



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΠΛΕΓΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ ΜΕ ΔΙΑΒΑΘΙΣΜΕΝΕΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τάσσης Σωτήριος

Πειραιάς 2016

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου κο Καραλέκα Δημήτριο του Πανεπιστημίου Πειραιώς στο τμήμα της Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού προγράμματος της Διοίκησης Έργων και Ανάπτυξης Προϊόντων. Η συνεργασία μας καθ'όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου ήταν άριστη και με κατανόηση ως προς τις επαγγελματικές μου υποχρεώσεις.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τη Διδάκτορα Χατζηνταή Νικολέτα για την πολύτιμη βοήθειά της σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, από το θεωρητικό μέρος έως και την εκτέλεση του πειράματος που πραγματοποιήσαμε στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου Πειραιώς. Η καθοδήγηση της Διδάκτωρ Νικολέτας Χατζηνταή ήταν πολύ σημαντική και οι εύστοχες παρατηρήσεις της με βοήθησαν να ολοκληρώσω επιτυχώς τη διπλωματική μου εργασία.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Πειραματική και υπολογιστική μελέτη τρισδιάστατης κατασκευής πλεγματικών δομών με διαβαθισμένες μηχανικές ιδιότητες	1
Κεφάλαιο 2 Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης	2
2.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση.....	2
2.2 Σύντηξη υλικού με λέιζερ (Selective Laser Sintering).....	4
2.3 Εναπόθεση λιωμένου υλικού (Fused Deposition Modeling)	5
2.4 Στερεολιθογραφία (Stereolithography)	6
2.5 Εκτύπωση σε τρεις διαστάσεις (Three Dimensional Printing).....	7
2.6 Αντικείμενα κατασκευασμένα με διαδοχικές στρώσεις (Laminated Object Manufacturing).....	9
2.7 Μέθοδος σκλήρυνσης με υπεριώδη ακτινοβολία σε φωτοπολυμερές υγρό (Solid Ground Curing)	10
2.8 Μοντελοποίηση τεχνολογίας multi-jet (Multi Jet Modelling)	11
Κεφάλαιο 3 Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην σημερινή βιομηχανία	13
3.1 Οι τεχνολογικές δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης	13
3.2 Η μείωση του βιομηχανικού κόστους με την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης	14
Κεφάλαιο 4 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία	15
4.1 Εφαρμογές των τρισδιάστατων εκτυπώσεων	15
4.2 Ιατρική βιομηχανία.....	15
4.3 Αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία	16
4.4 Αυτοκινητοβιομηχανία.....	17
4.5 Αμυντική βιομηχανία	18
4.6 Το μέλλον της τρισδιάστατης εκτύπωσης	19
Κεφάλαιο 5 Πλεγματικές δομές	20
5.1 Οι πλεγματικές δομές και οι εφαρμογές τους (Sandwich Structures)	20
5.2 Οι μορφές και οι τύποι των πλεγματικών δομών	21
5.3 Χρήση των πλεγματικών δομών σε μορφή πάνελ.....	23
5.4 Οι δυνατότητες των πλεγματικών δομών και η χρήση τους στη βιομηχανία.....	25
5.5 Η μηχανική συμπεριφορά των πλεγματικών δομών και η μετάδοση των φορτίων	26
Κεφάλαιο 6 Η εφαρμογή των πλεγματικών δομών στη μηχανική ιστών	28
6.1 Οι τρισδιάστατες πλεγματικές δομές στην μηχανική ιστών.....	28

6.2 Ο σχεδιασμός των δομών στη μηχανική ιστών	29
6.3 Η μεθοδολογία για την ανάπτυξη και τη σχεδίαση της μοναδιαίας δομής μίας επαλληλίας στη μηχανική ιστών	32
6.4 Η μηχανική των πλεγματικών δομών για την κατασκευή οστών.....	32
Κεφάλαιο 7 Πειραματική διαδικασία.....	35
7.1 Οι δομές που σχεδιάσαμε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας	35
7.2 Διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής των δομών	36
7.3 Πειραματικό μέρος για την κυβική πλεγματική δομή.....	39
7.4 Πειραματικό μέρος για την πολυγωνική πλεγματική δομή.....	40
7.5 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.....	42
Κεφάλαιο 8 Υπολογιστική προσομοίωση.....	46
8.1 Υπολογιστικό μέρος.....	46
8.2 Αριθμητικά αποτελέσματα από την υπολογιστική προσομοίωση.....	49
8.3 Αξιολόγηση των δομών.....	53

Εικόνες και διαγράμματα

Εικόνα 2.1 Σχηματισμός σφαιροειδούς δομής με πολυγωνικό δικτύωμα σε τρισδιάστατο εκτυπωτή	3
Εικόνα 2.2 Σχηματική απεικόνιση της τεχνολογίας σύντηξης υλικού με λέιζερ	5
Εικόνα 2.3 Σχηματική απεικόνιση της τεχνολογίας εναπόθεσης υλικού για τον σχηματισμό τρισδιάστατης δομής	6
Εικόνα 2.4 Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας της Στερεολιθογραφίας.....	7
Εικόνα 2.5 Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας εκτύπωσης αντικειμένου σε τρεις διαστάσεις 8	
Εικόνα 2.6 Σχηματική απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης σε διαδοχικές στρώσεις υλικού	10
Εικόνα 2.7 Σχηματική απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας και πολυμερούς υλικού	11
Εικόνα 2.8 Σχηματική απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης με την τεχνολογία multi-jet... 12	
Εικόνα 4.1 Προσθετικό μέλος κατασκευασμένο σε τρισδιάστατο εκτυπωτή.....	16
Εικόνα 4.2 Εξάρτημα τυπωμένο με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης	16
Εικόνα 4.3 Πολύπλοκες εκτυπωμένες γεωμετρίες για την αυτοκινητοβιομηχανία	17
Εικόνα 4.4 Στρατιωτικός εξοπλισμός εκτυπωμένος σε τρισδιάστατο εκτυπωτή προσαρμοσμένο σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη	18
Εικόνα 5.1 Σχηματική απεικόνιση των δομών επαλληλίας.....	20
Εικόνα 5.2 Δομή επαλληλίας με κυψελοειδή μορφή	24
Εικόνα 6.1 Τρισδιάστατο εκτυπωμένο μέλος ανθρώπινου σώματος	31
Εικόνα 6.2 Τρισδιάστατες εκτυπωμένες δομές οστών	34
Εικόνα 7.1 Απεικόνιση της κυβικής δομής στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks.....	35
Εικόνα 7.2 Απεικόνιση της πολυγωνικής δομής στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks... 36	
Εικόνα 7.3 Η κυβική πλεγματική δομή μετά από την εκτύπωση και με εμφανή τα υποστηρίγματα	38
Εικόνα 7.4 Αστοχίες που δημιουργήθηκαν κατά την εκτύπωση των κυβικών πλεγματικών δομών	38
Εικόνα 7.5 Πολυγωνικές πλεγματικές δομές εκτυπωμένες στον τρισδιάστατο εκτυπωτή	39
Εικόνα 7.6 Τα κυβικά πλεγματικά δοκίμια μετά το πείραμα θλίψης	40
Εικόνα 7.7 Τα πολυγωνικά πλεγματικά δοκίμια μετά το πείραμα θλίψης.....	41
Εικόνα 7.8 Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης των κυβικών μορφών επαλληλίας.....	44
Εικόνα 7.9 Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης των πολυγωνικών πλεγματικών δομών	45
Εικόνα 8.1 Παραμόρφωση πλεγματικής δομής κατά τον οριζόντιο άξονα x.....	46
Εικόνα 8.2 Παραμόρφωση δομής κατά τον εγκάρσιο άξονα y.	47
Εικόνα 8.3 Η εικόνα μας δείχνει την συνολική παραμόρφωση που δέχεται το δοκίμιο στην προσομοίωση θλίψης.....	47
Εικόνα 8.4 Η καταπόνηση σε φορτίο της πολυγωνικής δομής κατά τον οριζόντιο άξονα x. .	48
Εικόνα 8.5 Η καταπόνηση στο δοκίμιο κατα τον εγκάρσιο άξονα y.	48
Εικόνα 8.6 Η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου μετά την υπολογιστική προσομοίωση θλίψης.....	49
Εικόνα 8.6 Διάγραμμα φορτίου και μετατόπισης από την υπολογιστική προσομοίωση στο ANSYS.....	51
Εικόνα 8.7 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων από το πείραμα και την υπολογιστική προσομοίωση για την κυβική πλεγματική δομή.	52
Εικόνα 8.8 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων από το πείραμα και την υπολογιστική προσομοίωση για την πολυγωνική πλεγματική δομή	52

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 7.1 Ενδεικτική απεικόνιση δεδομένων από το πείραμα στην κυβική πλεγματική δομή.....	42
Πίνακας 7.2 Ενδεικτική απεικόνιση δεδομένων από το πείραμα στην πολυγωνική πλεγματική δομή.....	42
Πίνακας 7.3 Ενδεικτική απεικόνιση δεδομένων φορτίου και μετατόπισης για όλα τα δείγματα της κυβικής πλεγματικής δομής.	43
Πίνακας 7.4 Ενδεικτική απεικόνιση δεδομένων φορτίου και μετατόπισης για όλα τα δείγματα της πολυγωνικής πλεγματικής δομής.	43
Πίνακας 7.5 Ενδεικτικά αριθμητικά δεδομένα από την προσομοίωση στο λογισμικό ANSYS για την κυβική πλεγματική δομή.....	50
Πίνακας 7.6 Ενδεικτικά αριθμητικά δεδομένα από την προσομοίωση στο λογισμικό ANSYS για την πολυγωνική πλεγματική δομή.....	51

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Πειραματική και υπολογιστική μελέτη τρισδιάστατης κατασκευής πλεγματικών δομών με διαβαθισμένες μηχανικές ιδιότητες

Οι βιομηχανικές εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχουν πλέον εξελιχθεί κατά πολύ τα τελευταία χρόνια. Οι περισσότεροι μηχανικοί ίσως δεν έχουν συνειδητοποιήσει ακόμα τις δυνατότητες της τεχνολογίας που έχει προχωρήσει πέραν της κατασκευής πρωτοτύπων. Η τεχνολογία που χρησιμοποιούν οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές δημιουργεί ανθεκτικά και ασφαλή προϊόντα έτοιμα προς πώληση σε μεσαίες ή και μεγάλες ποσότητες. Το φάσμα των υλικών επεκτείνεται και πέραν των βασικών υλικών όπως είναι το πλαστικό και οι φωτοευαίσθητες ρητίνες, υλικά όπως τα κεραμικά, το τσιμέντο, το γυαλί αλλά και πολλά μέταλλα θερμοπλαστικά σύνθετα υλικά περιλαμβάνονται ήδη στις κατασκευές με τρισδιάστατους εκτυπωτές. Η τεχνολογία δεν είναι σε θέση ακόμα να προσφέρει μία οικονομία κλίμακας. Ωστόσο μπορεί να εξαλείψει το μειονέκτημα του προτύπου κατασκευής και την έλλειψη ευελιξίας. Κάθε μονάδα μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί ώστε να ταιριάζει καλύτερα στις ανάγκες μας. Αυτός είναι ο λόγος όπου η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι τόσο πολύτιμη και χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο.

Ο συνδυασμός των τρισδιάστατων εκτυπώσεων με την μελέτη δομών είναι επίσης ένα πολύ σημαντικό και χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση και τη μελέτη τρισδιάστατων κατασκευών όπου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην πραγματική βιομηχανία. Με την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορούν να κατασκευαστούν δομές σε υψηλά επίπεδα σχεδιασμού από εξελιγμένα σχέδια CAD. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να μελετήσουμε προηγμένες σχεδιαστικά πλεγματικές δομές με στόχο να αναπτύξουμε τις μηχανικές τους ιδιότητες ανάλογα με την εφαρμογή που θέλουμε να τις χρησιμοποιήσουμε και να εντοπίσουμε τις αδυναμίες τους. Ένας παραδοσιακός τρόπος κατασκευής δε θα μπορούσε να μας δώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα στην ποιότητα κατασκευής σε αντίθεση με έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή ο οποίος έχει τη δυνατότητα να κατασκευάσει μία περίπλοκη δομή με αποτέλεσμα να είμαστε σε θέση να αναλύσουμε τα σημεία φόρτισης, να αξιολογήσουμε την πλεγματική δομή και να εντοπίσουμε σε έναν μεγάλο βαθμό τις αδυναμίες της και τα πλεονεκτήματά της σε κάποια βιομηχανική εφαρμογή.

Κεφάλαιο 2 Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης

2.1 Τρισδιάστατη εκτύπωση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία διαδικασία κατασκευής τρισδιάστατων αντικειμένων με προσθήκη υλικού σε στρώσεις αντλώντας πληροφορίες από ένα ψηφιακό αρχείο. Η δημιουργία ενός τρισδιάστατου εκτυπωμένου αρχείου επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας προσθετική διαδικασία κατασκευής σε πολύ μικρά στρώματα. Σε μία εκτύπωση προσθετικής διαδικασίας το αντικείμενο δημιουργείται σε διαδοχικές στρώσεις εναπόθεσης υλικού έως ότου σχηματιστεί το τελικό αντικείμενο που θέλουμε να εκτυπώσουμε. Κάθε μία από αυτές τις στρώσεις υλικού θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως μία πολύ λεπτή οριζόντια διατομή του επιθυμητού αντικειμένου. Η ψηφιακή μορφή του αντικειμένου εκτύπωσης δημιουργείται υπολογιστικά σε ένα αρχείο ψηφιακής σχεδίασης CAD (Computer Aided Design) χρησιμοποιώντας κάποιο υπολογιστικό σχεδιαστικό πρόγραμμα εάν θέλουμε να δημιουργήσουμε ένα εξ ολοκλήρου καινούργιο αντικείμενο. Σε αντίθετη περίπτωση έχουμε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε έναν τρισδιάστατο σαρωτή ώστε να σαρώσουμε ένα ήδη υπάρχον αντικείμενο και να αντλήσουμε τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε από ένα τέτοιου είδους αρχείο.

Ως εκ τούτου, λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς των παραδοσιακών τρόπων κατασκευής κάποιου προϊόντος, η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει αναδειχθεί σε μία πολλά υποσχόμενη μέθοδο κατασκευής που διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα. Οι σχεδιαστές έχουν τη δυνατότητα να σχεδιάσουν αντικείμενα και να τα κατασκευάσουν στο γραφείο τους πολύ γρήγορα και πολύ οικονομικά. Με τον τρόπο αυτό έχουμε τη δυνατότητα να εξετάσουμε άμεσα τα αντικείμενα που σχεδιάζουμε, να αξιολογήσουμε και να εκτελέσουμε τις αναγκαίες τροποποιήσεις που θα οδηγήσουν στο επιθυμητό τελικό προϊόν.



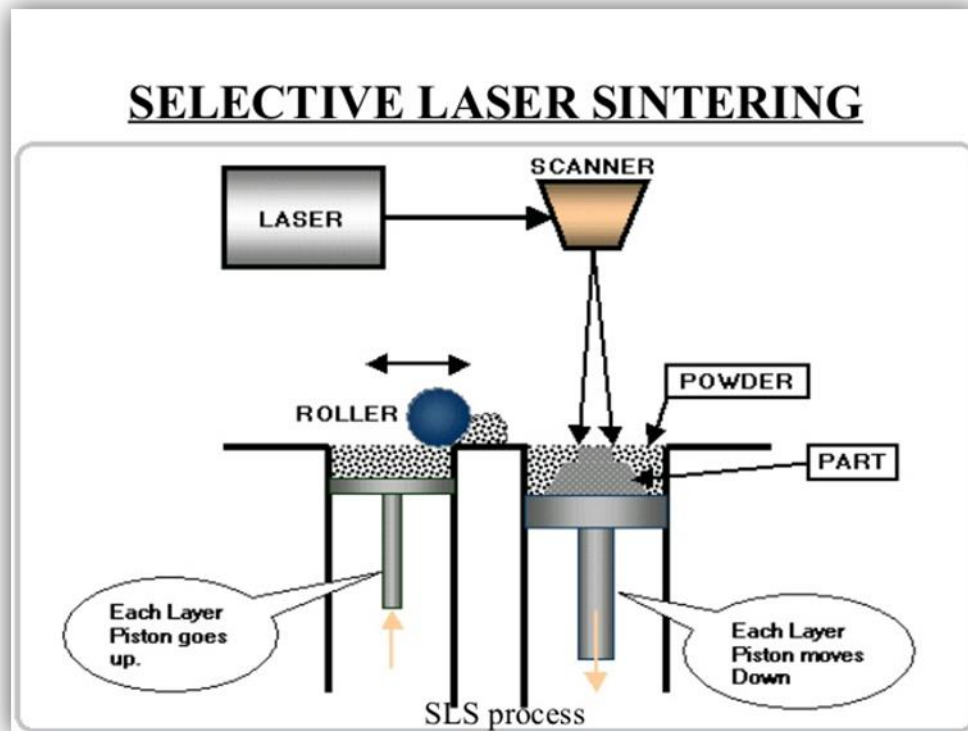
Εικόνα 2.1 Σχηματισμός σφαιροειδούς δομής με πολυγωνικό δικτύωμα σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

Όλες οι τεχνικές των τρισδιάστατων εκτυπώσεων δεν χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία. Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τρόποι για να επιτευχθεί μία εκτύπωση όμως όλοι χρησιμοποιούν μία κοινή αρχή, αυτή της εναπόθεσης υλικού σε στρώσεις. Παρά τους διαφορετικούς μηχανισμούς, τα βασικά στάδια της διαδικασίας είναι κοινά. Το αρχικό στάδιο όλων των μεθόδων είναι η γεωμετρία του επιθυμητού αντικειμένου που πρόκειται να κατασκευαστεί. Αυτή μπορεί να προέρχεται από ένα υπάρχον αντικείμενο, από ένα καινούργιο σχέδιο ή από αριθμητικά δεδομένα. Ένα ήδη υπάρχον αντικείμενο πρέπει να επαξεργαστεί μέσω ενός τρισδιάστατου σκάνερ που το αναλύει και συλλέγει τα δεδομένα σχετικά με το σχήμα του. Μία πρωτότυπη γεωμετρία επεξεργάζεται σε κάποιο λογισμικό CAD το οποίο θα περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με το σχήμα του και τέλος τα αριθμητικά και μαθηματικά δεδομένα θα πρέπει να αναλυθούν προκειμένου να σχηματίσουμε μία τρισδιάστατη γεωμετρία.

Το επόμενο στάδιο αφορά την μετατροπή των γεωμετρικών δεδομένων σε αρχείο .stl το οποίο υποστηρίζεται από πολλά λογισμικά και χρησιμοποιείται ευρέως για τις κατασκευές μέσω υπολογιστή και τρισδιάστατων εκτυπωτών. Τα αρχεία .stl περιγράφουν μόνο την γεωμετρία της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου χωρίς καμία πληροφορία για το χρώμα, την υφή ή άλλα χαρακτηριστικά του μοντέλου και χρησιμοποιούν ένα τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων ώστε να περιγράφουν την γεωμετρία. Στη συνέχεια το αρχείο αποστέλλεται στο λογισμικό του εκτυπωτή και το αντικείμενο διαχωρίζεται σε στρώσεις οι οποίες συγκεντρώνουν την τελική δομή. Οι παράμετροι καθορίζονται από τον χρήστη και το αρχείο μεταφέρεται στον τρισδιάστατο εκτυπωτή όπου ξεκινά η κατασκευή του αντικειμένου. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι κυριότεροι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης.

2.2 Σύντηξη υλικού με λέιζερ (Selective Laser Sintering)

Η μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης με σύντηξη και λέιζερ (SLS) είναι μία από τις πιο συνήθεις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται. Όπως σε όλες οι τεχνολογίες εκτύπωσης έτσι και στη συγκεκριμένη τεχνολογία, η διαδικασία ξεκινάει από ένα αρχείο ψηφιακού σχεδιασμού CAD. Τα αρχεία CAD μετατρέπονται σε μορφή αρχείου STL το οποίο είναι συμβατό με τους τρισδιάστατους εκτυπωτές και μπορούν να μεταφραστούν. Τα αντικείμενα που εκτυπώνονται τρισδιάστατα με αυτό τον τρόπο είναι φτιαγμένα από υλικά σε μορφή σκόνης, συνήθως σε πλαστική μορφή, τα οποία κατά κάποιο τρόπο απλώνονται σε μία λεπτή στρώση επάνω στο επίπεδο του τραπέζιου – πλατφόρμας στην οποία σχηματίζεται το αντικείμενο μέσα στον χώρο της μηχανής εκτύπωσης. Στη συνέχεια, ένα λέιζερ το οποίο ελέγχεται από έναν υπολογιστή που ορίζει το αντικείμενο που θα πρόκειται να εκτυπωθεί, δίνει κίνηση στην πλατφόρμα και σχηματίζει μία διατομή του αντικειμένου επάνω στην σκόνη. Το λέιζερ θερμαίνει το υλικό πούδρας είτε λίγο κάτω από το σημείο βρασμού (φαινόμενο σύντηξης), είτε λίγο πάνω από το σημείο βρασμού (φαινόμενο τήξης). Η διαδικασία αυτή ενώνει τα σωματίδια του υλικού πούδρας και σχηματίζει μία στέρεη μορφή. Εφόσον η αρχική στρώση του αντικειμένου έχει σχηματιστεί, η πλατφόρμα της μηχανής εκτύπωσης μετακινείται προς τα κάτω, συνήθως λιγότερο από 0,1 χιλιοστά, δίνοντας χώρο για να σχηματιστεί η επόμενη στρώση του εκτυπώμενου αντικειμένου με την ίδια ακριβώς διαδικασία που περιγράψαμε παραπάνω. Η διαδικασία συνεχίζεται διαδοχικά έως ότου εκτυπωθεί ολόκληρο το αντικείμενο με διαδοχικές στρώσεις. Όταν το αντικείμενο σχηματιστεί πλήρως, αφήνεται ώστε να ψυχθεί μέσα στη μηχανή εκτύπωσης πριν μπορέσουμε να το μετακινήσουμε. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους τρισδιάστατης εκτύπωσης, η διαδικασία σύντηξης υλικού με λέιζερ, απαιτεί πολύ μικρή χρήση πρόσθετου εξοπλισμού και εργαλείων εφόσον το αντικείμενο εκτυπωθεί. Αυτό σημαίνει ότι το αντικείμενο συνήθως δεν χρειάζεται να αλλοιωθεί με κάποιο τρόπο ή να λειανθεί αφού το βγάλουμε από τη μηχανή της εκτύπωσης. Επίσης η διαδικασία σύντηξης με λέιζερ δεν απαιτεί τη χρήση άλλων μορφών επιπρόσθετης υποστήριξης ώστε να συγκρατείται το αντικείμενο κατά τη διαδικασία της εκτύπωσης. Τέτοιες μορφές υποστήριξης του αντικειμένου σε άλλες μεθόδους είναι συνήθως απαραίτητες, όπως τη στερεολιθογραφία ή στην εναπόθεση υλικού, κάνοντας αυτές τις μεθόδους περισσότερο χρονοβόρες.

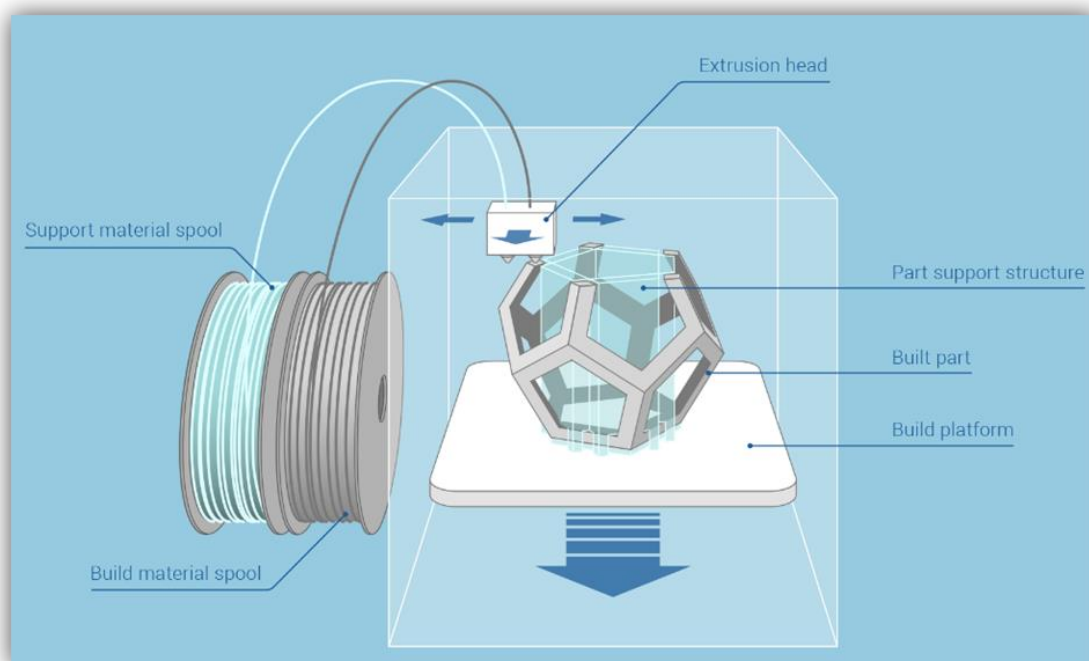


Εικόνα 2.2 Σχηματική απεικόνιση της τεχνολογίας σύντηξης υλικού με λέιζερ

2.3 Εναπόθεση λιωμένου υλικού (Fused Deposition Modeling)

Αντικείμενα που δημιουργούνται με εκτύπωση εναπόθεσης υλικού ξεκινούν ως ένα ψηφιακό αρχείο CAD που δημιουργείται σε κάποιο πρόγραμμα ψηφιακού σχεδιασμού. Πριν ξεκινήσει να εκτυπώνεται η επιθυμητή γεωμετρία που έχουμε σχεδιάσει, το αρχείο CAD θα πρέπει να μετατραπεί σε μία μορφή αρχείου την οποία ο τρισδιάστατος εκτυπωτής μπορεί να διαβάσει. Συνήθως, τέτοιες μορφές αρχείων είναι τα αρχεία STL. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές FDM χρησιμοποιούν δύο είδη υλικών εκτύπωσης. Το πρώτο υλικό είναι αυτό το οποίο χρησιμοποιεί ο εκτυπωτής ώστε να σχηματίσει την επιθυμητή γεωμετρία και από το οποίο αποτελείται το τελικό αντικείμενο και το δεύτερο υλικό είναι η λεγόμενη υποστήριξη της σχηματιζόμενης γεωμετρίας το οποίο λειτουργεί ως βάση και υποστήριξη του αντικειμένου κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης. Κατά τη διαδικασία της τρισδιάστης εκτύπωσης τα συγκεκριμένα υλικά τροφοδοτούνται στον εκτυπωτή μέσω κάποιων κυλίνδρων στους οποίους είναι τυλιγμένα τα υλικά σε μορφή νήματος και με έναν μηχανισμό ώθησης (extruders) ο οποίος σπρώχνει το υλικό μέσα στον μηχανισμό εκτύπωσης καθώς το αντικείμενο εκτυπώνεται μέσω ενός ακροφύσιου ώθησης υλικού. Όταν το υλικό φτάσει στο ακροφύσιο, αυτό λιώνει και εξωθείται επάνω στην πλατφόρμα όπου χτίζεται το αντικείμενο. Και το ακροφύσιο εξώθησης και η πλατφόρμα ελέγχονται από έναν υπολογιστή ο οποίος μεταφράζει τις διαστάσεις του αντικειμένου σε συντεταγμένες

στον χώρο X, Y και Z τις οποίες ακολουθούν και το ακροφύσιο εξώθησης και η πλατφόρμα. Σε μία τυπική τέτοια μέθοδο εκτύπωσης, το ακροφύσιο εξώθησης κινείται σε σχέση με την πλατφόρμα εκτύπωσης οριζόντια και κάθετα, σχηματίζοντας έτσι μία λεπτή στρώση της διατομής του αντικειμένου. Αυτή η λεπτή στρώση πλαστικού ψύχεται και σκληραίνει αμέσως μετά την εναπόθεσή του και είναι έτοιμοι ώστε να δεχθεί την αμέσως επόμενη στρώση. Όταν μία στρώση από τη διατομή του αντικειμένου ολοκληρωθεί, η πλατφόρμα εκτύπωσης μετακινείται προς τα κάτω ώστε να αφήσει ελεύθερο χώρο για την επόμενη στρώση που πρόκειται να εκτυπωθεί. Όταν το αντικείμενο εκτυπωθεί και εξέλθει από το μηχάνημα της τριδιάστατης εκτύπωσης, το υλικό υποστήριξης αφαιρείται είτε με εμβάπτιση του αντικειμένου μέσα σε νερό και ενός διαλύματος το οποίο καταστρέφει τα υποστηρίγματα ή, στην περίπτωση των θερμοπλαστικών υποστηριγμάτων μπορούμε να τα αφαιρέσουμε με το χέρι χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία.

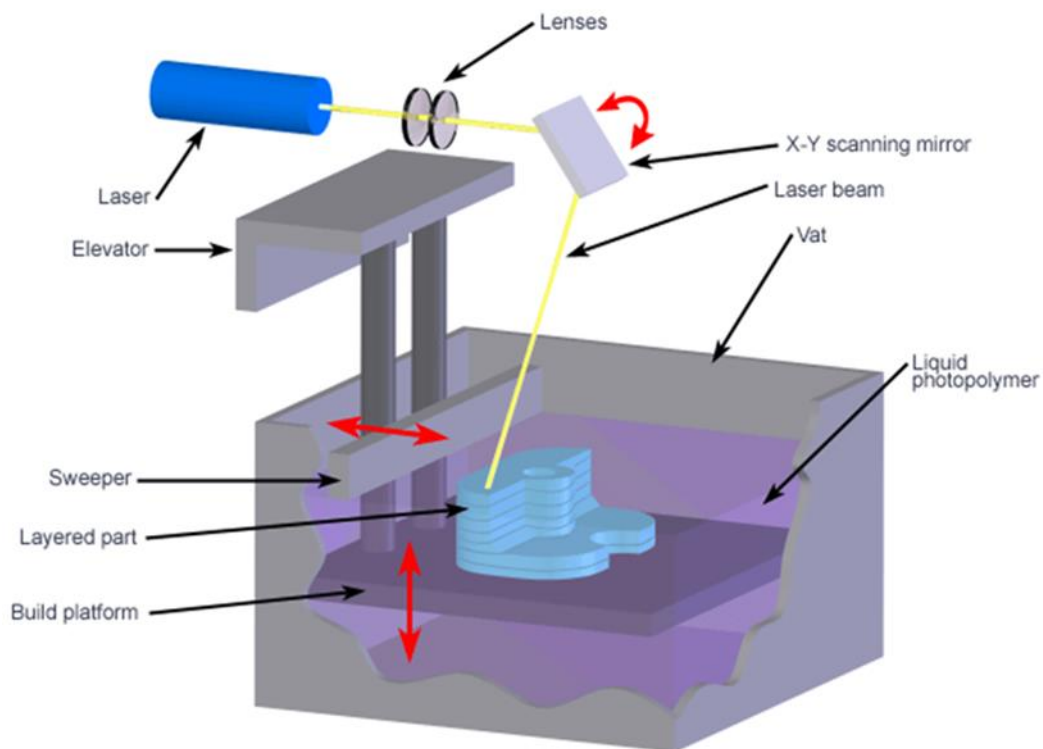


Εικόνα 2.3 Σχηματική απεικόνιση της τεχνολογίας εναπόθεσης υλικού για τον σχηματισμό τριδιάστατης δομής

2.4 Στερεολιθογραφία (Stereolithography)

Η στερεολιθογραφία (SLA) είναι μία από μεθόδους τριδιάστης εκτύπωσης που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία 3D εκτυπωμένων αντικειμένων. Είναι η διαδικασία με την οποία ένα μοναδικά σχεδιασμένο 3D αντικείμενο, μετατρέπει το υγρό πλαστικό σε στερεό αντικείμενο. Στο αρχικό στάδιο της διαδικασίας SLA, ένα λεπτό στρώμα φωτοπολυμερούς, συνήθως μεταξύ 0,05-0,15 χιλιοστών, είναι εκτεθειμένο πάνω από μια διάτρητη πλατφόρμα. Το λέιζερ με χρήση UV ακτινοβολίας

χτυπά την διάτρητη πλατφόρμα, σχηματίζοντας έτσι το αντικείμενο που εκτυπώνεται. Το χρησιμοποιούμενο υγρό σκληραίνει ακαριαία όταν εκτίθεται στο λέιζερ και σχηματίζει το πρώτο στρώμα του τρισδιάστατου αντικείμενου. Όταν το αρχικό στρώμα του αντικείμενου έχει σκληρύνει, η πλατφόρμα χαμηλώνει, εκθέτοντας μια νέα επιφάνεια για το πολυμερές υγρό. Το λέιζερ στη συνέχεια σχηματίζει μία εγκάρσια διατομή του αντικείμενου που εκτυπώνεται, η οποία συνδέεται άμεσα με το ήδη σκληρό τμήμα που βρίσκεται κάτω από αυτό. Η πλατφόρμα κατόπιν ανυψώνεται όταν το τρισδιάστατο εκτυπωμένο αντικείμενο έχει σχηματιστεί. Στη συνέχεια αφού το ξεπλύνουμε με έναν υγρό διαλύτη για να καθαριστεί από την περίσσεια ποσότητας ρητίνης, το αντικείμενο ψήνεται σε ένα φούρνο με υπεριώδης ακτίνες ώστε να σχηματοποιήσει πλήρως το πλαστικό. Αντικείμενα που σχηματίζονται με την μέθοδο της στερεολιθογραφίας έχουν γενικά λείες επιφάνειες, αλλά η ποιότητα τους εξαρτάται από την ποιότητα της μηχανής που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση.



Εικόνα 2.4 Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας της Στερεολιθογραφίας

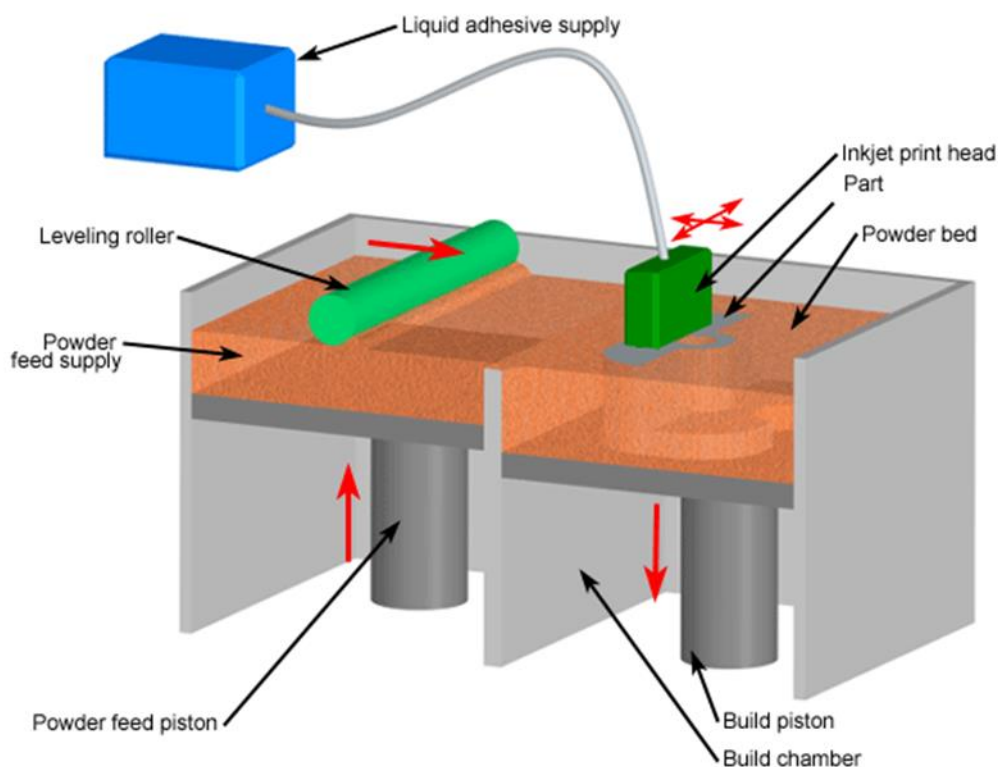
2.5 Εκτύπωση σε τρεις διαστάσεις (Three Dimensional Printing)

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μία διαδικασία η οποία αναπτύχθηκε στο τεχνολογικό ινστιτούτο της Μασαχουσέτης. Όπως και οι υπόλοιπες τεχνικές προσθετικής διαδικασίας δημιουργεί αντικείμενα με πολύ γρήγορο ρυθμό απευθείας από ένα μοντέλο CAD. Με τον υψηλό βαθμό ευελιξίας της μπορεί να δημιουργήσει κάθε γεωμετρία και από οποιοδήποτε υλικό, συμπεριλαμβανομένων των κεραμικών, των

μετάλλων, πολυμερών και σύνθετων υλικών. Ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής είναι ένα εργαλείο για άμεση ψηφιακή κατασκευή που εκτυπώνει επιλεκτικά ένα υγρό συνδετικό υλικό μέσα σε ένα στρώμα πούδρας ώστε να σχηματιστεί ένα αντικείμενο του οποίου το σχήμα έχει καθοριστεί από το μοντέλο CAD. Ένα επιτυχημένο αποτέλεσμα δεν περιλαμβάνει μόνο τη διαδικασία εκτύπωσης αλλά και τον κατάλληλο συνδυασμό της πούδρας και του συνδετικού υλικού, τα οποία παίζουν κρίσιμο ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων που παράγονται.

Χρησιμοποιώντας τεχνολογία παρόμοια με αυτής της ink-jet εκτύπωσης, ένα συνδετικό υλικό ενώνει επιλεκτικά τα σωματίδια της πούδρας σε προκαθορισμένα σημεία όπου το αντικείμενο επρόκειτο να σχηματιστεί. Στη συνέχεια ένας μηχανισμός εμβόλου που υποστηρίζει το στρώμα της πούδρας χαμηλώνει και το συνδετικό υλικό λειτουργεί για να σχηματίσει την επόμενη στρώση στο υλικό πούδρας. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου το αντικείμενο σχηματιστεί πλήρως.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση διαθέτει μία σειρά από πλεονεκτήματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει σχήματα που είναι δύσκολο ή και αδύνατο να κατασκευαστούν με παραδοσιακές τεχνικές.



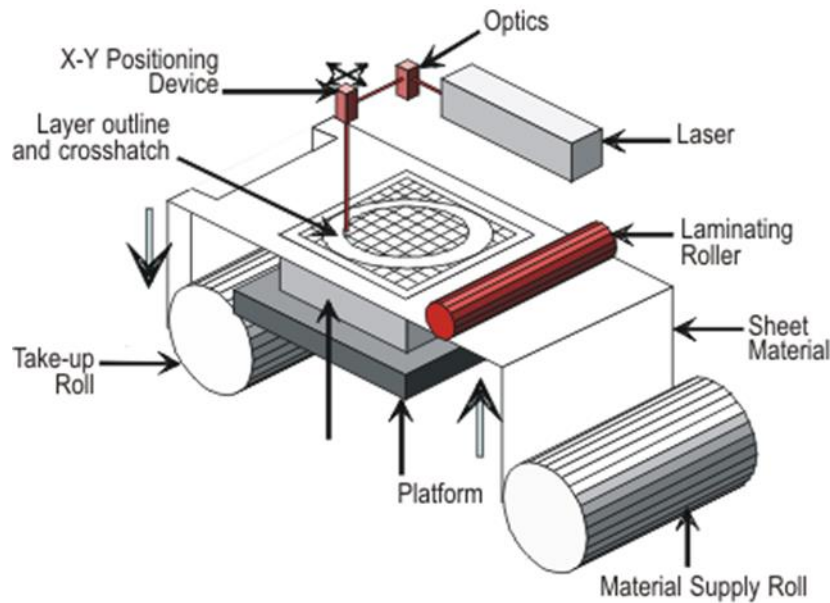
Εικόνα 2.5 Σχηματική απεικόνιση τεχνολογίας εκτύπωσης αντικειμένου σε τρεις διαστάσεις

2.6 Αντικείμενα κατασκευασμένα με διαδοχικές στρώσεις (Laminated Object Manufacturing)

Η συγκεκριμένη μέθοδος κατασκευής είναι μία ταχεία τεχνική κατασκευής πρωτοτύπων. Διαδοχικές στρώσεις υλικού χαρτιού, πλαστικού ή μετάλλου κολλούνται και σχηματίζουν μία συμπαγή δομή. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται μία μέθοδος κοπής, συνήθως κοπή με λέιζερ, και η δομή σχηματίζει την επιθυμητή γεωμετρία. Η μέθοδος μπορεί να χαρακτηριστεί και ως υβριδική αφού χρησιμοποιεί προσθετικές και αφαιρετικές διεργασίες. Κάθε στρώμα είναι συνδεδεμένο με το προηγούμενο με επίστρωση κόλλας που ενεργοποιείται από ένα θερμαινόμενο στοιχείο κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Αντικείμενα που έχουν κατασκευαστεί με τη συγκεκριμένη μέθοδο μπορούν να τροποποιηθούν περαιτέρω με μηχανική κατεργασία.

Η διαδικασία κατασκευής του αντικειμένου ξεκινά με την τροφοδότηση του υλικού επιστρώματος στην πλατφόρμα. Κάθε επίστρωση έχει πάνω του μία ουσία κόλλας η οποία ενεργοποιείται θερμικά. Ένας θερμαινόμενος κύλινδρος από ανοξείδωτο χάλυβα παρέχει την απαιτούμενη πίεση ώστε να φέρει κάθε μία στρώση σε επαφή με τις προηγούμενες και προκαλεί επαρκή συγκόλληση. Κάθε στρώμα κόβεται και μορφοποιείται με ένα λέιζερ στη διατομή που έχει ορίσει το αρχείο CAD. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας η πλατφόρμα κινείται προς τα κάτω και αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί ο σχηματισμός του αντικειμένου. Το περισσευούμενο υλικό που έχει μείνει για την καλύτερη υποστήριξη, αφαιρείται στο τέλος με το χέρι.

Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου προσθετικής κατασκευής σε σχέση με τις υπόλοιπες είναι η μειωμένη παραμόρφωση του αντικειμένου, η υψηλή αντοχή και η χαμηλή ευθραστότητα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η δυνατότητά της να κατασκευάζει αρκετά μεγάλα αντικείμενα, το οποίο είναι ο στόχος και των υπόλοιπων μεθόδων. Επιπροσθέτως, η μέθοδος διάφορα οργανικά και ανόργανα υλικά με διαφορετικές και μηχανικές ιδιότητες μπορούν να επεξεργαστούν δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να επεκταθούν στην επιλογή υλικού. Τέλος, το κόστος της μηχανής και συνολικά της διαδικασίας είναι χαμηλότερο σε σχέση με άλλα συστήματα με αποτέλεσμα το μειωμένο κόστος παραγωγής. Ωστόσο, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα. Η μέθοδος δεν είναι ιδανική για τη δημιουργία περίπλοκων γεωμετριών λόγω της αδυναμίας να κατασκευάσει κοίλες επιφάνειες και η λεπτομέρεια των αντικειμένων είναι σχετικά χαμηλή. Έτσι, η δυνατότητα της τεχνολογίας εφαρμόζεται καλύτερα σε μεγάλα και συμπαγή μοντέλα με χαμηλή πολυπλοκότητα στη γεωμετρία και ιδανικότερα στην κατασκευή πρωτοτύπων με μικρό κόστος.



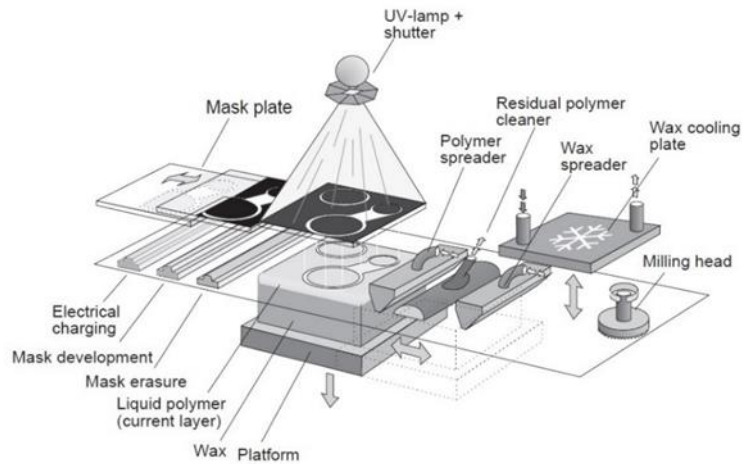
Εικόνα 2.6 Σχηματική απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης σε διαδοχικές στρώσεις υλικού

2.7 Μέθοδος σκλήρυνσης με υπεριώδη ακτινοβολία σε φωτοπολυμερές υγρό (Solid Ground Curing)

Η μέθοδος χρησιμοποιεί τη βασική αρχή της προσθετικής διαδικασίας και χρησιμοποιείται για την παραγωγή μοντέλων και πρωτοτύπων. Η κατασκευή κάθε στρώματος γίνεται με τη χρήση ενός λαμπτήρα υπεριώδους ακτινοβολίας υψηλής ισχύος και φωτοευαίσθητου υγρού. Πριν τη διαδικασία το μοντέλο διαχωρίζεται σε λεπτές στρώσεις και στη συνέχεια ξεκινά η διαδικασία της σκλήρυνσης στις διαστάσεις της διατομής του αντικειμένου. Η διατομή κάθε στρώματος υπολογίζεται με βάση το γεωμετρικό μοντέλο και το πάχος του κάθε στρώματος. Η πλατφόρμα του μηχανήματος είναι καλυμμένη με το υγρό και κάθε στρώση σχηματίζεται επάνω στην προηγούμενη με την χρήση της ακτινοβολίας. Στη συνέχεια το υπολειμματικό υγρό απομακρύνεται και μία ρευστή ουσία απλώνεται πάνω στο αντικείμενο για να γεμίσει τα κενά στη γεωμετρία. Η ουσία στερεοποιείται με μέθοδο ψύξης και το μοντέλο ολοκληρώνεται.

Η ποιότητα του μοντέλου από αρκετούς παράγοντες, όπως είναι το πάχος της κάθε στρώσης και ο χρόνος έκθεσης του φωτοπολυμερούς υγρού στην υπεριώδη ακτινοβολία. Επίσης ο χρόνος ψύξης και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής μπορούν επηρεάσουν την ποιότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου. Το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος εκτύπωσης είναι η έλλειψη υποστηριγμάτων για την στήριξη της δομής αφού χρησιμοποιείται ρευστή

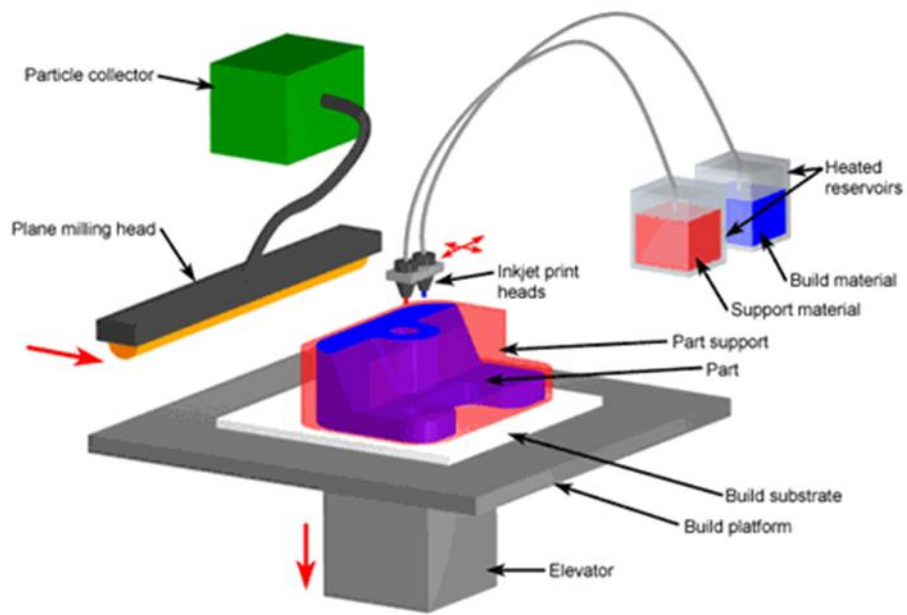
ουσία για την πλήρωση τυχόν κενών. Τα μοντέλα που σχηματίζονται με την συγκεκριμένη διαδικασία έχουν καλή ακρίβεια και ποιότητα. Το μειονέκτημα είναι το υψηλό λειτουργικό κόστος λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος. Επίσης, λόγω των πολλαπλών κεφαλών μπορούμε να κατασκευάσουμε εξαιρετικά λεπτομερή αντικείμενα με πολύ καλή ποιότητα.



Εικόνα 2.7 Σχηματική απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης με χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας και πολυμερούς υλικού

2.8 Μοντελοποίηση τεχνολογίας multi-jet (Multi Jet Modelling)

Η τεχνολογία multi-jet είναι μία διαδικασία ταχείας προτυποποίησης. Η κεφαλή εκτύπωσης αποτελείται από 96 ακροφύσια πολύ μικρού μεγέθους τα οποία εναποθέτουν υλικό σε μία πλατφόρμα κατασκευής. Το υλικό προσκολλάται στην προηγούμενη στρώση της διατομής που έχει σχηματιστεί χρησιμοποιώντας την θερμική του ενέργεια. Όταν η στρώση ολοκληρωθεί η πλατφόρμα χαμηλώνει και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του μοντέλου. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την υποστήριξη του μοντέλου είναι φωτοπολυμερές και γι' αυτό απαιτείται υπεριώδης ακτινοβολία κατά τη διαδικασία αφαίρεσης. Αυτό προσφέρει ένα σημαντικό πλεονέκτημα, καθώς μετά το τέλος της διαδικασίας έχουμε ένα ολοκληρωμένο αντικείμενο χωρίς να χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 2.8 Σχηματική απεικόνιση τρισδιάστατης εκτύπωσης με την τεχνολογία multi-jet

Κεφάλαιο 3 Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης στην σημερινή βιομηχανία

3.1 Οι τεχνολογικές δυνατότητες της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Το κατά πόσο μία εφαρμογή τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι τεχνικά εφαρμόσιμη ή οικονομικά εφικτή, εξαρτάται κυρίως από τον που θέλουμε να παράξουμε, το μέγεθος του αντικειμένου, την πολυπλοκότητα στην μορφολογία του και το κόστος του υλικού που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος σε εφαρμογές όπου το αντικείμενο μας έχει μικρό μέγεθος αλλά υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας και το μέγεθος παραγωγής αναφέρεται σε μικρούς όγκους. Η μέθοδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι οικονομικά αποτελεσματική και αποδοτική συνήθως σε βαθμούς παραγωγής από 50 έως 5.000 μονάδες με κάνοντας χρήση πλαστικού υλικού με τη μέθοδο της έγχυσης. Στο μέλλον, σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει, το εύρος της παραγωγικότητας θα αυξηθεί αφού το κόστος των πρώτων υλών μειώνεται. Οι μείωση αυτή θα κάνει αρκετούς κατασκευαστές να μεταπηδήσουν σε τέτοιε τεχνολογίες και να παράγουν ολοκληρωμένα καταναλωτικά προϊόντα μέσω των μεθόδων αυτών. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές είναι όπως αναφέραμε και παραπάνω ιδανική για την δημιουργία εξαρτημάτων με μικρό μέγεθος. Λόγω των πλεονεκτημάτων και των πολλαπλών δυνατοτήτων που έχει η συγκεκριμένη τεχνολογία, το εύρος των εφαρμογών που χρησιμοποιείται έχει πλέον αυξηθεί. Παλαιότερες τεχνολογίες τρισδιάστατων εφαρμογών παράγαν αντικείμενα ή εξαρτήματα τα οποία ήταν συνήθως εύθραστα και χρειαζόντουσαν περαιτέρω επιφανειακή επεξεργασία. Τα τελευταία χρόνια, το εύρος των υλικών που χρησιμοποιούνται έχει αυξηθεί σημαντικά. Παταδείγματα υλικών που χρησιμοποιούνται πλέον σε τρισδιάστατες εφαρμογές είναι το αλουμίνιο, το τιτάνιο, κεραμικά, πολυμερή και αρκετά άλλα υλικά.

Μικρού όγκου παραγωγές που χρησιμοποιούν μεθόδους τρισδιάστατων εκτυπώσεων περιλαμβάνουν συνήθως και εφαρμογές εξατομικευσης προϊόντων, προτυποποιήσεις, αντικαταστάσεις εξαρτημάτων και ιατρικά προϊόντα. Τέτοιες εφαρμογές αναφέρονται συνήθως σε υψηλής σημασίας και αξίας αντικείμενα τα οποία είτε είναι εξατομικευμένα είτε παράγονται σε πολύ μικρές ποσότητες. Με μαζική παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων οι κατασκευαστές έχουν τη δυνατότητα να εγκαταστήσουν μηχανήματα τρισδιάστατων εκτυπωτών και να δημιουργούν εκτυπωμένα αντικείμενα και εξαρτήματα για οποιαδήποτε εφαρμογή. Μολονότι τέτοιου είδους εξατομικευμένα προϊόντα κοστίζουν περισσότερο, οι προβλέψεις αναφέρουν ότι η διαφοροποίηση στην τιμή θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου.

Όπως αναφέραμε παραπάνω, η τρισδιάστατη εκτύπωση χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάπτυξη προτοτύπων. Εφόσον έχουμε τη δυνατότητα να επεξεργαστούμε και να παρατηρήσουμε αντικείμενα στον υπολογιστή σε ψηφιακή μορφή, πολλοί σχεδιαστές νέων προϊόντων έχουν την ανάγκη να επεξεργαστούν, να εξετάσουν και αγγίξουν ένα

νέο προϊόν προτού μία εταιρεία καταλήξει ώστε να κάνει μία μεγάλη επένδυση. Το δεύτερο και μεγαλύτερο πλεονέκτημα της προτοτηποποίησης με τρισδιάστατη εκτύπωση είναι η δυνατότητα να παράγεις προτότυπα γρήγορα και μάλιστα σε διαφορετικές εκδοχές, σε αντίθεση με τον πιο παραδοσιακό τρόπο σε κάποιο εργαστήριο το οποίο είναι ιδιαίτερα χρονοβόρο και κοστολογικά αυξημένο.

3.2 Η μείωση του βιομηχανικού κόστους με την χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Με την χρήση εφαρμογών της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το ρίσκο ή κίνδυνος ενός αποτυχημένου σχεδιασμού ενός προϊόντος ωφείλεται κυρίως στην κακή διαχείριση του χρόνου παρά στην επένδυση. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ο διαχωρισμός μεταξύ του σχεδιασμού ενός προϊόντος και των δυνατοτήτων κατασκευής και παραγωγής. Εφόσον ο σχεδιασμός και η κατασκευή μπορούν εύκολα να ανατεθούν σε μία μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης, οι σχεδιαστές μπορούν να έρθουν σε επαφή με εταιρείες με στόχο να παράγουν τα σχέδιά τους. Σε διαφορετική περίπτωση, οι καταναλωτές μπορούν να αποκτήσουν διαδικτυακά ένα αρχείο ψηφιακού σχεδιασμού ή κάποιο πρόγραμμα ψηφιακής σχεδίασης και θα έχουν τη δυνατότητα να εκτυπώσουν τρισδιάστατα ένα εξάρτημα που θέλουν να ανατικαταστήσουν για ίδια χρήση.

Σήμερα, οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές μπορούν να χρησιμοποιήσουν υλικά όπως πλαστικά, ρητίνες, και μέταλλα με βαθμό ακριβείας σχεδόν στο ένα δέκατο του χιλιοστού. Ο ρομποτικός εξοπλισμός των τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι πλέον αρκετά γρήγορος και αξιόπιστος και μπορεί να ανταπεξέλθει σε βιομηχανικές εφαρμογές ανάλογα με τις απαιτήσεις και το προϊόν. Όλοι αυτοί οι παράγοντες αλλά και πολλοί άλλοι, όπως η σταθερότητα που σχετίζεται μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων και μπορεί να προκαλέσει αστοχίες κάτω από ορισμένες συνθήκες καταπόνησης, εξετάζονται και βελτιώνονται συνεχώς. Επιπροσθέτως, η αντοχή των υλικών που χρησιμοποιούνται, η σταθερότητα και η αξιοπιστία των διαστάσεων, η αντίσταση στην θερμότητα και την υγρασία είναι επίσης παράγοντες που χρήζουν συνεχής βελτίωσης αφού είναι πολύ κρίσιμες μεταβλητές σε περιβάλλοντα συνεχών καταπόνησης.

Καθώς οι τιμές των πρώτων υλών μειώνονται και τα υλικά βελτιώνονται, η χρήση των τρισδιάστατων εφαρμογών επεκτείνεται πέραν της παρούσας εφαρμογής τους. Εφαρμογές που έχουν να κάνουν με πιο εξειδικευμένη μηχανική θα αυξηθούν με στόχο να καλυφθούν σημαντικές ανάγκες στη βιομηχανία για μεγαλύτερες εφαρμογές και στις ανάγκες μίας πιο εξατομικευμένης προσέγγισης πάντα σε σχέση με την μείωση του κόστους και την αύξηση της παραγωγικότητας.

Κεφάλαιο 4 Εφαρμογές της τρισδιάστατης εκτύπωσης στη βιομηχανία

4.1 Εφαρμογές των τρισδιάστατων εκτυπώσεων

Τα τελευταία χρόνια οι ανάγκες για την αύξηση της παραγωγικότητας, τη μείωση του κόστους στη βιομηχανία αλλά και τις σύγχρονες ανάγκες μίας πιο εξατομικευμένης και στοχευμένης βιομηχανοποίησης, έχουν ωθήσει την ανάπτυξη των τρισδιάστατων εφαρμογών σε ένα πολύ υψηλό επίπεδο. Το φάσμα των εφαρμογών έχει πλέον αυξηθεί και δεν περιορίζεται μόνο σε μονοδιάστατη κλίμακα. Παρακάτω, παραθέτουμε κάποια παραδείγματα βιομηχανιών, οι οποίες χρησιμοποιούν την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης με σκοπό να αναπτύξουν νέα προϊόντα με υψηλό βαθμό εξατομικεύσης και σχηματικής πολυπλοκότητας.

4.2 Ιατρική βιομηχανία

Οι προοπτικές των τρισδιάστατων εκτυπωτών για χρήση στην ιατρική βιομηχανία εξελίσσεται σε ένα εξαιρετικά γρήγορο ρυθμό καθώς οι ειδικοί έχουν ξεκινήσει να χρησιμοποιούν τρισδιάστατες μεθόδους εκτύπωσης σε πιο προχωρημένο και εξελιγμένο στάδιο. Πολλοί ασθενείς σε ολόκληρο τον κόσμο βιώνουν τη βελτίωση της ιατρικής περίθαλψης μέσω τρισδιάστατων εκτυπωμένων μοσχευμάτων και προσθετικών μελών όπως δεν ήταν ποτέ άλλοτε.

Η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών στην ιατρική είναι κατά πού υποσχόμενη, καθώς η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να σώσει ανθρώπινες ζωές ή να βελτιώσει δραματικά το βιοτικό επίπεδο των ασθενών. Οι τρισδιάστατες εκτυπώσεις μπορεί να χρειάζονται κάποια χρόνια ακόμα ώστε να ενταχθούν πλήρως στην ιατρική βιομηχανία. Πρόσφατες όμως έρευνες και δοκιμές εξέλιξης ώστε να δημιουργηθούν ιστοί, όργανα, οστά και προσθετικά μέλη δείχνουν πολύ ενθαρρυντικές και ελπιδοφόρες με στόχο την βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των ασθενών.

Τέλος, η κατασκευή προσθετικών μελών είναι επίσης πολύ σημαντικός τομέας στην ιατρική βιομηχανία, εφόσον η χρήση των τρισδιάστατων εκτυπώσεων είναι ιδανική για περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε εξατομικεύση, μικρού όγκου παραγωγής και χαμηλού βάρους αλλά ανθεκτικής κατασκευής. Η τρισδιάστατη εκτύπωση επιτρέπει στα άτομα που έχουν χάσει κάποιο μέλος τους, να αποκτήσουν αυτό ακριβώς που χρειάζονται με βάση την εμφάνιση, την αίσθηση, το μέγεθος, το βάρος, σε συνάρτηση πάντα με την ποιότητα της κατασκευής και της αξίας.



Εικόνα 4.1 Προσθετικό μέλος κατασκευασμένο σε τρισδιάστατο εκτυπωτή

4.3 Αεροπορική και αεροδιαστημική βιομηχανία

Η ανάπτυξη στην χρήση των τρισδιάστατων μεθόδων εκτύπωσης στις αεροπορικές βιομηχανίες συνδέεται άμεσα με την εξέλιξη και σε άλλες βιομηχανίες όπως είναι η κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών με προσθετική μέθοδο των μετάλλων (additive manufacturing process). Όπως πολλές άλλες βιομηχανίες έτσι και οι αεροπορικές και αεροδιαστημικές βιομηχανίες αξιοποιούν τις τεχνολογίες της τρισδιάστατης εκτύπωσης ώστε να βελτιώσουν την αποδοτικότητά τους σε σχέση με την ποιότητα αλλά και το κόστος, να μειώσουν τις απαιτήσεις συντήρησης και να εξοικονομήσουν το κόστος των καυσίμων χρησιμοποιώντας ελαφρύτερα εξαρτήματα.



Εικόνα 4.2 Εξάρτημα τυπωμένο με τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης

4.4 Αυτοκινητοβιομηχανία

Εάν και οι αυτοκινητοβιομηχίες ήταν από τους πρώτους μεταξύ των υπολοίπων οι οποίες υιοθέτησαν τις μεθόδους των τρισδιάστατων εκτυπώσεων για την κατασκευή προτοτύπων σε επίπεδο ολοκληρωμένων οχημάτων αλλά και εξαρτημάτων, δεν έχει προσαρμοστεί ακόμα πλήρως σε πιο υψηλό επίπεδο στην κατασκευή οχημάτων.

Στις μέρες μας, η χρήση τρισδιάστατων μεθόδων περιλαμβάνει από σχετικά απλές εφαρμογές στη δημιουργία νέων μοντέλων και την αξιολόγησή τους σε σχεδιαστικό και πρακτικό επίπεδο, μέχρι και τη δημιουργία λειτουργικών εξαρτημάτων τα οποία χρησιμοποιούνται σε δοκιμαστικά οχήματα και μηχανές. Πολύ σημαντική όπως αναφέραμε και παραπάνω είναι η δημιουργία των προτοτύπων τα οποία χρησιμοποιούνται για την αεροδυναμική απόδοση και αξιολόγηση ενός οχήματος. Με την χρήση των τρισδιάστατων εκτυπωτών, οι κατασκευάστριες εταιρείες μπορούν να κατασκευάσουν πολλαπλές διαδοχές προτοτύπων ενός σχεδίου που βρίσκεται προς αξιολόγηση και να δοκιμάσουν τις διάφορες του, χωρίς να καταναλώνουν χρήματα και πολύτιμο χρόνο στην κατασκευή ενός προτοτύπου.



Εικόνα 4.3 Πολύπλοκες εκτυπωμένες γεωμετρίες για την αυτοκινητοβιομηχανία

4.5 Αμυντική βιομηχανία

Τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται στους αμυντικούς εξοπλισμούς πρέπει να είναι ανθεκτικά, στιβαρά και πάνω απ' όλα αξιόπιστα, καθώς μία αστοχία ενός υλικού μπορεί να οδηγήσει σε κίνδυνο για μία ανθρώπινη ζωή. Με στόχο την αξιοπιστία, οι τεχνολογίες των τρισδιάστατων εκτυπώσεων στοχεύουν πλέον στο να κατασκευάζουν καλύτερα και ποικιλιότερα προϊόντα με σκοπό να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν στην αμυντική βιομηχανία, η οποία είναι πολύ απαιτητική λόγω των καταπονήσεων και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Στο μέλλον, είναι πολύ πιθανό για την αμυντική βιομηχανία, να χρησιμοποιούνται τρισδιάστατοι εκτυπωτές σε πεδία μάχης, οι οποίοι θα χρησιμοποιούνται απευθείας ώστε να εκτυπώνουν ένα χαλασμένο εξάρτημα, που σε αντίθετη περίπτωση θα έπρεπε να το προμηθευτούν από την κατασκευάστρια εταιρεία. Η δυνατότητα να παραχθούν πραγματικά και λειτουργικά προτότυπα όπου ομάδες ανθρώπων μπορούν να αξιολογήσουν και να χρησιμοποιήσουν για τέτοιους σκοπούς, γεφυρώνει το χάσμα που υπάρχει μεταξύ του ψηφιακού σχεδίου και του τελικού προϊόντος.



Εικόνα 4.4 Στρατιωτικός εξοπλισμός εκτυπωμένος σε τρισδιάστατο εκτυπωτή προσαρμοσμένο σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη

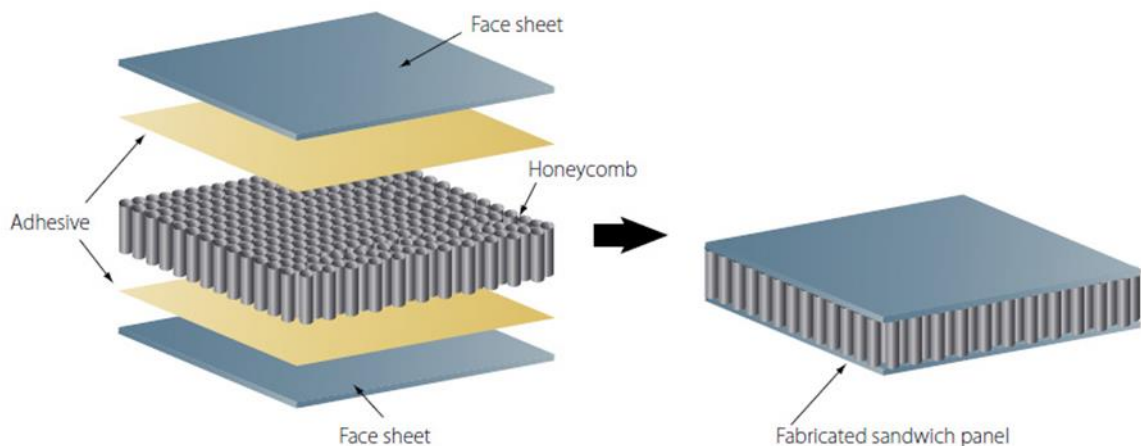
4.6 Το μέλλον της τρισδιάστατης εκτύπωσης

Προβλέπεται από κάποιους υποστηρικτές των τεχνολογιών της τρισδιάστατης εκτύπωσης ότι η συγκεκριμένη τεχνολογική ανάπτυξη θα αλλάξει την φύση της παραγωγής και του εμπορίου, καθώς οι τελικοί χρήστες θα έχουν τη δυνατότητα να κατασκευάσουν μόνοι τους προϊόντα ή κάποια εξαρτήματα που χρειάζονται αντί να το αποκτήσουν έναντι ενός χρηματικού ποσού από κάποιον κατασκευαστή. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές πλέον είναι σε θέση να εξάγουν αντικείμενα στο επιθυμητό χρώμα και με διαφορετικά υλικά. Η τεχνολογία συνεχίζει να βελτιώνεται έως ότου να είναι σε θέση να εξάγει ποιοτικά και πλήρως λειτουργικά προϊόντα. Με επίδραση στην χρήση ενέργειας, τη μείωση των αποβλήτων, την εξατομίκευση και γενικότερα τον κατασκευαστικό κλάδο, η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει εξελιχθεί πλέον σε ένα πολύ ισχυρό εργαλείο σε πολλούς και διαφορετικούς τομείς.

Κεφάλαιο 5 Πλεγματικές δομές

5.1 Οι πλεγματικές δομές και οι εφαρμογές τους (Sandwich Structures)

Οι πλεγματικές δομές σύνθετων υλικών είναι μία ειδική κατηγορία σύνθετων υλικών τα οποία κατασκευάζονται συνδέοντας δύο λεπτές αλλά δύσκαμπτες στρώσεις σύνθετου υλικού μέσω ενός στιβαρού αλλά χαμηλού βάρους πυρήνα. Το υλικό του πυρήνα είναι συνήθως υλικό σχατικά χαμηλής αντοχής, αλλά το πάχος του δίνει στη δομή επαλληλίας ιδιότητες υψηλής ακαμψίας συνδυάζοντας χαμηλή πυκνότητα. Αφρώδες υλικά τα οποία αποτελούν τον πυρήνα τέτοιων δομών όπως το όπως πολυβινυλοχλωρίδιο, η πολυουρεθάνη, το πολυαιθυλένιο ή το πολυστυρένιο είναι μερικά από τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, κυψελοειδής δομές ενισχύονται με αφρώδο υλικά όπως τα παραπάνω για να ενδυναμώσουν την κατασκευή. Σε μία διαφορετική περίπτωση, οι δομές επαλληλίας μπορούν να κατασκευαστούν από μεταλλικά αφρώδες υλικά (metal foams). Επίσης, ελάσματα από γυαλί ή άνθρακα ενισχυμένα με ίνες, ενισχυμένα θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή χρησιμοποιούνται ευρέως σε τέτοιες εφαρμογές ως υλικά των εξωτερικών λεπτών στρώσεων των δομών. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και ελάσματα μετάλλου. Ο πυρήνας συνδέεται συνήθως με τις εξωτερικές λεπτές στρώσεις με εναπόθεση κολλητικής ουσίας ή με συγκόλληση στην περίπτωση των μετάλλων.



Εικόνα 5.1 Σχηματική απεικόνιση των δομών επαλληλίας

5.2 Οι μορφές και οι τύποι των πλεγματικών δομών

Οι πλεγματικές δομές αποτελούνται από διαφορετικά υλικά τα οποία εξυπηρετούν κάθε φορά διαφορετική περίπτωση. Ένας από τους τύπους αυτών των δομών επαλληλίας αποτελείται από μεταλλικά στοιχεία. Το σύνθετο μεταλλικό υλικό, όπως ονομάζεται, είναι ένας τύπος δομικής επαλληλίας το οποίο αποτελείται από δύο λεπτές στρώσεις μετάλλου οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε πυρήνα πλαστικού υλικού και σχηματίζεται κάτω από συνθήκες ελεγχόμενης πίεσης, θερμοκρασίας και τάσης.

Ένας διαφορετικός τύπος της λεγόμενης δομής “sandwich” αποτελείται από ανακυκλώσιμα υλικά όπως είναι το χαρτί. Το ανακυκλωμένο χαρτί σχηματίζει τις δύο λεπτές στρώσεις της δομής αλλά και το υλικό του πυρήνα, συνήθως σε κυψελοειδή μορφή, δημιουργώντας έτσι μία χαμηλού βάρους δομή, με αρκετά καλές δομικές ικανότητες σε αντοχή, αλλά και πλήρως επαναπολτοποιήσιμο. Τέτοιες δομές επαλληλίας από χαρτί χρησιμοποιούνται κυρίως σε απλές εφαρμογές όπως είναι τα ανακυκλώσιμα έπιπλα, σε εκθεσιακά περίπτερα, σε διαχωριστικά τοίχων ή γραφείων και προστατευτικές συσκευασίες διάφορων οικιακών συσκευών. Τέλος, το σύνθετο υλικό αλουμινίου (aluminium composite material), είναι ένας τύπος σύνθετου υλικού το οποίο αποτελείται από δύο λεπτά φύλλα αλουμινίου τα οποία συνδέονται σε έναν πυρήνα μη μεταλλικού υλικού. Αυτή η μορφή χρησιμοποιείται κυρίως για την εξωτερική επένδυση και την πρόσοψη κτιρίων με σκοπό την μόνωσή τους από τις εξωτερικές συνθήκες. Μία ακόμα πολύ συνηθισμένη εφαρμογή ανά τον κόσμο είναι η κατασκευή πινακίδων και σημάτων αφού το αλουμίνιο είναι ένα υλικό με χαμηλό βάρος και πολύ καλό βαθμό αντοχής σε καταπονήσεις. Εάν το υλικό του πυρήνα αποτελείται από εύφλεκτο υλικό υπάρχει περίπτωση χρήση του συγκεκριμένου σύνθετου υλικού αλουμινίου να αποδειχθεί προβληματικό για την χρήση του σε κτιριακές προσόψεις ή μονώσεις, οπότε θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην χρήση τέτοιων υλικών. Τα φύλλα του αλουμινίου στα εξωτερικά στρώματα του σύνθετου υλικού μπορούν να επικαλυφθούν με πολυεστερική βαφή, με φθοριούχο πολυβινυλιδένιο ή και με άλλα υλικά υλικά, αλλά και να βαφθούν σε οποιοδήποτε χρώμα επιθυμούμε. Αντίστοιχα ο πυρήνας του σύνθετου υλικού αποτελείται από υλικό χαμηλής πυκνότητας όπως είναι το πολυαιθυλένιο ή από τον συνδυασμό υλικών χαμηλής πυκνότητας και ανόργανων υλικών με σκοπό ο πυρήνας να παρουσιάζει ιδιότητες επιβράδυνσης της φωτιάς.

Με βάση τον τύπο του πυρήνα του οποίου ενώνει τις δύο λεπτές εξωτερικές στρώσεις και τον τρόπο με τον οποίο ενώνονται τα δύο στοιχεία, οι δομές επαλληλίας μπορούν να διαχωριστούν σε ξεχωριστές κατηγορίες οι οποίες αφορούν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η δομή επαλληλίας:

- ◆ Ομοιογενής υποστήριξη
- ◆ Τοπική υποστήριξη
- ◆ Τμηματική υποστήριξη
- ◆ Μονοκατευθυντική υποστήριξη
- ◆ Αμφίδρομη υποστήριξη

Η τελευταία κατηγορία αποτελείται από κυψελοειδή μορφή του πυρήνα η οποία με βελτίωση της απόδοσης στον λόγο βάρους, χρησιμοποιείται συνήθως σε πιο

απαιτητικές εφαρμογές στις κατασκευαστικές βιομηχανίες και κυρίως στην αεροναυπηγική.

Η αντοχή του σύνθετου υλικού επαλληλίας εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες: Από τις εξωτερικές στρώσεις: Εάν η δομή επαλληλίας υποστηρίζεται και από τις δύο όψεις και στη συνέχεια εφαρμοστεί πίεση μέσω κάθετης δύναμης στο μέσον της δομής, τότε η ροπή κάμψης θα δώσει στο υλικό δυνάμεις διάτμησης. Η δύναμεις διάτμησης δίνουν στην κατώτερη στρώση τη δομής ιδιότητες διάτμησης και στην ανώτερη στρώση ιδιότητες συμπίεσης. Ο πυρήνας του σύνθετου υλικού διαχωρίζει όπως αναφέρουμε και παραπάνω τις δύο λεπτές εξωτερικές στρώσεις. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του πυρήνα τόσο ισχυρότερο είναι το σύνθετο υλικό. Η ίδια αρχή εφαρμόζεται κατά παρόμοιο τρόπο στην κατασκευή δοκών σε σχήμα I (I-beams).

Από την διεπαφή μεταξύ του πυρήνα και των εξωτερικών στρώσεων: Επειδή οι διατμητικές τάσεις στο σύνθετο υλικό αλλάζουν ταχύτατα μεταξύ του πυρήνα και των λεπτών στρωμάτων, η συγκολλητική στρώση δέχεται και αυτή κάποιους βαθμούς διατμητικών τάσεων. Εάν ο δεσμός κόλλησης μεταξύ των στρώσεων και του πυρήνα είναι αδύναμος, το πιο πιθανό είναι να υπάρξει αστοχία και στη συνέχεια καταστροφή του σύνθετου υλικού.

Η θεωρία των δομών επαλληλίας περιγράφεται από την δομική συμπεριφορά μίας δοκού, ελάσματος ή κελύφους τα οποία αποτελούνται τρεις στρώσεις, δύο λεπτών φύλλων και ενός πυρήνα. Η πιο κοινή θεωρία που χρησιμοποιείται στις δομές επαλληλίας είναι η γραμμική και είναι μία επέκταση της θεωρίας τη δοκού πρώτης τάξεως. Η συγκεκριμένη θεωρία γραμμικής θεώρησης είναι πολύ σημαντική για τον σχεδιασμό, τη μελέτη και την ανάλυση των σύνθετων δομών επαλληλίας οι οποίες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κτιρίων, οχημάτων και την αεροναυπηγική βιομηχανία.

Κάποια από τα σημαντικά πλεονεκτήματα των δομών επαλληλίας είναι:

■ Τα διασταυρούμενα τμήματα της δομής είναι σύνθετα: Συνήθως αποτελούνται από υλικά χαμηλής ή μέτριας αντοχής τα οποία είναι συνδεδεμένα με δύο δύσκαμπτα εξωτερικά πάνελ. Το σύνθετο υλικό έχει μία σημαντικά υψηλότερη ακαμψία στη δάτμηση σε σχέση πάντα με το βάρος σε αντίθεση με κάποιον ισοδύναμο δοκό ο οποίος είναι κατασκευασμένος μόνο από ένα συγκεκριμένο υλικό.

■ Η υψηλή ακαμψία του εξωτερικών φύλλων οδηγεί σε μια μεγάλη ακαμψία ως προς την αναλογία του βάρους για το σύνθετο υλικό. Η συμπεριφορά για παράδειγμα μίας δοκού με διασταυρούμενα τμήματα στο ρόλο του πυρήνα διαφέρει κατά πολύ από μία παραδοσιακή δοκό με μία σταθερή διατομή που ενώνει το άνω και κάτω μέρος του δομικού στοιχείου.

Η θεωρία στις δομές επαλληλίας που χρησιμοποιούνται σε δοκούς, πάνελς ή σε κάποιο κέλυφος συνήθως υποθέτουν ότι η πίεση αναφοράς στις πειραματικές διαδικασίες είναι μηδενική. Παρά ταύτα, κατά την σκλήρυνση, οι διαφορές της θερμοκρασίας μεταξύ των επιφανειών υφίστανται από το γεγονός της θερμικής συμπεριφοράς με το υλικό του πυρήνα. Αυτές οι διαφορές θερμοκρασίας σε συνδυασμό με τις γραμμικές διαστολές μπορεί να οδηγήσουν σε κάμψη της δομής επαλληλίας προς την κατεύθυνση της θερμότερης επιφάνειας. Εάν και η κάμψη μπορεί να περιοριστεί κατά τη διαδικασία

της κατασκευής, κάποιες παραμένουσες τάσεις μπορεί να εμφανιστούν στα στοιχεία του σύνθετου υλικού. Συνήθως, οι παραμορφώσεις και οι τάσεις που δέχεται το δομικό στοιχείο και στην περίπτωση μας η δομή επαλληλίας ακολουθούν μία γραμμικότητα. Ωστόσο, όταν αναμένονται μεγάλες ελαστικές παραμορφώσεις ή ροπές κάμψης, οι αρχικές τάσεις αναφοράς θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο και να ενσωματώνονται στο θεωρητικό επίπεδο.

5.3 Χρήση των πλεγματικών δομών σε μορφή πάνελ

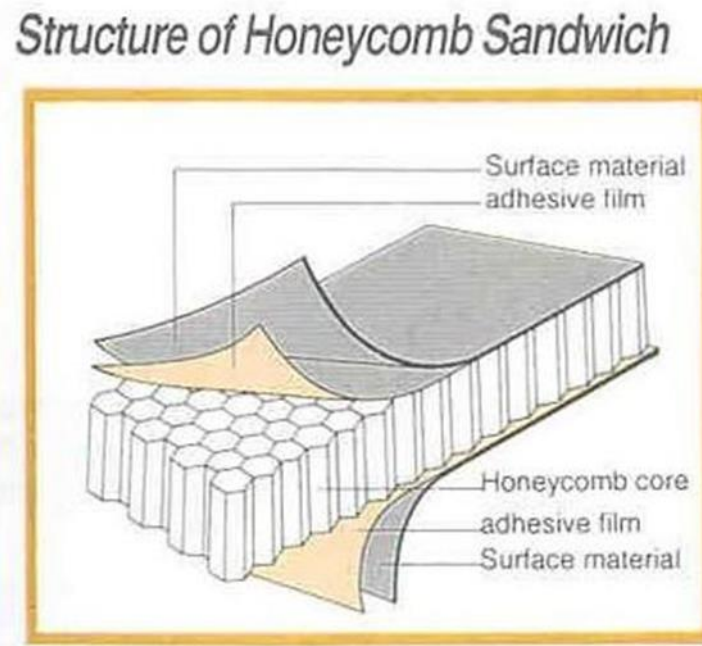
Οι πλεγματικές δομές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πάνελς (sandwich panels) είναι μία κατασκευή η οποία δεν διαφέρει από τα προαναφερόμενα και χαρακτηρίζεται από έναν πυρήνα χαμηλής πυκνότητας ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε δύο σχετικά λεπτές στρώσεις υλικού. Η κατασκευή μίας δομής επαλληλίας της επιτρέπει να επιτύχει εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες με πολύ χαμηλό βάρος κατασκευής. Η πολύ υψηλή απόδοση σε ακαμψία επιτυγχάνεται χάρη στην αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο διαδορετικών υλικών και στην σχηματική συστοιχία του πυρήνα κάτω από καμπτικό φορτίο που εφαρμόζεται στο πάνελ. Ο πυρήνας δέχεται και απορροφά τα φορτία διάτμησης και δημιουργεί μία απόσταση μεταξύ των δύο εξωτερικών φύλλων τα οποία απορροφούν τις διατμητικές τάσεις σε εφελκυσμό και και θλίψη αντίστοιχα για το άνω και κάτω μέρος αφού τα δύο εξωτερικά μέρη του πάνελ υπόκεινται σε διαφορετικού είδους καταπονήσεις.

Η κυψελοειδής μορφή έχει αποδειχθεί η πιο αποδοτική και δομικά σταθερή για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των δομών επαλληλίας σε σχέση πάντα με τις μηχανικές ιδιότητες, τη δομική συμπεριφορά και το βάρος της κατασκευής. Η αεροναυπηγική και η αεροδιαστημική βιομηχανία χρησιμοποιεί ευρέως τις δομές επαλληλίας με πυρήνα κυψελοειδής μορφής καθώς η συγκεκριμένη δομή είναι ικανή να ανταπεξέλθει στις δύσκολες συνθήκες και τις μεγάλες καταπονήσεις που υπόκεινται τα αεροσκάφη που κατασκευάζουν. Η χρήση της κυψελοειδής μορφής σε πιο κοινές εφαρμογές είναι περιορισμένη λόγω του μεγάλου όγκου στην ποσότητα των κατασκευών και ως εκ τούτου του μεγάλου κόστους παραγωγής.

Η τάση ως προς τις δομές επαλληλίες και ιδιαίτερος με τον πυρήνα κυψελοειδής μορφής ήταν όπως αναφέραμε παραπάνω περιορισμένη, αλλά η μείωση κόστους στην παραγωγική διαδικασία και η αλλαγές στην μορφή της παραγωγικής διαδικασίας η οποίες έχουν υιοθετηθεί από πολλούς κατασκευαστές ανά τον κόσμο επιτρέπει την παραγωγή δομών επαλληλίας με πολύ αποδοτικό κόστος. Η εφαρμογές αφορούν κυρίως θερμοπλαστικά υλικά απο τα οποία είναι κατασκευασμένος ο κυψελοειδής πυρήνας σε μία πιο ανοιχτή αγορά όπως είναι η κατασκευή κτιρίων, η αυτοκινητοβιομηχανία και τα προϊόντα συσκευασίας.

Με χαμηλό βάρος και σε μεγάλο βαθμό δύσκαμπτα, τα πάνελς σύνθετων υλικών αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για την μοντέρνα βιομηχανία και την πληθώρα σχεδίων

και κατασκευών. Ίσως το κόστος και ο χρόνος κατασκευής της είναι ένα εμπόδιο, αλλά είναι πολύ βασικό να χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση των κατασκευών και ειδικότερα στις αεροναυπηγικές βιομηχανίες αφού οι κανονισμοί πλέον, για παράδειγμα στις καμπίνες των αεροπλάνων, είναι πολύ αυστηροί αφού έχουν να κάνουν με τον περιορισμό φωτιάς ή τοξικών αερίων. Τέτοια θέματα περιορίζουν πολύ τις επιλογές όσον αφορά στο τι υλικό θα χρησιμοποιήσουμε, οπότε τα σύνθετα υλικά δομών επαλληλίας μπορούν δώσουν τη λύση σε αυτές τις δύσκολες περιοχές της βιομηχανίας. Η σημασία της μείωσης βάρους και της μείωσης κατανάλωσης καυσίμου σε συνδυασμό με την κατασκευή πολυσύνθετων εφαρμογών έχουν φέρει στην επιφάνεια την ανάγκη για την κατασκευή δομών επαλληλίας με διαφόρους τύπους πυρήνα. Αν και η αποκαλούμενες δομές sandwich είναι σε μεγάλο βαθμό άκαμπτες με αντοχή σε μεγάλα φορτία, κάποιες περιοχές όπως είναι τα σημεία στερέωσης ή ανοιχτές επιφάνειες της δομής χρειάζονται ενίσχυση και προστασία από εξωτερικές ζημιές και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως είναι η υγρασία και τα φαινόμενα οξείδωσης για την περίπτωση των μετάλλων.



Εικόνα 5.2 Δομή επαλληλίας με κυψελοειδή μορφή

5.4 Οι δυνατότητες των πλεγματοειδών δομών και η χρήση τους στη βιομηχανία

Όταν οι σχεδιαστικές και οι κατασκευαστικές προδιαγραφές απαιτούν πολύ μεγάλους βαθμούς αντοχής σε καταπονήσεις σε σχέση με το βάρος, οι δομές επαλληλίας έχουν αποδειχθεί εξαιρετική επιλογή. Εκτός από την υψηλή αντοχή, τον μεγάλο βαθμό ακαμψίας και το χαμηλό βάρος, οι δομές επαλληλίας έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν επιπρόσθετα πλεονεκτήματα σε μία κατασκευή όπως είναι η θερμομόνωση και η ακουστική μόνωση.

Οι δομές επαλληλίας, λόγω της φύσης της κατασκευής τους χρησιμοποιούνται γενικά ως μορφές φύλλων ή ως πάνελς τα οποία εφαρμόζονται σε ανοιχτά υπό κατασκευή πλαίσια με σκοπό να μεταφέρουν τις εγκάρσιες διατμητικές τάσεις. Σε άλλες εφαρμογές οι δομές επαλληλίας δρουν ως υποστηρίγματα και λειτουργούν τόσο σαν πρωτοβάθμιο όσο και σαν δευτεροβάθμιο στοιχείο για να υποστηρίξουν και να ενισχύσουν εξαιρετικά μεγάλα φορτία με την προϋπόθεση ότι τα σημεία τοποθέτησης και σύνδεσης στο πλαίσιο είναι ιδανικά.

Κάποιες διαφορετικές εφαρμογές χρησιμοποιούν ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των δομών επαλληλίας, δηλαδή το χαμηλό βάρος τους λόγω της χαμηλής πυκνότητας που τις χαρακτηρίζουν. Τέτοιες περιπτώσεις εφαρμογών περιλαμβάνουν προσόψεις τοίχων και πλαϊσίων για την μείωση του θορύβου. Αυτές οι εφαρμογές γενικά, δεν έχουν να κάνουν με τη δομική σταθερότητα και την αντοχή σε εξωτερικά φορτία για τις συγκεκριμένες δομές.

Αρχικά, η δομές sandwich χρησιμοποιούνταν μόνο σε επίπεδες εφαρμογές και όχι σε επιφάνειες με κάποιο βαθμό κυρτότητας. Στις μέρες μας όμως, σημαντικές βελτιώσεις στις τεχνικές των κατασκευών και την αυξανόμενη επίγνωση των βιομηχανιών για τις δυνατότητες των δομών επαλληλίας αλλά και τη χρήση φυσικά της τρισδιάστατης εκτύπωσης σαν μέσω κατασκευής τέτοιων στοιχείων, η μορφές τους πλέον δεν περιορίζονται σε επίπεδες επιφάνειες αλλά σε κάθε είδους επιφάνειες με μεγάλους βαθμούς κυρτότητας και περιπλοκότητας. Καμπύλες, σκελετοειδής τμήματα και άλλα περίπλοκα σχέδια μπορούν πλέον να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν από τέτοιες δομές ενώ μέχρι και πριν λίγα χρόνια δεν θα ήταν δυνατό να γίνουν.

Σήμερα μπορούμε να συναντήσουμε τυπικές δομές επαλληλίας αλλά και πιο εξελιγμένες μορφές σε πάρα πολλές βιομηχανίες. Συνοψίζοντας, οι βιομηχανίες αυτές ενδεικτικά είναι:

ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Εσωτερικά τοιχώματα

Πάνελ πατωμάτων

Επιφάνειες ελέγχου πτερυγίων

Ράφια αποθήκευσης αποσκευών

ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Κάλυμμα κάψουλας

Όργανα καμπίνας και στηρίγματα

Αφαιρετικές κωνοειδής ασπίδες για το ρύγχος της ατράκτου

Θύρες για την στενάγωση διαφορετικών τμημάτων

Διαστημικοί δορυφόροι

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΗΛΕΚΤΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Κατασκευή ηλεκτρονικών ραδιοθόλων

Μεγάλες κεραίες και δισκοειδής ανακλαστήρες

Στρατιωτικά ηλεκτρονικά όργανα

Ηλεκτρονικός εξοπλισμός για καταστρώματα οχημάτων

ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

Παλέτες φορτίων

Εμπορευματοκιβώτια ναυτιλίας

Πάνελς ψύξης

Ειδικά αμαξώματα οχημάτων

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Αρχιτεκτονικά υαλοπετάσματα εξωτερικών τοίχων

Διαχωριστικά πάνελς

Επίπεδες οροφές κτιρίων

Κατασκευές αρχιτεκτονικών πλαισίων και τοίχων

5.5 Η μηχανική συμπεριφορά των πλεγματικών δομών και η μετάδοση των φορτίων

Πρωταρχικής σημασίας για την επιτυχή αξιοποίηση των δομών επαλληλίας είναι η χρήση της μεθόδου για την μετάδοση φορτίων από και προς τη δομή επαλληλίας. Από την ίδια τη φύση της, μία δομή επαλληλίας δεν έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει συγκεντροτικούς βαθμούς φορτίων σε συγκεκριμένα σημεία στο επίπεδο της δομής. Ως εκ τούτου, οι σημερινοί σχεδιαστές δεν μπορούν να προσφεύγουν σε σχεδιαστικές λύσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα αργές και όχι τόσο αξιόπιστες μεθόδους για την σύνδεση μεταξύ του πυρήνα και των εξωτερικών λεπτών φύλλων των δομών επαλληλίας. Πολλές από αυτές τις παλαιότερες μεθόδους έτειναν να εκμηδενίσουν τα σημαντικά πλεονεκτήματα της υψηλής αντοχής σε αναλογία με το βάρος διότι χρησιμοποιούσαν στερεά τμήματα ή προσθήκες ή ακόμα και πρόσθετα πλαίσια από διάφορα υλικά με σκοπό να ενισχύσουν τον πυρήνα της δομής προσθέτοντας όμως έτσι άσκοπο βάρος. Αυτή η προσθήκη υλικού μέσα στη δομή γινόταν συνήθως με την αφαίρεση υλικού και όγκου από τον ίδιο τον πυρήνα της δομής για να αναπτύξουν την απαιτούμενη αντοχή. Υπάρχουν δύο μορφές πρωτεύοντος φορτίου που πρέπει να εξετάζονται κατά τον σχεδιασμό και τη μελέτη μίας δομής επαλληλίας:

Η πρώτη είναι η διάτμηση και η ένταση του φορτίου. Σε πολλές περιπτώσεις οι σχεδιαστές αντιμετωπίζουν διαφόρους συνδυασμούς των φορτίων που ενεργούν σε πολλές κατευθύνσεις. Η μελέτη κατά τον σχεδιασμό των δομών επαλληλίας αποκαλύπτει ότι το μεγαλύτερο σύνολο των πρωτογενών φορτίων θα πρέπει να γίνεται από το εξωτερικό στρώμα της δομής. Στη συνέχεια, ο πυρήνας δρα ως σταθροποιητής κατά το πλάτος της κατασκευής. Για τον λόγο αυτό, το φορτίο που εφαρμόζεται στην δομή θα διανέμεται όσο το δυνατόν περισσότερο στην επιφάνεια που καταπονείται εφόσον τα εξωτερικά στρώματα είναι σχετικά λεπτά (αναλόγως πάντα από την κατασκευή και το μέγεθος) και το φορτίο θα πρέπει να μεταφέρεται ομαλά και όσο το δυνατόν ισόποσα από τα εξωτερικά στρώματα προς τον πυρήνα. Πολύ σημαντικό επίσης είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η σύνδεση μεταξύ των εξωτερικών και των εσωτερικών στοιχείων της δομής. Η σωστή επιλογή του τρόπου σύνδεσης σε πολλές περιπτώσεις είναι ικανή να επιτύχει τον απαιτούμενο βαθμό της διανομής του φορτίου. Εκτός όμως από τα πρωτογενή φορτία, επίσης πολύ σημαντικά είναι και τα φορτία που δέχεται η δομή επαλληλίας από δυνάμεις ροπών. Η ροπές συνήθως ενεργούν λόγω των μεθόδων συναρμολόγησης και σύνδεσης και όχι από το μέγεθος των φορτίων που ενεργούν πάνω στις επιφάνειες.

Κεφάλαιο 6 Η εφαρμογή των πλεγματικών δομών στην μηχανική ιστών

6.1 Οι τρισδιάστατες πλεγματικές δομές στην μηχανική ιστών

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για την εφαρμογή και την ανάπτυξη βιοτεχνικών οργάνων και ιστών στο ιατρικό πεδίο των μεταμόσχευσης οργάνων έχει αυξηθεί κατά πολύ σε σχέση με τα παλαιότερα χρόνια. Μία από τις βασικές προκλήσεις στη μηχανική των ιστών για ιατρικές εφαρμογές είναι η δυσκολία στην κατασκευή τους, καθώς οι συγκεκριμένες δομές είναι πολύπλοκες και παράλληλα θα πρέπει να είναι βιολογικά αποτελεσματικές και αποδεκτές. Εάν και έχουν κατασκευαστεί τρισδιάστατες δομές οι οποίες προσπαθούν να αποτυπώσουν όσο το δυνατόν καλύτερα ανθρώπινα όργανα ή οστά, η εφαρμοζόμενες προσεγγίσεις κατασκευής δεν μπορούσαν να σχηματίσουν τις απαιτούμενες μορφές οργάνων λόγω των υψηλών απαιτήσεων τόσο σε επίπεδο σχεδίασης όσο και σε επίπεδο κατασκευής. Όταν εφαρμόζεται η μηχανική ιστών, υπάρχουν κάποια κρίσιμες απαιτήσεις για τις κατασκευή των δομών. Οι απαιτήσεις αυτές αναφέρονται στο κατά πόσο μία δομή σε μοναδιαίο επίπεδο αλλά και σε συνολικό επίπεδο, δηλαδή σε μορφή δομών επαλληλίας, είναι ικανή να υποστηρίξει την κυτταρική ανάπτυξη και παράλληλα να μιμείται το φυσιολογικό περιβάλλον μέσα σε ένα ανθρώπινο σώμα περιλαμβάνοντας τα αναγκαία γεωμετρικά, τοπογραφικά και φυσικά χαρακτηριστικά των ιστών. Συγκεκριμένα για την δημιουργία λεπτών ιστών με τη χρήση τρισδιάστατων εφαρμογών, η ανάπτυξη υψηλά πυκνών αγγειακών δικτύων που μπορούν να πληρούν τις απαιτήσεις σε θρεπτικά συστατικά και οξυγόνο, παραμένει πολύ μεγάλη πρόκληση στη μηχανική των ιστών. Αυτές οι προκλήσεις περιορίζουν το μέγεθος των μηχανικής ιστών σε μερικές εκατοντάδες μικρόμετρα. Η ιδανική δομή για την μηχανική των ιστών υποστηρίζει τη χωρική κατανομή των κυττάρων σε μία τρισδιάστατη κατασκευή και παρέχει μηχανική σταθερότητα στα κύτταρα επιτρέποντας τη βέλτιστη μεταφορά θρεπτικών συστατικών και την απομάκρυνση αποβλήτων. Υπάρχουν πολυάριθμες προσεγγίσεις για τη δημιουργία τρισδιάστατων δομών στη μηχανική ιστών και όλες προσπαθούν να επιτύχουν την υψηλή πυκνότητα των κυττάρων σε συνάρτηση και αναλογία με τον απαιτούμενο όγκο. Μία στρατηγική στη δημιουργία κυττάρων χρησιμοποιεί εξαιρετικά πορώδεις δομές με διασυνδεδεμένους πόρους που παρέχουν τον απαραίτητο χώρο για διείσδυση και την ανάπτυξη των κυττάρων που επιτρέπουν τη μεταφορά μάζας.

Οι δομικές, μηχανικές και μαζικές ιδιότητες μεταφοράς αυτών των δομών καθορίζονται από παραμέτρους όπως το μέγεθος των πόρων, το σχήμα των πόρων, το πορώδες, τη διασυνδεσιμότητα των πόρων, τη διαπερατότητα, την επιφάνεια της δομής, την ακαμψία και το υλικό. Τέτοιες δομές που αποτελούνται από τυχαία τοπογραφία μικροπόρων είναι ένα από τα παλαιότερα και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πρότυπα για τη μηχανική των ιστών. Οι τεχνικές κατασκευής, όπως

χύτευση σωματιδίων και πλέγματα ινών έχουν χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσουν δομές επαλληλίας αφρού σαν εσωτερική δομή με τυχαία αρχιτεκτονική και περιορισμένο έλεγχο της κλίμακας. Αν και τέτοιες τεχνικές επεξεργασίας είναι γρήγορες, επεκτάσιμες και μη κοστοβόρες, δεν είναι δυνατή η ακρίβεια στον έλεγχο στις μικροαρχιτεκτονικές λεπτομέρειες, όπως το μέγεθος των πόρων, η γεωμετρία, η σύνδεσή τους και η διανομή εντός της δομής. Η δυνατότητα να μπορούμε να ελέγχουμε την εσωτερική αρχιτεκτονική της δομής είναι σημαντική, καθώς αυτό επιτρέπει τον έλεγχο επί της μηχανικής αντοχής της, της αποτελεσματικής επιφάνειας για την ανάπτυξη των κυττάρων, και της ροής των θρεπτικών συστατικών εντός του πυρήνα της δομής. Τεχνικές για την παραγωγή δομών σε τρεις διαστάσεις όπου έχουμε τον πλήρη έλεγχο της αρχιτεκτονικής και της σύνδεσης των πόρων έχουν διερευνηθεί από πολλούς ερευνητές. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν το σχηματισμό των καναλιών με ακρίβεια και καθορισμένες διαστάσεις.

Ωστόσο, η απαίτηση για χρήση μήτρων συνεπάγεται σε μια αργή και επίπονη διαδικασία για την επίτευξη μιας πολυεπίπεδης τρισδιάστατης κατασκευής. Αυτές οι μέθοδοι που περιλαμβάνουν τη δημιουργία των τρισδιάστατων αντικειμένων χρησιμοποιώντας εναπόθεση στρωμάτων έχουν επιτυχώς χρησιμοποιηθεί στη μηχανική ιστών για την ανάπτυξη δομών και βασίζονται κυρίως σε σκληρό πλαστικό. Η εφαρμογή των δομών που κατασκευάζονται από μαλακό πολυμερες ή ελαστομερή υλικά είναι επιθυμητή όταν σχεδιάζεται για μαλακούς ιστούς. Ωστόσο τέτοιες τεχνικές απαιτούν τη χρήση πολύπλοκων τεχνολογιών κατασκευής και συναρμολόγησης για την παραγωγή δομών μεγάλης κλίμακας.

6.2 Ο σχεδιασμός των δομών στην μηχανική ιστών

Ο τομέας της μηχανικής των ιστών εστιάζει κυρίως στην ανάπτυξη ιστών οι οποίοι μπορούν να υποστηρίξουν κυτταρικές δομές με στόχο την αναγέννηση κατεστραμμένων ιστών ή οργάνων. Αυτή η προσπάθεια συνήθως περιλαμβάνει την κατασκευή ενός άδειου κελύφους που αποτελείται από φυσικό ή συνθετικό υλικό. Σε ορισμένες περιπτώσεις το υλικό που χρησιμοποιείται αποτελείται από τον συνδυασμό φυσικού και σύνθετου υλικού. Σε κάθε περίπτωση το συγκεκριμένο εξωτερικό κέλυφος αποτελεί μία δομή που μιμείται την εξωκυτταρική μήτρα. Ιδανικά όταν τα σωστά κύτταρα ενώνονται με την δομή μας, η ίδια η δομή κατευθύνει την κυτταρική ανάπτυξη, τον πολλαπλασιασμό, τη διαφοροποίηση και έτσι να μετατρέπεται από ένα μη λειτουργικό κατασκεύασμα σε μία δομή που μπορεί να εκτελέσει τη φυσική λειτουργία που προορίζεται. Ο απώτερος στόχος, της αναγεννητικής ιατρικής, για να αποκατασταθεί η κανονική λειτουργία των ιστών, είναι η δομές να αποτελούνται από βιοδιασπώμενα υλικά και έτσι σταδιακά να αντικαθίστανται με φυσικά συστατικά του σώματος έως ότου εξαφανιστεί πλήρως. Με αυτόν τον τρόπο, η τεχνητές δομές εξυπηρετούν την επιδιωκόμενη λειτουργία τους και έτσι να έχουν τη δυνατότητα να

παρέχουν ουσιαστικά μία πλατφόρμα για μεταμόσχευση κυττάρων και να υποστηρίζουν τη διεύθυνση των στοχευόμενων κυττάρων και να κατευθύνουν την μετατροπή από τεχνητό σε απόλυτα λειτουργικό ιστό με κανονική φυσιολογική λειτουργία χωρίς να παρεμποδίζεται από μη φυσιολογικά συστατικά.

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, η στρατηγική σχεδίασης στην μηχανική ιστών συνήθως παράγουν δομές που είναι ακατάλληλες για κλινική χρήση, καθώς εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες. Είτε μπορούν να διαθέτουν τη μηχανική αντοχή που απαιτείται για να αντέχουν τα φυσικά φορτία, αλλά δεν έχουν την κατάλληλη και επιθυμητή κυτταρική απόκριση στο μικροπεριβάλλον ή διαθέτουν ένα μικροπεριβάλλον που επάγει μια καλή κυτταρική απόκριση αλλά δεν διαθέτουν την μηχανική αντοχή για να επιβιώσουν στην εμφύτευση. Ο κοινός στόχος στον σχεδιασμό των περίπλοκων δομών στη μηχανική ιστών είναι να διερευνήσει τις προόδους στις τεχνικές κατασκευής για να βρει τη μέση λύση όπου μία δομή διαθέτει την αναγκαία αντοχή ώστε να αντέχει κάποια φυσιολογική φόρτωση, διατηρώντας παράλληλα την ικανότητα να επάγει μια στοχευμένη κυτταρική απόκριση. Η ιδανική δομή στη μηχανική ιστών πρέπει να διαθέτει την απαιτούμενη αρχιτεκτονική και να ενθαρρύνει την πλήρη διεύθυνση, την προώθηση και την ανάπτυξη ιστού και τα απαραίτητα δίκτυα αγγειακής υποστήριξης. Ακολουθώντας λοιπόν τη λογική ότι οι δομές της μηχανικής ιστών θα πρέπει να είναι βιοσυμβατές, το οποίο σημαίνει ότι τα κύτταρα αναπτύσσονται πιο εύκολα και να αποδίδουν μία φυσιολογικά υγιή κατάσταση. Επιπροσθέτως, οι συγκεκριμένες κυτταρικές δομές δεν πρέπει να περιέχουν κυτταροτοξικές ή ανοσογόνες ουσίες από τα υλικά κατασκευής καθώς θα μπορούσαν να επηρεάσουν την πρόοδο της αποκατάστασης των ιστών και τη λειτουργία τους, αλλά να αποτελούνται από συμβατά βιοενεργά υλικά. Τέλος, η δομή που θα σχεδιάσουμε θα πρέπει να διαθέτει δομικές και μηχανικές ιδιότητες, παρόμοιες με αυτές των πραγματικών ιστών, προκειμένου να παρέχει άμεση υποστήριξη και να περιορίσει τις μηχανικές καταπονήσεις που εφαρμόζονται στα κύτταρα μετά την εμφύτευση, καθώς θα μπορούσε να εξελιχθεί σε μία ανεπιθύμητη φλεγμονή.

Μία αδυναμία που εντοπίζεται σχεδόν σε όλες τις σχεδιαζόμενες δομές κατά την κατασκευή τους, είναι ότι δεν μπορεί να ελεγχθεί πλήρως η αρχιτεκτονική τους διότι οι περισσότερες συμβατικές τεχνικές κατασκευής προσφέρουν έλεγχο επί ορισμένων δομικών χαρακτηριστικών όπως είναι το πορώδες, αλλά το μέσο μέγεθός τους δεν καθιστούν δυνατή τον πλήρη έλεγχο ειδικών δομικών στοιχείων και τη μελέτη αυτών. Η μέθοδος όμως της τρισδιάστατης εκτύπωσης περιλαμβάνει τη δημιουργία δομών επαλληλίας σε διαδοχικές στρώσεις με εναπόθεση υλικού ενός σκληρυνόμενου πολυμερούς. Αυτή η συγκεκριμένη τεχνική όχι μόνο επιτρέπει αλλά και είναι πολύ ικανή ώστε να οριστεί η θέση κάθε δομικού στοιχείου του σώματος της δομής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας ενός τρισδιάστατου υπολογιστικού μοντέλου που αντιπροσωπεύει τη δομή που επιθυμούμε να κατασκευάσουμε. Μόλις το μοντέλο δημιουργηθεί και αποσταλλεί στον τρισδιάστατο εκτυπωτή, το λογισμικό διαχωρίζει αυτόματα το επιθυμητό αντικείμενο σε πολύ μικρές στρώσεις διατομών. Για παράδειγμα, εάν το απαιτούμενο κρίσιμο ύψος σκλήρυνσης του εξωθούμενου πολυμερούς είναι ένα χιλιοστό και η δομή μας έχει ύψος ένα εκατοστό, το λογισμικό θα διαιρέσει αυτόματα τη δομή μας σε δέκα ξεχωριστές στρώσεις διατομών ύψους

ενός χιλιοστού. Στη συνέχεια κάθε στρώση θα σταλεί ξεχωριστά στον τρισδιάστατο εκτυπωτή και έπειτα θα μεταφραστεί στις ακριβείς συντεταγμένες με σκοπό να ξεκινήσει τη διαδικασία εκτύπωσης και εξώθησης του πολυμερούς. Στο τέλος της διαδικασίας, ανάλογα με τις ιδιότητες σκλήρυνσης του υλικού που χρησιμοποιούμε και την τεχνολογία του τρισδιάστατου εκτυπωτή, θα έχουμε ως αποτέλεσμα μία συμπαγής τρισδιάστατη δομή η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη μηχανική ιστών.

Ο σχεδιασμός δομών και η χρήση τρισδιάστατων εκτυπωτών, μας έχουν δώσει τη δυνατότητα να αναγεννήσουμε οστά ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε ασθενή και να δημιουργήσουμε αγγειακά και νευρωνικά μοσχεύματα. Εκτός από την κατασκευή δομών σε πιο ελεύθερο επίπεδο μελέτης, η τρισδιάστατοι εκτυπωτές μας δίνουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε αντίγραφα των ιστών από ιατρικές εικόνες ασθενών, το οποίο αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την αξιολόγηση των επιλογών θεραπείας, όπως η αποφυγή μίας χειρουργικής προσέγγισης και των κινδύνων που μπορεί να κρύβει με βάση των ασθενή. Το κυριότερο μειονέκτημα ίσως στην ενασχόλησή μας με τέτοιες εφαρμογές, είναι ότι το μέγεθος των δομικών στοιχείων που θέλουμε να κατασκευάσουμε θα πρέπει να είναι ίδιο με τις φυσικές εξωκυτταρικές μήτρες για την περίπτωση κυτταρικών εφαρμογών. Σε πολλές περιπτώσεις εκτυπωμένων δομών σε τρισδιάστατους εκτυπωτές, οι διαστάσεις διαφέρουν κατά μερικές εκατοντάδες μικρά και δεν μπορούν χρησιμοποιηθούν για τον λόγο που κατασκευάστηκαν. Επί του παρόντος μόνο λίγες προσπάθειες έχουν καταφέρει να αντιγράψουν τα πολύ μικρά δομικά στοιχεία μίας εξωκυτταρικής δομής αφού αυτό εξαρτάται κατά πολύ από την τεχνολογία των τρισδιάστατων εκτυπωτών και φυσικά και των υλικών που χρησιμοποιούμε.



Εικόνα 6.1 Τρισδιάστατο εκτυπωμένο μέλος ανθρώπινου σώματος

6.3 Η μεθοδολογία για την ανάπτυξη και τη σχεδίαση της μοναδιαίας δομής μίας επαλληλίας στη μηχανική ιστών

Οι βιολογικοί ιστοί είναι από τη φύση τους ετερογενής δομές. Η ετερογένεια εντοπίζεται τόσο σε μορφολογικό όσο και σε μηχανικό επίπεδο και αναλόγως της ανατομίας και της διάρθρωσης. Για παράδειγμα, στο σχήμα φαίνονται τρεις διαφορετικοί τύποι αρχιτεκτονικής δομών, όπως βρίσκονται σε διάφορες ανατομικές θέσεις στον ανθρώπινο σκελετό. Με βάση την μοντελοποίηση και την σχεδιαστική προσέγγιση, η αρχιτεκτονική των δομών μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις διαφορετικούς τύπους: πλακοειδής τύπος δομής, ραβδοειδής τύπος δομής και υβριδικός τύπος.

Κάθε διακριτός όγκος μπορεί να χαρακτηριστεί από ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό του σχεδιασμού, όπως οι διαφορετικές εσωτερικές επαλληλίες και ο τρόπος σύνδεσης και πλέξης μεταξύ των ιστών που βρίσκονται μέσα στη δομή. Χάρη στην ανεπτυγμένη πια τεχνολογία των υπολογιστών και των τρισδιάστατων εκτυπωτών, μπορούμε να αναπτύξουμε μοντέλα με βάση τα μοτίβα που χρειαζόμαστε, το μέγεθος και το σχήμα των πόρων καθώς και τις απαιτούμενες βιολογικές και βιοφυσικές σχεδιαστικές ανάγκες. Μετά τη διαδικασία της σχεδίασης, δημιουργείται μία βιβλιοθήκη η οποία περιλαμβάνει αρχεία CAD με διαφορετικές αρχιτεκτονικές και μοτίβα. Όλα αυτά τα σχεδιαστικά αρχεία αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων για μεταγενέστερη χρήση. Με μία κατάλληλη επιλογή σε μία προσχεδιασμένη μονάδα, μπορεί κάποιος μπορεί να σχεδιάσει μία ετερογενής δομή ιστού προσαρμόζοντας τις ιδιότητες που απαιτούνται για την εκάστοτε εφαρμογή χρησιμοποιώντας, για παράδειγμα διαφορετικά χαρακτηριστικά μοτίβα για τον σχεδιασμό μίας ειδικής πορώδους γεωμετρίας, την επαναδιάταξη κάποιων μοτίβων λειτουργίας σε μία τρισδιάστατη δομή για να σχηματιστεί μία προτιμότερη και περισσότερο λειτουργήσιμη κατανομή και διασυνδεσιμότητα πόρων και τέλος την ανάλυση και την προσομοίωση σε υπολογιστικό περιβάλλον ώστε να κατανοήσουμε καλύτερα τα χαρακτηριστικά αντοχής και την σταθερότητα της κατασκευής.

6.4 Η μηχανική των πλεγμάτων δομών για την κατασκευή οστών

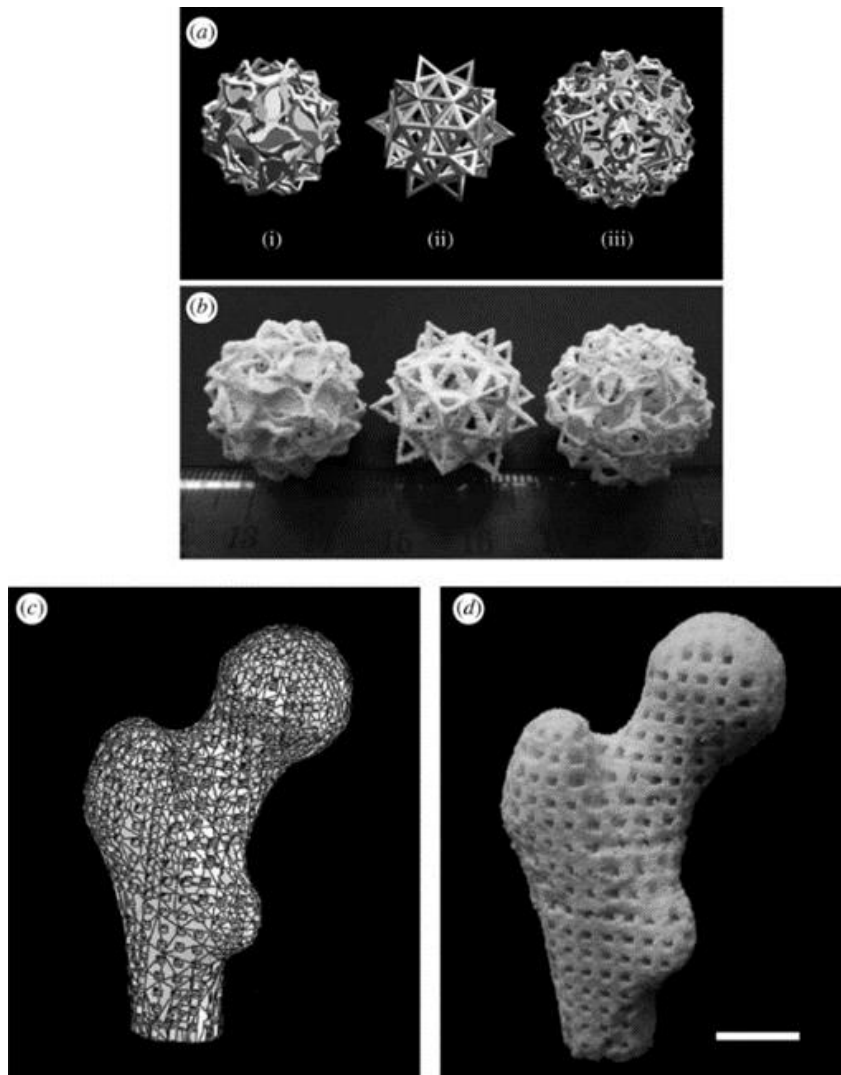
Οι δομές που σχεδιάζονται και χρησιμοποιούνται στη μηχανική οστών δέχονται συνήθως φορτία προς όλες τις κατευθύνσεις. Για τον λόγο αυτό η μοναδιαία δομή θα πρέπει να δομικές ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες του ιστού που αντικαθίστανται με τέτοιο τρόπο όπου οι μηχανικές ιδιότητες να ταιριάζουν όσο περισσότερο γίνεται. Οι συγκεκριμένες ιδιότητες βοηθούν τη δομή στο σύνολό της να αντιδρά καλύτερα σε φορτία και καταπονήσεις όταν αυτές εμφυτεύονται στο σώμα. Είναι πολύ σημαντικό κατανοήσουμε τις ιδιότητες των οστών με σκοπό να ποσοτικοποιηθούν οι ανάγκες λειτουργίας των δομών σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες καταπονήσεων. Η

μελέτη της μορφολογίας των οστών είναι πολύ κρίσιμη αφού μόνο έτσι μπορούμε να προφυλάξουμε τις δομές επαλληλίας που αντικαθιστούν κάποιο οστό από αστοχίες και καταστροφές.

Η μηχανική ιστών στην κατασκευή οστών χρησιμοποιεί επιλεγμένους συνδυασμούς υλικών για τις δομές που κατασκευάζονται. Αυτά τα υλικά παράγουν δομές όπου είναι βιοσυμβατές και έχουν μηχανική δύναμη παρόμοια με αυτή των πραγματικών οστών. Τα κατασκευαστικά σχέδια και οι συνθήκες επεξεργασίας μπορούν να επηρεάσουν άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες των τρισδιάστατων τυπωμένων δομών. Τα υλικά που ενισχύουν την αναγέννηση οστών αποτελούν πιθανές λύσεις για ένα πλήθος εφαρμογών στην ιατρική. Η χρήση πορώδους υλικού από βιοκεραμικά και βιοπολυμερή συστατικά για την υποστήριξη των οστών είναι το βασικό στοιχείο στην έρευνα της μηχανικής ιστών. Οι τρέχουσες προκλήσεις περιλαμβάνουν τη μηχανική των υλικών που μπορεί να συνδυαστεί τόσο με τη μηχανική αντοχή όσο και με τον παράγοντα της βιομίμησης.

Τρισδιάστατες τυπωμένες δομές για εφαρμογές οστών από πολυαιθυλένιο (PE) έχουν δείξει αντοχές σε εφελκυσμό έως και 4MPa αλλά παράλληλα δεν παρουσιάζουν καμία τοξικότητα στον άνθρωπο. Επίσης τα κεραμικά υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως στη μηχανική ιστών για οστά λόγω της εξαιρετικής τους βιοδραστικότητας και τις ομοιότητες που παρουσιάζουν στη σύνθεση των οστών. Η μεγαλύτερη πρόκληση αφορά τη μηχανική αντοχή και τις ιδιότητες πορώδους που έχουν οι δομές. Η υψηλή πυκνότητα και κάποιες τροποποιήσεις και βελτιστοποιήσεις στη σύνθεση της δομής μπορούν να φέρουν αποτελέσματα υψηλότερων αντοχών σε θλίψη.

Αν και τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών της τρισδιάστατης εκτύπωσης μας έχουν δώσει τη δυνατότητα δημιουργίας πολύ μικρών και λεπτομερών κατασκευών, ο συνδυασμός των υλικών αποτελεί πολύ κρίσιμο παράγοντα στη διαδικασία κατασκευής. Η ζήτηση τρισδιάστατων εκτυπώσεων για τέτοιες εφαρμογές θα αυξηθεί λόγω της προσαρμοστικότητας για συγκεκριμένους ασθενείς και κλινικές ανάγκες.

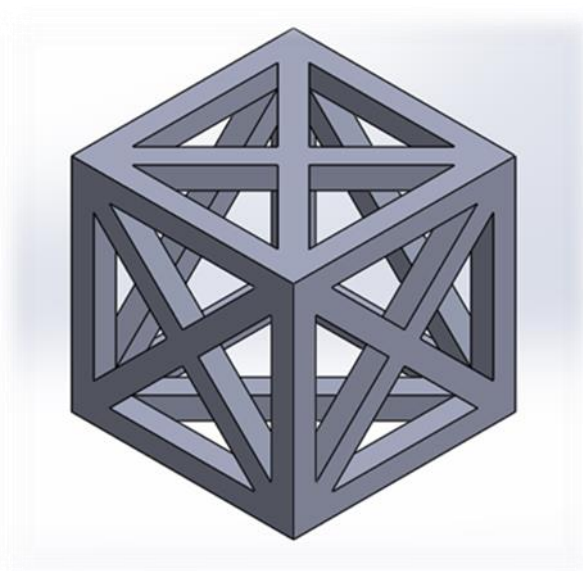


Εικόνα 6.2 Τρισδιάστατες εκτυπωμένες δομές οστών

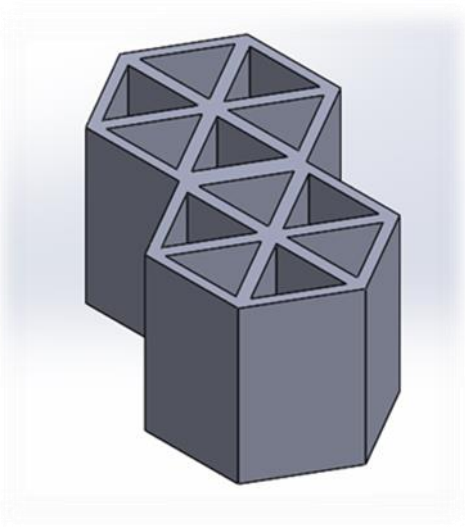
Κεφάλαιο 7 Πειραματική διαδικασία

7.1 Οι δομές που σχεδιάσαμε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας

Στη δική μας περίπτωση η δομή που σχεδιάσαμε και κατασκευάσαμε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου έχει δύο μορφές. Η κύρια ιδέα και το κοινό στοιχείο που κυριαρχεί και στις δύο δομές ήταν η εισαγωγή διαγώνιων δομικών νεύρων κατά το μήκος και το πλάτος της μοναδιαίας δομής μας με στόχο να την ενισχύσουμε και να τις δώσουμε την απαραίτητη σταθερότητα που χρειαζόμαστε για μία πιθανή εφαρμογή. Η πρώτη δομή αποτελείται από το πλαίσιο μίας κυβικής δομής με ενισχύσεις στην κάθε μία από τις έξι πλευρές που έχει. Οι ενισχύσεις αυτές αποτελούνται όπως αναφέραμε και παραπάνω από κάποια δομικά νεύρα τα οποία ενώνουν τη δομή από γωνία σε γωνία με στόχο τη συνοχή της δομής και την ενίσχυση της σταθερότητά της. Η δεύτερη δομή που σχεδιάσαμε έχει πολυγωνική – κυψελοειδής μορφή και είναι βασισμένη στο περισσότερο χρησιμοποιούμενο σχέδιο δομών στο οποίο έχουν βασιστεί πολλές εφαρμογές στον χώρο του σχεδιασμού των δομών σε συνδυασμό με την τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Και σε αυτή τη δομή εργαστήκαμε κατά παρόμοιο τρόπο, δηλαδή εισάγαμε στο εσωτερικό του πολυγώνου κάποια δομικά νεύρα τα οποία εκτείνονται καθ' όλο το ύψος της δομής.



Εικόνα 7.1 Απεικόνιση της κυβικής δομής στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks



Εικόνα 7.2 Απεικόνιση της πολυγωνικής δομής στο σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks

7.2 Διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής των δομών

Κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού καταλήξαμε σε δύο μορφές δομών με σκοπό να είμαστε πιο αντικειμενικοί στα αποτελέσματα που θα εξάγουμε και να επιτύχουμε ένα πιο ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών.

Κατά τη διάρκεια όμως της διαδικασίας του σχεδιασμού αντιμετωπίσαμε κάποια τεχνικά προβλήματα κυρίως διαστασιολογικά σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη εκτύπωση και αυτό γιατί ο συγκεκριμένος 3D εκτυπωτής δεν θα είχε ίσως τη δυνατότητα να εκτυπώσει σε κάποιες μικρότερες διαστάσεις πέραν ενός κρίσιμου σημείου που μας έδωσε τη δυνατότητα να παρατηρήσουμε, να μελετήσουμε και να αξιολογήσουμε στον καλύτερο δυνατό βαθμό τις δύο δομές μας. Το στάδιο του σχεδιασμού στο πραγματοποιήθηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα ψηφιακού σχεδιασμού SolidWorks 2015 και τα σχέδια αποθηκεύτηκαν σε μορφή part (.prt). Στη συνέχεια μετατρέψαμε τα αρχεία σε μορφή .stl έτσι ώστε να μπορούν να αναγνωριστούν από τον εκτυπωτή. Το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε για την ανάλυση των δοκιμών και τον διαχωρισμό τους σε λεπτές στρώσεις ήταν το Catalyst EX. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χώρισε το δοκίμιο σε στρώσεις πάχους κατά προσέγγιση 0,2 χιλιοστών. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά, το λογισμικό παράγει τις πληροφορίες που χρειάζεται ο εκτυπωτής ώστε να ξεκινήσει τη διαδικασία εξώθησης υλικού και εναπόθεσης της κάθε στρώσης. Όταν το αρχείο stl. Εισήχθει στο λογισμικό έπρεπε να οριστούν τρεις παράμετροι. Πρώτον, το πάχος της στρώσης

ορίστηκε στα 0,254 χιλιοστά. Δεύτερον, η δομή επιλέχθηκε να είναι με τη μέγιστη πυκνότητα έτσι ώστε το κενό μεταξύ των νηματίων να είναι το ελάχιστο δυνατό. Τρίτον, η υποστήριξη (supports) ορίστηκε στη βασική επιλογή με στόχο να έχουμε μία επαρκή υποστήριξη κατά τη διάρκεια της κατασκευής των δοκιμίων. Ειδικότερα στην κυβική δομή, η υποστήριξη ήταν πολύ βασική για την κατασκευή, καθώς η δομή δεν είχε υλικό στο εσωτερικό της σε αντίθεση με την πολυγωνική δομή η οποία λόγω σχεδιασμού ήταν πιο στέρεη κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης.

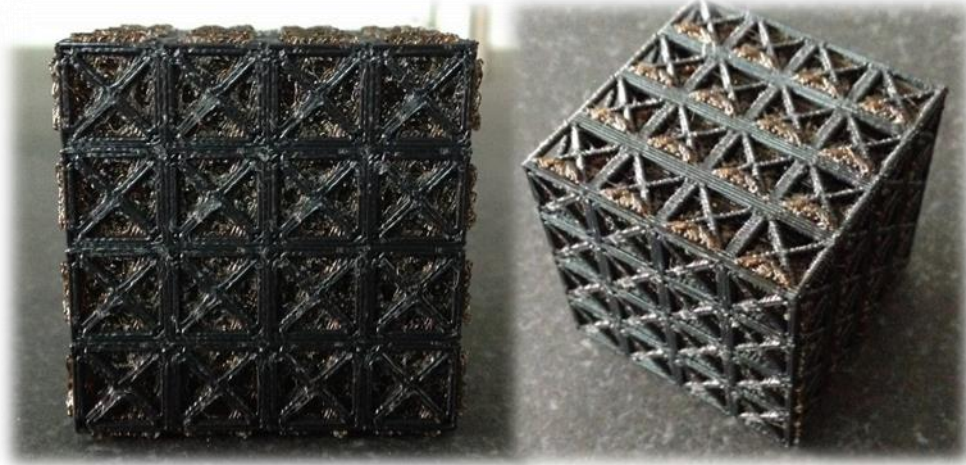
Μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων, το σχέδιο τοποθετήθηκε στην επιθυμητή τελική θέση πάνω στην πλατφόρμα του τρισδιάστατου εκτυπωτή και ξεκίνησε η διαδικασία διαχωρισμού του δοκιμίου (slicing process). Όταν η διαδικασία διαχωρισμού ολοκληρώθηκε η μορφή του αρχείου μετατράπηκε από .stl σε αρχείο .cmb το οποίο περιέχει τις απαιτούμενες πληροφορίες σχετικά με το υλικό εκτύπωσης, την ποσότητα της υποστήριξης του αντικειμένου και των στρώσεων που έχει διαχωριστεί. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως η χρήση υποστηριγμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική ώστε να αποφύγουμε πιθανή κατάρρευση του αντικειμένου που εκτυπώνεται ή κακή ποιότητα κατασκευής.

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία τεμαχισμού - διαχωρισμού του δοκιμίου, το αρχείο μεταφέρθηκε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή και ξεκίνησε η διαδικασία εκτύπωσης. Μετά την επίτευξη των επιθυμητών τιμών θερμοκρασίας, 74oC για τον θάλαμο και 270° C για την κεφαλή εξώθησης του υλικού, η πλατφόρμα τοποθετήθηκε στην απαιτούμενη θέση σε σχέση με την κεφαλή εξώθησης και ξεκίνησε η εναπόθεση υλικού σε στρώσεις και ο σχηματισμός του αντικειμένου.

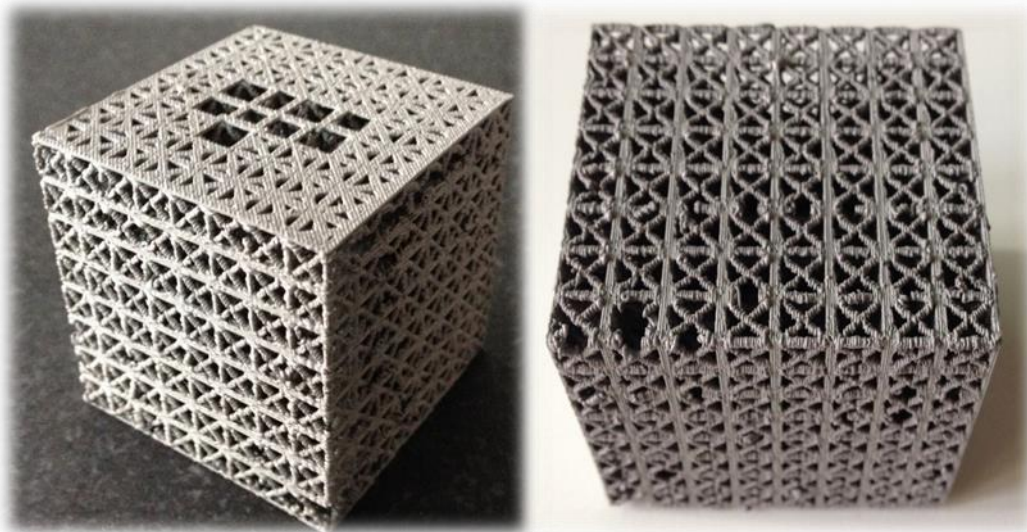
Μετά την ολοκλήρωση της θεμελίωσης η πρώτη στρώση περιλαμβάνει την πρώτη διατομή του αντικειμένου μας. Το υλικό από το οποίο κατασκευάστηκαν τα δοκίμια είναι το Stratasys P430 ABS, ενώ το υλικό στήριξης είναι το Stratasys™ P400SR το οποίο είναι διαλυτό υλικό υποστήριξης. Οι δομές τυπώθηκαν ξεχωριστά σε διαφορετικές εκτυπώσεις στο κέντρο της πλατφόρμας προκειμένου να επιτευχθεί η υψηλότερη ομοιογένεια κατασκευής και όσο το δυνατόν υψηλότερη ποιότητα.

Όταν ολοκληρώθηκε η διαδικασία κατασκευής το ικρίωμα παρέμεινε στην πλατφόρμα λίγη ώρα έτσι ώστε να ψυχθεί στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και στη συνέχεια αποσπάστηκε προσεκτικά από την πλατφόρμα. Η επόμενη ενέργειά μας ήταν η εμφάνιση των δοκιμίων που εκτυπώσαμε σε διαλύτη ώστε να αφαιρέσουμε τα υποστηρίγματα τα οποία ήταν προσκολλημένα στα αντικείμενά μας. Εκεί, το υλικό υποστήριξης διαλύεται σε διάλυμα φρέσκου νερού και συμπύκνωμα διαλύτη. Ο διαλύτης που χρησιμοποιήσαμε ήταν ο Stratasys™ P400SC WaterWorks και για κάθε 4 λίτρα νερού προσθέσαμε 90,47 γραμμάρια από τον διαλύτη. Μετά από 4 με 12 ώρες περίπου εμφάνισης (αναλόγως τη δομή), αφαιρέσαμε όλα τα υποστηρίγματα και τα δοκίμια καθαρίστηκαν πλήρως.

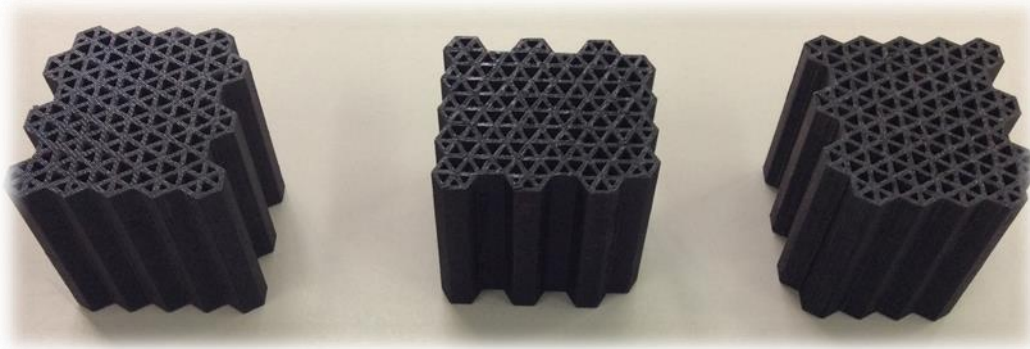
Στις παρακάτω φωτογραφίες μπορούμε να διακρίνουμε τα δοκίμια που κατασκευάσαμε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου (πέντε κυβικά δοκίμια και τρία πολυγωνικά), αλλά και κάποιες αρχικές πρώτες αστοχίες μετά τις εκτυπώσεις των δομών. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αποθήκευση και τη μετάφραση του αρχείου CAD, στο μέγεθος του δοκιμίου και την τεχνολογική ακρίβεια του εκτυπωτή.



Εικόνα 7.3 Η κυβική πλεγματική δομή μετά από την εκτύπωση και με εμφανή τα υποστηρίγματα



Εικόνα 7.4 Αστοχίες που δημιουργήθηκαν κατά την εκτύπωση των κυβικών πλεγματικών δομών



Εικόνα 7.5 Πολυγωνικές πλεγματικές δομές εκτυπωμένες στον τρισδιάστατο εκτυπωτή

Στην εικόνα 7.4 παρατηρούμε πως οι πλεγματικές δομές του πρώτου σχεδίου που επιχειρήσαμε να εκτυπώσουμε λόγω των μικρότερων διαστάσεων που είχαμε δώσει αρχικά στην μοναδιαία δομή, επηρέασε τη συνολική εκτύπωση, καθώς είχαμε πολλές αστοχίες στο εκτυπωμένο δοκίμιο και δε θα μπορούσαμε να το χρησιμοποιήσουμε για τα πειράματά μας. Αφού αυξήσαμε τις διαστάσεις στη μοναδιαία δομή το δοκίμιο εκτυπώθηκε επιτυχώς, όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.3.

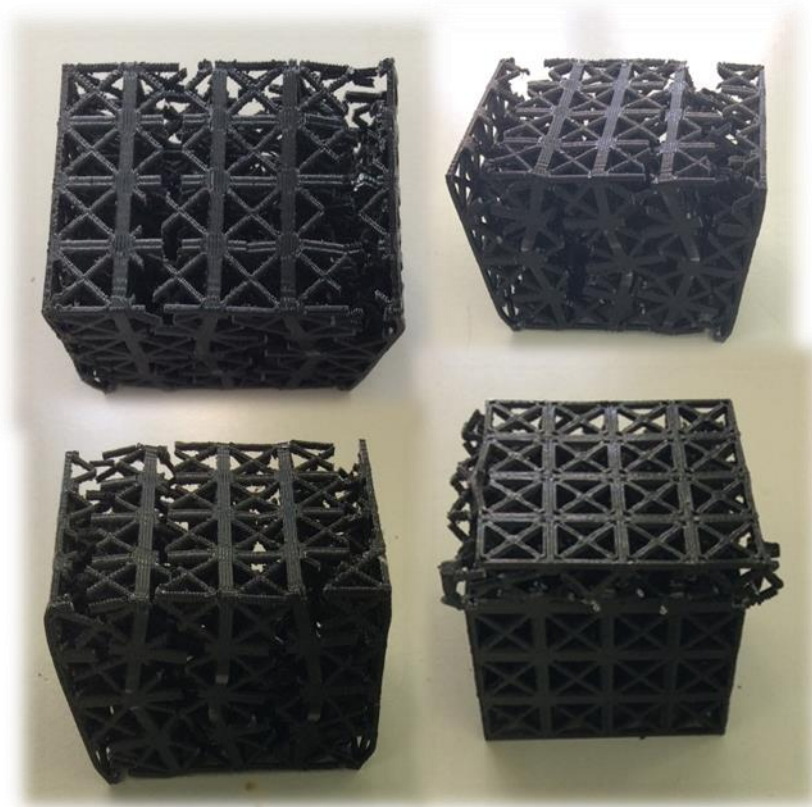
Τα δείγματα που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματά μας κατασκευάστηκαν από πλαστικό υλικό ABS σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσα σε κλειστό θάλαμο σε τρισδιάστατο εκτυπωτή Stratasys Dimension Elite. Το πάχος του κάθε στρώματος ήταν 0,25 χιλιοστά, οπότε συνολικά το κάθε δοκίμιο είχε περίπου 160 στρώσεις υλικού, καθώς το ύψος των δοκιμίων ήταν 40mm.

Προκειμένου να καθορίσουμε τις μηχανικές ιδιότητες των τρισδιάστατων εκτυπωμένων δοκιμίων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D695 - 08, τα δοκίμια δοκιμάστηκαν σε συμπίεση. Πιο συγκεκριμένα, η δοκιμή πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας θλιπτικό μηχάνημα INSTRON 5967. Η πάνω κινούμενη χαλύβδινη πλάκα (πλατό) της μηχανής κινούνταν με ταχύτητα 1,3mm/min με αποτέλεσμα την προοδευτική θλίψη. Συνολικά πέντε δοκίμια κατασκευάστηκαν για την κυβική δομή, ενώ για την πολυγωνική δομή κατασκευάστηκαν τρία. Το μέγεθος και των δύο δοκιμίων ήταν κατά προσέγγιση 40x40x40 χιλιοστά (μήκος x πλάτος x ύψος).

7.3 Πειραματικό μέρος για την κυβική πλεγματική δομή

Το πρώτο πείραμα αφορά το πρώτο σχέδιο που εκτυπώσαμε το οποίο έχει κυβική δομή. Τοποθετήσαμε το κυβικό δοκίμιο στην μηχανή θλίψης και εφαρμόσαμε δύναμη 30kN με στόχο να κατανοήσουμε καλύτερα τη συμπεριφορά του σε καταπόνηση. Τα αποτελέσματα αυτά μας δίνουν πολύ καλά και αξιόπιστα στοιχεία για την συγκεκριμένη δομή αφού κατανοούμε σε πραγματικές συνθήκες την συμπεριφορά της και μπορούμε να επιλέξουμε σε ποιά μελλοντική εφαρμογή θα μπορούσε να επιλεχτεί

ως στοιχείο δόμησης μιας κατασκευής σε κάποια εφαρμογή όπως για παράδειγμα στην αυτοκινητοβιομηχανία. Για τη συγκεκριμένη δομή εκτυπώσαμε στον 3D εκτυπωτή 5 δοκίμια με σκοπό να πάρουμε μία πιο συνολική και αξιόπιστη εικόνα όσον αφορά την καταπόνησή της. Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται η κυβική δομή μετά το πείραμα της θλίψης. Όπως φαίνεται και στις φωτογραφίες αλλά και από την παρακολούθηση του πειράματος, παρατηρούμε ότι η δομή ξεκινάει και αστοχεί κυρίως από το άνω μέρος και στη συνέχεια αυτό μεταφέρεται σε ολόκληρη την πλεγματοκή δομή.

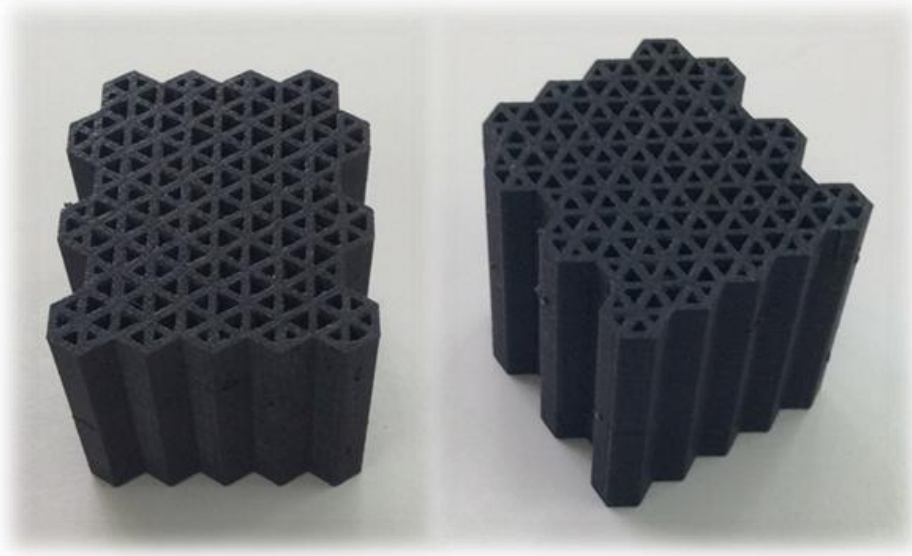


Εικόνα 7.6 Τα κυβικά πλεγματοκά δοκίμια μετά το πείραμα θλίψης

7.4 Πειραματικό μέρος για την πολυγωνική πλεγματοκή δομή

Στο δεύτερο σχέδιο με την πολυγωνική δομή ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία με το πρώτο δοκίμιο, δηλαδή εφαρμόσαμε και πάλι δύναμη έως 30kN στο μηχάνημα θλίψης με στόχο να βρούμε τα όρια αντοχής της συγκεκριμένης δομής. Κατά τη διάρκεια του πειράματος θλίψης παρατηρούμε ότι η πολυγωνική δομή αποδεικνύεται πολύ σταθερή και στιβαρή, με ελάχιστα σημεία παραμόρφωσης, κυρίως στα σημεία στήριξης και

πίεσης από το κινούμενο πλατό της μηχανής θλίψης. Αυτό οφείλεται κυρίως στον σχεδιασμό και τη μορφή της πολυγωνικής δομής, αφού το φορτίο το εσωτερικό είναι διαμορφωμένο με ενισχυτικά νεύρα που δίνουν τη δυνατότητα στην κατασκευή να αντιστέκεται σε μεγάλο φορτίο. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνεται η πολυγωνική δομή μετά το πείραμα θλίψης. Είναι προφανές όπως φαίνεται και από τις φωτογραφίες μετά το πείραμα ότι το φορτίο των 30kN που εφαρμόσαμε δεν παραμόρφωσε σχεδόν καθόλου τη μορφή του δοκιμίου.



Εικόνα 7.7 Τα πολυγωνικά πλεγματικά δοκίμια μετά το πείραμα θλίψης.

7.5 Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

Κατά την πειραματική διαδικασία καταγράφηκαν όλες οι μεταβλητές που μας δίνουν την αριθμητική αποτίμηση της μηχανικής καταπόνησης των δοκιμίων. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ένα δείγμα από τα αποτελέσματα αφού ο όγκος των δεδομένων είναι πολύ μεγάλος. Τα δεδομένα αφορούν την παραμόρφωση του δοκιμίου σε σχέση με τον χρόνο, το αρχικό ύψος (l_0), το φορτίο και την θλίψη.

Time (s)	Extension (mm)	Load (N)	Compressive extension (mm)	Compressive strain (Extension) (mm/mm)	Compressive stress (MPa)
0	0.02838	5.5638	0	0	0.00454
0.02	0.02838	5.5	0	0	0.00449
0.04	0.02838	5.49714	0	0	0.00449
0.06	0.02839	5.48949	0.00001	0	0.00448
0.08	0.02843	5.44907	0.00006	0	0.00445
0.1	0.0285	5.42728	0.00012	0	0.00443
0.12	0.02857	5.43331	0.00019	0.00001	0.00444
0.14	0.02872	5.49219	0.00035	0.00001	0.00448
0.16	0.02895	5.55481	0.00057	0.00002	0.00453
0.18	0.02905	5.605	0.00068	0.00002	0.00458
0.2	0.0291	5.61184	0.00072	0.00002	0.00458
0.22	0.02913	5.60346	0.00075	0.00002	0.00457
0.24	0.02921	5.61712	0.00084	0.00002	0.00459
0.26	0.02951	5.70512	0.00113	0.00003	0.00466
0.28	0.03006	5.846	0.00168	0.00005	0.00477
0.3	0.03074	6.03585	0.00237	0.00007	0.00493
0.32	0.03143	6.21984	0.00305	0.00009	0.00508
0.34	0.03207	6.39134	0.0037	0.00011	0.00522

Πίνακας 7.1 Ενδεικτική απεικόνιση δεδομένων από το πείραμα στην κυβική πλεγματική δομή.

Time (s)	Extension (mm)	Load (N)	Compressive extension (mm)	Compressive strain (Extension) (mm/mm)	Compressive stress (MPa)
0	0.00005	14.84559	0	0	0.01212
0.02	0.00006	14.83221	0.00001	0	0.01211
0.04	0.0001	14.8319	0.00005	0	0.01211
0.06	0.00015	14.8745	0.0001	0	0.01214
0.08	0.00021	14.9033	0.00016	0	0.01217
0.1	0.00032	14.95838	0.00027	0.00001	0.01221
0.12	0.00053	15.12293	0.00048	0.00001	0.01235
0.14	0.00074	15.38922	0.00069	0.00002	0.01256
0.16	0.00083	15.502	0.00078	0.00002	0.01265
0.18	0.00086	15.53401	0.00081	0.00002	0.01268
0.2	0.00089	15.55091	0.00084	0.00002	0.01269
0.22	0.00096	15.59751	0.00091	0.00003	0.01273
0.24	0.0012	15.8384	0.00115	0.00003	0.01293
0.26	0.00169	16.59616	0.00164	0.00005	0.01355
0.28	0.00236	17.60266	0.00231	0.00007	0.01437
0.3	0.00311	18.76273	0.00306	0.00009	0.01532
0.32	0.0039	19.97022	0.00385	0.00011	0.0163
0.34	0.00469	20.99465	0.00464	0.00013	0.01714

Πίνακας 7.2 Ενδεικτική απεικόνιση δεδομένων από το πείραμα στην πολυγωνική πλεγματική δομή.

Με βάση λοιπόν τα δεδομένα που έχουμε στη διάθεσή μας και συνδυάζοντας τις διαφορετικές μετρήσεις που έχουμε για κάθε δοκίμιο των δύο δομών που σχεδιάσαμε, μπορούμε να σχηματίσουμε τα διαγράμματα παραμόρφωσης με βάση το φορτίο (N) και τη μετατόπιση (mm) που υπόκειται η δομή σε χρονικές στιγμές t.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα δεδομένα σε συνδυασμό για τα πέντε διαφορετικά δοκίμια για την κυβική δομή και αντίστοιχα τα τρία δοκίμια για την πολυγωνική δομή που κατασκευάσαμε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή.

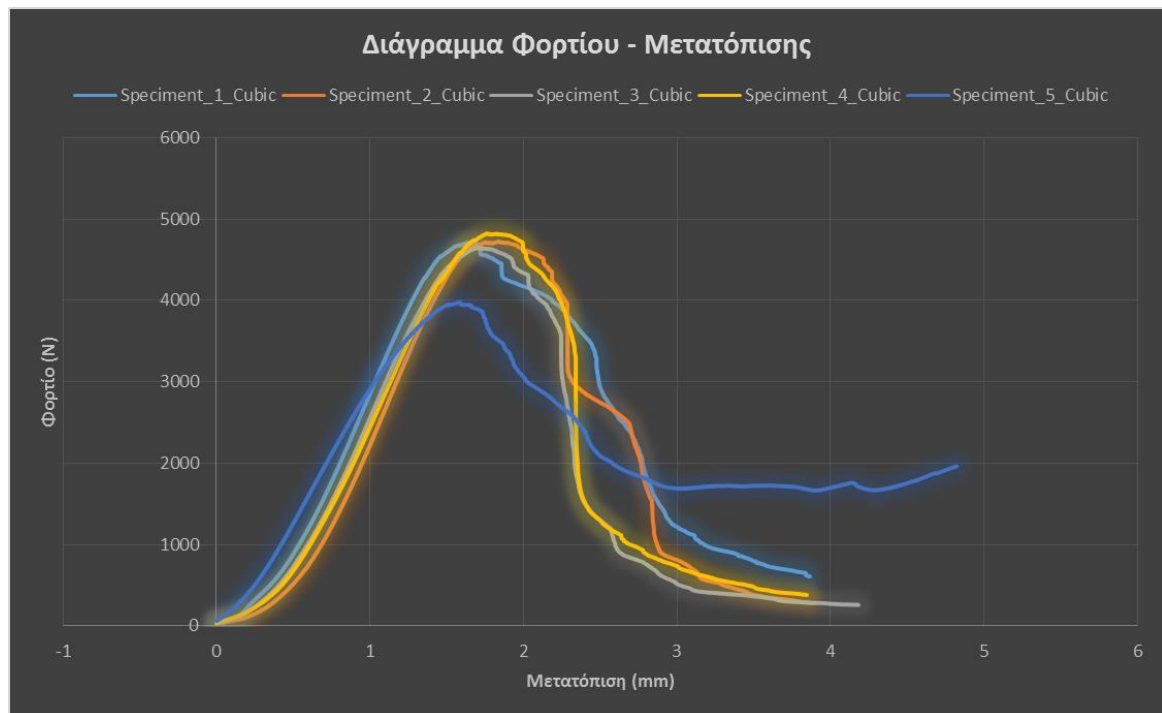
Speciment_1_Cubic		Speciment_2_Cubic		Speciment_3_Cubic		Speciment_4_Cubic		Speciment_5_Cubic	
Extension (mm)	Load (N)	Extension (mm)	Load (N)	Extension (mm)	Load (N)	Extension (mm)	Load (N)	Extension (mm)	Load (N)
0.02838	5.5638	0.02049	6.32865	0.02419	6.97632	0.08026	7.82776	0.12506	6.45773
0.02838	5.5	0.02049	6.28036	0.02417	6.9577	0.08026	7.80304	0.12506	6.50042
0.02838	5.49714	0.02049	6.23353	0.02416	6.93836	0.08026	7.75439	0.12512	6.54044
0.02839	5.48949	0.02051	6.23372	0.02418	6.93516	0.08027	7.75013	0.1253	6.6532
0.02843	5.44907	0.02056	6.26893	0.02423	6.94511	0.08032	7.71685	0.12547	6.78605
0.0285	5.42728	0.02062	6.30937	0.02429	6.88748	0.08039	7.75282	0.12555	6.82792
0.02857	5.43331	0.02069	6.2653	0.02437	6.89521	0.08048	7.76357	0.12559	6.8484
0.02872	5.49219	0.02084	6.25889	0.02453	6.87397	0.08066	7.79945	0.12562	6.92269
0.02895	5.55481	0.02097	6.31658	0.0247	6.95749	0.0808	7.84867	0.12577	6.99668
0.02905	5.605	0.02103	6.32237	0.02478	7.04349	0.08085	7.87372	0.12619	7.32606
0.0291	5.61184	0.02106	6.29692	0.02481	7.00567	0.08088	7.81691	0.12692	7.86216
0.02913	5.60346	0.0211	6.3273	0.02484	6.94795	0.08092	7.81887	0.12778	8.44419
0.02921	5.61712	0.02126	6.33349	0.02492	6.9277	0.08102	7.87046	0.12862	9.02811
0.02951	5.70512	0.02165	6.4267	0.02521	7.09168	0.08135	8.04702	0.12934	9.55223
0.03006	5.846	0.02226	6.54586	0.02578	7.39706	0.08198	8.43239	0.12993	9.95997
0.03074	6.03585	0.02298	6.78099	0.0266	7.81651	0.08278	8.97544	0.1304	10.24701
0.03143	6.21984	0.02374	6.98289	0.02751	8.28703	0.08361	9.55883	0.13081	10.51707

Πίνακας 7.3 Ενδεικτική απεικόνιση δεδομένων φορτίου και μετατόπισης για όλα τα δείγματα της κυβικής πλεγματοειδούς δομής.

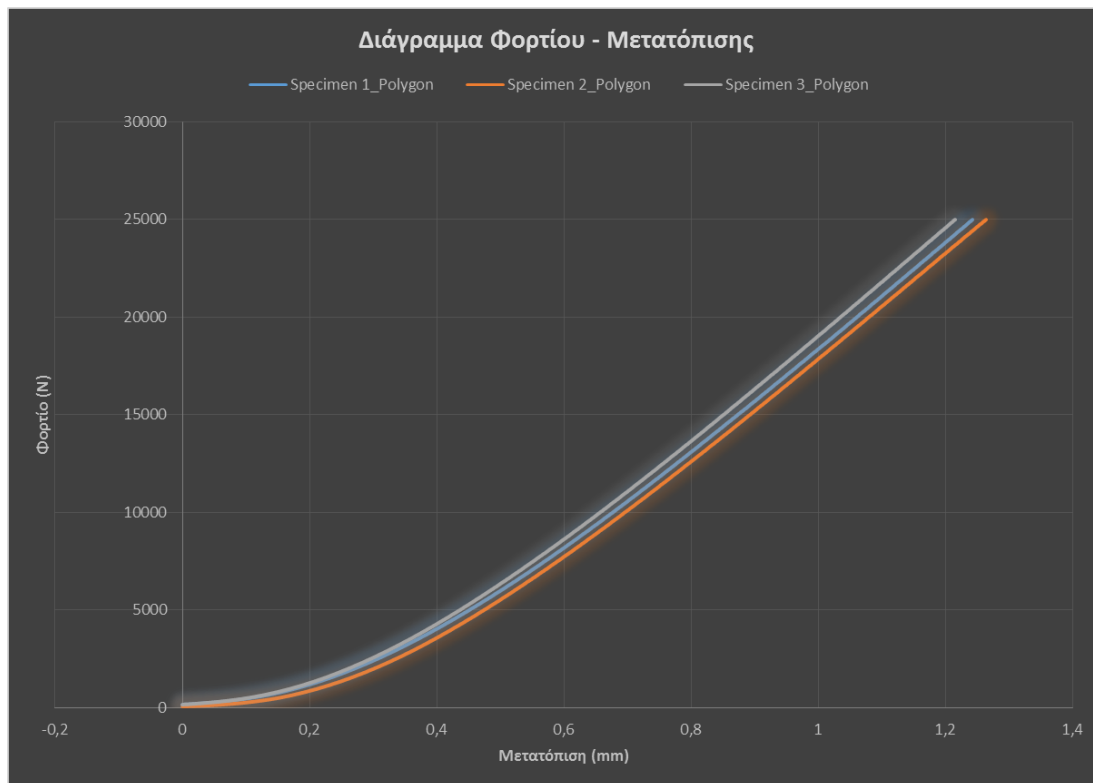
Extension (mm)	Load (N)	Extension (mm)	Load (N)	Extension (mm)	Load (N)
0.00005	14.84559	0.02607	2.65335	-0.04681	7.51035
0.00006	14.83221	0.02607	2.62092	-0.04681	7.53834
0.0001	14.8319	0.02607	2.57464	-0.04679	7.54577
0.00015	14.8745	0.02609	2.60632	-0.04674	7.56285
0.00021	14.9033	0.02614	2.5531	-0.04666	7.64797
0.00032	14.95838	0.0262	2.50254	-0.04648	7.8727
0.00053	15.12293	0.0263	2.47807	-0.04624	8.20734
0.00074	15.38922	0.02647	2.62681	-0.04611	8.37886
0.00083	15.502	0.0266	2.77455	-0.04606	8.41449
0.00086	15.53401	0.02666	2.81111	-0.04604	8.39686
0.00089	15.55091	0.02669	2.83206	-0.04594	8.51914
0.00096	15.59751	0.02683	2.95074	-0.04562	9.05156
0.0012	15.8384	0.02719	3.32458	-0.04504	10.10721
0.00169	16.59616	0.02776	3.99561	-0.04432	11.47526
0.00236	17.60266	0.02844	4.90628	-0.04355	12.92685
0.00311	18.76273	0.02912	5.84503	-0.04279	14.35838
0.0039	19.97022	0.02975	6.63772	-0.04208	15.60112
0.00469	20.99465	0.0303	7.2798	-0.04148	16.60255

Πίνακας 7.4 Ενδεικτική απεικόνιση δεδομένων φορτίου και μετατόπισης για όλα τα δείγματα της πολυγωνικής πλεγματοειδούς δομής.

Από τα παραπάνω δεδομένα, συνδυάζοντας τις τιμές που έχουμε για το φορτίο και τη μετατόπιση, έχουμε τα στοιχεία που χρειαζόμαστε ώστε να σχηματίσουμε τα διαγράμματα load – extension και να παρατηρήσουμε πως συμπεριφέρονται τα διαφορετικής δομής και διατομής δοκίμια που σχεδιάσαμε και κατασκευάσαμε στον 3D εκτυπωτή. Αναφέρουμε πως τα παραπάνω δεδομένα είναι μόνο ένα δείγμα δεδομένων λόγω του μεγάλου όγκου μετρήσεων.



Εικόνα 7.8 Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης των κυβικών μορφών επαλληλίας



Εικόνα 7.9 Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης των πολυγωνικών πλεγματικών δομών

Στα διαγράμματα παρατηρούμε πως συμπεριφέρεται κάθε δομή ξεχωριστά σε κάθε δοκιμή θλίψης που πραγματοποιήσαμε. Για την κυβική δομή, στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι και τα πέντε δοκίμια συμπεριφέρονται σχεδόν με παρόμοιο τρόπο, όπως άλλωστε φαίνεται και στις εικόνες των δοκιμών από το πείραμα θλίψης. Αρχικά, η καταπόνηση της δομής μεταφράζεται στη γραμμική περιοχή του διαγράμματος και σε ελαστική παραμόρφωση. Στη συνέχεια συναντάμε τα σημεία διαρροής όπου και η δομή ξεκινά να μπαίνει στην περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης μέχρι το σημείο αστοχίας – θραύσης της δομής. Όσον αφορά το συγκεκριμένο σχέδιο που εκτυπώσαμε για τις ανάγκες των πειραμάτων, είναι προφανές πως το φορτίο που μπορεί να υποστεί η πλεγματική δομή δεν θα μπορούσε να υπερβαίνει τα 5kN. Η παραμόρφωση στην κυβική πλεγματική δομή όπως φαίνεται από το διάγραμμα μετατόπισης-φορτίου αλλά και από τις εικόνες μετά το πείραμα είναι αρκετά μεγάλη αφού η μετατόπιση φτάνει σε τιμές των 2 χιλιοστών.

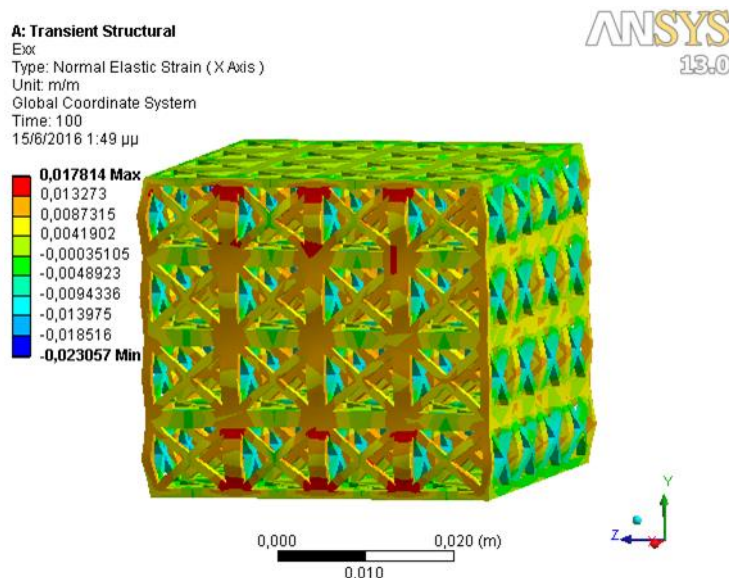
Σε αντίθεση με την πρώτη πλεγματική δομή, η πολυγωνική δομή δεν συμπεριφέρεται όπως η κυβική και η δύναμη των 30kN που εφαρμόστηκε δεν ήταν αρκετή για να οδηγήσει σε παραμόρφωση της δομής. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η μορφή της συγκεκριμένης δομής. Στο διάγραμμα φαίνεται πως και τα τρία δοκίμια δεν υπέστησαν κάποια σοβαρή παραμόρφωση και ως εκ τούτου δεν υπάρχει πλαστική παραμόρφωση ούτε και σημείο διαρροής. Παρατηρούμε ότι το δοκίμιο παραμένει στην περιοχή της ελαστικής παραμόρφωσης μέχρι και το τέλος του πειράματος θλίψης και η παραμόρφωση που υπέστη το κάθε δοκίμιο είναι της τάξεως του ενός χιλιοστού σε πενταπλάσιο φορτίο από αυτό που εφαρμόστηκε στην κυβική πλεγματική δομή.

Κεφάλαιο 8 Υπολογιστική προσομοίωση

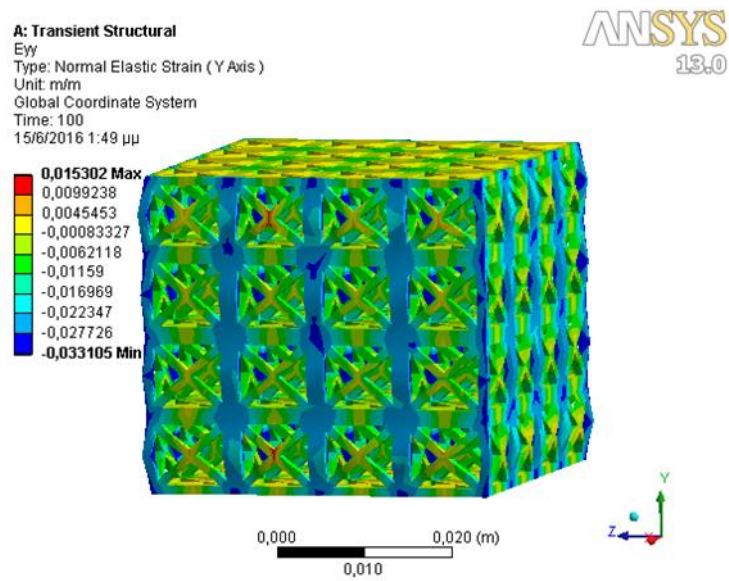
8.1 Υπολογιστικό μέρος

Στο υπολογιστικό μέρος η διαδικασία και τα δεδομένα εφαρμόστηκαν σε προσομοίωση στον υπολογιστή με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS 13.0 στο οποίο είχαμε τη δυνατότητα να κατανοήσουμε καλύτερα αλλά και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα από το πειραματικό μέρος. Μετά από τη διαδικασία και την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα, παρατηρούμε ότι τα υπολογιστικά αποτελέσματα βρίσκονται πολύ κοντά στα πειραματικά αφού η προσομοίωση μας δείχνει ότι οι πλεγματικές δομές αστοχούν σχεδόν στα ίδια σημεία και με τον ίδιο ρυθμό. Στις παρακάτω φωτογραφίες μπορούμε να παρατηρήσουμε το πως αστοχούν τα δύο σχέδια των πλεγματικών δομών και σε ποια σημεία κατά τους άξονες X, Y και Z. Παρατηρούμε πως η μέγιστη καταπόνηση στην κυβική πλεγματική δομή βρίσκεται στο ανώτερο επίπεδο της δομής και προς τα εξωτερικά τοιχώματα. Στην πολυγωνική πλεγματική δομή το μέγιστο φορτίο εστιάζεται στο κέντρο της δομής και στα εξωτερικά τοιχώματα λόγω των εξωτερικών ακμών όπου και συσσωρεύονται φορτία.

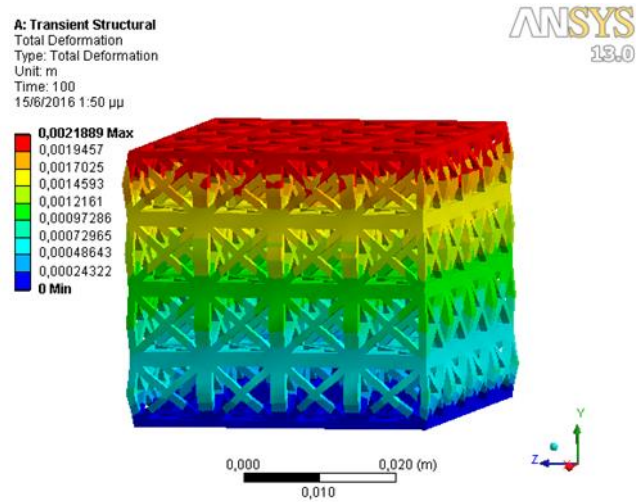
Παραμόρφωση κυβικής πλεγματικής δομής



Εικόνα 8.1 Παραμόρφωση πλεγματικής δομής κατά τον οριζόντιο άξονα x.

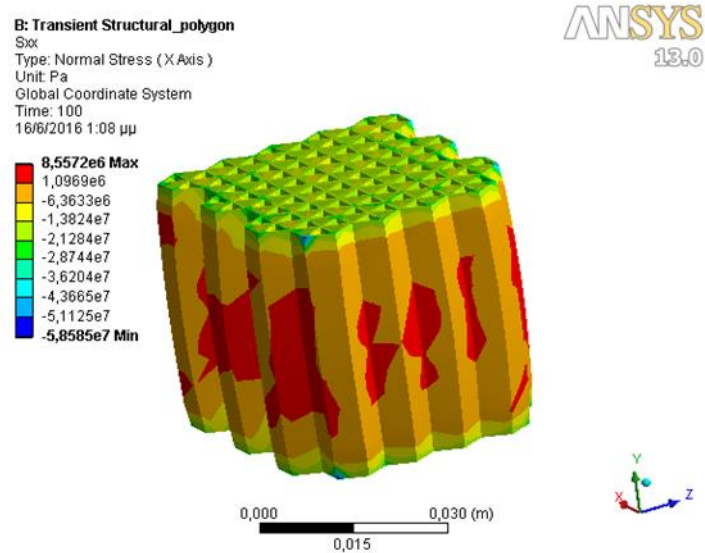


Εικόνα 8.2 Παραμόρφωση δομής κατά τον εγκάρσιο άξονα y.

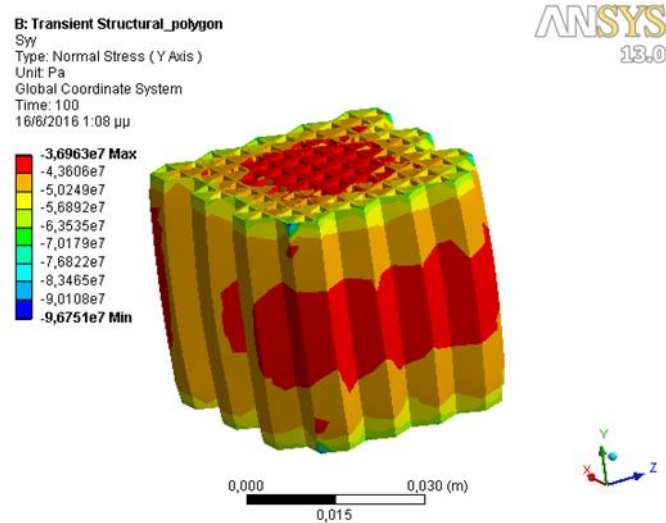


Εικόνα 8.3 Η εικόνα μας δείχνει την συνολική παραμόρφωση που δέχεται το δοκίμιο στην προσομοίωση θλίψης.

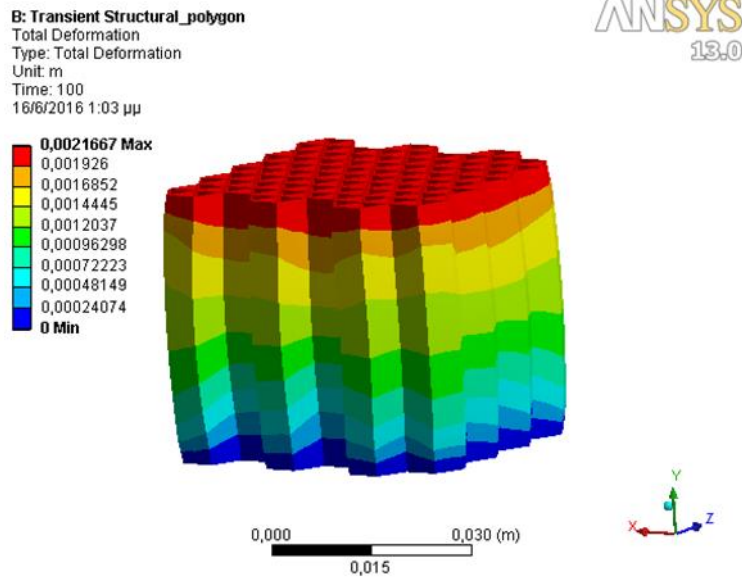
Παραμόρφωση πολυγωνικής πλεγματικής δομής



Εικόνα 8.4 Η καταπόνηση σε φορτίο της πολυγωνικής δομής κατά τον οριζόντιο άξονα x.



Εικόνα 8.5 Η καταπόνηση στο δοκίμιο κατα τον εγκάρσιο άξονα y.



Εικόνα 8.6 Η συνολική παραμόρφωση του δοκιμίου μετά την υπολογιστική προσομοίωση θλίψης

8.2 Αριθμητικά αποτελέσματα από την υπολογιστική προσομοίωση

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ακριβή επίλυση προβλημάτων μηχανικής και στις μέρες μας αποτελεί κορυφαία μέθοδος με εφαρμογή σε πρακτικά προβλήματα. Το πρώτο βήμα της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση της εξεταζόμενης δομής σε υποδιαιρέσεις ή στοιχεία. Το δεύτερο βήμα είναι η παρεμβολή της μετατόπισης του μοντέλου. Το τρίτο βήμα εξετάζει τα στοιχεία δυσκαμψίας και των φορτίων και το τέταρτο βήμα, εκτελεί την συνάθροιση των εξισώσεων ισορροπίας. Ένας βασικός παράγοντας για την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα μοντέλο είναι η διαίρεση του σε μικρότερα στοιχεία. Παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα της ανάλυσης είναι το πλήθος των στοιχείων και το μέγεθός τους. Γενικά, μία αύξηση στον αριθμό των στοιχείων σημαίνει πιο ακριβή αποτελέσματα. Εάν το σώμα δεν έχει απότομες μεταβολές στη γεωμετρία του και δεν έχουμε συμπεριλάβει στους υπολογισμούς τις ιδιότητες του υλικού και εξωτερικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία, το σώμα μπορεί να χωριστεί σε ίσες υποδιαιρέσεις. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να εισαχθούν οι ασυνέχειες ώστε να έχουμε μία πιο ακριβή λύση.

Μετά την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στα μοντέλα που σχεδιάσαμε στο υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS 13.0, πέραν της απεικόνισης των δομών με βάση τα στοιχεία της θλίψης και της καταπόνησης μετά την εφαρμογή φορτίου, εξάγαμε και τα αριθμητικά αποτελέσματα των αντιδράσεων και στις τρεις κατευθύνσεις (X, Y, Z), αλλά και τις συνολικές αντιδράσεις δυνάμεων με βάση το χρόνο. Με βάση λοιπόν τους χρόνους και την ταχύτητα, μπορέσαμε να υπολογίσουμε

τις μετατοπίσεις των μοντέλων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στους παρακάτω πίνακες παραθέτουμε ένα δείγμα από τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς που εκτελέσαμε για την κυβική και την πολυγωνική δομή αντίστοιχα (20 πρώτες μετρήσεις, λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων), αλλά και τα διαγράμματα φορτίου-μετατόπισης για κάθε ένα από τα δοκίμια της κυβικής και πολυγωνικής πλεγματοειδούς δομής.

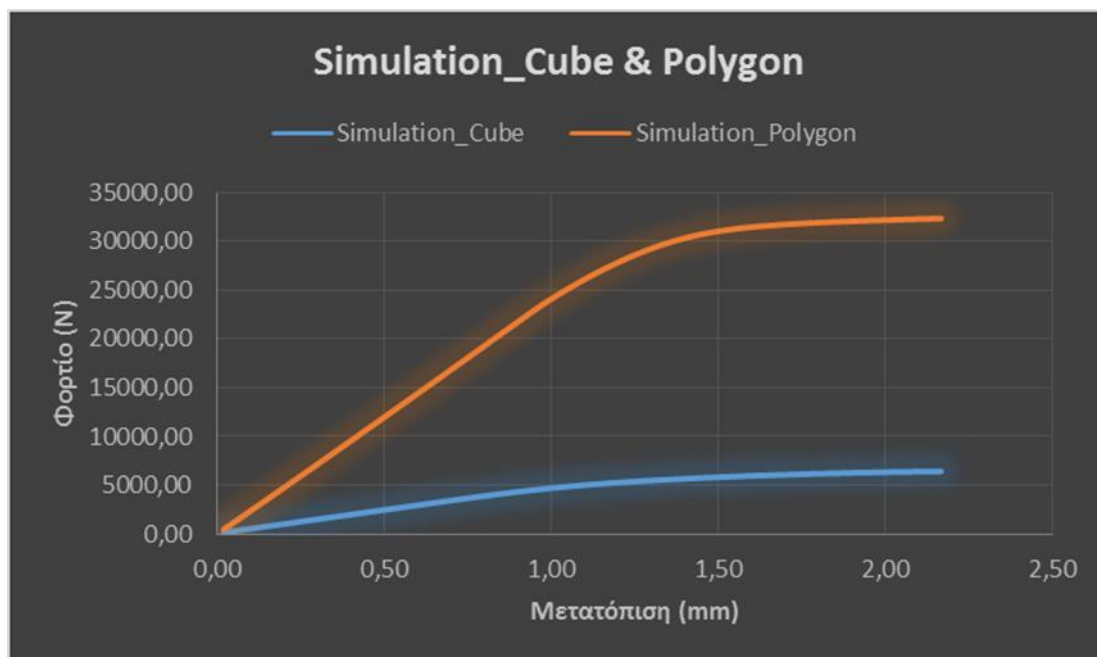
Στις πρώτες στήλες των πινάκων παρατηρούμε πως διαμορφώνονται οι τιμές των αντιδράσεων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης θλίψης στο υπολογιστικό πρόγραμμα και στις τρεις αξονικές κατευθύνσεις κατά τη διάρκεια του χρόνου. Η στήλη με τη διατομή A (m^2) και την ταχύτητα u (mm/s) είναι σταθερές τιμές καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η διατομή A υπολογίστηκε από το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks, όπου και σχεδιάστηκαν οι πλεγματοειδείς δομές ($0,0566 m^2$), και η ταχύτητα u είναι η σταθερή ταχύτητα που επιλέξαμε και στο πραγματικό μας πείραμα να κινείται το κινούμενο πλατό της μηχανής θλίψης ($0,021667 mm/s$). Στις δύο τελευταίες στήλες των πινάκων υπολογίζουμε την μετατόπιση και την τάση στην επιφάνεια της διατομής της πλεγματοειδούς δομής. Η μετατόπιση x υπολογίστηκε από το γινόμενο ταχύτητας-χρόνου ($u \cdot t$) για κάθε χρονική στιγμή και η τάση από το φορτίο (Total Force Reaction) ανά τη μονάδα επιφάνειας της διατομής (A). Από τα δεδομένα των παραπάνω πινάκων μπορούμε να εξάγουμε το διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης για την υπολογιστική προσομοίωση. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται οι μετατοπίσεις σε σχέση με το φορτίο και για τα δύο σχέδια των πλεγματοειδών δομών που σχεδιάσαμε από την προσομοίωση. Στο διάγραμμα παρατηρούμε πως η πολυγωνική πλεγματοειδής δομή χρειάστηκε σχεδόν πενταπλάσιο φορτίο από την κυβική για να μετατοπιστεί κατά 2 χιλιοστά.

Cube	Time [s]	Force Reaction (X) [N]	Force Reaction (Y) [N]	Force Reaction (Z) [N]	Force Reaction (Total) [N]	A (m^2)	u (mm/s)	Displacement, $u \cdot t$ (mm)	$\sigma = F/A$ (N/m^2)
	1	0.05	104.48	-0.01	104.48	0.0566	0.0216667	0.0217	1844.96
	2	0.10	208.99	-0.02	208.99	0.0566	0.0216667	0.0433	3690.45
	3	0.15	313.54	-0.04	313.54	0.0566	0.0216667	0.0650	5536.64
	4	0.20	418.12	-0.05	418.12	0.0566	0.0216667	0.0867	7383.37
	5	0.25	522.73	-0.06	522.73	0.0566	0.0216667	0.1083	9230.62
	6	0.30	627.37	-0.07	627.37	0.0566	0.0216667	0.1300	11078.40
	7	0.35	732.04	-0.09	732.04	0.0566	0.0216667	0.1517	12926.72
	8	0.40	836.74	-0.10	836.74	0.0566	0.0216667	0.1733	14775.56
	9	0.45	941.47	-0.11	941.47	0.0566	0.0216667	0.1950	16624.93
	10	0.50	1046.20	-0.12	1046.2	0.0566	0.0216667	0.2167	18474.31
	11	0.55	1151.00	-0.14	1151	0.0566	0.0216667	0.2383	20324.92
	12	0.60	1255.80	-0.15	1255.8	0.0566	0.0216667	0.2600	22175.53
	13	0.65	1360.70	-0.16	1360.7	0.0566	0.0216667	0.2817	24027.90
	14	0.70	1465.60	-0.17569	1465.6	0.0566	0.0216667	0.3033	25880.28
	15	0.75	1570.50	-0.18896	1570.5	0.0566	0.0216667	0.3250	27732.65
	16	0.80	1675.40	-0.20232	1675.4	0.0566	0.0216667	0.3467	29585.03
	17	0.85	1780.30	-0.21577	1780.3	0.0566	0.0216667	0.3683	31437.40
	18	0.90	1885.30	-0.22933	1885.3	0.0566	0.0216667	0.3900	33291.54
	19	0.95	1990.30	-0.24298	1990.3	0.0566	0.0216667	0.4117	35145.68
	20	1.00	2095.40	-0.25673	2095.4	0.0566	0.0216667	0.4333	37001.59

Πίνακας 7.5 Ενδεικτικά αριθμητικά δεδομένα από την προσομοίωση στο λογισμικό ANSYS για την κυβική πλεγματοειδή δομή.

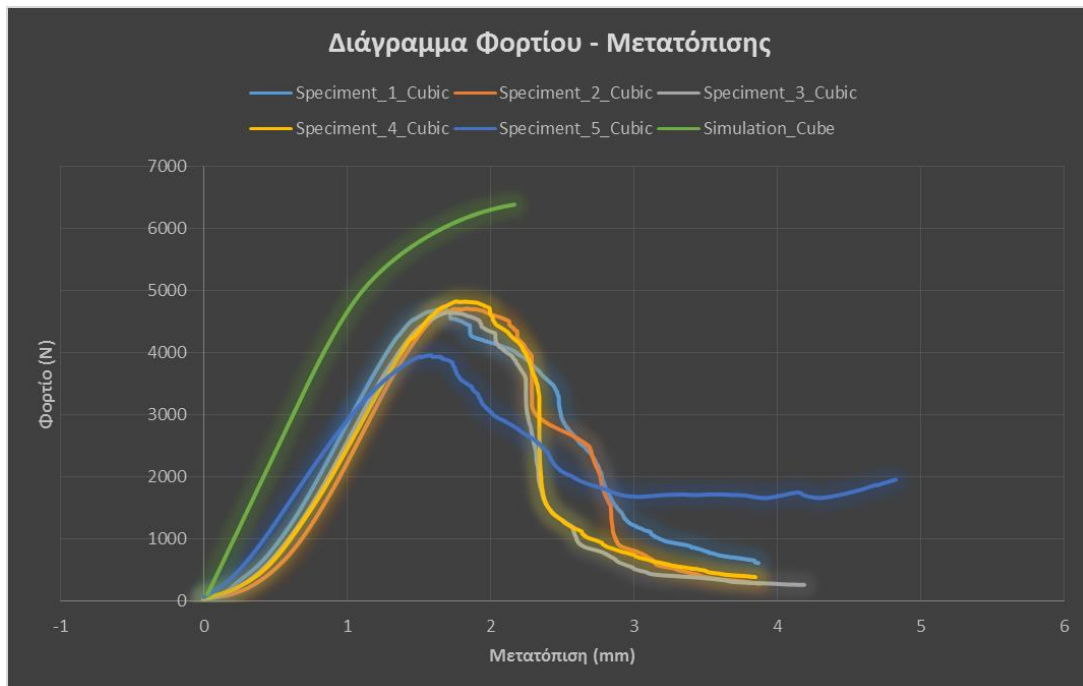
Polygon	Time [s]	Force Reaction (X) [N]	Force Reaction (Y) [N]	Force Reaction (Z) [N]	Force Reaction (Total) [N]	A (m ²)	u (mm/s)	Displacement, u*t (m)	$\sigma=F/A$ (N/m ²)
	1	-0,03	512,66	0,02	512,66	0,00015887	0,0216667	0,0216667000	3226915,088
	2	-0,06	1025,90	0,05	1025,90	0,00015887	0,0216667	0,0433334000	6457480,959
	3	-0,09	1539,60	0,07	1539,60	0,00015887	0,0216667	0,0650001000	9690942,28
	4	-0,13	2053,90	0,09	2053,90	0,00015887	0,0216667	0,0866668000	12928180,27
	5	-0,16	2568,70	0,12	2568,70	0,00015887	0,0216667	0,1083335000	16168565,49
	6	-0,19	3084,10	0,14	3084,10	0,00015887	0,0216667	0,1300002000	19412727,39
	7	-0,22	3600,00	0,16	3600,00	0,00015887	0,0216667	0,1516669000	22660036,51
	8	-0,25	4116,50	0,19	4116,50	0,00015887	0,0216667	0,1733336000	25911122,3
	9	-0,29	4633,50	0,21	4633,50	0,00015887	0,0216667	0,1950003000	29165355,32
	10	-0,32	5151,00	0,23	5151,00	0,00015887	0,0216667	0,2166670000	32422735,57
	11	-0,35	5669,10	0,26	5669,10	0,00015887	0,0216667	0,2383337000	35683892,49
	12	-0,38	6187,70	0,28	6187,70	0,00015887	0,0216667	0,2600004000	38948196,64
	13	-0,42	6706,90	0,31	6706,90	0,00015887	0,0216667	0,2816671000	42216277,46
	14	-0,45	7226,60	0,33	7226,60	0,00015887	0,0216667	0,3033338000	45487505,51
	15	-0,48	7746,90	0,36	7746,90	0,00015887	0,0216667	0,3250005000	48762510,23
	16	-0,51	8267,70	0,38	8267,70	0,00015887	0,0216667	0,3466672000	52040662,18
	17	-0,55	8789,10	0,41	8789,10	0,00015887	0,0216667	0,3683339000	55322590,8
	18	-0,58	9311,00	0,43	9311,00	0,00015887	0,0216667	0,3900006000	58607666,65
	19	-0,61	9833,50	0,46	9833,50	0,00015887	0,0216667	0,4116673000	61896519,17
	20	-0,65	10357,00	0,48	10357,00	0,00015887	0,0216667	0,4333340000	65191666,14

Πίνακας 7.6 Ενδεικτικά αριθμητικά δεδομένα από την προσομοίωση στο λογισμικό ANSYS για την πολυγωνική πλεγματοειδή δομή

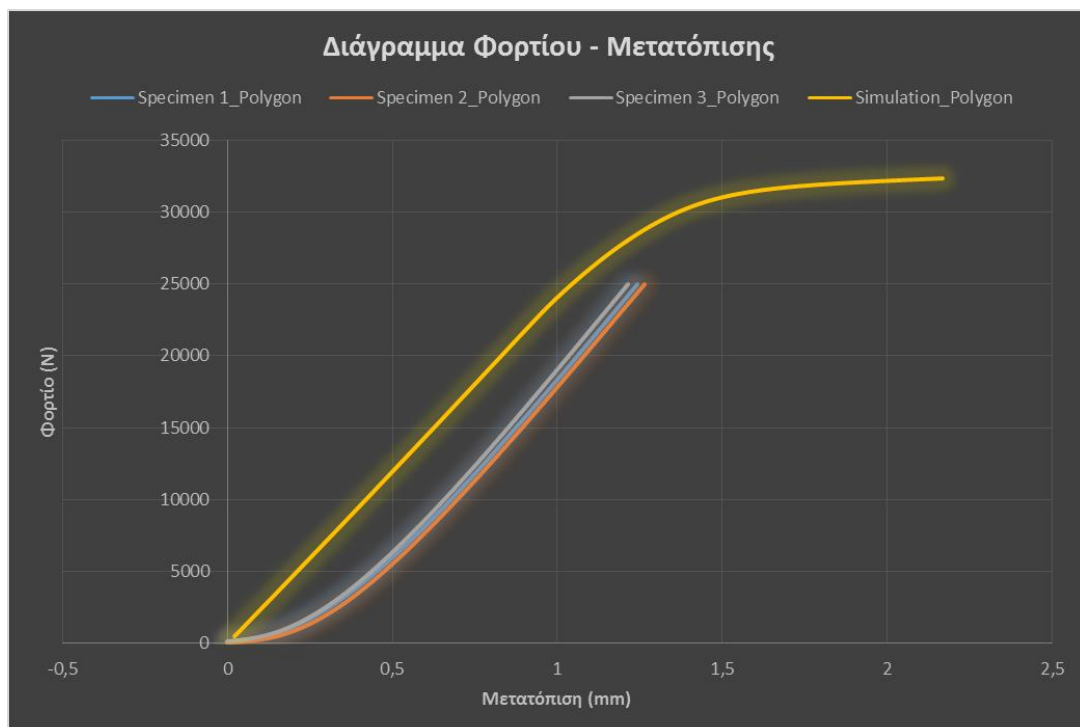


Εικόνα 8.6 Διάγραμμα φορτίου και μετατόπισης από την υπολογιστική προσομοίωση στο ANSYS.

Μετά από την ολοκλήρωση των πειραμάτων για όλα τα δείγματα που εκτυπώσαμε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή και τις υπολογιστικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε στο λογισμικό ANSYS, μπορούμε να συγκρίνουμε τα πραγματικά δεδομένα από το πείραμα με τα υπολογιστικά με σκοπό να αξιολογήσουμε την πειραματική διαδικασία συνολικά.



Εικόνα 8.7 Διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων από το πείραμα και την υπολογιστική προσομοίωση για την κυβική πλεγματική δομή.



Εικόνα 8.8 Διάγραμμα φορτίου-μετατόπισης. Σύγκριση αριθμητικών αποτελεσμάτων από το πείραμα και την υπολογιστική προσομοίωση για την πολυγωνική πλεγματική δομή

8.3 Αξιολόγηση των δομών

Μετά από την εκτέλεση των πειραμάτων σε εργαστηριακό αλλά και σε υπολογιστικό επίπεδο, φαίνεται πως οι δύο δομές ίσως να μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και σε μία πραγματική κατασκευή σε κάποια βιομηχανία. Η κυβική δομή για παράδειγμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για κάποια κατασκευαστική ανάγκη όπου το κριτήριο δε θα ήταν η αντοχή, αλλά η σταθερότητα και το μειωμένο βάρος. Κάποιες εφαρμογές που θα ήταν εφικτή η χρήση μίας τέτοιας δομής θα ήταν προϊόντα που αφορούν ίσως εφαρμογές οικιακής χρήσης. Τέτοια προϊόντα ίσως θα μπορούσαν να ήταν ένα mouse για ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου θα μπορούσε να κατασκευαστεί το κυρίως σώμα (body structure). Με αυτό τον τρόπο θα είχαμε επιτύχει χαμηλό βάρος, ανθεκτική δομή και φθινό κόστος κατασκευής. Μία ακόμα ίσως επιτυχημένη εφαρμογή μιας τέτοια δομής θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε κάποια πιο απαιτητική βιομηχανία όπως είναι η αμυντική βιομηχανία στην οποία στόχος είναι το χαμηλό βάρος σε συνδυασμό με την αντοχή.

Σε αντίθεση με την κυβική, η πολυγωνική δομή ίσως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε κάποια πιο βαριά βιομηχανία, όπου η χρήση θα ήταν έντονη και τα κριτήρια θα αφορούσαν την αντοχή και τη στιβαρότητα μίας κατασκευής, χωρίς να δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο βάρος. Παραδείγματα για χρήση της συγκεκριμένης δομής σε κάποια εφαρμογή όπου θα απαιτούσε αντοχή ίσως είναι η κατασκευή δικτυωμάτων για την στήριξη κάποιας οροφής, η κατασκευή ικριωμάτων για την επισκευή ή την συντήρηση κτιρίων, αλλά και μικρότερες εφαρμογές όπως η βάση μιας τηλεόρασης όπου υπόκειται σε συνεχές φορτίο και η υπάρχει η αμφιβολία και ο φόβος της αστοχίας.

Βιβλιογραφία

- Naing, M.W., Chua, C.K., Leong, K.F., Wang, Y. (2005) *Fabrication of customized scaffolds using computer-aided design and rapid prototyping techniques*. Singapore: Nanyang Technological University.
- Kantaros, A., Chatzidai, N., Karalekas, D. (2015) '3D printing-assisted design of scaffold structures'. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 0268-3768, pp. 2-12.
- Berman, B. (2011) '3D printing: the new industrial revolution'. *Sciencedirect*, 55, pp. 156-161.
- Kantaros, A. (2015) *Design and characterization of 3D structures for biomedical applications*. University of Piraeus.
- Shenoi, R.A., Groves, A., Rajapaske, Y.D.S. (2005) *Theory and Applications of Sandwich Structures*, University of Southampton.
- Sherman, L. M. (2009) Additive manufacturing: new capabilities for rapid prototypes and production parts. *Plastics Technology*, 553, pp. 35-45.
- CSC Leading Edge Forum (2012) *3D printing and the future of manufacturing*. Australia.
- Chua, C. K., Leong, K. F., Cheah, C. M., Chua, S. W. (2003) 'Development of a Tissue Engineering Scaffold Structure Library for Rapid Prototyping'. *Part 1: Investigation and Classification*, 21, pp. 291-299.
- Sabree, I., Gough, J.E., Derby, B. (2015) 'Mechanical properties of porous ceramic scaffolds: Influence of internal dimensions'. *Ceramics International*, 41, pp. 8425-8432.