



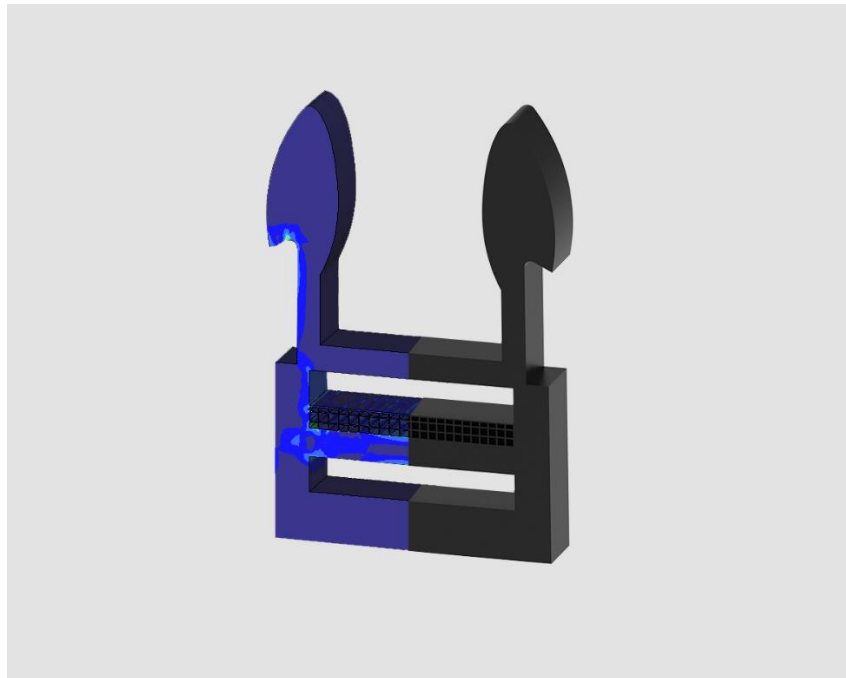
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ

Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων

Διπλωματική Εργασία

Η έννοια του fail-safe στην τεχνολογία της προσθετικής
κατασκευής

Μαρινάκης Γεώργιος – dpsd18071



Τριμελής Επιτροπή

Επιβλέπων Καθηγητής: Παπανίκος Παρασκευάς

1^ο μέλος: Ζαχαρόπουλος Νικόλαος

2^ο μέλος: Μουλιανίτης Βασίλειος

Δηλώνω υπεύθυνα ότι η διπλωματική εργασία είναι εξ' ολοκλήρου δικό μου έργο και κανένα μέρος της δεν είναι αντιγραμμένο από έντυπες ή ηλεκτρονικές πηγές, μετάφραση από ξενόγλωσσες πηγές και αναπαραγωγή από εργασίες άλλων ερευνητών ή φοιτητών. Όπου έχω βασιστεί σε ιδέες ή κείμενα άλλων, έχω προσπαθήσει με όλες μου τις δυνάμεις να το προσδιορίσω σαφώς μέσα από την καλή χρήση αναφορών ακολουθώντας την ακαδημαϊκή δεοντολογία.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου κ. Παρασκευά Παπανίκο και την επιτροπή καθηγητών. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Κωνσταντίνο Μπάιλα για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του. Τέλος, ευχαριστώ του συγγενείς και φίλους μου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	6
2. Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing).....	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής.....	8
2.2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2.2 Ρευστή πρώτη ύλη (liquid).....	8
2.2.3 Κονιοποιημένη πρώτη ύλη (powder).....	11
2.2.4 Στερεά πρώτη ύλη (solid).....	17
2.3 Διαφορετικός τρόπος ταξινόμησης	21
2.3.1 Φωτοπολυμερισμός σε κάδο (Vat photopolymerization).....	22
2.3.2 Σύντηξη πούδρας σε κλίνη (Powder bed fusion)	22
2.3.3 Εξώθηση υλικού (Material extrusion).....	23
2.3.4 Εναπόθεση υλικού (Material jetting)	23
2.3.5 Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (Binder jetting).....	23
2.3.6 Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (Directed Energy Deposition).....	23
2.3.7 Επάλληλων φύλλων (Sheet lamination)	24
2.4 Τα βήματα της Προσθετικής Κατασκευής	24
2.4.1 Από την ιδέα στο CAD	24
2.4.2 Μετατροπή αρχείου σε STL/AMF/3MF	25
2.4.4 Προγραμματισμός της μηχανής ΠΚ	27
2.4.5 Κατασκευαστική διεργασία	29
2.4.6 Απομάκρυνση και καθαρισμός	29
2.4.7 Μετεπεξεργασία	30
2.4.8 Χρήση	31
2.5 Πλεονεκτήματα τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής	32
2.6 Μειονεκτήματα τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής	33
3. Σχεδίαση για Προσθετική Κατασκευή (DfAM).....	34
3.1 Εισαγωγή.....	34
3.2 Προσανατολισμός.....	34
3.3 Στηρίγματα.....	35
3.4 Κούφια τοιχώματα	37
3.5 Υποκοπές και άλλα κατασκευαστικά περιοριστικά χαρακτηριστικά	37

3.6 Συνδεδεμένα χαρακτηριστικά	38
3.7 Μείωση αριθμού εξαρτημάτων.....	39
3.8 Αρίθμηση	40
4. Τομείς εφαρμογής της σχεδίασης για Προσθετική Κατασκευή.....	40
4.1 Εισαγωγή.....	41
4.2 Ταχεία Πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping)	41
4.3 Ταχεία κατασκευή εργαλείων παραγωγής (Rapid Tooling)	42
4.4 Ταχεία Παραγωγή (Rapid Manufacturing).....	44
4.5 Εφαρμογές στην Ιατρική	46
4.6 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	47
4.7 Εφαρμογές στην αεροδιαστημική	48
4.8 Εφαρμογές στην ναυπηγική.....	49
4.8 Καταναλωτική βιομηχανία.....	49
4.9 Αρχιτεκτονική.....	53
4.10 Αρχαιολογία	53
4.11 Εκπαίδευση.....	54
5. Βελτιστοποίηση γεωμετρίας και αντοχής των προϊόντων Προσθετικής Κατασκευής	55
5.1 Εισαγωγή.....	55
5.2 Τοπολογική βελτιστοποίηση	55
5.2.1 Διαμόρφωση δικτύωματος.....	56
5.2.2 Ογκομετρική πυκνότητα	57
5.3 Generative design	57
6. Η έννοια του fail-safe	59
6.1 Εισαγωγή.....	59
6.2 Τύποι fail-safe	61
6.2.1 Μηχανικό	61
6.2.2 Ηλεκτρικό	63
6.3 Τεχνικές εξασφάλισης ενός fail-safe συστήματος	64
6.2.1 Εφεδρικότητα.....	64
6.2.2 Εσκεμμένη χρήση αδύναμων συνδέσμων	65
6.2.3 Από την φύση των υλικών.....	66
6.2.4 Γρήγορη αναγνώριση.....	66
6.2.5 Διαρροή.....	66

6.2.6 Crack arresters	67
7. Αξιοποίηση του fail-safe στην προσθετική κατασκευή.....	67
7.1 Εισαγωγή.....	67
7.2 Σχεδίαση του lattice	67
7.2.1 Εισαγωγή.....	67
7.2.2 Δυνατότητες λογισμικών σχεδίασης CAD	69
7.2.3 Περιορισμοί λογισμικών σχεδίασης CAD	71
7.2.4 Διαφορές lattice με solid δομής.....	72
7.3 Μεθοδολογία.....	85
7.3.1 Στατική ανάλυση	85
7.3.2 Εύρεση των περιοχών με την μεγαλύτερη συγκέντρωση των τάσεων	87
7.3.3 Αλλαγή γεωμετρίας.....	88
7.3.4 Εισαγωγή σημείων μέτρησης των επίμαχων περιοχών συγκέντρωσης της τάσης και της μετατόπισης.....	99
7.3.5 Ανάλυση βελτιστοποίησης.....	104
7.3.6 Σύγκριση των concepts και επιλογή τελικού προϊόντος.....	109
8. Συμπεράσματα.....	113
9. Βιβλιογραφία	114
10. Ευρετήριο εικόνων.....	116

1. Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η λογική του fail-safe για κατασκευή βιομηχανικών προϊόντων με την τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής. Η απουσία της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής από τους τομείς εφαρμογής της έννοιας του Fail-Safe, αποτέλεσε την αφορμή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παρά την ραγδαία ανάπτυξη και υιοθέτηση της Προσθετικής Κατασκευής από διάφορες βιομηχανίες, όπως η ιατρική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική, η αρχιτεκτονική και η καταναλωτική βιομηχανία, δεν έχει ακόμα αξιοποιηθεί η λογική του fail-safe στα κατασκευαζόμενα προϊόντα. Η ενσωμάτωση αυτή θα προσφέρει στα προϊόντα εξασφάλιση της λειτουργίας του συστήματος σε περίπτωση αστοχίας κάποιου δομικού στοιχείου. Για αυτόν τον λόγο μελετήθηκε τόσο η έννοια του fail-safe όσο και η προσθετική κατασκευή ώστε να βρεθούν οι ευκαιρίες υιοθέτησής του fail-safe μέσω των δυνατοτήτων της Προσθετικής Κατασκευής.

Με τον όρο fail-safe χαρακτηρίζονται οι δομές οι οποίες έχουν σχεδιαστεί ώστε να αντέχουν καθορισμένες τάσεις, ακόμα και αν αστοχήσει πλήρως ένα δομικό μέρος ή μερικώς ένα μεγαλύτερο, έτσι ώστε να παραμείνουν λειτουργικές [1]. Σαν όρος πρωτοεμφανίστηκε και χρησιμοποιήθηκε στην

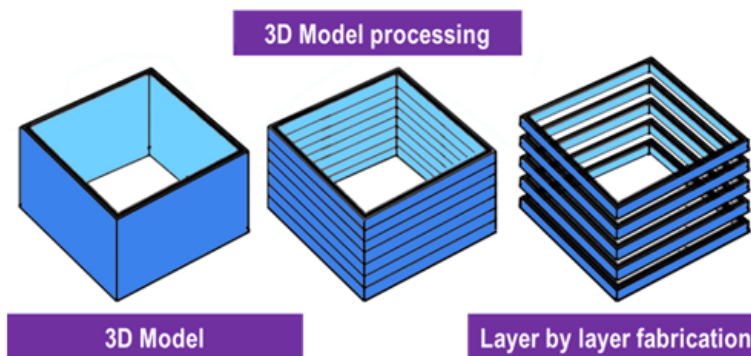
αεροναυπηγική. Από το 1988 και μετά το fail-safe ήταν το κύριο πεδίο μηχανολογικής βελτιστοποίησης [1]. Το fail-safe είναι ένας ακόμα βασικός παράγοντας που τα αεροπορικά ταξίδια είναι τόσο ασφαλή.

Η προσέγγιση της λογικής του fail-safe έχει δημιουργηθεί καθώς έχει γίνει αποδεκτό ότι θα προκύψουν αστοχίες. Ο ρόλος του fail-safe είναι να εξασφαλίσει ότι θα υπάρξει χρόνος για την επίλυση τους και ότι η δομή θα έχει μεγαλύτερη αντοχή από την αναγκαία, ώστε να παραμείνει σταθερή μέχρι το διάστημα επίλυσης των προβλημάτων αυτών [2]. Το fail-safe έχει χρησιμοποιηθεί και μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό στην αεροναυπηγική και τα ηλεκτρικά κυκλώματα, ωστόσο δύναται επίσης να υιοθετηθεί και από άλλες βιομηχανίες όπως και από την προσθετική κατασκευή.

2. Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing)

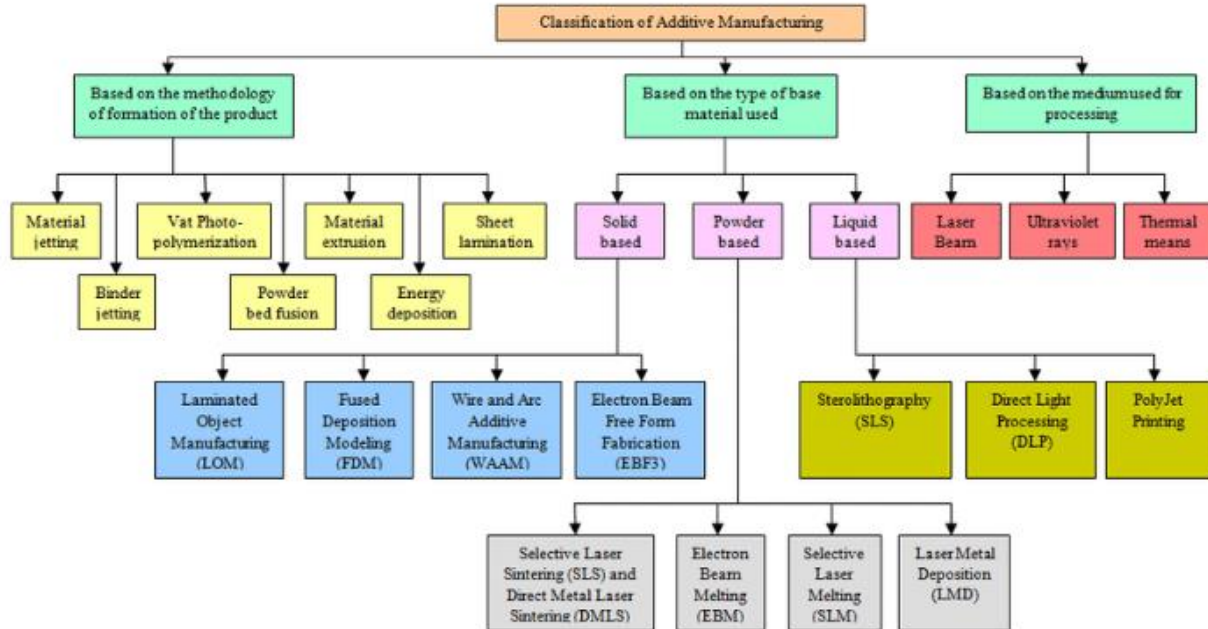
2.1 Εισαγωγή

Βασική αρχή του Additive Manufacturing (AM) είναι ότι ένα μοντέλο, δημιουργημένο σε ένα πρόγραμμα CAD (Computer-Aided Design), μπορεί να κατασκευαστεί χωρίς να προγραμματιστεί η διαδικασία παραγωγής του. Με την χρήση συμβατικών μεθόδων κατασκευής ο χρήστης πρέπει πρώτα να αναλύσει την μορφή του αντικειμένου για να ορίσει ποιες μεθόδους θα χρησιμοποιήσει για το κάθε μορφολογικό χαρακτηριστικό του αλλά και με ποια σειρά. Ο όρος Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ), εμπεριέχει όλες τις τεχνολογίες οι οποίες χρησιμοποιούν διαδικασίες ελεγχόμενης πρόσθεσης υλικού για την κατασκευή ενός αντικειμένου. Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούν διάφορα υλικά (μέταλλα, κεραμικά, φωτοπολυμερή, θερμοπλαστικά πολυμερή κα) σε μορφές νημάτων, κόκκων, φύλλων αλλά και υγρών. Τα παραπάνω υλικά επεξεργάζονται από τα εκάστοτε μηχανήματα και μετατρέπονται σε “layers” ώστε να κατασκευαστεί η προκαθορισμένη γεωμετρία των αντικειμένων. Τα layers ή αλλιώς στρώσεις είναι οι λεπτές διατομές στις οποίες χωρίζεται το αντικείμενο προκειμένου να κατασκευαστεί. Οι στρώσεις αυτές έχουν ένα ορισμένο πάχος και η τιμή τους έχει αποδειχτεί ότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του παραγόμενου αντικειμένου και την αντοχή του[3].



Εικόνα 2-1. Επεξεργασία ενός 3d μοντέλου σε στρώσεις (layers).

2.2 Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής



Εικόνα 2-2. Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής.

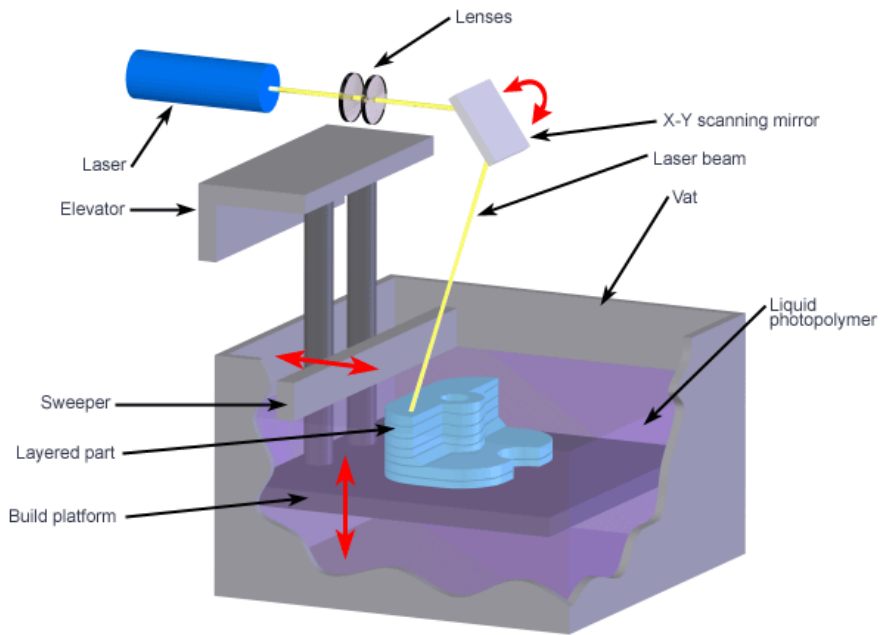
2.2.1 Εισαγωγή

Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής είναι αρκετές και ο αριθμός τους συνεχίζει να αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται μπορούν να είναι πλαστικά πολυμερή, μέταλλα, κεραμικά και σύνθετα υλικά. Κάθε τεχνολογία έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα/ μειονεκτήματα που αφορούν την ποιότητα, τον χρόνο κατασκευής των παραγόμενων αντικειμένων, την αντοχή και όχι μόνο. Τα υλικά κατασκευής με την τεχνολογία ΠΚ διαδραματίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο, έτσι οι τεχνολογίες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες όσο αφορά την πρώτη ύλη που χρησιμοποιούν.

2.2.2 Ρευστή πρώτη ύλη (liquid)

Η ρευστή πρώτη ύλη χρησιμοποιείται στην μέθοδο της Στερεολιθογραφίας (SLA), της Digital Light Processing (DLP) και της Polyjet 3D. Στην πρώτη, το αντικείμενο κατασκευάζεται με την βοήθεια φωτοπολυμερούς ρητίνης, η οποία στερεοποιείται επιλεκτικά σε στρώματα μέσω ειδικού λέιζερ υπεριώδους ακτινοβολίας. Η τεχνολογία Polyjet 3D εναποθέτει σταγονίδια πολυμερούς, μέσω μηχανισμών ψεκασμού, τα οποία στερεοποιούνται από την υπεριώδη ακτινοβολία.

2.2.2.1 Stereolithography (SLA)



Copyright © 2008 CustomPartNet

Εικόνα 2-3. Απεικόνιση της μεθόδου SLA.

Η κατασκευή των προϊόντων στην μέθοδο SLA γίνεται με ρητίνες, οι οποίες έχουν την δυνατότητα να φωτοπολυμερίζονται [4]. Στον φωτοπολυμερισμό ένα laser, με υπεριώδεις ακτινοβολίες, ενώνει τα μόρια δημιουργώντας πολυμερή και με αυτόν τον τρόπο να χτίζεται κάθε στρώση ενός προϊόντος. Εκτός από διαφορετικού χρώματος ρητίνες, διατίθενται και με διαφορετικές μηχανικές αντοχές. Αυτό που διακρίνει την συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η υψηλή ποιότητα κατασκευής των μοντέλων. Ωστόσο, οι περισσότερες μηχανές έχουν μικρή επιφάνεια κατασκευής, με μεγαλύτερη την ProX 950 ο την 3D Systems η οποία είναι ικανή να κατασκευάσει αντικείμενα με μέγιστο μέγεθος 1500 x 750 x 550 mm (W x D x H).

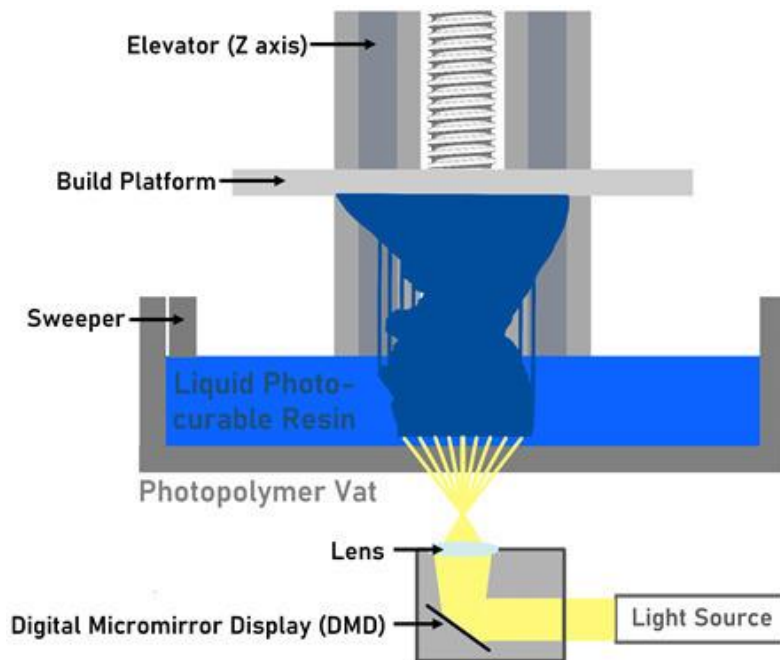


Εικόνα 2-4. Μηχάνημα ProX 950 από την εταιρία 3D Systems.

Η ρευστή ρητίνη βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο και η βάση κατασκευής μπαίνει μέσα στην ρητίνη σε κάθε στρώση, όσο είναι το βήμα κατασκευής στον άξονα z. Η δέσμη του laser φωτοπολυμερίζει την γεωμετρία του κάθε στρώματος με κινήσεις στον άξονα x και y [4]. Μετά την κάθε στρώση ένας σαρωτής κατανέμει ομοιόμορφα την υγρή ρητίνη για την επόμενη στρώση. Στο τέλος της διαδικασίας ο χρήστης θα πρέπει, εκτός από το να αφαιρέσει τις υποστηρικτικές δομές (όπου χρειάζεται), να βάλει το αντικείμενο φούρνο με υπεριώδης ακτίνες ώστε να σκληρύνει κατάλληλα το υλικό και να είναι έτοιμο για χρήση.

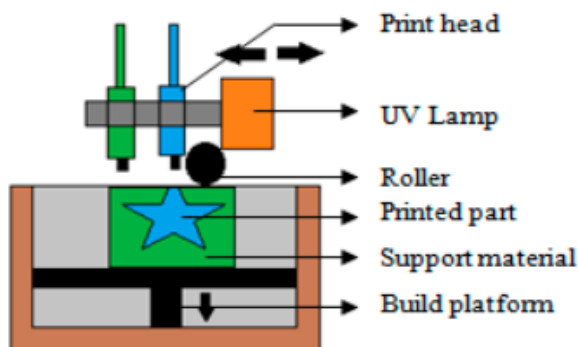
2.2.2.2 Digital Light Processing (DLP)

Η μέθοδος DLP διαφέρει από την SLA στην στερεοποίηση των ρητινών, καθώς στην DLP χρησιμοποιείται ένας προτζέκτορας, DLP (Digital Light Processing) τεχνολογίας, για την στερεοποίηση. Επιπλέον στην συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιούνται πολλά παραπάνω υλικά εκτός των πολυμερών, που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο SLA, τα οποία βοηθούν και σε βιοϊατρικές εφαρμογές [5].



Εικόνα 2-5. Απεικόνιση της DLP διεργασίας.

2.2.2.3 Polyjet Printing



Εικόνα 2-6. Απεικόνιση της διεργασίας του Polyjet Printing.

Στην συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιούνται φωτοπολυμερή τα οποία αφού ψεκασθούν, στερεοποιούνται με φώτα UV ακτινοβολίας [6]. Η κεφαλή ψεκασμού κινείται στους x και y άξονες και η πλατφόρμα κατασκευής στον z [5]. Χρησιμοποιείται ένα ακροφύσιο με υλικό για τις υποστηρικτικές δομές και ένα με υλικό για τις κύριες. Η διαδικασία ψεκασμού και στερεοποίησης από την λάμπα UV επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ολοκληρωθεί το προϊόν.

2.2.3 Κονιοποιημένη πρώτη ύλη (powder)

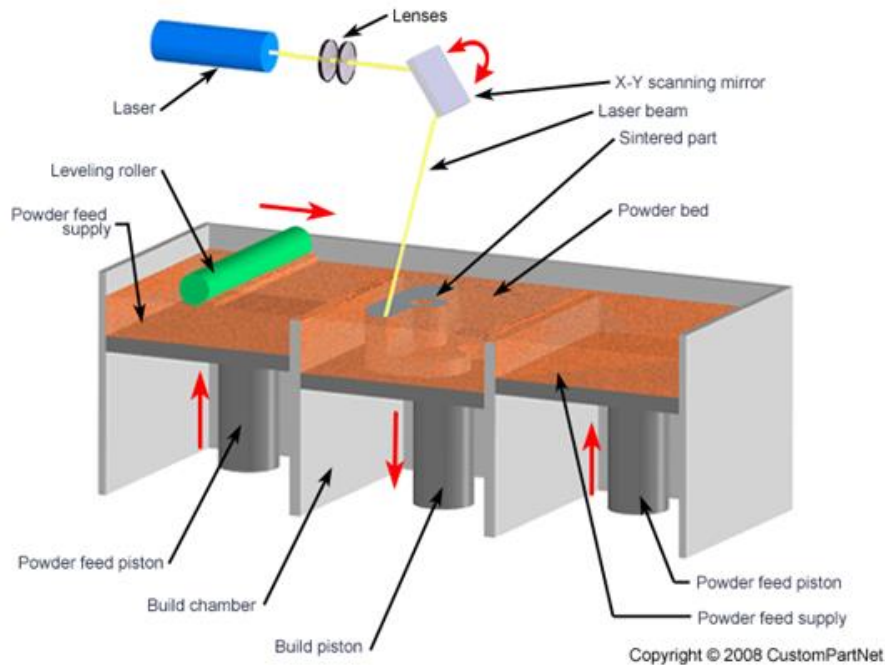
Η πρώτη ύλη σε κόκκους χρησιμοποιείται από την τεχνολογία επιλεκτικής συσσωμάτωσης με λέιζερ (SLS), την τρισδιάστατη εκτύπωση, την επιλεκτική συσσωμάτωση κόκκων μετάλλου με λέιζερ (DMLS), αλλά και από την μορφοποίηση κόκκων με λέιζερ (LPF). Κύρια πλεονεκτήματα των μεθόδων αυτών είναι η πολύ καλή μηχανική αντοχή των αντικειμένων, η δυνατότητα χρήσης μεταλλικών υλικών, και η απαλλαγή από τις υποστηρικτικές δομές. Παρόλα αυτά, τα κατασκευασμένα αντικείμενα έχουν πορώδη υφή και συνεπώς χρειάζονται μετεπεξεργασία. Επίσης, όσο αφορά την γεωμετρία τους δεν δίνεται πλήρης ελευθερία, καθώς πρέπει να μην έχουν κλειστές κοιλότητες, όπου μπορεί να εγκλωβιστεί πούδρα.

2.2.3.1 Επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ (SLS)

Η τεχνολογία της επιλεκτικής συσσωμάτωσης με λέιζερ αναπτύχθηκε το 1980 και χρησιμοποιεί μια μεγάλη γκάμα υλικών όπως, γυαλιά, κεραμικά, νάιλον, κράματα μετάλλων ελαστομερή και κεριά (συνθετικά). Η κατασκευή αντικειμένου γίνεται μέσω επαναληπτικής απόθεσης κόκκων, των παραπάνω υλικών, και παράλληλα με την βοήθεια του λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα θερμαίνει επιλεκτικά συγκολλώντας τους κόκκους μεταξύ τους. Η ισχύς του λέιζερ αλλάζει με βάση το υλικό των κόκκων.

Τα πλεονεκτήματά της είναι ότι:

- τα παραγόμενα αντικείμενα έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή.
- υπάρχουν πολλά υλικά για επιλογή.
- τα αντικείμενα δεν χρειάζονται υποστηρικτική γεωμετρία για να κατασκευαστούν.



Εικόνα 2-7. Απεικόνιση της Επιλεκτικής συσσωμάτωσης με λέιζερ.

Τα μειονεκτήματά της είναι:

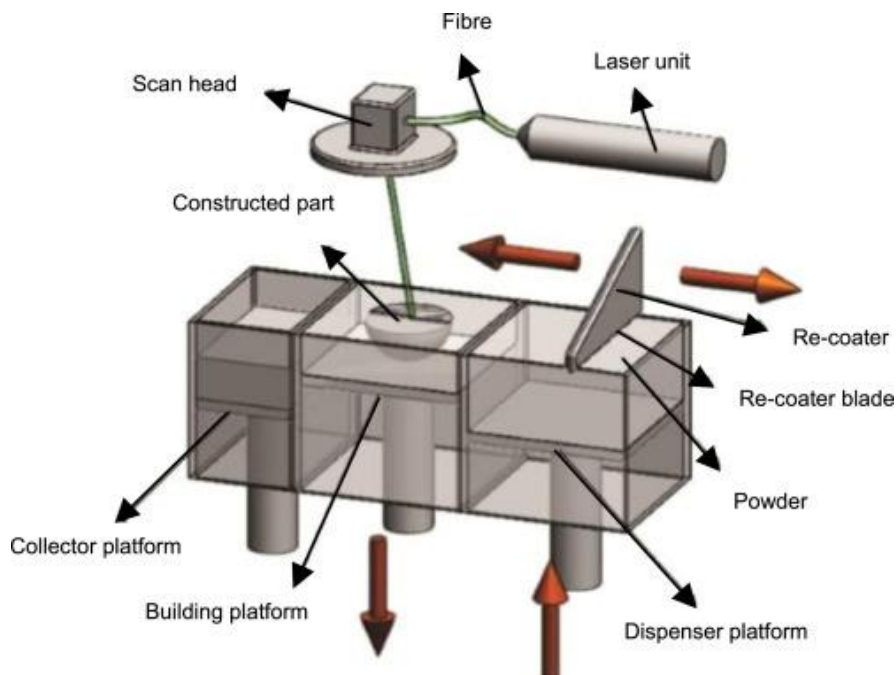
- η χαμηλή ακρίβεια.
- η τραχύτητα των επιφανειών.
- η πορώδης υφή του τελικού προϊόντος.

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρειάζεται ένα ισχυρό laser ώστε να είναι ικανό να ενώσει τους κόκκους της πούδρας. Η πούδρα βρίσκεται πάνω στην βάση κατασκευής και μετά την κατασκευή κάθε στρώσης, κατεβαίνει με το ανάλογο βήμα. Έπειτα, ένας κύλινδρος διοχετεύει από πάνω νέα πούδρα, ώστε να κατασκευαστεί η επόμενη διατομή. Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι δεν χρειάζονται υποστηρικτικές δομές καθώς η περισσεύουσα πούδρα βοηθάει σε αυτό το κομμάτι [4].

Η Επιλεκτική Πολυεπίπεδη Πυροσυσσωμάτωση χρειάζεται ένα σύστημα το οποίο ρυθμίζει και ελέγχει την ατμόσφαιρα στο εσωτερικό του θαλάμου κατασκευής, φιλτράροντας τον αέρα και διατηρώντας την θερμοκρασία σταθερή. Ακόμη, χρειάζεται άλλα δύο δοχεία (πέρα του ενός όπου γίνεται η κατασκευή), ώστε το ένα να παρέχει αχρησιμοποίητη πούδρα και το άλλο να συγκεντρώνει την περισσεύουσα. Τα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι δεν χρειάζεται υποστηρικτικές

δομές, επιτρέποντας έτσι να κατασκευαστούν πιο γρήγορα τα προϊόντα χωρίς σπατάλη υλικού. Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα κατασκευής μεγάλων αντικείμενων, με μεγάλη αντοχή και ακαμψία αλλά και πολύπλοκων προϊόντων χωρίς να χαλάσει η επιφάνειά τους από τα στηρίγματα. Παρόλα αυτά, το κόστος αγοράς της μηχανής αλλά και της κατασκευαστικής διαδικασίας είναι αρκετά μεγάλο. Για αυτόν τον λόγο προτιμάται η χρήση της τεχνολογίας για την κατασκευή πολλών όμοιων αντικειμένων μαζί, ώστε να μειωθεί το κόστος της μονάδας. Ένα ακόμη αρνητικό είναι ότι δεν γίνεται να κατασκευαστούν αντικείμενα με κούφιο εσωτερικό, καθώς το κενό θα καλυφθεί από πούδρα.

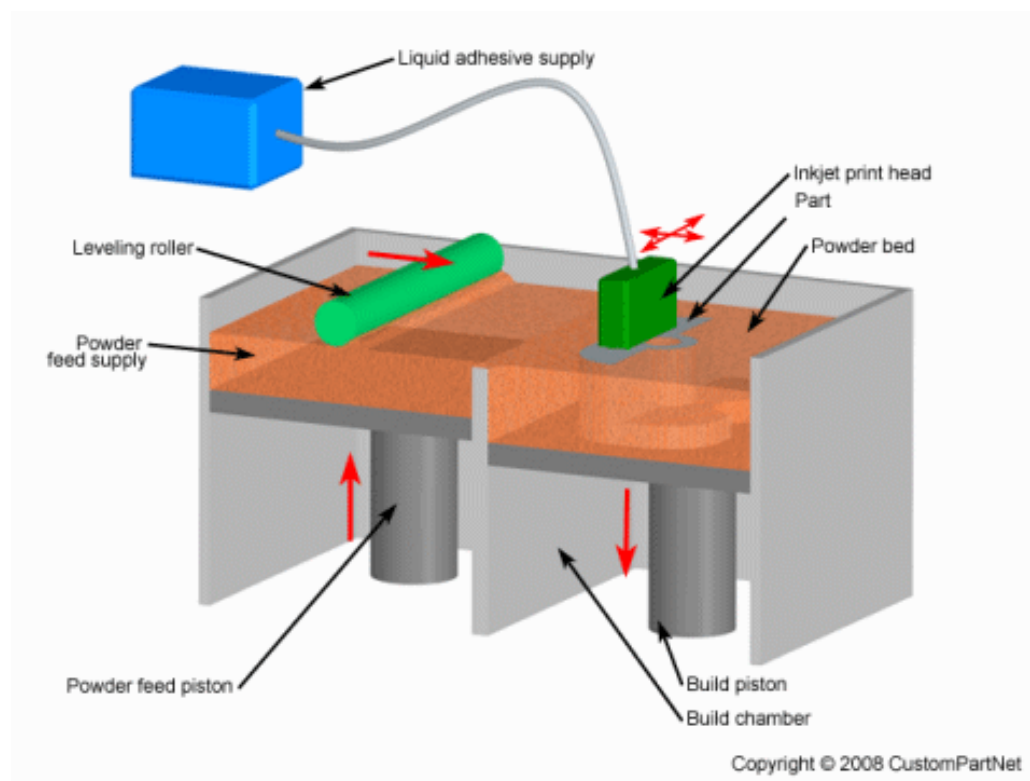
2.2.3.2 Επιλεκτική συσσωμάτωση κόκκων μετάλλου με λέιζερ (DMLS)



Εικόνα 2-8. Απεικόνιση της DMLS διεργασίας.

Η τεχνολογία της Επιλεκτικής συσσωμάτωσης κόκκων μετάλλου με λέιζερ αναπτύχθηκε το 1994 και σε αντίθεση με την Επιλεκτική συσσωμάτωση με λέιζερ, οι κόκκοι μετάλλου δεν έχουν κάποια επικάλυψη για την συγκόλλησή τους. Επιπλέον, το λέιζερ τους έχει μεγαλύτερη ισχύ. Οι ιδιότητες του παραγόμενου αντικείμενου είναι πολύ κοντά σε αυτές της πρώτης ύλης, αφού δεν χρησιμοποιείται συνδετικό υλικό. Η πυκνότητα του αντικείμενου είναι κατά 20% μεγαλύτερη με την μέθοδο DMLS έναντι της SLS μεθόδου. Ακόμη, έχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια και μεγάλη λίστα υλικών (αλουμίνιο, τιτάνιο, χρώμιο, χάλυβα).

2.2.3.3 Τρισδιάστατη εκτύπωση (3DP)



Εικόνα 2-9. Απεικόνιση της διεργασίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

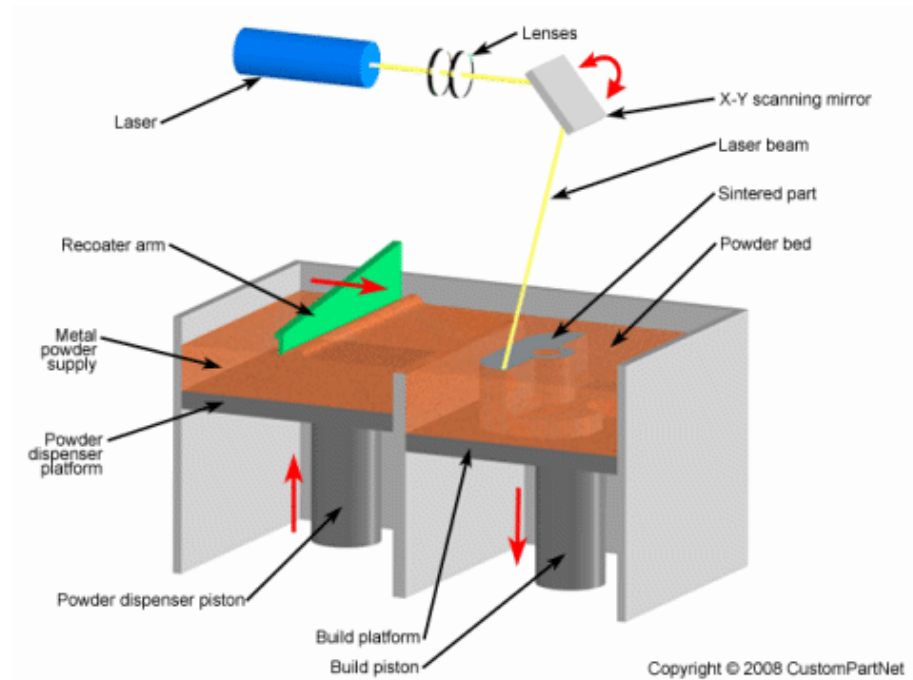
Στην τρισδιάστατη εκτύπωση ένα αντικείμενο κατασκευάζεται με επαναληπτική απόθεση κεραμικής πούδρας σε συνεργασία με επιλεκτικό ψεκασμό ειδικής συγκολλητικής ουσίας συγκολλώντας με αυτόν τον τρόπο τους κόκκους μεταξύ τους. Μετά ένας κύλινδρος κυλάει από πάνω τροφοδοτώντας νέα πούδρα για την επόμενη στρώση. Λόγω του τρόπου ενοποίηση των κόκκων, το τελικό προϊόν έχει πορώδη υφή και είναι σχετικά εύθραυστο. Συνήθως οι κόκκοι είναι από γύψο ή πούδρα με βάση το άμυλο. Επειδή η δεσμοί που θα δημιουργηθούν είναι χαλαροί, το αντικείμενο θα επικαλυφθεί από διάλυμα ενισχυτικού υλικού. Η θέρμανση ή η βαφή μπορούν να διορθώσουν σε ένα βαθμό αυτά τα προβλήματα [6]. Κύριο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι ότι επιτρέπει την κατασκευή αντικειμένων με πολύχρωμους χρωματισμούς. Επίσης συχνά χρησιμοποιείται για την δημιουργία καλουπιών χύτευσης, λόγω της κεραμικής πρώτης ύλης.

2.2.3.4 Μορφοποίηση κόκκων με λέιζερ (LPF)

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί να παράγει τελικά μεταλλικά προϊόντα, σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, τα οποία έχουν καλές ιδιότητες. Επιπλέον, η πρώτη ύλη είναι δυνατόν

να αλλάζει κατά την διάρκεια παραγωγής ενός προϊόντος. Σαν μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την επιδιόρθωση αντικειμένων. Σε αυτή την μέθοδο, μια ακτίνα λέιζερ κατοπτρίζεται σε μια κεφαλή εναπόθεσης υλικού στην οποία εισέρχονται ομοαξονικά κόκκοι μετάλλου. Συνήθως η κεφαλή είναι αυτή που μένει σταθερή, ενώ κινείται η πλατφόρμα με σκοπό την κατασκευή των αντικειμένων. Ακόμα, χρησιμοποιείται πιεσμένος αέρας κυρίως για να αδρανοποιήσει το οξυγόνο από την δεξαμενή κατασκευής με σκοπό της βέλτιστες ιδιότητες και συγκόλληση του αντικειμένου. Σε κάποιες περιπτώσεις ο αέρας αυτός χρησιμοποιείται και για την καλύτερη τροφοδότηση των κόκκων. Τέλος, βρίσκεται σε πλεονεκτική θέση έναντι της SLS μεθόδου, καθώς δεν χρειάζεται στάδιο μετεπεξεργασίας.

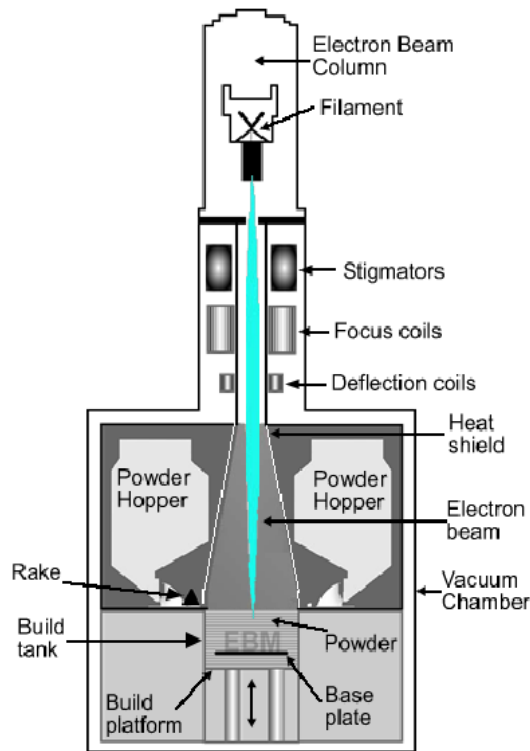
2.2.3.5 Selective Laser Melting (SLM)



Εικόνα 2-10. Απεικόνιση της SLM.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι μια παραλλαγή της SLS. Στην SLM χρησιμοποιούνται μεταλλικά υλικά όπως τιτάνιο, αλουμίνιο, χρώμιο, ανοξείδωτος χάλυβας. Συχνά χρησιμοποιείται και ο όρος Direct Metal. Χρησιμοποιούνται μικρότερης διαμέτρου κόκκοι, κάτι το οποίο ισοδυναμεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατασκευή των προϊόντων. Σε αντίθεση με την SLS, η πρώτη στρώση είναι μικρότερη σε σχέση με τις επόμενες. Στον θάλαμο κατασκευής χρησιμοποιείται ένα ευγενές αέριο, έτσι ώστε να μην οξειδωθεί το μεταλλικό υλικό. Παράλληλα, για την σωστή λειτουργία τους, οι μηχανές χρειάζονται Laser υψηλής ισχύος [7]. Άλλη μια διαφορά με την SLS είναι ότι το Laser τήκει τελείως τους μεταλλικούς κόκκους, δεν τους θερμαίνει απλά, με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αποφευχθεί η πορώδης υφή των κατασκευασμένων αντικειμένων. Κατά τα άλλα η διαδικασία είναι όμοια με την SLS.

2.2.3.6 Electron Beam Melting (EBM)



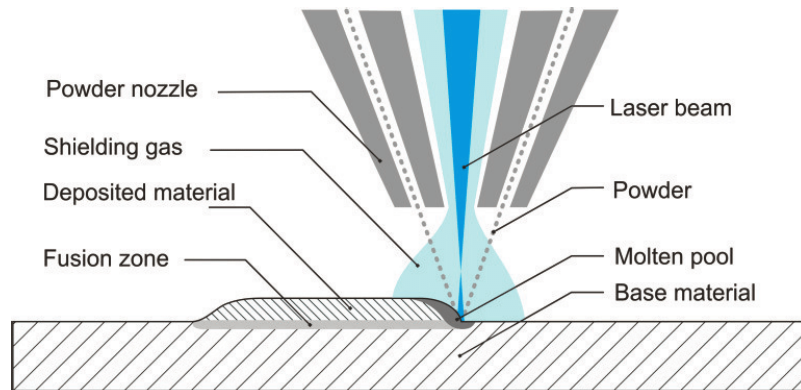
Εικόνα 2-11. Απεικόνιση της διεργασίας EBM.

Η διαφορά στην συγκεκριμένη τεχνολογία είναι ότι αντί για laser χρησιμοποιείται μια δέσμη ηλεκτρονίων, πετυχαίνοντας έτσι πολύ υψηλή θερμοκρασία για την τήξη των μεταλλικών υλικών. Ακόμη, χρησιμοποιείται ειδικός απορροφητήρας για να ρυθμίζει την πίεση στον κάδο [7].

2.2.3.7 Laser Metal Deposition (LMD)

Η εναπόθεση μετάλλων με laser είναι μια συνδυαστική μέθοδος που χρησιμοποιεί στοιχεία από εναπόθεση υλικού και από σύντηξη πούδρας για την κατασκευή αντικειμένων από υλικά που είναι δύσκολο να επεξεργασθούν [8]. Το μεταλλικό υλικό εναποθέτεται σε μορφή πούδρας και τήκεται από το την μικρή δέσμη του laser πετυχαίνοντας άριστη ποιότητα κατασκευής, μειώνοντας παράλληλα την σπατάλη του υλικού. Ένα ακόμη προτέρημα της είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιδιόρθωση πολύπλοκων αντικειμένων. Παρόλα αυτά, οι ιδιότητες των κατασκευασμένων αντικειμένων εξαρτώνται από πολύπλοκες παραμέτρους και συνεπώς είναι δύσκολο να υπολογιστούν, κάνοντας δύσκολη και την ομοιόμορφη κατανομή τους. Ακόμη, χρειάζεται πολύ καλός έλεγχος της θερμότητας, καθώς μεγαλύτερες ή μικρότερες θερμοκρασίες από τις αναγκαίες μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα όπως παραμορφώσεις και κακές συγκολλήσεις. Το κόστος των υλικών και του εξοπλισμού είναι μεγάλο για αυτό

και χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες που μπορούν να το υποστηρίξουν, όπως η ιατρική και η αεροδιαστημική [9].



Εικόνα 2-12. Απεικόνιση της εναπόθεσης μετάλλου με laser (LMD).

2.2.4 Στερεά πρώτη ύλη (solid)

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία που χρησιμοποιεί στερεά πρώτη ύλη είναι η FDM (Fused Deposition Modeling), σύμφωνα με την οποία το στερεό υλικό, σε μορφή νήματος, θερμαίνεται και εναποθέτεται ελεγχόμενα πάνω στην επιφάνεια κατασκευής. Επιπλέον, πολύ γνωστή είναι και η τεχνολογία LOM (Laminated Object Manufacturing), στην οποία το υλικό βρίσκεται σε μορφή λεπτών φύλλων χαρτιού, πλαστικού ή μετάλλου. Ακόμη, σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται και οι τεχνολογίες WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) και EBF3 (Electron Beam Free Form Fabrication). Τα κοινά προτερήματα των μεθόδων αυτών είναι ότι παράγουν, σχετικά με τις υπόλοιπες μεθόδους, γρήγορα και με μικρό κόστος προϊόντα και ότι μπορούν να κατασκευάσουν από μικρά μέχρι πολύ μεγάλα αντικείμενα. Όμως, υστερούν στην ποιότητα κατασκευής και χρειάζονται αρκετή μετεπεξεργασία ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή εμφάνιση. Ακόμη, στην FDM και κυρίως στην LOM σπαταλάται πολύ υλικό το οποίο χρησιμοποιείται ως υποστηρικτική δομή.

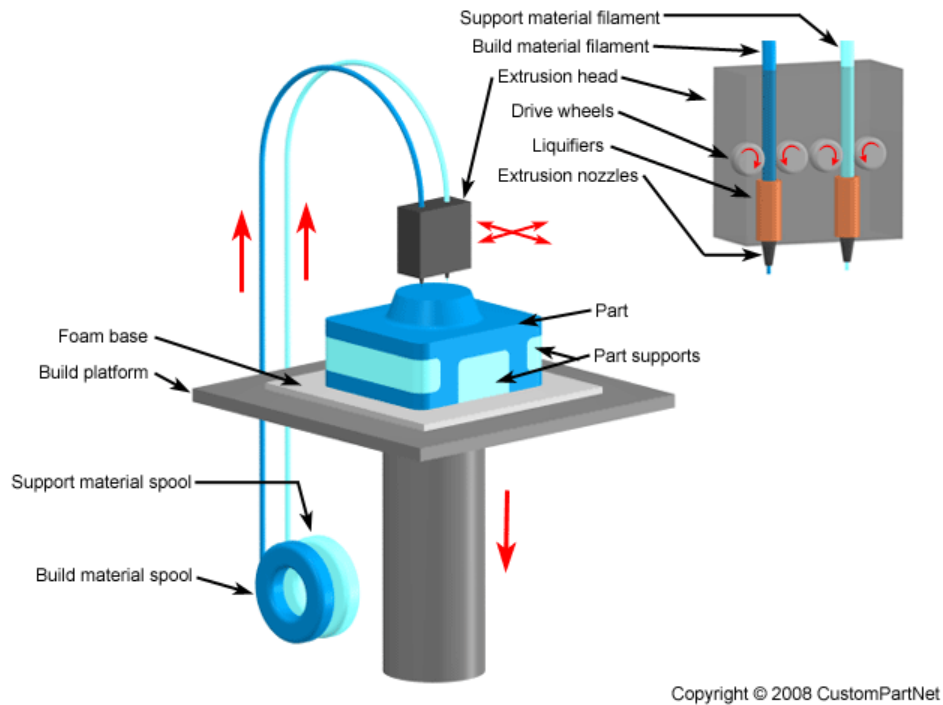
2.2.4.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Η Συντηγμένη Μοντελοποίηση με Εναπόθεση (FDM), χρησιμοποιεί θερμοπλαστικά πολυμερή σε μορφή νήματος σχηματίζοντας με αυτά την κάθε στρώση. Σαν τεχνολογία αναπτύχθηκε από την Stratasys το 1990. Ένας άλλος όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την τεχνολογία είναι ο Fused Filament Fabrication ή FFF, αυτός ο όρος δημιουργήθηκε καθώς ο όρος FDM ανήκει στην εταιρία Stratasys [4].

Κύριο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος συγκριτικά με την ποιότητα κατασκευής. Τα προϊόντα που κατασκευάζονται με αυτήν την μέθοδο έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα αλλά δεν έχουν τόσο καλή ακρίβεια στις λεπτομέρειες. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι τα ABS, PLA, PETG, TPU και άλλα. Τα υλικά αυτά είναι φθηνά ως προς

την αγορά τους αλλά και προσφέρουν ευκολία στην μετεπεξεργασία. Η γκάμα των υλικών αυξάνεται συνεχώς με σύνθετα υλικά με διάφορες ιδιότητες. Τα μηχανήματα τεχνολογίας FDM/FFF μπορούν να κατασκευάσουν από πολύ μικρά μέχρι πολύ μεγάλα αντικείμενα.

Το υλικό σε μορφή νήματος τροφοδοτείται σε μια θερμαινόμενη κεφαλή (η κεφαλή πρέπει να έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη ή ίση με το σημείο τήξης του εκάστοτε υλικού) η οποία κινείται, με σκοπό την ελεγχόμενη εναπόθεσή του πάνω στην επιφάνεια κατασκευής. Ανάλογα με την διάμετρο του ακροφύσιου της κεφαλής (extruder) ορίζεται το εύρος του πάχους της στρώσης και η ακρίβεια των λεπτομερειών.



Εικόνα 2-13. Απεικόνιση της διεργασίας FDM.

Υπάρχουν διαθέσιμα ακροφύσια από 0.1 mm μέχρι 1.2 mm, με την πιο μικρή διάμετρο να ισοδυναμεί σε μεγαλύτερο χρόνο κατασκευής. Η συνηθέστερη επιλογή ακροφύσιου είναι η 0.4 mm καθώς επιτυγχάνεται πολύ καλή λεπτομέρεια σε μικρό σχετικά χρόνο. Η κεφαλή αφού θερμανθεί στην επιλεγμένη θερμοκρασία κάνει κινήσεις σε δύο άξονες, είτε στον x και στον z είτε στον x και y, στον τρίτο άξονα μετακινείται η επιφάνεια κατασκευής προκειμένου να κατασκευαστεί ένα αντικείμενο. Επιπλέον, σε άλλα μηχανήματα η κεφαλή κινείται και στους τρεις άξονες και η βάση κατασκευής παραμένει σταθερή σε την διαδικασία. Το υλικό που εξωθείται από το ακροφύσιο στερεοποιείται πολύ γρήγορα (λόγω της πολύ μικρότερης θερμοκρασίας του χώρου) και κολλάει στην προηγούμενη στρώση. Οι περισσότερες μηχανές πλέον μπορούν να συνεχίσουν την κατασκευή μετά από μια διακοπή ρεύματος.

Ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται οι μηχανές διαθέτουν θερμαινόμενες βάσεις κατασκευής ώστε να διευκολύνουν την κόλληση της πρώτης στρώσης πάνω στην βάση αλλά και βοηθάει στην εξάλειψη των παραμορφώσεων λόγω μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας. Η FDM είναι από τις

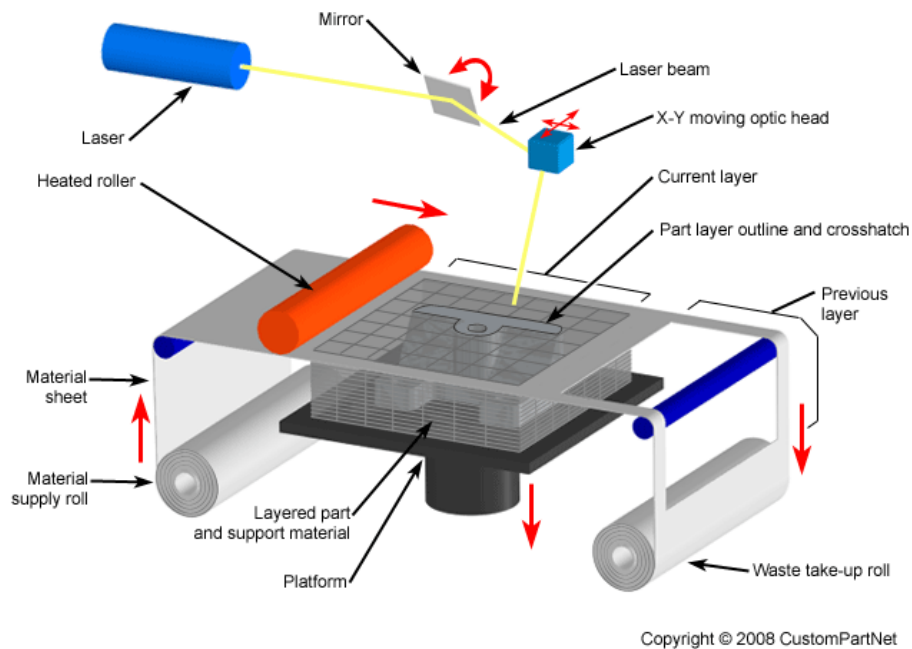
τεχνολογίες που για την κατασκευή γεωμετριών με κλίση μικρότερη από 45 μοίρες, σε σχέση με την βάση κατασκευής, χρειάζονται υποστηρικτικές δομές. Σε αυτό το κομμάτι υπάρχουν δύο κατηγορίες μηχανημάτων, αυτά που χρησιμοποιούν μία κεφαλή και αυτά που χρησιμοποιούν δύο. Στην δεύτερη κατηγορία η μια κεφαλή χρησιμοποιείται για την κατασκευή της κύριας γεωμετρίας του αντικειμένου και η δεύτερη για την κατασκευή υποστηρικτικών δομών με χρήση διαφορετικού υλικού, κάνοντας έτσι πιο εύκολη την αφαίρεσή τους. Στην πρώτη κατηγορία η ίδια κεφαλή χρησιμοποιείται και για τις δύο εργασίες.

Nozzle Diameter	Layer Height	Print time
0.3 mm	0.1 mm	3h 55 min
0.3 mm	0.15 mm	2h 40 min
0.3 mm	0.2 mm	2h 4 min
0.4 mm	0.15 mm	2h 38 min
0.4 mm	0.2 mm	2h 2 min
0.4 mm	0.3 mm	1h 24 min
0.5 mm	0.2 mm	2h 0 min
0.5 mm	0.3 mm	1h 23 min
0.5 mm	0.4 mm	1h 6 min
0.8 mm	0.4 mm	1h 5 min
0.8 mm	0.5 mm	52 min
0.8 mm	0.6 mm	44 min
1.0 mm	0.5 mm	52 min
1.0 mm	0.6 mm	45 min
1.0 mm	0.75 mm	41 min

Εικόνα 2-14. Διάφορες διαμέτρους ακροφύσιου και το πάχος των στρώσεων αλλά και ο χρόνος εκτύπωσης που προκύπτει από την χρήση τους.

2.2.4.2 Laminated Object Manufacturing (LOM)

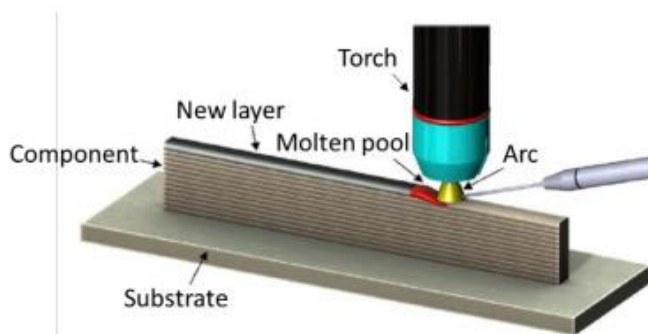
Στην τεχνολογία LOM (Laminated Object Manufacturing) τα αντικείμενα παράγονται με περικοπή με λέιζερ και συγκόλληση στρώσεων φύλλων χαρτιού με κόλλα, η οποία ενεργοποιείται με την θερμότητα. Το υλικό τροφοδοτείται με δύο ρολά, ένα τροφοδοσίας και ένα συγκέντρωσης. Κύριο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι ταχύτερη κατασκευή των αντικειμένων, καθώς η ακτίνα του λέιζερ χρειάζεται να σχεδιάσει μόνο το εξωτερικό περίγραμμά τους. Η επιφάνεια του φύλλου που βρίσκεται εκτός του περιγράμματος, διαγραμμίζεται σε μικρά ορθογώνια από το λέιζερ για την ευκολότερη αφαίρεσή τους. Σε κάθε στρώση, μετά την διαγράμμιση και των ορθογώνιων, ένας κύλινδρος συγκόλλησης περνάει πάνω από το φύλλο με πίεση και θερμότητα για να συγκολλήσει το καινούργιο στρώμα στα παλιά. Στο τέλος της διαδικασίας το αντικείμενο βρίσκεται εντός ενός ορθογώνιου που αποτελείται και από την διαγραμμισμένη σε ορθογώνια γεωμετρία (η οποία χρησιμοποιείται και υποστηρικτικά). Επομένως, το περισσεύων υλικό πρέπει να αφαιρεθεί χειρωνακτικά. Ακόμη, πρέπει να βαφτεί για να προστατευτεί κυρίως από την υγρασία.



Εικόνα 2-15. Απεικόνιση της διεργασίας LOM.

Με την τεχνολογία αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν χάρτινα, πλαστικά αλλά και μεταλλικά υλικά. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που σαν διεργασία έχει μικρό κόστος παραγωγής προϊόντων. Μπορούν να κατασκευαστούν από μικρά μέχρι μεγάλα αντικείμενα χωρίς την χρήση στηριγμάτων και ταχύτατα, σε σχέση με τις υπόλοιπες διεργασίες. Όμως, σε αυτό που υστερεί είναι η ποιότητα κατασκευής των προϊόντων. Επιπλέον, ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι ότι όσα αντικείμενα φέρουν κλειστούς όγκους με κοίλα μορφολογικά χαρακτηριστικά δεν μπορούν να κατασκευαστούν ως ένα ενιαίο αντικείμενο. Ακόμη, ένα μειονέκτημα είναι ότι απορρίπτεται μεγάλο μέρος υλικού το οποίο δεν χρειάζεται για την κατασκευή του αντικειμένου.

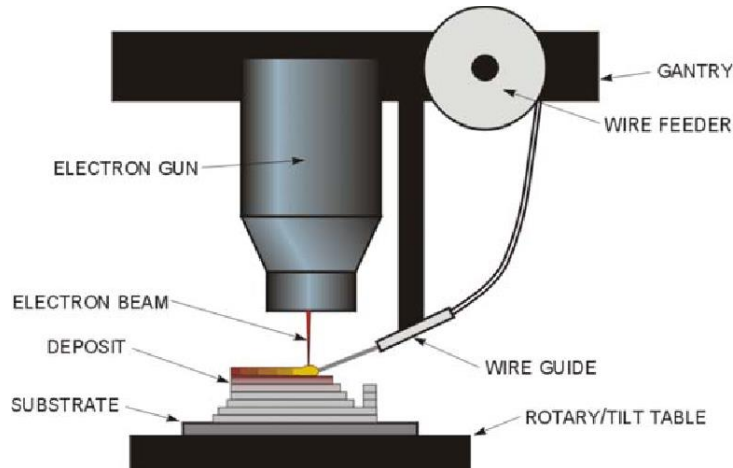
2.2.4.3 Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)



Εικόνα 2-16. Απεικόνιση της WAAM.

Στην WAAM χρησιμοποιούνται μέταλλα σε μορφή σύρματος, τα οποία δημιουργούν στρώσεις με ηλεκτρική συγκόλληση. Το σύρμα ηλεκτροδίου τήκεται όταν περνάει από το ηλεκτρικό τόξο, και έτσι μπορεί να κολλήσει στην βάση κατασκευής ή στη προηγούμενη στρώση. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τιτάνιο, αλουμίνιο και χάλυβας. Η WAAM προτιμάται γιατί μπορεί να παράξει μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα σε σχετικά μικρό χρόνο και κόστος, καθώς πετυχαίνει μεγαλύτερα ποσοστά εναπόθεσης [10]. Επιπλέον, χρησιμοποιείται ρομποτικός βραχίονας, ο οποίος κινείται σε 6 άξονες, ενώ παράλληλα μπορεί να περιστρέφεται η βάση κατασκευής. Με βάση αυτό μπορούν να κατασκευαστούν αντικείμενα χωρίς τον περιορισμό για παράλληλα στρώματα, εξαλείφοντας και την ανάγκη για υποστηρικτικές δομές. Όμως, η ποιότητα των επιφανειών είναι αρκετά χειρότερη σε σχέση με άλλες μεθόδους (το πάχος κάθε στρώσης είναι 1 ή 2 χιλιοστά) και συνήθως χρειάζεται αρκετή μετεπεξεργασία, όπως κοπές επιφανειών ή θερμική επεξεργασία [11].

2.2.4.4 Electron Beam Free Form Fabrication (EBF3)

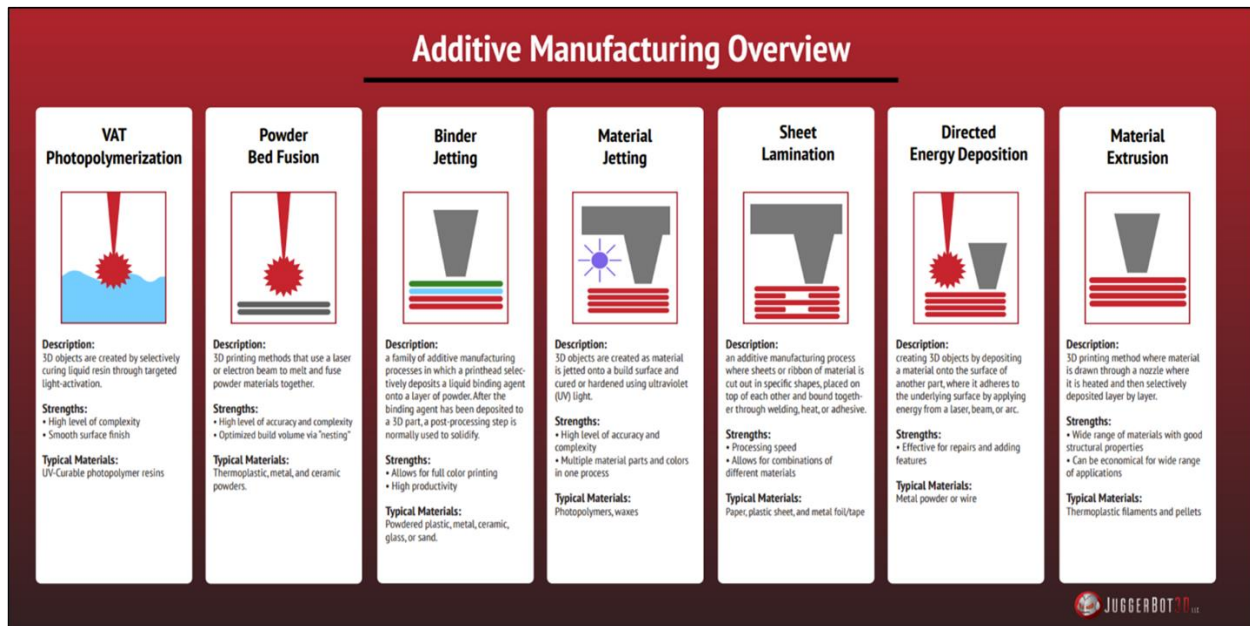


Εικόνα 2-17. Απεικόνιση της EBF3.

Σε αυτή την μέθοδο χρησιμοποιείται μια δέσμη ηλεκτρονίων για να συγκολλήσει τα σωματίδια της πούδρας ενός υλικού σχηματίζοντας με αυτόν τον τρόπο την κάθε στρώση. Η πούδρα τροφοδοτείται μέσω ενός ακροφύσιου. Κύριο πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει υλικά με υψηλό σημείο τήξης. Η δέσμη ηλεκτρονίων επιτρέπει πιο επιλεκτική τήξη υλικού και συνεπώς μεγαλύτερη ακρίβεια στα κατασκευασμένα αντικείμενα.

2.3 Διαφορετικός τρόπος ταξινόμησης

Με έναν διαφορετικό τρόπο ταξινόμησης, με βάση κάποια κοινά χαρακτηριστικά, μπορούμε να χωρίσουμε τις τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής στις επτά κατηγορίες.



Εικόνα 2-18. Κατηγορίες ταξινόμησης τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής.

2.3.1 Φωτοπολυμερισμός σε κάδο (Vat photopolymerization)

Στην μέθοδο Φωτοπολυμερισμού σε κάδο χρησιμοποιούνται ρητίνες σε υγρή μορφή, οι οποίες στερεοποιούνται επιλεκτικά με την βοήθεια ενός laser, σχηματίζοντας τις στρώσεις που περιγράφουν το αντικείμενο προς κατασκευή. Μετά τον σχηματισμό κάθε στρώσης η βάση κατασκευής μετακινείται είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω, δηλαδή είτε μέσα στην ρητίνη είτε προς τα έξω, ανάλογα με την μηχανή. Τα προϊόντα της μεθόδου χαρακτηρίζονται από εξαιρετική ποιότητα κατασκευής αλλά και μικρό μέγεθος [5].

2.3.2 Σύντηξη πούδρας σε κλίση (Powder bed fusion)

Στην μέθοδο Powder bed fusion χρησιμοποιούνται υλικά σε μορφή πούδρας, των οποίων τα σωματίδια ενώνονται με την χρήση ακτινών laser, δημιουργώντας έτσι κάθε στρώση ενός αντικειμένου. Μετά από την σχεδίαση της στρώσης με το laser πάνω στην πούδρα, ένας κύλινδρος ή μια λεπίδα τροφοδοτεί νέο υλικό για την επόμενη στρώση. Οι τεχνολογίες που ανήκουν σε αυτήν την μέθοδο χαρακτηρίζονται από μειωμένη σπατάλη υλικού, καθώς δεν χρειάζονται υποστηρικτικές δομές αλλά και η περισσευούμενη πούδρα μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Επιπλέον, τα τελικά προϊόντα είναι λειτουργικά, με καλή ποιότητα κατασκευής, και οι χρόνοι κατασκευής τους μικροί καθώς υπάρχει η δυνατότητα παράλληλης κατασκευής πολλών εξαρτημάτων ταυτόχρονα [5].

2.3.3 Εξώθηση υλικού (Material extrusion)

Στην Εξώθηση υλικού το θερμοπλαστικό υλικό που χρησιμοποιείται, βρίσκεται σε μορφή νήματος και περνάει μέσα από ένα θερμαινόμενο ακροφύσιο (το οποίο έχει ρυθμιστεί στην θερμοκρασία τήξης του υλικού). Με την βοήθεια της κίνησης της κεφαλής εξώθησης σε δύο άξονες, κατατίθεται το υλικό σχηματίζοντας τις διατομές του αντικειμένου και στερεοποιείται γρήγορα (λόγω της μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας). Η απλότητα και τα φθηνά υλικά έχουν κάνει την συγκεκριμένη μέθοδο πολύ δημοφιλή, κάτι που έχει μειώσει δραματικά και το κόστος αγοράς των μηχανημάτων αλλά και παραγωγής των προϊόντων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία προτιμάται καθώς απαιτεί πολύ χαμηλό κόστος για την δημιουργία πρωτοτύπων αλλά και αντικειμένων ετοιμών για χρήση με απλές και φθηνές διαδικασίες μετεπεξεργασίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και για την δημιουργία κτισμάτων αλλά και γλυκών [5]. Τέλος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο ακροφύσια αντί για ένα, τόσο για την κατασκευή ξεχωριστή κατασκευή υποστηρικτικών δομών και βασικής γεωμετρίας, όσο και για την χρήση διαφορετικού υλικού στο κέλυφος από το εσωτερικό.

2.3.4 Εναπόθεση υλικού (Material jetting)

Στην εναπόθεση υλικού χρησιμοποιούνται σταγονίδια υλικού τα οποία αφού ψεκαστούν επιλεκτικά, χρησιμοποιείται ένα φως UV για να τα στερεοποιήσει στην πλατφόρμα κατασκευής. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως θερμοσκληρυνόμενα φωτοπολυμερή. Κάποια από τα πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας είναι οι ομογενείς ιδιότητες, η μεγάλη ακρίβεια αποτύπωσης και η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών υλικών. Όμως, τα υλικά αυτά είναι ακριβά προς την αγορά τους [5].

2.3.5 Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας (Binder jetting)

Η Εναπόθεση συγκολλητικής ουσίας είναι η μέθοδος στην οποία χρησιμοποιείται υγρή συγκολλητική ουσία για να ενώσει τους κόκκους της πούδρας ενός υλικού, με σκοπό να σχηματίσει στρώσεις και τελικά το προϊόν. Μετά από κάθε στρώση η βάση κατασκευής κατεβαίνει προς τα κάτω, όσο είναι το πάχος κάθε στρώματος, και νέο υλικό τροφοδοτείται πάνω στην βάση για την δημιουργία της επόμενης στρώσης. Αυτή η μέθοδος προτιμάται για τους μικρούς χρόνους κατασκευής και την ικανότητα δημιουργίας περίπλοκων δομών χωρίς την χρήση υποστηρικτικών δομών [5].

2.3.6 Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας (Directed Energy Deposition)

Η Κατευθυνόμενη Εναπόθεση Ενέργειας είναι μια μέθοδος μεταξύ εξώθησης υλικού και σύντηξης πούδρας σε κλίση, καθώς χρησιμοποιεί ένα laser ώστε να τήξει τους κόκκους πούδρας την στιγμή που βγαίνουν από το ακροφύσιο. Πέρα από πούδρες, υπάρχουν μηχανήματα που χρησιμοποιούν σύρματα, ενώ σχεδόν πάντα χρησιμοποιούνται μεταλλικά υλικά. Η συγκεκριμένη μέθοδος προτιμάται,

έναντι της PBF, γιατί είναι πιο γρήγορη, οικονομική αλλά και δίνει την δυνατότητα χρήσης πολλαπλών υλικών.

2.3.7 Επάλληλων φύλλων (Sheet lamination)

Στην Sheet lamination χρησιμοποιούνται λεπτά φύλλα υλικού τα οποία είτε συγκολλούνται και μετά χαράσσεται το περισσεύον υλικό, είτε πρώτα σχηματίζεται η γεωμετρία της εκάστοτε τομής του αντικειμένου και μετά συγκολλούνται τα φύλλα. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι διάφορα μέταλλα, πλαστικά και χαρτί. Η ενέργεια που χρειάζονται για την λειτουργία τους οι μηχανές είναι σχετικά μικρή και γενικά το κόστος παραγωγής είναι μικρό. Παρόλα αυτά, είναι μια μέθοδος στην οποία σπαταλάται πολύ υλικό και η μετεπεξεργασία είναι αναγκαία.

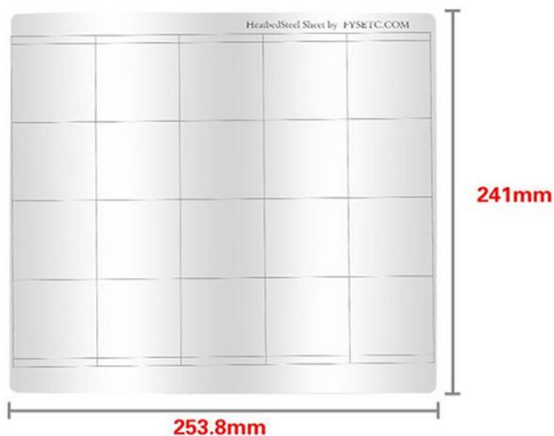
2.4 Τα βήματα της Προσθετικής Κατασκευής



Εικόνα 2-19. Τα πέντε στάδια της προσθετικής κατασκευής.

2.4.1 Από την ιδέα στο CAD

Η διαδικασία αρχίζει με την σύλληψη της ιδέας. Ο σχεδιαστής πρέπει να περιγράψει την ομάδα χρηστών, το πλαίσιο χρήσης του προϊόντος, την ανεκπλήρωτη ανάγκη και το μέσον εκπλήρωσής της. Αυτά τα στοιχεία θα συντελέσουν στην δημιουργία του brief. Στην συνέχεια πρέπει να οριστούν οι προδιαγραφές σχεδίασης. Μετά από αυτό το στάδιο ο σχεδιαστής μπορεί να αρχίσει να δημιουργεί πρόχειρα σχέδια που περιγράφουν την μορφή και την λειτουργία του προϊόντος. Έχοντας έστω τα σχέδια του πρωτοτύπου, μπορεί να το σχεδιάσει ψηφιακά με την βοήθεια CAD προγράμματος. Το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο αυτό στην συνέχεια θα αποτελέσει την βάση για την κατασκευή του. Το ψηφιακό μοντέλο μπορεί να δημιουργηθεί είτε από τον σχεδιαστή μέσω ενός συστήματος CAD, είτε μέσω τρισδιάστατης σάρωσης ενός φυσικού αντικειμένου, είτε αυτόματα από λογισμικό με την βοήθεια αλγορίθμου. Αν το τρισδιάστατο μοντέλο χωράει στον κατασκευαστικό χώρο της μηχανής προσθετικής κατασκευής, τότε μπορεί να δημιουργηθεί.



Εικόνα 2-20. Heatbed επιφάνεια κατασκευής για εκτυπωτή Prusa i3 Mk3.

2.4.2 Μετατροπή αρχείου σε STL/AMF/3MF

Η συνηθέστερη μορφή αρχείου είναι η STL, προέρχεται από την πρώτη τεχνολογία προσθετικής κατασκευής, την STereoLithography. Το αρχείο STL περιγράφει γεωμετρικά ένα μοντέλο μετατρέποντας τις επιφάνειές του σε τριγωνικές έδρες. Όσο πιο μικρές και πολλές τριγωνικές έδρες χρησιμοποιεί ένα σύστημα CAD για την αποτύπωση του μοντέλου, τόσο πιο πιστό στην σχεδιασμένη γεωμετρία του θα είναι το εκτυπωμένο αντικείμενο. Φυσικά, κάτι τέτοιο συνεπάγεται και σε μεγαλύτερο μέγεθος αρχείου.

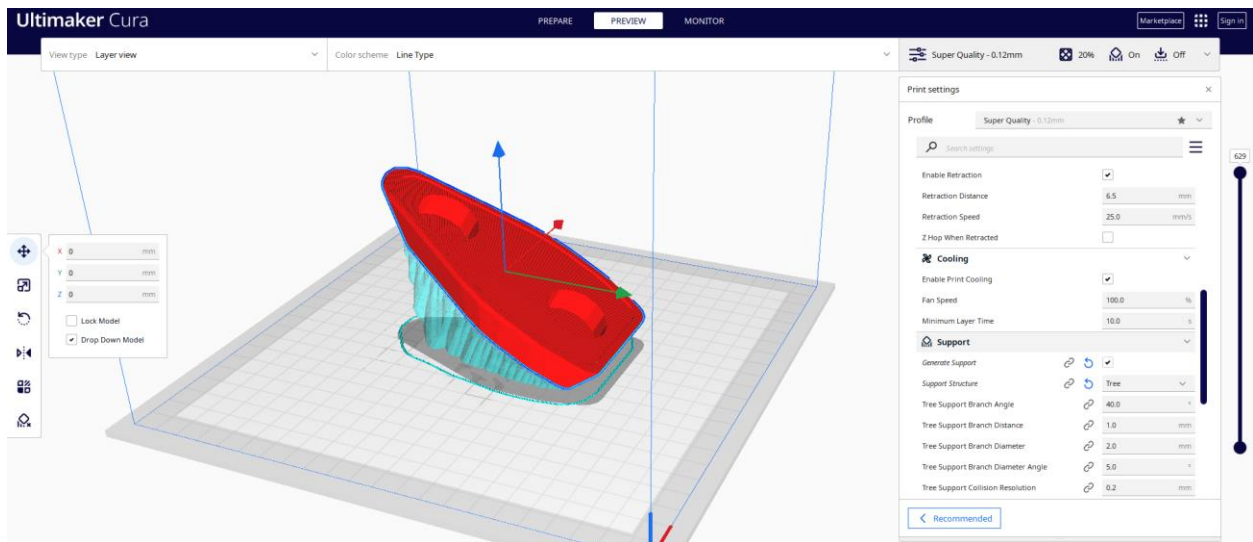
Παρόλα αυτά, το αρχείο STL έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, δεν περιέχει πληροφορίες σχετικά με το χρώμα, την υφή, το υλικό ή οποιοδήποτε άλλο χαρακτηριστικό πέρα των τριγώνων και της θέσης τους. Για αυτόν το λόγο δημιουργήθηκε το αρχείο AMF, το οποίο είναι πλέον ASTM/ISO πρότυπο και περιλαμβάνει αυτές τις επιπλέον πληροφορίες.



Εικόνα 2-21. Διαφορά STL με 3MF ως προς την μνήμη που καταλαμβάνουν τα αρχεία.

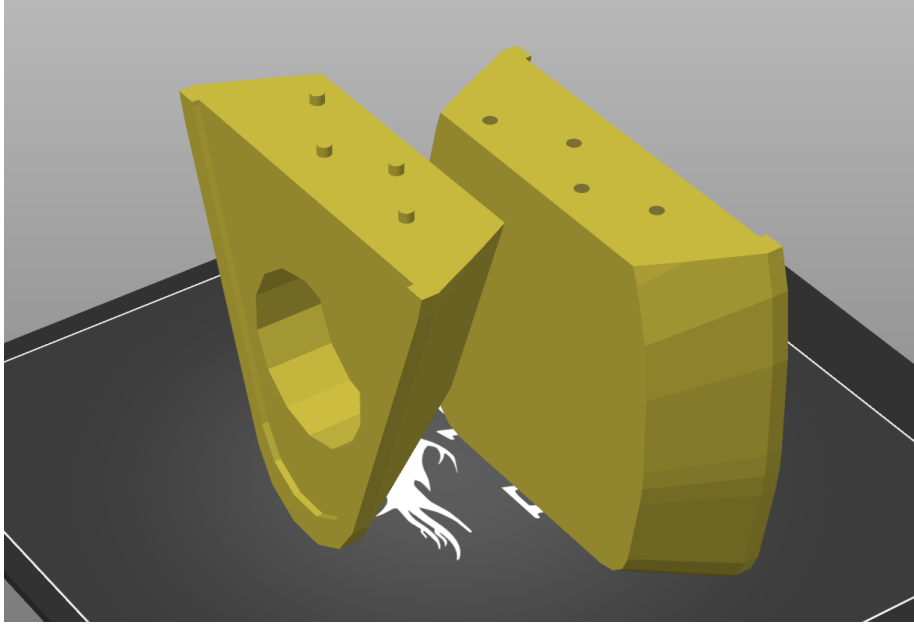
Σε μερικές περιπτώσεις ένα αρχείο STL μπορεί να περιέχει λάθη, λόγω σχεδιαστικών ατελειών ή κατά την μετατροπή ενός αρχείου CAD σε STL. Υπάρχουν όμως λογισμικά επιδιόρθωσης αυτών των λαθών ώστε να αποφευχθούν αποτυχίες κατά την κατασκευή του αντικειμένου.

2.4.3 Λογισμικά διαχείρισης STL αρχείων



Εικόνα 2-22. Επιφάνεια εργασίας στο λογισμικό Ultimaker Cura. Με κόκκινο απεικονίζεται το μοντέλο που έχει εισαχθεί σε μορφή stl και με γαλάζιο οι υποστηρικτικές δομές που θα χρειαστούν για την κατασκευή του.

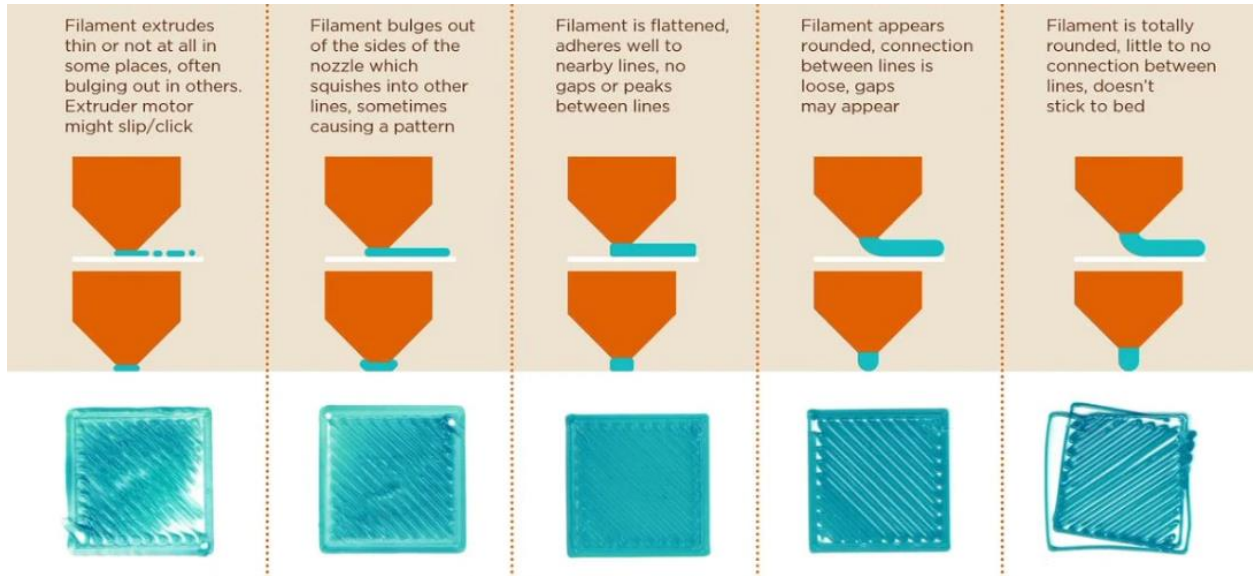
Συνήθως, τα λογισμικά προγραμματισμού των μηχανών ΠΚ διαθέτουν οπτικοποίηση του αντικειμένου που θα κατασκευαστεί. Ο χρήστης, μεταξύ άλλων, μπορεί να το μετακινήσει, να το μεγεθύνει/ συρρικνώσει, να αλλάξει τον προσανατολισμό του, αλλά και να προσθέσει περισσότερα αντικείμενα για να κατασκευαστούν ταυτόχρονα. Συνήθιζεται να εκτυπώνονται ελαφρώς μεγεθυμένα τα μοντέλα ώστε μετά την λείανση να έχουν το επιθυμητό σχεδιασμένο μέγεθος. Κάποια λογισμικά προγραμματισμού διαθέτουν κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά, όπως την προσθήκη ανάγλυφων χαρακτήρων αλλά και τον χωρισμό ενός μεγάλου αντικειμένου με βοηθητική γεωμετρία για την ένωση του μετά την κατασκευή.



Εικόνα 2-23. Επιλογή τοποθέτησης συνδετικής γεωμετρίας σε ένα μεγάλο μοντέλο, στο λογισμικό PrusaSlicer 2.6.

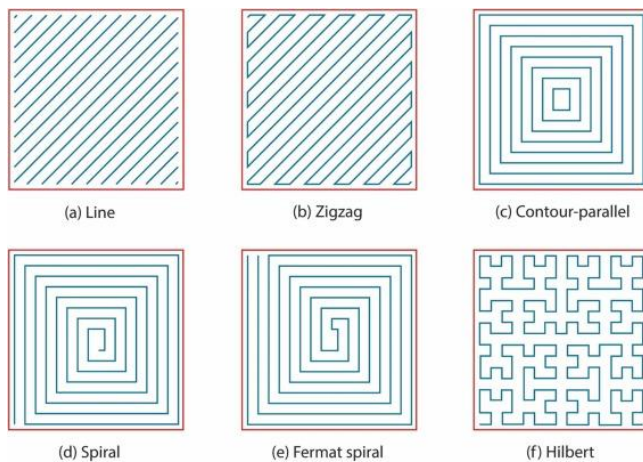
2.4.4 Προγραμματισμός της μηχανής ΠΚ

Οι συνηθέστερες παράμετροι που επιλέγει ο χειριστής της μηχανής είναι το πάχος του στρώματος, η ταχύτητα μετακίνησης της συσκευής αλλά και η επιλογή του υλικού και των παραμέτρων του. Το πάχος των στρωμάτων βρίσκεται σε μια κλίμακα από 0,05 έως 0,25mm, ανάλογα την μηχανή προσθετικής κατασκευής που χρησιμοποιείται. Προετοιμασία της μηχανής αποτελεί και η τροφοδοσία της μηχανής με υλικό, σε όποια μορφή και να είναι. Οι μηχανές που διαθέτουν κατασκευαστική πλάκα, χρειάζονται ευθυγράμμιση, η οποία είτε γίνεται χειροκίνητα είτε αυτοματοποιημένα κατά την εκκίνηση της μηχανής.



Εικόνα 2-24. Διαφορετικές ευθυγραμμίσεις της κατασκευαστικής πλάκας με τα αποτελέσματα εκτύπωσης ενός τετραγώνου.

Όσο αφορά το εσωτερικό του περιγράμματος κάθε αντικειμένου η μηχανή προσθετικής κατασκευής πρέπει να το «γεμίσει» με υλικό έχοντας ως βάση κάποιο αλγοριθμικό πρότυπο, γνωστό και ως πρότυπο πλήρωσης. Το συνηθέστερο πρότυπο πλήρωσης είναι η διαγράμμιση με παράλληλα ευθύγραμμα τμήματα (hatching) σε μία ή παραπάνω κατευθύνσεις. Ένα ακόμα πρότυπο πλήρωσης είναι αυτό της ορθογώνιας σάρωσης (orthogonal scanning) το οποίο χρησιμοποιείται στην Στερεολιθογραφία και στο οποίο κάθε layer «γεμίζει» κατά τον Χ άξονα και έπειτα κατά τον Υ. Στην τεχνολογία FDM χρησιμοποιείται ένα γραμμικό πρότυπο «ζιγκ-ζαγκ» το οποίο φαίνεται στην εικόνα 3-7 (b), η γωνία εναπόθεσης μπορεί να αλλάζει από στρώμα σε στρώμα ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αντοχή. Ακόμη, υπάρχουν πρότυπα πλήρωσης σπειροειδείς, ομόκεντρα και κυψελωτά. Ο χρήστης επιλέγει το κατάλληλο πρότυπο ανάλογα με τις ιδιότητες που επιθυμεί να έχει το αντικείμενο που θα κατασκευάσει.



Εικόνα 2-25. Πρότυπα πλήρωσης

Quality			Speed		
Layer Height	0.12	mm	Print Speed	50.0	mm/s
Line Width	0.4	mm	Infill Speed	50.0	mm/s
Top/Bottom Line Width	0.4	mm	Wall Speed	25.0	mm/s
Walls			Outer Wall Speed	25.0	mm/s
Wall Thickness	1.2	mm	Inner Wall Speed	25.0	mm/s
Wall Line Count	3		Top/Bottom Speed	25.0	mm/s
Horizontal Expansion	0.0	mm	Travel Speed	150.0	mm/s
Top/Bottom			Initial Layer Speed	20.0	mm/s
Top/Bottom Thickness	0.84	mm	Initial Layer Print Speed	20.0	mm/s
Top Thickness	0.84	mm	Travel		
Top Layers	7		Enable Retraction	<input checked="" type="checkbox"/>	
Bottom Thickness	0.84	mm	Retraction Distance	6.5	mm
Bottom Layers	7		Retraction Speed	25.0	mm/s
Infill			Z Hop When Retracted	<input type="checkbox"/>	
Infill Density	20.0	%	Cooling		
Infill Pattern	Cubic		Enable Print Cooling	<input checked="" type="checkbox"/>	
Material			Fan Speed	100.0	%
Printing Temperature	200.0	°C	Minimum Layer Time	10.0	s
Build Plate Temperature	60	°C			

Εικόνα 2-26. Μερικές από τις παραμετροποιήσεις προγραμματισμού μιας μηχανής ΠΚ στο λογισμικό Ultimaker Cura 5.2.1.

2.4.5 Κατασκευαστική διεργασία

Η διεργασία κατασκευής, στην συνέχεια, είναι κατά κύριο λόγο αυτοματοποιημένη. Η κατασκευή των στρωμάτων γίνεται μέσω κινούμενης, κατά τον κάθετο άξονα κατασκευής, κεφαλής εναπόθεσης υλικού ή κατασκευαστική πλατφόρμα. Ο σχηματισμός των στρωμάτων σε κάποιες τεχνολογίες είναι ταυτόχρονος με την εναπόθεση του υλικού, ενώ σε κάποιες ξεχωριστά.

2.4.6 Απομάκρυνση και καθαρισμός



Εικόνα 2-27. Αφαίρεση υποστηρικτικών δομών.

Μερικές τεχνολογίες ΠΚ απαιτούν ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση, αφού έχει κατασκευαστεί το αντικείμενο, όπως αφαίρεση υποστηρικτικού υλικού, ενώ σε άλλες χρειάζεται αρκετή μετεπεξεργασία του αντικειμένου. Το κοινό σε όλες τις περιπτώσεις είναι ότι πρέπει να απομακρυνθεί το προϊόν από την κατασκευαστική πλατφόρμα. Όταν κατασκευάζεται ένα μεταλλικό αντικείμενο, μεταλλικά θα είναι και τα στηρίγματα που θα δημιουργηθούν. Για να απομακρυνθούν μπορεί να χρειαστεί φρέζα ή μηχάνημα ηλεκτροδιάβρωσης με σύρμα.

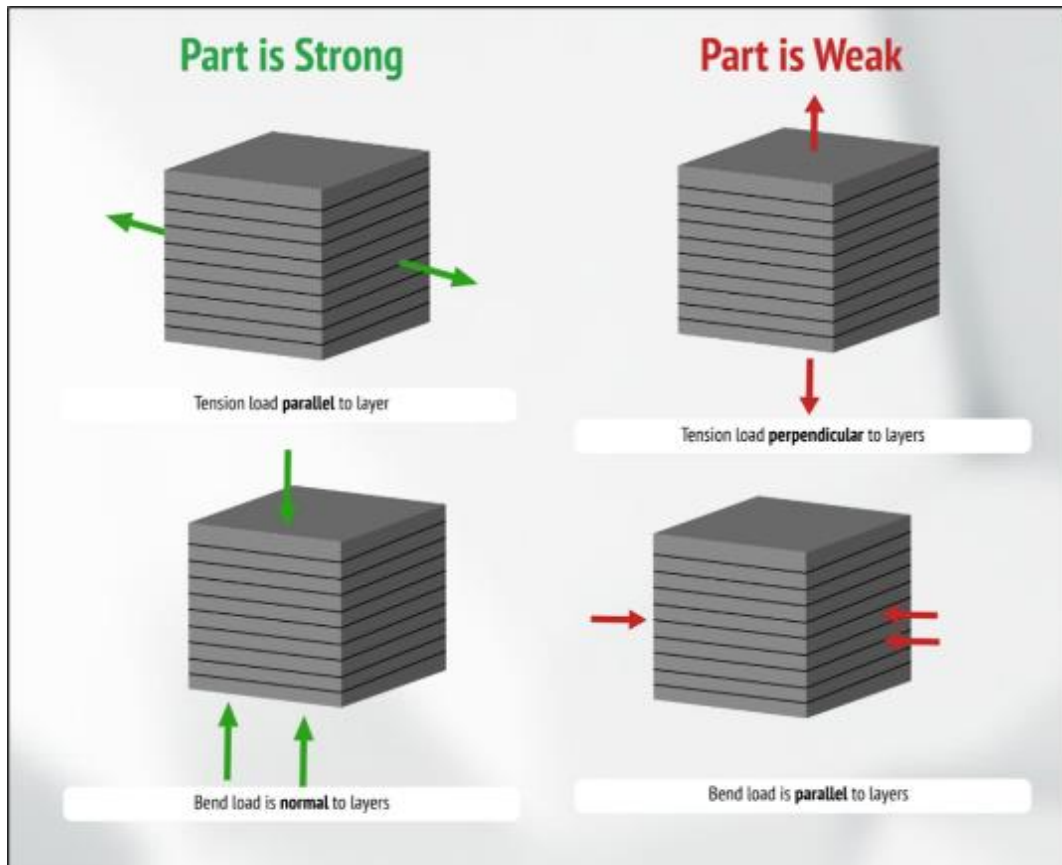
2.4.7 Μετεπεξεργασία



Εικόνα 2-28. Δεξιά απεικονίζεται το αντικείμενο που δεν έχει δεχτεί επεξεργασία και αριστερά φαίνεται πως είναι μετά την λείανση και την βαφή του.

Σε αυτό το βήμα λαμβάνουν χώρα οι λειάνσεις και οι επικαλύψεις που μπορεί να χρειαστεί το αντικείμενο προκειμένου να αποκτήσει καλή ποιότητα επιφάνειας και σωστές διαστάσεις. Κάποιες τεχνολογίες ΠΚ απαιτούν θερμική ή χημική επεξεργασία, ώστε να βελτιωθούν οι ιδιότητες του αντικειμένου. Το συγκεκριμένο βήμα απαιτεί αρκετή χειρωνακτική εργασία.

2.4.8 Χρήση



Εικόνα 2-29. Μηχανική συμπεριφορά αντικειμένων που έχουν παραχθεί με προσθετική κατασκευή.

Τα αντικείμενα που έχουν παραχθεί από κάποια μέθοδο προσθετικής κατασκευής έχουν διαφορετικές ιδιότητες από αυτά που έχουν κατασκευαστεί με συμβατικές μεθόδους, ακόμα και αν είναι από το ίδιο ή παρόμοιο υλικό. Οι ιδιότητες των «εκτυπωμένων» αντικειμένων παρουσιάζουν ανισοτροπική συμπεριφορά (σε διαφορετικές διευθύνσεις παρουσιάζονται διαφορετικές ιδιότητες κατά την φόρτιση). Επομένως, για την fail-safe μελέτη ενός εκτυπωμένου αντικειμένου παίζει μεγάλο ρόλο ο προσανατολισμός κατασκευής του.

2.5 Πλεονεκτήματα τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής

Τα πλεονεκτήματα της προσθετικής κατασκευής σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής βιομηχανικών προϊόντων είναι αρκετά. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι μέθοδοι προσθετικής κατασκευής βρίσκονται ακόμα υπό εξέλιξη. Με βάση αυτό, πολλοί εντάσσουν την τεχνολογία προσθετικής κατασκευής στην 4η βιομηχανική επανάσταση.

Ο προγραμματισμός της παραγωγής είναι πιο απλός σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και ο χρόνος παραγωγής καθώς η επέμβαση του ανθρώπου είναι ελάχιστη και η διαδικασία παραγωγής, για τις περισσότερες τεχνολογίες, σχεδόν αυτοματοποιημένη [7]. Επίσης, μια μικρή παραγωγή αντικειμένων χρειάζεται ακόμη μικρότερο χρόνο και κόστος. Τα πρωτότυπα μπορούν να δημιουργηθούν εύκολα και γρήγορα (σε μερικές ημέρες έναντι εβδομάδων ή και μηνών που θα χρειάζονταν άμα φτιάχονταν με συμβατικές μεθόδους). Ακόμη, επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια μεταξύ του τρισδιάστατου μοντέλου και του εκτυπωμένου αντικειμένου, καθώς όπως αναφέρθηκε και πριν, ο άνθρωπος υπερβαίνει σε μικρό βαθμό στην διαδικασία κατασκευής.

Αντικείμενα με περίπλοκα μορφολογικά χαρακτηριστικά είναι ευκολότερο να κατασκευαστούν με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής, έναντι των συμβατικών μεθόδων, καθώς μειώνονται τα πολλαπλά κομμάτια αλλά και οι ενώσεις μεταξύ τους. Όσο περίπλοκο και αν είναι ένα αντικείμενο χρειάζεται το πολύ δύο βήματα για να κατασκευαστεί, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους που απαιτούνται πολλαπλά και επαναληπτικά βήματα. Στην περίπτωση που αλλάξουν κάποιες σχεδιαστικές λεπτομέρειες στην φόρμα του αντικειμένου, ο χρόνος κατασκευής του θα είναι λογικά υπολογίσιμος σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους όπου μικρές αλλαγές μπορούν να προσθέσουν πολλαπλά βήματα. Η εξατομίκευση γίνεται στο στάδιο της τρισδιάστατης σχεδίασης το οποίο κάνει την κατασκευή τους πολύ απλή και εύκολη. Επιπλέον, δίνεται μεγάλη ελευθερία στον σχεδιασμό καθώς δεν χρειάζεται η χρήση ήδη υπάρχοντων εξαρτημάτων για να είναι οικονομικά βιώσιμο το νέο προϊόν.

Όσον αφορά το υλικό, καταναλώνεται πολύ λίγο έως ελάχιστο, κάνοντας την διαδικασία οικονομικότερη, αποδοτικότερη και φιλικότερη προς το περιβάλλον. Το υλικό που σπαταλάται για τις υποστηρικτικές δομές κτλ., είναι ευκολότερο να ανακυκλωθεί από αυτό των συμβατικών μεθόδων. Σε κάποιες διεργασίες είναι δυνατή η χρήση διαφορετικών υλικών από στρώση σε στρώση. Επιπλέον, με την χρήση της προσθετικής κατασκευής, δύναται να κατασκευαστούν αντικείμενα από μικροδομές μέχρι και μακροδομές. Τα μηχανήματα είναι μικρότερα και καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τα συμβατικά. Τέλος, η χρήση της τεχνολογίας καταργεί την ανάγκη για μεγάλες αποθήκες, αφού τα προϊόντα κατασκευάζονται όταν υπάρχει ζήτηση, με την μέθοδο pull.

Αναλογιζόμενοι τα παραπάνω προτερήματα της τεχνολογίας ΠΚ αλλά και την δυνατότητα γρήγορης κατασκευής πρωτοτύπων, η τεχνολογία ΠΚ μπορεί να συντελέσει στην δημιουργία μιας μεγάλης γκάμας προϊόντων Fail-Safe, καθώς μπορούν να γίνουν σε μικρότερο χρόνο, περισσότερα πειράματα αστοχίας. Ακόμη, τα μοντέλα δοκιμής δεν θα απέχουν μορφολογικά μεταξύ τους, δίνοντας πιο ακριβή δεδομένα στις μελέτες. Η ικανότητα δημιουργίας πολύπλοκων μορφολογικών χαρακτηριστικών τόσο στο εξωτερικό όσο και στο εσωτερικό ως μοτίβο πλήρωσης, δίνει στον σχεδιαστή την δυνατότητα ελέγχου της αντοχής του αντικειμένου. Ακόμη, με την εφαρμογή μοτίβου πλήρωσης στο εσωτερικό, εξοικονομείται και το υλικό.

2.6 Μειονεκτήματα τεχνολογιών Προσθετικής Κατασκευής

Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα στην τεχνολογία τα οποία βέβαια μειώνονται καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα είναι η ποικιλία των υλικών που προορίζονται για τελικά προϊόντα, η οποία είναι περιορισμένη με προσπάθειες να χρησιμοποιηθούν και ποιο πολλά σύνθετα υλικά [12]. Μερικά από τα υλικά της ΠΚ είναι τα εξής:

- ABS
- Πολυανθρακικό
- PC
- PLA
- Πολυθεραιμίδιο
- Εποξικές ρητίνες
- Ακρυλικά
- Τιτάνιο
- Ανοξείδωτο ατσάλι
- Χρυσός
- Αλουμίνιο
- Κράματα νικελίου
- Ασήμι
- Πολυστυρένιο
- Πολυπροπυλένιο

Ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα είναι η αποθήκευση των υλικών, γιατί υπάρχει κίνδυνος να υπάρξουν χημικές αντιδράσεις καταστρέφοντας την απόδοση του υλικού ή ακόμα και να γίνουν επικίνδυνα ως προς το περιβάλλον ή τον άνθρωπο [7]. Οι δύο κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση των υλικών είναι το φως και η υγρασία. Είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιούνται υλικά σύμφωνα με τις προδιαγραφές κάθε μηχανής.

Ένα ακόμα αρνητικό είναι ότι μερικά από αυτά τα υλικά είναι αρκετά ακριβά για την παραγωγή τους. Επιπλέον, το κόστος μετάβασης από την συμβατική παραγωγή στην προσθετική είναι μεγάλο. Επίσης, μερικές μέθοδοι παραγωγής μπορεί να είναι πιο αργές από τις συμβατικές, ειδικά όταν χρειάζονται μεγάλες ποσότητες προϊόντων γρήγορα. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούν σκόνη, επιβάλουν στο αντικείμενο μια τραχιά επιφάνεια, η οποία χρήζει μετεπεξεργασίας. Επιπλέον, χρειάζεται μεγάλη ποσότητα υλικού σε σκόνη, ανεξάρτητα από το μέγεθος του προϊόντος.

Η ποικιλομορφία των μηχανημάτων έχει κάνει δύσκολη την δημιουργία ενός συνόλου κανόνων οι οποίοι θα αφορούν και θα πιστοποιούν την ποιότητα των αντικειμένων, όπως αντίστοιχες συμβατικές πιστοποιήσεις. Επίσης, η επιτυχία εκτύπωσης ενός αντικειμένου βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον προγραμματισμό των παραμέτρων της μηχανής, ο οποίος μπορεί να χρειάζεται αλλαγή τόσο από προϊόν σε προϊόν αλλά και από υλικό σε υλικό [13]. Τέλος, δεν είναι εφικτό να γίνει δοκιμή ελέγχου ενός μόνο κομματιού από κάθε παρτίδα, καθώς μπορεί να φέρει διαφορετικές ιδιότητες από τα υπόλοιπα, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους. Αυτό συμβαίνει γιατί η προσθετική κατασκευή δεν εξασφαλίζει πάντα την επαναληψιμότητα [13].

Συνεπώς, όσον αφορά την κατασκευή fail-safe προϊόντων, σημαντικά ζητήματα είναι η επαναληψιμότητα και η πιστοποίηση της fail-safe ιδιότητας τους.

3. Σχεδίαση για Προσθετική Κατασκευή (DfAM)

3.1 Εισαγωγή

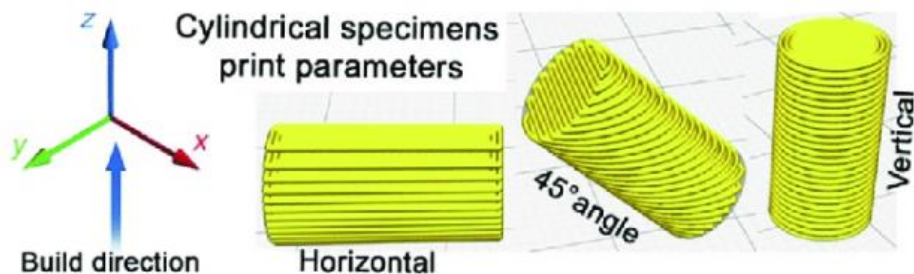
Το DfAM είναι η αξιοποίηση των ευκαιριών σχεδίασης που συνοδεύουν την προσθετική κατασκευή με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους, τον βέλτιστο χρόνο κατασκευής και εξασφάλιση της προδιαγραμμένης αντοχής και αισθητικής. Η σχεδιαστική πρόθεση (design intent) είναι ένα εργαλείο εφαρμογής των σχεδιαστικών αποφάσεων κατά την δημιουργία ενός αντικειμένου, με την χρήση παραμέτρων, περιορισμών, αλγεβρικών σχέσεων και συννοριακών συνθηκών, ως μεταβλητές ελέγχου του σχεδίου.

Οι πιο σημαντικές παράμετροι που πρέπει να ορίσει ο χρήστης είναι το πάχος στρώματος και ο προσανατολισμός κατασκευής του αντικειμένου. Ο προσανατολισμός επηρεάζει την αντοχή, την επιφάνεια που θα εμφανιστεί η κλιμάκωση των στρωμάτων, την ποσότητα των στηριγμάτων αλλά και τον χρόνο κατασκευής ενός προϊόντος. Τα συμπαγή γεωμετρικά χαρακτηριστικά συνήθως κατασκευάζονται με κάποιο μοτίβο πλήρωσης, διατηρώντας παρόμοια αντοχή και παράλληλα εξοικονομώντας χρόνο και υλικό. Τα λογισμικά προγραμματισμού των μηχανών Προσθετικής Κατασκευής ξεπερνούν τον περιορισμό της μέγιστων διαστάσεων κατασκευής της κάθε μηχανής, δίνοντας την δυνατότητα να κατασκευαστούν αντικείμενα μεγαλύτερα από την βάση κατασκευής κάθε μηχανής. Αυτό το πετυχαίνουν με τα κατάλληλα εργαλεία τεμαχισμού και προσθήκης συνδετικών χαρακτηριστικών. Ακόμη με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να κατασκευαστούν προϊόντα με διαφορετικά υλικά ή με διαφορετικό προσανατολισμό κατασκευής των μελών τους. Επίσης, ο σχεδιαστής πρέπει να λάβει υπόψη του την δυνατότητα κατασκευής λειτουργικών προσυναρμολογημένων μηχανισμών αλλά και γενικότερα την δυνατότητα μείωσης των εξαρτημάτων ενοποιώντας τα. Τέλος, υπάρχουν εργαλεία τοποθέτησης αλφαριθμητικών πάνω σε αρχεία stl ή δημιουργίας πλαισίου συγκράτησης για την αναγνώρισή τους, σε περιπτώσεις που χρειάζεται η παραγωγή μεγάλων παρτίδων όμοιων προϊόντων.

3.2 Προσανατολισμός

Προτεραιότητα έχει ο προσανατολισμός της κατασκευής, καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις υπόλοιπες παραμέτρους. Επόμενο βήμα είναι ο αυτόματος τεμαχισμός του μοντέλου σε επίπεδα, οριζόντια προς την επιφάνεια κατασκευής, ανάλογα με το επιλεγμένο πάχος στρώματος. Με την επιλογή του προσανατολισμού κατασκευής επιβάλλεται και η εμφάνιση των στρωμάτων σε αυτόν τον άξονα. Λόγω της φύσης της τεχνολογίας, η οποία αναγκάζει το αντικείμενο να κατασκευάζεται σε στρώματα, οι επιφάνειες που έχουν κάποια κλίση ως προς τον άξονα κατασκευής, θα έχουν κάποια γεωμετρική απόκλιση από το τρισδιάστατο μοντέλο. Η απόκλιση αυτή είναι ανάλογη και με το ορισμένο πάχος του στρώματος, όσο μικρότερο το πάχος του στρώματος τόσο μικρότερη η απόκλιση. Επομένως, ένα

κυλινδρικό αντικείμενο είναι προτιμότερο να εκτυπωθεί κατακόρυφα ως προς τον άξονά του. Αν εκτυπώνονταν οριζόντια θα εμφάνιζε κλιμακωτή μορφή περιμετρικά όπως φαίνεται στην εικόνα 3-1. Όμως, όσο πιο πολλά τα στρώματα τόσο πιο αργή η διαδικασία κατασκευής, άρα ο οριζόντιος κύλινδρος θα κατασκευάζονταν πιο γρήγορα από τον κατακόρυφο. Αυτό ισχύει για την πλειονότητα των τεχνολογιών ΠΚ εκτός των διεργασιών εξώθησης υλικού. Τα ρεαλιστικά αντικείμενα, ωστόσο, έχουν πιο σύνθετα γεωμετρικά στοιχεία σε διαφορετικές διευθύνσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο σχεδιαστής πρέπει να επιλέξει ανάλογα με την σπουδαιότητα κάθε γεωμετρικού στοιχείου και να προσανατολίσει κατάλληλα το αντικείμενο, ώστε να πετύχει μεγαλύτερη ακρίβεια στα σημεία βαρύτητας. Ένας ακόμη παράγοντας επιλογής προσανατολισμού είναι οι υποστηρικτικές δομές. Επειδή οι υποστηρικτικές δομές είναι υλικό το οποίο το οποίο θα πεταχτεί στο τέλος της διεργασίας, είναι προτιμότερο και για κέρδος κόστους αλλά και χρόνου να χρησιμοποιούνται όσο λιγότερο γίνεται. Επομένως, ένας προσανατολισμός μπορεί να επιλεγεί έχοντας ως κριτήριο τα ελάχιστα ή και καθόλου στηρίγματα. Στις διεργασίες που χρησιμοποιείται πούδρα τα χαρακτηριστικά που βρίσκονται κάθετα με την επιφάνεια κατασκευής θα είναι λεία και ακριβή, ενώ τα χαρακτηριστικά περιμετρικά της γεωμετρίας θα έχουν τραχιά επιφάνεια λόγω της επαφής τους με τους κόκκους.



Εικόνα 3-1. Διαφορετικοί προσανατολισμοί κατασκευής ενός κυλίνδρου.

3.3 Στηρίγματα



Εικόνα 3-2. Εκτύπωση SLA με στηρίγματα.

Τα στηρίγματα από την μια βοηθούν την διεργασία κατασκευής, αλλά από την άλλη είναι υλικό που σπαταλάται. Επομένως, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται ελάχιστα ως καθόλου. Στα σημεία επαφής των στηριγμάτων με το αντικείμενο μένουν ατέλειες οι οποίες θέλουν λείανση στο στάδιο της μετεπεξεργασίας. Όμως, σε πολλά αντικείμενα η χρήση τους μπορεί να είναι πολύ κρίσιμη, καθώς έχουν άμεσο ρόλο στην συγκράτηση του αντικειμένου με την επιφάνεια κατασκευής. Σε περίπτωση αποκόλλησης του αντικειμένου η διαδικασία κρίνεται αποτυχημένη καθώς οι περισσότερες διεργασίες δεν θα σταματήσουν να κατασκευάζουν τα επόμενα στρώματα, αλλά και να σταματήσουν δεν μπορεί να επανατοποθετηθεί το αντικείμενο στο ίδιο ακριβώς σημείο ώστε να συνεχιστεί η διαδικασία.



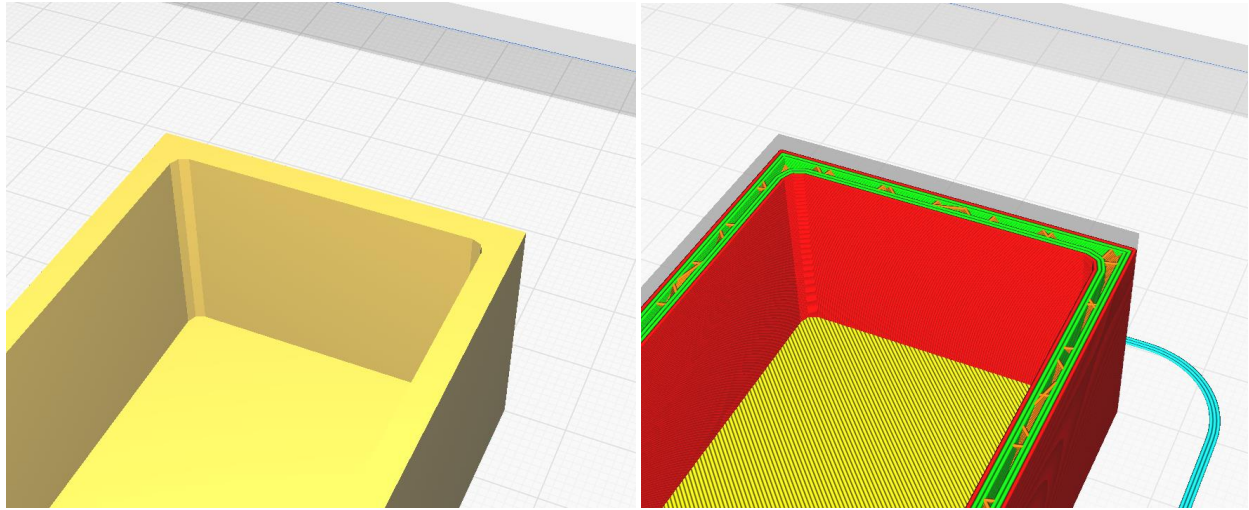
Εικόνα 3-3. Υφή επιφανειών που έχουν δεχθεί στηρίγματα για να κατασκευαστούν.

Αντικείμενα που έχουν κενό εσωτερικό αλλά και επιφάνεια που χρήζει υποστήριξης από το εσωτερικό της, όπως για παράδειγμα ένας μεσαίου μεγέθους κύβος, οι υποστηρικτικές δομές θα πρέπει αναγκαστικά να δημιουργηθούν στο εσωτερικό του αντικειμένου. Επομένως, στο τέλος της διεργασίας δεν θα μπορούν να αφαιρεθούν. Στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ρητίνη η πούδρα θα έχει εγκλωβιστεί και αυτή σε υγρή ή κοκκώδη μορφή αντίστοιχα. Μια λύση στα παραπάνω προβλήματα είναι η δημιουργία οπών στην γεωμετρία των αντικειμένων, οι οποίες στην συνέχεια θα μπορούν να κλείσουν με τάπες. Ακόμη, μπορεί να χωριστεί το αντικείμενο σε μέρη και να ενωθεί στην συνέχεια.



Εικόνα 3-4. Αντικείμενο με κούφιο εσωτερικό το οποίο θα κατασκευαστεί με ρητίνη. Στο χαμηλότερο σημείο του έχουν γίνει οπές για να ελευθερωθεί η ρητίνη που δεν πολυμερίστηκε.

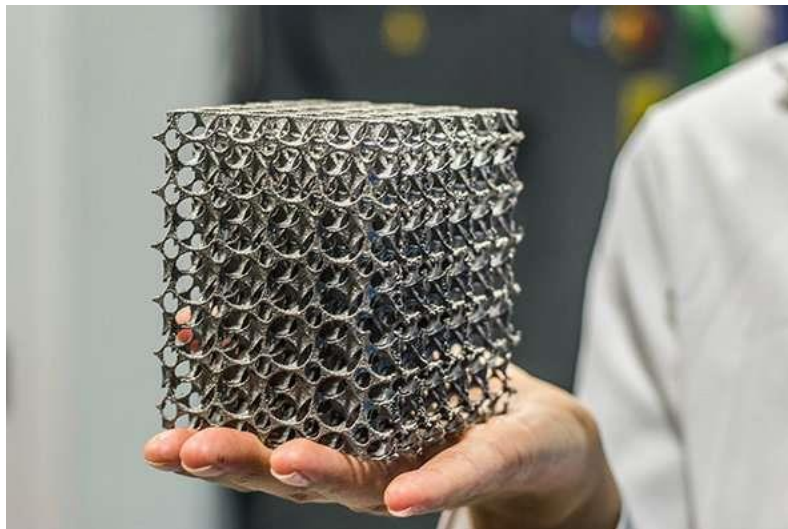
3.4 Κούφια τοιχώματα



Εικόνα 3-5α και 3-5β. Αριστερά απεικονίζεται το αντικείμενο προς εκτύπωση και δεξιά το πως θα κατασκευαστεί με μηχάνημα τεχνολογίας FDM.

Τα τοιχώματα των αντικειμένων με μεγάλο πάχος, συνήθως κατασκευάζονται με εσωτερικό μοτίβο πλήρωσης για οικονομία χρόνου, υλικού, αλλά και μάζας όπως φαίνεται στην εικόνα 6-5β. Η κυψελωτή μορφή είναι μια δημοφιλής επιλογή καθώς παρέχει μεγάλη μηχανική αντοχή, χρησιμοποιώντας λιγότερο υλικό.

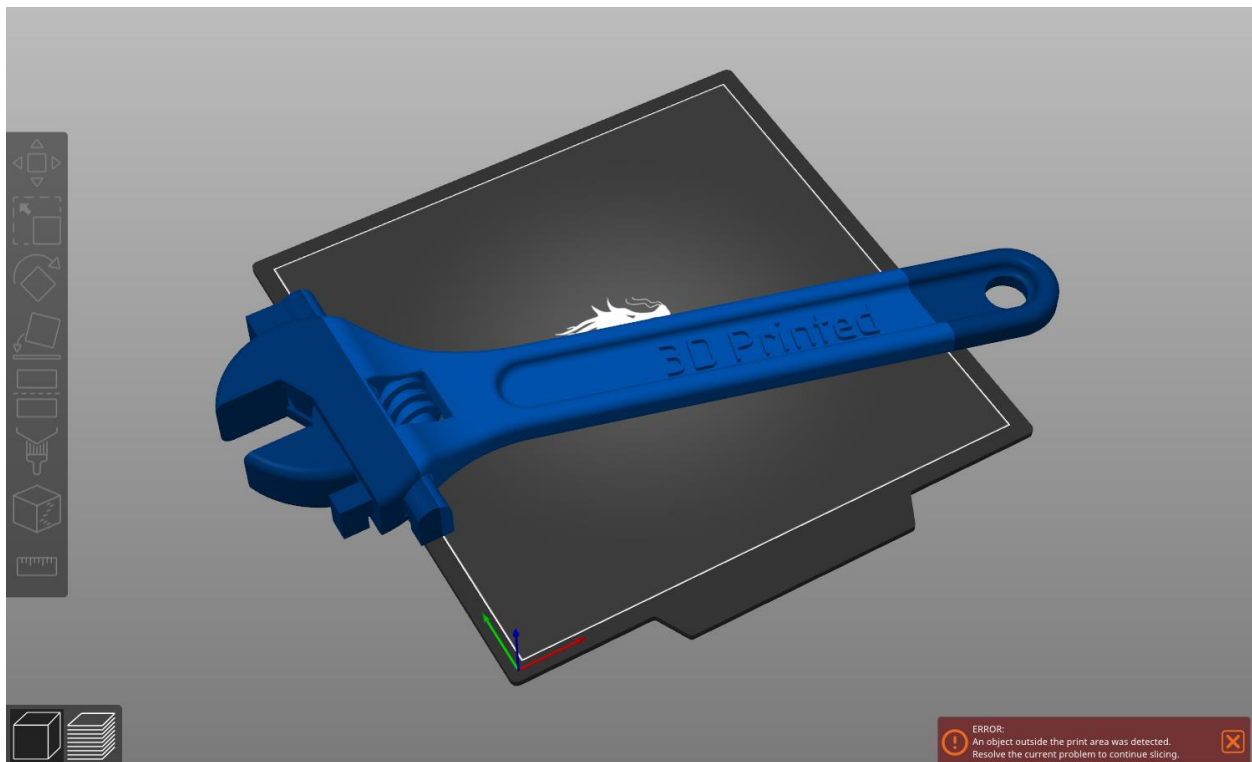
3.5 Υποκοπές και άλλα κατασκευαστικά περιοριστικά χαρακτηριστικά



Εικόνα 3-6. Γεωμετρικά πολύπλοκο αντικείμενο φτιαγμένο με προσθετική κατασκευή.

Στην φάση του ιδεασμού και των αρχικών προτάσεων, όπου η κατασκευασιμότητα δεν έχει αρχίζει να παίζει ρόλο, η χρήση συμβατικών μεθόδων κατασκευής πρωτοτύπων είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Αυτό συμβαίνει γιατί χρειάζεται προγραμματισμό, επιλογή των κατάλληλων κατασκευαστικών μεθόδων αλλά και της σειράς τους, για την δημιουργία των διάφορων χαρακτηριστικών του, όπως οπές, σπειρώματα, εσοχές κ.α. Επομένως, η χρήση των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής διαθέτει μεγάλο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην συγκεκριμένη φάση του σχεδιασμού. Επιπλέον, η χρήση τέτοιων τεχνολογιών βοηθάει στην ευκολότερη επιλογή χαρακτηριστικών του τελικό προϊόντος για τους παραπάνω λόγους.

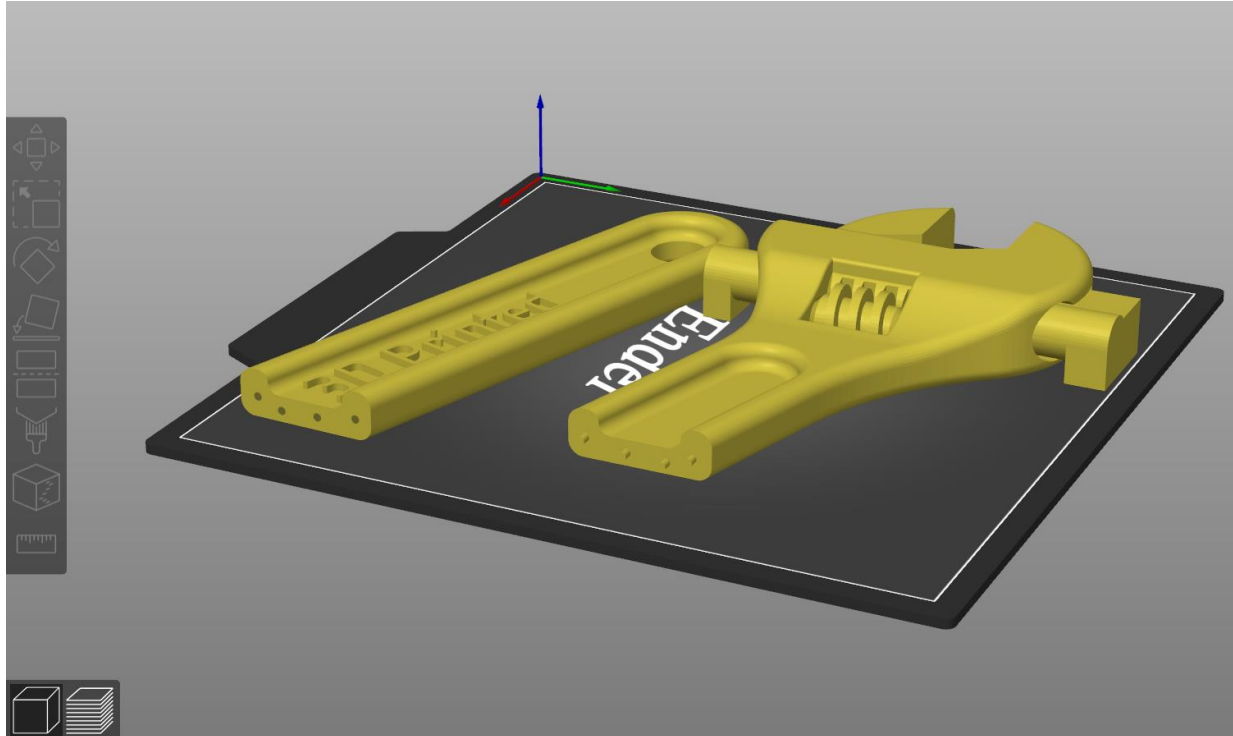
3.6 Συνδετικά χαρακτηριστικά



Εικόνα 3-7. Αντικείμενο μεγαλύτερο από την διαθέσιμη κατασκευαστική επιφάνεια της μηχανής ΠΚ.

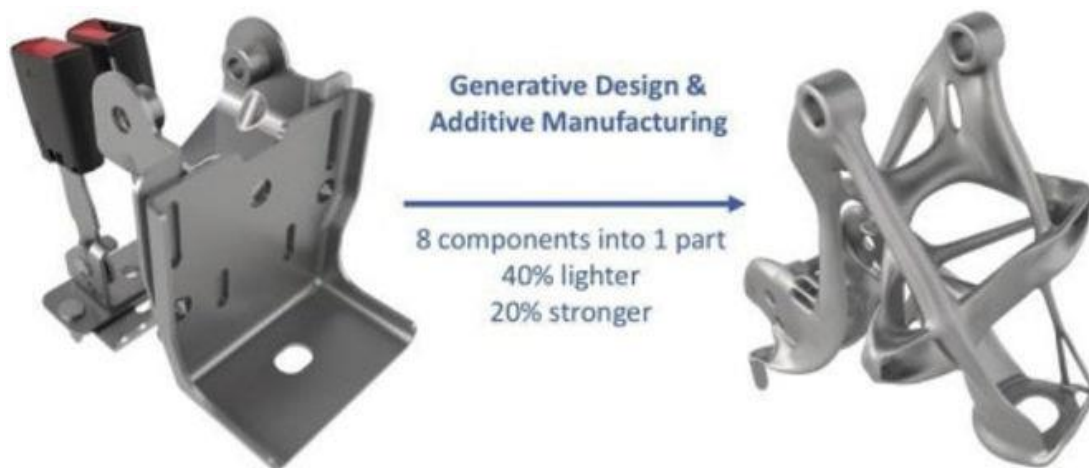
Αν και η τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς και διατίθενται στην αγορά μηχανές με μεγάλες επιφάνειες κατασκευής αντικειμένων (σε μερικές τεχνολογίες), ο ενιαία κατασκευή μεγάλων αντικειμένων δεν είναι πάντα εφικτή. Για αυτόν τον λόγο, ο σχεδιαστής θα πρέπει να ορίσει κατάλληλα τα σημεία τομής του αντικειμένου για την εύκολη και μη ορατή, όσο γίνεται, συναρμολόγησή του. Το λογισμικό PrusaSlicer 2.6 επιτρέπει στον χρήστη να επιλέγει τα μέρη τομής του αντικειμένου, τα σημεία αλλά και την ποσότητα των γεωμετρικών συνδετικών χαρακτηριστικών, με σκοπό την εύκολη επανένωσή τους. Ο τεμαχισμός των αντικειμένων είναι χρήσιμος και σε περιπτώσεις που αυτά χωράνε να κατασκευαστούν στην επιφάνεια της μηχανής. Μια από αυτές τις περιπτώσεις είναι όταν θέλουμε να

εκτυπώσουμε κάποια μέρη του αντικειμένου με διαφορετικό χρώμα ή και υλικό. Ακόμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αντικείμενα που σε οποιονδήποτε προσανατολισμό χρειάζονται μεγάλη ποσότητα υποστηρικτικής δομής, σε αυτή την περίπτωση ο κατάλληλος τεμαχισμός μπορεί να μειώσει σημαντικά τον χρόνο κατασκευής του αντικειμένου αλλά και την ποσότητα του υλικού που θα χρειαστεί.



Εικόνα 3-8. Τομή αντικειμένου σε επιλεγμένο σημείο και προσθήκη συνδετικής γεωμετρίας.

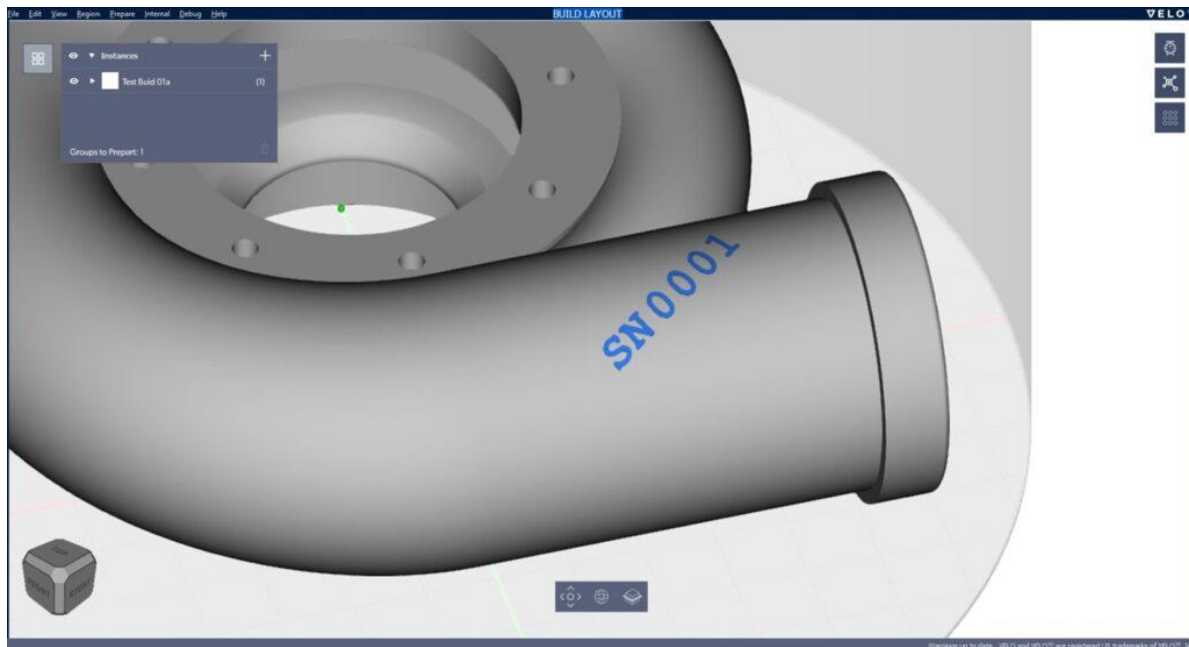
3.7 Μείωση αριθμού εξαρτημάτων



Εικόνα 3-9. Αριστερά απεικονίζεται ένα προϊόν που χρειάζεται να παραχθεί σε 8 εξαρτήματα και δεξιά η επανασχεδίαση του σε ένα μόνο εξάρτημα το οποίο μπορεί να κατασκευαστεί με ΠΚ.

Με την χρήση της προσθετικής κατασκευής ολοένα και περισσότερο, έναντι των συμβατικών μεθόδων, για την κατασκευή τελικών προϊόντων σε διάφορους τομείς έχει αλλάξει και ο τρόπος σχεδιασμού των εξαρτημάτων τους. Η προσθετική κατασκευή δίνει την δυνατότητα κατασκευής λειτουργικών προσυναρμολογημένων αρθρωτών μηχανισμών. Ακόμη, πολύπλοκα αντικείμενα από πολλά κομμάτια, μπορούν να κατασκευαστούν ως ένα ενιαίο προϊόν, μη στερώντας την λειτουργικότητά τους. Επομένως, ο σχεδιαστής οφείλει να αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα που του παρέχει η τεχνολογία και να διαμορφώνει τον τρόπο σκέψης του εντάσσοντας τις ευκαιρίες σχεδίασης που του δίνονται.

3.8 Αρίθμηση



Εικόνα 3-10. Προσθήκη αλφαριθμητικών στο μοντέλο stl μέσω του λογισμικού Vero 3d, το οποίο προγραμματίζει την μηχανή ΠΚ.

Οι τομείς που χρησιμοποιούν διεργασίες προσθετικής κατασκευής, κυρίως σε μεγάλη κλίμακα, κατασκευάζοντας διαρκώς πολλά αντικείμενα, χρειάζονται ένα τρόπο παρακολούθησης και αναγνώρισης τους. Έτσι, μια εύκολη λύση που έχει προκύψει είναι η προσθήκη ανάγλυφων αλφαριθμητικών χαρακτήρων πάνω σε κάποια επιφάνεια του αντικειμένου. Αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει κατά την σχεδίαση του αντικειμένου στο πρόγραμμα CAD ή ευκολότερα σε μερικά από τα λογισμικά προγραμματισμού των μηχανών. Τέλος, μερικές φορές χρησιμοποιείται η κατασκευή ενός πλέγματος μαζί με τα εξαρτήματα, ώστε να είναι ομαδοποιημένα.

4. Τομείς εφαρμογής της σχεδίασης για Προσθετική Κατασκευή

4.1 Εισαγωγή

Αρχικά, η Προσθετική Κατασκευή χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για την κατασκευή πρωτοτύπων, για αυτό και είχε υιοθετήσει τον όρο Ταχεία Πρωτοτυποποίηση, με την εξέλιξή της όμως επεκτάθηκε και στην δημιουργία εργαλείων, όπως καλούπια και μήτρες για χύτευση με έγχυση και καλούπια για χύτευση ακριβείας. Για τις ένθετες μήτρες χρησιμοποιούνται μηχανήματα μεταλλικής πούδρας χάλκινου υλικού. Ακόμη, η Προσθετική Κατασκευή χρησιμοποιείται, πλέον, και ως ταχεία παραγωγή, δηλαδή τα παραγόμενα προϊόντα προορίζονται για χρήση. Έχοντας ως κύριο πλεονέκτημα την οικονομικά βιώσιμη κατασκευή εξατομικευμένων προϊόντων, η Προσθετική Κατασκευή αντικατέστησε αρκετές από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Το χαρακτηριστικό της εξατομίκευσης και της δημιουργίας πολύπλοκων δομών, έδωσαν την δυνατότητα υιοθέτησης και εξέλιξης της τεχνολογίας στον τομέα της ιατρικής. Η προσθετική κατασκευή χρησιμοποιείται και στην αυτοκινητοβιομηχανία καθώς προσφέρει ελαφρύτερα εξαρτήματα διατηρώντας σταθερή την αντοχή τους, η μείωση του βάρους βοηθάει κυρίως στις καλύτερες αποδόσεις των αυτοκινήτων. Το ίδιο πλεονέκτημα σε συνδυασμό με την δυνατότητα ενοποίησης των διάφορων μικρών εξαρτημάτων σε λιγότερα, για περαιτέρω μείωση του βάρους και απλοποίηση της επισκευής, αξιοποιεί και η αεροδιαστημική. Η εξατομίκευση και η μείωση του βάρους έχουν βοηθήσει και την εξέλιξη την καταναλωτική βιομηχανία. Οι τομείς χρήσης της προσθετικής κατασκευής συνεχίζουν να διευρύνονται με πιο πρόσφατους την αρχιτεκτονική και την ναυπηγική.

4.2 Ταχεία Πρωτοτυποποίηση (Rapid Prototyping)



Εικόνα 4-1. Φυσικό μοντέλο ενός τρισδιάστατου σχεδίου.

Αρχικά, οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή πρωτοτύπων για αυτό και ήταν γνωστές με τον όρο Rapid Prototyping. Τα πρωτότυπα αυτά χρησιμοποιούνταν για να επικοινωνήσουν μια σχεδιαστική ιδέα, ως ένα απτό μέσο, αλλά και για να δοκιμαστεί η εργονομία, η λειτουργικότητα αλλά και η αισθητική τους πριν αρχίσει η μαζική παραγωγή. Ο όρος Ταχεία Πρωτοτυποποίηση αναφέρεται στην ευκολία και στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας κατασκευής ενός πρωτοτύπου κυρίως και όχι τόσο στον χρόνο. Ωστόσο, αν και ο χρόνος κατασκευής ενός προϊόντος με την χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής μπορεί να διαρκέσει από μερικές ώρες μέχρι και μέρες, είναι συνήθως μικρότερος από την κατασκευή του με τις συμβατικές μεθόδους.

4.3 Ταχεία κατασκευή εργαλείων παραγωγής (Rapid Tooling)

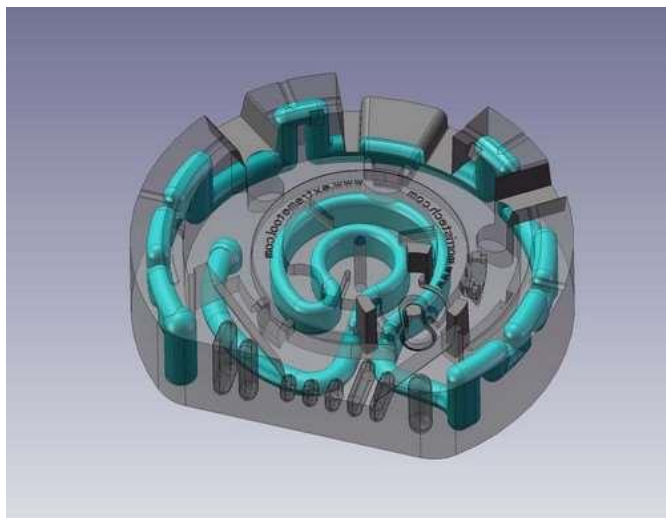


Εικόνα 4-2. Δύο τμήματα καλούπιού για χύτευση με έγχυση.

Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κατασκευή εργαλείων μικρής σχετικά παραγωγής, τα οποία έχουν δημιουργηθεί μέσω τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής. Αυτά τα εργαλεία, αν και μικρότερης αντοχής, ως προς την διάρκεια ζωής τους σε σχέση με τα συμβατικά, έχουν μεγάλο ανταγωνιστικό πλεονέκτημα ως προς τον χρόνο και το κόστος κατασκευής τους (αν φυσικά προορίζονται για μικρή παραγωγή). Συνήθως, τα εργαλεία που φτιάχνονται είναι μήτρες και καλούπια για χύτευση με έγχυση (Injection Molding). Υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων ταχείας κατασκευής εργαλείων, οι άμεσες και οι έμμεσες. Στην κατηγορία των άμεσων ανήκουν οι μέθοδοι των οποίων τα εργαλεία έχουν παραχθεί με μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής. Ενώ, στην κατηγορία των έμμεσων ανήκουν αυτές με τις οποίες τα εργαλεία είτε χρειάζονται επεξεργασία για να φτάσουν στο τελικό τους στάδιο, είτε χρησιμοποιούνται ως πρότυπα σε παραδοσιακές διαδικασίες χύτευσης.

Μία από τις άμεσες μεθόδους είναι η χύτευση με έγχυση ή αλλιώς Injection Molding (IM). Το IM είναι η χύτευση τυγμένου πολυμερούς, το οποίο ωθείται υπό πίεση σε ένα μεταλλικό καλούπι/ μήτρα. Μετά, αφού ψυχθεί και στερεοποιηθεί το πολυμερές, το καλούπι χωρίζεται και βγαίνει το κομμάτι. Το

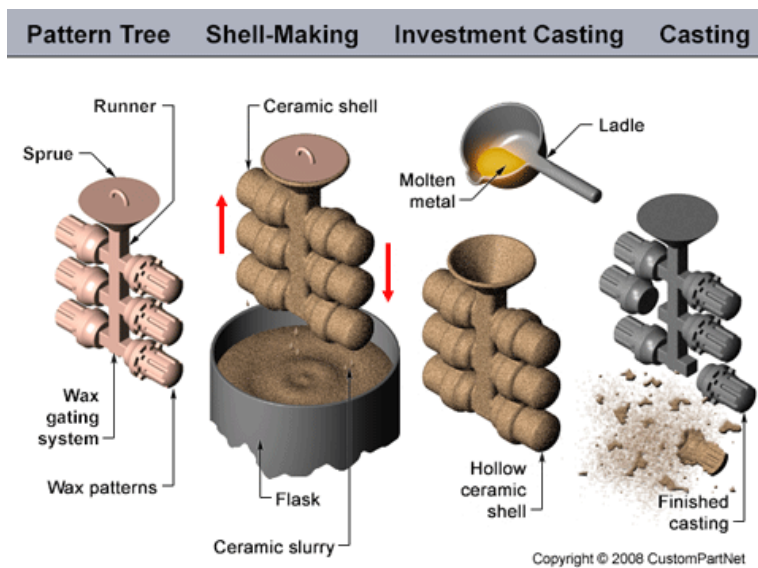
καλούπι ξανά κλείνει και επαναλαμβάνετε η διαδικασία. Όσο πιο σύνθετο το προϊόν τόσο πιο δύσκολος είναι ο προγραμματισμός για την κατασκευή του. Κάθε καλούπι έχει μια κοιλότητα στην οποία γίνεται η έγχυση του τηγμένου υλικού. Η μια πλευρά του καλουπιού είναι κινούμενη με σκοπό την αφαίρεση του κομματιού. Για να γίνει πιο εύκολη η διαδικασία απόσπασης του κομματιού από την κοιλότητα, τα τοιχώματα του κομματιού πρέπει να διαθέτουν την κατάλληλη κλίση, ώστε να υπάρχει μικρή τριβή μεταξύ καλουπιού και κομματιού. Επειδή όμως δεν γίνεται όλα τα αντικείμενα να έχουν αυτήν την κλίση, τα καλούπια χρειάζεται να διαίρονται σε παραπάνω από δύο τμήματα. Οι ένθετες μήτρες είναι αυτές που επιτρέπουν την εξατομίκευση στην όλη διαδικασία και μπορούν να φτιαχτούν με AM. Για μια πλήρως λειτουργική διάταξη χύτευσης με ένθετες μήτρες πρέπει να τοποθετηθεί κατάλληλα το σημείο έγχυσης, οι ράβδοι εξόλκευσης και τα προσεπιχωνεύματα. Το συνηθέστερο μεταλλικό υλικό για την δημιουργία ενθέτων μητρών είναι ο εργαλειοχάλυβας. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται AM συστήματα μεταλλικής πούδρας. Ο χαλκός είναι ένα μέταλλο με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, με αυτόν τον τρόπο κάνει πιο εύκολη την απαγωγή θερμότητας από την πολυμερική μήτρα άρα και την ψύξη του καλουπιού. Πλεονέκτημα της χρήσης AM για την δημιουργία καλουπιών είναι η ικανότητα διαμόρφωσης καναλιών ψύξης στο εσωτερικό του κομματιού, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-3. Μεταξύ των ενθέτων μητρών, ρέει ψυκτικό υγρό, το οποίο ρίχνει τις θερμοκρασίες του κομματιού μετά την έγχυση. Οι περιοχές του κομματιού που έχουν περισσότερο υλικό συγκεντρωμένο, ψύχονται πιο αργά άρα χρειάζονται μεγαλύτερη ροή ψυκτικού υγρού ώστε να αποφύγουμε πιθανή στρέβλωση λόγω της υψηλής θερμοκρασίας.



Εικόνα 4-3. Κανάλια εσωτερικής ψύξης.

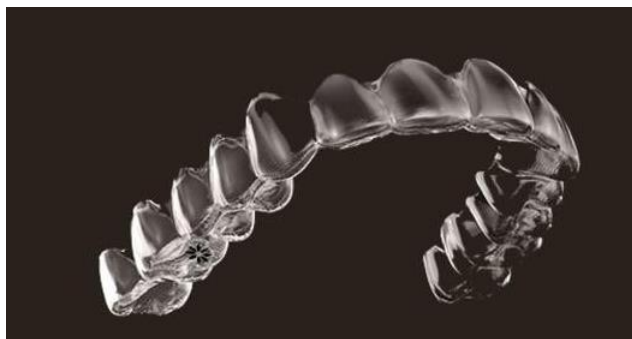
Η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) χρησιμοποιείται ως η εναλλακτική τεχνολογία για την κατεργασία μετάλλων. Έχουν γίνει έρευνες για να δημιουργηθούν ηλεκτρόδια EDM τα οποία ουσιαστικά θα είναι κατασκευασμένα από AM διεργασίες και θα έχουν επιμεταλλωθεί. Με αυτά τα ηλεκτρόδια θα έχουμε την δυνατότητα να κατεργαστούμε και να δημιουργήσουμε καλούπια. Η συνηθέστερη μέθοδος επιμετάλλωσης των πολυμερικών κομματιών είναι η ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση με χαλκό.

Άλλη μια μέθοδος είναι η χύτευση ακριβείας (Investment Casting). Με αυτόν τον όρο ονομάζεται η διαδικασία σύμφωνα με την οποία κατασκευάζονται μεταλλικά κομμάτια από μη μεταλλικά πρότυπα/καλούπια. Τα επιμέρους πρότυπα τοποθετούνται με τρόπο που σχηματίζουν μια δομή (γνωστή και ως δέντρο). Η δομή αυτή δέχεται αρκετές επικαλύψεις από κεραμικό υλικό σε μορφή πάστας σχηματίζοντας ένα κέλυφος το οποίο είναι ικανό να αντέξει την διεργασία της χύτευσης. Πριν από την έκχυση του μεταλλικού υλικού πρέπει να αποβληθεί το υλικό των προτύπων (κερί) με την θερμότητα. Μετά την έκχυση το κεραμικό κέλυφος πρέπει να σπάσει χειροκίνητα για να αφαιρεθούν τα κομμάτια από το δέντρο και τέλος να επεξεργαστούν. Η διαδικασία περιγράφεται και από την εικόνα 4-4. Το κύριο πλεονέκτημα χρήσης τεχνολογιών AM στην διαδικασία αυτή είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησης πολλών διαφορετικών υλικών για την δημιουργία των προτύπων. Τέτοια υλικά είναι το κερί, τα πολυανθρακικά πολυμερή και το ABS.



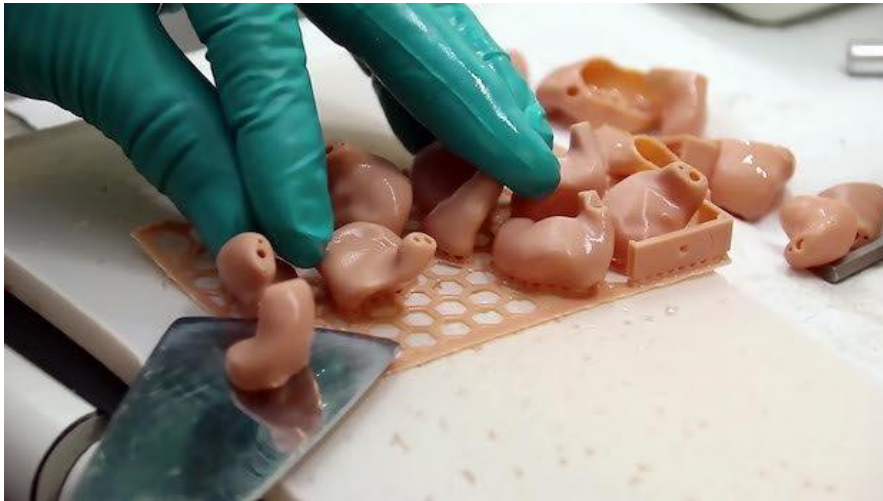
Εικόνα 4-4. Διαδικασία χύτευσης ακριβείας.

4.4 Ταχεία Παραγωγή (Rapid Manufacturing)



Εικόνα 4-5. Διάφανοι ορθοδοντικοί νάρθηκες.

Ένας από τους λόγους που άρχισε η προσθετική κατασκευή να αντικαταστά τις συμβατικές μεθόδους είναι η δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων, μικρού αριθμού μεν αλλά με πολύπλοκα μορφολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να είναι εξατομικευμένα για τον κάθε χρήστη. Τέτοια προϊόντα μπορεί να είναι ορθοδοντικά μασελάκια ή ακουστικά βαρηκοΐας. Ακόμη, εφόσον δεν υπάρχει κάποιος κατασκευαστικός περιορισμός, με την χρήση της προσθετικής κατασκευής μπορούν να βελτιστοποιηθούν οι φόρμες των προϊόντων. Επιπλέον, κύριο πλεονέκτημα αποτελεί μη αναγκαία κατοχή παραγωγικού εξοπλισμού. Όσον αφορά την βιωσιμότητα, η χρήση τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής βοηθάει μειώνοντας τα υπολείμματα υλικού. Επίσης, μειώνεται και ο χρόνος συναρμολόγησης αφού με την προσθετική κατασκευή μπορούν να φτιάχνονται εξαρτήματα απ' ευθείας χωρίς να χρειάζονται συναρμολόγηση.



Εικόνα 4-6. Κελύφη για ακουστικά βαρηκοΐας.

Λόγοι που οδηγούν στην χρήση προσθετικής κατασκευής έναντι των συμβατικών μεθόδων, για την κατασκευή τελικών αντικειμένων:

- Δυνατότητα κατασκευής εξατομικευμένων προϊόντων με μοναδικές μορφές.
- Δυνατότητα κατασκευής προϊόντων με πολύπλοκα γεωμετρικά στοιχεία μορφολογική πολυπλοκότητα.
- Μικρές ή και μοναδικές παρτίδες παραγωγής μπορούν να είναι οικονομικά συμφέρουσες αφού δεν χρειάζονται ακριβά καλούπια ή ακριβά εργαλεία παραγωγής τα οποία πρέπει να αποσβεθούν μέσω των παραγόμενων προϊόντων.
- Ακρίβεια μεταξύ σχεδιασμένου μοντέλου (CAD) και τελικού κατασκευασμένου αντικειμένου.
- Άμεση καταχώρηση των στοιχείων κάθε μοντέλου ψηφιακά με δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τους όποτε χρειαστεί.
- Δεν χρειάζονται εργαλεία παραγωγής.
- Τέλος, στις μεγάλες αποθήκες διατήρησης ανταλλακτικών, αφού χρειάζεται μόνο το ψηφιακό μοντέλο τους.

Ακόμη κάποιες μηχανές προσθετικής κατασκευής έχουν την δυνατότητα να κατασκευάζουν ταυτόχρονα μέχρι και 100 διαφορετικούς νάρθηκες για παράδειγμα οι οποίοι είναι όλοι διαφορετικοί και εξατομικευμένοι στον κάθε χρήστη. Άλλες μηχανές μπορούν να κατασκευάσουν ταυτόχρονα 4.000 βοηθήματα ακοής.

4.5 Εφαρμογές στην Ιατρική



Εικόνα 4-7. Παράδειγμα αναδόμησης της λεκάνης.

Οι τεχνολογίες προσθετικής σχεδίασης άρχισαν να χρησιμοποιούνται στην Ιατρική λόγω της ικανότητάς τους για κατασκευή πολύπλοκων μορφολογικά αντικειμένων. Επιπλέον, η υιοθέτησή τους διευκολύνθηκε από την δυνατότητα αξιοποίησης δεδομένων αξονικών και μαγνητικών τομογραφιών, για την κατασκευή εξατομικευμένων αντικειμένων για ασθενείς. Μια από τις εφαρμογές της ΠΚ στην Ιατρική είναι η μοντελοποίηση, η οποία αναφέρεται στην κατασκευή μοντέλων ανθρώπινων μελών και βιολογικών δομών. Επίσης, δημιουργούνται εξατομικευμένα μοσχεύματα για πλαστικές χειρουργικές επεμβάσεις αλλά και επεμβάσεις αποκατάστασης. Τα μοσχεύματα μπορούν να φέρουν πόρους και ικρίωματα. Ακόμη, με την χρήση PBF δημιουργούνται ορθοπεδικά εμφυτεύματα, τα οποία μπορούν να προσφέρουν καλύτερη μετάβαση από τον ανθρώπινο σκελετό στην επιφάνεια του εμφυτεύματος, με σκοπό την οστεοενσωμάτωση. Ακόμη, συχνή είναι και η παραγωγή προσθετικών μελών με μειωμένο

κόστος και χρόνο κατασκευής. Η τεχνολογία της σάρωσης σε συνδυασμό με την προσθετική κατασκευή είναι πλέον εδραιωμένες στον χώρο της ορθοδοντικής, βοηθώντας στην κατασκευή εξατομικευμένων ναρθήκων για το στόμα από διαφανής ρητίνη. Το σαρωμένο ψηφιακό σχέδιο χρειάζεται να εισαχθεί σε μια μηχανή ΠΚ για να κατασκευαστεί. Η δουλειά του οδοντίατρου απλοποιείται αφού η αρχειοθέτηση των ασθενών γίνεται εύκολα και ηλεκτρονικά. Τέλος, οι τεχνολογίες ΠΚ βοηθούν κατασκευάζοντας χειρουργικά εργαλεία και ιατρικές συσκευές.

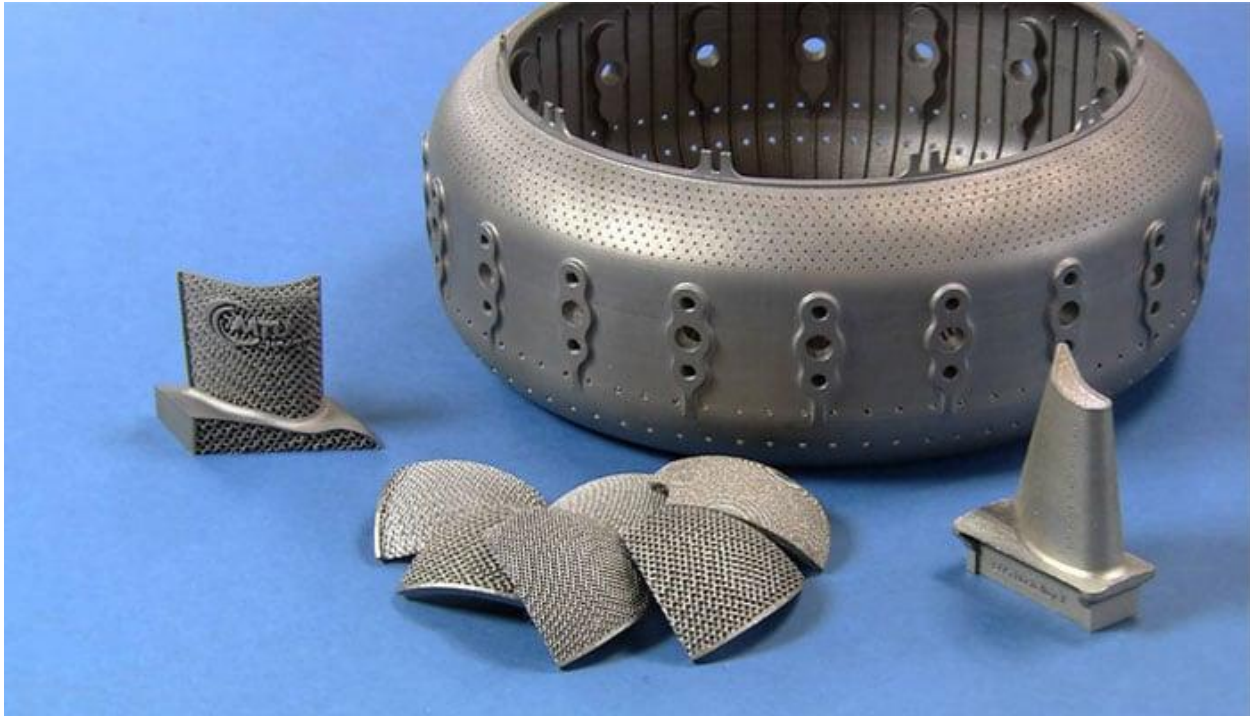
4.6 Εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία



Εικόνα 4-8. Δαγκάνες φρένων αυτοκινήτων από την Bugatti.

Οι γεωμετρίες των αυτοκινήτων είναι αρκετά συνθέτες επομένως είναι δύσκολο και ακριβό να κατασκευαστούν με τις συμβατικές μεθόδους. Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής έχουν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε αυτό το κομμάτι. Επιπλέον, με την δυνατότητα της μερικής πλήρωσης του εσωτερικού των στερεών δομών, με παρόμοια αντοχή και συμπεριφορά στις τάσεις από το πλήρως συμπαγές, επιτυγχάνεται μικρότερο βάρος στο αυτοκίνητο άρα και καλύτερες επιδόσεις. Για πάνω από 20 χρόνια πλέον οι Formula 1 χρησιμοποιεί εξαρτήματα κατασκευασμένα από προσθετική κατασκευή για τα αγωνιστικά αμαξίδια. Τα εξαρτήματα αυτά είναι ηλεκτρολογικά κελύφη, βάσεις καμερών καθώς και αλλά διάφορα αεροδυναμικά κομμάτια. Ακόμη, ένα από τα κομμάτια εφαρμογής της τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής στην αυτοκινητοβιομηχανία, είναι η δημιουργία των πρωτότυπων προϊόντων τα οποία παρουσιάζουν συνήθως σε εκθέσεις. Οι εφαρμογές στα αυτοκίνητα είναι παρά πολλές, από φρένα υψηλών επιδόσεων μέχρι και εξατομικευμένα εξαρτήματα. Έχοντας την γκάμα των ανταλλακτικών ως ηλεκτρονικά αρχεία λύνει την ανάγκη τεράστιων αποθηκών αλλά και την δυσκολία εύρεσης τους.

4.7 Εφαρμογές στην αεροδιαστημική



Εικόνα 4-9. Εξαρτήματα για κινητήρες της MTU Aero Engines.

Οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής χρησιμοποιούνται και στην αεροδιαστημική για ελαχιστοποίηση του βάρους διατηρώντας την ασφάλεια και τις επιδόσεις. Μεγάλες βιομηχανίες στον χώρο έχουν επενδύσει για την δημιουργία βελτιωμένων εξαρτημάτων του κινητήρα με μεθόδους ΠΚ. Η μείωση του βάρους βοηθάει και στην οικονομία του καυσίμου αλλά και στην αύξηση του εύρους. Ήδη από το 2015 ένα αεροπλάνο A350 είχε περισσότερα από 1000 εξαρτήματα φτιαγμένα με προσθετική κατασκευή. Οι δυο μέθοδοι που ξεχωρίζουν είναι η εξώθηση υλικού και powder bed fusion, λόγω της εξέλιξης των θερμό ανθεκτικών υλικών. Για την δημιουργία του σκελετού του αεροπλάνου χρησιμοποιείται η διεργασία Direct Energy Deposition και η Powder Bed Fusion. Μια μείωση βάρους της τάξεως του ενός κιλού ισούται με μια μείωση γύρω στα 1.185 ευρώ σε καύσιμα τον χρόνο. Εκτός από αεροπλάνα, εξαρτήματα φτιάχνονται για ελικόπτερα, δορυφόρους καθώς και πυραύλους. Κάτι σχετικά απλό όπως ένα ακροφύσιο καυσίμου μπορεί να φτιαχτεί ως ένα εξάρτημα, γλιτώνοντας περίπου 18 μικρότερα εξαρτήματα (όπως και συγκολλήσεις), 25% βάρος και κερδίζοντας 5 φορές μεγαλύτερη αντοχή. Λαμβάνοντας υπόψη ότι κάθε κινητήρας χρειάζεται περίπου 19 τέτοια ακροφύσια, οι βελτίωση είναι αρκετά αισθητή. Ακόμη, οι τουρμπίνες στις γεννήτριες ενέργειας μοιράζονται πολλά κοινά με αυτές των αεροπλάνων. Οι καινοτομίες που προσφέρουν οι τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παραγωγή ενέργειας. Επομένως, η προσθετική κατασκευή μπορεί να βοηθήσει την αεροδιαστημική να εξελιχθεί κι άλλο με την δυνατότητα επανασχεδίασης ήδη υπάρχοντων εξαρτημάτων σε ελαφρύτερα, διατηρώντας την αντοχή σταθερή [14]. Επιπλέον, μπορεί να μειώσει τον χρόνο παραγωγής των εξαρτημάτων αλλά και του όγκου των απορριμμάτων πολύτιμων υλικών.

4.8 Εφαρμογές στην ναυπηγική



Εικόνα 4-10. Σκάφος κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από 3D εκτυπωτή.

Η ναυπηγική είναι ένας από τους νέους τομείς εφαρμογής της Προσθετικής Κατασκευής, με σημαντικότερο σημείο αναφοράς την δημιουργία σκάφους μήκους 7,62 μέτρων το 2019. Το συγκεκριμένο σκάφος αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο Maine και χρειάστηκε μόλις 72 ώρες για να κατασκευαστεί από θερμοπλαστικό υλικό, στον μεγαλύτερο 3D εκτυπωτή του κόσμου. Τα υλικά κατασκευής του είναι θερμοπλαστικά και συνθετικό ξύλο επιτρέποντάς του να μπορεί να ανακυκλωθεί, σε αντίθεση με τα συμβατικά σκάφη [34]. Η χρήση της ΠΚ έχει βοηθήσει και στην δημιουργία λεπτομερών πρωτοτύπων γρηγορότερα και οικονομικότερα από τις συμβατικές μεθόδους. Ένα από τα σημαντικά ζητήματα στην ναυτιλία είναι η ανάγκη για ανταλλακτικά, καθώς οι συνθήκες λειτουργίας τους κάνουν πιο σύντομη την ανάγκη για συντήρηση. Η αποθήκευση των ανταλλακτικών είναι μια κοστοβόρα διαδικασία, λόγω του μεγάλου όγκου και βάρους τους. Ακόμη, η διαρκή αλλαγή τοποθεσίας των πλοίων καθιστά πολλές φορές αδύνατη την έγκαιρη επισκευή λόγω της θέσης τους σε σχέση με τις αποθήκες. Η προσθετική Κατασκευή έχει δώσει λύση και στα δύο προβλήματα, καθώς καταργεί την απαίτηση για αποθήκευση έτοιμων εξαρτημάτων (μόνο των ψηφιακών τους μοντέλων), αλλά και δεν απαιτεί την σταθερή τοποθέτηση μηχανημάτων κατασκευής σε λίγα σημεία [35].

4.8 Καταναλωτική βιομηχανία



Εικόνα 4-11. Εξατομικευμένα παπούτσια ποδοσφαίρου.

Όσον αφορά τα υποδήματα, η εταιρία Prior 2 Level άρχισε να κατασκευάζει τα πρώτα εξατομικευμένα παπούτσια ποδοσφαίρου από το 2000. Οι εξατομικευμένες σόλες πετύχαιναν μεγάλη μείωση των πιέσεων στο πέλμα. Διάφορες μεγάλες εταιρίες του χώρου χρησιμοποιούν μεθόδους PBF και VPP, για την δημιουργία πολύπλοκων γεωμετρικά σολών.



Εικόνα 4-12. Σκελετός ποδηλάτου κατασκευασμένος με προσθετική κατασκευή.

Όσον αφορά την ποδηλασία, υπάρχουν ήδη αρκετές εφαρμογές της ΠΚ ως προς τον σκελετό των ποδηλάτων. Με την βοήθεια της τεχνολογίας και της εξέλιξης στον τομέα των υλικών επιτυγχάνεται η δημιουργία πολύ στιβαρών σκελετών με πολύ μικρότερο βάρος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί και με την χρήση τοπολογικής βελτιστοποίησης. Ακόμη, η τεχνολογία χρησιμοποιείται και για την κατασκευή συλλεκτικών φιγούρων.



Εικόνα 4-13. Εξατομικευμένες σόλες παπουτσιών από την Nike.

Στον χώρο των κοσμημάτων η παραδοσιακή διαδικασία κατασκευής περιλαμβάνει την δημιουργία κέρινων μοντέλων τα οποία χρειάζονται για την δημιουργία καλούπιων χύτευσης. Η διαδικασία αυτή απαιτεί μεγάλη εξειδίκευση και πολύ χρόνο για ένα καλό αποτέλεσμα κέρινου μοντέλου. Η χρήση της προσθετικής κατασκευής βοηθάει στην γρηγορότερη κατασκευή μοντέλων για καλούπια χύτευσης, απλοποιώντας την διαδικασία. Τα μοντέλα αυτά δεν έχουν κάποιον περιορισμό ως προς την περιπλοκότητα. Ακόμη, έχουν γίνει μελέτες [31] για την δημιουργία λογισμικού, το οποίο βοηθάει στην συν σχεδίαση κοσμημάτων με τον πελάτη. Ο πελάτης μπορεί να εξατομικεύσει κοσμήματα και να δει τις εναλλακτικές επιλογές σε οικονομικά πρωτότυπα, πριν την ακριβή κατασκευή του τελικού προϊόντος. Η χρήση της προσθετικής κατασκευής κάνει αμεσότερη την εκτίμηση του κόστους και του χρόνου κατασκευής, βελτιώνοντας την εμπειρία του καταναλωτή.



Εικόνα 4-14. Κοσμήματα κατασκευασμένα με προσθετική κατασκευή.



Εικόνα 4-15. Cheesecake δημιουργημένο με Προσθετική Κατασκευή.

Ένας ακόμη τομέας εφαρμογής και εξέλιξης της προσθετικής κατασκευής, αποτελεί η βιομηχανία τροφίμων. Τα βρώσιμα παραγόμενα προϊόντα μπορούν να έχουν επιλεγμένες γεύσεις και διατροφικά οφέλη για τον καταναλωτή. Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι λόγω της φύσης της τεχνολογίας αποτρέπεται η υπερπαραγωγή και συνεπώς η σπατάλη τροφίμων. Η χρήση της Προσθετικής Κατασκευής στην βιομηχανία του φαγητού ξεκίνησε το 2006, από το Cornell University, ο εκτυπωτής τους μπορούσε να χρησιμοποιήσει υλικά όπως τυρί, σοκολάτα και ζύμη μπισκότου [33]. Πλέον η γκάμα των υλικών που μπορούν να εκτυπωθούν περιέχει υλικά σε μορφή πουρέ, ζελέ, ζαχαρόπαστας, υλικά σε μορφή σκόνης (όπως ζάχαρη, πρωτεΐνη, σοκολάτα), σάλτσας και μελανιών τροφίμων. Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε έξι κατηγορίες, Extrusion-based printing, Hot-melt and room temperature, Selective laser sintering, Binder jetting, Inkjet printing και Multi-printhead and multi-material. Στην κατηγορία Extrusion-based printing τα υλικά εξωθούνται από μια κινούμενη σε τρεις άξονες κεφαλή, χρησιμοποιώντας συμπιεσμένο αέρα ή με πίεση. Μερικά προϊόντα απαιτούν μαγείρεμα πριν την κατανάλωση (όπως ψήσιμο ή τηγάνισμα). Οι μηχανές της κατηγορίας Hot-melt and room temperature, χρησιμοποιούν θέρμανση της κεφαλής εξώθησης ώστε να τήξουν το υλικό για να μπορέσουν να δημιουργήσουν την σχεδιασμένη γεωμετρία, και να στερεοποιηθούν γρήγορα. Στην Selective laser sintering μέθοδο, το υλικό σε μορφή πούδρας βρίσκεται σε ένα δοχείο και με την βοήθεια ενός laser τήκεται επιλεκτικά ενώνοντας του κόκκους μεταξύ τους. Το περισσεύον υλικό μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί. Παρόμοια είναι και η διαδικασία της μεθόδου Binder jetting, με μόνη διαφορά την ενοποίηση των κόκκων της πούδρας, στην οποία χρησιμοποιείται συνδετικό υλικό υγρής μορφής αντί για laser θερμότητας. Οι εκτυπωτές φαγητού τεχνολογίας Inkjet printing αποτυπώνουν εικόνες πάνω σε έτοιμα φαγητά, όπως μπισκότα, σοκολάτες, κέικ κ.α., με την χρήση ειδικών βρώσιμων μελανιών. Τέλος, στην κατηγορία Multi-printhead and multi-material, ανήκουν οι εκτυπωτές που χρησιμοποιούν διάφορες κεφαλές για την ταυτόχρονη εκτύπωση διαφορετικών υλικών, ελαχιστοποιώντας τον χρόνο δημιουργίας, ή για την εύκολη και γρήγορη εναλλαγή υλικών κατά την διαδικασία της παρασκευής.

4.9 Αρχιτεκτονική



Εικόνα 4-16. Αρχιτεκτονικό μοντέλο αναπαράστασης.

Η χρήση ξύλινων μοντέλων για την αναπαράσταση των σχεδίων έχει αντικατασταθεί από την χρήση της προσθετικής κατασκευής, δημιουργώντας πιο ρεαλιστικά, ακριβή και εύκολα μοντέλα αναπαράστασης [15]. Οι διορθώσεις γίνονται ευκολότερα και με δυνατότητα αλλαγής επιμέρους τμημάτων. Ο χρόνος κατασκευής των πρωτοτύπων έχει μειωθεί δραματικά, αφού ένα μοντέλο μπορεί να κατασκευαστεί σε κάποιες μέρες, αντί για μήνες που θα χρειάζονταν με κάποια συμβατική μέθοδο. Ακόμη, έχουν αρχίσει και εφαρμογές της τεχνολογίας πέρα από μακέτες, κατασκευάζοντας ολόκληρα σπίτια με ανταγωνιστικό κόστος και ποιότητα. Ένας εκτυπωτής 6 μέτρων φτιαγμένος από Ολλανδούς επιστήμονες μπορεί να κατασκευάσει αντικείμενα μεγαλύτερα από 2 κυβικά τετραγωνικά σε όγκο. Η χρήση της τεχνολογίας σε αυτόν τον τομέα μπορεί να μειώσει το κόστος κατασκευής άρα και πώλησης των σπιτιών [15].

4.10 Αρχαιολογία

Τα περισσότερα μνημεία και αγάλματα έχουν καταστραφεί είτε λόγω βανδαλισμών είτε λόγω καιρικών συνθηκών, επηρεάζοντας την πολιτιστική κληρονομιά. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να βοηθηθεί από την τεχνολογία της Προσθετικής Κατασκευής, η οποία συνδυαστικά με την τρισδιάστατη σάρωση είναι ικανή να βοηθήσει στην αποκατάσταση αρχαιολογικών αντικειμένων, δίνοντας μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα στον θεατή. Ακόμη, η Προσθετική Κατασκευή χρησιμοποιείται και για την δημιουργία πιστών αντιγράφων ιστορικών αντικειμένων, δίνοντας την δυνατότητα στους επισκέπτες των μουσείων να μπορούν να τα αγγίξουν και να τα περιεργαστούν, προστατεύοντας τα πρωτότυπα.



Εικόνα 4-17. Δημιουργία πιστού αντιγράφου ενός ιστορικού αντικειμένου.

4.11 Εκπαίδευση



Εικόνα 4-18. Εκτυπωτής ΠΚ για την δημιουργία οστών εξαφανισμένων ζώων για την απτή μελέτη τους.

Τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα μοντέλα βοηθούν στην οπτικοποίηση της περιγραφής μιας δύσκολης νοητής εικόνας από τον καθηγητή. Η μετάβαση δισδιάστατων σχεδίων σε τρισδιάστατα μοντέλα βοηθάει στην εξάσκηση δημιουργικών λύσεων. Ακόμη, η προσθετική κατασκευή στον εκπαιδευτικό τομέα, βοηθάει στην πρακτική εμπειρία των μαθητών, μέσω της εξάσκησης και του

πειραματισμού εύρεσης λύσης. Η χρήση της προσθετικής κατασκευής εξασκεί την οπτικοποίηση, η οποία είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο επικοινωνίας [32].

5. Βελτιστοποίηση γεωμετρίας και αντοχής των προϊόντων Προσθετικής Κατασκευής

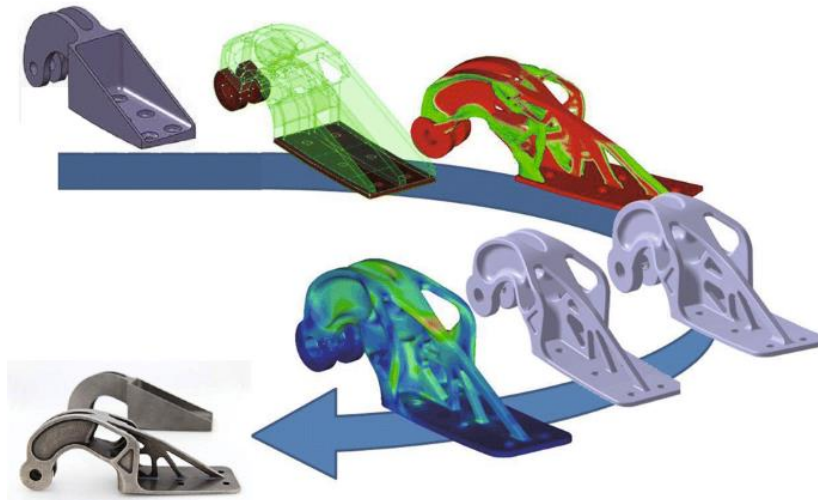
5.1 Εισαγωγή

Οι δυνατότητες των τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής έχουν αλλάξει τον τρόπο σκέψης των σχεδιαστών, οι οποίοι συχνά στοχεύουν στην δημιουργία προϊόντων με μικρό βάρος (για την μάζα τους), μεγάλη αντοχή και πολύπλοκες μορφές. Επίσης, έχουν γίνει εφαρμογές και στην δημιουργία ευκάμπτων μηχανισμών, οι οποίοι αποθηκεύουν τις τάσεις που δέχονται σε κίνηση. Το στάδιο της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας σχεδιασμού των περισσότερων αντικειμένων. Αυτό συμβαίνει καθώς είναι επιθυμητή η μείωση του κόστους αλλά και η αφαίρεση του υλικού που δεν χρειάζεται για την σχεδιασμένη αντοχή του. Σε αυτό έχει συμβάλει και η τάση της εποχής για εξοικονόμηση υλικών και πόρων αλλά και η αισθητική προτίμηση των γεωμετρικών μορφών στα προϊόντα. Έτσι, εργαλεία όπως η τοπολογική βελτιστοποίηση και το generative design αποτελούν πλέον βήματα στην διαδικασία σχεδιασμού των σύγχρονων προϊόντων.

Ένα αντικείμενο μπορεί να βελτιωθεί ως προς τρεις προσεγγίσεις βελτιστοποίησης. Μπορεί να βελτιστοποιηθεί με βάση την τιμή, δηλαδή να τροποποιηθούν οι παράμετροι και οι διαστάσεις του και ότι άλλο έχει άμεση επιρροή στο κόστος, με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το κόστος. Η δεύτερη βελτιστοποίηση είναι η βελτιστοποίηση μορφής, δηλαδή η αλλαγή της μορφής του προϊόντος. Η βελτιστοποίηση μορφής συχνά γίνεται παράλληλα με την βελτιστοποίηση τιμής. Τέλος, η τοπολογική βελτιστοποίηση αναφέρεται και στην τροποποίηση της κατανομής του υλικού εντός κάποιων παραμέτρων, το οποίο έχει και άμεσο αντίκτυπο στην μορφή του. Η κύρια διαφορά μεταξύ τοπολογικής βελτιστοποίησης και των υπολοίπων είναι ότι η γεωμετρία θα διαφοροποιηθεί με στόχο τις μηχανικές συμπεριφορές που έχει σχεδιαστεί να έχει το προϊόν.

5.2 Τοπολογική βελτιστοποίηση

Η τοπολογική βελτιστοποίηση (Topology optimization) είναι η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για την επιλογή της πιο αποδοτικής διάταξης της γεωμετρίας σε έναν επιλεγμένο χώρο, έχοντας ορίσει κάποιους περιορισμούς [16]. Οι εξαγόμενες γεωμετρίες των προϊόντων, χρησιμοποιώντας αυτήν την μέθοδο, είναι περίπλοκες αυτό όμως δεν αποτελεί πρόβλημα για την κατασκευή των αντικειμένων αυτών με τις τεχνολογίες της προσθετικής κατασκευής.



Εικόνα 5-1. Ροή εξέλιξης προϊόντος με την διαδικασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Η τοπολογική βελτιστοποίηση καθορίζει την τελική την μορφή του προϊόντος έχοντας ως δεδομένο (ως μορφή εισόδου) την μηχανική αντοχή του. Χρησιμοποιείται είτε αυτούσια είτε μετά την βελτιστοποίηση τιμής ή μορφής. Είναι ένα υπολογιστικά δύσκολο πρόβλημα που χρειάζεται διάφορες υπολογιστικές αναλύσεις τεχνικής μηχανικής. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης είναι αντικείμενα με όλα τα μέρη τους φορτισμένα σε όλο το μήκος της έκτασης τους, αλλά πιο χαμηλά από το όριο αντοχής. Τα συμπαγή μεγάλα τμήματα δίνουν την θέση τους σε μικρότερα δικτυώματα.

Η χρήση αυτών των μικρότερων δικτυωμάτων βελτιώνει την ελαστική συμπεριφορά και την ανοχή στις τάσεις [16]. Τα μεγαλύτερου μεγέθους δικτυώματα έχουν μεγαλύτερη ακαμψία. Ανάμεσα σε μεγάλα στιβαρά, σε μικρά και σε βαθμωτά δικτυώματα (το μέγεθος των δικτυωμάτων αλλάζει ανάλογα με το φορτίο που πρέπει να αντέξουν), τα τελευταία έχουν την χρησιμότερη συμπεριφορά, καθώς συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο. Ακόμη, όσο αφορά τα βαθμωτά δικτυώματα, παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά σε περιπτώσεις ανεπαρκείων υλικού σε τυχαία σημεία, δίνοντάς τους μια fail-safe συμπεριφορά [16]. Η τοπολογική βελτιστοποίηση φέρει δύο προσεγγίσεις, την διαμόρφωση δικτυώματος και την ογκομετρική πυκνότητα.

5.2.1 Διαμόρφωση δικτυώματος

Η τοπολογική βελτιστοποίηση σαν διαδικασία αναγνωρίζει τα σημαντικότερα υποστυλώματα, ορίζει το μέγεθός τους καθώς και αφαιρεί τα πολύ μικρά υποστυλώματα. Έχοντας ως μεταβλητή σχεδιασμού την διάμετρο κάθε στοιχείου, δημιουργούνται δοκοί πάνω σε ένα πλέγμα κόμβων. Οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με truss elements. Έτσι, καθώς τρέχει η ανάλυση μειώνονται τα πάχη των ράβδων που δεν χρειάζονται τόσο στην μηχανική αντοχή της δομής. Οι τοπικές τάσεις ή παραμορφώσεις οδηγούν στην κλιμάκωση του μεγέθους των ράβδων. Στο τέλος της διαδικασίας αφαιρούνται οι ράβδοι με πολύ μικρό πάχος. Αυτή η μεθοδολογία λόγω των πολλαπλών αναλύσεων που χρειάζεται, απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος, άρα και ακριβά υπολογιστικά συστήματα. Για καλύτερα

αποτελέσματα, εκτός από την διάμετρο κάθε στοιχείου, πρέπει να χρησιμοποιηθεί και η τοποθεσία τους ως μεταβλητή σχεδιασμού. Για την μείωση των σχεδιαστικών μεταβλητών, κάποιες μέθοδοι χρησιμοποιούν ευρηστικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Ένα παράδειγμα είναι η μέθοδος Size Matching and Scaling (SMS) η οποία χρειάζεται μόνο δύο μεταβλητές σχεδιασμού και την μέγιστη διάμετρο των ράβδων. Η μέθοδος αυτή λειτουργεί με την εκτέλεση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) στο στερεό μοντέλο.

5.2.2 Ογκομετρική πυκνότητα

Η προσέγγιση της ογκομετρικής πυκνότητας αφορά τον προσδιορισμό της κατάλληλης πυκνότητας ενός υλικού σε ένα σύνολο voxels. Η πιο κοινή μέθοδος είναι η Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP). Η μέθοδος αυτή, παίρνει ως αρχική γεωμετρία ένα ορθογώνιο κομμάτι, το οποίο μπορεί να δεχθεί επεξεργασία αφαιρώντας ή προσθέτοντας βασικά σχήματα αλλά και να δεχθεί τρύπες, αποτελούμενο από ένα σύνολο voxels. Κάθε voxel χαρακτηρίζεται από μια τιμή πυκνότητας, η οποία χρησιμοποιείται ως σχεδιαστική μεταβλητή, από 1 μέχρι 0, όπου 1 είναι πλήρως συμπαγές και όπου 0 δεν υπάρχει καθόλου υλικό. Οι ενδιάμεσες τιμές υποδηλώνουν την ανάγκη μερικής πυκνότητας υλικού για την υποστήριξη των τοπικών τάσεων στο voxel. Είναι προτιμότερες οι ακραίες τιμές των voxels καθώς είναι ευκολότερη η μετέπειτα κατασκευή του αντικειμένου. Οι τιμές πυκνότητας χρησιμοποιούνται για να κλιμακώσουν την ακαμψία των voxels.

5.3 Generative design



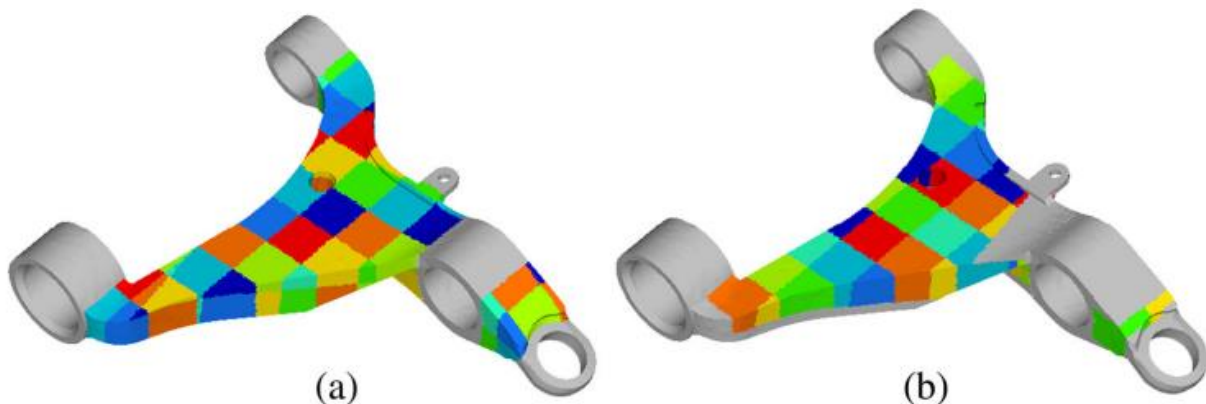
Εικόνα 5-2. Επανασχεδίαση σκελετού με την χρήση του generative design πετυχαίνοντας μείωση 40% του βάρους.

Το generative design είναι μια σχεδιαστική μέθοδος σύνθεσης με την οποία δημιουργούνται ποικίλα εναλλακτικά γεωμετρικά μοντέλα, τα οποία ικανοποιούν σχεδιαστικές προδιαγραφές. Ο ρόλος του

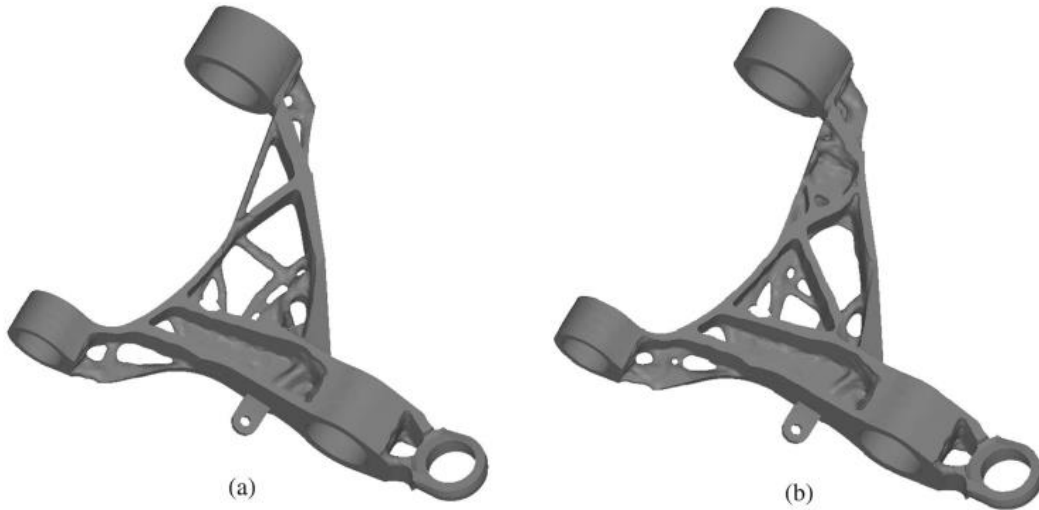
σχεδιαστή είναι να ορίσει τις δυνάμεις, την βασική γεωμετρία καθώς και τα όρια αυτής. Ακόμη, μπορούν να δοθούν περιορισμοί κόστους, υλικού και διεργασίας κατασκευής.

Η κυρία διαφορά μεταξύ topology optimization και generative design είναι ότι στο πρώτο η λογική του αλγορίθμου είναι να αφαιρέσει το υλικό που δεν χρειάζεται ώστε να αντέξει κάποιες δεδομένες τάσεις ένα αντικείμενο. Στο generative design από την άλλη η γεωμετρία του αντικειμένου κατασκευάζεται από την αρχή προσθέτοντας υλικό εκεί που χρειάζεται και μεταβάλλοντας την πυκνότητα με σκοπό την εξομάλυνση των τάσεων.

Με την βοήθεια του εργαλείου της τοπολογικής βελτιστοποίησης έχουν γίνει μελέτες, όπως τις [20], [16], [26] και την για την κατασκευή δισδιάστατων αλλά και τρισδιάστατων δομών οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν με τον όρο fail-safe. Αυτό που είναι κοινό στις μελέτες αυτές είναι η προσέγγισή τους στην fail-safe λογική, οι περισσότερες δημιουργούν αλγορίθμους οι οποίοι αφαιρούν είτε ολόκληρα δικτυώματα (ένα ή περισσότερα την φορά) είτε μοντελοποιούν την αστοχία με κυκλικές ή τετράγωνες ελλείψεις υλικού σε μεμονωμένα σημεία, διατρέχοντας ολόκληρη την γεωμετρία του αντικειμένου. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουν ότι η δομή θα συνεχίσει να αντέχει τις προκαθορισμένες τάσεις σε οποιαδήποτε από τις ορισμένες αστοχίες. Κάτι τέτοιο είναι πολύ δύσκολο υπολογιστικά για απλά μοντέλα, πόσο μάλλον για περίπλοκα ρεαλιστικά προϊόντα. Μερικές πιο σύγχρονες μελέτες [19], [27] χρησιμοποιούν πιθανολογικές προσεγγίσεις για την τοποθέτηση των αστοχιών, γλιτώνοντας σημαντικό υπολογιστικό χρόνο. Όμως, οι περισσότερες μελέτες μοντελοποιούν και αναλύουν μη ρεαλιστικές αστοχίες δικτυωμάτων, εκτός από αυτές που χρησιμοποιούν πρώτα μηχανικές αναλύσεις, σε μια προσπάθεια να απλοποιήσουν υπολογιστικά το πρόβλημα. Στην μελέτη [1] αναλύεται ένα τρισδιάστατο εξάρτημα, η κρίσιμη γεωμετρία του οποίου χωρίζεται σε κύβους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως μοντελοποιήσεις αστοχιών. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ληφθεί ένα τοπολογικά βελτιστοποιημένο και με fail-safe λογική μοντέλο. Σε αυτό βοήθησε το λογισμικό Altair OptiStruct, στο οποίο αφού αναλυθεί μηχανικά το μοντέλο, ο χρήστης μπορεί να ορίσει το μέγεθος των κύβων που θα αποτελέσουν την μοντελοποίηση της αστοχίας.



Εικόνα 5-3. Απεικόνιση των ορισμένων κύβων αστοχίας στην κρίσιμη γεωμετρία ενός εξαρτήματος στο λογισμικό Altair OptiStruct.



Εικόνα 5-4. (α) Τοπολογικά βελτιστοποιημένο εξάρτημα (β) με την προσθήκη της fail-safe προσέγγισης.

6. Η έννοια του fail-safe

6.1 Εισαγωγή

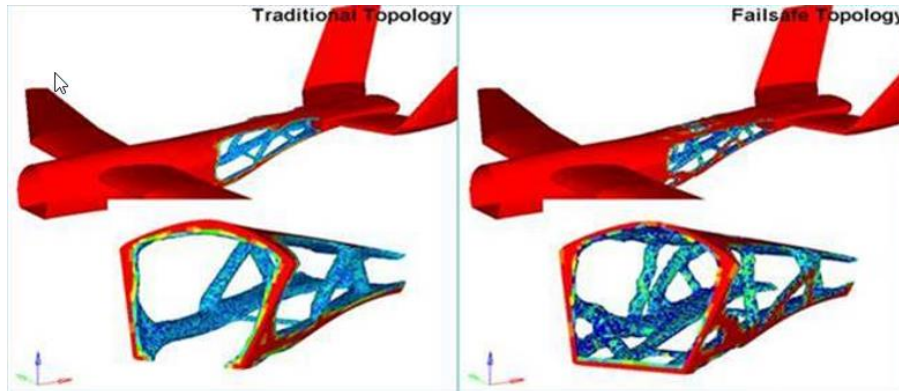
Fatigue Fracture Mechanics		
● Fatigue – structure Design Philosophies		
Safe-life	Fail-safe	Damage Tolerance
<ul style="list-style-type: none"> ➢ Adopted by many, especially in the vehicle industry ➢ The oldest approaches to fatigue structure ➢ Large safety factor ➢ Low maintenance costs ➢ Design methods are ; <ul style="list-style-type: none"> - Stress life (S-N curve) - Strain life (ϵ-N curve) 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Examples ; <ul style="list-style-type: none"> - Leak before break(LBB) - Crack arresters ➢ Techniques for this method ; <ul style="list-style-type: none"> - Redundancies (e.g. Back-up system/Multi-paths load) - Intentional :weal-link) - Early crack detection (NDT, Fracture mechanics) ➢ To manage the expected and mitigating damage 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ In the case when a crack is present ➢ Fracture mechanics concept <ul style="list-style-type: none"> - design method; da/dN-ΔK ➢ Evaluation of the residual life ➢ Crack size, orientation, geometry by Nondestructive evaluation(NDT, NDI)

Donny (barleyjeong@gmail.com)

Εικόνα 6-1. Σύγκριση του Fail-safe με το Safe-life και το Damage Tolerance.

Fail-safe αποκαλείται ένα αντικείμενο ή σύστημα, όταν έχει μια σχεδιαστική δυνατότητα, η οποία σε περίπτωση μερικής καταστροφής του εγγενώς θα προκαλέσει την μικρότερη δυνατή ζημιά στην υπόλοιπη

δομή του, στο περιβάλλον ή στον άνθρωπο [17]. Ένα σύστημα fail-safe δεν εμποδίζει μια αποτυχία ή καταστροφή από το να συμβεί, αλλά την περιορίζει με βάση την ασφάλεια. Το Safe-life και το Damage Tolerance είναι δύο φιλοσοφίες διαφορετικές από το fail-safe αλλά με κοινό επίκεντρο την ασφάλεια.

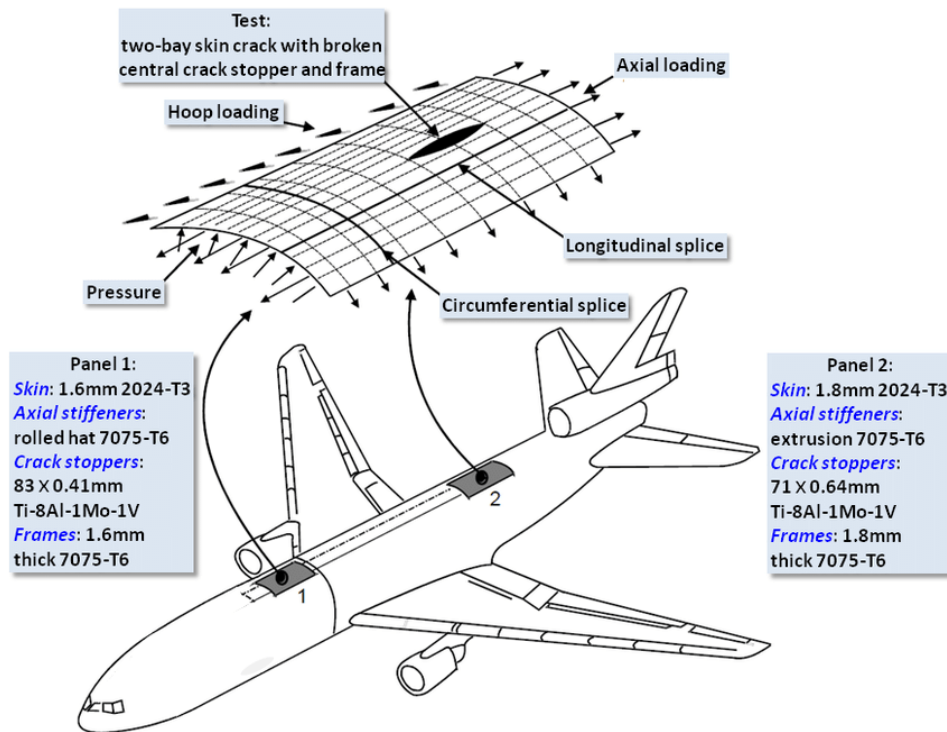


Εικόνα 6-2. Τοπολογική βελτιστοποίηση ενός σκελετού αεροπλάνου, δεξιά με την χρήση της λογικής του fail-safe και αριστερά χωρίς, στο λογισμικό Altair OptiStruct.

Για να θεωρηθεί fail-safe μια δομή θα πρέπει να είναι σχεδιασμένη να αντέχει και να διατηρεί την λειτουργία της σε περίπτωση μερικής καταστροφής της δομής της [1]. Μια fail-safe κατασκευή μπορεί να υποστεί ένα σύνολο τάσεων αφού σπάσει κάποιο τμήμα της, διατηρώντας την ευστάθεια του συστήματος. Η αντοχή της δομής πρέπει να είναι 150% των προσδοκώμενων τάσεων και όταν σπάσει οποιοδήποτε τμήμα της να πέσει στο 100% [18]. Σύμφωνα με τον C. Cid [19], για να μελετηθεί υπολογιστικά ένα πρόβλημα τοπολογικής βελτιστοποίησης με fail-safe φιλοσοφία, χρειάζεται να οριστούν οι τυχαίες θέσεις που μπορεί να υπάρξει αστοχία αλλά και οι πιθανότητες να συμβεί σε καθεμία από αυτές τις θέσεις. Επιπλέον, πρέπει να ελεγχθεί η συμπεριφορά της δομής μετά από κάθε αστοχία. Η ακρίβεια κατά τον ορισμό των δυνάμεων είναι πολύ σημαντική, καθώς το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης μπορεί να βγει λανθασμένα ανθεκτικό τις τάσεις ή ακόμα και να καταλήξει η ανάλυση σε άτοπο [20].

Ο όρος safe-life χρησιμοποιείται για να δείξει ότι κάποια εξαρτήματα έχουν μελετηθεί ώστε είναι απόλυτα ασφαλείς μέχρι κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα. Μετά το πέρας αυτού του διαστήματος χρειάζονται αλλαγή ακόμα και αν δεν παρουσιάζουν φθορές, ώστε να παραμένει ασφαλής το σύστημα. Για να υπολογιστεί το χρονικό περιθώριο θεώρησης ενός αντικειμένου χρειάζεται εκτεταμένη έρευνα της κόπωσης του. Η λογική του safe-life διαφέρει από του fail-safe, καθώς με την τήρηση των οδηγιών προλαμβάνεται το ατύχημα. Ο σχεδιαστής καλείται να επιλέξει ποια από τις δυο φιλοσοφίες θα ενσωματώσει στο προϊόν του. Η επιλογή βασίζεται στο κατά πόσο η πιθανότητα και η σπουδαιότητα του ατυχήματος υπερτερεί του κόστους (το κόστος μπορεί να αφορά χρόνο ή και μείωση της επίδοσης του προϊόντος) ενσωμάτωσης της εκάστοτε φιλοσοφίας [21]. Στην αεροναυπηγική λόγω της σπουδαιότητας της ασφάλειας χρησιμοποιούνται και οι δυο φιλοσοφίες.

6.2 Τύποι fail-safe



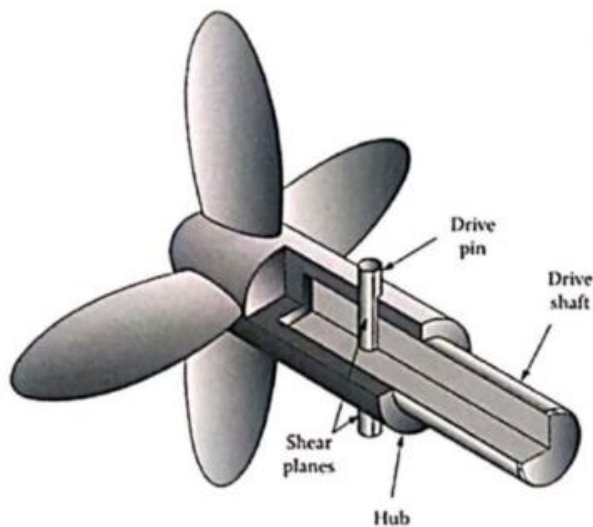
Εικόνα 6-3. Fail-safe σχεδιασμός των εξωτερικών panel ενός αεροσκάφους.

Η συνηθέστερη χρήση της φιλοσοφίας του fail-safe συναντάται στην αεροναυπηγική και στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Στην αεροναυπηγική υπάρχουν τρεις τύποι δομής fail-safe. Ο πρώτος τύπος αποτελείται από μέρη του αεροσκάφους που είναι σχεδιασμένα για να ραγίζουν αλλά όχι να σπάνε τελείως μέχρι να γίνουν εμφανή, με σκοπό να αλλαχθούν. Στον δεύτερο τύπο η τάση αποβάλλεται μέσω της ολικής καταστροφής ενός τμήματος στο οποίο υπάρχει εφεδρικό τμήμα. Στον τρίτο τύπο, η αποτυχία από μόνη της οδηγεί σε μείωση των τάσεων άρα και στον περιορισμό ανάπτυξης της καταστροφής [2]. Καθώς το αεροπλάνο είναι ένα μέσο μετακίνησης, του οποίου η δυσλειτουργία μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τις ζωές όλων των επιβατών, είναι αναγκαίο να ελεγχθούν όλα τα επιμέρους τμήματά του ως προς την fail-safe λογική.

6.2.1 Μηχανικό

Ένα παράδειγμα μηχανικού fail-safe συναντάται στα καρότσια μεταφοράς αποσκευών στα αεροδρόμια απαιτούν ο χρήστης να κρατάει το χερούλι συνεχώς, το οποίο απενεργοποιεί τα φρένα. Έτσι ώστε σε περίπτωση που έχει μια κλίση το έδαφος ή έχει κάποια ταχύτητα το καρότσι, να σταματήσει για να μην γίνει επικίνδυνο. Ένας παρόμοιος μηχανισμός χρησιμοποιείται και για τα χορτοκοπτικά. Σε σεισμογενείς

περιοχές, σε περίπτωση σεισμού ο ανελκυστήρας σταματάει στο κοντινότερο επίπεδο και ανοίγει τις πόρτες του. Ακόμη, σε περίπτωση που κοπεί το καλώδιο του ανελκυστήρα, ενεργοποιούνται τα φρένα (τα οποία σε διαφορετική περίπτωση απενεργοποιούνται από την κίνηση του καλωδίου) και αποφεύγεται ο κίνδυνος πτώσης του. Οι μηχανικές πόρτες σε περίπτωση διακοπής του ρεύματος ανοίγουν χειροκίνητα και δεν απαιτούν κωδικό ή κλειδί, με σκοπό την ασφαλή έξοδο των ανθρώπων σε περίπτωση κινδύνου. Οι προπέλες των σκαφών χρησιμοποιούν κάποιους πείρους ασφάλειας, όπως φαίνεται στην εικόνα 6-4, έτσι ώστε όταν μπλεχτεί και ζοριστεί η προπέλα να σπάσουν μόνο αυτοί προστατεύοντας την ακριβή αντικατάσταση της προπέλας. Σε μερικά παλαιότερα αεροπλάνα που χρησιμοποιούσαν κινητήρες με προπέλες, ένας μηχανισμός τις έφερνε σε κανονική θέση ώστε να πετάει το αεροπλάνο. Σε περίπτωση που χάλαγε ο μηχανισμός αυτός οι προπέλες γύριζαν σε τέτοια θέση ώστε να επηρεάζουν όσο λιγότερο γίνεται την αεροδυναμική του αεροπλάνου και να μην το φρενάρουν, όπως φαίνεται στην εικόνα 6-5. Ένα άλλο παράδειγμα είναι οι δικλείδες ασφαλείας στα παράθυρα αυτοκινήτων, στα οποία όταν πάνε να κλείσουν τραυματίζοντας το δάχτυλο του χρήστη, με το που νιώσουν κάποια αντίσταση κατεβαίνουν αποφεύγοντας τον τραυματισμό. Σύμφωνα με την έρευνα [1], η προσθήκη περισσότερων ρουλεμάν βοηθάει στην καλύτερη κατανομή των τάσεων και γενικότερα στην εξασφάλιση μιας fail-safe δομής. Σε αυτήν την έρευνα μελέτησαν την συμπεριφορά μιας δομής όταν λαμβάνει χώρα μια δεδομένου μεγέθους αστοχία σε τυχαία σημεία της δομής. Για την επίλυση των δύσκολων μαθηματικών προβλημάτων, χρησιμοποίησαν το λογισμικό Altair OptiStruct.

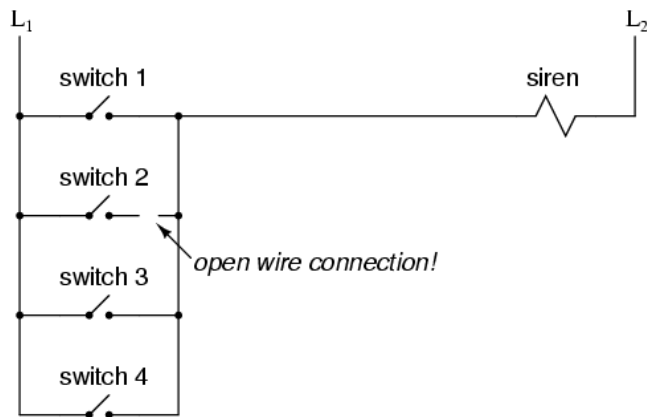


Εικόνα 6-4. Fail-safe μηχανισμός προπέλας σκάφους.



Εικόνα 6-5. Μηχανισμός περιστροφής προπέλας αεροπλάνου.

6.2.2 Ηλεκτρικό



Εικόνα 6-6. Ηλεκτρικό κύκλωμα με τεσσάρων διακοπών fail-safe φιλοσοφίας.

Πολύ συχνή είναι και η χρήση ηλεκτρικών fail-safe μηχανισμών οι οποίοι προστατεύουν διάφορες συσκευές από υπερφόρτωση και καταστροφή των καλωδίων λόγο υπερθέρμανσης, με την βοήθεια ηλεκτρικών ασφαλειών. Ένα παράδειγμα βρίσκεται στους φωτεινούς σηματοδότες, στους οποίους όταν κάποιος δυσλειτουργεί, οι ειδικοί που παρακολουθούν την κυκλοφορία σημαίνουν όλους τους φωτεινούς σηματοδότες της διασταύρωσης σε προειδοποιητικό σήμα αναβοσβήνοντας. Ακόμη, τα συστήματα

συναγερμών είναι σε κλειστά κυκλώματα και σε περίπτωση που ένα καλώδιο κοπεί τότε ενεργοποιείται αυτόματα ο συναγερμός. Ένα ακόμη παράδειγμα ηλεκτρικού fail-safe είναι ο μηχανισμός σε μερικά εργαλεία κοπής με τροχό, τα εργαλεία αυτά προστατεύουν το δάκτυλο του χρήστη σταματώντας την περιστροφή του τροχού. Κάτι τέτοιο το πετυχαίνουν με την βοήθεια της αγωγιμότητας του δαχτύλου.

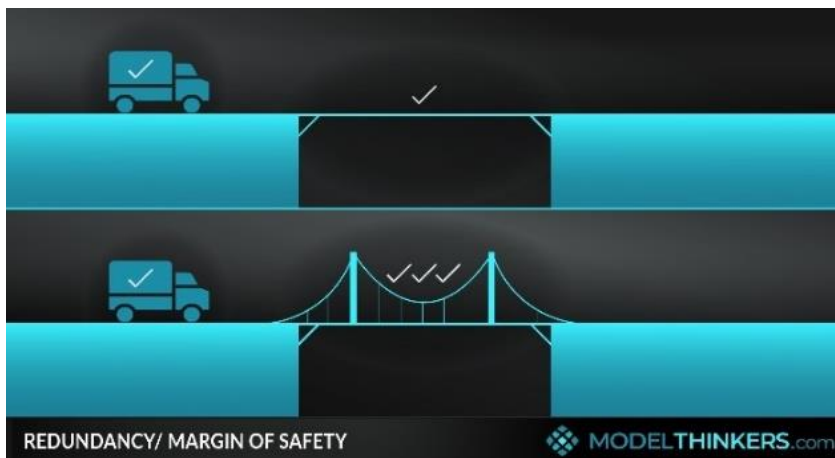


Εικόνα 6-7. Ηλεκτρική ασφάλεια για ηλεκτρολογικό πίνακα.

Κατά την δημιουργία του προϊόντος θα πρέπει να καταγράφονται όλα τα πιθανά σφάλματα τα οποία μπορούν αν εξελιχθούν να προκαλέσουν ζημιά στον άνθρωπο, το περιβάλλον ή οικονομικής φύσεως. Αυτή είναι ανάλυση ονομάζεται Fault Tree Analysis [22]. Αυτά τα προβλήματα πρέπει να αναλυθούν ως προς τον τύπο τους, την προέλευση και την επικινδυνότητα που δύναται να προκαλέσουν. Η αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος αυξάνει την πιθανότητα των προβλημάτων.

6.3 Τεχνικές εξασφάλισης ενός fail-safe συστήματος

6.2.1 Εφεδρικότητα



Εικόνα 6-8. Χρήση παραπάνω δικτυωμάτων και στηριγμάτων σε μια γέφυρα από τα αναγκαία, για εξασφάλιση μεγαλύτερης ασφάλειας.

Είναι χρήσιμο να υπάρχουν εφεδρικά εξαρτήματα ή και συστήματα σε περίπτωση δυσλειτουργίας των βασικών. Δηλαδή η χρήση παραπάνω εξαρτημάτων από όσα χρειάζονται για την επίτευξη μιας λειτουργίας. Για παράδειγμα τα εφεδρικά δικτυώματα σε μια γέφυρα ή οι πολλαπλοί κινητήρες σε ένα αεροσκάφος, εξασφαλίζουν ασφαλή διατήρησή διέλευση των ανθρώπων ή την ασφαλή πτήση σε περίπτωση δυσλειτουργίας κάποιου κινητήρα αντίστοιχα. Βέβαια με αυτόν τον τρόπο το σύστημα γίνεται πιο ακριβό και περίπλοκο.

6.2.2 Εσκεμμένη χρήση αδύναμων συνδέσμων

Συχνά χρησιμοποιούνται φθηνά ανταλλακτικά τα οποία είναι εύκολο να αλλαχθούν, για να προστατέψουν μεγαλύτερα και ακριβότερα εξαρτήματα ενός συστήματος. Στα ηλεκτρικά συστήματα ένα απλό παράδειγμα είναι οι ασφάλειες, οι οποίες καίγονται εμποδίζοντας το ρεύμα να καταστρέψει τον υπόλοιπο εξοπλισμό.



Εικόνα 6-9. Κρίκος ο οποίος τοποθετείται ανάμεσα στο σκοινί και στην αλυσίδα του πλοίου. Είναι σχεδιασμένος για να σπάει όταν δεχθεί μεγάλες τάσεις, ώστε να προστατεύει τα υπόλοιπα εξαρτήματα.

6.2.3 Από την φύση των υλικών

Στους αγωγούς του φυσικού αερίου χρησιμοποιείται πολύ σκληρό υλικό το οποίο σε περίπτωση αστοχίας θα συμπεριφερθεί με όλκιμο τρόπο. Αυτό γίνεται γιατί οι ρωγμές σε όλκιμο υλικό μεταδίδονται με υπό διπλάσιο ρυθμό από ότι σε ψαθυρό.

6.2.4 Γρήγορη αναγνώριση

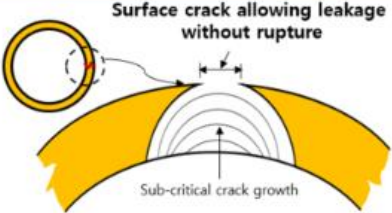
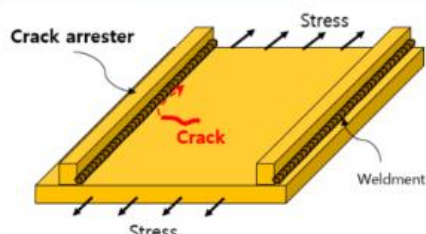
Ένα σύστημα μπορεί να κάνει εύκολο τον εντοπισμό των ρωγμών σε αρχικό στάδιο. Για να γίνει κάτι τέτοιο εφικτό θα πρέπει το υλικό να μελετηθεί ως προς την αντοχή του στις μέγιστες δυνάμεις που μπορεί να δεχτεί, με το μέγιστο μέγεθος ρωγμών. Ακόμη, πρέπει να βρεθεί ο χρόνος ανάπτυξης της ρωγμής μέχρι το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος.

6.2.5 Διαρροή

Τα δοχεία που λειτουργούν υπό πίεση για να μην σκάσουν και γίνουν επικίνδυνα, επιτρέπουν την δημιουργία ρωγμών ώστε να απελευθερώνεται το αέριο. Αυτές οι ρωγμές είναι ανιχνεύσιμες και χρειάζονται επιδιόρθωση πριν να αναπτυχθούν περεταίρω.

Fatigue Fracture Mechanics

● Examples of the Failure-safe design

Leak Before Break (LBB)	Crack Arrester
 <p>Surface crack allowing leakage without rupture</p> <p>Sub-critical crack growth</p>	 <p>Crack arrester</p> <p>Stress</p> <p>Crack</p> <p>Weldment</p> <p>Stress</p>
<ul style="list-style-type: none">➤ Pressure vessels and pipes are designed such that a crack will propagate completely through those before it reaches critical length.➤ Generally, the cracks will start at the internal wall and progress outward radially.➤ Leak are generally easy to detect, and therefore, should be detected before the crack grows to critical length.	<ul style="list-style-type: none">➤ To prevent cracks that exceed critical length from fracturing the entire part, crack arresters may be added to the structure.➤ Effectively, what is occurring is the crack tip stress intensity decreases as it approaches the arresters.➤ The arresters start to carry more and more load, thus decreasing the load near the crack tip.

Dovny (harleyjeong@gmail.com)

Εικόνα 6-10. Σχεδιάγραμμα διαρροή και crack arresters.

6.2.6 Crack arresters

Για τον περιορισμό ανάπτυξης των ρωγμών χρησιμοποιούνται τα crack arresters, τα οποία έχουν την μορφή βιδωτών ιμάντων και εφαρμόζονται συνήθως πάνω σε σωλήνες ή στον σκελετό του αεροσκάφους όπως φαίνεται στην εικόνα 6-10.

7. Αξιοποίηση του fail-safe στην προσθετική κατασκευή

7.1 Εισαγωγή

Η προσθετική κατασκευή δίνει την δυνατότητα να δημιουργηθούν πολύπλοκα μορφολογικά προϊόντα, με οργανικές μορφές αλλά και να επεξεργαστεί η εσωτερική δομή τους. Η ικανότητα αυτή είναι πολύ χρήσιμη, καθώς τα αποτελέσματα των τοπολογικών βελτιστοποιήσεων με την fail-safe φιλοσοφία είναι πολύπλοκα μορφολογικά και οργανικά. Από την άλλη, η επεξεργασία του εσωτερικού μοτίβου πλήρωσης (infill pattern) και της πυκνότητάς (infill density) του, δίνει την δυνατότητα ελέγχου της μηχανικής του συμπεριφοράς. Από τις τεχνικές εξασφάλισης ενός fail-safe συστήματος, που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούν να αξιοποιηθούν από την τεχνολογία της ΠΚ δύο, η «εφεδρικότητα» και η «εσκεμμένη χρήση αδύναμων συνδέσμων». Η λογική της εφεδρικότητας χρησιμοποιείται στις fail-safe τοπολογικές βελτιστοποιήσεις, στις οποίες χρησιμοποιούνται μικρότερα δικτυώματα με σκοπό, στην περίπτωση αστοχίας μερικών δικτυωμάτων σε τυχαία σημεία, να παραμείνει σταθερή και λειτουργική η δομή τους. Η τεχνική της εσκεμμένης χρήσης αδύναμων συνδέσμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους. Πρώτον, με την συμβατική έννοια, δηλαδή με την χρήση της τεχνολογίας για την κατασκευή των συνδέσμων οι οποίοι θα σπάνε για να προστατέψουν το υπόλοιπο σύστημα. Δεύτερον, με την επεξεργασία του εσωτερικού των προϊόντων σε επιλεγμένα σημεία, κάνοντάς τα πιο αδύναμα, έτσι ώστε να σπάνε όταν δεχθούν καθορισμένες δυνάμεις, προστατεύοντας την χρήσιμη γεωμετρία ενός προϊόντος.

7.2 Σχεδίαση του lattice

7.2.1 Εισαγωγή

Η μορφή του lattice παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην δημιουργία ενός αντικειμένου. Το lattice δημιουργείται από την επανάληψη ενός δυσδιάστατου ή τρισδιάστατου γεωμετρικού σχήματος, στους άξονες x και y , με σκοπό την κατασκευή ενός pattern. Αυτό το pattern μπορεί να επεξεργαστεί με πολλούς ή λίγους τρόπους ανάλογα με το λογισμικό μοντελοποίησης. Μερικά λογισμικά δίνουν την δυνατότητα αλλαγής της πυκνότητας ενιαία ή κατά μήκος μιας γραμμής, το μέγεθος της μονάδας που επαναλαμβάνεται, την τοποθέτηση του μοτίβου στον χώρο κ.α. Οι lattice δομές χρησιμοποιούνται συνήθως, για την διατήρηση της αντοχής του αντικειμένου με ταυτόχρονη μείωση του βάρους, την

εσκεμμένη παραμόρφωση του σε σημεία που χρειάζεται αλλά και την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων των υλικών [23]. Η προσθετική κατασκευή έχει βοηθήσει να χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο τέτοιες δομές, λόγω της εύκολης κατασκευής τους και των προτερημάτων που προσφέρουν. Ένα από αυτά είναι η μεγαλύτερη απορρόφηση δυνάμεων και η καλύτερη συμπεριφορά στις αστοχίες, σε σύγκριση με το συμπαγές εσωτερικό [20].

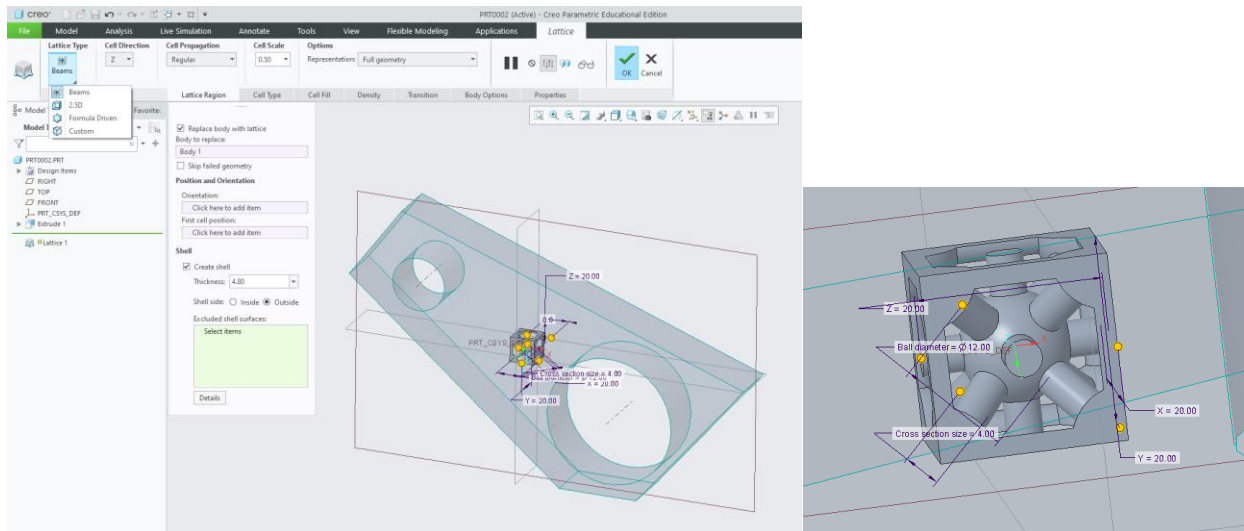
Στην έρευνα [23] προτείνεται μια μεθοδολογία παράκαμψης των περιορισμών των λογισμικών σχεδίασης με σκοπό την δημιουργία fail-safe προϊόντων. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει εφικτό εφαρμόζοντας την δομή του lattice, σε επιλεγμένα σημεία, με την χρήση της σχεδιαστικής πρόθεσης (design intent). Η αντοχή ελέγχεται και κατανέμεται στο προϊόν διαφορετικά, με σκοπό την συσσώρευση των τάσεων σε τμήματα του αντικείμενου, τα οποία δεν επηρεάζουν την λειτουργία του ή δεν θα γίνει επικίνδυνο προς τον χρήστη, αν υπερβούν το όριο αντοχής.

Έχοντας ως έμπνευση την φύση, στην οποία παρατηρείται μια οικονομία ως προς την κατανάλωση ενέργειας και πόρων, έχουν υιοθετηθεί διάφορα μοντέλα δομής από τον άνθρωπο με συνηθέστερο, ως από τα πιο στιβαρά, τις κυψέλες [24]. Άλλα μοντέλα δομής που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι ο ιστός της αράχνης, η εσωτερική δομή των κοκάλων, των φυσικών φελλών κ.α. Ένα μοτίβο ή lattice δημιουργείται όταν επαναλαμβάνονται οι μονάδες των παραπάνω μοντέλων [24]. Οι φυσικές δομές χωρίζονται σε κλειστές κυτταρικές δομές (οι οποίες είναι κλεισμένες γύρω από μια μεμβράνη) και σε ανοιχτές [25]. Η διαφορά στις κλειστές είναι ότι οι μηχανικές ιδιότητές τους μπορούν να επηρεαστούν και από το περίβλημά τους πέρα από την εσωτερική δομή τους, σε αντίθεση με τις ανοιχτές οι οποίες βασίζονται μόνο στην εσωτερική δομή τους. Στην προσθετική κατασκευή χρησιμοποιούνται σχεδόν μόνο ανοιχτοί τύποι lattice καθώς στην προσπάθεια δημιουργίας κλειστών τύπων, θα χρειάζονταν υποστηρικτικές δομές, οι οποίες θα εγκλωβίζονταν [24]. Σύμφωνα με την έρευνα [24], με την χρήση της προσθετικής κατασκευής μπορούν να κατασκευαστούν δύο τύποι κλειστού lattice, τοπικά κλειστός και καθολικά κλειστός. Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι το μέγεθος της μονάδας του μοτίβου επηρεάζει την αντοχή. Οι μικρές κλειστές μονάδες κελιού παρουσίασαν μεγαλύτερη ακαμψία και απορρόφηση ενέργειας [24]. Στην δομή της κυψέλης, παρατηρήθηκε αδυναμία στα χαμηλά στρώματα. Ακόμη, οι τοπικά κλειστοί τύποι με μικρό μέγεθος μονάδας, έφεραν την μεγαλύτερη ακαμψία. Οι lattice δομές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις Stochastic (foam) structures και τις περιοδικές δομές. Οι περιοδικές δομές προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή, μεταξύ των δύο [30]. Ορισμένες δομές συμπεριφέρονται ανισοτροπικά, για παράδειγμα οι εξαγωνικές δομές παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακαμψία όταν δεχθούν δυνάμεις κατά μήκος της περιοχής που έχουν εφαρμοστεί, παρά κάθετα [30]. Ένα φυσικό υλικό που συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο είναι το ξύλο.

Τα πιο δημοφιλή λογισμικά CAD διαθέτουν εργαλεία εφαρμογής και επεξεργασίας lattice δομών, ενσωματωμένα. Μερικά από αυτά τα λογισμικά είναι το Creo Parametric, το Autodesk Fusion 360, το nTop, το Altair OptiStruct & Inspire, το Siemens NX κ.α. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί, ως προς την επεξεργασία των lattice δομών, σε δύο από τα παραπάνω προγράμματα, το Creo Parametric και το Fusion 360.

7.2.2 Δυνατότητες λογισμικών σχεδίασης CAD

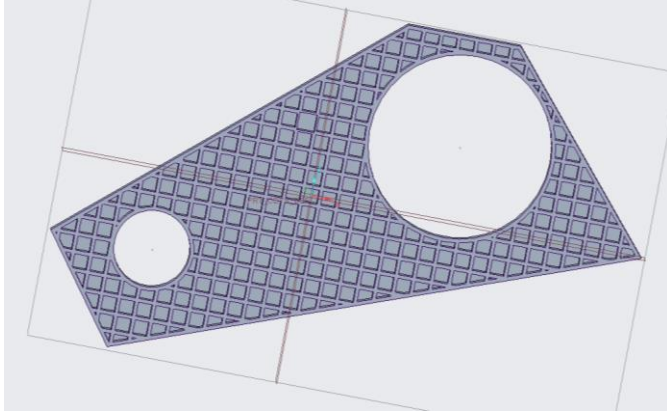
Στο Creo Parametric οι επιλογές παραμετροποίησης του lattice είναι αρκετές. Αρχικά, υπάρχει δυνατότητα επιλογής του τύπου του, ανάμεσα σε beams, 2.5D, formula driven (Gyroid, Primitive, Diamond) μέχρι και custom, στο οποίο ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει τον δικό του τύπο lattice.



Εικόνα 7-1. Στιγμιότυπα οθόνης από το λογισμικό Creo, στο menu lattice με τις επιλογές παραμετροποίησης.

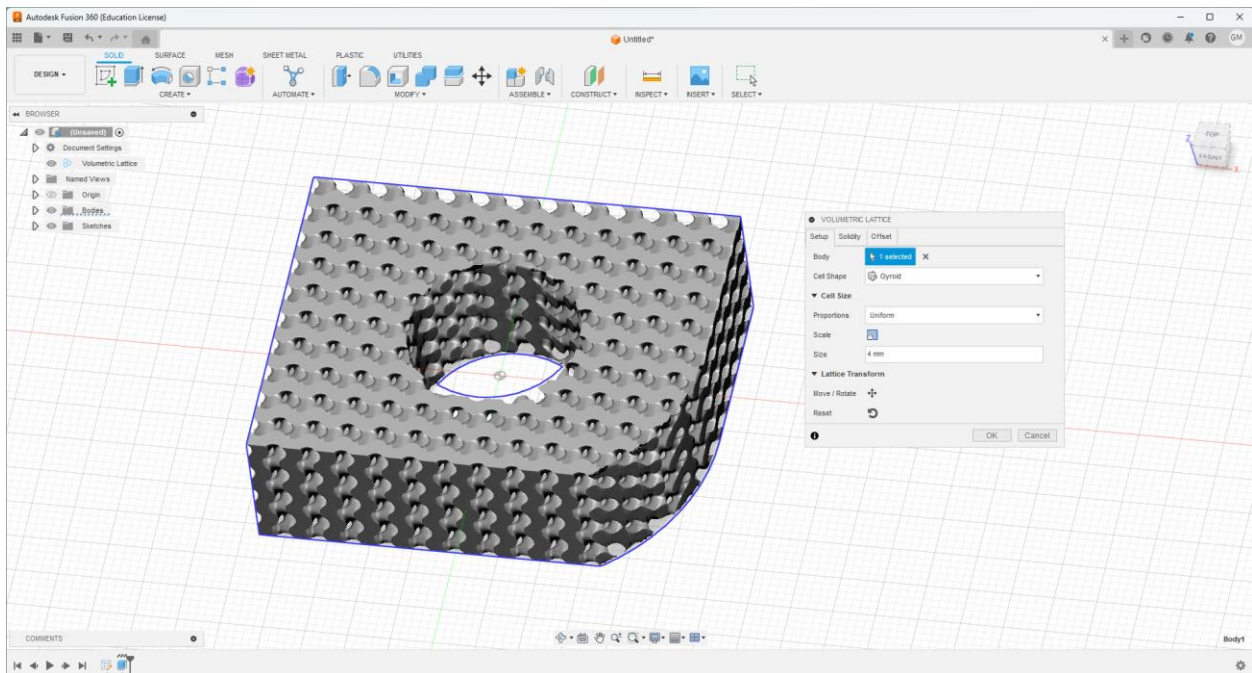
Ακόμη, δίνεται η επιλογή ως προς την κατεύθυνση που θα έχουν τα cells, ώστε να περιστραφούν κατάλληλα. Μια ακόμη δυνατότητα προσαρμογής, είναι ο τρόπος πολλαπλασιασμού των cells, στην οποία υπάρχουν οι επιλογές regular, quasi-radial και Herringbone. Από τις βασικές ρυθμίσεις είναι και η κλίμακα του cell, ο χρήστης δύναται να επιλέξει ομοιόμορφη μεγέθυνση ή σμίκρυνση ή να επιλέξει ακριβώς την τιμή κάθε παραμέτρου (μήκους και πλάτους).

Αφού επιλεγθούν οι βασικές παράμετροι, ο χρήστης πρέπει να ορίσει το body στο οποίο θα εφαρμοστεί η γεωμετρία του lattice. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής κελύφους, περιμετρικά του lattice, στο επιθυμητό πάχος. Όσον αφορά τις επιλογές τύπου lattice 2.5D και Beams, ο χρήστης μπορεί να αλλάξει και το σχήμα του cell, διαλέγοντας ανάμεσα σε τρίγωνο, τετράγωνο, εξάγωνο και οκτάγωνο, ενώ για την επιλογή Beams υπάρχει επιπλέον και η επιλογή stochastic (η οποία παραμετροποιείται σε μεγάλο βαθμό). Τέλος, παραμετροποιήσεις μπορούν να γίνουν και ως προς την πυκνότητα πολλαπλασιασμού των cells, με τις επιλογές να είναι τρεις. Πρώτον, ομοιόμορφη, δεύτερον να αλλάζει ανάλογα με την απόσταση από ένα σημείο αναφοράς και τρίτον να κατανέμεται ανάλογα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσομοίωσης.



Εικόνα 7-2. Αναπαράσταση lattice δομής σε ένα αντικείμενο.

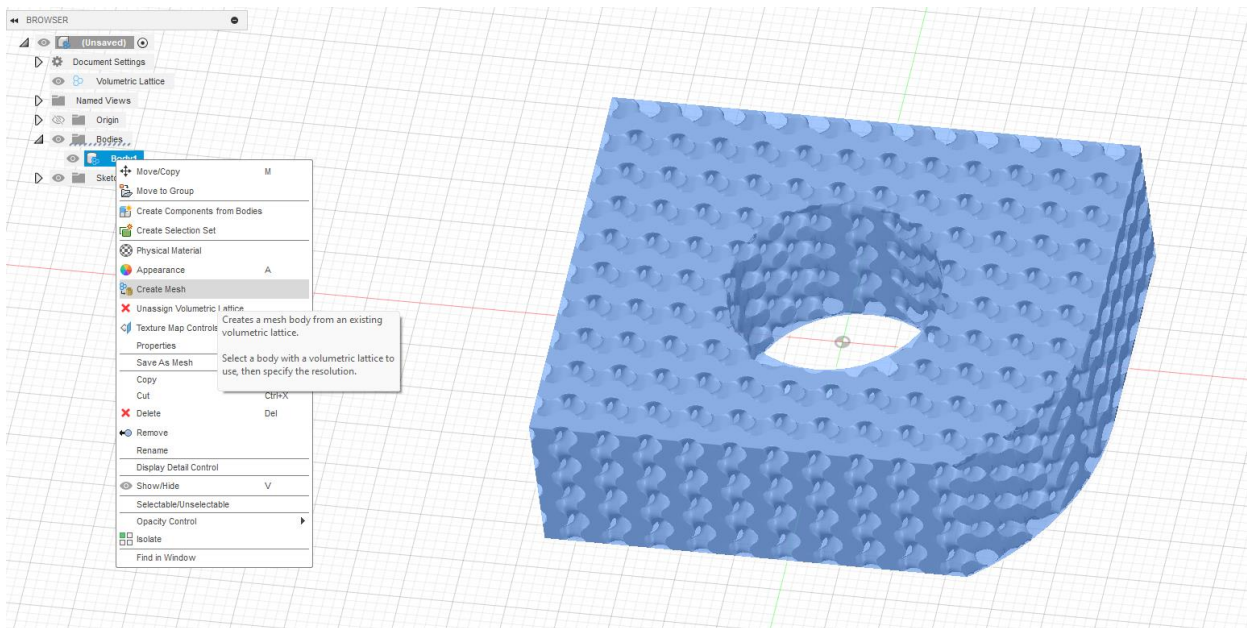
Οι επιλογές και οι παραμετροποιήσεις της δομής του lattice στο λογισμικό Fusion 360 γίνεται πολύ γρήγορα με άμεση οπτική απεικόνιση. Όσον αφορά το σχήμα του cell, υπάρχουν οι επιλογές Gyroid, Cross και Schwarz P. Τα cells μπορούν να μεγεθυνθούν ή να σμικρυνθούν ομοιόμορφα ή ανομοιόμορφα με βάση το μέγεθος του cell στους άξονες x, y, z. Επιπλέον, η δομή του lattice μπορεί να μετακινηθεί ή και να περιστραφεί, δίνοντας στον χρήστη μεγάλο έλεγχο ως προς την αποτύπωση του στο εκάστοτε body.



Εικόνα 7-3. Μετατροπή ενός solid body σε lattice Gyroid δομή με μέγεθος 4 mm.

Μια ακόμα βασική παράμετρος είναι η στερεότητα (solidity) η οποία, στην ομοιόμορφη αποτύπωσή της, ελέγχεται από μια κλίμακα από το 0 μέχρι το 100, όπου 0 καθόλου συμπαγές και 100 πλήρως συμπαγές.

Η δεύτερη επιλογή ως προς την στερεότητα είναι η βαθμωτή εξέλιξη κατά μήκος μιας γραμμής, η οποία θα οριστεί ως αναφορά. Έπειτα, πρέπει να οριστεί η τιμή της στερεότητας για το αρχικό σημείο της γραμμής και για το τελικό. Τελευταία παραμετροποίηση είναι το offset, ο χρήστης έχει την επιλογή να ορίσει ένα offset, ρυθμίζοντας την απόσταση από τις ορισμένες επιφάνειες ή αντικείμενα, μέχρι το σημείο που θα αντικατασταθεί με δομή lattice. Επιπλέον, υπάρχει δυνατότητα αλλαγή της στερεότητας των σημείων που έχουν οριστεί ως αναφορές. Σε αντίθεση με το Creo Parametric, οι lattice δομές μπορούν να εξαχθούν μόνο ως mesh bodies και επομένως δεν μπορούν να εισαχθούν ως γεωμετρίες για την μηχανική δοκιμή τους σε αναλύσεις. Για αυτόν τον λόγο, στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό Creo Parametric για την περιγραφή της μεθοδολογίας.



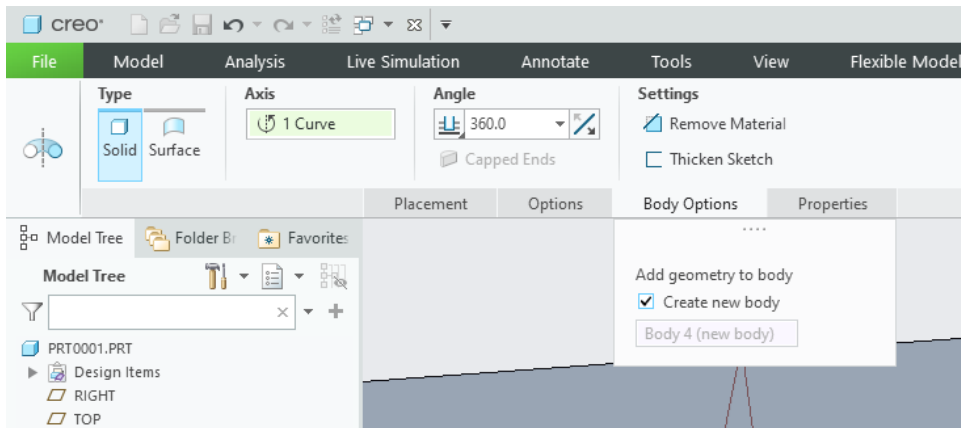
Εικόνα 7-4. Εξαγωγή της lattice δομής ως mesh body.

7.2.3 Περιορισμοί λογισμικών σχεδίασης CAD

Όμως, τα λογισμικά CAD περιέχουν και μερικούς περιορισμούς, κυρίως ως προς την αναγκαστική τοποθέτηση της lattice δομής σε ολόκληρο το body του μοντέλου, με μόνη εξαίρεση την δυνατότητα εφαρμογής κελύφους περιμετρικά του lattice, σε όλες ή σε επιλεγμένες επιφάνειες. Ένας ακόμη σημαντικός περιορισμός είναι οι διαθέσιμες δομές που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης, οι οποίες είναι σχετικά λίγες. Στην περίπτωση που επιλέξει να δημιουργήσει το δικό του lattice, αν δεν είναι αισθητικός ο σκοπός, η διαδικασία μελέτης της αναμενόμενης αντοχής και συμπεριφοράς είναι αρκετά σύνθετη.

Παρόλα αυτά, υπάρχει τρόπος παράκαμψης του κυριότερου περιορισμού ως προς την τοποθέτηση σε bodies. Αρχικά, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την επιλογή δημιουργίας ξεχωριστών bodies κατά την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου, μέσω των ρυθμίσεων από το body options, σε όγκους που θα χρησιμοποιηθεί lattice ή προορίζονται να εξαιρεθούν από την υπόλοιπη γεωμετρία. Στην περίπτωση που

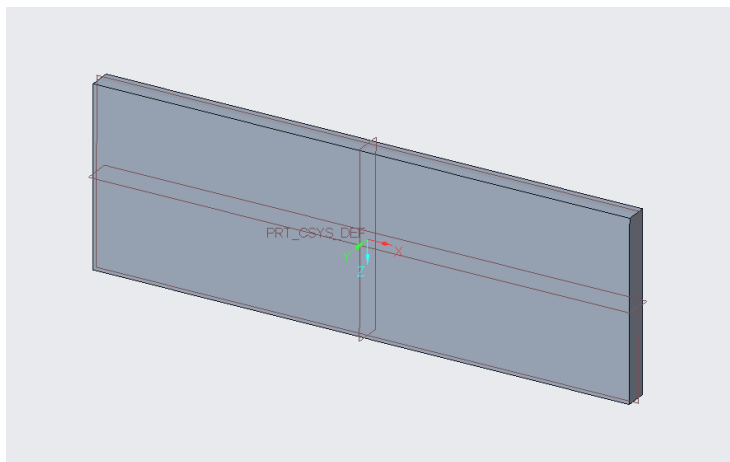
το τρισδιάστατο μοντέλο έχει δημιουργηθεί ως έναν ενιαίο body, υπάρχει δυνατότητα διαχωρισμού του σε περισσότερα. Κάτι τέτοιο γίνεται εφικτό με την βοήθεια της εντολής Split Body, από το menu Model, επιλέγοντας το body και το εργαλείο ή reference που θα χρησιμοποιηθεί για να το χωρίσει σε δύο μέρη. Ως εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίπεδα, επιφάνειες και στερεά μοντέλα. Με αυτόν τον τρόπο παρακάμπτεται ένας από τους βασικούς περιορισμούς των λογισμικών δίνοντας στον χρήστη την ελευθερία να τοποθετήσει την δομή του lattice όπου ακριβώς επιθυμεί.



Εικόνα 7-5. Επιλογή δημιουργίας ενός καινούργιο body κατά της δημιουργία ενός όγκου στο λογισμικό *Creo Parametric*.

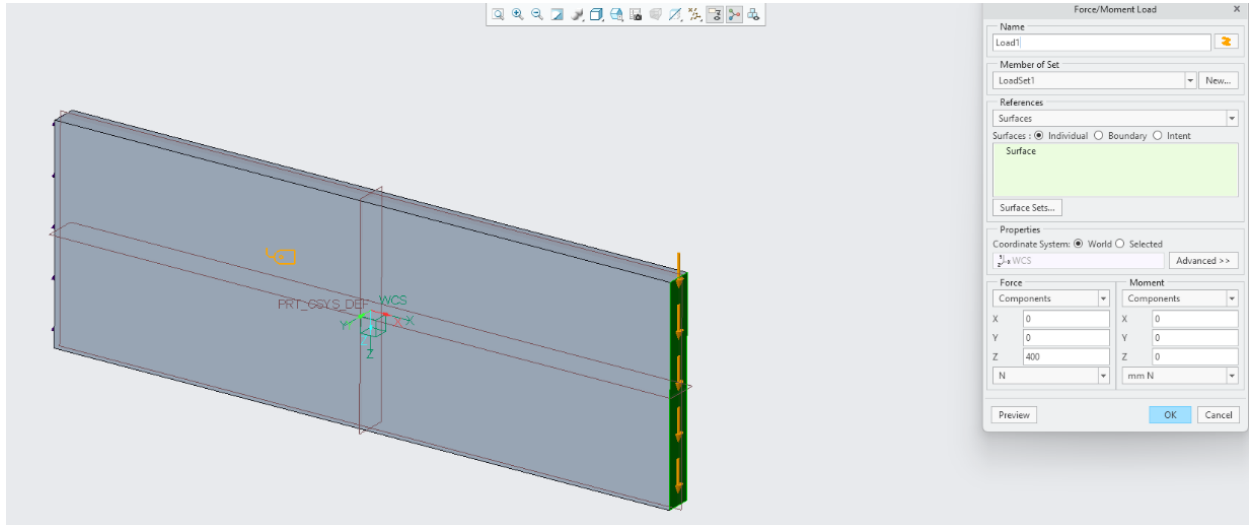
7.2.4 Διαφορές lattice με solid δομής

Για την μελέτη της συμπεριφοράς των lattice δομών σε σχέση με τις συμπαγής αλλά και σε σχέση με την αλλαγή των παραμέτρων τους, θα χρησιμοποιηθεί μια δοκός, διαστάσεων 240 x 80 x 10 mm, ως μοντέλο για στατικές αναλύσεις.



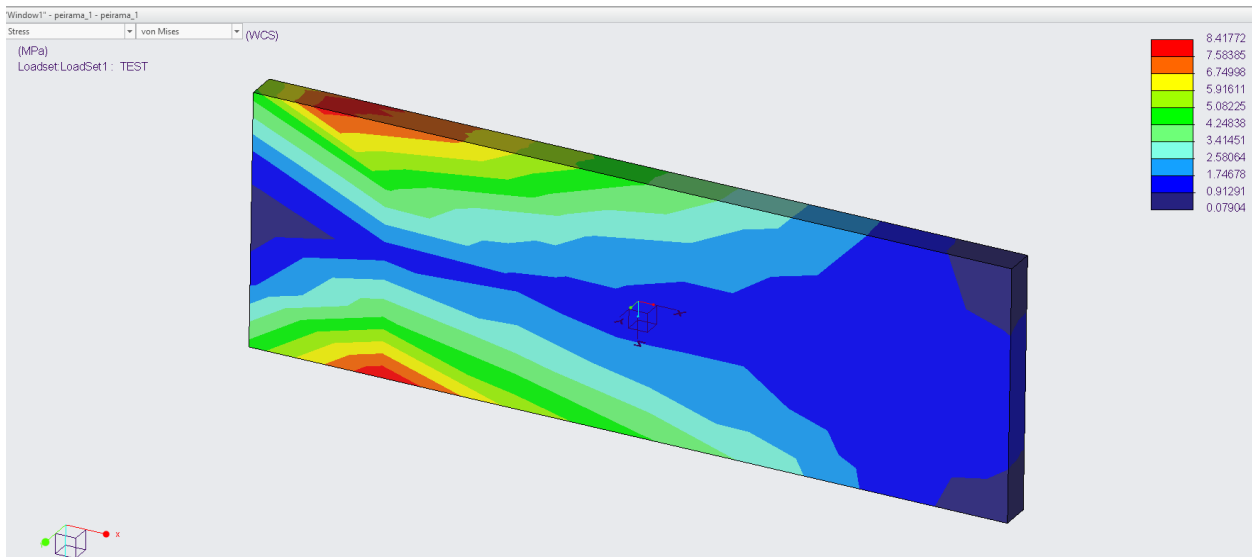
Εικόνα 7-6. Δοκός διαστάσεων 240 x 80 x 10 mm.

Πακτώνουμε την μια πλευρά και ορίζουμε μια δύναμη 400 N, όπως φαίνεται στην εικόνα 7-7. Ως υλικό χρησιμοποιήθηκε το ABS με tensile yield stress στα 41.4 MPa.

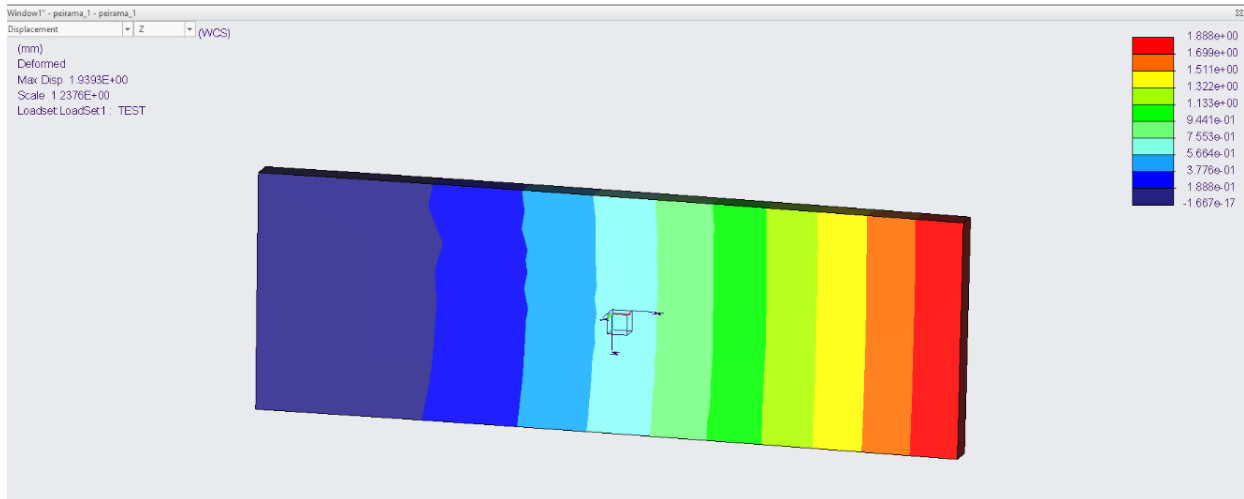


Εικόνα 7-7. Εφαρμογή δύναμης με μέτρο 400 N στον z άξονα.

Τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης με Single Pass μέθοδο, ως προς την τάση και την μετατόπιση απεικονίζονται στις εικόνες 7-8 και 7-9. Η μέγιστη τάση βρέθηκε στα 8,4 MPa ενώ η μέγιστη μετατόπιση ως προς τον Z στα 1,8 mm.

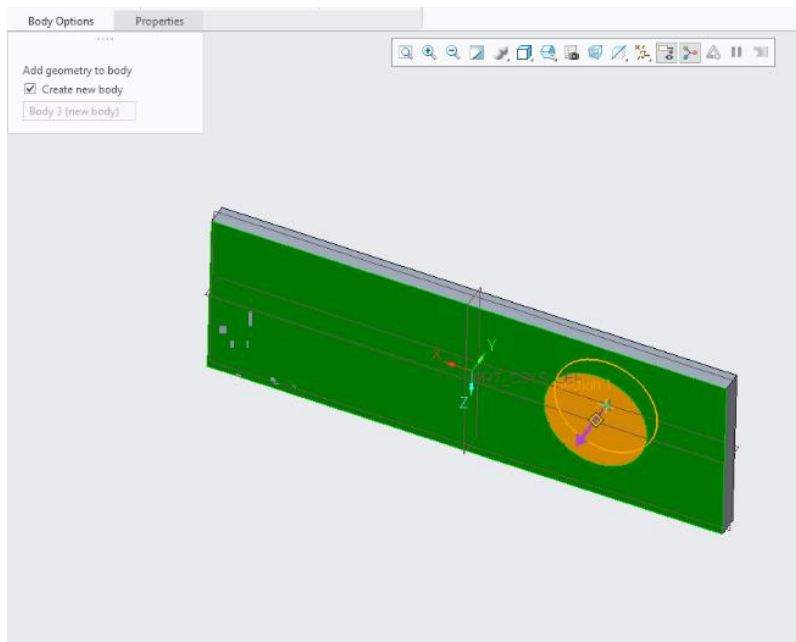


Εικόνα 7-8. Απεικόνιση κατανομής των τάσεων στη δοκό.

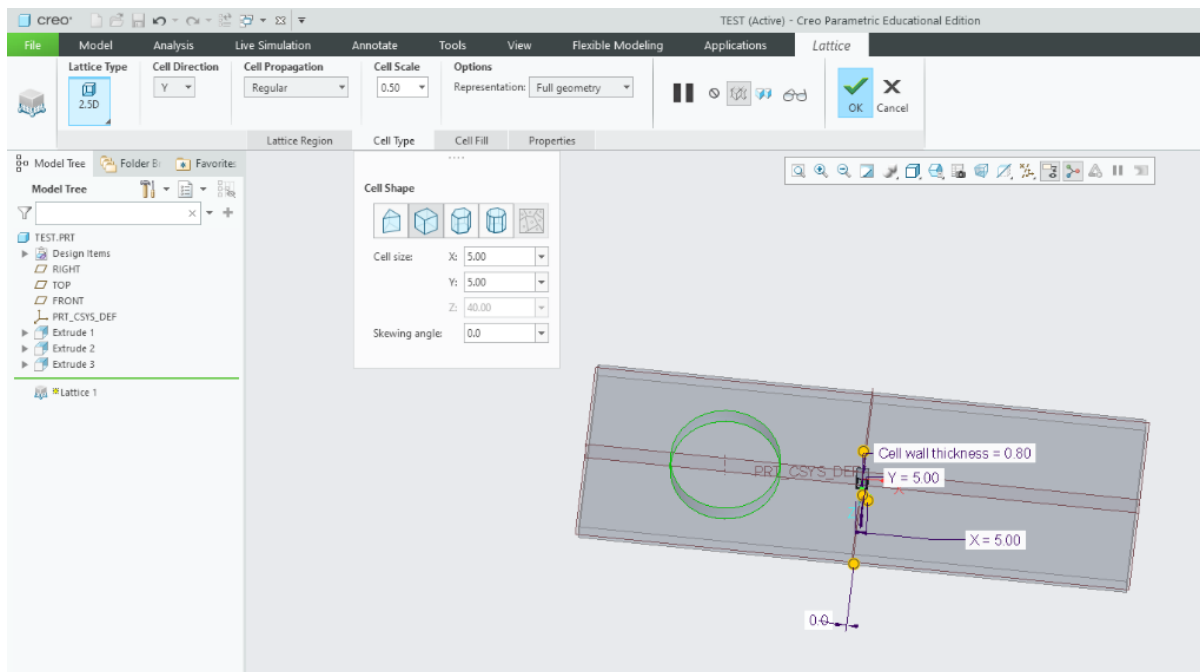


Εικόνα 7-9. Απεικόνιση της μετατόπισης ως προς τον Z άξονα.

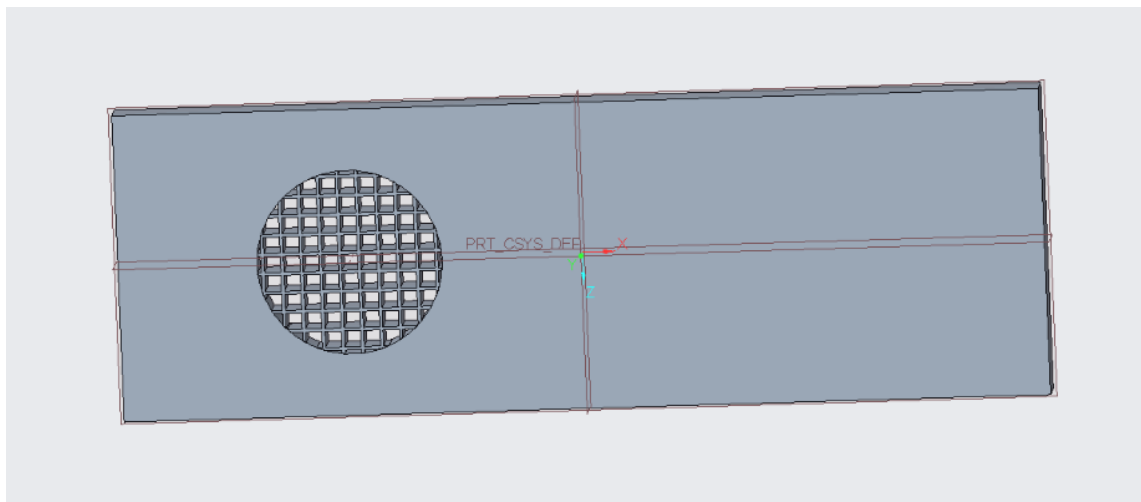
Επόμενο βήμα αποτελεί η αντικατάσταση ενός κυλινδρικού συμπαγές όγκου της δοκού με lattice δομή, με σκοπό να μελετηθεί η διαφορά στην συμπεριφορά της δοκού ως προς τις τάσεις και την μετατόπιση. Για την μετατροπή σε lattice χρησιμοποιήθηκε η παράκαμψη του λογισμικού, δηλαδή σχεδιάστηκε πρώτα μια οπή, αφαιρέθηκε και μετά θα την καλύφθηκε επιλέγοντας να δημιουργηθεί ως new body (ώστε να διαχωριστεί από την υπόλοιπη γεωμετρία). Αυτό είχε ως σκοπό να αντικατασταθεί αυτό το body με lattice. Χρησιμοποιήθηκε 2.5D κυβική δομή με διαστάσεις 5 x 5 mm και πάχος κελύφους 0,8 mm. Με την εφαρμογή αυτών των παραμέτρων του lattice και με μέγεθος οπής 48 mm, η μάζα μειώθηκε κατά 6,5 %.



Εικόνα 7-10. Δημιουργία ενός κυλινδρικού όγκου ως new body, μέσα από τις παραμετροποιήσεις της εντολής extrude.

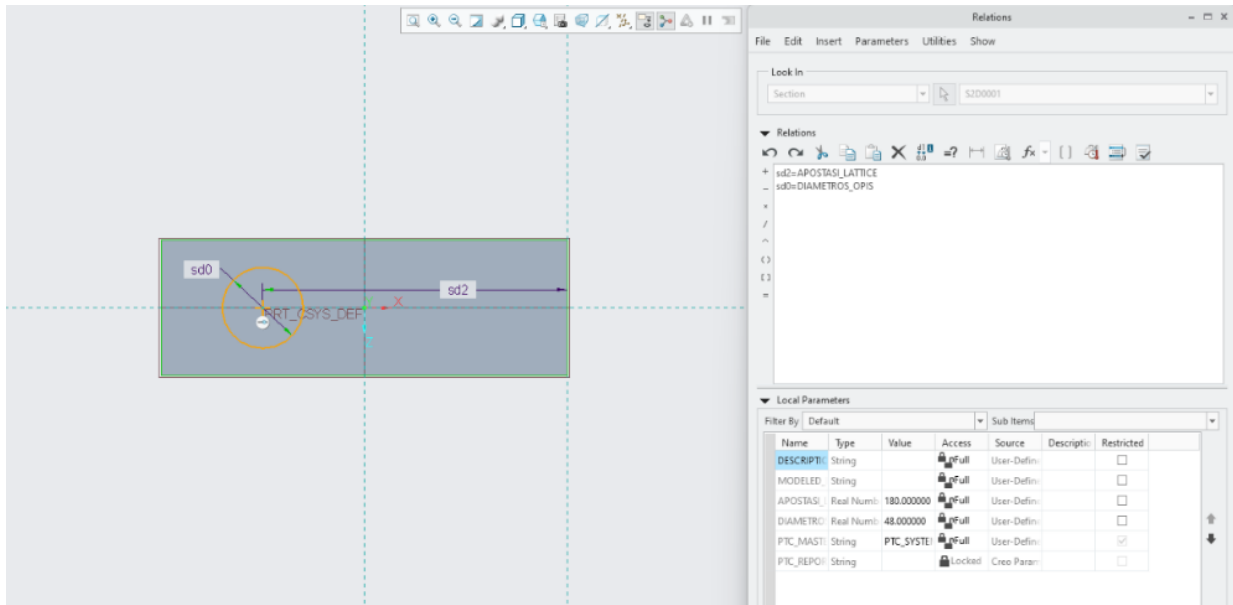


Εικόνα 7-11. Επιλογές παραμετροποίησης του lattice στο λογισμικό Creo Parametric.



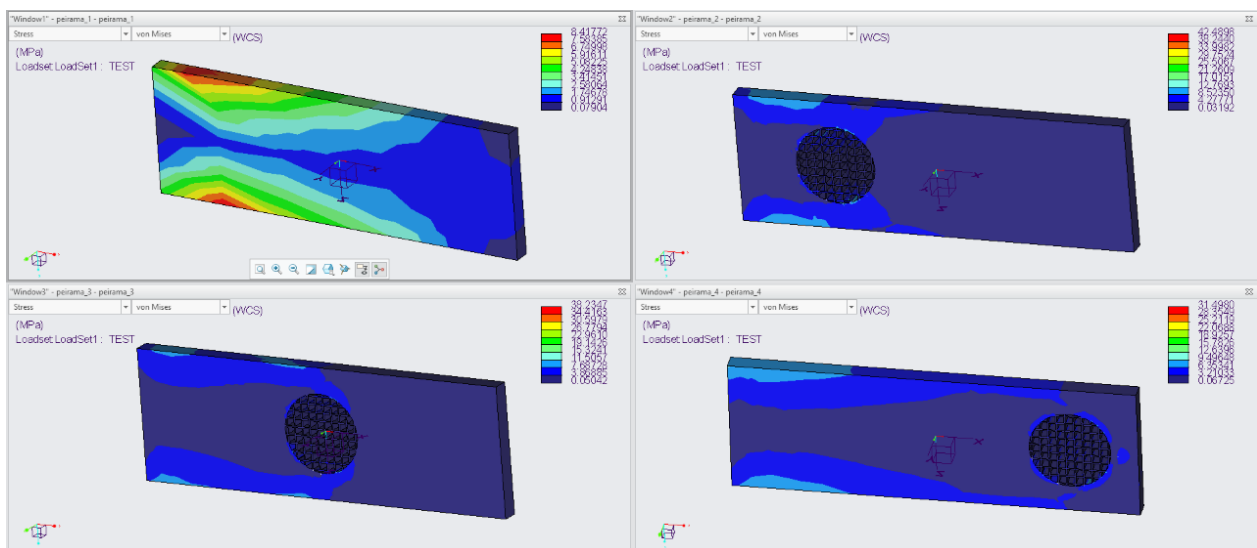
Εικόνα 7-12. Απεικόνιση μια δοκού στην οποία ένας κυλινδρικός όγκος έχει αντικατασταθεί από lattice δομή.

Αξιοποιώντας το design intent μέσα από την εντολή relations στο menu tools, ορίζουμε δύο παραμέτρους, την απόσταση του lattice από την πλευρά που έχει εφαρμοστεί η δύναμη και την διάμετρο της γεωμετρίας του lattice. Αυτές οι παράμετροι θα χρησιμοποιηθούν για την εύκολη μεταβολή της τιμής τους στις αναλύσεις.



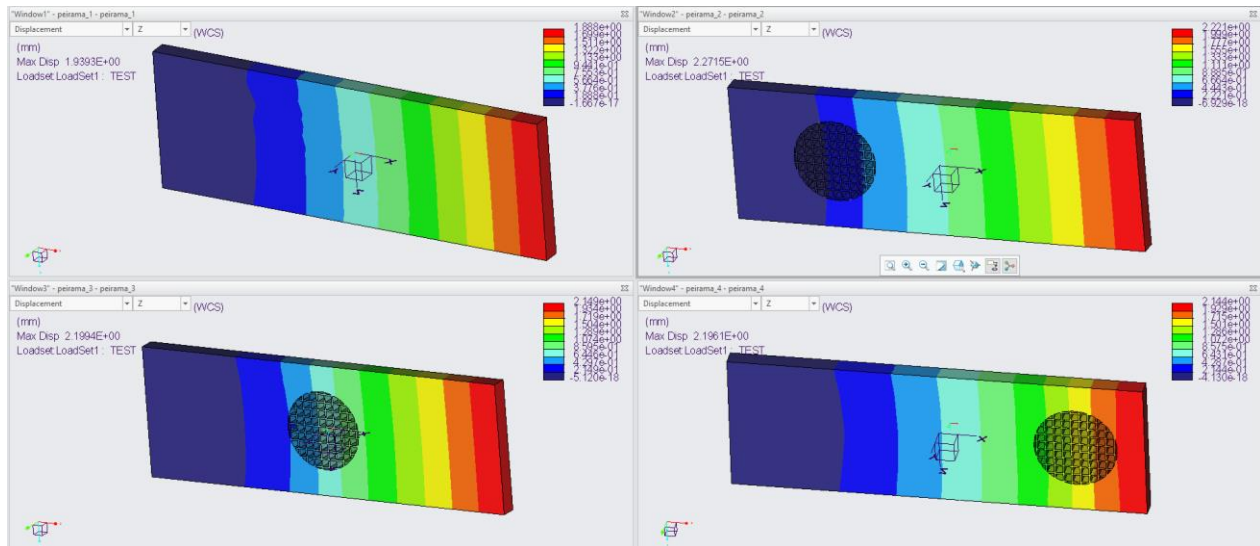
Εικόνα 7-13. Ορισμός σχεδιαστικής πρόθεσης μέσα από την εντολή «relations» του Creo Parametric.

Η δομή του lattice μετακινήθηκε τρεις φορές, πλησιάζοντας την επιφάνεια εφαρμογής της δύναμης. Από τα αποτελέσματα αρχικά παρατηρούμε ότι η αντικατάσταση ενός συμπαγούς μέρους με lattice επηρεάζει την κατανομή των τάσεων αλλά και την τιμή της μέγιστης τάσης. Στην εικόνα 7-14 παρατηρείται ότι οι τάσεις εφαρμόζονται πιο ομοιόμορφα, στις περιπτώσεις που έχει χρησιμοποιηθεί lattice. Ένα ακόμη συμπέρασμα είναι ότι η τοποθεσία του lattice επηρεάζει και αυτή την τάση. Ανάμεσα στις τρεις θέσεις του lattice που αναλύθηκαν, η μικρότερη μέγιστη τάση παρατηρήθηκε στην τοποθεσία κοντινότερα στην επιφάνεια εφαρμογής της δύναμης με μέτρο 31,5 MPa.



Εικόνα 7-14. Απεικονίσεις των τάσεων για τις 4 διαφοροποιήσεις της δοκού.

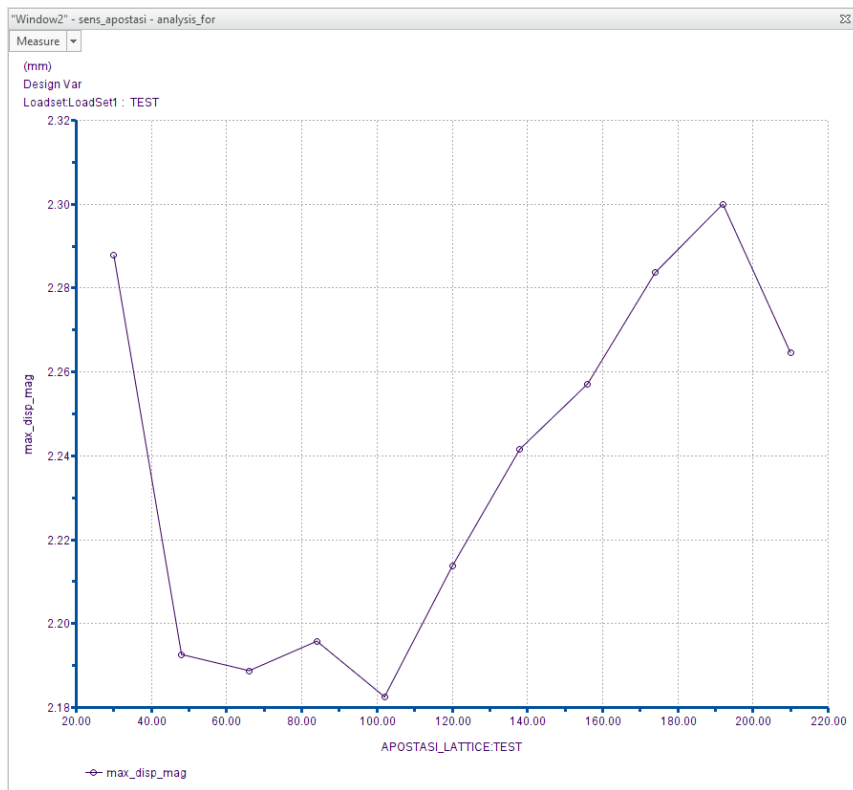
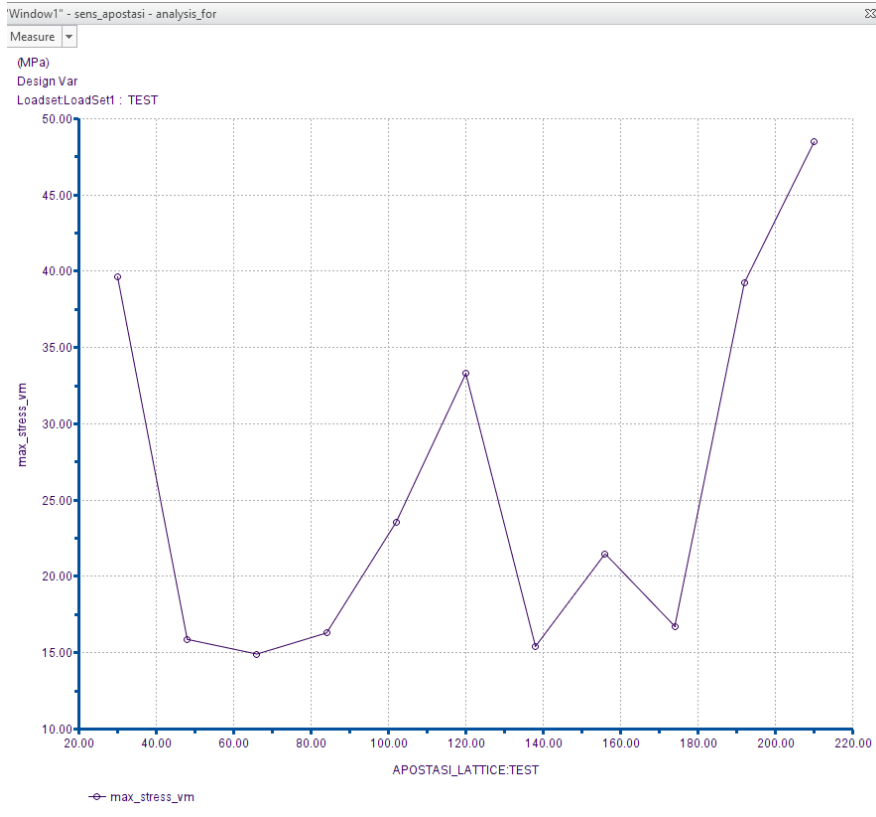
Όσον αφορά την μετατόπιση ως προς τον άξονα εφαρμογής της δύναμης, η τοποθεσία του lattice την επηρέασε άμεσα. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε μείωση της μετατόπισης παράλληλα με την μείωση της απόστασης του lattice από την πλευρά εφαρμογής της δύναμης. Η μέγιστη μετατόπιση που παρατηρήθηκε ήταν κατά περίπου 18% αυξημένη σε σχέση με την συμπαγή δοκό.



Εικόνα 7-15. Απεικονίσεις των μετατοπίσεων για τις 4 διαφοροποιήσεις της δοκού.

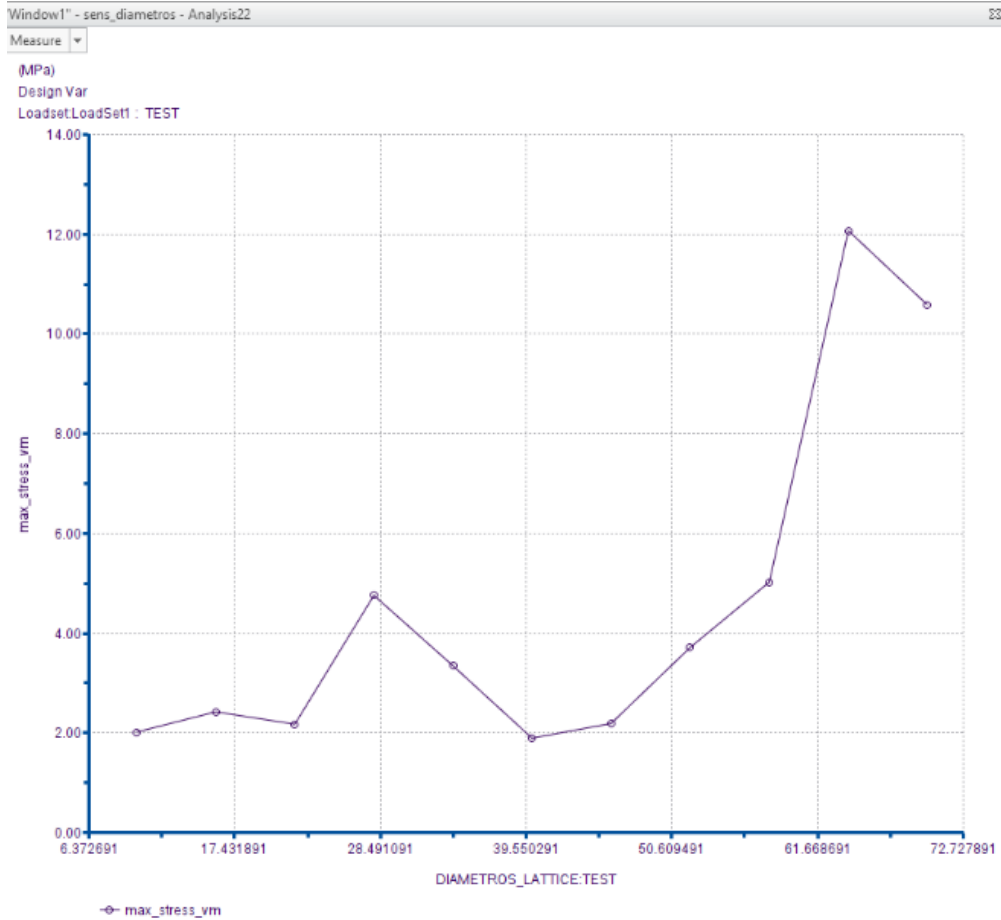
	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη Μετατόπιση (mm)
Συμπαγής δοκός	8,4	1,9
Δοκός με lattice κοντά στην πάκτωση	42,5	2,2
Δοκός με lattice στην μέση	38,2	2,1
Δοκός με lattice κοντά στην πλευρά εφαρμογής της δύναμης	31,5	2,1

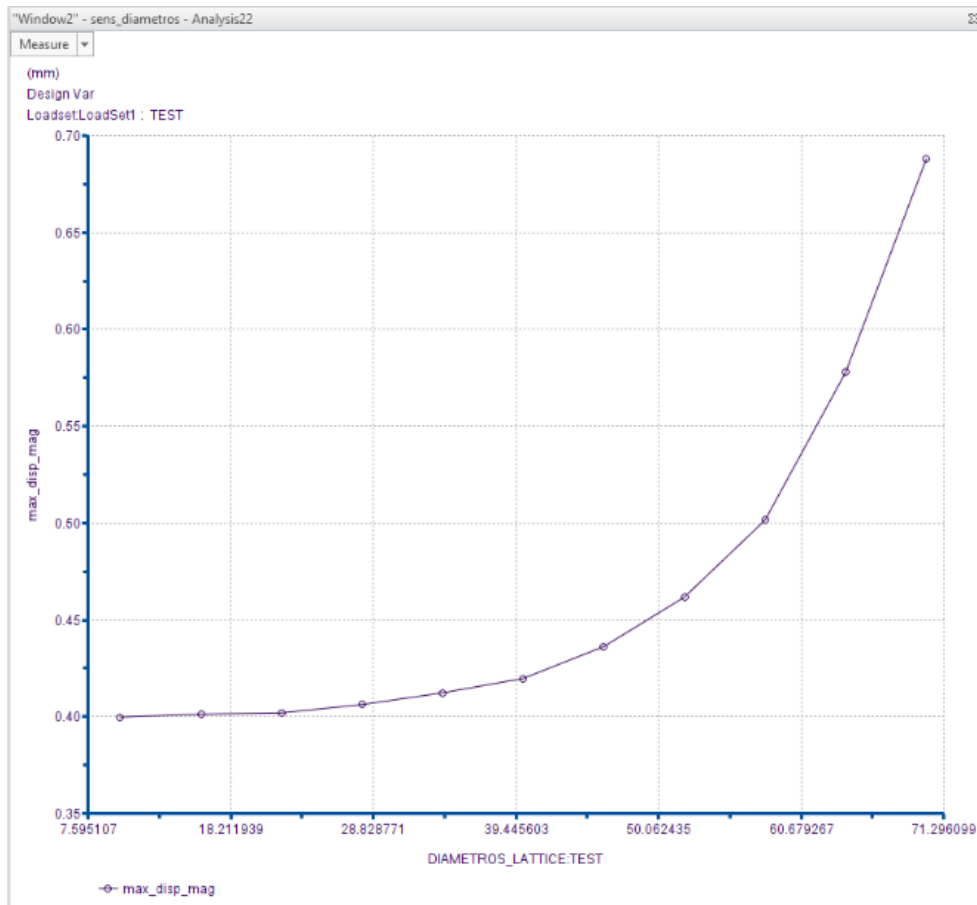
Για μια πιο πλήρη εικόνα, σχετικά με την επιρροή της τοποθεσίας του lattice στην τάση και την μετατόπιση, χρησιμοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας. Το εύρος τιμών της απόστασης του lattice από την πλευρά εφαρμογής της δύναμης ορίστηκε από 30 mm έως 120 mm.



Εικόνα 7-15. Διαγράμματα μέγιστης τάσης και μέγιστης μετατόπισης για την δοκό κατά την μετατόπιση της lattice δομής.

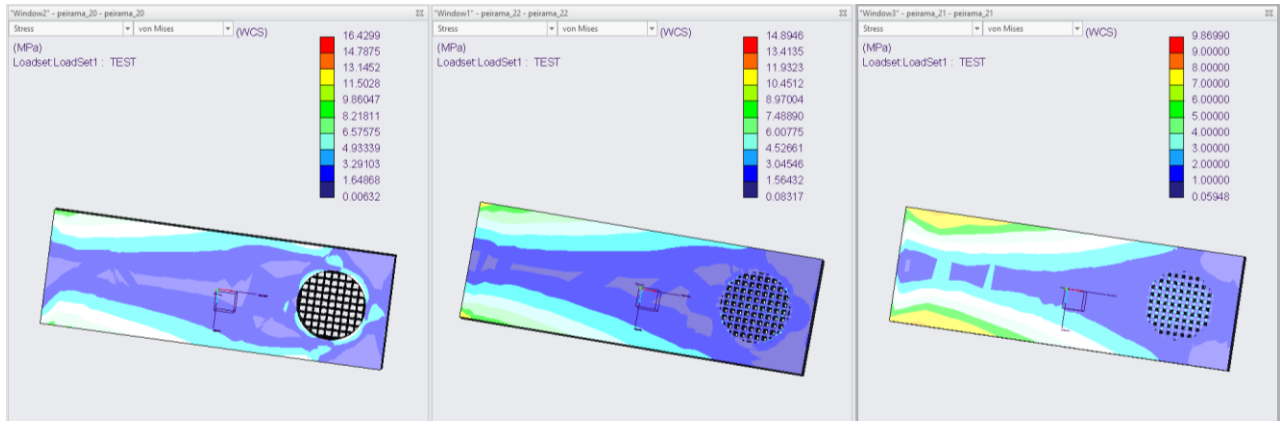
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη τάση και η μετατόπιση δεν μεταβάλλονται γραμμικά με την θέση του lattice. Σε αυτή την περίπτωση, για να βρεθεί η βέλτιστη ακριβής θέση του lattice πρέπει να γίνει ανάλυση βελτιστοποίησης. Ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκε και για την διάμετρο της γεωμετρίας του lattice, όταν η απόσταση από την πλευρά εφαρμογής της δύναμης ήταν 40 mm. Από τα διάγραμμα παρατηρούμε ότι και το μέγεθος της γεωμετρίας του lattice επηρεάζει την τάση και την μετατόπιση. Η τάση δεν αλλάζει αναλογικά με την αύξηση του μεγέθους της επιφάνειας του lattice, αλλά η μετατόπιση αυξάνεται παράλληλα με το μέγεθος, όπως φαίνεται στην εικόνα 7-16.



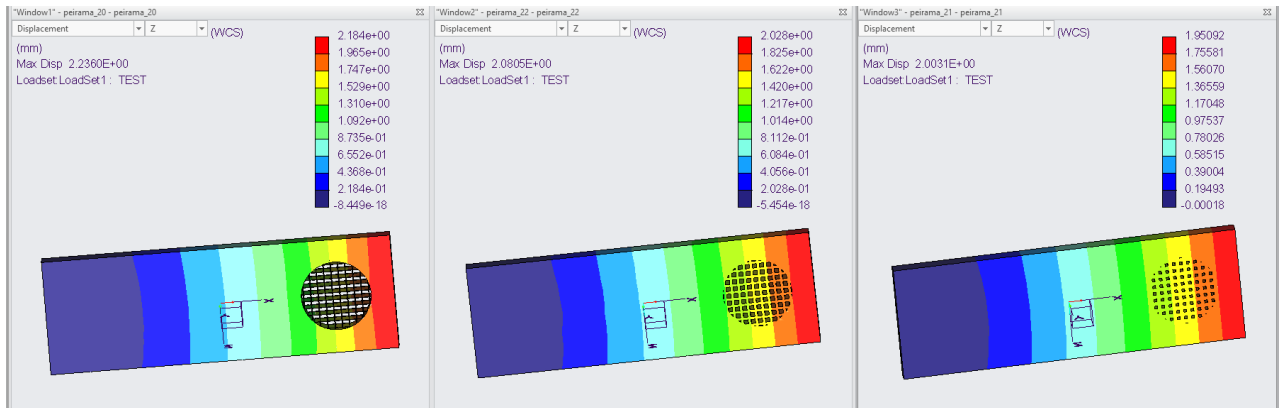


Εικόνα 7-16. Διαγράμματα μέγιστης τάσης και μέγιστης μετατόπισης για την δοκό κατά την αύξηση του κυλινδρικού όγκου του lattice.

Μια ακόμα σημαντική παράμετρος του lattice είναι οι διαστάσεις του κελιού του μοτίβου πλήρωσης. Όσον αφορά το πάχος του κελύφους κάθε cell εξετάστηκαν τρεις περιπτώσεις. Παρατηρήθηκε μέχρι και 40 % διαφορά ως προς την μέγιστη τάση, ενώ ως προς την μετατόπιση η μέγιστη διαφορά σημειώθηκε στο 10.7 %. Ακόμη, εμφανής ήταν και η διαφορά στην κατανομή των τάσεων. Χρησιμοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για την εξέταση της συμπεριφοράς της δοκού κατά την μεταβολή του πάχους του κελύφους από 0,2 έως 4 mm.

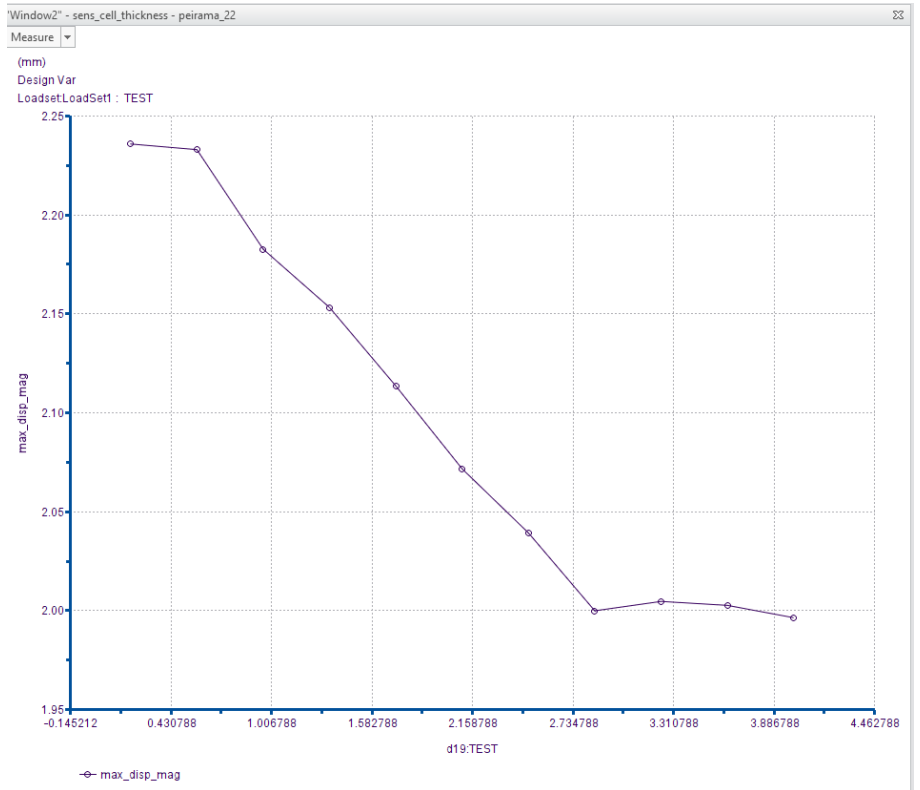


Εικόνα 7-17. Απεικονίσεις των τάσεων για τρεις διαφοροποιήσεις του πάχους του κελύφους στο lattice.



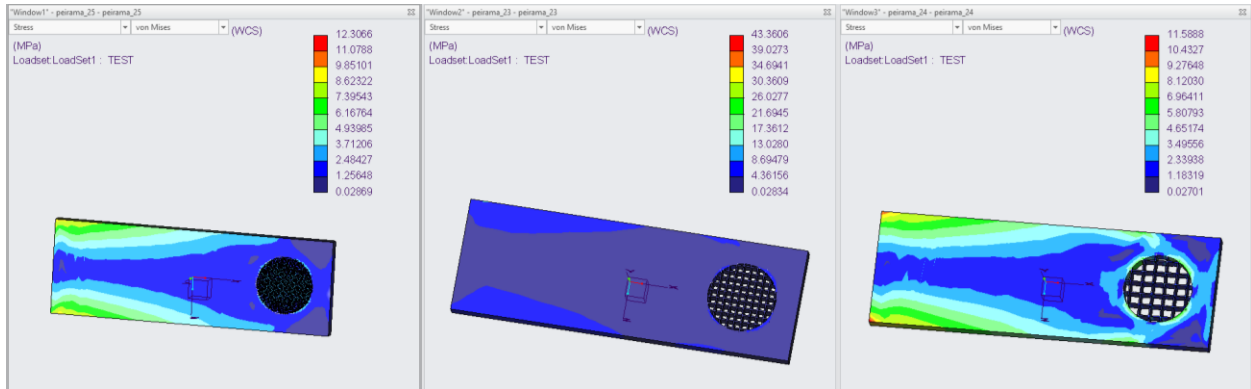
Εικόνα 7-18. Απεικονίσεις της μετατόπισης για τρεις διαφοροποιήσεις του πάχους του κελύφους στο lattice.

	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)
Lattice με μικρό πάχος κελύφους	16,4	2,2
Lattice με μεσαίο πάχος κελύφους	14,9	2
Lattice με μεγάλο πάχος κελύφους	9,8	1,9

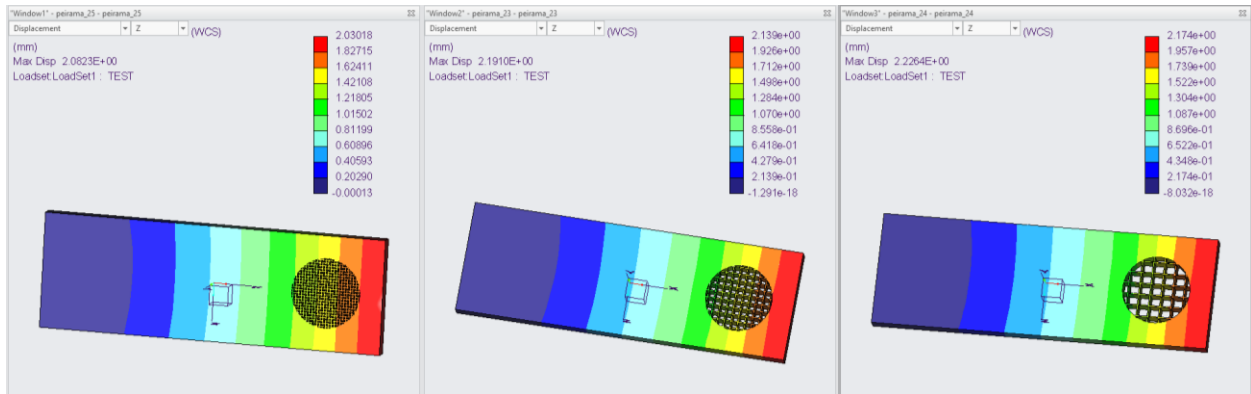


Εικόνα 7-19. Διαγράμματα μέγιστης τάσης και μέγιστης μετατόπισης για την δοκό κατά την αύξηση του πάχους του κελύφους στου lattice.

Τα αποτελέσματα δεν έδειξαν κάποια γραμμικότητα με εξαίρεση την συμπεριφορά στην μετατόπιση για τις τιμές πάχους 0,5 μέχρι 2,8 mm. Τέλος, μελετήθηκε και η συμπεριφορά της δοκού στις μεταβολές της παραμέτρου του μεγέθους κάθε cell. Αναλύθηκαν τρεις περιπτώσεις μεγεθών, τα αποτελέσματα έδειξαν μεγάλη διακύμανση στις τάσεις. Συγκεκριμένα, το μεσαίο μέγεθος στοιχείων έφερε την μεγαλύτερη τάση, ενώ το μικρότερο με το μεγαλύτερο είχαν πολύ κοντινές τιμές μέγιστης τάσης. Ωστόσο, η μεσαία τιμή μεγέθους στοιχείου είχε πολύ ομαλότερη κατανομή των τάσεων σε σχέση με τα άλλα δύο μεγέθη. Τα αποτελέσματα της μετατόπισης έδειξαν ελάχιστες διαφορές με την μεγαλύτερη μεταβολή να είναι μικρότερη από 7%.



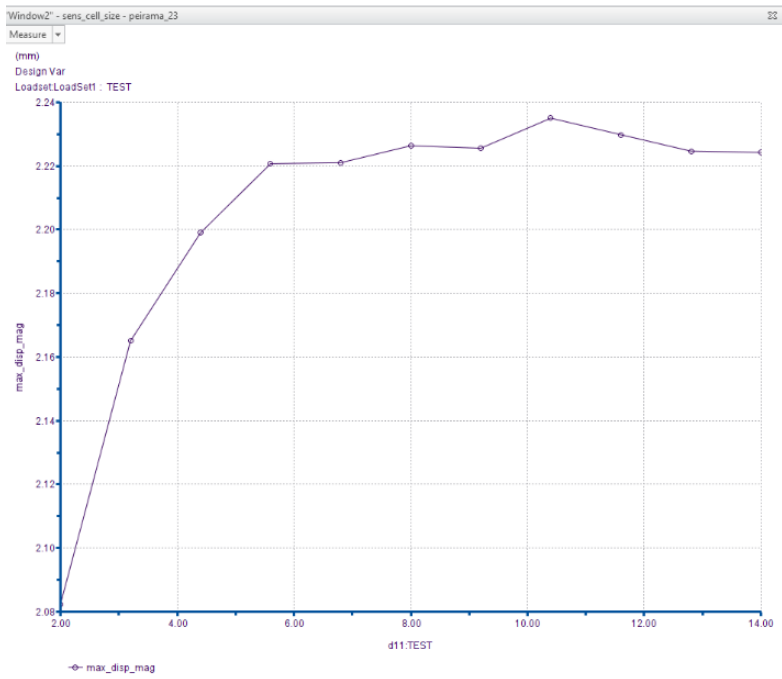
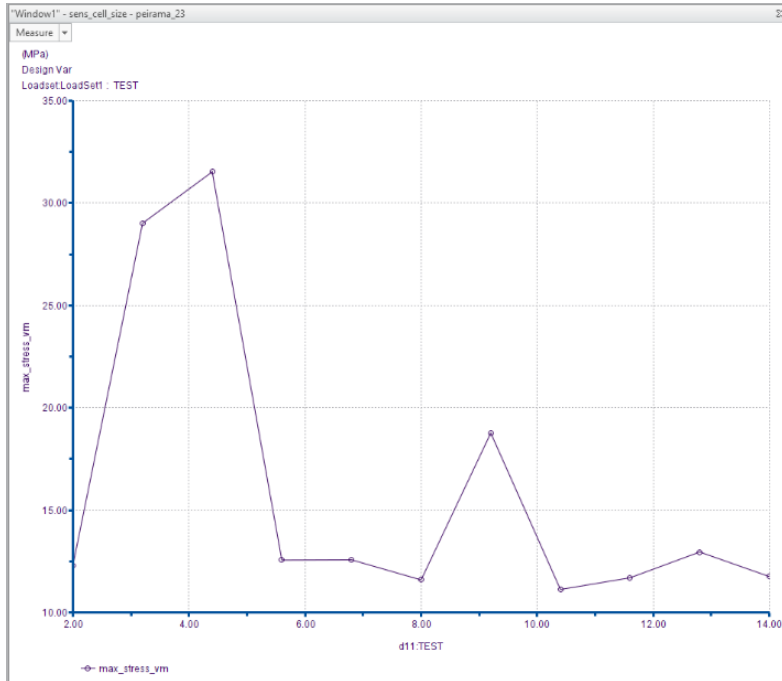
Εικόνα 7-20. Απεικονίσεις των τάσεων για τρεις διαφοροποιήσεις του μεγέθους του κάθε κελιού στο lattice.



Εικόνα 7-21. Απεικονίσεις της μετατόπισης για τρεις διαφοροποιήσεις του μεγέθους του κάθε κελιού στο lattice.

	Μέγιστη τάση (MPa)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)
Lattice με μικρό μέγεθος κελιού	12,3	2
Lattice με μεσαίο μέγεθος κελιού	43,3	2,1
Lattice με μεγάλο μέγεθος κελιού	11,6	2,2

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, με ελάχιστο μέγεθος cell (κελύφους) τα 2 mm και μέγιστο τα 14 mm, για την οπτικοποίηση της συμπεριφορά της δοκού στις μεταβολές αυτές. Συμπερασματικά, η τάση μεταβάλλεται με δυσανάλογο τρόπο και η μετατόπιση αυξάνεται, αλλά όχι γραμμικά, με την αύξηση του μεγέθους του cell.



Εικόνα 7-22. Διαγράμματα μέγιστης τάσης και μέγιστης μετατόπισης για την δοκό κατά την αύξηση του μεγέθους κάθε κελιού (cell) του lattice.

7.3 Μεθοδολογία

Ως παράδειγμα ανάλυσης της μεθοδολογίας, θα χρησιμοποιηθεί ένα κλιπ πόρπης, παρόμοιο της εικόνας 7-23. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο εξάρτημα, καθώς έπειτα από έρευνα διαπιστώθηκε ότι η όταν σπάει χάνει τελείως την λειτουργία του, η οποία είναι σε αρκετές περιπτώσεις η στήριξη μάντων σε τσάντες, τσαντάκια και βαλίτσες, κάνοντας έτσι τα αντικείμενα αυτά επιρρεπή στο να χαθούν. Με βάση αυτό το αντικείμενο θα αναλυθεί η μεθοδολογία μετατροπής ενός υπάρχοντος προϊόντος σε fail-safe με την χρήση της προσθετικής κατασκευής. Η μεθοδολογία αναλύεται στα εξής ακόλουθα βήματα:

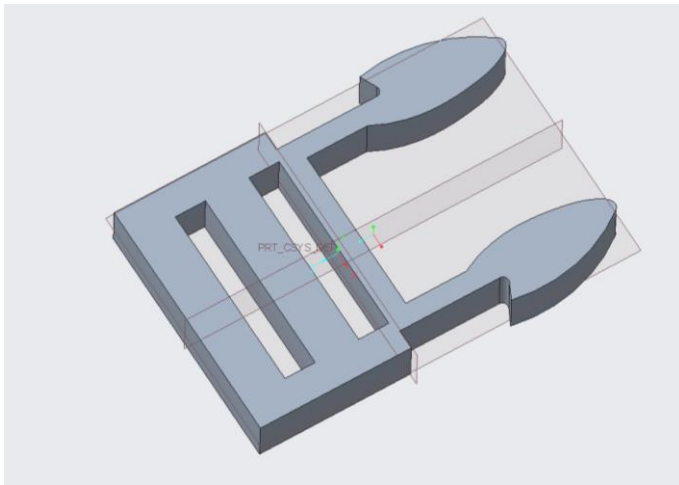
1. Στατική Ανάλυση με την χρήση CAE συστήματος
2. Εύρεση των περιοχών με την μεγαλύτερη συγκέντρωση των τάσεων
3. Αλλαγή γεωμετρίας:
 - Αντικατάσταση συμπαγούς όγκου με lattice ή
 - Μορφολογική επανασχεδίαση ή
 - Συνδυασμός των παραπάνω
4. Εισαγωγή μέτρησης των επίμαχων περιοχών συγκέντρωσης της τάσης και της μετατόπισης
5. Ανάλυση βελτιστοποίησης για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων



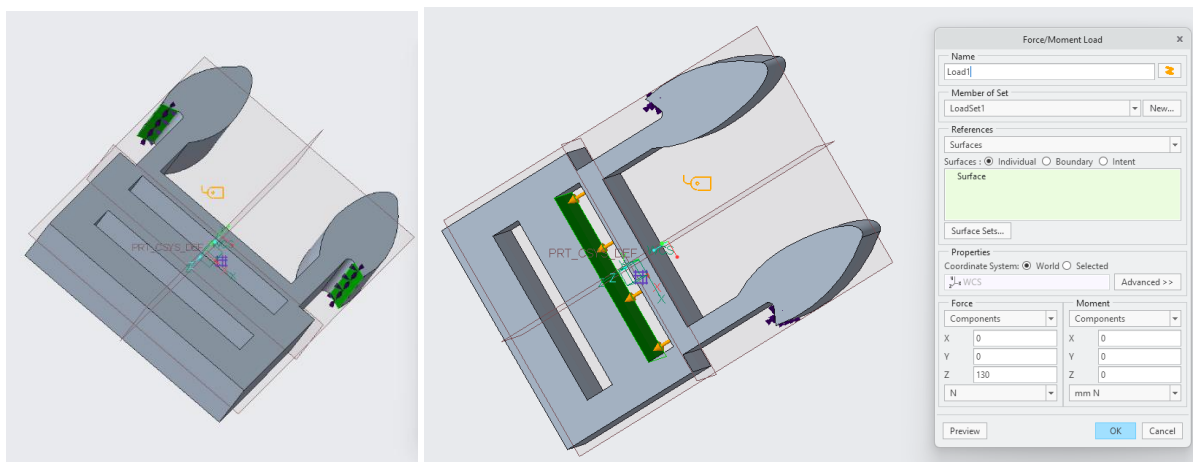
Εικόνα 7-23. Quick Side Release Buckle Clips.

7.3.1 Στατική ανάλυση

Πρώτο στάδιο της μελέτης είναι η στατική ανάλυση του μοντέλου με την βοήθεια ενός λογισμικού CAE. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα βήματα της μεθοδολογίας το Creo Simulate. Για την διεκπεραίωση μιας στατικής ανάλυσης στα λογισμικά CAE, χρειάζεται να οριστεί η δύναμη που ασκείται στο αντικείμενο, η επιφάνεια της πάκτωσης, το υλικό και η τριγωνοποίηση του μοντέλου. Σκοπός της στατικής ανάλυσης είναι η απεικόνιση και ο εντοπισμός των περιοχών συγκέντρωσης των τάσεων στο στερεό. Για την απλούστευση των αναλύσεων αλλά και των περιορισμό σφάλματος των αναλύσεων, χρησιμοποιήθηκε ένα εκ των δύο εξαρτημάτων του προϊόντος και η μορφή του απλοποιήθηκε, όπως φαίνεται στην εικόνα 7-24.

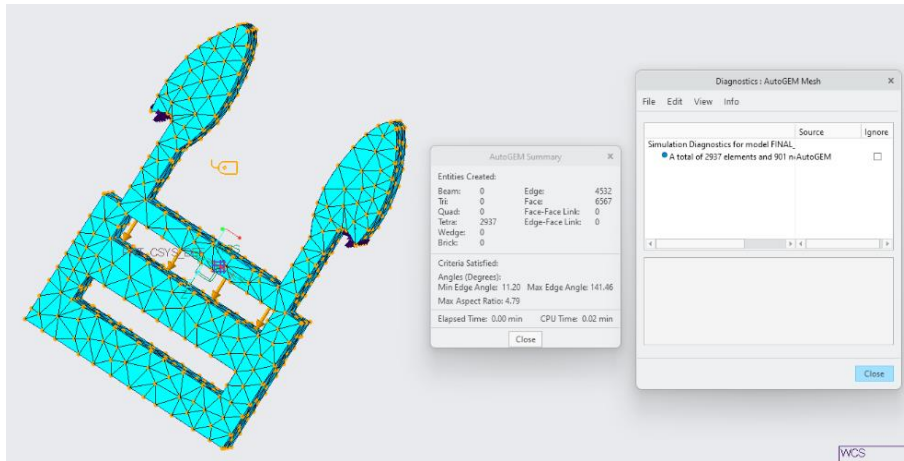


Εικόνα 7-24. Τρισδιάστατο μοντέλο κλιπ πόρτης.



Εικόνα 7-25. Πάκτωση και ορισμός δύναμης στο κλιπ πόρτης.

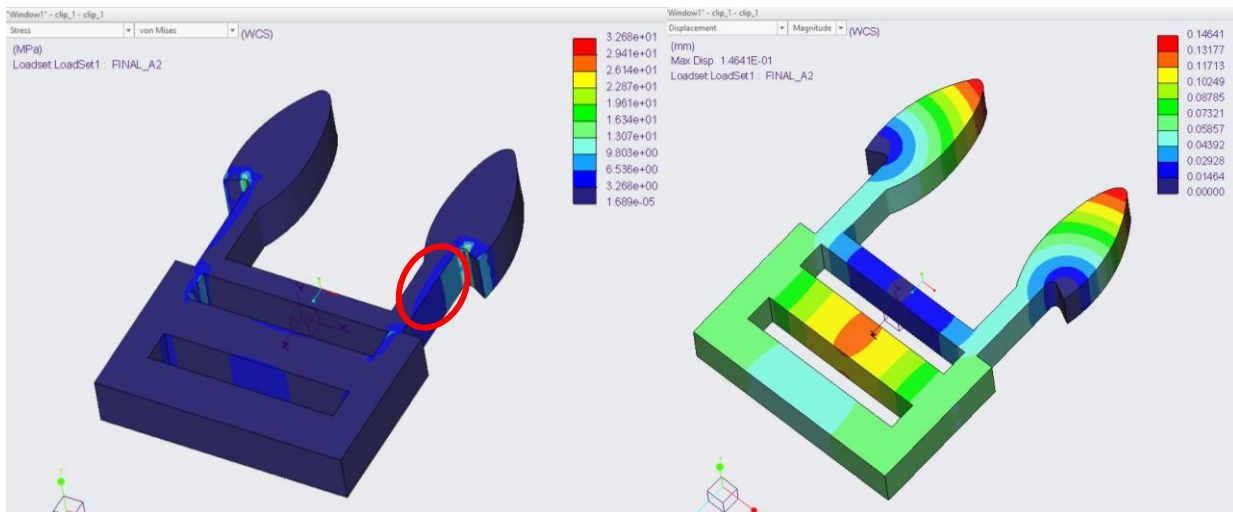
Στο παράδειγμα του κλιπ εφαρμόστηκε μια δύναμη 130 N στην επιφάνεια επαφής του ιμάντα με το κλιπ και πακτώθηκε στα σημεία επαφής με των δύο εξαρτημάτων. Ως υλικό χρησιμοποιήθηκε το ABS (41 MPa Yield Stress).



Εικόνα 7-26. Έλεγχος τριγωνοποίησης.

Ο έλεγχος της τριγωνοποίησης, με το εργαλείο AutoGEM δεν ήταν ο ιδανικός για μια λεπτομερή στατική ανάλυση, για αυτό χρησιμοποιήθηκε μέγιστο μέγεθος στοιχείου 4 mm. Επιλέχθηκε single-pass adaptive τύπος ανάλυσης για γρηγορότερα αποτελέσματα, καθώς με multi-pass αναλύσεις θα προκύψουν πολύ κοντινά αποτελέσματα με πολύ περισσότερο χρόνο, δυσκολεύοντας τις δοκιμές.

7.3.2 Εύρεση των περιοχών με την μεγαλύτερη συγκέντρωση των τάσεων



Εικόνα 7-27. Απεικονίσεις τάσης και παραμόρφωσης για το κλιπ πόρτης.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η δύναμη των 130 N πλησιάζει το όριο διαρροής, αλλά παραμένει μικρότερη από αυτό. Η συγκέντρωση των τάσεων γίνεται στο σημείο επαφής των δύο εξαρτημάτων όπου και συναντάται η μέγιστη τάση. Λόγω της γεωμετρίας και του υλικού του θα αστοχήσει στην κόκκινη κυκλωμένη περιοχή της εικόνας 7-27, χάνοντας την λειτουργικότητά του.

Γνωρίζοντας την περιοχή αστοχίας από τις αναλύσεις, μελετήθηκε εκ νέου η γεωμετρία του προϊόντος, ώστε να γίνει η μορφολογική επανασχεδίαση με προσθήκη γεωμετρίας ή αντικατάσταση συμπαγούς όγκου με lattice ή συνδυασμός αυτών. Παράλληλα, για να συνεχίσει να είναι το ίδιο λειτουργικό χρειάζεται να έχει παρόμοια ελαστικότητα στο σημείο επαφής με των δαχτύλων του χρήστη.

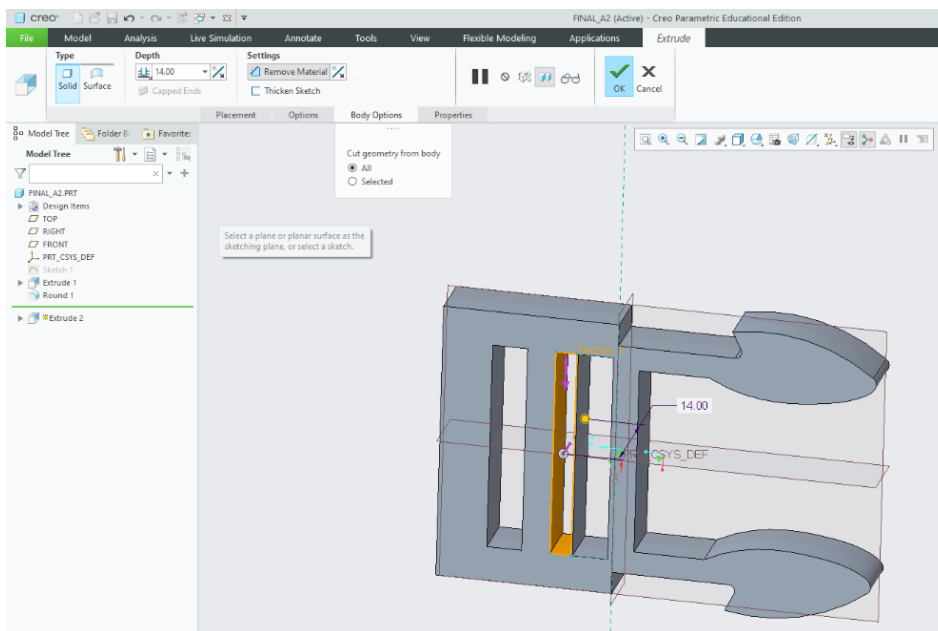
7.3.3 Αλλαγή γεωμετρίας

Κάνοντας ιδεασμό ως προς το πως θα μπορούσε να αλλάξει η γεωμετρία του κλιπ και ποιοι όγκοι θα μπορούσαν να αντικατασταθούν με lattice, καταλήξαμε σε δύο concept ώστε το προϊόν να γίνει Fail-Safe. Στο πρώτο θα γίνει αντικατάσταση στερεού με lattice και στο δεύτερο θα γίνει μορφολογική επανασχεδίαση προσθέτοντας έξτρα γεωμετρία.

7.3.3.1 Αντικατάσταση συμπαγούς όγκου με lattice

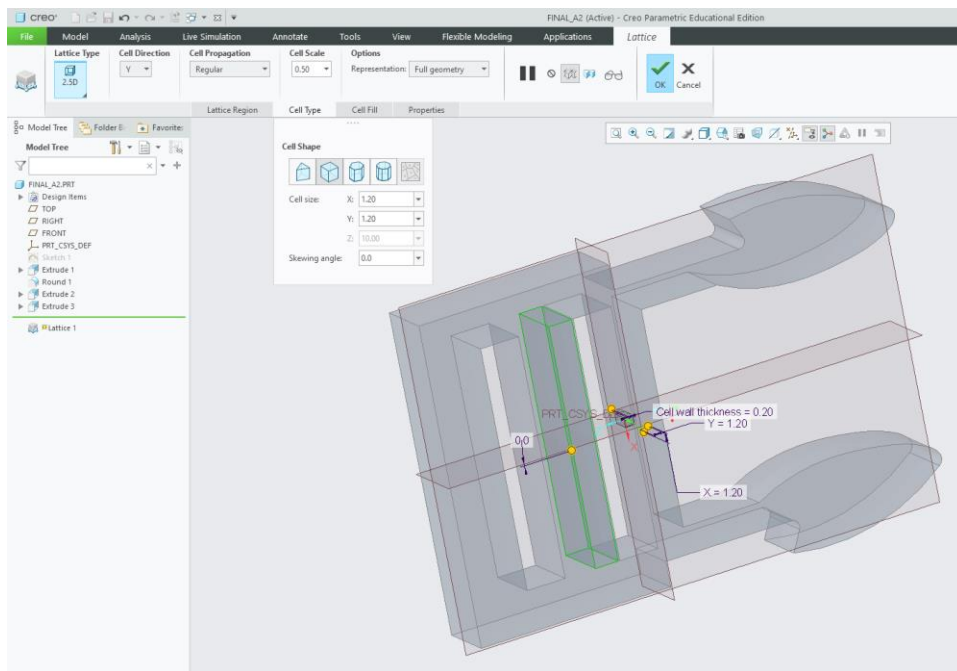
Για να χρησιμοποιήσουμε τα lattices στα σημεία που επιθυμούμε, πρέπει πρώτα τα σημεία αυτά να χωριστούν ως νέα bodies για να μπορέσουν να αντικατασταθούν με lattice γεωμετρίες, αξιοποιώντας την παράκαμψη που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η διαδικασία αυτή απαιτεί την χρήση του λογισμικού Creo Parametric.

Στο πρώτο concept χρησιμοποίησα την εντολή extrude, με την επιλογή remove material, για να αφαιρέσω ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο από την δοκό που έρχεται σε επαφή με τον ιμάντα.

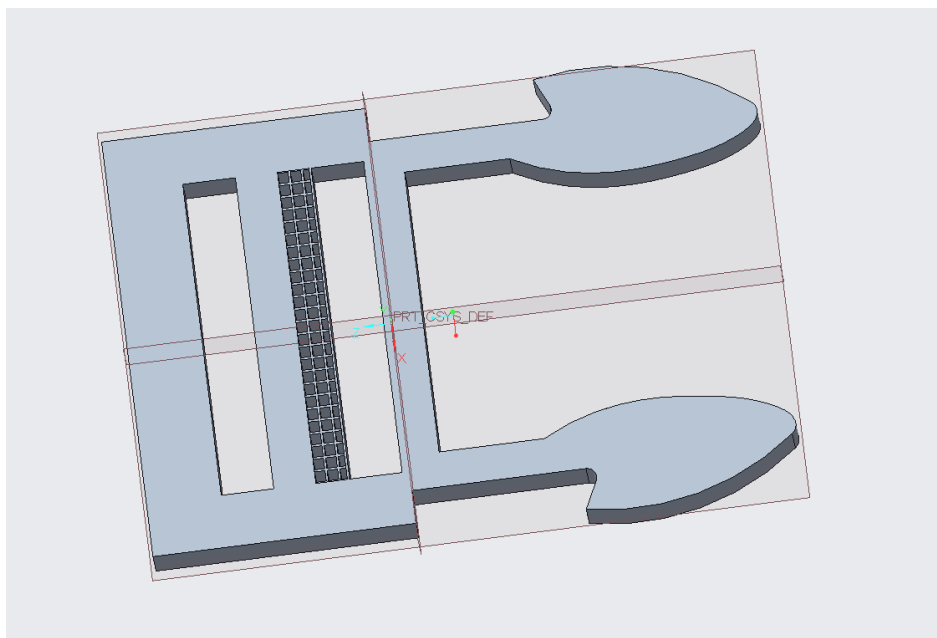


Εικόνα 7-28. Extrude cut στο κλιπ πόρπης.

Αφού έκανα την αφαίρεση χρησιμοποίησα την εντολή extrude για να γεμίσω το κενό του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου, αλλά με την επιλογή να δημιουργηθεί ένα ξεχωριστό body. Αυτό το ξεχωριστό body χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή του σε lattice δομή. Μέσα από το menu του lattice, επέλεξα τον 2.5D τύπο σε μορφή τετραγώνου. Οι διαστάσεις του cell ήταν 1,2 x 1,2 mm με 0,2 mm πάχος τοίχους.

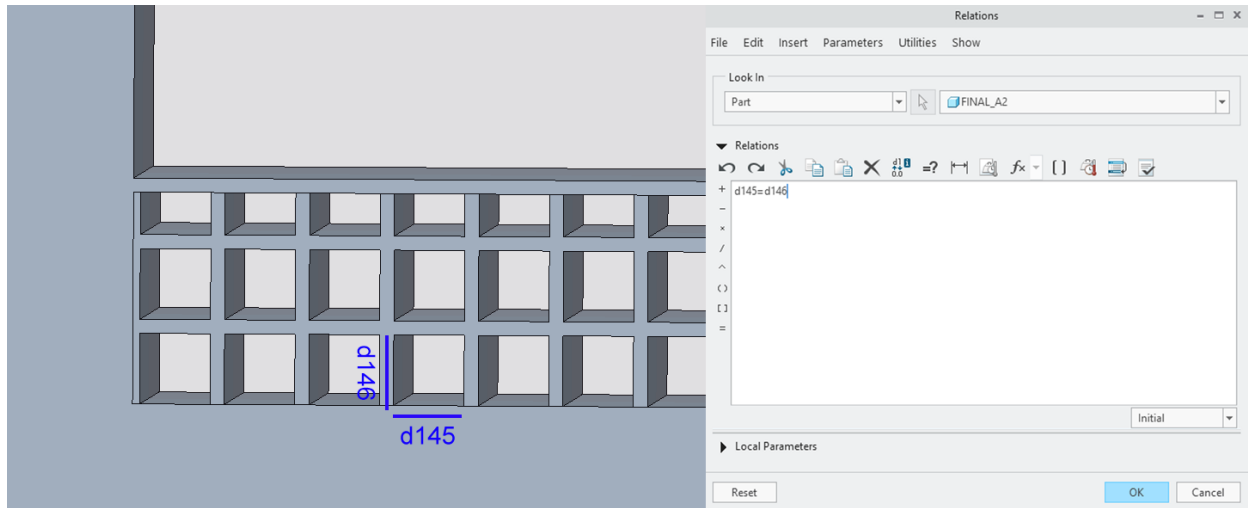


Εικόνα 7-29. Αντικατάσταση solid body με lattice.



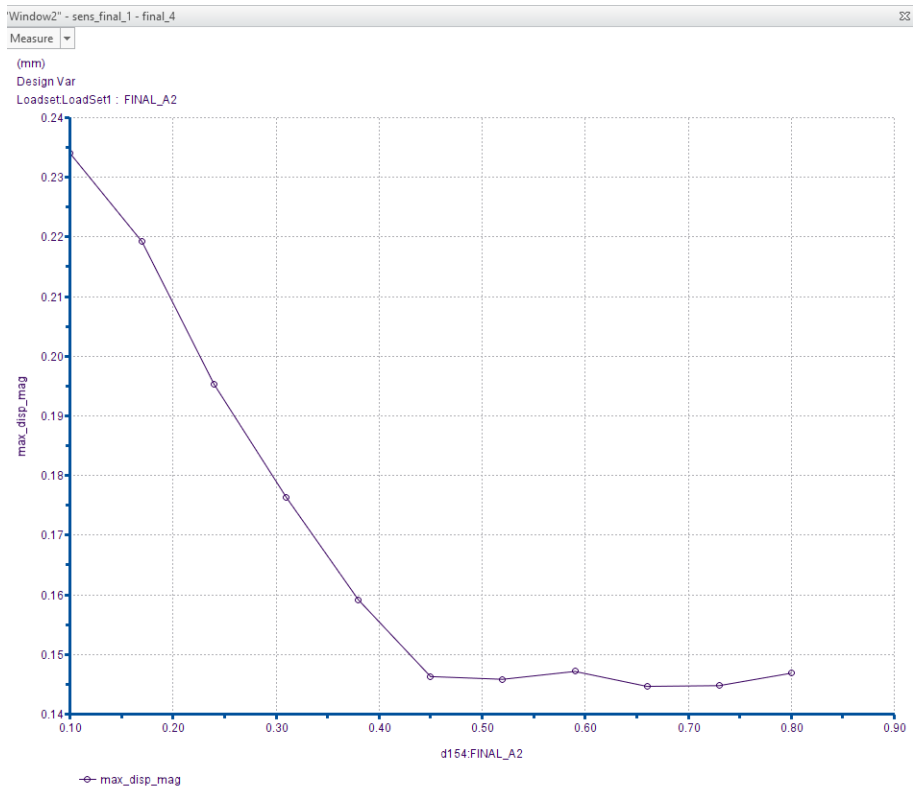
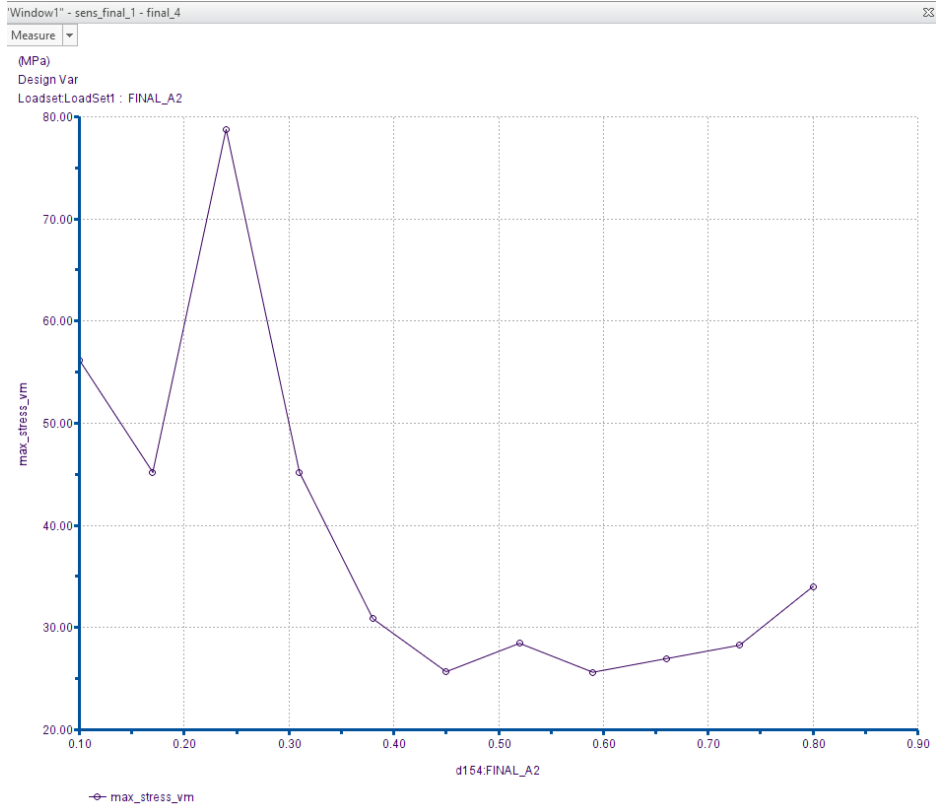
Εικόνα 7-30. Απεικόνιση τροποποιημένης μορφής του κλιπ πόρτης.

Για να μπορώ να εισάγω το μέγεθος του κελιού του lattice ως μια μεταβλητή, χρησιμοποίησα τα relations του Creo για να ταυτίσω τις παραμέτρους του μήκους και πλάτους.



Εικόνα 7-31. Εξίσωση ισότητας των παραμέτρων του μήκους και του πλάτους.

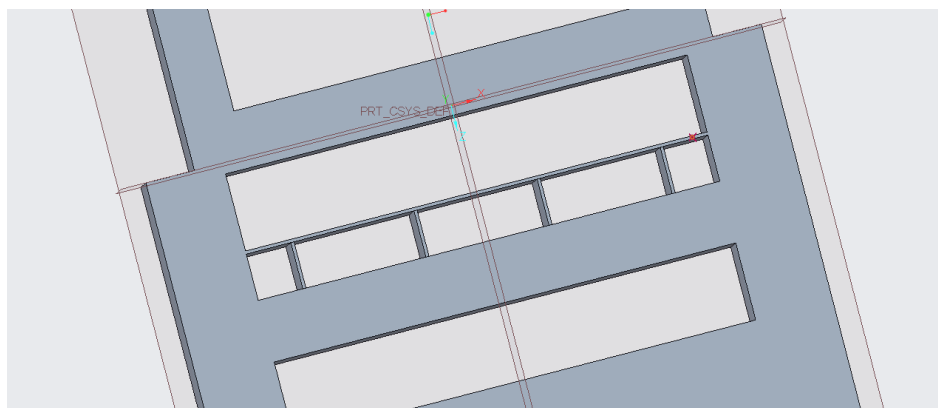
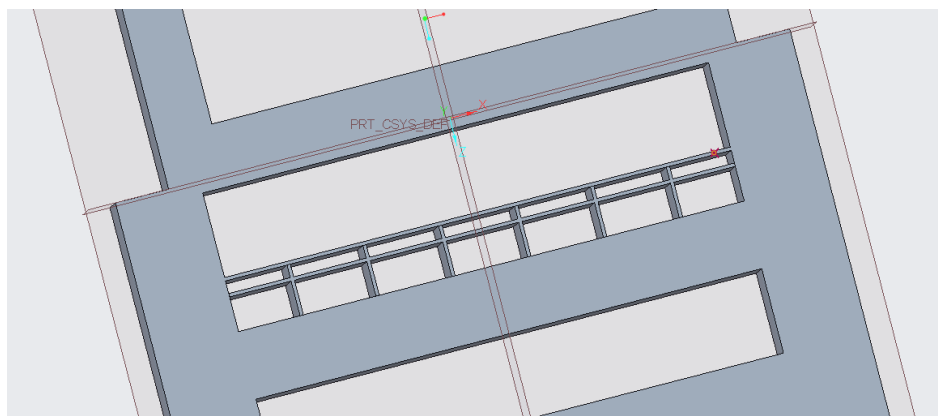
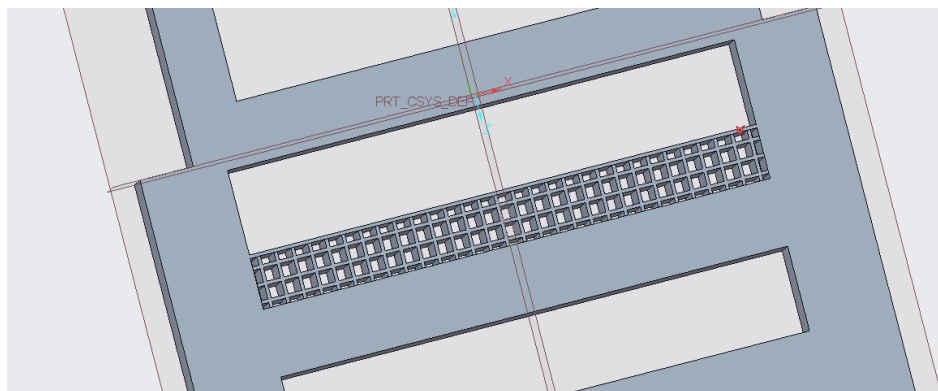
Μετά την αντικατάσταση με lattice, έτρεξα αναλύσεις ευαισθησίας για να ελεγχθεί η συμπεριφορά του κλιπ, αλλά και το πως επηρεάζουν την αντοχή του, οι μεταβλητές του lattice. Στην εικόνα 7-32 φαίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το πάχος του lattice, με εύρος τιμών από 0,1 έως 0,8 mm.



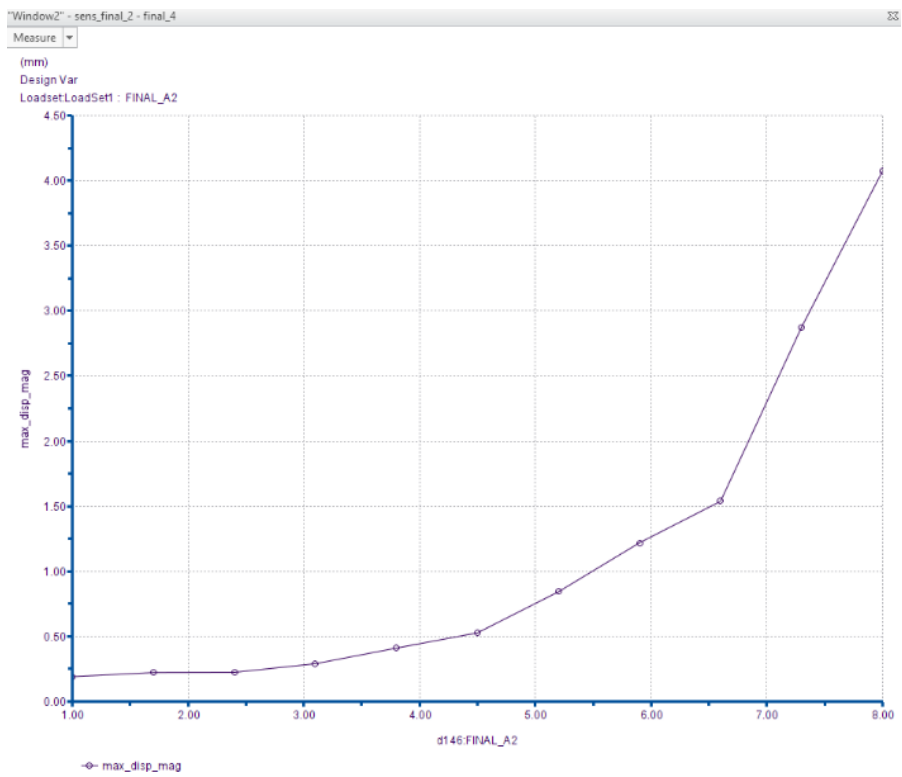
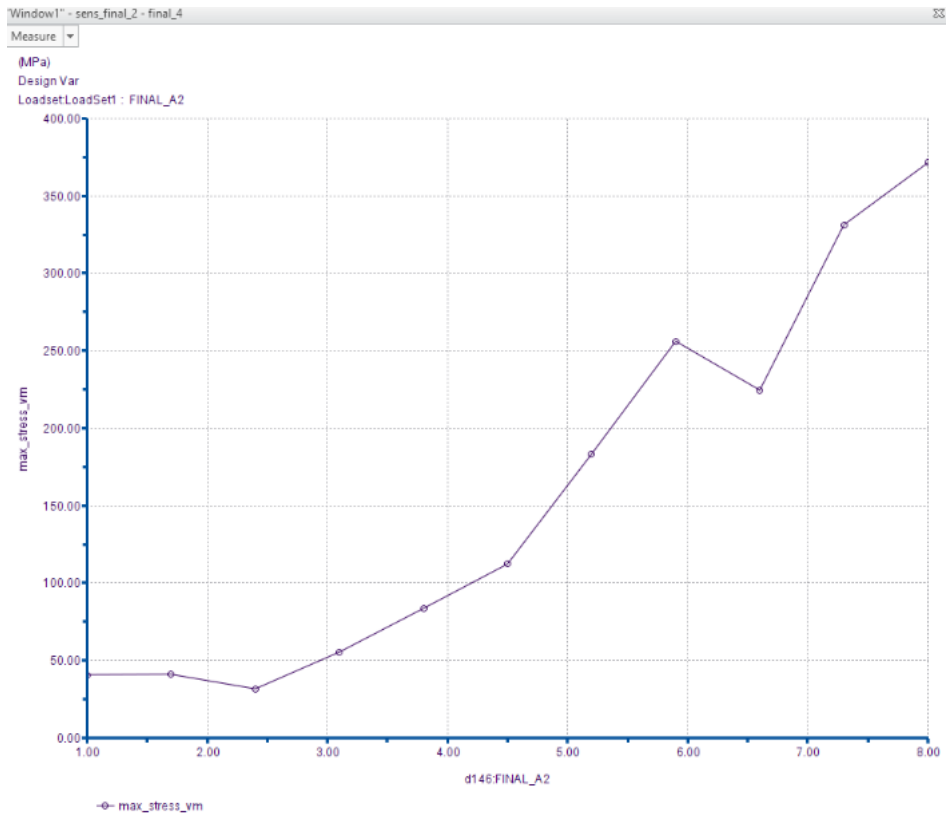
Εικόνα 7-32. Διαγράμματα μέγιστης τάσης και μέγιστης μετατόπισης για το κλιπ πόρπης, κατά την αύξηση του πάχους τοιχώματος του lattice.

Από τα διαγράμματα δεν προκύπτει κάποια αναλογική σχέση μεταξύ της αύξησης του πάχους τοιχώματος και της τάσης ή της μετατόπισης. Μόνο όσον αφορά την μετατόπιση παρατηρούμε μια σχεδόν σταθεροποίηση για τις τιμές πάχους τοιχώματος από 0,45 έως 0,8 mm.

Για την δεύτερη παράμετρο του lattice, το μέγεθος κάθε στοιχείου, έτρεξα μια ακόμα ανάλυση ευαισθησίας με ελάχιστο μέγεθος στοιχείου 1 mm και μέγιστο 8 mm. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση του μεγέθους των στοιχείων σχεδόν πάντα ισούται με αύξηση της μέγιστης τάσης και παραμόρφωσης. Παρακάτω απεικονίζονται οι δομές του lattice με μέγεθος στοιχείου 1 mm, 4,5 και 8 mm διαδοχικά.



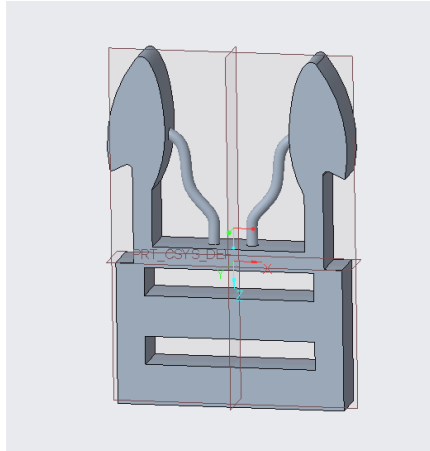
Εικόνα 7-33. Διαφοροποιήσεις μεγέθους των κελιών του lattice, με τιμές 1, 4,5 και 8 mm.



Εικόνα 7-34. Διάγραμμα μέγιστης τάσης και μέγιστης μετατόπισης για το κλιπ πόρτης, κατά την αύξηση του μεγέθους των στοιχείων.

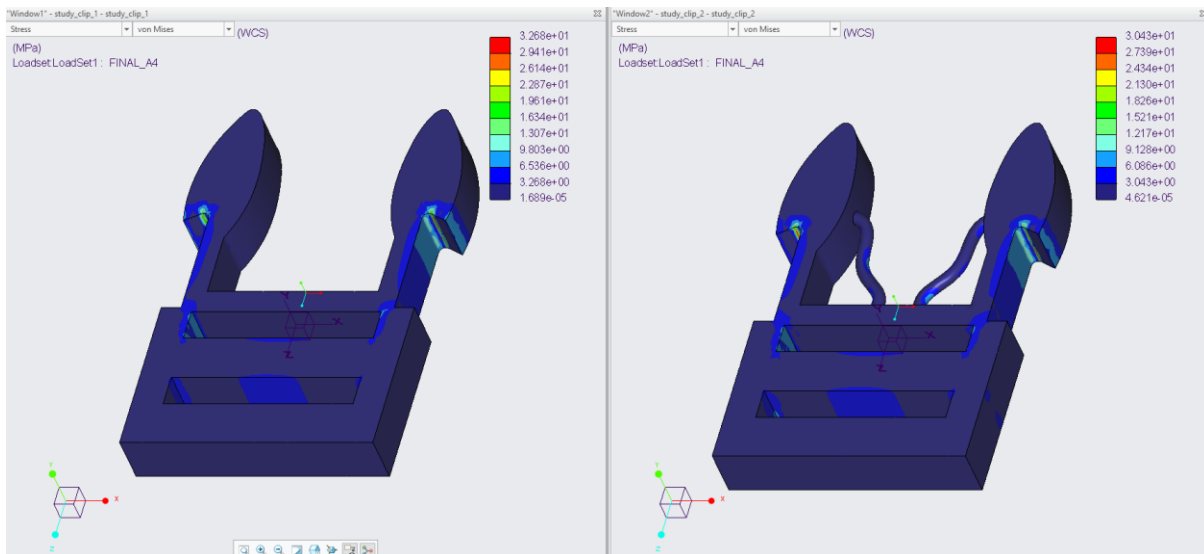
7.3.3.2 Μορφολογική επανασχεδίαση

Στο δεύτερο concept χρησιμοποιήσα επιπρόσθετη γεωμετρία από την εσωτερική πλευρά των ράβδων συγκράτησης, με σκοπό να συγκεντρώνει τις τάσεις, δρώντας ως αδύναμος σύνδεσμος. Η γεωμετρία αυτή χρησιμοποιήθηκε δοκιμαστικά, ώστε να εκλεχθεί η συμπεριφορά του κλιπ με την προσθήκη της και το αν θα γίνει αληθής ή ψευδής ο αρχικός ισχυρισμός. Δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας την εντολή sweep, έγινε mirror ώστε να είναι συμμετρικές οι δύο πλευρές και τέλος έγινε merge για την ενοποίησή της με τον αρχικό όγκο.

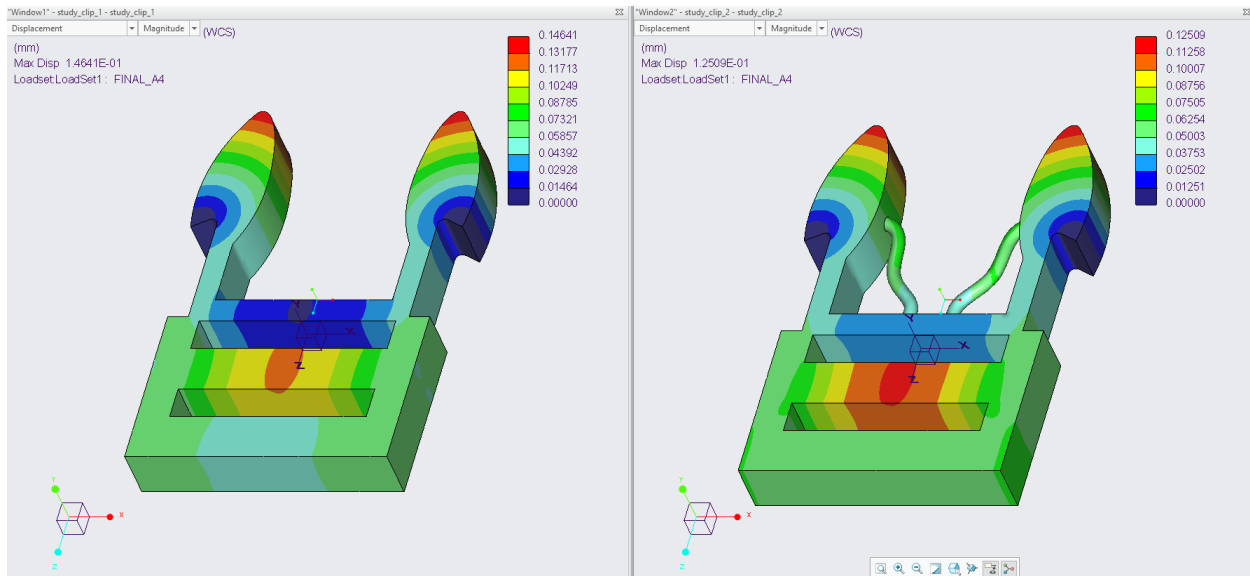


Εικόνα 7-35. Απεικόνιση της επανασχεδιασμένης αρχικής μορφής του κλιπ πόρτης.

Χρησιμοποιήθηκε στατική ανάλυση για την διεξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την συμπεριφορά της νέας μορφής σε τάσεις και μετατοπίσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν μείωση στην μέγιστη τάση κατά 6.88 % και στην μέγιστη μετατόπιση κατά 14.62 %. Ωστόσο, η μάζα αυξήθηκε, κάτι το οποίο δεν είναι επιθυμητό.



Εικόνα 7-36. Απεικόνιση τάσεων για το αρχικό και το βελτιωμένο κλιπ πόρτης.

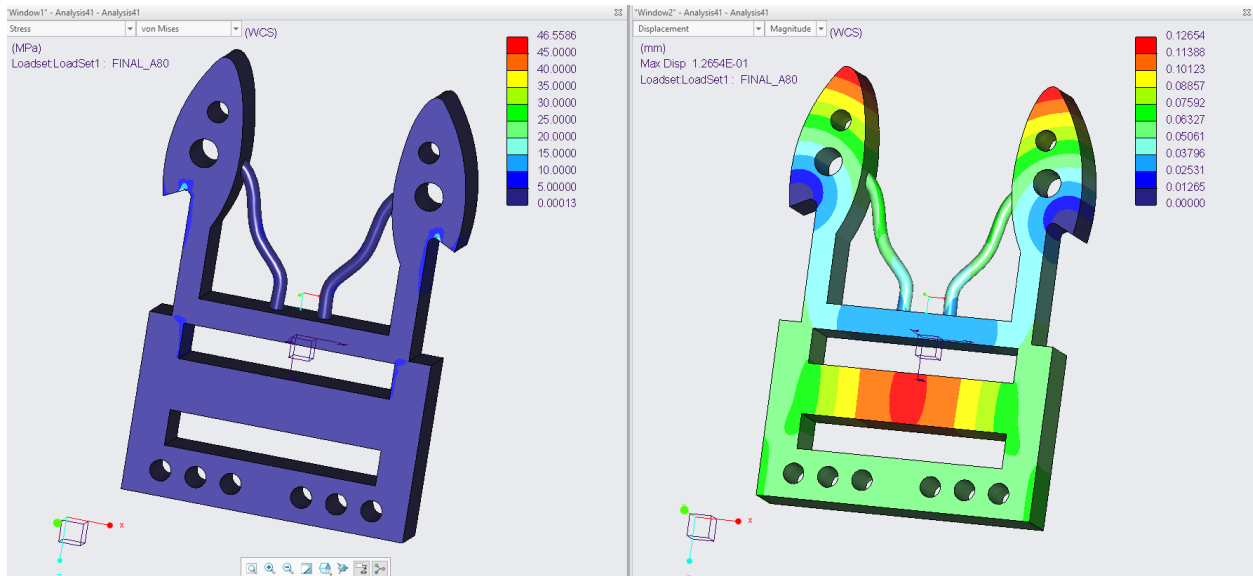


Εικόνα 7-37. Απεικόνιση μετατοπίσεων για το αρχικό και το βελτιωμένο κλιπ πόρτης.

	Τάση (MPa)	Μετατόπιση (mm)
Αρχική γεωμετρία κλιπ	3,2	0,14
Επανασχεδιασμένο κλιπ με πρόσθετη γεωμετρία	3	0,12

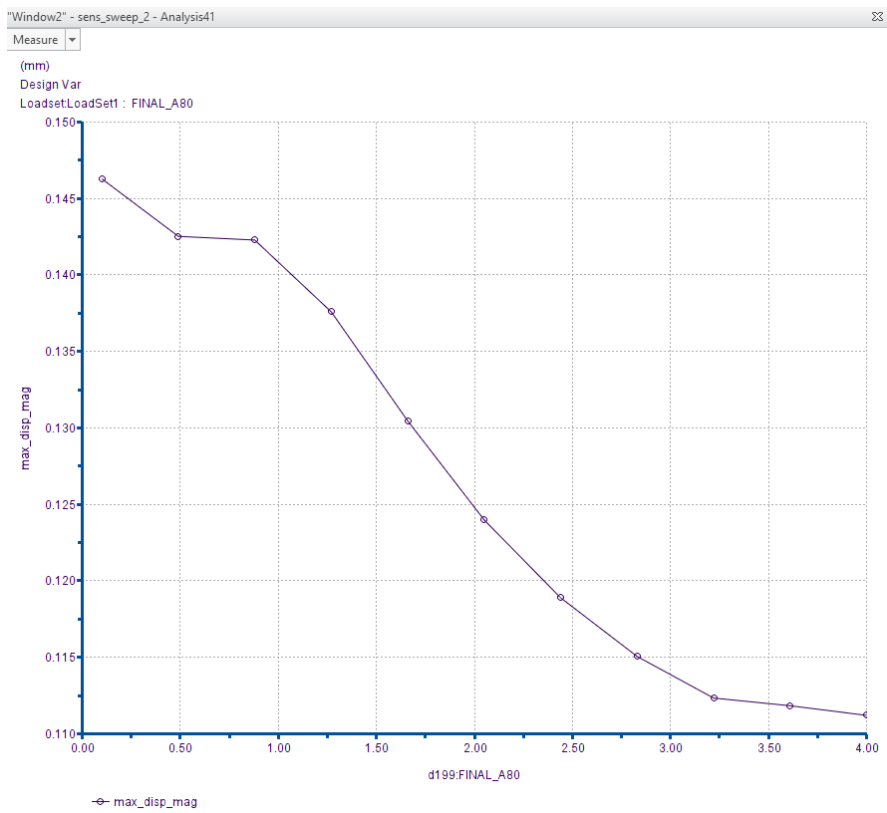
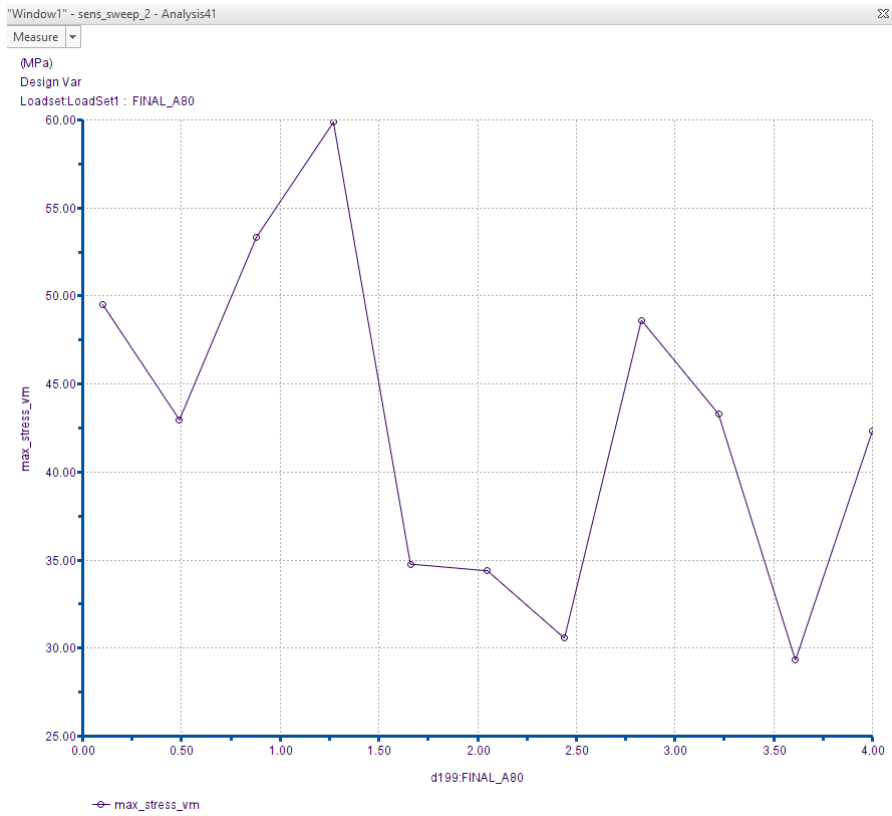
Έτσι, έχοντας ως στόχο την μείωση της μάζας της αρχικής μορφής του κλιπ και λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα των αναλύσεων της τάσης, αφαιρέθηκε όγκος από τις περιοχές με μικρή συγκέντρωση τάσεων. Στις περιοχές αυτές επιλέχθηκε να αφαιρεθεί εσωτερικά όγκος κυλινδρικού σχήματος, διατηρώντας την εξωτερική τους μορφή αναλλοίωτη, καθώς έχουν λειτουργικό ρόλο ύπαρξης. Τα αποτελέσματα ανάλυσης της νέας μορφολογίας άλλαξαν. Πιο συγκεκριμένα οι τάσεις αυξήθηκαν αρκετά, με την μέγιστη να είναι 46,5 MPa και συγκεντρώθηκαν στο σημείο επαφής των δύο εξαρτημάτων. Η μετατόπιση παρέμεινε σχεδόν ίδια, με διαφορά 1.16 %. Η μάζα έγινε κατά 5,47 % μικρότερη, σε σχέση με την αρχική μορφή του κλιπ. Βέβαια τα αποτελέσματα αυτά είναι για τις τυχαίες τιμές των παραμέτρων, οπότε χρειάζεται να γίνει ανάλυση βελτιστοποίησης για να κριθεί η νέα δομή ως προς την χρησιμότητά της.

	Τάση (MPa)	Μετατόπιση (mm)
Επανασχεδιασμένο κλιπ με πρόσθετη γεωμετρία	3	0,12
Επανασχεδιασμένο κλιπ με πρόσθετη γεωμετρία και αφαίρεση όγκου	4,6	0,12

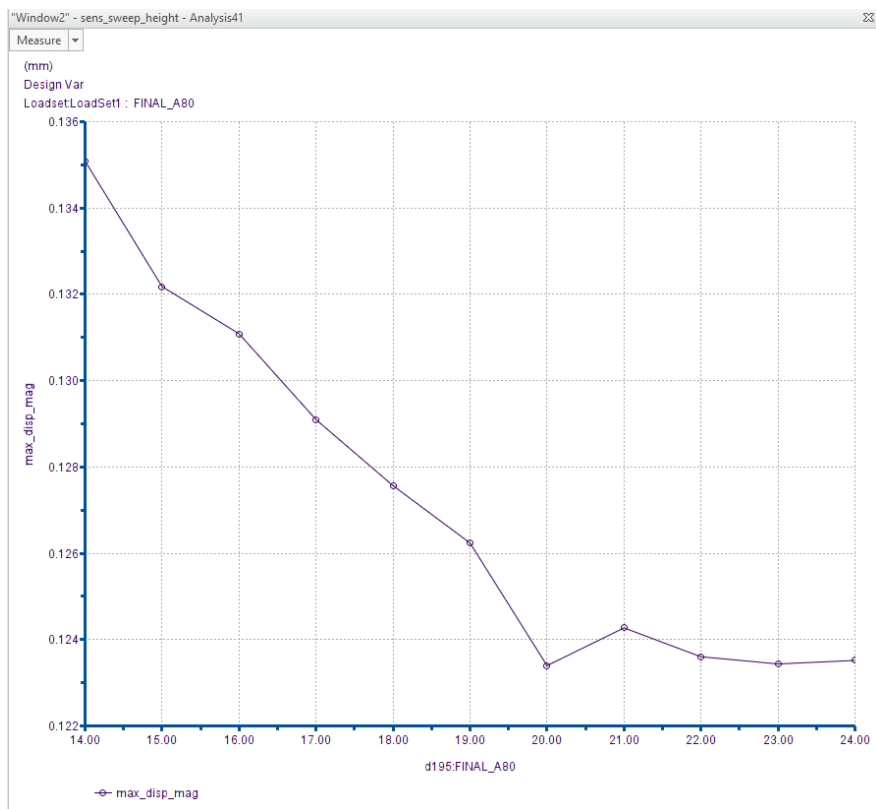
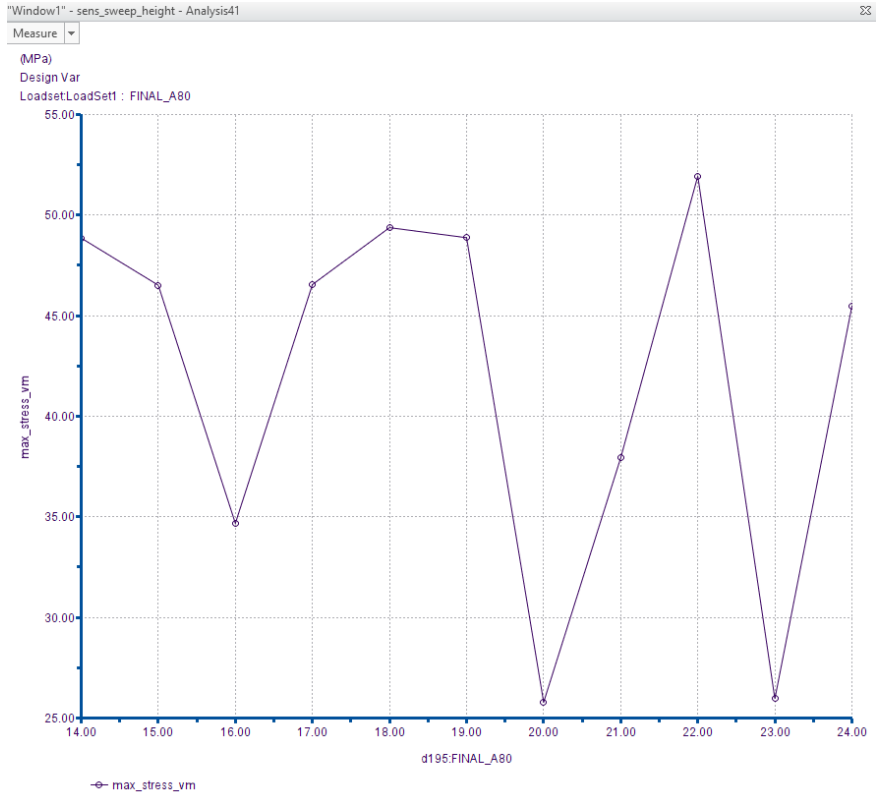


Εικόνα 7-38. Απεικόνιση τάσεων και μετατοπίσεων για το νέο βελτιωμένο κλιπ πόρπης.

Οι δύο παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό την εκδοχή της αλλαγμένης γεωμετρίας, είναι το πάχος της επιπρόσθετης γεωμετρίας και το ύψος σύνδεσής της με τις ράβδους. Συγκεκριμένα για το πάχος μελετήθηκαν με ανάλυση ευαισθησίας οι τιμές από 0,1 έως 4 mm και για το ύψος σύνδεσης από 14 έως 24 mm. Τα διάγραμμα τάσης και μετατόπισης για τις δύο μεταβλητές φαίνονται στις εικόνες 7-39 και 7-40. Όσον αφορά την μετατόπιση, η αύξηση των τιμών των μεταβλητών προκαλεί μείωση της μετατόπισης. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στα διαγράμματα των τάσεων. Επομένως, είναι αναγκαία η χρήση της ανάλυσης βελτιστοποίησης για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των δύο παραμέτρων.



Εικόνα 7-39. Διαγράμματα τάσης και μετατόπισης για το πάχος της επιπρόσθετης γεωμετρίας.

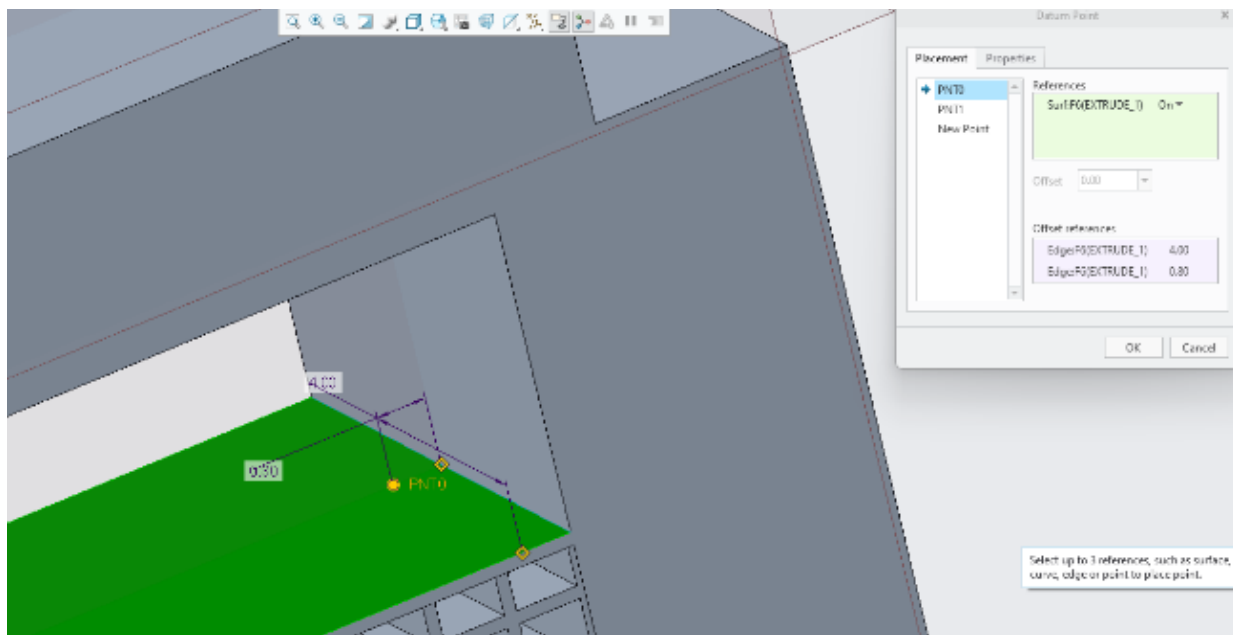


Εικόνα 7-40. Διαγράμματα τάσης και μετατόπισης για το ύψος σύνδεσης της επιπρόσθετης γεωμετρίας με τις ράβδους.

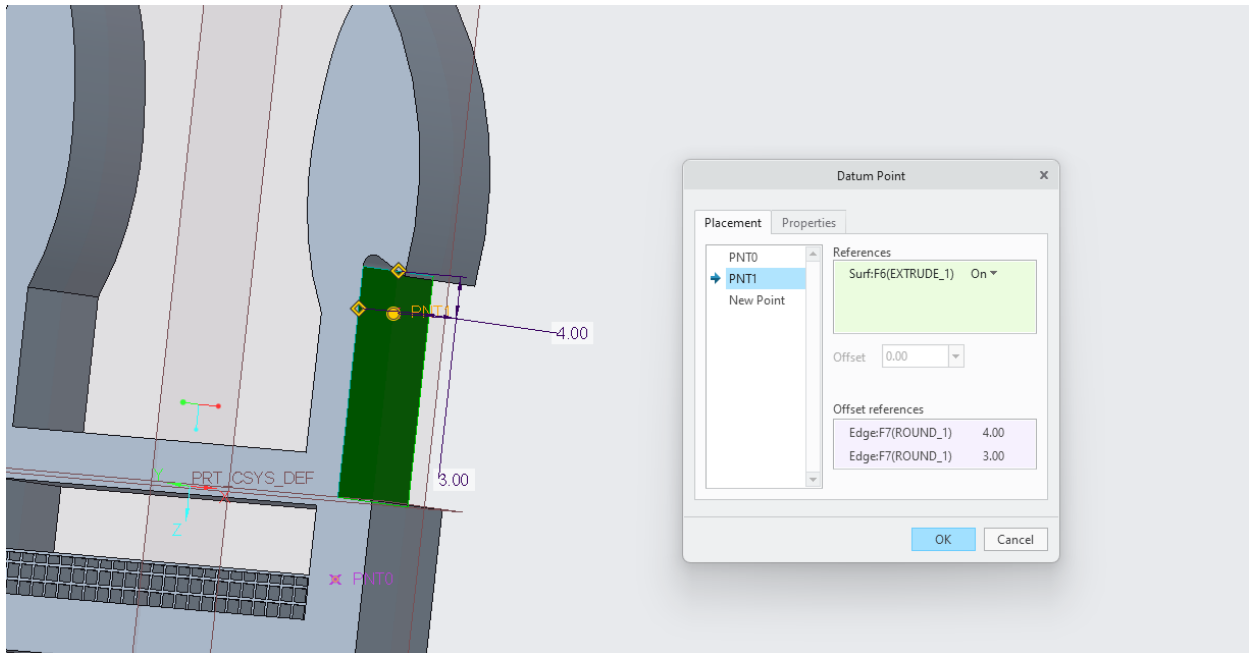
7.3.4 Εισαγωγή σημείων μέτρησης των επίμαχων περιοχών συγκέντρωσης της τάσης και της μετατόπισης

Από τα δεδομένα των αναλύσεων και των δύο εκδοχών αλλαγής γεωμετρίας, δεν μπορεί να βγει κάποιο συμπέρασμα σχετικά με τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων, με στόχο την μείωση της μάζας του κλιπ πόρπης και ταυτόχρονα την τήρηση των ορίων αστοχίας του υλικού. Για αυτόν τον λόγο πρέπει να χρησιμοποιηθούν αναλύσεις βελτιστοποίησης.

Όσον αφορά την εκδοχή αλλαγής γεωμετρίας με αντικατάσταση συμπαγούς όγκου με lattice, σκοπός της ανάλυσης βελτιστοποίησης είναι να βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων του lattice, για τις οποίες θα μειωθεί η μάζα όσο γίνεται διατηρώντας την μέγιστη τάση, στα κρίσιμα σημεία, υπό περιορισμούς. Τα κρίσιμα σημεία τα ορίζουμε με στόχο να οδηγήσουμε την γεωμετρία του lattice σε αστοχία πριν από την δομή που θα αστοχούσε αν δεν είχαμε εφαρμόσει το lattice. Η γεωμετρία του lattice χρησιμοποιείται για να συγκεντρώσει τις τάσεις και συνεπώς να αστοχήσει πρώτη, διατηρώντας την λειτουργικότητα του αντικειμένου. Με βάση αυτόν τον κανόνα, τοποθετήθηκε ένα σημείο πάνω στην επιφάνεια του lattice, όπως φαίνεται στην εικόνα 7-41 και το δεύτερο στην επιφάνεια συγκέντρωσης των τάσεων λόγω της επαφής των δύο εξαρτημάτων του κλιπ πόρπης. Τα σημεία αυτά θα χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή περιορισμών στην ανάλυση της βελτιστοποίησης.

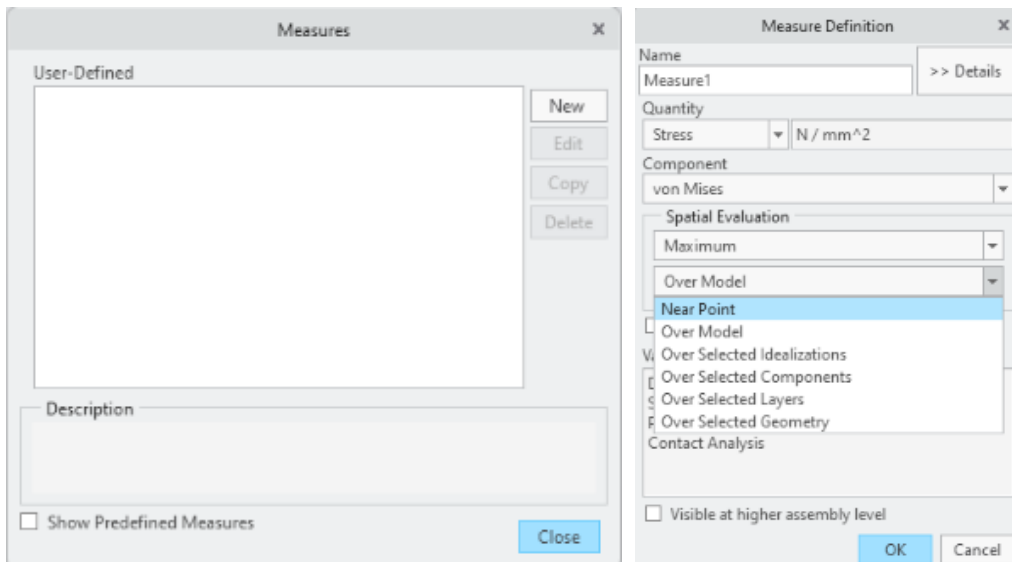


Εικόνα 7-41. Τοποθέτηση σημείου σε επιφάνεια εξωτερικά του lattice.

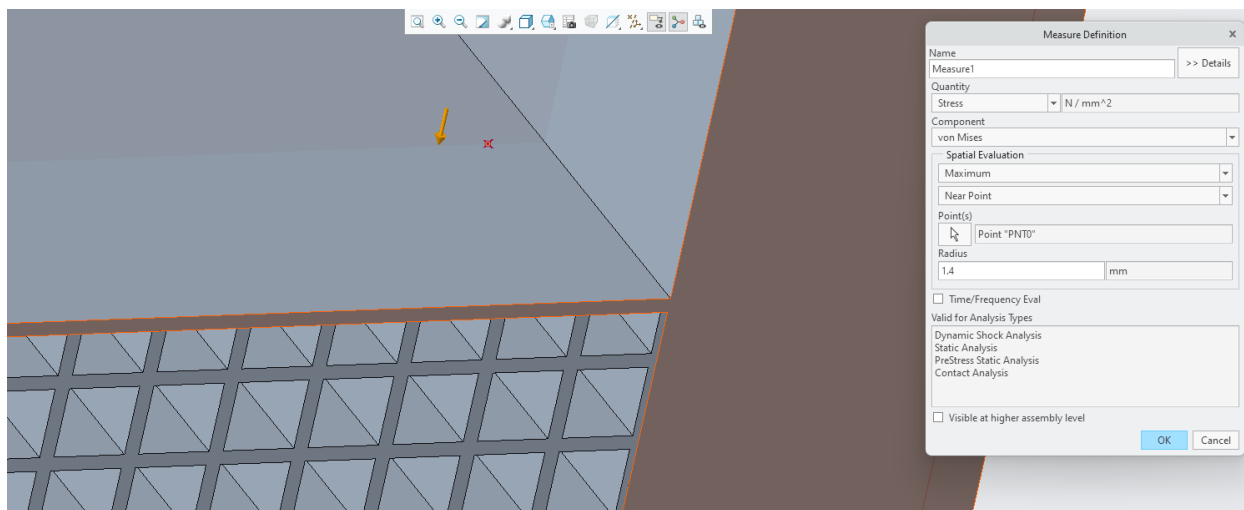


Εικόνα 7-42. Τοποθέτηση σημείου στην επιφάνεια επαφής των δύο εξαρτημάτων του κλιπ πόρπης.

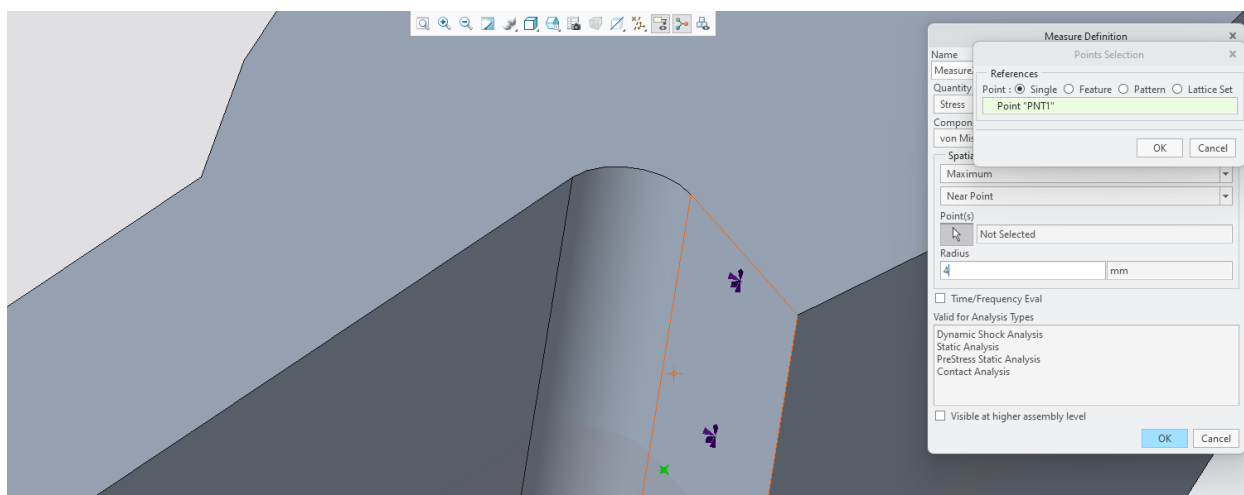
Από την εντολή Measures του Simulate χρειάζεται να δημιουργηθούν από το “New” δύο measures (measure1 και measure2), στα οποία θα επιλεγεί το “Near Point” στην κατηγορία Spatial Evaluation. Με αυτόν τον τρόπο εμφανίζεται μια ακόμα κατηγορία στην οποία πρέπει να εισαχθούν τα δύο σημεία, από την κατηγορία “Point(s)” και να οριστεί η ακτίνα του κύκλου που θα χρησιμοποιηθεί ως περιοχή εφαρμογής των μετρήσεων measure1 και measure2.



Εικόνα 7-43. Μενού εισαγωγής σημείων μέτρησης.

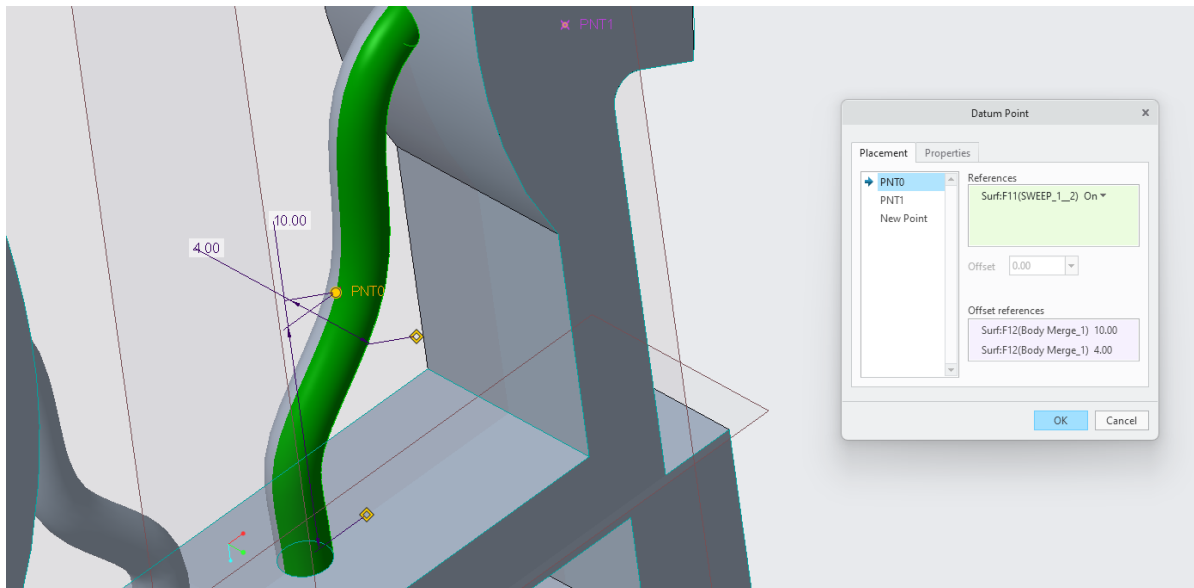


Εικόνα 7-44. Ορισμός του σημείου και της ακτίνας εφαρμογής του *measure1*.

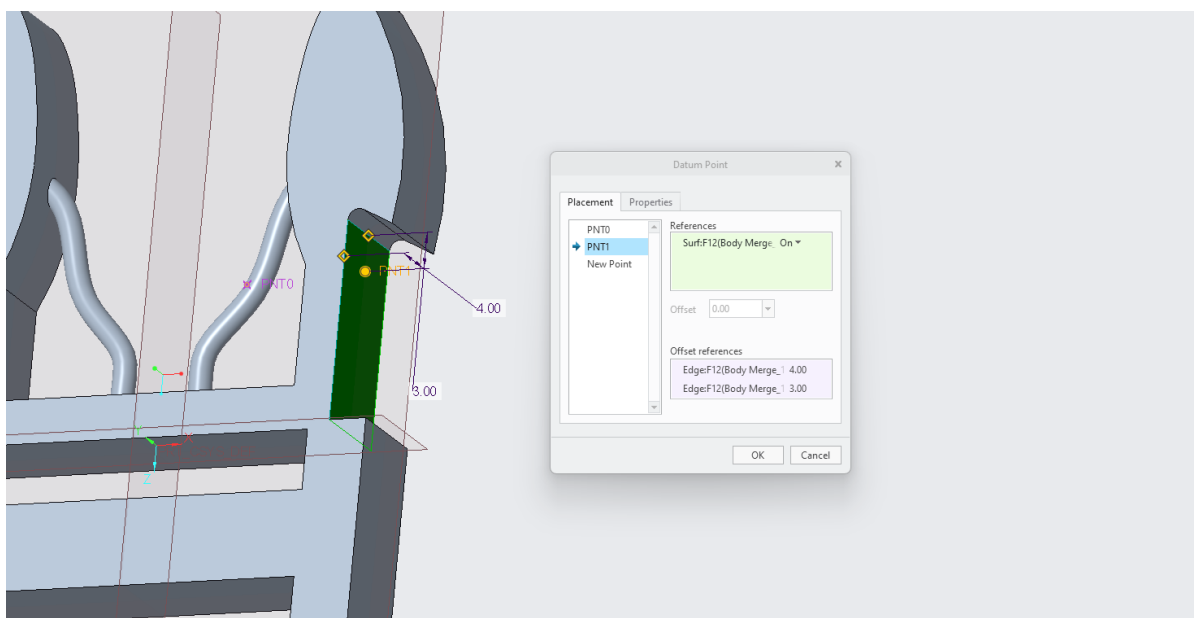


Εικόνα 7-45. Ορισμός του σημείου και της ακτίνας εφαρμογής του *measure2*.

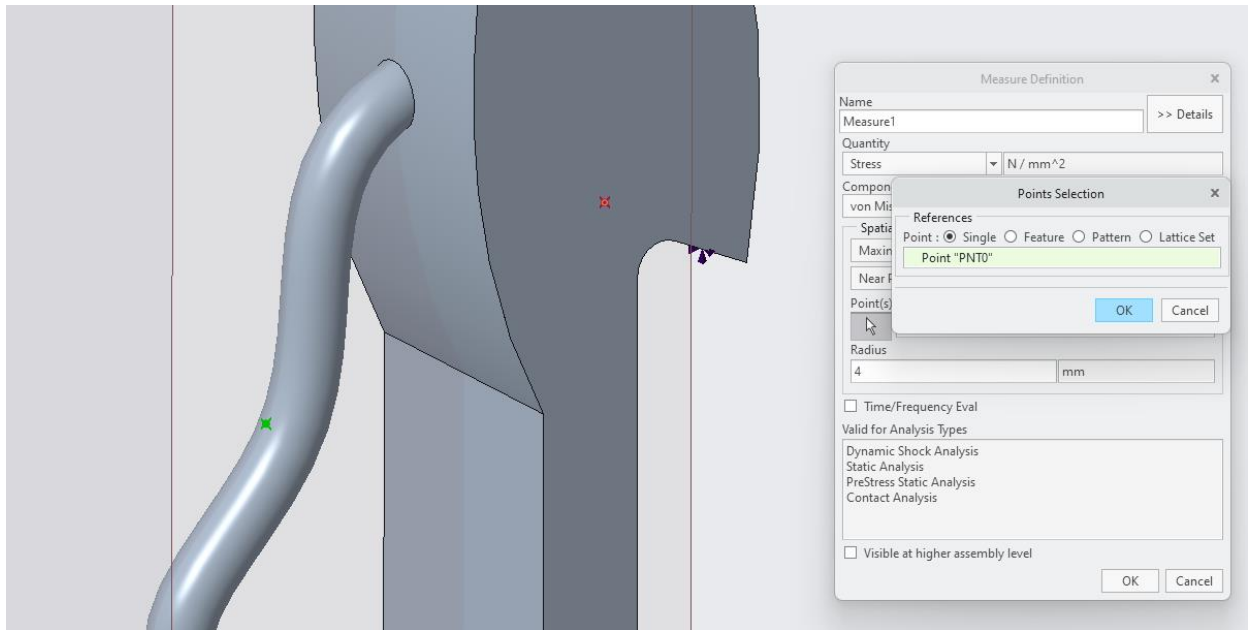
Για την εκδοχή αλλαγής γεωμετρίας με μορφολογική επανασχεδίαση, το πρώτο σημείο επιλέχθηκε με βάση την μέγιστη τάση που δέχεται η προσθετή γεωμετρία, και το δεύτερο τοποθετήθηκε όπως και στην προηγούμενη εκδοχή. Τα σημεία αυτά θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία των *measures*, ακολουθώντας την διαδικασία που παρουσιάστηκε προηγουμένως, με ακτίνα εφαρμογής των μετρήσεων τα 4 mm.



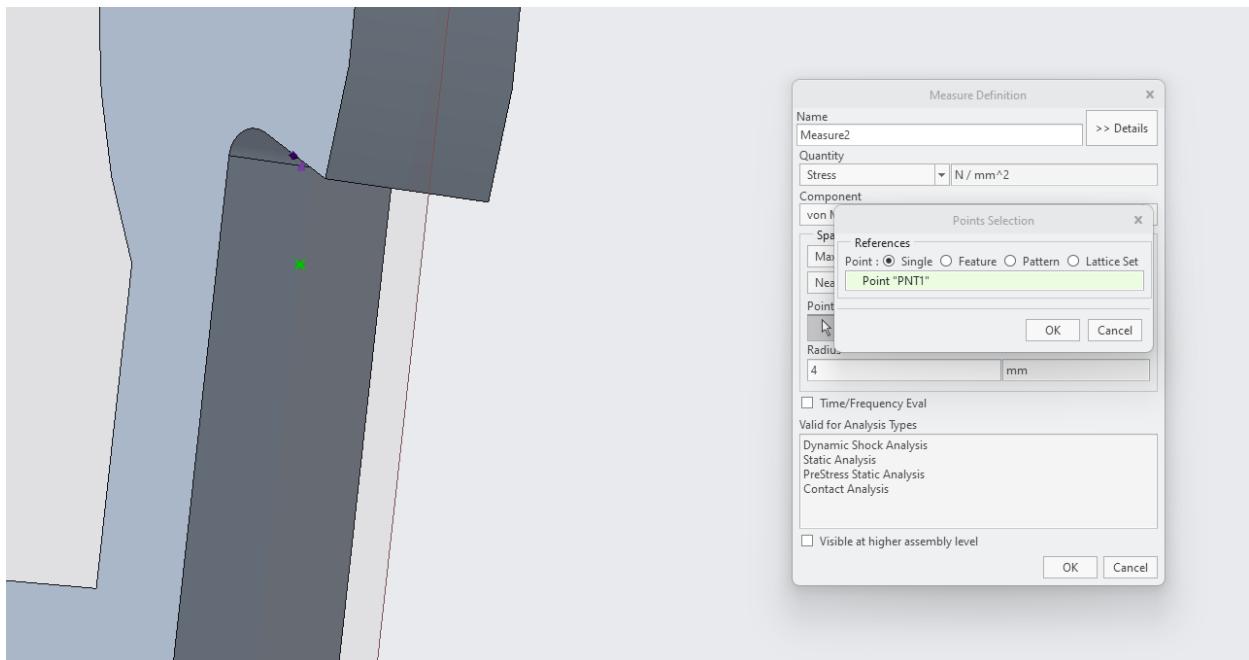
Εικόνα 7-46. Τοποθέτηση σημείου στην πρόσθετη γεωμετρία.



Εικόνα 7-47. Τοποθέτηση σημείου στην επιφάνεια επαφής των δύο εξαρτημάτων του κλιπ πόρτης.



Εικόνα 7-48. Ορισμός του σημείου και της ακτίνας εφαρμογής του *measure1*.

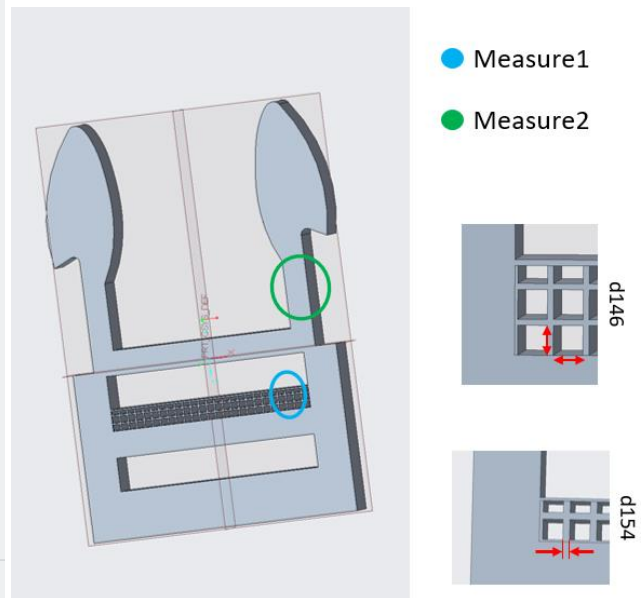
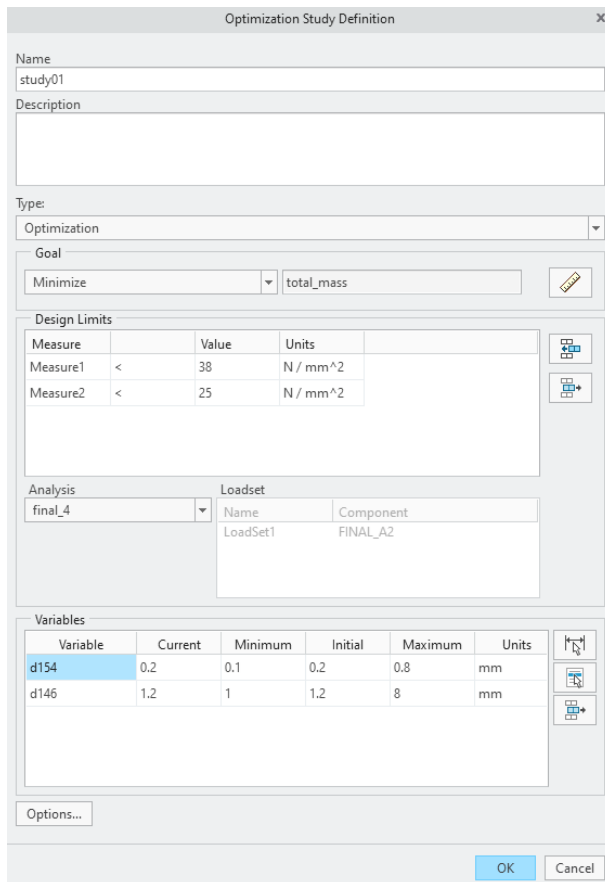


Εικόνα 7-49. Ορισμός του σημείου και της ακτίνας εφαρμογής του *measure2*.

7.3.5 Ανάλυση βελτιστοποίησης

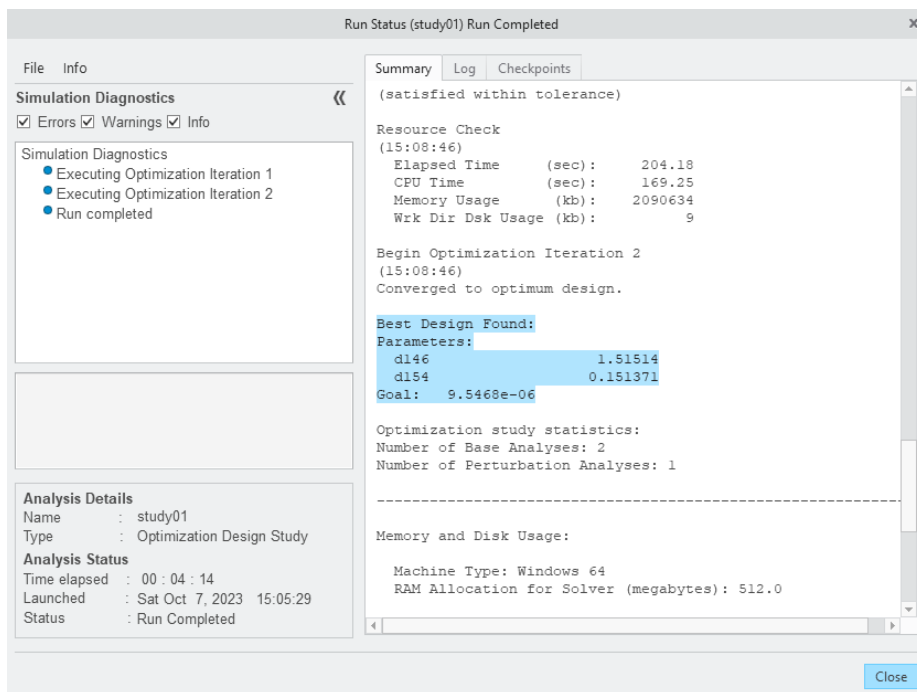
Τα measures που δημιουργήθηκαν, θα χρησιμοποιηθούν στην μελέτη βελτιστοποίησης στο πεδίο design limits, ώστε να οριοθετηθούν οι τάσεις που μπορούν να λάβουν χώρα στα κρίσιμα σημεία της γεωμετρίας.

Στο παράδειγμα του concept 1, είναι επιθυμητό να σπάσει πρώτα η γεωμετρία του lattice και μετά η γεωμετρία που κουμπώνει με το δεύτερο εξάρτημα του κλιπ. Καθώς με αυτόν τον τρόπο θα προστατευτεί η κύρια γεωμετρία και θα αστοχήσει μόνο η επιφάνεια με lattice, διατηρώντας την λειτουργικότητα του προϊόντος μέχρι να είναι δυνατή η αλλαγή του. Επομένως, στο measure2 χρησιμοποιήθηκε τιμή μικρότερη από 25 MPa και για το measure1 μικρότερη από 38 MPa, όπου 41,4 MPa το όριο αντοχής του ABS. Στόχος της ανάλυσης βελτιστοποίησης ήταν η ελαχιστοποίηση της μάζας, με μεταβλητές το πάχος του cell και το μέγεθος κάθε κελιού του lattice. Συγκεκριμένα για το πάχος, το πεδίο τιμών ήταν από 0,1 έως 0,8 mm και για το μέγεθος των κελιών από 1 έως 8 mm.



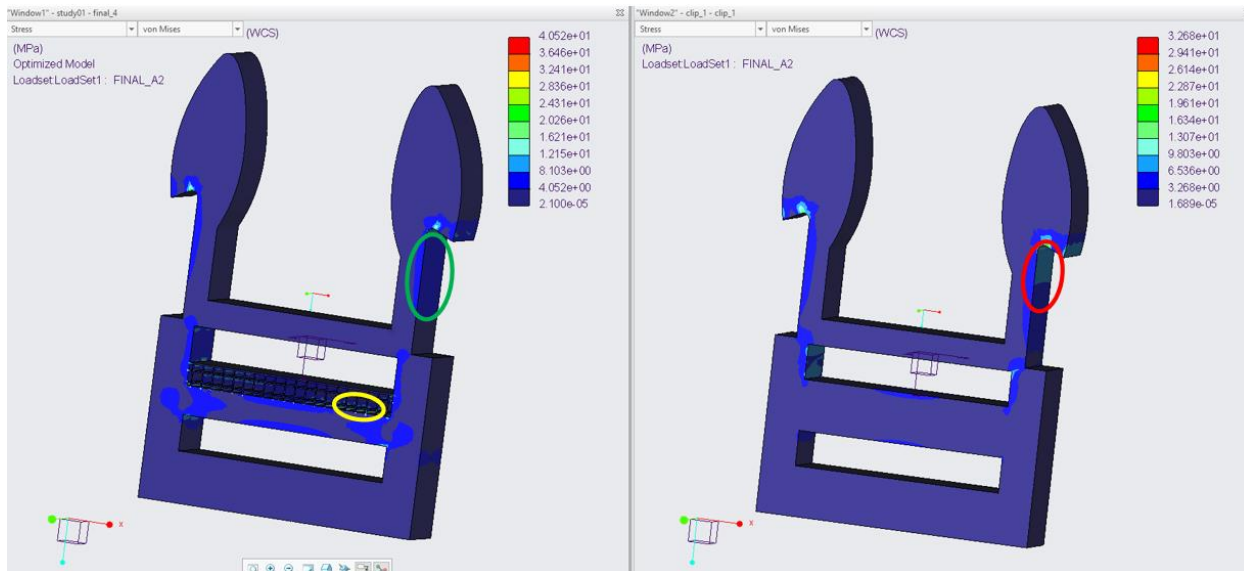
Εικόνα 7-50. Παραμετροποιήσεις ανάλυσης βελτιστοποίησης για την εκδοχή με lattice.

Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του lattice βρέθηκαν 1,5 mm για το μέγεθος των κελιών και 0,15 mm για το πάχος του τοιχώματος. Η χρήση του lattice μείωσε την μάζα κατά 5,96%.

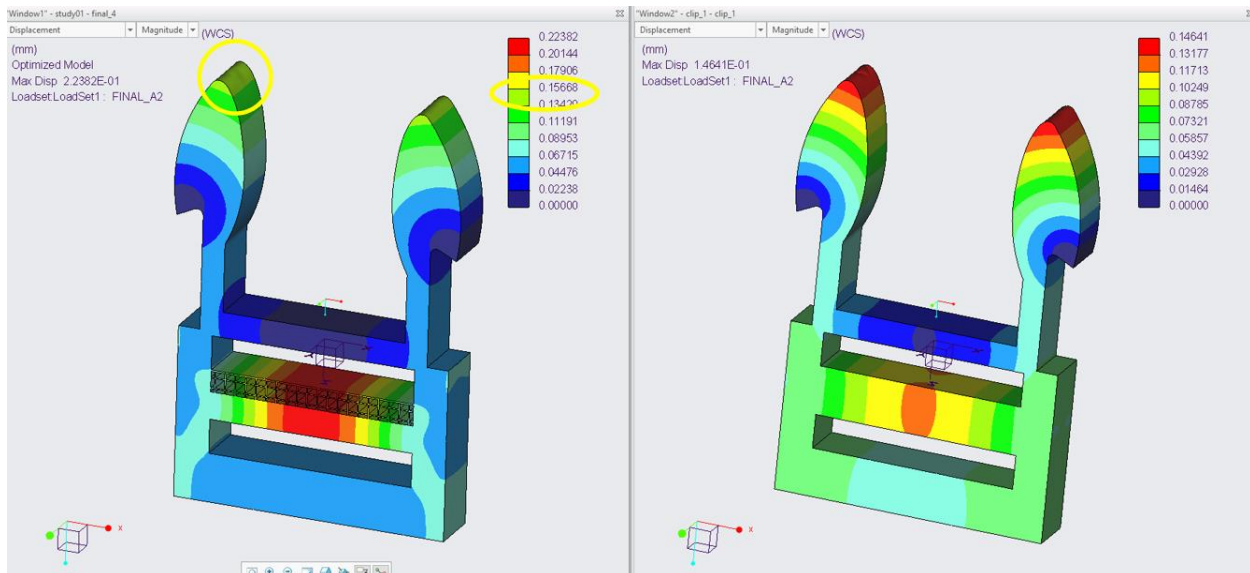


Εικόνα 7-51. Αποτελέσματα ανάλυσης βελτιστοποίησης για το concept 1.

Οι τάσεις και οι μετατοπίσεις της βελτιστοποιημένης μορφής του κλιπ πόρτης σε σχέση με την αρχική μορφή του φαίνονται στις εικόνες 7-52 και 7-53. Η μέγιστη τάση στα κρίσιμα σημεία (πράσινη κυκλωμένη περιοχή στην εικόνα 7-52) μειώθηκε κατά 4,29 % ενώ η μετατόπιση στην κορυφή των ράβδων παρέμεινε σταθερή. Η μέγιστη τάση στην γεωμετρία του lattice βρέθηκε στα 30 MPa (κίτρινη περιοχή εικόνα 7-52).



Εικόνα 7-52. Απεικόνιση τάσεων για το βελτιστοποιημένο κλιπ πόρτης σε σχέση με το αρχικό μοντέλο.



Εικόνα 7-53. Απεικόνιση μετατοπίσεων για το βελτιστοποιημένο κλιπ πόρπης σε σχέση με το αρχικό μοντέλο.

	Τάση στα κρίσιμα σημεία (MPa)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)
Αρχική γεωμετρία κλιπ	7	0,14
Κλιπ με βελτιστοποιημένο lattice	6,7	0,23

Συγκριτικά με τις αναλύσεις ευαισθησίας το πρόγραμμα έδωσε αναμενόμενη τιμή όσον αφορά το μέγεθος των κελιών, αλλά για το πάχος του τοιχώματος έδωσε μικρή τιμή, η οποία αντιστοιχούσε σε μεγάλες τιμές τάσης και μετατόπισης. Αυτό συμβαίνει γιατί η ανάλυση ευαισθησίας μετράει μεμονωμένα μια παράμετρο, θεωρώντας τις υπόλοιπες σταθερές. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης βελτιστοποίησης δίνει τον βέλτιστο συνδυασμό τιμών των ορισμένων παραμέτρων. Η βελτιστοποιημένης μορφής μείωσε ελάχιστα την μέγιστη τάση σε σχέση με την αρχική μορφή. Αλλά το σημαντικότερο είναι ότι πέτυχε να συγκεντρώσει τις τάσεις στην γεωμετρία του lattice, αποφορτίζοντας τις περιοχές που αν σπάσουν θα χαθεί η λειτουργικότητα του προϊόντος. Επίσης, αν και η μετατόπιση σχεδόν διπλασιάστηκε, δεν αποτελεί πρόβλημα στην λειτουργία του κλιπ, καθώς η μέγιστη μετατόπιση βρέθηκε στην γεωμετρία του lattice (κόκκινη περιοχή στην εικόνα 7-53). Επομένως, οι ράβδοι συγκράτησης παραμορφώνονται όσο και στην αρχική μορφή του (δηλαδή κατά 0,14 mm). Η μείωση της μάζας αν και μικρή σε ποσοστό, είναι σημαντική λόγω της μεγάλης κατασκευαστικής ζήτησης του συγκεκριμένου προϊόντος.

Στην ανάλυση βελτιστοποίησης της εκδοχής αλλαγής της γεωμετρίας με μορφολογική επανασχεδίαση, εφαρμόστηκε το όριο των 38 MPa στο measure1 που μετράει την τάση στα αδύναμα σημεία της πρόσθετης γεωμετρίας. Ενώ, στα measure2 που βρίσκεται στο κρίσιμο σημείο της γεωμετρίας, το όριο που δόθηκε ήταν στα 25 MPa. Για να διατηρηθεί η λειτουργικότητα λόγω της ελαστικότητας των ράβδων σταθερή, προστέθηκε ένα ακόμα measure στην μύτη των ράβδων. Η τιμή μετατόπισης του αρχικού κλιπ μετρήθηκε στα 0,14 mm, για αυτό το measure 3 ορίστηκε ίσο με αυτή την τιμή. Ως μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν η ακτίνα του sweep και το ύψος σύνδεσης της επιπρόσθετης

γεωμετρίας με τις ράβδους συγκράτησης των δύο εξαρτημάτων του κλιπ, όπως φαίνεται στην εικόνα 7-54. Συγκεκριμένα το εύρος τιμών για την πρώτη μεταβλητή ήταν από 0,1 έως 4 mm και για την δεύτερη από 14 έως 24 mm. Σκοπός είναι η αστοχία του βελτιστοποιημένου προϊόντος να γίνει στο σημείο της επιπρόσθετης γεωμετρίας, λειτουργώντας ως αδύναμος σύνδεσμος για την προστασία της βασικής δομής.

The image shows the 'Optimization Study Definition' dialog box on the left and a 3D model of a clip on the right. The dialog box contains the following information:

- Name: study0
- Description: (empty)
- Type: Optimization
- Goal: Minimize total_mass
- Design Limits:

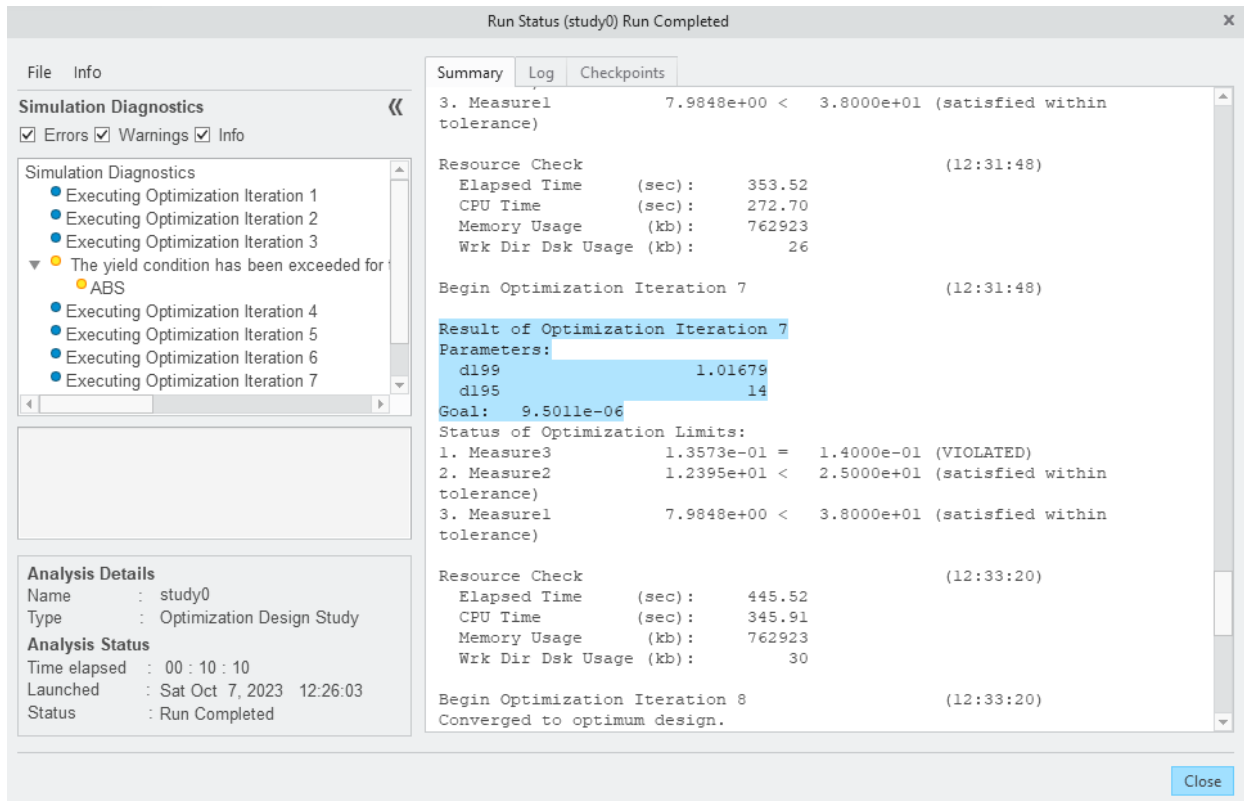
Measure	Value	Units
Measure1	< 38	N / mm ²
Measure2	< 25	N / mm ²
Measure3	= 0.14	mm
- Analysis: Analysis41
- Loadset: LoadSet1, Component: FINAL_A80
- Variables:

Variable	Current	Minimum	Initial	Maximum	Units
d195	19.3	14	19.3	24	mm
d199	1.92	1	1.92	4	mm

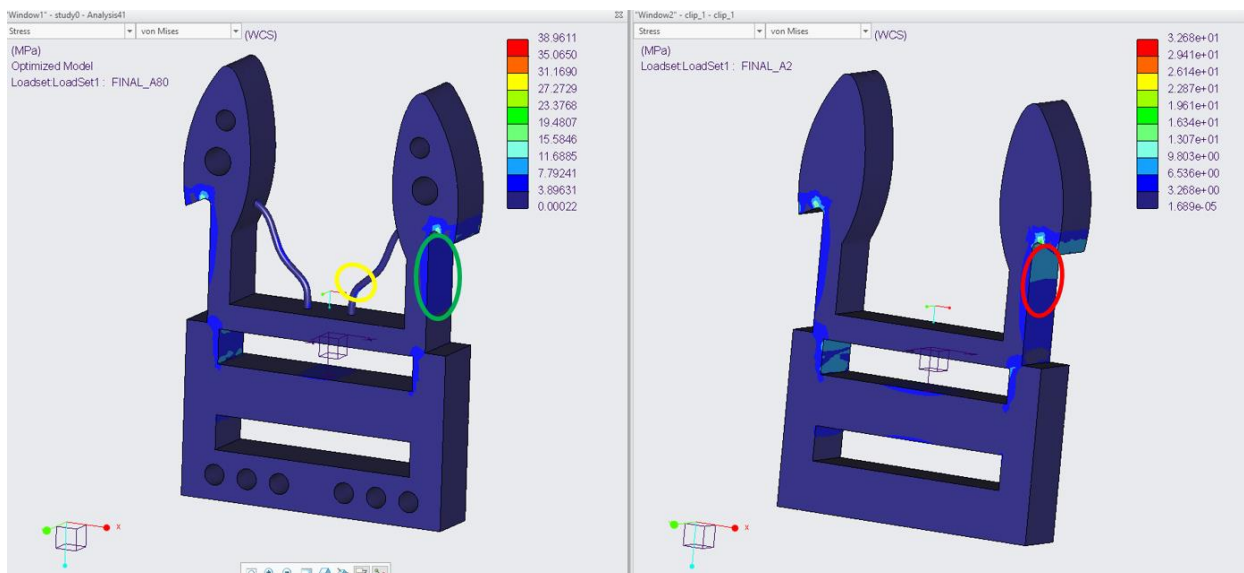
The 3D model on the right shows the clip with three measurement points: Measure1 (blue circle), Measure2 (green circle), and Measure3 (yellow circle). Two inset images show cross-sections of the clip with dimensions d199 and d195 indicated.

Εικόνα 7-54. Παραμετροποιήσεις ανάλυσης βελτιστοποίησης για την εκδοχή με την πρόσθετη γεωμετρία.

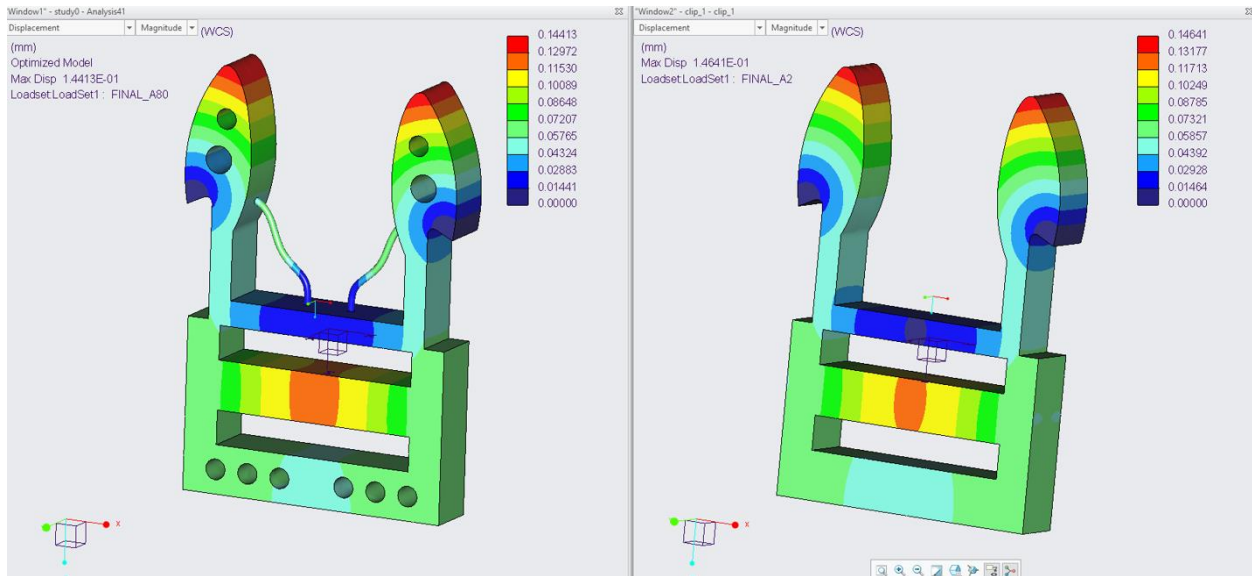
Το αποτέλεσμα της ανάλυση παραβιάζει μόνο την συνθήκη του measure3, δηλαδή του περιορισμού της μετατόπισης στο άκρο του κλιπ. Βέβαια, η παραβίαση αυτή είναι πολύ μικρή και θεωρείται αμελητέα. Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων της εκδοχής μορφολογικής επανασχεδίασης είναι 1 mm για την διατομή του sweep και 14 mm για το ύψος σύνδεσης της επιπρόσθετης γεωμετρίας με τις ράβδους. Σε σύγκριση με το αρχικό μοντέλο του κλιπ, η μέγιστη τάση στο κρίσιμο σημείο μειώθηκε κατά 1,43 % και η μετατόπιση διατηρήθηκε σταθερή. Η βέλτιστη μορφολογία μειώνει την μάζα 6,41 % συγκριτικά με την αρχική δομή. Η μέγιστη τάση στην πρόσθετη γεωμετρία εντοπίστηκε στην κίτρινη κυκλωμένη περιοχή της εικόνας 7-56, με μέτρο 9,5 MPa.



Εικόνα 7-55. Αποτελέσματα ανάλυσης βελτιστοποίησης για την εκδοχή με την πρόσθετη γεωμετρία.



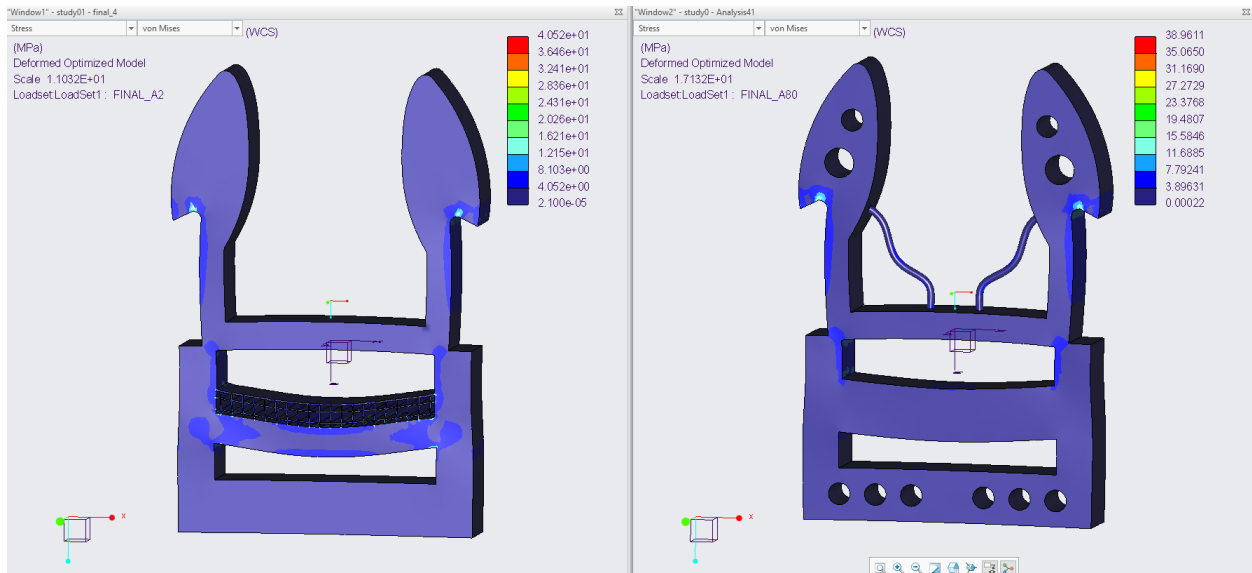
Εικόνα 7-56. Απεικόνιση τάσεων για την εκδοχή με την πρόσθετη γεωμετρία σε σχέση με το αρχικό μοντέλο.



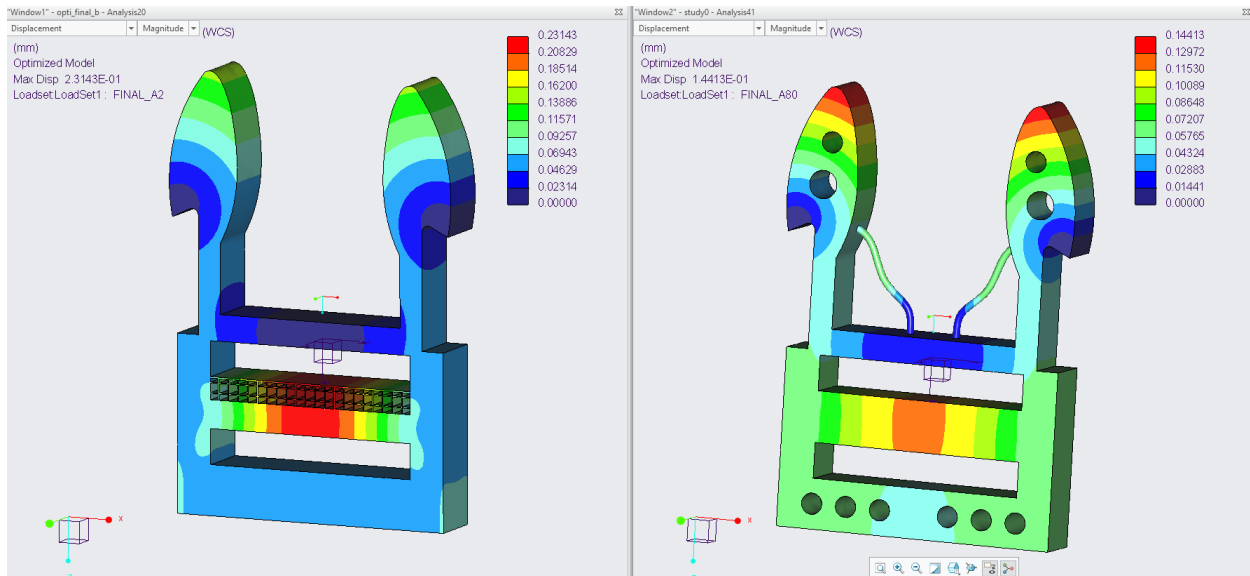
Εικόνα 7-57. Απεικόνιση μετατοπίσεων για την εκδοχή με την πρόσθετη γεωμετρία σε σχέση με το αρχικό μοντέλο.

	Τάση στα κρίσιμα σημεία (MPa)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)
Αρχική γεωμετρία κλιπ	7	0,14
Κλιπ με βελτιστοποιημένη πρόσθετη γεωμετρία	6,9	0,14

7.3.6 Σύγκριση των concepts και επιλογή τελικού προϊόντος



Εικόνα 7-58. Απεικόνιση τάσεων για τα βελτιστοποιημένα κλιπ πόρτης των 2 εκδοχών, παραμορφωμένα κατά 4%.



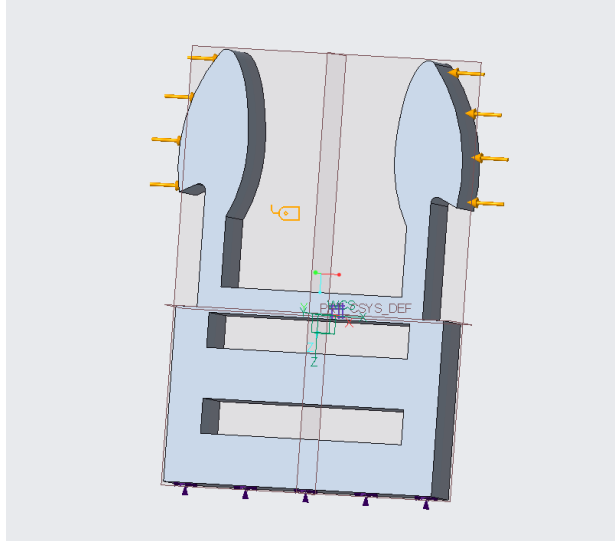
Εικόνα 7-59. Απεικόνιση μετατοπίσεων για τα βελτιστοποιημένα κλιπ πόρτης των 2 εκδοχών.

	Τάση στα κρίσιμα σημεία (MPa)	Μέγιστη μετατόπιση (mm)	Μείωση μάζας (%)	Τάση στην πρόσθετη/ lattice γεωμετρία
Αρχική γεωμετρία κλιπ	7	0,14		
Βελτιστοποιημένο κλιπ με lattice	6,7	0,22	5,96	30
Βελτιστοποιημένο κλιπ με μορφολογική επανασχεδίαση	6,9	0,14	6,41	9,5

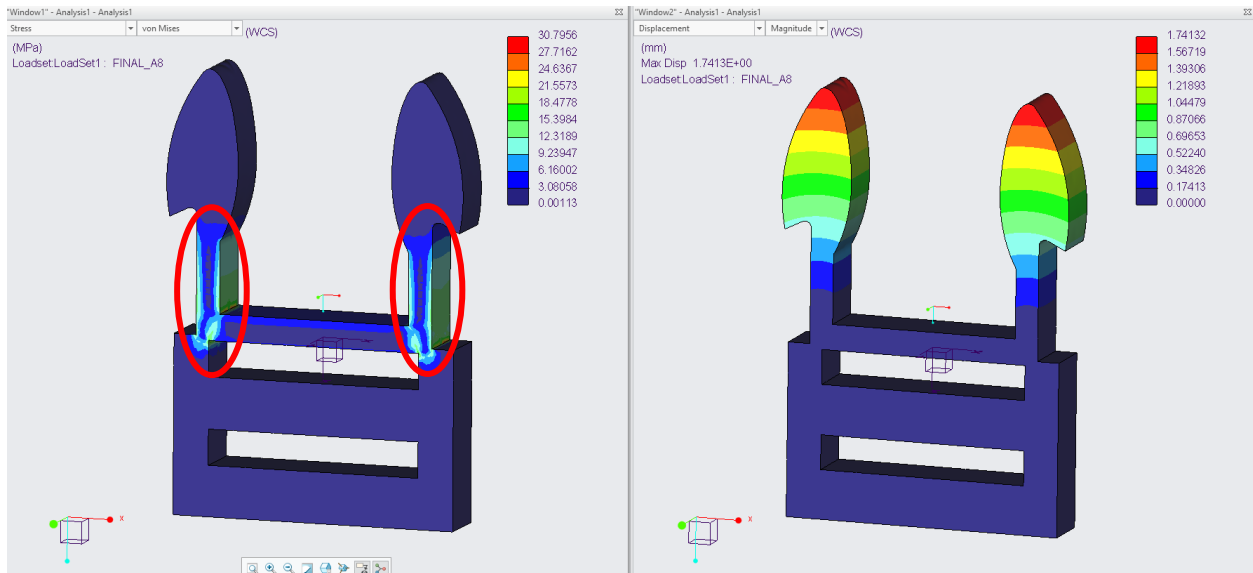
Στην πρώτη εκδοχή, η αντικατάσταση συμπαγούς όγκου με lattice γεωμετρία, πέτυχε τον σκοπό της συγκεντρώνοντας τις τάσεις, άρα και μειώνοντας τις από τις επιφάνειες επαφής των δύο εξαρτημάτων. Η μέγιστη τάση, στα κρίσιμα σημεία σε σχέση με την αρχική μορφή, μειώθηκε ελάχιστα ενώ η μέγιστη μετατόπιση σχεδόν διπλασιάστηκε. Ωστόσο, η μέγιστη μετατόπιση παρουσιάζεται στην lattice γεωμετρία, και δεν εμποδίζει την λειτουργία του κλιπ πόρτης. Ακόμη, υπήρξε μείωση στην μάζα της τάξης 5,96 %. Η φιλοσοφία του συγκεκριμένου concept είναι να έρχεται πρώτα σε αστοχία η δομή του lattice, προστατεύοντας την βασική γεωμετρία, άρα και την λειτουργικότητα του προϊόντος. Το βελτιστοποιημένο εξάρτημα πετυχαίνει το παραπάνω, σύμφωνα με τις αναλύσεις κερδίζοντας τον όρο του fail-safe προϊόντος. Συγκεκριμένα όταν η τάση στα κρίσιμα σημεία (δηλαδή τις ράβδους συγκράτησης) είναι στα 6,7 MPa, η τάση στην lattice γεωμετρία είναι 30 MPa.

Όσον αφορά την εκδοχή μορφολογικής επανασχεδίασης, λόγω της προσθήκης της spline γεωμετρίας, μελετήθηκε και η συμπεριφορά της στην φόρτιση κατά το κούμπωμα των δύο εξαρτημάτων

του κλιπ. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν δυνάμεις των 10 N στο αριστερό και δεξιό άκρο του αρχικού κλιπ πόρτης, όπως φαίνεται στην εικόνα 7-60. Τα αποτελέσματα έδειξαν έντονη φόρτιση στις κρίσιμες περιοχές (εικόνα 7-61), κάτι το οποίο θα μειώσει την αντοχή τους σε βάθος χρόνου λόγω της κόπωσης. Ίδια συμπεριφορά έχει και η εκδοχή αντικατάστασης συμπαγούς όγκου με lattice, καθώς η προσθήκη του δεν επηρεάζει την συγκεκριμένη φόρτιση.

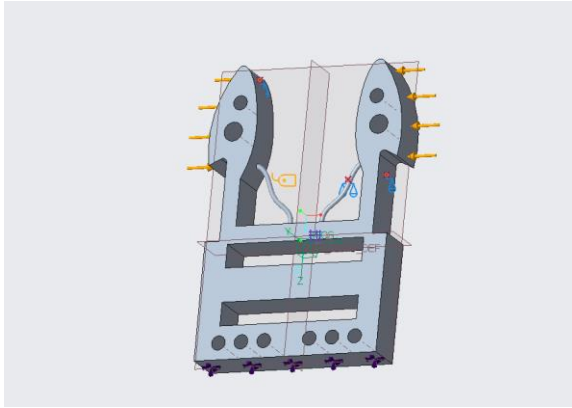


Εικόνα 7-60. Πάκτωση και ορισμός δύναμης για το αρχικό κλιπ πόρτης.

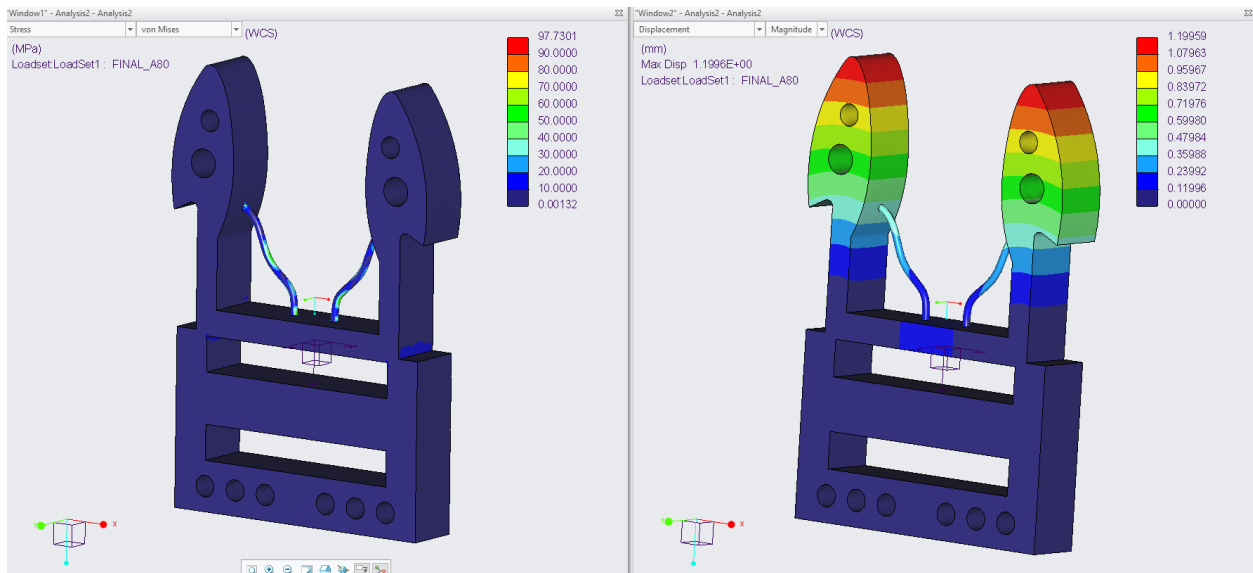


Εικόνα 7-61. Απεικόνιση τάσης και μετατόπισης για αρχική γεωμετρία του κλιπ πόρτης κατά την οριζόντια φόρτιση των ράβδων.

Η αντίστοιχη στατική ανάλυση για την εκδοχή βελτιστοποιημένης μορφολογικής επανασχεδίασης, με την ίδια δύναμη, παρουσιάζει τις ράβδους αφόρτιστες λόγω της συσώρευσής τους στην πρόσθετη γεωμετρία. Αυτό είναι ένα μεγάλο προτέρημα της εκδοχής αυτής σε σύγκριση με την εκδοχή της εφαρμογής του lattice, καθώς η κόπωση δεν θα μειώσει την αντοχή των ράβδων σε βάθος χρόνου.



Εικόνα 7-62. Πάκτωση και ορισμός δύναμης για την βελτιστοποιημένη εκδοχή μορφολογικής επανασχεδίασης.



Εικόνα 7-63. Απεικόνιση τάσης και μετατόπισης για την εκδοχή με την πρόσθετη γεωμετρία κατά την οριζόντια φόρτιση των ράβδων.

Όσον αφορά την μηχανική συμπεριφορά της εκδοχής με την πρόσθετη γεωμετρία κατά τον εφελκυσμό, (όταν δηλαδή τα δύο εξαρτήματα του κλιπ πόρπης είναι κουμπωμένα) η τάση μειώθηκε ελάχιστα στα κρίσιμα σημεία και η μετατόπιση στα άκρα των ράβδων παρέμεινε σταθερή. Κάτι τέτοιο επιτεύχθηκε με 6,41 % λιγότερη μάζα.

Η διαφορά μείωσης της μάζας επί τοις εκατό, μεταξύ των δύο εκδοχών είναι ελάχιστη, επομένως δεν μπορεί να αποτελέσει κριτήριο διάκρισης ενός εκ των δύο. Με βάση τον σημαντικότερο παράγοντα, ο οποίος είναι το fail-safe, χρειάζεται εμπειρικό πείραμα για την εξακρίβωση της συμπεριφοράς της πρόσθετης γεωμετρίας κυρίως κατά την αστοχία. Καθώς, από τα δεδομένα των αναλύσεων προκύπτει μικρή διαφορά στην μέγιστη τάση μεταξύ spline γεωμετρίας και κρίσιμου σημείου. Στην εκδοχή αντικατάστασης συμπαγούς όγκου με lattice, είναι προφανές ότι θα αστοχήσει πρώτη η γεωμετρία του lattice, λόγω της διαφοράς τους σε τάσεις (η μέγιστη τάση στην lattice γεωμετρία είναι στα 30 MPa όταν η μέγιστη τάση στο κρίσιμο σημείο είναι 7 MPa). Ωστόσο, σε βάθος χρόνου η εκδοχή με lattice θα υποστεί κόπωση λόγω της λειτουργίας του κλιπ, από την πίεση των δαχτύλων κατά το κούμπωμα των δύο εξαρτημάτων.

Συμπερασματικά, είναι δύσκολο να προταθεί κάποιο εκ των δύο, καθώς παρουσιάζουν εξίσου βελτιωμένη συμπεριφορά και fail-safe λειτουργία. Με κριτήριο επιλογής την ασφάλεια σε σύντομης διάρκειας ζωής προϊόντα, η επιλογή της εκδοχής με lattice θα ήταν καταλληλότερη για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αν το κριτήριο επιλογής είναι η διατήρηση της ασφάλειας σε προϊόντα μεγάλης διάρκειας ζωής, τότε είναι προτιμότερη η επιλογή της εκδοχής με την πρόσθετη γεωμετρία. Παρόλα αυτά, και οι δύο εκδοχές βελτιστοποιημένου προϊόντος ανταποκρίνονται στο στόχο της διπλωματικής και εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του δεδομένου προϊόντος, κατά την αστοχία, μέχρι να είναι εφικτή η αντικατάστασή του.

8. Συμπεράσματα

Τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής απορρέουν από την ερευνά σε συνδυασμό με το case study που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το case study απέδειξε την δυνατότητα μετατροπής ήδη υπαρχόντων προϊόντων σε fail-safe, με την χρήση της προσθετικής κατασκευής. Η χρήση της προσθετικής κατασκευής, αποδείχτηκε αναγκαία για την μεθοδολογία μετατροπής ενός προϊόντος σε fail-safe. Αυτό συμβαίνει, καθώς τα προϊόντα που απορρέουν από αυτήν είναι μορφολογικά περίπλοκα και παρουσιάζουν γεωμετρικά στοιχεία που θα ήταν είτε δύσκολο είτε αδύνατο να κατασκευαστούν με συμβατικές μεθόδους κατασκευής.

Αρχικά, αποδείχθηκε πως η αντικατάσταση συμπαγούς όγκου με lattice σε κατάλληλη τοποθεσία, μπορεί να μειώσει την μέγιστη τάση και την μετατόπιση ενός προϊόντος, προσφέροντάς του μεγαλύτερο κύκλο ζωής, άρα και μεγαλύτερη αντοχή. Επιπλέον, μπορεί να μειώσει σημαντικά την μάζα του αντικειμένου, εξοικονομώντας υλικό. Η δομή του lattice συγκεντρώνει τις τάσεις και αποφορτίζει σε έναν βαθμό την υπόλοιπη δομή, με την ικανότητα να λειτουργήσει ως αδύναμος κρίκος, μετατρέποντας ένα προϊόν σε fail-safe. Οι τιμές των παραμέτρων του lattice, έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην μηχανική συμπεριφορά του, για αυτό είναι αναγκαία η χρήση ανάλυσης βελτιστοποίησης για εύρεση των βέλτιστων, για κάθε ορισμένη περίπτωση.

Η προσθήκη spline γεωμετρίας σε ένα αντικείμενο, στα σημεία που δέχονται θλιπτικές δυνάμεις, μειώνει αρκετά την μέγιστη τάση, συνεπώς αυξάνει την αντοχή του. Επιπλέον, λόγω της μορφολογίας της μπορεί να απορροφήσει τάσεις, μειώνοντας την κόπωση σε σημαντικά δομικά σημεία. Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να λειτουργήσει ως αδύναμος σύνδεσμος, προστατεύοντας την κύρια γεωμετρία. Η

τοποθέτηση της αρχής και του τέλους της γεωμετρίας αυτής, καθώς και η διατομή της, αλλάζουν σημαντικά την μηχανική συμπεριφορά ενός αντικειμένου. Άρα η ανάλυση βελτιστοποίησης, χρειάζεται για τον ορισμό των καταλληλότερων τιμών.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις (Creo Simulate), χρειάζεται μεγάλη υπολογιστική ισχύ για την εύρεση αποτελέσματος, κυρίως στις αναλύσεις βελτιστοποίησης. Επομένως, η λεπτομερής μοντελοποίηση προϊόντων με πολλά μορφολογικά χαρακτηριστικά δεν προτείνεται, καθώς αυξάνει τον χρόνο εκτέλεσης των αναλύσεων αλλά και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αποτυχίας της ανάλυσης.

Τα βελτιστοποιημένα fail-safe προϊόντα, τα οποία απορρέουν από την χρήση της προτεινόμενης μεθοδολογίας, χαρακτηρίζονται από περίπλοκες μορφές, κάτι το οποίο αποτελεί εξειδίκευση της τεχνολογίας της προσθετικής κατασκευής. Η χρήση της προσθετικής κατασκευής για την δημιουργία fail-safe βιομηχανικών προϊόντων, μπορεί να μειώσει αρκετά την χρήση υλικού.

Θα είχε ενδιαφέρον να εξεταστούν διαφορετικοί πιο σύνθετοι τύποι lattice, όπως gyroid ή stochastic. Επίσης, σε ένα διαφορετικό βιομηχανικό προϊόν, του οποίου η γεωμετρία δεν θα είχε τόσους μορφολογικούς περιορισμούς, θα ήταν ενδιαφέρον να μελετηθεί η γεωμετρική επανασχεδιάσή του με την χρήση του εργαλείου της τοπολογικής βελτιστοποίησης.

9. Βιβλιογραφία

- [1] Zhou, M., & Fleury, R. (2016). Fail-safe topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54, 1225-1243.
- [2] Harpur, N. F. (1958). Fail-safe structural design. *The Aeronautical Journal*, 62(569), 363-376.
- [3] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17). Cham, Switzerland: Springer.
- [4] Αλεξίου, Βασιλική (2017) Πειραματική μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμιών με διαφορετικό προσανατολισμό εκτύπωσης, diploma thesis, Syros: University of the Aegean.
- [5] Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., & Dutta, N. K. (2021). Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. *Polymers*, 13(5), 753.
- [6] Spanou, Despina (2019) A study on Manufacturing and 3D Printing of a Mouthpiece for a Classical Alto Saxophone, diploma thesis, Syros: University of the Aegean.
- [7] Χασιαλής, Βασίλειος (2020) Προσθετική κατασκευή με μέταλλα: Case study Fsaе Upright, diploma thesis, Syros: University of the Aegean.
- [8] Palanisamy, C., & Raman, R. (2022). Tribology of additively manufactured materials: fundamentals, modeling, and applications. In *Tribology of Additively Manufactured Materials* (pp. 223-266). Elsevier.
- [9] Selcuk, C. (2013). Joining processes for powder metallurgy parts. In *Advances in powder metallurgy* (pp. 380-398). Woodhead Publishing.
- [10] Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7), 1121.

- [11] Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. (2016). Wire+ arc additive manufacturing. *Materials science and technology*, 32(7), 641-647.
- [12] Bourell, D., Kruth, J. P., Leu, M., Levy, G., Rosen, D., Beese, A. M., & Clare, A. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP annals*, 66(2), 659-681.
- [13] Pereira, T., Kennedy, J. V., & Potgieter, J. (2019). A comparison of traditional manufacturing vs additive manufacturing, the best method for the job. *Procedia Manufacturing*, 30, 11-18.
- [14] Ferro, C., Grassi, R., Secli, C., & Maggiore, P. (2016). Additive manufacturing offers new opportunities in UAV research. *Procedia CIRP*, 41, 1004-1010.
- [15] Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (Eds.). (2019). *Additive manufacturing*. CRC press.
- [16] Zhao, Z., & Zhang, X. S. (2021). Additive manufacturing of topology-optimized graded porous structures: an experimental study. *Jom*, 73(7), 2022-2030.
- [17] <https://en.wikipedia.org/wiki/Fail-safe>
- [18] McBrearty, J. F. (1956). Fatigue and fail-safe airframe design. *SAE Transactions*, 426-436.
- [19] Cid, C., Baldomir, A., & Hernández, S. (2020). Probability-damage approach for fail-safe design optimization (PDFSO). *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 62, 3149-3163.
- [20] Lüdeker, J. K., & Kriegesmann, B. (2019). Fail-safe optimization of beam structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(3), 260-268.
- [21] <https://faculty.up.edu/lulay/MEStudentPage/failsafe.pdf>
- [22] <https://qualityinspection.org/fail-safe-design-principles-examples/>
- [23] Bailas, K., Louka, E. S., & Papanikos, P. (2022, August). Exploiting Design Intent to Produce Fail-Safe Extrusion-Based Additive Manufacturing Parts. In *Macromolecular Symposia* (Vol. 404, No. 1, p. 2100318).
- [24] Kumar, A., Collini, L., Daurel, A., & Jeng, J. Y. (2020). Design and additive manufacturing of closed cells from supportless lattice structure. *Additive Manufacturing*, 33, 101168.
- [25] Ashby, M. F. (2006). The properties of foams and lattices. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 15-30.
- [26] Stolpe, M. (2019). Fail-safe truss topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 60, 1605-1618.
- [27] Martínez-Frutos, J., & Ortigosa, R. (2021). Risk-averse approach for topology optimization of fail-safe structures using the level-set method. *Computational Mechanics*, 68(5), 1039-1061.
- [28] Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons*, 60(5), 677-688.
- [29] <https://prototaluk.com/blog/additive-manufacturing-advantages-and-disadvantages/>
- [30] Hadi, A., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2015, March). Design configurations and creation of lattice structures for metallic additive manufacturing. In *14eme colloque national AIP PRIMECA*.
- [31] Ferreira, T., Almeida, H. A., Bártolo, P. J., & Campbell, I. (2012, July). Additive manufacturing in jewellery design. In *Engineering Systems Design and Analysis* (Vol. 44878, pp. 187-194). American Society of Mechanical Engineers.

[32] Ramdhani, F. F., & Mulyanti, B. (2020, April). Additive manufacturing in education. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 830, No. 4, p. 042093). IOP Publishing.

[33] https://en.wikipedia.org/wiki/3D_food_printing

[34] <https://maineboats.com/print/issue-162/university-maine-3dirigo>

[35] Kostidi, E., Nikitakos, N., & Progoulakis, I. (2021). Additive manufacturing and maritime spare parts: Benefits and obstacles for the end-users. *Journal of Marine science and Engineering*, 9(8), 895.

10. Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 2-1: <https://symbiosisonlinepublishing.com/robotics-automation/robotics-automation32.php>

Εικόνα 2-2: https://www.researchgate.net/figure/Classification-of-additive-manufacturing-processes-from-different-contexts_fig1_349868862

Εικόνα 2-3: <https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>

Εικόνα 2-4: <https://www.3dsystems.com/3d-printers/prox-950>

Εικόνα 2-5: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/digital-light-processing-dlp-3d-printing/>

Εικόνα 2-6: Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., & Dutta, N. K. (2021). Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. *Polymers*, 13(5), 753.

Εικόνα 2-7: <https://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>

Εικόνα 2-8: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/direct-metal-laser-sintering>

Εικόνα 2-9: <https://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>

Εικόνα 2-10: <https://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>

Εικόνα 2-11: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-drawing-of-an-electron-beam-melting-system_fig2_269836411

Εικόνα 2-12: https://www.researchgate.net/figure/Laser-metal-deposition_fig1_273536418

Εικόνα 2-13: <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>

Εικόνα 2-14: <https://www.gcreate.com/post/choosing-the-right-nozzle-for-your-layer-height-with-3d-printing>

Εικόνα 2-15: <https://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>

Εικόνα 2-16: Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. (2019). Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, 12(7), 1121.

Εικόνα 2-17: <https://www.semanticscholar.org/paper/Electron-Beam-Freeform-Fabrication-of-Titanium-Brice-Newman/0b55dd55dac6c52a41659642d7a1b48ddb15db1d>

Εικόνα 2-18: <https://nwirc.org/debunking-myths-of-3d-printing/>

Εικόνα 2-19: <https://www.cttc.fr/en/videos-downloads/additive-manufacturing-of-ceramics/>

Εικόνα 2-20: <https://www.zipy.gr/p/ali/1pc-prusa-i3-mk3-mk52-spring-steel-sheet-heatbed-platform-3d-printer-printing-buildplate-253-8-241mm-for-reprap-3d-printer-parts/4000392949726/>

Εικόνα 2-21:

[https://www.pcbway.com/blog/technology/What is 3MF Is it better than STL format .html](https://www.pcbway.com/blog/technology/What%20is%203MF%20Is%20it%20better%20than%20STL%20format%20.html)

Εικόνα 2-22: screenshot από το λογισμικό Ultimaker Cura 5.2.1

Εικόνα 2-23: screenshot από το λογισμικό Prusa Slicer 2.6

Εικόνα 2-24: <https://www.kywoo3d.com/blogs/3d-printer-news/manual-leveling-vs-auto-leveling-sensor>

Εικόνα 2-25: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860422002226>

Εικόνα 2-26: screenshot από το λογισμικό Ultimaker Cura 5.2.1

Εικόνα 2-27: https://filament2print.com/gb/blog/92_3d-printing-fdm-sla-sls-technology.html

Εικόνα 2-28: <https://www.3dnextech.com/en/3d-print-finishing-what-are-the-solutions/>

Εικόνα 2-29: <https://nwirc.org/debunking-myths-of-3d-printing/>

Εικόνα 3-1: https://www.researchgate.net/figure/a-print-orientations-of-cylindrical-test-specimens-b-parameters-used-for-printing_fig1_349670293

Εικόνα 3-2: <https://www.hubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview/>

Εικόνα 3-3: <https://www.simplify3d.com/resources/print-quality-troubleshooting/poor-surface-above-supports/>

Εικόνα 3-4: <https://imaterialise.helpjuice.com/design-printing/how-to-hollow-out-your-3d-model>

Εικόνες 3-5: screenshot από το λογισμικό Ultimaker Cura 5.2.1

Εικόνα 3-6: <https://phys.org/news/2017-12-additive.html>

Εικόνα 3-7: screenshot από το λογισμικό PrusaSlicer 2.6 με αντικείμενο από <https://www.thingiverse.com/thing:139268>

Εικόνα 3-8: screenshot από το λογισμικό PrusaSlicer 2.6 με αντικείμενο από <https://www.thingiverse.com/thing:139268>

Εικόνα 3-9: <https://www.locanam.com/post/design-for-additive-manufacturing-dfam>

Εικόνα 3-10: https://velo3d.com/press_releases/velo3d-releases-flow-5-0-to-enhance-the-level-of-control-over-the-3d-printing-process/

Εικόνα 4-1: <https://www.3dquickprinting.com/3d-printing/4-benefits-rapid-prototyping-manufacturing-companies/>

Εικόνα 4-2: <https://neo.rps.ltd/solutions/rapid-tooling/>

Εικόνα 4-3: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/rapid-tooling-faster-better-and-less-expensive>

Εικόνα 4-4: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/investment-casting/>

Εικόνα 4-5: <https://www.3dsystems.com/press-releases/3d-systems-sla-3d-printers-enable-align-technology-s-unprecedented-use-3d-printing>

Εικόνα 4-6: <https://www.tctmagazine.com/hear-and-now-enabling-mass-manufacture-hearing-aids/>

Εικόνα 4-7: <https://www.linkedin.com/pulse/additive-manufacturing-medical-implants-already-industry-thomas-gradl-1f>

Εικόνα 4-8: <https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/>

Εικόνα 4-9: <https://www.3dnatives.com/en/additive-manufacturing-aerospace-growing-061220184/#!>

Εικόνα 4-10: <https://maineboats.com/print/issue-162/university-maine-3dirigo>

Εικόνα 4-11: <https://newatlas.com/worlds-first-fully-customised-football-boot/5490/>

Εικόνα 4-12: <https://www.cyclingweekly.com/news/latest-news/the-worlds-first-3d-printed-steel-bike-frame-is-like-nothing-youve-seen-before-210728>

Εικόνα 4-13: <https://www.dezeen.com/2013/03/04/nike-vapor-laser-talon-3d-printed-football-boot-studs-by-nike/>

Εικόνα 4-14: <https://www.wenext.com/blog/3D-Printing/3d-printed-jewelry>

Εικόνα 4-15: <https://www.3printr.com/pros-and-cons-of-3d-printed-food-2461502/>

Εικόνα 4-16: <https://www.voxeljet.com/additive-manufacturing/case-studies/architecture/3d-printing-for-architectural-models/>

Εικόνα 4-17: <https://all3dp.com/2/3d-scanning-3d-printing-in-archaeology-paleontology/>

Εικόνα 4-18: <https://all3dp.com/2/3d-scanning-3d-printing-in-archaeology-paleontology/>

Εικόνα 5-1: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-019-09331-1>

Εικόνα 5-2:

https://www.taiwanteam.com.tw/data_1803?fbclid=IwAR3nWha9vIs599WSUi7rHbo2bITRbCtfIBlt1gxOlFRhAmtZOgPOOIMT_Sk

Εικόνα 5-3: Zhou, M., & Fleury, R. (2016). Fail-safe topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54, 1225-1243.

Εικόνα 5-4: Zhou, M., & Fleury, R. (2016). Fail-safe topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54, 1225-1243.

Εικόνα 6-1:

<https://m.blog.naver.com/PostView.naver?isHttpsRedirect=true&blogId=rossie999&logNo=220993984477>

Εικόνα 6-2:

https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/aerospace_design_optimization_r.htm

Εικόνα 6-3: https://www.researchgate.net/figure/Panel-locations-for-the-Douglas-DC-10-fuselage-fail-safety-tests-The-tests-were-done_fig3_309744416

Εικόνα 6-4: <https://qualityinspection.org/fail-safe-design-principles-examples/>

Εικόνα 6-5: <https://www.bartleby.com/questions-and-answers/the-figure-below-shows-a-boat-propeller-mounted-on-a-drive-shaft-with-a-7-mm-diameter-d-cylindrical-/f59a5792-0552-409b-b948-daf7a4e1120d>

Εικόνα 6-6: <https://shorturl.at/gopuE>

Εικόνα 6-7: <https://shorturl.at/ezOS4>

Εικόνα 6-8: <https://modelthinkers.com/mental-model/redundancy-margin-of-safety>

Εικόνα 6-9: <https://www.gwec.co.uk/product/weak-link-connector/>

Εικόνα 6-10:

<https://m.blog.naver.com/PostView.naver?isHttpsRedirect=true&blogId=rossie999&logNo=220993984477>

Εικόνα 7-1: screenshot από το λογισμικό Creo Parametric

Εικόνα 7-2: screenshot από το λογισμικό Creo Parametric

Εικόνα 7-3: screenshot από το λογισμικό Fusion 360

Εικόνα 7-4: screenshot από το λογισμικό Fusion 360

Εικόνα 7-5 έως εικόνα 7-63: screenshot από το λογισμικό Creo