



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ  
(3D PRINTING) ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ  
ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΟΥ ABS.**

---

Αναστάσιος Σαμαράς

Επιβλέπων: Αλέξης Κερμανίδης

Βόλος 2016

## Ευχαριστίες

Πρώτα και κύρια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα και Επίκουρο Καθηγητή κ. Αλέξη Κερμανίδη για το ενδιαφέρον του γύρω από το θέμα της διπλωματικής εργασίας, τις συμβουλές και την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπο μου.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους κ.κ Αθ. Παπαθανασίου και Γρ. Χαϊδεμενόπουλο καθώς και το Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών και το Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος που μου παραχώρησαν την άδεια για τη χρησιμοποίηση του απαραίτητου εξοπλισμού.

Ακόμη, οφείλω ευχαριστίες στον υπογύφιο διδάκτωρ Πέτρο Χριστοδούλου για την καθοδήγηση, τις συμβουλές του και τον χρόνο που αφιέρωσε για την διεξαγωγή μέρους των πειραμάτων.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ αξίζει στην εταιρία Create N Paste και στον Αντώνη Τσιαρσιώτη για τη συνεισφορά τους στην κατασκευή των δοκιμίων, τις πολύτιμες συμβουλές του και τη γενικότερα εξαιρετική συνεργασία που αναπτύξαμε.

Ευχαριστίες οφείλω και στους φίλους μου Γιάννη, Χάρη, Παναγιώτη, Γιάννη, Κώστα και Γιάννη, για τα υπέροχα φοιτητικά χρόνια που μου χάρισαν και την στήριξη τους, όπως και σε όλους όσους αποτέλεσαν μέλη της Centaurus Racing Team από το 2013 έως το 2015 για τις έντονες και δημιουργικές στιγμές που ζήσαμε.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου. Τους γονείς μου Γιώργο και Ζωή καθώς και τα αδέρφια μου Παντελή και Στάθη για όλα όσα μου έχουν προσφέρει.

## Περίληψη

Τα τελευταία τριάντα χρόνια αναπτύσσονται όλο και περισσότερο οι μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης καθώς δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής πολύπλοκων γεωμετριών που είναι από δύσκολο έως αδύνατο να δημιουργηθούν με άλλες μεθόδους. Η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μια μέθοδο προσθετικής παραγωγής στην οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Η πιο διαδεδομένη τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η μέθοδος εναπόθεσης τήγματος. Χρησιμοποιείται ευρέως για ταχεία προτυποποίηση άλλα δεν είναι ακόμη ικανή να παράγει λειτουργικά εξαρτήματα. Αυτή η αδυναμία οφείλεται στις χαμηλές μηχανικές ιδιότητες που διαθέτουν τα παραγόμενα με μέθοδο εναπόθεσης τήγματος προϊόντα.

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μία παραμετρική μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων τρισδιάστατης εκτύπωσης στις μηχανικές ιδιότητες εφελκυσμού του πολυμερούς ABS. Οι παράμετροι εκτύπωσης που εξετάζονται είναι το ποσοστό πλήρωσης και το πάχος στρώματος του εκτυπωμένου θερμοπλαστικού ABS. Αναλύεται, επίσης, η επίδραση του ποσοστού κενών της δομής, που προκύπτει από τις διαφορετικές παραμέτρους, στη μηχανική του συμπεριφορά. Ακόμη, πραγματοποιείται μία σύγκριση των ιδιοτήτων του υλικού που προέκυψαν από τα πειράματα με τις θεωρητικές τιμές που προκύπτουν από τον νόμο μίξης της θεωρίας μηχανικής σύνθετων υλικών. Τέλος, διαπιστώνεται η ακρίβεια που μπορεί να πετύχει ένας μη επαγγελματικός εκτυπωτής στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής και καταγράφεται η επιρροή των παραμέτρων που μελετήθηκαν στο χρόνο εκτύπωσης.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την πειραματική διαδικασία δείχνουν ότι οι μειωμένες μηχανικές ιδιότητες οφείλονται στην ύπαρξη κενών στη δομή και ότι το πάχος στρώματος επηρεάζει το ποσοστό κενών. Η σύγκριση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων οδηγεί σε υπερεκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων. Ακόμη, η ανάλυση της δομής οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένας μη επαγγελματικός εκτυπωτής είναι ικανός να προσδώσει την απαιτούμενη ακρίβεια στη δομή. Τέλος, διαπιστώνεται ότι η εναπόθεση λιγότερου υλικού και λιγότερων στρωμάτων οδηγεί σε ταχύτερες εκτυπώσεις.

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή.....	8
1.1	Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας .....	8
1.2	Κίνητρο και Υπόβαθρο .....	9
1.3	Σκοπός της Έρευνας και Ερευνητικά Ερωτήματα .....	10
Κεφάλαιο 2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	11
2.1	Μέθοδος Εναπόθεσης Τήγματος (Fused Deposition Modeling - FDM) .....	11
2.2	Μηχανισμός Ενοποίησης και Δομή στην FDM.....	14
2.3	Ακρίλονιτρίλιο – Βουταδιένιο – Στυρένιο (ABS).....	16
2.3.1	Το ABS στην Τρισδιάστατη Εκτύπωση .....	17
2.4	Έρευνες από τη Διεθνή Βιβλιογραφία .....	18
Κεφάλαιο 3	Πειραματική Διαδικασία.....	20
3.1	Κατασκευή Δοκιμίων.....	20
3.2	Πειραματική Προμελέτη .....	23
3.3	Πειράματα Εφελκυσμού.....	27
3.4	Ανάλυση Μικροδομικών Χαρακτηριστικών FDM ABS .....	28
Κεφάλαιο 4	Πειραματικά Αποτελέσματα .....	30
4.1	Αποτελέσματα Πειραμάτων Εφελκυσμού .....	30
4.1.1	Επίδραση Ποσοστού Πλήρωσης στις Μηχανικές Ιδιότητες.....	30
4.1.2	Επίδραση Πάχους Στρώματος στις Μηχανικές Ιδιότητες .....	33
4.2	Μικροδομικά Χαρακτηριστικά FDM ABS.....	36
4.2.1	Ποσοστό Πλήρωσης 100 %.....	36
4.2.2	Ποσοστό Πλήρωσης 70 % .....	41
4.3	Χρόνος Εκτύπωσης .....	45
4.4	Θεωρητικοί Υπολογισμοί.....	47
Κεφάλαιο 5	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων .....	49
5.1	Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων .....	49
5.2	Χρόνος Εκτύπωσης .....	52
5.3	Θεωρητικοί Υπολογισμοί.....	52
Κεφάλαιο 6	Συμπεράσματα .....	54
Κεφάλαιο 7	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....	55
Κεφάλαιο 8	Βιβλιογραφία.....	56

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1.1: Σχηματική απεικόνιση της FDM λειτουργίας (4).....	12
Εικόνα 2.1.2: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος εξώθησης νήματος (5).....	12
Εικόνα 2.1.3: Τρισδιάστατο μοντέλο CAD.....	13
Εικόνα 2.1.4: Τριγωνοποίηση κατά την μετατροπή σε αρχείο .stl.....	13
Εικόνα 2.1.5: Προεπισκόπηση εκτύπωσης.....	13
Εικόνα 2.1.6: Εκτύπωση αντικειμένου.....	13
Εικόνα 2.1.7: Τελικό προϊόν.....	14
Εικόνα 2.2.1: Στάδια πυροσυσσωμάτωσης.....	15
Εικόνα 2.2.2: Σχηματική απεικόνιση της FDM δομής.....	15
Εικόνα 2.3.1: Ακρυλονιτρίλιο (13).....	16
Εικόνα 2.3.2: Βουταδιένιο (13).....	16
Εικόνα 2.3.3: Στυρένιο (13).....	16
Εικόνα 3.1.1: Ο εκτυπωτής Makerbot Replicator 2x.....	20
Εικόνα 3.1.2: Παράμετροι που επιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες.....	21
Εικόνα 3.1.3: Πάχος και πλάτος ίνας.....	21
Εικόνα 3.1.4: Υψηλό ποσοστό πλήρωσης.....	22
Εικόνα 3.1.5: Χαμηλό ποσοστό πλήρωσης.....	22
Εικόνα 3.2.1: Σημεία συγκέντρωσης τάσεων στη ραδίωση.....	23
Εικόνα 3.2.2: Διαστάσεις δοκιμίου σύμφωνα με ASTM D638 Type 1.....	24
Εικόνα 3.2.3: Κενό μεταξύ πλήρωσης και περιμέτρου στην προεπισκόπηση της εκτύπωσης.....	24
Εικόνα 3.2.4: Κενό μεταξύ πλήρωσης και περιμέτρου στην FDM δομή.....	24
Εικόνα 3.2.5: Τροποποιημένες διαστάσεις του δοκιμίου.....	25
Εικόνα 3.2.6: Προεπισκόπηση εκτύπωσης του νέου δοκιμίου.....	25
Εικόνα 3.2.7: FDM δομή του νέου δοκιμίου.....	25
Εικόνα 3.2.8: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια με και χωρίς κενό.....	26
Εικόνα 3.2.9: Πείραμα εφελκυσμού.....	27
Εικόνα 3.4.1: Εγκοπή στο μέσο του δοκιμίου.....	29
Εικόνα 3.4.2: Σπάσιμο δοκιμίου για μελέτη της δομής.....	29
Εικόνα 3.4.3: Στερεοσκόπιο Leica Wild M3Z και κάμερα Leica DC 300.....	29
Εικόνα 4.1.1: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια πάχους στρώματος 0.15 mm και ποσοστό πλήρωσης 70 και 100 %.....	30
Εικόνα 4.1.2: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια πάχους στρώματος 0.20 mm και ποσοστό πλήρωσης 70 και 100 %.....	31
Εικόνα 4.1.3: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια πάχους στρώματος 0.30 mm και ποσοστό πλήρωσης 70 και 100 %.....	31
Εικόνα 4.1.4: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια πάχους στρώματος 0.40 mm και ποσοστό πλήρωσης 70 και 100 %.....	32

Εικόνα 4.1.5: Σχέση μέτρου ελαστικότητας και ποσοστού πλήρωσης για διαφορετικά πάχη στρώματος.....	33
Εικόνα 4.1.6: Σχέση αντοχής και ποσοστού πλήρωσης για διαφορετικά πάχη στρώματος.....	33
Εικόνα 4.1.7: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 100 % και πάχος στρώματος 0.15, 0.20, 0.30, 0.40 mm.....	34
Εικόνα 4.1.8: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 70 % και πάχος στρώματος 0.15, 0.20, 0.30, 0.40 mm.....	34
Εικόνα 4.1.9: Σχέση μέτρου ελαστικότητας και πάχους στρώματος για ποσοστά πλήρωσης 70 και 100 %.....	35
Εικόνα 4.1.10: Σχέση αντοχής και πάχους στρώματος για ποσοστά πλήρωσης 70 και 100 %.....	36
Εικόνα 4.2.1: Το μισό τμήμα της δομής.....	36
Εικόνα 4.2.2: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο μισό τμήμα.....	37
Εικόνα 4.2.3: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο.....	37
Εικόνα 4.2.4: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο.....	37
Εικόνα 4.2.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δομής.....	37
Εικόνα 4.2.6: Το μισό τμήμα της δομής.....	38
Εικόνα 4.2.7: Το μισό τμήμα της δομής.....	39
Εικόνα 4.2.8: Το μισό τμήμα της δομής.....	39
Εικόνα 4.2.9: Το μισό τμήμα της δομής.....	41
Εικόνα 4.2.10: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο μισό τμήμα της επιφάνειας.....	41
Εικόνα 4.2.11: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στην πλήρωση.....	41
Εικόνα 4.2.12: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο.....	41
Εικόνα 4.2.13: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο.....	42
Εικόνα 4.2.14: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δομής.....	42
Εικόνα 4.2.15: Το μισό τμήμα της δομής.....	43
Εικόνα 4.2.16: Το μισό τμήμα της δομής.....	43
Εικόνα 4.2.17: Το μισό τμήμα της δομής.....	44
Εικόνα 4.4.1: Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει ποσοστού κενών.....	48
Εικόνα 4.4.2: : Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα αντοχής συναρτήσει ποσοστού κενών.....	48
Εικόνα 5.1.1: Αντοχή συναρτήσει του ποσοστού κενών.....	50
Εικόνα 5.1.2: Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει του ποσοστού κενών.....	50
Εικόνα 5.1.3: Συσχέτιση ποσοστού κενών με το λόγο των διαστάσεων της ίνας.....	50
Εικόνα 5.1.4: Αντοχή συναρτήσει του λόγου διαστάσεων ίνας.....	50
Εικόνα 5.1.5: Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει του λόγου διαστάσεων ίνας.....	50

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1.1: Παράμετροι εκτύπωσης. ....	21
Πίνακας 3.1.2: Ιδιότητες EasyFill™ ABS (16). ....	22
Πίνακας 3.2.1: Συγκριτικός πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων για δοκίμια με και χωρίς κενό. ....	26
Πίνακας 3.3.1: Παράμετροι εκτύπωσης που μελετήθηκαν. ....	28
Πίνακας 4.2.1: Χαρακτηριστικά δομής. ....	38
Πίνακας 4.2.2: Χαρακτηριστικά δομής. ....	38
Πίνακας 4.2.3: Χαρακτηριστικά δομής. ....	39
Πίνακας 4.2.4: Χαρακτηριστικά δομής. ....	40
Πίνακας 4.2.5: Χαρακτηριστικά δομής. ....	42
Πίνακας 4.2.6: Χαρακτηριστικά δομής. ....	43
Πίνακας 4.2.7: Χαρακτηριστικά δομής. ....	44
Πίνακας 4.2.8: Χαρακτηριστικά δομής. ....	44
Πίνακας 4.3.1: Χρόνος εκτύπωσης και μηχανικές ιδιότητες για κάθε δοκίμιο. ....	45
Πίνακας 4.3.2: Συγκριτικός πίνακας των χαρακτηριστικών της δομής, των μηχανικών ιδιοτήτων και του χρόνου εκτύπωσης ανάλογα με το πάχος στρώματος και το ποσοστό πλήρωσης. ....	46
Πίνακας 4.4.1: Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα. ....	47

## Κατάλογος Εξισώσεων

Εξίσωση 4.4.1. ....	47
Εξίσωση 4.4.2. ....	47
Εξίσωση 4.4.3. ....	47

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

## 1.1 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας. Παρουσιάζεται το κίνητρο που οδήγησε στην εκπόνηση της καθώς και ο σκοπός της παρούσας έρευνας.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναλώνεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση όπου γίνεται αναφορά στη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά της μεθόδου εναπόθεσης τήγματος, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων. Επιπλέον, παρατίθεται η υπάρχουσα γνώση γύρω από τη μέθοδο εναπόθεσης τήγματος υλικού ABS, που είναι από τα πιο διαδεδομένα πολυμερή και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, και των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων εφελκυσμού και της ανάλυσης δομής ενώ σε αυτό παρουσιάζονται και οι παράμετροι εκτύπωσης που επιλέχθηκαν.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων, στο τέταρτο κεφάλαιο. Παρουσιάζεται η επίδραση του ποσοστού πλήρωσης και του πάχους στρώματος στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού καθώς και τα αποτελέσματα από την ανάλυση της δομής. Επιπλέον, καταγράφεται ο χρόνος εκτύπωσης και γίνονται θεωρητικοί υπολογισμοί για το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή.

Στο πέμπτο κεφάλαιο σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πείραμα εφελκυσμού, την ανάλυση δομής, το χρόνο εκτύπωσης και τους θεωρητικούς υπολογισμούς.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την εξαγωγή συμπερασμάτων από την πειραματική και τη θεωρητική ανάλυση που προηγήθηκε.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με το έβδομο κεφάλαιο στο οποίο γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στα χαρακτηριστικά της μεθόδου εναπόθεσης τήγματος και στην ανάπτυξη ενός απλού θεωρητικού μοντέλου που θα προβλέπει τις FDM ιδιότητες. Οι προτάσεις έχουν ως γνώμονα την βελτίωση των μηχανικής συμπεριφοράς και τη δυνατότητα πρόβλεψης της ώστε να γίνουν λειτουργικά τα FDM προϊόντα.



## 1.2 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3d printing) είναι μία μέθοδος που βιώνει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια καθώς επιτρέπει την παραγωγή εξαρτημάτων που είναι αδύνατον να παραχθούν με άλλες μεθόδους. Τεχνητά όργανα, αεροναυπηγικά εξαρτήματα ακόμα και σπίτια έχουν εκτυπωθεί επιβεβαιώνοντας πως η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει εφαρμογή σε πολλούς τομείς και μπορεί να συνεισφέρει ώστε να γίνουν σημαντικές αλλαγές στον κόσμο (1). Η τρισδιάστατη εκτύπωση παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών μεθόδων αφαίρεσης υλικού αφού αποτελεί μία μέθοδο που δεν παράγει απόβλητα, δεν απαιτεί τόσο μεγάλο εργαστηριακό εξοπλισμό ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις δίνει την δυνατότητα να παραχθεί ένα αντικείμενο γρηγορότερα και οικονομικότερα. Η προσθετική παραγωγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ταχεία προτυποποίηση (Rapid Prototyping – RP), για ταχεία ανάπτυξη μέσων – εργαλείων (Rapid Tooling – RT) που χρειάζονται για τη μαζική παραγωγή ενώ σταδιακά παρατηρείται μετάβαση στην ταχεία παραγωγή (Rapid Manufacturing - RM). Εταιρίες και οργανισμοί όπως η Ford, η Boeing, η General Electric και η NASA έχουν αναγνωρίσει τις δυνατότητες αυτής της τεχνολογίας πραγματοποιούν μεγάλες επενδύσεις στην έρευνα και την ανάπτυξη της (2).

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι τρισδιάστατης εκτύπωσης όπου η κάθε μία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της. Από τις πιο διαδεδομένες και προσιτές είναι η μέθοδος εναπόθεσης τήγματος (Fused Deposition Modeling – FDM)<sup>1</sup> κατά την οποία ίνες πολυμερούς εναποτίθενται στρωματικά δημιουργώντας το τελικό αντικείμενο. Η FDM είναι μία μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενός αντικειμένου οποιασδήποτε γεωμετρίας, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης άλλων μέσων (π.χ καλουπιών) σε χαμηλό κόστος. Λόγω της στρωματικής παραγωγής η FDM παρέχει την δυνατότητα κατασκευής προϊόντων σύνθετης γεωμετρίας που είναι από δύσκολο έως αδύνατον να παραχθούν με τις μεθόδους αφαίρεσης υλικού (3). Ωστόσο, η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία αντικειμένων με μειωμένη αντοχή σε σχέση με τα αντίστοιχα που παράγονται με άλλες μεθόδους περιορίζοντας την ύπαρξη λειτουργικών FDM προϊόντων. Ως εκ τούτου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη των αιτιών που υποβαθμίζουν τις μηχανικές ιδιότητες και η πρόβλεψη τους.

---

<sup>1</sup> Αναφέρεται και ως Fused Filament Fabrication (FFF). Ωστόσο, ο όρος Fused Deposition Modeling (FDM), που κατοχυρώθηκε από την Stratasys Ltd, είναι πιο συνηθισμένος.

### 1.3 Σκοπός της Έρευνας και Ερευνητικά Ερωτήματα

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των FDM παραμέτρων εκτύπωσης στη μηχανική συμπεριφορά του εκτυπωμένου από ABS αντικειμένου<sup>2</sup>. Μεταβάλλοντας το πάχος στρώματος και το ποσοστό πλήρωσης πραγματοποιήθηκαν πειράματα εφελκυσμού προκειμένου να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες του FDM ABS και εξετάστηκε η επίδραση των κενών της δομής στις ιδιότητες του. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης έρευνας έγινε προσπάθεια να κατανοηθούν καλύτερα τα παρακάτω:

- 1) Η διαφοροποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων όταν αλλάζουν οι παραπάνω παράμετροι.
- 2) Η ακρίβεια με την οποία αποτυπώνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής που επιλέγει ο χρήστης και αυτών που προκύπτουν μετά την εκτύπωση για ένα μη επαγγελματικό εκτυπωτή.
- 3) Η πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς με χρήση του νόμου μίξης από τη θεωρία μηχανικής σύνθετων υλικών.

---

<sup>2</sup> Τόσο το μέτρο ελαστικότητας όσο και η αντοχή που εκτιμώνται είναι ιδιότητες του πολυστρωτου αντικείμενου (FDM ABS) και όχι του υλικού ABS.

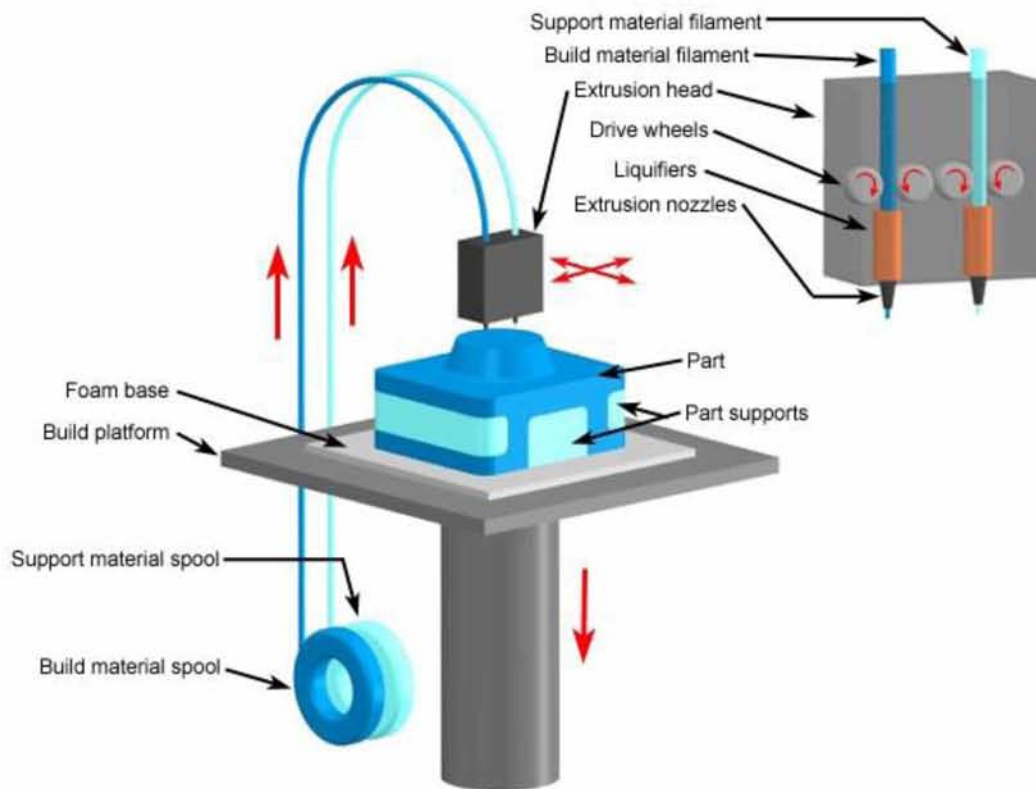
## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Μέθοδος Εναπόθεσης Τήγματος (Fused Deposition Modeling - FDM)

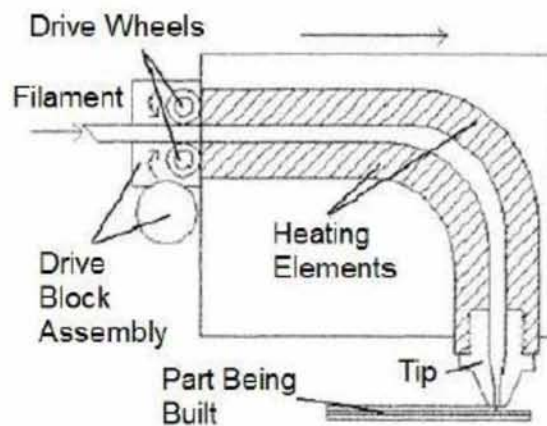
Κάποιες από τις κυρίαρχες τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση (Selective Laser Sintering – SLS), η στερεολιθογραφία (Stereolithography Apparatus – SLA), η εναπόθεση τήγματος (Fused Deposition Modeling - FDM), η κατασκευή με επάλληλες στρώσεις (Laminated Object Manufacturing – LOM), η επιλεκτική τήξη με laser (Selective Laser Melting – SLM), η ηλεκτρονική δέσμη τήξης (Electron Beam Melting – EBM) και η συγκόλληση κόκκων υλικού (Ink Jet Printing – IJP).

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην FDM μέθοδο και τις ιδιότητες των προϊόντων που παράγει. Έτσι, θα ακολουθήσει μία λεπτομερέστερη αναφορά σε αυτή. Η μέθοδος της εναπόθεσης τήγματος εξελίχθηκε αρχικά από τον Scott Crump και την Stratasys Ltd ενώ σήμερα αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης. Κατά τη λειτουργία της το υλικό, που είναι σε μορφή νήματος, θερμαίνεται, εξέρχεται μέσω ενός ακροφυσίου και εναποτίθεται δημιουργώντας τις διαδρομές κάθε στρώματος ενώ διαδοχικά στρώματα στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο δημιουργώντας την τελική τρισδιάστατη μορφή του αντικειμένου. Η θερμική ενέργεια του ημιτηγμένου υλικού ωθεί την συγκόλληση μεταξύ των ινών και καθώς το υλικό εναποτίθεται ενώνεται με το προϋπάρχον, ψύχεται και στερεοποιείται.

Η μέθοδος της εναπόθεσης τήγματος, λοιπόν, βασίζεται στην εξώθηση υλικού σε ημίρευστη κατάσταση και την εναπόθεση και στερεοποίηση του στο τραπέζι μιας ηλεκτρονικά ελεγχόμενης τριαξονικής συσκευής. Όπως κάθε μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης έτσι και η FDM δέχεται σαν είσοδο αρχεία CAD σε μορφή .stl και λειτουργεί με την αρχή της στρωματικής παραγωγής. Εντός ενός θερμοκρασιακά ελεγχόμενου θαλάμου, το κατάλληλο υλικό σε μορφή νήματος ξετυλίγεται από μία κουλούρα και τροφοδοτείται στο ακροφύσιο το οποίο έχει την δυνατότητα να κινείται στο επίπεδο x-y. Μία θερμική αντίσταση παρέχει την κατάλληλη ενέργεια για να βρεθεί το νήμα σε ημίρευστη κατάσταση προκειμένου να τροφοδοτηθεί στο ακροφύσιο και στη συνέχεια να εναποτεθεί στο τραπέζι του εκτυπωτή ώστε να στερεοποιηθεί και να δημιουργηθεί η επιθυμητή γεωμετρία. Το τραπέζι του εκτυπωτή έχει δυνατότητα κίνησης στον κατακόρυφο άξονα και σταδιακά υποχωρεί για να εναποτεθούν τα στρώματα που απαιτούνται για τη δημιουργία του αντικειμένου. Η εικόνα 2.1.1 αναπαριστά την FDM λειτουργία ενώ η διαδικασία της εξώθησης νήματος φαίνεται ξεχωριστά στην εικόνα 2.1.2.



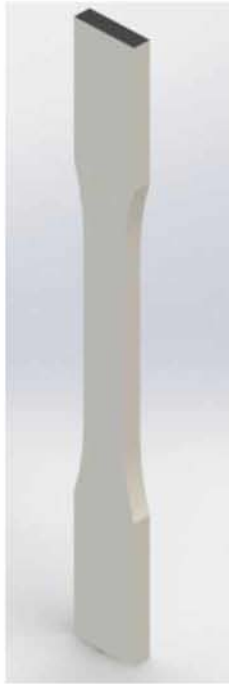
Εικόνα 2.1.1: Σχηματική απεικόνιση της FDM λειτουργίας (4).



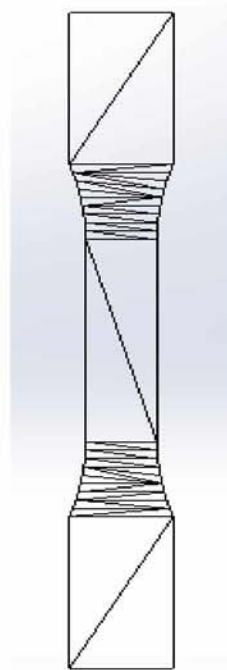
Εικόνα 2.1.2: Σχηματική απεικόνιση του συστήματος εξώθησης νήματος (5).

Για την παραγωγή ενός τεμαχίου απαιτούνται τέσσερα στάδια:

- 1) Δημιουργία του αντικειμένου σε πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης και αποθήκευση σε μορφή .stl (Εικόνα 2.1.3 και Εικόνα 2.1.4).



Εικόνα 2.1.3:  
Τρισδιάστατο  
μοντέλο CAD



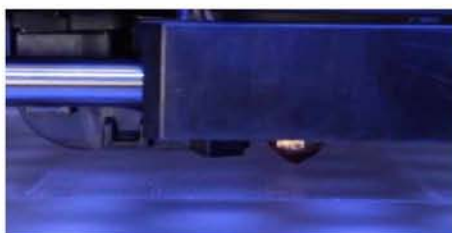
Εικόνα 2.1.4:  
Τριγωνοποίηση κατά  
την μετατροπή σε  
αρχείο .stl.

- 2) Εισαγωγή του αρχείου .stl στο πρόγραμμα τμήσεως (slicer). Το πρόγραμμα τμήσεως είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία των τομών κατά μήκος του άξονα z και την παραγωγή του κώδικα G για την καθοδήγηση της μηχανής. Εκεί ο χρήστης επιλέγει τις παραμέτρους εκτύπωσης που επιθυμεί και εξάγει τον κώδικα. Το πρόγραμμα τμήσεως δίνει τη δυνατότητα προεπισκόπησης της εκτύπωσης (Εικόνα 2.1.5).



Εικόνα 2.1.5: Προεπισκόπηση εκτύπωσης.

- 3) Έπειτα εισάγεται ο κώδικας G στον εκτυπωτή και ξεκινάει η διαδικασία της εκτύπωσης (Εικόνα 2.1.6).



Εικόνα 2.1.6: Εκτύπωση αντικειμένου.

- 4) Τέλος, ο χρήστης παίρνει το τελικό προϊόν (Εικόνα 2.1.7) και αν επιθυμεί μπορεί να προβεί σε κάποια διεργασία εξομάλυνσης (post – processing).

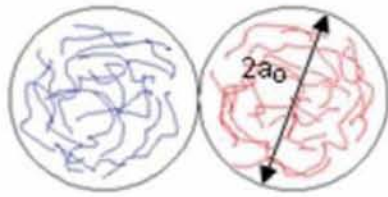


Εικόνα 2.1.7: Τελικό προϊόν.

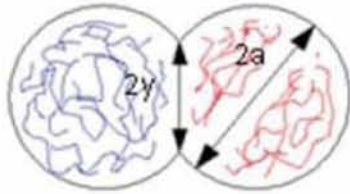
## 2.2 Μηχανισμός Ενοποίησης και Δομή στην FDM

Κατά την FDM, το θερμαινόμενο νήμα εξέρχεται μέσω ενός ακροφυσίου και εναποτίθεται δημιουργώντας τις διαδρομές κάθε στρώματος ενώ διαδοχικά στρώματα στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο δημιουργώντας την τελική τρισδιάστατη μορφή του αντικειμένου. Η θερμική ενέργεια από το ημιτηγμένο υλικό ωθεί την συγκόλληση μεταξύ των διαδρομών και καθώς το υλικό εναποτίθεται ενώνεται με το προϋπάρχον, ψύχεται και στερεοποιείται (6). Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα ορθότροπο σύνθετο υλικό, αποτελούμενο από πολυμερή νήματα τα οποία δεν είναι τέλεια ενωμένα μεταξύ τους και έχει κενά. Δύο διαδοχικές διαδρομές νήματος ενώνονται μεταξύ τους με πυροσυσσωμάτωση. Ο σχηματισμός δεσμών ανάμεσα στα νήματα κατά την FDM μπορεί να περιγραφεί στην εικόνα 2.2.1. Η διατομή του νήματος ιδανικά θεωρείται κυκλική. Το πρώτο στάδιο της διεργασίας είναι η διεπιφανειακή μοριακή επαφή και η ανάπτυξη λαιμού ενώ στη συνέχεια τα μόρια κινούνται σε διατάξεις που προτιμούν ώστε να επιτευχθεί ισορροπία. Τα μόρια διαχέονται δια μέσου της διεπιφάνειας και σχηματίζουν πρωτεύοντες χημικούς δεσμούς. Το μέγεθος του λαιμού χαρακτηρίζεται από έναν αδιάστατο αριθμό, που είναι ο λόγος της ακτίνας του λαιμού και της ακτίνας του εκτυπωμένου νήματος, και καθορίζει την ποιότητα της συγκόλλησης μεταξύ των νημάτων. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι κάτω από τους 200 °C δεν υπάρχει ανάπτυξη λαιμού ενώ σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 270 °C παρατηρείται αποσύνθεση όταν το υλικό είναι το ABS (6).

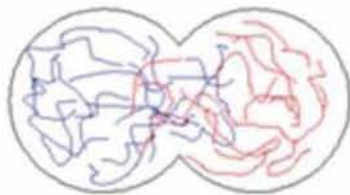
Το μέγεθος του λαιμού καταλαμβάνει ένα μέρος της διεπιφάνειας και αυτή η ατελής συγκόλληση έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη κενών στο εσωτερικό του υλικού. Παρόλο, που το νήμα εξέρχεται μέσω ενός ακροφυσίου όταν εναποτεθεί στο τραπέζι, λόγω της βαρύτητας, αποκτά μία ελλειπτική διατομή με τον χρήστη να έχει τη δυνατότητα να επιλέξει και τις δύο διαστάσεις της έλλειψης. Να σημειωθεί πως η διατομή της κάθε διαδρομής εκτός από ελλειπτική θα μπορούσε σε κάποιες περιπτώσεις να χαρακτηριστεί και ως ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με ημικυκλικά άκρα. Συχνά, όμως, για λόγους απλότητας αναπαριστάται σαν κυκλικό ή ελλειπτικό. Από την πλευρά τους τα κενά εμφανίζουν ένα σχεδόν πρισματικό σχήμα. Γενικά, η FDM δομή αναπαρίσταται στην εικόνα 2.2.2.



1) Μοριακή Επαφή στη Διεπιφάνεια

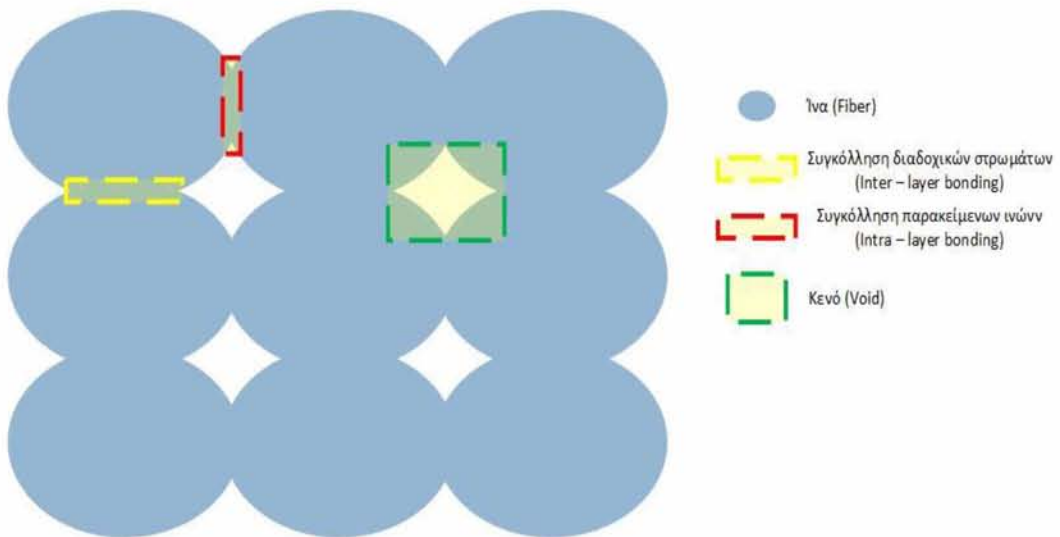


2) Ανάπτυξη λαιμού



3) Διάχυση

Εικόνα 2.2.1: Στάδια ποροσυσσωμάτωσης.



Εικόνα 2.2.2: Σχηματική απεικόνιση της FDM δομής.

## 2.3 Ακρυλονιτρίλιο – Βουταδιένιο – Στυρένιο (ABS)

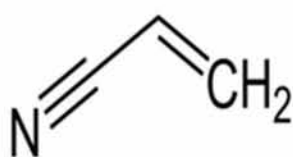
Το ABS είναι από τα θερμοπλαστικά που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία και το πιο σύνηθες στην FDM τεχνολογία. Θα ακολουθήσει μία εκτενέστερη αναφορά σε αυτό καθώς αποτελεί το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Το ABS είναι ένα κοινό θερμοπλαστικό συμπολυμερές με χημικό τύπο  $(C_8H_8)_x(C_4H_6)_y(C_3H_3N)_z$ . Συγκεκριμένα είναι ένα άμορφο τριπολυμερές που προέρχεται από τον πολυμερισμό στυρενίου και ακρυλονιτρίλιου με την παρουσία πολυβουταδιενίου. Οι περιεκτικότητες κυμαίνονται από 15 ως 35 % σε ακρυλονιτρίλιο, από 5 ως 30 % σε βουταδιένιο και από 40 ως 60 % σε στυρένιο. Το αποτέλεσμα είναι μία μακριά αλυσίδα πολυβουταδιενίου διασταυρωμένη με μικρότερες αλυσίδες από πολυ (στυρένιο ακρυλονιτρίλιο). Τα τμήματα νιτρίλιου από τις γειτονικές αλυσίδες έλκονται μεταξύ τους και συγκρατούν τις μοριακές αλυσίδες κάνοντας το ABS ισχυρότερο από το πολυστυρένιο. Το ABS συνδυάζει την αντοχή και τη δυσθραυστότητα του ακρυλονιτρίλιου και του στυρενίου με την σκληρότητα του πολυβουταδιενίου. Μεταβάλλοντας τις αναλογίες των μονομερών μπορούν να βελτιωθούν η αντοχή σε κρούση και θερμότητα αλλά και η σκληρότητα του.

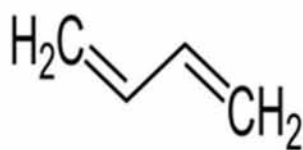
Το ακρυλονιτρίλιο (Εικόνα 2.3.1) είναι συνθετικό μονομερές που παράγεται από προπυλένιο και αμμωνία. Δεν τήκεται ως τους 250 °C. Είναι ατελώς κρυσταλλικό και εμφανίζει κρυσταλλικότητα λόγω προσανατολισμού σε εφελκυσμένες ίνες. Έχει καλή αντοχή ενώ είναι αδιάλυτο σε συνήθεις διαλύτες αλλά διαλυτό σε διμεθυλοφορμαμίδιο.

Το βουταδιένιο (Εικόνα 2.3.2) αποτελείται από υδρογονάνθρακες που προέρχονται από βουτάνιο. Είναι άμορφο με θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης τους -88 °C. Προσφέρει ευκαμψία, αντοχή στην κρούση και διατήρηση ιδιοτήτων σε χαμηλές θερμοκρασίες.

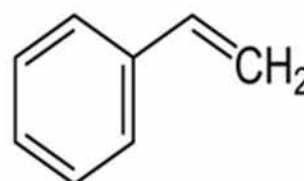
Το στυρένιο (Εικόνα 2.3.3) λαμβάνεται από βενζόλιο και αιθυλένιο από τον άνθρακα. Είναι άμορφο ακόμα και αν υποστεί προσανατολισμό και η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι στους 100 °C. Συνεισφέρει στην ακαμψία, την επιφανειακή στιλπνότητα και την ευκολία επεξεργασίας.



Εικόνα 2.3.1: Ακρυλονιτρίλιο (13).



Εικόνα 2.3.2: Βουταδιένιο (13).



Εικόνα 2.3.3: Στυρένιο (13).



Γενικά, το ABS θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σαν ένα πλαστικό με μέτρια αντοχή και σχετικά χαμηλό κόστος με τις σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες να είναι η αντοχή σε κρούση και η σκληρότητα του. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον με θερμοκρασίες από -20 έως 80 °C. Είναι ανθεκτικό σε υδατικά οξέα, αλκάλια, συμπυκνωμένα υδροχλωρικά και φωσφορικά οξέα, αλκοόλες και ζωικά, φυτικά και ορυκτά έλαια, αλλά προσβάλλεται από συμπυκνωμένα θειικά και νιτρικά οξέα. Είναι διαλυτό σε εστέρες, κετόνες, διχλωριούχο αιθυλένιο ή ακετόνη κάτι που βοηθάει στη συγκόλληση εκτυπώσεων μεταξύ τους ή στην εξομάλυνση τους (post-processing). Το ABS χρησιμοποιείται σε γενικές εφαρμογές, όπως καταναλωτικά προϊόντα, ενώ έχει εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία και την ιατρική.

### 2.3.1 Το ABS στην Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Ο πρώτος τύπος ABS που χρησιμοποιήθηκε σε τεχνολογία FDM ήταν το ABS P400 που αναπτύχθηκε από την Stratasys και είχε υποδεέστερες μηχανικές ιδιότητες από άλλους τύπους ABS. Οι Rodríguez κ.συν. (9) μελέτησαν τη σχέση ανάμεσα στον τρόπο παραγωγής, τη δομή και τη μηχανική συμπεριφορά του ABS. Χρησιμοποίησαν διαφορετικούς παραμέτρους εκτύπωσης (θερμοκρασία εξώθησης, θερμοκρασία θαλάμου, απόσταση μεταξύ των διαδρομών κλπ) για να βελτιστοποιήσουν τη μηχανική του συμπεριφορά και παρατήρησαν πως τα κενά είναι το κυριότερο χαρακτηριστικό της δομής των εκτυπωμένων τεμαχίων.

Κάποιες από τις παραμέτρους εκτύπωσης έχουν μεγάλη εξάρτηση από το υλικό που χρησιμοποιείται. Η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία εξώθησης καθορίζεται από το θερμοπλαστικό που χρησιμοποιείται κατά την εκτύπωση. Για το ABS το εύρος θερμοκρασιών κυμαίνεται από 210 έως 250 °C.

Για την επίτευξη καλής ποιότητας εκτύπωσης είναι απαραίτητο το αντικείμενο να παραμένει προσκολλημένο στο τραπέζι καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο συνίσταται η θέρμανση του πριν ξεκινήσει η εκτύπωση. Για την περίπτωση του ABS η θερμοκρασία θέρμανσης είναι περίπου στους 110 °C. Επιπρόσθετα, ακολουθείται συγκεκριμένη διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειας της τράπεζας για την προσκόλληση του αντικειμένου. Επειδή, το ABS δεν παρουσιάζει ικανοποιητική πρόσφυση στο τραπέζι και υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης συνηθίζεται να καλύπτεται με θερμική ταινία τύπου Kapton (14). Παρ' όλα αυτά αν το αντικείμενο έχει μικρό ύψος και μεγάλη επιφάνεια στο x-y επίπεδο είναι πολύ πιθανό να υπάρξει αποκόλληση ακόμη και με την παρουσία της ταινίας Kapton. Κάτι τέτοιο αντιμετωπίζεται με επάλειψη της τράπεζας με διαλυμένο σε ακετόνη ABS και στη συνέχεια θέρμανση του μίγματος στους 110 °C. Η αναλογία είναι 30 cm νήματος ABS διαμέτρου 3 mm σε 250 ml ακετόνης ή αλλιώς 9 gr/l (15). Επιπλέον, για την αποφυγή παραμορφώσεων είναι καλό η εκτύπωση του ABS να

γίνεται σε κλειστό θάλαμο προκειμένου να μην υπάρχουν μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές.

Κατά την εκτύπωση του ABS εκπέμπονται αναθυμιάσεις με δυσάρεστη οσμή που μπορούν να είναι επικίνδυνες για ανθρώπους με αναπνευστικά προβλήματα. Γι' αυτό συνίσταται καλός αερισμός του χώρου που βρίσκεται ο εκτυπωτής όταν το υλικό εκτύπωσης είναι το ABS.

## 2.4 Έρευνες από τη Διεθνή Βιβλιογραφία

Το μεγαλύτερο μέρος της μέχρι τώρα έρευνας αφορά τη μηχανική συμπεριφορά αντικειμένων από πολυμερές υλικό που κατασκευάζονται από επαγγελματικούς εκτυπωτές. Η πλειοψηφία των ερευνητών εστιάζει στην συγκόλληση μεταξύ των ινών και κατ' επέκταση στα κενά που δημιουργούνται ενώ προσπαθεί να επηρεάσει αυτούς τους δύο τομείς μεταβάλλοντας τις παραμέτρους εκτύπωσης. Με βάση το μοντέλο για πυροσυσσωμάτωση πολυμερών σε συνδυασμό με ανάλυση μετάδοσης θερμότητας έχειδειχθεί ότι η πυροσυσσωμάτωση συμβαίνει για δευτερόλεπτα μετά την εναπόθεση του πολυμερούς (6). Ο ρυθμός ανάπτυξης και το μέγεθος του λαιμού εξαρτάται από τις θερμοκρασίες εξώθησης και θαλάμου, από τις συνθήκες συναγωγής, που προέρχονται από το περιβάλλον και τον αέρα που υπάρχει στα κενά, καθώς και από τις συνθήκες αγωγής κατά την επαφή γειτονικών ινών (7). Το νήμα δεν παραμένει για επαρκές χρονικό διάστημα πάνω από την θερμοκρασία μετάβασης στην υαλώδη κατάσταση. Οπότε η συγκόλληση μεταξύ των νημάτων δεν είναι τόσο ισχυρή και τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου είναι υποδεέστερα σε σύγκριση με την περίπτωση που το υλικό δεν ήταν εκτυπωμένο. Παρόλο που οι μηχανικές ιδιότητες επηρεάζονται από την δομή, η οποία ελέγχεται από τις παραμέτρους εκτύπωσης, η διεύθυνση των μορίων είναι επίσης σημαντική και μπορεί να επηρεαστεί από την εξώθηση του υλικού (8), (9), (10). Έχει παρατηρηθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή είναι μειωμένα από 11 ως 37 % και από 22 ως 57 % αντίστοιχα για το εκτυπωμένο προϊόν σε σύγκριση με το πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση. Επίσης, παρόμοιες παρατηρήσεις έγιναν συγκρίνοντας το εκτυπωμένο προϊόν με το αντίστοιχο χυτό ενώ φάνηκε πως οι παράμετροι εκτύπωσης είχαν σημαντική επιρροή στα τελικά χαρακτηριστικά (9), (10). Οι Guggala και Regalla (11) συμπέραναν πως η αντοχή της συγκόλλησης μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων είναι διαφορετική από αυτή μεταξύ των παρακείμενων στρωμάτων εξαιτίας των διαφορετικών θερμοκρασιών σε αυτά. Ο χρόνος που απαιτείται για την εναπόθεση παρακείμενων στρωμάτων είναι μικρότερος από αυτόν που απαιτείται για τα διαδοχικά στρώματα. Συνεπώς, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ στρωμάτων είναι μικρότερη στην πρώτη περίπτωση. Σαν αποτέλεσμα, η συγκόλληση μεταξύ παρακείμενων στρωμάτων είναι ισχυρότερη από αυτή μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων.

Προφανώς, οι μηχανικές ιδιότητες των τεμαχίων από FDM εξαρτώνται από τη δομή του εκτυπωμένου αντικειμένου, η οποία επηρεάζεται από τις παραμέτρους εκτύπωσης όπως το πλάτος των διαδρομών, το πάχος των στρώματων, τη διεύθυνση εναπόθεσης, τη διεύθυνση του αντικειμένου στο τραπέζι, την ταχύτητα και το χρόνο εναπόθεσης καθώς και τα κενά ανάμεσα στις διαδρομές. Τη μεγαλύτερη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες έχει το ποσοστό κενών στη δομή του υλικού. Είναι κάτι που μπορεί να επηρεαστεί από πολλές παραμέτρους όπως τη θερμοκρασία εξώθησης και θαλάμου, το πάχος και το πλάτος των ινών, την ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος και κίνησης του ακροφυσίου (9), (10), (12). Εκτός από την δομή, μέρος της οποίας απαρτίζεται από κενά, η μηχανική συμπεριφορά επηρεάζεται και από ατέλειες στις εξωτερικές επιφάνειες όπου παρατηρείται το φαινόμενο του “σκαλοπατιού”, το οποίο συμβαίνει λόγω του ότι τα στρώματα στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο. Στο πρόγραμμα του κάθε εκτυπωτή εισάγεται ένα αρχείο .stl το οποίο χωρίζεται σε οριζόντια επίπεδα. Έτσι εναποτίθενται τα οριζόντια τμήματα που έχουν “τεμαχιστεί” και χτίζεται το αντικείμενο σε λεπτά στρώματα αναδεικνύοντας το φαινόμενο του “σκαλοπατιού”, το οποίο γίνεται ακόμα πιο εμφανές σε αντικείμενα με καμπύλες επιφάνειες και όταν χρησιμοποιούνται παχιά στρώματα. Επιπλέον, στα επιφανειακά ελαττώματα εντάσσεται και η ανικανότητα του εκτυπωτή να αποτυπώσει με καλή διαστασιολογική ακρίβεια τις καμπύλες επιφάνειες του αντικειμένου. Αυτό οφείλεται αφ’ ενός στο φαινόμενο που περιγράφηκε παραπάνω και αφ’ ετέρου στο γεγονός ότι η μετατροπή του CAD σε .stl μειώνει την ανάλυση του αντικειμένου γιατί κατά την αναπαράσταση του δημιουργεί μόνο τρίγωνα και όχι τόξα και καμπύλες.

Επιφανειακά ελαττώματα εμφανίζονται λόγω της μεθόδου ή λόγω μη κατάλληλης επιλογής των παραμέτρων εκτύπωσης για δεδομένο υλικό (θερμοκρασία εναπόθεσης, ταχύτητα κλπ). Ωστόσο, υπάρχουν τρόποι να βελτιωθεί η ποιότητα της επιφάνειας μετά την εκτύπωση του προϊόντος αλλά είναι ανεπιθύμητοι διότι κοστίζουν σε χρόνο και χρήμα. Γενικότερα, οποιαδήποτε προσπάθεια για βελτίωση της επιφάνειας είτε με κατάλληλη επιλογή παραμέτρων εκτύπωσης (χαμηλότερη ταχύτητα εκτύπωσης, λεπτότερα στρώματα) είτε με κατεργασία μετά την εκτύπωση επιβαρύνει χρονικά και οικονομικά.

## Κεφάλαιο 3 Πειραματική Διαδικασία

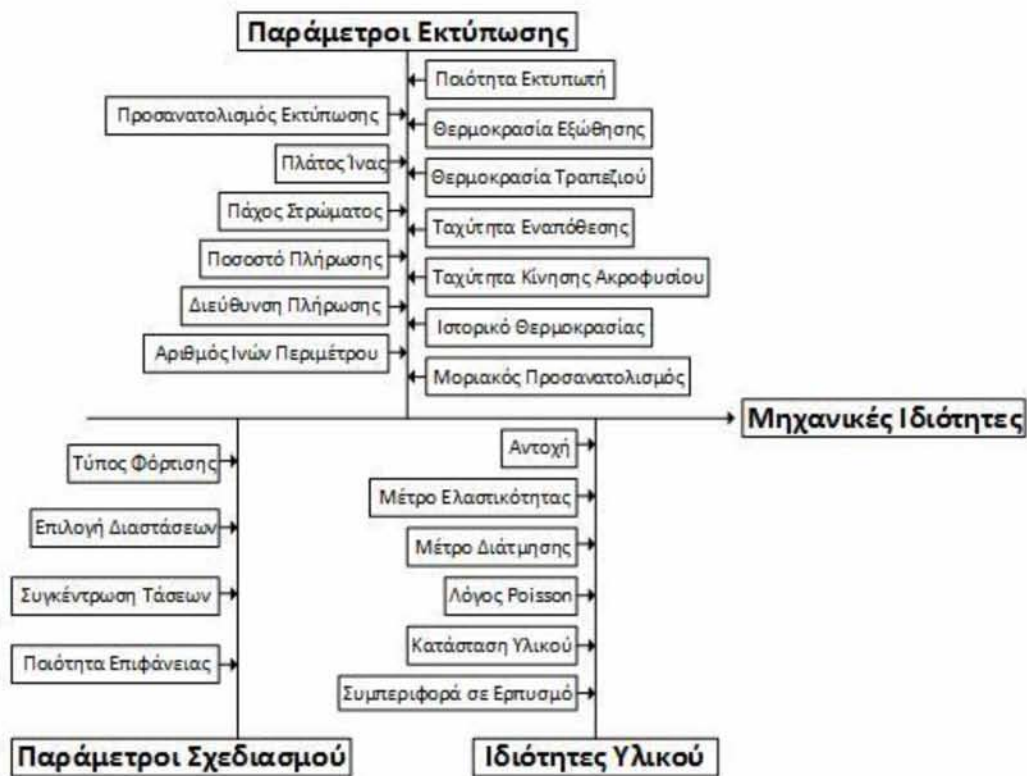
### 3.1 Κατασκευή Δοκιμίων

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού σε εκτυπωμένα, με μέθοδο FDM, δοκίμια από θερμοπλαστικό ABS. Επιπλέον εξετάστηκε η FDM δομή με παρατήρηση στο στερεοσκόπιο.

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ο μη επαγγελματικός εκτυπωτής Makerbot Replicator 2x (Εικόνα 3.1.1) της MakerBot® με διάμετρο ακροφυσίου 0.40 mm ενώ το υλικό εκτύπωσης ήταν το EasyFill™ ABS, που παράγεται από την Formfutura VOF, με διάμετρο νήματος 1.75 mm. Το πρόγραμμα τμήσεως που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Makerbot Desktop 3.9.0 το οποίο δημιουργήθηκε, επίσης, από την MakerBot®. Οι παράμετροι που επιδρούν στη μηχανική συμπεριφορά ενός FDM εξαρτήματος, αυτοί που επιλέχθηκαν ως παράμετροι εκτύπωσης για τα δοκίμια και οι ιδιότητες του υλικού παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 3.1.2, Πίνακας 3.1.1, Πίνακας 3.1.2). Η εικόνα 3.1.3 δείχνει το πλάτος και το πάχος μιας ίνας ενώ οι εικόνες 3.1.4 και 3.1.5 δείχνουν τη διαφορά μεταξύ υψηλού και χαμηλού ποσοστού πλήρωσης.



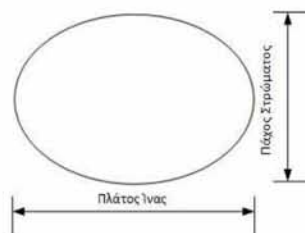
Εικόνα 3.1.1: Ο εκτυπωτής Makerbot Replicator 2x.



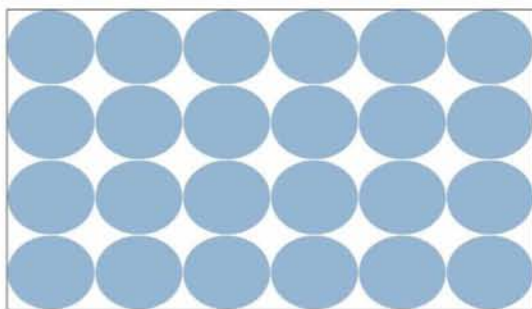
Εικόνα 3.1.2: Παράμετροι που επιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες.

Πίνακας 3.1.1: Παράμετροι εκτύπωσης.

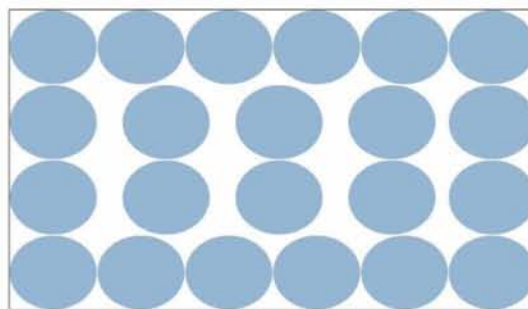
Παράμετροι Εκτύπωσης	
Πάχος στρώματος	0.15, 0.20, 0.30, 0.40 mm
Πλάτος ίνας	0.40 mm
Ποσοστό πλήρωσης	70, 100 %
Διεύθυνση πλήρωσης	$\theta = 0^\circ$
Αριθμός στρωμάτων περιμέτρου	3
Ταχύτητα εξώθησης	90 mm/s
Ταχύτητα ακροφυσίου	90 mm/s
Θερμοκρασία εξώθησης	235 °C
Θερμοκρασία τραπεζιού	110 °C
Προσανατολισμός εκτύπωσης	Άξονας y



Εικόνα 3.1.3: Πάχος και πλάτος ίνας.



Εικόνα 3.1.4: Υψηλό ποσοστό πλήρωσης.



Εικόνα 3.1.5: Χαμηλό ποσοστό πλήρωσης.

Πίνακας 3.1.2: Ιδιότητες EasyFill™ ABS (16).

Ιδιότητες	Τιμή	Πρότυπο Δοκιμής	Συνθήκες Δοκιμής
<b>Φυσικές</b>			
Ειδική βαρύτητα	1.03 g/cc	ISO 1183	-
Ρυθμός ροής τήγματος	5.5 cm <sup>3</sup> /10min	ISO 1183	220° C/10Kg
Απορρόφηση Υγρασίας	0.21 %	ISO 62	23° C/50% RH
<b>Μηχανικές</b>			
Αντοχή σε κρούση	36 KJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/A	Izod Notched @23° C
Αντοχή σε εφελκυσμό	38 MPa	ISO 527	@23° C
Μέτρο Ελαστικότητας σε εφελκυσμό	1900 MPa	ISO 527	@23° C
Επιμήκυνση στη θραύση	9 %	ISO 527	@23° C
Αντοχή σε κάμψη	68.7 MPa	-	-
Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη	2250 MPa	-	-
<b>Θερμικές</b>			
Θερμοκρασία εξώθησης	220 - 270 °C	-	-
Θερμοκρασία τήξης	145 ± 10 °C	ISO 294	-
Θερμοκρασία μετάβασης στην υαλώδη κατάσταση	103 °C	ISO 306	-

Το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε καθώς και ο τρόπος επιλογής των διαστάσεων επιλέχθηκαν με βάση τη διεξαγωγή προκαταρκτικών πειραμάτων. Η διαδικασία περιγράφεται στην ενότητα 3.2.

## 3.2 Πειραματική Προμελέτη

Η διεξαγωγή προκαταρκτικών πειραμάτων έγινε με σκοπό την επιλογή του κατάλληλου προτύπου εφελκυσμού, των κατάλληλων διαστάσεων στα δοκίμια καθώς και για τον προσδιορισμό της διασποράς στα πειραματικά αποτελέσματα ώστε να εκτιμηθεί ο κατάλληλος αριθμός επαναλήψεων για κάθε πείραμα.

Σε πρώτη φάση αναζητήθηκε το κατάλληλο πρότυπο που θα εφαρμόζονταν για την διεξαγωγή των πειραμάτων εφελκυσμού. Αρχικά, το ASTM D638<sup>3</sup> θεωρήθηκε το ιδανικότερο καθώς χρησιμοποιείται για εφελκυσμό σε πλαστικά. Ωστόσο, υπήρξαν περιπτώσεις όπου το συγκεκριμένο κρίθηκε ακατάλληλο για παραχθέντα με τη μέθοδο FDM αντικείμενα διότι η γεωμετρία των δοκιμίων επέφερε αστοχία στη ραδίωση εξαιτίας της συγκέντρωσης τάσεων στα σημεία όπου σταματούσαν οι ίνες (Εικόνα 3.2.1) (17). Γι' αυτό οι Ahn κ. συν. (17) πρότειναν τη χρησιμοποίηση του ASTM D3039<sup>4</sup> που είναι για εφελκυσμό σε σύνθετα υλικά. Από την άλλη, οι Gribbins και Steinhauer (18) προτίμησαν το ASTM D638 αντί του ASTM D3039 γιατί τα πειράματα που έκαναν με το πρώτο ήταν έγκυρα σε αντίθεση με αυτά που βασίστηκαν στο δεύτερο. Έτσι, επιλέχθηκε αρχικά να γίνει δοκιμή εφελκυσμού σύμφωνα με το ASTM D638 και αν το πείραμα κριθεί έγκυρο να εφαρμοστεί αυτό το πρότυπο για όλη την σειρά δοκιμίων.

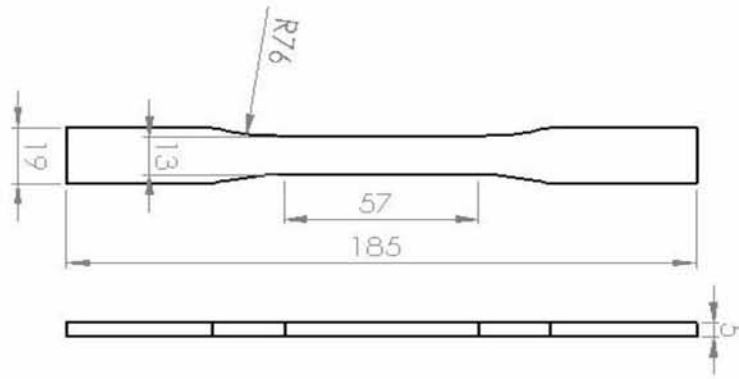


Εικόνα 3.2.1: Σημεία συγκέντρωσης τάσεων στη ραδίωση.

Αρχικά, εκτυπώθηκαν τέσσερα δοκίμια με τις διαστάσεις του προτύπου ASTM D638 (Εικόνα 3.2.2) προκειμένου να διεξαχθούν τα αρχικά πειράματα. Οι παράμετροι εκτύπωσης ορίστηκαν όπως αναφέρονται στον πίνακα 3.1.1 με το πάχος στρώματος να είναι 0.20 mm και το ποσοστό πλήρωσης 100 %.

<sup>3</sup> Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

<sup>4</sup> Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.



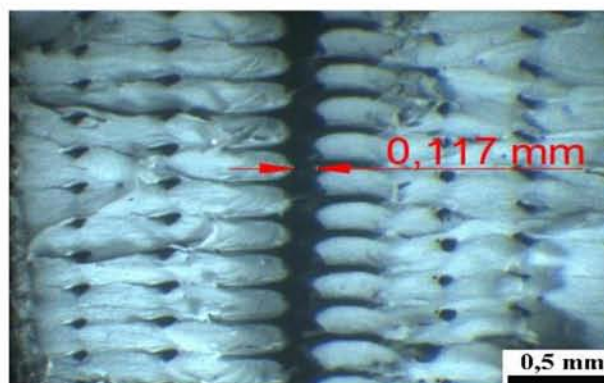
Εικόνα 3.2.2: Διαστάσεις δοκιμίου σύμφωνα με ASTM D638 Type 1.

Αφού ορίστηκαν οι παράμετροι στο Makerbot Desktop έγινε προεπισκόπηση της εκτύπωσης. Εκεί διαπιστώθηκε η ύπαρξη κενού 0.114 mm μεταξύ των διαδρομών πλήρωσης και περιμέτρου (Εικόνα 3.2.3) στην περιοχή της στένωσης. Παρ' όλα αυτά πραγματοποιήθηκε η εκτύπωση ώστε να φανεί αν όντως θα υπάρχει αυτό το κενό και ποια θα είναι η επίδραση του.



Εικόνα 3.2.3: Κενό μεταξύ πλήρωσης και περιμέτρου στην προεπισκόπηση της εκτύπωσης.

Με το πέρας των τεσσάρων πειραμάτων ελέγχθηκε στο στερεοσκόπιο η FDM δομή για να προσδιορισθεί το μέγεθος του κενού. Όπως φαίνεται στις εικόνες 3.2.3 και 3.2.4 η προεπισκόπηση ήταν αρκετά ακριβής καθώς το κενό μετρήθηκε στα 0.117 mm.

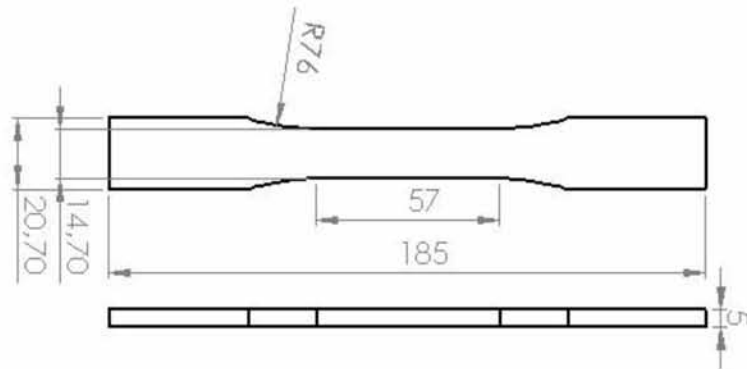


Εικόνα 3.2.4: Κενό μεταξύ πλήρωσης και περιμέτρου στην FDM δομή.

Η ύπαρξη αυτού του ανεπιθύμητου κενού οδήγησε στην αλλαγή του σχεδιασμού και των διαστάσεων. Έτσι, εκτυπώθηκαν τέσσερα δοκίμια με τις νέες



διαστάσεις, οι οποίες μαζί με την προεπισκόπηση της εκτύπωσης και την FDM δομή παρουσιάζονται στις εικόνες 3.2.5, 3.2.6 και 3.2.7 όπου διαπιστώνεται η απουσία παρόμοιου κενού.



Εικόνα 3.2.5: Τροποποιημένες διαστάσεις του δοκιμίου.

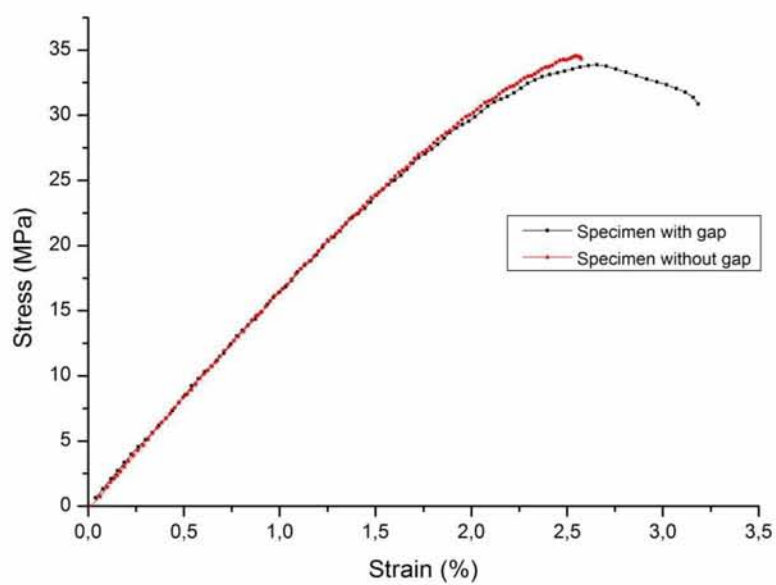


Εικόνα 3.2.6: Προεπισκόπηση εκτύπωσης του νέου δοκιμίου.



Εικόνα 3.2.7: FDM δομή του νέου δοκιμίου.

Από τις δοκιμές εφελκυσμού φάνηκε ότι η επίδραση του συγκεκριμένου κενού μεταξύ πλήρωσης και περιμέτρου δεν επηρέαζε σημαντικά την τιμή αντοχής του υλικού η οποία διέφερε κατά 3.8 % (Εικόνα 3.2.8, Πίνακας 3.2.1).



Εικόνα 3.2.8: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια με και χωρίς κενό.

Πίνακας 3.2.1: Συγκριτικός πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων για δοκίμια με και χωρίς κενό.

	Αντοχή (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Επιμήκυνση (%)
Δοκίμιο με κενό	33.28	1740	3.18
Δοκίμιο χωρίς κενό	34.54	1728	2.57



Εικόνα 3.2.9: Πείραμα εφελκυσμού.

Από τα οχτώ πειράματα που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι η περιοχή αστοχίας ήταν εντός των ορίων που προδιαγράφει το πρότυπο ASTM D638 (Εικόνα 3.2.9) και η απόκλιση μεταξύ των ιδιοτήτων ήταν μικρότερη του 5 %. Έτσι, αποφασίστηκε πως το συγκεκριμένο πρότυπο μπορεί να εφαρμοσθεί και δεν εξετάστηκε η εναλλακτική του ASTM D3039. Έπειτα, λόγω της μικρής διακύμανσης στα αποτελέσματα κρίθηκε πως δεν απαιτούνται περισσότερα από δύο πειράματα για κάθε παράμετρο μελέτης.

### 3.3 Πειράματα Εφελκυσμού

Με βάση την πειραματική προμελέτη που έγινε εκτυπώθηκαν δύο δοκίμια για κάθε παράμετρο εκτύπωσης που εξετάστηκε. Στη συνέχεια έγιναν τα πειράματα εφελκυσμού με βάση το ASTM D638 στη μηχανή εφελκυσμού MTS 810 με δυναμοκυψέλη μέγιστου φορτίου 5 kN και μηκυνσιόμετρο 50 mm ενώ η πίεση στις αρπάγες ρυθμίστηκε στα 200 psi ώστε να μη δημιουργούνται πλαστικές παραμορφώσεις στις θέσεις συγκράτησης των δοκιμίων με τις αρπάγες. Οι παράμετροι εκτύπωσης που επιλέχθηκαν υπάρχουν στον πίνακα 3.1.1. Όπως προαναφέρθηκε, αντικείμενο μελέτης αποτελούσαν η επίδραση του πάχους στρώματος και του ποσοστού πλήρωσης στη συμπεριφορά του υλικού κατά τον εφελκυσμό. Στον πίνακα 3.3.1 παρουσιάζονται οι τιμές πάχους στρώματος και

ποσοστού πλήρωσης για κάθε δοκίμιο. Σημειώνεται πως αρκετά από τα δοκίμια αστόχησαν εκτός του gage area αλλά πριν τη ραδίωση. Σε αυτή την περίπτωση το πείραμα θεωρείται έγκυρο σύμφωνα με το ASTM D638.

Πίνακας 3.3.1: Παράμετροι εκτύπωσης που μελετήθηκαν.

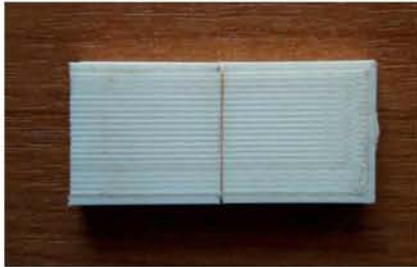
Αριθμός Δοκιμίου	Ποσοστό Πλήρωσης (%)	Πάχος Στρώματος (mm)
#1	70	0.15
#2	70	0.20
#3	70	0.30
#4	70	0.40
#5	100	0.15
#6	100	0.20
#7	100	0.30
#8	100	0.40

### 3.4 Ανάλυση Μικροδομικών Χαρακτηριστικών FDM ABS

Για την εξέταση της δομής κατασκευάστηκαν δοκίμια διαστάσεων 40 x 19 x 5 mm στα οποία έγινε τομή κατά το πάχος για να παρατηρηθούν στο στερεοσκόπιο. Προκειμένου να διατηρηθεί η δομική ακεραιότητα των δοκιμίων και να εξασφαλισθεί ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε στρώσης και των κενών δεν θα επηρεάζονταν κατά την προετοιμασία για τον οπτικό έλεγχο, οι επιφάνειες των δοκιμίων που μελετήθηκαν προέκυψαν από ψαθυρή θραύση. Έτσι, δημιουργήθηκε μία αρχική εγκοπή βάθους περίπου 0.7 mm (Εικόνα 3.4.1) στο μέσο των δοκιμίων και στη συνέχεια αυτά ψύχθηκαν στους  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  καθώς εκεί εξασφαλιζόνταν η ψαθυρή θραύση (19). Έπειτα χτυπήθηκαν τα δοκίμια με καλέμι και σφυρί με συνθήκες κάμψης τριών σημείων (Εικόνα 3.4.2). Οι επιφάνειες των δοκιμίων παρατηρήθηκαν στο στερεοσκόπιο Leica Wild M3Z (Εικόνα 3.4.3 και Εικόνα 3.4.3) ενώ με χρήση της κάμερας Leica DC 300 ελήφθησαν φωτογραφίες της δομής. Ακολούθησε η ανάλυση των εικόνων στο πρόγραμμα Image - Pro Plus 5 όπου προσδιορίστηκε το ποσοστό κενών σε όλη την επιφάνεια καθώς και στα πρώτα και τελευταία στρώματα της επιφάνειας ενώ μετρήθηκαν και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής, όπως το πάχος και το πλάτος των διαδρομών των στρωμάτων στην πλήρωση και την περίμετρο. Επίσης, μετρήθηκε το ποσοστό κενών στην πλήρωση για τα δοκίμια με 70 % πλήρωση, η απόσταση μεταξύ των στρωμάτων που αντιστοιχεί σε 70 % πλήρωση καθώς και το μήκος συγκόλλησης<sup>5</sup>. Για την σύγκριση του ποσοστού κενών μεταξύ των αρχικών και των τελικών στρωμάτων επιλέχθηκε το 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτη και το 40 % αυτής που εκτυπώθηκε τελευταία.

<sup>5</sup> Για τα δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 70 % το μήκος συγκόλλησης αφορούσε τα στρώματα της περιμέτρου.

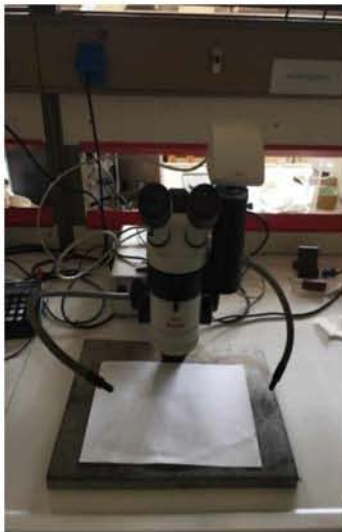
Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να προσδιορισθεί το πραγματικό ποσοστό κενών, να συσχετιστεί με τις μηχανικές ιδιότητες αλλά και να εκτιμηθεί αν υπάρχει απόκλιση των χαρακτηριστικών της δομής σε σχέση με αυτά που ορίζονται από τις παραμέτρους εκτύπωσης.



Εικόνα 3.4.1: Εγκοπή στο μέσο του δοκιμίου.



Εικόνα 3.4.2: Σπάσιμο δοκιμίου για μελέτη της δομής.



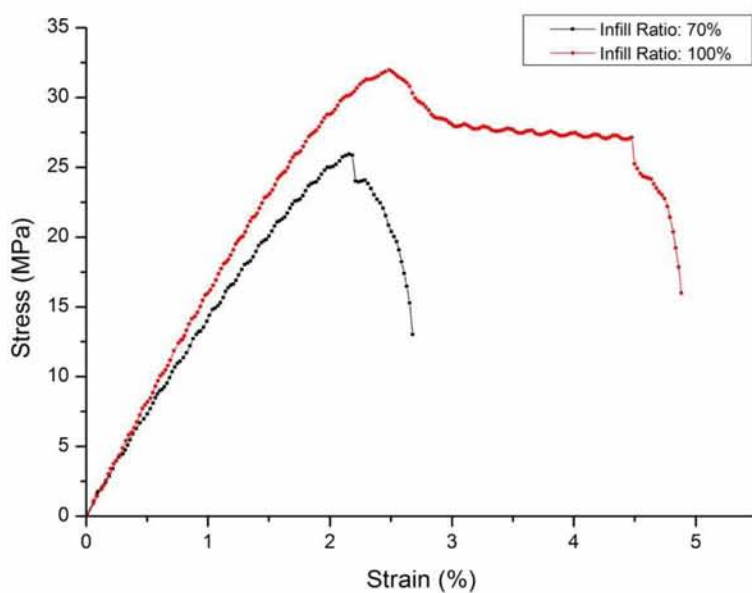
Εικόνα 3.4.3: Στερεοσκόπιο Leica Wild M3Z και κάμερα Leica DC 300.

## Κεφάλαιο 4 Πειραματικά Αποτελέσματα

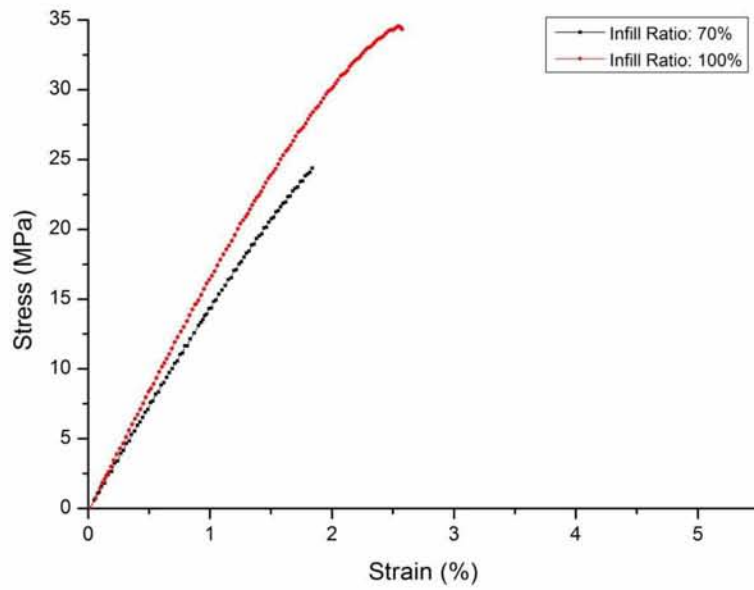
### 4.1 Αποτελέσματα Πειραμάτων Εφελκυσμού

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων εφελκυσμού σε δοκίμια που κατασκευάστηκαν με διαφορετικό ποσοστό πλήρωση δίνονται στις εικόνες 4.1.1 – 4.1.4.

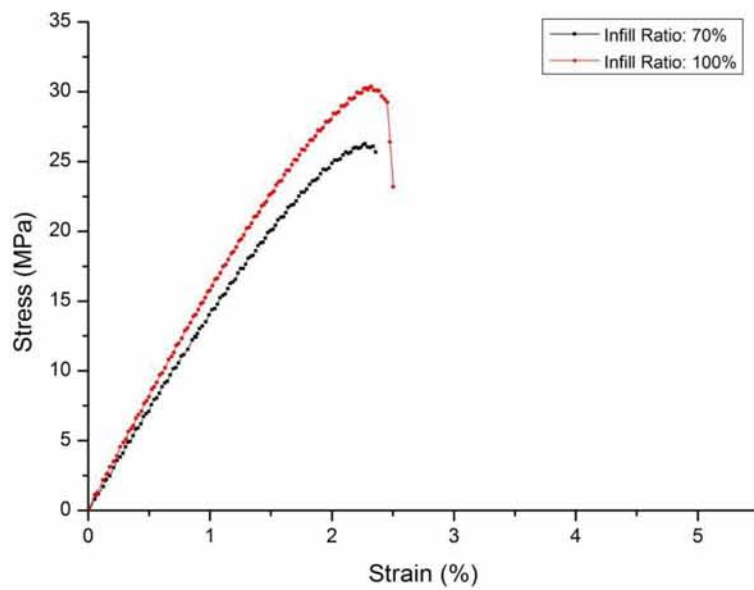
#### 4.1.1 Επίδραση Ποσοστού Πλήρωσης στις Μηχανικές Ιδιότητες



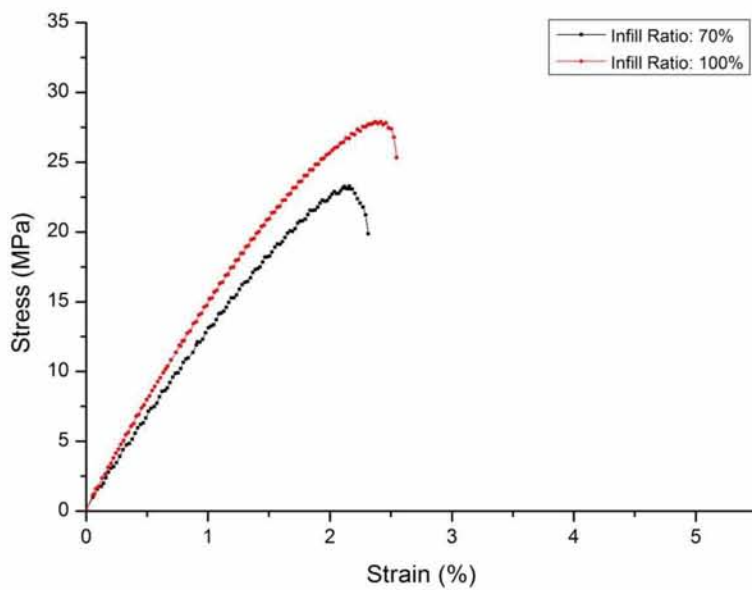
Εικόνα 4.1.1: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια πάχους στρώματος 0.15 mm και ποσοστό πλήρωσης 70 και 100 %.



Εικόνα 4.1.2: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια πάχους στρώματος 0.20 mm και ποσοστό πλήρωσης 70 και 100 %.



Εικόνα 4.1.3: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια πάχους στρώματος 0.30 mm και ποσοστό πλήρωσης 70 και 100 %.



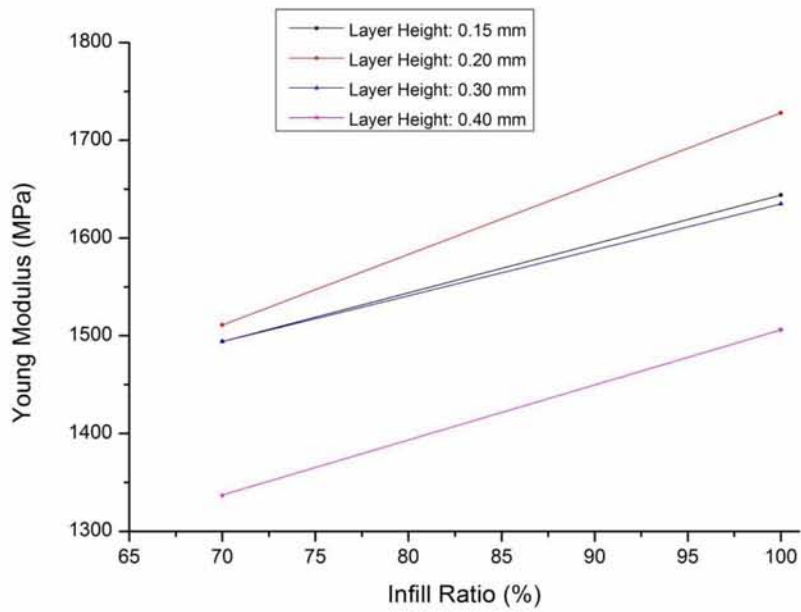
Εικόνα 4.1.4: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια πάχους στρώματος 0.40 mm και ποσοστό πλήρωσης 70 και 100 %.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης (Εικόνα 4.1.1 με Εικόνα 4.1.4) διαπιστώνεται πως το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή αυξάνουν με το ποσοστό πλήρωσης. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο διότι υψηλότερο ποσοστό πλήρωσης συνεπάγεται περισσότερο υλικό.

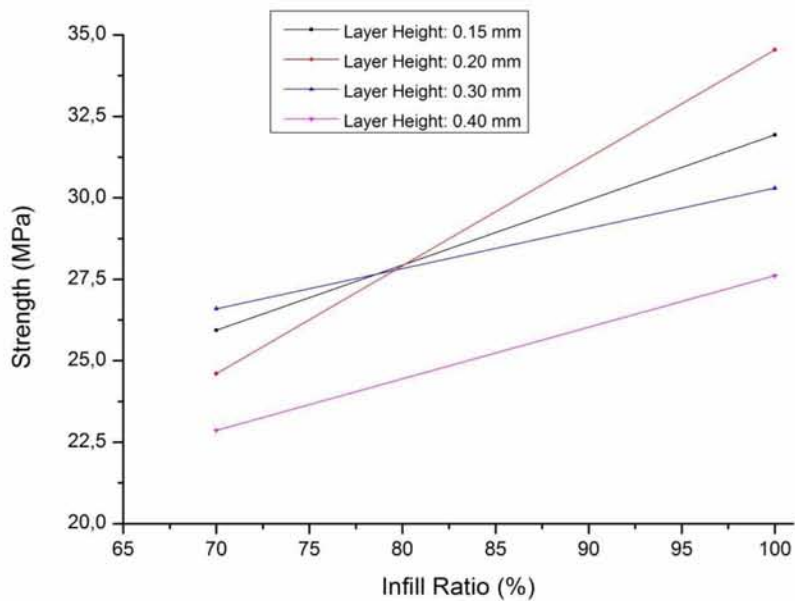
Η απότομη κατακόρυφη μετατόπιση που παρατηρείται στην εικόνα 4.1.1 συνέβη διότι στα δοκίμια με πάχος στρώματος 0.15 mm παρατηρήθηκε αποκόλληση κάποιων στρώσεων με αποτέλεσμα την πτώση του φορτίου και στη συνέχεια τη θραύση.

Στις εικόνες 4.1.5 και 4.1.6 αναπαριστάται η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής ανάλογα με το ποσοστό πλήρωσης για πάχη στρώματος 0.15, 0.20, 0.30 και 0.40 mm. Παρατηρείται αυξητική τάση των δύο ιδιοτήτων όσο μεγαλώνει το ποσοστό πλήρωσης.





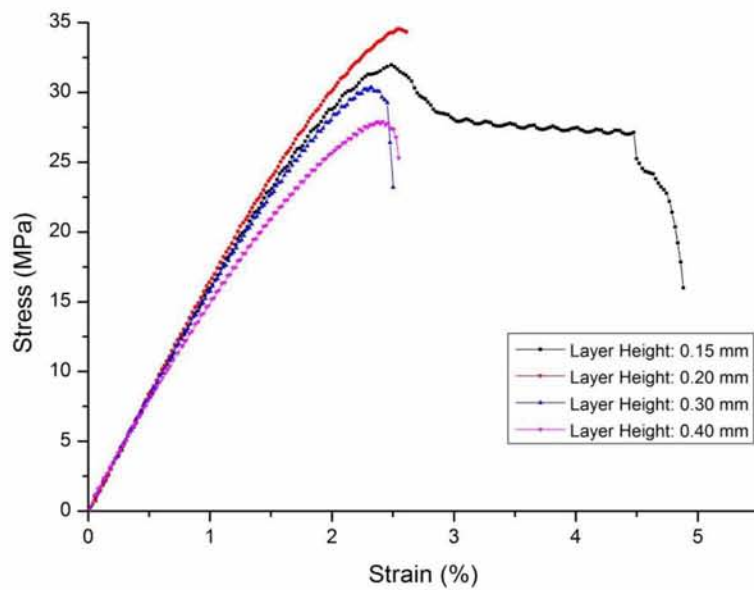
Εικόνα 4.1.5: Σχέση μέτρου ελαστικότητας και ποσοστού πλήρωσης για διαφορετικά πάχη στρώματος.



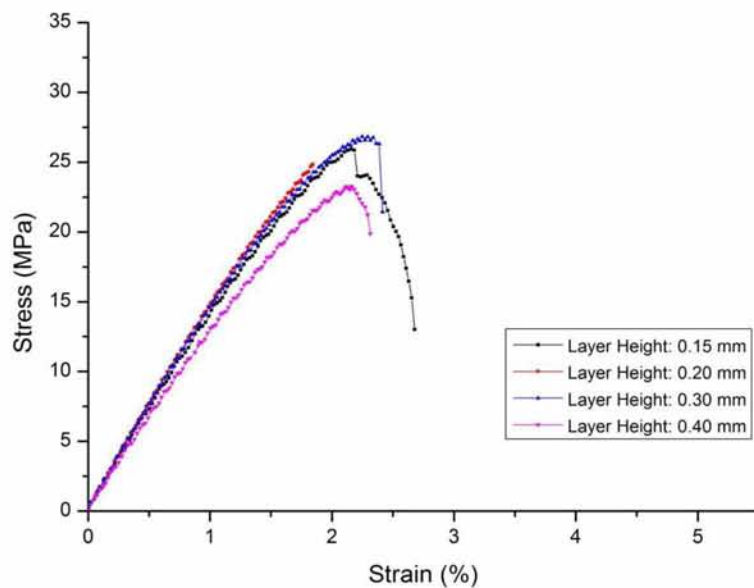
Εικόνα 4.1.6: Σχέση αντοχής και ποσοστού πλήρωσης για διαφορετικά πάχη στρώματος.

#### 4.1.2 Επίδραση Πάχους Στρώματος στις Μηχανικές Ιδιότητες

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων εφελκυσμού σε δοκίμια που κατασκευάστηκαν με διαφορετικό πάχος στρώματος παραθέτονται στις εικόνες 4.1.7 και 4.1.8.



Εικόνα 4.1.7: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 100 % και πάχος στρώματος 0.15, 0.20, 0.30, 0.40 mm.

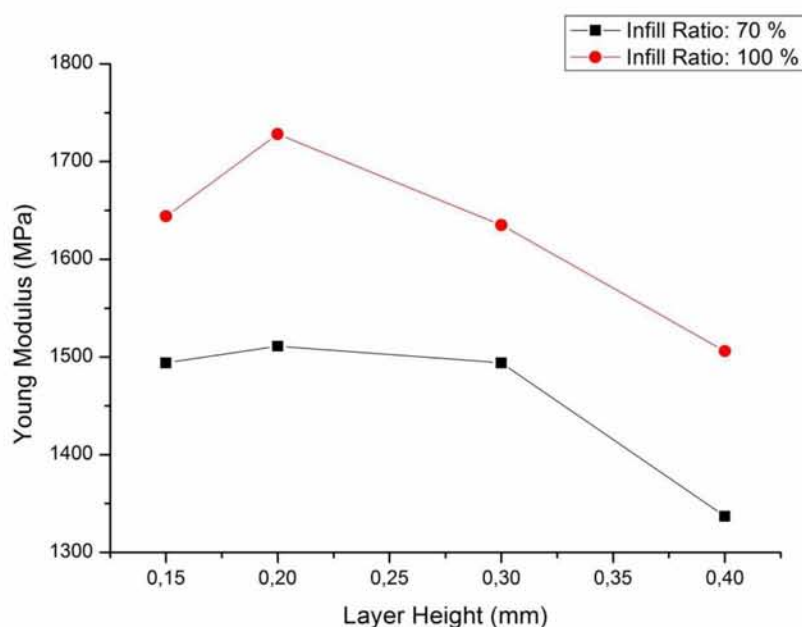


Εικόνα 4.1.8: Τάση – παραμόρφωση για δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 70 % και πάχος στρώματος 0.15, 0.20, 0.30, 0.40 mm.

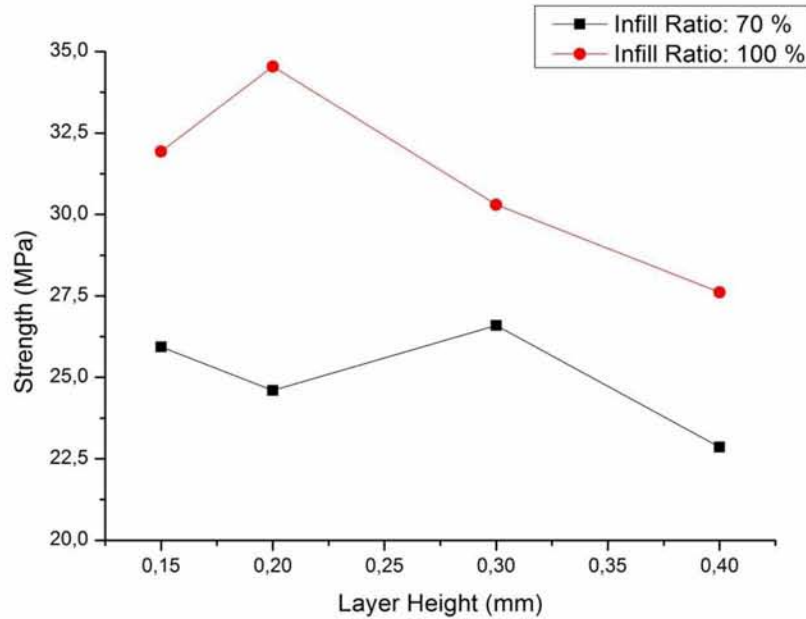
Οι υψηλότερες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων στα δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 100 % παρουσιάστηκαν σε αυτό με πάχος στρώματος 0.20 mm. Συγκεκριμένα, η αντοχή ήταν 34.54 MPa και το μέτρο ελαστικότητας 1728 MPa. Τόσο η μείωση όσο και η αύξηση του πάχους στρώματος είχαν σαν αποτέλεσμα χαμηλότερες τιμές αντοχής και μέτρου ελαστικότητας (Εικόνα 4.1.9 και Εικόνα 4.1.10). Το FDM ABS είναι ένα ψαθυρό υλικό όπως διαπιστώνεται και από τις παραμορφώσεις που

καταγράφηκαν. Για τα δοκίμια με πάχη στρώματος 0.20, 0.30 και 0.40 mm η επιμήκυνση κυμαίνονταν από 2.51 έως 2.64 % ενώ για αυτό με στρώμα πάχους 0.15 mm ήταν 4.88 %.

Στα δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 70 % η μεγαλύτερη αντοχή σημειώθηκε στο δοκίμιο με πάχος στρώματος 0.30 mm και μετρήθηκε στα 26.60 MPa ενώ το μέτρο ελαστικότητας του ήταν 1494 MPa. Οποιαδήποτε μεταβολή πάχους στρώματος προκάλεσε μείωση στην αντοχή. Δεν ίσχυε το ίδιο, όμως, για το μέτρο ελαστικότητας. Το δοκίμιο με στρώμα πάχους 0.20 mm ήταν αυτό με το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας το οποίο βρίσκονταν στα 1511 MPa ενώ η αντοχή του ήταν 24.60 MPa. Όπως και στην περίπτωση με πλήρωση 100 % το δοκίμιο με πάχος στρώματος 0.15 mm εμφάνισε την μεγαλύτερη επιμήκυνση με 2.68 %. Η ελάχιστη τιμή επιμήκυνσης ήταν 1.84 % και την είχε το δοκίμιο με πάχος στρώματος 0.20 mm. Οι εικόνες 4.1.9 και 4.1.10 αναπαριστούν τη μεταβολή της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας με το πάχος στρώματος.



Εικόνα 4.1.9: Σχέση μέτρου ελαστικότητας και πάχους στρώματος για ποσοστά πλήρωσης 70 και 100 %.



Εικόνα 4.1.10: Σχέση αντοχής και πάχους στρώματος για ποσοστά πλήρωσης 70 και 100 %

## 4.2 Μικροδομικά Χαρακτηριστικά FDM ABS

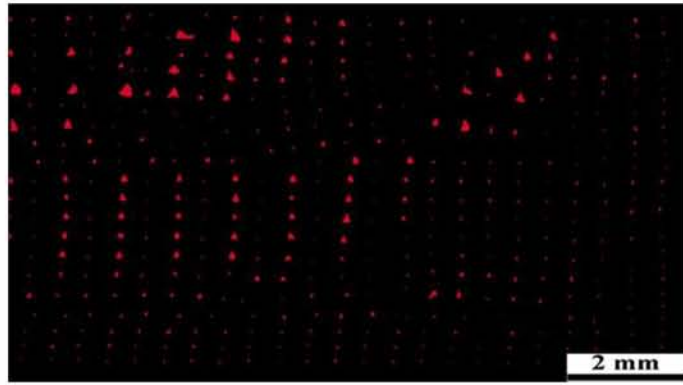
Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται τα μικροδομικά χαρακτηριστικά της FDM δομής ανάλογα με το πάχος στρώματος και το ποσοστό πλήρωσης. Για κάθε ποσοστό πλήρωσης παρουσιάζονται, ενδεικτικά, τροποποιημένες εικόνες που τονίζουν την ύπαρξη κενών και εισήχθησαν στο Image Pro Plus 5 για τον προσδιορισμό του ποσοστού κενών. Επιπλέον, δίνονται πίνακες με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής για κάθε παράμετρο που μελετήθηκε.

### 4.2.1 Ποσοστό Πλήρωσης 100 %

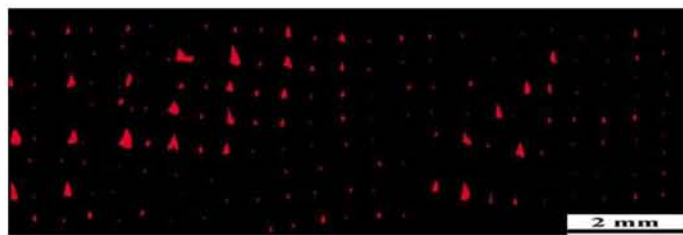
#### 1) Πάχος στρώματος 0.15 mm.



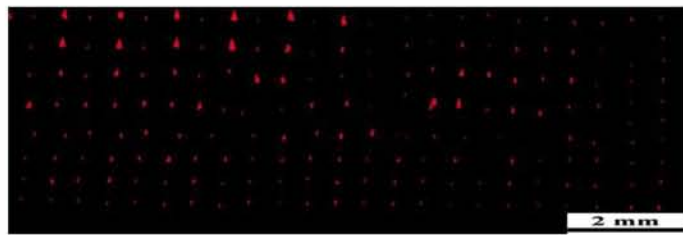
Εικόνα 4.2.1: Το μισό τμήμα της δομής.



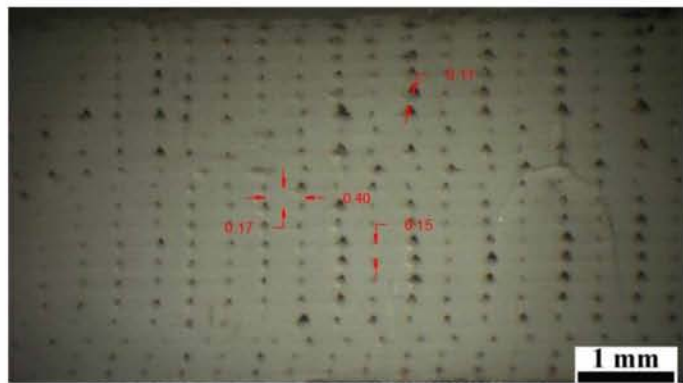
Εικόνα 4.2.2: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο μισό τμήμα.



Εικόνα 4.2.3: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο 40 % της επιφάνειας που εκτοπώθηκε τελευταίο.



Εικόνα 4.2.4: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο 40 % της επιφάνειας που εκτοπώθηκε πρώτο.

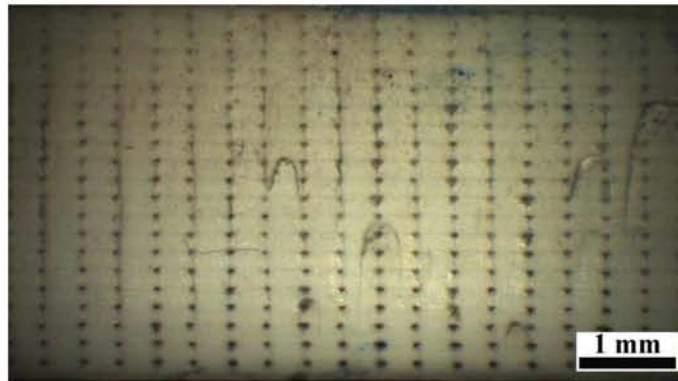


Εικόνα 4.2.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δομής.

Πίνακας 4.2.1: Χαρακτηριστικά δομής.

Ποσοστό κενών σε όλη την επιφάνεια (%)	1.49
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο (%)	1.06
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο (%)	1.86
Πάχος στρώματος στην περίμετρο (mm)	0.17
Πάχος στρώματος στην πλήρωση (mm)	0.17
Πλάτος διαδρομής στην περίμετρο (mm)	0.40
Πλάτος διαδρομής στην πλήρωση (mm)	0.40
Μήκος συγκόλλησης (mm)	0.125
Λόγος μήκους συγκόλλησης και πάχους στρώματος	0.73

2) Πάχος στρώματος 0.2 mm.

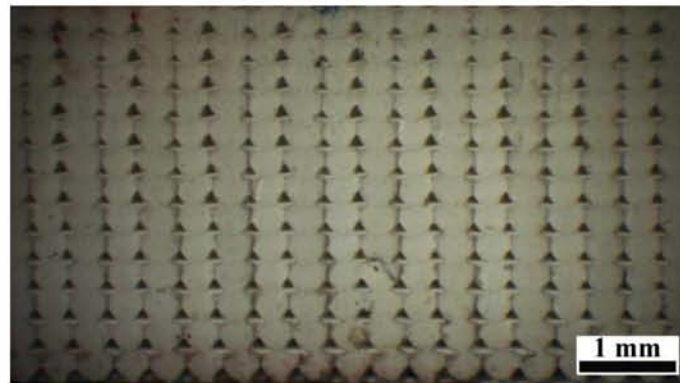


Εικόνα 4.2.6: Το μισό τμήμα της δομής.

Πίνακας 4.2.2: Χαρακτηριστικά δομής.

Ποσοστό κενών σε όλη την επιφάνεια (%)	0.41
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο (%)	0.26
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο (%)	0.55
Πάχος στρώματος στην περίμετρο (mm)	0.20
Πάχος στρώματος στην πλήρωση (mm)	0.20
Πλάτος διαδρομής στην περίμετρο (mm)	0.40
Πλάτος διαδρομής στην πλήρωση (mm)	0.40
Μήκος συγκόλλησης (mm)	0.15
Λόγος μήκους συγκόλλησης και πάχους στρώματος	0.75

### 3) Πάχος στρώματος 0.3 mm.

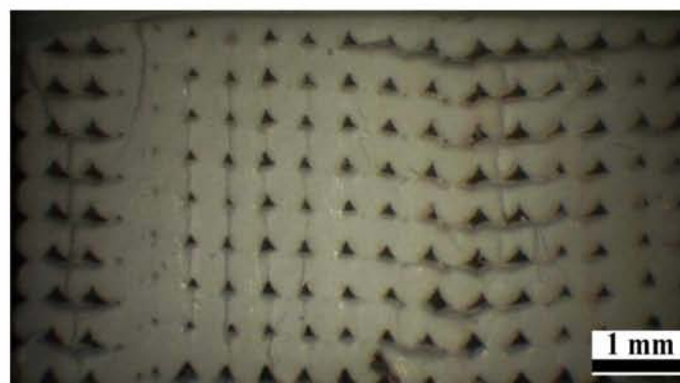


Εικόνα 4.2.7: Το μισό τμήμα της δομής.

Πίνακας 4.2.3: Χαρακτηριστικά δομής.

Ποσοστό κενών σε όλη την επιφάνεια (%)	3.88
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο (%)	4.07
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο (%)	3.58
Πάχος στρώματος στην περίμετρο (mm)	0.30
Πάχος στρώματος στην πλήρωση (mm)	0.30
Πλάτος διαδρομής στην περίμετρο (mm)	0.40
Πλάτος διαδρομής στην πλήρωση (mm)	0.40
Μήκος συγκόλλησης (mm)	0.21
Λόγος μήκους συγκόλλησης και πάχους στρώματος	0.70

### 4) Πάχος στρώματος 0.4 mm.



Εικόνα 4.2.8: Το μισό τμήμα της δομής.

Πίνακας 4.2.4: Χαρακτηριστικά δομής.

Ποσοστό κενών σε όλη την επιφάνεια (%)	5.21
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο (%)	4.78
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο (%)	5.51
Πάχος στρώματος στην περίμετρο (mm)	0.40
Πάχος στρώματος στην πλήρωση (mm)	0.40
Πλάτος διαδρομής στην περίμετρο (mm)	0.40
Πλάτος διαδρομής στην πλήρωση (mm)	0.40
Μήκος συγκόλλησης (mm)	0.26
Λόγος μήκους συγκόλλησης και πάχους στρώματος	0.65

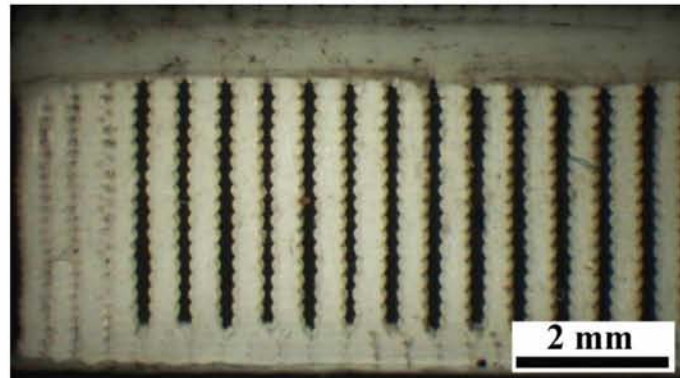
Εξετάζοντας τα δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 100 % το χαμηλότερο ποσοστό κενών μετρήθηκε στο δοκίμιο με πάχος στρώματος 0.20 mm και ήταν 0.41 %. Διαπιστώθηκε πως το ποσοστό κενών μεταβάλλονταν με το πάχος στρώματος και αποτελούσε την αιτία διαφοροποίησης των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ των δοκιμίων. Ο λόγος μήκους συγκόλλησης και πάχους στρώματος επιδρούσε στο ποσοστό κενών. Το δοκίμιο με πάχος στρώματος 0.20 mm και ποσοστό πλήρωσης 100 % παρουσίασε τον υψηλότερο λόγο με 0.75. Το ποσοστό κενών μεταξύ των στρωμάτων που εκτυπώθηκαν στην αρχή ήταν χαμηλότερο από αυτό των στρωμάτων που εκτυπώθηκαν στο τέλος. Οι χαμηλότερες τιμές παρατηρήθηκαν για το δοκίμιο πάχους στρώματος 0.20 mm και ήταν 0.26 και 0.56 % για τα πρώτα και τα τελευταία στρώματα αντίστοιχα. Ωστόσο, εξαίρεση σε αυτή τη συμπεριφορά αποτέλεσε το δοκίμιο με πάχος στρώματος 0.30 mm όπου τα πρώτα στρώματα είχαν ποσοστό κενών 4.07 και τα τελευταία είχαν 3.58 %. Βέβαια, στην προκειμένη περίπτωση η διαφορά ήταν η μικρότερη που σημειώθηκε.

Κατά τη μέτρηση του πάχους και του πλάτους διαδρομών των στρωμάτων, για τον έλεγχο της γεωμετρικής ακρίβειας στη δομή, διαπιστώθηκε πως υπήρχε απόκλιση όταν ζητούνταν στρώμα πάχους 0.15 mm αφού στο συγκεκριμένο δοκίμιο το πάχος στρώματος τόσο σε πλήρωση όσο και σε περίμετρο ήταν 0.17 αντί για 0.15 mm. Βέβαια, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής των υπόλοιπων δοκιμίων δεν είχαν διαφοροποίηση σε σχέση με τις τιμές που επιλέχθηκαν.



#### 4.2.2 Ποσοστό Πλήρωσης 70 %

##### 1) Πάχος στρώματος 0.15 mm.



Εικόνα 4.2.9: Το μισό τμήμα της δομής.



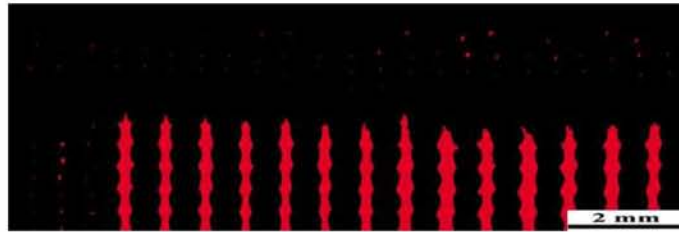
Εικόνα 4.2.10: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο μισό τμήμα της επιφάνειας.



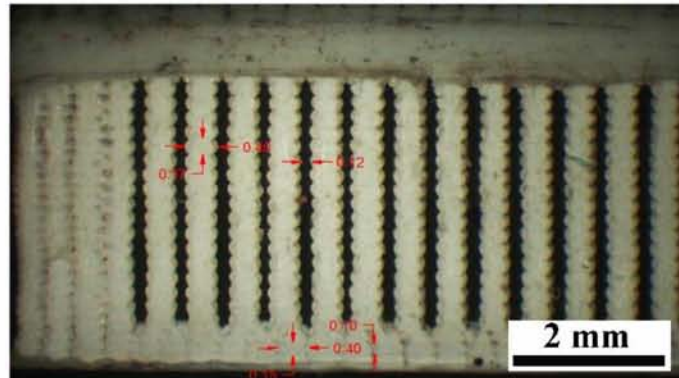
Εικόνα 4.2.11: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στην πλήρωση.



Εικόνα 4.2.12: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο 40 % της επιφάνειας που εκτοπώθηκε τελευταίο.



Εικόνα 4.2.13: Επιφάνεια κενών (κόκκινο χρώμα) στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο.

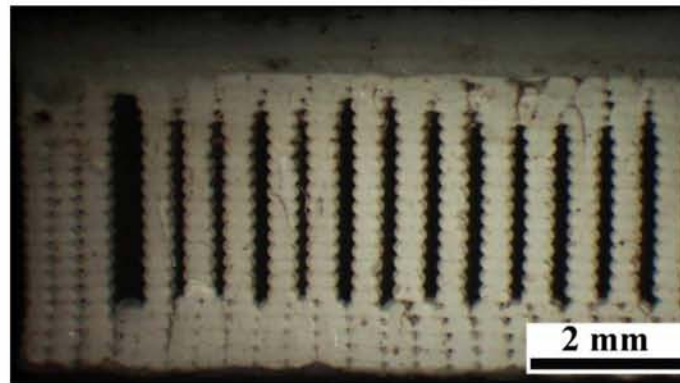


Εικόνα 4.2.14: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δομής.

Πίνακας 4.2.5: Χαρακτηριστικά δομής.

Ποσοστό κενών σε όλη την επιφάνεια (%)	15.74
Ποσοστό κενών στην πλήρωση (%)	29.35
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο (%)	11.19
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο (%)	16.40
Απόσταση μεταξύ στηλών (mm)	0.12
Πάχος στρώματος στην περίμετρο (mm)	0.15
Πάχος στρώματος στην πλήρωση (mm)	0.17
Πλάτος διαδρομής στην περίμετρο (mm)	0.40
Πλάτος διαδρομής στην πλήρωση (mm)	0.40
Μήκος συγκόλλησης (mm)	0.10
Λόγος μήκους συγκόλλησης και πάχους στρώματος	0.67

2) Πάχος στρώματος 0.2 mm.

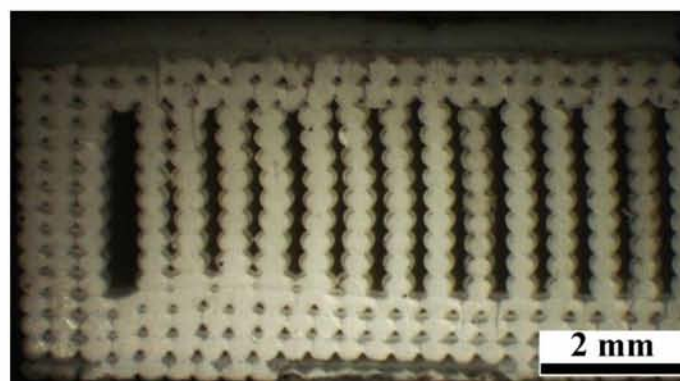


Εικόνα 4.2.15: Το μισό τμήμα της δομής.

Πίνακας 4.2.6: Χαρακτηριστικά δομής.

Ποσοστό κενών σε όλη την επιφάνεια (%)	16.39
Ποσοστό κενών στην πλήρωση (%)	32.12
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο (%)	10.79
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο (%)	14.60
Απόσταση μεταξύ στηλών (mm)	0.12
Πάχος στρώματος στην περίμετρο (mm)	0.20
Πάχος στρώματος στην πλήρωση (mm)	0.20
Πλάτος διαδρομής στην περίμετρο (mm)	0.40
Πλάτος διαδρομής στην πλήρωση (mm)	0.40
Μήκος συγκόλλησης (mm)	0.15
Λόγος μήκους συγκόλλησης και πάχους στρώματος	0.75

3) Πάχος στρώματος 0.3 mm.

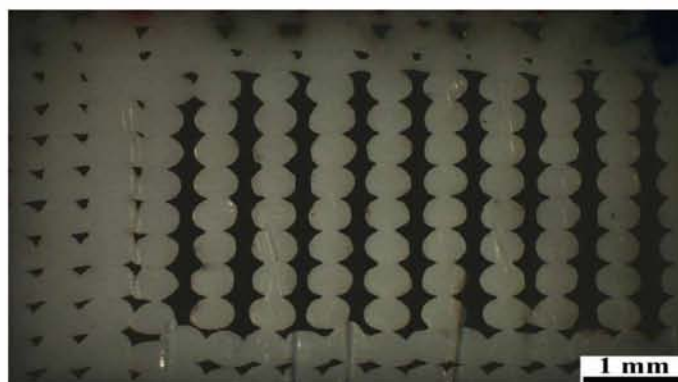


Εικόνα 4.2.16: Το μισό τμήμα της δομής.

Πίνακας 4.2.7: Χαρακτηριστικά δομής.

Ποσοστό κενών σε όλη την επιφάνεια (%)	13.77
Ποσοστό κενών στην πλήρωση (%)	28.56
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο (%)	9.39
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο (%)	11.49
Απόσταση μεταξύ στηλών (mm)	0.11
Πάχος στρώματος στην περίμετρο (mm)	0.30
Πάχος στρώματος στην πλήρωση (mm)	0.30
Πλάτος διαδρομής στην περίμετρο (mm)	0.40
Πλάτος διαδρομής στην πλήρωση (mm)	0.40
Μήκος συγκόλλησης (mm)	0.21
Λόγος μήκους συγκόλλησης και πάχους στρώματος	0.70

4) Πάχος στρώματος 0.4 mm.



Εικόνα 4.2.17: Το μισό τμήμα της δομής.

Πίνακας 4.2.8: Χαρακτηριστικά δομής.

Ποσοστό κενών σε όλη την επιφάνεια (%)	20.52
Ποσοστό κενών στην πλήρωση (%)	32.33
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο (%)	16.10
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο (%)	20.21
Απόσταση μεταξύ στηλών (mm)	0.12
Πάχος στρώματος στην περίμετρο (mm)	0.40
Πάχος στρώματος στην πλήρωση (mm)	0.40
Πλάτος διαδρομής στην περίμετρο (mm)	0.40
Πλάτος διαδρομής στην πλήρωση (mm)	0.40
Μήκος συγκόλλησης (mm)	0.26
Λόγος μήκους συγκόλλησης και πάχους στρώματος	0.65

Στα δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 70 %, το οποίο αντιστοιχούσε σε απόσταση 0.12 mm μεταξύ των διαδρομών πλήρωσης με εξαίρεση το δοκίμιο με

στρώμα πάχους 0.30 mm στο οποίο η απόσταση μετρήθηκε στα 0.11 mm, διαπιστώθηκε ότι για πάχος στρώματος 0.30 mm υπήρχε το χαμηλότερο ποσοστό κενών το οποίο ήταν 13.77 %. Το ποσοστό κενών στην περιοχή πλήρωσης εκτιμήθηκε σε 29.35, 32.12, 28.56 και 32.33 % για τα δοκίμια με πάχος στρώματος 0.15, 0.20, 0.30 και 0.40 mm παρουσιάζοντας ικανοποιητική συνέπεια μεταξύ της επιλογής του χρήστη και του τελικού αντικειμένου. Μεταξύ των τμημάτων που εκτυπώθηκαν στην αρχή και στο τέλος υπήρχε, επίσης, διαφοροποίηση στο ποσοστό κενών με τα αρχικά στρώματα να εμφανίζουν λιγότερα κενά. Επισημαίνεται πως η ύπαρξη των στρωμάτων της περιμέτρου είναι αυτή που επιφέρει τη διαφορά μεταξύ του ποσοστού κενών και αυτού της πλήρωσης.

Κατά την ανάλυση ακρίβειας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών δομής βρέθηκε πως το δοκίμιο με πλήρωση 70 % είχε πάχος στρώματος στην πλήρωση 0.17 αντί για 0.15 mm. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής των υπόλοιπων δοκιμίων ήταν όπως είχαν ορισθεί από το πρόγραμμα τμήσεως.

### 4.3 Χρόνος Εκτύπωσης

Αφού ρυθμιστούν οι παράμετροι εκτύπωσης, το πρόγραμμα τμήσεως υπολογίζει τον χρόνο που απαιτείται για την παραγωγή του κάθε δοκιμίου. Στον πίνακα 4.3.1 είναι καταγεγραμμένοι οι χρόνοι εκτύπωσης και οι μηχανικές ιδιότητες για τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν.

Πίνακας 4.3.1: Χρόνος εκτύπωσης και μηχανικές ιδιότητες για κάθε δοκίμιο.

Ποσοστό Πλήρωσης (%)	Πάχος Στρώματος (mm)	Ποσοστό Κενών (%)	Αντοχή (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Παραμόρφωση (%)	Χρόνος Εκτύπωσης (min)
70	0.15	15.74	25.93	1494	2.68	65
70	0.20	16.39	24.60	1511	1.84	59
70	0.30	13.77	26.60	1494	2.39	41
70	0.40	20.52	22.86	1337	2.25	32
100	0.15	1.49	31.93	1644	4.88	77
100	0.20	0.41	34.54	1728	2.64	69
100	0.30	3.88	30.30	1635	2.51	47
100	0.40	5.21	27.61	1506	2.59	37

Ακολουθεί πίνακας που περιλαμβάνει τις πληροφορίες για κάθε δοκίμιο.

Πίνακας 4.3.2: Συγκριτικός πίνακας των χαρακτηριστικών της δομής, των μηχανικών ιδιοτήτων και του χρόνου εκτόπωσης ανάλογα με το πάχος στρώματος και το ποσοστό πλήρωσης.

	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
	0.15	70	0.20	70	0.30	70	0.40	70	0.15	100	0.20	100	0.30	100	0.40	100
Ποσοστό κενών σε όλη την επιφάνεια (%)	15.74		16.39		13.77		20.52		1.49		0.41		3.88		5.21	
Ποσοστό κενών στην πλήρωση (%)	29.35		32.12		28.56		32.33		-		-		-		-	
Απόσταση μεταξύ στηλών (gap) (mm)	0.12		0.12		0.11		0.12		-		-		-		-	
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε πρώτο (%)	11.19		10.79		9.39		16.10		1.06		0.26		4.07		4.78	
Ποσοστό κενών στο 40 % της επιφάνειας που εκτυπώθηκε τελευταίο (%)	16.40		14.60		11.49		20.21		1.86		0.55		3.58		5.51	
Πάχος στρώματος στην περίμετρο (mm)	0.15		0.20		0.30		0.40		0.17		0.20		0.30		0.40	
Πάχος στρώματος στην πλήρωση (mm)	0.17		0.20		0.30		0.40		0.17		0.20		0.30		0.40	
Πλάτος διαδρομής στην περίμετρο (mm)	0.40		0.40		0.40		0.40		0.40		0.40		0.40		0.40	
Πλάτος διαδρομής στην πλήρωση (mm)	0.40		0.40		0.40		0.41		0.40		0.40		0.40		0.40	
Μήκος συγκόλλησης (mm)	0.10		0.15		0.21		0.26		0.125		0.15		0.21		0.26	
Λόγος μήκους συγκόλλησης και πάχους στρώματος	0.67		0.75		0.70		0.65		0.73		0.75		0.70		0.65	
Αντοχή (MPa)	25.93		24.60		26.60		22.86		31.93		34.54		30.30		27.61	
Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	1494		1511		1494		1337		1644		1728		1635		1506	
Παραμόρφωση (%)	2.68		1.84		2.39		2.25		4.88		2.64		2.51		2.59	
Χρόνος Εκτόπωσης (min)	65		59		41		32		77		69		47		37	

## 4.4 Θεωρητικοί Υπολογισμοί

Μετά την διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε προσπάθεια να εκτιμηθούν οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού ABS με βάση τη θεωρία της μηχανικής ινωδών σύνθετων υλικών.

Δεδομένου ότι οι ίνες ήταν παράλληλες στη διεύθυνση φόρτισης και ότι πειραματικά προσδιορίστηκαν το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή οι θεωρητικοί υπολογισμοί αφορούσαν αυτές τις δύο τιμές για κάθε δοκίμιο. Για την πρόβλεψη τους εφαρμόστηκε ο νόμος των μιγμάτων κάνοντας την παραδοχή πως το FDM ABS συμπεριφέρεται ως σύνθετο που φορτίζεται παράλληλα στη διεύθυνση των ινών για τις οποίες θεωρείται πως υφίστανται κοινές παραμορφώσεις.

$$E_{FDM} = (1 - \rho_1) E \quad \text{Εξίσωση 4.4.1}$$

$$\sigma_{FDM} = (1 - \rho_1) \sigma \quad \text{Εξίσωση 4.4.2}$$

όπου  $E_{FDM}$  και  $\sigma_{FDM}$  το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή του εκτυπωμένου προϊόντος,  $\rho_1$  το ποσοστό κενών,  $E$  και  $\sigma$  το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή του νήματος.

Στη συνέχεια, προσδιορίστηκε το σφάλμα μεταξύ των πειραματικών και των εκτιμώμενων τιμών μέσω της:

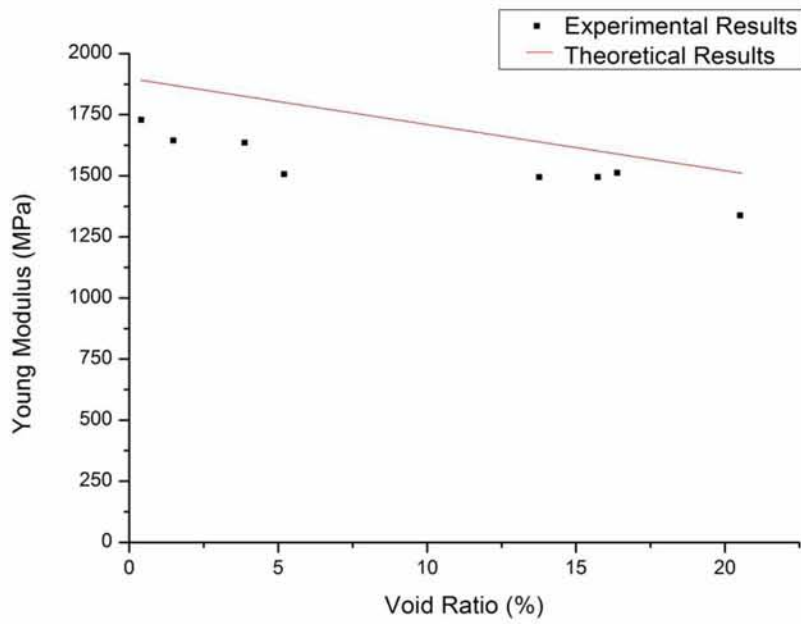
$$\frac{\text{Εκτιμώμενη τιμή} - \text{Γνωστή Τιμή}}{\text{Γνωστή τιμή}} \times 100 \rightarrow$$

$$\frac{(1 - \rho_1) E_{νημ.} - E_{πειρ.}}{E_{πειρ.}} \times 100 \quad \text{Εξίσωση 4.4.3}$$

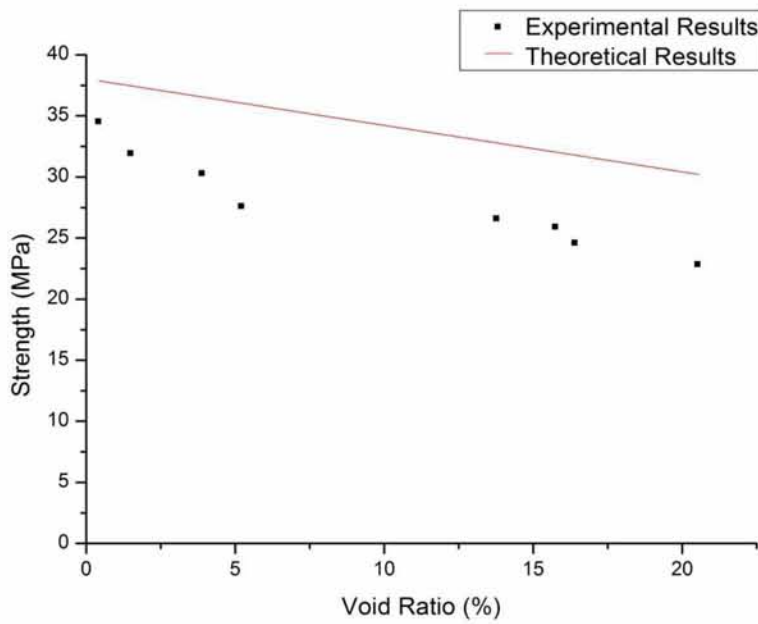
Για  $E = 1900 \text{ MPa}$ ,  $\sigma = 38 \text{ MPa}$  (Πίνακας 3.1.2) και  $\rho_1$  το ποσοστό κενών (Πίνακας 4.3.2) προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 4.4.1, Εικόνα 4.4.1 και Εικόνα 4.4.2).

Πίνακας 4.4.1: Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα.

Ποσοστό κενών (%)	$E_{\text{θεωρ}}$	$\sigma_{\text{θεωρ}}$	$E_{\text{πειρ}}$	$\sigma_{\text{πειρ}}$	Απόκλιση στο Μέτρο Ελαστικότητας (%)	Απόκλιση στην Αντοχή (%)
1.49	1872	37.43	1644	31.93	13.85	17.24
0.41	1892	37.84	1728	34.54	9.50	9.57
3.88	1826	36.53	1635	30.30	11.70	20.55
5.21	1801	36.02	1506	27.61	19.59	30.46
15.74	1601	32.02	1494	25.93	7.16	23.48
16.39	1589	31.77	1511	24.60	5.14	29.15
13.77	1638	32.77	1494	26.60	9.66	23.19
20.52	1510	30.20	1337	22.86	12.95	32.12



Εικόνα 4.4.1: Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα μέτρου ελαστικότητας συναρτήσει ποσοστού κενών.



Εικόνα 4.4.2: Θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα αντοχής συναρτήσει ποσοστού κενών.



## Κεφάλαιο 5 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

### 5.1 Σχολιασμός Πειραματικών Αποτελεσμάτων

Από την διεξαγωγή των πειραμάτων εφελκυσμού και της ανάλυσης της FDM δομής διαπιστώθηκε πως οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται από το ποσοστό κενών καθώς διαφορετικό ποσοστό πλήρωσης και πάχος στρώματος άλλαζε την ενεργή επιφάνεια. Η τιμή ποσοστού πλήρωσης που εισάγεται στο πρόγραμμα τμήσεως αποκλίνει από την πραγματική λόγω του ότι οι ίνες δεν συγκολλούνται πλήρως μεταξύ τους.

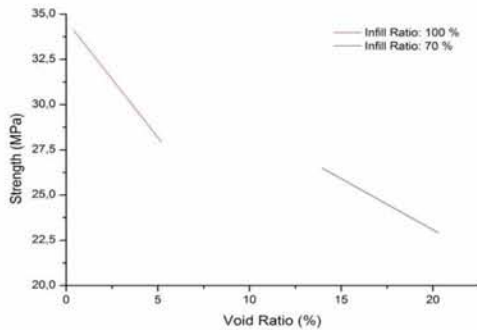
Το δοκίμιο με ποσοστό πλήρωσης 100 % και πάχος στρώματος 0.20 mm είχε το χαμηλότερο ποσοστό κενών με 0.41 % παρουσιάζοντας την καλύτερη μηχανική συμπεριφορά καθώς είχε τη μεγαλύτερη αντοχή με 34.54 MPa και τη μεγαλύτερη δυσκαμψία με 1728 MPa. Η καλύτερη συγκόλληση μεταξύ των ινών κάθε στρώματος συνεπάγεται χαμηλό ποσοστό κενών, άρα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες η επίτευξη αυτού του συνδυασμού εξαρτάται τόσο από το πάχος όσο και από το πλάτος κάθε ίνας. Οι δύο αυτές διαστάσεις επηρεάζουν τη διατομή της ίνας, άρα και την διεπιφάνεια επαφής.

Η ίδια εξάρτηση ανάμεσα στις μηχανικές ιδιότητες και το ποσοστό κενών παρατηρήθηκε και στα δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 70 %. Για πάχος στρώματος 0.30 mm υπήρχε το χαμηλότερο ποσοστό κενών το οποίο ήταν 13.77 % και η μεγαλύτερη αντοχή με 26.60 MPa. Ωστόσο, το μέτρο ελαστικότητας του, που ήταν 1494 MPa, ήταν το δεύτερο υψηλότερο. Το δοκίμιο με στρώμα πάχους 0.20 mm είχε ποσοστό κενών 16.39 % και ήταν αυτό με το υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας το οποίο βρίσκονταν στα 1511 MPa ενώ η αντοχή του ήταν 24.60 MPa. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα εφελκυσμού για τα δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 70 % δεν υπήρξε το ίδιο μεγάλη διαφοροποίηση στις μηχανικές ιδιότητες ανάλογα με το πάχος στρώματος όπως στην περίπτωση που το ποσοστό πλήρωσης βρίσκονταν στο 100 %. Επισημαίνεται πως η ύπαρξη των στρωμάτων της περιμέτρου είναι αυτή που επιφέρει τη διαφοροποίηση μεταξύ του ποσοστού κενών και αυτού της πλήρωσης.

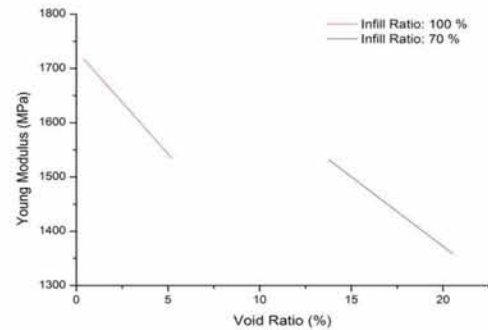
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα που δείχνουν τη μεταβολή της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας με το ποσοστό κενών (Εικόνα 5.1.1 και Εικόνα 5.1.2), τη μεταβολή του λόγου των διαστάσεων της ίνας (πλάτος ίνας / πάχος ίνας) με το ποσοστό κενών (Εικόνα 5.1.3) καθώς και την εξάρτηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας από τον λόγο των διαστάσεων ίνας (Εικόνα 5.1.4 και Εικόνα 5.1.5).

Είναι εξίσου σημαντικό να διατυπωθεί πως εκτός από το ποσοστό κενών η ποιότητα της επιφάνειας επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά. Για μεγάλα πάχη στρώματος η επιφάνεια γίνεται τραχιά προκαλώντας συγκέντρωση τάσεων. Έτσι

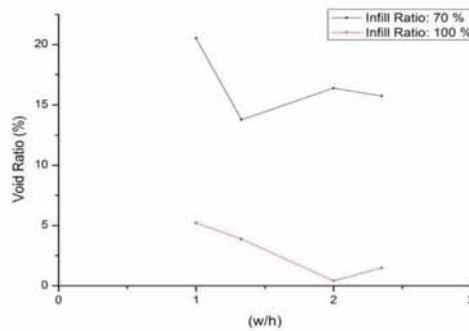
εξηγείται το ότι το δοκίμιο με πάχος στρώματος 0.40 mm και ποσοστό πλήρωσης 100 % έχει παρεμφερή ιδιότητες με αυτό που έχει στρώμα πάχους 0.30 mm και ποσοστό πλήρωσης 70 % αν και το δεύτερο έχει 8.56 % λιγότερο υλικό.



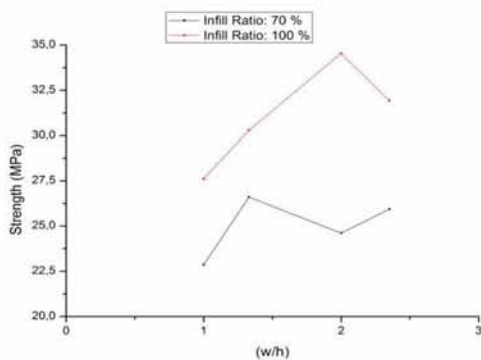
Εικόνα 5.1.1: Αντοχή συναρτήσει του ποσοστού κενών.



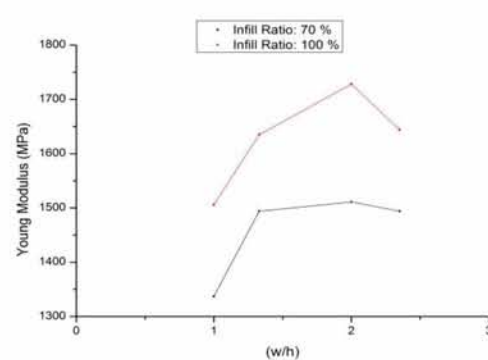
Εικόνα 5.1.2: Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει του ποσοστού κενών.



Εικόνα 5.1.3: Συσχέτιση ποσοστού κενών με το λόγο των διαστάσεων της ίνας.



Εικόνα 5.1.4: Αντοχή συναρτήσει του λόγου διαστάσεων ίνας.



Εικόνα 5.1.5: Μέτρο ελαστικότητας συναρτήσει του λόγου διαστάσεων ίνας.

Από τα διαγράμματα των εικόνων 5.1.1 και 5.1.2 διαπιστώνεται η μείωση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας με την αύξηση του ποσοστού κενών το οποίο είναι αναμενόμενο αφού μειώνεται η ενεργή επιφάνεια. Από τις παραπάνω

αναλύσεις, όμως, διαπιστώνεται εξάρτηση του ποσοστού κενών με τις διαστάσεις της ίνας. Για τα δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 100 % φαίνεται από τα διαγράμματα (Εικόνα 5.1.3, Εικόνα 5.1.4 και Εικόνα 5.1.5) ότι για λόγο διαστάσεων ίσο με δύο το ποσοστό κενών ελαχιστοποιείται ενώ η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας μεγιστοποιούνται. Από τα ίδια διαγράμματα αλλά για ποσοστό πλήρωσης 70 % και λόγο διαστάσεων ίσο με 1.33 εμφανίζεται ελάχιστο ποσοστό κενών, κάτι το οποίο οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο ότι εκεί υπήρχε ποσοστό πλήρωσης 28,56 %, ενώ είναι μέγιστη και η αντοχή. Το μέτρο ελαστικότητας εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή, χωρίς να διαφέρει σημαντικά από τις άλλες, για λόγο διαστάσεων ίνας ίσο με δύο.

Σε όλα τα δοκίμια ήταν ιδιαίτερα μεγάλη η διαφοροποίηση στο ποσοστό κενών μεταξύ των στρώματων που εκτυπώθηκαν στην αρχή και στο τέλος αφού τα αρχικά στρώματα είχαν χαμηλότερο ποσοστό κενών. Αιτία αυτού είναι το ότι τα αρχικά στρώματα παραμένουν για περισσότερη ώρα σε υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα την καλύτερη συγκόλληση μεταξύ των διαδρομών που τα απαρτίζουν. Εξαιρεση αποτέλεσε η περίπτωση του δοκιμίου με πλήρωση 100 % και στρώμα πάχους 0.30 mm. Ωστόσο, η διαφορά ήταν αρκετά μικρή.

Επιπρόσθετα, κατά την ανάλυση της δομής μετρήθηκαν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ώστε να διαπιστωθεί αν υπάρχει απόκλιση μεταξύ των επιλεγθέντων παραμέτρων από τον χρήστη και του τελικού προϊόντος από τον εκτυπωτή. Με αυτή τη διαδικασία διαπιστώθηκε πως υπήρχε απόκλιση όταν ζητούνταν στρώμα πάχους 0.15 mm αφού το δοκίμιο με πλήρωση 70 % είχε πάχος στρώματος στην πλήρωση 0.17 αντί για 0.15 mm ενώ αυτό με ποσοστό πλήρωσης 100 % είχε πάχος 0.17 αντί για 0.15 mm τόσο στα στρώματα πλήρωσης όσο και σε αυτά της περιμέτρου. Ένας παράγοντας που είναι πιθανόν να επέφερε αυτές τις αποκλίσεις είναι η ρύθμιση του εκτυπωτή. Αν το καλιμπράρισμα δεν γίνει με καλή ακρίβεια μπορεί να επηρεαστεί η ροή του υλικού με αποτέλεσμα κάποιες γεωμετρικές αποκλίσεις. Στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής μπορούν να επέλθουν αποκλίσεις αν δεν γίνει με ακρίβεια η βαθμονόμηση του κατακόρυφου άξονα ή αν αλλάξει η ταχύτητα τροφοδοσίας του νήματος ή/και η ταχύτητα κίνησης του ακροφύσιου στον κάθετο και στον οριζόντιο άξονα. Τα δύο τελευταία θα μπορούσαν να συμβούν από κακή ρύθμιση ή λειτουργία των επιμέρους συστημάτων. Η μεγαλύτερη ακρίβεια στο καλιμπράρισμα του κατακόρυφου άξονα απαιτείται όταν επιλέγονται οι οριακές τιμές πάχους στρώματος που μπορούν να υποστηριχθούν από το διαθέσιμο ακροφύσιο. Στην περίπτωση που μελετάται οι οριακές τιμές είναι 0.15 και 0.40 mm καθώς το ακροφύσιο είναι 0.40 mm και παρατηρείται πως μόνο στην περίπτωση πάχους στρώματος 0.15 mm υπήρξε απόκλιση. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής των υπόλοιπων δοκιμίων ήταν όπως είχαν οριστεί από το πρόγραμμα του εκτυπωτή παρουσιάζοντας συνέπεια μεταξύ των επιθυμητών και των παραγόμενων χαρακτηριστικών της δομής. Το τελευταίο μάλιστα οδηγεί στο συμπέρασμα πως η πιθανότερη αιτία της απόκλισης που προαναφέρθηκε ήταν το ότι η ακρίβεια στη βαθμονόμηση του κατακόρυφου άξονα δεν ήταν ικανοποιητική για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Ακόμη, αξίζει να

σημειωθεί πως είναι αρκετά πιθανόν αυτή η απόκλιση να έχει επηρεάσει και τις ιδιότητες των δοκιμών αυτών.

## 5.2 Χρόνος Εκτύπωσης

Ο χρόνος που απαιτείται για την εκτύπωση των αντικειμένων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (ποσοστό πλήρωσης, πάχος στρώματος, ταχύτητα εκτύπωσης, ύπαρξη υποστηρικτικών δομών, διεύθυνση αντικειμένου κλπ) και είναι ιδιαίτερα σημαντικός όταν πρόκειται για την παραγωγή ενός αριθμού αντικειμένων. Στην παρούσα μελέτη οι παράμετροι που μπορούσαν να επηρεάσουν το χρόνο εκτύπωσης ήταν το ποσοστό πλήρωσης και το πάχος στρώματος. Όπως ήταν αναμενόμενο το μικρό ποσοστό πλήρωσης και το μεγάλο πάχος στρώματος θα επέφεραν ταχύτερη εκτύπωση καθώς στην πρώτη περίπτωση θα εναποθέτονταν λιγότερο υλικό και στη δεύτερη λιγότερα στρώματα. Το δοκίμιο με 70 % πλήρωση και στρώμα πάχους 0.40 mm είναι αυτό που εκτυπώνεται ταχύτερα επιβεβαιώνοντας το παραπάνω. Ωστόσο, είναι και αυτό με τις χαμηλότερες ιδιότητες.

## 5.3 Θεωρητικοί Υπολογισμοί

Από τη χρήση της θεωρία προκύπτει ότι η θεωρητική πρόβλεψη υπερεκτιμά τις μηχανικές ιδιότητες, υποδηλώνοντας την επίδραση και άλλων παραμέτρων στην μηχανική συμπεριφορά πέρα από τη μείωση της ενεργής επιφάνειας που επιφέρουν τα κενά (Πίνακας 4.4.1, Εικόνα 4.4.1, Εικόνα 4.4.2). Αυτή η διαφορά που παρατηρείται θα μπορούσε να οφείλεται στη συγκέντρωση τάσεων λόγω των κενών που είναι ικανή να μειώσει την αντοχή του FDM αντικειμένου, αλλά και στη μη λεία επιφάνεια που παρατηρείται για μεγάλα πάχη στρώματος. Μάλιστα, η οπτική ανάλυση της δομής έδειξε πως το σχήμα των κενών είναι τριγωνικό το οποίο συνεπάγεται μεγάλη συγκέντρωση τάσεων λόγω των γωνιών. Επιπλέον, ένας άλλος μηχανισμός που μπορεί να επηρεάσει είναι η αλλαγή που συμβαίνει στις ιδιότητες του νήματος κατά την διεργασία της εξώθησης.

Οι μηχανικές ιδιότητες των θερμοπλαστικών επηρεάζονται σημαντικά από τον μοριακό προσανατολισμό. Διαφορετικός προσανατολισμός ανάμεσα στο ABS νήμα και σε μία εκτυπωμένη ίνα μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Ο μοριακός προσανατολισμός του ABS επηρεάζεται από την θερμοκρασία και τον ρυθμό εξώθησης. Χαμηλή θερμοκρασία και αργός ρυθμός εξώθησης τείνουν να αυξήσουν τον βαθμό μοριακού προσανατολισμού (degree of molecular orientation).

Ένας τρόπος για να αξιολογήσει κανείς ποιοτικά το βαθμό μοριακού προσανατολισμού είναι με μετρήσεις θερμικής συρρίκνωσης (20). Το ποσό συρρίκνωσης που εμφανίζεται όταν το υλικό διατηρηθεί πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης στην υαλώδη κατάσταση και στη συνέχεια ψυχθεί εκφράζει το βαθμό προσανατολισμού της πολυμερικής αλυσίδας. Όσο μεγαλύτερη είναι η συρρίκνωση τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός μοριακού προσανατολισμού στη διεύθυνση της συρρίκνωσης.

Οι Rodriguez κ. συν. (10) πραγματοποίησαν αυτό το πείραμα τοποθετώντας σε φούρνο θερμοκρασίας 110 °C για 6 ώρες ίδιου μήκους νήμα ABS και εκτυπωμένη ίνα ABS με στόχο να μετρηθεί το ποσοστό συρρίκνωσης μετά την ψύξη σε θερμοκρασία δωματίου. Το πείραμα έδειξε πως το νήμα ABS συρρικνώθηκε κατά 20 % ενώ το εκτυπωμένο νήμα μόλις κατά 0.4 %. Έτσι έγινε αντιληπτό πως το νήμα ABS έχει μεγαλύτερο βαθμό μοριακού προσανατολισμού πριν την διεργασία της εξώθησης. Συνεπώς, δικαιολογείται μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας και αντοχή για το ABS πριν την εκτύπωση του.

Οι ίδιοι προκειμένου να επιβεβαιώσουν την αναμενόμενη αλλαγή στις μηχανικές ιδιότητες πραγματοποίησαν δοκιμή εφελκυσμού σε εκτυπωμένη ίνα διαπιστώνοντας μείωση 4 % στο μέτρο ελαστικότητας και 19.7 % στην αντοχή σε σχέση με το ABS που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση.

Ως εκ τούτου, τόσο ο μοριακός προσανατολισμός όσο και η συγκέντρωση τάσεων φαίνεται να δικαιολογούν απόκλιση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και της θεωρητικής προσέγγισης που έγινε για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων. Άλλωστε το μεγαλύτερο σφάλμα υφίσταται στις περιπτώσεις όπου εμφανίζεται το μέγιστο πάχος στρώματος (0.40 mm) το οποίο, όπως παρατηρήθηκε, συνεπάγεται υψηλό ποσοστό κενών και μεγάλη συγκέντρωση τάσεων αφού συνδυάζει μεγάλο μέγεθος κενά με την λιγότερο λεία επιφάνεια. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως εξ' αρχής αναμενόταν απόκλιση διότι το θεωρητικό μοντέλο θεωρεί τέλεια συνάφεια μεταξύ των ινών.

## Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν να προσδιοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες του FDM ABS, που παράγεται από μη επαγγελματικό εκτυπωτή, όταν μεταβάλλεται το ποσοστό πλήρωσης και το πάχος στρώματος, να ερμηνευτούν τα χαρακτηριστικά μικροδομής του FDM ABS και να συσχετιστούν οι παράμετροι εκτύπωσης με τις μηχανικές ιδιότητες. Ακόμη, να διαπιστωθεί αν ένας μη επαγγελματικός εκτυπωτής έχει την απαιτούμενη ακρίβεια στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μικροδομής, αν μπορούν να προβλεφθούν θεωρητικά οι FDM ιδιότητες καθώς και να συσχετιστεί ο χρόνος εκτύπωσης με τις παραμέτρους που τέθηκαν προς μελέτη. Από τη μελέτη προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι μηχανικές ιδιότητες μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού κενών.
- Οι μηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται από το πλάτος και το πάχος των ινών που εναποθέτονται αφού οι δύο διαστάσεις επηρεάζουν τη συγκόλληση, άρα και το ποσοστό κενών.
- Το μέτρο ελαστικότητας είναι μέγιστο όταν ο λόγος των διαστάσεων ίνας (πλάτος / πάχος) είναι ίσος με δύο.
- Η μέγιστη αντοχή εμφανίζεται για λόγο διαστάσεων ίσο με 2 και 1.33 όταν το ποσοστό πλήρωσης είναι 100 και 70 % αντίστοιχα.
- Η επιμήκυνση εφελκυσμού, γενικά, δεν επηρεάζεται από τις παραμέτρους εκτύπωσης. Ωστόσο, εμφανίζει την μεγαλύτερη τιμή για πάχος στρώματος 0.15 mm ή λόγο διαστάσεων ίσο με 2.35.
- Η επιθυμητή διαστασιολογική ακρίβεια στη γεωμετρία των ινών επιτυγχάνεται με εξαίρεση την περίπτωση πάχους στρώματος 0.15 mm.
- Οι θεωρητικοί υπολογισμοί με βάση το νόμο των μιγμάτων οδηγούν σε υπερεκτίμηση των τιμών της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας.

## Κεφάλαιο 7 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Διαπιστώνοντας εξάρτηση του ποσοστού κενών από τις διαστάσεις διατομής της ίνας προτείνεται η διεξαγωγή περαιτέρω πειραμάτων όπου θα δοκιμάζονται ακόμη περισσότερα πάχη στρώματος και ποσοστά πλήρωσης. Επίσης, παράμετρο θα μπορούσε να αποτελέσει και το πλάτος της ίνας, που σε αυτή την εργασία θεωρήθηκε σταθερό. Με αυτό τον τρόπο θα είναι δυνατή η εξαγωγή των βέλτιστων διαστάσεων ίνας.

Ακόμη, ιδιαίτερα σημαντικό είναι να μπορεί να γίνει πρόβλεψη των FDM ιδιοτήτων. Γι' αυτό θα ήταν πολύ χρήσιμο να προσδιορισθεί η αντοχή μίας εκτυπωμένης ίνας και να γίνει εκ νέου θεωρητικός υπολογισμός με βάση αυτή. Έτσι θα εξακριβωθεί αν η απόκλιση που παρατηρήθηκε οφείλεται στον μοριακό προσανατολισμό ή κάπου αλλού. Διεξαγωγή πειραμάτων σε δοκίμια με διαφορετικό προσανατολισμό πλήρωσης και προσπάθεια εκτίμησης ιδιοτήτων θα είχε εξίσου μεγάλο ενδιαφέρον. Επίσης, η ανάπτυξη ενός θεωρητικού μοντέλου που θα λαμβάνει υπόψη την αλλαγή ιδιοτήτων του πολυμερούς λόγω της διεργασία εξώθησης, την συγκέντρωση τάσεων και τη συγκόλληση μεταξύ των ινών θα ήταν ιδιαίτερα σημαντική.

Επιπλέον, θα μπορούσε να γίνει μελέτη σε συνθήκες κόπωσης προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση που έχουν τα κενά και οι διάφοροι παράμετροι εκτύπωσης στη διάρκεια ζωής ενός FDM κομματιού.

Τέλος, ένας από τους καλύτερους τρόπους για να εξακριβωθεί αν οι μη επαγγελματικοί εκτυπωτές μπορούν να παράγουν λειτουργικά εξαρτήματα θα ήταν η δοκιμή. Για παράδειγμα θα μπορούσε να μελετηθεί ένα FDM εξάρτημα και στη συνέχεια να τοποθετηθεί σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον ώστε να αξιολογηθεί η απόδοσή του.

## Κεφάλαιο 8 Βιβλιογραφία

1. "Awesome 3-d printing tech we can't show you on tv - yet". **Lilleholm L.**  
<http://america.aljazeera.com/watch/shows/techknow/blog/2014/1/2/>, s.l. : AlJazeera America, 2014.
2. "Printing out barbies and ford cylinders". **Boulton C.**  
<http://online.wsj.com/news/articles/>, 2013.
3. **Cantu K. M. και Jonsson E. W.** "3d printing for end products". 2012.
4. <http://www.custompartnet.com/wu/fued-deposition-modeling>.
5. **Cooper K. G.** "Fused Deposition Modeling". *Rapid prototyping technology selection and application*. Νέα Υόρκη, 2001, 68-87.
6. **Bellehumer C. T., Li L., Sun Q. και Gu P.** "Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process". *Journal of Manufacturing Process*. 2004, Τόμ. 6, 170-178.
7. **Costa S.F., Duarte F.M. και Covas J.A.** "Thermal conditions affecting heat transfer in FDM/FFE: a contribution towards the numerical modelling of the process". *Virtual and Physical Prototyping*. 2014.
8. **Renaud J. E., Rodriguez J. F. και Thomas J. P.** "Tailoring the mechanical properties of fused deposition manufacture components". *Rapid Prototyping and Manufacturing*. 1999, 629-643.
9. **Rodriguez J. F., Thomas J. P. και Renaud J. E.** "Characterization of the mesostructure of fused deposition acrylonitrile butadiene - styrene materials". *Rapid Prototyping Journal*. 2000, Τόμ. 6, 176-185.
10. **Rodriguez J. F., Thomas J. P. και Renaud J. E.** "Mechanical Behavior of ABS Fused Deposition Materials. Experimental Investigation". *Rapid Prototyping Journal*. 2001, Τόμ. 7, 3, 148-158.
11. **Gurralla P. K. και Regala S. P.** "Part strength evolution with bonding between filaments in fused depositions modeling". *Visual and Physical Prototyping*. 2014, Τόμ. 9, 141-149.
12. **Li L., Sun Q., Bellehumeur C. και Gu P.** "Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties". *Journal of Manufacturing Processes*. 2002, Τόμ. 4, 2.
13. [https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiene\\_styrene](https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene).
14. [http://reprap.org/wiki/Heated\\_Bed](http://reprap.org/wiki/Heated_Bed).



15. <http://www.makerstoolworks.com/abs-juice-how-to-make-abs-stick-to-your-printbed/>.
16. <https://static.webshopapp.com/shops/021593/files/045088842/tds-easyfil-abs.pdf>.  
s.l. : Formfutura.
17. **Ahn S.H., Montero M., Odell D., Roundy S., Wright P. K.** "Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs". *Rapid Pro-*. 2002, Τόμ. 8, 4, 248-257.
18. **Gribbins C., Steinhauer H. M.** "*EXPERIMENTAL ANALYSIS ON AN ADDITIVELY MANUFACTURED ABS LIVING HINGE*". TEXAS : Solid Freeform Symp, 2014.
19. **Rankouhi B., Javadpour S., Delfanian F. και Letcher T.** "Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation". *Journal of Failure Analysis and Prevention*. Μάιος, 2016.
20. **Fritch.** "Injection molding ABS for properties". *PACTEC V Conference of the Society of Plastic Engineers*. 1980, Τόμ. 1, 184 - 216.