχείριση συναρμολογημάτων με δυνατότητα χρήσης τυποποιημένων εξαρτημάτων από προεγκατεστημένες στο σύστημα βιβλιοθήκες
- Απεικόνιση επιφανειών ελεύθερης μορφής
- Δημιουργία στερεών μοντέλων ελασμάτων (Sheet metal Design)
- Εφαρμογή της μεθόδου του Generative Design
- Δημιουργία μηχανολογικών σχεδίων των τρισδιάστατων μοντέλων που σχεδιάστηκαν
- Σχεδιασμό ηλεκτρονικών και πλακετών (Printed Circuit Board)
- Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis)
- Προγραμματισμός των κατεργασιών κατασκευής εξαρτημάτων (Computer Aided Manufacturing)

## 1.4.2 Βασικές αρχές του γενεσιουργού σχεδιασμού με την χρήση του λογισμικού Fusion 360

Για την εφαρμογή της μεθόδου του γενεσιουργού σχεδιασμού βασική προϋπόθεση αποτελεί η αναγνώριση των απαιτήσεων και των περιορισμών του σχεδίου. Πρέπει να προσδιοριστεί η λειτουργία του αντικειμένου σε σχέση με άλλα συναρμοζόμενα εξαρτήματα και τα κινούμενα μέρη, αν υπάρχουν. Έπειτα, να οριστούν τα φορτία και τα σημεία στα οποία αυτά εφαρμόζονται. Έχοντας καθορίσει ότι χρειάζεται η μέθοδος, αρχικά σχεδιάζονται και ορίζονται οι περιοχές που θα πρέπει να παραμείνουν αναλλοίωτες στο τελικό σχέδιο (Preserved areas). Στη συνέχεια, δημιουργούνται κάποιες γεωμετρίες, ώστε να οριστούν οι περιοχές του σχεδίου (Obstacles) που δεν θα πρέπει να υπάρχει υλικό και το εξάρτημα να είναι λειτουργικό. Επόμενο βήμα αποτελεί ο ορισμός των περιορισμών (Constraints), τα σημεία και το είδος της στήριξης. Σημαντικό επίσης είναι ο ορισμός των καταπονήσεων (Loads), ώστε τα σχέδια που θα παραχθούν να τις λάβουν υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό και να έχουν την απαιτούμενη αντοχή. Στη συνέχεια, επιλέγονται οι στόχοι της μελέτης (Objectives), δηλαδή η ελαχιστοποίηση της μάζας ή η μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας. Παράλληλα, ορίζεται και ο συντελεστής ασφαλείας που θα πρέπει να πληρούν τα σχέδια (Limits). Το λογισμικό δίνει επίσης την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει πολλαπλά υλικά για την μελέτη του και να αποφασίσει στο τέλος βάσει αποτελεσμάτων ποιο θα είναι το υλικό του τελικού του εξαρτήματος. Όσο αναφορά την κατασκευαστική μέθοδο, το λογισμικό επιτρέπει την επιλογή διάφορων μεθόδων, όπως Additive Manufacturing (Προσθετική Κατασκευή), Milling (Φρεζάρισμα) και Casting (Χύτευση).

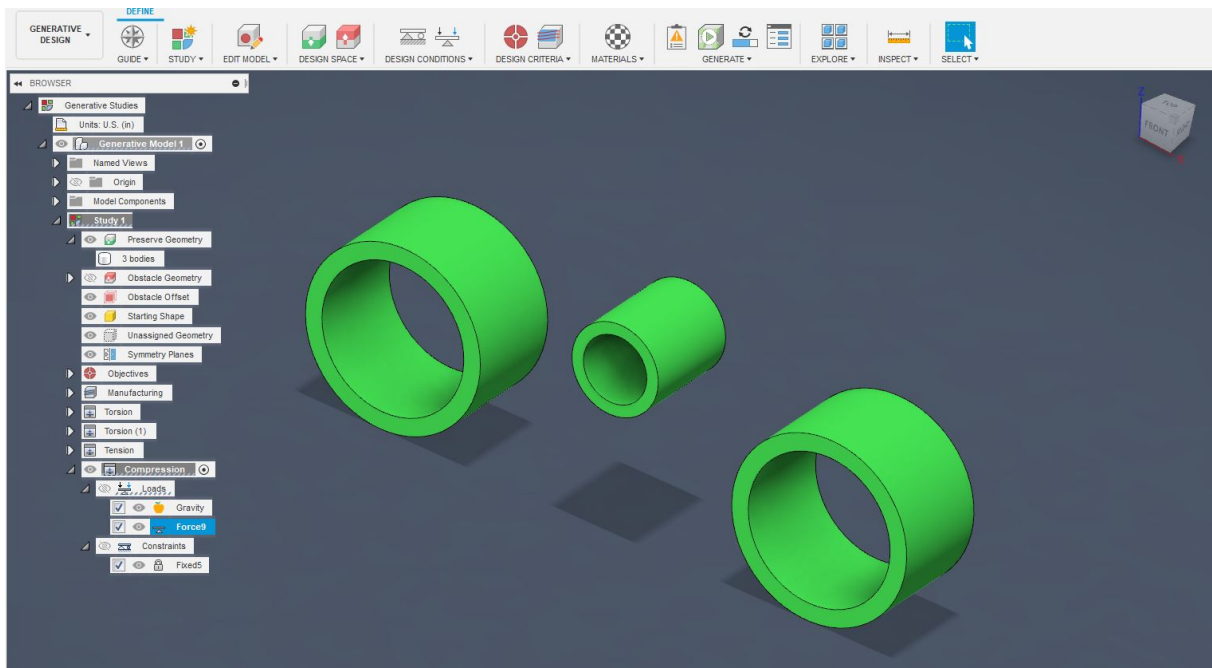
Παρακάτω αναλύονται οι βασικές αρχές του γενεσιουργού σχεδιασμού σε ένα εξάρτημα τιμονιού μιας μοτοσυκλέτας στο λογισμικό Fusion 360.



Εικόνα 11: Διαδικασία εκτέλεσης μεθόδου [20]

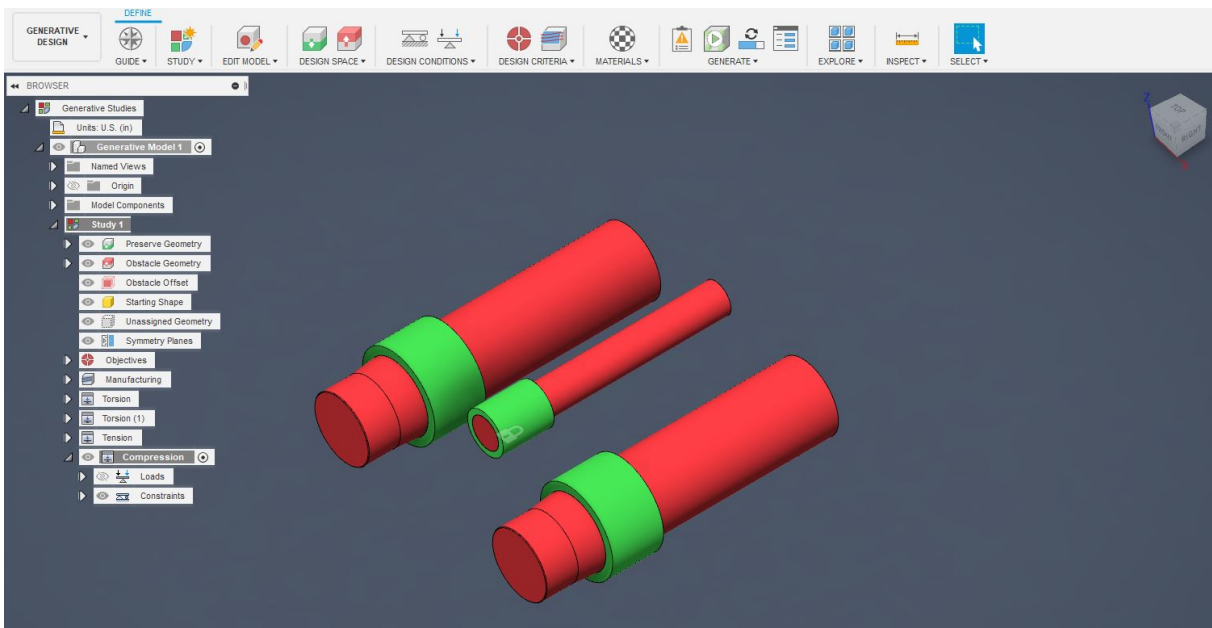


## 1. Ορισμός των περιοχών που θα διατηρηθούν στο τελικό σχέδιο (Preserved areas)



Εικόνα 12: Preserved areas

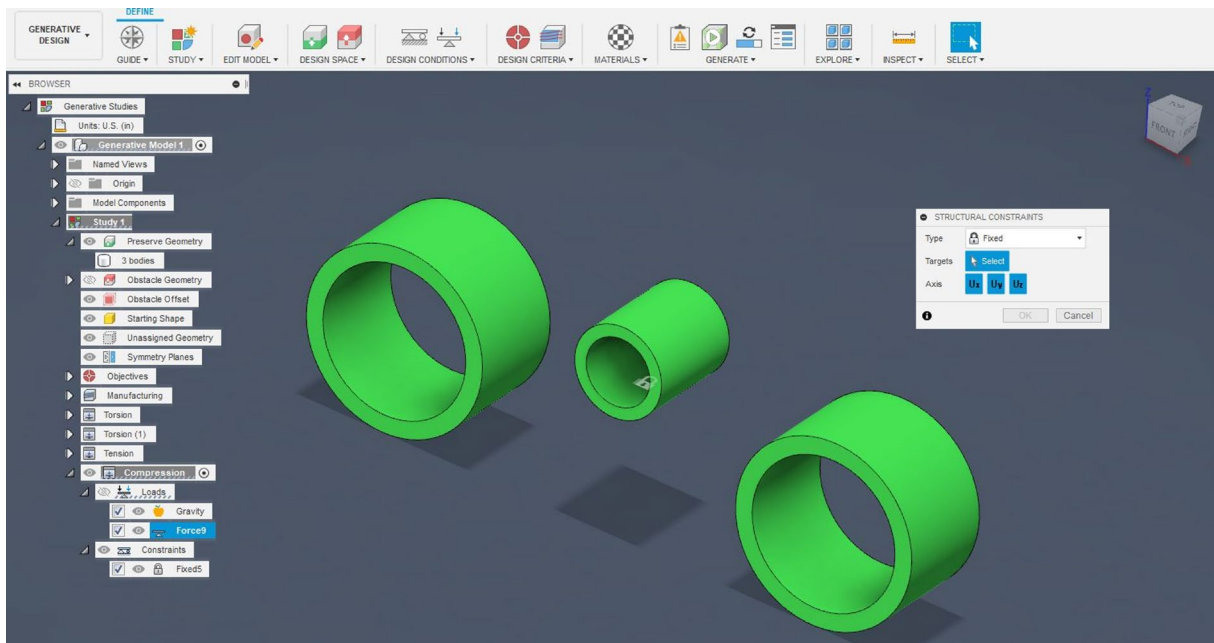
## 2. Ορισμός γεωμετριών όπου δεν μπορεί να υπάρχει υλικό για την διατήρηση της λειτουργικότητας του εξαρτήματος (Obstacles)



Εικόνα 13: Obstacles

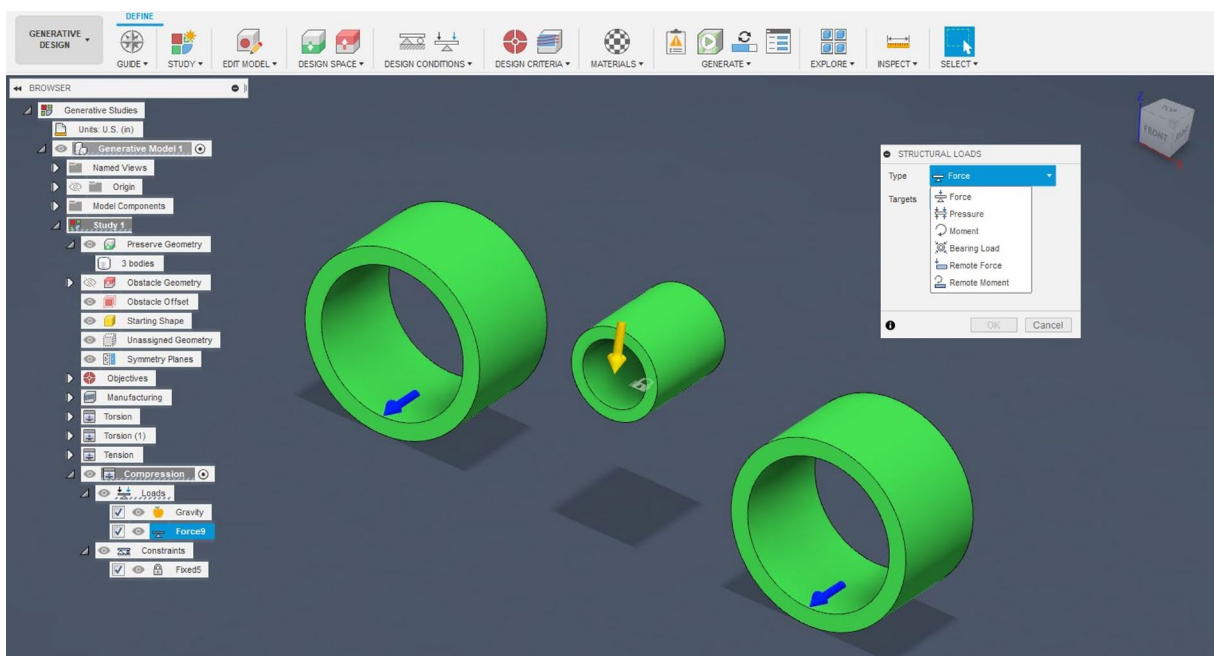


### 3. Ορισμός περιορισμών και είδους στήριξης στα απαιτούμενα σημεία (Constraints)



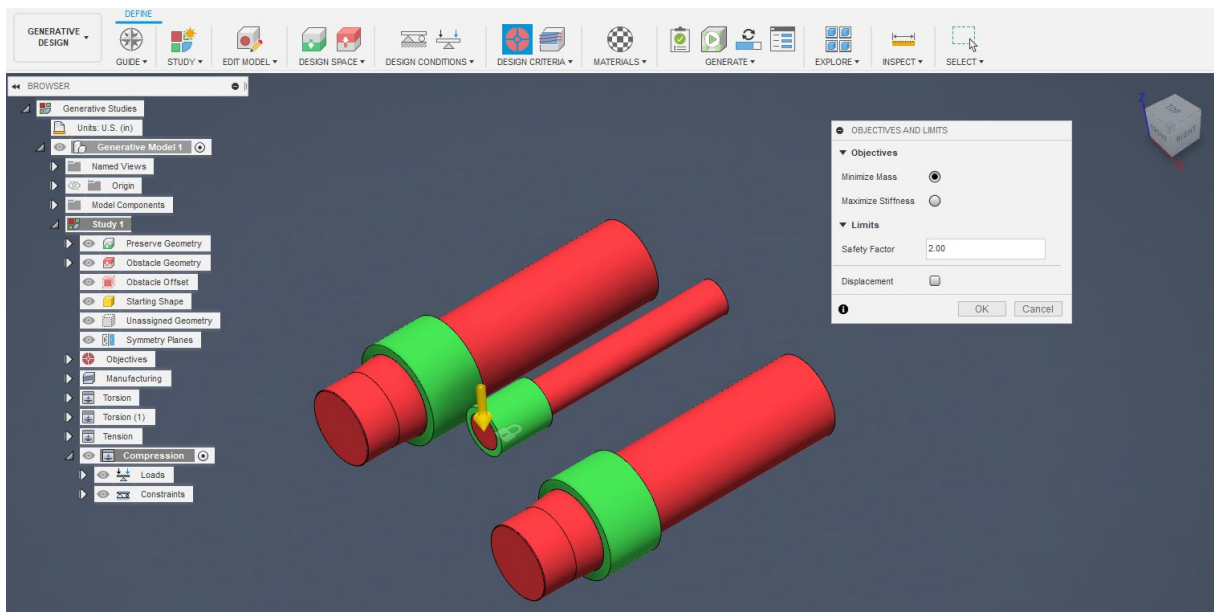
Εικόνα 14: Constraints

### 4. Ορισμός δυνάμεων και καταπονήσεων (Loads)



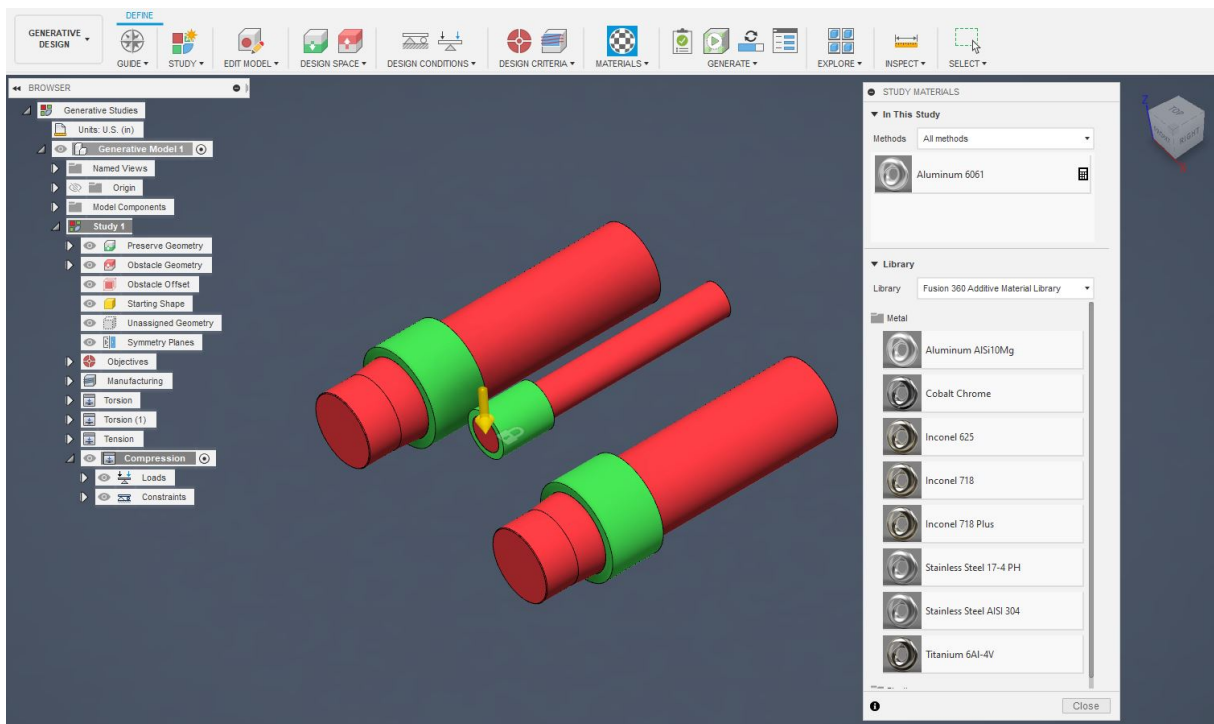
Εικόνα 15: Loads

## 5. Ορισμός στόχων και κριτηρίων σχεδίασης (Objectives and Limits)



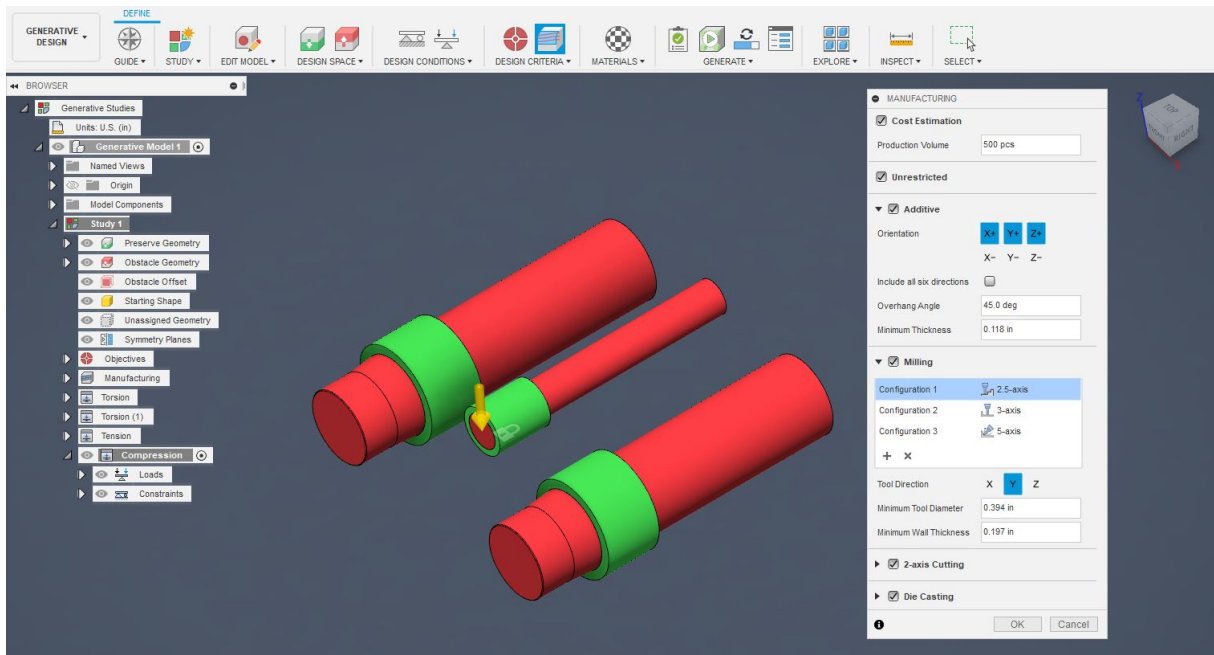
Εικόνα 16: Objectives and limits

## 6. Επιλογή υλικού (Study Materials)



Εικόνα 17: Study Materials

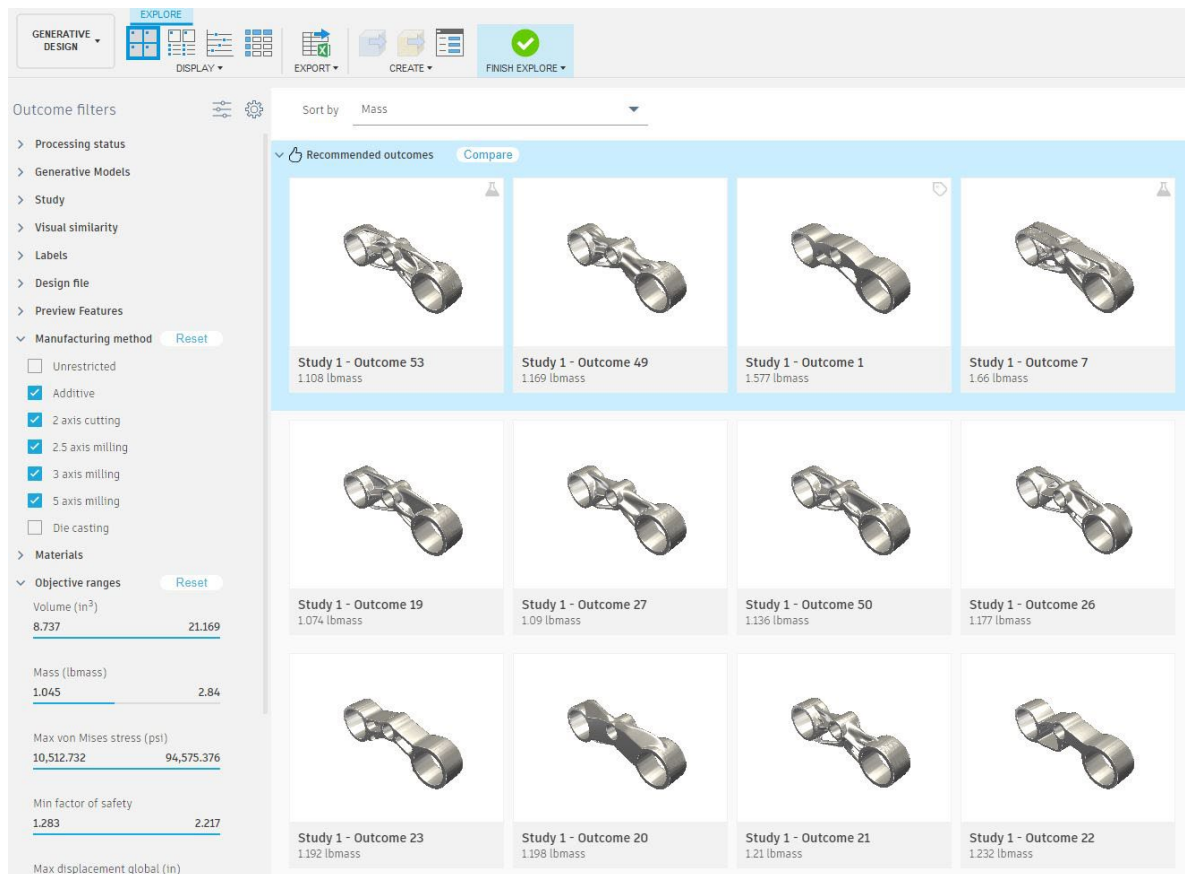
## 7. Επιλογή κατασκευαστικής μεθόδου (Manufacturing)



Εικόνα 18: Manufacturing

## 8. Παραγωγή σχεδιαστικών επιλογών (Outcomes)

Η μέθοδος με βάση τα κριτήρια και τις παραμέτρους που έχουν οριστεί από τον σχεδιαστή παράγει ένα πλήθος σχεδιαστικών λύσεων (Outcomes). Αυτές κατατάσσονται ανάλογα με την μέθοδο κατασκευής που έχει επιλεγεί και μπορεί να γίνει σύγκριση αυτών για την εύρεση του βέλτιστου σχεδίου.



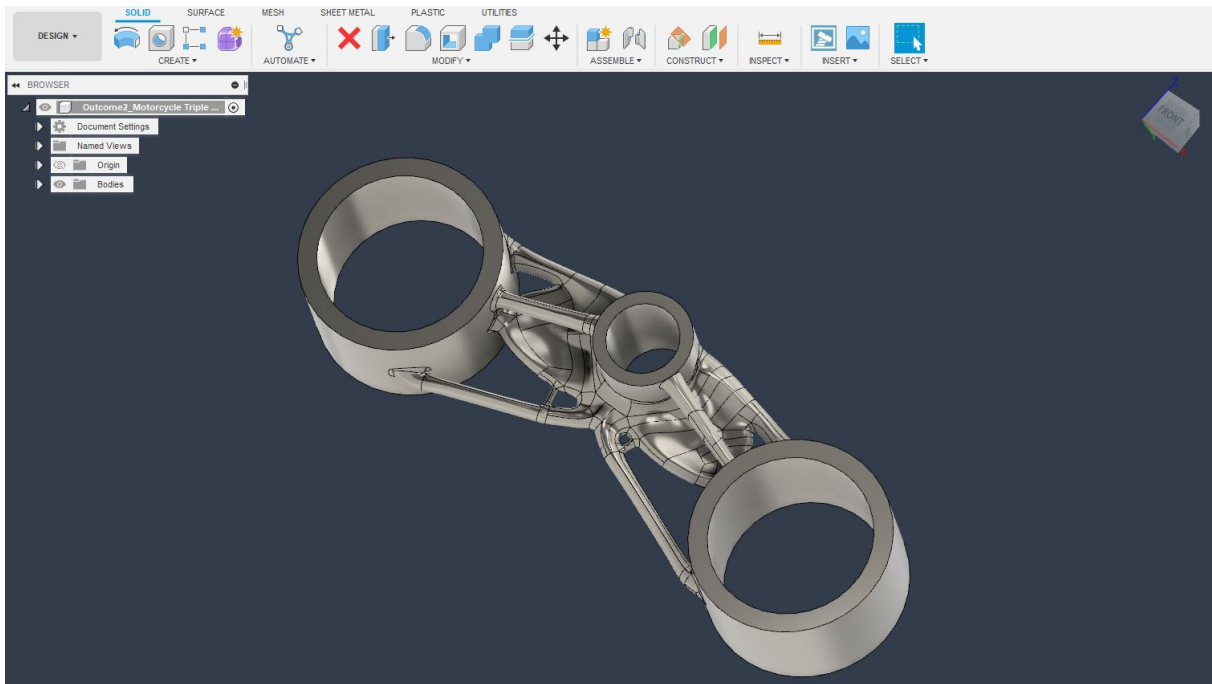
Εικόνα 19: Outcomes

## 9. Επανάληψη της διαδικασίας μέχρι την ικανοποίηση των κριτηρίων

Ο σχεδιαστής μπορεί σε αυτό το στάδιο να κάνει τις απαραίτητες αλλαγές που κρίνει ότι πρέπει να γίνουν, για να βελτιωθούν τα σχέδια που προέκυψαν και να εκτελέσει μια νέα μελέτη. Η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί έως ότου βρεθεί η βέλτιστη λύση που ικανοποιεί τα κριτήρια σχεδίασης.

## 10. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και επιλογή βέλτιστου σχεδίου

Ο σχεδιαστής είναι υπεύθυνος για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την μέθοδο και πρέπει να επιλέξει αυτό που θεωρεί ότι ικανοποιεί καλύτερα τα κριτήρια.

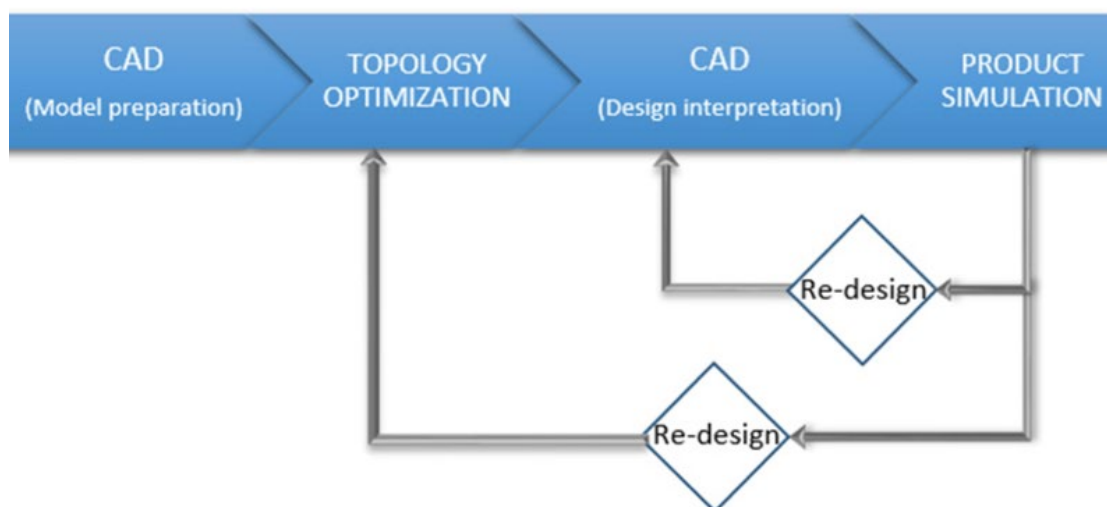


Εικόνα 20: Επιλογή βέλτιστου σχεδίου

## 1.5 Αντιπαράθεση και σύγκριση των μεθόδων της τοπολογικής βελτιστοποίησης και του γενεσιουργού σχεδιασμού

Η τοπολογική βελτιστοποίηση (Topology Optimization) είναι μια υπολογιστική μέθοδος σχεδιασμού, η οποία στόχο της έχει την βελτιστοποίηση της κατανομής του υλικού σε έναν δεδομένο χώρο σχεδιασμού και την μεγιστοποίηση της απόδοσής του, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα φορτία και τους περιορισμούς [21]. Αποτελεί κατηγορία της δομικής βελτιστοποίησης μαζί με την βελτιστοποίηση μεγέθους (Size optimization) και σχήματος (Shape optimization). Χρησιμοποιεί υπολογιστικούς αλγορίθμους και εφαρμόζεται για να αφαιρεθεί υλικό από τις περιοχές του εξαρτήματος που δεν συμβάλλουν στην συνολική απόδοσή του και δεν εφαρμόζονται φορτία.

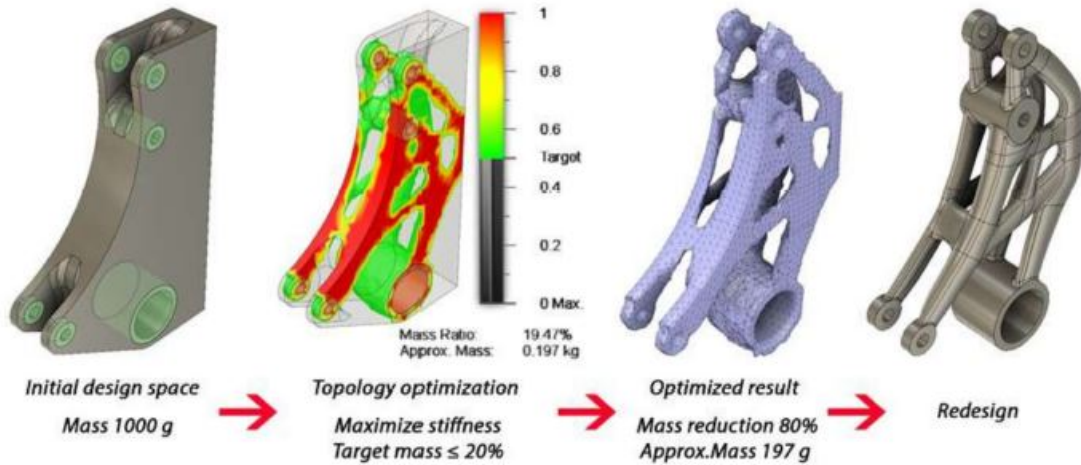
## Design (Product Optimization)



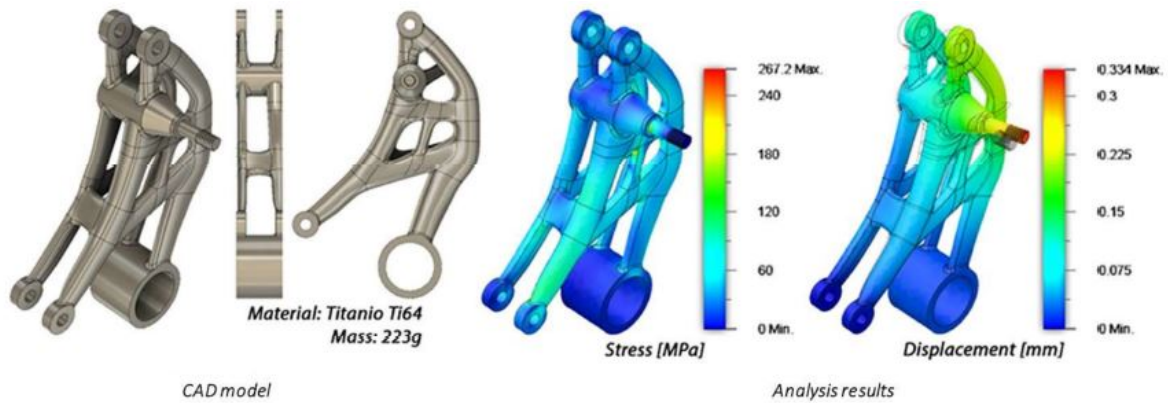
Εικόνα 21: Διάγραμμα ροής εργασιών της τοπολογικής βελτιστοποίησης [23]

Αρχικά, η μέθοδος απαιτεί την σχεδίαση της γεωμετρίας του αρχικού αντικειμένου που θα βελτιστοποιηθεί. Επόμενο στάδιο αποτελεί η διαίρεση του εξαρτήματος σε δυο μέρη, στον χώρο σχεδιασμού όπου θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση και στον χώρο στον οποίο δεν θα υπάρξει κάποια αλλαγή και συνδέονται άλλα εξαρτήματα. Και τα δυο μέρη διακριτοποιούνται σε πεπερασμένα στοιχεία, ώστε να γίνει η στατική ανάλυση του εξαρτήματος. Έπειτα, εφαρμόζονται οι φορτίσεις στα κατάλληλα σημεία, ορίζονται οι οριακές συνθήκες και η πυκνότητα του υλικού που έχει επιλεγθεί. Απαραίτητο σε μια τέτοια μελέτη είναι ο καθορισμός του στόχου σχεδίασης τον οποίο επιθυμεί ο σχεδιαστής. Αυτός μπορεί να είναι είτε η ελαχιστοποίηση του βάρους είτε η αύξηση της δυσκαμψίας. Η μέθοδος υπολογίζει την κατανομή των τάσεων και τις παραμορφώσεις και βάσει αυτών αφαιρεί υλικό στα κατάλληλα σημεία. Από αυτή παράγεται ένα περίπλοκο φυσικό σχήμα, το οποίο δείχνει την αφαίρεση υλικού βασισμένη στα κριτήρια, και δεν μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε ένα παραμετρικό μοντέλο. Έτσι, το σχέδιο πρέπει να επεξεργαστεί σε σχεδιαστικό λογισμικό για να βελτιωθεί η μορφή του και να είναι κατασκευάσιμο. Στη συνέχεια, γίνεται εκ νέου ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για να ελεγχθεί αν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του σχεδίου και αν έχει επιτευχθεί η απαραίτητη απόδοση. Η ανάγκη επαναλαμβανόμενων αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων κατά την εφαρμογή της έχει ως επακόλουθο την απαίτηση υψηλής υπολογιστικής ισχύος [22].





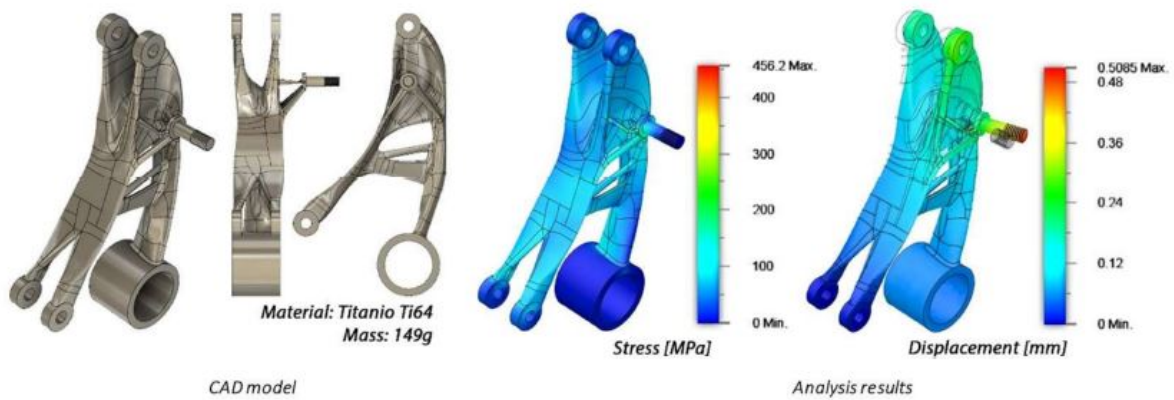
Εικόνα 22: Παράδειγμα εφαρμογής της τοπολογικής βελτιστοποίησης [24]



Εικόνα 23: Έλεγχος ανασχεδιασμένου μοντέλου με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων [24]

Σε αντίθεση με αυτή την μέθοδο, ο γενεσιουργός σχεδιασμός δεν περιορίζει τον χώρο σχεδιασμού και δεν αφαιρεί περιττό υλικό. Απεναντίας, δημιουργεί την γεωμετρία αποφεύγοντας προκαθορισμένες περιοχές και δίνοντας έμφαση στις περιοχές που πρέπει να διατηρηθούν στο τελικό σχέδιο. Το αποτέλεσμα μιας τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι ένα μοναδικό σχέδιο το οποίο προέκυψε από ένα ήδη υπάρχον, ενώ στην περίπτωση του γενεσιουργού σχεδιασμού υπάρχει ένα πλήθος λύσεων που μπορεί να επιλεγεί χωρίς απαραίτητα να υπάρχει αρχικό σχέδιο. Επίσης, παρέχει την δυνατότητα επιλογής πολλών υλικών προς μελέτη συγκριτικά με την τοπολογική βελτιστοποίηση που μπορεί να επιλεγεί μόνο ένα. Στην περίπτωση του γενεσιουργού σχεδιασμού λαμβάνεται υπ' όψιν και ο τρόπος κατασκευής με επιλογή διάφορων μεθόδων, ενώ στην τοπολογική βελτιστοποίηση δεν συμπεριλαμβάνεται. Τέλος, τα αποτελέσματα μια μελέτης του γενεσιουργού σχεδιασμού δεν

χρηζουν συνήθως επιπλέον επεξεργασίας σε σχέση με μιας μελέτης τοπολογικής βελτιστοποίησης, όπου απαιτείται ανασχεδιασμός σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 24: Παράδειγμα εφαρμογής του γενεσιουργού σχεδιασμού [24]

	Τοπολογική Βελτιστοποίηση	Γενεσιουργός Σχεδιασμός
Αρχική γεωμετρία	Στερεό σώμα για τον μέγιστο όγκο του εξαρτήματος	Δεν είναι αναγκαίο, αλλά μπορεί να είναι συναρμολογήματα ή μεμονωμένα εξαρτήματα
Ορισμός χώρου σχεδιασμού	Μέγιστος όγκος και γεωμετρίες που θα διατηρηθούν στο τελικό σχέδιο	Γεωμετρίες που θα διατηρηθούν στο τελικό σχέδιο και γεωμετρίες όπου δεν πρέπει να υπάρχει υλικό
Αριθμός υλικών ανά μελέτη	1	1 ή περισσότερα
Σχεδιασμός με βάση την κατασκευαστική μέθοδο	Δεν συμπεριλαμβάνεται	Επιλογή διάφορων μεθόδων (Φρεζάρισμα, Χύτευση, Προσθετική Κατασκευή)
Αποτελέσματα μελέτης	Ένα μόνο σχέδιο	Πολλαπλές σχεδιαστικές λύσεις
Μετεπεξεργασία σχεδίου	Αναγκαίο σε κάθε περίπτωση	Δεν απαιτείται σε όλες τις περιπτώσεις

Πίνακας 1: Σύγκριση απαιτήσεων και δυνατοτήτων της Τοπολογικής Βελτιστοποίησης και του Γενεσιουργού Σχεδιασμού

Κοινό γνώρισμα και των δυο μεθόδων είναι η δημιουργία εξαρτήματος με μειωμένο βάρος και υψηλή απόδοση διατηρώντας την λειτουργικότητά του. Ωστόσο, η μέθοδος του γενεσιουργού σχεδιασμού υπερτερεί έναντι της τοπολογικής βελτιστοποίησης, αφού μπορεί



να εφαρμοστεί προτού καν σχεδιαστεί μια εκδοχή του εξαρτήματος. Στην περίπτωση που υπάρχει αρχική γεωμετρία, αν επιλεγθεί να εφαρμοστεί η μέθοδος του γενεσιουργού σχεδιασμού, θα παραχθούν περισσότερες από μια λύσεις και δεν θα χρειαστεί ανασχεδιασμός του εξαρτήματος. Επίσης, λαμβάνοντας υπ' όψιν την κατασκευαστική μέθοδο τα σχέδια που προκύπτουν είναι καταλληλότερα για κατασκευή χωρίς να απαιτούνται επιπρόσθετες αλλαγές. Με αυτόν τον τρόπο, περιορίζεται σημαντικά ο χρόνος σχεδιασμού και ανάλυσης του αντικειμένου. Έτσι, αντί της μεθόδου της τοπολογικής βελτιστοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο γενεσιουργός σχεδιασμός, ώστε και να βελτιστοποιηθεί μια υπάρχουσα γεωμετρία αλλά και να παραχθούν περισσότερες και βελτιωμένες λύσεις.



## **Κεφάλαιο 2ο – Τα οφέλη και οι προκλήσεις του γενεσιουργού σχεδιασμού**

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά θα αναφερθούν τα πλεονεκτήματα που έχει η προσθετική κατασκευή σε συνδυασμό με τον γενεσιουργό σχεδιασμό, κάποιες κατηγορίες της και στην συνέχεια αναλύονται τα μειονεκτήματά της. Έπειτα, παρουσιάζονται κάποια μοντέλα κόστους τόσο για την προσθετική κατασκευή, όσο και για τις μεθόδους αφαίρεσης υλικού. Στόχος είναι η ανάλυση του κόστους σε καθεμιά και η παρουσίαση των παραγόντων που επηρεάζουν περισσότερο το κόστος τους. Τέλος, παρατίθεται μελέτη κατασκευής καλουπιού μέσω της τρισδιάστατης εκτύπωσης και μεθόδου αφαίρεσης υλικού και γίνεται σύγκριση ως προς το κόστος τους, αλλά και την λειτουργικότητα των τελικών εξαρτημάτων.

### **2.1 Τα πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής σε συνδυασμό με τον γενεσιουργό σχεδιασμό**

Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται οι τεχνολογίες της προσθετικής κατασκευής για την δημιουργία προϊόντων. Αρχικά, μοναδική χρήση της μεθόδου αποτελούσε η παραγωγή πρωτοτύπων ως δοκιμή πριν τα τελικά προϊόντα, γνωστή και ως ταχεία πρωτοτυποποίηση. Με αυτόν τον τρόπο μπορούσε να ελεγχθεί η λειτουργικότητα ενός εξαρτήματος και τυχόν σχεδιαστικές ατέλειες πριν την μαζική παραγωγή του. Ωστόσο, αυτό δεν φαίνεται να βοηθούσε ιδιαίτερα την παραγωγική διαδικασία και έτσι το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στην εύρεση λύσης για την παραγωγή των τελικών προϊόντων μέσω αυτής [25]. Το κύριο πλεονέκτημά της έγκειται στην δυνατότητα κατασκευής ιδιαίτερων και πολύπλοκων γεωμετριών που διαφορετικά δεν θα μπορούσαν να παραχθούν με συμβατικές μεθόδους. Έτσι, απαλλάσσεται από την ανάγκη προμήθειας ειδικών εργαλείων και από τους σχεδιαστικούς περιορισμούς που επιβάλλουν οι συμβατικές μέθοδοι. Ακόμη, μόλις σχεδιαστεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να κατασκευαστεί απευθείας, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους που θα έπρεπε να γίνει μεγαλύτερη και πιο χρονοβόρα προετοιμασία πριν την παραγωγή του. Επιπλέον, η μέθοδος προσφέρει την δυνατότητα ανταπόκρισης σε ασταθείς ζητήσεις, αλλά και σε κατά παραγγελία παραγωγές [26]. Δίνει δηλαδή το πλεονέκτημα να παραχθούν προϊόντα που θα αξιοποιηθούν μόνο μια

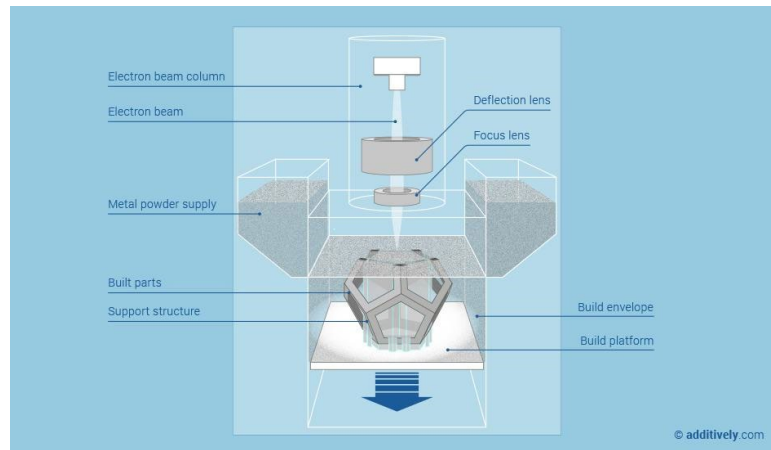
φορά και θα μπορούν να προσαρμοστούν κατάλληλα ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε πελάτη.

Μέσω των τεχνολογιών αυτών έχει δοθεί ευκαιρία ανάδειξης και ανάπτυξης των μεθόδων βελτιστοποίησης. Η μέθοδος του γενεσιουργού σχεδιασμού συγκεκριμένα, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την προσθετική κατασκευή εξαιτίας των περίπλοκων γεωμετριών που παράγονται από αυτή. Αυτές οι οργανικές γεωμετρίες που δημιουργούνται προσφέρουν ταυτόχρονα την μείωση του απαιτούμενου υλικού σε συνδυασμό με την διατήρηση της απαιτούμενης αντοχής. Μέσω της μεθόδου του γενεσιουργού σχεδιασμού μπορούν να συνδυαστούν πολλαπλά εξαρτήματα σε ένα ενιαίο, βελτιώνοντας την λειτουργικότητά και αποδοτικότητά τους και μειώνοντας τα κόστη συναρμολόγησης. Επίσης, από την μέθοδο προκύπτουν πολλές σχεδιαστικές λύσεις και έτσι μειώνεται ο χρόνος σχεδιασμού διαφορετικών ιδεών. Μπορούν να γίνονται εύκολα αλλαγές και δεν χρειάζεται εκ νέου σχεδιασμός άλλων επιλογών. Ακόμη, δεν απαιτούνται τα ίδια επίπεδα ελέγχου του φυσικού αντικειμένου, αφού κατά την εφαρμογή της μεθόδου λαμβάνονται υπ' όψιν οι απαιτήσεις αντοχής. Εξαιτίας της δομής της σε κάθε επανάληψη το λογισμικό βελτιώνεται και παράγει καλύτερες λύσεις, αναγνωρίζει τα προβληματικά σημεία και τα διορθώνει. Μέσω της τεχνητής νοημοσύνης που χρησιμοποιεί προκύπτουν σχέδια που θα ήταν δύσκολο να φανταστεί και να σχεδιάσει ο εκάστοτε σχεδιαστής. Επιτυγχάνονται με αυτόν τον τρόπο εξαρτήματα με λιγότερο βάρος διασφαλίζοντας παράλληλα την απόδοσή του, αλλά και την λειτουργικότητά του.

### **2.1.1 Κατηγορίες της προσθετικής κατασκευής**

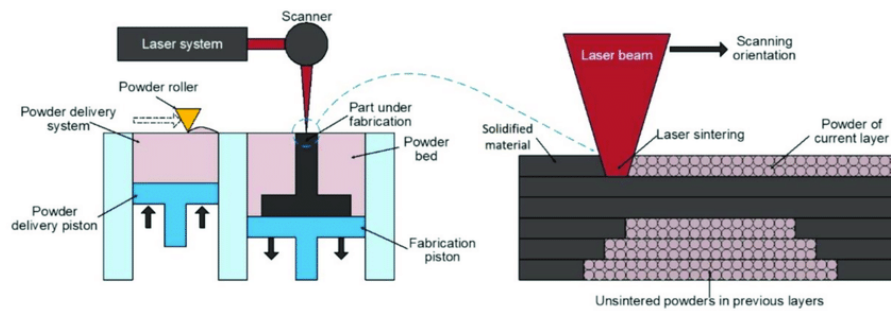
Οι βασικές κατηγορίες της προσθετικής κατασκευής που αφορούν την κατασκευή εξαρτημάτων κυρίως από μέταλλο και από κάποια είδη πλαστικού είναι οι εξής:

1. Electron Beam Melting (EBM) – Τήξη με δέσμη ηλεκτρονίων: Σε αυτή την μέθοδο μια δέσμη ηλεκτρονίων υπό κενό τήκει επιλεκτικά μεταλλικό υλικό, το οποίο βρίσκεται στο τραπέζι της μηχανής υπό μορφή σκόνης.



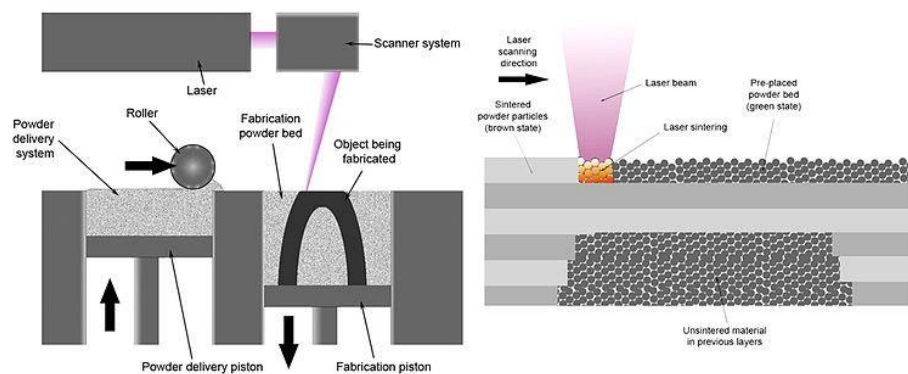
Εικόνα 25: Electron Beam Melting (EBM) [27]

2. Selective Laser Melting (SLM) – Επιλεκτική Τήξη με λέιζερ: Σε αυτή την μέθοδο το λέιζερ χρησιμοποιείται για την πλήρη τήξη της σκόνης μετάλλου σε στρώματα.



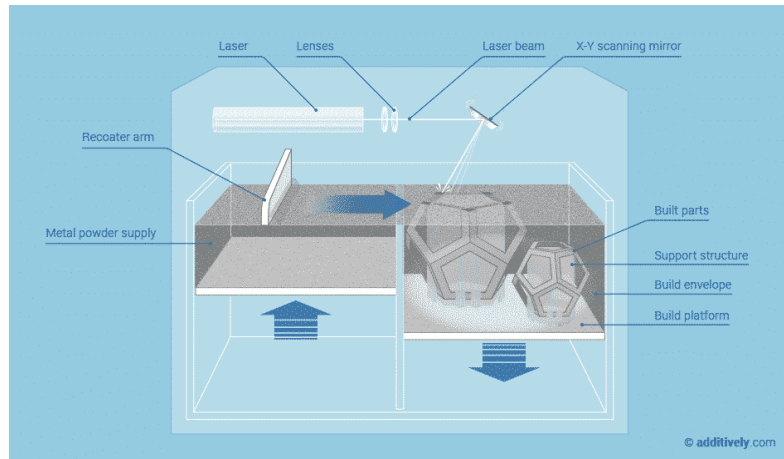
Εικόνα 26: Selective Laser Melting (SLM) [28]

3. Selective Laser sintering (SLS) – Επιλεκτική Σύντηξη με λέιζερ: Σε αυτή την μέθοδο το λέιζερ χρησιμοποιείται για την επιλεκτική σύντηξη του κονιοποιημένου υλικού σε στρώματα. Αυτή η σκόνη μπορεί να είναι πλαστικό, μέταλλο, κεραμικό ή γυαλί.



Εικόνα 27: Selective Laser sintering (SLS) [29]

4. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Άμεση Σύντηξη Μετάλλου με λέιζερ: Σε αυτή την μέθοδο το λέιζερ χρησιμοποιείται για την άμεση σύντηξη των σωματιδίων της σκόνης του μετάλλου σε στρώματα. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ποιότητα της τελικής επιφάνειας που δημιουργείται, η οποία έχει τραχύτητα 8.75 Ra.



Εικόνα 28: Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [27]

## 2.2 Τα μειονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής

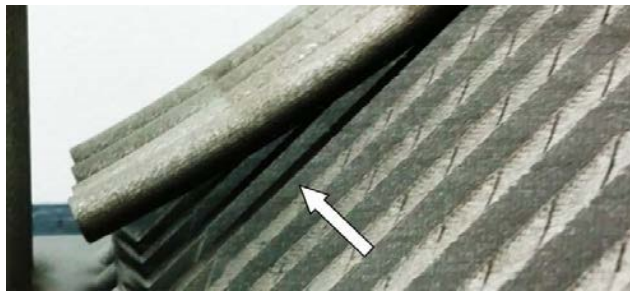
Στην περίπτωση επιλογής της προσθετικής κατασκευής ως μέθοδο κατασκευής των αποτελεσμάτων μιας μελέτης γενεσιουργού σχεδιασμού, υπάρχουν κάποιες προκλήσεις που δεν μπορούν να αποφευχθούν. Παρακάτω αναλύονται κάποιες από αυτές.

- Συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους υπάρχει πεπερασμένος όγκος χώρου κατασκευής και σχετίζεται άμεσα με το μηχάνημα που έχει επιλεγεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εξαναγκάζει την κατασκευή περιορισμένων σε μέγεθος αντικειμένων.
- Σε περιπτώσεις που υπάρχουν προεξοχές, απότομες κλίσεις και ιδιαίτερες γεωμετρίες στο σχέδιο, είναι αναγκαία η προσθήκη υποστηρικτικών δομών, γιατί για να στερεοποιηθεί ένα στρώμα θα πρέπει να εναποτεθεί σε ήδη υπάρχουσα επιφάνεια.



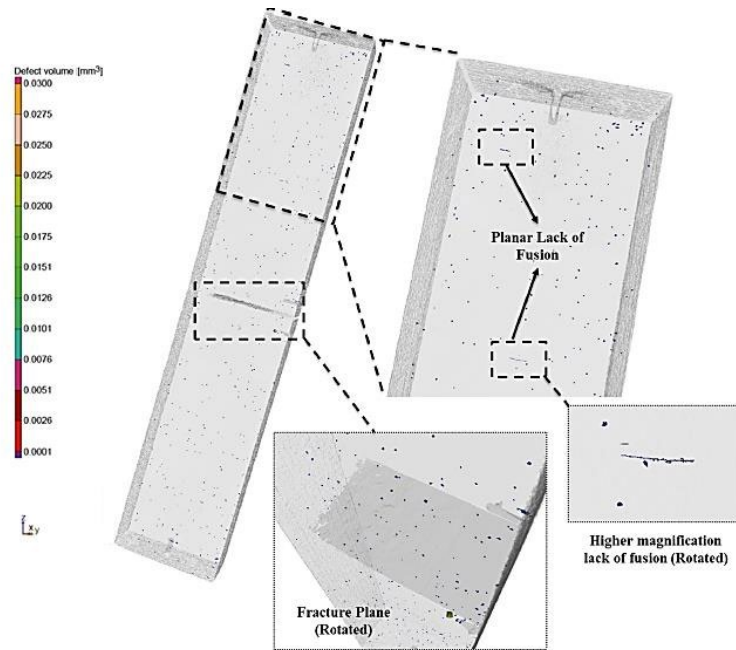
Εικόνα 29: Υποστηρικτικές δομές για την επίτευξη εκτόπισης της γεωμετρίας [30]

Ωστόσο, υπάρχει πιθανότητα αποκόλλησης του εξαρτήματος από αυτές τις δομές λόγω ανεπαρκούς τήξης της σκόνης, στην περίπτωση όπου έχει επιλεγθεί ανάλογη μέθοδος κατασκευής.



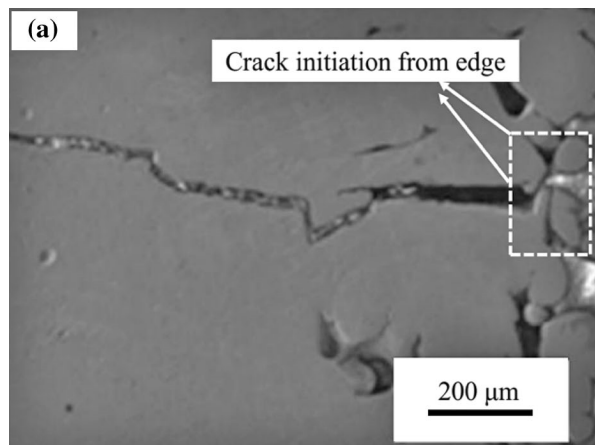
Εικόνα 30: Αποκόλληση εξαρτήματος από τις υποστηρικτικές δομές [31]

- Σε πολλές περιπτώσεις σχηματίζεται πορώδες. Δυο διαφορετικά είδη, το ένα αφορά στην ύπαρξη εγκλωβισμένου αερίου και το άλλο στην ελλιπή σύντηξη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ατελή τήξη της σκόνης λόγω ανεπαρκούς ενέργειας του λέιζερ. Το υψηλότερο πορώδες αερίου θα μειώσει τη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης των κατασκευασμένων εξαρτημάτων.



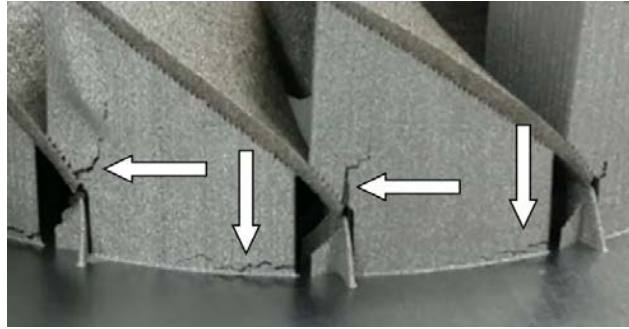
Εικόνα 31: Αποτελέσματα ηλεκτρονικής τομογραφίας σε δείγμα Ti-6Al-4V (Εγκλωβισμός πορώδους, μη ενοποιημένης σκόνης και έλλειψη σύντηξης) [32]

- Υπάρχει πιθανότητα σχηματισμού ρωγμών μεταξύ των στρωμάτων κατά την στερεοποίηση τους ή κατά την επακόλουθη θέρμανση. Σχετίζονται με την κατανομή της θερμοκρασίας, την ατελή σύντηξη και τις παραμένουσες τάσεις. Αυτές οι ατέλειες στην δομή έχουν αντίκτυπο στην μηχανική συμπεριφορά του εξαρτήματος [33].



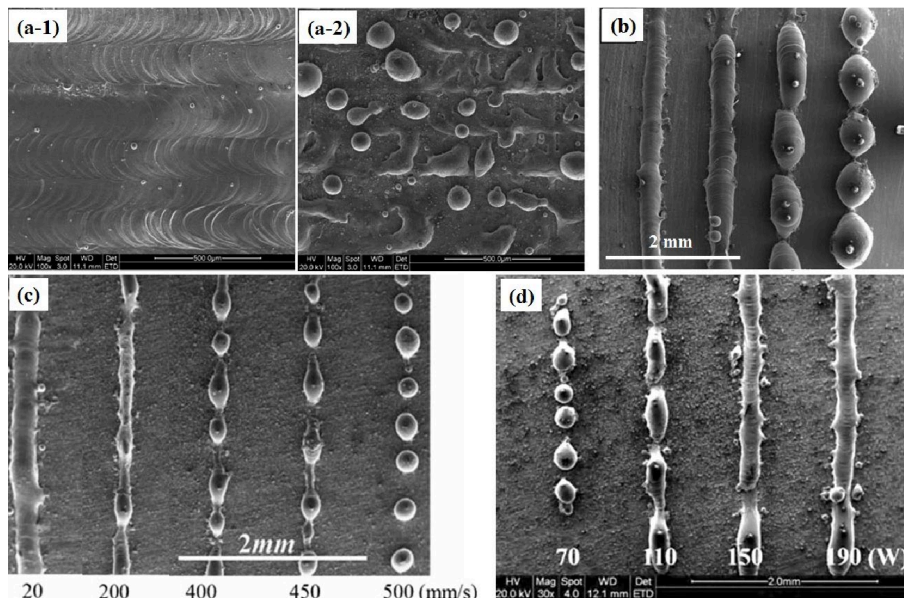
Εικόνα 32: Μορφολογία ρωγμής κατά την κατασκευή εξαρτήματος τιτανίου με την μέθοδο SLM [34]





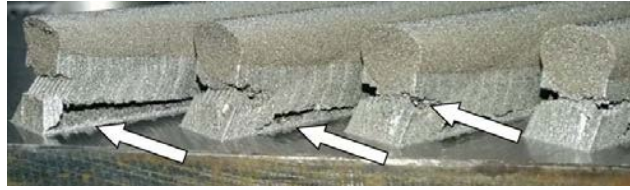
Εικόνα 33: Σχηματισμός Ρωγμών [31]

- Δημιουργείται το φαινόμενο “balling”, στο οποίο σχηματίζονται εξογκώματα με σφαιρική μορφή, όταν το υγρό μέταλλο στερεοποιείται σε σφαίρα υπό την επίδραση επιφανειακής τάσης. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκληθεί τόσο από υψηλή όσο και από χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα της δέσμης λέιζερ.



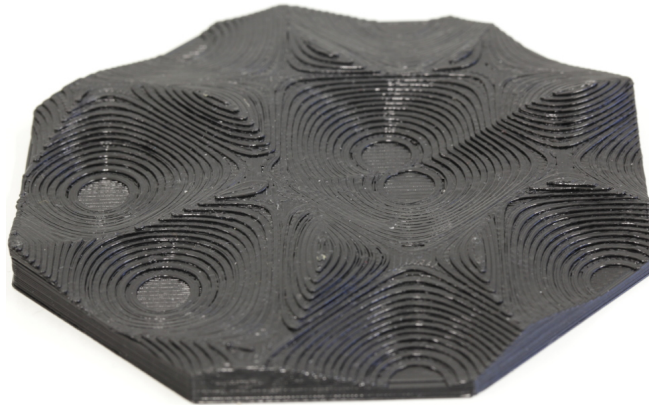
Εικόνα 34: Η επίδραση των παραμέτρων της διεργασίας στην εμφάνιση του “Balling” κατά την διάρκεια εκτύπωσης Laser-Powder Bed Fusion [35]

- Δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις εξαιτίας της τήξης και της στερεοποίησης των υλικών σε σύντομο χρονικό διάστημα και σε μικρό όγκο. Αν ξεπεράσουν το όριο της εφελκυστικής τάσης, μπορεί να δημιουργηθούν μικρορωγμές και να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Για την εξάλειψή τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί θερμική επεξεργασία ή θερμική ισοστατική πίεση [31].



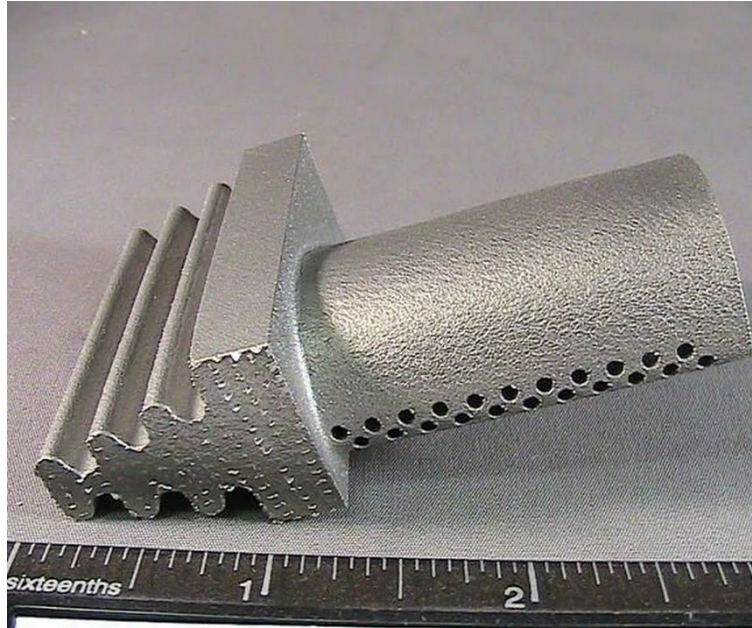
*Εικόνα 35: Ρωγμές εξαιτίας παραμενουσών τάσεων [31]*

- Όσον αφορά την ποιότητα της επιφάνειας, κυρίως στις καμπυλωτές επιφάνειες η τραχύτητά της αυξάνεται και παρατηρείται το φαινόμενο του σκαλοπατιού. Αυτό οφείλεται στις διαφορές μεταξύ της σχεδιαζόμενης γεωμετρίας και της μεταφρασμένης στο αρχείο stl. Για να βελτιωθεί η επιφάνεια, είτε γίνεται μετεπεξεργασία με μηχανικές και χημικές μεθόδους είτε μεταβάλλοντας κάποιες παραμέτρους της εκτύπωσης. Αυτό όμως μπορεί να αυξήσει τον χρόνο εκτύπωσης και άρα κατ' επέκταση και το κόστος.



*Εικόνα 36: Εμφάνιση του φαινομένου του σκαλοπατιού [36]*

Επίσης, η συμπεριφορά οποιουδήποτε εξαρτήματος είναι συνάρτηση της επιφανειακής τραχύτητας. Στην περίπτωση όπου η τραχύτητα είναι υψηλή, το εξάρτημα θα φθαρεί περισσότερο και θα έχει υψηλότερο συντελεστή τριβής γεγονός που αυξάνει την πιθανότητα σχηματισμού ρωγμών [37].



Εικόνα 37: Ποιότητα επιφάνειας πτερυγίου τρισδιάστατης εκτύπωσης [38]

- Μέσω των μεθόδων της τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτυγχάνεται χαμηλή διαστασιολογική ακρίβεια των αντικειμένων, περίπου 100μm στις περισσότερες περιπτώσεις και αν υπάρχει ανάγκη μεγαλύτερης ακρίβειας προστίθεται επιπλέον επεξεργασία [39].
- Σε όλες σχεδόν τις εκτυπώσεις απαιτείται κατά κανόνα μετέπειτα επεξεργασία της επιφάνειας (Post Processing), όπως λείανση της επιφάνειας, προσθήκη κατεργασίας αφαίρεσης υλικού, μεθόδους ψηγματοβολής σφαιριδίων (Bead Blasting) και φινίρισμα μέσω δόνησης. Αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση της ποιότητας της επιφάνειας, αλλά ταυτόχρονα μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση επιπλέον ελαττωμάτων που θα επηρεάσουν αρνητικά την αντοχή σε κόπωση. Επίσης, απαιτείται επιπρόσθετη διαδικασία αφαίρεσης τυχόν πρόσθετου υλικού στήριξης ή σκόνης από το τελικό εξάρτημα.
- Οι διάφορες μέθοδοι προσθετικής κατασκευής, οι πρώτες ύλες, ο μηχανολογικός εξοπλισμός, καθώς και η επακόλουθη επεξεργασία συμβάλλουν στην δημιουργία αποκλίσεων στην κατασκευαστική διαδικασία. Για την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων χρησιμοποιούνται Μη Καταστροφικές Δοκιμές (Non Destructive Testing - NDT), όπως Δινορρέυματα και υπέρηχοι. Στον κατασκευαστικό τομέα γίνεται χρήση ήδη προτύπων NDT για τον έλεγχο των κατεργασιών συγκόλλησης και χύτευσης. Ο έλεγχος των τεχνολογιών της προσθετικής κατασκευής όμως καθίσταται αδύνατος με την χρήση των υπάρχοντων προτύπων των συμβατικών μεθόδων εξαιτίας των σημαντικών διαφορών που

παρουσιάζουν κατά την φάση της κατασκευής. Έτσι, οι προϋπάρχουσες μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν ως έχουν και θα πρέπει να υιοθετηθούν νέα πρότυπα ελέγχου.

- Η τρισδιάστατη εκτύπωση δεν εμφανίζει επαναληψιμότητα, αλλά ανισοτροπία και μη ύπαρξη ομοιομορφίας στην δομή του εξαρτήματος. Για παράδειγμα, σε SLS χρησιμοποιείται μια δέσμη λέιζερ και μέσω κατόπτρων κατευθύνεται προς τα διάφορα σημεία κάθε στρώματος. Η γωνία πρόσπτωσης της θα ποικίλλει ανάλογα με το σημείο στο οποίο επιδρά και δεν μπορεί εύκολα να διασφαλιστεί ότι το λέιζερ δίνει την ίδια ποσότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται διαφορετικοί βαθμοί ένωσης στο τεμάχιο [39].
- Παρουσιάζεται έλλειψη προτύπων για την διασφάλιση της επαναληψιμότητας και της σταθερής ποιότητας των προϊόντων παραγόμενα από μεθόδους προσθετικής κατασκευής. Καθίστανται καταλυτική η ύπαρξη συγκεκριμένων πιστοποιήσεων για κάθε φάση της κατασκευής λόγω της φύσης της προσθετικής κατασκευής. Σκοπός η διασφάλιση των ιδιοτήτων του υλικού κατά την διάρκεια των διεργασιών που εν συνεχεία επιδρούν στην μηχανική συμπεριφορά του τελικού εξαρτήματος.
- Ο χρόνος εκτύπωσης είναι μεγάλος και αυτό εμποδίζει περαιτέρω την υιοθέτησή της λόγω της επακόλουθης αύξησης του χρόνου παράδοσης και της πιθανότητας μείωσης της ικανότητας ανταπόκρισης στη ζήτηση. Μεταβάλλοντας παραμέτρους, όπως το πάχος στρώματος, τον αριθμό των στρωμάτων, την ταχύτητα εκτύπωσης, για την βελτίωση του τελικού εξαρτήματος μεταβάλλεται και ο χρόνος της εκτύπωσης. Επίσης, όσο πιο περίπλοκη γεωμετρία, τόσο πιο χρονοβόρα η διαδικασία εκτύπωσης.
- Ενώ το μοναδιαίο κόστος είναι μικρό σε μικρού όγκου παραγωγές, σε μεγάλες παραγωγές η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ασύμφορη [40]. Αντίθετα, στις συμβατικές μεθόδους όσο αυξάνεται η ποσότητα τόσο μειώνεται το κόστος ανά τεμάχιο.
- Το κόστος των πρώτων υλών είναι υψηλό, γιατί τα υλικά σε σκόνη συνήθως παρασκευάζονται με ψεκασμό με αέριο ή νερό. Αυτός ο τύπος διαδικασίας παραγωγής σκόνης είναι ακριβός και δίνει μια περιορισμένη ποσότητα υλικού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ακόμη, απαιτούνται διαφορετικές διεργασίες για διαφορετικούς τύπους υλικών. Επιπλέον, η ποιότητα του τελικού τεμαχίου εξαρτάται από την ποιότητα της σκόνης, η οποία καθορίζεται από την μέθοδο παραγωγής. Στις περισσότερες μεθόδους εγκλωβίζεται κάποιο αέριο το οποίο στη συνέχεια μπορεί να δημιουργήσει πόρους στο τελικό προϊόν. Επίσης, οι επιλογές των υλικών είναι περιορισμένες συγκριτικά με αυτές

που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις συμβατικές μεθόδους, καθιστώντας έτσι την υιοθέτησή της πιο δύσκολη.

- Το κόστος εξοπλισμού είναι υψηλό και κάθε εκτυπωτής έχει την δική του τεχνολογία που μπορεί να επεξεργαστεί συγκεκριμένη κατηγορία υλικών. Δεν υπάρχει δηλαδή συμβατότητα με όλα τα υλικά. Ακόμα και ίδιας κατηγορίας με ελαφρώς διαφορετικά χαρακτηριστικά πιθανώς να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον ίδιο εκτυπωτή.
- Παρατηρείται υψηλή κατανάλωση ενέργειας για την τρισδιάστατη εκτύπωση εξαρτημάτων. Ο χρόνος ποικίλλει ανάλογα με διάφορες παραμέτρους εκτύπωσης που επιλέγονται. Για παράδειγμα, το πάχος στρώματος αν αυξηθεί θα επηρεάσει την καταναλισκόμενη ενέργεια, αφού για μικρά πάχη τα απαιτούμενα για την ολοκλήρωση της κατασκευής στρώματα αυξάνονται. Οι ταυτόχρονες εκτυπώσεις μειώνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις, αλλά αυτό δεν είναι πάντα εφικτό.
- Στην συνολική απαιτούμενη ενέργεια θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν, πέρα από την εναπόθεση του υλικού, και οι μη παραγωγικές διεργασίες, όπως για παράδειγμα η ψύξη των αντικειμένων μετά το τέλος της εκτύπωσης, ο καθαρισμός του θαλάμου, κλπ. Έτσι, ενώ ο χρόνος σεταρίσματος του μηχανήματος είναι μικρός, απαιτείται επιπλέον χρόνος μετά το πέρας της που θα πρέπει να συνυπολογιστεί στο συνολικό κόστος.
- Η παραγωγικότητα της διαδικασίας εξαρτάται από τις γνώσεις του σχεδιαστή που θα πρέπει να είναι υψηλές. Απαιτούνται γνώσεις των περιορισμών της εκτύπωσης και της εκάστοτε τεχνολογίας. Είναι αναγκαίο για κάθε τεχνολογία να δημιουργηθούν σαφείς οδηγίες σχεδιασμού, ώστε ο σχεδιαστής να προβλέψει όποιες αστοχίες μπορούν να προκύψουν και να τις επιλύσει έγκαιρα.



*Εικόνα 38: Παράδειγμα αστοχίας - Κύρτωση προεξοχής [31]*

## 2.3 Πρόταση χρήσης του γενεσιουργού σχεδιασμού για κατασκευή αντικειμένων με κλασσικές μεθόδους

Λόγω της ιδιαιτερότητας των μεθόδων της προσθετικής κατασκευής, του κόστους της και των λογισμικών που απαιτούνται, δεν το διαθέτουν πολλές επιχειρήσεις και κυρίως οι μικρές. Οπότε, οι περισσότερες επιχειρήσεις καταλήγουν να μην χρησιμοποιούν την μέθοδο του γενεσιουργού σχεδιασμού και να μην αξιοποιούν τις δυνατότητές της. Ωστόσο, η μέθοδος του γενεσιουργού σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως πηγή έμπνευσης για την δημιουργία νέων προϊόντων με συμβατικές μεθόδους εκμεταλλευόμενο τα οφέλη αυτών έναντι της προσθετικής κατασκευής. Στις συμβατικές μεθόδους κατασκευής συμπεριλαμβάνονται οι μέθοδοι αφαίρεσης υλικού, οι μέθοδοι διαμόρφωσης, η χύτευση, οι συγκολλήσεις και γενικότερα οι συνδέσεις. Κάποια από τα οφέλη των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής είναι η δυνατότητα μαζικής παραγωγής σε μικρό χρονικό διάστημα και η υψηλή ακρίβεια των εξαρτημάτων που μπορούν να παραχθούν. Ακόμη, υπάρχει μεγάλο εύρος υλικών που μπορούν να επιλεγθούν για κάθε μέθοδο συγκριτικά με της προσθετικής κατασκευής. Για απλές κατασκευές επίσης είναι οικονομικότερη η λύση των συμβατικών μεθόδων, αφού δεν απαιτεί ακριβό εξοπλισμό ή πολύπλοκες διεργασίες. Επιπλέον, οι διαδικασίες παραγωγής των προϊόντων μπορούν να αυτοματοποιηθούν εύκολα μειώνοντας την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης και αυξάνοντας την παραγωγικότητα. Επίσης, σημαντικό όφελος αυτών είναι η επαναληψιμότητά τους και η σημαντική μείωση που εμφανίζουν στο κόστος σε μεγάλους όγκους παραγωγής. Ακόμη, ως προς τις μηχανικές ιδιότητές τους φαίνεται τα εξαρτήματα που παράγονται από αυτές να είναι ανθεκτικά και με υψηλή αντοχή. Έτσι, επιλέγοντας ένας σχεδιαστής να κατασκευάσει το προϊόν με κλασσικές μεθόδους θα μειωθεί σημαντικά το κόστος παραγωγής του. Δηλαδή στο στάδιο ανάπτυξης ενός προϊόντος ή βελτίωσης ενός ήδη υπάρχοντος ο σχεδιαστής, αφού εφαρμόσει την μέθοδο, μπορεί να επιλέξει το σχέδιο που θεωρεί βέλτιστο και να αξιοποιήσει τις βελτιώσεις που προέκυψαν. Για παράδειγμα, σημεία στα οποία δεν έχει προστεθεί υλικό, ή σημεία που πρέπει να ενισχυθούν για αύξηση της αντοχής. Έπειτα, μπορεί να τις εφαρμόσει ανασχεδιάζοντας το προϊόν με σκοπό την κατασκευή του με κλασσικές μεθόδους. Εναλλακτικά, μπορεί να αποφασίσει ένα αντικείμενο να το κάνει συναρμολόγημα ή και το αντίστροφο. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν όλες οι επιχειρήσεις να χρησιμοποιούν την μέθοδο του γενεσιουργού σχεδιασμού και να εκμεταλλευτούν τα οφέλη της με τα ήδη υπάρχοντα μηχανήματα που διαθέτουν.



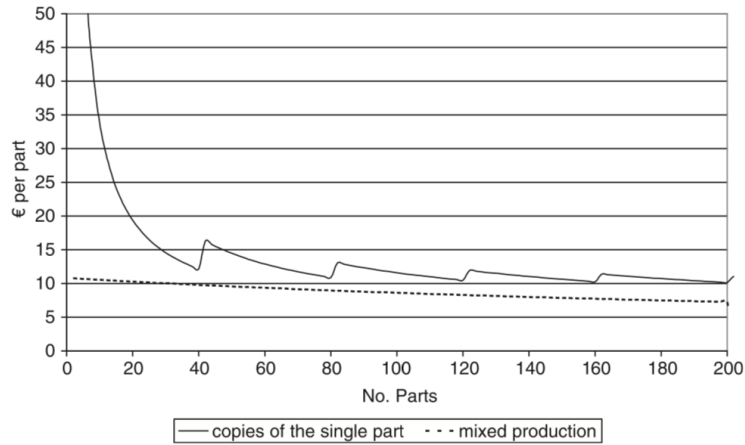
### 2.3.1 Μοντέλα κόστους για την μέθοδο της προσθετικής κατασκευής και των μηχανουργικών κατεργασιών

Με την ανάπτυξη των τεχνολογιών της προσθετικής κατασκευής δημιουργήθηκε η ανάγκη υπολογισμού του κόστους των αντικειμένων που παράγονται από αυτή. Για τον σκοπό αυτό έγιναν διάφορες μελέτες που στόχο τους είχαν την δημιουργία κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων, τα οποία θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην οικονομική ανάλυση της μεθόδου. Οι Hopkins και Dickens το 2003 [40] ανέπτυξαν ένα μοντέλο το οποίο χώριζε το κόστος σε τρεις κατηγορίες, κόστος μηχανήματος, κόστος εργασίας και κόστος υλικού. Σε αυτά τα κόστη δεν συμπεριλήφθηκαν παράγοντες, όπως η κατανάλωση ενέργειας, γιατί σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν η συνεισφορά τους ήταν λιγότερη από το 1% του τελικού κόστους. Επίσης, μια από τις παραδοχές ήταν ότι το μηχάνημα παρήγαγε το ίδιο κομμάτι σταθερά για ένα χρόνο. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό ήταν έγκυρο μόνο για μεγάλη παραγωγή και όχι για μικρού όγκου παραγωγές. Έπειτα, το 2005 ο Ruffo, κ.ά [41] βασιζόμενοι σε αυτό το μοντέλο δημιούργησαν ένα νέο που περιλάμβανε τα άμεσα και έμμεσα κόστη. Για αυτή την μελέτη χρησιμοποίησαν το ίδιο κομμάτι που χρησιμοποιήθηκε από τους Hopkins και Dickens. Ως έμμεσα κόστη θεώρησαν το κόστος του μηχανήματος, τα γενικά έξοδα παραγωγής και τα διοικητικά έξοδα. Σε αντίθεση με την παλαιότερη μελέτη, το κόστος εργασίας και συντήρησης του μηχανήματος συμπεριλαμβάνονται στα έμμεσα κόστη. Επιπλέον, στο προηγούμενο μοντέλο θεωρήθηκε ότι ο τεχνίτης εργαζόταν σε πλήρη απασχόληση μόνο με αυτό το αντικείμενο, σετάροντας το μηχάνημα και καθαρίζοντας τα τεμάχια και όχι ότι εργαζόταν και σε άλλους τομείς. Σχετικά με το κόστος υλικού το δεύτερο μοντέλο λαμβάνει υπ' όψιν του το υλικό που μπορεί να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί, κάτι το οποίο είναι πιο ρεαλιστικό και μειώνει σημαντικά το κόστος υλικού.

<i>Production overhead</i>	€	<i>Production labour</i>	€
Yearly rent rate (per m <sup>2</sup> )	130.5	Technician annual salary + employer contributions	32 770 ( + 22%)
Building area (m <sup>2</sup> )	246.5		
Energy consumption/h	1.5	<i>Machine costs</i>	€
		Machine & breakout station purchase	362 500 + 24 360
<i>Administration overhead</i>	€	Purchase cost/year*	45 313 + 3045
Hardware purchase	2175	Maintenance/year	21 750
Software purchase	2175	Software purchase	7250
Hardware cost/year*	435	Hardware purchase	4350
Software cost/year*	435	Software cost/year*	1450
Consumables per year	1450	Cost of software upgrades/year	1450
		Hardware cost/year	870

Εικόνα 39: Έμμεσα κόστη [41]

Το 2006 ο Ruffo, κ.ά [42] χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο προσπάθησαν να ενσωματώσουν διαφορετικά κομμάτια στο ίδιο μηχάνημα και όχι αντίγραφα του ίδιου εξαρτήματος. Τα αποτελέσματα αυτού έδειξαν ότι μια τέτοιου είδους μεικτή παραγωγή οδηγεί σε χαμηλότερα κόστη.



Εικόνα 40: Σύγκριση κόστους για αντίγραφα του ίδιου αντικειμένου και διαφορετικών αντικειμένων [43]

Το 2012 ο Baumer, κ.ά [44] ανέπτυξαν το μοντέλο και ενσωμάτωσαν σε αυτό τα κόστη της δαπανώμενης ενέργειας στην κατηγορία των άμεσων κοστών. Παρ' όλα αυτά δεν λήφθηκαν υπ' όψιν τα κόστη προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας για κάθε κομμάτι. Έτσι, το 2013 ο Rickenbacher, κ.ά [45] υπολόγισαν το κόστος αυτών και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι βοηθητικές διεργασίες καταλαμβάνουν το 23% του συνολικού χρόνου κατασκευής. Το 2016 ο Hällgren, κ.ά [46] παρουσίασαν μια μέθοδο, η οποία επιτρέπει την άμεση σύγκριση της προσθετικής κατασκευής με τις μηχανουργικές κατεργασίες υψηλών ταχυτήτων (High Speed Machining). Σε αυτή την περίπτωση τα κόστη χωρίζονται σε επαναλαμβανόμενα και μη κόστη. Στόχος αυτής της προσέγγισης ήταν να επαληθεύσει αν η κατασκευή αντικειμένων με προσθετική κατασκευή είναι οικονομικότερη των μηχανουργικών κατεργασιών υψηλών ταχυτήτων. Το συμπέρασμά της ήταν ότι για μεγάλα κομμάτια που απαιτούν μεγάλους χρόνους εκτύπωσης οι μηχανουργικές κατεργασίες υπερτερούν.

	High Speed Machining, HSM	Metal Additive Manufacturing, AM
Initial investment,	Fixtures +NC tool path planning	AM build preparation
NRC	Derived from cost quotes	Powder deposit time (NRC per build chamber)
Recurring cost	Cut time + material cost	Print time + powder cost + post process treatment

Εικόνα 41: Τα επαναλαμβανόμενα και μη κόστη του High Speed Machining και του Additive Manufacturing [46]



Το 2018 ο Baumers, κ.ά [47] συνέχισαν την μελέτη που είχαν κάνει δοκιμάζοντας διαφορετικές κατανομές στην εκτύπωση. Η μελέτη κατέληξε ότι η εκτύπωση αντιγράφων του ίδιου αντικειμένου εκμεταλλευόμενοι την μέγιστη χωρητικότητα του μηχανήματος μειώνει το κόστος. Ωστόσο, αν επιλεγθούν διαφορετικά αντικείμενα να εκτυπωθούν ταυτόχρονα τα αποτελέσματα δεν είναι ίδια. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο κατασκευής και η πιθανότητα αποτυχίας αυξάνεται. Τέλος, σε αυτό το μοντέλο αναλύθηκε για πρώτη φορά η πιθανότητα αποτυχίας και συμπεριλήφθηκε στο τελικό κόστος.

Όπως και για την προσθετική κατασκευή έτσι για τις μηχανουργικές κατεργασίες έχουν αναπτυχθεί μοντέλα κόστους με σκοπό την ακριβέστερη πρόβλεψη του χρόνου. Συγκεκριμένα, το 2013 ο Liu, κ.ά [48] δημιούργησαν μια μέθοδο υπολογισμού του χρόνου κατασκευής βασιζόμενοι στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τελικού αντικειμένου, όπως οπές, προφίλ, αυλακώσεις, κλπ. Από δοκιμές φάνηκε ότι η μέθοδος δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα με μέσο σφάλμα 3.6%. Έτσι, γνωρίζοντας τον χρόνο κατασκευής μπορεί να βελτιστοποιηθεί το πλάνο παραγωγής και να μεταβληθεί το σχέδιο του αντικειμένου προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος και κατά συνέπεια το κόστος.

### **2.3.2 Συγκριτική μελέτη κατασκευής καλουπιού με μέθοδο αφαίρεσης υλικού και τρισδιάστατης εκτύπωσης**

Στην παρακάτω μελέτη περίπτωσης της Rucsandra Acsinte αναλύεται καλούπι για εισαγωγή αέρα, η οποία τοποθετείται στον ουραίο κώνο αεροσκάφους [43]. Η ανάλυση αφορά την κατασκευή του καλουπιού, τις τεχνικές προδιαγραφές και το κόστος κατασκευής του. Το τελικό αντικείμενο παράγεται μέσω κατασκευής σύνθετων υλικών με hand lay-up, δηλαδή τοποθέτηση υφασμάτων σύνθετων υλικών σε στρώσεις. Το καλούπι αρχικά αποτελούνταν από δυο κομμάτια, κατασκευαζόταν από ανοξείδωτο χάλυβα με μέθοδο αφαίρεσης υλικού και είχε βάρος περίπου 80 κιλά. Αυτό απαιτούσε εξοπλισμό ανύψωσης για να μετακινηθεί σε κάθε στάδιο προσθέτοντας χρόνο στην παραγωγική διαδικασία.

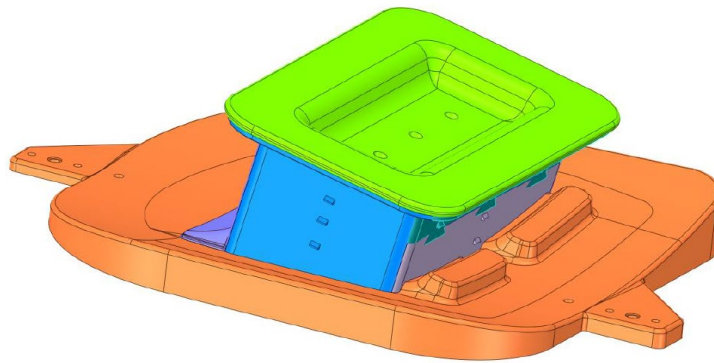


*Εικόνα 42: Καλούπι από ανοξείδωτο χάλυβα [43]*



*Εικόνα 43: Τελικό αντικείμενο από σύνθετα υλικά [43]*

Για να βελτιωθεί η εργονομία του και να μειωθεί ο χρόνος, το καλούπι κατασκευάστηκε μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Έτσι, το καλούπι χωρίστηκε σε 7 κομμάτια, ώστε να μπορέσει να τυπωθεί και το υλικό που επιλέχθηκε ήταν ULTEM 1010. Το υλικό αυτό εξασφαλίζει δομική σταθερότητα του τεμαχίου σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία, το οποίο απαιτείται στην μετέπειτα παραγωγική διαδικασία, και παρουσιάζει χαμηλό πορώδες. Με αυτή την μέθοδο χρειάστηκε μετεπεξεργασία των εκτυπωμένων αντικειμένων, όπως η αφαίρεση των υποστηρικτικών δομών, λείανση, εφαρμογή εποξικής ρητίνης, σκλήρυνση της ρητίνης και τελική λείανση για στεγανοποίηση.



*Εικόνα 44: Συναρμολόγημα καλουπιού προς εκτύπωση [43]*



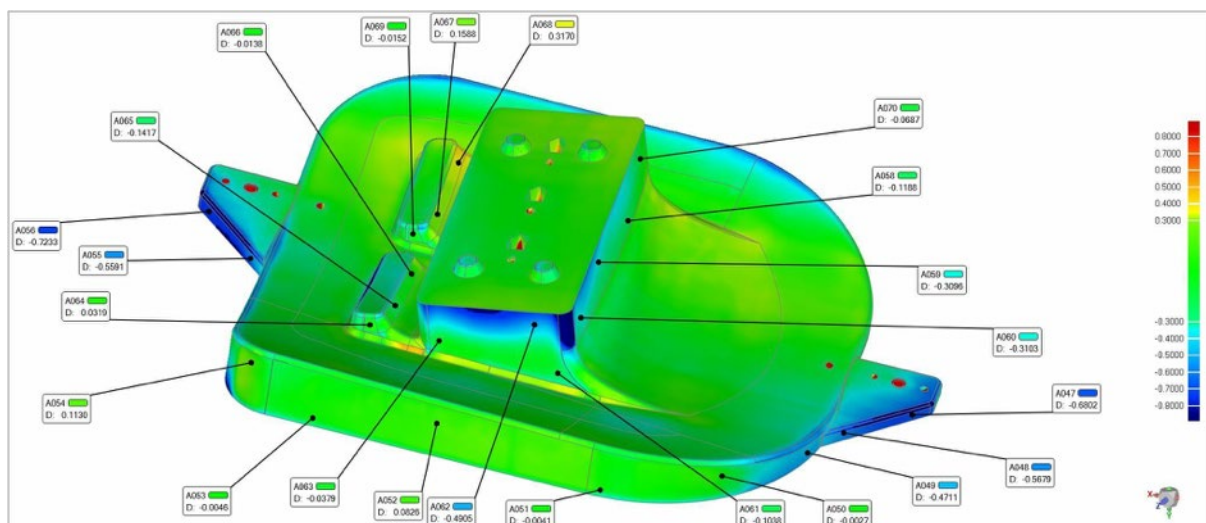
*Εικόνα 45: Εξαρτήματα συναρμολογήματος καλουπιού [43]*



*Εικόνα 46: Τελική μορφή καλουπιού μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης [43]*

Επιπλέον, έγινε διαστασιολογικός ποιοτικός έλεγχος του καλουπιού σε εργαλειομηχανή μέτρησης συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machine – CMM), ώστε να διασφαλιστεί ότι ικανοποιεί τις απαιτήσεις του σχεδίου. Πραγματοποιήθηκαν δυο έλεγχοι, ένας ακριβώς μετά την εκτύπωση και ένας μετά την επεξεργασία με ρητίνη και την τελική λείανση. Κατά τον πρώτο έλεγχο οι μεγαλύτερες αποκλίσεις βρέθηκαν γύρω από τις λαβές

που δεν επηρεάζουν όμως το τελικό καλούπι. Επίσης, υπήρξε μια μικρή απόκλιση γύρω από τμήμα που ανήκει στον λαιμό και γύρω από τις τέσσερις γωνίες του πάνω κομματιού. Ακόμη, σε κάποιες περιοχές που υπάρχει καμπυλότητα στις γωνίες εμφανίστηκαν κάποιες ατέλειες που παραμένουν εντός των προδιαγραφών. Στον δεύτερο έλεγχο παρατηρήθηκε αύξηση του σφάλματος των διαστάσεων, κάποια σημεία βελτιώθηκαν και άλλα εμφάνισαν μεγαλύτερη απόκλιση. Παρ' όλα αυτά οι αποκλίσεις ήταν αποδεκτές και το καλούπι ικανοποιούσε τις διαστασιολογικές απαιτήσεις του σχεδίου. Στη συνέχεια, το καλούπι χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του τελικού αντικειμένου και παρουσίασε σημαντικά λειτουργικά και εργονομικά προβλήματα. Αρχικά, το πρώτο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν η έλλειψη σταθερότητας του καλουπιού λόγω του μικρού του βάρους. Έτσι, για την τοποθέτηση των στρώσεων των ανθρακονημάτων χρειάστηκε να στερεωθεί το καλούπι σε συγκεκριμένα σημεία στην θέση εργασίας, προσθέτοντας ένα ακόμα βήμα στην συνολική παραγωγή.



Εικόνα 47: Διαστασιολογική ανάλυση ενός τμήματος του καλουπιού [43]

Επιπλέον, για την κατασκευή του τελικού αντικειμένου από ανθρακονήματα αναγκαίο είναι μετά την τοποθέτηση των στρώσεων να προστεθεί ειδικό φιλμ και στην συνέχεια να σφραγιστεί σε σακούλα υπό κενό. Έπειτα, ακολουθεί διεργασία σε αυτόκλειστο υπό πίεση και στην βέλτιστη θερμοκρασία, διαδικασία ψύξης και τέλος αφαίρεση από το καλούπι. Στην περίπτωση του εκτυπωμένου καλουπιού κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης, η υψηλή πίεση και θερμοκρασία αλλοίωσαν τις επιθυμητές διαστάσεις του τελικού τεμαχίου και έτσι το καλούπι δεν πληρούσε τις τεχνικές προδιαγραφές που ορίστηκαν.

Όσον αφορά το κόστος της κατασκευής του καλουπιού, υλοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση βασισμένη στα μοντέλα που παρουσιάστηκαν παραπάνω τόσο για το κόστους της

τρισδιάστατης εκτύπωσης όσο και της μεθόδου αφαίρεσης υλικού. Αρχικά, για το κόστος του πρώτου περιγράφηκαν τα έμμεσα κόστη, δηλαδή το κόστος του μηχανήματος και τα βοηθητικά κόστη, όπως το λογισμικό και το κόστος συντήρησης. Υπολογίστηκε συνολικό έμμεσο κόστος 62,63 \$/hr. Επιπρόσθετα, το κόστος υλικού ήταν 140 \$/kg, το κόστος εργασίας 15 \$/hr και η κατανάλωση ενέργειας 86,6 MJ/kg. Αντίστοιχα στην περίπτωση της μεθόδου αφαίρεσης υλικού τα έμμεσα κόστη υπολογίστηκαν 80,4 \$/hr, το κόστος υλικού 2,5 \$/kg, το κόστος εργασίας 15 \$/hr και η κατανάλωση ενέργειας 50 J/mm<sup>3</sup>. Για την μελέτη αυτή θεωρήθηκε παραγωγή 200 κομματιών σε διάστημα ενός χρόνου. Αρχική διαπίστωση ήταν ότι το κόστος της μεθόδου αφαίρεσης υλικού ήταν 16% μικρότερο της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Πιο συγκεκριμένα το συνολικό κόστος της μεθόδου αφαίρεσης υλικού ήταν 1.418,66 \$/τεμάχιο και 283.731,19 \$/χρόνο, ενώ της τρισδιάστατης εκτύπωσης 1.684,13 \$/τεμάχιο και 336.826,39 \$/χρόνο. Και στις δυο μεθόδους η αγορά του υλικού και τα βοηθητικά κόστη παρέμειναν οι κύριες δαπάνες. Η κύρια αιτία αύξησης του κόστους της εκτύπωσης ήταν το κόστος του μηχανήματος και συντήρησής του. Επίσης, ενώ υπάρχει μεγάλη διαφορά στην απαιτούμενη ποσότητα υλικού για την μέθοδο αφαίρεσης υλικού, αυτό δεν επιδρά στο τελικό κόστος του υλικού εξαιτίας της υψηλότερης τιμής του υλικού για εκτύπωση. Ωστόσο, το κόστος εργασίας στην περίπτωση της εκτύπωσης ήταν χαμηλότερο, αφού δεν απαιτείται κάποια διεργασία κατά την διάρκεια της εκτύπωσης. Ενώ στην μέθοδο αφαίρεσης υλικού απαιτείται τοποθέτηση της πρώτης ύλης στη βάση συγκράτησης στην μηχανή, αλλαγή εργαλείων και πιθανή διόρθωση τους για αντιστάθμιση της φθοράς τους.

<b>Subtractive</b>				
Total Cost				
	per piece		per year	percent
<b>Main Machine Cost</b>	\$	156,25	\$ 31 250,00	11%
<b>Auxiliary Cost</b>	\$	223,54	\$ 44 708,00	16%
<b>Material Cost</b>	\$	960,00	\$ 192 000,00	68%
<b>Energy Cost</b>	\$	42,87	\$ 8 573,19	3%
<b>Labor Cost</b>	\$	36,00	\$ 7 200,00	3%
<b>Total Cost</b>	\$	1 418,66	\$ 283 731,19	100%
<b>Direct Cost</b>				
<b>Material Cost</b>	\$	960,00	\$ 192 000,00	92%
<b>Energy Cost</b>	\$	42,87	\$ 8 573,19	4%
<b>Labor Cost</b>	\$	36,00	\$ 7 200,00	3%
<b>Total Cost</b>	\$	1 038,87	\$ 207 773,19	100%

Πίνακας 2: Κόστη μεθόδου αφαίρεσης υλικού [43]



<b>Additive</b>			
<b>Total Cost</b>			
	<b>per piece</b>	<b>per year</b>	<b>percent</b>
<b>Main Machine Cost</b>	\$ 250,00	\$ 50 000,00	15%
<b>Auxiliary Cost</b>	\$ 322,05	\$ 64 409,80	19%
<b>Material Cost</b>	\$ 1 087,94	\$ 217 588,22	65%
<b>Energy Cost</b>	\$ 15,14	\$ 3 028,36	1%
<b>Labor Cost</b>	\$ 9,00	\$ 1 800,00	1%
<b>Total Cost</b>	\$ 1 684,13	\$ 336 826,39	100%

<b>Direct Cost</b>			
<b>Material Cost</b>	\$ 1 087,94	\$ 217 588,22	98%
<b>Energy Cost</b>	\$ 15,14	\$ 3 028,36	1%
<b>Labor Cost</b>	\$ 9,00	\$ 1 800,00	1%
<b>Total Cost</b>	\$ 1 112,08	\$ 222 416,59	100%

Πίνακας 3: Κόστη τρισδιάστατης εκτύπωσης [43]

Από τα παραπάνω αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης γίνεται αντιληπτό ότι σε ορισμένους τομείς η τρισδιάστατη εκτύπωση υπερτερεί έναντι των μεθόδων αφαίρεσης υλικού και σε άλλους το αντίστροφο. Είναι εμφανές ότι πέρα από την μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής, απαραίτητη είναι η επίτευξη της λειτουργικότητας του τελικού εξαρτήματος. Γι' αυτό και σε τέτοιες περιπτώσεις ο ποιοτικός έλεγχος είναι αναγκαίος και μπορεί να βοηθήσει στην βελτίωση του προϊόντος και της παραγωγικής διαδικασίας.

## Κεφάλαιο 3ο – Μελέτες Περίπτωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν διάφορες περιπτώσεις ανασχεδιασμών αντικειμένων που δημιουργήθηκαν μέσω της μεθόδου του γενεσιουργού σχεδιασμού στο λογισμικό Fusion 360 της Autodesk. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να αναδειχθεί η χρήση της μεθόδου ως εργαλείο παραγωγής ιδεών στον σχεδιασμό εξαρτημάτων. Επιπλέον, στόχος αποτελεί η μείωση του κόστους των εξαρτημάτων επιλέγοντας την κατασκευή τους μέσω συμβατικών μεθόδων, εξασφαλίζοντας παράλληλα την λειτουργικότητά τους. Σε κάθε παράδειγμα θα γίνει αρχικά περιγραφή της μελέτης του γενεσιουργού σχεδιασμού που πραγματοποιήθηκε για να προκύψει το τελικό βέλτιστο σχέδιο. Στην συνέχεια, θα παρουσιαστεί το ανασχεδιασμένο εξάρτημα και θα παρατεθούν οι έλεγχοι αντοχής που έγιναν στα σχέδια που προέκυψαν. Τέλος, στα τρία από αυτά θα παρουσιαστούν ορισμένα στοιχεία κόστους κατασκευής των εξαρτημάτων από ζητήσεις προσφοράς που έγιναν σε κάποιες εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον τομέα. Αυτό το κόστος διαμορφώνεται κυρίως από την πρώτη ύλη, τον χρόνο της διεργασίας, τον χρόνο σεταρίσματος του μηχανήματος, τον προγραμματισμό κοπής και εκτύπωσης. Επίσης, η τιμή μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά ανάλογα και με τις απαιτήσεις του σχεδίου ως προς την διαστασιολογική ακρίβεια και τον χρόνο παράδοσης και η κοστολόγηση θα είναι διαφορετική. Γι' αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι το κόστος εξαρτάται από πολλές παραμέτρους της διεργασίας, αλλά και από τον εκάστοτε προμηθευτή. Έτσι, σε κάθε περίπτωση οι τιμές είναι ενδεικτικές και μπορούν να εμπεριέχουν κάποιο σφάλμα υπολογισμού.

### 3.1 Μηχανικό πεντάλ

Το παρακάτω εξάρτημα που θα παρουσιαστεί αφορά μηχανικό πεντάλ από μελέτη περίπτωσης [49] που πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον ανασχεδιασμό του. Στόχος του ήταν να μειωθεί η μάζα του χρησιμοποιώντας την μέθοδο του γενεσιουργού σχεδιασμού ως οδηγό. Για αυτή την μελέτη χρησιμοποιήθηκε η αρχική γεωμετρία του αντικειμένου, η οποία κατασκευαζόταν με συγκόλληση 4-5 εξαρτημάτων. Το υλικό που επιλέχθηκε σε αυτή την περίπτωση είναι αλουμίνιο 5050. Το βάρος του αρχικού σχεδίου είναι 0,773 kg, η μέγιστη τάση που δέχεται είναι 21,7MPa και ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 2,54.

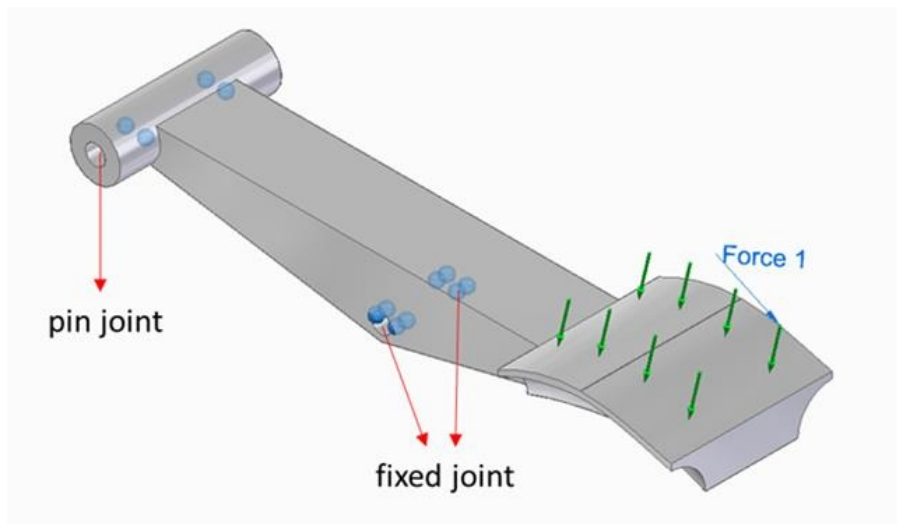


Εικόνα 48: Συναρμολόγημα – Μηχανικό πεντάλ [49]

### 3.1.1 Μελέτη γενεσιουργού σχεδιασμού – Μηχανικό πεντάλ

- Ορισμός φορτίων και περιορισμών – Μηχανικό πεντάλ

Η δύναμη που ασκείται στο πεντάλ θεωρήθηκε 450N, ορίστηκε πάκτωση στην εσωτερική επιφάνεια της οπής και άρθρωση στην εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου.



Εικόνα 49: Ορίσματα μελέτης Generative Design – Μηχανικό πεντάλ [49]



- Outcome μελέτης για κατασκευή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης – Μηχανικό πεντάλ

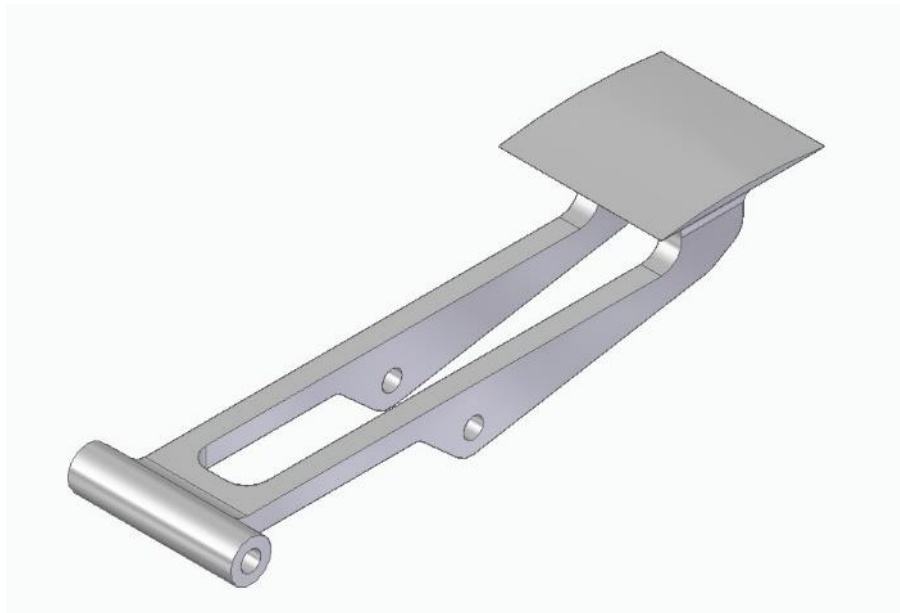
Το βάρος του outcome που επιλέχθηκε ως βέλτιστο είναι 0,387 kg και ως μέθοδος κατασκευής έχει επιλεγεί η τρισδιάστατη εκτύπωση. Η μέγιστη τάση που δέχεται το εξάρτημα είναι 36,7MPa και ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι 1,5.



Εικόνα 50: Outcome – Μηχανικό πεντάλ [49]

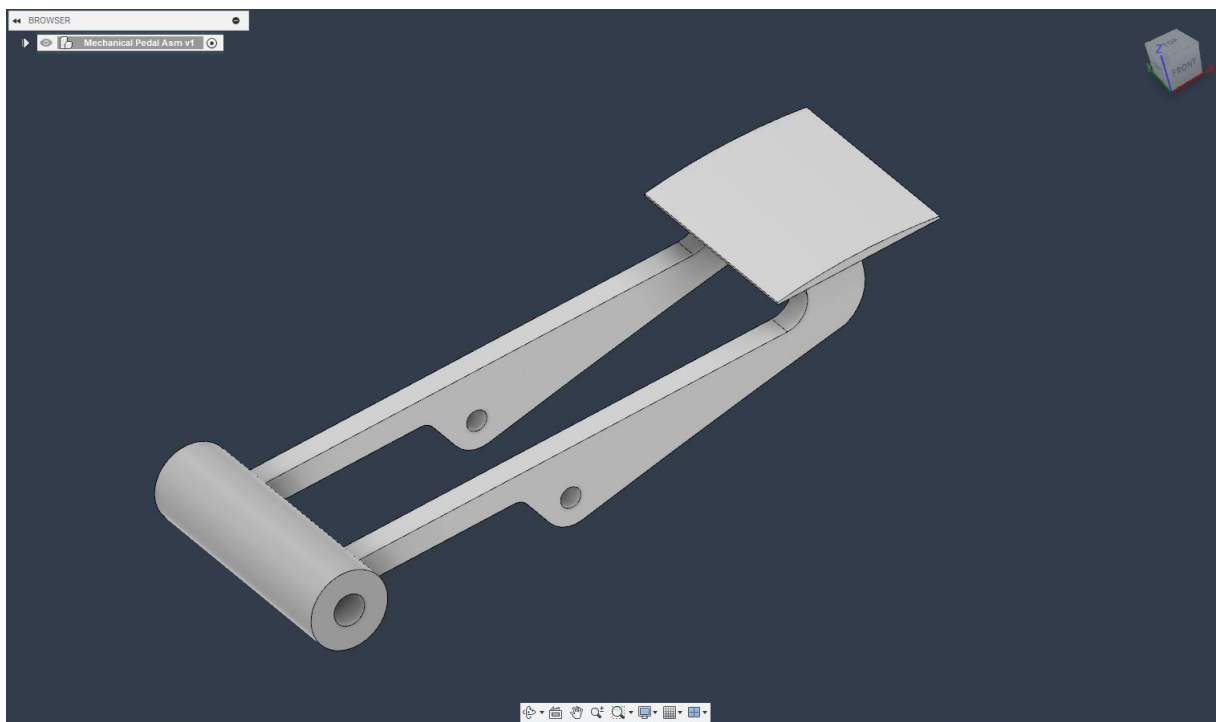
### 3.1.2 Ανασχεδιασμός εξαρτήματος – Μηχανικό πεντάλ

Το ανασχεδιασμένο εξάρτημα έγινε με γνώμονα την κατασκευή του τελικού αντικειμένου με κλασσικές μεθόδους, όπως χύτευση και συγκόλληση χρησιμοποιώντας τις βελτιώσεις του γενεσιουργού σχεδιασμού. Το βάρος που προέκυψε είναι 0,470 kg, δηλαδή 0,083 kg παραπάνω από το βάρος του outcome.

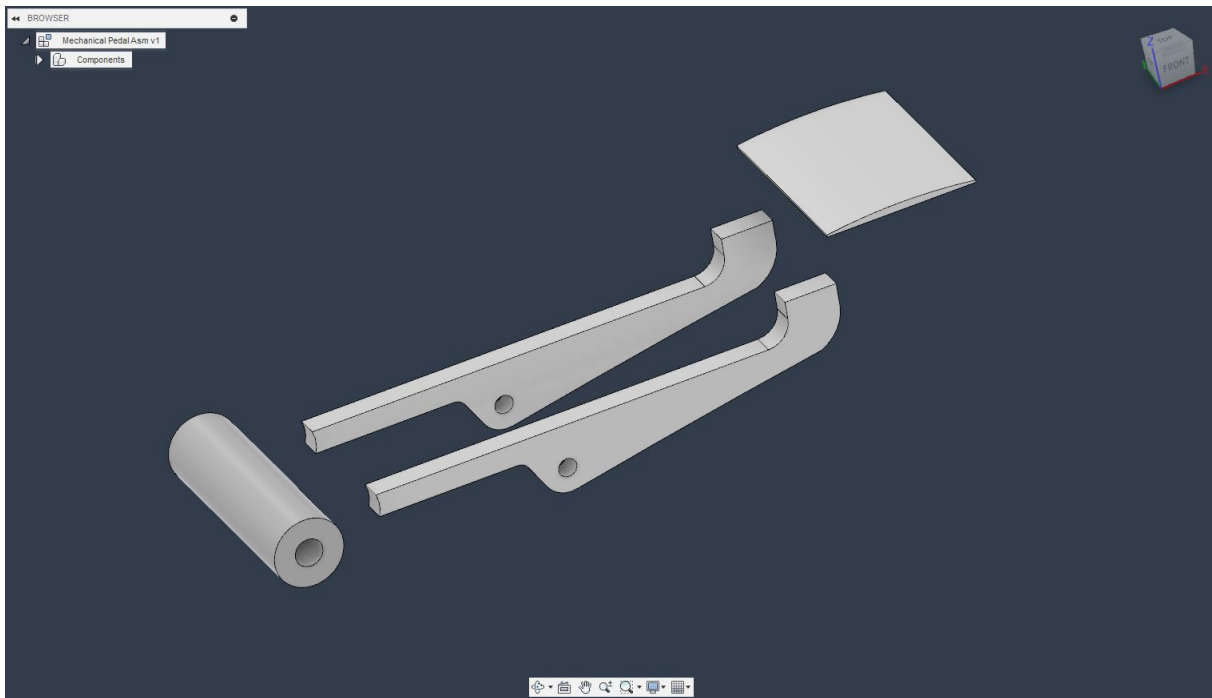


Εικόνα 51: Ανασχεδιασμός Μηχανικού πεντάλ [49]

Ως μια εναλλακτική πρόταση θα μπορούσε να ανασχεδιαστεί ξανά το εξάρτημα και να απλοποιηθεί κι άλλο σε σχέση με του σχεδιαστή. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται αυτή η πρόταση, όπου το τελικό εξάρτημα θα αποτελείται από 4 κομμάτια. Ο κύλινδρος θα κατασκευαστεί μέσω τórνευσης, η πλάκα με μέθοδο αφαίρεσης υλικού και πιο συγκεκριμένα φρεζάρισμα και τα δυο ελάσματα μέσω κοπής με λέιζερ. Στη συνέχεια, θα συγκολληθούν στα κατάλληλα σημεία ώστε να προκύψει το τελικό εξάρτημα.



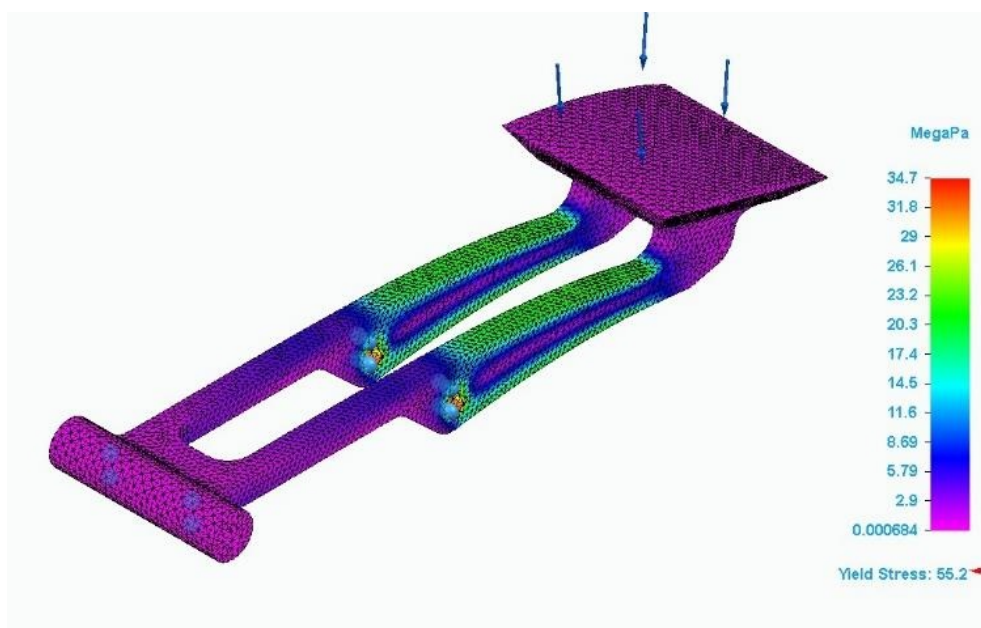
Εικόνα 52: Εναλλακτικός σχεδιασμός Μηχανικού πεντάλ



Εικόνα 53: Exploded View – Εναλλακτικός σχεδιασμός Μηχανικού πεντάλ

### 3.1.3 Έλεγχος αντοχής ανασχεδιασμένου εξαρτήματος – Μηχανικό πεντάλ

Από τον έλεγχο της αντοχής που πραγματοποιήθηκε στο ανασχεδιασμένο εξάρτημα προέκυψε ότι η μέγιστη τάση είναι 34,7 MPa και εμφανίζεται στις χρωματισμένες περιοχές που φαίνονται στην παρακάτω εικόνα. Ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας που προέκυψε είναι 1,59.



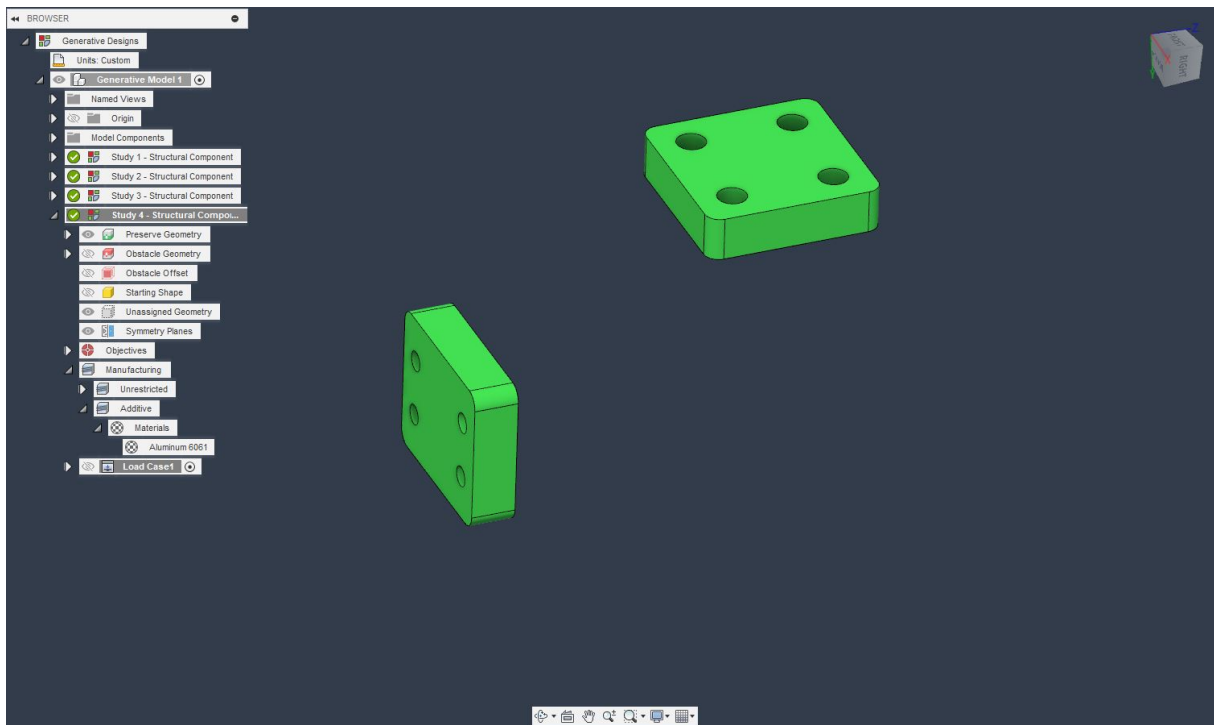
Εικόνα 54: Κατανομή τάσεων ανασχεδιασμένου Μηχανικού πεντάλ [49]

## 3.2 Στήριγμα

Το ακόλουθο παράδειγμα αφορά την δημιουργία ενός στηρίγματος. Η ανάλυση θα γίνει θεωρώντας ότι το υλικό είναι αλουμίνιο 6061.

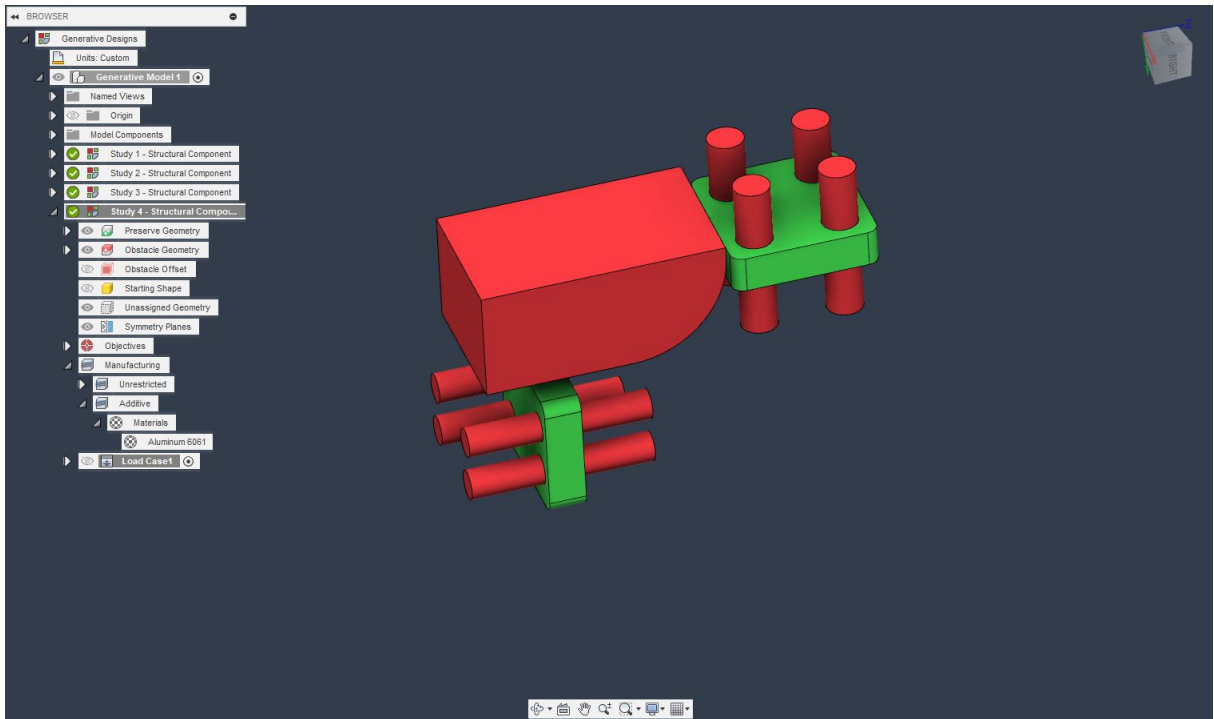
### 3.2.1 Μελέτη γενεσιουργού σχεδιασμού – Στήριγμα

- Ορισμός των Preserved Areas – Στήριγμα



Εικόνα 55: Preserved areas – Στήριγμα

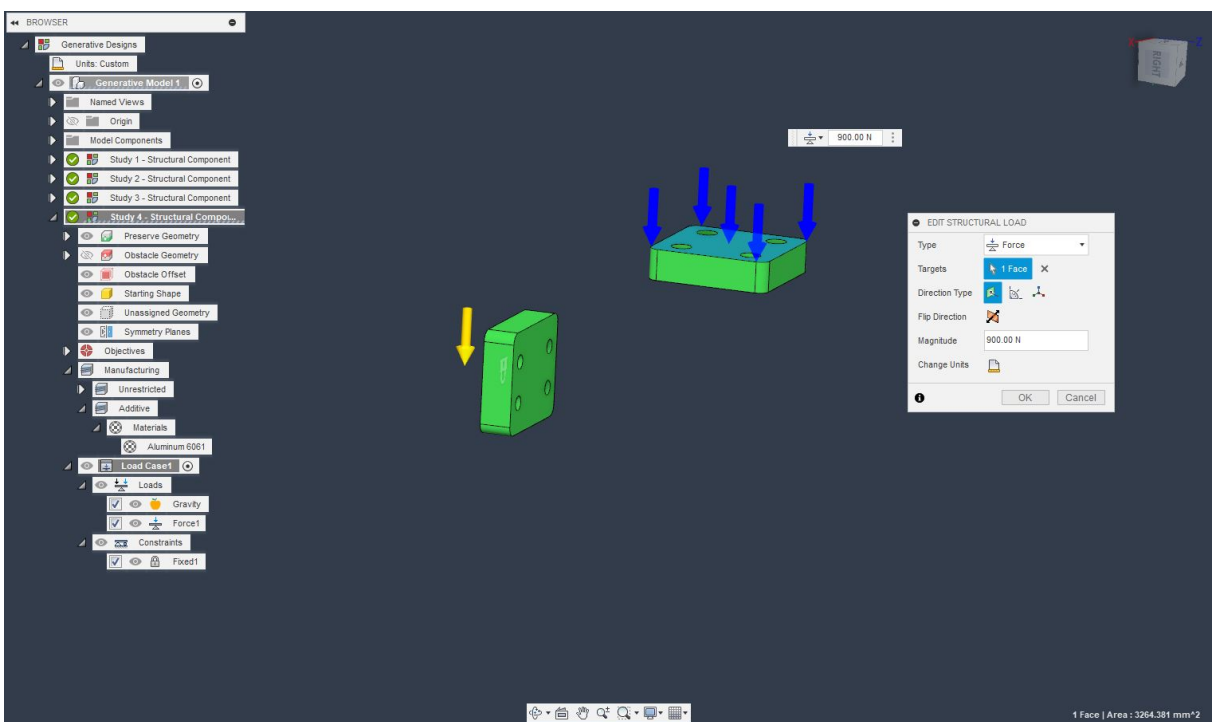
- Ορισμός των Obstacles – Στήριγμα



Εικόνα 56: Obstacles – Στήριγμα

- Ορισμός φορτίων και περιορισμών – Στήριγμα

Το φορτίο ασκείται στην πάνω επιφάνεια της δεξιάς πλάκας και είναι ίσο με 900N. Οι περιορισμοί που εφαρμόστηκαν είναι πάκτωση στην μια επιφάνεια της αριστερής πλάκας.



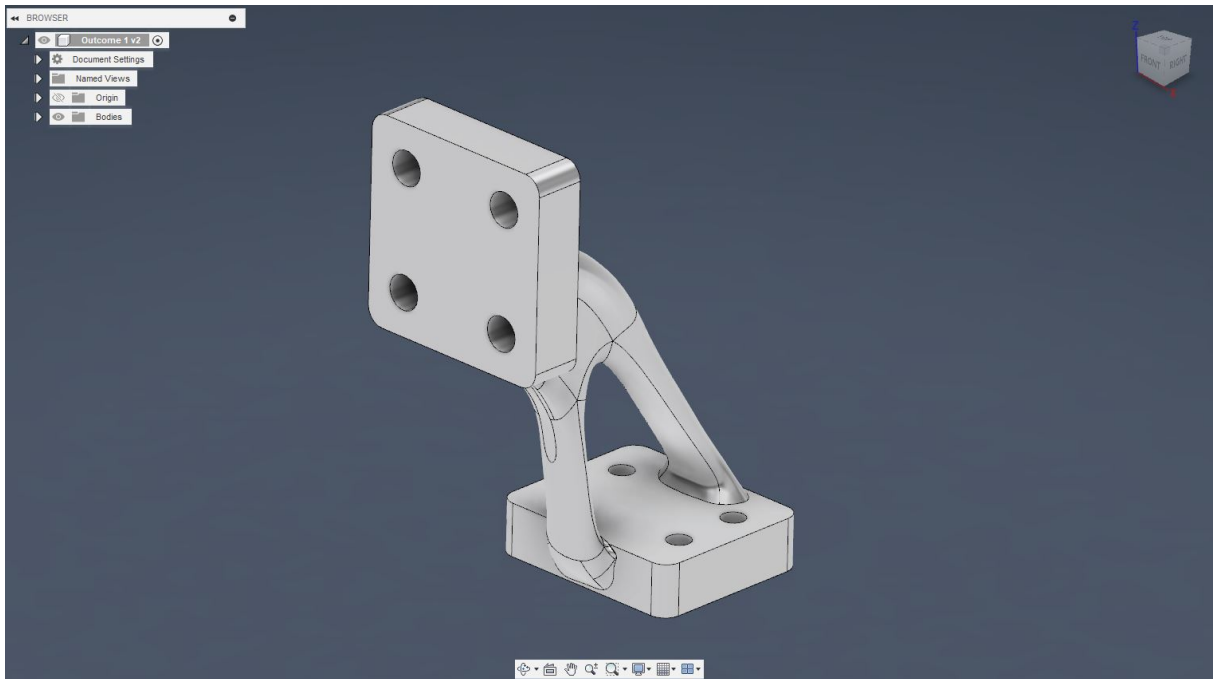
Εικόνα 57: Loads & Constraints – Στήριγμα

- Outcome μελέτης για κατασκευή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης – Στήριγμα

Το βάρος του outcome που επιλέχθηκε είναι 0,308 kg και ως μέθοδος κατασκευής έχει επιλεγθεί η τρισδιάστατη εκτύπωση.



Εικόνα 58: Outcome Στήριγμα – Όψη 1



Εικόνα 59: Outcome Στήριγμα – Όψη 2

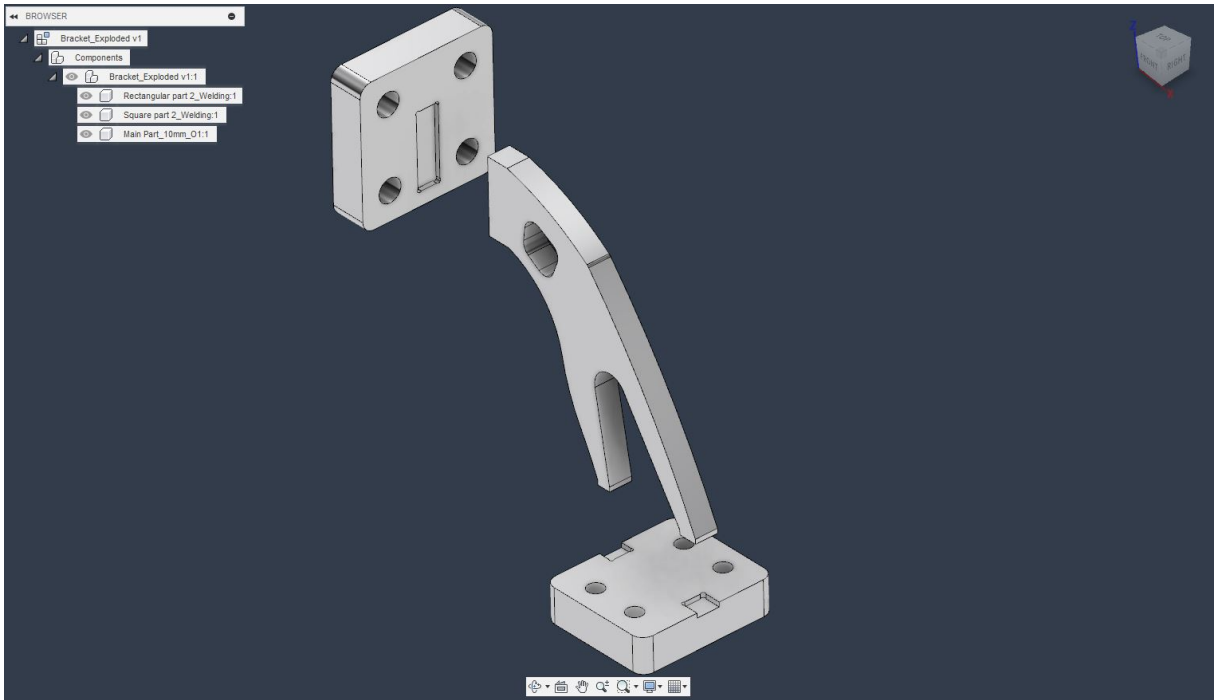
### 3.2.2 Ανασχεδιασμός εξαρτήματος – Στήριγμα

Το αποτέλεσμα της μελέτης του γενεσιουργού σχεδιασμού ανασχεδιάστηκε και προέκυψε το παρακάτω εξάρτημα. Στον νέο σχεδιασμό έχουν διατηρηθεί οι απαιτούμενες περιοχές για την λειτουργικότητά του και παράλληλα έχει κατανεμηθεί το υλικό έχοντας ως οδηγό το outcome. Το βάρος του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος πλησιάζει αρκετά το βάρος του outcome και συγκεκριμένα είναι 0,337 kg.



Εικόνα 60: Ανασχεδιασμός Στήριγματος

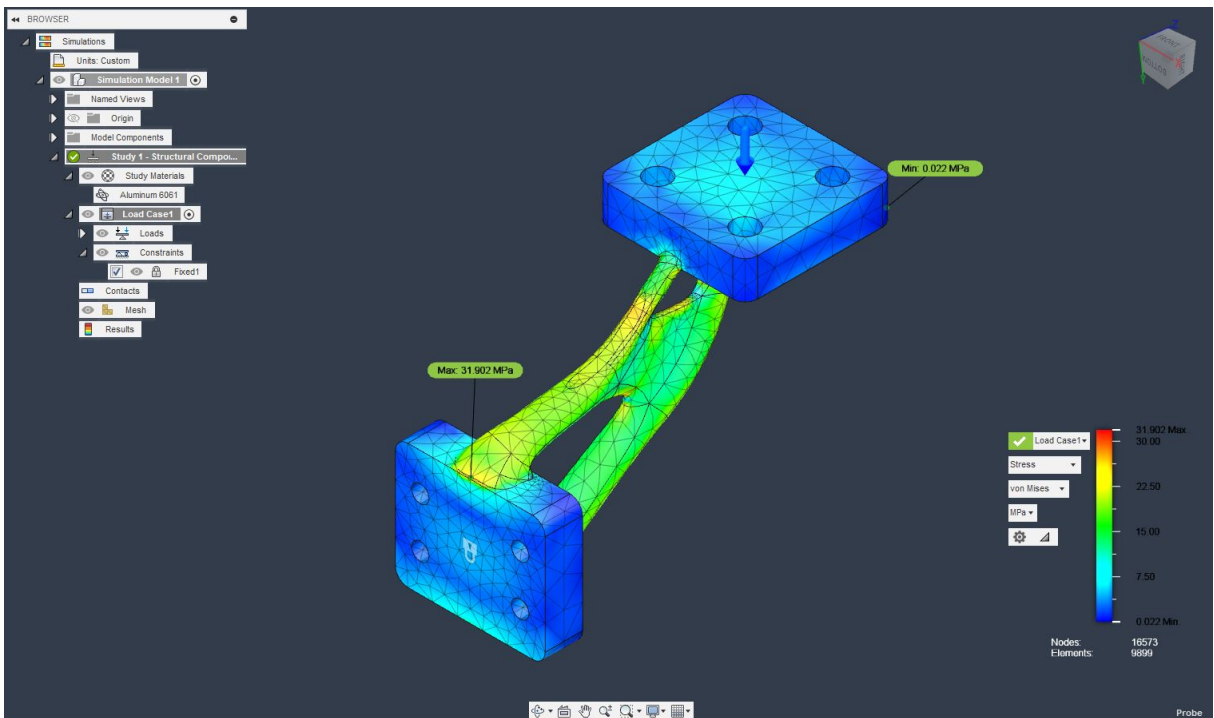
Σε αυτή την περίπτωση έχει επιλεγεί να κατασκευαστεί με συνδυασμό μεθόδων. Οι δυο πλάκες θα κατασκευαστούν με μέθοδο αφαίρεσης υλικού και πιο συγκεκριμένα φρεζάρισμα και το έλασμα με κοπή με χρήση λείζερ. Έπειτα, θα συγκολληθούν στα κατάλληλα σημεία. Για ευκολότερη συγκόλληση έχουν δημιουργηθεί κάποιες γεωμετρίες για την σύνδεση των κομματιών.



Εικόνα 61: Exploded View – Ανασχεδιασμός Στηρίγματος

### 3.2.3 Έλεγχος αντοχής outcome – Στήριγμα

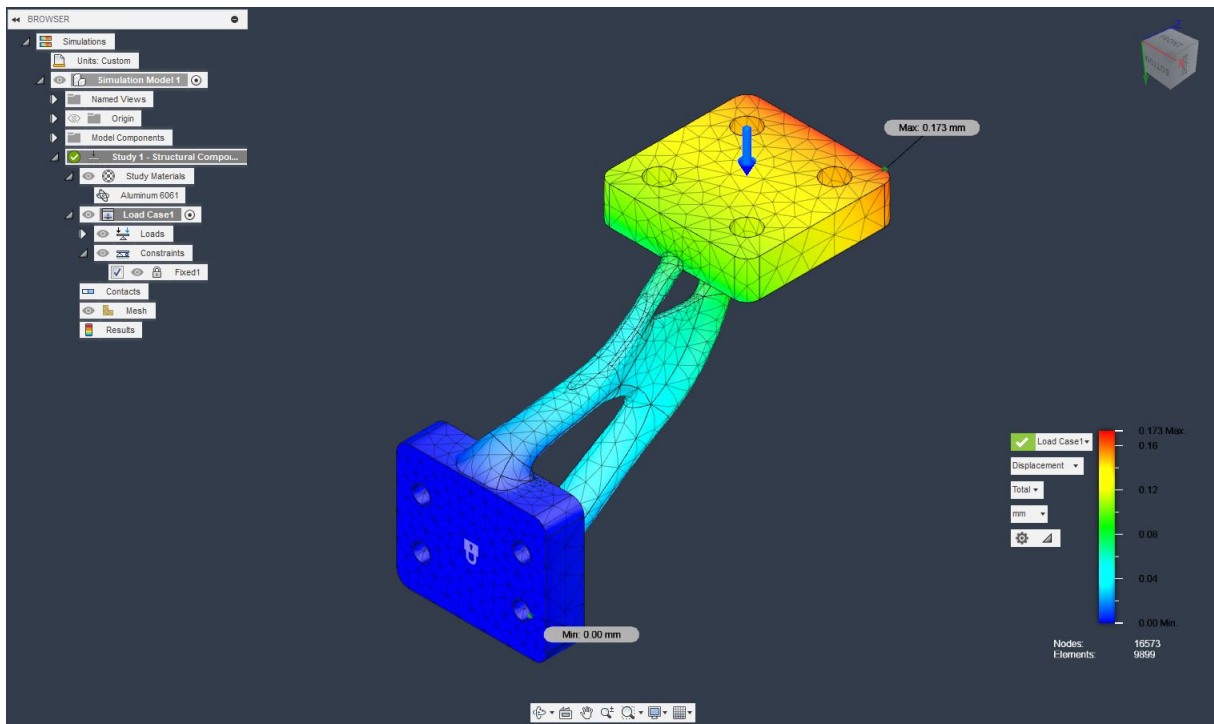
Από τον έλεγχο της αντοχής που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι η μέγιστη τάση που δέχεται είναι 31,902 MPa και εμφανίζεται στο σημείο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 62: Κατανομή τάσεων outcome Στηρίγματος

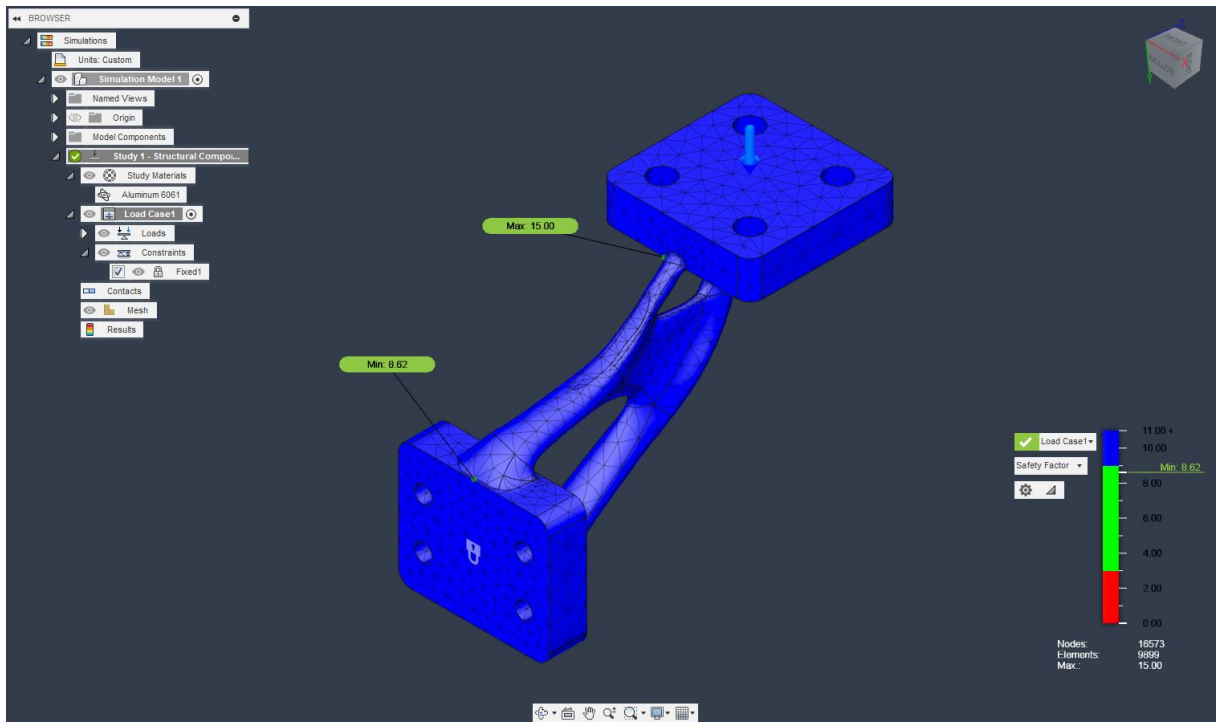


Επίσης, παρακάτω φαίνεται η μετατόπιση που θα δεχτεί το εξάρτημα και συγκεκριμένα η μέγιστη είναι 0,173mm στο σημείο που σημειώνεται στην εικόνα.



Εικόνα 63: Διάγραμμα μετατόπισης outcome Στηρίγματος

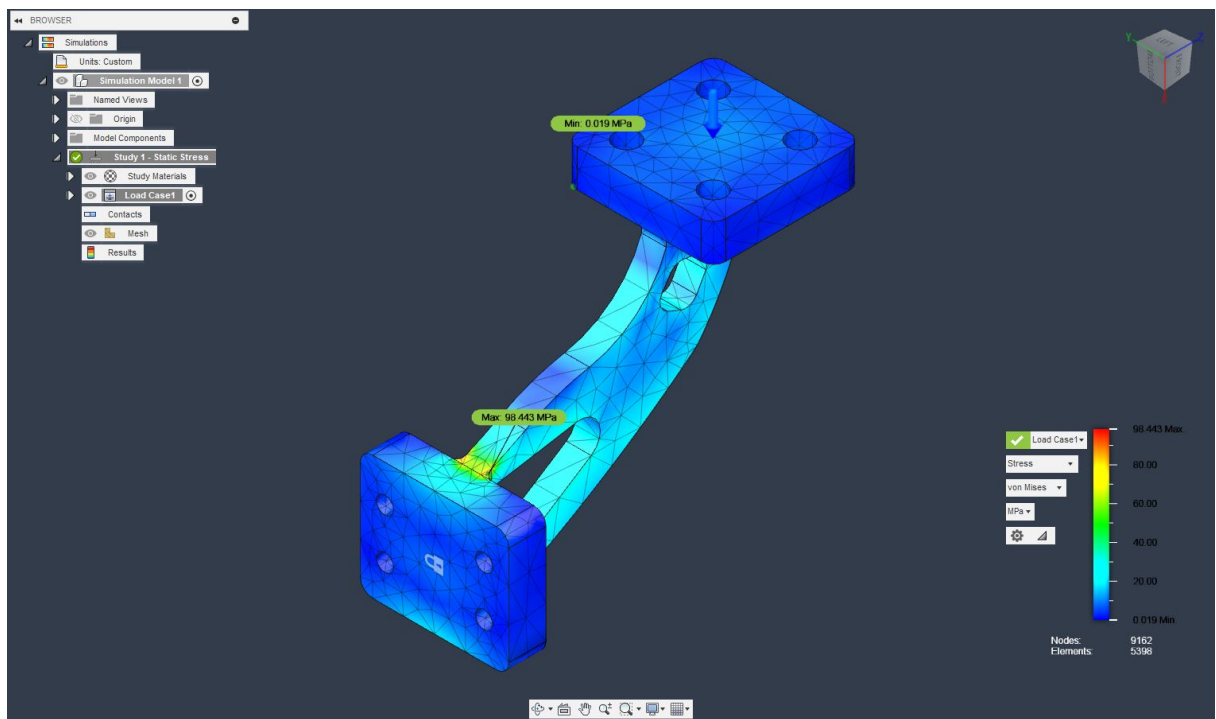
Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο συντελεστής ασφαλείας του εξαρτήματος και συγκεκριμένα φαίνεται ότι ο ελάχιστος συντελεστής είναι 8,62 στο σημείο που δείχνει το βέλος.



Εικόνα 64: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας outcome Στήριγμα

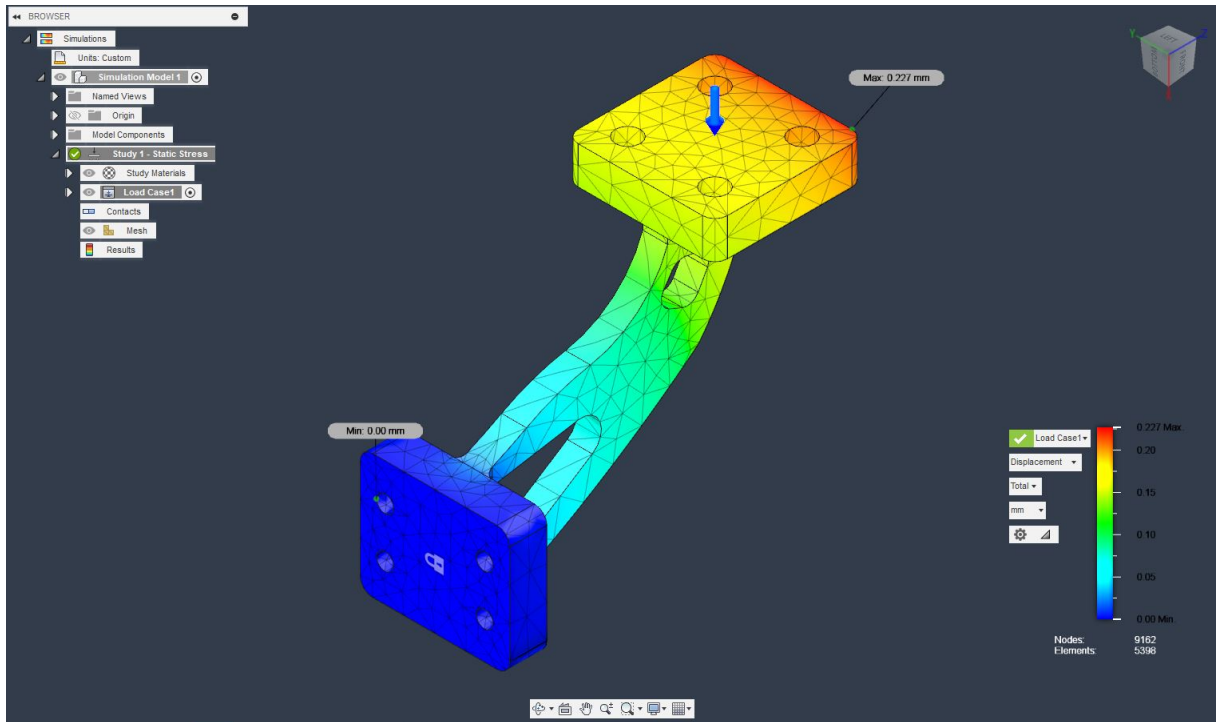
### 3.2.4 Έλεγχος αντοχής ανασχεδιασμένου εξαρτήματος – Στήριγμα

Από τον έλεγχο της αντοχής που πραγματοποιήθηκε στο ανασχεδιασμένο εξάρτημα προέκυψε ότι η μέγιστη τάση είναι 98,443 MPa και εμφανίζεται στο σημείο που δείχνει το βέλος στην παρακάτω εικόνα.



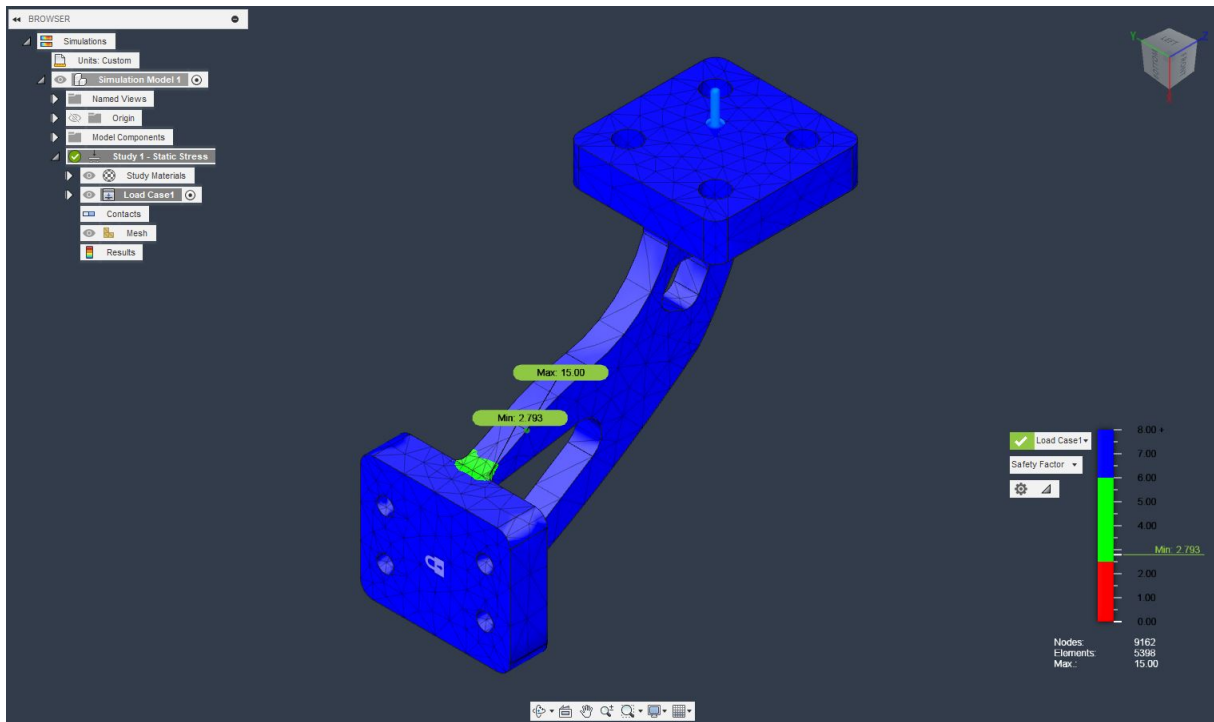
Εικόνα 65: Κατανομή τάσεων ανασχεδιασμένου Στήριγματος

Επίσης, παρακάτω φαίνεται η μετατόπιση που θα δεχτεί το εξάρτημα και συγκεκριμένα η μέγιστη είναι 0,227mm στο σημείο που σημειώνεται στην εικόνα.



Εικόνα 66: Διάγραμμα μετατόπισης ανασχεδιασμένου Στηρίγματος

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο συντελεστής ασφαλείας του εξαρτήματος και συγκεκριμένα φαίνεται ότι ο ελάχιστος συντελεστής είναι 2,793 στο σημείο που δείχνει το βέλος.



Εικόνα 67: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας ανασχεδιασμένου Στηρίγματος

### 3.2.5 Σύγκριση κόστους εξαρτημάτων – Στήριγμα

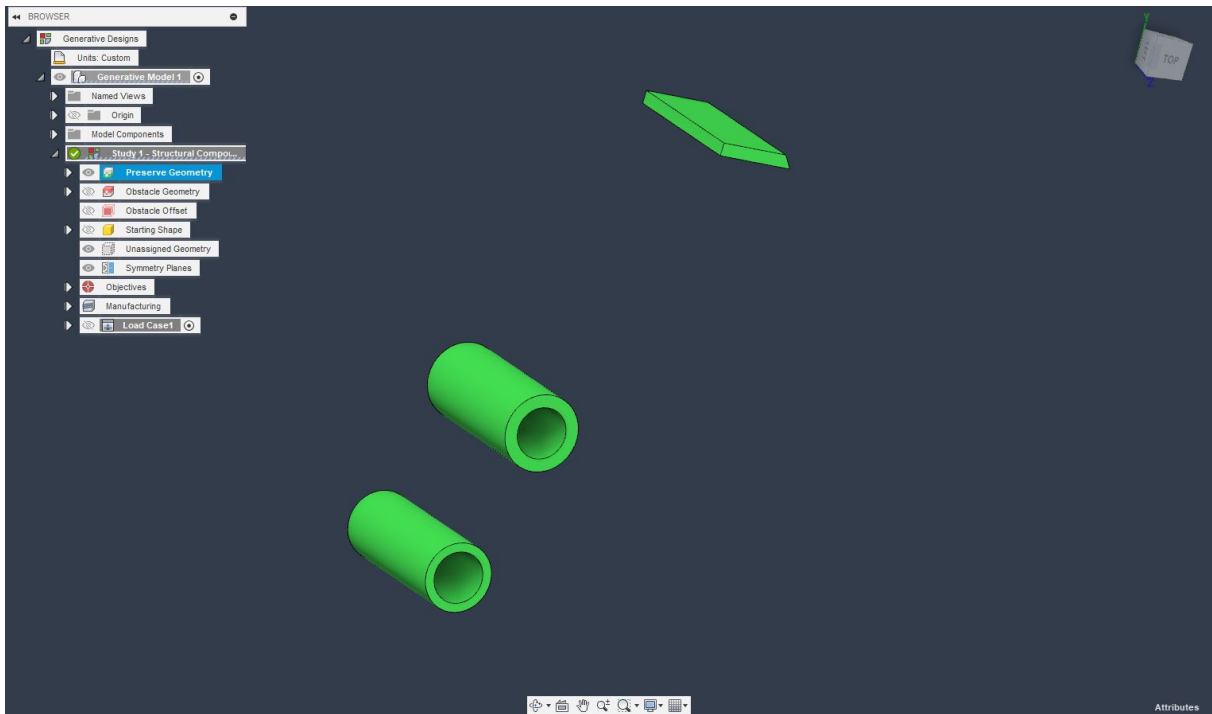
Για τον υπολογισμό του κόστους των εξαρτημάτων έγινε ζήτηση προσφοράς από ορισμένες εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον τομέα. Το κόστος του βέλτιστου σχεδίου που προέκυψε μέσω του γενεσιουργού σχεδιασμού και κατασκευάζεται μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης κοστολογήθηκε περίπου στα 680 ευρώ. Σε ό,τι αφορά το κόστος του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος είναι 227 ευρώ, αυτό αποτελείται από το κόστος των δυο εξαρτημάτων που θα γίνουν σε φρέζα και υπολογίζεται περίπου στα 90 και 95 ευρώ αντίστοιχα, το κόστος του ελάσματος 17 ευρώ και το κόστος συγκόλλησης αυτών 25 ευρώ. Από αυτά τα στοιχεία φαίνεται ότι το κόστος του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος που προτείνεται είναι τρεις φορές μικρότερο και αυτή η λύση είναι πιο συμφέρουσα.

### 3.3 Εξάρτημα συγκράτησης

Η παρακάτω ανάλυση αφορά εξάρτημα συγκράτησης και θα γίνει θεωρώντας ότι το υλικό είναι χάλυβας St52. Στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχει αρχικό εξάρτημα και θα χρησιμοποιηθεί στην μελέτη ως αρχική γεωμετρία.

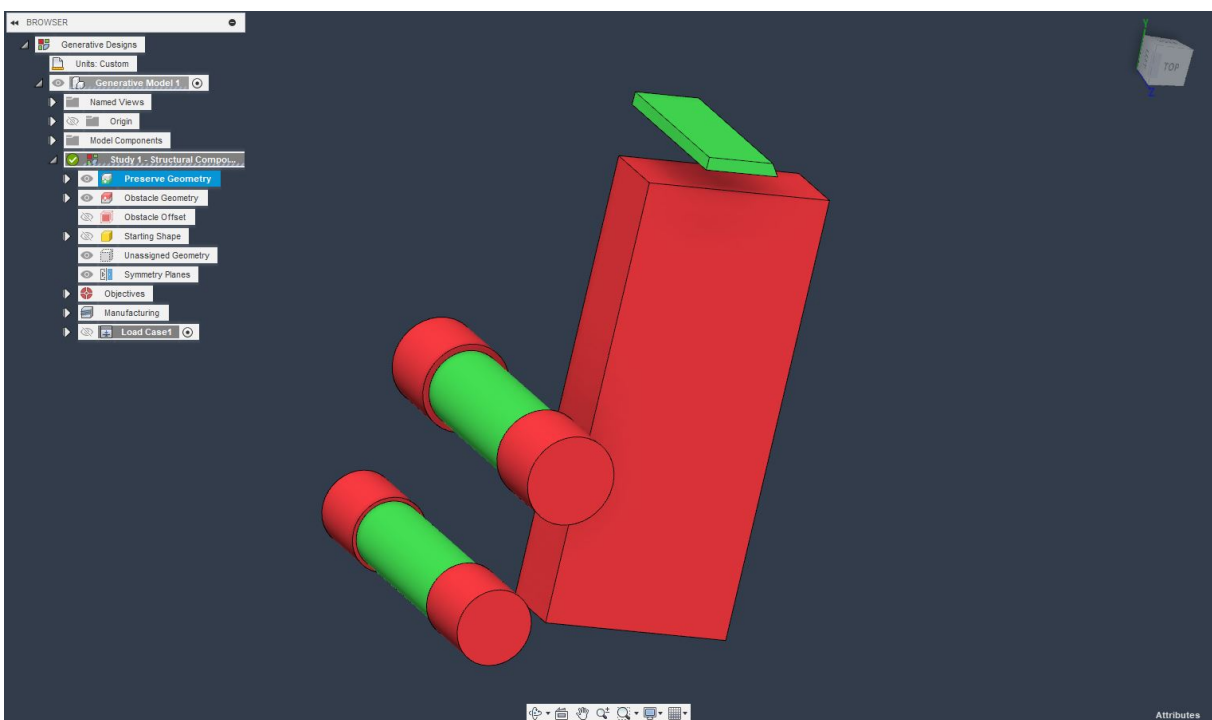
### 3.3.1 Μελέτη γενεσιουργού σχεδιασμού – Εξάρτημα συγκράτησης

- Ορισμός των Preserved Areas – Εξάρτημα συγκράτησης



Εικόνα 68: Preserved areas – Εξάρτημα συγκράτησης

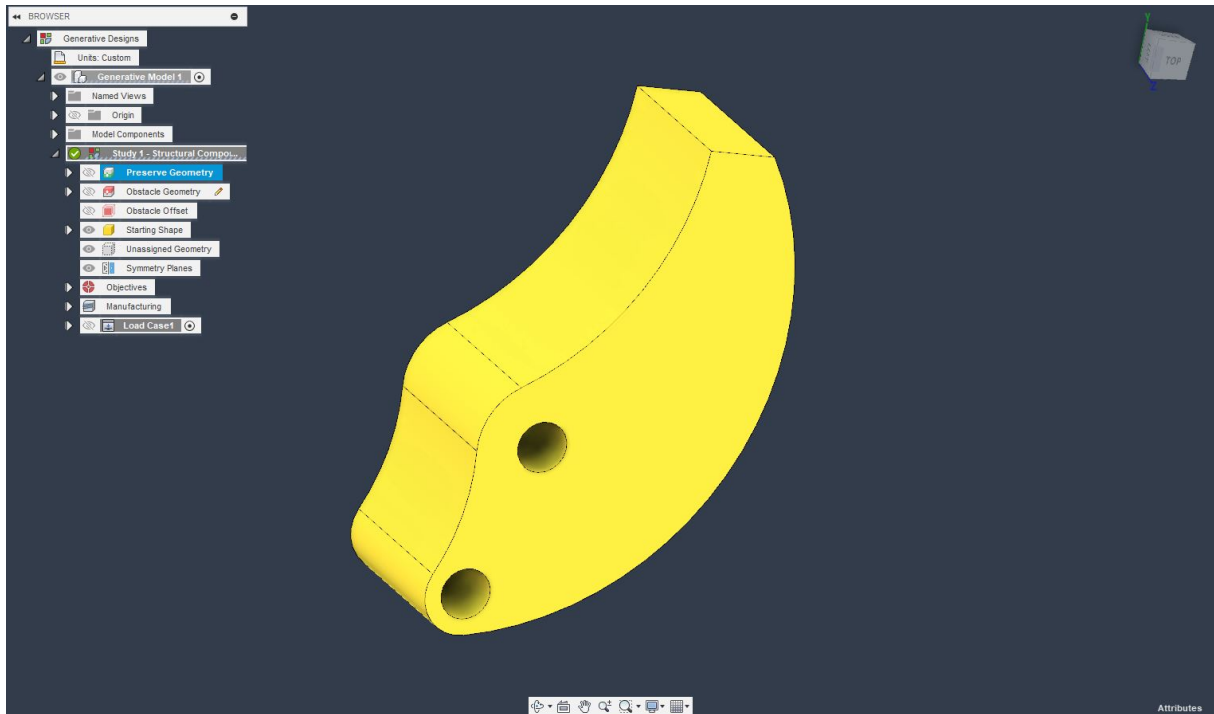
- Ορισμός των Obstacles - Εξάρτημα συγκράτησης



Εικόνα 69: Obstacles – Εξάρτημα συγκράτησης

- Ορισμός αρχικής γεωμετρίας – Εξάρτημα συγκράτησης

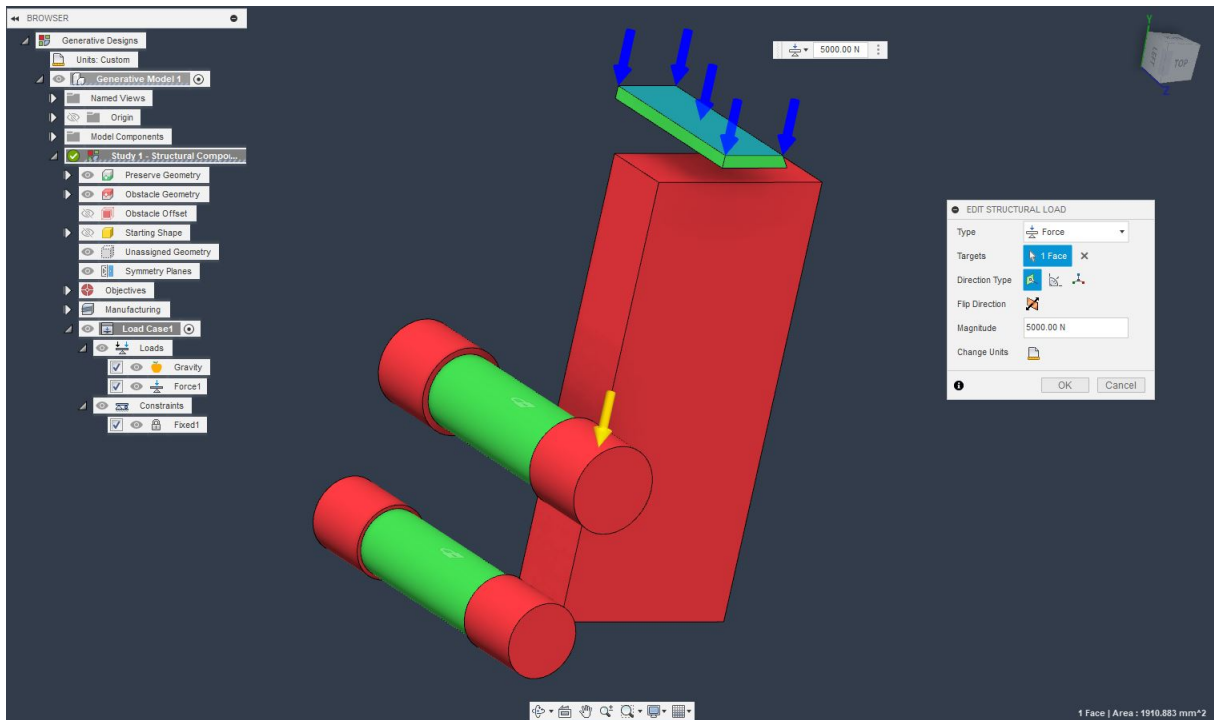
Το βάρος της αρχικής γεωμετρίας ήταν 8,139 kg.



Εικόνα 70: Starting Shape – Εξάρτημα συγκράτησης

- Ορισμός φορτίων και περιορισμών – Εξάρτημα συγκράτησης

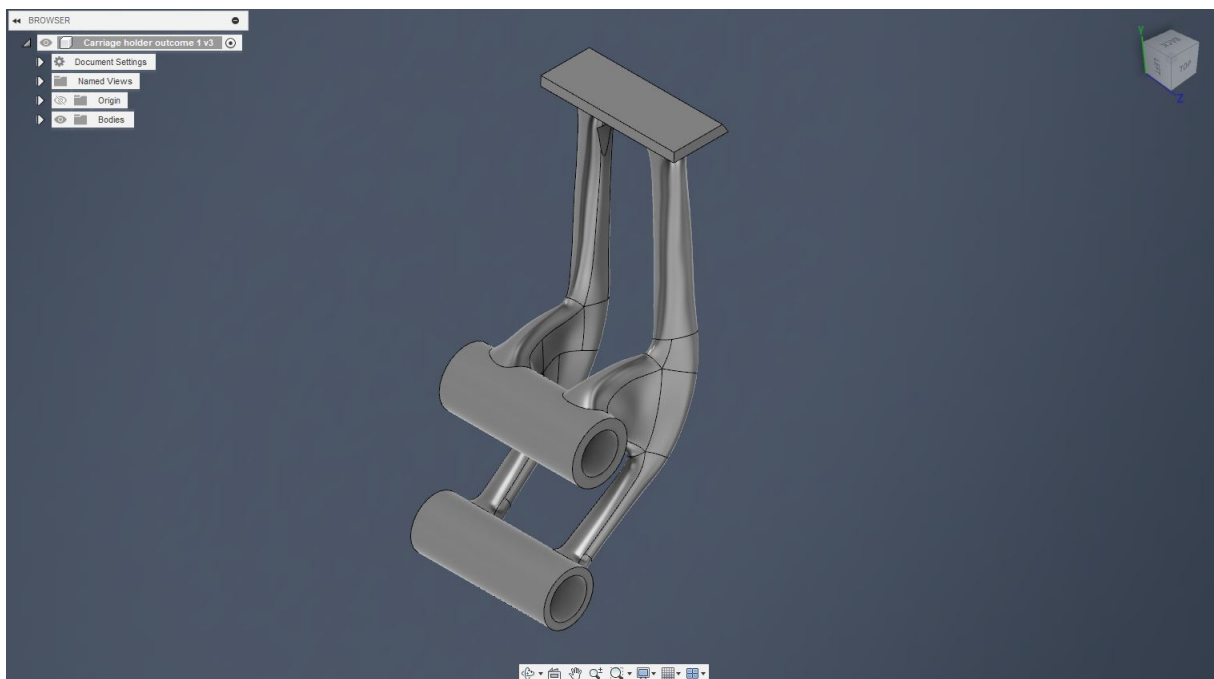
Το φορτίο ασκείται στην πάνω επιφάνεια της πλάκας και είναι ίσο με 5000N. Οι περιορισμοί που εφαρμόστηκαν είναι πάκτωση στην εσωτερική επιφάνεια των κυλίνδρων.



Εικόνα 71: Loads & Constraints – Εξάρτημα συγκράτησης

- Outcome μελέτης για κατασκευή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης – Εξάρτημα συγκράτησης

Το βάρος του outcome που επιλέχθηκε ως βέλτιστο είναι 0,995 kg και ως μέθοδος κατασκευής έχει επιλεγθεί η τρισδιάστατη εκτύπωση.



Εικόνα 72: Outcome Εξαρτήματος συγκράτησης – Όψη 1



Εικόνα 73: Outcome Εξαρτήματος συγκράτησης – Όψη 2

### 3.3.2 Ανασχεδιασμός εξαρτήματος – Εξάρτημα συγκράτησης

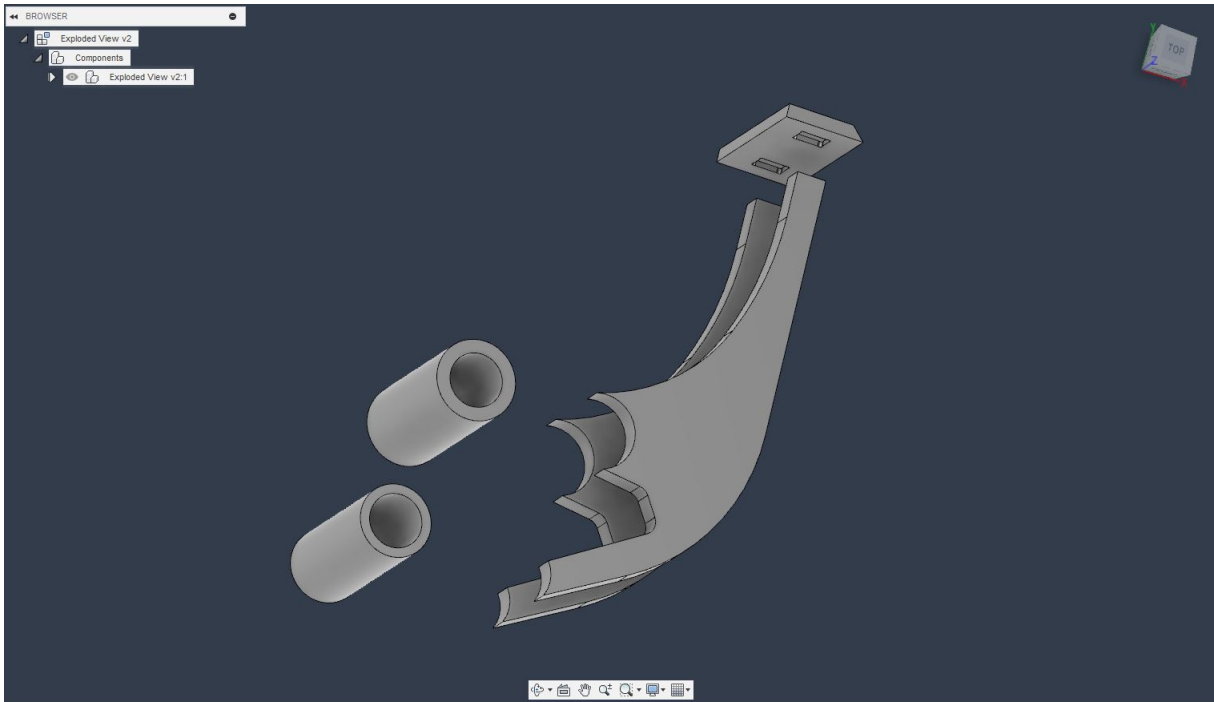
Το αποτέλεσμα της μελέτης του γενεσιουργού σχεδιασμού ανασχεδιάστηκε και προέκυψε το παρακάτω εξάρτημα. Στον νέο σχεδιασμό έχουν διατηρηθεί οι περιοχές που απαιτούνται για την λειτουργικότητά του και παράλληλα έχει κατανεμηθεί το υλικό έχοντας ως οδηγό το outcome. Το βάρος του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος είναι 1,115 kg, δηλαδή 0,120 kg παραπάνω από το βάρος του outcome.



Εικόνα 74: Ανασχεδιασμός Εξαρτήματος συγκράτησης



Σε αυτή την περίπτωση έχει επιλεγεί να κατασκευαστεί με συνδυασμό μεθόδων. Η πλάκα θα κατασκευαστεί με μέθοδο αφαίρεσης υλικού και πιο συγκεκριμένα φρεζάρισμα, τα δυο ελάσματα με κοπή με λέιζερ και οι δυο κύλινδροι με τórνευση. Έπειτα, θα συγκολληθούν στα κατάλληλα σημεία. Για ευκολότερη συγκόλληση έχουν δημιουργηθεί κάποιες γεωμετρίες για την σύνδεση των κομματιών.



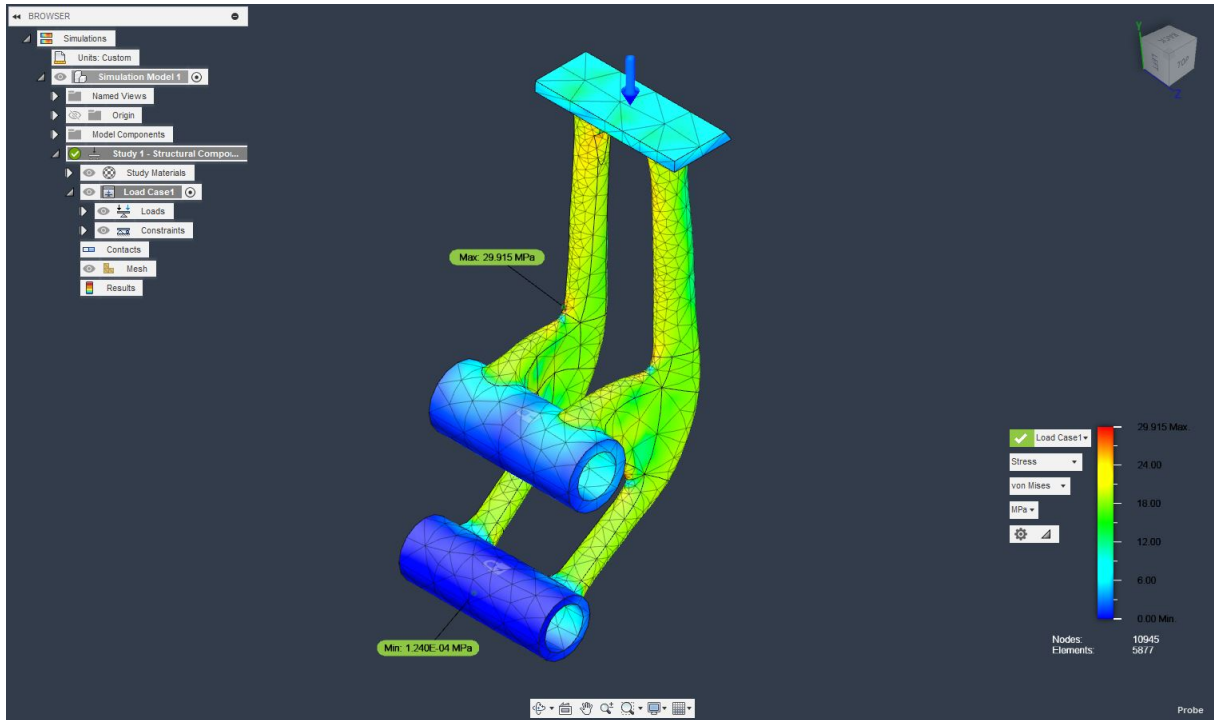
Εικόνα 75: Exploded View – Ανασχεδιασμός Εξαρτήματος συγκράτησης / Όψη 1



Εικόνα 76: Exploded View – Ανασχεδιασμός Εξαρτήματος συγκράτησης / Όψη 2

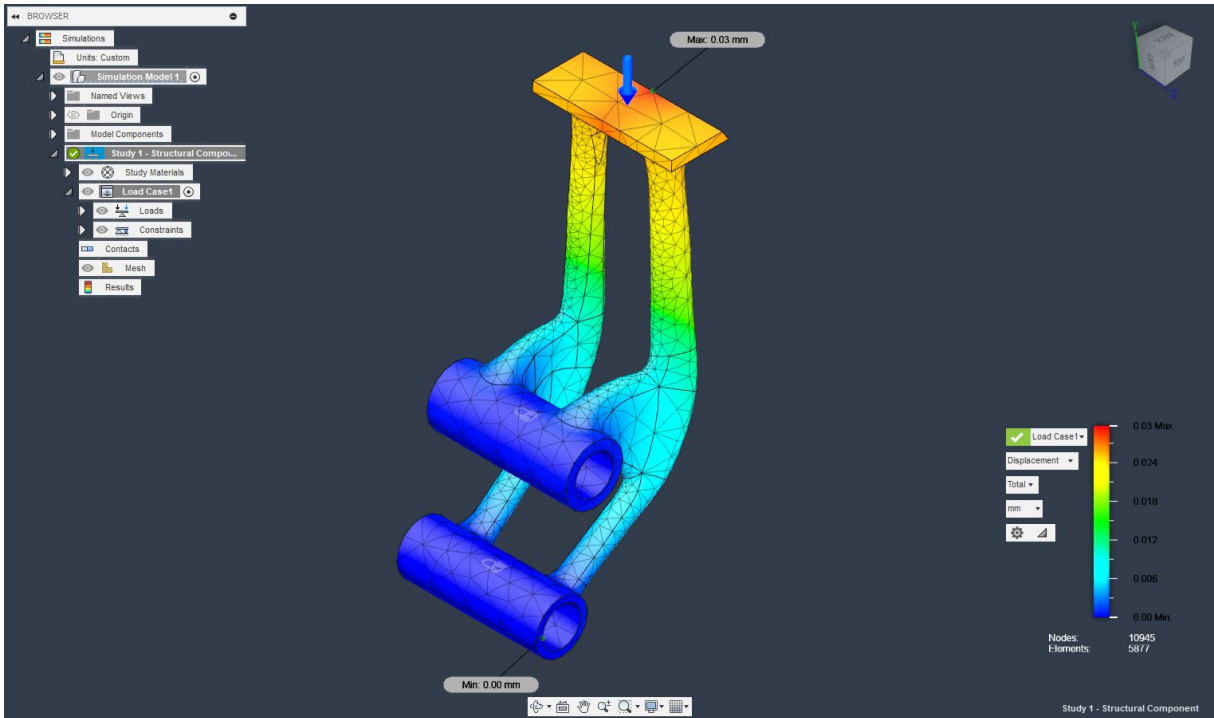
### 3.3.3 Έλεγχος αντοχής outcome – Εξάρτημα συγκράτησης

Από τον έλεγχο της αντοχής που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι η μέγιστη τάση είναι 29,915 MPa και εμφανίζεται στο σημείο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



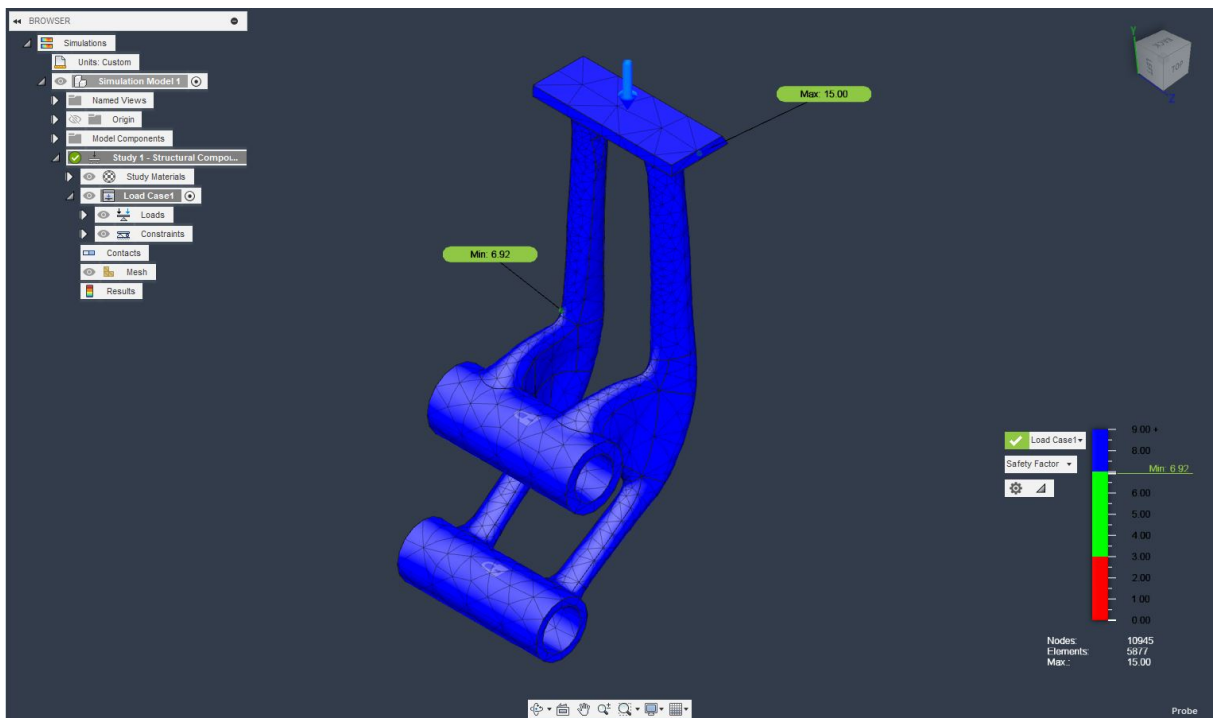
Εικόνα 77: Κατανομή τάσεων outcome Εξαρτήματος συγκράτησης

Επίσης, παρακάτω φαίνεται η μετατόπιση που θα δεχτεί το εξάρτημα και συγκεκριμένα η μέγιστη είναι 0,03mm στο σημείο που σημειώνεται στην εικόνα.



Εικόνα 78: Διάγραμμα μετατόπισης outcome Εξαρτήματος συγκράτησης

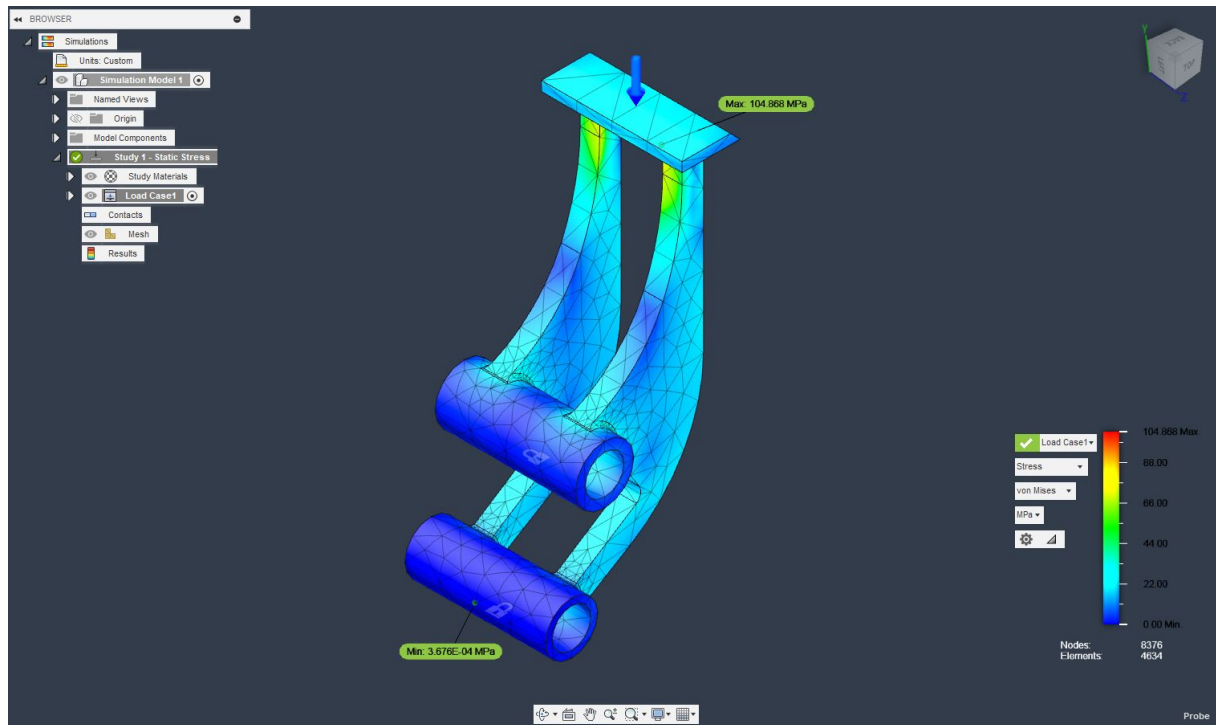
Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο συντελεστής ασφαλείας του εξαρτήματος και συγκεκριμένα φαίνεται ότι ο ελάχιστος συντελεστής είναι 6,92 στο σημείο που δείχνει το βέλος.



Εικόνα 79: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας outcome Εξαρτήματος συγκράτησης

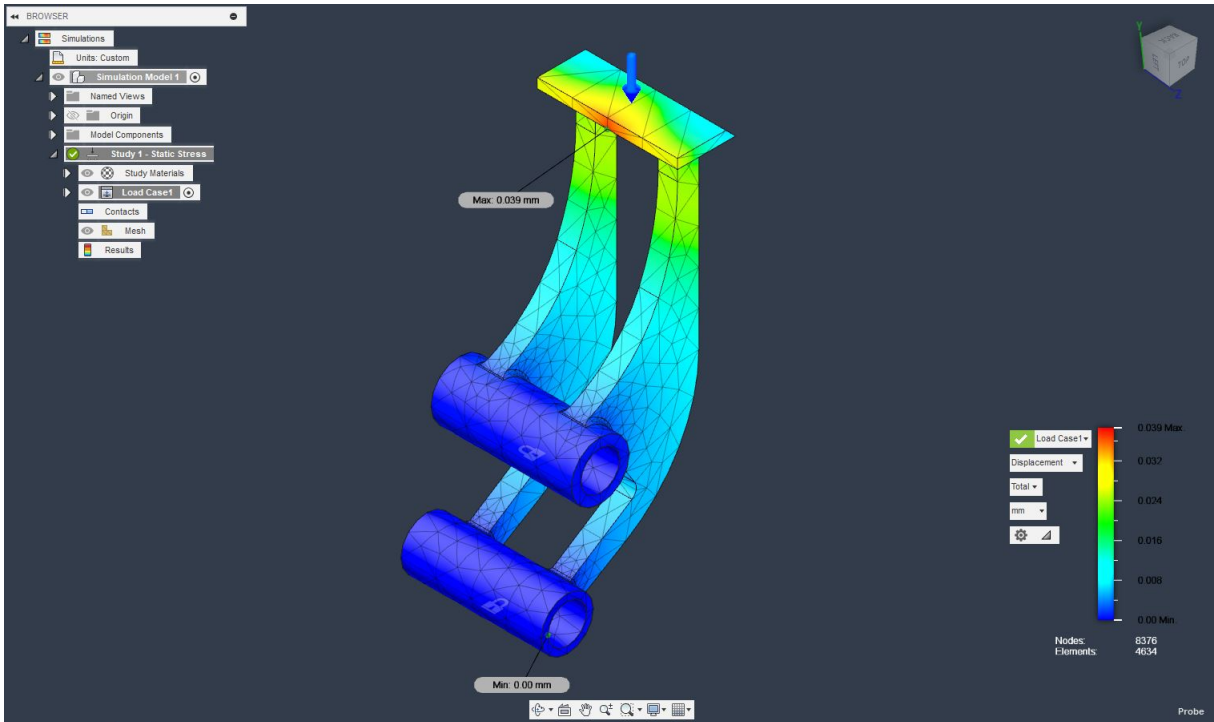
### 3.3.4 Έλεγχος αντοχής ανασχεδιασμένου εξαρτήματος – Εξάρτημα συγκράτησης

Από τον έλεγχο της αντοχής που πραγματοποιήθηκε στο ανασχεδιασμένο εξάρτημα προέκυψε ότι η μέγιστη τάση είναι 104,868 MPa και εμφανίζεται στο σημείο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



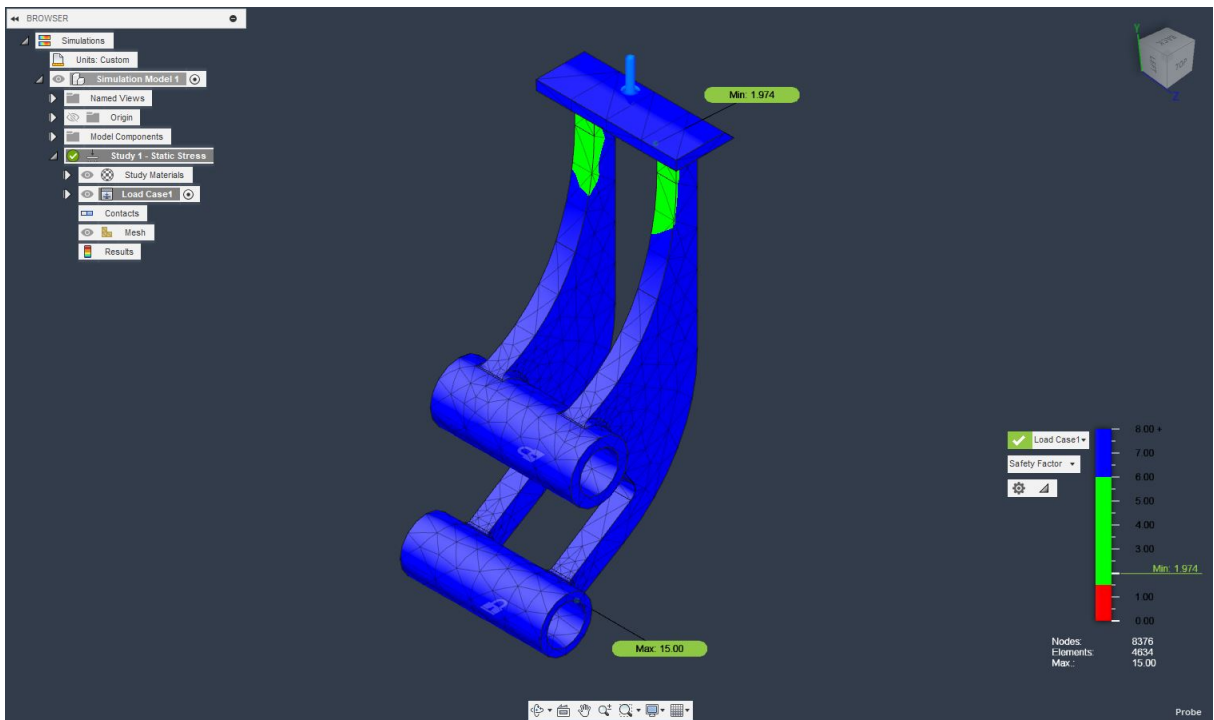
Εικόνα 80: Κατανομή τάσεων ανασχεδιασμένου Εξαρτήματος συγκράτησης

Επίσης, παρακάτω φαίνεται η μετατόπιση που θα δεχτεί το ανασχεδιασμένο εξάρτημα και συγκεκριμένα η μέγιστη είναι 0,039mm στο σημείο που σημειώνεται στην εικόνα.



Εικόνα 81: Διάγραμμα μετατόπισης ανασχεδιασμένου Εξαρτήματος συγκράτησης

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο συντελεστής ασφαλείας του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος και συγκεκριμένα φαίνεται ότι ο ελάχιστος συντελεστής είναι 1,974 στο σημείο που δείχνει το βέλος.



Εικόνα 82: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας ανασχεδιασμένου Εξαρτήματος συγκράτησης

### 3.3.5 Σύγκριση κόστους εξαρτημάτων – Εξάρτημα συγκράτησης

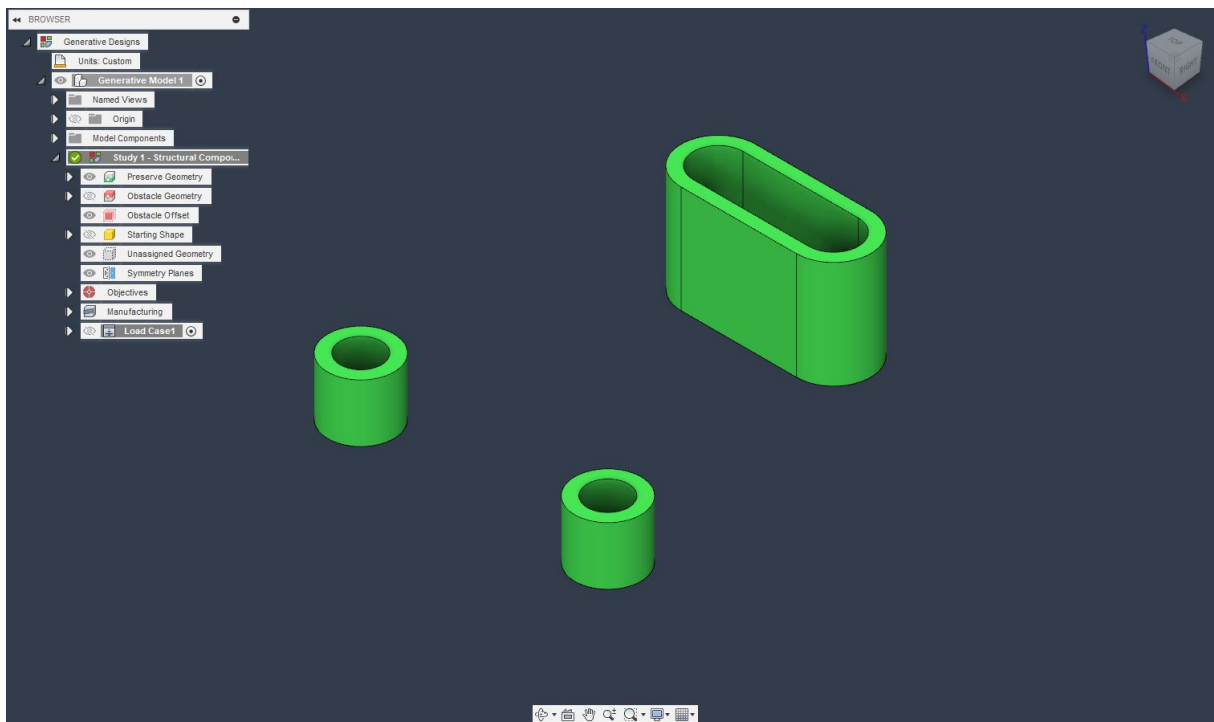
Για τον υπολογισμό του κόστους των εξαρτημάτων έγινε ζήτηση προσφοράς από ορισμένες εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον τομέα. Το κόστος του βέλτιστου σχεδίου που προέκυψε μέσω του γενεσιουργού σχεδιασμού και κατασκευάζεται με τρισδιάστατη εκτύπωση κοστολογήθηκε περίπου στα 1560 ευρώ. Σε ό,τι αφορά το κόστος του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος είναι 222 ευρώ, αυτό αποτελείται από το κόστος του ενός εξαρτήματος που θα γίνει σε φρέζα και υπολογίζεται περίπου στα 85 ευρώ, το κόστος των δυο ελασμάτων 7 ευρώ, το κόστος των δυο κυλίνδρων που θα γίνει σε τόρνο, 50 και 55 ευρώ και το κόστος συγκόλλησης αυτών 25 ευρώ. Από αυτά τα στοιχεία φαίνεται ότι το κόστος του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος που προτείνεται είναι αρκετά μικρότερο και η επιλογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ασύμφορη.

## 3.4 Βάση

Η παρακάτω ανάλυση αφορά την βελτιστοποίηση ήδη υπάρχουσας βάσης και θα γίνει θεωρώντας ότι το υλικό είναι αλουμίνιο AlSi10Mg. Το αρχικό εξάρτημα παρουσιάζεται παρακάτω και θα χρησιμοποιηθεί στην μελέτη ως αρχική γεωμετρία.

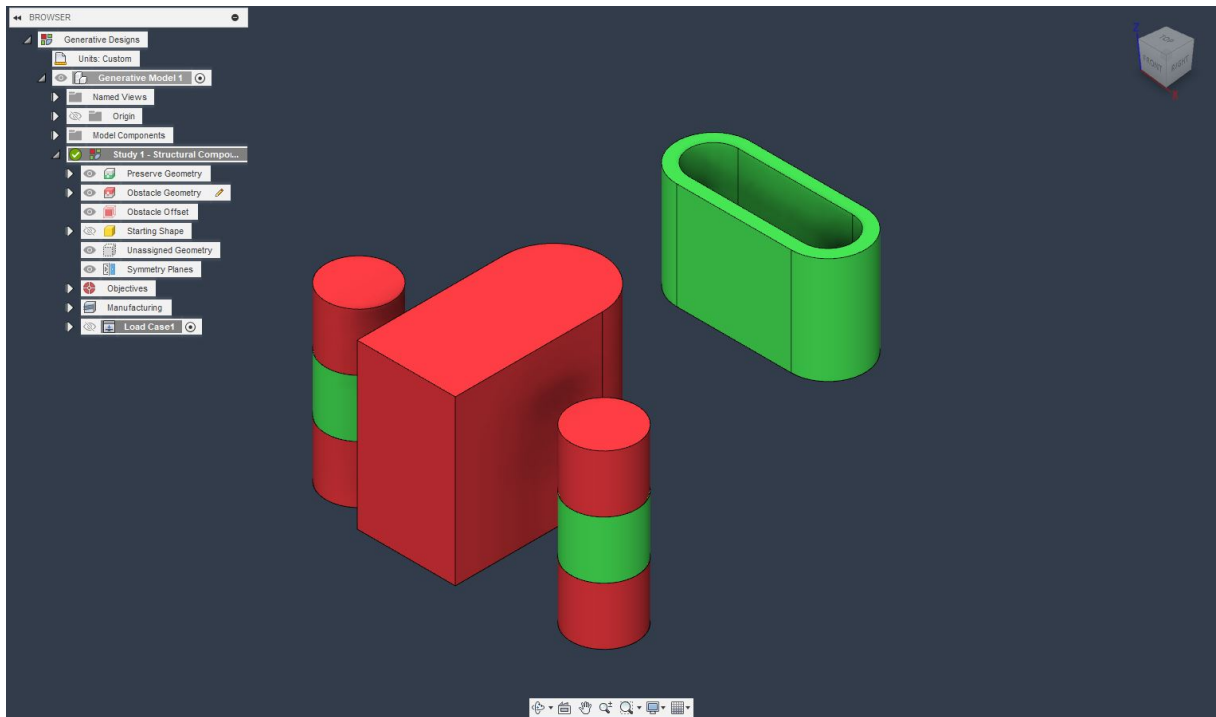
### 3.4.1 Μελέτη γενεσιουργού σχεδιασμού – Βάση

- Ορισμός των Preserved Areas - Βάση



Εικόνα 83: Preserved Areas – Βάση

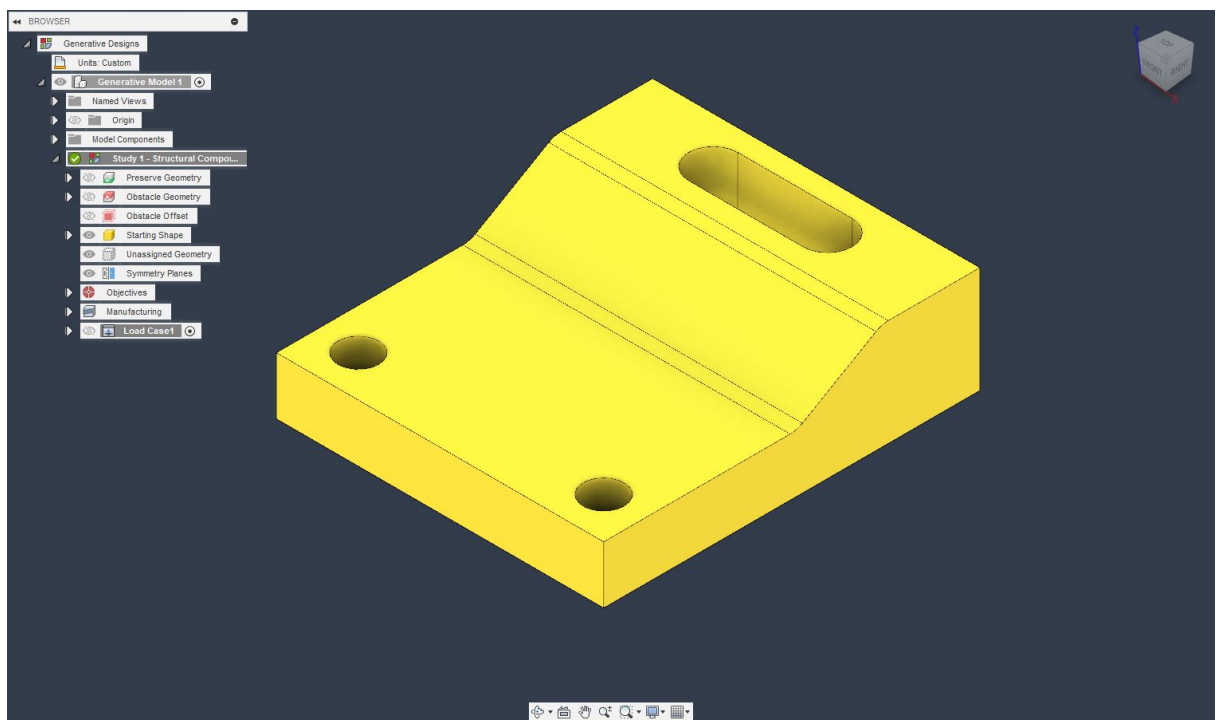
- Ορισμός των Obstacles – Βάση



Εικόνα 84: Obstacles – Βάση

- Ορισμός αρχικής γεωμετρίας – Βάση

Το βάρος της αρχικής γεωμετρίας ήταν 5,096 kg.

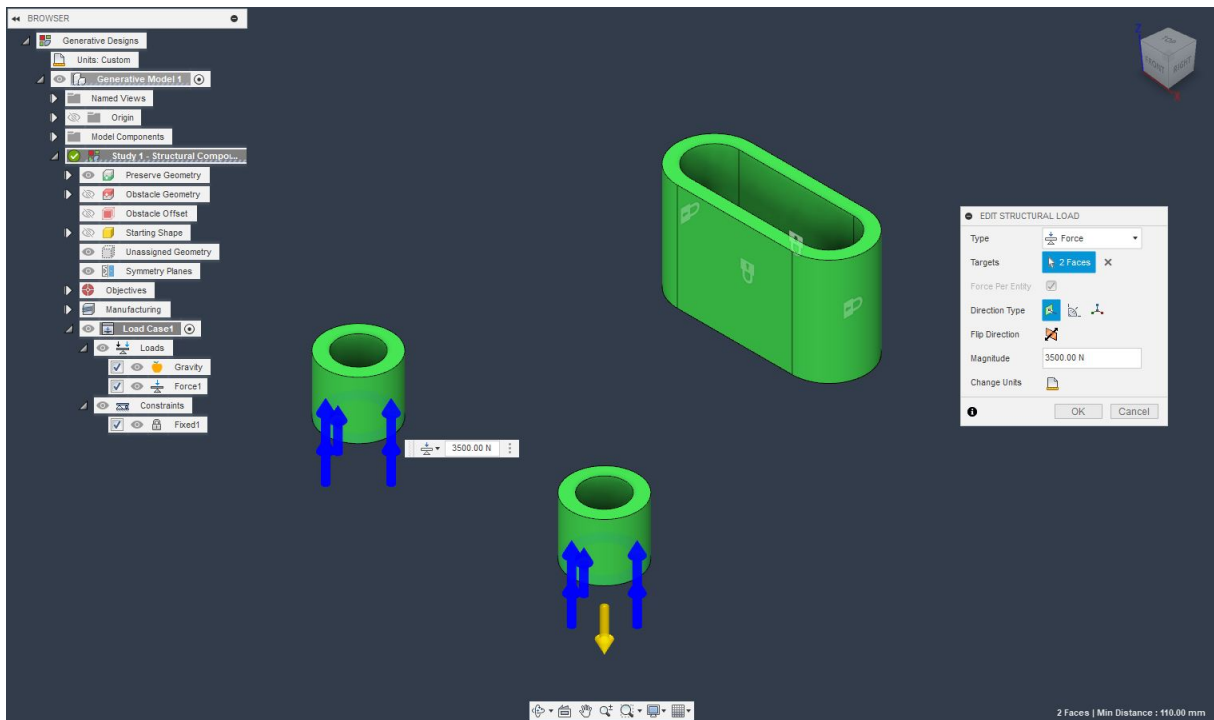


Εικόνα 85: Starting Shape – Βάση



- Ορισμός φορτίων και περιορισμών - Βάση

Το φορτίο ασκείται στην κάτω επιφάνεια των δυο κυλίνδρων και είναι ίσο με 3500N σε καθεμιά. Οι περιορισμοί που εφαρμόστηκαν είναι πάκτωση στην εσωτερική επιφάνεια του δεξιού αντικειμένου.

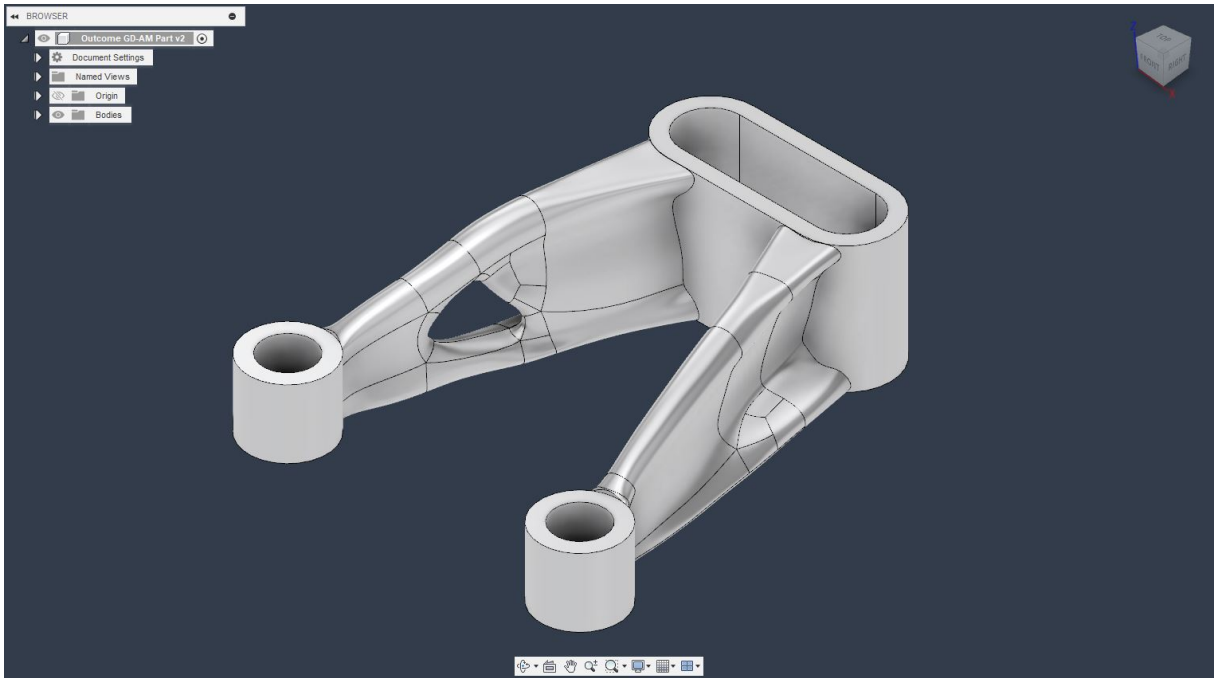


Εικόνα 86: Loads & Constraints – Βάση

- Outcome μελέτης για κατασκευή μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης – Βάση

Το βάρος του outcome που επιλέχθηκε είναι 0,883 kg και ως μέθοδος κατασκευής έχει επιλεχθεί η τρισδιάστατη εκτύπωση.





Εικόνα 87: Outcome Βάση – Όψη 1



Εικόνα 88: Outcome Βάση – Όψη 2

### 3.4.2 Ανασχεδιασμός εξαρτήματος – Βάση

Το αποτέλεσμα της μελέτης του γενεσιουργού σχεδιασμού ανασχεδιάστηκε και προέκυψε το παρακάτω εξάρτημα. Στον νέο σχεδιασμό έχουν διατηρηθεί οι περιοχές που απαιτούνται για την λειτουργικότητά του και παράλληλα έχει κατανεμηθεί το υλικό έχοντας ως οδηγό το outcome. Σε αυτή την περίπτωση έχει επιλεγεί να κατασκευαστεί με μέθοδο

αφαίρεσης υλικού και συγκεκριμένα φρεζάρισμα. Το βάρος του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος είναι 0,972 kg, δηλαδή 0,089 kg μεγαλύτερο σε σχέση με του outcome.



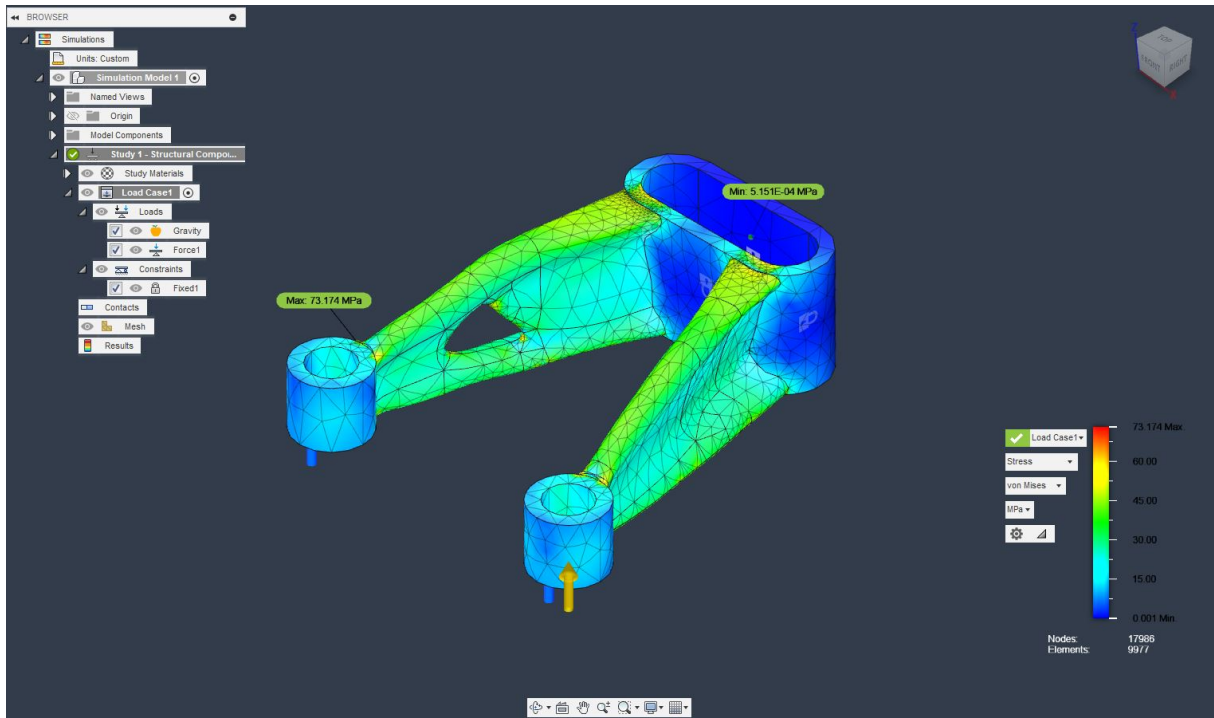
Εικόνα 89: Ανασχεδιασμός Βάση – Όψη 1



Εικόνα 90: Ανασχεδιασμός Βάση – Όψη 2

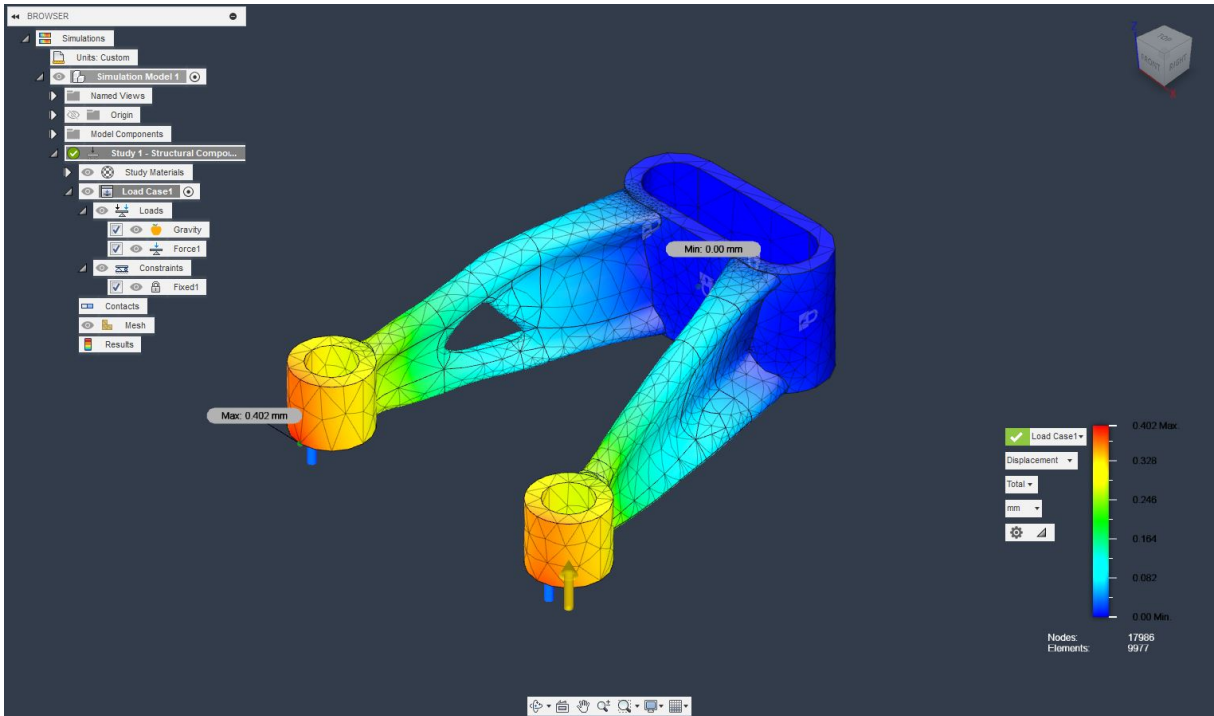
### 3.4.3 Έλεγχος αντοχής outcome – Βάση

Από τον έλεγχο της αντοχής που πραγματοποιήθηκε στο εξάρτημα προέκυψε ότι η μέγιστη τάση είναι 73,174 MPa και εμφανίζεται στο σημείο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



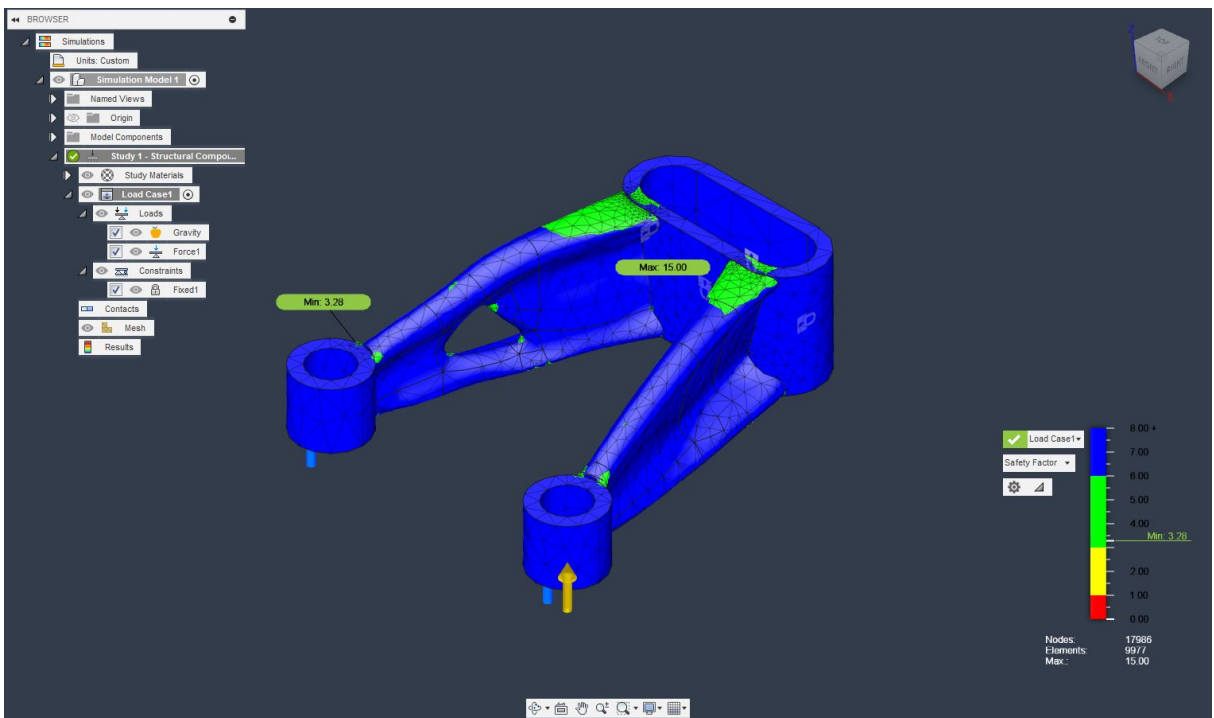
Εικόνα 91: Κατανομή τάσεων outcome Βάση

Επίσης, παρακάτω φαίνεται η μετατόπιση που θα δεχτεί το εξάρτημα και συγκεκριμένα η μέγιστη είναι 0,402mm στο σημείο που σημειώνεται στην εικόνα.



Εικόνα 92: Διάγραμμα μετατόπισης outcome Βάση

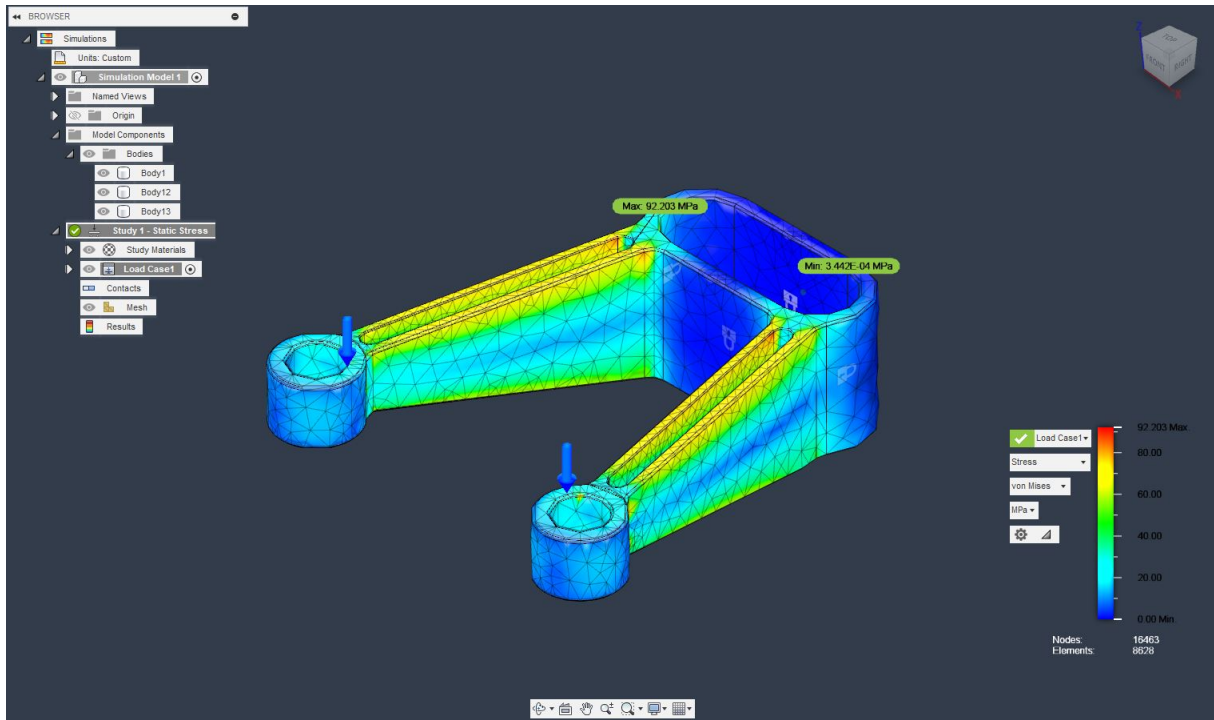
Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο συντελεστής ασφαλείας του εξαρτήματος και συγκεκριμένα φαίνεται ότι ο ελάχιστος συντελεστής είναι 3,28 στο σημείο που δείχνει το βέλος.



Εικόνα 93: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας outcome Βάση

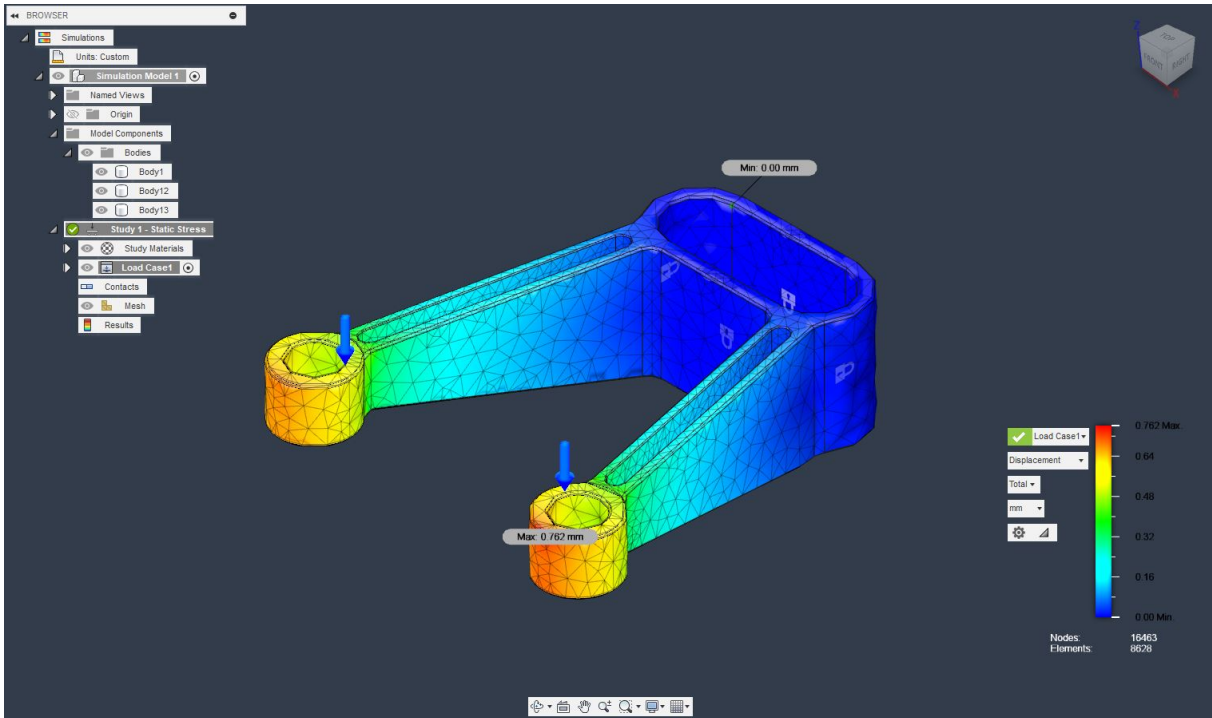
### 3.4.4 Έλεγχος αντοχής ανασχεδιασμένου εξαρτήματος – Βάση

Από τον έλεγχο της αντοχής που πραγματοποιήθηκε στο ανασχεδιασμένο εξάρτημα προέκυψε ότι η μέγιστη τάση είναι 92,203 MPa και εμφανίζεται στο σημείο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



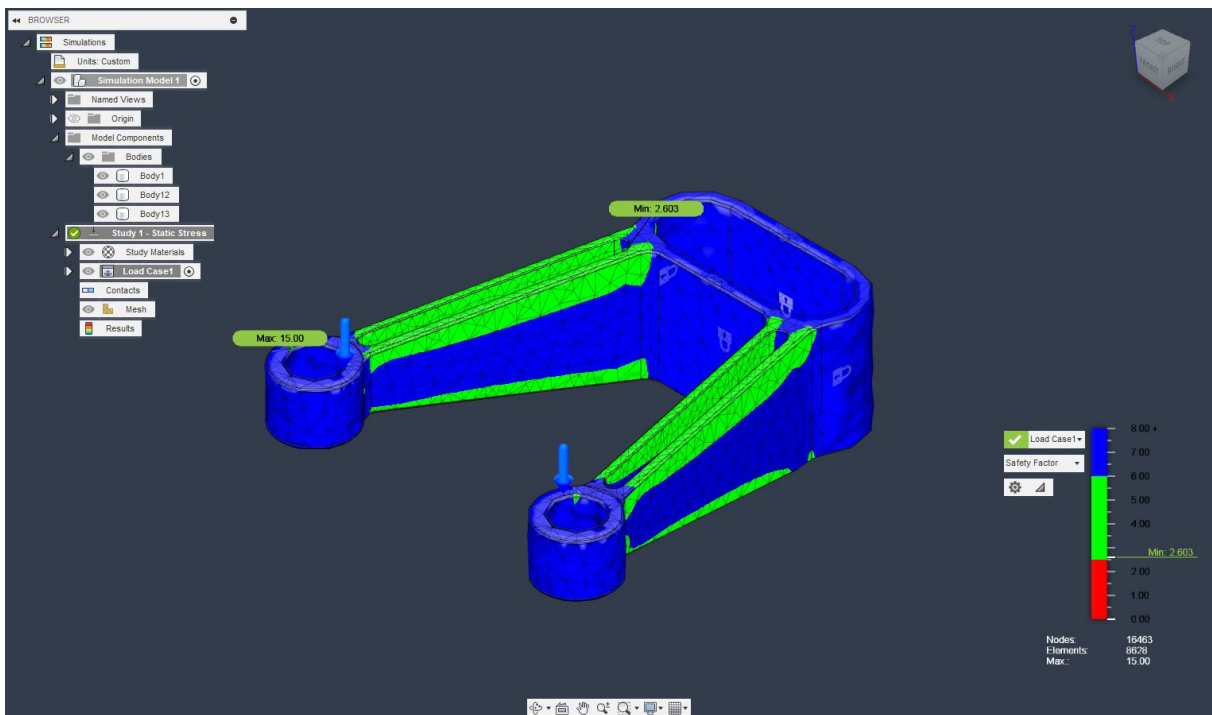
Εικόνα 94: Κατανομή τάσεων ανασχεδιασμένου Βάση

Επίσης, παρακάτω φαίνεται η μετατόπιση που θα δεχτεί το ανασχεδιασμένο εξάρτημα και συγκεκριμένα η μέγιστη είναι 0,762mm στο σημείο που σημειώνεται στην εικόνα.



Εικόνα 95: Διάγραμμα μετατόπισης ανασχεδιασμένου Βάση

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο συντελεστής ασφαλείας του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος και συγκεκριμένα φαίνεται ότι ο ελάχιστος συντελεστής είναι 2,603 στο σημείο που δείχνει το βέλος.



Εικόνα 96: Διάγραμμα συντελεστή ασφαλείας ανασχεδιασμένου Βάση

### 3.4.5 Σύγκριση κόστους εξαρτημάτων – Βάση

Για τον υπολογισμό του κόστους των εξαρτημάτων έγινε ζήτηση προσφοράς από ορισμένες εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον τομέα. Το κόστος του βέλτιστου σχεδίου που προέκυψε μέσω του γενεσιουργού σχεδιασμού και κατασκευάζεται με τρισδιάστατη εκτύπωση κοστολογήθηκε περίπου στα 1245 ευρώ. Σε ό,τι αφορά το κόστος του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος, υπολογίζεται περίπου στα 530 ευρώ και αφορά την κατασκευή του σε φρέζα. Από αυτά τα στοιχεία φαίνεται ότι το κόστος του ανασχεδιασμένου εξαρτήματος που προτείνεται είναι χαμηλότερο και η επιλογή της μεθόδου αφαίρεσης υλικού συμφέρει περισσότερο.





## Κεφάλαιο 4ο – Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει συνοπτική παρουσίαση των σημαντικότερων σημείων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα αναλυθούν τα βασικά συμπεράσματά της και θα αναφερθούν πιθανές μελλοντικές ενέργειες που θα μπορούσαν να υλοποιηθούν.

Αρχικά, σκοπός της εργασίας ήταν να διερευνηθεί η χρήση του γενεσιουργού σχεδιασμού ως εργαλείο έμπνευσης στον σχεδιασμό μηχανολογικών προϊόντων. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε αυτή η μέθοδος να εφαρμοστεί με στόχο την κατασκευή των εξαρτημάτων με συμβατικές μεθόδους κατασκευής. Έτσι, αυτό θα μείωνε σημαντικά το κόστος κατασκευής τους και θα καθιστούσε την μέθοδο πιο προσιτή και σε επιχειρήσεις που δεν διαθέτουν τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν κάποιες από τις εφαρμογές της μεθόδου στην βιομηχανία και αναλύθηκε η μεθοδολογία και οι βασικές αρχές της μέσω του λογισμικού Fusion 360 της Autodesk. Επίσης, έγινε σύγκριση με την μέθοδο της τοπολογικής βελτιστοποίησης, όπου φάνηκε ότι ο γενεσιουργός σχεδιασμός υπερτερεί. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να γίνει χρήση του γενεσιουργού σχεδιασμού αντί της τοπολογικής βελτιστοποίησης και να επιλεγεί η βέλτιστη γεωμετρία από ένα πλήθος παραγόμενων επιλογών.

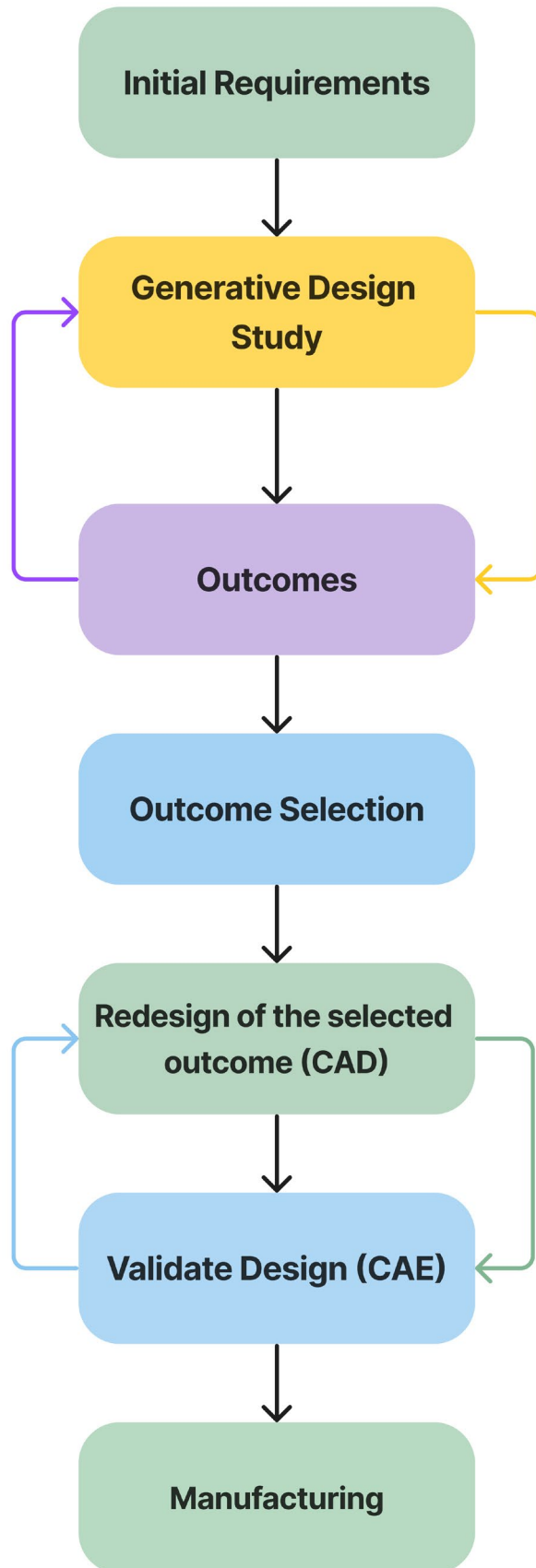
Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα του γενεσιουργού σχεδιασμού σε συνδυασμό με της προσθετικής κατασκευής. Στην συνέχεια, αφού συνοπτικά αναφέρθηκαν κάποιες κατηγορίες της προσθετικής κατασκευής, παρατέθηκαν με παραδείγματα τα μειονεκτήματά της. Ακόμη, αναλύθηκαν κάποια υφιστάμενα μοντέλα κόστους για την τρισδιάστατη εκτύπωση και για τις μεθόδους αφαίρεσης υλικού. Επιπλέον, παρουσιάστηκε συγκριτική μελέτη κατασκευής καλουπιού με μέθοδο αφαίρεσης υλικού και τρισδιάστατης εκτύπωσης με στόχο την ανάδειξη των προβλημάτων της προσθετικής κατασκευής. Μέσω αυτής φάνηκε πως η μέθοδος αφαίρεσης υλικού ήταν οικονομικότερη, αλλά και ότι το καλούπι που προέκυψε ήταν καλύτερο σε σχέση με αυτό της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το οποίο δεν ήταν λειτουργικό.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν τέσσερα παραδείγματα χρήσης του γενεσιουργού σχεδιασμού με σκοπό τον ανασχεδιασμό των εξαρτημάτων και την κατασκευή τους με κλασσικές κατασκευαστικές μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε η εφαρμογή της μεθόδου, έπειτα ο ανασχεδιασμός του εξαρτήματος και ο έλεγχος αντοχής τους. Στα τρία από αυτά παρατέθηκαν στοιχεία κόστους για την κατασκευή τους τόσο μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης όσο και μέσω συμβατικών μεθόδων. Από αυτά τα παραδείγματα

έγινε εμφανές πως η επιλογή κλασσικών μεθόδων κατασκευής μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος ενός προϊόντος.

Σε ό,τι αφορά το κόστος κατασκευής των εξαρτημάτων, για να είναι πιο ακριβές θα πρέπει να αναλυθεί και να ληφθούν υπ' όψιν όλοι οι παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτό. Για παράδειγμα, ο χρόνος κατασκευής, το κόστος της πρώτης ύλης, η καταναλισκόμενη ενέργεια, η πιθανότητα σφάλματος και ο χρόνος βοηθητικών διεργασιών που απαιτούνται. Έτσι, θα μπορέσει να προβλεφθεί με μικρότερο σφάλμα το κόστος και να αποφευχθούν τυχόν παραλείψεις. Επιπρόσθετα, ωφέλιμο θα ήταν να γίνει εκτενέστερη μελέτη για την περίπτωση κατασκευής περισσότερων του ενός εξαρτημάτων και να γίνει εκ νέου σύγκριση του κόστους. Καθώς στις διάφορες κατασκευαστικές μεθόδους το κόστος μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση των παραγόμενων προϊόντων και χωρίς αυτό μπορεί να οδηγηθεί κανείς σε λανθασμένα συμπεράσματα. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξετάζονται όλοι παράμετροι του κόστους και ανάλογα να επιλέγεται η πιο συμφέρουσα μέθοδος και λύση.

Συμπερασματικά, ο γενεσιουργός σχεδιασμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη μηχανολογικών προϊόντων ως εργαλείο έμπνευσης και να επιταχύνει την διαδικασία σχεδιασμού. Ο εκάστοτε σχεδιαστής μπορεί να εκμεταλλευτεί τις σχεδιαστικές επιλογές που παρήχθησαν και να τις ανασχεδιάσει, ώστε να κατασκευαστούν με πιο φθηνές μεθόδους. Ακόμη, μέσω αυτής της πρότασης χρήσης διευρύνεται η εφαρμογή της μεθόδου και δεν περιορίζεται μόνο στην προσθετική κατασκευή που χρησιμοποιείται κυρίως έως τώρα. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται διάγραμμα με την προτεινόμενη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος, στο οποίο φαίνεται η συμβολή του γενεσιουργού σχεδιασμού στο στάδιο σύλληψης και σχεδιασμού ενός προϊόντος.



Εικόνα 97: Προτεινόμενη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντος



## Βιβλιογραφία

- [1] X. Li, H. Demirel, M. Goldstein, Z. Sha, “Exploring Generative Design Thinking for Engineering Design and Design Education”, 2021 ASEE Midwest Section Conference, doi:10.18260/1-2-1125.1153-38349, [Μάιος, 2023]
- [2] “Symetri”, “What is Generative Design and what does it mean to manufacturers?”, <https://www.symetri.co.uk/insights/blog/what-is-generative-design-and-what-does-it-mean-to-manufacturers/>, [Μάιος, 2023]
- [3] “Sculpteo”, “What is generative design?”, <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/create-3d-file/generative-design/>, [Μάιος, 2023]
- [4] “Twitter”, “Pushrod Suspension designed and rendered by Juan Luna”, <https://x.com/adskFusion/status/1335328273086222337>, [Μάιος, 2023]
- [5] J. Frazer, “Creative Design and the Generative Evolutionary Paradigm”, in Creative Evolutionary Systems, 2002, chapter 9, pages 253-274, doi:10.1016/b978-155860673-9/50047-1, [Μάιος, 2023]
- [6] D. Vlah , R. Žavbi, N. Vukašinović, “Evaluation of topology optimization and generative design tools as support for conceptual design”, International Design Conference – Design 2020, volume 1, pages 451-460, University of Ljubljana, doi:10.1017/dsd.2020.165, [Μάιος, 2023]
- [7] A. Filippo, M. Lombardi, F. Marongiu, A. Lorusso, D. Santaniello, “Generative Design for project optimization”, 27th International Conference on Distributed Multimedia Systems, University of Salerno, 2021, doi:10.18293/dmsviva21-014, [Μάιος, 2023]
- [8] T. Fischer, C. Herr, “Teaching Generative Design”, Paper, School of Design, The Hong Kong Polytechnic University, 2001 [Μάιος, 2023]
- [9] F. Bukhari, “A Hierarchical Evolutionary Algorithmic Design System for Generating and Evolving Building Design Models”, Ph.D. dissertation, School of Design, Queensland University of Technology, 2011, [Μάιος, 2023]
- [10] “Autodesk”, “Airbus – The bionic partition”, <https://www.autodesk.com/customer-stories/airbus>, [ Μάιος, 2023]

- [11] “Autodesk”, “Stress tests comparing the existing partition to the bionic partition”, <https://www.autodesk.com>, [Ιούνιος, 2023]
- [12] K. Walmsley, “Keanw”, “Autodesk and Airbus generatively design a 3D-printed “bionic” partition for the A320”, <https://www.keanw.com/2016/02/autodesk-and-airbus-generatively-design-a-3d-printed-bionic-partition-for-the-a320.html>, 2016, [Ιούνιος, 2023]
- [13] “Core 77 Design Awards”, “Gamma: Space Exploration Lander”, <https://designawards.core77.com/Transportation/85772/GAMMA-Space-Exploration-Lander>, 2019, [Ιούνιος, 2023]
- [14] M. Pollak, M. Kocisko, J. Dobransky, “Analysis of software solutions for creating models by a generative design approach”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1199, Technical university of Kosice, 2021, doi:10.1088/1757-899X/1199/1/012098, [Ιούνιος, 2023]
- [15] S. Sheppard, “The Future of Making as applied to the Automotive Industry”, [https://labs.blogs.com/its\\_alive\\_in\\_the\\_lab/2018/10/here-in-my-car-i-feel-safest-of-all.html](https://labs.blogs.com/its_alive_in_the_lab/2018/10/here-in-my-car-i-feel-safest-of-all.html), 2018, [Ιούνιος, 2023]
- [16] A. Bastian, “Andreas Bastian”, “Lightning – Motorcycles – LS – 218 – Swingarm”, <https://www.andreasbastian.com/Lightning-Motorcycles-LS-218-Swingarm>, 2017, [Ιούνιος, 2023]
- [17] “The next wave of intelligent design automation”, Briefing Paper, Harvard Business Review Analytic Services, 2018, [Σεπτέμβριος, 2023]
- [18] S. Li, “Medium”, “Generative Design”, <https://medium.com/@sixuanli/generative-design-61cdb7fa89fb>, 2019, [Ιούνιος, 2023]
- [19] J. I. Saadi, M. C. Yang, “Generative Design: Reframing the Role of the Designer in Early-Stage Design Process”, Journal of Mechanical Design, volume 145, issue 4, pages 1-48, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2023, doi:10.1115/1.4056799, [Σεπτέμβριος 2023]
- [20] “Autodesk – Fusion 360”, “Product Documentation: Generative Design Workflow”, <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GD-OVERVIEW>, [Μάιος, 2023]
- [21] A. Gebisa, H. Lemu, “A case study on topology optimized design for additive manufacturing”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 276,

- Department of Mechanical and Structural Engineering and Materials Science, University of Stavanger, 2017, doi:10.1088/1757-899X/276/1/012026, [Σεπτέμβριος 2023]
- [22] Ε. Κοκκινάκη, “Τοπολογική βελτιστοποίηση κυβελωτών δομών με χρήση του προγράμματος NX”, Μεταπτυχιακή διατριβή, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2018, [Σεπτέμβριος, 2023]
- [23] E. Dalpadulo, F. Gherardini, F. Pini and F. Leali, “Integration of Topology Optimization and Design Variants Selection for Additive Manufacturing-Based Systematic Product Redesign”, MDPI - Paper, Department of Engineering “Enzo Ferrari”, University of Modena and Reggio Emilia, 2020, doi:10.3390/app10217841, [Σεπτέμβριος, 2023]
- [24] L. Barbieri, M. Muzzupappa, “Performance-Driven Engineering Design Approaches Based on Generative Design and Topology Optimization Tools: A Comparative Study”, MDPI – Paper, Department of Mechanical, Energy and Management Engineering (DIMEG), University of Calabria, 2022, doi:10.3390/app12042106, [Σεπτέμβριος, 2023]
- [25] Ν. Σαλταγιάννη, “Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης και η επίδρασή της στην εφοδιαστική αλυσίδα”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Οργάνωσης και Διοίκησης Επιχειρήσεων, Σχολή Οικονομικών Επιχειρηματικών και Διεθνών Σπουδών, Πειραιάς, 2023, [Οκτώβριος, 2023]
- [26] M. Attaran, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing”, in Business Horizons, 2017, volume 60, issue 5, pages 677-688, School of Business & Public Administration, California State University, doi:10.1016/j.bushor.2017.05.011, [Οκτώβριος, 2023]
- [27] “Additively”, <https://www.additively.com>, [Φεβρουάριος, 2024]
- [28] P. Ansari, A. Rehman, F. Pitir, S. Veziroglu, Y. Mishra, O. Aktas, M. Salamci, “Selective Laser Melting of 316L Austenitic Stainless Steel: Detailed Process Understanding Using Multiphysics Simulation and Experimentations”, MDPI – Paper, Gazi University, 2021, doi:10.3390/met11071076, [Φεβρουάριος, 2024]
- [29] Π. Παπαρησιτίδης, “Η εφαρμογή της τρισδιάστατης εκτύπωσης στο σχεδιασμό και τη βιομηχανία της συσκευασίας”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, 2020, [Φεβρουάριος, 2024]

- [30] B. Stackpole, “Robotics247”, “Materialise Takes the Pain Out of Support Generation for Metal 3D Printing”, <https://www.robotics247.com/article/materialise-takes-the-pain-out-of-support-generation-for-metal-3d-printing>, 2017, [Φεβρουάριος, 2024]
- [31] A. Vranić, N. Bogojević, S. Č. Kostić, D. Croccolo, G. Olmi, “Advantages and Drawbacks of Additive Manufacturing”, IMK-14 - Research & Development in Heavy Machinery, ISSN 0354-6829, The Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, University of Kragujevac, 2017, doi:10.5937/imk1702057v, [Φεβρουάριος, 2024]
- [32] Ε. Μιχάκη, “Ερευνητική Μελέτη των Τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2019, [Φεβρουάριος, 2024]
- [33] “Eplus3D”, “Typical Defects of 3D Printed Metal Parts”, <https://www.eplus3d.com/typical-defects-of-3d-printed-metal-parts.html>, 2021, [Φεβρουάριος, 2024]
- [34] B. Zhang, Y. Li, Q. Bai, “Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review”, Review Article - Chinese Mechanical Engineering Society and Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 2017, doi:10.1007/s10033-017-0121-5, [Φεβρουάριος, 2024]
- [35] E. Todorov, R. Spencer, S. Gleeson, M. Jamshidinia, S. Kelly, “America Makes: National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII) Project 1: Nondestructive Evaluation (NDE) of Complex Metallic Additive Manufactured (AM) Structures”, Technical report, 2014, doi:10.21236/ADA612775, [Φεβρουάριος, 2024]
- [36] D. Ahlers, “Technical Aspects of Multimodal Systems – University of Hamburg”, [https://tams.informatik.uni-hamburg.de/research/3d-printing/nonplanar\\_printing/](https://tams.informatik.uni-hamburg.de/research/3d-printing/nonplanar_printing/), [Φεβρουάριος, 2024]
- [37] R. Chand, V. Sharma, R. Trehan, M. Gupta, M. Sarikaya, “Investigating the Dimensional Accuracy and Surface Roughness for 3D Printed Parts Using a Multi-jet Printer”, Journal of Materials Engineering and Performance, volume 32, issue 3, pages 1145-1149, 2023, doi:10.1007/s11665-022-07153-0, [Φεβρουάριος, 2024]
- [38] Christina M. Fuges, “Modern Machine shop”, “Do's and Don'ts of Finishing Metal 3D-Printed Parts”, <https://www.mmsonline.com/articles/-dos-and-donts-of-finishing-metal-3d-printed-parts>, 2017, [Φεβρουάριος, 2024]



- [39] D. González, A. Álvarez, “Additive Manufacturing Feasibility Study & Technology Demonstration”, European Defence Agency-EDA, 2018, [Φεβρουάριος, 2024]
- [40] T. Pereira, J. Kennedy, J. Potgieter, “A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job”, 14th Global Congress on Manufacturing and Management (GCMM-2018), Procedia Manufacturing, volume 30, pages 11-18, Massey University, 2019, doi:10.1016/j.promfg.2019.02.003, [Φεβρουάριος, 2024]
- [41] N. Hopkinson, P. Dickens, “Analysis of rapid manufacturing-using layer manufacturing processes for production”, in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, volume 217, part c, pages 31-39, Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough University, 2003, doi:10.1243/095440603762554596, [Φεβρουάριος, 2024]
- [42] M. Ruffo, C. Tuck, R. Hague, “Empirical laser sintering time estimator for Duraform PA”, International Journal of Production Research, volume 44, issue 23, pages 5131-5146, Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough University, 2006, doi:10.1080/00207540600622522, [Φεβρουάριος, 2024]
- [43] R. Acsinte, “An Economical Comparison between Additive Manufacturing and Subtractive Manufacturing”, Master’s diploma thesis, Department of Aerospace Engineering, Instituto Superior Tecnico (Lisboa), 2019, [Φεβρουάριος, 2024]
- [44] M. Baumers, C. Tuck, R. Wildman, I. Ashcroft, R. Hague, “Energy inputs to Additive Manufacturing: Does capacity utilization matter?”, Conference Proceedings and Journals, Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough University, 2011, doi:10.26153/tsw/15275, [Φεβρουάριος, 2024]
- [45] L. Rickenbacher, A. Spierings, K. Wegener, “An integrated cost-model for selective laser melting (SLM)”, Rapid Prototyping Journal, ISSN: 1355-2546, volume 19, issue 3, pages 208-214, Institute For Rapid Product Development, 2012, doi:10.1108/13552541311312201, [Φεβρουάριος, 2024]
- [46] S. Hällgren, L. Pejryd, J. Ekengren, “Additive Manufacturing and High Speed Machining -Cost comparison of short lead time manufacturing methods”, 26th CIRP Design Conference, Procedia CIRP, volume 50, pages 384-389, School of Science and

Technology, Örebro University, 2016, doi:10.1016/j.procir.2016.05.049, [Φεβρουάριος, 2024]

- [47] M. Baumers, R. Wildman, M. Wallace, J. Yoo, B. Blackwell, P. Farr, C. Roberts, “Using total specific cost indices to compare the cost performance of additive manufacturing for the medical devices domain”, *Journal of Engineering Manufacture*, 2018, doi:10.1177/0954405418774591, [Φεβρουάριος, 2024]
- [48] C. Liu, Y. Li, W. Wang, W. Shen, “A feature-based method for NC machining time estimation”, Article, College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, doi:10.1016/j.rcim.2012.10.001, [Φεβρουάριος, 2024]
- [49] M. Fenoan, O. Alquabeh, M. M Nisar, S. Zia, “Generative Design of a Mechanical Pedal”, *International Journal of Engineering and Management Sciences*, volume 6, issue 1, Department of Mechanical Engineering, University of Debrecen, 2021, doi:10.21791/ijems.2021.1.5, [Μάρτιος, 2024]