



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών &
Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**«Βελτιστοποίηση σχήματος για προσθετική
κατασκευή με τη μέθοδο LPBF και επιβεβαίωση
σχεδιασμού στο λογισμικό ANSYS»**

Καλογεράκης Δημήτριος

Επιβλέπων Καθηγητής : Βασίλειος Σπιτάς – Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

Ευχαριστίες

Για την αμέριστη προσοχή τους και τη συμβολή τους στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω :

- Τον κο. Βασίλειο Σπιτά, καθηγητή Ε.Μ.Π., ο οποίος ανέλαβε την επίβλεψη του θέματος και κατεύθυνε τη πορεία του, ώστε να προκύψουν τα ποιοτικότερα αποτελέσματα.
- Τον κο. Χρήστο Βακουφτσή, υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π., ο οποίος με καθοδήγησε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, ακόμα και όταν ο ίδιος βρισκόταν στην Ελλάδα, στην Αγγλία, στην Πολωνία, στο Βέλγιο ή στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής δίνοντας έτσι τον υπότιτλο στην διπλωματική εργασία “Η διπλωματική των 2 ηπείρων και 5 κρατών”.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η προσθετική κατασκευή ή προσθετική κατεργασία ή τρισδιάστατη εκτύπωση έχει υπάρξει μια από τις πιο ταχύτατα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες στον τομέα των μηχανολογικών κατασκευών. Αυτό συμβαίνει γιατί έχει βρει εφαρμογή σε πάρα πολλές διαφορετικές βιομηχανίες και προσφέρει δυνατότητες που οι παλαιότερες συμβατικές κατεργασίες δεν θα μπορούσαν ποτέ να παρέχουν. Ωστόσο, σαν τεχνολογία είναι ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης και σιγά σιγά γίνεται η αισθητή η ανάγκη αφενός για βαθύτερη κατανόησή της και αφετέρου η ανάγκη για επιμόρφωση των μηχανικών-σχεδιαστών σχετικά με το πως μπορούν να την αξιοποιήσουν. Πάνω σε αυτό το κομμάτι, δηλαδή τον σχεδιασμό για προσθετική κατεργασία (DfAM : Design for Additive Manufacturing), έρχεται να συνεισφέρει η παρούσα διπλωματική εργασία μέσα από την οποία διερευνήθηκαν οι δυνατότητες του λογισμικού nTopology για την επεξεργασία γεωμετριών προς μείωση βάρους του τελικού παραγόμενου τεμαχίου. Έπειτα έγινε επιβεβαίωση του σχεδιασμού με χρήση της σουίτας “Additive” του λογισμικού ANSYS, μέσα από προσομοίωση της διαδικασίας εκτύπωσης LPBF (Laser Powder Bed Fusion) η οποία έδωσε μια πρόβλεψη για τις παραμένουσες τάσεις (οι οποίες θα αναπτυχθούν κατά την εκτύπωση του τεμαχίου) και τις παραμορφώσεις που θα προκαλέσουν. Η επιβεβαίωση του σχεδιασμού έγινε σε δύο συνιστώσες, αφενός ότι οι παραμένουσες τάσεις δεν υποβαθμίζουν την αντοχή του τεμαχίου και αφετέρου ότι το τεμάχιο μπορεί να κατασκευαστεί εντός προδιαγεγραμμένων γεωμετρικών ανοχών. Στις περιπτώσεις όπου υπήρξε αστοχία στα παραπάνω, έγιναν προτάσεις για επανασχεδιασμό του τεμαχίου οι οποίες θα πρέπει με τη σειρά τους να επιβεβαιωθούν δίνοντας έτσι επαναληπτικό χαρακτήρα στην όλη διαδικασία.

Abstract

Over the last years additive manufacturing has been one of the most rapidly advancing technologies in the field of mechanical structures. This is because it has found application in many different industries thanks to its capabilities, previously thought impossible with the use of conventional manufacturing technologies. However, as a technology it is still in a development stage and slowly it is becoming apparent, on the one hand the need for deeper understanding of the technology and on the other, the need for education of engineers-designers on how to make the most out of it. It is exactly on this point where this thesis contributes, namely on Design for Additive Manufacturing (DfAM). In this thesis the capabilities of the software nTopology were explored, in order to lightweight a given geometry after which, the result was imported into the software ANSYS where, using its “Additive” suite, a simulation of the LPBF process took place. The simulation gave a prediction for the residual stresses that occur during the printing process along with their associated deformations. The verification of the final design came in two ways: first it was verified whether the residual stresses downgrade the part’s strength and second whether the part can be produced within specified geometric tolerances. If the part failed in either or both of these ways, suggestions for its redesign were made, the results of which would also need to be verified giving the whole process a repeating character.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	12
1.1 Γενικά.....	12
1.2 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας	12
2. Τεχνολογίες και Υλικά Προσθετικής Κατασκευής	13
2.1 Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής.....	13
2.1.1. Fused Deposition Modeling (FDM)	13
2.1.2. Stereolithography (SLA)	14
2.1.3. Laser Powder Bed Fusion (LPBF).....	15
2.1.4. Digital Light Processing (DLP)	15
2.1.5. Material Jetting	16
2.1.6. Binder Jetting.....	17
2.1.7. Electro Beam Melting (EBM)	18
2.2 Υλικά.....	18
2.2.1. Πολυμερή	18
2.2.2. Μεταλλικά	23
3. Generative Design vs Topology Optimization	23
3.1 Topology Optimization	23
3.2 Generative Design	25
3.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων	26
4. Επεξεργασία Τεμαχίου στο nTopology	27
4.1 Case Study.....	27
4.2 Προετοιμασία Τεμαχίου.....	28
4.3 Topology Optimization	30
4.4 Shelling.....	35
4.4.1 Simple Shelling.....	35
4.4.2 Field Driven Shelling.....	37
4.5 Latticing	41
4.5.1 Simple Latticing	41
4.5.2 Field Driven Latticing	44
5. ANSYS Additive Suite	48
5.1 Επαλήθευση Μοντέλου.....	48

5.2 Μοντελοποίηση.....	50
5.2.1 Υλικό	50
5.2.2 LPBF Wizard.....	54
5.3 Επίδραση Παραμέτρων Εκτύπωσης.....	57
5.3.1 Παράμετροι Γενικά.....	57
5.3.2 Αποτελέσματα Μελέτης Παραμέτρων	58
5.4 Αποτελέσματα, Αξιολόγηση και Επανασχεδιασμός.....	62
5.4.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.	62
5.4.2 Αξιολόγηση και Επανασχεδιασμός	78

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας FDM.	13
Εικόνα 2. Παράδειγμα αντικειμένου εκτυπωμένο με FDM.	14
Εικόνα 3. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας SLA.	14
Εικόνα 4. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας LPBF.	15
Εικόνα 5. Σχεδιάγραμμα Τεχνολογίας DLP.	16
Εικόνα 6. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας Material Jetting.	16
Εικόνα 7. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας Binder Jetting.	17
Εικόνα 8. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας EBM.	18
Εικόνα 9. Στάδια της μεθόδου βελτιστοποίησης τοπολογίας.	23
Εικόνα 10. Παράδειγμα προσομοίωσης βελτιστοποιημένης τοπολογίας υπό τάση.	24
Εικόνα 11. Σύνολο διαφορετικών σχεδίων που προέκυψαν με τη χρήση γεννητικού σχεδιασμού.	25
Εικόνα 12. Παράδειγμα χωρικών περιορισμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για γεννητικό σχεδιασμό. Με πράσινο σημειώνονται οι περιοχές που πρέπει να συμπεριληφθούν στο τελικό σχέδιο και με κόκκινο οι περιοχές που πρέπει να αποφευχθούν.	26
Εικόνα 13. Αρχική γεωμετρία του προς επεξεργασία τεμαχίου.	27
Εικόνα 14. Φορτία στα οποία καλείται να αντέξει το τεμάχιο.	27
Εικόνα 15. Δένδρο σχεδιασμού.	28
Εικόνα 16. Το αρχικό τεμάχιο σε implicit μορφή.	28
Εικόνα 17. Πλευρές στις οποίες ασκούνται τα φορτία.	29
Εικόνα 18. Πλευρές οι οποίες περιορίζονται από τους κοιλίες στήριξης.	29
Εικόνα 19. Αρχικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων επιφάνειας.	30
Εικόνα 20. Αποτέλεσμα της επαναπλεγματοποίησης.	30
Εικόνα 21. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων όγκου.	31
Εικόνα 22. Παθητικές περιοχές.	31
Εικόνα 23. Κόμβοι εφαρμογής αρχικών συνθηκών. Με πράσινο σημειώνονται οι κόμβοι στους οποίους θα ασκηθούν τα φορτία και με γαλάζιο οι περιορισμοί μετατόπισης.	32
Εικόνα 24. Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης τοπολογίας χωρίς περιορισμούς.	33
Εικόνα 25. Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης τοπολογίας με περιορισμό overhang 45°	33
Εικόνα 26. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος βελτιστοποίησης τοπολογίας με περιορισμό Overhang.	34
Εικόνα 27. Αποτέλεσμα 2ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος βελτιστοποίησης τοπολογίας με περιορισμό Overhang.	34
Εικόνα 28. Αποτέλεσμα 3ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος βελτιστοποίησης τοπολογίας με περιορισμό Overhang.	34
Εικόνα 29. Αποτέλεσμα 4ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος βελτιστοποίησης τοπολογίας με περιορισμό Overhang.	34
Εικόνα 30. Κελυφοποίηση τεμαχίου με πάχος κελύφους 2mm.	35
Εικόνα 31. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος κελυφοποίησης με πάχος κελύφους 2mm.	36
Εικόνα 32. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος κελυφοποίησης με πάχος κελύφους 2mm.	36

Εικόνα 33. Αποτέλεσμα 3ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος κελυφοποίησης με πάχος κελύφους 2mm.....	36
Εικόνα 34. Αποτέλεσμα 4ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος κελυφοποίησης με πάχος κελύφους 2mm.....	36
Εικόνα 35. Στατική ανάλυση 4ης περίπτωσης φόρτισης στην αρχική γεωμετρία.	37
Εικόνα 36. Προκύπτουν stress map για την 4η περίπτωση φόρτισης	38
Εικόνα 37. Παράδειγμα πεδίου απόστασης που παράγεται με μετασχηματισμό του προηγούμενου stress map.	38
Εικόνα 38. Scalar Field Chip του nTopology που χρησιμοποιήθηκε για τον μετασχηματισμό του stress map σε πεδίο για να προσδιοριστεί το μεταβλητό πάχος του κελύφους.....	39
Εικόνα 39. Αποτέλεσμα του field driven shelling.	39
Εικόνα 40. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος του field driven shelling...40	40
Εικόνα 41. Αποτέλεσμα 2ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος του field driven shelling...40	40
Εικόνα 42. Αποτέλεσμα 3ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος του field driven shelling...40	40
Εικόνα 43. Αποτέλεσμα 4ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος του field driven shelling...40	40
Εικόνα 44. Παραδείγματα μοναδιαίων κυττάρων. Με τη σειρά από πάνω αριστερά : Simple Cubic, Face Centered Cubic, Octet, Diamond , Iso Truss, Fluorite.	41
Εικόνα 45. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος latticing με πάχος 2mm. ...42	42
Εικόνα 46. Αποτέλεσμα 2ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος latticing με πάχος 2mm. ...42	42
Εικόνα 47. Αποτέλεσμα 3ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος latticing με πάχος 2mm. ...43	43
Εικόνα 48. Αποτέλεσμα 4ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος latticing με πάχος 2mm. ...43	43
Εικόνα 49. Scalar Field Chip του nTopology που χρησιμοποιήθηκε για τον μετασχηματισμό του stress map σε πεδίο για να προσδιοριστεί το μεταβλητό πάχος του lattice.	44
Εικόνα 50. Τομή του τεμαχίου με μεταβλητό πάχος lattice.	44
Εικόνα 51. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος field driven latticing.	45
Εικόνα 52. Αποτέλεσμα 2ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος field driven latticing.	45
Εικόνα 53. Αποτέλεσμα 3ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος field driven latticing.	46
Εικόνα 54. Αποτέλεσμα 4ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος field driven latticing.	46
Εικόνα 55. Αποτελέσματα μετρήσεων μηχανήματος CMM.....	48
Εικόνα 56. Μετατόπιση περιφέρειας κατά X, της οπής Φ15.	49
Εικόνα 57. Διάγραμμα Πυκνότητας-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.	50
Εικόνα 58. Διάγραμμα Συντελεστή Θερμικής Διαστολής-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.....	51
Εικόνα 59. Διάγραμμα Μέτρου Ελαστικότητας-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.	51
Εικόνα 60. Διάγραμμα Λόγου Poisson-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.....	52
Εικόνα 61. Διάγραμμα Ορίου Διαρροής-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.	52
Εικόνα 62. Διάγραμμα Θερμικής Αγωγιμότητας-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.	53
Εικόνα 63. Διάγραμμα Ειδικής Θερμοχωρητικότητας-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.....	53
Εικόνα 64. Σχεδιάγραμμα της προσομοίωσης στο ANSYS Workbench.	54
Εικόνα 65. 1ο βήμα μοντελοποίησης, καθορισμός γεωμετριών,	54
Εικόνα 66. 2ο βήμα μοντελοποίησης, καθορισμός χαρακτηριστικών πλέγματος.....	55

Εικόνα 67. 3ο βήμα μοντελοποίησης, καθορισμός υποστηρικτικής γεωμετρίας.	55
Εικόνα 68. 4ο βήμα μοντελοποίησης, αντιστοίχιση υλικών στα σώματα.	56
Εικόνα 69. 5ο βήμα μοντελοποίησης, καθορισμός παραμέτρων μηχανής.	56
Εικόνα 70. 6ο βήμα μοντελοποίησης, καθορισμός αρχικών συνθηκών προσομοίωσης.	57
Εικόνα 71. Καθορισμός μεταβλητών ως παραμέτρους σχεδιασμού.	58
Εικόνα 72. Σχεδιάγραμμα της προσομοίωσης για τον καθορισμό της επίδρασης των παραμέτρων μηχανής στις παραμένουσες τάσεις και στη συνολική παραμόρφωση του τεμαχίου.	58
Εικόνα 73. Μενού επεξεργασίας παραμέτρων σχεδιασμού και αποτελεσμάτων.	59
Εικόνα 74. Πλέγμα του Solid με υποστηρικτική γεωμετρία και μέγεθος voxel 2mm.	59
Εικόνα 75. Συνολική Παραμόρφωση και Παραμένουσες Τάσεις για το Solid χωρίς heat treatment.	63
Εικόνα 76. Παραμόρφωση κατά τον άξονα Z της βάσης του Solid χωρίς heat treatment.	64
Εικόνα 77. Παραμόρφωση κατά Y και Z της περιφέρειας των οπών πείρο, του Solid χωρίς heat treatment.	64
Εικόνα 78. Παραμόρφωση κατά X και Y της περιφέρειας οπής κοχλία στήριξης του Solid χωρίς heat treatment.	65
Εικόνα 79. Συνολική Παραμόρφωση και Παραμένουσες Τάσεις για το Solid με heat treatment.	66
Εικόνα 80. Παραμόρφωση κατά τον άξονα Z της βάσης του Solid με heat treatment.	67
Εικόνα 81. Παραμόρφωση κατά Y και Z της περιφέρειας των οπών πείρου του Solid με heat treatment.	68
Εικόνα 82. Παραμόρφωση κατά X και Y της περιφέρειας οπής κοχλία στήριξης του Solid με heat treatment.	69
Εικόνα 83. Συνολική Παραμόρφωση και Παραμένουσες Τάσεις για το Shell χωρίς heat treatment.	70
Εικόνα 84. Παραμόρφωση κατά τον άξονα Z της βάσης του Shell χωρίς heat treatment.	71
Εικόνα 85. Παραμόρφωση κατά Y και Z της περιφέρειας των οπών πείρου του Shell χωρίς heat treatment.	71
Εικόνα 86. Παραμόρφωση κατά X και Y της περιφέρειας οπής κοχλία στήριξης του Shell χωρίς heat treatment.	72
Εικόνα 87. Συνολική Παραμόρφωση και Παραμένουσες Τάσεις για το Shell με heat treatment.	73
Εικόνα 88. Παραμόρφωση κατά τον άξονα Z της βάσης του Shell με heat treatment.	74
Εικόνα 89. Παραμόρφωση κατά Y και Z της περιφέρειας των οπών πείρου του Shell με heat treatment.	75
Εικόνα 90. Παραμόρφωση κατά X και Y της περιφέρειας οπής κοχλία στήριξης του Shell με heat treatment.	76
Εικόνα 91. Όψη σε εγκάρσια τομή του Solid.	78
Εικόνα 92. Πρόταση επανασχεδιασμού του Solid. Με μπλε είναι σημειωμένη η επιφάνεια που θα χρειαστεί επιπρόσθετη κατεργασία ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη επιπεδότητα.	80
Εικόνα 93. Παραμόρφωση κατά τον Z του επανασχεδιασμένου Solid.	81
Εικόνα 94. Πρόταση επανασχεδιασμού του Shell. Με μπλε είναι σημειωμένη η επιφάνεια που θα χρειαστεί επιπρόσθετη κατεργασία ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη επιπεδότητα.	83

Εικόνα 95. Όψη σε εγκάρσια τομή του Shell όπου φαίνεται η χρησιμότητα των οπών που προστέθηκαν κατά τον επανασχεδιασμό.	83
Εικόνα 96. Παραμόρφωση κατά τον Z του επανασχεδιασμένου Shell.	84
Εικόνα 97. Διάγραμμα αξιολόγησης των τριών σχεδίων ως προς το άμεσο κόστος παραγωγής και το βάρος τους.	85

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Πίνακας αποτελεσμάτων n Topology όσον αφορά στη μείωση βάρους τεμαχίου.

Πίνακας 2. Σύγκριση μετρούμενων διαμέτρων με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες.

Πίνακας 3. Σύγκριση μετρούμενων συντεταγμένων X με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες.

Πίνακας 4. Σύγκριση μετρούμενων συντεταγμένων Y με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες.

Πίνακας 5. Πίνακας γενικών αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.

Πίνακας 6. Πίνακας αποτελεσμάτων που αφορούν τη βάση.

Πίνακας 7. Πίνακας αποτελεσμάτων που αφορούν τις οπές πείρου.

Πίνακας 8. Πίνακας αποτελεσμάτων που αφορούν τις οπές κοχλιών.

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Ως “προσθετική κατασκευή” (additive manufacturing) αναφέρεται στη διαδικασία δημιουργίας τρισδιάστατων αντικειμένων με την προσθήκη υλικού στρώμα προς στρώμα, που σε αντίθεση με τις παραδοσιακές αφαιρετικές μεθόδους επιτρέπει την παραγωγή πολύπλοκων γεωμετριών και ταυτόχρονα τη μείωση των αποβλήτων. Υπάρχει μια πληθώρα τεχνολογιών προσθετικής κατεργασίας, οι οποίες καλύπτουν μεγάλο εύρος εφαρμογών, από την βιομηχανία έως και τους χομπίστες, με βασικότερες τις FDM, SLA και SLS, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Τις δεκαετίες του 1950 και του 1960 τέθηκαν τα πρώτα θεμέλια της προσθετικής κατασκευής. Το 1950, ο μαθηματικός και φυσικός Stephen Wolfram ανέπτυξε μια μέθοδο κατεργασίας ελεγχόμενης από υπολογιστή που έμοιαζε με τη σύγχρονη τρισδιάστατη εκτύπωση. Ωστόσο, η ιδέα δεν κέρδισε μεγάλη προσοχή εκείνη την εποχή. Το 1983 ο όρος "στερεολιθογραφία" (SLA) επινοήθηκε από τον Charles Hull, όταν κατέθεσε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μια μέθοδο δημιουργίας τρισδιάστατων αντικειμένων με τη σκλήρυνση στρωμάτων υγρού φωτοπολυμερούς με υπεριώδη ακτινοβολία. Στα μέσα της δεκαετίας του '80 η τεχνολογία selective laser sintering (SLS) αναπτύχθηκε από τον Dr. Carl Deckard στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, στο Όστιν που αργότερα, το 1990 κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Παράλληλα ο Scott Crump ανέπτυξε την, πλέον πιο γνωστή και πολυδιαδεδομένη, τεχνολογία FDM (Fused Deposition Modeling) που κατοχυρώθηκε το 1992 με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Μετά την αλλαγή της χιλιετίας οι τεχνολογίες προσθετικής κατεργασίας συνέχισαν να εξελίσσονται και να διαφοροποιούνται. Εισήχθησαν νέα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων και των κεραμικών. Αυτή η δεκαετία είδε επίσης ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την τρισδιάστατη εκτύπωση σε επίπεδο χόμπυ, με το RepRap να ξεκινά το 2005, με στόχο την ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή ανοικτού κώδικα. Από το 2010 και μετά ο κλάδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης γνώρισε σημαντική ανάπτυξη και αναγνωρισιμότητα. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία οδήγησαν σε υψηλότερη ανάλυση, αυξημένες ταχύτητες εκτύπωσης και μεγαλύτερη ποικιλία υλικών. Η προσθετική κατασκευή άρχισε να βρίσκει εφαρμογές σε διάφορες βιομηχανίες, όπως η αεροδιαστημική, οι επιστήμες υγείας, η αυτοκινητοβιομηχανία κ.α. Περνώντας στο παρόν συνεχίζεται η εξέλιξη της τεχνολογίας τόσο σε βιομηχανικό επίπεδο (π.χ. με τη παραγωγή μεγάλης κλίμακας) όσο και σε ερευνητικό (π.χ. με το “4D Printing”).

1.2 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η χρήση διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας μιας γεωμετρίας με χρήση του εμπορικού λογισμικού nTopology με τελικό σκοπό την μείωση του βάρους του παραγόμενου τεμαχίου, με χρήση προσθετικής κατεργασίας τεχνολογίας LPBF. Λόγω της φύσης της προσθετικής κατεργασίας στο εσωτερικό του τεμαχίου, αναπτύσσονται τάσεις οι οποίες προκαλούν και ορισμένες παραμορφώσεις. Ως συνέχεια της διαδικασίας που ακολουθήθηκε στο nTopology γίνεται μια προσομοίωση της διαδικασίας της εκτύπωσης στην σουίτα προσθετικής κατεργασίας του εμπορικού λογισμικού ANSYS προκειμένου να προβλεφθούν οι παραπάνω τάσεις και παραμορφώσεις και να

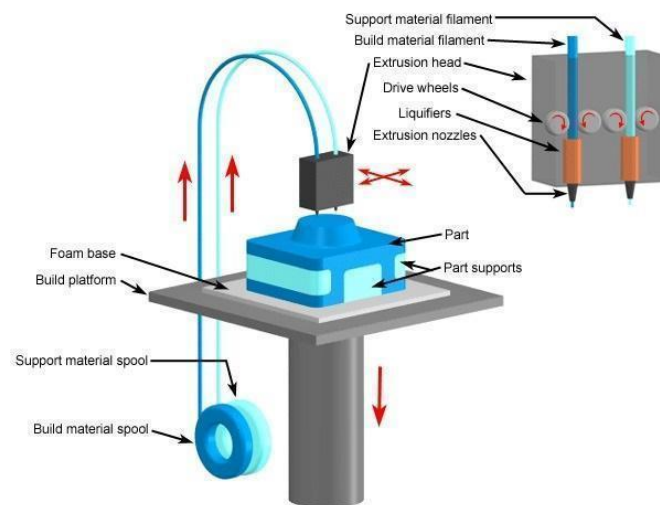
επαληθευθεί ότι η τελική γεωμετρία όχι μόνο είναι ικανή ως προς τη λειτουργικότητά της αλλά και κατασκευάσιμη εντός των ορίων προδιαγραφών.

2. Τεχνολογίες και Υλικά Προσθετικής Κατασκευής

2.1 Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής

2.1.1. Fused Deposition Modeling (FDM)

Το FDM είναι μια τεχνική προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί θερμοπλαστικά υλικά για την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων. Ένα νήμα από θερμοπλαστικό υλικό, συχνά PLA ή ABS, τροφοδοτείται μέσω ενός θερμαινόμενου ακροφυσίου, το οποίο εναποθέτει το υλικό στρώμα προς στρώμα σε μια πλατφόρμα κατασκευής. Το υλικό που εξωθείται στερεοποιείται γρήγορα, συνδεόμενο με τα υποκείμενα στρώματα. Το κύριο μειονέκτημά της μεθόδου έγκειται στο φινίρισμα της επιφάνειας του τελικού τεμαχίου, το οποίο μπορεί να είναι σχετικά τραχύ σε σύγκριση με άλλες μεθόδους. Η ανάλυση και η ακρίβεια των διαστάσεων των εκτυπώσεων FDM επηρεάζονται από παράγοντες όπως το μέγεθος του ακροφυσίου, το ύψος στρώματος και η ταχύτητα εκτύπωσης. Το FDM είναι γνωστό για την απλότητα και την προσιτή τιμή του, γεγονός που το καθιστά μια δημοφιλή επιλογή για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων και εφαρμογές για χομπίστες.



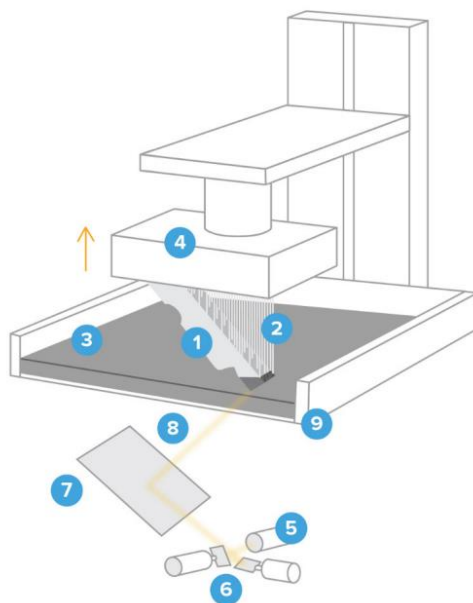
Εικόνα 1. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας FDM.



Εικόνα 2. Παράδειγμα αντικειμένου εκτυπωμένου με FDM.

2.1.2. Stereolithography (SLA)

Το SLA ή στερεολιθογραφία είναι μια διαδικασία προσθετικής κατασκευής που δημιουργεί αντικείμενα με τη σκλήρυνση υγρής φωτοπολυμεριζόμενης ρητίνης με τη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας. Μια δεξαμενή με υγρή φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη εκτίθεται σε λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας, το οποίο στερεοποιεί επιλεκτικά τη ρητίνη στρώμα προς στρώμα, σχηματίζοντας σταδιακά το αντικείμενο. Η τεχνολογία SLA παρέχει εκτυπώσεις υψηλής ανάλυσης με λεία επιφάνεια, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν ψιλές λεπτομέρειες και περίπλοκες γεωμετρίες. Σημαντικό κομμάτι αυτής της μεθόδου είναι η επιπλέον επεξεργασία που απαιτείται για την απομάκρυνση της περίσσειας ρητίνης και την πλήρη σκλήρυνση του αντικειμένου. Σε σχέση με το FDM, τα μηχανήματα SLA είναι σχετικά πιο ακριβά αν και πλέον πολλές εταιρείες παράγουν μηχανήματα σε πολύ προσιτές τιμές.



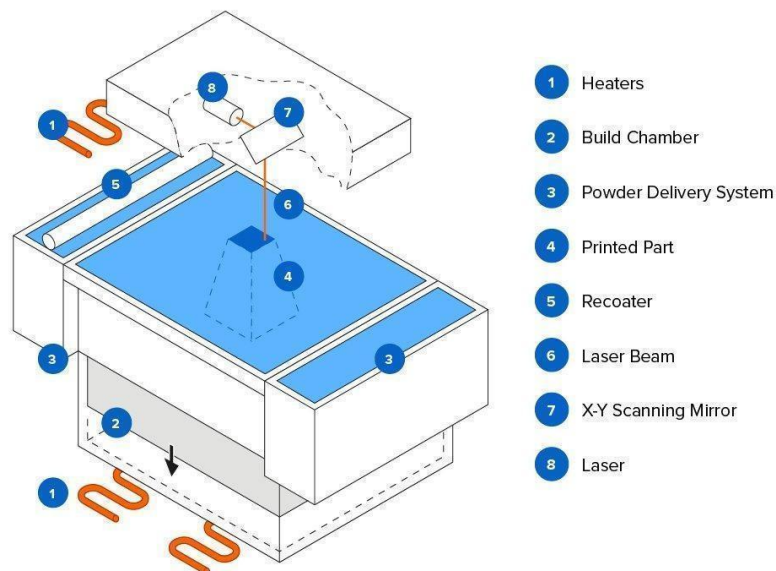
Upside-Down (Inverted) SLA

- 1 Printed Part
- 2 Supports
- 3 Resin
- 4 Build Platform
- 5 UV Laser
- 6 Galvanometers
- 7 X-Y Scanning Mirror
- 8 Laser Beam
- 9 Resin Tank

Εικόνα 3. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας SLA.

2.1.3. Laser Powder Bed Fusion (LPBF)

Το LPBF είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιεί ένα λέιζερ υψηλής ισχύος για τη σύντηξη κονιοποιημένων υλικών, όπως πλαστικά, μέταλλα ή κεραμικά, σε ένα στερεό αντικείμενο. Η διαδικασία ξεκινά με την εξάπλωση ενός λεπτού στρώματος υλικού σε σκόνη στην πλατφόρμα κατασκευής. Το λέιζερ σαρώνει το στρώμα σύμφωνα με τη διατομή του τρισδιάστατου μοντέλου, συσσωματώνοντας επιλεκτικά τα σωματίδια σκόνης μεταξύ τους. Μόλις ολοκληρωθεί ένα στρώμα, η πλατφόρμα κατασκευής κατεβαίνει και απλώνεται ένα νέο στρώμα σκόνης, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία μέχρι να σχηματιστεί ολόκληρο το αντικείμενο. Η LPBF προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας δημιουργίας πολύπλοκων γεωμετριών χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση δομών υποστήριξης και της ικανότητας παραγωγής λειτουργικών εξαρτημάτων τελικής χρήσης με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες. Τα μηχανήματα LPBF είναι γενικά ακριβά και η διαδικασία απαιτεί εξειδικευμένες προφυλάξεις ασφαλείας λόγω του χειρισμού λεπτών σκονών και της χρήσης λέιζερ υψηλής ισχύος.

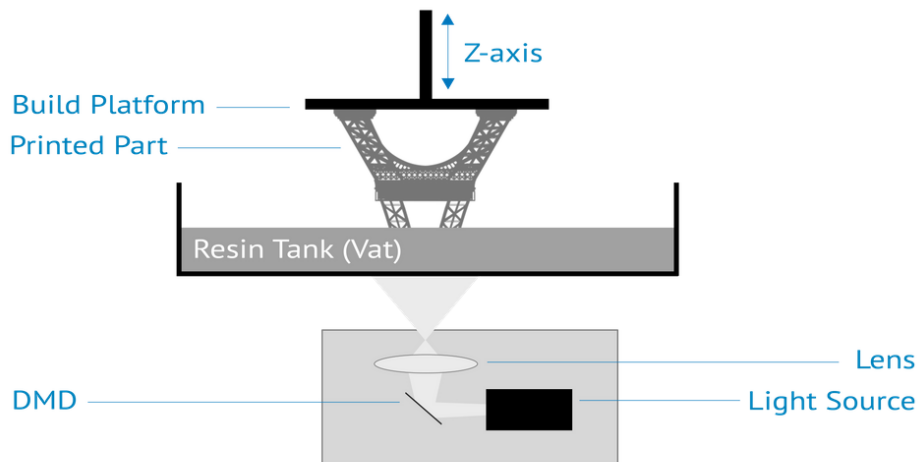


Εικόνα 4. Σδιάγραμμα τεχνολογίας LPBF.

2.1.4. Digital Light Processing (DLP)

Το DLP είναι μια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που μοιράζεται ομοιότητες με τη στερεολιθογραφία SLA. Στην DLP, μια δεξαμενή με υγρή φωτοπολυμεριζόμενη ρητίνη εκτίθεται σε έναν προβολέα ψηφιακού φωτός DLP που προβάλλει ταυτόχρονα την εικόνα ενός ολόκληρου στρώματος, στερεοποιώντας τη ρητίνη. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα κατασκευής μετακινείται προς τα κάτω και ένα νέο στρώμα υγρής ρητίνης εκτίθεται στο προβαλλόμενο φως, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία μέχρι να ολοκληρωθεί το αντικείμενο. Το DLP προσφέρει ταχύτερους χρόνους εκτύπωσης σε σύγκριση με το SLA, καθώς ολόκληρα στρώματα σκληραίνονται ταυτόχρονα. Ωστόσο, η ανάλυση των εκτυπώσεων DLP μπορεί να είναι ελαφρώς χαμηλότερη από την SLA λόγω της φύσης του ψηφιακού προβολέα φωτός που

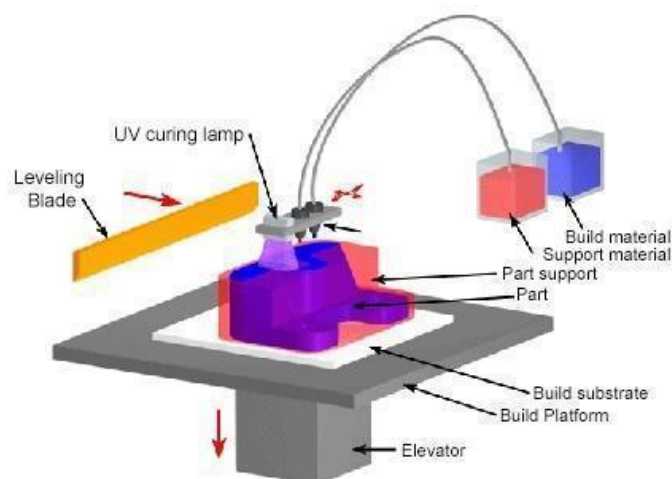
αποτελείται από pixels. Αυτή η τεχνολογία είναι κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής λεπτομέρειας, όπως στην κατασκευή κοσμημάτων και στην οδοντιατρική προσθετική.



Εικόνα 5. Σχεδιάγραμμα Τεχνολογίας DLP.

2.1.5. Material Jetting

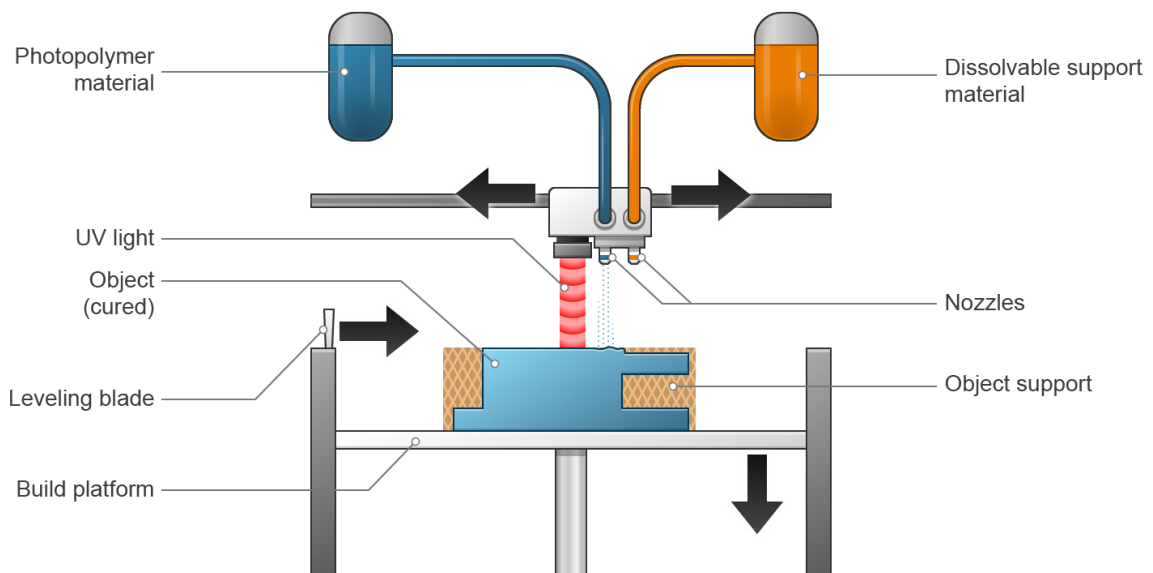
Το Material Jetting είναι μια τεχνική προσθετικής κατασκευής που λειτουργεί παρόμοια με την εκτύπωση μελάνης. Χρησιμοποιεί κεφαλές εκτύπωσης για την απόθεση σταγονιδίων υγρών φωτοπολυμερών ή κεριών πάνω σε μια πλατφόρμα κατασκευής. Αυτές οι σταγόνες σκληραίνονται γρήγορα με υπεριώδεις ακτίνες, στερεοποιώντας το υλικό. Η εκτόξευση υλικού μπορεί επίσης να συνδυάσει πολλαπλά υλικά στην ίδια εκτύπωση, επιτρέποντας τη δημιουργία εξαρτημάτων από πολλά υλικά και πολλά χρώματα σε μια ενιαία διαδικασία. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει εκτυπώσεις υψηλής ανάλυσης με λεία επιφανειακά τελειώματα, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές όπου η λεπτομέρεια και η αισθητική είναι ζωτικής σημασίας. Η εκτόξευση υλικού χρησιμοποιείται συνήθως στην παραγωγή οπτικών πρωτοτύπων, ιατρικών μοντέλων και περίπλοκων αρχιτεκτονικών μοντέλων.



Εικόνα 6. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας Material Jetting.

2.1.6. Binder Jetting

Το Binder Jetting είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή αντικειμένων με κονιοποιημένα υλικά, όπως μέταλλα, άμμο ή κεραμικά. Η διαδικασία ξεκινά με την εξάπλωση ενός λεπτού στρώματος υλικού σε μορφή σκόνης στην πλατφόρμα κατασκευής. Στη συνέχεια, ένα συνδετικό υλικό εναποτίθεται επιλεκτικά πάνω στο στρώμα σκόνης, δεσμεύοντας τα σωματίδια μεταξύ τους για τη δημιουργία του σχήματος του αντικειμένου. Μόλις ολοκληρωθεί ένα στρώμα, η πλατφόρμα κατασκευής χαμηλώνει και απλώνεται ένα νέο στρώμα σκόνης, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται στρώμα προς στρώμα μέχρι να σχηματιστεί το τελικό αντικείμενο. Μετά την εκτύπωση, το τεμάχιο μπορεί να υποβληθεί σε περαιτέρω επεξεργασία, όπως πυροσυσσώματωση, για να αποκτήσει πλήρη αντοχή. Το Binder Jetting προσφέρει το πλεονέκτημα της εκτύπωσης μεγάλων εξαρτημάτων με σχετικά υψηλή ταχύτητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που κυμαίνονται από αρχιτεκτονικά μοντέλα έως την παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων για βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροδιαστημική.

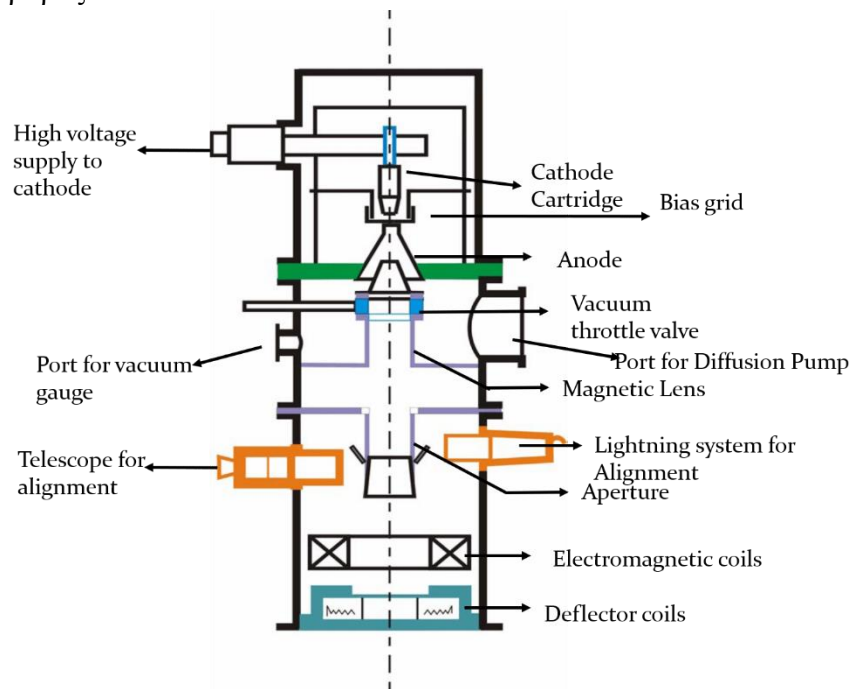


2018 © Dassault Systèmes

Εικόνα 7. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας Binder Jetting.

2.1.7. Electro Beam Melting (EBM)

Το EBM είναι μια τεχνική προσθετικής κατασκευής ειδικά σχεδιασμένη για μεταλλικά εξαρτήματα. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον κενού για να αποφευχθεί η παρεμβολή της δέσμης ηλεκτρονίων. Το EBM χρησιμοποιεί μια δέσμη ηλεκτρονίων για την επιλεκτική τήξη μεταλλικής σκόνης, στρώμα προς στρώμα, ακολουθώντας τη διατομή του τρισδιάστατου μοντέλου. Η δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας εξασφαλίζει τη διεξοδική τήξη και τη σύντηξη των μεταλλικών σωματιδίων, οδηγώντας σε εξαρτήματα με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και πυκνότητα. Το EBM είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την κατασκευή κρίσιμων εξαρτημάτων σε βιομηχανίες όπου τα εξαρτήματα απαιτούν υψηλή αντοχή, ακρίβεια και μειωμένο βάρος.



Εικόνα 8. Σχεδιάγραμμα τεχνολογίας EBM.

2.2 Υλικά

2.2.1. Πολυμερή

i. PLA

Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) είναι ένα βιοδιασπώμενο και βιώσιμο θερμοπλαστικό πολυμερές που προέρχεται από βιώσιμες πηγές, όπως το άμυλο καλαμποκιού ή το ζαχαροκάλαμο. Έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή στο πεδίο της προσθετικής κατασκευής λόγω των ευνοϊκών περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών του, της ευκολίας χρήσης και των αξιόπαινων μηχανικών ιδιοτήτων του. Οι ευπροσάρμοστες ιδιότητες του PLA το καθιστούν ευνοϊκό για μια σειρά εφαρμογών, που καλύπτουν τόσο την κατασκευή πρωτοτύπων όσο και τη λειτουργική χρήση.

Το PLA παρουσιάζει ικανοποιητικά μηχανικά χαρακτηριστικά που το καθιστούν κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές. Διαθέτει όριο εφελκυσμού στο εύρος 50 έως 70 MPa, ενώ το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 2,7 έως 4,0 GPa και επιμήκυνση κατά τη θραύση κυμαίνεται μεταξύ 5 και 20%. Είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά του PLA επηρεάζονται από παράγοντες όπως η γεωμετρία,

οι παράμετροι εκτύπωσης και τυχόν μετεπεξεργασία. Οι αξιέπαινες μηχανικές ιδιότητες του PLA, σε συνδυασμό με τη βιοδιασπασιμότητά του, προσφέρονται για μια σειρά εφαρμογών στο πλαίσιο της προσθετικής κατασκευής:

- Πρωτοτυποποίηση:

Λόγω της ευκολίας εκτύπωσης και της αποδεκτής δομικής πιστότητας. Η ικανότητά του να υλοποιεί γρήγορα πολύπλοκες γεωμετρίες επιταχύνει τις επαναληπτικές διαδικασίες σχεδιασμού.

- Ιατρικά μοντέλα:

Η βιοσυμβατότητα και η δυνατότητα αποστείρωσης του PLA το καθιστούν κατάλληλο για ανατομικά μοντέλα, διευκολύνοντας την ιατρική εκπαίδευση, τον προεγχειρητικό σχεδιασμό και τις εκπαιδευτικές προσομοιώσεις.

- Εκπαιδευτικά μοντέλα:

Το PLA αποτελεί προτιμώμενη επιλογή για τα εκπαιδευτικά ιδρύματα λόγω της μη τοξικής του φύσης και της βιοδιασπασιμότητάς του. Διευκολύνει τη δημιουργία ανατομικών μοντέλων, αρχιτεκτονικών πρωτοτύπων και διδακτικών οπτικών βοηθημάτων.

- Καλλιτεχνικά:

Οι καλλιτέχνες και οι τεχνίτες χρησιμοποιούν το PLA για τη δημιουργία περίπλοκων γλυπτών και διακοσμητικών αντικειμένων. Το λείο φινίρισμα και η ικανότητά του να διατηρεί τις λεπτές λεπτομέρειες ανταποκρίνονται στις αισθητικές και καλλιτεχνικές απαιτήσεις.

Συνοψίζοντας, το PLA αποτελεί ένα πολύπλευρο υλικό στο πλαίσιο της προσθετικής κατασκευής. Ο συνδυασμός μηχανικών χαρακτηριστικών και οικολογικού χαρακτήρα βοηθούν στην ανάπτυξη ενός μεγάλου φάσματος εφαρμογών, συνδυάζοντας τη χρησιμότητα με την περιβαλλοντική υπευθυνότητα.

ii. ABS

Το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) αποτελεί ένα εξέχον θερμοπλαστικό στον τομέα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το οποίο χαρακτηρίζεται από τα πολύπλευρα μηχανικά χαρακτηριστικά του και την ευρεία εφαρμογή του. Το ABS, ένα συμπολυμερές που περιλαμβάνει μονάδες ακρυλονιτρίλιου, βουταδιενίου και στυρενίου, προσδίδει ένα μωσαϊκό μηχανικών ιδιοτήτων που το καθιστούν ευέλικτο σε διάφορους βιομηχανικούς και λειτουργικούς τομείς.

Το ABS παρουσιάζει μια σειρά μηχανικών ιδιοτήτων που είναι καθοριστικές για την καταλληλότητά του για εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ειδικότερα, το ABS παρουσιάζει όριο διαρροής που κυμαίνεται μεταξύ 30 και 60 MPa, μέτρο ελαστικότητας, το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 1,8 και 3,5 GPa, και επιμήκυνση κατά τη θραύση που εκτείνεται από 3 έως 50%. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να αναγνωριστεί ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ABS εξαρτώνται από τις συνθήκες εκτύπωσης, τη γεωμετρία και τις μεταγενέστερες επεξεργασίες. Οι μηχανικές ικανότητες και τα χαρακτηριστικά του υλικού ABS εκδηλώνονται σε μια σειρά εφαρμογών στο πεδίο της τρισδιάστατης εκτύπωσης:

- Λειτουργικά πρωτότυπα:

όπου ο ισορροπημένος συνδυασμός αντοχής και ανθεκτικότητας προσομοιώνει τη μηχανική συμπεριφορά των εξαρτημάτων τελικής χρήσης.

- Βιομηχανικά εξαρτήματα:

Η ανθεκτικότητα του ABS το καθιστά κατάλληλο για την κατασκευή βιομηχανικών εξαρτημάτων.

Συνοψίζοντας, το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS) αποτελεί ένα σεβαστό υλικό στο παράδειγμα της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η μηχανική επιδεξιότητα, η ευελιξία και οι ανθεκτικές ιδιότητες του ABS βρίσκουν απήχηση σε μια έκταση εφαρμογών και παγιώνουν τη θέση του ως ένα σταθερό θερμοπλαστικό στο τοπίο της προσθετικής κατασκευής.

iii. PETG

Η πολυαιθυλενοτερεφθαλική γλυκόλη, κοινώς γνωστή ως PETG, είναι ένας θερμοπλαστικός συμπολυεστέρας με έναν συνδυασμό μηχανικών χαρακτηριστικών και χημικής ανθεκτικότητας ο οποίος του προσδίδει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους βιομηχανικούς, εμπορικούς και δημιουργικούς τομείς.

Το μηχανικό προφίλ του PETG υποστηρίζει την καταλληλότητά του για πολυποίκιλες προσπάθειες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το PETG εμφανίζει όριο διαρροής 50 έως 80 MPa, μέτρο ελαστικότητας που κυμαίνεται από 2,0 έως 3,5 GPa, και επιμήκυνση κατά τη θραύση που κυμαίνεται από 2 έως 8%. Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από παράγοντες όπως οι ρυθμίσεις εκτύπωσης, οι γεωμετρία και οι μετεπεξεργασία.

- Λειτουργικά πρωτότυπα:

Η ισορροπία των μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζει το PETG το τοποθετεί ιδανικά για την κατασκευή λειτουργικών πρωτοτύπων που αντικατοπτρίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των εξαρτημάτων τελικής χρήσης.

- Καλλιτεχνικές και δημιουργικές αναζητήσεις:

Οι καλλιτέχνες και οι τεχνίτες αξιοποιούν το PETG για τη δημιουργία περίπλοκων γλυπτών, εγκαταστάσεων τέχνης και αισθητικά ελκυστικών αντικειμένων, εκμεταλλευόμενοι τη διαφάνειά του και τη δομική του ακεραιότητα.

- Εκπαιδευτικά μοντέλα:

Η βιοσυμβατότητα και η ευκολία εκτύπωσης του PETG ενισχύουν τη χρήση του σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, διευκολύνοντας την κατασκευή ανατομικών μοντέλων, εκπαιδευτικών οθονών και διαδραστικών εργαλείων μάθησης.

Συνολικά, η πολυαιθυλενοτερεφθαλική γλυκόλη (PETG) έχει μια ισχυρή παρουσία στο πεδίο της προσθετικής κατασκευής. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του, συνδυάζονται με τη χημική του ανθεκτικότητα και δημιουργούν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

iv. TPU

Η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU), είναι ένα πολυμερές με αξιοσημείωτη ελαστικότητα και ανθεκτικότητα.

Το TPU έχει όριο διαρροής που κυμαίνεται από 20 έως 60 MPa μέτρο ελαστικότητας που κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 2,5 GPa και επιμήκυνση κατά τη θραύση, που κυμαίνεται από 400 έως 800%. Ο συνδυασμός μηχανικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών του TPU το τοποθετεί ως υλικό επιλογής σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών:

- Πρωτοτυποποίηση:

Η εγγενής ελαστικότητα του TPU το καθιστά ιδανικό για την παραγωγή εύκαμπτων πρωτοτύπων, αναπαράγοντας τη μηχανική συμπεριφορά αντικειμένων που απαιτούν κάμψη και παραμόρφωση.

- Εξαρτήματα στεγανοποίησης:

Οι ισχυρές ικανότητες στεγανοποίησης του TPU το καθιστούν κατάλληλο για την κατασκευή παρεμβυσμάτων, σφραγίδων και ο-ρινγκ που απαιτούν ανθεκτικότητα έναντι περιβαλλοντικών παραγόντων.

- Αντικείμενα με αντοχή σε κρούσεις:

Η εξαιρετική αντοχή του TPU στην κρούση βρίσκει εφαρμογές σε προστατευτικό εξοπλισμό, αθλητικό εξοπλισμό και γενικά περιπτώσεις όπου τα αντικείμενα απαιτούν προστασία από έντονες κρούσεις.

Συνοψίζοντας, η θερμοπλαστική πολυουρεθάνη (TPU) αναλαμβάνει σημαντικό ρόλο στον τομέα της προσθετικής κατασκευής, υποστηριζόμενη από τα μηχανικά της χαρακτηριστικά, τα οποία του δίδουν την θέση του κατεξοχήν πιο χρησιμοποιημένου ελαστικού υλικού.

v. PEEK

Το Polyether Ether Ketone (PEEK), είναι ένα προηγμένο θερμοπλαστικό μηχανικής που έχει αναδειχθεί στον τομέα της προσθετικής κατασκευής λόγω της εξαιρετικής θερμικής σταθερότητας, της μηχανικής ικανότητας και της χημικής του αντοχής. Ο ξεχωριστός συνδυασμός των ιδιοτήτων του το καθιστά το κατεξοχήν υλικό για εφαρμογές υψηλών επιδόσεων που απαιτούν ανθεκτικότητα απέναντι σε ακραίες συνθήκες.

Οι μηχανικές ιδιότητες του PEEK αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο της αξιοποίησής του σε προσπάθειες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το PEEK έχει ένα αυξημένο όριο διαρροής, που κυμαίνεται μεταξύ 90 και 100 MPa, μέτρο ελαστικότητας που κυμαίνεται από 3,6 έως 4,0 GPa, και επιμήκυνση θραύσης που κυμαίνεται από 20 έως 50%. Αξιοσημείωτη είναι η θερμική σταθερότητα του PEEK, η οποία χαρακτηρίζεται από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης που κυμαίνεται μεταξύ 143 και 163°C. Μερικές από τις εφαρμογές του PEEK είναι :

- Αεροδιαστημική και αεροπορία:

Το PEEK βρίσκει εύνοια στον τομέα της αεροδιαστημικής, συμβάλλοντας στην κατασκευή ελαφρών αλλά ανθεκτικών εξαρτημάτων για αεροσκάφη, δορυφόρους και διαστημόπλοια, όπου η αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και μηχανικές καταπονήσεις είναι υψίστης σημασίας.

- Ιατρικά εμφυτεύματα:

Η βιοσυμβατότητα και η δυνατότητα αποστείρωσης του PEEK το τοποθετούν ιδανικά για τη δημιουργία ιατρικών εμφυτευμάτων, προσθετικών και χειρουργικών εργαλείων που απαιτούν βιοσυμβατά, μη διαβρωτικά υλικά.

- Εξαρτήματα πετρελαίου και φυσικού αερίου:

Η χημική αντίσταση και η σταθερότητα διαστάσεων του PEEK το καθιστούν ένα ευνοϊκό υλικό για την παραγωγή εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται σε απαιτητικά περιβάλλοντα πετρελαίου και φυσικού αερίου, συμπεριλαμβανομένων εργαλείων γεωτρήσεων.

- Αυτοκινητοβιομηχανία:

Η ικανότητα του PEEK να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες και μηχανική καταπόνηση το καθιστά κατάλληλο για την κατασκευή εξαρτημάτων αυτοκινήτων υψηλής απόδοσης, όπως εξαρτήματα κινητήρα και ηλεκτρικούς σύνδεσμους.

- Ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα:

Οι μονωτικές ιδιότητες και η αντοχή του PEEK στη φωτιά το καθιστούν βέλτιστη επιλογή για την παραγωγή συνδέσμων, μονωτικών και γενικά εξαρτημάτων στον τομέα των ηλεκτρονικών.

Συνοψίζοντας, το PEEK κατέχει μια σημαντική θέση στον τομέα της λειτουργικής προσθετικής κατασκευής χάρη στα εξαιρετικά μηχανικά, θερμικά και χημικά χαρακτηριστικά του.

vi. Πολυαμίδιο (νάιλον)

Το νάιλον, ένα πολυμερές θερμοπλαστικό που παρουσιάζει μια γκάμα ιδιοτήτων που το καθιστούν υλικό επιλογής για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών, εμπορικών και δημιουργικών εφαρμογών. Έχει όριο διαρροής που κυμαίνεται από 50 έως 80 MPa, μέτρο ελαστικότητας που κυμαίνεται από 2,5 έως 3,5 GPa, και επιμήκυνση κατά τη θραύση, που κυμαίνεται μεταξύ 100 και 600%. Χάρη σε αυτά το νάιλον χαίρει μεγάλου εύρους εφαρμογών:

- Λειτουργικά πρωτότυπα:

Το αμάλγαμα αντοχής και ευελιξίας του νάιλον το καθιστά βέλτιστη επιλογή για τη δημιουργία λειτουργικών πρωτοτύπων που μιμούνται πιστά τη μηχανική συμπεριφορά των τελικών εξαρτημάτων.

- Μηχανικά εξαρτήματα:

Η μηχανική ανθεκτικότητα του νάιλον το καθιστά κατάλληλο για την κατασκευή μηχανικών εξαρτημάτων όπως γρανάζια, ρουλεμάν, κουζινέτα και άλλα στοιχεία που φέρουν φορτίο, όπου η αντοχή και η αντίσταση στη φθορά είναι αναγκαία.

- Δομικά εξαρτήματα:

Η ανθεκτικότητα του νάιλον το καθιστούν κατάλληλο για την κατασκευή δομικών εξαρτημάτων σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και τα βιομηχανικά μηχανήματα.

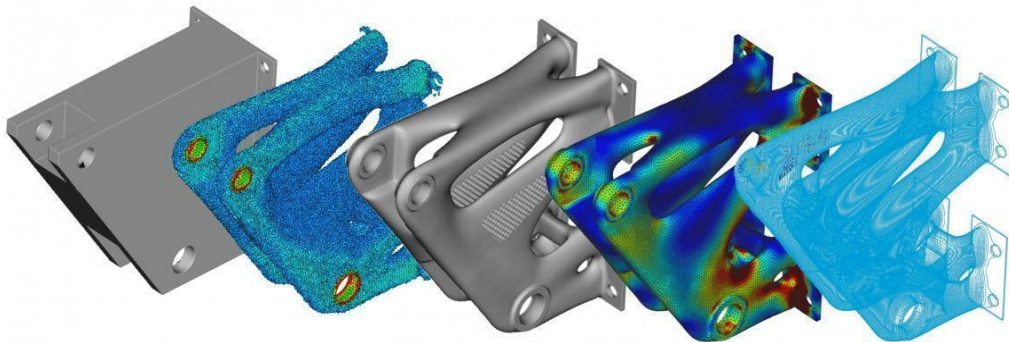
2.2.2. Μεταλλικά

Υπάρχει μια εξίσου μεγάλη ποικιλία μεταλλικών υλικών που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία και ειδικά στην τεχνολογία LPBF όπως τιτάνιο, αλουμίνιο, χάλυβας και κράματα νικελίου ή χαλκού. Τα μέταλλα χάρη στις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες έχουν υπάρξει το κέντρο της προσοχής της επιστημονικής κοινότητας και έχουν μελετηθεί εκτενώς. Αυτό ωστόσο δημιουργεί ένα κενό στην κατανόηση που έχουμε για τα πλαστικά και αυτός είναι, μεταξύ άλλων, και ο λόγος που επιλέχθηκε να μελετηθεί το Nylon 12 στη παρούσα διπλωματική εργασία.

3. Generative Design vs Topology Optimization

3.1 Topology Optimization

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας (topology optimization) είναι μια υπολογιστική μέθοδος σχεδιασμού που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης κατανομής του υλικού σε ένα δεδομένο πεδίο σχεδιασμού για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων απόδοσης. Στόχος της βελτιστοποίησης τοπολογίας είναι η εύρεση της πιο αποδοτικής διάταξης υλικού που ελαχιστοποιεί ή μεγιστοποιεί μια συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση, σεβόμενη διάφορους περιορισμούς, όπως περιορισμοί τάσεων, μετατοπίσεων ή όγκου. Αποτελεί βασικό εργαλείο στον τομέα της δομικής βελτιστοποίησης και χρησιμοποιείται ευρέως στη μηχανική και το σχεδιασμό προϊόντων για τη δημιουργία ελαφρών εξαρτημάτων υψηλών επιδόσεων.



Εικόνα 9. Στάδια της μεθόδου βελτιστοποίησης τοπολογίας.

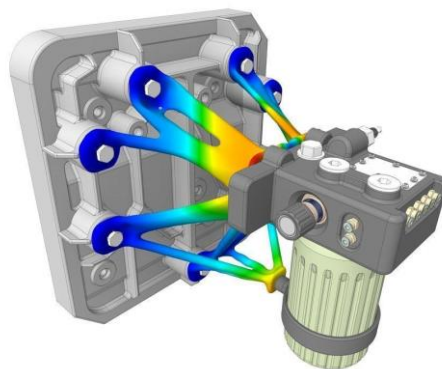
Το ξεκίνημα της μεθόδου μπορεί να εντοπιστεί στο έργο του Άρη Παπαλάμπρου και του Dennis J. Wilde στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Αρχικά επικεντρώθηκε στη δομική βελτιστοποίηση, προσπαθώντας να προσδιορίσει τη βέλτιστη κατανομή του υλικού σε έναν δεδομένο χώρο σχεδιασμού. Η μέθοδος απέκτησε μεγαλύτερη ισχύ κατά τις δεκαετίες του 1980 και 1990 με πρωτοποριακές συνεισφορές από τους Ole Sigmund και Michael P. Bendsøe. Αυτές οι θεμελιώδεις εργασίες έθεσαν τα θεμέλια για την αυστηρή διατύπωση και την υπολογιστική εφαρμογή που ακολούθησε.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης τοπολογίας περιλαμβάνει τη διαίρεση του πεδίου σχεδιασμού σε μικρότερα πεπερασμένα στοιχεία. Μέσα σε κάθε στοιχείο, η πυκνότητα ή το κλάσμα όγκου του υλικού αναπαρίσταται ως συνεχής μεταβλητή, συνήθως μεταξύ 0 και 1. Ένα μαθηματικό μοντέλο, συχνά βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιείται για την ανάλυση της δομικής απόκρισης, όπως η κατανομή των τάσεων, για διαφορετικές διατάξεις υλικών. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ανακατανέμει επαναληπτικά το υλικό για να βελτιώσει την απόδοση του σχεδιασμού, ικανοποιώντας παράλληλα τους περιορισμούς.

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε προσεγγίσεις με βάση την πυκνότητα και σε προσεγγίσεις με βάση τη γεωμετρία. Οι μέθοδοι που βασίζονται στην πυκνότητα προσαρμόζουν την πυκνότητα του υλικού εντός των στοιχείων, ενώ οι μέθοδοι που βασίζονται στη γεωμετρία τροποποιούν το σχήμα ή την τοπολογία της ίδιας της δομής. Οι μέθοδοι με βάση την πυκνότητα είναι πιο συνηθισμένες και περιλαμβάνουν την ερμηνεία ενδιάμεσων τιμών πυκνότητας ως υλικό που υπάρχει και τιμών κοντά στο 0 ως κενό ή καθόλου υλικό. Καθώς προχωρά η βελτιστοποίηση, οι ενδιάμεσες πυκνότητες φιλτράρονται ή εξομαλύνονται για να δημιουργηθεί μια σαφής κατανομή υλικού. Από την άλλη πλευρά, οι μέθοδοι που βασίζονται στη γεωμετρία χειρίζονται απευθείας τη γεωμετρία της δομής, προσθέτοντας ή αφαιρώντας υλικό με βάση προκαθορισμένους κανόνες.

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας έχει ευρεία εφαρμογή σε διάφορους τομείς της μηχανικής, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, μηχανική κατασκευών και η εμβιομηχανική. Στην αεροδιαστημική, η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό ελαφρών και δομικά αποδοτικών εξαρτημάτων, ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση καυσίμων και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, στην αυτοκινητοβιομηχανία βοηθά στην ανάπτυξη ασφαλέστερων και ελαφρύτερων δομών οχημάτων, στην μηχανική κατασκευών βοηθά στο σχεδιασμό φερόντων κατασκευών με βελτιωμένη σταθερότητα και κατανομή φορτίου. Επιπλέον, είναι ζωτικής σημασίας στη εμβιομηχανική για τη δημιουργία ιατρικών εμφυτευμάτων με βελτιστοποιημένη κατανομή υλικών για την προώθηση της οστεοενσωμάτωσης και της βιοσυμβατότητας.

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας αποτελεί απόδειξη της αρμονικής σύγκλισης των μαθηματικών, της μηχανικής και των υπολογιστών. Η ιστορική της εξέλιξη, οι εφαρμογές της και τα μαθηματικά της θεμέλια τονίζουν συλλογικά τη σημαντικότητα της στο σύγχρονο μηχανολογικό σχεδιασμό. Καθώς η μέθοδος συνεχίζει να εξελίσσεται με τις τεχνολογικές εξελίξεις, η ικανότητά της να φέρνει επανάσταση στο σχεδιασμό προϊόντων, να βελτιώνει τη δομική απόδοση και να προωθεί την καινοτομία παραμένει ακλόνητη.



Εικόνα 10. Παράδειγμα προσομοίωσης βελτιστοποιημένης τοπολογίας υπό τάση.

3.2 Generative Design

Ο γεννητικός σχεδιασμός (generative design) είναι μια προηγμένη προσέγγιση υπολογιστικού σχεδιασμού που αξιοποιεί αλγόριθμους και τεχνητή νοημοσύνη για να εξερευνήσει έναν τεράστιο χώρο σχεδιασμού και να δημιουργήσει βελτιστοποιημένες λύσεις για προβλήματα μηχανικής. Πρόκειται για ένα ισχυρό εργαλείο στον τομέα του μηχανολογικού σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης, με στόχο τη δημιουργία καινοτόμων και αποτελεσματικών λύσεων για σύνθετες μηχανολογικές προκλήσεις. Ο γεννητικός σχεδιασμός περιλαμβάνει τον ορισμό στόχων και περιορισμών σχεδιασμού, μετά τον οποίο ένας αλγόριθμος διερευνά και αξιολογεί επαναληπτικά πολλαπλές εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού για την εύρεση των λύσεων με τις καλύτερες επιδόσεις.

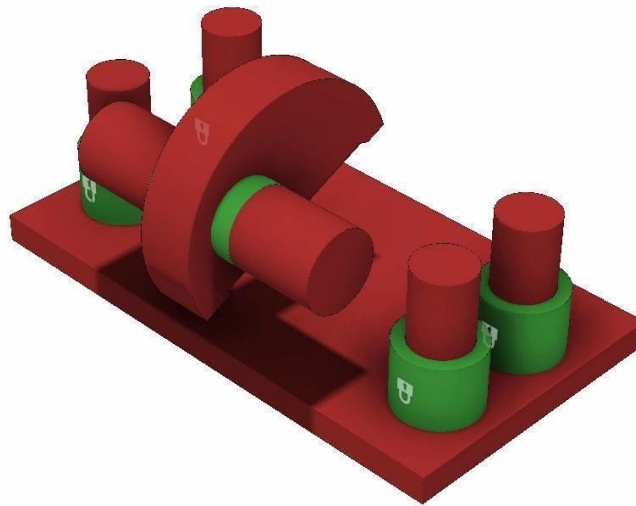


Εικόνα 11. Σύνολο διαφορετικών σχεδίων που προέκυψαν με τη χρήση γεννητικού σχεδιασμού.

Το generative design έχει τις ρίζες της στη σύγκλιση του σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), της υπολογιστικής γεωμετρίας και των μεθόδων βελτιστοποίησης. Οι πρώτες έννοιες χρονολογούνται από τη δεκαετία του 1960, με το επαναστατικό σύστημα Sketchpad του Ivan Sutherland, το οποίο εισήγαγε διαδραστικά γραφικά υπολογιστή για την εξερεύνηση του σχεδιασμού. Ωστόσο, μόλις τις τελευταίες δεκαετίες ωρίμασε σε μια συστηματική προσέγγιση. Οι πρώτες προσπάθειες χαρακτηρίζονταν από γραμματικές σχημάτων (shape grammar), σχεδιασμό βάσει κανόνων και εξελικτικούς αλγόριθμους. Τον 21ο αιώνα, ο γεννητικός σχεδιασμός άνθισε με την πρόοδο των υπολογιστικών δυνατοτήτων και της αλγοριθμικής πολυπλοκότητας. Πρωτοποριακές εργασίες ερευνητών όπως ο John Frazer, ο Peter Bentley και ο Karl Sims άνοιξαν το δρόμο για την ενσωμάτωση γενετικών αλγορίθμων, νευρωνικών δικτύων και άλλων υπολογιστικών τεχνικών στις διαδικασίες σχεδιασμού. Με την έλευση ισχυρών υπολογιστικών πλατφορμών, ο γεννητικός σχεδιασμός βρήκε σημαντική χρησιμότητα σε μηχανολογικές εφαρμογές.

Η διαδικασία ξεκινά με τον ορισμό των απαιτήσεων σχεδιασμού, όπως οι λειτουργικοί στόχοι (π.χ. ελαχιστοποίηση του βάρους, μεγιστοποίηση της αντοχής) και οι κατασκευαστικοί περιορισμοί (π.χ. ιδιότητες υλικών, διαδικασίες κατασκευής). Αυτοί οι στόχοι και οι περιορισμοί κωδικοποιούνται σε μαθηματικά μοντέλα και ένας αλγόριθμος χρησιμοποιεί τεχνικές βελτιστοποίησης για την αναζήτηση λύσεων εντός του καθορισμένου χώρου σχεδιασμού.

Το generative design χρησιμοποιεί συνήθως εξελικτικούς αλγορίθμους, γενετικούς αλγορίθμους ή άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης για την επαναληπτική δημιουργία και αξιολόγηση υποψηφίων σχεδιασμών. Κάθε σχεδιασμός αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση και αξιολογείται με προσομοιώσεις ή ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για να εκτιμηθεί η απόδοσή του με βάση τους καθορισμένους στόχους και περιορισμούς. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος ανατροφοδοτείται σύμφωνα με τις επιδόσεις κάθε υποψηφίου σχεδίου για να καθοδηγήσει τη δημιουργία νέων υποψηφίων σχεδιασμών, συγκλίνοντας σταδιακά προς βέλτιστες ή σχεδόν βέλτιστες λύσεις.



Εικόνα 12. Παράδειγμα χωρικών περιορισμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για γεννητικό σχεδιασμό. Με πράσινο σημειώνονται οι περιοχές που πρέπει να συμπεριληφθούν στο τελικό σχέδιο και με κόκκινο οι περιοχές που πρέπει να αποφευχθούν.

Το generative design επιτρέπει τη διερεύνηση αντισυμβατικών και καινοτόμων σχεδίων που ο άνθρωπος δεν θα μπορούσε εύκολα να συλλάβει. Με την αυτοματοποίηση της διαδικασίας διερεύνησης του σχεδιασμού, το generative design μπορεί να εξετάσει έναν μεγάλο αριθμό δυνατοτήτων γρήγορα και αποτελεσματικά. Αυτό επιταχύνει τη διαδικασία επανάληψης του σχεδιασμού και οδηγεί σε βελτιωμένες λύσεις που πληρούν ή υπερβαίνουν τις απαιτήσεις του μηχανικού, ενώ συχνά ξεπερνούν τα όρια του εφικτού με τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού.

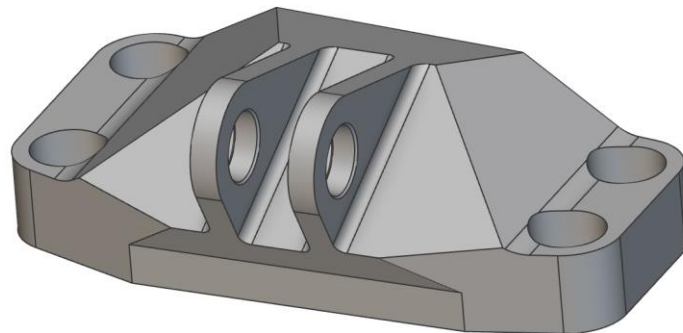
3.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων

Αν και η διπλωματική εργασία ξεκίνησε με σκοπό να χρησιμοποιηθεί το generative design, διαπιστώθηκε ότι αυτό δεν θα ήταν δυνατό, καθώς όλα τα εμπορικά λογισμικά (βλ. Anydesk Fusion 360, PTC Creo, Siemens Nx & Solid Edge, Altair Inspire, Dassault Systèmes CATIA κ.α.) δεν διαθέτουν αυτή τη λειτουργία στην ακαδημαϊκή άδεια. Για αυτό τον λόγο εντέλει επιλέχθηκε το nTopology ως λογισμικό στο οποίο έγινε όλη η επεξεργασία του τεμαχίου, γιατί από τη στιγμή που η μόνη διαθέσιμη μέθοδος βελτιστοποίησης ήταν η βελτιστοποίηση τοπολογίας, θεωρήθηκε σκόπιμο να δοθεί έμφαση σε ένα, σχετικά, νέο πρόγραμμα το οποίο λειτουργεί με τρόπο διαφορετικό από αυτόν της νόρμας (βλ. Dassault Systèmes Solidworks, ANSYS κ.α.).

4. Επεξεργασία Τεμαχίου στο nTopology

4.1 Case Study

Το αντικείμενο που θα μελετηθεί στη παρούσα διπλωματική εργασία είναι το “bracket” από γνωστό διαγωνισμό της General Electric, καθώς έχει εδραιωθεί ως τεμάχιο αναφοράς για εργασίες πάνω στη προσθετική κατασκευή. Ο λόγος που έχει καταλάβει αυτή τη θέση είναι το ότι σαν σχήμα περιλαμβάνει πολλά σημεία ενδιαφέροντος όπως σπές, overhangs, ορθογώνιες ακμές κ.α. αλλά ταυτόχρονα έχει και πολύ ξεκάθαρη λειτουργία ώστε να είναι εφικτή η αξιολόγηση του τελικού σχεδιασμού όχι μόνο ως προς την αντοχή του αλλά και ως προς τη λειτουργικότητά του.



Εικόνα 13. Αρχική γεωμετρία του προς επεξεργασία τεμαχίου.

Δεδομένου ότι το υλικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί και παρακάτω είναι το Nylon 12 ενώ ο διαγωνισμός αρχικά υποδεικνύει τιτάνιο χρειάζεται πρώτα να γίνει μια μετατροπή των ζητούμενων φορτίων ώστε να ανταποκρίνονται στις αντοχές του νέου υλικού. Αυτή η αλλαγή έγινε σύμφωνα με τον λόγο του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου των ορίων διαρροής. Για το τιτάνιο το μέτρο ελαστικότητας είναι 114GPa ενώ για το Nylon 12 είναι 1300MPa (λόγος $11.4 \cdot 10^{-3}$) ενώ για τα όρια διαρροής είναι 880MPa και 42MPa αντίστοιχα (λόγος $47.8 \cdot 10^{-3}$). Εφόσον ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας είναι πιο μικρός επιλέχθηκε αυτός ως συντελεστής για την απλή αναλογική μετατροπή των φορτίων.

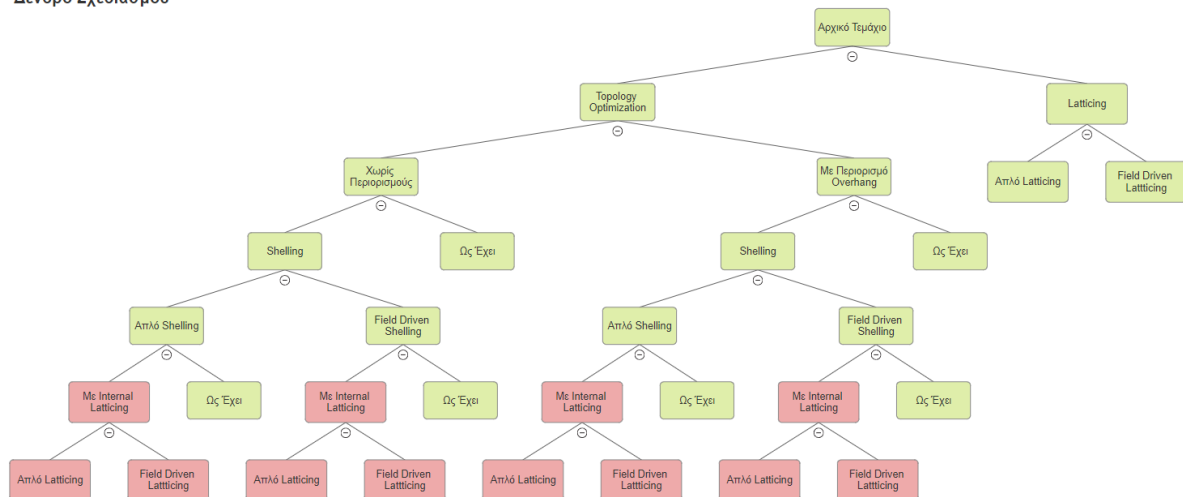
Περίπτωση 1 Στατικό Κατακόρυφο 405N		Περίπτωση 2 Στατικό Οριζόντιο 431N	
Περίπτωση 3 Στατικό 42° από τον κατακόρυφο άξονα 481N		Περίπτωση 4 Στατική Ροπή Στο οριζόντιο επίπεδο στο κέντρο των οπών 3.8352e+4 Nmm	

Εικόνα 14. Φορτία στα οποία καλείται να αντέξει το τεμάχιο.

4.2 Προετοιμασία Τεμαχίου

Προτού να παρουσιασθεί ο τρόπος με τον οποίο έγιναν όλες οι επεξεργασίες χρησιμοποιώντας το nTopology χρειάζεται να γίνει αναφορά στην λογική σύμφωνα με την οποία επιλέχθηκαν οι κατευθύνσεις οι οποίες ακολουθήθηκαν, μέχρι ποιο σημείο εξερευνήθηκαν και τι μένει ανοιχτό για το μέλλον. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω ενός δενδροδιαγράμματος το οποίο ονομάστηκε “Δένδρο Σχεδιασμού” και δείχνει την πορεία η οποία συνδέει ένα design με τα προγενέστερά.

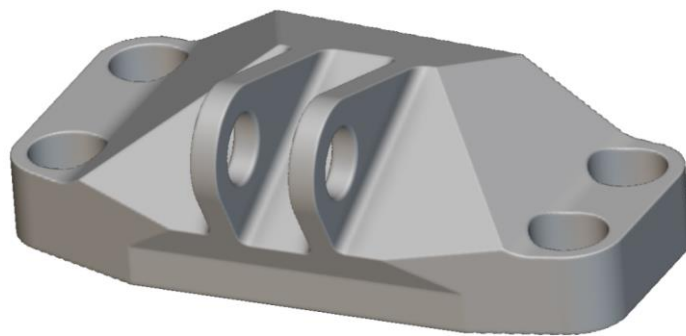
Δένδρο Σχεδιασμού



Εικόνα 15. Δένδρο σχεδιασμού.

Στο δένδρο ό,τι έχει σημειωθεί με πράσινο είναι design τα οποία έχουν παραχθεί και μελετηθεί στη παρούσα εργασία ενώ με κόκκινο υπογραμμίστηκαν τα design τα οποία είναι ανοιχτά προς μελλοντική μελέτη.

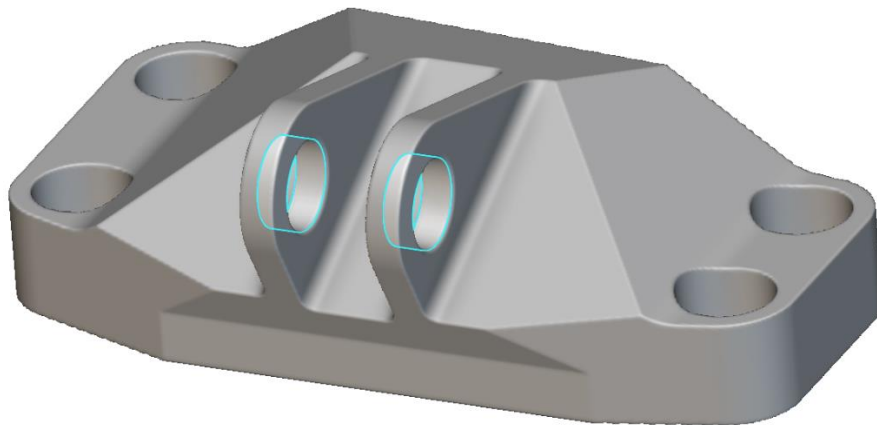
Έχοντας υπόψιν το δένδρο σχεδιασμού χρειάζεται πρώτα να γίνουν κάποια προκαταρκτικά βήματα για την προετοιμασία του τεμαχίου. Η διαδικασία ξεκινάει με την εισαγωγή του αρχείου .step του τεμαχίου (όπως αυτό δόθηκε από την General Electric), στο nTopology το οποίο δημιουργεί το αρχικό CAD body. Έπειτα το CAD body μετατρέπεται σε implicit body προκειμένου να είναι δυνατή η επεξεργασία του με όλες τις διαθέσιμες εντολές του προγράμματος.



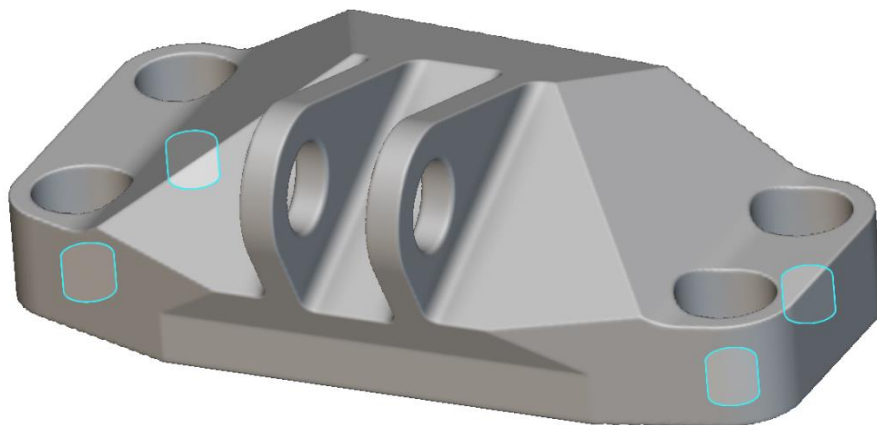
Εικόνα 16. Το αρχικό τεμάχιο σε implicit μορφή.

Πέρα από την μετατροπή αυτή, για λόγους που θα φανούν στη συνέχεια, ορίζονται πάνω στο CAD body οι πλευρές που θα φέρουν φορτίο και οι πλευρές που θα χρησιμοποιηθούν για την δέσμευση των βαθμών ελευθερίας του τεμαχίου κατά τις στατικές αναλύσεις που θα ακολουθήσουν.

Στη συνέχεια χρειάζεται να εισαχθούν στο πρόγραμμα οι μηχανικές ιδιότητες του Nylon 12, το οποίο έγινε χρησιμοποιώντας την εντολή “Isotropic Material” με το chip “Isotropic Linear Elastic Property”. Το μέτρο ελαστικότητας ορίστηκε $E = 1935\text{MPa}$ ενώ ο λόγος Poisson $\nu = 0.39$.



Εικόνα 17. Πλευρές στις οποίες ασκούνται τα φορτία.



Εικόνα 18. Πλευρές οι οποίες περιορίζονται από τους κοχλίες στήριξης.

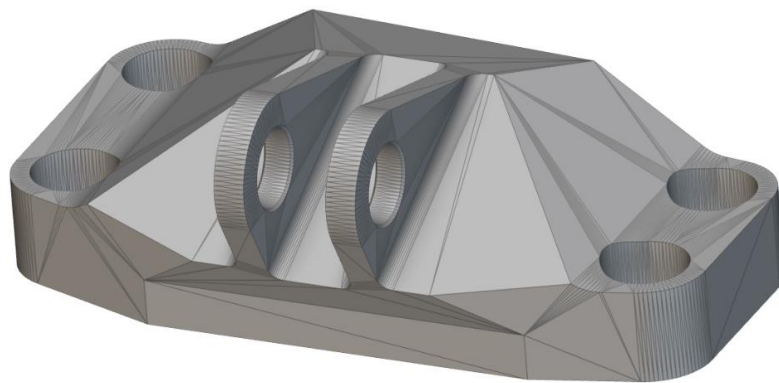
4.3 Topology Optimization

Στον πρώτο κλάδο της αρχικής διακλάδωσης του δένδρου σχεδιασμού είναι το topology optimization. Η διαδικασία για την εκτέλεση μιας τέτοιας μελέτης είναι παρόμοια με αυτές άλλων λογισμικών. Συγκεκριμένα τα βήματα που ακολουθήθηκαν έχουν ως εξής :

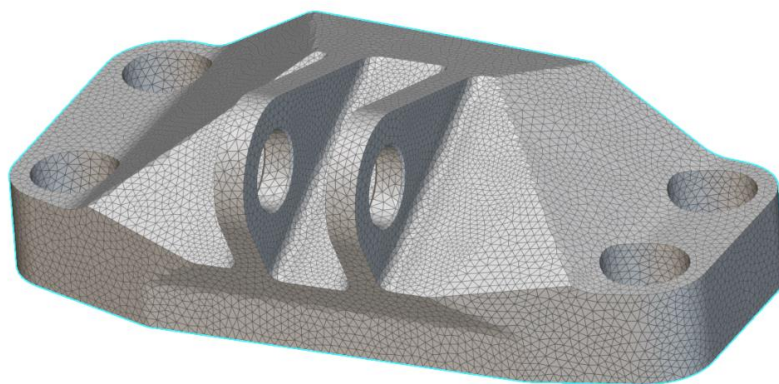
1. Πλεγματοποίηση (meshing) :

Αρχικά έγινε πλεγματοποίηση της επιφάνειας του τεμαχίου με ανοχή 0.01mm ώστε να διατηρηθούν όσο γίνεται οι διάφορες λεπτομέρειες. Ωστόσο το αρχικό πλέγμα δεν είναι κατάλληλο για χρήση σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων οπότε έγινε επαναπλεγματοποίηση με τριγωνικά στοιχεία στόχου μεγέθους τα 2mm.

Για την ολοκλήρωση της πλεγματοποίησης χρειάζεται το αρχικό πλέγμα επιφάνειας να μετατραπεί σε πλέγμα όγκου όπως και έγινε, ξανά με στόχο μεγέθους στοιχείων τα 2mm.



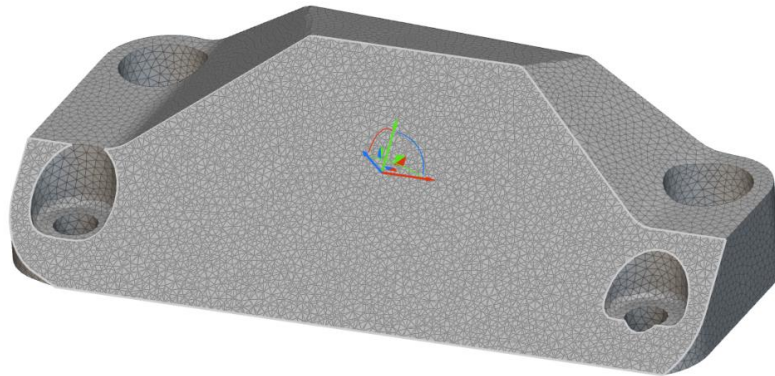
Εικόνα 19. Αρχικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων επιφάνειας.



Εικόνα 20. Αποτέλεσμα της επαναπλεγματοποίησης.

2. Δημιουργία Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων :

Το παραπάνω πλέγμα μετατρέπεται σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και επιπλέον ορίζεται το Nylon 12 ως το υλικό του.

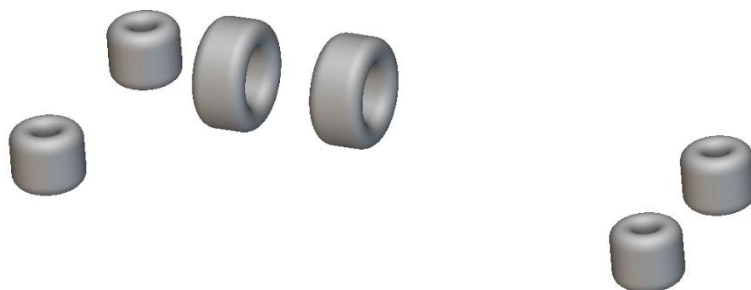


Εικόνα 21. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων όγκου.

3. Οριακές Συνθήκες :

Έχοντας ετοιμάσει τη γεωμετρία χρειάζεται να οριστούν και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος. Πρώτα μετατρέπονται οι πλευρές που επιλέχθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο από γεωμετρικές οντότητες σε συγκεκριμένα πεπερασμένα στοιχεία και έπειτα ορίζονται και οι παθητικές περιοχές.

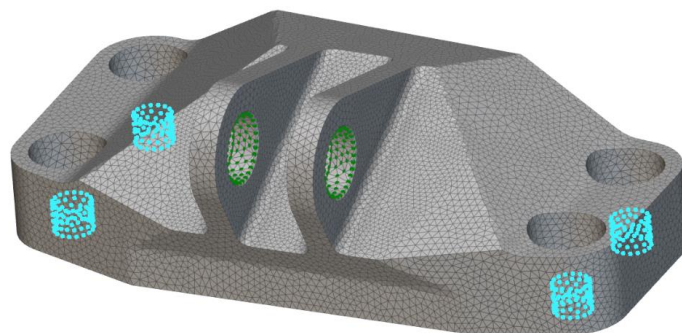
Παθητικές περιοχές είναι κομμάτια του τεμαχίου μας τα οποία δεν θα συμμετάσχουν στην ανάλυση που ακολουθεί καθώς είναι αναγκαίες για τη λειτουργία του τεμαχίου και οφείλουν να μείνουν αναλλοίωτες. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι περιοχή γύρω από τις οπές στήριξης και τις οπές που θα φέρουν το φορτίο.



Εικόνα 22. Παθητικές περιοχές.

4. Φορτία :

Στο σημείο αυτό πρέπει να οριστούν τα φορτία στα οποία καλείται να αντέξει το τεμάχιο και σύμφωνα με τα οποία θα εκτελεστεί και το topology optimization. Για αυτό το σκοπό δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σετ οριακών συνθηκών, ένα για κάθε περίπτωση φόρτισης, καθένα από τα οποία περιέχει το εκάστοτε φορτίο και έναν περιορισμό μηδενικής μετατόπισης στις σπές στήριξης προκειμένου να περιοριστούν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας.

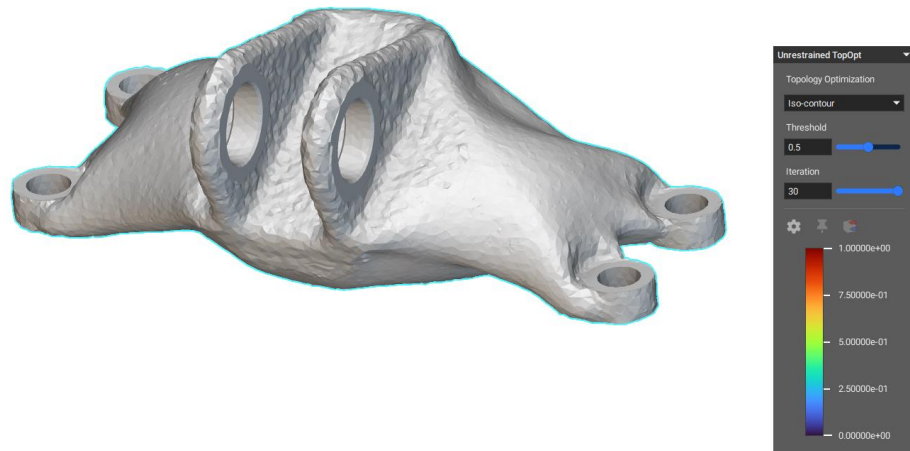


Εικόνα 23. Κόμβοι εφαρμογής αρχικών συνθηκών. Με πράσινο σημειώνονται οι κόμβοι στους οποίους θα ασκηθούν τα φορτία και με γαλάζιο οι περιορισμοί μετατόπισης.

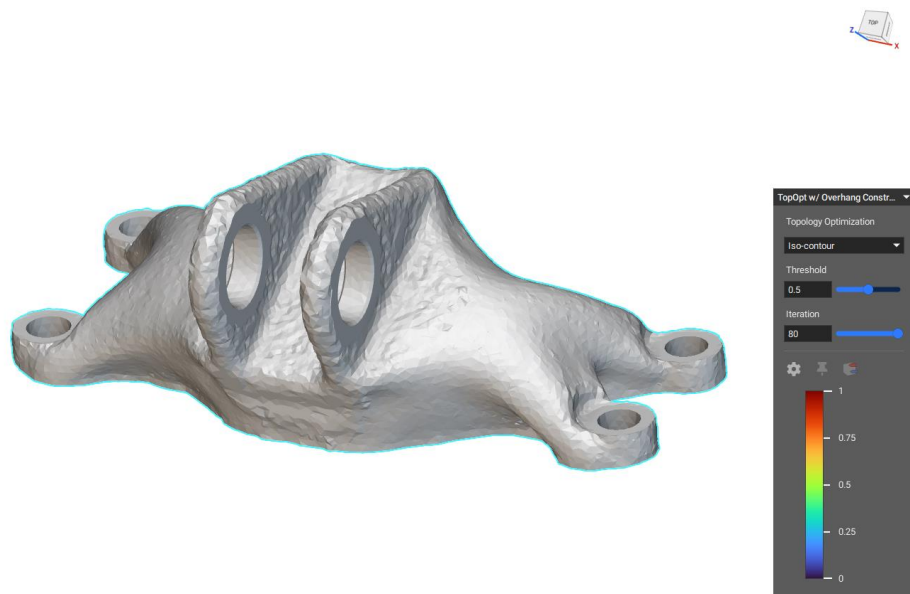
5. Παράμετροι Μελέτης :

Το τελευταίο βήμα για την έναρξη του topology optimization είναι να οριστούν παράμετροι και περιορισμοί για τον ίδιο τον αλγόριθμο. Πρώτα πρώτα ορίστηκε ως στόχος της μελέτης η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας του τεμαχίου όταν αυτό υποβληθεί σε κάθε μία από τις περιπτώσεις φόρτισης.

Ως προς τους περιορισμούς τέθηκε περιορισμός όγκου 30%, που σημαίνει ότι το τελικό αποτέλεσμα θα έχει όγκο μικρότερο από το 30% του αρχικού. Σε αυτό το σημείο δημιουργείται διακλάδωση στο δένδρο σχεδιασμού. Στον πρώτο κλάδο γίνεται topology optimization χωρίς κάποιον επιπλέον περιορισμό ενώ στο δεύτερο τίθεται περιορισμός overhang στις 45°. Αυτός ο περιορισμός έχει ως στόχο την δημιουργία ενός τελικού αποτελέσματος ο οποίος θα είναι κατάλληλος για χρήση σε κάποιον 3D εκτυπωτή χωρίς την ανάγκη υποστηρικτικού υλικού, με ότι αυτό συνεπάγεται.

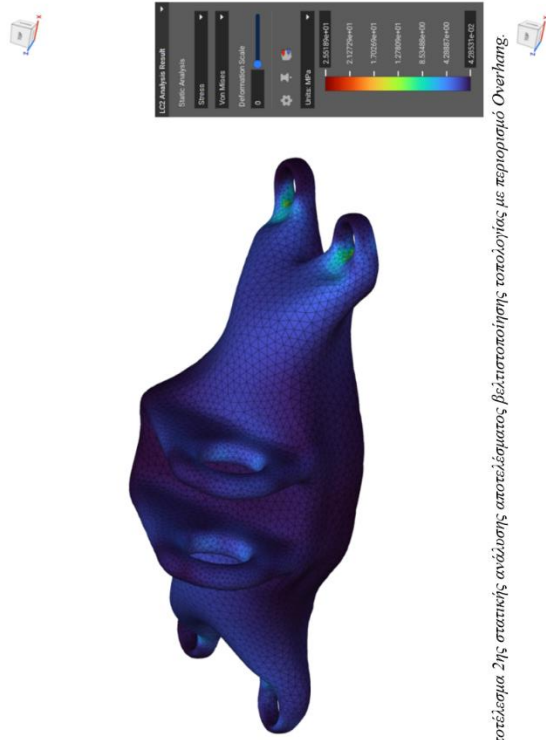


Εικόνα 24. Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης τοπολογίας χωρίς περιορισμούς.

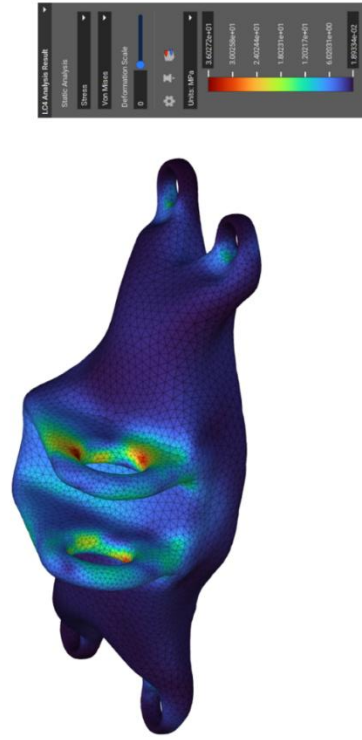


Εικόνα 25. Αποτέλεσμα βελτιστοποίησης τοπολογίας με περιορισμό overhang 45°

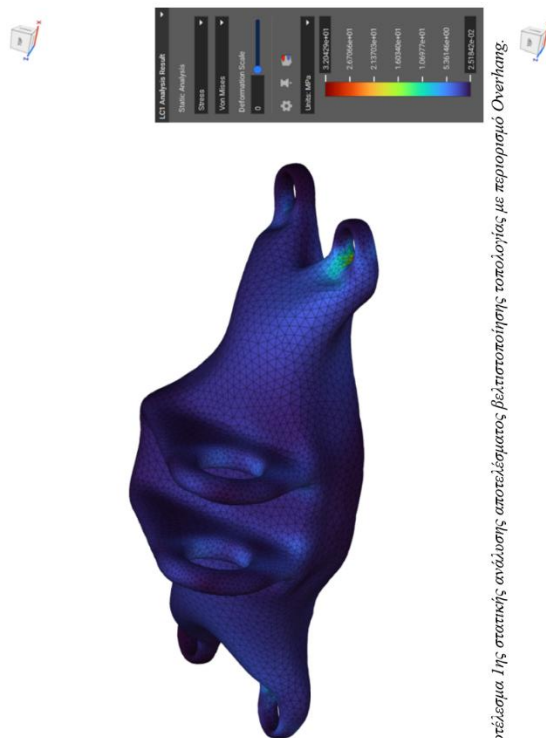
Τα αποτελέσματα της μελέτης, όπως αναμενόταν, έχουν μια πολύ τραχιά μορφή και χρήζουν επεξεργασίας προκειμένου να είναι αφενός κατάλληλα για περαιτέρω μελέτη και αφετέρου καλαίσθητα. Καθότι τα αποτελέσματα είναι implicit body μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας η εντολή “smoothen body” δίνοντας έτσι τα πρώτα τελικά αποτελέσματα, θεωρητικά, έτοιμα για εκτύπωση.



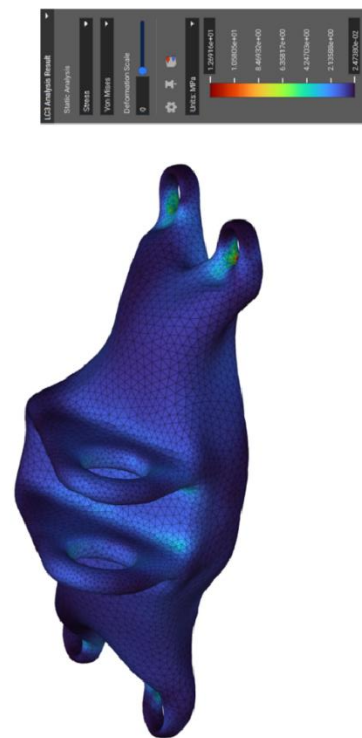
Εικόνα 27. Αποτέλεσμα 2ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος, βελτιστοποίησης τοπολογίας με περιορισμό Overhang.



Εικόνα 29. Αποτέλεσμα 4ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος, βελτιστοποίησης τοπολογίας με περιορισμό Overhang.



Εικόνα 26. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος, βελτιστοποίησης τοπολογίας με περιορισμό Overhang.



Εικόνα 28. Αποτέλεσμα 3ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος, βελτιστοποίησης τοπολογίας με περιορισμό Overhang.

Όπως ήταν αναμενόμενο, το τεμάχιο αντέχει και στις 4 περιπτώσεις αν και πρακτικά αυτή η οποία όρισε το σημείο όπου τερμάτισε ο αλγόριθμος φαίνεται να είναι η τέταρτη, μοτίβο το οποίο συνεχίζεται και στη συνέχεια της μελέτης. Επίσης το εκτιμώμενο βάρος που δίνει το nTopology είναι 126.09g, δηλαδή 70.73% μείωση από τα αρχικά 430.86g.

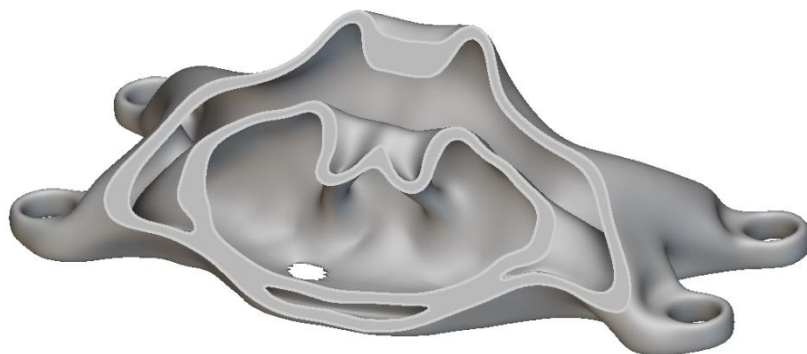
Αν και το όνομα της μεθόδου περιλαμβάνει την έννοια της βελτιστοποίησης, στην πραγματικότητα το τελικό τεμάχιο δεν είναι πάντοτε βέλτιστο, για αυτό και πλέον κυκλοφορεί και ο όρος “topology suggestion”. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αλγόριθμος μπορεί να παράγει μόνο μασίφ τεμάχια τα οποία πολλές φορές περιλαμβάνουν περίσσιο, αχρειαστο όγκο. Για να προσεγγιστεί η βέλτιστη λύση μια οδός βελτίωσης είναι η μετατροπή του μασίφ τεμαχίου σε κέλυφος, όπως θα παρουσιαστεί στην επόμενη παράγραφο.

4.4 Shelling

Όπως τα περισσότερα λογισμικά CAD έτσι και το nTopology δίνει τη δυνατότητα μετατροπής οποιουδήποτε τεμαχίου σε κέλυφος. Έχοντας το implicit body του παραπάνω αποτελέσματος, με την εντολή “shell body” γίνεται η μετατροπή. Ως είσοδο η εντολή χρειάζεται τη γεωμετρία και το επιθυμητό πάχος του κελύφους. Σε αυτό το σημείο δημιουργείται κι άλλη διακλάδωση στο δένδρο σχεδιασμού. Στον μεν κλάδο γίνεται απλή κελυφοποίηση με σταθερό πάχος ενώ στον δε κλάδο το πάχος μεταβάλλεται σύμφωνα με κάποιον κανόνα, λεπτομέρειες για τον οποίο υπάρχουν παρακάτω.

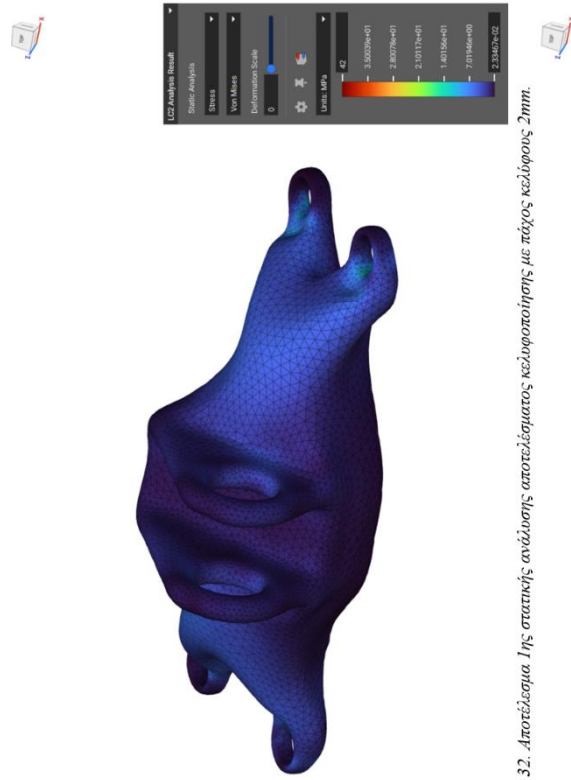
4.4.1 Simple Shelling

Η περίπτωση αυτή είναι αρκετά απλή και δεν χρειάζεται περαιτέρω επεξήγηση. Για την επιλογή του τελικού πάχους έγιναν επαναληπτικά δοκιμές με τιμές που κυμαίνονταν από 1.5mm έως 2.5mm με βήμα 0.1mm.

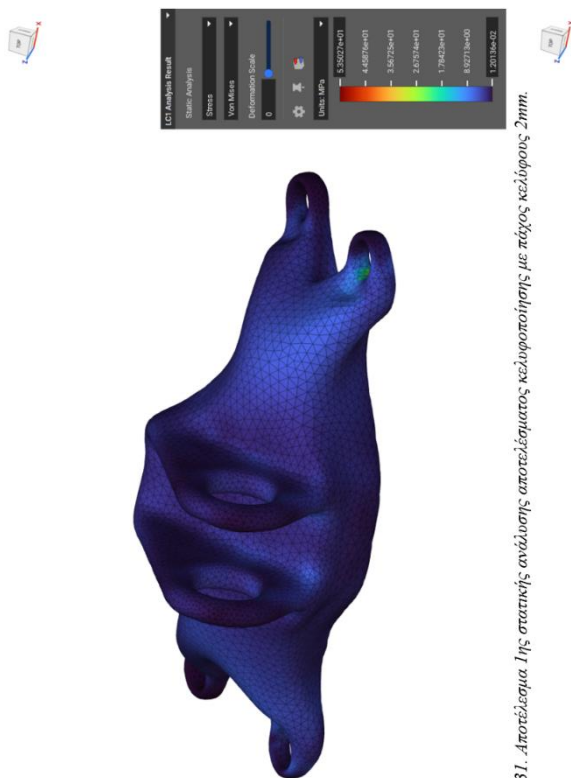


Εικόνα 30. Κελυφοποίηση τεμαχίου με πάχος κελύφους 2mm.

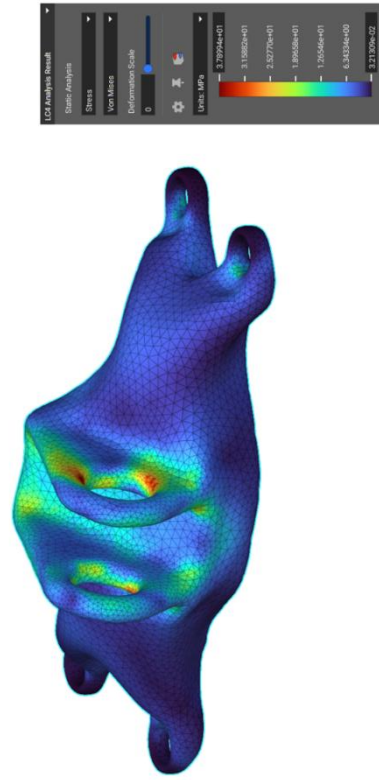
Χάρη στη λογική του nTopology οι παραπάνω δοκιμές έγιναν πολύ γρήγορα εφόσον έχοντας έτοιμο το “workflow” υπεύθυνο για τη δημιουργία και τις στατικές αναλύσεις του κελυφοποιημένου τεμαχίου, απλά αλλάζοντας το επιθυμητό πάχος στο αντίστοιχο πεδίο της εντολής εμφανίζονται αυτόματα τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων προκειμένου να γίνει αξιολόγηση για το εκάστοτε πάχος. Η τελική τιμή που επιλέχθηκε είναι τα 2.2mm η οποία έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα :



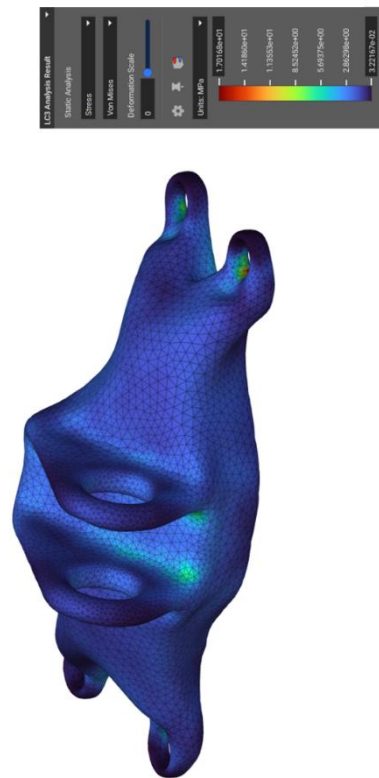
Εικόνα 32. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος κελυφοποίησης με πάχος κελύφους 2mm.



Εικόνα 31. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος κελυφοποίησης με πάχος κελύφους 2mm.



Εικόνα 34. Αποτέλεσμα 4ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος κελυφοποίησης με πάχος κελύφους 2mm.



Εικόνα 33. Αποτέλεσμα 3ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος κελυφοποίησης με πάχος κελύφους 2mm.

Είναι φανερό ότι για τις τρεις πρώτες περιπτώσεις φόρτισης υπήρχε το περιθώριο να αφαιρεθεί περαιτέρω υλικό το οποίο εντέλει δεν επηρέασε σημαντικά τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων. Όσο για τη τέταρτη περίπτωση, καθότι τα “αυτιά” στα οποία βρίσκονται οι οπές του πείρου είναι σχετικά λεπτά, η κελυφοποίηση με πάχος 2.2mm δεν αφαιρεί σημαντική ποσότητα υλικού σε εκείνο το σημείο και άρα δεν επιδεινώνεται σημαντικά και η αντοχή του τεμαχίου. Γίνεται λοιπόν φανερή η σημασία του όρου “topology suggestion”.

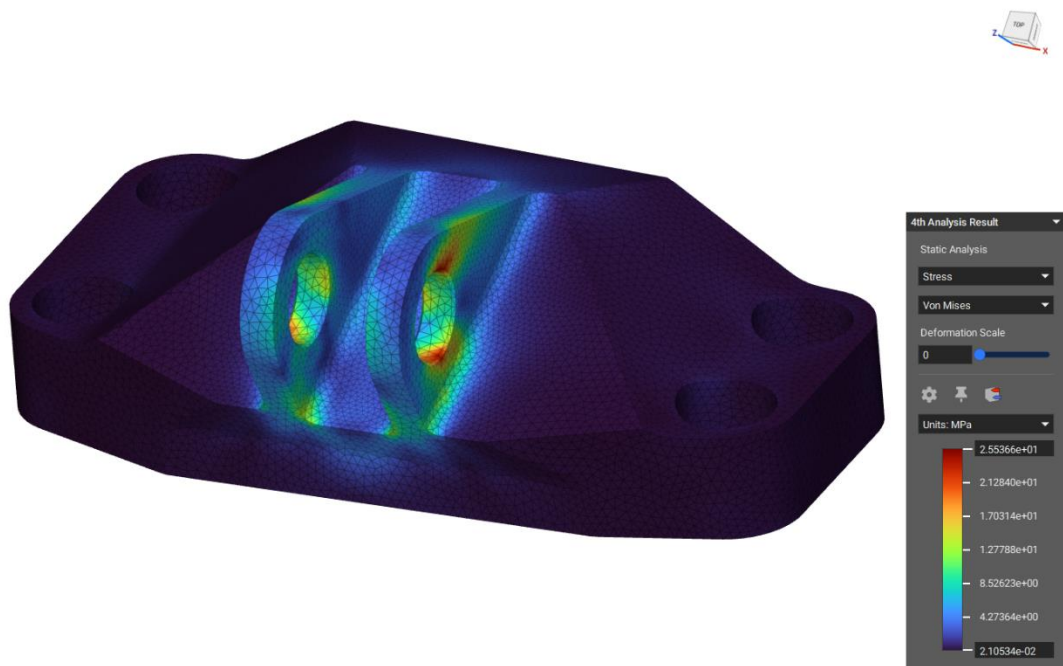
Όσο για το βάρος η εκτίμηση που δίνει το nTopology είναι 77.3g, δηλαδή 82.05% μείωση από το αρχικό ή περαιτέρω 38.69% μείωση από το προηγούμενο αποτέλεσμα.

4.4.2 Field Driven Shelling

Το nTopology δίνει την δυνατότητα για δυναμική αλλαγή οποιασδήποτε μεταβλητής στο επίπεδο ή και τον χώρο χρησιμοποιώντας την έννοια των “πεδίων” (fields). Τα πεδία είναι στην ουσία κατανομές μεγεθών στον χώρο όπως π.χ. τάση, θερμοκρασία κ.τ.λ. Αν σε αυτές τις κατανομές αντιστοιχιστεί και ένα χρώμα τότε μπορεί να γίνει μια οπτικοποίηση των πεδίων προκειμένου να γίνουν πιο εύκολα αντιληπτά.

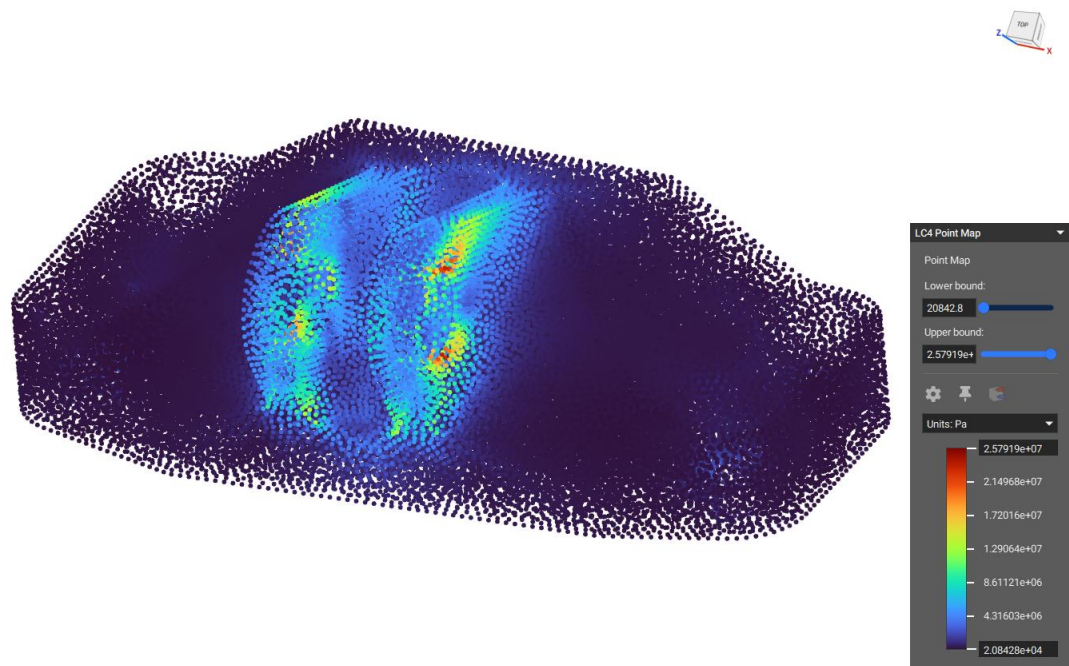
Αυτά τα πεδία μπορούν να προκύψουν με διάφορες μεθόδους π.χ. από ένα απλό gradient στον χώρο ή πιο σύνθετα, όπως και στην παρούσα διπλωματική εργασία, από τα δεδομένα μιας στατικής ανάλυσης.

Η μεταβλητή η οποία έχει νόημα να μεταβάλλεται δυναμικά στη περίπτωση του shelling είναι προφανώς το πάχος του κελύφους. Αυτό συμβαίνει καθώς θα ήταν επιθυμητό η κατανομή υλικού (και άρα πάχος κελύφους) να ακολουθεί την αναμενόμενη κατανομή τάσης ώστε να υπάρχει υλικό εκεί που υπάρχει ανάγκη και να αφαιρεθεί από εκεί που δεν υπάρχει. Συνεπώς χρειάστηκε να γίνει μια στατική ανάλυση στην αρχική γεωμετρία ώστε να δημιουργηθεί το κατάλληλο πεδίο.



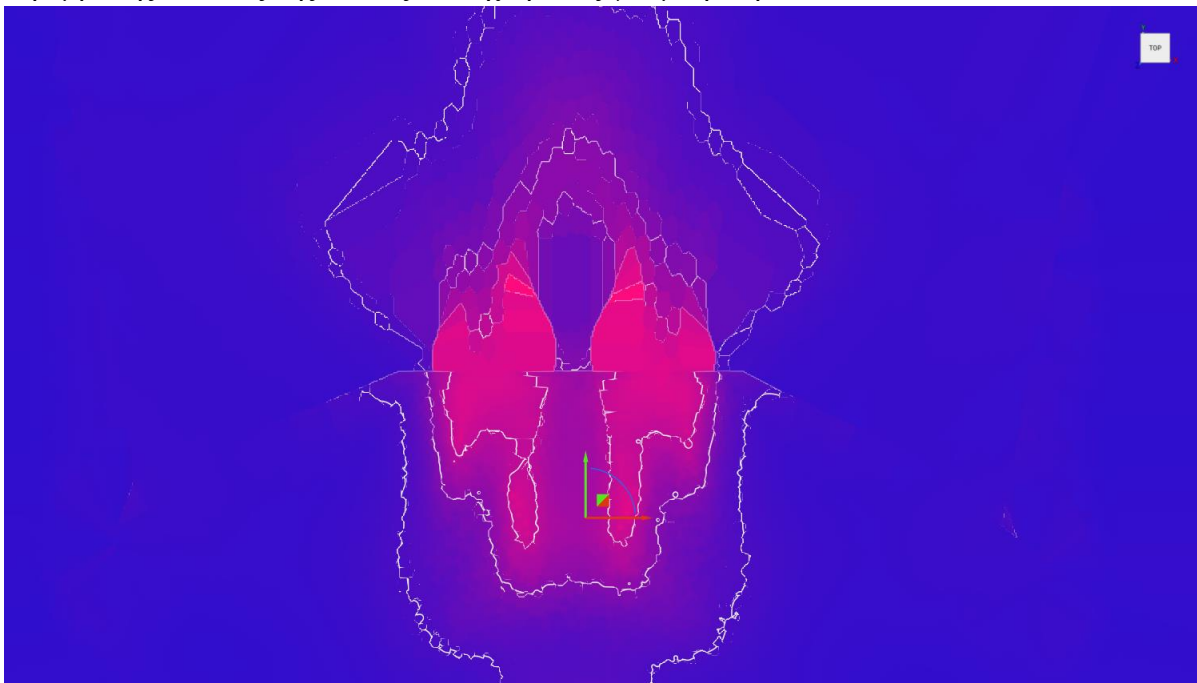
Εικόνα 35. Στατική ανάλυση 4ης περίπτωσης φόρτισης στην αρχική γεωμετρία.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μετατρέπονται αρχικά σε ένα νέφος διακριτών σημείων (τα οποία είναι οι κόμβοι του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε) το καθένα με την δική του τιμή.



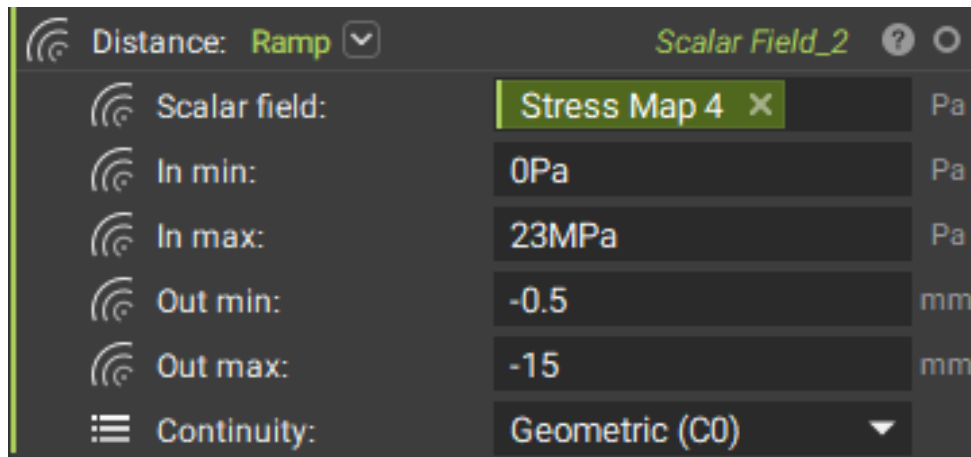
Εικόνα 36. Προκύπτουν stress map για την 4η περίπτωση φόρτισης

Έπειτα το nTopology μετατρέπει το νέφος των σημείων σε συνεχές πεδίο μέσω παρεμβολής το είδος της οποίας επιλέχθηκε ως γεωμετρική.



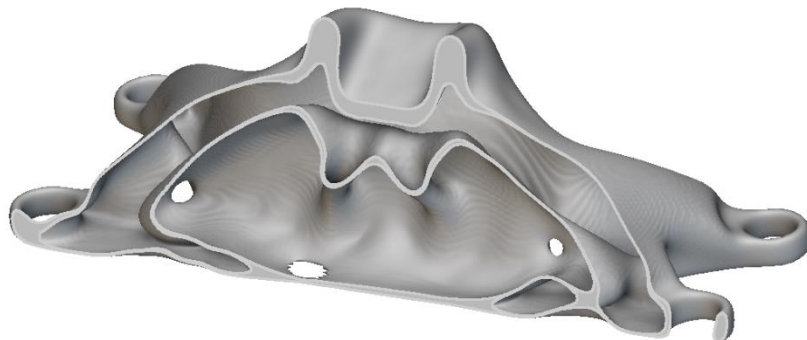
Εικόνα 37. Παράδειγμα πεδίου απόστασης που παράγεται με μετασχηματισμό του προηγούμενου stress map.

Έχοντας αυτό το πεδίο τάσεων χρειάζεται να γίνει ένας μετασχηματισμός όπου ως είσοδο έχει την τάση σε κάθε σημείο του πεδίου και ως έξοδο δίνει το επιθυμητό πάχος του κελύφους.



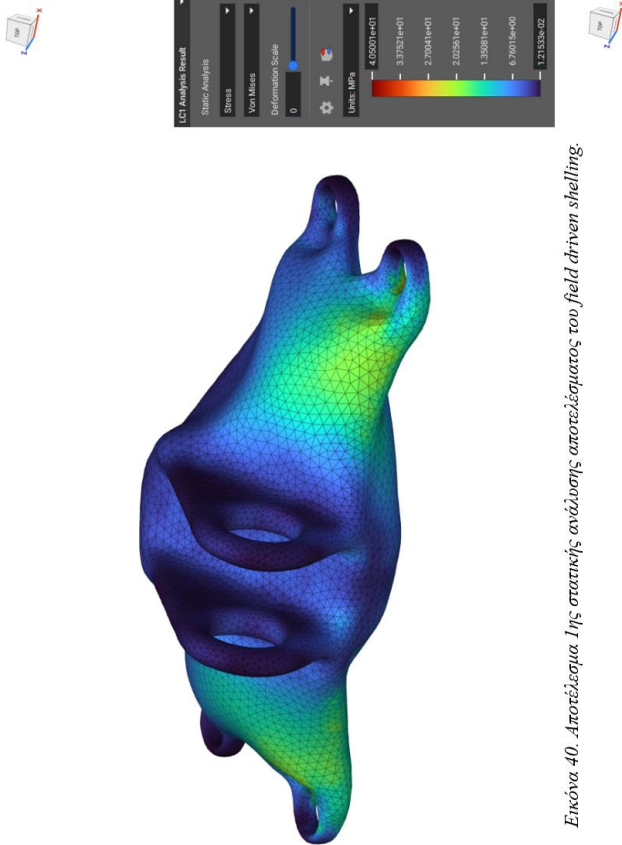
Εικόνα 38. *Scalar Field Chip* του nTopology που χρησιμοποιήθηκε για τον μετασχηματισμό του *stress map* σε πεδίο για να προσδιοριστεί το μεταβλητό πάχος του κελύφους.

Η παραπάνω μεταβλητή, οι παράμετροι της οποίας καθορίστηκαν με παρόμοιο δοκιμαστικό τρόπο με το πάχος κελύφους, μπορεί να εισαχθεί στην εντολή “shell body” στο πεδίο του πάχους και ως αποτέλεσμα δίνει το παρακάτω :

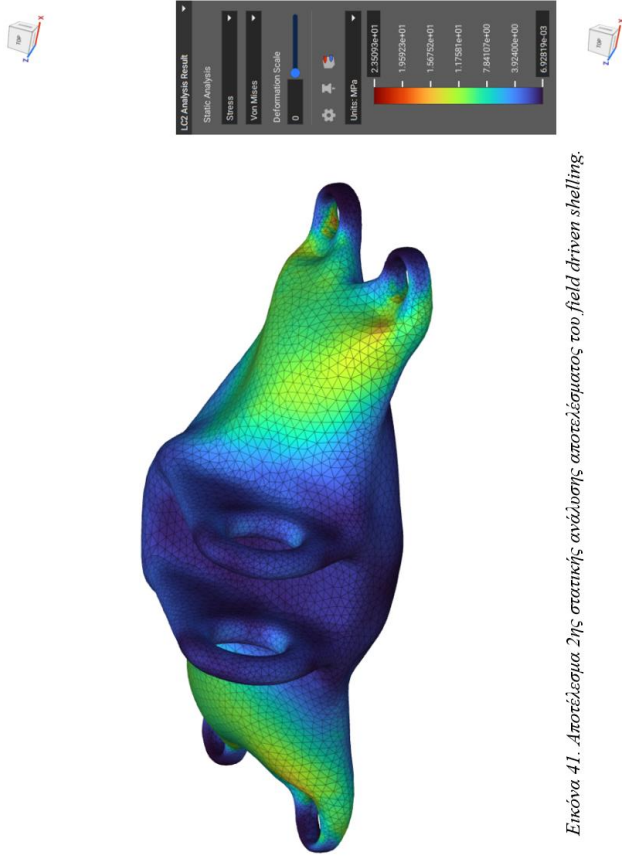


Εικόνα 39. Αποτέλεσμα του *field driven shelling*.

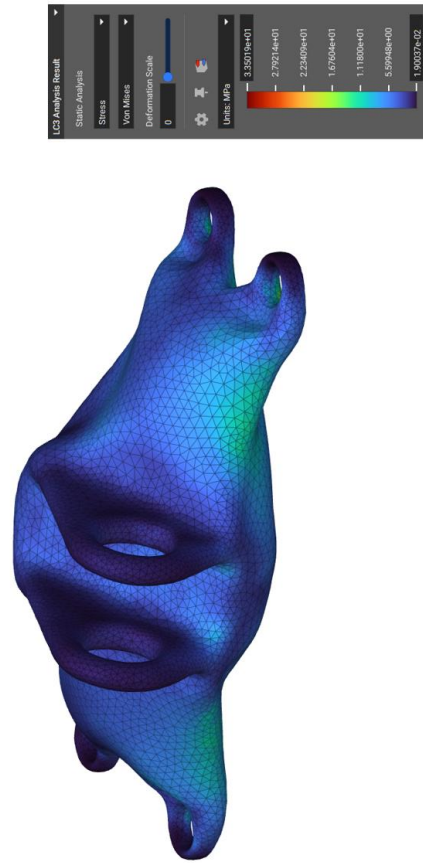
Εκτελώντας στατική ανάλυση στη νέα γεωμετρία λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα:



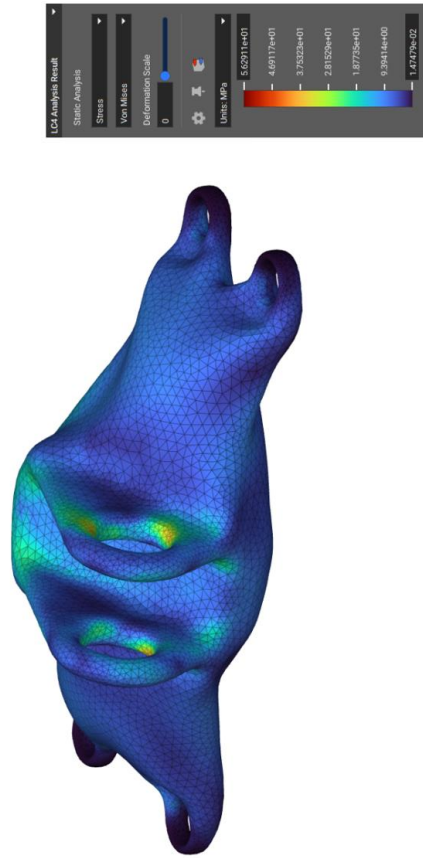
Εικόνα 40. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτέλεσματος του field driven shelling.



Εικόνα 41. Αποτέλεσμα 2ης στατικής ανάλυσης αποτέλεσματος του field driven shelling.



Εικόνα 42. Αποτέλεσμα 3ης στατικής ανάλυσης αποτέλεσματος του field driven shelling.



Εικόνα 43. Αποτέλεσμα 4ης στατικής ανάλυσης αποτέλεσματος του field driven shelling.

Όπως και προηγουμένως έτσι και τώρα υπήρχε περιθώριο να αφαιρεθεί κι άλλο υλικό στο μεγαλύτερο κομμάτι του τεμαχίου πράγμα το οποίο και έγινε στην ουσία “στρατηγικά” χάρη στη χρήση των πεδίων. Το ελάχιστο πάχος που χρησιμοποιήθηκε είναι το 1mm τιμή η οποία δεν έγινε αποδεκτή στη διαδικασία του shell καθώς αφαιρούσε σημαντική ποσότητα υλικού από τα “αυτιά” όμως εδώ ακριβώς επειδή αναμένεται μεγάλη φόρτιση σε αυτά το πάχος τους έχει διατηρηθεί.

Όσο για το βάρος η εκτίμηση που δίνει το nTopology είναι 46.12g, δηλαδή 89.3% μείωση από το αρχικό ή περαιτέρω 40.33% μείωση από το προηγούμενο αποτέλεσμα.

4.5 Latticing

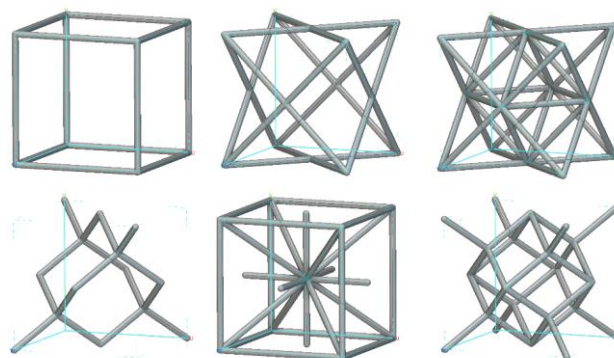
4.5.1 Simple Latticing

Στον δεύτερο κλάδο της αρχικής διακλάδωσης του δένδρου σχεδιασμού είναι η δημιουργία εσωτερικών πλεγματοδομών ή αλλιώς “latticing”. Η διαδικασία χωρίζεται σε δύο μέρη και συγκεκριμένα στη δημιουργία του πλέγματος και στη ενσωμάτωση του στην προς επεξεργασία γεωμετρία.

Ένα lattice στην πραγματικότητα αποτελείται από ένα αρχικό “κύτταρο” το οποίο επαναλαμβάνεται στις τρεις διαστάσεις συμπεριλαμβανομένων και των σφαιρικών και κυλινδρικών. Τα βήματα για τη δημιουργία ενός lattice περιγράφονται παρακάτω.

Πρώτο βήμα είναι η δημιουργία ενός “χάρτη” ο οποίος αφενός καθορίζει το σύστημα συντεταγμένων και αφετέρου τον ακριβή όγκο μέσα στα οποία θα αναπτυχθεί το lattice καθώς και το μέγεθος που θα έχουν τα κύτταρα. Το σύστημα συντεταγμένων ορίζεται από το ποια εντολή θα χρησιμοποιηθεί (rectangular cell map, spherical cell map, cylindrical cell map) ενώ ο όγκος ορίζεται από οποιοδήποτε implicit body. Όσο για το μέγεθος των κυττάρων, ανάλογα με το σύστημα συντεταγμένων που επιλέχθηκε, δίδονται ως είσοδος τρεις μεταβλητές π.χ. μήκος κατά x,y,z.

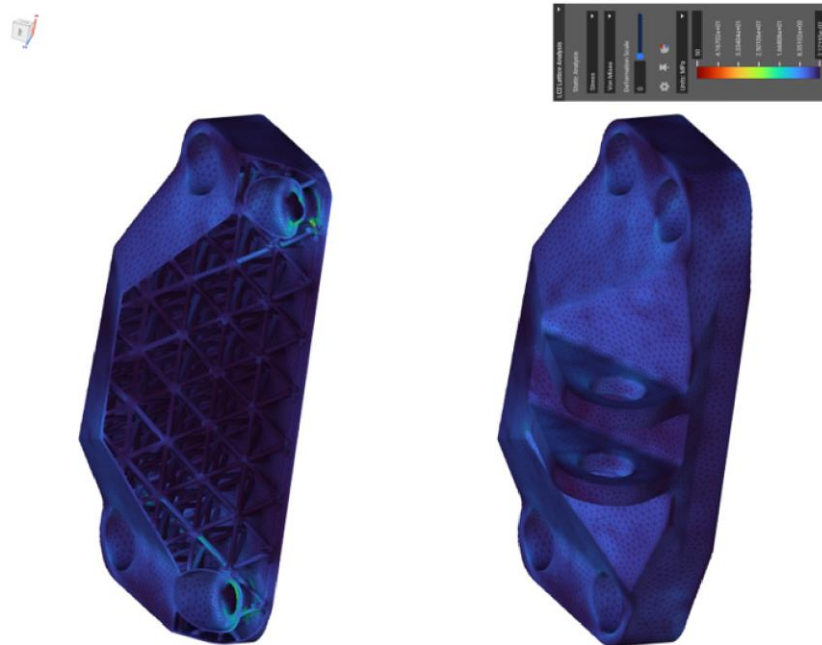
Έχοντας έτοιμο τον χάρτη, το δεύτερο βήμα είναι ο προσδιορισμός της μορφής των κυττάρων που θα χρησιμοποιηθούν. Το nTopology δίνει αρκετές επιλογές όσον αφορά στο σχήμα των κυττάρων οι οποίες ανήκουν σε τρεις βασικές κατηγορίες : κύτταρα γράφου, κύτταρα TPMS (triply periodic minimal surface) και στοχαστικά. Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν μόνο κύτταρα γράφου.



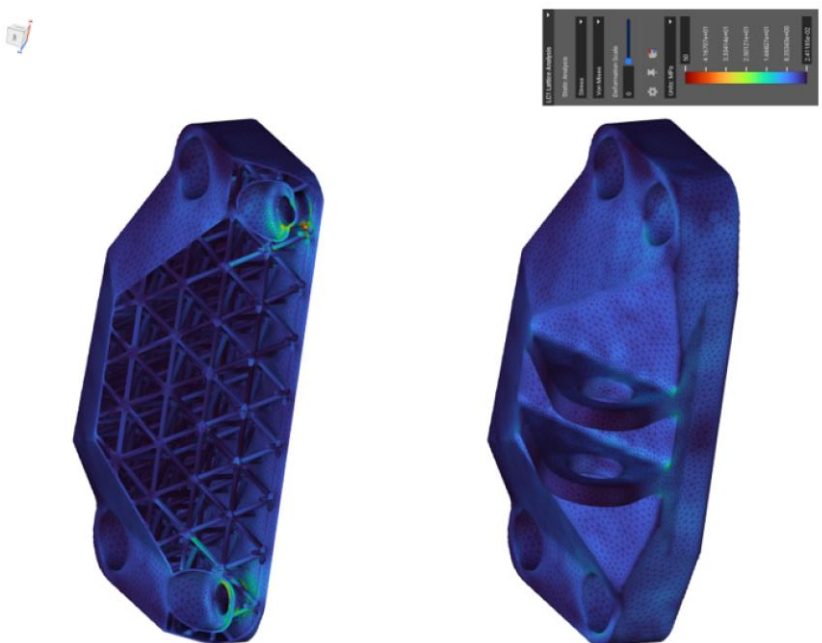
Εικόνα 44. Παραδείγματα μοναδιαίων κυττάρων. Με τη σειρά από πάνω αριστερά : Simple Cubic, Face Centered Cubic, Octet, Diamond, Iso Truss, Fluorite.

Τελειώνοντας τα παραπάνω βήματα, μένει ως αποτέλεσμα ένα lattice το οποίο όμως δεν έχει το απαραίτητο σχήμα για να ενσωματωθεί στο ζητούμενο τεμαχίο. Για να γίνει αυτό χρειάζεται πρώτα να εξαχθεί ο εσωτερικός όγκος του τεμαχίου με χρήση κατάλληλων εντολών Boolean και στη συνέχεια με μια εντολή “Boolean Intersect” μεταξύ του lattice και του εσωτερικού όγκου προκύπτει ο εσωτερικός όγκος σε μορφή lattice. Τέλος με μια τελευταία εντολή “Boolean Union” γίνεται η τελική ενοποίηση του εξωτερικού κελύφους με το νέο lattice.

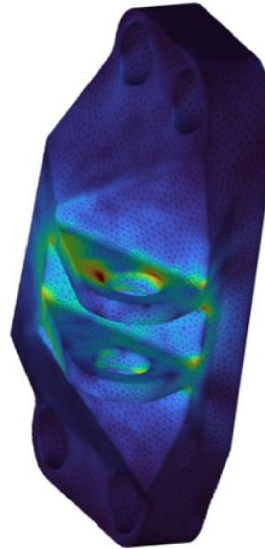
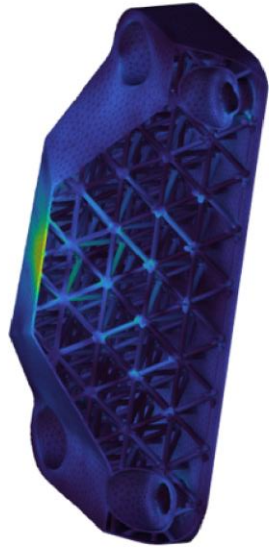
Για την επιλογή του τελικού σχήματος και πάχους κυττάρου ακολουθήθηκε διαδικασία παρόμοια με αυτή της κελυφοποίησης. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκε ένα workflow στο οποίο δίδεται ως είσοδος το επιθυμητό σχήμα και πάχος του κυττάρου και ως έξοδος προκύπτει απόκριση του τελικού τεμαχίου στα τέσσερα ζητούμενα φορτία, προκειμένου να γίνει αξιολόγηση. Έτσι με δοκιμές σε μερικά σχήματα για διάφορα πάχη, επιλέχθηκε ως ικανοποιητική λύση το σχήμα Iso Truss με πάχος 2mm.



Εικόνα 46. Αποτέλεσμα 2ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος lattice με πάχος 2mm.



Εικόνα 45. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελέσματος lattice με πάχος 2mm.



Εικόνα 48. Αποτέλεσμα 4ης στατικής ανάλυσης αποτελεσματος latticing με πάχος 2mm.

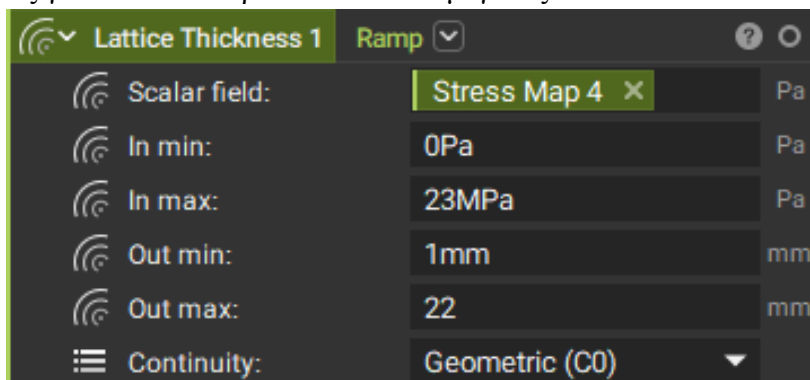


Εικόνα 47. Αποτέλεσμα 3ης στατικής ανάλυσης αποτελεσματος latticing με πάχος 2mm.

Όπως και στις περιπτώσεις του Topology Optimization και του Shelling έτσι και εδώ η δυσμενέστερη περίπτωση φόρτισης είναι η τέταρτη με τις μεγαλύτερες τάσεις να εμφανίζονται στο ίδιο σημείο. Σε αυτή τη περίπτωση φαίνεται ότι το τεμάχιο δεν μπορεί να αντέξει τις απαιτούμενες φορτίσεις οπότε χρειάζεται να γίνει μια περαιτέρω επεξεργασία του lattice. Ωστόσο χάριν πληρότητας αναφέρεται ότι η εκτίμηση που δίνει το nTopology για το βάρος είναι 70.97g δηλαδή 83.53% μείωση από το αρχικό.

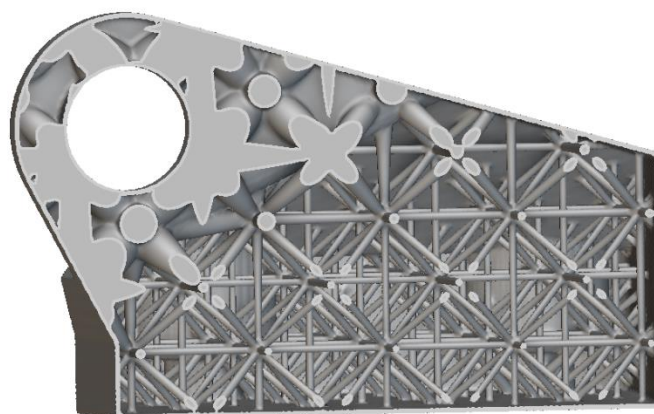
4.5.2 Field Driven Latticing

Στο ίδιο πνεύμα με το field driven shelling ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία και στο κομμάτι του latticing μόνο που εδώ η οδηγούμενη μεταβλητή είναι το πάχος του lattice. Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο πεδίο για τον καθορισμό του πάχους και άλλαξε μόνο ο μετασχηματισμός για να ανταποκρίνεται στο νέο μέγεθος.



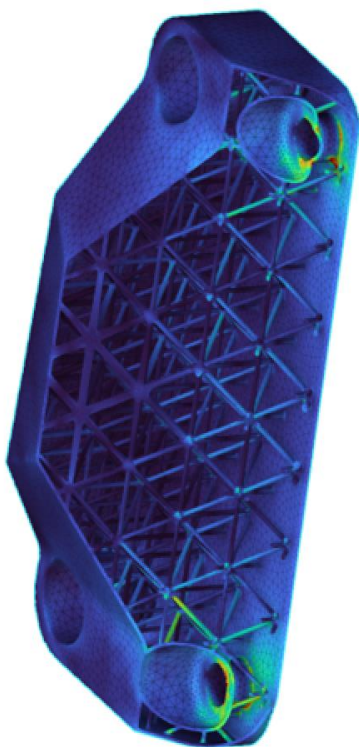
Εικόνα 49. Scalar Field Chip του nTopology που χρησιμοποιήθηκε για τον μετασχηματισμό του stress map σε πεδίο για να προσδιοριστεί το μεταβλητό πάχος του lattice.

Το τελικό αποτέλεσμα σε τομή φαίνεται παρακάτω :

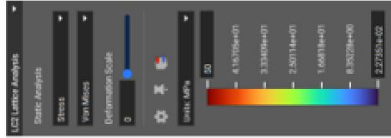
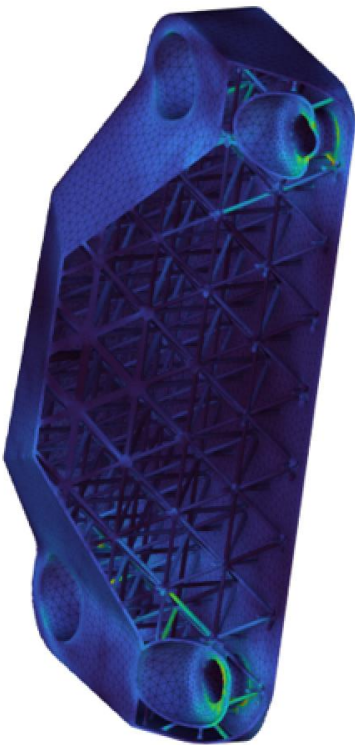


Εικόνα 50. Τομή του τεμαχίου με μεταβλητό πάχος lattice.

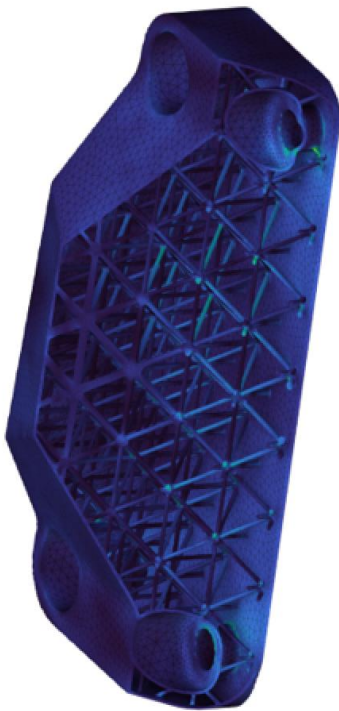
Εκτελώντας στατική ανάλυση προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:



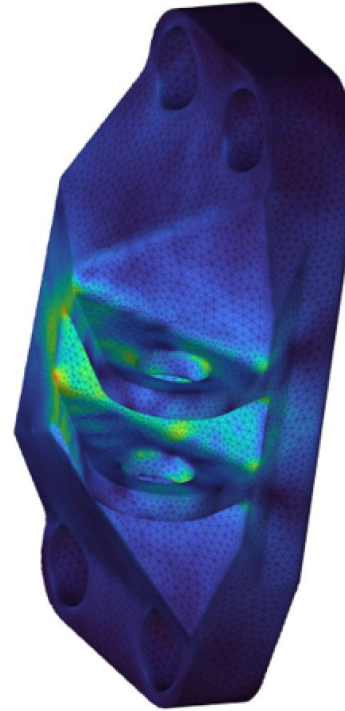
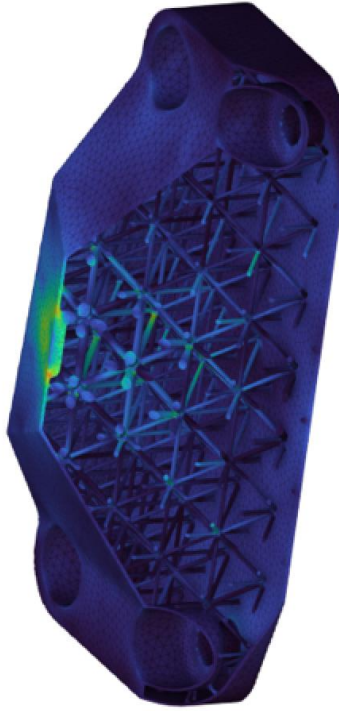
Εικόνα 51. Αποτέλεσμα 1ης στατικής ανάλυσης αποτελεσματικού πεδίου ολισθητικού πλέγματος.



Εικόνα 52. Αποτέλεσμα 2ης στατικής ανάλυσης αποτελεσματικού πεδίου ολισθητικού πλέγματος.



Εικόνα 33. Αποτελεσμα 3ης στατικής ανάλυσης αποτελεσματος field driven latticing.



Εικόνα 34. Αποτελεσμα 4ης στατικής ανάλυσης αποτελεσματος field driven latticing.

Όπως ήταν αναμενόμενο αφαιρέθηκε υλικό από το μεγαλύτερο κομμάτι του τεμαχίου το οποίο δεν δέχεται μεγάλη φόρτιση και παράλληλα προστέθηκε υλικό στα “αυτιά” όπως ακριβώς και στη περίπτωση του Field Driven Shell. Σημαντική, αν και αναμενόμενη, παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι οι μεγαλύτερες τάσεις αναπτύσσονται σε σημεία όπου το lattice “συναντάει” το κέλυφος. Αυτό δείχνει το ότι δεν θα ήταν δόκιμο να δημιουργηθεί lattice πολύ μικρού πάχους (δηλαδή στις παραμέτρους που φαίνονται στην εικόνα 49 να ορισθεί Out min = 0) διότι υπάρχει κίνδυνος να αστοχίας του υλικού σε κάποιο αντίστοιχο σημείο, ακόμα και κατά την κατασκευή, με απρόβλεπτες συνέπειες στην συνολική συμπεριφορά του τεμαχίου υπό φόρτιση.

Όσο για το βάρος η εκτίμηση που δίνει το nTopology είναι 64.79g, δηλαδή 84.96% μείωση από το αρχικό, ή 8.71% από το προηγούμενο αποτέλεσμα.

Όλα τα αποτελέσματα της παραπάνω παραγράφου συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα όπου γίνεται πιο εύκολα αντιληπτή η επίδραση που έχει στο βάρος κάθε περαιτέρω επεξεργασία του τεμαχίου.

Design	Βάρος (g)	Ποσοστιαία Μείωση από Αρχικό	Ποσοστιαία Μείωση από "πρόγονο"
Αρχικό	430,86	-	-
Topology Optimization	126,09	70,74%	-
Shell	77,3	82,06%	38,69%
Field Driven Shell	46,12	89,30%	40,34%
Lattice	70,97	83,53%	-
Field Driven Lattice	64,79	84,96%	8,71%

Πίνακας 1. Πίνακας αποτελεσμάτων nTopology όσον αφορά στη μείωση βάρους τεμαχίου.

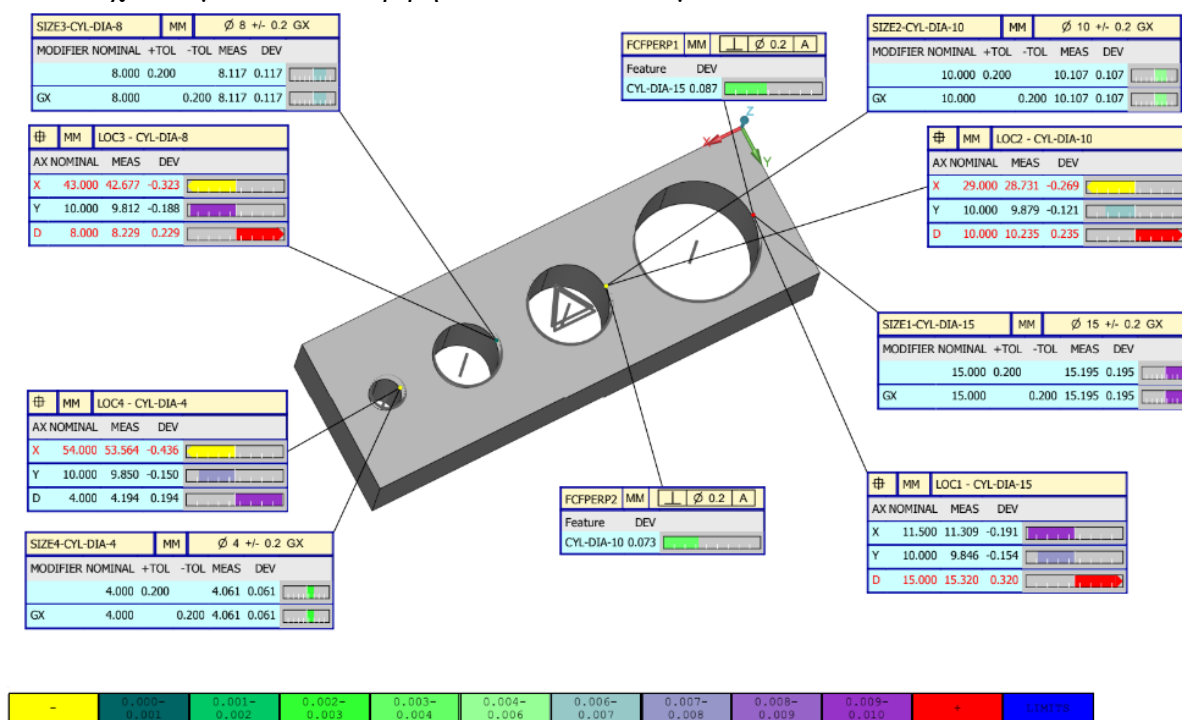
5. ANSYS Additive Suite

Πέρα από τη γεωμετρία, ρόλο στη τελική συμπεριφορά του τεμαχίου παίζουν και οι συνθήκες στις οποίες εκτυπώθηκε. Ως γνωστόν κατά τη διάρκεια μιας θερμικής κατεργασίας, στο τελικό τεμάχιο αναπτύσσονται τάσεις οι οποίες παραμένουν και μετά το πέρας της κατεργασίας υποβαθμίζοντας έτσι τις πραγματικές του αντοχές. Επιπλέον αυτές οι τάσεις δημιουργούν και παραμορφώσεις οι οποίες δύναται να εμποδίσουν την αρμονική συνεργασία του τεμαχίου ως μέρος ενός ευρύτερου συνόλου/μηχανισμού.

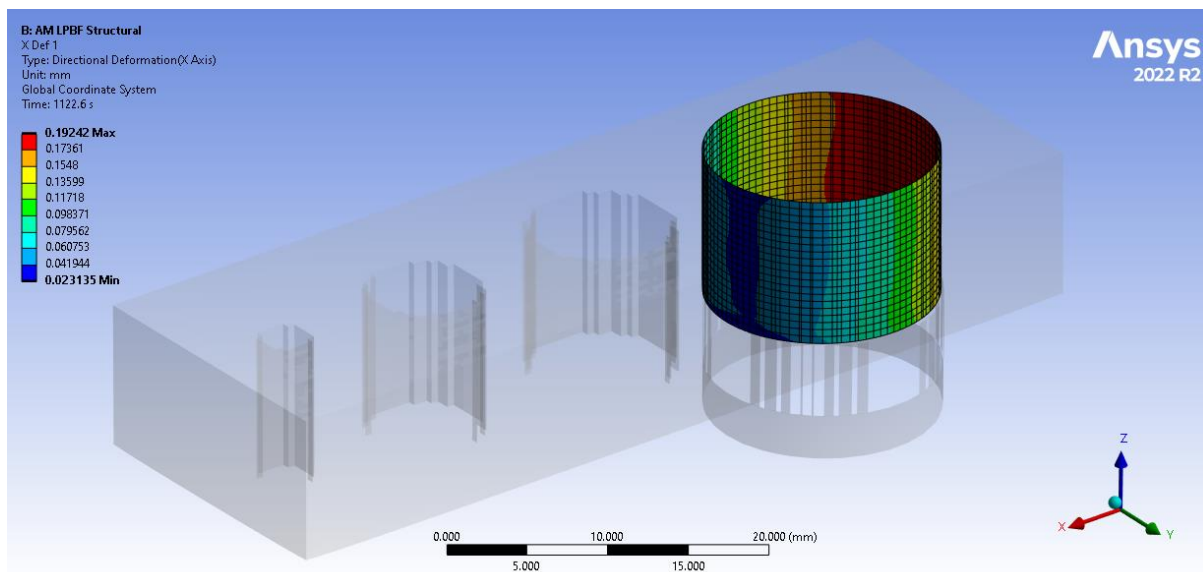
Η σουίτα “Additive” του ANSYS, μέσα από προσομοίωση της διαδικασίας εκτύπωσης, δίνει την δυνατότητα να προβλεφθούν οι παραπάνω τάσεις και παραμορφώσεις δίνοντας έτσι την δυνατότητα για ταχύτερη επαλήθευση του αν ένα τεμάχιο θα έχει την απαιτούμενη συμπεριφορά ή εάν χρήζει επανασχεδιασμού.

5.1 Επαλήθευση Μοντέλου

Με δεδομένο ότι η σουίτα Additive είναι ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης, προτείνεται από την ίδια την ANSYS να γίνει μία επαλήθευση του εκάστοτε μοντέλου για να υπάρχει καλύτερη εικόνα σχετικά με το πόσο ακριβή είναι τα αποτελέσματα.



Εικόνα 55. Αποτελέσματα μετρήσεων μηχανήματος CMM



Εικόνα 56. Μετατόπιση περιφέρειας κατά X, της οπής Φ15.

Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκαν τα δοκίμια της εικόνας X όπου. Πρόκειται για ένα ζεύγος αρσενικών-θηλυκών κυλινδρικών γεωμετριών διαμέτρου 4, 8, 10 και 15 mm. Αφενός εκτυπώθηκαν και μετρήθηκαν τα δοκίμια και αφετέρου έγινε η προσομοίωση της εκτύπωσης στο ANSYS. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της μέτρησης με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Διάμετρος	Μέτρηση (mm)	Μοντέλο (mm)	Απόκλιση από την Μέτρηση
Άξονας Φ4	3,724	3,878	4,14%
Άξονας Φ8	7,651	7,82	2,21%
Άξονας Φ10	9,649	9,881	2,40%
Άξονας Φ15	14,596	14,768	1,18%
Τρήμα Φ4	4,194	4,182	0,29%
Τρήμα Φ8	8,229	8,225	0,05%
Τρήμα Φ10	10,235	10,274	0,38%
Τρήμα Φ15	15,32	15,348	0,18%

Πίνακας 2. Σύγκριση μετρούμενων διαμέτρων με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες.

Συντεταγμένη X	Μέτρηση (mm)	Μοντέλο (mm)	Απόκλιση από την Μέτρηση
Άξονας Φ4	53,806	53,637	0,31%
Άξονας Φ8	42,783	42,718	0,15%
Άξονας Φ10	28,651	28,819	0,59%
Άξονας Φ15	11,059	11,058	0,01%
Τρήμα Φ4	53,564	53,717	0,29%
Τρήμα Φ8	42,677	42,811	0,31%
Τρήμα Φ10	28,731	28,935	0,71%
Τρήμα Φ15	11,309	11,424	1,02%

Πίνακας 3. Σύγκριση μετρούμενων συντεταγμένων X με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες.

Συντεταγμένη Υ	Μέτρηση (mm)	Μοντέλο (mm)	Απόκλιση από την Μέτρηση
Άξονας Φ4	9,96	9,911	0,49%
Άξονας Φ8	9,898	9,942	0,44%
Άξονας Φ10	9,927	9,98	0,53%
Άξονας Φ15	9,821	9,973	1,55%
Τρήμα Φ4	9,85	9,942	0,93%
Τρήμα Φ8	9,812	9,926	1,16%
Τρήμα Φ10	9,879	9,912	0,33%
Τρήμα Φ15	9,846	9,891	0,46%

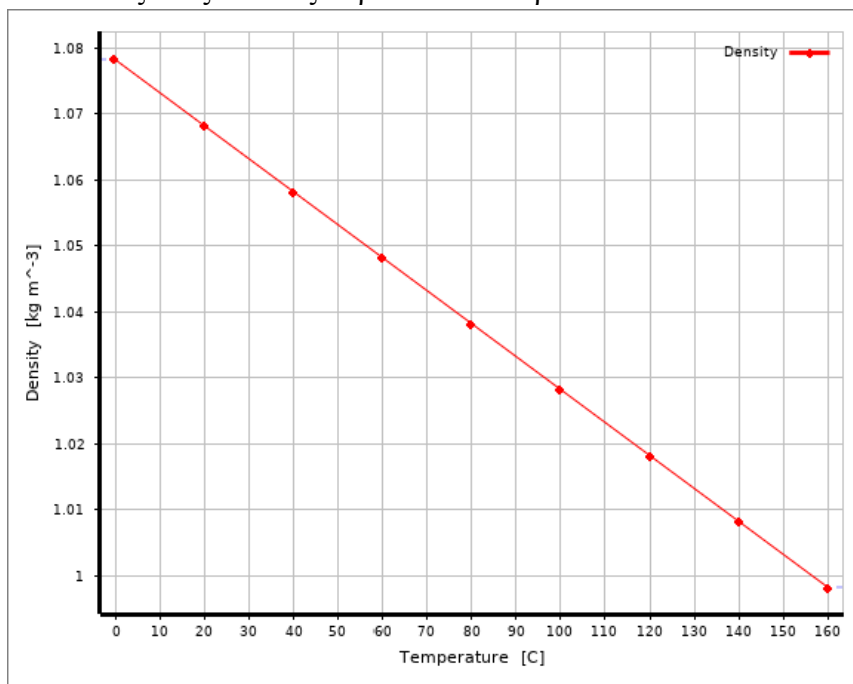
Πίνακας 4. Σύγκριση μετρούμενων συντεταγμένων Υ με τις αντίστοιχες προβλεπόμενες.

Ως επί το πλείστον φαίνεται ότι η ακρίβεια το μοντέλου είναι ικανοποιητική με τις περισσότερες αποκλίσεις να είναι μικρότερες από 1.5% ενώ η μεγαλύτερη είναι 4.14% που και πάλι δεν είναι ιδιαίτερα κακή. Αξιοσημείωτο επίσης είναι το γεγονός ότι επιτυγχάνεται καλύτερη ακρίβεια στις γεωμετρίες τρήματος, παρατήρηση σημαντική καθότι το τεμάχιο που μελετάται στην παρούσα εργασία έχει μόνο τέτοιες γεωμετρίες.

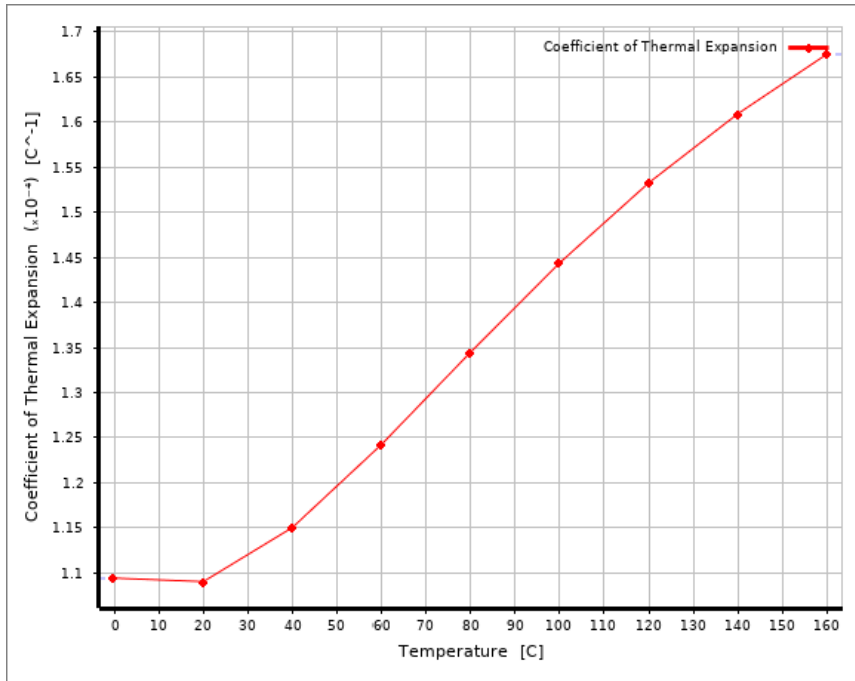
5.2 Μοντελοποίηση

5.2.1 Υλικό

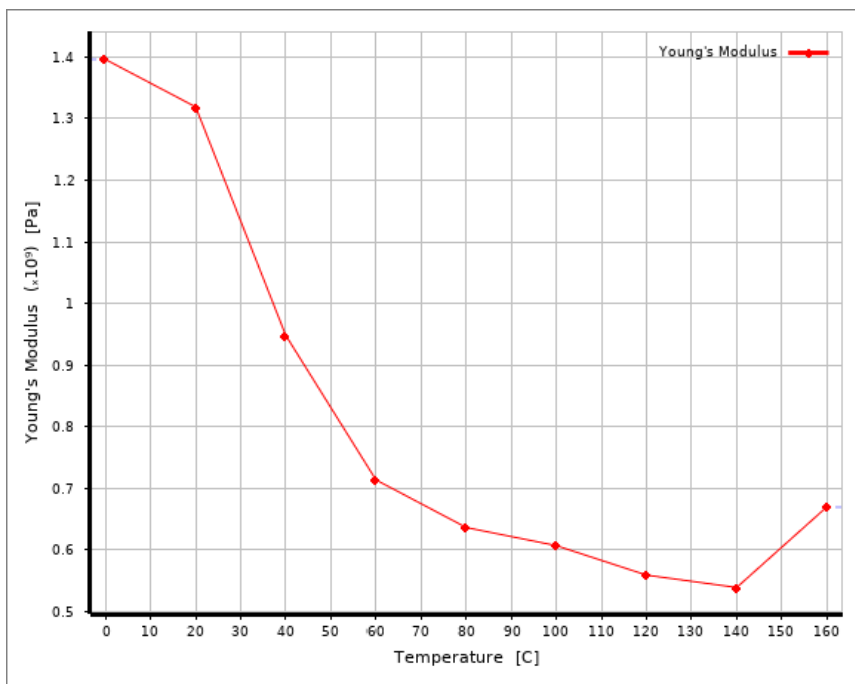
Ως υλικό εκτύπωσης επιλέχθηκε το πολυαμίδιο 12 (Nylon 12) επειδή είναι αρκετά κοινό υλικό για τη μέθοδο SLS. Δυστυχώς η βιβλιοθήκη υλικών του ANSYS δεν περιλαμβάνει το Nylon 12 για αυτό χρειάστηκε να εισαχθούν οι ιδιότητες του χειροκίνητα προκειμένου να μπορεί να γίνει η προσομοίωση. Δεδομένου ότι η εκτύπωση πρόκειται για θερμική κατεργασία οι ιδιότητες αυτές δεν μένουν σταθερές αλλά αλλάζουν συναρτήσει της θερμοκρασίας επομένως χρειάζεται να εισαχθούν στο ANSYS σε μορφή πίνακα οι τιμές του οποίου συμπληρώθηκαν βάσει μιας παλαιότερης διπλωματικής εργασίας. Τα διαγράμματα που προκύπτουν από αυτούς τους πίνακες παρατίθενται παρακάτω.



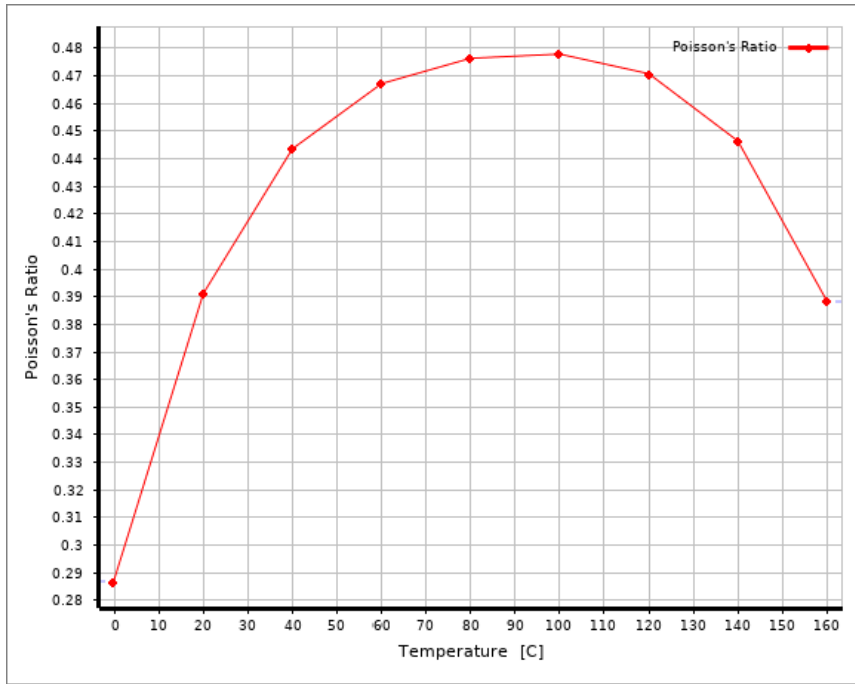
Εικόνα 57. Διάγραμμα Πυκνότητας-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.



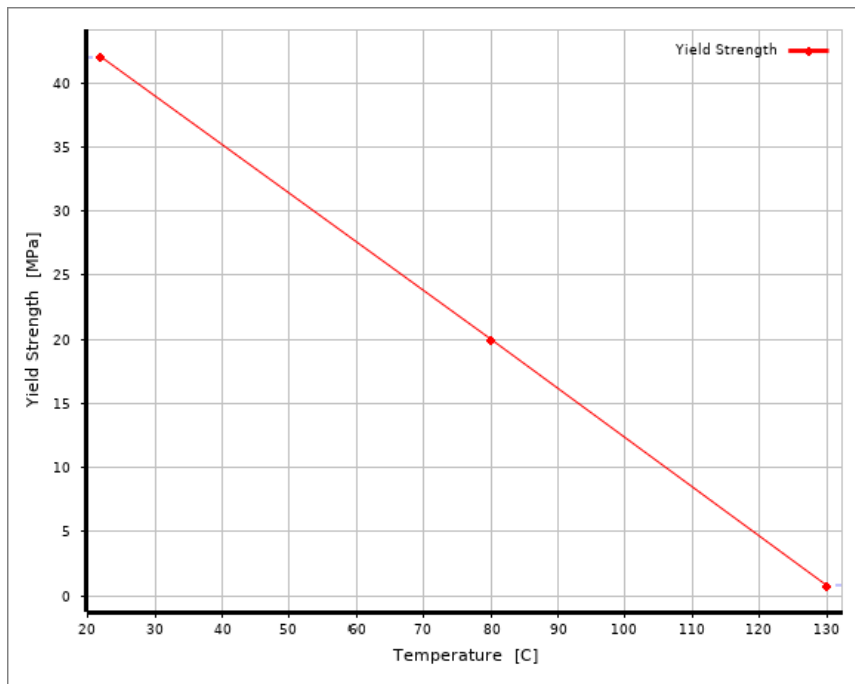
Εικόνα 58. Διάγραμμα Συντελεστή Θερμικής Διαστολής-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.



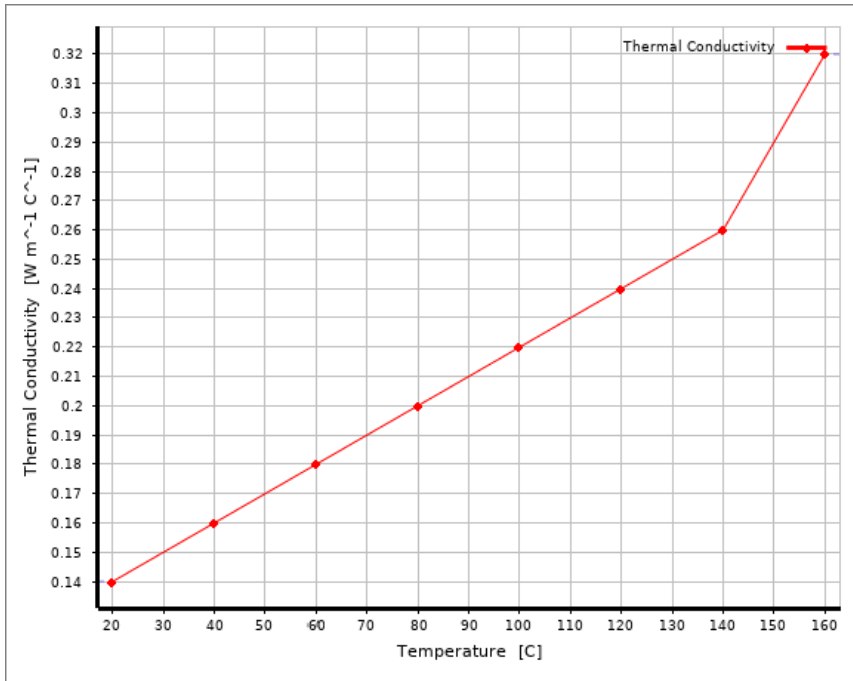
Εικόνα 59. Διάγραμμα Μέτρου Ελαστικότητας-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.



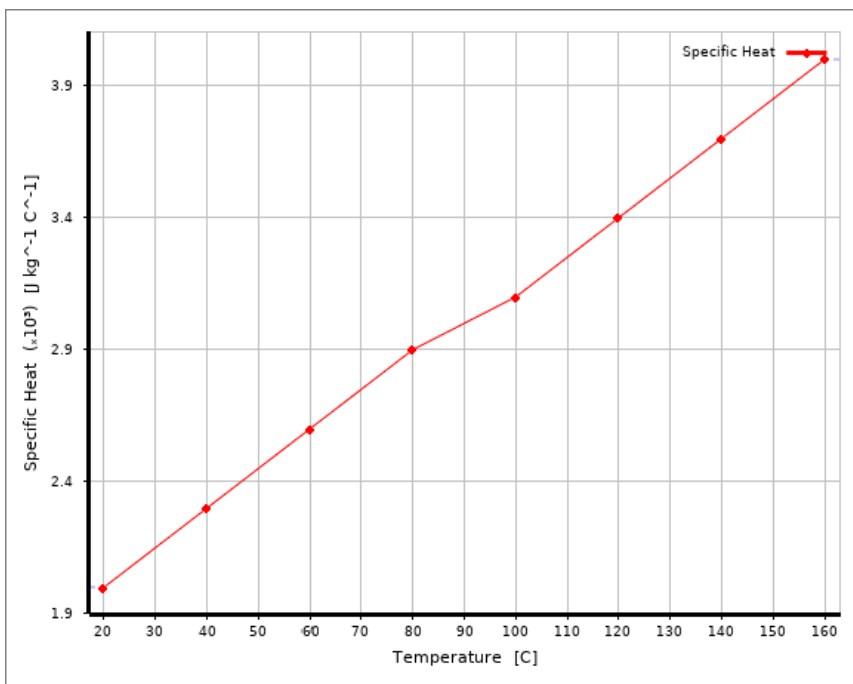
Εικόνα 60. Διάγραμμα Λόγου Poisson-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.



Εικόνα 61. Διάγραμμα Ορίου Διαρροής-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.



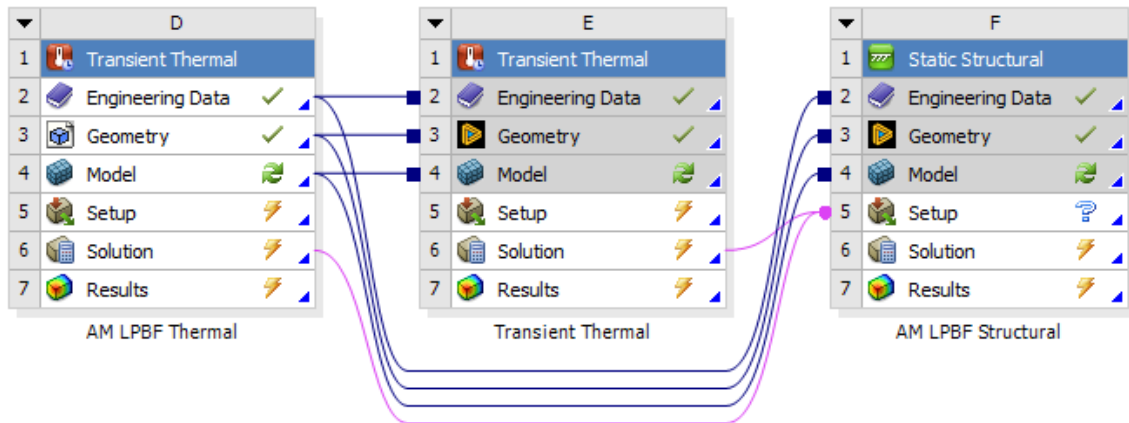
Εικόνα 62. Διάγραμμα Θερμικής Αγωγιμότητας-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.



Εικόνα 63. Διάγραμμα Ειδικής Θερμοχωρητικότητας-Θερμοκρασίας από 0-160°C για το Nylon 12.

5.2.2 LPBF Wizard

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η μοντελοποίηση της εκτύπωσης είναι με τη δημιουργία ενός ζεύγους θερμικής-στατικής προσομοίωσης (με την προσθήκη μιας μεταβατικής θερμικής στη περίπτωση του heat treatment) όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα της Εικόνας 62.

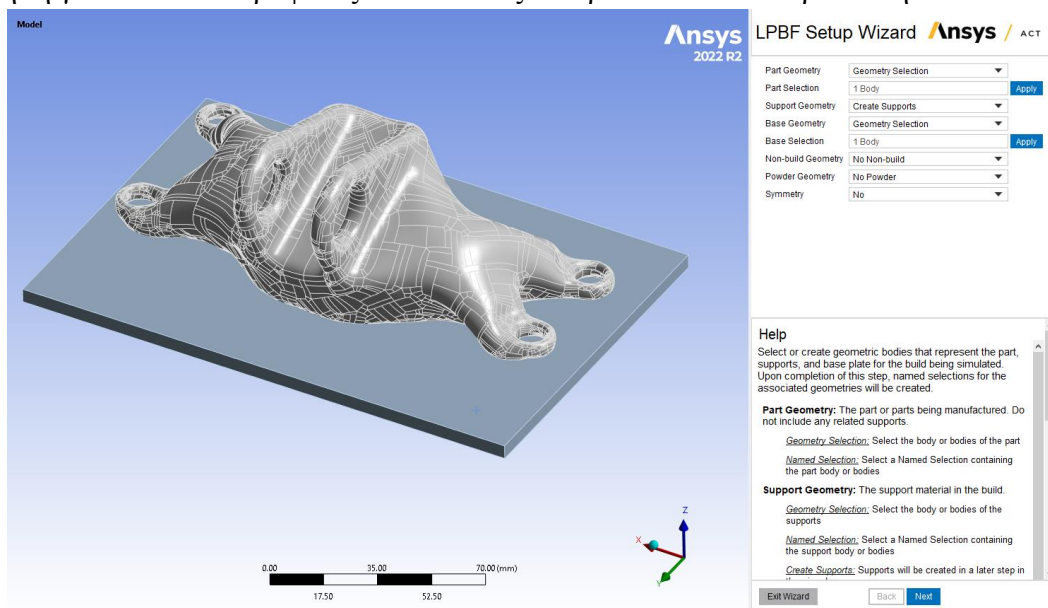


Εικόνα 64. Σχεδιάγραμμα της προσομοίωσης στο ANSYS Workbench.

Μέσα στο περιβάλλον του ANSYS Structural, στα Add-Ons υπάρχει η επιλογή “LPBF Process” η οποία δίνει πρόσβαση στο LPBF Wizard το οποίο αποτελεί τον τρόπο με τον οποίο γίνεται γρήγορα και πιο αυτοματοποιημένα το απαραίτητο setup όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Βήμα 1

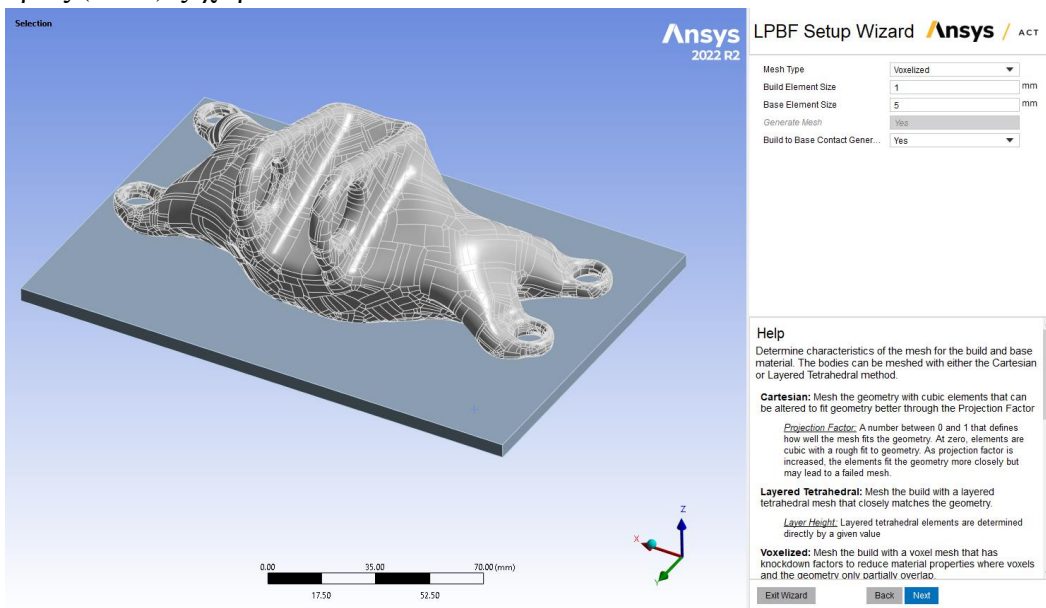
Πρώτο βήμα αποτελεί η εισαγωγή των αναγκαίων γεωμετριών στο ANSYS. Απαραίτητες γεωμετρίες αποτελούν : το προς εκτύπωση τεμάχιο, η βάση εκτύπωσης και κατά περιπτώσεις η υποστηρικτική γεωμετρία. Εν προκειμένω για την υποστηρικτική γεωμετρία χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία αυτόματης δημιουργίας τους. Σημαντική επίσης είναι και η απαίτηση για τον κατακόρυφο άξονα ο οποίος θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι ο Z.



Εικόνα 65. 1ο βήμα μοντελοποίησης, καθορισμός γεωμετριών,

Βήμα 2

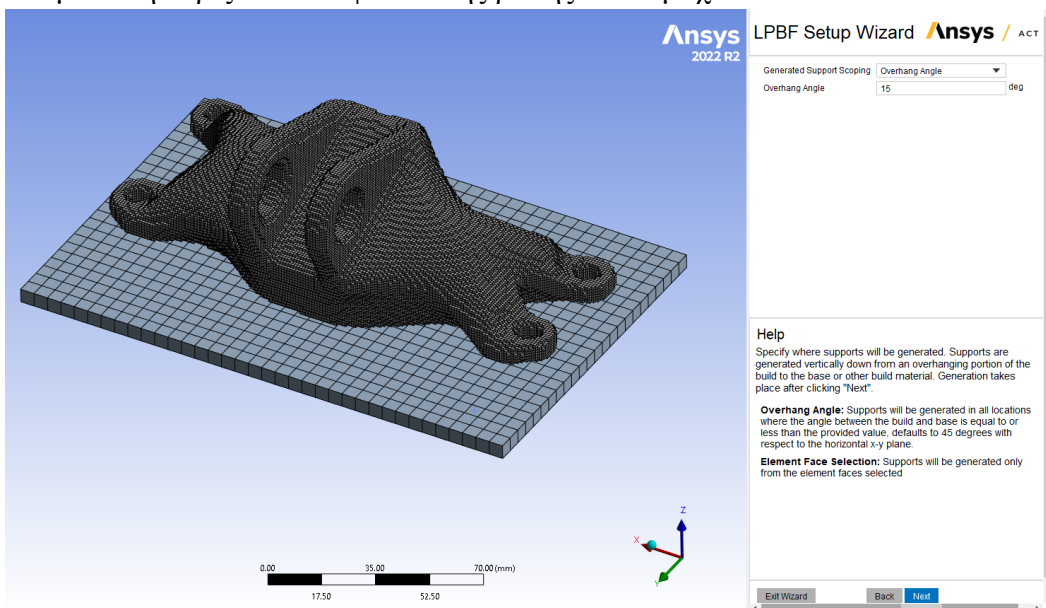
Στη συνέχεια ορίζονται οι παράμετροι για την πλεγματοποίηση του μοντέλου όπως το είδος πλέγματος και τα μεγέθη πλέγματος για τη βάση (base) και τις προς εκτύπωση γεωμετρίες (build) ξεχωριστά.



Εικόνα 66. 2ο βήμα μοντελοποίησης, καθορισμός χαρακτηριστικών πλέγματος.

Βήμα 3

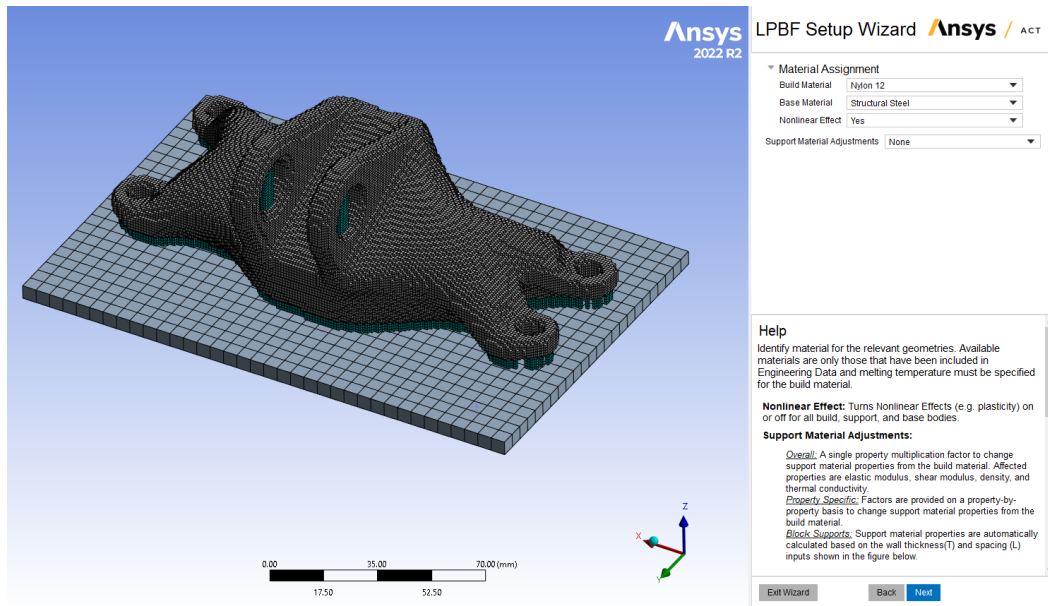
Σε αυτό το βήμα γίνεται η επιλογή των παραμέτρων που αφορούν την αυτόματη δημιουργία υποστηρικτικής γεωμετρίας. Καθότι το τεμάχιο έχει προκύψει με περιορισμό overhang 45° , η μόνη υποστηρικτική γεωμετρία που χρειάζεται είναι η δημιουργία ψευδοβάσης. Ο πιο εύκολος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι ορίζοντας ως κανόνα δημιουργίας υποστηρικτικής γεωμετρίας με overhang το οποίο τέθηκε αρκετά χαμηλά ώστε να πιάσει μόνο την οριζόντια επιφάνεια της βάσης του τεμαχίου.



Εικόνα 67. 3ο βήμα μοντελοποίησης, καθορισμός υποστηρικτικής γεωμετρίας.

Βήμα 4

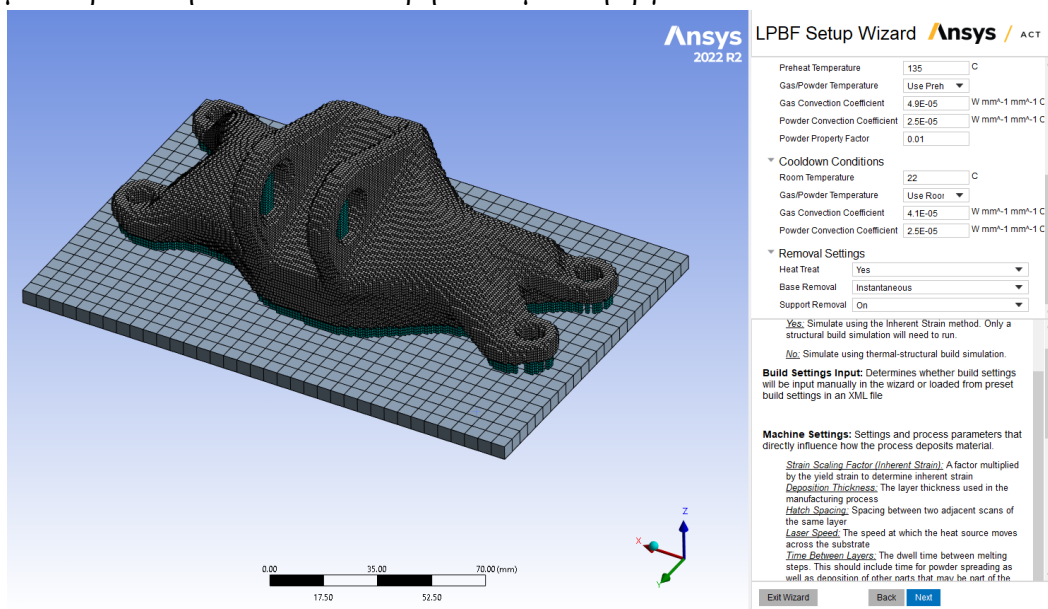
Σε αυτό το βήμα έγινε η καταχώρηση υλικού σε κάθε γεωμετρία. Nylon 12 για τις προς εκτύπωση γεωμετρίες και χάλυβας για τη βάση.



Εικόνα 68. 4ο βήμα μοντελοποίησης, αντιστοίχιση υλικών στα σώματα.

Βήμα 5

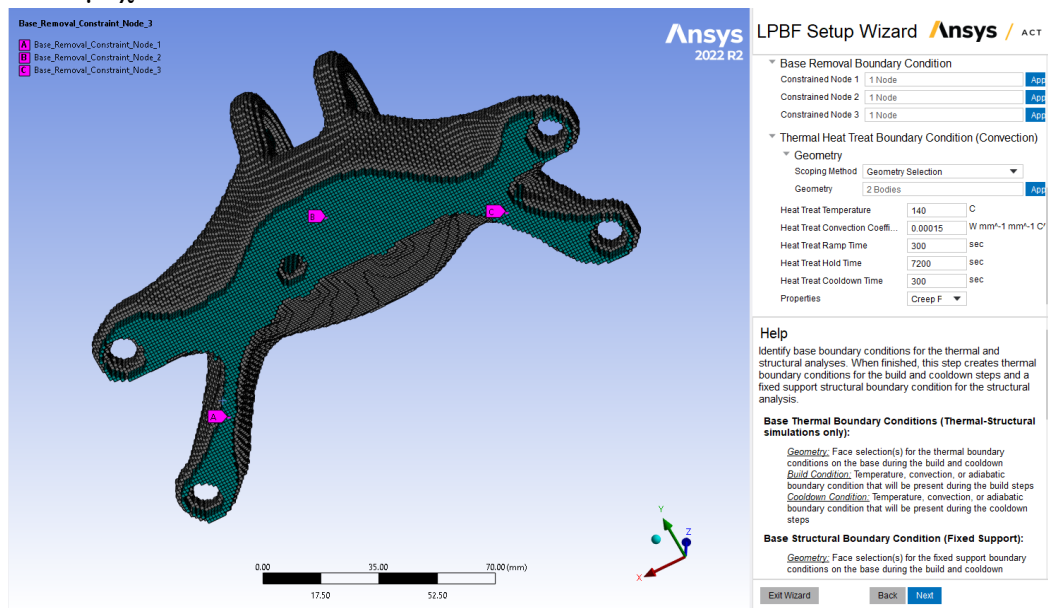
Σειρά έχει η καταχώρηση όλων των παραμέτρων εκτύπωσης όπως το ύψος στρώσης, η ταχύτητα laser, το hatch spacing κ.τ.λ. Η επιλογή των παραμέτρων εκτύπωσης περιγράφεται στην παράγραφο 5.2 ενώ οι παράμετροι που αφορούν την μοντελοποίηση του θερμικού φαινομένου βασίστηκαν σε παλαιότερη διπλωματική εργασία.



Εικόνα 69. 5ο βήμα μοντελοποίησης, καθορισμός παραμέτρων μηχανής.

Βήμα 6

Στο, τελευταίο, βήμα γίνεται η καταχώρηση των αρχικών συνθηκών τόσο για το στατικό όσο και για το θερμικό φαινόμενο και, σε περίπτωση που γίνει και η αντίστοιχη επιλογή, για την αφαίρεση βάσης ή/και heat treatment. Για τα δύο πρώτα ως όριο επιλέγεται η κάτω επιφάνεια της βάσης εκτύπωσης. Για την αφαίρεση βάσης έγινε προσεκτική επιλογή τριών κόμβων σύμφωνα με τις οδηγίες που δίνονται στο εγχειρίδιο της σουίτας. Το heat treatment επιλέχθηκε να γίνει στους 140°C για 2 ώρες με 5 λεπτά για την ομαλή θέρμανση και ψύξη του τεμαχίου και.



Εικόνα 70. 6ο βήμα μοντελοποίησης, καθορισμός αρχικών συνθηκών προσομοίωσης.

5.3 Επίδραση Παραμέτρων Εκτύπωσης

5.3.1 Παράμετροι Γενικά

Η διαδικασία της εκτύπωσης περιλαμβάνει πάρα πολλές διαφορετικές παραμέτρους οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες : Παράμετροι Γεωμετρίας, Παράμετροι Υλικού και Παράμετροι Μηχανής.

Οι παράμετροι γεωμετρίας αναφέρονται σε όλες τις μορφολογικές αλλαγές που μπορούν να γίνουν σε ένα τεμάχιο, προκειμένου να βελτιωθεί η τελική συμπεριφορά του, όπως π.χ. αλλαγή σε πάχη λεπτότοιχων διατομών ή σε ακτίνες ραδίων. Οι παράμετροι υλικού έχουν να κάνουν, προφανώς, με όλες τις σχετικές ιδιότητες του υλικού π.χ. μέτρο ελαστικότητας ή συντελεστής θερμικής διαστολής. Τέλος οι παράμετροι μηχανής έχουν να κάνουν με όλες εκείνες τις ρυθμίσεις οι οποίες μπορούν να ελεγχθούν μέσα από τον slicer του εκάστοτε εκτυπωτή π.χ. ισχύς λέιζερ ή ύψος στρώσης.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια μελέτη πάνω σε συγκεκριμένες μεταβλητές μηχανής και πως αυτές επηρεάζουν τη τελική συμπεριφορά για κάθε ένα από τα τρία τελικά τεμάχια (και στη συνέχεια γίνεται σαφής και η σημαντικότητα των παραμέτρων γεωμετρίας).

5.3.2 Αποτελέσματα Μελέτης Παραμέτρων

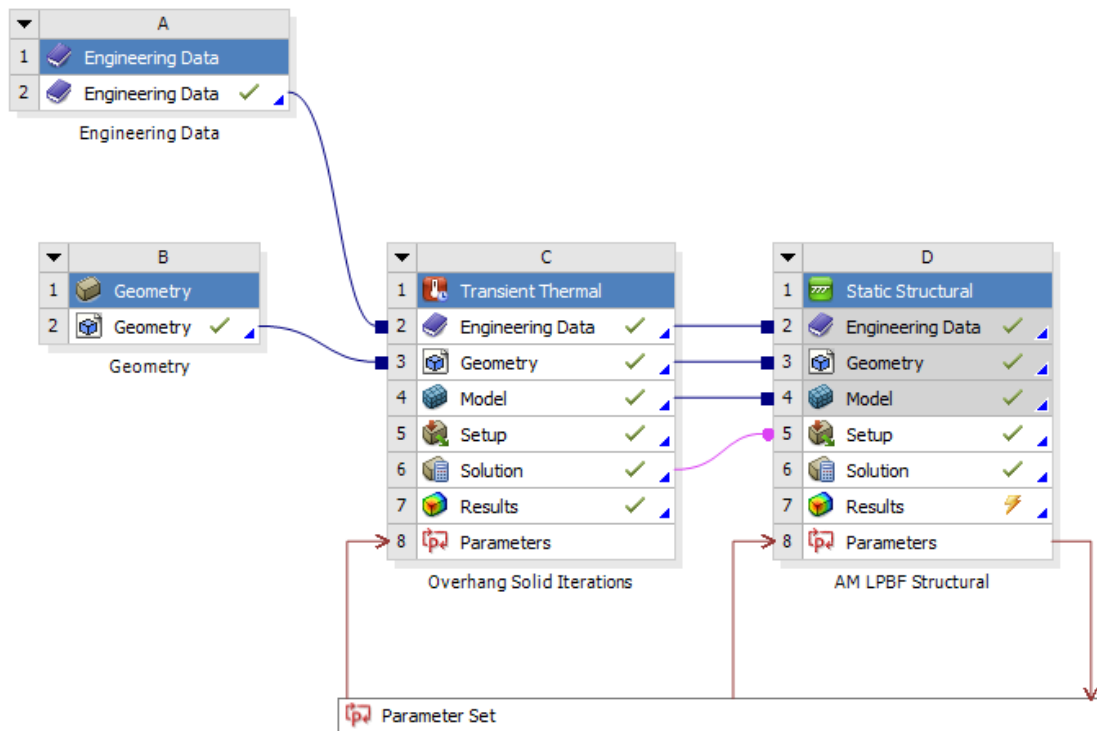
Λόγω του τρόπου με τον οποίο γίνεται η προσομοίωση στο ANSYS το εύρος των παραμέτρων που μπορούν να μελετηθούν είναι περιορισμένο και για αυτό επιλέχθηκαν οι παρακάτω πέντε : Ταχύτητα Σάρωσης Λείζερ, Hatch Spacing, Ύψος Στρώσης και Γωνία Τεμάχιου ως προς την επιφάνεια εκτύπωσης.

Το ANSYS δίνει τη δυνατότητα κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης να οριστούν ορισμένα μεγέθη ως παράμετροι σχεδιασμού είτε ως “είσοδοι” είτε ως “έξοδοι” ανάλογα προφανώς με το αν είναι μεγέθη της μοντελοποίησης ή μεγέθη που ανήκουν στη λύση.

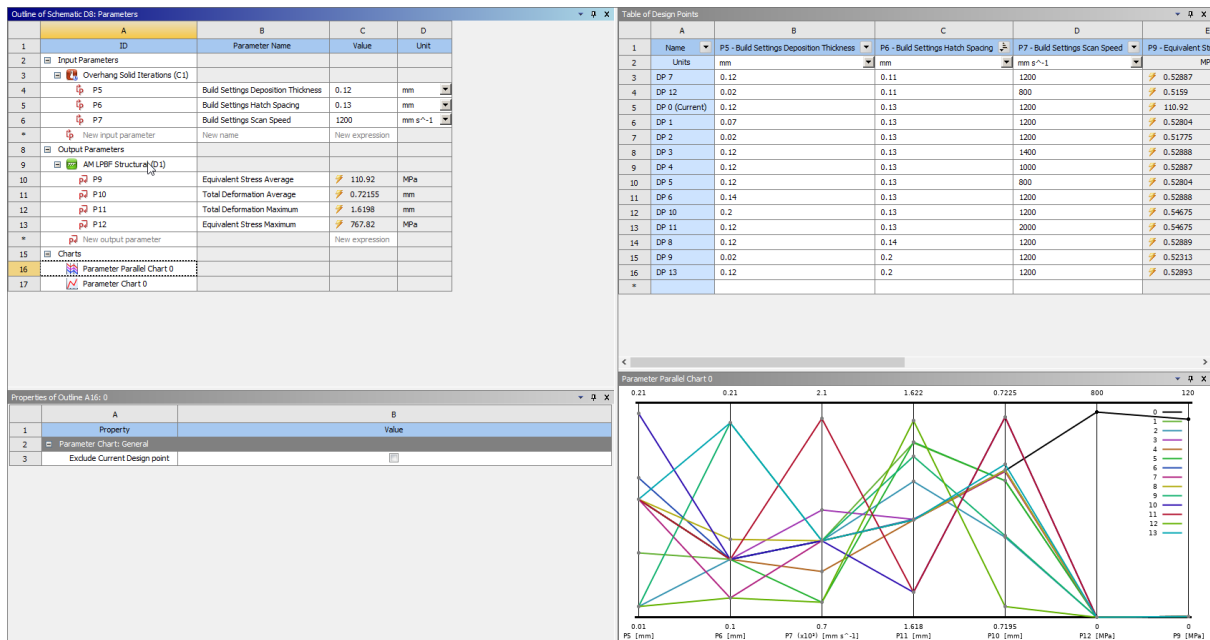
P Deposition Thickness	0.12 mm
P Hatch Spacing	0.13 mm
P Scan Speed	1200. mm/s

Εικόνα 71. Καθορισμός μεταβλητών ως παραμέτρους σχεδιασμού.

Ο κάθε συνδυασμός εισόδων αποτελεί και ένα σημείο σχεδιασμού το οποίο δίνει έναν συγκεκριμένο συνδυασμό εξόδων (λύσεων). Κατά αυτόν τον τρόπο γίνεται πιο εύκολο να μελετηθεί μια πληθώρα περιπτώσεων, οι οποίες μπορούν να διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους, έτσι ώστε να συλλεχθούν τα απαραίτητα δεδομένα για την εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος σχετικά με το προς μελέτη τεμάχιο, εν προκειμένω ποια είναι η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων στις παραμένουσες τάσεις και στην συνολική παραμόρφωση.

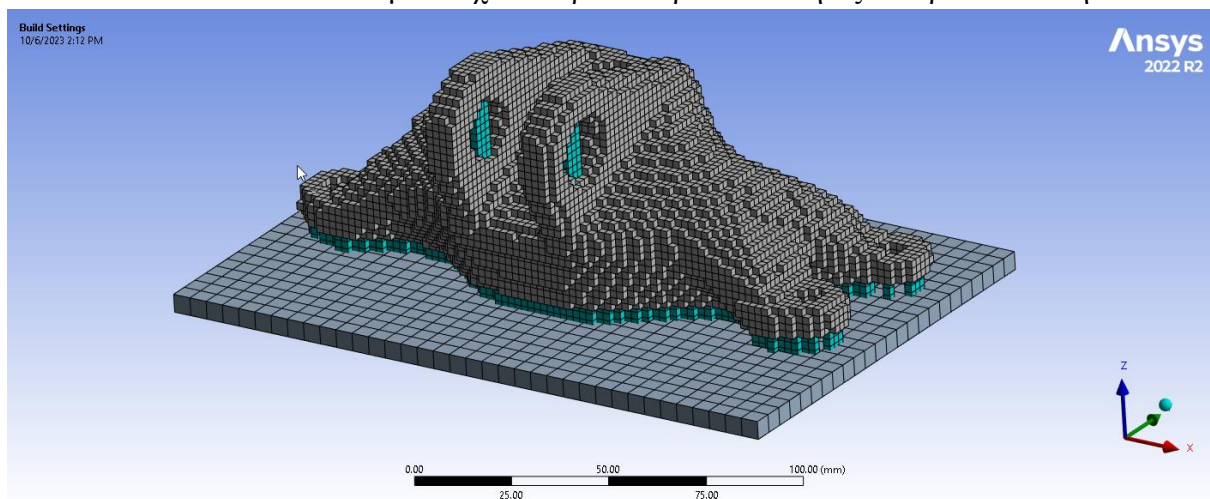


Εικόνα 72. Σχεδιάγραμμα της προσομοίωσης για τον καθορισμό της επίδρασης των παραμέτρων μηχανής στις παραμένουσες τάσεις και στη συνολική παραμόρφωση του τεμαχίου.



Εικόνα 73. Μενού επεξεργασίας παραμέτρων σχεδιασμού και αποτελεσμάτων.

Καθότι δεν είναι εφικτή η εν παραλλήλω εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων αλλά αντιθέτως δίνεται μόνο η δυνατότητα να εκτελεστούν σειριακά, χρειάστηκε να γίνει ένας συμβιβασμός στο μέγεθος του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να ληφθούν τα αποτελέσματα εντός λογικού χρονικού διαστήματος. Ένα ικανοποιητικό μέγεθος 1mm χρειάζεται περίπου 4-5 ώρες για να δώσει λύση για ένα σημείο σχεδιασμού που σημαίνει ότι για τα 14 που μελετήθηκαν εντέλει θα χρειαζόταν συνολικά περισσότερες από 60 ώρες. Μειώνοντας την ανάλυση στα 2mm, κάθε σημείο χρειάστηκε περίπου 40 λεπτά οπότε λήφθηκαν τα αποτελέσματα σε περίπου 10 ώρες. Ωστόσο τα 2mm δεν αποτυπώνουν ικανοποιητικά τη γεωμετρία του τεμαχίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, επομένως όλα τα επακόλουθα αποτελέσματα έχουν περισσότερο ποιοτική αξία παρά ποσοτική.



Εικόνα 74. Πλέγμα του Solid με υποστηρικτική γεωμετρία και μέγεθος voxel 2mm.

i Ταχύτητα Laser

Η ταχύτητα του laser επηρεάζει τον ρυθμό με τον οποίο προσδίδεται ενέργεια στο τεμαχίο κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Χαμηλότερη ταχύτητα συνεπάγεται ότι το υλικό θερμαίνεται πιο ομοιόμορφα και κατ'επέκταση ψύχεται πιο ομοιόμορφα. Αντίθετα στη περίπτωση της υψηλότερης ταχύτητας η ανομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στο υλικό δημιουργεί μια κλίση η οποία προκαλεί εσωτερικές τάσεις και συνεπώς παραμορφώσεις. Τα παραπάνω επαληθεύονται και από τα διαγράμματα που φαίνονται στη συνέχεια. Οι μπλε καμπύλες που αντιστοιχούν στη μέση τιμή συνολικής παραμόρφωσης και τάσης έχουν ανοδική τάση με την αύξηση της ταχύτητας laser.

ii Hatch Spacing

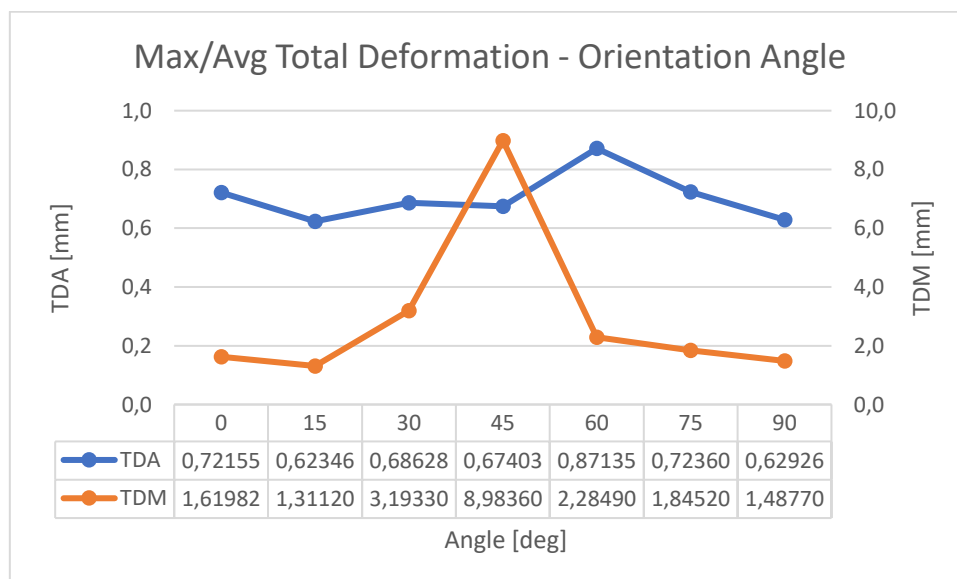
Το hatch spacing επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα εντός του τεμαχίου. Μικρότερο hatch spacing σημαίνει μικρότερος αριθμός κενών και επομένως καλύτερη αγωγή της θερμότητας. Αυτή η καλύτερη αγωγή συνεπάγεται πιο ομοιόμορφη θέρμανση και ψύξη του τεμαχίου. Ωστόσο δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική αλλαγή στις παραμορφώσεις και τις παραμένουσες τάσεις

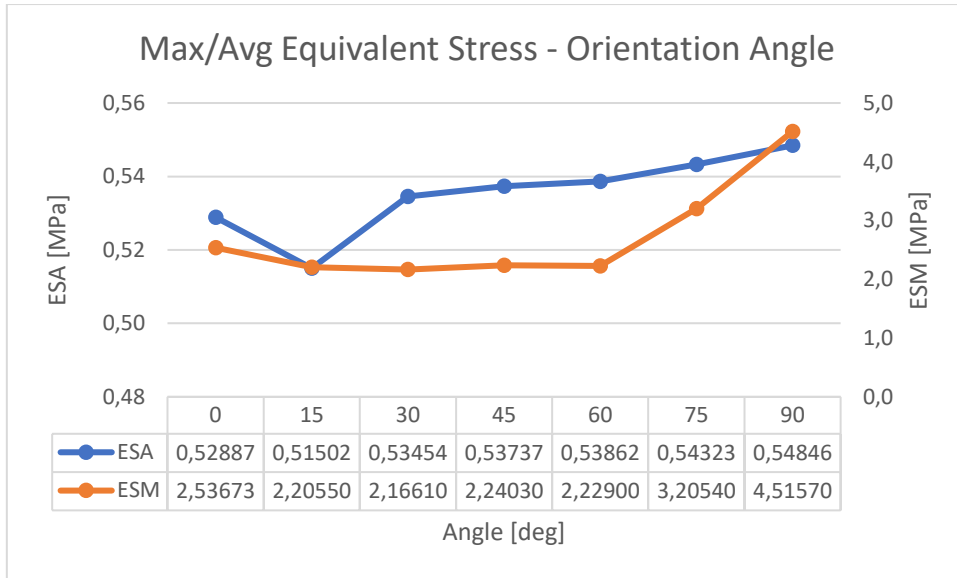
iii Ύψος Στρώσης

Το ύψος στρώσης αφενός λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με τον hatch spacing όσον αφορά στην πυκνότητα των κενών εντός του τεμαχίου αλλά επιπλέον επηρεάζει και την κατανομή των εσωτερικών τάσεων. Συγκεκριμένα τα μικρότερα ύψη στρώσεων τείνουν να δημιουργούν πιο σταδιακές μεταβάσεις μεταξύ των στρώσεων, μειώνοντας την πιθανότητα απότομων αλλαγών στην τάση μεταξύ γειτονικών στρώσεων. Έτσι, θεωρητικά, επιτυγχάνονται μικρότερες παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται και ο κίνδυνος αποκόλλησης των στρώσεων (delamination). Ωστόσο δεν παρατηρήθηκε αυτή η αναμενόμενη μείωση τάσεων και παραμορφώσεων.

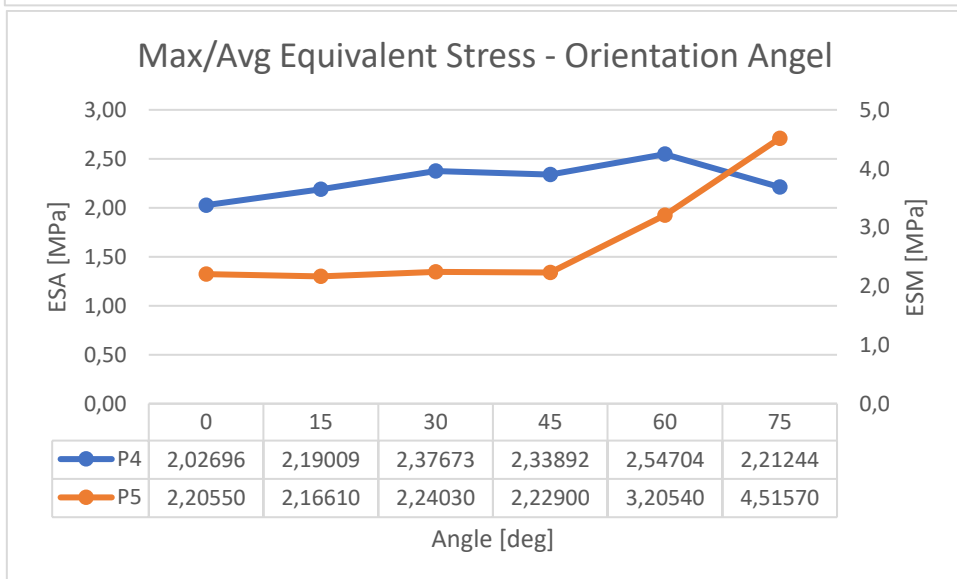
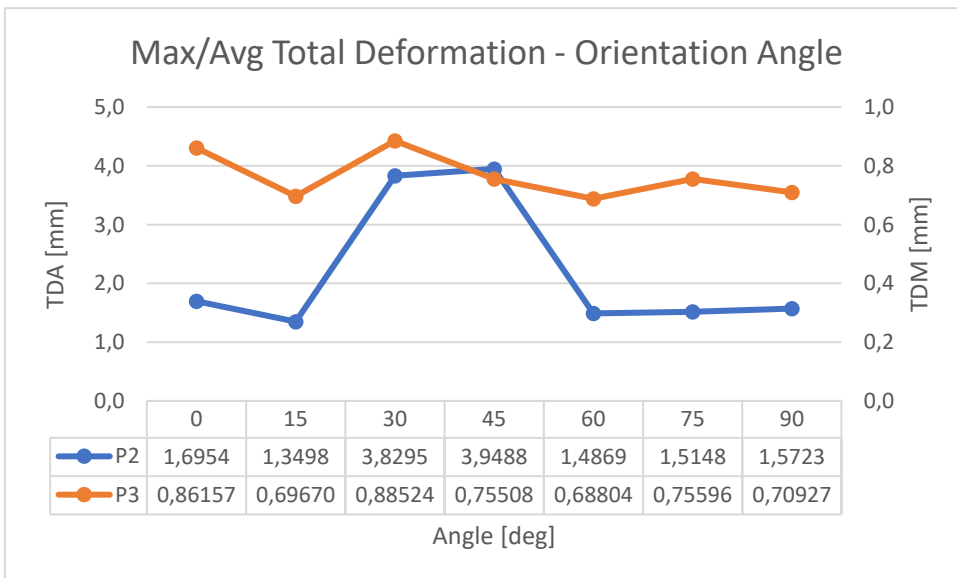
iv Γωνία Τεμαχίου

Solid :





Shell :



Ως επί το πλείστον τα διαγράμματα επιβεβαιώνουν τους κανόνες που είναι ήδη γνωστοί σχετικά με την επίδραση των παραμέτρων στις παραμένουσες τάσεις και στις παραμορφώσεις. Ωστόσο ακόμα και στις περιπτώσεις που παρατηρείται αλλαγή, αυτή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους. Αφενός υπάρχει περίπτωση το μεγάλο μέγεθος voxel να μην έδωσε αρκετή ακρίβεια στο πλέγμα προκειμένου να μπορέσει να εμφανιστεί το πραγματικό μέγεθος των αλλαγών. Αφετέρου, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η σουίτα του ASNYS είναι ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης, μπορεί το σημείο αυτό να αποτελεί κενό στις δυνατότητές της.

Επίσης να σημειωθεί ότι στην παραπάνω μελέτη δεν συμπεριλήφθηκε η περίπτωση του heat treatment καθότι τείνει να “ισοπεδώνει” όλες τις μικρές αυτές αλλαγές με αποτέλεσμα να μην δίνει κάποιο περαιτέρω αξιοποιήσιμο αποτέλεσμα.

Είναι φανερό ότι οι, εντός λογικών πλαισίων, αλλαγές στις παραπάνω παραμέτρους δεν επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στην απόκριση του τελικού τεμαχίου. Με δεδομένο αυτό και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι “ιδανικές” τιμές των παραμέτρων συνεπάγονται σημαντικά μεγαλύτερους χρόνους εκτύπωσης έγινε μια εμπειρική επιλογή των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στις τελικές προσομοιώσεις και συγκεκριμένα είναι :

Solid :

- Ταχύτητα Laser : 900mm/s
- Hatch Spacing : 0.11mm
- Ύψος Στρώσης : 0.12mm
- Γωνία Τεμαχίου : 0°

Shell :

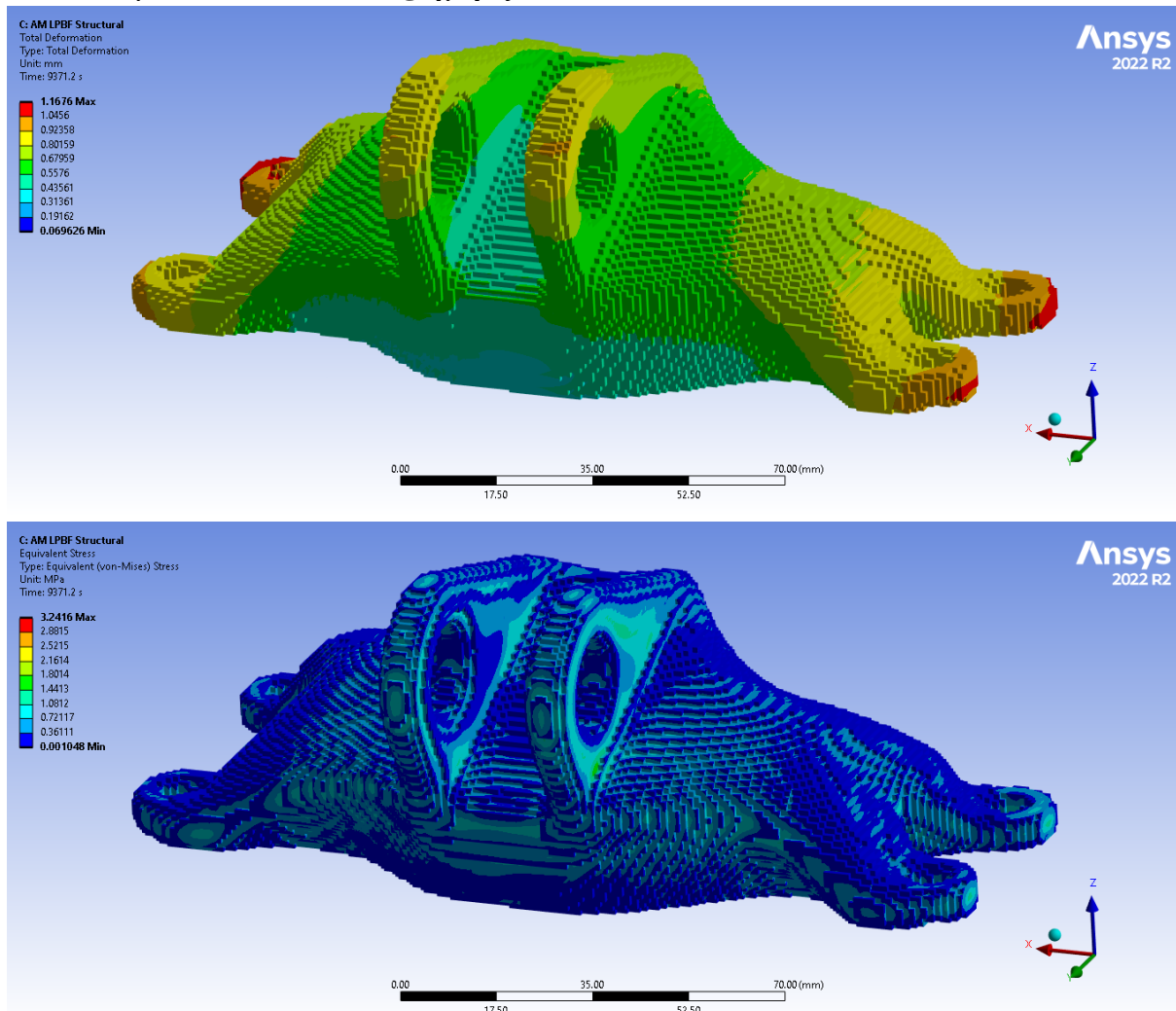
- Ταχύτητα Laser : 900mm/s
- Hatch Spacing : 0.13mm
- Ύψος Στρώσης : 0.12mm
- Γωνία Τεμαχίου : 0°

5.4 Αποτελέσματα, Αξιολόγηση και Επανασχεδιασμός

5.4.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.

Έχοντας τις τιμές της παραγράφου 5.3.2 ακολουθείται η διαδικασία μοντελοποίησης, όπως αυτή περιγράφεται στη παράγραφο 5.2, δίνοντας τα παρακάτω αποτελέσματα. Για κάθε μία από τις τέσσερις περιπτώσεις (Solid Overhang με/χωρίς heat treatment, Shell με/χωρίς heat treatment) παρουσιάζονται οι συνολικές παραμορφώσεις, οι παραμένουσες τάσεις, η μετατόπιση κατά τον άξονα Z της βάσης του τεμαχίου, οι μετατοπίσεις Y,Z των περιφερειών των οπών του πείρου και οι μετατοπίσεις X,Y των περιφερειών των οπών για του κοχλίες στήριξης.

Αποτελέσματα Solid Overhang (χωρίς heat treatment)

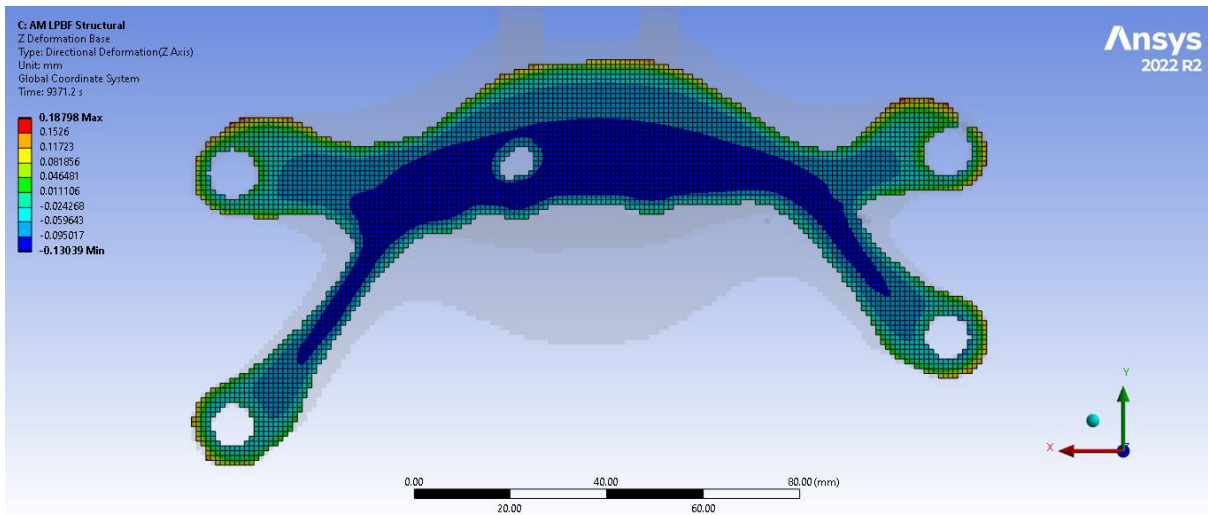


Εικόνα 75. Συνολική Παραμόρφωση και Παραμένουσες Τάσεις για το Solid χωρίς heat treatment.

Σαν μια συνολική εικόνα δεν φαίνεται να έχουν εμφανιστεί μεγάλες παραμορφώσεις αλλά ούτε και ιδιαίτερα μεγάλες παραμένουσες τάσεις.

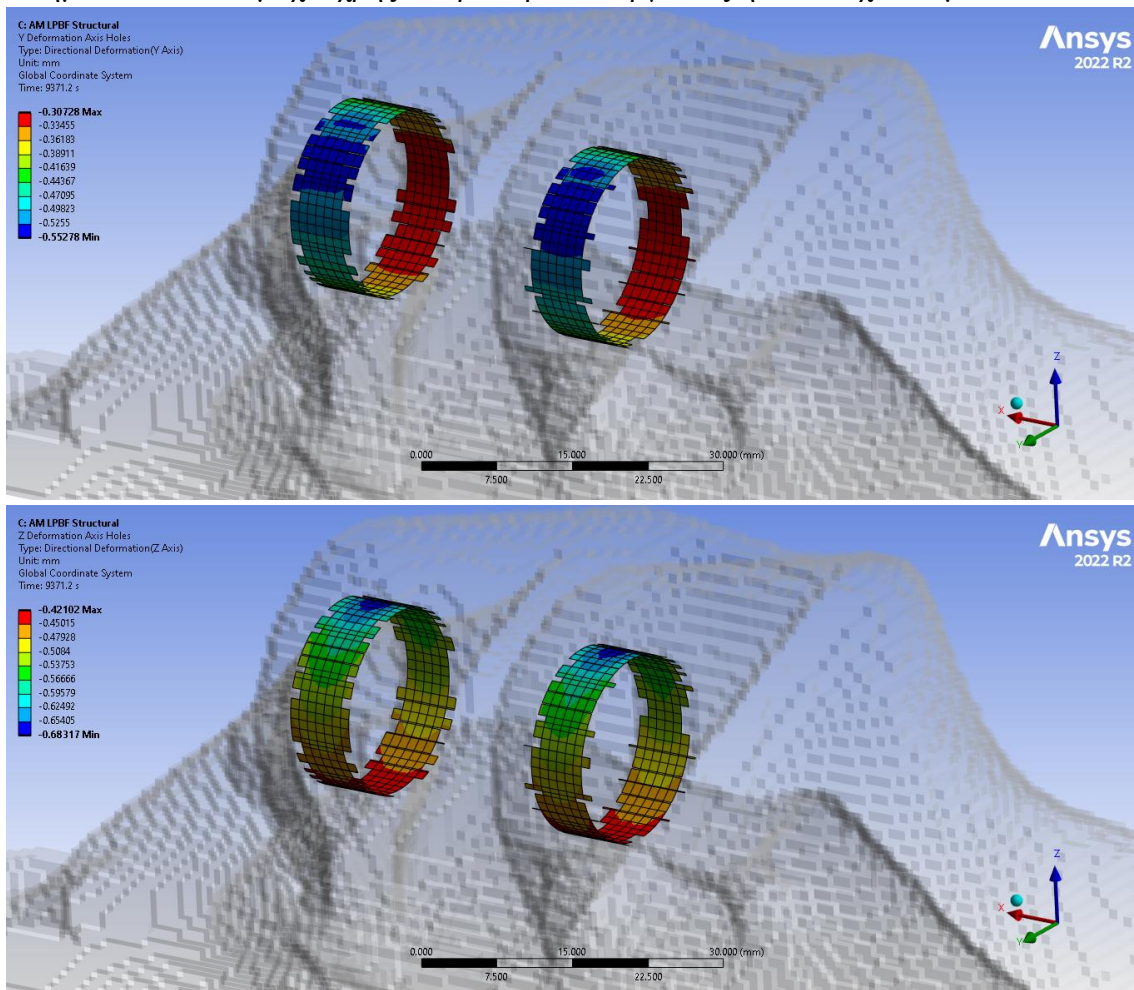
Για τις παραμένουσες τάσεις συγκεκριμένα, αν γίνει διασταύρωση με τις στατικές αναλύσεις του nTopology φαίνεται ότι τα σημεία στα οποία εμφανίζεται η μέγιστη παραμένουσα τάση των 3.24MPa είναι σημεία που κατά τα άλλα δεν δέχονται κάποια άλλη σημαντική φόρτιση. Επομένως οι παραμένουσες τάσεις δεν επηρεάζουν την αντοχή του τεμαχίου.

Όσον αφορά στις παραμορφώσεις, ενώ το διάγραμμα της συνολικής παραμόρφωσης έχει μια αξία ως εποπτικό μέσο για το κατά πόσο το τεμάχιο βρίσκεται εντός του πεδίου ανοχών, για να εξακριβωθεί αν το παραπάνω ισχύει πρέπει να μελετηθούν τα σημεία ενδιαφέροντος με λεπτομέρεια όπως και γίνεται παρακάτω.



Εικόνα 76. Παραμόρφωση κατά τον άξονα Z της βάσης του Solid χωρίς heat treatment.

Η πρώτη γεωμετρική ανοχή που εξετάζεται είναι η επιπεδότητα της βάσης του τεμαχίου η οποία δίνεται ίση με 0.254mm. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 76 η μέγιστη κάθετη απόσταση μεταξύ του ψηλότερου και το χαμηλότερου σημείου είναι $0.188 - (-0.13) = 0.318\text{mm}$ που σημαίνει ότι το τεμάχιο χρήζει περαιτέρω κατεργασίας ή επανασχεδιασμού.



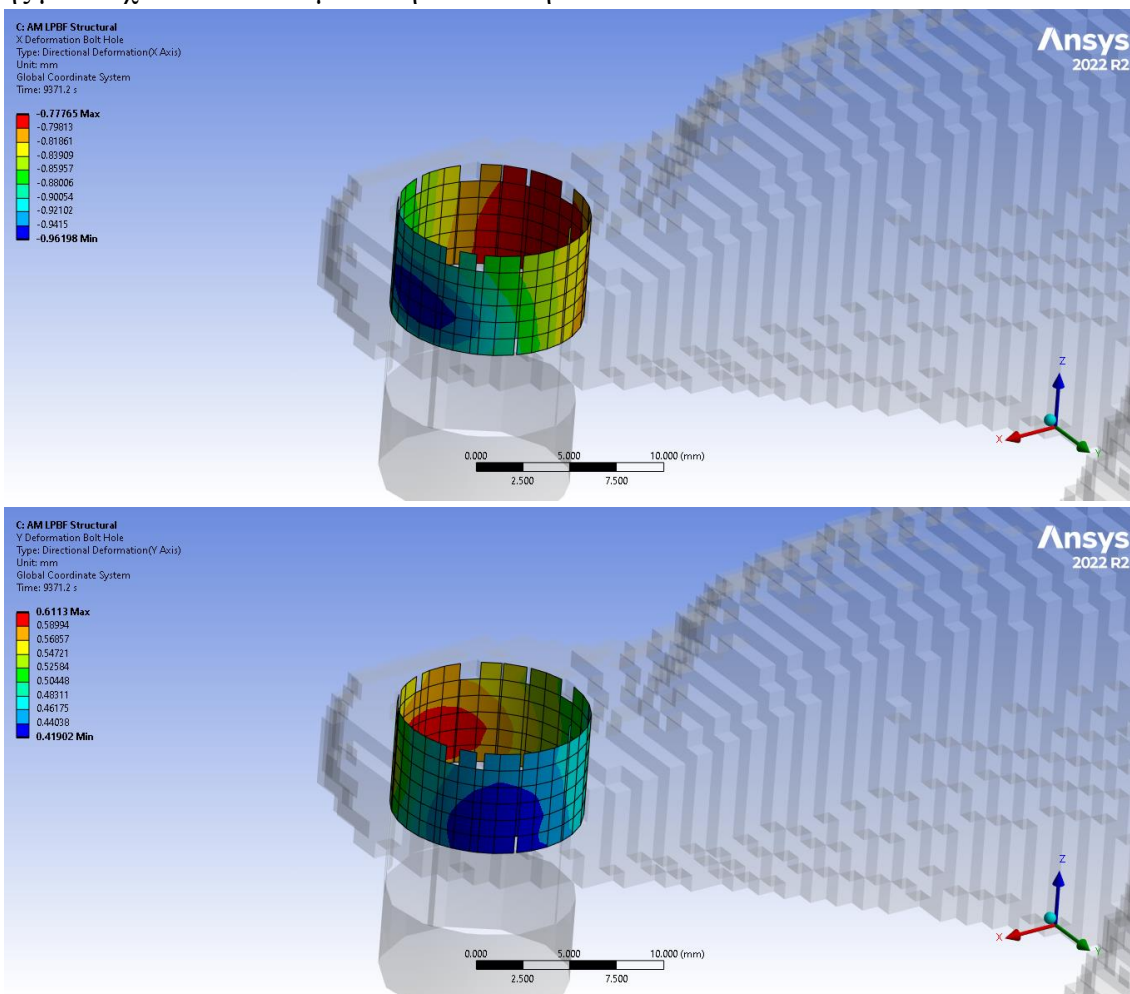
Εικόνα 77. Παραμόρφωση κατά Y και Z της περιφέρειας των οπών πείρο, του Solid χωρίς heat treatment.

Στη συνέχεια εξετάζεται το κατά πόσο τηρείται η ανοχή κυλινδρικότητας και τοποθέτησης στις σπές του πείρου. Δεν δίνεται κάποια συγκεκριμένη τιμή για την ανοχή κυλινδρικότητας οπότε μπορεί να θεωρηθεί μια ικανοποιητική στα 0.254mm ενώ για την τοποθέτηση ο στόχος είναι τα 0.5mm.

Το ANSYS δίνει σαν αποτέλεσμα την μέση μετατόπιση όλων των σημείων της περιφέρειας της οπής η οποία τιμή μπορεί να θεωρηθεί ως η νέα θέση του κέντρου των σπών όπου για την κατεύθυνση Y είναι -0.417mm και για την Z -0.517mm άρα συνολικά στο επίπεδο YZ είναι $[(0.417)^2+(0.517)^2]^{1/2} = 0.664\text{mm}$ δηλαδή δεν τηρείται η ανοχή τοποθέτησης και χρειάζεται επανασχεδιασμός του τεμαχίου.

Όσο για την ανοχή κυλινδρικότητας εξετάζεται το κατά πόσο η μέγιστα παραμορφωμένες προκύπτουσες “διάμετροι” κατά Y και κατά Z βρίσκονται εντός του πεδίου ανοχών. Για την κατεύθυνση Y η μέγιστα παραμορφωμένη διάμετρος μεταβάλεται κατά $-0.51 - (-0.33) = -0.18\text{mm}$ ενώ για τη Z μεταβάλεται κατά $-0.66 - (-0.44) = -0.22\text{mm}$ επομένως τηρείται η ανοχή κυλινδρικότητας.

Όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της συστολής του υλικού μετά το πέρας της εκτόπωσης η διάμετρος της οπής έχει κατά μέσο όρο μικρύνει. Σε περίπτωση όπου η οπή θα έβγαине εκτός ανοχών κυλινδρικότητας τότε θα χρειαζόταν είτε περαιτέρω επεξεργασία για την διάνοιξη οπής αποδεκτής διαμέτρου ή επανασχεδιασμός όπου θα γινόταν υπερδιαστασιολόγηση της οπής με στόχο να αντισταθμίσει την συστολή



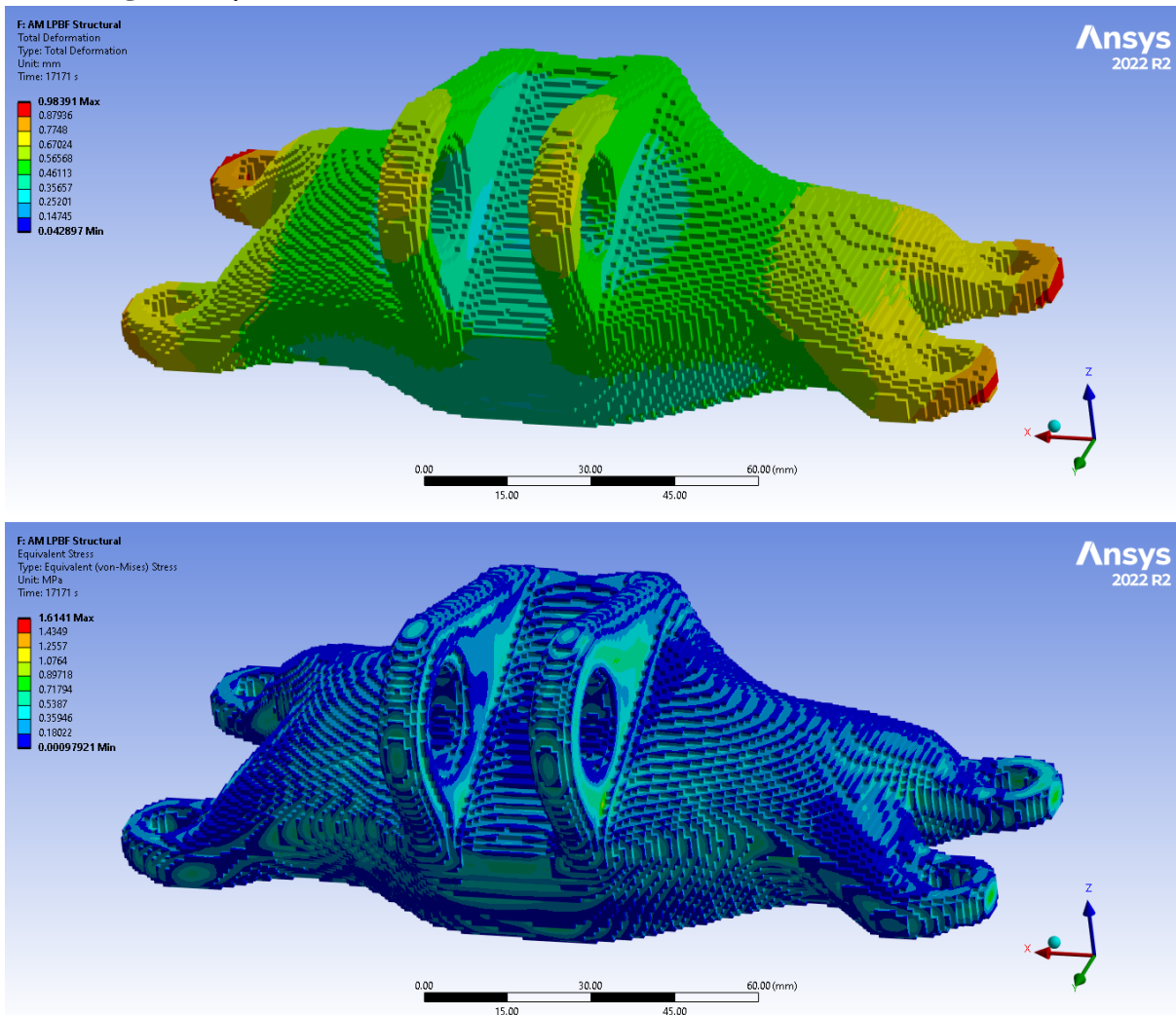
Εικόνα 78. Παραμόρφωση κατά X και Y της περιφέρειας οπής κοιλία στήριξης του Solid χωρίς heat treatment.

Αντίστοιχη διαδικασία όπως αυτή για τις οπές του πείρου ακολουθήθηκε και για τις οπές για τους κοχλίες στήριξης. Για αυτές τις οπές δίνεται ξανά ανοχή τοποθέτησης 0.5mm ενώ δίνεται η μέγιστη επιτρεπτή εσωτερική διάμετρος 10.287mm με ονομαστική τιμή τα 10mm. Επειδή σε αντίθεση με τις οπές του πείρου οι τέσσερις αυτές οπές διαφέρουν μεταξύ τους εξετάζεται η δυσμενέστερη περίπτωση της οπής που βρίσκεται μακρύτερα από το κύριο σώμα του τεμαχίου.

Η μέση μετατόπιση του κέντρου στην X κατεύθυνση είναι -0.43mm και για την Y είναι 0.25mm οπότε η συνολική μετατόπιση στη επίπεδη XY είναι $[(-0.43)^2 + (0.25)^2]^{1/2} = 0.497\text{mm}$ δηλαδή τηρείται η ανοχή τοποθέτησης.

Για τον περιορισμό μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου, η μέγιστη παραμορφωμένη διάμετρος για την κατεύθυνση X μεταβάλλεται κατά $-0.96 - (-0.80) = -0.16\text{mm}$ ενώ για τη Y μεταβάλλεται κατά $-0.61 - 0.45 = 0.22\text{mm}$ επομένως τηρείται ο περιορισμός της μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου.

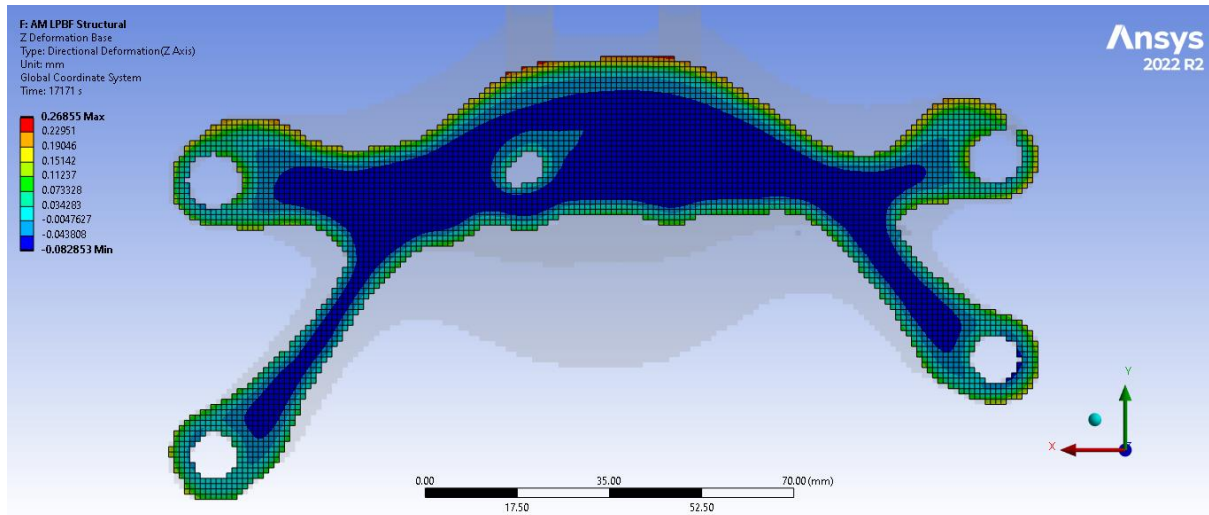
Overhang Solid (με heat treatment)



Εικόνα 79. Συνολική Παραμόρφωση και Παραμένονες Τάσεις για το Solid με heat treatment.

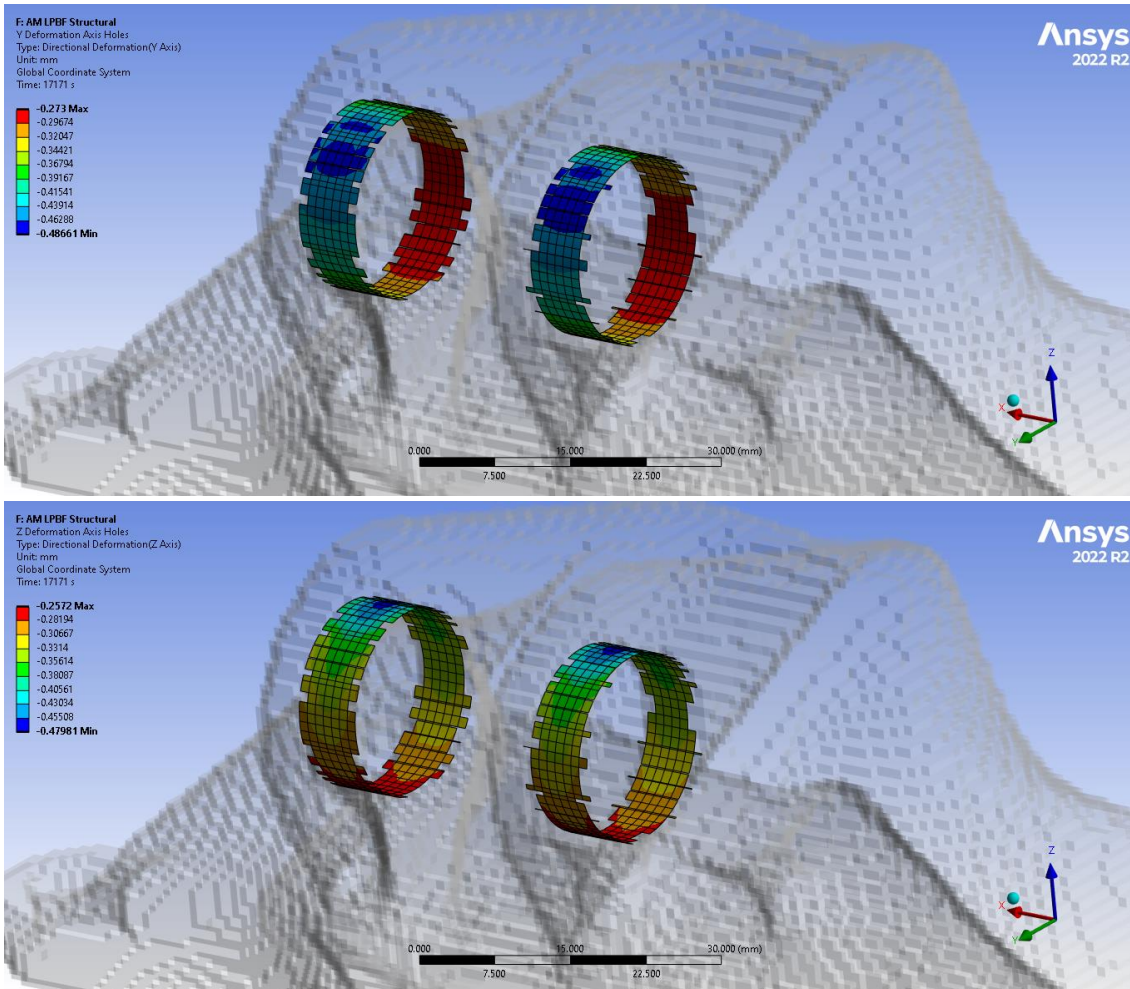
Σαν μια συνολική εικόνα δεν φαίνεται να έχουν εμφανιστεί μεγάλες παραμορφώσεις αλλά ούτε και ιδιαίτερα μεγάλες παραμένουσες τάσεις. Επίσης όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω του heat treatment, παρατηρείται ήδη μείωση των τιμών και των δύο μεγεθών.

Για τις παραμένουσες τάσεις συγκεκριμένα, αν γίνει διασταύρωση με τις στατικές αναλύσεις του nTopology φαίνεται ότι τα σημεία στα οποία εμφανίζεται η μέγιστη παραμένουσα τάση των 1.6MPa είναι σημεία που κατά τα άλλα δεν δέχονται κάποια άλλη σημαντική φόρτιση. Επομένως οι παραμένουσες τάσεις δεν επηρεάζουν την αντοχή του τεμαχίου.



Εικόνα 80. Παραμόρφωση κατά τον άξονα Z της βάσης του Solid με heat treatment.

Η πρώτη γεωμετρική ανοχή που εξετάζεται είναι η επιπεδότητα της βάσης του τεμαχίου η οποία δίνεται ίση με 0.254mm. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 80 η μέγιστη κάθετη απόσταση μεταξύ του ψηλότερου και το χαμηλότερου σημείου είναι $0.268 - (-0.083) = 0.351\text{mm}$ που σημαίνει ότι το τεμάχιο χρήζει περαιτέρω κατεργασίας ή επανασχεδιασμού.



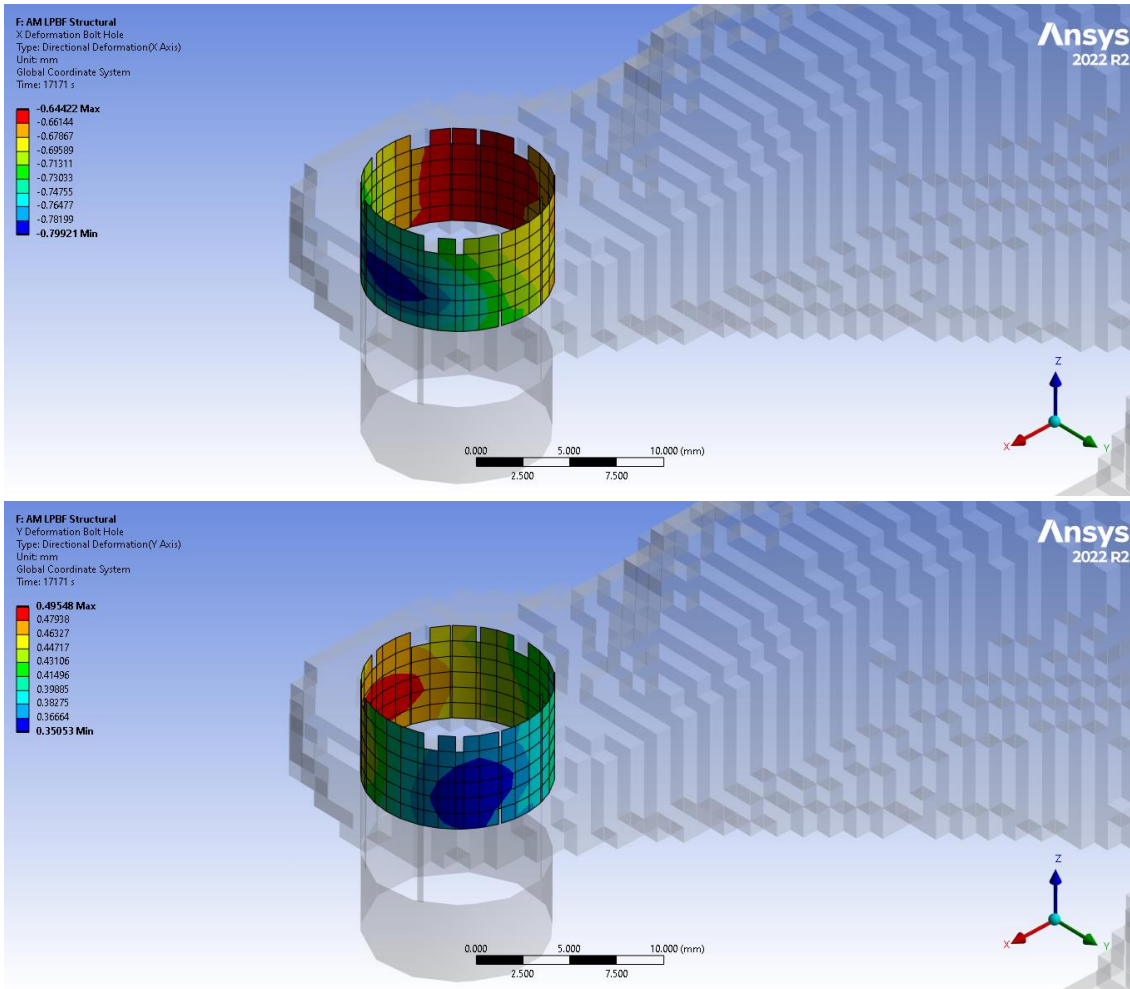
Εικόνα 81. Παραμόρφωση κατά Y και Z της περιφέρειας των οπών πείρου του Solid με heat treatment.

Στη συνέχεια εξετάζεται το κατά πόσο τηρείται η ανοχή κυλινδρικότητας και τοποθέτησης στις οπές του πείρου. Δεν δίνεται κάποια συγκεκριμένη τιμή για την ανοχή κυλινδρικότητας οπότε μπορεί να θεωρηθεί μια ικανοποιητική στα 0.254mm ενώ για την τοποθέτηση ο στόχος είναι τα 0.5mm.

Για τον προσδιορισμό της νέας θέσης των κέντρων των οπών ακολουθείται η ίδια διαδικασία με πριν και προκύπτει ότι για την κατεύθυνση Y είναι -0.363mm και για την Z -0.334mm άρα συνολικά στο επίπεδο YZ είναι $[(0.363)^2+(0.334)^2]^{1/2} = 0.493\text{mm}$ δηλαδή τηρείται η ανοχή τοποθέτησης.

Όσο για την ανοχή κυλινδρικότητας εξετάζεται το κατά πόσο η μέγιστη παραμορφωμένες προκύπτουσες “διάμετροι” κατά Y και κατά Z βρίσκονται εντός του πεδίου ανοχών. Για την κατεύθυνση Y η μέγιστη παραμορφωμένη διάμετρος μεταβάλεται κατά $-0.438 - (-0.288) = -0.15\text{mm}$ ενώ για τη Z μεταβάλεται κατά $-0.459 - (-0.28) = -0.179\text{mm}$ επομένως τηρείται και η ανοχή κυλινδρικότητας.

Όπως ήταν αναμενόμενο λόγω της συστολής του υλικού μετά το πέρας της εκτύπωσης η διάμετρος της οπής έχει κατά μέσο όρο μικρύνει. Σε περίπτωση όπου η οπή θα έβγαινε εκτός ανοχών τότε θα χρειαζόταν είτε περαιτέρω επεξεργασία για την διάνοιξη οπής αποδεκτής διαμέτρου ή επανασχεδιασμένος όπου θα γινόταν υπερδιαστασιολόγηση της οπής με στόχο να αντισταθμίσει την συστολή



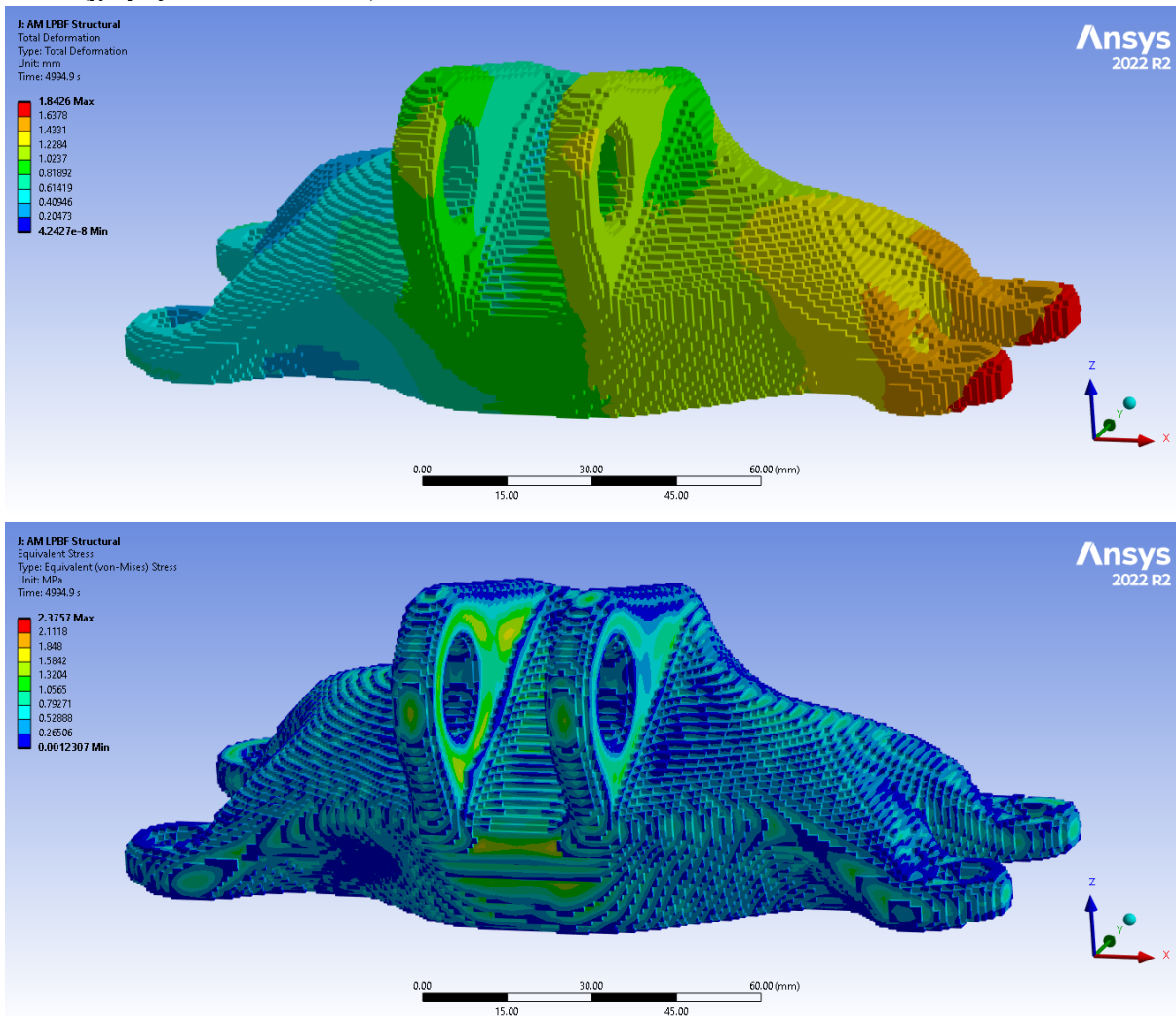
Εικόνα 82. Παραμόρφωση κατά X και Y της περιφέρειας οπής κοχλίας στήριξης του Solid με heat treatment.

Αντίστοιχη διαδικασία όπως αυτή για τις οπές του πείρου ακολουθήθηκε και για τις οπές για τους κοχλίες στήριξης. Για αυτές τις οπές δίνεται ξανά ανοχή τοποθέτησης 0.5mm ενώ δίνεται η μέγιστη επιτρεπτή εσωτερική διάμετρος 10.287mm με ονομαστική τιμή τα 10mm. Επειδή σε αντίθεση με τις οπές του πείρου οι τέσσερις αυτές οπές διαφέρουν μεταξύ τους εξετάζεται η δυσμενέστερη περίπτωση της οπής που βρίσκεται μακρύτερα από το κύριο σώμα του τεμαχίου.

Η μέση μετατόπιση του κέντρου στην X κατεύθυνση είναι -0.354mm και για την Y είναι 0.214mm οπότε η συνολική μετατόπιση στη επίπεδη XY είναι $[(-0.354)^2 + (0.214)^2]^{1/2} = 0.413\text{mm}$ δηλαδή τηρείται η ανοχή τοποθέτησης.

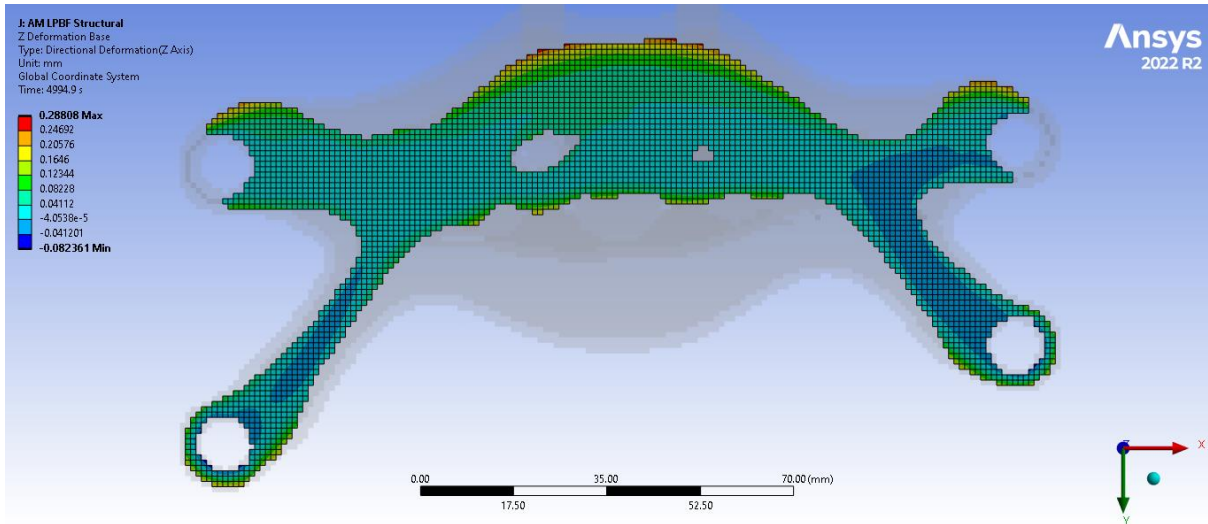
Για τον περιορισμό μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου, η μέγιστη παραμορφωμένη διάμετρος για την κατεύθυνση X μεταβάλεται κατά $-0.795 - (-0.66) = -0.135\text{mm}$ ενώ για τη Y μεταβάλεται κατά $-0.492 - 0.388 = 0.104\text{mm}$ επομένως τηρείται ο περιορισμός της μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου.

Shell (χωρίς heat treatment)



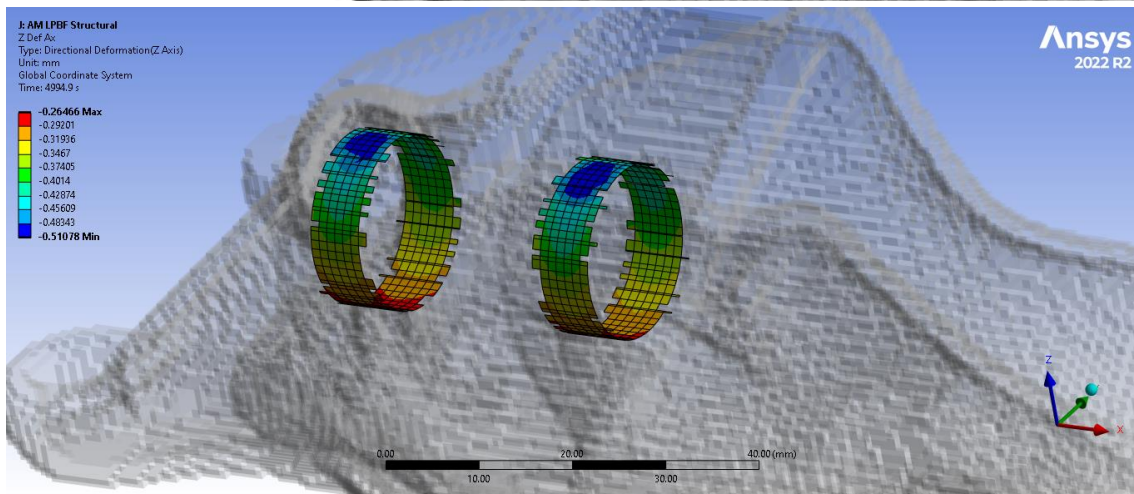
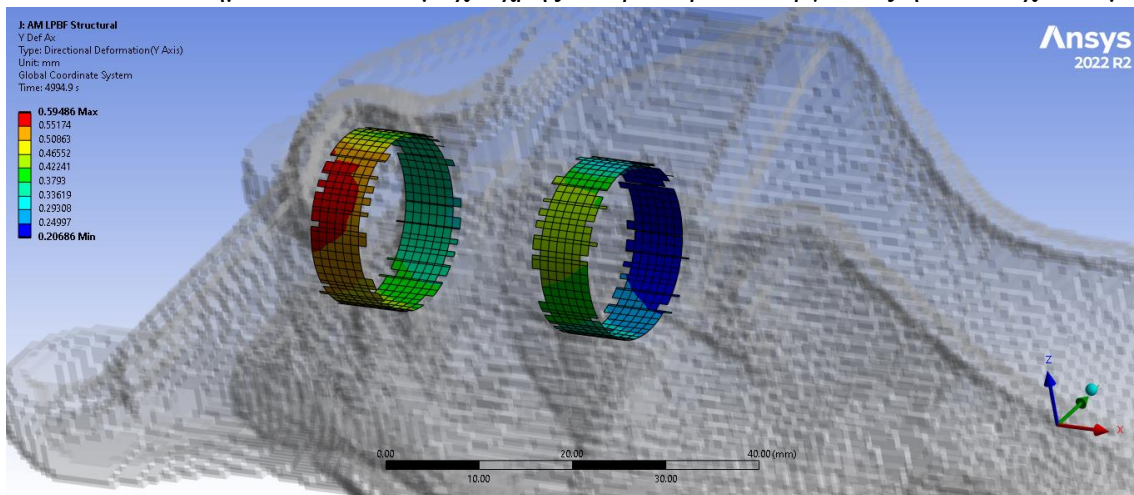
Εικόνα 83. Συνολική Παραμόρφωση και Παραμένουσες Τάσεις για το Shell χωρίς heat treatment.

Σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση του Solid παρατηρούνται σημαντικά μεγαλύτερες συνολικές παραμορφώσεις με την μέγιστη τιμή να είναι σχεδόν διπλάσια. Κοιτώντας τις παραμένουσες τάσεις, αν γίνει διασταύρωση με τις στατικές αναλύσεις του nTopology φαίνεται ότι τα σημεία στα οποία εμφανίζεται η μέγιστη παραμένουσα τάση των 2.38MPa είναι σημεία που κατά τα άλλα δεν δέχονται κάποια άλλη σημαντική φόρτιση. Επομένως οι παραμένουσες τάσεις δεν επηρεάζουν την αντοχή του τεμαχίου.



Εικόνα 84. Παραμόρφωση κατά τον άξονα Z της βάσης του Shell χωρίς heat treatment.

Η πρώτη γεωμετρική ανοχή που εξετάζεται είναι η επιπεδότητα της βάσης του τεμαχίου η οποία δίνεται ίση με 0.254mm. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 84 η μέγιστη κάθετη απόσταση μεταξύ του ψηλότερου και το χαμηλότερου σημείου είναι $0.288 - (-0.008) = 0.296\text{mm}$ που σημαίνει ότι το τεμάχιο χρήζει περαιτέρω κατεργασίας ή επανασχεδιασμού.

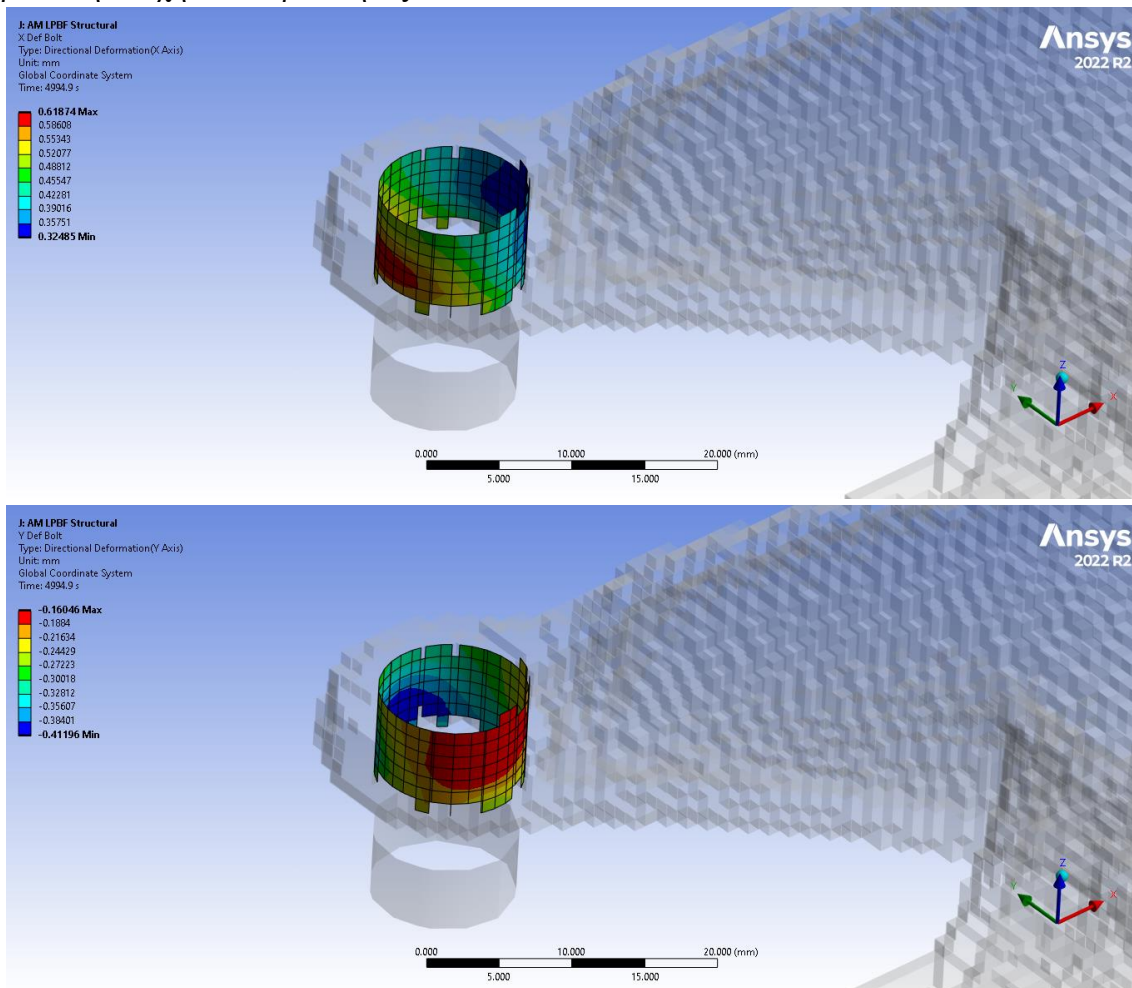


Εικόνα 85. Παραμόρφωση κατά Y και Z της περιφέρειας των οπών πείρον του Shell χωρίς heat treatment.

Στη συνέχεια εξετάζεται το κατά πόσο τηρείται η ανοχή κυλινδρικότητας και τοποθέτησης στις οπές του πείρου. Δεν δίνεται κάποια συγκεκριμένη τιμή για την ανοχή κυλινδρικότητας οπότε μπορεί να θεωρηθεί μια ικανοποιητική στα 0.254mm ενώ για την τοποθέτηση ο στόχος είναι τα 0.5mm. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις οι δύο οπές διαφέρουν ως προς το πόσο παραμορφώνονται με την, όπως φαίνεται στην εικόνα 85, αριστερή οπή να παραμορφώνεται περισσότερο. Έτσι θεωρήθηκε σκόπιμο να ελεγχθεί μόνο αυτή ως προς τις ανοχές της όντας η δυσμενέστερη περίπτωση.

Για τον προσδιορισμό της νέας θέσης του κέντρου της οπής ακολουθείται η ίδια διαδικασία με πριν και προκύπτει ότι για την κατεύθυνση Y είναι 0.385mm και για την Z - 0.369mm άρα συνολικά στο επίπεδο YZ είναι $[(0.385)^2 + (0.369)^2]^{1/2} = 0.533\text{mm}$ δηλαδή δεν τηρείται η ανοχή τοποθέτησης και το τεμάχιο χρήζει επανασχεδιασμού.

Όσο για την ανοχή κυλινδρικότητας εξετάζεται το κατά πόσο η μέγιστα παραμορφωμένες προκύπτουσες “διάμετροι” κατά Y και κατά Z βρίσκονται εντός του πεδίου ανοχών. Για την κατεύθυνση Y η μέγιστα παραμορφωμένη διάμετρος μεταβάλλεται κατά $0.546 - 0.334 = 0.212\text{mm}$ ενώ για τη Z μεταβάλλεται κατά $-0.507 - (-0.312) = -0.195\text{mm}$ επομένως τηρείται η ανοχή κυλινδρικότητας.



Εικόνα 86. Παραμόρφωση κατά X και Y της περιφέρειας οπής κοχλία στήριξης του Shell χωρίς heat treatment.

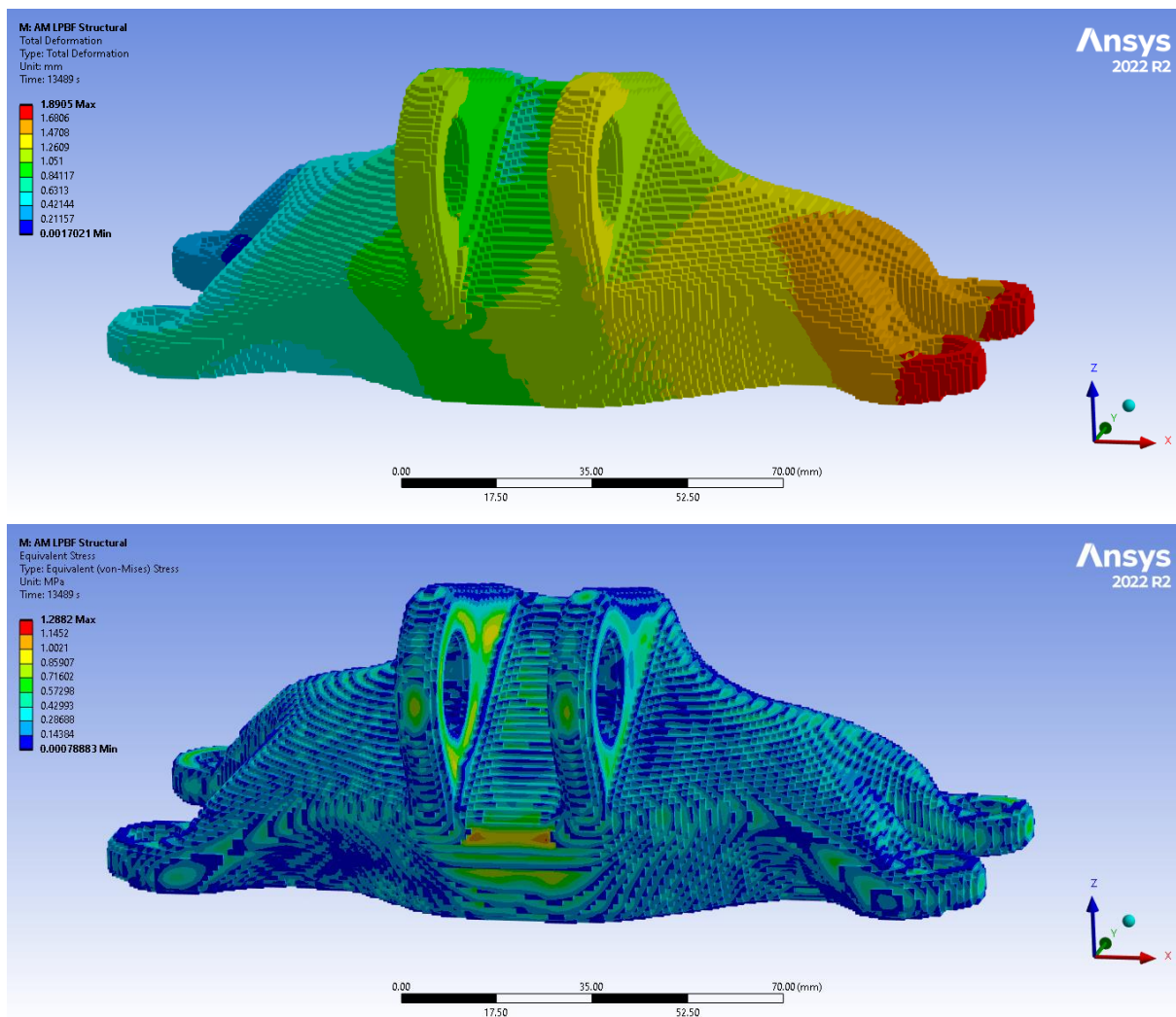
Αντίστοιχη διαδικασία όπως αυτή για τις οπές του πείρου ακολουθήθηκε και για τις οπές για τους κοχλίες στήριξης. Για αυτές τις οπές δίνεται ξανά ανοχή τοποθέτησης 0.5mm ενώ δίνεται η μέγιστη επιτρεπτή εσωτερική διάμετρος 10.287mm με ονομαστική τιμή τα 10mm.

Επειδή σε αντίθεση με τις οπές του πείρου οι τέσσερις αυτές οπές διαφέρουν μεταξύ τους εξετάζεται η δυσμενέστερη περίπτωση της οπής που βρίσκεται μακρύτερα από το κύριο σώμα του τεμαχίου.

Η μέση μετατόπιση του κέντρου στην X κατεύθυνση είναι 0.261mm και για την Y είναι -0.153mm οπότε η συνολική μετατόπιση στη επίπεδη XY είναι $[(0.261)^2 + (0.153)^2]^{1/2} = 0.303\text{mm}$ δηλαδή τηρείται η ανοχή τοποθέτησης.

Για τον περιορισμό μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου, η μέγιστα παραμορφωμένη διάμετρος για την κατεύθυνση X μεταβάλεται κατά $0.612 - 0.324 = 0.288\text{mm}$ ενώ για τη Y μεταβάλεται κατά $-0.411 - 0.175 = 0.236\text{mm}$ επομένως οριακά δεν τηρείται ο περιορισμός της μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου.

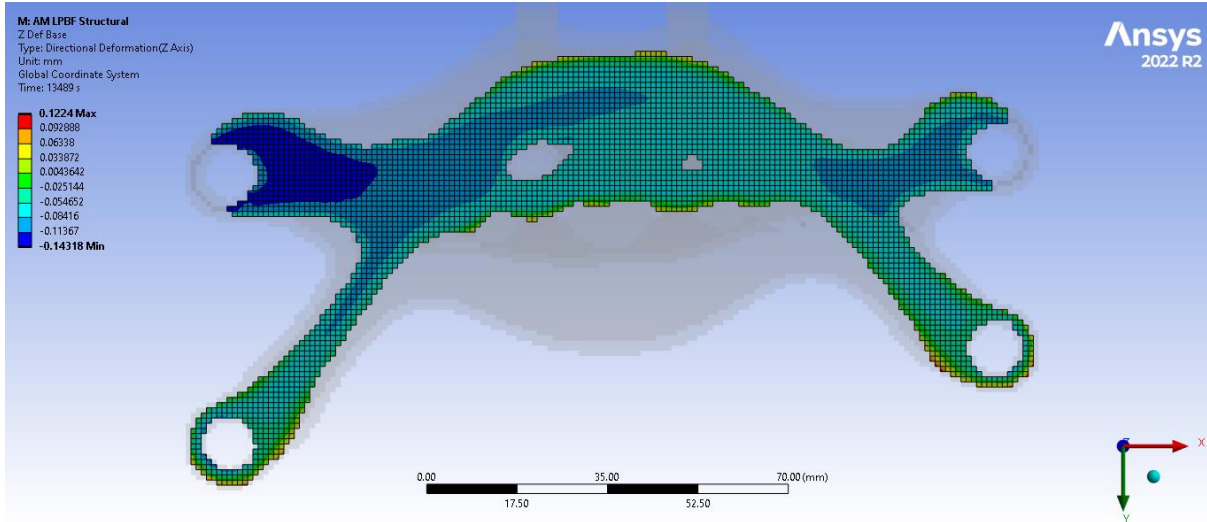
Shell (με heat treatment)



Εικόνα 87. Συνολική Παραμόρφωση και Παραμένουσες Τάσεις για το Shell με heat treatment.

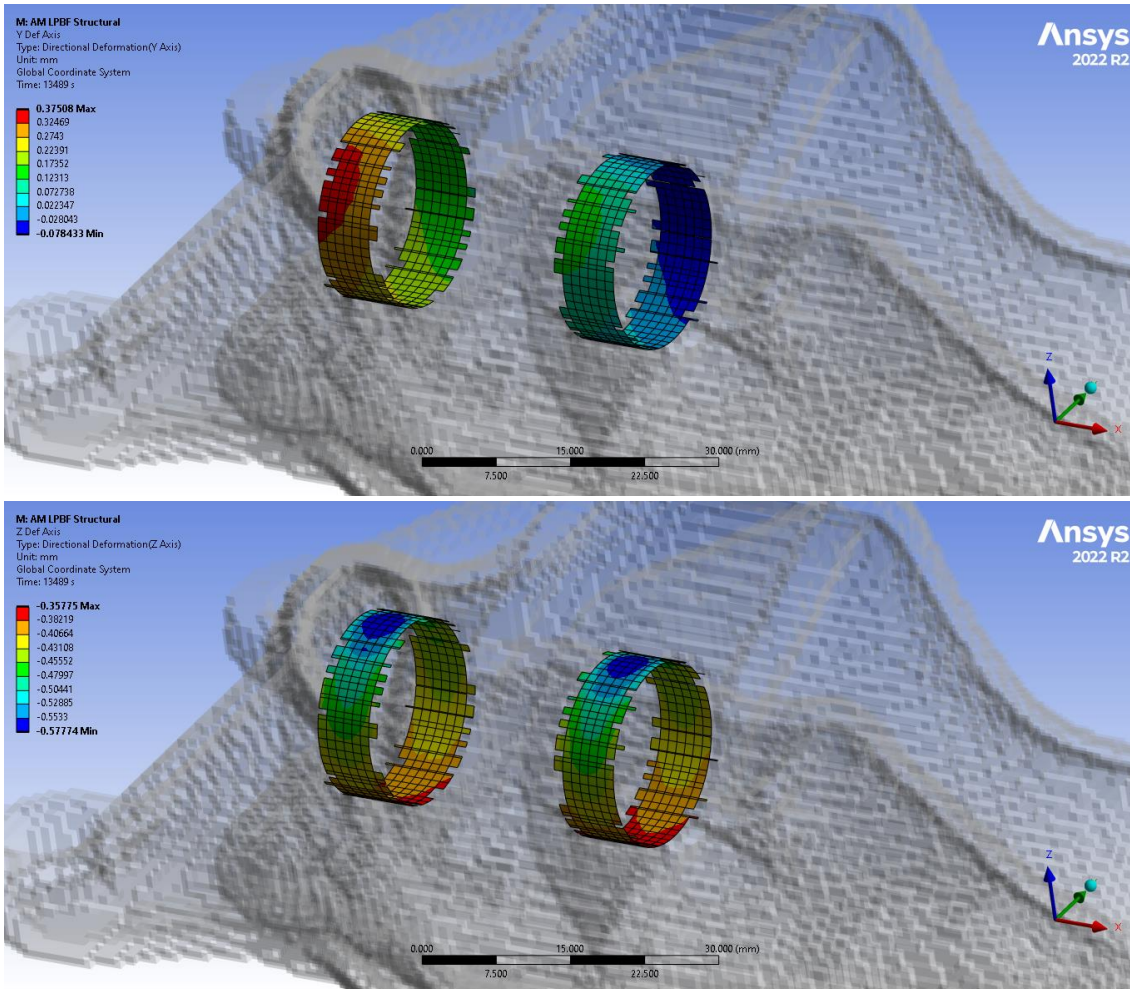
Οι τιμές της μέγιστης και της ελάχιστης παραμόρφωσης είναι ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με τη προηγούμενη περίπτωση.

Σχετικά με τις παραμένουσες τάσεις, όπως ήταν αναμενόμενο, μειώνονται σημαντικά περίπου στο μισό. Και σε αυτή τη περίπτωση, αν γίνει διασταύρωση με τις με τις στατικές αναλύσεις του nTopology φαίνεται ότι τα σημεία στα οποία εμφανίζεται η μέγιστη παραμένουσα τάση των 1.29MPa είναι σημεία που κατά τα άλλα δεν δέχονται κάποια άλλη σημαντική φόρτιση. Επομένως οι παραμένουσες τάσεις δεν επηρεάζουν την αντοχή του τεμαχίου.



Εικόνα 88. Παραμόρφωση κατά τον άξονα Z της βάσης του Shell με heat treatment.

Η πρώτη γεωμετρική ανοχή που εξετάζεται είναι η επιπεδότητα της βάσης του τεμαχίου η οποία δίνεται ίση με 0.254mm. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 88 η μέγιστη κάθετη απόσταση μεταξύ του ψηλότερου και το χαμηλότερου σημείου είναι $0.122 - (-0.14) = 0.262\text{mm}$ που σημαίνει ότι το τεμάχιο χρήζει περαιτέρω κατεργασίας ή επανασχεδιασμού.

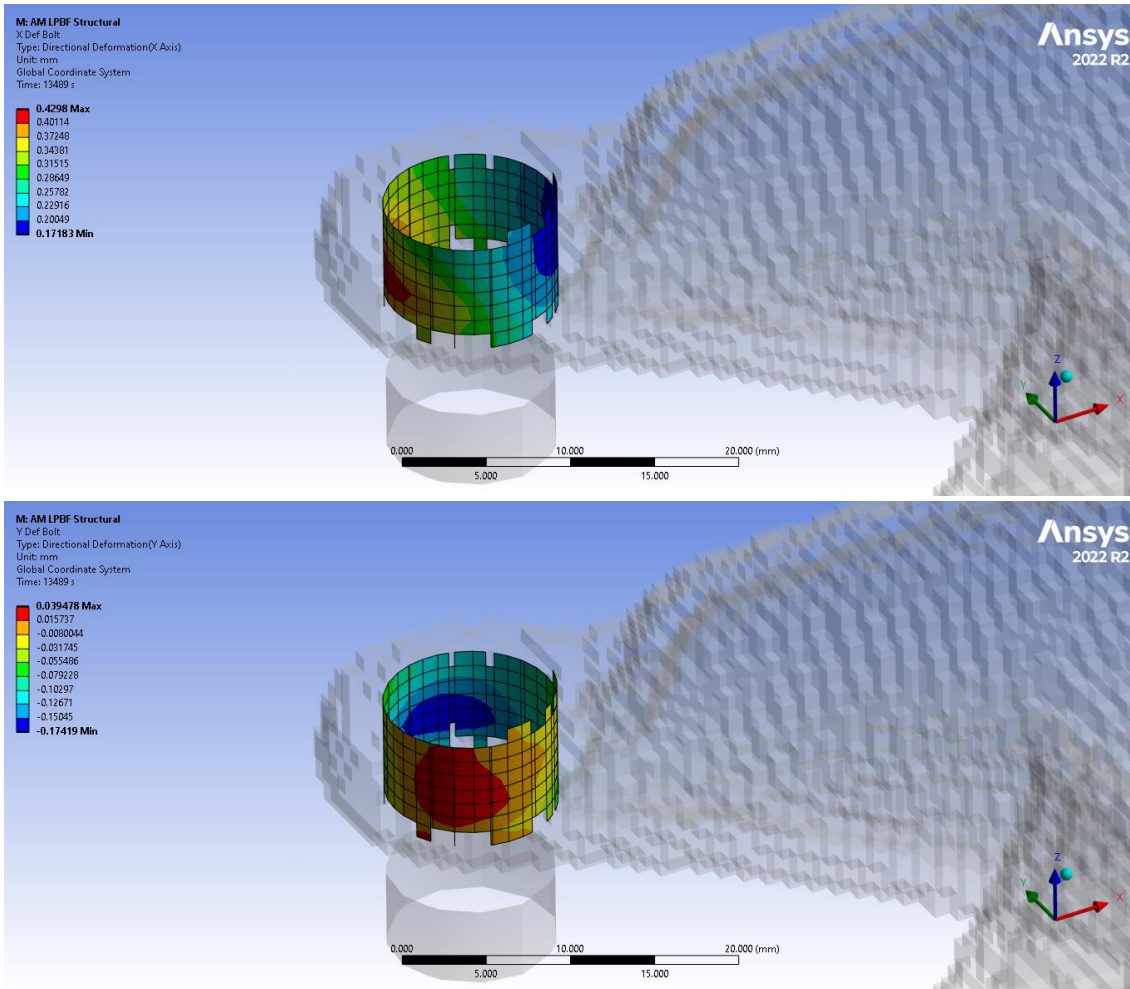


Εικόνα 89. Παραμόρφωση κατά Y και Z της περιφέρειας των οπών πείρου του Shell με heat treatment.

Στη συνέχεια εξετάζεται το κατά πόσο τηρείται η ανοχή κυλινδρικότητας και τοποθέτησης στις οπές του πείρου. Δεν δίνεται κάποια συγκεκριμένη τιμή για την ανοχή κυλινδρικότητας οπότε μπορεί να θεωρηθεί μια ικανοποιητική στα 0.254mm ενώ για την τοποθέτηση ο στόχος είναι τα 0.5mm. Όπως και στην αμέσως προηγούμενη περίπτωση οι δύο οπές διαφέρουν ως προς το πόσο παραμορφώνονται με την, όπως φαίνεται στην εικόνα 89, αριστερή οπή να παραμορφώνεται περισσότερο. Έτσι θεωρήθηκε σκόπιμο να ελεγχθεί μόνο αυτή ως προς τις ανοχές της όντας η δυσμενέστερη περίπτωση.

Για τον προσδιορισμό της νέας θέσης του κέντρου της οπής ακολουθείται η ίδια διαδικασία με πριν και προκύπτει ότι για την κατεύθυνση Y είναι 0.128mm και για την Z - 0.440mm άρα συνολικά στο επίπεδο YZ είναι $[(0.128)^2 + (0.440)^2]^{1/2} = 0.458\text{mm}$ δηλαδή πλέον τηρείται η ανοχή τοποθέτησης.

Όσο για την ανοχή κυλινδρικότητας εξετάζεται το κατά πόσο η μέγιστα παραμορφωμένες προκύπτουσες “διάμετροι” κατά Y και κατά Z βρίσκονται εντός του πεδίου ανοχών. Για την κατεύθυνση Y η μέγιστα παραμορφωμένη διάμετρος μεταβάλλεται κατά $0.319 - 0.127 = 0.192\text{mm}$ ενώ για τη Z μεταβάλλεται κατά $-0.568 - (-0.375) = -0.193\text{mm}$ επομένως τηρείται και η ανοχή κυλινδρικότητας.



Εικόνα 90. Παραμόρφωση κατά X και Y της περιφέρειας οπής κοχλία στήριξης του Shell με heat treatment.

Αντίστοιχη διαδικασία όπως αυτή για τις οπές του πείρου ακολουθήθηκε και για τις οπές για τους κοχλίες στήριξης. Για αυτές τις οπές δίνεται ξανά ανοχή τοποθέτησης 0.5mm ενώ δίνεται η μέγιστη επιτρεπτή εσωτερική διάμετρος 10.287mm με ονομαστική τιμή τα 10mm. Επειδή σε αντίθεση με τις οπές του πείρου οι τέσσερις αυτές οπές διαφέρουν μεταξύ τους εξετάζεται η δυσμενέστερη περίπτωση της οπής που βρίσκεται μακρύτερα από το κύριο σώμα του τεμαχίου.

Η μέση μετατόπιση του κέντρου στην X κατεύθυνση είναι 0.163mm και για την Y είναι -0.033mm οπότε η συνολική μετατόπιση στη επίπεδη XY είναι $[(0.163)^2 + (0.033)^2]^{1/2} = 0.166\text{mm}$ δηλαδή τηρείται η ανοχή τοποθέτησης.

Για τον περιορισμό μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου, η μέγιστη παραμορφωμένη διάμετρος για την κατεύθυνση X μεταβάλλεται κατά $0.422 - 0.199 = 0.223\text{mm}$ ενώ για τη Y μεταβάλλεται κατά $-0.018 - (-0.169) = 0.187\text{mm}$ επομένως τηρείται και ο περιορισμός της μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου.

Αν και σαν αριθμητικές τιμές η μέγιστη και η μέση ολική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερες παρατηρείται ότι οι παραμορφώσεις στα σημεία όπου γίνεται ο έλεγχος για τις ανοχές είναι σημαντικά μικρότερες και μάλιστα αρκετά ώστε να παρακάμψει την ανάγκη επανασχεδιασμού του Shell όσον αφορά στη μέγιστη επιτρεπτή εσωτερική διάμετρο των οπών των κοχλιών.

Συνολικά, προκειμένου να γίνει πιο εύκολα αντιληπτή η διαφορά στις επιδόσεις κάθε περίπτωσης, παραθέτονται πινακοποιημένα όλα τα αποτελέσματα της παρούσας παραγράφου.

Περίπτωση	Π1	Π2	Π3	Π4
Solid	1,168	0,932	3,242	0,270
Solid με Heat Treatment	0,984	0,447	1,614	0,422
Shell	1,843	0,785	2,376	0,465
Shel με Heat Treatment	1,890	0,930	1,288	0,270

Πίνακας 5. Πίνακας γενικών αποτελεσμάτων προσομοιώσεων όπου : Π1 Μέγιστη Ολική Παραμόρφωση (mm), Π2, Μέση Ολική Παραμόρφωση (mm), Π3 Μέγιστη Παραμένουσα Τάση (MPa), Π4 Μέση Παραμένουσα Τάση (MPa).

Περίπτωση	Π5	Π16
Solid	0,318	X
Solid με Heat Treatment	0,351	X
Shell	0,296	X
Shel με Heat Treatment	0,262	X

Πίνακας 6. Πίνακας αποτελεσμάτων που αφορούν τη βάση όπου : Π5 Μέγιστη Κατακόρυφη Απόσταση Ακραίων Σημείων Βάσης (mm), Π16 Επιπεδότητα Βάσης.

Περίπτωση	Π6	Π7	Π8	Π9	Π10	Π17	Π18
Solid	-0,417	-0,517	0,664	-0,180	-0,220	X	✓
Solid με Heat Treatment	-0,363	-0,334	0,493	-0,150	-0,179	✓	✓
Shell	0,385	-0,369	0,533	0,212	-0,195	✓	✓
Shel με Heat Treatment	0,128	-0,440	0,458	0,192	-0,193	✓	✓

Πίνακας 7. Πίνακας αποτελεσμάτων που αφορούν τις οπές πείρου όπου : Π6 Μετακίνηση Κέντρου Οπών Πείρου κατά Y (mm), Π7 Μετακίνηση Κέντρου Οπών Πείρου κατά Z (mm), Π8 Μετακίνηση Κέντρου Οπών Πείρου κατά YZ (mm), Π9 Μέγιστη Απόκλιση Διαμέτρου Οπών Πείρου Κατά Y (mm), Π10 Μέγιστη Απόκλιση Διαμέτρου Οπών Πείρου Κατά Z (mm) , Π17 Τοποθέτηση Κέντρου Οπών Πείρου, Π18 Κυλινδricότητα Οπών Πείρου.

Περίπτωση	Π11	Π12	Π13	Π14	Π15	Π19	Π20
Solid	-0,430	0,250	0,497	-0,160	0,220	✓	✓
Solid με Heat Treatment	-0,354	0,214	0,413	-0,135	0,104	✓	✓
Shell	0,261	-0,153	0,303	0,288	0,236	✓	X
Shel με Heat Treatment	0,163	-0,033	0,166	0,223	0,187	✓	✓

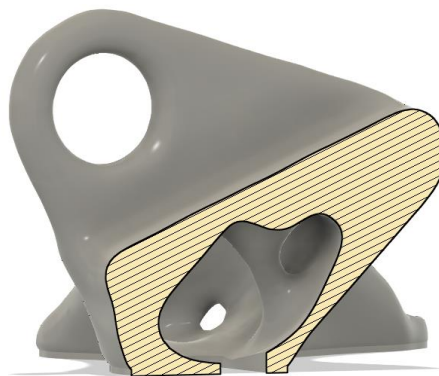
Πίνακας 8. Πίνακας αποτελεσμάτων που αφορούν τις οπές κοχλιών όπου : Π11 Μετακίνηση Κέντρου Οπών Κοχλιών κατά X (mm), Π12 Μετακίνηση Κέντρου Οπών Πείρου κατά Y (mm), Π13 Μετακίνηση Κέντρου Οπών Πείρου κατά XY (mm), Π14 Μέγιστη Απόκλιση Διαμέτρου Οπών Κοχλιών Κατά X (mm), Π15 Μέγιστη Απόκλιση Διαμέτρου Οπών Κοχλιών Κατά Y (mm), Π19 Τοποθέτηση Κέντρων Οπών Κοχλιών, Π20 Μέγιστη Εσωτερική Διάμετρος.

5.4.2 Αξιολόγηση και Επανασχεδιασμός

Αξιολόγηση Solid

Προδιαγραφές :

- Ενδεικνυόμενη χρήση. Έδρανο στήριξης πείρου.
- Περιορισμός Μεγέθους. Κανένας περιορισμός
- Ανάγκη για χρήση υποστηρικτικής γεωμετρίας. ΝΑΙ για τη δημιουργία ψευδοβάσης και στις οπές του πείρου για επιπλέον ασφάλεια. Η ψευδοβάση (raft) προτείνεται σε όλα τα τεμάχια που πρόκειται να παραχθούν με LPBF γιατί αφενός βοηθάει με την ομοιόμορφη ψύξη του τεμαχίου και αφετέρου με την αφαίρεσή του από την επιφάνεια εκτύπωσης.
- Ποιότητα επιφάνειας. Κανένας περιορισμός.
- Ανάγκη για αφαίρεση σκόνης. ΝΑΙ. Αν και συμπαγές το Solid έχει μια, σχεδόν, κλειστή κοιλότητα όπως φαίνεται στην Εικόνα 91.



Εικόνα 91. Όψη σε εγκάρσια τομή του Solid.

Δομές Ενδιαφέροντος :

- Οργανικές δομές. Ολόκληρο το τεμάχιο έχει οργανικό σχήμα.
- Δομοστοιχειωτές δομές. ΟΧΙ.
- Ελάχιστες επιτρεπτές καμπυλότητες. Δεν υπάρχουν σημεία με μικρές καμπυλότητες.
- Λειτουργικά κανάλια και κοιλότητες. ΟΧΙ.

Περιορισμοί Τεχνολογίας :

- Μέγιστα/Ελάχιστα μεγέθη γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Δεν υπάρχουν γεωμετρίες που φτάνουν αυτά τα όρια, εν προκειμένω 100μm στον Z και 20-200μm στο επίπεδο XY.
- Ανοχές. Όλες οι σχετικές πληροφορίες αναγράφονται στη παράγραφο 5.4.1
- Αποδεκτή τοπική απόκλιση πάχους τοιχώματος. Η αναμενόμενη απόκλιση που δίνει η μέθοδος LPBF είναι ικανοποιητική και εντός ορίων.
- Ανάγκη Επανασχεδιασμού. ΝΑΙ στη βάση και στις οπές του πείρου σε περίπτωση που δεν επιλεγθεί χρήση heat treatment.

Αξιολόγηση ως προς βάρος και κόστος :

- Βάρος : 126.09g δηλαδή μείωση 70.74%
- Κόστος : Το κόστος υπολογίζεται από τον τύπο :

$$C_b = C_i \times t_b + C_d = C_i \times t_b + w \times C_m + P_b \times t_b \times C_e$$

Όπου :

- C_b : Κόστος Εκτύπωσης (€)
- C_i : Έμμεσο Κόστος (€/h)
- C_d : Άμεσο κόστος (€)
- t_b : Χρόνος Εκτύπωσης (h)
- w : Βάρος Χρησιμοποιούμενου υλικού (g)
- C_m : Κόστος Υλικού (€/g)
- P_b : Απαιτούμενη Ηλεκτρική Ισχύς (kW)
- C_e : Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας (€/kWh)

Το έμμεσο κόστος C_b αναφέρεται στο κόστος μηχανώρας του εκτυπωτή οπότε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρείται σταθερό. Ο χρόνος εκτύπωσης t_b εκτιμήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Sintratec Central περίπου ίσος με 5 ώρες και 27 λεπτά. Το βάρος το τεμαχίου μαζί με την υποστηρικτική γεωμετρία είναι περίπου 140g ενώ το κόστος του υλικού είναι περίπου 0.10€/g. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για την εκτύπωση Nylon 12 είναι 20kW και το κόστος άνα κιλοβατώρα θεωρείται 0.25€.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το κόστος κιλοβατώρας διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, τη κλίμακα της παραγωγής (οικιακή, βιοτεχνία, βιομηχανία) και λοιπά ρυθμιστικά χρέη. Η τιμή των 0.25€ είναι μια σχετικά απαισιόδοξη τιμή.

Εντέλει το άμεσο κόστος υπολογίζεται $C_{d,αρχικό} = 72.5€$ για το αρχικό τεμάχιο και $C_{d,solid} = 41.5€$ για το Solid δηλαδή μείωση κατά 42.7%.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο κόστος αναφέρεται στη περίπτωση όπου παράγεται ένα τεμάχιο με κάθε εκτύπωση. Σε περίπτωση όπου είναι εφικτή η ταυτόχρονη παραγωγή περισσότερων τεμαχίων (πάντοτε με τον ίδιο προσανατολισμό ως προς τη γωνία τους με την βάση εκτύπωσης) τότε θα πρέπει το άμεσο και το έμμεσο κόστος να διαιρεθεί με τον αριθμό των τεμαχίων. Επίσης, αν και όχι μεγάλη, αλλαγή θα παρατηρηθεί και στον χρόνο εκτύπωσης ο οποίος εξαρτάται κυρίως από το συνολικό ύψος της εκτύπωσης.

Επανασχεδιασμός του Solid

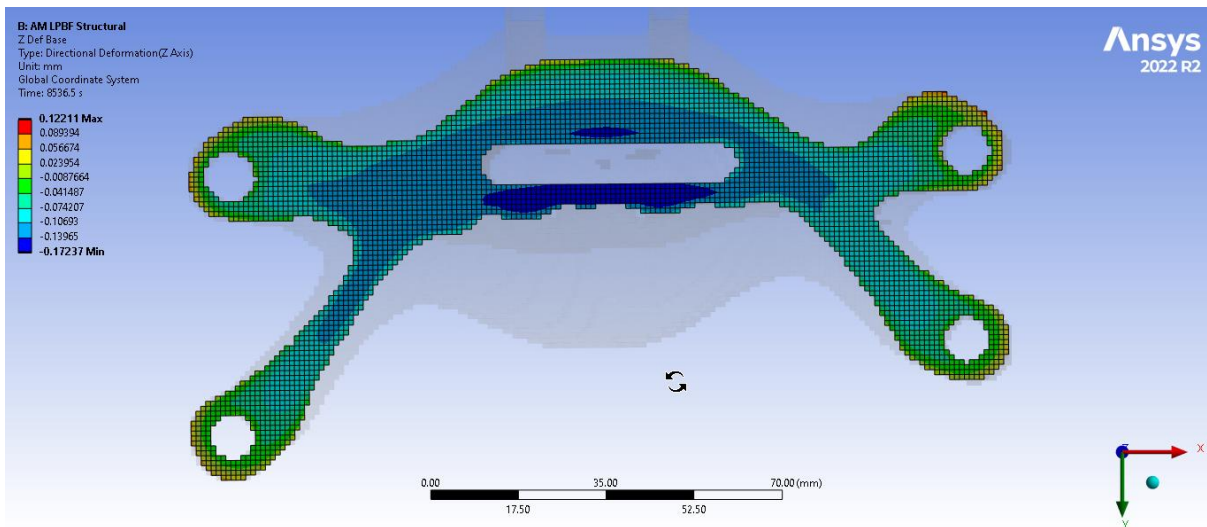
Το Solid απέτυχε να πιάσει δύο ανοχές, την τοποθέτηση των κέντρων των οπών του πείρου (στη περίπτωση που δεν χρησιμοποιήθηκε heat treatment) και την επιπεδότητα της βάσης. Μια λύση για την επιπεδότητα, η οποία και εφαρμόστηκε, είναι να προστεθεί επιπλέον υλικό (0.2mm), όπως φαίνεται στην εικόνα 92, στη βάση του τεμαχίου έτσι ώστε να δοθεί αρκετό περιθώριο ώστε με την αφαίρεση υλικού να επιτευχθεί η απαιτούμενη ανοχή στην ονομαστική επιφάνεια.



Εικόνα 92. Πρόταση επανασχεδιασμού του Solid. Με μπλε είναι σημειωμένη η επιφάνεια που θα χρειαστεί επιπρόσθετη κατεργασία ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη επιπεδότητα.

Για να επιτευχθεί και η ανοχή τοποθέτησης των κέντρων μια λύση θα ήταν να αφαιρεθεί υλικό από όπου είναι αυτό εφικτό προκειμένου να μειωθούν συνολικά οι παραμορφώσεις, δεδομένο που είναι ευρέως γνωστό στη σφαίρα της προσθετικής κατεργασίας και επιβεβαιώνεται με την σύγκριση των μέσων όρων των συνολικών παραμορφώσεων του Solid και του Shell (0.932mm vs 0.785mm αντίστοιχα). Η αφαίρεση αυτή μπορεί να γίνει εμπειρικά και το αποτέλεσμα θα ήταν αμφίβολο ως προς την αντοχή του τεμαχίου στις ζητούμενες φορτίσεις, να γίνει εκ νέου μελέτη βελτιστοποίησης τοπολογίας με διαφορετική παραμετροποίηση, ή να γίνει κελυφοποίηση όπου πλέον πρόκειται για διαφορετικό κλάδο του δένδρου σχεδιασμού. Εν προκειμένω δοκιμάστηκε η διάνοιξη οπής στη βάση η οποία θα βοηθήσει και στην αφαίρεση σκόνης από την, σχεδόν, κλειστή κοιλότητα του Solid.

Εκτελώντας εκ νέου την προσομοίωση για το Solid, αυτή τη φορά με την ανανεωμένη γεωμετρία, παρατηρείται ότι ξανά η βάση δεν είναι αρκετά επίπεδη αφού $0.122 - (-0.172) = 0.294\text{mm}$, ωστόσο τα επιπλέον 0.2mm που προστέθηκαν σε αυτή δίνουν αρκετό περιθώριο ώστε με την αφαίρεσή τους να επιτευχθεί η ζητούμενη επιπεδότητα.



Εικόνα 93. Παραμόρφωση κατά τον Z του επανασχεδιασμένου Solid.

Όσο για την τοποθέτηση των κέντρων, η μέση μετατόπιση κατά Y είναι -0.231mm και κατά Z -0.313 και άρα στο επίπεδο YZ είναι $[(0.231)^2 + (0.313)^2]^{1/2} = 0.389\text{mm}$ δηλαδή πλέον επιτυγχάνεται η τοποθέτηση των κέντρων των οπών του πείρου.

Αξιολόγηση Shell

Προδιαγραφές :

- Ενδεικνυόμενη χρήση. Έδρανο στήριξης πείρου.
- Περιορισμός Μεγέθους. Περιορισμός στο ελάχιστο πάχους κελύφους ο οποίος έχει ληφθεί υπόψιν στη παράγραφο 4.4.2.
- Ανάγκη για χρήση υποστηρικτικής γεωμετρίας. ΝΑΙ για τη δημιουργία ψευδοβάσης και στις οπές του πείρου για επιπλέον ασφάλεια. Η ψευδοβάση (raft) προτείνεται σε όλα τα τεμάχια που πρόκειται να παραχθούν με LPBF γιατί αφενός βοηθάει με την ομοιομορφη ψύξη του τεμαχίου και αφετέρου με την αφαίρεσή του από την επιφάνεια εκτύπωσης.
- Ποιότητα επιφάνειας. Κανένας περιορισμός.
- Ανάγκη για αφαίρεση σκόνης. ΝΑΙ για αυτό κατά τον επανασχεδιασμό χρειάζεται η διάνοιξη οπής για την αφαίρεση της σκόνης από την εσωτερική κοιλότητα του τεμαχίου.

Δομές Ενδιαφέροντος :

- Οργανικές δομές. Ολόκληρο το τεμάχιο έχει οργανικό σχήμα.
- Δομοστοιχειωτές δομές. ΟΧΙ.
- Ελάχιστες επιτρεπτές καμπυλότητες. Δεν υπάρχουν σημεία με μικρές καμπυλότητες.
- Λειτουργικά κανάλια και κοιλότητες. ΟΧΙ.

Περιορισμοί Τεχνολογίας :

- Μέγιστα/Ελάχιστα μεγέθη γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Δεν υπάρχουν γεωμετρίες που φτάνουν αυτά τα όρια, εν προκειμένω $100\mu\text{m}$ στον Z και $20\text{-}200\mu\text{m}$ στο επίπεδο XY.
- Ανοχές. Όλες οι σχετικές πληροφορίες αναγράφονται στη παράγραφο 5.4.1
- Αποδεκτή τοπική απόκλιση πάχους τοιχώματος. Η αναμενόμενη απόκλιση που δίνει η μέθοδος LPBF είναι ικανοποιητική και εντός ορίων.

- Ανάγκη Επανασχεδιασμού. ΝΑΙ στη βάση και στις οπές των κοχλιών στήριξης στη περίπτωση που δεν επιλεχθεί η χρήση heat treatment.

Αξιολόγηση ως προς βάρος και κόστος :

- Βάρος : 46.12g δηλαδή μείωση 89.30%
- Κόστος : Το κόστος υπολογίζεται από τον τύπο :

$$C_b = C_i \times t_b + C_d = C_i \times t_b + w \times C_m + P_b \times t_b \times C_e$$

Όπου :

- C_b : Κόστος Εκτύπωσης (€)
- C_i : Έμμεσο Κόστος (€/h)
- C_d : Άμεσο κόστος (€)
- t_b : Χρόνος Εκτύπωσης (h)
- w : Βάρος Χρησιμοποιούμενου υλικού (g)
- C_m : Κόστος Υλικού (€/g)
- P_b : Απαιτούμενη Ηλεκτρική Ισχύς (kW)
- C_e : Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας (€/kWh)

Το έμμεσο κόστος C_b αναφέρεται στο κόστος μηχανώρας του εκτυπωτή οπότε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρείται σταθερό. Ο χρόνος εκτύπωσης t_b εκτιμήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Sintratec Central επίσης περίπου ίσος με 5 ώρες και 27 λεπτά. Το βάρος το τεμαχίου μαζί με την υποστηρικτική γεωμετρία είναι περίπου 65g ενώ το κόστος του υλικού είναι περίπου 0.10€/g. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για την εκτύπωση Nylon 12 είναι 20kW και το κόστος άνα κιλοβατώρα θεωρείται 0.25€.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το κόστος κιλοβατώρας διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, τη κλίμακα της παραγωγής (οικιακή, βιοτεχνία, βιομηχανία) και λοιπά ρυθμιστικά χρέη. Η τιμή των 0.25€ είναι μια σχετικά απαισιόδοξη τιμή.

Εντέλει το άμεσο κόστος υπολογίζεται $C_{d,shell} = 34€$ δηλαδή μείωση κατά 53.1% από το αρχικό ή 18.1% μείωση από το Solid.

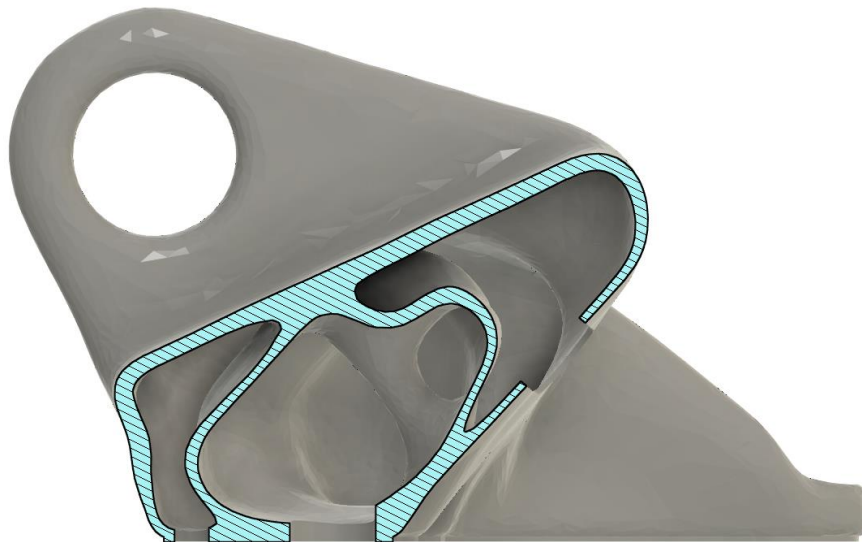
Επανασχεδιασμός Shell

Το Shell απέτυχε να πιάσει δύο ανοχές, την μέγιστη εσωτερική διάμετρο των οπών των κοχλιών στήριξης (στη περίπτωση που δεν χρησιμοποιήθηκε heat treatment) και την επιπεδότητα της βάσης. Για την επιπεδότητα ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με το Solid και το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 94.



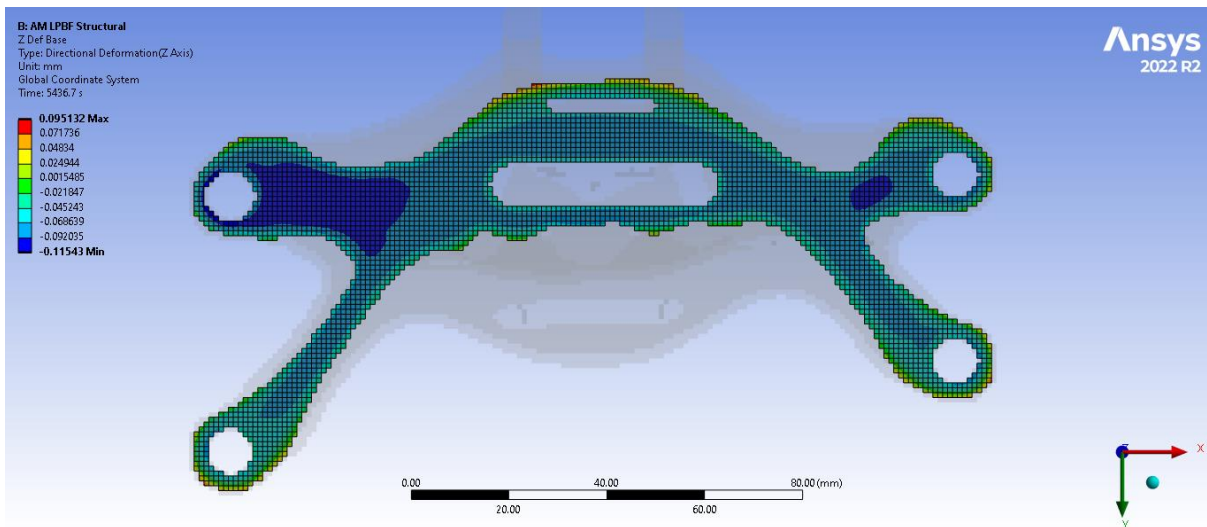
Εικόνα 94. Πρόταση επανασχεδιασμού του Shell. Με μπλε είναι σημειωμένη η επιφάνεια που θα χρειαστεί επιπρόσθετη κατεργασία ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη επιπεδότητα.

Όσο για την μέγιστη εσωτερική διάμετρο, το Shell βγήκε εκτός πεδίου ανοχών για 0.01mm οπότε οι οπές που διανοίχθηκαν για την αφαίρεση της σκόνης από την εσωτερική κοιλότητά του είχαν και ως δεύτερο αποτέλεσμα την μείωση των συνολικών παραμορφώσεων τόσο ώστε να επιτευχθεί και ο περιορισμός μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου.



Εικόνα 95. Όψη σε εγκάρσια τομή του Shell όπου φαίνεται η χρησιμότητα των οπών που προστέθηκαν κατά τον επανασχεδιασμό.

Εκτελώντας εκ νέου την προσομοίωση για το Shell, αυτή τη φορά με την ανανεωμένη γεωμετρία, παρατηρείται ότι η βάση είναι πλέον εντός προδιαγραφών ως προς την επιπεδότητά της εφόσον $0.095 - (-0.115) = 0.21\text{mm}$, ωστόσο τα επιπλέον 0.2mm που προστέθηκαν θα πρέπει και πάλι να αφαιρεθούν.



Εικόνα 96. Παραμόρφωση κατά τον Z του επανασχεδιασμένου Shell.

Όσο για τον περιορισμό μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου, η μέγιστη παραμορφωμένη διάμετρος για την κατεύθυνση X μεταβάλλεται κατά $-0.606 - (-0.463) = -0.143\text{mm}$ ενώ για τη Y μεταβάλλεται κατά $-0.214 - (-0.067) = -0.147\text{mm}$ επομένως τηρείται ο περιορισμός της μέγιστης εσωτερικής διαμέτρου.

Αξιολόγηση Lattice

Προδιαγραφές :

- Ενδεικνύομενη χρήση. Έδρανο στήριξης πείρου.
- Περιορισμός Μεγέθους. Περιορισμός στο ελάχιστο πάχους δομοστοιχείου ο οποίος έχει ληφθεί υπόψιν στη παράγραφο 4.5.2.
- Ανάγκη για χρήση υποστηρικτικής γεωμετρίας. ΝΑΙ για τη δημιουργία ψευδοβάσης και στις οπές του πείρου για επιπλέον ασφάλεια. Η ψευδοβάση (raft) προτείνεται σε όλα τα τεμάχια που πρόκειται να παραχθούν με LPBF γιατί αφενός βοηθάει με την ομοιόμορφη ψύξη του τεμαχίου και αφετέρου με την αφαίρεσή του από την επιφάνεια εκτύπωσης.
- Ποιότητα επιφάνειας. Κανένας περιορισμός.
- Ανάγκη για αφαίρεση σκόνης. ΝΑΙ για αυτό κατά τον επανασχεδιασμό χρειάζεται η διάνοιξη οπής για την αφαίρεση της σκόνης από την εσωτερική κοιλότητα του τεμαχίου.

Δομές Ενδιαφέροντος :

- Οργανικές δομές. ΟΧΙ.
- Δομοστοιχειωτές δομές. ΝΑΙ.
- Ελάχιστες επιτρεπτές καμπυλότητες. Μικρές καμπυλότητες προκύπτουν στα σημεία όπου η δομοστοιχειωτή δομή τέμνεται με το εξωτερικό κέλυφος.
- Λειτουργικά κανάλια και κοιλότητες. ΟΧΙ.

Περιορισμοί Τεχνολογίας :

- Μέγιστα/Ελάχιστα μεγέθη γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Δεν υπάρχουν γεωμετρίες που φτάνουν αυτά τα όρια, εν προκειμένω $100\mu\text{m}$ στον Z και $20\text{-}200\mu\text{m}$ στο επίπεδο XY.
- Ανοχές. Το Lattice εμπίπτει στις ανοχές που περιγράφονται στην παράγραφο 5.4.1.

- Αποδεκτή τοπική απόκλιση πάχους τοιχώματος. Η αναμενόμενη απόκλιση που δίνει η μέθοδος LPBF είναι ικανοποιητική και εντός ορίων.
- Ανάγκη Επανασχεδιασμού. Σίγουρα διάνοιξη οπής για την αφαίρεση σκόνης

Αξιολόγηση ως προς βάρος και κόστος :

- Βάρος : 64.79g δηλαδή μείωση 84.96%
- Κόστος : Το κόστος υπολογίζεται από τον τύπο :

$$C_b = C_i \times t_b + C_d = C_i \times t_b + w \times C_m + P_b \times t_b \times C_e$$

Όπου :

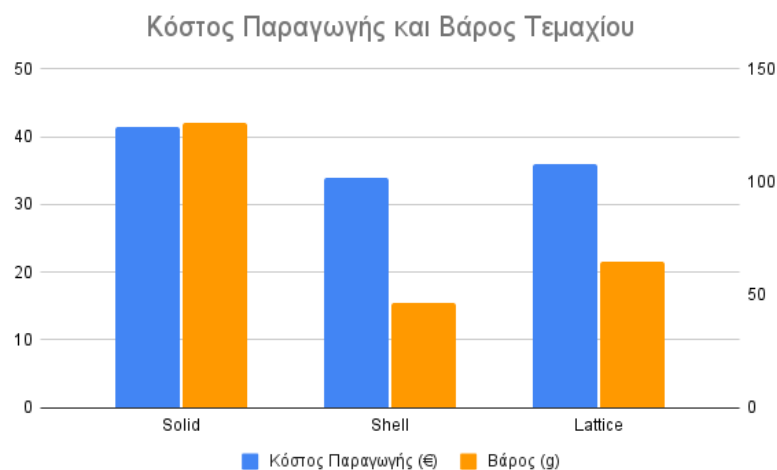
- C_b : Κόστος Εκτύπωσης (€)
- C_i : Έμμεσο Κόστος (€/h)
- C_d : Άμεσο κόστος (€)
- t_b : Χρόνος Εκτύπωσης (h)
- w : Βάρος Χρησιμοποιούμενου υλικού (g)
- C_m : Κόστος Υλικού (€/g)
- P_b : Απαιτούμενη Ηλεκτρική Ισχύς (kW)
- C_e : Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας (€/kWh)

Το έμμεσο κόστος C_b αναφέρεται στο κόστος μηχανώρας του εκτυπωτή οπότε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρείται σταθερό. Ο χρόνος εκτύπωσης t_b εκτιμήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Sintratec Central επίσης περίπου ίσος με 5 ώρες και 27 λεπτά. Το βάρος το τεμαχίου μαζί με την υποστηρικτική γεωμετρία είναι περίπου 85g ενώ το κόστος του υλικού είναι περίπου 0.10€/g. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για την εκτύπωση Nylon 12 είναι 20kW και το κόστος άνα κιλοβατώρα θεωρείται 0.25€.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το κόστος κιλοβατώρας διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, τη κλίμακα της παραγωγής (οικιακή, βιοτεχνία, βιομηχανία) και λοιπά ρυθμιστικά χρέη. Η τιμή των 0.25€ είναι μια σχετικά απαισιόδοξη τιμή.

Εντέλει το άμεσο κόστος υπολογίζεται $C_{d,shell} = 36€$ δηλαδή μείωση κατά 52.3% από το αρχικό.

Συνοπτικά τα αποτελέσματα της αξιολόγησης φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 97. Διάγραμμα αξιολόγησης των τριών σχεδίων ως προς το άμεσο κόστος παραγωγής και το βάρος τους.

Βιβλιογραφία

- [1] X. Προβατίδης, Πεπερασμένα Στοιχεία στην Ανάλυση Κατασκευών, 2η ed. ΤΖΙΟΛΑΣ, 2015.
- [2] I. Κάββαλος, ‘Ανάπτυξη σε περιβάλλον ANSYS και πειραματική επαλήθευση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για θερμομηχανική ανάλυση πλαστικών εξαρτημάτων εκτυπωμένων με τη μέθοδο Selective Laser Sintering-SLS’. National Technological University of Athens, 2020. doi: 10.26240/HEAL.NTUA.19759.
- [3] Π. Καριοφύλλης, ‘Η επανάσταση της τρισδιάστατης εκτύπωσης’. National Technological University of Athens, Ιουνίου 12, 2017. doi: 10.26240/HEAL.NTUA.6651.
- [4] Ansys Inc, Ansys Workbench Additive Manufacturing Analysis Guide
- [5] H. D. Vora και S. Sanyal, ‘A comprehensive review: metrology in additive manufacturing and 3D printing technology’, Progress in Additive Manufacturing, τ. 5, τχ. 4. Springer Science and Business Media LLC, σσ. 319–353, Ιουλίου 09, 2020. doi: 10.1007/s40964-020-00142-6.
- [6] T. Vaneker (2), A. Bernard (1), G. Moroni (2), I. Gibson, και Y. Zhang, ‘Design for additive manufacturing: Framework and methodology’, CIRP Annals, τ. 69, τχ. 2. Elsevier BV, σσ. 578–599, 2020. doi: 10.1016/j.cirp.2020.05.006.
- [7] M. K. Thompson κ.ά., ‘Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints’, CIRP Annals, τ. 65, τχ. 2. Elsevier BV, σσ. 737–760, 2016. doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- [8] C. K. Chua, C. H. Wong, and W. Y. Yeong, Standards, Quality Control and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing. London: Academic Press, 2017.
- [9] Ameta, G. , Lipman, R. , Witherell, P. and Moylan, S. (2015), Tolerance Specification and Related Issues for Additively Manufactured Products, 35th Computers and Information in Engineering Conference (CIE), Boston, MA.
- [10] “Generative Design 101,” Formlabs, <https://formlabs.com/blog/generative-design/>.
- [11] “GE Jet Engine Bracket Challenge,” GrabCAD, <https://grabcad.com/challenges/ge-jet-engine-bracket-challenge>.
- [12] ASM material data sheet, <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtp641>.
- [13] G. De Pasquale, D. Barra, nTopology 3 User Guide - Part 1: Comprehensive Reference Manual for Beginners and Intermediate Users with Step-by-Step Design-Based Approach
- [14] C. McCreight, “Self-training guide – ntop,” Self-Training Guide, <https://support.ntop.com/hc/en-us/articles/360052775254-Self-Training-Guide>.