



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Σύνθετα πολυμερικά και βιοϋλικά για τριδιάστατη εκτύπωση (3D printing)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΩΝ/ΝΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΟΥΔΗΣ
ΧΗΜ. ΜΗΧ. ΕΜΠ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
Κ. Α. Χαριτίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιανουάριος 2017

Πρόλογος - Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στην Ερευνητική Μονάδα Προηγμένων, Σύνθετων, Νάνο Υλικών και Νανοτεχνολογίας, R-NanoLab, της σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016.

Κατά τη διαδικασία εκπόνησης της Εργασίας εμφανίστηκαν αντικειμενικές και υποκειμενικές δυσκολίες, το τελικό αποτέλεσμα όμως είναι «προϊόν» συλλογικής δουλειάς, επιμονής και υπομονής, τόσο από τους επιβλέποντες, όσο και από μένα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω:

- τον καθηγητή της Σχολής κ. Κωνσταντίνο Χαριτίδη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάληψη του θέματος
- τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Ηλία Κούμουλο, για τη συνεχή βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Εργασίας
- τη μεταπτυχιακή φοιτήτρια Ελένη Γκάρτζου, για την συμβολή και τη βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, κυρίως όσον αφορά το Πειραματικό Μέρος και την πραγματοποίηση των πειραμάτων
- ολόκληρη την ομάδα του R-NanoLab, για τη βοήθειά τους και το μεγάλο ενδιαφέρον που έδειξαν.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την Εργασία αυτή στην αδερφή μου, Νάντια Παρασκευούδη, για την ολόπλευρη στήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων της τριδιάστατης εκτύπωσης στις μηχανικές ιδιότητες τριδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων. Η έλλειψη βιβλιογραφίας και πρότυπων πειραμάτων γύρω από τις μηχανικές ιδιότητες και τον τρόπο που αυτές επηρεάζονται από τις αλλαγές στις τιμές σημαντικών παραμέτρων, αποτέλεσε ουσιαστικά το κίνητρο για την εκπόνηση της Εργασίας αυτής. Για το σκοπό αυτό, διερευνήθηκε πειραματικά η μηχανική συμπεριφορά τριδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων για δύο διαφορετικές παραμέτρους εκτύπωσης και για δύο διαφορετικά υλικά, το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) και το Carbonfil™. Συγκεκριμένα, εκτυπώθηκαν για κάθε υλικό 9 δοκίμια κατά το πρότυπο ASTM D_638 Type I για όλους του πιθανούς συνδυασμούς 3 διαφορετικών επιπέδων (levels) και 2 διαφορετικών παραμέτρων (factors).

Οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι το ποσοστό πλήρωσης του υλικού (infill %) και η γωνία προσανατολισμού-εκτύπωσης (infill angle). Για το ποσοστό πλήρωσης του υλικού μελετήθηκαν οι τιμές 50%, 75% και 100%, ενώ για τη γωνία προσανατολισμού οι τιμές 45°, 75° και 90°. Αρχικά, έγινε μία εισαγωγή στις διάφορες έννοιες της τριδιάστατης εκτύπωσης και αναλύθηκαν όλες οι παράμετροι της τριδιάστατης εκτύπωσης που μεταβάλλουν τη μηχανική συμπεριφορά του εκτυπωμένου αντικειμένου. Έπειτα, κατασκευάστηκαν τα δοκίμια με τη χρήση του τριδιάστατου εκτυπωτή Zmorph personal fabricator 2.0 και συζητήθηκαν τα βήματα της εκτύπωσης.

Τα δοκίμια που εκτυπώθηκαν εξετάστηκαν αρχικώς ως προς δομικές ατέλειες στο Οπτικό Μικροσκόπιο. Στη συνέχεια έγινε δοκιμή εφελκυσμού (Tensile Test) για κάθε δοκίμιο και από τα δεδομένα που προέκυψαν, υπολογίστηκαν η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Ultimate Tensile Strength), η μέγιστη επιμήκυνση (Max elongation), το όριο διαρροής (Yield strength), μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) και η αντοχή σε θραύση (Stress at Fracture). Σχεδιάστηκαν και συζητήθηκαν τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης (stress strain curves). Έπειτα έγινε μελέτη του μηχανισμού της θραύσης των δοκιμίων με τη χρήση του Οπτικού Μικροσκοπίου και του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM).

Τέλος, έγινε ανάλυση των αποτελεσμάτων και συζήτηση αυτών. Συγκρίθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες των εκτυπωμένων δοκιμίων για διαφορετικές τιμές παραμέτρων στο ίδιο υλικό αλλά και για διαφορετικά υλικά. Επιπλέον, εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με την επιρροή των εξεταζόμενων παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες.

Παρόλο που σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η πρόβλεψη και η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων τριδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων συναρτήσει δύο συγκεκριμένων μεταβλητών της τριδιάστατης εκτύπωσης, τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν δεν αφορούν μόνο τις μηχανικές ιδιότητες. Επιπρόσθετα, καταλήξαμε και σε πιο γενικά -αλλά ταυτόχρονα χρήσιμα- συμπεράσματα σχετικά με την ομοιογένεια του τελικού υλικού, το κόστος εκτύπωσης, το μηχανισμό θραύσης κλπ. συναρτήσει πάντα των εξεταζόμενων μεταβλητών.

Το ποσοστό πλήρωσης (Infill %) παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες και τις επηρεάζει πολύ πιο άμεσα σε σχέση με τη γωνία εκτύπωσης (Infill Angle). Ακριβώς το ίδιο ισχύει και για τις περισσότερες άλλες ιδιότητες των δοκιμίων, οι οποίες βέβαια δεν έχουν άμεση σχέση με τις μηχανικές ιδιότητες αλλά είναι σημαντικό να αναφερθούν.

Έτσι για το σκοπό αυτό, δημιουργήθηκαν διαγράμματα «Radar Charts», τα οποία απεικονίζουν τις διαφορές μεταξύ των τιμών σε συγκεκριμένες ιδιότητες για το ίδιο υλικό, το ίδιο ποσοστό πλήρωσης

αλλά για διαφορετική γωνία εκτύπωσης. Τα διαγράμματα αυτά βοήθησαν σημαντικά στην εξαγωγή των παρακάτω γενικών συμπερασμάτων και για τα δύο υλικά:

- Ο χρόνος εκτύπωσης μειώνεται σημαντικά (από 10 έως 50 λεπτά) για διαφορετικό ποσοστό πλήρωσης. Όσο πιο πολύ αυξήσουμε το ποσοστό πλήρωσης, τόσο πιο χρονοβόρα θα είναι η εκτύπωση.
- Αντίθετα, η γωνία εκτύπωσης φαίνεται να μην επηρεάζει καθόλου το χρόνο εκτύπωσης για σταθερό ποσοστό πλήρωσης.
- Το κόστος της εκτύπωσης αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού πλήρωσης. Χαρακτηριστικά, για σταθερή γωνία εκτύπωσης, το μήκος του νήματος υλικού που απαιτείται για την εκτύπωση ενός δοκιμίου με ποσοστό πλήρωσης 100% είναι μεγαλύτερο κατά 150% συγκριτικά με το μήκος που απαιτείται για την εκτύπωση ενός δοκιμίου με ποσοστό πλήρωσης 50%.Εύκολα συμπεραίνουμε πως σε πιο μεγάλη κλίμακα εκτυπώσεων (βιομηχανική π.χ.), το ποσοστό πλήρωσης παίζει σημαντικό παράγοντα κόστους που πρέπει να μελετάται.
- Αντίθετα, η γωνία εκτύπωσης επηρεάζει ελάχιστα έως και καθόλου το κόστος της εκτύπωσης, καθώς το μήκος νήματος που απαιτείται για δύο εκτυπώσεις δοκιμίων ίδιου ποσοστού πλήρωσης αλλά διαφορετικής γωνίας εκτύπωσης είναι σχεδόν το ίδιο.
- Η απόκλιση των διαστάσεων του τελικού εκτυπωμένου δοκιμίου από τις διαστάσεις του αρχείου CAD είναι σχετικά μικρή έως και αμελητέα για σχεδόν όλες τις εκτυπώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Παρόλ' αυτά όμως, παρατηρήθηκε πως για πιο «περίπλοκες» γωνίες εκτύπωσης, υπήρχε ελαφρώς μεγαλύτερη απόκλιση στις διαστάσεις. Έτσι, τα δοκίμια που είχαν γωνία εκτύπωσης 45 ή 75° είχαν μεγαλύτερη απόκλιση στις διαστάσεις τους από αυτές των αντίστοιχων αρχείων CAD. Αντίθετα, για γωνία εκτύπωσης 0°, παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια σχεδόν μηδενική απόκλιση.
- Η ομοιογένεια του δοκιμίου φαίνεται να μην επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τη γωνία εκτύπωσης, αλλά εξαρτάται σημαντικά από το ποσοστό πλήρωσης. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του ποσοστού πλήρωσης, τόσο πιο συμπαγές και ομοιογενές είναι το δοκίμιο. Χαρακτηριστικά, το δοκίμιο για το υλικό PLA με γωνία εκτύπωσης 45° και ποσοστό πλήρωσης 100% είναι πολύ πιο ομοιογενές σαν αντικείμενο συγκριτικά με το δοκίμιο PLA με την ίδια γωνία εκτύπωσης αλλά με ποσοστό πλήρωσης 50%.
- Παράλληλα, με την αύξηση της γωνίας εκτύπωσης, παρατηρήθηκε μέσω της οπτικής μικροσκοπίας αύξηση ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως π.χ. το «cobwebbing» ή το «warping», που σχετίζονται με τη διακύμανση της ογκομετρικής παροχής και την δημιουργία παραμενουσών τάσεων λόγω ανομοιόμορφης ψύξης του υλικού. Μπορούμε δηλαδή να συμπεράνουμε, πως για πιο «περίπλοκες» γωνίες εκτύπωσης παρουσιάζονται περισσότερα ανεπιθύμητα φαινόμενα της τριδιάστατης εκτύπωσης.
- Το ποσοστό πλήρωσης φαίνεται να επηρεάζει την εμφάνιση τέτοιων φαινομένων. Για μεγάλες τιμές της παραμέτρου αυτής, έχουμε εντονότερη εμφάνιση σκέβρωσης και ιστών.
- Όσον αφορά τη θραύση, τα δοκίμια από Carbonfil™ παρουσίασαν ιδιαίτερα ανομοιόμορφη επιφάνεια θραύσης σε σχέση με τα δοκίμια από PLA.
- Οι εξεταζόμενες μεταβλητές δε φαίνεται να επηρεάζουν τους μηχανισμούς θραύσης σε μικροσκοπικό επίπεδο, καθορίζουν όμως τη μακροσκοπική μηχανική συμπεριφορά.

Τα συμπεράσματα της παρούσης Εργασίας αποτελούν παρακαταθήκη για επόμενους ερευνητές που θέλουν να ασχοληθούν με τη Μηχανική της τριδιάστατης εκτύπωσης. Τα αποτελέσματα και τα

δεδομένα μπορούν να αξιοποιηθούν για περαιτέρω διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς τριδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων, μιας και πρόκειται για μία καινούρια τεχνολογία με ακόμη πολύ μικρή βιβλιογραφία. Περαιτέρω παράμετροι μπορούν να εξεταστούν σύμφωνα με τις πρότυπες διαδικασίες που ακολουθήθηκαν εδώ.

Abstract

This thesis has assessed the influence of the 3D printing parameters on the mechanical properties of 3D printed objects. The lack of bibliography and standard procedures regarding this matter, was the main motivation for this thesis.

For the purposes of this study, the mechanical behavior of 3D printed tensile specimen was explored for two different printing parameters, as well as for two different materials, i.e., the poly(lactic) acid (PLA) and CarbonfilTM. Nine specimens were printed for each material based on the ASTM D_638 Type I standard for every possible combination between 3 different levels of 2 factors (parameters).

The 3D printing parameters examined were the infill percentage and the infill angle. The values 50%, 75%, and 100% and the values 45°, 75°, and 90° were investigated for the infill percentage and the infill angle, respectively. Initially, several aspects of 3D printing were presented and the parameters responsible for modifying the mechanical properties of the printed object were analyzed. The specimen were then printed by using the 3D printer Zmorph personal fabricator 2.0 and the steps involved in this process were discussed.

To test for structural defects, the printed specimen were examined in the optical microscope. Upon completion of this testing, a tensile test for each specimen was completed. From the data obtained, the ultimate tensile strength, the maximum elongation at break, yield strength, Young's modulus and stress at fracture were calculated. The stress strain curves have been designed and discussed. By using the optical microscope and the Scanning Electron Microscope (SEM), the fracture mechanism of each specimen was examined. Finally, the results were analyzed and discussed.

The mechanical properties of the printed specimen with different parameters both in the same material, as well as in different ones, were compared. Several conclusions regarding the influence of the parameters on the mechanical properties were reached.

In addition to the mechanical properties, other general but equally important conclusions were made. Those refer to the homogeneity of the final product, the cost of the 3d printing procedure, the fracture mechanism etc. in accordance with the considered parameters.

The Infill Percentage plays great part for the mechanical behavior of an 3d printed specimen. It affects its mechanical properties much more directly compared to the Infill Angle. The same applies to almost all other properties of the specimen, not only the mechanical ones. For the purposes of reporting this influence, several Radar Charts were made, which portray the differences between the values of specific properties for the same material, the same Infill Percentage but different Infill Angle. These Charts helped out for reaching the following general conclusion for both materials:

- The printing time is remarkably reduced (from 10 up to 50 minutes) for different Infill Percentage. Increasing the value of this parameter will lead to longer printing times.
- On the other side, the Infill Angle does not seem to affect the printing time, when keeping the Infill Percentage same.
- The cost of the print is significantly increased when raising the Infill Percentage. For example, for a standard Infill Angle, 150% extra filament is needed when increasing the value of the Infill Percentage from 50% to 100%. Thereafter, when talking about big scale prints (industrial etc.), the Infill Percentage plays an important role and should be thoroughly studied and considered.
- On the other hand, the infill angle does not seem to affect the cost of the print. The filament needed for two specimen prints of same Infill Percentage but different Infill Angle is just about the same.
- The declination of the dimensions of the 3d printed specimen from the dimension of the CAD file is very small or practically negligible. However, for specimen with more complex geometries and infill angle, there was a slight increase in this declination. For example, the specimen with Infill Angle of 45° or 75° had bigger declination in its dimensions compared to the specimen with Infill Angle of 0°, which had practically none.
- The homogeneity of the specimen does not seem to be affected from the Infill Angle. It depends, however, on the Infill Percentage. The higher the value of the Infill Percentage is, the more compact the specimen is. For instance, the PLA specimen with an Infill Angle of 45° and an Infill Percentage of 100% is much more compact and massive compared to the PLA specimen of the same Infill Angle but for 50% value of the Infill Percentage.
- It was observed through the optical microscope, that by increasing the value of the Infill Angle, more unwanted phenomena such as cobwebbing or warpage. For more complex Infill Angles, the severity of this phenomena is increased.
- On the other side, the Infill Percentage, also seems to affect the appearance of such phenomena. For higher values of this parameter, cobwebbing and warping also appear.
- As to the fracture mechanism, the Carbonfil™ specimen had a much more dissimilar fracture surface compared to the PLA specimen.
- In microscopic level, the examined parameters do not seem to affect the fracture mechanism. They determine the macroscopic mechanical behavior.

The conclusion of this thesis can be of great importance in further future research in the area of the Mechanics of 3d printed objects. The results and the data gained from the standard procedures followed, can be used furthermore, since there is a lack of bibliography regarding mechanical properties of 3d printed objects. In addition to that, further parameters of the printing procedure can be examined using the same standard procedures which were followed in this thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Η τριδιάστατη εκτύπωση και τα Υλικά	10
1.1 Εισαγωγή.....	10
1.2 Fused Filament Fabrication (FFF).....	15
1.3 Τα διάφορα μέρη του εκτυπωτή και η λειτουργία τους	18
1.4 Βασικές παράμετροι της τριδιάστατης εκτύπωσης.....	20
1.5 Τα υλικά προς εκτύπωση	24
1.7 Τα προβλήματα της εκτύπωσης	29
1.8 Εφαρμογές της τριδιάστατης εκτύπωσης.....	32
1.9 Ο Zmorph personal fabricator 2.0.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Η επίδραση των παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες	36
2.1 Εισαγωγή.....	36
2.2 Μηχανικές ιδιότητες που θα εξεταστούν.....	38
2.3 Επιλογή κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες	40
2.4 Επιλογή των παραμέτρων που θα εξεταστούν	45
2.5 Αξιοπιστία δοκιμών για ορθή δοκιμή εφελκυσμού	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Σύνθεση δοκιμών και Μέθοδοι Χαρακτηρισμού	49
3.1 Διαδικασία εκτύπωσης των δοκιμών	49
3.2 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού	54
3.2.1 Οπτική Μικροσκοπία	54
3.2.2 Η δοκιμή εφελκυσμού (Tensile Test).....	56
3.2.3 Χαρακτηρισμός θραύσης με τη χρήση του SEM (Fractography).....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	65
4.1 Οπτική Μικροσκοπία	65
4.2 Δοκιμή Εφελκυσμού	74
4.3 Scanning Electron Microscopy-Fractography analysis.....	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα	105
5.1 Συμπεράσματα.....	105
5.1.1 Γενικά Συμπεράσματα	105
5.1.2 Συμπεράσματα για την επιρροή των εξεταζόμενων παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες .	113
5.1.3 Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων PLA και Carbonfil™	116

5.1.4	Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων τριδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων εφελκυσμού και δοκιμίων εφελκυσμού κατασκευασμένων με κανονικές μεθόδους.....	118
5.2	Μελλοντική Έρευνα	120
5.2.1	Προτυποποίηση δοκιμής εφελκυσμού για τριδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια	120
5.2.2	Διερεύνηση της επιρροής πολλαπλών παραμέτρων πολλαπλών τιμών στις μηχανικές ιδιότητες με στατιστικό σχεδιασμό πειράματος.....	121
Κεφάλαιο 6ο:	Βιβλιογραφία	122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Η τριδιάστατη εκτύπωση και τα Υλικά

1.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία της τριδιάστατης εκτύπωσης, η οποία έχει ιστορία δύο περίπου δεκαετιών, ξεκίνησε με την ανάπτυξη των τεχνικών της ταχείας προτυποποίησης (Rapid Prototyping) κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1970^{1,2}, οι οποίες αποσκοπούσαν στην απάλειψη των ατελειών και στη δραστική μείωση του χρόνου κατασκευής των πρωτοτύπων διαφόρων προϊόντων.

Η κατασκευή προτύπων αποτελούσε πάντα μέρος της διαδικασίας σχεδίασης και ανάπτυξης ενός προϊόντος, παίζοντας σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της λειτουργικότητάς του και στην ενσωμάτωση σε αυτό διαφόρων επιθυμητών χαρακτηριστικών. Οι μηχανικοί και οι σχεδιαστές που αναπτύσσουν τμήματα μηχανισμών, ή αντικείμενα πολύπλοκης μορφής, μπορούν να αποκτήσουν, να μεταφέρουν ή να εξηγήσουν σε άλλους πολύ περισσότερα στοιχεία και πληροφορίες διαθέτοντας ένα χειροπιαστό, ακριβές τριδιάστατο μοντέλο, αντί ενός σχεδίου ή μιας απεικόνισης του αντικειμένου στην οθόνη ενός υπολογιστή. Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός ακριβούς πρωτοτύπου του εξαρτήματος κάποιου κινητήρα, επιτρέπει στους μηχανικούς να διαπιστώσουν άμεσα αν το συγκεκριμένο τμήμα ταιριάζει από την άποψη των διαστάσεων και της μορφής του με το υπόλοιπο λειτουργικό σύνολο. Κατ' ανάλογο τρόπο, οι υπεύθυνοι της προώθησης στην αγορά ενός καταναλωτικού προϊόντος μπορούν, έχοντας στα χέρια τους ένα ακριβές πρωτότυπο του αντικειμένου που προτείνει το σχεδιαστικό τμήμα, να διαπιστώσουν εύκολα και έγκαιρα εάν αυτό έχει τις επιθυμητές αναλογίες, το σχήμα ή τα άλλα χαρακτηριστικά που απαιτεί το κοινό στο οποίο απευθύνεται.

Παλαιότερα, η διαδικασία της κατασκευής τριδιάστατων μοντέλων και προτύπων συνίστατο στη χρονοβόρα και υψηλού κόστους κατασκευή προτύπων από έμπειρους και επιδέξιους τεχνίτες με τη χρήση εργαλείων χειρός και μικρών εργαλειομηχανών ακριβείας. Εκτός από το χρόνο και το κόστος, οι διαδικασίες παραδοσιακής προτυποποίησης ενείχαν πάντα ένα στοιχείο ασάφειας, καθώς μεταξύ του αρχικού σχεδίου και του μοντέλου μεσολαβούσε πάντα σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό η ικανότητα και η αντίληψη του κατασκευαστή μοντέλων. Η κατάσταση αυτή άρχισε να αλλάζει με τη χρησιμοποίηση εργαλειομηχανών ψηφιακής καθοδήγησης, καθώς οι παράμετροι του κατασκευαζόμενου προτύπου μπορούσαν να ελεγχθούν εξ αρχής ώστε να ανταποκρίνονται με ακρίβεια στο αρχικό σχέδιο. Και πάλι όμως η διαδικασία ήταν χρονοβόρα και ακριβή, ιδίως στην περίπτωση που τυχόν μικρότερες ή μεγαλύτερες τροποποιήσεις επέβελλαν την εκ νέου κατασκευή του μοντέλου.

Η ανάπτυξη των μηχανών τριδιάστατης εκτύπωσης, αποτέλεσε το καθοριστικό σημείο τομής με το παρελθόν. Οι νέες μηχανές επέτρεψαν την κατασκευή πρωτοτύπων ή αντιγράφων ακριβείας, απευθείας από ψηφιακά μοντέλα των αντικειμένων δημιουργημένα με τη χρήση λογισμικού CAD (Computer Aided Design) , με μικρότερο κόστος και μέσα σε διάστημα ωρών αντί των εβδομάδων ή των μηνών που απαιτούσαν οι παλαιότερες διαδικασίες.

Η δραστική μείωση του χρόνου και του κόστους κατασκευής των πρωτοτύπων, βελτιστοποιεί τη διαδικασία της ανάπτυξης ενός προϊόντος, παρέχοντας στους κατασκευαστές τη χρονική άνεση να τελειοποιήσουν τα προϊόντα τους στο πιο κρίσιμο στάδιο της ανάπτυξής τους, αυτό της βασικής σχεδίασης, με αποτέλεσμα να φθάνουν στην αγορά ολοκληρωμένα, ταχύτερα και με μικρότερο κόστος. Ήδη από το 1994 οι τεχνικοί της εταιρίας αεροπορικών κινητήρων Pratt & Whitney δήλωναν ότι η εισαγωγή τεχνικών ταχείας πρωτοτυποποίησης για την κατασκευή χυτών ακριβείας, επέτρεψε τη μείωση του κόστους και του χρόνου κατασκευής της τάξης του 70 έως 90%³. Ας επισημάνουμε στο σημείο αυτό πως “ταχεία” πρωτοτυποποίηση δε σημαίνει “στιγμιαία” : στην πράξη, όλα σχεδόν τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με τις μεθόδους αυτές απαιτούν τρεις έως 72 ώρες, ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητά τους⁴. Επιπλέον, η τριδιάστατη εκτύπωση συνοδεύεται ακόμη από αρκετούς περιορισμούς όσον αφορά το μέγεθος των αντικειμένων που μπορούν να κατασκευαστούν και τα χρησιμοποιούμενα υλικά (η κατασκευή μεταλλικών αντικειμένων είναι σχετικά δύσκολη και ακριβή). Παρόλ’αυτά βέβαια, γίνονται πλέον μεγάλα βήματα και στην κατασκευή μεγάλων αντικειμένων κυρίως σε πιλοτική μορφή, όπως μικρές γέφυρες⁵.

Οι τεχνολογίες ταχείας πρωτοτυποποίησης που είναι διαθέσιμες στην αγορά σήμερα, περιλαμβάνουν έξι βασικές τεχνικές τριδιάστατης εκτύπωσης, κάθε μία από τις οποίες έχει τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματά της: τη στερεολιθογραφία (stereolithography, STL), την επιλεκτική σύντηξη με τη χρήση ακτίνων λέιζερ (selective laser sintering, SLS), την παραγωγή αντικειμένων μέσω της συγκόλλησης λεπτών φύλων (laminated object manufacturing), την κατασκευή μοντέλων μέσω εναπόθεσης/σύντηξης διαδοχικών στρώσεων (fused deposition modeling, FDM), την τεχνική τριδιάστατης εκτύπωσης ink-jet (3D ink-jet Printing) και μία παραλλαγή της στερεολιθογραφίας γνωστή και ως Solid Ground Curing.

Στην παρούσα εργασία, αναλύεται αποκλειστικά και μόνο η κατασκευή μοντέλων μέσω εναπόθεσης/σύντηξης διαδοχικών στρώσεων (fused deposition modeling, FDM). Παρόλ’ αυτά όλες οι τεχνικές τριδιάστατης εκτύπωσης ακολουθούν μία κοινή διαδικασία πέντε σταδίων:

- Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου CAD του σχεδίου ή του σκαναρισμένου αντικειμένου
- Μετατροπή του μοντέλου CAD σε format STL.
- Τεμαχισμό με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, του αρχείου STL σε λεπτές διατομές ελαχίστου πάχους.
- Αυτοματοποιημένη κατασκευή του αντικειμένου με τη διαδοχική εναπόθεση/σχηματισμόκαι συνένωση των διατομών.
- Καθαρισμό και τελικό φινίρισμα του μοντέλου.

Η μετατροπή του μοντέλου CAD σε format STL αποτελεί το δεύτερο στάδιο της τριδιάστατης εκτύπωσης, έχοντας καθιερωθεί ως πρότυπο εξ’αρχής από τη στερεολιθογραφία καθώς ήταν η πρώτη εμπορικά διαθέσιμη τεχνική ταχείας πρωτοτυποποίησης που αναπτύχθηκε. Οι διάφορες εκδόσεις του λογισμικού CAD, χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους για την αναπαράσταση στερεών (τριδιάστατων) αντικειμένων. Το format STL αναπαριστά μία

τριδιάστατη επιφάνεια ως ένα πλέγμα στοιχειωδών επίπεδων τριγώνων, που θυμίζουν την πολυεδρική όψη της επιφάνειας ενός κατεργασμένου διαμαντιού. Επειδή τα αρχεία STL χρησιμοποιούν στοιχειώδη επίπεδα, δεν μπορούν να αναπαραστήσουν καμπύλες επιφάνειες, παρά μόνο κατά προσέγγιση. Η αύξηση του αριθμού των στοιχειωδών τριγώνων επιτρέπει καλύτερη προσέγγιση, αλλά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του αρχείου. Μεγάλα και πολύπλοκα αρχεία σημαίνουν μεγαλύτερο χρόνο επεξεργασίας και κατασκευής, συνεπώς οι σχεδιαστές πρέπει να εξισορροπήσουν τις απαιτήσεις ακρίβειας με τις ανάγκες ευχρηστίας ώστε να κατασκευάσουν ένα διαχειρίσιμο αρχείο STL. Η διαδικασία αυτή είναι κοινή για όλες τις τεχνικές τριδιάστατης εκτύπωσης.

Το τρίτο βήμα της διαδικασίας της τριδιάστατης εκτύπωσης, συνίσταται στη χρήση λογισμικών Computer Aided Manufacturing (CAM), όπου εισάγεται το STL μοντέλο και ορίζονται οι κατασκευαστικές παράμετροι του αντικειμένου, με βάση τις οποίες δημιουργείται το πρόγραμμα κατασκευής του ως μια αλληλουχία εντολών προς το σύστημα τριδιάστατης εκτύπωσης. Το λογισμικό του προγράμματος αυτού διαιρεί (τεμαχίζει) το ψηφιακό μοντέλο σε έναν αριθμό λεπτών εγκάρσιων διατομών πάχους λίγων μm έως κάποιων cm (ανάλογα με την τεχνική εκτύπωσης), ενώ μπορεί να δημιουργήσει και μια βοηθητική δομή, που θα χρησιμοποιείται για τη στήριξη του πρωτότυπου κατά τη διάρκεια της κατασκευής του (σε περίπτωση που υπάρχουν εσωτερικές κοιλότητες, πρόβολοι, ή λεπτά τοιχώματα). Στην αγορά προσφέρονται σήμερα διάφορα τέτοια προγράμματα, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική, τα περισσότερα από τα οποία επιτρέπουν στον χρήστη να ρυθμίσει το μέγεθος, τη θέση και τον προσανατολισμό του ψηφιακού μοντέλου. Ο προσανατολισμός του μοντέλου καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο αυτό θα κατασκευαστεί, κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς οι ιδιότητες των αντικειμένων που κατασκευάζονται με τις τεχνικές της τριδιάστατης εκτύπωσης δεν είναι όμοιες και στις τρεις συντεταγμένες x, y, z . Επιπλέον, ο προσανατολισμός του μοντέλου καθορίζει κατά ένα μέρος το χρόνο που θα απαιτηθεί για την κατασκευή του πρωτοτύπου, εφόσον οι σχεδιαστές προτιμούν να επιλέγουν τη συντεταγμένη z για τη μικρότερη διάσταση του αντικειμένου, έτσι ώστε να μειώσουν τον αριθμό των διαδοχικών λεπτών διατομών που θα εναποτεθούν ή μία πάνω στην άλλη, μειώνοντας έτσι τον συνολικό χρόνο κατασκευής.

Το τέταρτο στάδιο είναι η κατασκευή του φυσικού αντικειμένου με τη χρήση των έξι τεχνικών που προαναφέρθηκαν, από μηχανές οι οποίες κατασκευάζουν μία-μία τις διατομές στις οποίες διαιρέθηκε ψηφιακό μοντέλο, χρησιμοποιώντας τα διάφορα υλικά (ρητίνες, πλαστικά, χαρτί, κεραμικά ή μέταλλα σε σκόνη κλπ.). Η κατασκευή γίνεται αυτοματοποιημένα και απαιτείται μικρή ανθρώπινη παρέμβαση.

Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την απομάκρυνση του αντικειμένου από τη μηχανή και την απόσπασή του από τυχόν στηρίγματα. Μερικά πρωτότυπα κατασκευασμένα από φωτοευαίσθητα υλικά υφίστανται περαιτέρω επεξεργασία σκλήρυνσης πριν παραδοθούν για χρήση. Μπορεί επίσης να απαιτηθεί ο καθαρισμός και το φινίρισμα της επιφάνειας του πρωτοτύπου ή άλλες επεμβάσεις που σχετίζονται με την εμφάνιση ή την αντοχή του.

Η έννοια της τριδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να οριστεί ως η μετατροπή ενός τριδιάστατου ψηφιακού μοντέλου σε ένα τριδιάστατο αντικείμενο το οποίο μεταφέρεται στον υλικό κόσμο. Η τριδιάστατη εκτύπωση βρίσκεται σε εξελισσόμενο στάδιο, καθώς η τελική της μορφή δεν έχει ακόμα διαμορφωθεί. Ο τομέας της 3d εκτύπωσης περιστρέφεται γύρω από τρεις βασικούς άξονες: α) Τον σχεδιαστικό τομέα, κατά τον οποίο απαιτείται η εγκατάσταση και χρήση λογισμικού που εξειδικεύεται σε 3d σχεδιασμό. Τέτοια λογισμικά είναι γνωστά στην βιομηχανία ως CAD (Computer Aided Design) και επιτρέπουν στο χρήστη:

- την πλήρη διαμόρφωση ενός αντικειμένου και στις τρεις διαστάσεις.
- την τελική φάση της εκτύπωσης, όπου ο παραγωγός μπορεί να τελειοποιήσει το προϊόν ή να εντοπίσει και να επιδιορθώσει πιθανές ατέλειες.

Οι τεχνολογίες προτυποποίησης περιλαμβάνουν έξι βασικές μεθόδους τριδιάστατης εκτύπωσης:

1. Στερεολιθογραφία Stereo lithography (STL)
2. Επιλεκτική σύντηξη με laser Selective laser sintering (SLS)
3. Συγκόλληση λεπτών φύλλων Laminated object manufacturing (LOM)
4. Εναπόθεση διαδοχικών στρώσεων Fused deposition modeling (FDM)
5. Τριδιάστατη εκτύπωση inkjet 3d inkjet printing
6. Παραλλαγή στερεολιθογραφίας Solid ground curing (SGC)

Τα πέντε κοινά στάδια που ακολουθούν όλες οι τεχνικές 3d εκτύπωσης είναι:

- α) Δημιουργία αρχικού ψηφιακού μοντέλου CAD
- β) Μετατροπή του μοντέλου CAD σε format STL
- γ) Τεμαχισμός του αρχείου STL σε διατομές ελάχιστου πάχους
- δ) Κατασκευή του αντικειμένου με αλληλαπόθεση των διατομών
- ε) Καθαρισμός και τελικό φινίρισμα του μοντέλου

Η τριδιάστατη εκτύπωση (3D printing) είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής στην οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Στην τριδιάστατη εκτύπωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικού, κυρίως

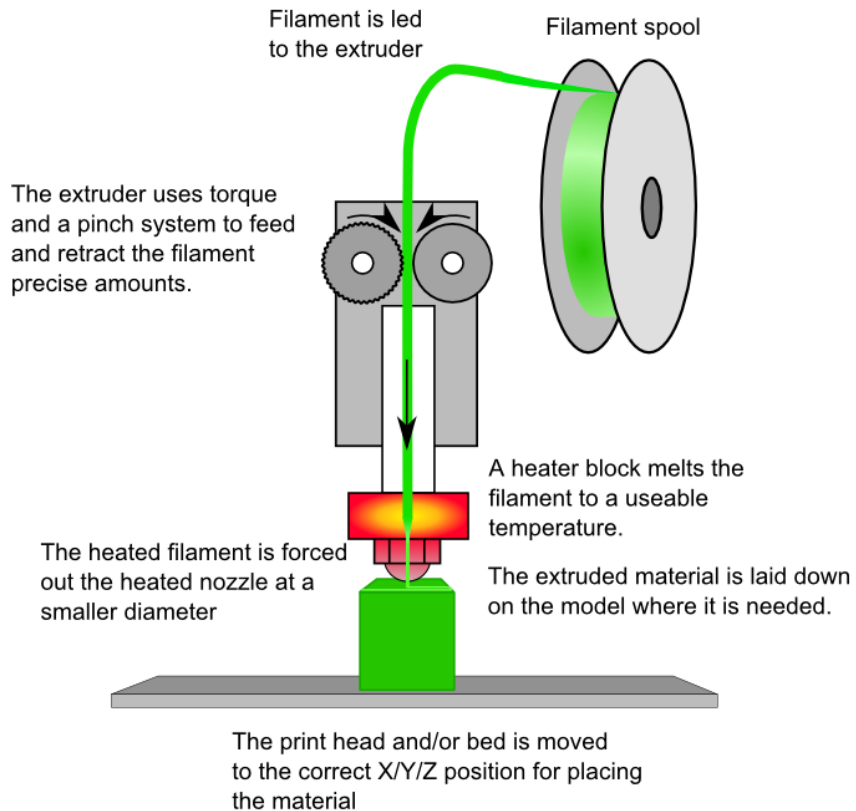
κεραμικά και πολυμερή. Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και εξοπλισμό προσθετικής κατασκευής, οι τριδιάστατοι εκτυπωτές είναι συνήθως ταχύτεροι, φθηνότεροι και ευκολότεροι στη χρήση. Οι τριδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτοτύπων από σχεδιαστές, μηχανικούς και ομάδες ανάπτυξης νέων προϊόντων, έχουν τη δυνατότητα να εκτυπώνουν μέρη και εξαρτήματα από διάφορα υλικά, με διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες και συχνά σε μια ενιαία διαδικασία κατασκευής.

1.2 Fused Filament Fabrication (FFF)

Η κατασκευή μέσω Ελεγχόμενης Εναπόθεσης Ινών Υλικού (FFF) είναι μία μέθοδος προσθετικής κατασκευής στρώσεων ενός υλικού και αποτελεί μία εκ των βασικών λειτουργιών του 3d εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής. Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε τα τέλη του 1980 από τον Scott Crump και πρωτοεμφανίστηκε στην αγορά το 1990 κυρίως σε μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες⁶. Στους τριδιάστατους εκτυπωτές που λειτουργούν κατά την FFF έχουμε μία προσθετική εναπόθεση στρώσεων ενός υλικού από κάτω προς τα πάνω. Τα πνευματικά δικαιώματα του όρου FFF ανήκουν πλέον στην εταιρία Stratasys, η οποία δραστηριοποιείται στον χώρο της τριδιάστατης εκτύπωσης⁷.

Η τεχνική FFF βασίζεται στην τήξη και την επιλεκτική εναπόθεση μιας λεπτής ίνας θερμοπλαστικού για τον σχηματισμό αλληπάλληλων στρώσεων οι οποίες και θα δημιουργήσουν το τελικό αντικείμενο. Ξεκινάει με τη δημιουργία ενός stl αρχείου (stereolithography file format) μέσω κατάλληλων λογισμικών (π.χ. Autocad), το οποίο αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση του προς εκτύπωση αντικειμένου σε 3 διαστάσεις. Για την εκτύπωση του αντικειμένου απαιτείται ένα υλικό, το οποίο είναι συνήθως πολυμερές σε μορφή νήματος-ρολού, το οποίο τήκεται και οδηγείται σε ένα στόμιο (nozzle). Μόλις το υλικό έχει ξεπεράσει το σημείο υαλώδους μετάπτωσής του και έχει λιώσει, εξέρχεται μέσα από το στόμιο για να σχηματίσει στρώσεις. Όσο προχωράει αυτή η διαδικασία, οι στρώσεις υλικού ξανασκληραίνουν, έρχονται δηλαδή σε στερεά μορφή. Άρα, για την τεχνική αυτή απαιτούνται θερμοπλαστικά υλικά, ικανά δηλαδή να λιώσουν και να ξαναεπιστρέψουν έπειτα στη στερεή κατάσταση. Το σημαντικό εδώ είναι ότι ουσιαστικά θερμαίνουμε το στόμιο (nozzle) για να «λιώσει» το υλικό, το οποίο έπειτα εξωθείται στην επιφάνεια εκτύπωσης. Το στόμιο μπορεί να κινηθεί στο ΧΥ επίπεδο ακολουθώντας την τροχιά που υπολογίστηκε από το CAM λογισμικό με βάση τις παραμέτρους που έχει ορίσει ο χρήστης.

Παρακάτω φαίνεται η μέθοδος FFF:



Εικόνα 1.1: Η μέθοδος FFF³⁷

Τα βήματα της διαδικασίας:

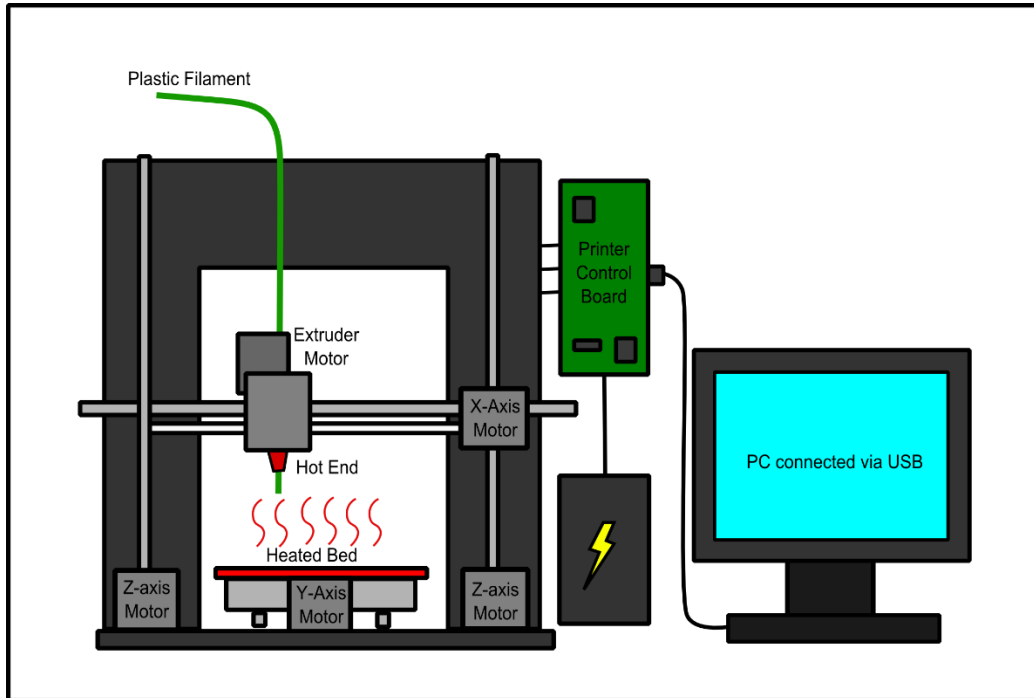
1. Το νήμα οδηγείται στον εκβολέα (extruder)
2. Στον εκβολέα, ένας βηματικός κινητήρας ρυθμίζει την παροχή υλικού, για να τροφοδοτήσει την ακριβή ποσότητα νήματος προς το ακροφύσιο.
3. Ένα θερμαινόμενο μπλοκ λιώνει το νήμα στην κατάλληλη θερμοκρασία.
4. Το θερμό νήμα οδηγείται εκτός του θερμαινόμενου στομίου σε μικρότερη διάμετρο.
5. Το εξωθημένο υλικό εναποτίθεται στην επιφάνεια εκτύπωσης.
6. Η κεφαλή του 3d εκτυπωτή καθώς και η επιφάνεια εκτύπωσης έχουν τη δυνατότητα κίνησης στους X, Y, Z άξονες για την ακριβή εναπόθεση του υλικού στο σωστό και επιθυμητό σημείο.

Το υλικό προς εκτύπωση βρίσκεται συνήθως σε μορφή νήματος τυλιγμένο σε καρούλι. Το υλικό οδηγείται στον εκβολέα (extruder), ο οποίος μέσω της περιστροφικής δύναμης που ασκεί, ωθεί την ακριβή ποσότητα υλικού που απαιτείται. Έπειτα το υλικό οδηγείται σε ένα μέρος όπου

αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες, τις οποίες καθορίζει ο χειριστής ανάλογα το υλικό, προκειμένου να φτάσει το υλικό την θερμοκρασία τήξης του και να λιώσει. Το λιωμένο πλέον υλικό οδηγείται εν τέλει στο στόμιο (nozzle), το οποίο βρίσκεται επίσης στη θερμοκρασία τήξης του υλικού. Τέλος, εξωθείται μέσω του στομίου σε πολύ μικρότερη διάμετρο από την αρχική. Αυτό το στόμιο και η βάση εκτύπωσης κινούνται από κοινού κατά μήκος, πλάτος και ύψος. Με τον τρόπο αυτό το μηχάνημα δημιουργεί ένα στρώμα αυτού του μέρους, η βάση κινείται, δημιουργεί άλλο ένα στρώμα και ούτω καθεξής. Η ένωση αυτών των στρωμάτων δημιουργεί το αντικείμενο.

1.3 Τα διάφορα μέρη του εκτυπωτή και η λειτουργία τους

Στην εικόνα 1.2 φαίνονται τα διάφορα μέρη του εκτυπωτή, τα οποία αναλύονται παρακάτω:



Εικόνα 1.2: Τα διάφορα μέρη του εκτυπωτή³⁸

1. Εκβολέας (Extruder)

Είναι το εξάρτημα στο οποίο εισέρχεται το νήμα και το τροφοδοτεί στο λεγόμενο θερμαινόμενο μπλοκ.

2. Θερμαινόμενο μπλοκ (Hot End)

Είναι το μέρος του εκτυπωτή όπου αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες προκειμένου να τακεί το υλικό προς εκτύπωση. Συνήθως, είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο και μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες μέχρι και 260 °C. Για το λόγο αυτό, το μπλοκ αυτό είναι θερμικά απομονωμένο από την υπόλοιπη διάταξη, καθώς η επαφή σε αυτό μπορεί μέχρι και να καταστρέψει άλλα εξαρτήματα.

3. Η κεφαλή (head)

Είναι το μέρος που αποτελείται από τον εκβολέα και το θερμαινόμενο μπλοκ. Μπορεί και κινείται στους άξονες X, Y για την εναπόθεση του υλικού στην επιφάνεια εκτύπωσης.

4. Το ακροφύσιο (nozzle)

Πρόκειται για το στόμιο από το οποίο εξέρχεται το τηγμένο υλικό. Έχει 1,75mm ή 3mm. Με τη βοήθεια της κίνησης της κεφαλής και του εκβολέα, το υλικό εξέρχεται στην επιθυμητή διάμετρο και εναποτίθεται πάνω στην επιφάνεια εκτύπωσης.

5. Η επιφάνεια εκτύπωσης (Printbed)

Πρόκειται για το μέρος του εκτυπωτή όπου γίνεται η εναπόθεση του λιωμένου υλικού. Συνήθως είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο, Plexiglass ή γυαλί. Έχει τη δυνατότητα θέρμανσης, έτσι ώστε το υλικό, μετά την εναπόθεσή του, να μην επιστρέφει κατευθείαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, κάτι το οποίο βοηθάει στη σωστή συγκόλληση των διαδοχικών στρώσεων.

6. Το νήμα (Filament)

Πρόκειται για το υλικό που θα εκτυπωθεί. Βρίσκεται σε μορφή νήματος και εμπορικά βρίσκεται τυλιγμένο σε ειδικό καρούλι. Τα νήματα που υποστηρίζονται από τους σύγχρονους εκτυπωτές έχουν διάμετρο 1,75mm είτε 3mm.

1.4 Βασικές παράμετροι της τριδιάστατης εκτύπωσης

Παρακάτω συνοψίζονται οι παράμετροι της τριδιάστατης εκτύπωσης:

1. Ποσοστό πλήρωσης (Infill %)

Το ποσοστό πλήρωσης (Infill %) είναι μία τιμή που αντανακλά το ποσοστό πλήρωσης του χώρου μέσα στον αντικείμενο που πρόκειται να εκτυπωθεί. Δείχνει ουσιαστικά πόσο συμπαγές είναι το αντικείμενο. Αύξηση του σημαίνει και αύξηση του απαιτούμενου υλικού για την εκτύπωση. Σε μεγάλες τιμές ποσοστού πλήρωσης αναμένεται μεγαλύτερη αντοχή του εκτυπωμένου υλικού. Παρόλ' αυτά στις τριδιάστατες εκτυπώσεις, οι συνηθισμένες τιμές κυμαίνονται από 30 έως 50%, καθώς περαιτέρω αύξηση του ποσοστού πλήρωσης, αυξάνει σημαντικά το κόστος και το χρόνο της εκτύπωσης.

2. Αριθμός εξωτερικών κελύφων (Number of Shells)

Πρόκειται για τον αριθμό των εξωτερικών περιγραμμάτων που εκτυπώνονται σε κάθε στρώση. Όσο περισσότερα κελύφη υπάρχουν, τόσο πιο μεγάλη αντοχή έχει το εκτυπωμένο αντικείμενο, καθώς αύξηση του αριθμού κελυφών σημαίνει πρακτικά περιμετρική ενίσχυση του αντικειμένου με πιο χοντρές στρώσεις υλικού. Στις περισσότερες εκτυπώσεις, χρησιμοποιούνται 2 ή 3 κελύφη.

3. Ύψος στρώσης (Layer Height)

Είναι ίσως η πιο σημαντική παράμετρος, καθώς επηρεάζει στο μεγαλύτερο βαθμό την ποιότητα της εκτύπωσης. Πρόκειται ουσιαστικά για την παράμετρο που ορίζει το ύψος κάθε στρώσης που εκτυπώνεται. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της, τόσο πιο πολλές στρώσεις θα απαιτηθούν έτσι ώστε να συμπληρωθεί η εκτύπωση, καταφέροντας με αυτόν τον τρόπο καλύτερα αποτελέσματα και εκτυπώσεις. Παρόλ' αυτά οι χαμηλές τιμές της παραμέτρου αυτής συνεπάγονται και πολύ πιο μεγάλους χρόνους εκτύπωσης. Οι συνηθέστερες τιμές είναι οι 0.1mm, 0.2mm και 0.3mm.

4. Πάχος γραμμών (path width)

Πρόκειται για το πάχος της κάθε γραμμής εναποθετημένου υλικού σε κάθε στρώση. Όσο πιο παχιά είναι η κάθε γραμμή, τόσο λιγότερες γραμμές συνολικά μπορούν να εναποτεθούν στο εσωτερικό του αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου, τόσο πιο «χοντρές» είναι οι γραμμές και άρα τόσο πιο συμπαγής είναι η κάθε στρώση. Βιβλιογραφικά, το πάχος στρώσης κυμαίνεται από 0.2 mm έως 0.4 mm⁸.

5. Θερμοκρασία εκβολέα (Extruder Temperature)

Είναι η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να φτάσει ο εκβολέας για να ξεκινήσει η εκτύπωση. Η θερμοκρασία παραμένει στην τιμή που τις δίνουμε καθ' όλη τη διάρκεια της εκτύπωσης. Η τιμή της θερμοκρασίας του εκβολέα επιλέγεται ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται για εκτύπωση. Για το PLA, η κατάλληλη θερμοκρασία εκβολέα είναι γύρω στους 230°C, ενώ για το Carbonfil™ οι 210°C.

6. Ταχύτητα εκτύπωσης (Printing Speed)

Είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται η κεφαλή του εκτυπωτή κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης και εναπόθεσης υλικού στην επιφάνεια εκτύπωσης. Πρακτικά, πρόκειται για την ταχύτητα με την οποία εκτυπώνεται κάθε στρώση και είναι μία παράμετρος με μεγάλο εύρος τιμών ανάλογα το αντικείμενο που εκτυπώνεται και τις επιθυμητές ιδιότητες. Σε πολύ υψηλές ταχύτητες δύναται να υπάρχουν ατέλειες ενώ αντίθετα σε πολύ χαμηλές ταχύτητες, το εναποθετημένο εκτυπωμένο υλικό μπορεί να παρουσιάζει προβλήματα κατά τη συγκόλληση με την επόμενη στρώση.

7. Ταχύτητα κίνησης (Movement Speed)

Είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται η κεφαλή όταν δεν εκτυπώνεται υλικό. Συνήθως οι τιμές της παραμέτρου αυτής είναι πολύ υψηλότερες από αυτές της ταχύτητας εκτύπωσης, καθώς έτσι μειώνεται ο χρόνος που απαιτείται χωρίς να επηρεάζεται άμεσα η ποιότητα της εκτύπωσης.

8. Θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης (Printbed Temperature)

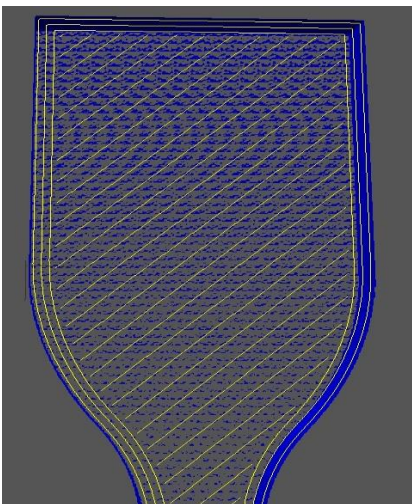
Είναι η θερμοκρασία που έχει η επιφάνεια εκτύπωσης έτσι ώστε το τηγμένο εναποθετημένο υλικό να μην πήζει και να μην στερεοποιείται κατευθείαν, έτσι ώστε όταν εναποθεθεί η ακριβώς επόμενη στρώση υλικού, να έχει αντίστοιχη θερμοκρασία για να μπορέσουν οι δύο διαδοχικές στρώσεις να εννοθούν μικρομοριακά. Αυτό βοηθά καταλυτικά στην καλύτερη συγκόλληση των στρώσεων και στην πρόληψη εμφάνισης συγκεκριμένων ανεπιθύμητων φαινομένων όπως ο διαχωρισμός των στρώσεων και η εμφάνιση σχισμών (Layer Separation and Splitting), η σκέβρωση (Warping) και η συρρίκνωση. Η συνηθισμένη τιμή είναι γύρω στους 60 °C.

9. Γωνία εκτύπωσης-προσανατολισμός (Raster angle ή Infill angle)

Πρόκειται για τη γωνία περιστροφής του rectilinear πλέγματος στο XY επίπεδο (γύρω από τον Z άξονα). Ανάλογα με τη γωνία εκτύπωσης μεταβάλλονται σημαντικά οι μηχανικές ιδιότητες του εκτυπωμένου αντικειμένου, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Στις εικόνες 1.3-1.5 φαίνονται συγκεκριμένα οι τρεις γωνίες εκτύπωσης που επιλέχθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας.

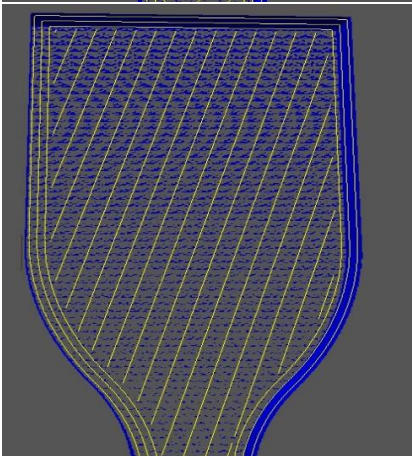
10. Το λογισμικό Voxelizer

Το Voxelizer είναι λογισμικό που έχει αναπτύξει η εταιρία για τον ZMorph 3D Printer. Βοηθάει στην επεξεργασία και εκτύπωση αντικειμένων με την τεχνική που λέγεται voxelization, όπου τα αντικείμενα απαρτίζονται από τριδιάστατα pixels αντί για τρίγωνα (ψηφιακή πλεγματοποίηση). Αυτό επιτρέπει λειτουργίες που δεν δυνατό να γίνουν με παραδοσιακές προσεγγίσεις, όπως την χρήση φίλτρων και άμεσης συμβατότητας με αρχεία σάρωσης MRI. Μπορεί να καθοδηγήσει όλες τις κεφαλές της Z-morph. Εναλλακτικά μπορεί να λειτουργήσει και με άλλα opensource λογισμικά όπως το Pronterface, το YARRH και άλλα παρόμοια. Μπορεί επίσης να δεχτεί αρχεία κι από άλλα CAM λογισμικά όπως τα: Cura, Slic3r, KisSlicer, SFACT.



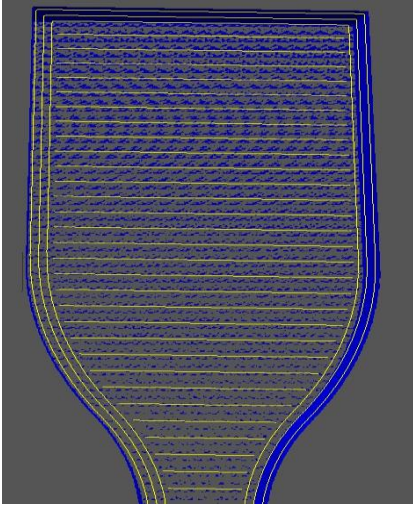
Εικόνα 1.3: Γωνία εκτύπωσης 45°

Οι γραμμές της στρώσης σχηματίζουν γωνία 90° με την επόμενη στρώση. Η εικόνα είναι από το λογισμικό Voxelizer.



Εικόνα 1.4: Γωνία εκτύπωσης 75°

Οι γραμμές της στρώσης σχηματίζουν γωνία 90° με την επόμενη στρώση. Η εικόνα είναι από το λογισμικό Voxelizer.



Εικόνα 1.5: Γωνία εκτύπωσης 0° ή 90°

Οι γραμμές της στρώσης σχηματίζουν γωνία 90° με την επόμενη στρώση. Η εικόνα είναι από το λογισμικό Voxelizer.

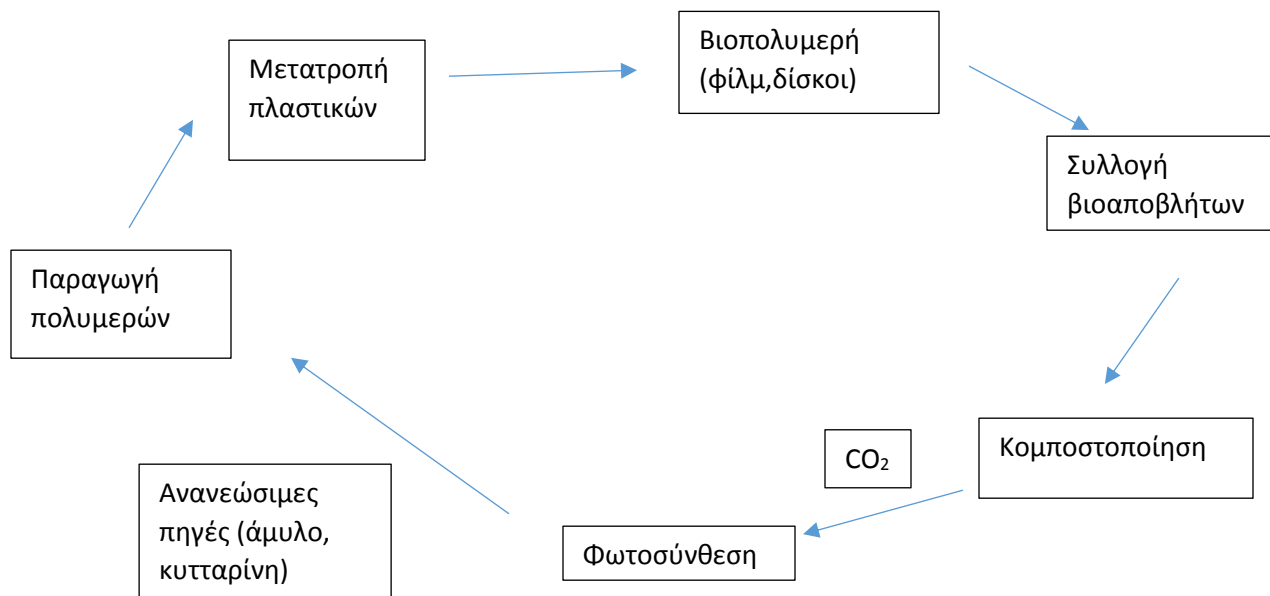
1.5 Τα υλικά προς εκτύπωση

Δεκάδες υλικών είναι διαθέσιμα για τριδιάσταση εκτύπωση, όπως το συμπολυμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου ABS, το πολυγαλακτικό οξύ PLA, το polycarbonate PC, πολυαμίδιο PA, το πολυστυρένιο PS και διάφορα θερμοπλαστικά ελαστομερή.

1.5.1 Βιοδιασπώμενα πολυμερή

Γενικά, ένα βιοδιασπώμενο υλικό (σκέτο πολυμερές, αναμειγμένο προϊόν ή σύνθετο) μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές. Οι καινοτομίες στην ανάπτυξη υλικών από βιοπολυμερή, η διατήρηση των ορυκτών με βάση τις πρώτες ύλες, η πλήρης βιολογική αποικοδομησιμότητα, η μείωση του όγκου των απορριμμάτων, η προστασία του κλίματος μέσω της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται, καθώς και οι δυνατότητες εφαρμογής γεωργικών πόρων για τη σύνθεση βιοπολυμερών είναι μερικοί από τους λόγους για τους οποίους αυτά τα υλικά έχουν προσελκύσει το δημόσιο ενδιαφέρον.

Ο κύκλος ζωής των βιοδιασπώμενων πολυμερών φαίνεται σχηματικά παρακάτω:



Μερικά παραδείγματα των εμπορικών βιοαποικοδομήσιμων πολυμερών στην αγορά είναι το Polylactide (PLA), το πολυ (3-υδροξυ βουτυρικού-συν-3 υδροξυβαλερικό) (PHBV), θερμοπλαστικά με βάση το άμυλο, και πολυκαπρολακτόνη (PCL). Τα τρία πρώτα πολυμερή προέρχονται από γεωργικές πρώτες ύλες και το τελευταίο από πετροχημικές πηγές. Όλα τους ενδύκνυνται για πλήρη κομποστοποίηση.⁹

Στην εργασία αυτή, ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι το πολυγαλακτικό οξύ (PLA). Η επιστημονική κοινότητα έχει στρέψει την προσοχή της στο PLA τα τελευταία χρόνια και αυτό γιατί το PLA

θεωρείται από πολλούς ως η απάντηση στην αυξανόμενη ανάγκη της αγοράς για υλικά προερχόμενα από τη βιοτεχνολογία. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην αύξηση της αφθονίας του, αλλά επίσης επειδή εύκολα ανακτάται από φυτά, είναι σχετικά φθηνό και κατέχει μεγάλες δυνατότητες να τροποποιηθεί και να ενσωματωθεί σε μίγματα πολυμερών και άλλα σύνθετα υλικά με καλές τελικές χρήσεις.¹⁰

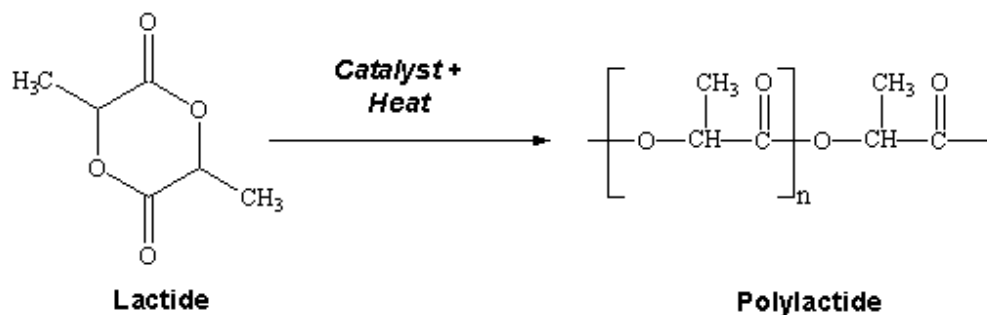
1.5.2 Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA)

Πρόκειται για ένα εκ των δύο υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας. Το PLA χρησιμοποιείται ευρέως στην τριδιάστατη εκτύπωση και επομένως κρίθηκε ενδιαφέρον ερευνητικά να εξεταστούν οι μηχανικές ιδιότητες εκτυπωμένου PLA. Έτσι, η ευρεία χρήση του αλλά και η συνεχής έρευνα που γίνεται πάνω σε αυτό για την τριδιάστατη εκτύπωση ήταν οι βασικότεροι λόγοι για την επιλογή του.

Το πολυγαλακτικό οξύ (polylactic acid) θεωρείται ένα από τα πιο χρήσιμα πολυμερή στις μέρες μας. Το γεγονός ότι είναι βιοαποικοδομήσιμο και αφομοιώσιμο από τον ανθρώπινο οργανισμό, το καθιστά κατάλληλο για ένα μεγάλο αριθμό ιατρικών και φαρμακευτικών εφαρμογών αλλά και για κατασκευή τεχνητών υφασμάτων πλαστικών μπουκαλιών και συσκευασιών. Απώτερος μελλοντικός στόχος των ερευνών, είναι η βελτίωση της αντοχής του υλικού και η μείωση του κόστους παραγωγής, γεγονός που θα το κάνει ανταγωνίσιμο έναντι των ήδη υπάρχων πετροχημικών πλαστικών.

Το πολυγαλακτικό οξύ είναι ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συνθετικά πολυμερή στη βιοϊατρική όπως μεμβράνες φράγματος, καθοδηγούμενη αναγέννηση ιστού (σε οδοντιατρικές εφαρμογές), ορθοπεδικά, ράμματα και ικρίσματα. Το PLA είναι ένα χειρόμορφο μόριο και εμφανίζεται σε τέσσερις διαφορετικές μορφολογίες. Πρόκειται για τα πολυμερή P-DD-LA, P-LL-LA (ονομάζεται επίσης PLLA), P-DL-LA (ονομάζεται επίσης PDLA) και ένα P-μεσο-LA. Με ρύθμιση της αναλογίας τέτοιων πολυμερών, του M_w , και του κλάσματος κρυσταλλικότητας είναι δυνατόν να διαμορφώνονται οι μηχανικές ιδιότητες, ο ρυθμός αποικοδόμησης, η θερμοκρασία T_g και πολλοί άλλοι παράγοντες σε κάποιο επιθυμητό σημείο για συγκεκριμένη εφαρμογή.^{11,12}

Η παραγωγή του πολυγαλακτικού οξέος γίνεται είτε με αντίδραση πολυσυμπύκνωσης του γαλακτικού οξέος, είτε με πολυμερισμό του λακτιδίου (κυκλικό παράγωγο του γαλακτικού οξέος). Ο πρώτος τρόπος οδηγεί κυρίως σε πολυμερή μικρού μοριακού βάρους λόγω του γεγονότος ότι κατά την αντίδραση πολυσυμπύκνωσης παράγεται συνεχώς νερό το οποίο και πρέπει να απομακρύνεται για την μετατόπιση της ισορροπίας προς την παραγωγή πολυμερούς. Αντίθετα με την μέθοδο πολυμερισμού διάνοιξης δακτυλίου του λακτιδίου επιτυγχάνεται η παραγωγή πολυμερών μεγάλου μοριακού βάρους σε μικρό χρονικό διάστημα.



Σχήμα 1.1: Η χημική αντίδραση παραγωγής του PLA¹⁰

Η παραγωγή PLA καταναλώνει 25-55% λιγότερη ενέργεια από ορυκτές πηγές (ορυκτά καύσιμα) σε σχέση με τα πετρελαϊκά πολυμερή.⁸

1.5.3 Μειονεκτήματα PLA

Ενώ το PLA μπορεί να θεωρηθεί ως ένα φιλικό προς το περιβάλλον βιοϋλικό με εξαιρετικές ιδιότητες, έχει επίσης πολλά προφανή μειονεκτήματα σε ορισμένες εφαρμογές:

- 1) Ο ρυθμός αποδόμησης του μέσω υδρόλυσης των εστερικών ομάδων είναι πολύ αργός. Αυτή η διαδικασία διαρκεί μερικές φορές πολλά έτη, η οποία μπορεί να παρακωλύσει τη βιοϊατρική εφαρμογή του.
- 2) Το PLA είναι πολύ εύθραυστο, με λιγότερο από 10% επιμήκυνση σε εφελκυσμό και έτσι δεν είναι κατάλληλο για απαιτητικές εφαρμογές σε μηχανική απόδοση, εκτός εάν είναι κατάλληλα τροποποιημένο.
- 3) Το PLA είναι ισχυρά υδρόφοβο και μπορεί να προκαλέσει φλεγμονώδη απόκριση από τους ιστούς των ζώντων ξενιστών, λόγω της χαμηλής του συγγένειας με τα κύτταρα, όταν χρησιμοποιείται ως υλικό μηχανικής ιστών.¹³
- 4) Ένας άλλος περιορισμός του PLA κυρίως στην ευρύτερη βιομηχανική εφαρμογή είναι οι περιορισμένες ιδιότητες φραγής αερίου που εμποδίζουν την πλήρη του πρόσβαση σε βιομηχανικούς τομείς όπως η συσκευασία.

1.5.4 Μηχανικές ιδιότητες του PLA

Οι μηχανικές ιδιότητες αντικατροπτρίζουν ουσιαστικά τα αποτελέσματα του μοριακού βάρους, του προσανατολισμού των μοριακών αλυσίδων και της κρυσταλλικότητας.

Το PLLA είναι κρυσταλλικό ενώ το PDLLA είναι ένα άμορφο βιοδιασπώμενο πολυμερές. Εξαιτίας της κρυσταλλικότητάς τους, τα διάφορα PLLA πολυμερή ίδιου μοριακού βάρους έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από το PDLLA. Το PLLA έχει πιο δομημένη και συμπαγή δομή και ως εκ τούτου καλύτερες μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερο χρόνο ζωής. Παρόλ' αυτά, τα ανηπτομένα PLLA έχουν επίσης καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα μη ανηπτομένα PLLA λόγω του μεγαλύτερου βαθμού κρυσταλλικότητας που προκλήθηκε από την ανόπτηση.¹⁴

Οι μηχανικές ιδιότητες του PLA ποικίλουν σε ευρεία γκάμα, από απαλό, ελαστικό πλαστικό μέχρι σε δύσκαμπτο πλαστικό υψηλής αντοχής. Με αύξηση του μοριακού βάρους αυξάνονται επίσης οι μηχανικές ιδιότητες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αύξηση του μοριακού βάρους του PLLA από $23 \cdot 10^5$ kg/kmol σε $67 \cdot 10^5$ kg/kmol, κάτι το οποίο επέφερε αύξηση στη δύναμη που απαιτείται για πλήρη κάμψη από 64 σε 106 MPa. Παρόλ' αυτά βέβαια, η αντοχή σε εφελκυσμό παρέμεινε ίδια στα 59MPa. Στην περίπτωση του PDLLA, όταν το μοριακό βάρος αυξήθηκε από 47.5 kg σε 114kg, η αντοχή σε εφελκυσμό και η δύναμη για πλήρη κάμψη αυξήθηκαν από 49 σε 53 MPa και από 84 σε 88 MPa αντίστοιχα.¹⁵

Οι διάφορες ιδιότητες του PLA φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Table 2.3 Mechanical properties of PLA (Naturework™ Cargill Dow)
(Doi and Steinbuechel, 2002)

Properties	ASTM	2002D	2100D	PLA Resin
Specific gravity	D792	1.24	1.30	1.24
Melt index, (g/10min (190 °C/2.16 K)	D1238	4-8	5-15	10-30
Clarity	-	Transparent	Opaque	-
Tensile strength at break psi (MPa)	D882	7700 (53)	8100 (56)	7000 (48)
Tensile yield strength, psi (MPa)	D882	500 (3.5)	500 (3.5)	-
Tensile Modulus, kpsi (GPa)	D882	6.0	3.0	2.5
Tensile elongation, %	D256	0.24 (12.81)	0.37 (19.8)	0.3 (0.16)
Notched izod impact, ft-lb/in (J/m)	-	Similar to	-	-
Shrinkage		PET		

Εικόνα 1.6: Οι μηχανικές ιδιότητες του PLA¹⁶

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, όσον αφορά την βελτίωση των ιδιοτήτων του PLA, έχει στραφεί στη βελτίωση των θερμικών και μηχανικών ιδιοτήτων καθώς και των ρεολογικών, όπως το ιξώδες και η αντοχή του τήγματος. Για τα φιλμ PLA, η έρευνα έχει στραφεί στον βαθμό κρυσταλλικότητας, τη θερμική σταθερότητα και τις επιμηκυντικές δυνατότητες. Για το σκοπό αυτό, οι ερευνητές πλέον στρέφονται στα μίγματα PLA με άλλα πολυμερή.

1.5.5 To CarbonFil™

Το CarbonFil™ είναι το δεύτερο υλικό που επιλέχθηκε για τη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων τρισδιάστων εκτυπωμένων αντικειμένων. Πρόκειται για ένα υλικό της εταιρίας FormFutura, το οποίο είναι ουσιαστικά τροποποιημένο PET (Polyethylene terephthalate), ενισχυμένο με ίνες άνθρακα, σε ποσοστό 20 wt.%. Το PLA και το CarbonFil™ έχουν παρόμοιες εφαρμογές στην τριδιάστατη εκτύπωση, με το τελευταίο όμως να είναι ένα νέο καινοτόμο υλικό που ακόμη δεν έχει την ίδια ευρεία χρήση σε σύγκριση με το PLA. Επομένως, πέρα από την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων του κάθε υλικού ξεχωριστά, η σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων των δύο αυτών υλικών (PLA και CarbonFil™) έχει μεγάλο ενδιαφέρον και αυτό αποτέλεσε ίσως το σημαντικότερο κριτήριο για την επιλογή του CarbonFil™ ως δεύτερο υλικό διερεύνησης.

Το ενισχυμένο αυτό υλικό έχει 10% περισσότερη αντοχή σε κρούση συγκριτικά με το μη ενισχυμένο και είναι επίσης πολύ πιο σκληρό¹⁸. Επίσης έχει μια σχετικά υψηλή θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης (85°C) και πολύ καλή θερμική σταθερότητα. Στο τέλος της παρούσης εργασίας παρατίθεται το τεχνικό φυλλάδιο (technical data sheet) για το Carbonfil™.

Παρακάτω συνοψίζονται οι σημαντικότερες ιδιότητες του CarbonFil™:

- Εξαιρετικά άκαμπτο
- Ευκολία στην εκτύπωση
- Δεν παρουσιάζεται το φαινόμενο της σκέβρωσης (warping)
- Ελαφρύ
- Μεγάλη αντοχή στην κρούση
- Πολύ καλή προσκόλληση των στρώσεων
- Σταθερότητα διαστάσεων μετά την εκτύπωση

1.7 Τα προβλήματα της εκτύπωσης

Το εκτυπωμένο υλικό δεν προσκολλάται στην επιφάνεια εκτύπωσης

Είναι πολύ σημαντικό η πρώτη στρώση του υλικού να εκτυπωθεί σωστά και να συγκολληθεί επαρκώς με την επιφάνεια εκτύπωσης. Πολλές φορές συναντάται το πρόβλημα της κακής ή και καθόλου προσκόλλησης του υλικού στην επιφάνεια. Κάτι τέτοιο μπορεί να αποβεί καταστροφικό για την πορεία και την ποιότητα της εκτύπωσης και πρέπει να αντιμετωπίζεται άμεσα. Πιθανοί λόγοι που προκαλούν το πρόβλημα αυτό είναι η λάθος απόσταση ακροφυσίου και επιφάνειας εκτύπωσης, κάτι το οποίο αντιμετωπίζεται με διαμέτρηση της επιφάνειας εκτύπωσης και τοποθέτησής της στην σωστή απόσταση από την κεφαλή του εκτυπωτή. Μία άλλη αιτία του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η κακή προσρόφηση του υλικού από την επιφάνεια, κάτι το οποίο είναι πολύ σύνηθες, και λύνεται πολύ απλά με την τοποθέτηση ειδικής ταινίας πάνω στην επιφάνεια όπου πρόκειται να εκτυπωθεί το αντικείμενο. Τέλος, οι επιλεγμένες θερμοκρασίες παίζουν επίσης μεγάλο ρόλο. Μπορεί η θερμοκρασία του εκβολέα που έχει επιλεγεί να μην επαρκεί για την πλήρη τήξη του υλικού ή αντίθετα η θερμοκρασία της επιφάνειας να είναι πολύ χαμηλή και έτσι να επαναρχεται το υλικό πολύ γρήγορα στην στερεή κατάσταση.

Σκέβρωση (Warping)

Σκέβρωση συμβαίνει όταν το πλαστικό ψύχεται και συστέλλεται. Καθώς το εκτυπωμένο υλικό ψύχεται και συστέλλεται, αρχίζει ταυτόχρονα να τραβιέται προς τα μέσα. Πολλές φορές αυτό οδηγεί σε κύρτωση του υλικού. Η σημαντικότερη όμως επίπτωση του προβλήματος αυτού είναι η κακή τελική ποιότητα και η μη σωστή διακύμανση του πάχους του υλικού καθ' όλη την επιφάνεια του εκτυπωμένου υλικού, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα όσον αφορά τις ιδιότητες του εκτυπωμένου αντικειμένου. Μία από τις πιθανές αιτίες μπορεί να είναι οι μεγάλες ταχύτητες εκτύπωσης και οι περίπλοκες γεωμετρίες. Το πρόβλημα αυτό μπορεί οφείλεται επίσης στην επιλογή μη κατάλληλων θερμοκρασιών. Έτσι, η λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα βρίσκεται καθαρά στην έρευνα και στις συνεχείς δοκιμές μέχρι να βρεθούν οι κατάλληλες θερμοκρασίες. Τέλος, η προσθήκη (εάν δεν υπάρχει) ενός ανεμιστήρα ψύξης πάνω από την επιφάνεια εκτύπωσης μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού.

Παρουσίαση ιστών (Cobwebbing)

Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται όταν εμφανίζονται μικροί ιστοί πλαστικού επάνω στο εκτυπωμένο αντικείμενο. Αυτό συμβαίνει συνήθως εξαιτίας της διαρροής πλαστικού κατά τη διάρκεια κίνησης της κεφαλής όταν δεν εκτυπώνεται υλικό. Τη λύση στο πρόβλημα αυτό τη

φέρνει η δυνατότητα ανάκλησης του υλικού τις στιγμές της κίνησης της κεφαλής όταν δεν εκτυπώνεται υλικό. Υπάρχει δηλαδή η δυνατότητα να επιλεγεί από το λογισμικό η εντολή αυτή, δηλαδή να ανακαλείται-τραβιέται το υλικό κάθε φορά που κινείται η κεφαλή και δεν εκτυπώνει.

Υπολειτουργία του εκβολέα (Under-extrusion)

Με τον όρο αυτό νοείται ένα σύνηθες πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά τη διάρκεια μίας εκτύπωσης. Πιο συγκεκριμένα, πολλές φορές ο εκτυπωτής αδυνατεί να τροφοδοτήσει την ποσότητα υλικού που έχει απαιτηθεί με διάφορα αρνητικά αποτελέσματα, όπως λειπές στρώσεις, πολύ λεπτές στρώσεις ή στρώσεις που παρουσιάζουν ανωμαλίες (τρύπες π.χ.). Πρόκειται για ένα πρόβλημα με πολλές πιθανές αιτίες και παραμένει μέχρι στιγμής δύσκολη η αντιμετώπισή του. Αυτό που βοηθά σίγουρα πάντως και πρέπει να είναι δεδομένο πριν από κάθε εκτύπωση, είναι η επαρκής και σωστή τροφοδότηση του εκβολέα με υλικό.

Υπερθέρμανση (Overheating)

Το πλαστικό που εξέρχεται από τον εκβολέα μπορεί να βρίσκεται σε θερμοκρασία μεταξύ 190°C και 240°C. Όσο το πλαστικό είναι ακόμη θερμό, είναι πολύ εύκαμπτο και μπορεί πολύ εύκολα να παραμορφωθεί. Το πρόβλημα της υπερθέρμανσης ξεκινάει όταν έχει επιλεγεί υψηλή θερμοκρασία για το υλικό ή δεν υπάρχει επαρκής ψύξη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε άσχημες αισθητικά εκτυπώσεις και σημαντικές αλλοιώσεις στη δομή και άρα τις ιδιότητες των αντικειμένων. Πρόκειται παρ' αυτά για ένα εύκολα αντιμετωπίσιμο πρόβλημα, καθώς επαρκής ψύξη με ανεμιστήρα και εύρεση της κατάλληλης θερμοκρασίας εκβολέα με δοκιμές επαρκούν για την αποφυγή του.

Διαχωρισμός των στρώσεων και σχισμές (Layer Separation and Splitting)

Όπως προαναφέρθηκε, η τριδιάστατη εκτύπωση λειτουργεί με την διαδοχική εναπόθεση λεπτών στρώσεων υλικού. Κάθε επιτυχής στρώση εκτυπώνεται επάνω στην προηγούμενη μέχρι να ολοκληρωθεί η τελική δομή του αντικειμένου. Για να είναι όμως γερό και συμπαγές το τελικό εκτυπωμένο αντικείμενο, θα πρέπει κάθε στρώση να είναι πολύ καλά συγκολλημένη με την προηγούμενη και την επόμενη. Εάν έστω και μία στρώση δεν έχει συγκολληθεί επιτυχώς με τις αντίστοιχες διαδοχικές στρώσεις της, είναι πολύ πιθανό το τελικό αντικείμενο να διαχωριστεί ή να έχει πολύ κακή αισθητική και αρνητικά αποτελέσματα στις ιδιότητές του. Το φαινόμενο της μη επιτυχούς συγκόλλησης μεταξύ των διαδοχικών στρώσεων ονομάζεται διαχωρισμός των στρώσεων και αποτελεί ένα από τα πιο συνηθισμένα προβλήματα σε μία τριδιάστατη εκτύπωση. Πιθανότερη αιτία του προβλήματος αυτού είναι η χαμηλή θερμοκρασία του εκβολέα σε συνδυασμό με την ανεπαρκή ψύξη κατά την εναπόθεση της στρώσης. Η εύρεση της

κατάλληλης θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει απευθείας στην άμεση λύση του προβλήματος. Η αύξηση της θερμοκρασίας επιτρέπει την καλύτερη συγκόλληση των στρώσεων, καθώς τα θερμά υλικά αναπτύσσουν πολύ καλύτερους δεσμούς σε σχέση με το όταν είναι πιο ψυχρά. Το πρόβλημα αυτό όμως παραμένει πολυδιάστατο και η αύξηση της θερμοκρασίας του εκβολέα μπορεί να μην επαρκεί για την επίλυσή του. Μία άλλη πιθανή αιτία του φαινομένου είναι το μεγάλο πάχος στρώσεων, το πόσο ψηλή είναι δηλαδή κάθε στρώση. Μειώνοντας το πάχος της κάθε στρώσης μέχρι ένα βέλτιστο σημείο δύναται να συμβάλει επίσης στην αντιμετώπιση του φαινομένου και αυτό γιατί όσο πιο λεπτές είναι οι στρώσεις, τόσες περισσότερες στρώσεις απαιτούνται για να ολοκληρωθεί το αντικείμενο και άρα το μεγαλύτερο πλήθος των στρώσεων επιτρέπει την πιο γρήγορη και καλύτερη συγκόλληση μεταξύ τους.

1.8 Εφαρμογές της τριδιάστατης εκτύπωσης

Ο τριδιάστατος εκτυπωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές και η βοήθεια που προσφέρει είναι πολύ σημαντική και αξιοσημείωτη. Σε πολλές χώρες του εξωτερικού η συγκεκριμένη μορφή εκτύπωσης έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον ενός μεγάλου ποσοστού πολιτών με αποτέλεσμα οι αρχές του να βρίσκουν σημείο εφαρμογής και στην καθημερινή ζωή.

1. Τέχνη:

Με τριδιάστατο σχεδιασμό δουλεύουν πια πολλοί καλλιτέχνες στο χώρο της γλυπτικής, χρυσοχοΐας, animation και διαδραστικής τέχνης. Στην παρακάτω εικόνα 1.7 παρατίθεται ένα έργο τέχνης κατασκευασμένο εξ' ολοκλήρου από τριδιάστατο εκτυπωτή.



Εικόνα 1.7: Τριδιάστατα εκτυπωμένη προτομή του βιετναμέζου γλύπτη Duong Le Thai

2. Ιατρική:

Πολλοί χειρουργοί σχεδιάζουν και εκτυπώνουν μέρη του σώματος είτε για να προετοιμαστούν για διάφορες πολύπλοκες εγχειρήσεις είτε για να τα χρησιμοποιήσουν ως τεχνητά μέλη σε ανθρώπους που είχαν κάποιο σοβαρό ατύχημα. Η νέα διαδικασία "εκτύπωσης" (αναπαραγωγής) ενός οστού περιλαμβάνει μια σειρά από βήματα. Αρχικά

χρειάζεται μια τριδιάστατη εικόνα του οστού, το οποίο πρέπει να αντικατασταθεί. Αν ένα οστό έχει χαθεί τελείως ή καταστραφεί σοβαρά, τότε δημιουργείται το αντίγραφο από το αντίστοιχο οστό στην άλλη πλευρά του σώματος. Η εικόνα στη συνέχεια τροφοδοτείται σε τριδιάστατο εκτυπωτή ψεκασμού, ο οποίος εναποθέτει διαδοχικά λεπτά στρώματα από ένα προκαθορισμένο υλικό, το ένα πάνω στο άλλο, μέχρι που να υλοποιηθεί ένα τριδιάστατο αντικείμενο ("σκελετός") του οστού. Το ίδιο σκεπτικό εφαρμόζεται και στην περίπτωση εκτύπωσης χόνδρου. Ένα εντυπωσιακό παράδειγμα είναι η επιτυχής (καλοκαίρι του 2011) μεταμόσχευση εμφυτεύματος κάτω σιαγόνας.¹⁹ Το εμφύτευμα φτιάχτηκε από σκόνη τιτανίου. Το υλικό θερμάνθηκε από λέιζερ και «έχτισε» τη σιαγόνα στρώμα-στρώμα με χρήση 3d εκτυπωτή σε λίγες μόνο ώρες. Η μεταμόσχευση διήρκεσε τέσσερις ώρες (το 1/5 του κλασσικού χρόνου) και έγινε αφού το μόσχευμα καλύφθηκε με ένα ειδικό βιοκεραμικό στρώμα. Απώτερος στόχος είναι η τριδιάστατη εκτύπωση ολόκληρων οργάνων τα οποία στη συνέχεια θα μεταμοσχεύονται στο ανθρώπινο σώμα.

Στην εικόνα 1.8 απεικονίζεται ένα τριδιάστατο εκτυπωμένο προσθετικό άνω άκρο.



Εικόνα 1.8: Τεχνητό χέρι κατασκευασμένο με τη χρήση τριδιάστατου εκτυπωτή³⁹

3. Αρχιτεκτονική:

Μεγάλα αρχιτεκτονικά γραφεία (π.χ. Foster and Partners) παρακολουθούν στενά την έρευνα που πραγματοποιείται στην παρασκευή τιμέντου με 3D printing.²⁰ Ήδη έχει παραχθεί ένα κομμάτι, υποδηλώνοντας την πρόθεση και το ύψος της προσέγγισης στο θέμα. Ο τελικός στόχος είναι να επιτευχθεί η εκτύπωση σε διαστάσεις 2m x 2.5m x 5m μέτρα. Αν κάτι τέτοιο επιτευχθεί τότε δεν θα απέχουμε να μιλάμε για μια γκαρσονιέρα 4 x 5 μέτρα ή και παραπάνω. Όλο αυτό σημαίνει πως θα υπάρχει φτηνή και γρήγορη παραγωγή σπιτιών, κάτι το οποίο μπορεί να λύσει πολλά από τα προβλήματα στέγασης σε ολόκληρο το κόσμο, αλλά και να φέρει μια νέα εποχή στις κατασκευές.



Εικόνα 1.9: Τριδιάστατα εκτυπωμένα γέφυρα από ατσάλι στο Άμστερνταμ⁴⁰

4. Κατασκευή πρωτοτύπων:

Προσφέρεται η δυνατότητα δημιουργίας δοκιμαστικών μοντέλων προτού γίνει η επένδυση για τα τελικά προϊόντα (π.χ. αυτοκίνητα, αεροσκάφη, τεχνολογικά αντικείμενα πάσης φύσεως, ακουστικά βαρηκοΐας, κοσμήματα, διάφορες φιγούρες παιχνιδιών και πολλά άλλα).

5. Ανακατασκευή τόπων εγκλημάτων:

Η αναπαράσταση των γεγονότων κατά τη διάρκεια ενός εγκλήματος δίνει την δυνατότητα στους εγκληματολόγους να μελετήσουν την υπόθεση με περισσότερη λεπτομέρεια και άνεση ώστε να καταλήξουν στο αποτέλεσμα που θέλουν.

6. Επαναχρησιμοποίηση υλικών :

Οι τριδιάστατοι εκτυπωτές έχουν άλλο ένα σημαντικό προτέρημα σε σχέση με τους συνηθισμένους εκτυπωτές. Είναι ικανοί να επαναχρησιμοποιούν «άχρηστα» υλικά ή ακόμα και βιοδιασπώμενα υλικά συμβάλλοντας στην ανακύκλωση και στην προστασία του περιβάλλοντος.

1.9 O Zmorph personal fabricator 2.0

Για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση δοκιμών εφελκυσμού ο Zmorph 2.0 S, ένας καινοτόμος εκτυπωτής για μικρής κλίμακας εκτυπώσεις, ικανός να χρησιμοποιήσει πολλές τεχνικές τριδιάστατης εκτύπωσης και είναι συμβατός με όλων των τύπων τα πλαστικά που διατίθενται στην αγορά για τριδιάστατη εκτύπωση, καθώς ακόμη και τα κεραμικά, και μίγματα υλικών.

Μέσω της χρήσης του λογισμικού , Voxelizer 3D , ο Zmorph 2.0 S είναι σε θέση να επεξεργαστεί το αντικείμενο εκτύπωσης χρησιμοποιώντας την τεχνική voxelization , όπου τα μοντέλα αναπαριστούνται ως 3d - pixels και όχι ως τριγωνικά πλέγματα , όπως γίνεται στα περισσότερα άλλα προγράμματα . Αυτό επιτρέπει λειτουργίες και εκτυπώσεις που δεν είναι δυνατόν να γίνουν με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η άμεση συμβατότητα του εκτυπωτή με μαγνητικούς τομογράφους, κάτι το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην Ερευνητική Ιατρική.

Ο τριδιάστατος εκτυπωτής Zmorph 2.0 S εφαρμόζει τις αρχές της Ελεγχόμενης Εναπόθεσης Τήγματος (Fused Filament Fabrication - FFF) θερμοπλαστικών υλικών για τη δημιουργία φυσικών αντικειμένων, τα οποία σχηματίζονται μέσω της πρόσθεσης διαδοχικών στρώσεων υλικού πάχους μερικών μm. Η μέθοδος αυτή υπερτερεί των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής, επιτυγχάνοντας περίπλοκες γεωμετρίες και συστάσεις που ως τώρα συναντούσαμε μόνο στη φύση. Επιπλέον, μπορεί να παράξει πλήρως λειτουργικά αντικείμενα, που δεν απαιτούν συναρμολόγηση, σε μια ενιαία διαδικασία κατασκευής. Ο σχεδιασμός του αντικειμένου γίνεται με τη βοήθεια του Η/Υ και στη συνέχεια το αντικείμενο διακριτοποιείται σε ογκο-μετρικά στοιχεία (voxels), από το λογισμικό που ελέγχει τον εκτυπωτή. Τα voxels σε συνδυασμό με την τριδιάστατη εκτύπωση δίνουν τη δυνατότητα ελέγχου της σύστασης και της πυκνότητας σε κάθε σημείο του αντικειμένου κι έτσι μπορούμε να το «προγραμματίσουμε» ώστε να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες και συμπεριφορά σε εξωτερικά ερεθίσματα (programmable matter).

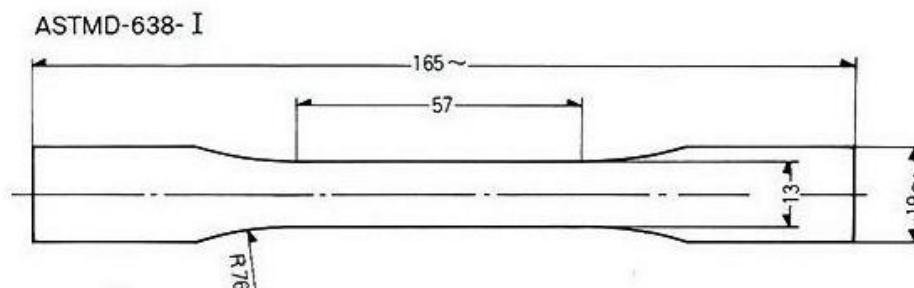
Πέρα από την τριδιάστατη εκτύπωση θερμοπλαστικών, η ύπαρξη εναλασσόμενων κεφαλών μετατρέπει τον εκτυπωτή σε μια ευέλικτη CNC εργαλειομηχανή, με δυνατότητα κοπής και εγχάραξης με laser, φρεζαρίσματος και διάτρησης με πολυεργαλείο Dremel, αλλά και βιο-εκτύπωσης με σύριγγα για την παρασκευή ικριωμάτων και εμφυτεύσιμων υλικών ελεγχόμενου πορώδους²¹.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Η επίδραση των παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες

2.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων τριδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει όμως μόνο ακολουθώντας πρότυπες διαδικασίες υπολογισμού των μηχανικών ιδιοτήτων. Για το σκοπό αυτό, αποφασίστηκε να εκτυπωθούν δοκίμια για κάθε υλικό ξεχωριστά και έπειτα να υποβληθούν σε δοκιμή εφελκυσμού (Tensile Test). Η επιλογή του κατάλληλου πρότυπου δοκιμίου αποτέλεσε ένα από τα δυσκολότερα σημεία στην παρούσα έρευνα, καθώς όλα τα πρότυπα δοκίμια για εφελκυσμό θερμοπλαστικών που έχουν σχεδιαστεί μέχρι στιγμής (είτε κατά ISO είτε κατά ASTM) απευθύνονταν σε δοκίμια κατασκευασμένα με injection molding, θερμοσυμπίεση κ.τ.λ. και όχι για τριδιάστατα εκτυπωμένα. Έτσι λοιπόν, έπρεπε να γίνει μία σειρά δοκιμών και εκτυπώσεων για την εύρεση του κατάλληλου προτύπου, το οποίο δε θα παρουσιάζε προβλήματα και ατέλειες στην εκτύπωση, καθώς έτσι θα ήταν αναξιόπιστα τα δεδομένα που θα λαμβάναμε κατά τη δοκιμή εφελκυσμού. Χαρακτηριστικά, εξετάστηκαν αρχικά τρία πρότυπα, τα πρότυπα για δοκίμια εφελκυσμού θερμοπλαστικών 527A και 527B κατά ISO και το πρότυπο D638_IV κατά ASTM. Για όλα αυτά τα πρότυπα όμως, παρουσιάστηκαν σφάλματα και ατέλειες κατά την εκτύπωση, όπως κυρίως σκέβρωση (warping) και διαχωρισμός των στρώσεων και σχισμές (Layer Separation and Splitting). Αποτέλεσε πρόκληση η εύρεση του κατάλληλου προτύπου που θα οδηγούσε σε ασφαλή συμπεράσματα και αυτό διότι είναι αρκετά δύσκολο να προβλέψει κανείς τη «συμβατότητα» των προτύπων αρχείων CAD των δοκιμών με τον εκτυπωτή και το λογισμικό του. Έγιναν πολλές προσπάθειες να βελτιωθούν τα παραπάνω εκτυπωμένα πρότυπα δοκίμια κυρίως αλλάζοντας διάφορες μεταβλητές της εκτύπωσης, όπως παραδείγματος χάριν η ταχύτητα εκτύπωσης (Printing Speed), ο αριθμός εξωτερικών κελύφων (Number of Shells) και η ψύξη του ανεμιστήρα (fan speed). Παρόλ' αυτά όμως, δεν καταφέραμε να βελτιώσουμε τις εκτυπώσεις για αυτά τα πρότυπα.

Τελικά, μετά από αρκετή έρευνα, καταλήξαμε στο πρότυπο D638_I κατά ASTM²², το οποίο με μικρές αλλαγές στις παραμέτρους της εκτύπωσης, μας έδωσε σχεδόν άριστες εκτυπώσεις τόσο από εμφανισιακή άποψη (καθόλου ατέλειες) όσο και στην επαναληψιμότητα. Έτσι, εκτυπώθηκαν επιτυχώς συνολικά 18 δοκίμια, 9 με το υλικό PLA και 9 με το υλικό CarbonFil™. Για την επιλογή των παραμέτρων της εκτύπωσης που επιλέχθηκαν να εξεταστούν και άρα το λόγο που εκτυπώθηκαν 9+9 δοκίμια, θα γίνει εκτενής αναφορά παρακάτω. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι διαστάσεις του εν λόγω δοκιμίου.



Εικόνα 2.1: Το πρότυπο δοκίμιο D638_I κατά ASTM και οι διαστάσεις του⁴¹

Η τριδιάστατη εκτύπωση, όντας μία σχετικά καινούρια τεχνολογία, υστερεί σημαντικά σε βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες εκτυπωμένων αντικειμένων. Τα περισσότερα δημοσιευμένα άρθρα και εργασίες σχετικά με το «3d printing» δεν αναλώνονται ιδιαίτερα στο κομμάτι της Μηχανικής, παρά μόνο σε συγκεκριμένα πεδία εφαρμογής όπως η Βιοϊατρική παραδείγματος χάριν. Έχοντας λοιπόν ελάχιστο υλικό για βιβλιογραφική έρευνα ως προς τις μηχανικές ιδιότητες, αποτέλεσε πρόκληση η έρευνα και η εξέτασή τους, κάτι που σηματοδότησε ουσιαστικά το σημαντικότερο κίνητρο για να γίνει η παρούσα εργασία.

Παράλληλα, όμως, λόγω της ελλιπούς βιβλιογραφίας, ήταν αρκετά απαιτητική η διερεύνηση, πρόβλεψη και συγγραφή του θεωρητικού μέρους της Μηχανικής των εκτυπωμένων αντικείμενων. Καταλαβαίνει κανείς συνεπώς, πόσο πιο «εύκολα» θα μπορούσαμε να περιγράψουμε τις μηχανικές ιδιότητες συμπαγών –μη τριδιάστατα εκτυπωμένων– αντικείμενων, λόγω της χρόνιας ενασχόλησης επιστημόνων σχετικά και κατά συνέπεια του τεράστιου εύρους βιβλιογραφίας που υπάρχει εδώ και πολλά χρόνια και συνεχίζει να αναπτύσσεται.

Έτσι, στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει μία προσπάθεια πρόβλεψης των μηχανικών ιδιοτήτων εκτυπωμένων αντικείμενων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη βιβλιογραφία σχετικά με τα συμπαγή αντικείμενα αλλά συγχρόνως και τις σημαντικές διαφορές σε σύγκριση με τα τριδιάστατα εκτυπωμένα αντικείμενα. Η διερεύνηση που έγινε δηλαδή, βασίζεται στα ήδη γνωστά στοιχεία της Μηχανικής, προσαρμοσμένα στις ιδιαιτερότητες και διαφορές των «3d printed» αντικείμενων.

2.2 Μηχανικές ιδιότητες που θα εξεταστούν

1. Μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Ultimate Tensile Strength)

Είναι η τιμή της τάσης, η οποία αντιστοιχεί στο μέγιστο της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης και πρόκειται ουσιαστικά για το λόγο της μέγιστης τιμής του φορτίου P_{max} προς την αρχική διατομή του δοκιμίου A_0 . Συμβολίζεται συνήθως ως « σ_u »:

$$\sigma_u = P_{max} / A_0$$

Κατά τη διάρκεια του πειράματος του εφελκυσμού, ο όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός και κάθε επιμήκυνση συνοδεύεται από τη μείωση της διατομής του δοκιμίου, διατηρώντας σταθερό τον όγκο του. Κατά την εφελκυστική παραμόρφωση του δοκιμίου, η συνολική αντοχή του υλικού επηρεάζεται από δύο ανταγωνιστικά φαινόμενα. Πρώτον, τη μείωση της διατομής του δοκιμίου, με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής του και δεύτερον την ενδοτράχυνση που προκύπτει λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης του δοκιμίου, η οποία και αυξάνει την αντοχή του δοκιμίου. Τα δύο αυτά φαινόμενα εμφανίζονται ταυτοχρόνως σε όλο το εύρος της πλαστικής παραμόρφωσης του δοκιμίου, όπου κατά την περιοχή από το όριο διαρροής έως τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, επικρατεί η ενδοτράχυνση του δοκιμίου, έναντι της μείωσης της διατομής, ενώ εν συνεχεία, μεταξύ της μέγιστης αντοχής και της τάσης θραύσης του υλικού, η μείωση της διατομής αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Στο σημείο της μέγιστης τάσης εμφανίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η επιμήκυνση και η ταυτόχρονη μείωση της διατομής να μην διανέμονται ομοιόμορφα σε όλο το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας έντονης εγκάρσιας στένωσης, η οποία ονομάζεται λαιμός. Τέλος, από το μαθηματικό ορισμό της μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό, προκύπτει ότι οι μονάδες μέτρησής του είναι N/m^2 .

2. Μέγιστη επιμήκυνση (Max elongation)

Πρόκειται για τη μέγιστη επιμήκυνση (%) που μπορεί να υποστεί το δοκίμιο ακριβώς πριν την εμφάνιση των πρώτων ρωγμών, δηλαδή πριν την έναρξη της θραύσης (fracture). Αναφέρεται στην ποσοστιαία επιμήκυνση ή επιβράχυνση του καταπονημένου δοκιμίου και είναι αδιάστατο μέγεθος. Ταύτιζεται στην καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης με το σημείο όπου βρίσκεται και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό. Είναι μία πολύ χρηστική μηχανική ιδιότητα, που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, λόγω της μεγάλης σημασίας της για το σχεδιασμό διαφόρων μεγάλων εφαρμογών της τριδιάστατης εκτύπωσης. Είναι πολύ σημαντικό, μία «γερή» κατασκευή να έχει υψηλή τιμή μέγιστης επιμήκυνσης, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλειά της.

3. Όριο διαρροής (Yield strength)

Μετά από κάποια τιμή της τάσης, αρχίζει όπως προαναφέρθηκε, η πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου ή αλλιώς η διαρροή του υλικού. Για τα περισσότερα υλικά υπάρχει μία προσδευτική μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική συμπεριφορά αλλά γενικών είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια το σημείο της εν λόγω μετάβασης. Προσεγγιστικά, χρησιμοποιείται το όριο διαρροής για τον προσδιορισμό του σημείου έναρξης της διαρροής του υλικού. Το όριο διαρροής είναι η τάση πέραν της οποίας η υφιστάμενη παραμόρφωση του δοκιμίου (προφανώς νοείται η πλαστική παραμόρφωση) είναι μόνιμη²³. Καλύτερα, μπορούμε να πούμε πως πρόκειται για την τάση που απαιτείται για να παραχθεί μία προσδιορισμένη, μικρή, ποσότητα πλαστικής παραμόρφωσης. Γι' αυτό το συμβατικό όριο διαρροής χρησιμοποιείται ο όρος «yield strength» αντί του «yield point», που αντιστοιχεί στο σημείο διαρροής και όχι στην τάση. Τέλος, το όριο διαρροής δεν είναι πάντα ορατό στα διαγράμματα εφελκυσμού και είναι ιδιαίτερα δυσδιάκριτο στα όλκιμα υλικά. Το όριο διαρροής είναι το πρώτο σημείο σε ένα διάγραμμα εφελκυσμού όπου έχουμε αύξηση της επιμήκυνσης χωρίς αύξηση τάσης.

4. Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus)

Το μέτρο ελαστικότητας είναι ουσιαστικά ένα μέτρο της στιβαρότητας ενός ελαστικού στερεού. Ορίζεται ως ο λόγος της μονοαξονικής τάσης προς τη μονοαξονική παραμόρφωση στο πεδίο τάσεων για το οποίο ισχύει ο νόμος Hooke. Το μέτρο του Young υπολογίζεται πειραματικά με την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος μέχρι το όριο αναλογίας. Είναι δηλαδή το πηλίκο $E = \frac{\text{Τάση αναλογίας}}{\text{Ανηγμένη παραμόρφωση}}$ και αποδίδει την ευκολία με την οποία ένα υλικό παραμορφώνεται εντός της ελαστικής του περιοχής²⁴. Το μέτρο ελαστικότητας έχει μονάδες μέτρησης N/m².

5. Αντοχή σε θραύση (Stress at Fracture)

Πρόκειται για την μέγιστη αντοχή του δοκιμίου τη στιγμή της θραύσης. Έχει μονάδες μέτρησης N/m² και αποτελεί μία εξίσου σημαντική μηχανική ιδιότητα, καθώς προσδιορίζει τη μέγιστη τάση που μπορεί να ασκηθεί σε ένα αντικείμενο μέχρι αυτό να σπάσει τελείως κατά τον εφελκυσμό. Στην περίπτωση του εφελκυσμού του δοκιμίου, αποτυπώνει την τάση κατά την οποία τα δύο άκρα του δοκιμίου διαχωρίζονται τελείως (ολική θραύση). Εύκολα συμπεραίνουμε λοιπόν, πόσο πολύτιμη είναι αυτή η ιδιότητα για το σχεδιασμό των εκτυπώσεων μας όταν πρόκειται για εφαρμογές που απαιτείται ασφάλεια και αντοχή στην επιμήκυνση (π.χ. τριδιάστατα εκτυπωμένες γέφυρες).

2.3 Επιλογή κρίσιμων παραμέτρων που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες

2.3.1 Οι ανεξάρτητες παράμετροι

Με τον όρο «ανεξάρτητη» νοείται κάθε παράμετρος της εκτύπωσης που δεν επηρεάζει τις τελικές μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου. Παράλληλα, οι ανεξάρτητες παράμετροι παραμένουν σταθερές για όλες τις εκτυπώσεις που έγιναν και για τα δύο υλικά. Πρόκειται ουσιαστικά για παραμέτρους που δεν έχουν σχέση με τη δομή του αντικειμένου, αλλά σηματοδοτούν τη λειτουργία του εκτυπωτή. Παρακάτω συνοψίζονται οι ανεξάρτητες παράμετροι:

1. Ταχύτητα κίνησης (Movement Speed):

Η ταχύτητα κίνησης της κεφαλής είναι, όπως προαναφέρθηκε, η ταχύτητα με την οποία κινείται η κεφαλή του εκτυπωτή όταν δεν εκτυπώνεται υλικό. Η παράμετρος αυτή δεν επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών.

2. Ταχύτητα ανάκλισης (retraction speed):

Η ταχύτητα ανάκλισης (retraction), δηλαδή το πόσο γρήγορα ο εκβολέας «τραβάει» το υλικό, έτσι ώστε να μην εκτυπώνει σε συγκεκριμένες «διαδρομές» της εκτύπωσης που δεν απαιτείται υλικό, αποτελεί επίσης μία ανεξάρτητη παράμετρο. Και αυτό επειδή η ανάκλιση γίνεται ουσιαστικά σε «νεκρό» χρόνο, κατά τον οποίο δεν εκτυπώνεται υλικό αλλά παρ' όλα αυτά η κεφαλή συνεχίζει να κινείται προς το επόμενο σημείο όπου θα εναποτεθεί υλικό. Δεν επηρεάζει σημαντικά τη συνολική διαδικασία της εκτύπωσης, ούτε τις μηχανικές ιδιότητες. Πρόκειται καθαρά για μία λειτουργική παράμετρο, η οποία μπορεί να επηρεάσει μόνο μεγάλου μεγέθους εκτυπώσεις (και κυρίως εκτυπώσεις με μεγάλο ύψος και απότομες γεωμετρικές εναλλαγές). Στην δικιά μας περίπτωση, το δοκίμιο είναι αρκετά μικρό και δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα ανάκλισης.

3. Χρώμα υλικού:

Παρ' όλο που δεν υπήρξε εκτύπωση στα πλαίσια της εργασίας με διαφορετικά χρώματα του ίδιου υλικού, βιβλιογραφικά, το χρώμα του υλικού δεν επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες της εκτύπωσης. Παραδείγματος χάριν, εάν εκτυπωθεί ένα δοκίμιο με PLA χρώματος μαύρου και ένα δοκίμιο με PLA χρώματος κίτρινου, εάν όλες οι υπόλοιπες παράμετροι είναι ίδιες και στις δύο εκτυπώσεις, τότε και τα δύο δοκίμια αναμένεται να έχουν ακριβώς τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες.

2.3.2 Οι παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες

Πρόκειται για τις παραμέτρους που έχουν άμεση επίδραση στις τελικές μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου. Οι παράμετροι αυτές καθώς και η εξήγηση του λόγου της επιρροής τους στις μηχανικές ιδιότητες αναλύονται παρακάτω:

1. Ποσοστό πλήρωσης (Infill %):

Όπως προαναφέρθηκε, το ποσοστό πλήρωσης (Infill %) είναι μία τιμή που αντανακλά το ποσοστό πλήρωσης του χώρου μέσα στον αντικείμενο που πρόκειται να εκτυπωθεί. Δείχνει ουσιαστικά πόσο συμπαγές είναι το αντικείμενο. Εύκολα διαπιστώνει κανείς, πώς όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου, τόσο πιο μεγάλη αντοχή σε κρούση θα έχει. Όσον αφορά τον εφελκυσμό, πάλι, όσο πιο συμπαγές είναι το αντικείμενο, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η τιμή της αντοχής σε εφελκυσμό (Ultimate tensile strength). Παράλληλα, η θράυση (Fracture) θα γίνεται πολύ αργότερα για ένα αντικείμενο με μεγάλο ποσοστό πλήρωσης σε σχέση με το ίδιο αντικείμενο με μικρό ποσοστό πλήρωσης. Επίσης το όριο διαρροής (Yield strength) αναμένεται επίσης να είναι μεγαλύτερο όσο αυξάνεται το ποσοστό πλήρωσης και αυτό διότι η τάση η οποία απαιτείται για να παραχθεί μία μικρή έστω πλαστική παραμόρφωση, παίρνει μεγαλύτερες τιμές για περισσότερο συμπαγή αντικείμενα.²⁵

Τέλος, όσον αφορά τη μέγιστη επιμήκυνση (max elongation at break), επίσης αναμένεται να είναι μεγαλύτερη για υψηλότερες τιμές της εν λόγω παραμέτρου. Αυτό εξηγείται από τη συμπαγότητα του αντικειμένου: Μικρότερη συμπαγότητα (δηλαδή μικρότερο ποσοστό πλήρωσης) σημαίνει περισσότερους πόρους στο «σώμα» του δοκιμίου και άρα οι τάσεις που θα ασκούνται κατά τον εφελκυσμό θα παραμορφώνουν και θα επιμηκύνουν πολύ πιο «εύκολα» το αντικείμενο συγκριτικά με ένα πολύ συμπαγές.

2. Αριθμός εξωτερικών κελύφων (Number of Shells):

Όσον αφορά τον αριθμό των εξωτερικών κελύφων του δοκιμίου, ισχύουν τα ίδια με το ποσοστό πλήρωσης για τις τιμές της αντοχής σε εφελκυσμό, της θράυσης, του ορίου διαρροής και της μέγιστης επιμήκυνσης κατά τον εφελκυσμό, για τελείως διαφορετικούς λόγους όμως. Ενώ στο ποσοστό πλήρωσης αναφέρθηκε η άμεση συσχέτιση με τη συμπαγότητα του υλικού, στην περίπτωση αυτή των εξωτερικών κελύφων, η συμπαγότητα δεν παίζει κανένα ρόλο διότι δεν επηρεάζεται από την τιμή τους. Αντίθετα, ο αριθμός των εξωτερικών κελύφων έχει να κάνει με την πλήρωση του χώρου στις εξωτερικές γραμμές του αντικειμένου και όχι στο κυρίως «σώμα». Η τιμή του αριθμού αυτού αντανακλά ουσιαστικά την ενίσχυση του περιγράμματος του αντικειμένου. Οι τάσεις-δυνάμεις που ασκούνται στο τριδιάστατο εκτυπωμένο δοκίμιο κατά τον εφελκυσμό, μπορούμε να πούμε ότι διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Στις τάσεις που ασκούνται στο «σώμα» και σε αυτές που ασκούνται στο περίγραμμα.

Τέλος, είναι εξίσου σημαντικό να αναφερθεί, πως η παράμετρος αυτή παίζει τεράστιο ρόλο για το σημείο θραύσης (Fracture ή Stress at Fracture) καθώς για την επιμήκυνση στη θραύση. Σε αντίθεση με τις άλλες μηχανικές ιδιότητες, η θραύση επηρεάζεται έντονα

από τον αριθμό εξωτερικών κελύφων, καθώς τα εξωτερικά κελύφη είναι σχεδόν πάντα πολύ πιο συμπαγή από το «σώμα». Αυτό οδηγεί στο εξής φαινόμενο: Ενώ όλο το εσωτερικό «σώμα» του δοκιμίου μπορεί να έχει ήδη υποστεί θραύση σε κάποιο σημείο, παρατηρείται ότι για τη θραύση των εξωτερικών κελύφων απαιτείται περισσότερη τάση. Σχηματίζονται έτσι ιστοί μεταξύ των δύο πλευρών του δοκιμίου που έχουν αποσχιστεί στα σημεία του περιγράμματος, ενώ παράλληλα το κυρίως (εσωτερικό) σώμα έχει υποστεί πλήρη θραύση. Άρα καταλήγοντας, ο αριθμός των εξωτερικών κελύφων επιρεάζει σημαντικά το σημείο θραύσης.

3. Θερμοκρασία εκβολέα (Extruder Temperature):

Σε αντίθεση με την θερμοκρασία της επιφάνειας εκτύπωσης, όπως θα αναλυθεί παρακάτω, η επίδραση της θερμοκρασίας του εκβολέα δεν μελετήθηκε στα πειράματα που έγιναν και επιλέχθηκε η τιμή που προτείνεται από τον κατασκευαστή του υλικού. Παρόλ' αυτά η θερμοκρασία εκβολέα παίζει καθοριστικό ρόλο στις διατμητικές τάσεις κατά την εξώθηση και στις ιδιότητες του υλικού και της FFF δομής.

4. Ύψος στρώσης (Layer Height):

Το ύψος στρώσης αντανακλά το πόσο ψηλή θα είναι η κάθε ίνα. Για δεδομένο δοκίμιο, αυτό έχει διπλή σημασία. Αρχικώς, όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της παραμέτρου τόσο πιο χοντρές (σε ύψος) και άρα πιο «σκληρές» με την έννοια της αντοχής θα είναι οι στρώσεις. Από την άλλη πλευρά όμως, όσο πιο μεγάλο είναι το ύψος στρώσης, τόσο λιγότερες στρώσεις απαιτούνται για την πλήρη εκτύπωση του αντικειμένου, δεδομένου ότι ερευνούμε ένα συγκεκριμένο δοκίμιο σταθερών διαστάσεων. Έτσι λοιπόν, καταλήγουμε σε ένα αμφιλεγόμενο συμπέρασμα όσον αφορά την επιρροή της παραμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες. Επειδή αύξηση του ύψους στρώσης σημαίνει ταυτόχρονα αύξηση της αντοχής κάθε ξεχωριστής στρώσης αλλά και μείωση της αντοχής του συνολικού «σώματος» λόγω της μείωσης του αριθμού των στρώσεων. Σαφώς βέβαια, στη «μάχη» αυτή μεταξύ αύξησης και μείωσης της αντοχής, υπερτερεί σημαντικά η αύξηση της αντοχής.^{23,26} Αυτό εξηγείται λόγω της μεγαλύτερης επιρροής που μπορεί να ασκήσει το ύψος κάθε στρώσης στις μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τον αριθμό των συνολικών στρώσεων, εφ' όσον διερευνούμε όπως είπαμε ένα δοκίμιο με 20 περίπου στρώσεις. Μία αύξηση του ύψους στρώσης κατά 0,1 mm, μειώνει τον αριθμό των στρώσεων σε 10. Αύξηση της τάξης του 0,1 mm είναι σχετικά μεγάλη και προσδίδει πολύ καλύτερη σκληρότητα και ακαμψία στο αντικείμενο, σε σημείο να είναι αμελητέα η μεταβολή του συνολικού αριθμού στρώσεων. Όλα τα παραπάνω προκύπτουν από το πειραματικό μέρος της παρούσης εργασίας, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

5. Πάχος γραμμών (path width):

Πρόκειται για μία παράμετρο εξίσου σημαντική με το ποσοστό πλήρωσης όσον αφορά την επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες. Το πάχος γραμμών ορίζει πόσο «χοντρή» θα είναι

η κάθε γραμμή κάθε στρώσης και εύκολα συμπεραίνει κανείς, πως η συγκεκριμένη παράμετρος έχει άμεση συσχέτιση με τη συμπαγότητα του αντικειμένου. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή της, τόσο πιο κοντά βρίσκονται οι γραμμές κάθε στρώσης και άρα τόσο λιγότεροι πόροι υπάρχουν. Πιο συγκεκριμένα, μία αύξηση της παραμέτρου αυτής κατά 0.1 mm θα προσδώσει πιο παχές γραμμές σε κάθε στρώση. Κάτι τέτοιο καθιστά το αντικείμενο πιο ανεκτικό σε τάσεις κάθε μορφής, καθώς αυτές θα πρέπει να κατανεμηθούν πλέον σε ολοένα και μεγαλύτερο χώρο.²⁴

Οι επιπτώσεις μίας αύξησης ή μείωσης της τιμής του πάχους γραμμών στις μηχανικές ιδιότητες συμπίπτουν με αυτές του ποσοστού πλήρωσης. Πρόκειται για μία ευαίσθητη παράμετρο, όπου κάθε μικρή αλλαγή της μπορεί να δώσει τελείως διαφορετικά αποτελέσματα κατά τη δοκιμή εφελκυσμού.

6. Ταχύτητα εκτύπωσης (Printing Speed):

Η ταχύτητα εκτύπωσης επηρεάζει ελάχιστα έως και καθόλου τις μηχανικές ιδιότητες, εφ' όσον η τιμή της κυμαίνεται στα προτεινόμενα πλαίσια (15 mm/s – 120 mm/s). Γενικώς, η ταχύτητα εκτύπωσης έχει τεράστια σημασία για το πόσο καλά θα συγκολληθούν οι στρώσεις μεταξύ τους και το εάν θα εμφανιστούν ανεπιθύμητα φαινόμενα κατά την εκτύπωση. Όλα τα παραπάνω θα έχουν τεράστια επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου, μόνο όμως στην περίπτωση που η τιμή της ταχύτητας εκτύπωσης αποκλίνει σημαντικά από το σύνηθες και συνιστώμενο εύρος της. Μέσα στα πλαίσια μίας επιτυχημένης εκτύπωσης, η ταχύτητα εκτύπωσης δεν μπορεί παρά να βρίσκεται στα συνιστώμενα αυτά εύρη τιμών και άρα να επιτυγχάνεται η ορθή συγκόλληση των στρώσεων και η απουσία εμφάνισης προβλημάτων. Συγκαταλέγεται στις παραμέτρους που δύναται να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες, καθώς μία πιθανή μεγάλη απόκλιση της τιμής της μπορεί να επιφέρει αρχικά αποτυχημένες εκτυπώσεις και κατ' επέκτασιν αναξιόπιστα δεδομένα σε μία δοκιμή εφελκυσμού. Όσον αφορά πολύ υψηλές ταχύτητες εκτύπωσης, μπορούμε να πούμε πως αυτές επιφέρουν κακή συγκόλληση μεταξύ των στρώσεων και άρα ασθενοποίηση της αντοχής του αντικειμένου σε τάσεις.

7. Θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης (Printbed Temperature):

Όσον αφορά τη θερμοκρασία επιφάνειας, μπορούμε να πούμε ότι παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τις μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου. Είναι σημαντικό η θερμοκρασία που έχει η επιφάνεια εκτύπωσης να βρίσκεται κοντά στη θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης του πολυμερούς ώστε να γίνεται ομαλή ψύξη των ινών Αυτό βοηθά στην καλύτερη συγκόλληση των στρώσεων και στην αποφυγή στρεβλώσεων. Αποκλίσεις από την ιδανική τιμή της παραμέτρου αυτής (που βρίσκεται μετά από ειδικά πειράματα εκτύπωσης), μπορεί να επιφέρουν κακή συγκόλληση των στρώσεων μεταξύ τους έχοντας άμεσο αντίκτυπο στα δεδομένα που θα ληφθούν από τη δοκιμή εφελκυσμού. Παρ' όλα αυτά όμως, δεν μπορούμε να προβλέψουμε ακριβώς την αλλαγή της μηχανικής συμπεριφοράς του αντικειμένου λόγω αλλαγών στη θερμοκρασία της επιφάνειας, καθώς πρόκειται για μία παράμετρο με πολυδιάστατες επιπτώσεις στις

μηχανικές ιδιότητες τόσο κατά την αύξηση όσο και κατά τη μείωσή της. Για την πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς ενός τριδιάστατα εκτυπωμένου αντικειμένου υπό τις αλλαγές στην τιμή της θερμοκρασίας επιφάνειας απαιτείται ειδική έρευνα με άλλου είδους πολλαπλά πειράματα, κάτι το οποίο ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσης εργασίας.

8. Γωνία εκτύπωσης-προσανατολισμός (Raster angle ή Infill angle):

Με τον όρο αυτό νοείται εδώ η γωνία περιστροφής του κάθετου πλέγματος στο επίπεδο XY, δηλαδή γύρω από τον άξονα Z. Η γωνία περιστροφής αποτελεί ίσως την πιο σημαντική παράμετρο της τριδιάστατης εκτύπωσης όσον αφορά την επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες. Καθώς πρόκειται για τη γωνία που σχηματίζουν οι γραμμές εναποθετημένου υλικού με τις γραμμές της επόμενης στρώσης, καταλαβαίνει κανείς πόσο διαφορετικές μπορεί να είναι οι τάσεις που ασκούνται σε ένα αντικείμενο με προσανατολισμό 0° και σε ένα πανομοιότυπο με προσανατολισμό 75° . Όπως γνωρίζουμε από τις βασικές αρχές της Φυσικής, η τιμή μίας δύναμης που θα ασκηθεί σε ένα σώμα, εξαρτάται σημαντικά από τη γωνία που σχηματίζει η δύναμη και το σώμα. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με τον εφελκυσμό. Οι τάσεις μέσα στο σώμα του δοκιμίου κατανέμονται πολύ διαφορετικά ανάλογα με τον προσανατολισμό των γραμμών υλικού μέσα στο «σώμα» του δοκιμίου, όπως επίσης και η επιμίκυνση που μπορεί να επιβληθεί.²⁴ Είναι αδύνατο προς το παρόν να προβλέψουμε την ακριβή αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων υπό την αλλαγή της γωνίας εκτύπωσης, αλλά σίγουρα μπορούν να γίνουν οι εξείς υποθέσεις^{24,27}:

- Εάν σε ένα σώμα ασκηθεί μία πλευρική δύναμη (άρα για όλες τις γωνίες εκτύπωσης εκτός της 0°), τότε η συνολική συνισταμένη των δυνάμεων θα είναι μικρότερη συγκριτικά με την κάθετη επιβολή δύναμης στο ίδιο σώμα (γωνία εκτύπωσης 0°). Αναμένουμε δηλαδή η γωνία εκτύπωσης 0° να αποφέρει υψηλότερες τιμές στην αντοχή εφελκυσμού (Ultimate Tensile Strength) και στο σημείο διαρροής (Yield Strength).
- Παράλληλα, επειδή πρόκειται περί εκατοντάδων γωνιών που σχηματίζονται μέσα στο δοκίμιο, οι διάφορες τάσεις αναμένεται να κατανέμονται με τελείως διαφορετικό τρόπο για διαφορετικές γωνίες εκτύπωσης. Σε γωνία 0° , οι τάσεις κατανέμονται συμμετρικά ενώ σε όλες τις υπόλοιπες γωνίες ασύμμετρα. Στην περίπτωση της δοκιμής εφελκυσμού, με σταθερές διαστάσεις για όλα τα δοκίμια, οι άναρχα κατανεμημένες τάσεις (και άρα οι γωνίες εκτύπωσης εκτός της 0°) αναμένεται να προσδίδουν μεγαλύτερη αντοχή σε θραύση (Max Stress at fracture).

2.4 Επιλογή των παραμέτρων που θα εξεταστούν

Τα παραπάνω αποτελούν απλώς υποθέσεις και αναμένεται να αξιολογηθούν στο πειραματικό μέρος της παρούσης εργασίας, καθώς η γωνία εκτύπωσης είναι μία εκ των δύο παραμέτρων που εξετάστηκε. Η επιλογή της συγκεκριμένης παραμέτρου για εξέταση έγινε πρώτον, λόγω της έλλειψης εκτενούς βιβλιογραφίας σχετικά με την επιρροή της γωνίας εκτύπωσης στις μηχανικές ιδιότητες και δεύτερον, διότι η παράμετρος αυτή είναι ίσως η κρισιμότερη για τη μηχανική συμπεριφορά των τριδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων. Αποφασίστηκε να εξεταστούν οι γωνίες εκτύπωσης 0°, 45° και 75°.

Η δεύτερη παράμετρος που εξετάστηκε είναι το ποσοστό πλήρωσης του υλικού μέσα στο αντικείμενο. Καταλήξαμε σε αυτή την παράμετρο επίσης για δύο λόγους. Αρχικώς, γιατί μαζί με τη γωνία εκτύπωσης αποτελούν ίσως τις πιο κύριες παραμέτρους που επηρεάζουν άμεσα και σε μεγάλο βαθμό τη μηχανική συμπεριφορά ενός τριδιάστατα εκτυπωμένου αντικειμένου. Ο δεύτερος λόγος επιλογής της συγκεκριμένης παραμέτρου για εξέταση, είναι η αμφιλεγόμενη επίδραση της στις μηχανικές ιδιότητες παρά την ύπαρξη κάποιων (ελάχιστων) δημοσιευμένων άρθρων και πειραμάτων, που συζητείται και προβληματίζει ιδιαίτερα την κοινότητα των χρηστών τριδιάστατων εκτυπωτών. Καταλήξαμε στις τιμές 50%, 75% και 100% πλήρωσης προς εξέταση.

Έτσι τελικώς, θέλοντας παράλληλα να εξετάσουμε και δύο διαφορετικά υλικά, το PLA και το CarbonFil™, καταλήξαμε σε συνολικά 18 πειράματα, ήτοι 9 για κάθε υλικό με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των δύο παραμέτρων, όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες:

Για το υλικό PLA:

Πίνακας 2.1

Πείραμα	Γωνία εκτύπωσης	Ποσοστό πλήρωσης
1	0°	50%
2	0°	75%
3	0°	100%
4	45°	50%
5	45°	75%
6	45°	100%
7	75°	50%
8	75°	75%
9	75°	100%

Για το υλικό CarbonFil™:

Πίνακας 2.2:

Πείραμα	Γωνία εκτύπωσης	Ποσοστό πλήρωσης
10	0°	50%
11	0°	75%
12	0°	100%
13	45°	50%
14	45°	75%
15	45°	100%
16	75°	50%
17	75°	75%
18	75°	100%

2.5 Αξιοπιστία δοκιμών για ορθή δοκιμή εφελκυσμού

Είναι πολύ σημαντικό για μία αξιόπιστη δοκιμή εφελκυσμού, να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις όσον αφορά τα δοκίμια. Αυτό ισχύει γενικά, τόσο για τις δοκιμές εφελκυσμού συμπαγών δοκιμών, όσο και για τις δοκιμές εφελκυσμού τριδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμών. Οι προϋποθέσεις αυτές είναι μείζονος σημασίας για τη λήψη ορθών και αξιόπιστων αποτελεσμάτων κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, καθώς οποιαδήποτε μικρή ή μεγάλη ατέλεια μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες μετρήσεις. Παρακάτω αναλύονται τα κριτήρια που πρέπει να πληρεί κάθε δοκίμιο που εκτυπώνεται, για την αποφυγή λήψης λανθασμένων δεδομένων από την δοκιμή εφελκυσμού:

1. Ομοιογένεια:

Η ομοιογένεια του υλικού σε όλο το μήκος του δοκιμίου αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη ιδιότητα, έτσι ώστε να έχουμε μία αξιόπιστη δοκιμή εφελκυσμού. Οι τάσεις που ασκούνται στο «σώμα» του δοκιμίου κατά τον εφελκυσμό πρέπει να είναι συμμετρικά κατανομημένες και για να γίνει αυτό, θα πρέπει να υπάρχει ίδια σύσταση του υλικού σε όλα τα σημεία του δοκιμίου. Αν στο ένα άκρο υπάρχει μεγαλύτερη συσσώρευση υλικού σε σχέση με το άλλο, τότε οι δυνάμεις αντίθετης φοράς που τείνουν να το επιμηκύνουν, θα κατανομηθούν ασύμμετρα στο «σώμα» του δοκιμίου και αυτό θα οδηγήσει είτε σε αποτυχημένη δοκιμή εφελκυσμού (θραύση του δοκιμίου πολύ μακριά από το κέντρο βάρους) είτε σε αναξιόπιστα δεδομένα για τις διάφορες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων. Έτσι, η ομοιογένεια αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο που πρέπει να πληρεί το δοκίμιο, καθώς είναι υψίστης σημασίας η συμμετρική μετάβαση και κατανομή του φορτίου από την πάκτωση προς την εφελκυσόμενη περιοχή για την αποφυγή πιθανής έκκεντρης φόρτισης²⁸.

2. Επαναληψιμότητα:

Ως επαναληψιμότητα ορίζεται η δυνατότητα της μεθόδου να δίνει το ίδιο αποτέλεσμα σε επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του ίδιου δείγματος και είναι συνώνυμο με τη συνέπεια (consistency). Για το λόγο αυτό θα πρέπει δύο ίδια δοκίμια, με ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους, να δίνουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα από τη δοκιμή εφελκυσμού. Η επαναληψιμότητα, δηλαδή, αναφέρεται ουσιαστικά στο πόσο κοντά είναι μεταξύ τους οι τιμές από μια σειρά μετρήσεων που έγιναν με ίδιο ακριβώς τρόπο σε μια συγκεκριμένη ποσότητα.

Παρ' όλα αυτά μεγάλη επαναληψιμότητα δε σημαίνει αναγκαστικά και ακριβή αποτελέσματα από τη δοκιμή εφελκυσμού, δείχνει όμως ότι υπάρχουν μικρές αποκλίσεις στις τιμές των δοκιμών για ίδια δοκίμια. Είναι σημαντικό άρα να υπάρχει

μεγάλη επαναληψιμότητα, όχι τόσο για λόγους ακρίβειας των αποτελεσμάτων του εφελκυσμού, αλλά για την αξιοπιστία της μεθόδου.

3. Διαστάσεις:

Επιπροσθέτως, οι ακριβείς διαστάσεις των δοκιμίων σύμφωνα με το πρότυπο D638_I κατά ASTM που ακολουθήθηκε, αποτελούν επίσης ένα πολύ σημαντικό κριτήριο που πρέπει να τηρηθεί, προτού το δοκίμιο «προχωρήσει» σε δοκιμή εφελκυσμού. Οι διαστάσεις όλων των εκτυπωμένων δοκιμίων, εκτός πως πρέπει να είναι σχεδόν ίδιες με τις διαστάσεις του προτύπου, πρέπει να είναι και κοντά μεταξύ τους, να μην υπάρχει δηλαδή απόκλιση στις τιμές τους. Για το λόγο αυτό έγινε μεθοδικός έλεγχος κάθε εκτυπωμένου δοκιμίου τόσο με το παχύμετρο όσο και με το Οπτικό Μικροσκόπιο.

4. Απουσία ατελειών:

Τέλος είναι εξίσου σημαντικό, να μην παρουσιάζονται ατέλειες στο δοκίμιο. Με τον όρο «ατέλειες» νοείται κάθε πιθανό «ψεγάδι» που μπορεί να εμφανιστεί μετά το πέρας της εκτύπωσης, όπως σκεβρωμένα άκρα, παρουσίαση ιστών κατά μήκος του δοκιμίου ή αξονική ασυμμετρία. Εάν δεν δύναται να διορθωθούν τα ελλωτάματα αυτά, τότε πρέπει να γίνει εκ νέου η εκτύπωση και να απορριφθεί το δοκίμιο. Σε κάθε περίπτωση, οι ατέλειες αυτές επηρεάζουν άμεσα τις μηχανικές ιδιότητες του δοκιμίου καθώς καταστρέφουν την ομοιογένειά του. Για τους παραπάνω λόγους, η απουσία ατελειών αποτελεί επίσης μία σημαντική προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται, ώστε ένα δοκίμιο να μπορεί να υποστεί δοκιμή εφελκυσμού δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα.

Για όλα τα παραπάνω, απαιτείται αυστηρός έλεγχος, τόσο οπτικός κατευθείαν μετά την εκτύπωση όσο και έλεγχος μέσω της Οπτικής Μικροσκοπίας, όπως θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Σύνθεση δοκιμίων και Μέθοδοι Χαρακτηρισμού

3.1 Διαδικασία εκτύπωσης των δοκιμίων

Περνώντας στο πειραματικό μέρος της εργασίας, είναι σημαντικό να αναφερθούν κάποια στοιχεία σχετικά με τη διαδικασία εκτύπωσης και αυτό διότι δεν πρόκειται για μία απλή εισαγωγή του αρχείου CAD στο λογισμικό CAM, αλλά για μία πολυδιάστατη διεργασία επιλογής παραμέτρων και επεξεργασίας του αντικειμένου τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά το τέλος της εκτύπωσης. Παρακάτω αναλύονται διεξοδικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν για κάθε μία από τις συνολικά 18 εκτυπώσεις:

1. Εισαγωγή αρχείου STL στο λογισμικό Voxelizer:

Όπως προαναφέρθηκε, το αρχείο STL του πρότυπου δοκιμίου D638_I κατά ASTM βρέθηκε έτοιμο στο διαδίκτυο. Δεν απαιτήθηκε η χρήση κάποιου σχεδιαστικού προγράμματος για τη σχεδιάσή του. Παρ' όλα αυτά, όμως, το αρχείο ελέγχθηκε στο πρόγραμμα AutoCAD Fusion για την επιβεβαίωση της εγκυρότητάς του ως προς τις διαστάσεις. Έπειτα, εισήχθει στο λογισμικό του εκτυπωτή, το Voxelizer.

2. Τοποθέτηση του κατάλληλου υλικού στον ειδικό χώρο:

Ανάλογα με το υλικό που πρόκειται να εκτυπωθεί, έπρεπε το αντίστοιχο νήμα να τοποθετηθεί στην ειδική εσοχή του εκβολέα. Έτσι, για το PLA παραδείγματος χάριν, τοποθετήθηκε αρχικά το καρούλι στο οποίο είναι τυλιγμένο το νήμα του PLA στην ειδική εσοχή του εκτυπωτή και έπειτα με προσοχή, η άκρη του νήματος εισήχθει στην είσοδο του εκβολέα. Στο σημείο αυτό απαιτήθηκε η χρήση του ειδικού «menu» στην μικρή οθόνη του εκτυπωτή, έτσι ώστε ο εκβολέας να αρχίσει να τραβάει από μόνος του το νήμα.

3. Τοποθέτηση ειδικής ταινίας στην επιφάνεια εκτύπωσης:

Κατά την εκτύπωση παρατηρείται πολλές φορές έντονη προσκόλληση του εκτυπωμένου αντικειμένου στην επιφάνεια εκτύπωσης (Printbed). Αυτό οδηγεί σε δύσκολο διαχωρισμό του αντικειμένου από την επιφάνεια και συχνά σε καταστροφή της κάτω στρώσης του αντικειμένου λόγω της στενής προσκόλλησης. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου τοποθετήθηκε ειδική ταινία πάνω στην επιφάνεια αυτή, η οποία βοηθά σημαντικά στην εύκολη και μη καταστροφική απομάκρυνση του αντικειμένου από την επιφάνεια εργασίας.

4. Βαθμονόμηση (calibration) των αξόνων του εκτυπωτή και την πλατφόρμας εκτύπωσης :

Οι τρεις άξονες του εκτυπωτή (x,y,z) μεταβάλλονται κατά την εκτύπωση από την επιφάνεια εκτύπωσης (x,y) και από το μεταλλικό άξονα της κεφαλής (z). Τα δύο αυτά μέρη του εκτυπωτή είναι εγκατεστημένα με βίδες και όπως είναι φυσικό, με τον καιρό, τείνουν να χαλαρώνουν αλλάζοντας έτσι το επίπεδο (0,0,0), το οποίο θεωρείται και σημείο ισορροπίας. Έτσι, πριν κάθε εκτύπωση, με τη βοήθεια του λογισμικού γίνεται βαθμονόμηση των αξόνων αλλά και της επιφάνειας εκτύπωσης και στην περίπτωση που εμφανιστεί απόκλιση από το σημείο ισορροπίας, απαιτείται είτε σφύξιμο είτε χαλάρωση των βιδών. Λόγω της μεγάλης γκάμας δυνατοτήτων όμως του λογισμικού, μετά τη βαθμονόμηση, το ίδιο το λογισμικό εμφάνιζε ακριβώς κατά πόσες μοίρες πρέπει να στραφεί η κάθε βίδα, έτσι ώστε να επαναφερθούν οι άξονες στο σημείο ισορροπίας. Έτσι, με τη χρήση κατσαβιδιού, επαναφέρονταν κάθε φορά οι τρεις βίδες της επιφάνειας εργασίας στη σωστή θέση και κατ' επέκτασιν διορθωνόταν η όποια απόκλιση των αξόνων.

5. Ρύθμιση των σταθερών και των μεταβλητών παραμέτρων:

Έπειτα γίνεται η ρύμιση των σταθερών παραμέτρων της εκτύπωσης, οι οποίες είναι σταθερές για όλες τις εκτυπώσεις που έγιναν. Οι παράμετροι αυτοί βέβαια βελτιστοποιήθηκαν μετά από πολλές δοκιμές, έτσι ώστε να έχουμε την καλύτερη ποιοτικά εκτύπωση. Οι μη σταθερές παράμετροι, τις οποίες ονομάζουμε και εξεταζόμενες είναι, όπως προαναφέρθηκε, το ποσοστό πλήρωσης (Infill %) και η γωνία προσανατολισμού-εκτύπωσης (infill angle). Παρακάτω παρατίθενται οι σταθερές παράμετροι που ρυθμίστηκαν μέσω του λογισμικού Voxelizer:

- Αριθμός εξωτερικών κελύφων (Number of Shells):

Επιλέξαμε σε κάθε δοκίμιο να υπάρχουν τρία εξωτερικά κελύφια, καθώς έτσι πετύχαμε την καλύτερη δυνατή συμμετρία των εσωτερικών στρώσεων και άρα την καλύτερη ομοιογένεια του δοκιμίου, πράγμα πολύ σημαντικό για αξιόπιστα αποτελέσματα κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, όπως προαναφέρθηκε. Σκοπός μας ήταν δηλαδή η ίση απόσταση των γραμμών εναπόθεσης του υλικού σε κάθε στρώση. Σε αντίθεση, τα δύο εξωτερικά κελύφη οδηγούσαν σε ασυμμετρία στην πλήρωση του υλικού κατά μήκος του δοκιμίου.

- Πάχος στρώσης (Layer Height):

Το πάχος της κάθε στρώσης ορίστηκε στα 0.1mm. Η τιμή αυτή για το πάχος είναι η πιο συνηθισμένη σε εκτυπώσεις υψηλής ακρίβειας και αυτό επιλέχθηκε.

- Θερμοκρασία εκβολέα (Extruder Temperature):

Η θερμοκρασία εκβολέα μεταβλήθηκε μόνο όταν είχαμε διαφορετικό υλικό προς εκτύπωση, οπότε θεωρείται σταθερή παράμετρος. Βιβλιογραφικά, για το PLA, η κατάλληλη θερμοκρασία εκβολέα είναι οι 210°C, ενώ για το Carbonfil οι 220°C.

- Ταχύτητα εκτύπωσης (Printing Speed):

Μετά από πολλές δοκιμές τόσο στα δοκίμια όσο και σε άλλα αντικείμενα που εκτυπώσαμε, καταλήξαμε στην ιδανική ταχύτητα εκτύπωσης στα 20 mm/s.

- Ταχύτητα κίνησης (Movement Speed):

Η ταχύτητα κίνησης της κεφαλής όσο δεν εκτυπώνεται υλικό ορίστηκε στα 120 mm/s και δεν εμφάνισε κάποιο πρόβλημα σε όλες τις δοκιμές.

- Θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης (Printbed Temperature):

Η τιμή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια εκτύπωσης ορίστηκε στους 60 °C, που είναι και βιβλιογραφικά η προτεινόμενη τιμή.

- Πάχος γραμμών (path width):

Η τιμή του πάχους των γραμμών, δηλαδή του πάχους κάθε γραμμής εναποθετημένου υλικού ορίστηκε στα 0.3 mm. Πέραν του ότι η τιμή αυτή βρίσκεται μέσα στα βιβλιογραφικά πλαίσια, καθοριστικό κριτήριο της επιλογής της τιμής αυτής, ήταν η συμμετρία των εσωτερικών γραμμών, η ίση απόσταση μεταξύ τους και με τα εξωτερικά κελύφη δηλαδή. Η συμμετρία, καθώς και η ομοιογένεια που προσφέρει κατά συνέπεια η τιμή αυτή, είναι πολύ σημαντικές για την αξιοπιστία των δεδομένων που θα πάρουμε από τις δοκιμές εφελκυσμού.

Τέλος, όσον αφορά τις δύο παραμέτρους που μεταβάλλονταν για τους σκοπούς της εργασίας, επιλέχθηκαν τα εξής:

- Για το ποσοστό πλήρωσης (Infill %) επιλέχθηκαν κάθε φορά, ανάλογα με το δοκίμιο που θέλαμε να εκτυπώσουμε, οι τιμές 50%, 75% και 100%.
- Για τη γωνία εκτύπωσης (Infill angle ή raster angle) επιλέχθηκαν να εξεταστούν οι τιμές 0° (ή αλλιώς 90°), 45°, 75°. Έτσι, κάθε φορά, αλλάζαμε στο λογισμικό την επιθυμητή τιμή.

6. Πρώτη δοκιμή εκτύπωσης:

Πρίν την τελική εκτύπωση, πρέπει να γίνει ένας έλεγχος εκτύπωσης, για να βεβαιωθούμε ότι ο εκτυπωτής θα λειτουργεί κανονικά. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να εξεταστούν τα παρακάτω:

- Ο εκβολέας δεν έχει μπλοκάρει.
- Το υλικό τήκεται μέσα στο θερμαινόμενο κουτί του εκβολέα.
- Ο εκβολέας εξωθεί το τηγμένο υλικό επιτυχημένα.
- Το στόμιο-ακροφύσιο (nozzle) εναποθέτει φυσιολογικά το υλικό στην επιφάνεια χωρίς εμπλοκές.
- Η βαθμονόμηση των αξόνων έχει γίνει σωστά.

Για όλους τους παραπάνω λόγους γίνεται μία πρώτη εκτύπωση μόνο της πρώτης στρώσης του αντικειμένου για την επιβεβαίωση της ομαλής λειτουργίας της διαδικασίας εκτύπωσης.

Έπειτα, το υλικό από την πρώτη δοκιμή απομακρύνεται αμέσως με σχετική ευκολία, χωρίς να καταστραφεί η ειδική ταινία, καθώς το υλικό δεν έχει πήξει ακόμα και δεν έχει συγκολληθεί με την επιφάνεια.

7. Εκτύπωση:

Μετά από όλα τα παραπάνω βήματα που ακολουθήθηκαν, προχωρήσαμε τελικά στην εκτύπωση. Εφ' όσον έχουν ρυθμιστεί οι παράμετροι και έχει γίνει η διακριτοποίηση του αντικειμένου (voxelization), επιλέγοντας την εντολή του λογισμικού «print», ξεκινάει η εκτύπωση, η οποία διήρκησε περίπου μισή ώρα για κάθε δοκίμιο. Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι καθ' όλη τη διάρκεια της εναπόθεσης υλικού από τον εκβολέα στην επιφάνεια, η εκτύπωση παρακολουθείται, ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητα φαινόμενα που μπορεί να επηρεάσουν εκ των υστέρων τη δοκιμή εφελκυσμού.

8. Χρόνος αναμονής:

Πρόκειται για το χρόνο όπου το υλικό επανέρχεται σε θερμοκρασία δωματίου. Ο χρόνος αναμονής είναι περίπου 15 λεπτά και καθορίζεται από το χρόνο που χρειάζεται η επιφάνεια εκτύπωσης για να επιστρέψει σε χαμηλές τιμές (50 °C). Είναι πολύ σημαντικό να τηρείται αυστηρά ο χρόνος αναμονής, έτσι ώστε το δοκίμιο να «κρυώσει» και άρα να έχουμε την καλύτερη δυνατή συγκόλληση των στρώσεων υλικού. Έπειτα το δοκίμιο είναι έτοιμο για απομάκρυνση από την επιφάνεια εκτύπωσης.

9. Αφαίρεση του δοκιμίου από την επιφάνεια εκτύπωσης:

Αφού το δοκίμιο έχει έρθει σε χαμηλή θερμοκρασία και έχει «κρυώσει», μπορεί πλέον να απομακρυνθεί από την επιφάνεια εκτύπωσης. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια μίας ειδικής σπάτουλας, με την οποία προσεκτικά πιέζουμε το κάτω μέρος των άκρων του δοκιμίου μέχρι να αποκολληθεί κάποια άκρη, χωρίς βέβαια να προκληθεί οποιαδήποτε φθορά. Έπειτα, πιέζουμε από την πλευρά της άκρης που έχει αποκολληθεί το δοκίμιο κατά μήκος μέχρι να απομακρυνθεί πλήρως από την επιφάνεια. Στο στάδιο αυτό, βοήθησε σημαντικά η χρήση της ειδικής ταινίας.

10. Οπτικός έλεγχος για ατέλειες:

Μετά την απομάκρυνση του δοκιμίου από την επιφάνεια εκτύπωσης, έγινε οπτικός έλεγχος για την εύρεση τυχόν ατελειών ή ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως η σκέβρωση, η συρρίκνωση κλπ. Σε ορισμένες περιπτώσεις απορρίφθηκε κάποιο δοκίμιο στο συγκεκριμένο στάδιο και απαιτήθηκε νέα εκτύπωση. Το συγκεκριμένο βήμα δεν έχει σχέση με την Οπτική Μικροσκοπία, η οποία θα συζητηθεί παρακάτω. Πρόκειται για έναν απλό έλεγχο «με το μάτι», ο οποίος όμως είναι πολύ σημαντικός για την εξακρίβωση της επιτυχίας της εκτύπωσης.

11. Μέτρηση διαστάσεων:

Έπειτα, με τη βοήθεια παχύμετρου, μετρήθηκαν οι τελικές διαστάσεις του δοκιμίου για δύο λόγους. Αρχικώς, για την επιβεβαίωση της ορθότητας σχετικά με το πρότυπο D638_1 κατά ASTM. Δεύτερον, γιατί ορισμένες από τις διαστάσεις, όπως θα αναφερθεί και στο επόμενο κεφάλαιο αναλυτικά, απαιτούνται για τη μέτρηση του πάχους διατομής και το αντίστοιχο σφάλμα. Τα τελευταία είναι πολύ σημαντικά, καθώς χρειάζονται για τους υπολογισμούς των μηχανικών ιδιοτήτων κατά την επεξεργασία των δεδομένων που λάβαμε από τις δοκιμές εφελκυσμού.

12. Αποθήκευση του δοκιμίου:

Όλα τα δοκίμια, μετά το πέρας όλων των παραπάνω βημάτων, τοποθετήθηκαν σε ξεχωριστές θήκες ασφαλείας τύπου zip ώστε να κλείνουν. Στις πλαστικές αυτές θήκες αναγράφηκαν οι λεπτομέρειες του κάθε δοκιμίου που περιείχαν (υλικό, Infill %, Infill angle) έτσι ώστε να αποφευχθεί η οποιαδήποτε παρανόηση στην ταξινόμηση. Τέλος, οι θήκες με τα δοκίμια αποθηκεύτηκαν σε ένα κουτί, μέχρι να οδηγηθούν σε Οπτική Μικροσκοπία και έπειτα σε δοκιμή εφελκυσμού.

3.2 Μέθοδοι Χαρακτηρισμού

Με τον όρο «μέθοδος χαρακτηρισμού» νοείται κάθε τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους σκοπούς της εργασίας, είτε για τη διεξαγωγή πειραματικών «κομματιών» είτε για την ανάλυση της αξιοπιστίας των διαφόρων αποτελεσμάτων. Στις μεθόδους χαρακτηρισμού που ακολουθήθηκαν για την παρούσα εργασία, συγκαταλέγονται η Οπτική Μικροσκοπία, η δοκιμή εφελκυσμού (Tensile Test), η τεχνική «SEM Fractography» και η στατιστική μέθοδος ANOVA. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιήθηκαν για πολλαπλούς και διαφορετικούς λόγους, που θα εξηγηθούν παρακάτω αναλυτικά, με κοινό γνώμονα όμως την αξιοπιστία των πειραμάτων και την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

3.2.1 Οπτική Μικροσκοπία

Η χρήση της Οπτικής Μικροσκοπίας για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας

Το οπτικό μικροσκόπιο χρησιμοποιήθηκε για τρεις σημαντικούς λόγους:

- Παρατήρηση σημείων συγκόλλησης:

Με τη χρήση του Οπτικού Μικροσκοπίου ήταν δυνατός ο έλεγχος των σημείων συγκόλλησης των στρώσεων αλλά και της συγκόλλησης των γραμμών κάθε στρώσης με τα εξωτερικά κελύφη. Είναι πολύ σημαντικό για την αξιοπιστία της δοκιμής εφελκυσμού να μην υπάρχουν κακές συγκολλήσεις μεταξύ γραμμών υλικού και εξωτερικών κελύφων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ομοιογένεια και η συμπαγότητα του δοκιμίου.

- Διαστάσεις:

Παράλληλα, έγινε και η διαστασιολόγηση διαφόρων αποστάσεων εντός του δοκιμίου. Αρχικά απαιτήθηκε να υπολογιστούν το πάχος του δοκιμίου, η απόσταση μεταξύ των δύο άκρων του λαιμού και το συνολικό πάχος των εξωτερικών κελύφων. Οι διαστάσεις αυτές απαιτούνται για τον μετέπειτα υπολογισμό της διατομής του δοκιμίου, η οποία χρειάζεται για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της δοκιμής εφελκυσμού. Επίσης, μέσω του Οπτικού Μικροσκοπίου, υπολογίστηκαν και άλλες χρήσιμες διαστάσεις, όπως η απόσταση των γραμμών κάθε στρώσης καθώς και το πάχος των πόρων. Τέλος, επιβεβαιώθηκαν μέσω του μικροσκοπίου οι ορθές συνολικές διαστάσεις του δοκιμίου σύμφωνα με το πρότυπο που επιλέχθηκε, το D638_I κατά ASTM.

- Έλεγχος για ανεπιθύμητα φαινόμενα:

Ο έλεγχος για ανεπιθύμητα φαινόμενα (παρουσίαση ιστών, σκέβρωση κλπ) είναι, όπως προαναφέρθηκε, ένα πολύ σημαντικό στάδιο της διαδικασίας εκτύπωσης. Έτσι, πέραν του απλού οπτικού ελέγχου και της παρατήρησης του δοκιμίου για την άμεση εντόπιση ανεπιθύμητων φαινομένων, κάθε δοκίμιο υπεβλήθη σε Οπτική Μικροσκοπία για αυστηρή εξέταση σε όλο το μήκος του.

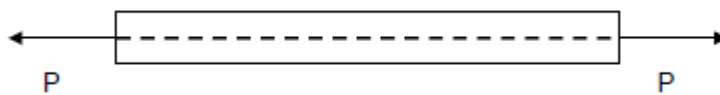


Εικόνα 3.2: Το Οπτικό Μικροσκόπιο του εργαστηρίου των Υλικών

3.2.2 Η δοκιμή εφελκυσμού (Tensile Test) ^{32,33,34,35,36}

3.2.2.1 Βασικές Αρχές

Η δοκιμή σε εφελκυσμό περιλαμβάνει την πάκτωση ενός κατάλληλου δοκιμίου στις αρπαγές της μηχανής εφελκυσμού και τη φόρτισή του σε μονοαξονικό προοδευτικά αυξανόμενο φορτίο, μέχρι την τελική του θραύση. Ο εφελκυσμός αποτελεί ίσως την πιο σημαντική πειραματική διαδικασία μέτρησης της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών σε αξονικά φορτία. Η αρχή λειτουργίας των πειραμάτων εφελκυσμού είναι η επιβολή δύο δυνάμεων, ίδιου μέτρου, ίδιας διεύθυνσης και αντίθετης φοράς, κατά τον διαμήκη άξονα ενός υλικού (κεντροβαρικά) , με σημεία εφαρμογής τα άκρα του, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.1 : Επιβολή εφελκυστικών φορτίων σε δοκίμιο

Οι επιβαλλόμενες αξονικές δυνάμεις, τείνουν να επιμηκύνουν το δοκίμιο. Κατά συνέπεια, εάν οι επιβαλλόμενες δυνάμεις ξεπεράσουν μια κρίσιμη τιμή, η παραμόρφωση του δοκιμίου θα είναι μόνιμη (πλαστική παραμόρφωση).

Ο Hooke, μελετώντας το πείραμα της επιβολής δύο δυνάμεων, ίδιου μέτρου, ίδιας διεύθυνσης και αντίθετης φοράς σε ένα υλικό , διαπίστωσε ότι ο παράγοντας $P/\Delta L$ παραμένει σταθερός, όταν μεταβληθεί το επιβαλλόμενο φορτίο. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο Hooke διατύπωσε τον γενικευμένο νόμο της ελαστικότητας βάσει του οποίου:

$$P = \frac{E \times A \times \Delta L}{L_0}$$

Όπου

E: Μέτρο Ελαστικότητας ή μέτρο Young N/m^2

A: Διατομή υλικού m^2

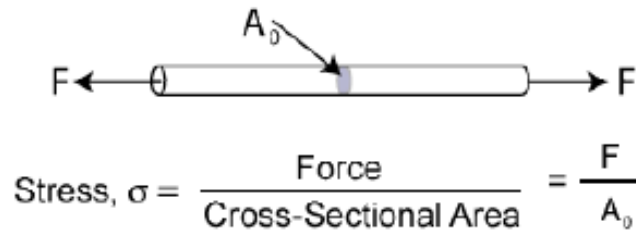
ΔL : διαμήκης παραμόρφωση δοκιμίου m

L_0 : αρχικό μήκος δοκιμίου m

P: επιβαλλόμενη, κάθετη στη διατομή, δύναμη N

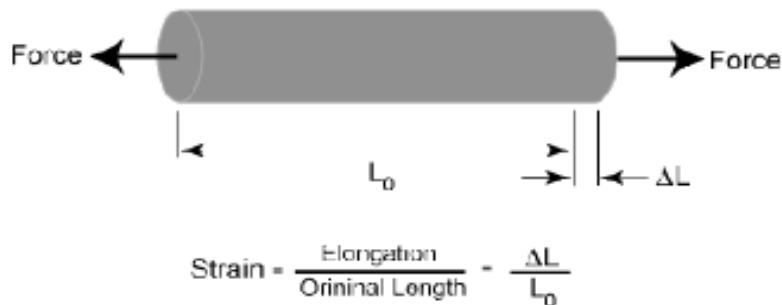
Παρόλ' αυτά, η έννοια της δύναμης και της επιμήκυνσης που προκαλεί η δύναμη αυτή σε ένα στερεό δεν είναι μονοσήμαντες. Ορίζεται έτσι το μέγεθος της μηχανικής τάσης ως το πηλίκο της

επιβαλλόμενης δύναμης σε ένα δοκίμιο προς την διατομή. Όταν μία δύναμη F επιβάλλεται σε ένα δοκίμιο κάθετα στην διατομή του (A_0), τότε η αντίστοιχη μηχανική τάση ονομάζεται ορθή και συμβολίζεται με το σύμβολο σ (stress).



Σχήμα 3.2: Ορισμός ορθής μηχανικής τάσης σ .

Σε ένα δοκίμιο αρχικού μήκους L_0 , το οποίο υπό την επίδραση δύναμης F εμφανίζει επιμήκυνση ΔL , ορίζεται το μέγεθος ε (σχήμα 3.3) το οποίο καλείται ανηγμένη παραμόρφωση (strain), ή αλλιώς παραμόρφωση.



Σχήμα 3.3: Ορισμός ανηγμένης παραμόρφωσης ε .

Σύμφωνα με τους δύο ορισμούς των μεγεθών ορθής τάσης και ανηγμένης παραμορφώσεως, ο γενικευμένος νόμος του Hooke, εμφανίζεται με τη μορφή της παρακάτω σχέσης, η οποία και αποτελεί το Νόμο του Hooke για τις ορθές μηχανικές τάσεις:

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Όπου :

σ : ορθή μηχανική τάση N/m^2

E : Μέτρο Ελαστικότητας ή μέτρο Young N/m^2

ε: ανηγμένη παραμόρφωση

Δεδομένου ότι τα άκρα του δοκιμίου βρίσκονται συγκρατημένα εντός των σιαγόνων – αρπαγών του οργάνου, η επιμήκυνση του δοκιμίου, υπολογίζεται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου, το οποίο καλείται και ωφέλιμο μήκος (gauge length). Σε δοκιμές εφελκυσμού το ωφέλιμο μήκος είναι μικρότερο από το συνολικό τμήμα του δοκιμίου. Οι μηχανές εφελκυσμού συνήθως πραγματοποιούν τις δοκιμές σε κατακόρυφη θέση. Το δοκίμιο τοποθετείται εντός των αρπαγών, όπου η κάτω αρπάγη παραμένει ακίνητη, ενώ η άνω αρπάγη κινείται κατακόρυφα προς τα πάνω, ανάλογα με το ρυθμό κίνησης που έχει επιλεγεί. Ο ρυθμός ανόδου της άνω αρπάγης και η ταυτόχρονη επιβολή δύναμης συγκράτησης του δοκιμίου εντός αυτής μπορεί να είναι:

- ρυθμός παραμόρφωσης ϵ (strain rate) sec^{-1}
- Ρυθμός δύναμης N/sec
- Ταχύτητα παραμόρφωσης mm/sec

3.2.2.2 Η πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τη μηχανή εφελκυσμού και έναν Η/Υ. Υπάρχουν διάφορες διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή ελεγχόμενου εφελκυστικού φορτίου στα δοκίμια εφελκυσμού. Στην δική μας περίπτωση, έγινε χρήση μίας ηλεκτρομηχανικής διάταξης, συγκεκριμένα του μοντέλου WDW-50 E, το οποίο φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.3: Το μοντέλο WDW-50 E του εργαστηρίου Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών

Οι ηλεκτρομηχανικές διατάξεις εφαρμόζουν το φορτίο με την κίνηση μίας πλάκας, στην οποία είναι πακτωμένη η μία κεφαλή του δοκιμίου, μέσω περιστρεφόμενων κοχλιών. Η άλλη άκρη του δοκιμίου είναι πακτωμένη σε σταθερή πλάκα. Εκεί προσδένεται και η μετρητική διάταξη της συσκευής, η οποία συνδέεται με τον Η/Υ.

Η συσκευή φέρει ένα στοιχείο φορτίου που επιτρέπει την μετάφραση σε ηλεκτρικό δυναμικό της δύναμης που εφαρμόζεται σε ένα δείγμα κατά την διάρκεια παραμόρφωσης.

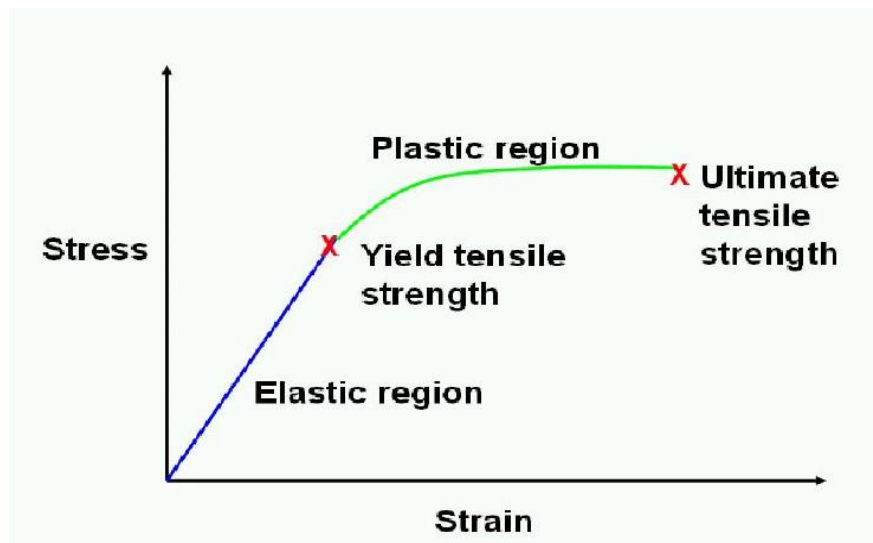
Το δείγμα προσδένεται σε δύο σιαγόνες, η μία είναι σταθερή και η άλλη κινητή. Η κινητή σιαγόνα είναι στερεωμένη σε έναν οριζόντιο άξονα μέσω του στοιχείου φορτίου. Ο οριζόντιος άξονας μετακινείται σε δύο κοχλίες με προκαθορισμένη ταχύτητα λόγω ενός συστήματος γραναζιών. Κατά την διάρκεια της έλξης το στοιχείο φορτίου μεταδίδει σε έναν Η/Υ ένα σήμα ανάλογο με την δύναμη που ασκείται επί του δείγματος.

3.2.2.3 Το διάγραμμα Stress-Strain

Κατά την δοκιμή σε εφελκυσμό διαμορφώνεται μία καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης (stress-strain curve), από τις μετρήσεις των τιμών του εφαρμοζόμενου αξονικού φορτίου και της επιμήκυνσης την οποία υφίσταται το δοκίμιο. Το σχήμα της καμπύλης αυτής εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους που έχουν να κάνουν με το ιστορικό και το είδος του υλικού. Αυτές είναι:

- Η χημική σύσταση
- Η προηγούμενη θερμική κατεργασία
- Η γεωμετρία του αντικειμένου
- Η εξωτερική πίεση
- Η ταχύτητα επιμήκυνσης ή αλλιώς ο ρυθμός επιβολής του φορτίου
- Η θερμοκρασία στην οποία γίνεται ο εφελκυσμός
- Από αρκετές παραμέτρους της τριδιάστατης εκτύπωσης στην δική μας περίπτωση, όπως θα αναλυθεί αργότερα παρακάτω.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά του υλικού κατά τον εφελκυσμό, η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης μας δίνει δύο κρίσιμες περιοχές, την ελαστική και την πλαστική περιοχή. Οι δύο αυτές κρίσιμες περιοχές φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:

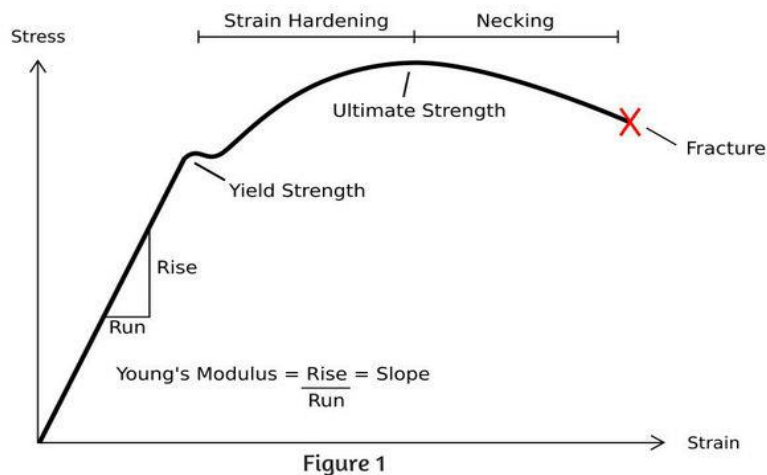


Σχήμα 3.4. Η ελαστική και η πλαστική περιοχή, όπως αποτυπώνονται στην καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης³¹

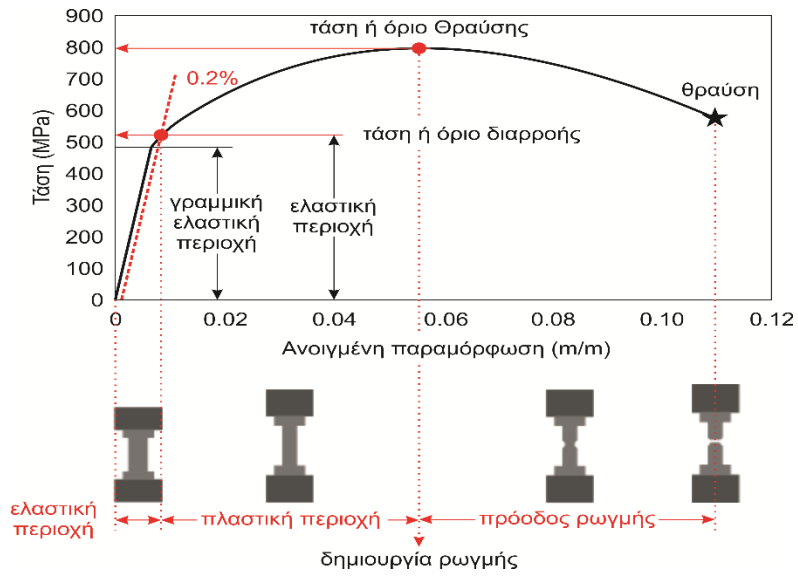
Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, το δοκίμιο παραμορφώνεται αρχικώς ελαστικά. Στην περιοχή αυτή, η τάση είναι ανάλογη της παραμόρφωσης. Η γραμμική αυτή σχέση διακόπτεται

με την εμφάνιση της πλαστικής παραμόρφωσης του δοκιμίου. Για να επιτευχθεί περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση του δοκιμίου, απαιτείται αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης. Έτσι, το υλικό εργοσκληρύνεται. Κατά τη φάση αυτή ο όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός και δεδομένου ότι το δοκίμιο επιμηκύνεται, η κάθετη επιφάνειά του προς το εφαρμοζόμενο φορτίο ελαττώνεται ομοιόμορφα κατά μήκος. Στο στάδιο αυτό, παρατηρείται αρχικά αύξηση της τάσης όσο αυξάνεται η παραμόρφωση. Μετά από κάποιο σημείο όμως, η μείωση της κάθετης στο φορτίο επιφάνειας του δοκιμίου γίνεται μεγαλύτερη από την αύξηση του φορτίου παραμόρφωσης λόγω της εργογήρανσης του υλικού. Η παραπάνω συνθήκη εφαρμόζεται αρχικά στο ασθενέστερο σημείο του δοκιμίου. Όλη η περαιτέρω πλαστική παραμόρφωση συνεπώς, θα συγκεντρώνεται στην περιοχή αυτή. Τότε στο δοκίμιο σχηματίζεται ο λεγόμενος λαιμός (necking).

Στο διάγραμμα του σχήματος 5 απεικονίζεται το διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης ενός θερμοπλαστικού, υπό συνθήκες περιβάλλοντος σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα, το γραμμικό μέρος της καμπύλης αποτελεί την ελαστική περιοχή του υλικού. Σε όλο το εύρος της περιοχής αυτής, η άρση της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης επιτρέπει στο δοκίμιο να επανέλθει στο αρχικό του μήκος. Η ενέργεια παραμόρφωσης στην ελαστική περιοχή μπορεί να υπολογιστεί από το περικλειόμενο εμβαδόν του νοητού ορθογωνίου τριγώνου και αποτελεί την προσφερόμενη ενέργεια, μέσω του παραγόμενου έργου της δύναμης, η οποία ονομάζεται και ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης. Το παραβολικό τμήμα του διαγράμματος αντιστοιχεί στην πλαστική περιοχή του υλικού, όπου οι παραμορφώσεις είναι μόνιμες (μη αντιστρεπτές). Το διάγραμμα εφελκυσμού των όλκιμών υλικών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χαρακτηρίζεται από ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 3.5: Το διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης³¹



Σχήμα 3.6: Ο διαχωρισμός των δύο κρίσιμων περιοχών στο διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης³²

3.2.3 Χαρακτηρισμός Θραύσης με τη χρήση του SEM (Fractography)

Με τον όρο «Fractography» νοείται η μελέτη των επιφανειών θραύσης των υλικών με τη χρήση του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις δοκιμών εφελκυσμού για να προσδιοριστεί η αιτία της αποτυχίας στις δομές ενός υλικού. Στην Επιστήμη των Υλικών γενικότερα η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και την αξιολόγηση θεωρητικών μοντέλων της συμπεριφοράς ανάπτυξης ρωγμών.

Ένας από τους στόχους της εξέτασης ενός υλικού με τη μέθοδο αυτή είναι ο προσδιορισμός της αιτίας της εμφάνισης των διαφόρων ρωγμών καθώς και η γενικότερη παρατήρηση του μηχανισμού θραύσης του δοκιμίου. Διαφορετικοί τύποι της ανάπτυξης της ρωγμής (π.χ. κόπωση, ρηγματώση διάβρωσης λόγω καταπόνησης, ευθραυστότητα υλικού) αποτυπώνονται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στην επιφάνεια, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στον προσδιορισμό του τρόπου θραύσης. Το συνολικό μοτίβο της θραύσης μπορεί να είναι πιο σημαντικό από μια απλή ρωγμή που βλέπουμε και με άλλα όργανα, ειδικά στην περίπτωση των εύθραυστων υλικών, και αυτό είναι που κάνει τη μέθοδο αυτή πολύ πιο ιδιαίτερη και χρήσιμη, καθώς με την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων μπορεί κανείς να αντλήσει ένα γενικό ολοκληρωμένο συμπέρασμα για τη θραύση.

Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε για την εν λόγω τεχνική είναι το μοντέλο Nova NanoSEM 230 scanning electron microscope της εταιρίας FEI:



Εικόνα 3.4: Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης Nova NanoSEM 230

Οι λόγοι χρήσης της συγκεκριμένης τεχνικής ήταν συνοπτικά:

- Παρατήρηση των σημείων θραύσης:

Ο αρχικός λόγος χρήσης της μεθόδου είναι η δυνατότητα της λήψης εικόνων από τις μικροδομές στα σημεία θραύσης. Η εξέταση και παρατήρηση έπειτα των εικόνων αυτών είναι πολύ σημαντικό κομμάτι για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας, καθώς είναι άμεσα συνδεδεμένο με τις μηχανικές ιδιότητες.

- Χαρακτηρισμός θραύσης:

Μετά τη λήψη των προαναφερθέντων εικόνων, με την κατάλληλη επεξεργασία και γνώση, μπορεί να προσδιοριστεί ο τρόπος θραύσης των δοκιμίων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για την αξιολόγηση της αντοχής των υλικών που εξετάστηκαν, καθώς μας δίνονται αρκετά συμπεράσματα σχετικά με τη Μηχανική των Υλικών.

- Εξαγωγή συμπερασμάτων για την αντοχή του υλικού:

Όπως προαναφέρθηκε, η τεχνική αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε τη θραύση του κάθε δοκιμίου. Κατά συνέπεια, μπορούν να βγούν πολύ χρήσιμα συμπεράσματα για την αντοχή και άλλες μηχανικές ιδιότητες του υλικού, που ίσως να μην μπορούν να εξαχθούν από τη δοκιμή εφελκυσμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: Αποτελέσματα και Συζήτηση

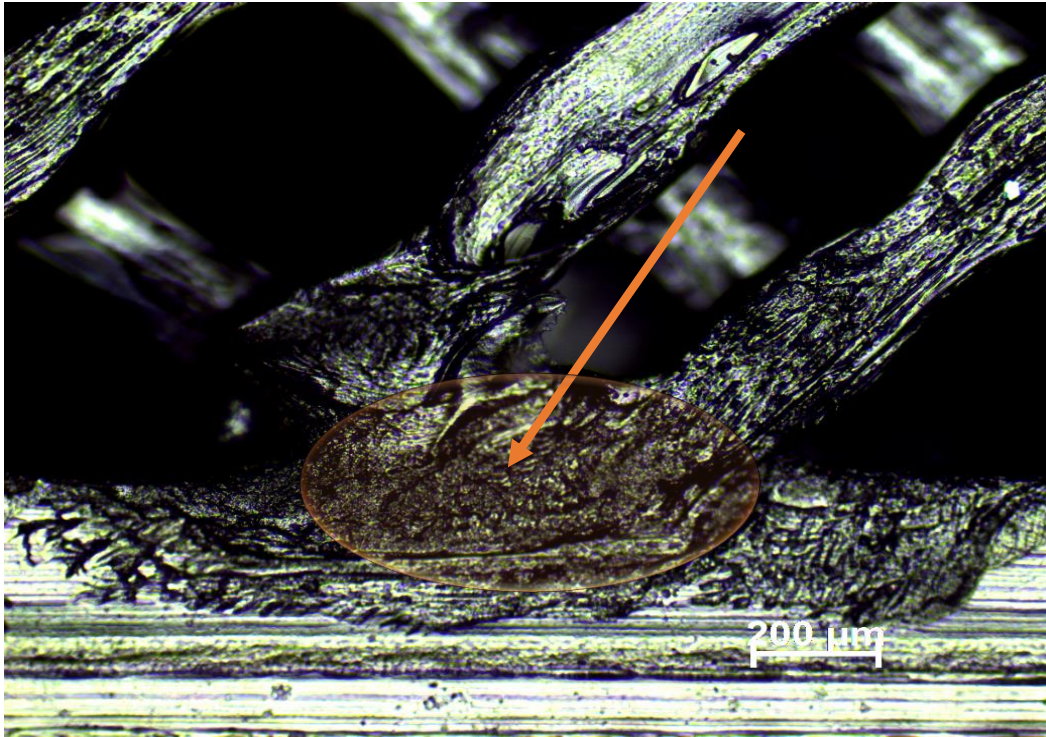
4.1 Οπτική Μικροσκοπία

Κάθε δοκίμιο που εκτυπώθηκε εξετάστηκε στο οπτικό μικροσκόπιο, με σκοπό την παρατήρηση των σημείων συγκόλλησης των εσωτερικών γραμμών με τα κελύφη, τον υπολογισμό διαφόρων διαστάσεων καθώς και τον έλεγχο για πιθανά ανεπιθύμητα φαινόμενα μέσα στις μικροδομές που μπορεί να οδηγήσουν σε αναξιόπιστα αποτελέσματα κατά τη δοκιμή εφελκυσμού.

Αρχικώς, εξετάστηκαν αυστηρά για κάθε δοκίμιο τα εν λόγω σημεία συγκόλλησης, καθώς είναι πολύ σημαντικό για την αξιοπιστία της δοκιμής εφελκυσμού να μην υπάρχουν κακές συγκολλήσεις μεταξύ γραμμών υλικού και εξωτερικών κελύφων, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ομοιογένεια και η συμπαγότητα του δοκιμίου. Στην αρχή, όταν ακόμη αναζητούνταν οι βέλτιστες παράμετροι εκτύπωσης για ποιότητα και αξιοπιστία, παρατηρούνταν συνεχώς στο οπτικό μικροσκόπιο κακές συγκολλήσεις στα σημεία σύνδεσης των εσωτερικών γραμμών με το περίγραμμα. Μετά τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της εκτύπωσης -πλην των δύο που εξετάστηκαν (ποσοστό πλήρωσης και γωνία εκτύπωσης)- , παρατηρήθηκαν ως επί το πλείστον καλές συγκολλήσεις. Άρα λοιπόν, η Οπτική Μικροσκοπία αποτέλεσε σημαντικό εργαλείο όχι μόνο για την εξέταση των τελικών δοκιμίων, αλλά και για την αξιολόγηση της πορείας της βελτιστοποίησης των παραμέτρων.

Είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί, πως δεν αρκεί προφανώς ένα σημείο καλής συγκόλλησης για να συμπεράνουμε την συνολική καλή συγκόλληση. Πρέπει κάθε εσωτερική γραμμή ορατή από το οπτικό μικροσκόπιο να παρουσιάζει καλή συγκόλληση με το περίγραμμα, έτσι ώστε το δοκίμιο να τίθεται κατάλληλο για δοκιμή εφελκυσμού. Απαιτήθηκε δηλαδή, η πλήρης εξέταση κατά μήκος του δοκιμίου και η παρατήρηση όλων των σημείων συγκόλλησης του «λαιμού» του δοκιμίου. Η διαδικασία αυτή, παρ' ότι χρονοβόρα, είναι απαραίτητη για την αξιοπιστία των δεδομένων που λαμβάνονται από την δοκιμή εφελκυσμού.

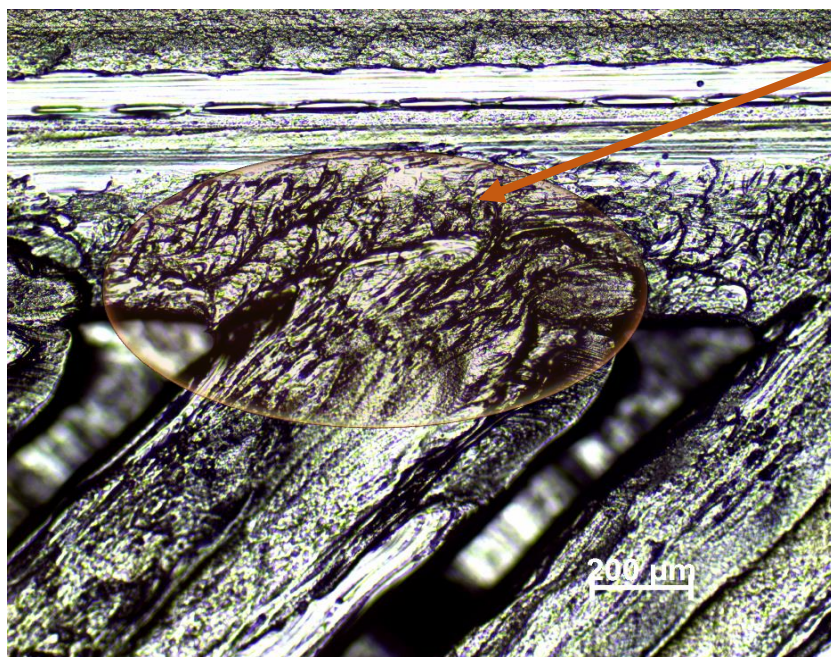
Οι παρακάτω εικόνες βοηθούν για την κατανόηση των παραπάνω:



Εικόνα 4.1: Καλή συγκόλληση των εσωτερικών γραμμών με το περίγραμμα

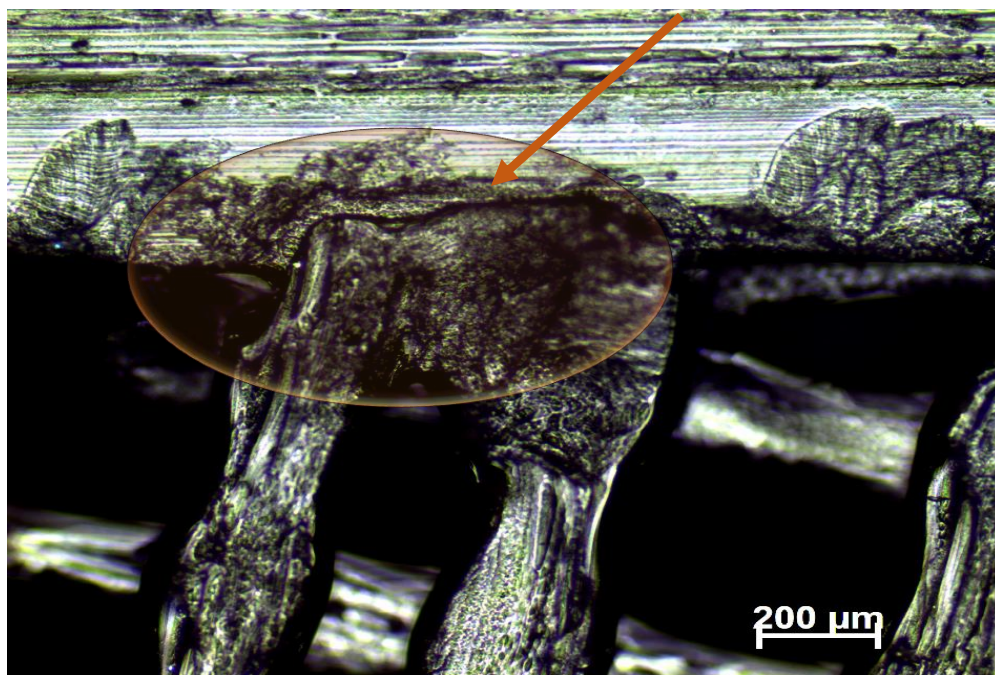
Στην εικόνα 4.1 παρατηρούμε μία πολύ καλή συγκόλληση, καθώς δεν εμφανίζονται ρωγμές ή σχισμές υλικού ανάμεσα στις εσωτερικές γραμμές και το περίγραμμα. Μπορούμε δηλαδή να πούμε ότι στο σημείο αυτό έχουμε σχεδόν πλήρη συμπαγότητα του υλικού.

Αντιθέτως, στις παρακάτω εικόνες, παρατηρούνται κακές συγκολλήσεις:



Εικόνα 4.2: Μέτρια –μή αποδεκτή- συγκόλληση

Στην εικόνα 4.2 παρατηρούνται σχισμές σε διάφορες τοποθεσίες του σημείου συγκόλλησης. Πρόκειται ουσιαστικά για μικρά κενά στο δοκίμιο, όπου δεν έχει εναποτεθεί υλικό. Το εν λόγω δοκίμιο απορρίφθηκε και δεν προχώρησε σε δοκιμή εφελκυσμού, λόγω της μέτριας συγκόλλησης πολλαπλών γραμμών με τα εξωτερικά κελύφη σε αρκετά σημεία.

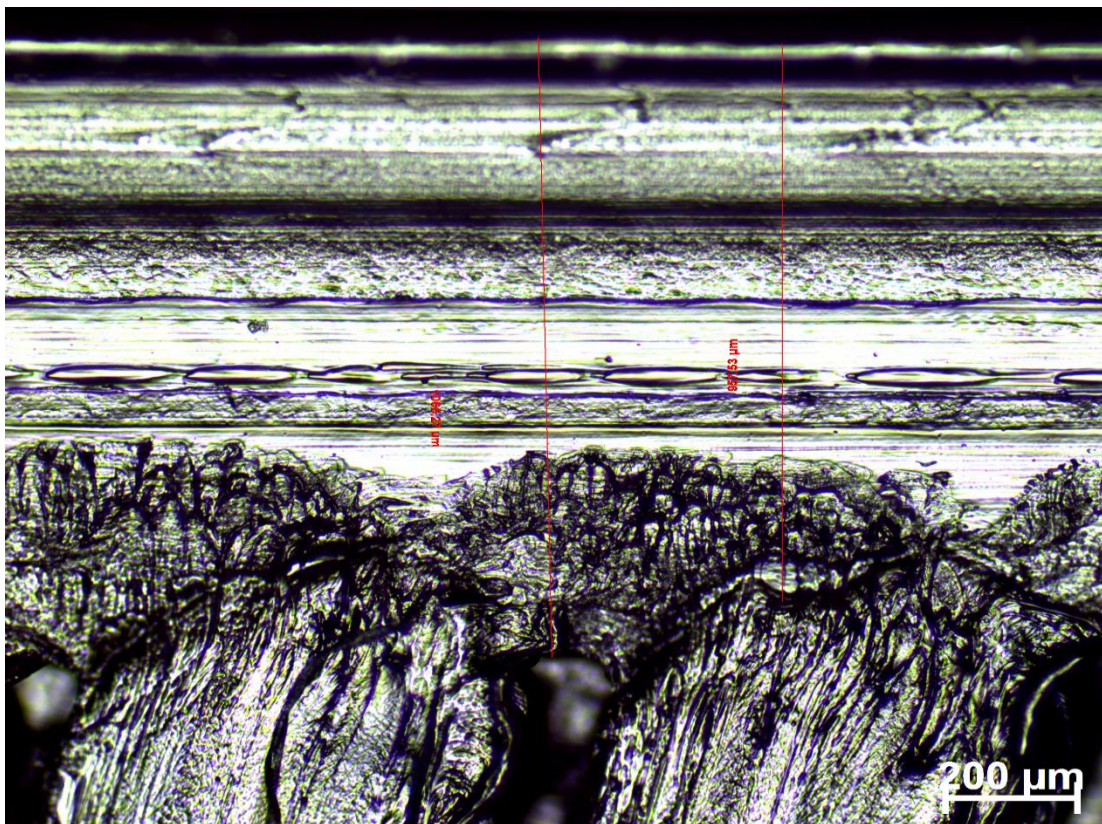


Εικόνα 4.3: Κακή συγκόλληση

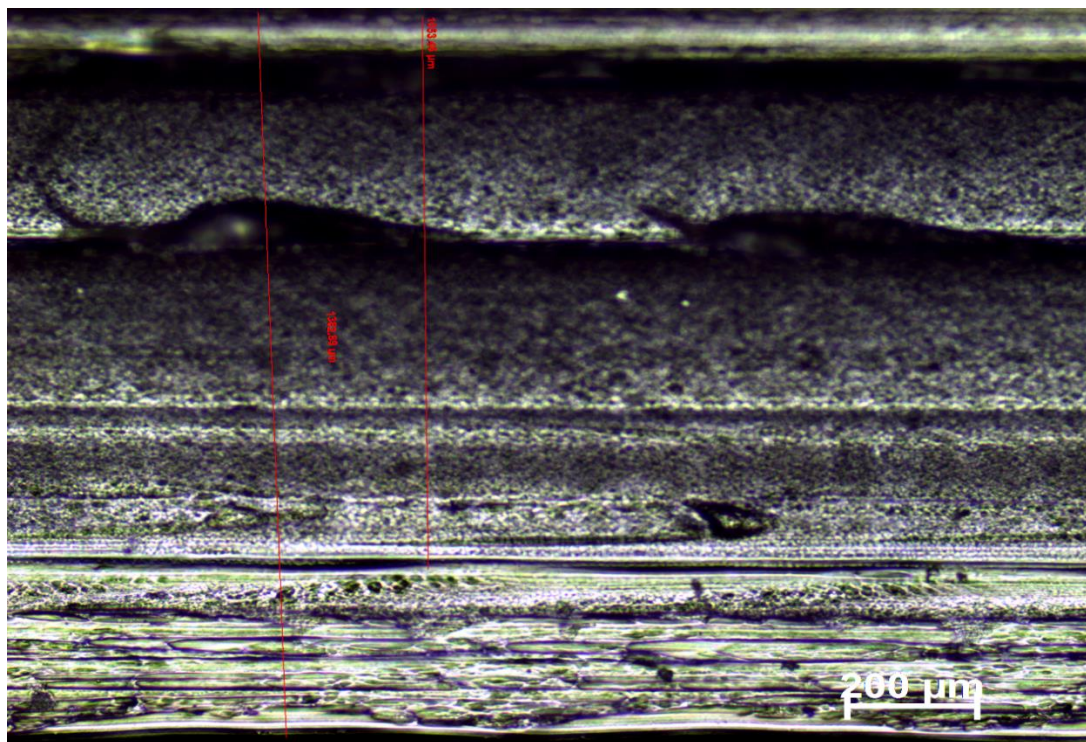
Στο σημείο συγκόλλησης της παραπάνω εικόνας παρατηρείται μία ενιαία ρωγμή μεταξύ της γραμμής ενοποθετημένου υλικού και του περιγράμματος του δοκιμίου. Εδώ, δεν υπάρχουν μικρές ασυνεχείς σχισμές στο υλικό όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Αντιθέτως, παρατηρούμε πλήρη απόσχιση της εσωτερικής γραμμής από το περίγραμμα. Πρόκειται για μία σαφώς κακή συγκόλληση, η οποία μπορεί να οφείλεται σε λάθη κατά τη διάρκεια της εκτύπωσης ή/και σε επιλογή εσφαλμένων τιμών συγκεκριμένων παραμέτρων της εκτύπωσης, όπως π.χ. πολύ υψηλή ταχύτητα εκτύπωσης ή χαμηλή θερμοκρασία επιφάνειας εκτύπωσης. Η κακή αυτή σύνδεση του υλικού μεταξύ του εσωτερικού (Infill) και του εξωτερικού (Outfill) του δοκιμίου, καθιστούν το δοκίμιο ακατάλληλο για δοκιμή εφελκυσμού, καθώς θα επηρεαστούν άμεσα οι μηχανικές ιδιότητες του. Συνοψίζοντας, όλα τα δοκίμια που εμφάνισαν συμπεριφορά στα σημεία συγκόλλησης αντίστοιχα ή ίδια με τις δύο παραπάνω περιπτώσεις απορρίφθηκαν.

Επιπροσθέτως, με τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου υπολογίστηκαν οι διαστάσεις διαφόρων αποστάσεων εντός του δοκιμίου. Αρχικά υπολογίστηκαν το πάχος του δοκιμίου, η απόσταση μεταξύ των δύο άκρων του λαιμού και το συνολικό πάχος των εξωτερικών κελύφων. Οι διαστάσεις αυτές είναι απαραίτητες για τον μετέπειτα υπολογισμό της διατομής του δοκιμίου, η οποία χρειάζεται για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της δοκιμής εφελκυσμού. Τέλος, μέσω του Οπτικού Μικροσκοπίου, υπολογίστηκαν και άλλες χρήσιμες διαστάσεις, όπως η απόσταση των γραμμών κάθε στρώσης καθώς και το πάχος των πόρων. Τέλος, επιβεβαιώθηκαν μέσω του μικροσκοπίου οι ορθές συνολικές διαστάσεις του δοκιμίου σύμφωνα με το πρότυπο που επιλέχθηκε, το D638_I κατά ASTM.

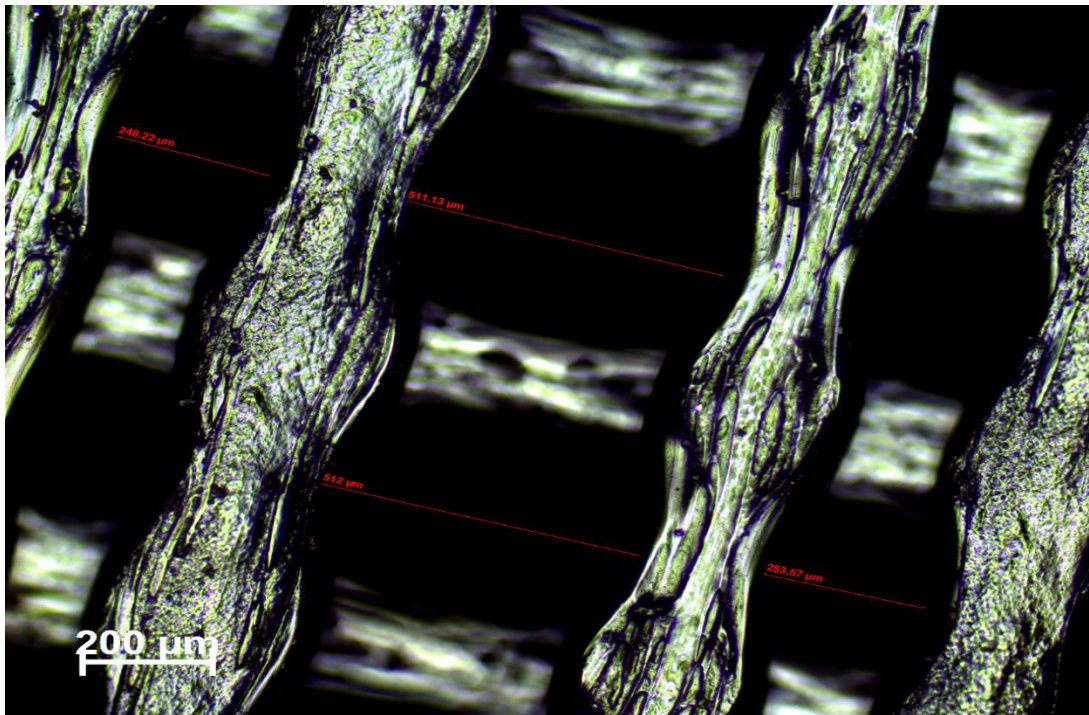
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται κάποιες από τις παραπάνω διαστάσεις:



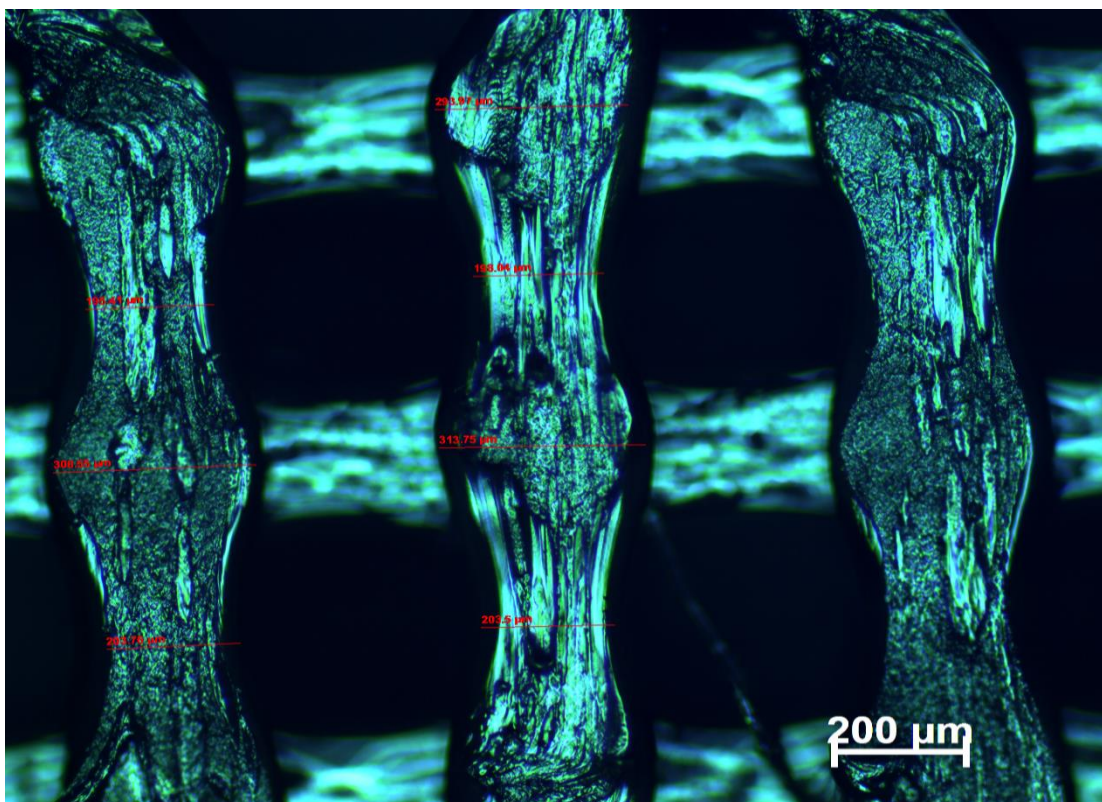
Εικόνα 4.4: Το πάχος των εξωτερικών κελυφών και τα σημεία συγκόλλησης



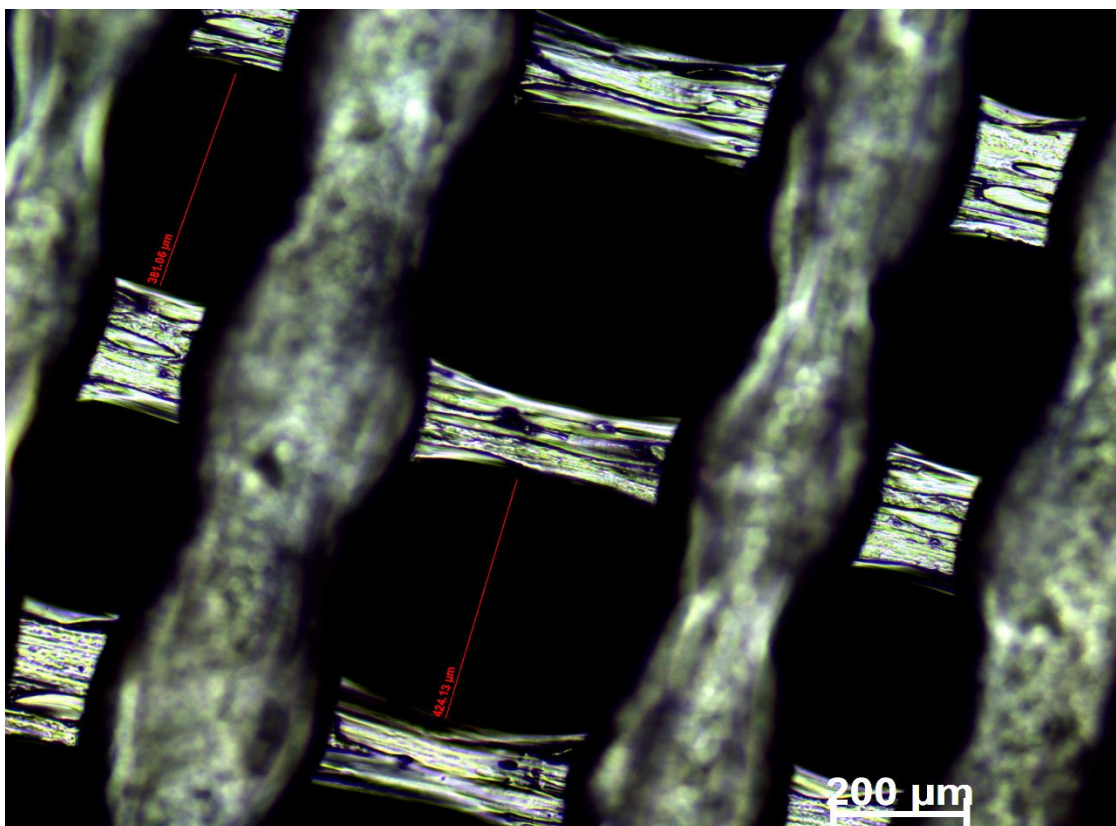
Εικόνα 4.5: Το πάχος των εξωτερικών κελυφών



Εικόνα 4.6: Η απόσταση των γραμμών κάθε στρώσης

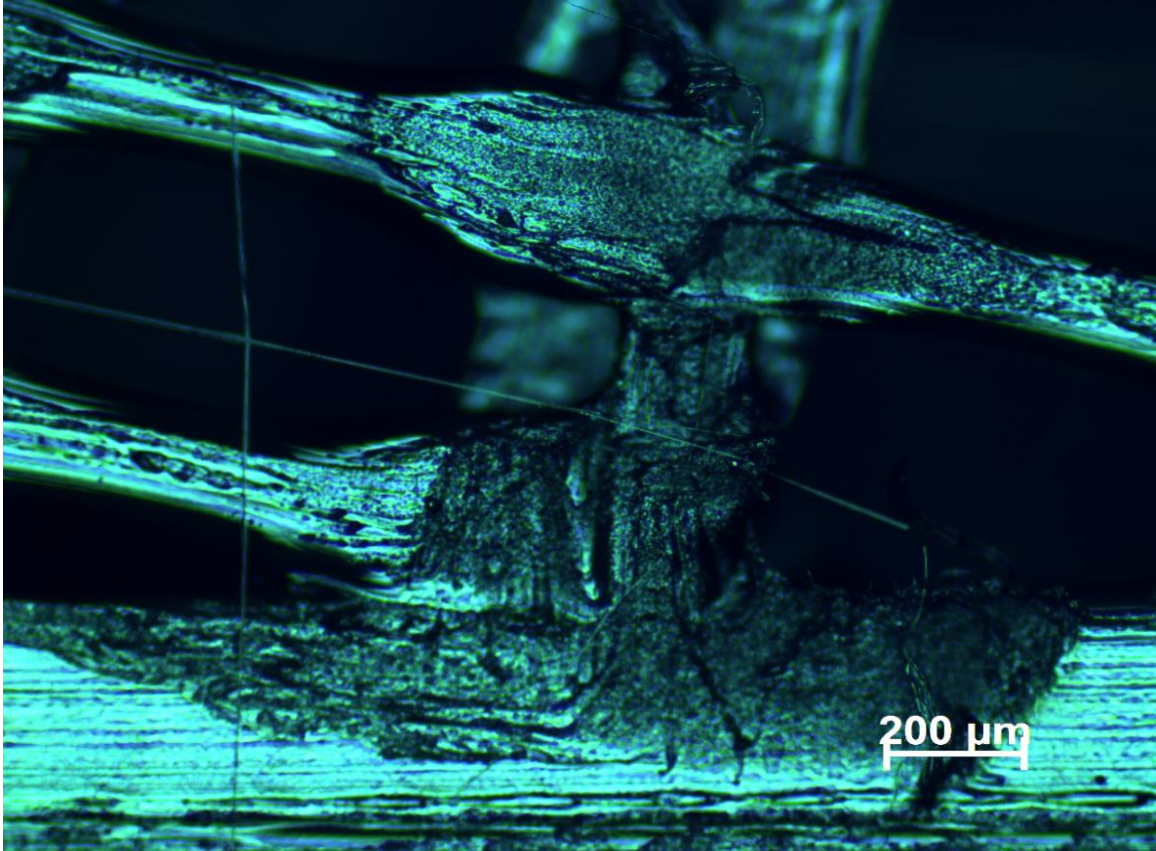


Εικόνα 4.7: Το πάχος γραμμής (path width) της στρώσης

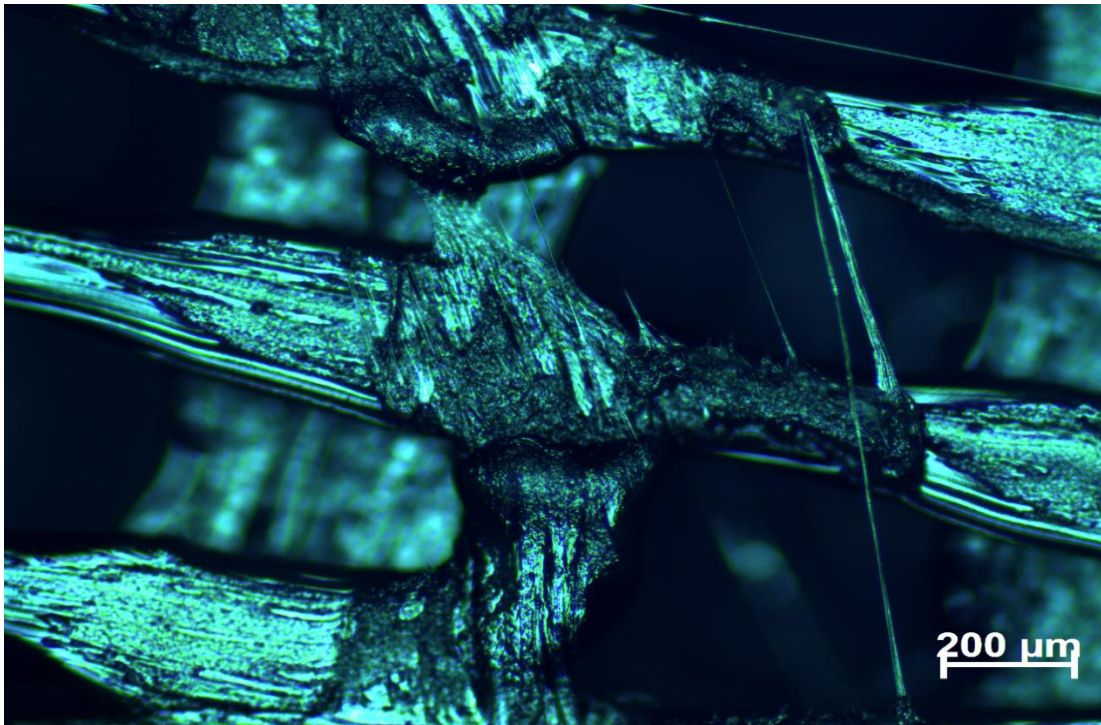


Εικόνα 4.8: Διαστάσεις για τον υπολογισμό του εμβαδού των πόρων

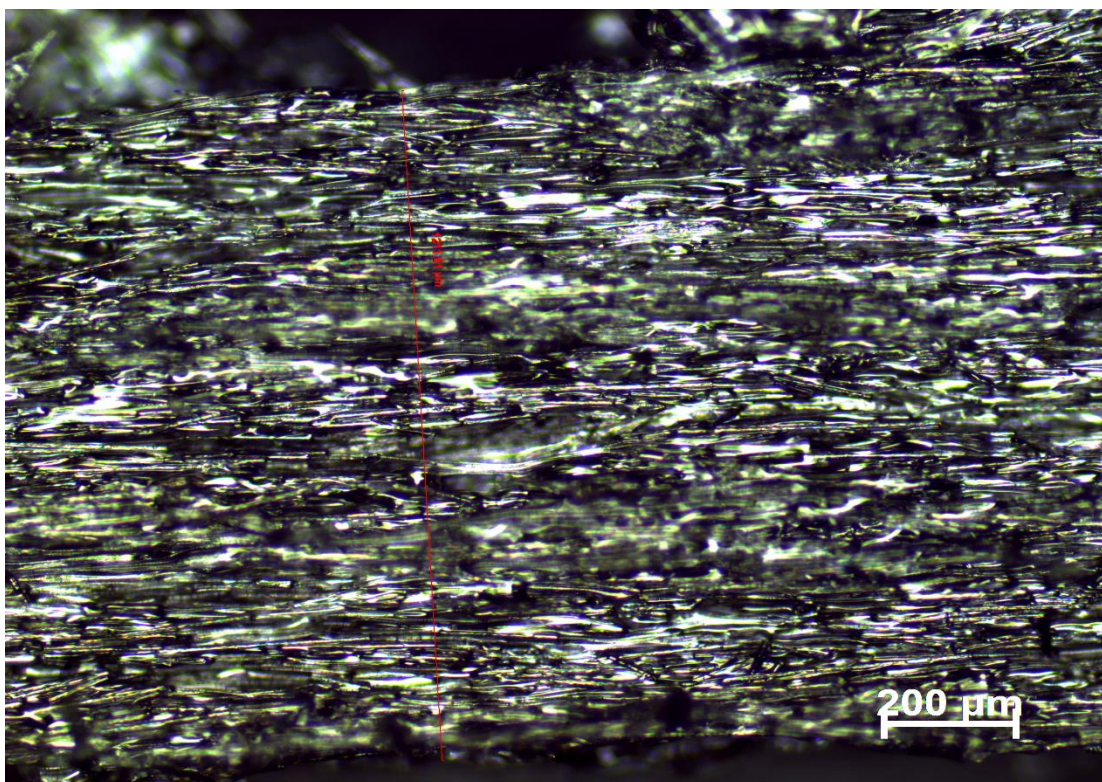
Τέλος, με τη βοήθεια του οπτικού μικροσκοπίου, έγινε έλεγχος για ανεπιθύμητα φαινόμενα στις μικροδομές του εσωτερικού του δοκιμίου, κάτι που δεν είναι δυνατό να γίνει «με το μάτι». Παρατηρήθηκαν κυρίως ιστοί ανάμεσα σε γραμμές υλικού και σκέβρωση. Οι ιστοί γίνονται αμέσως αντιληπτοί όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Αντίθετα, η σκέβρωση φαίνεται μέσω της αλλαγής επιπέδου του υλικού και παρατηρείται καλύτερα με τη διαδοχική αλλαγή εστίασης του φακού (focus). Τα δοκίμια που εμφάνισαν σκέβρωση και εμφανώς ελαττωματικές συγκολλήσεις απορρίφθηκαν.



Εικόνα 4.9: Παρουσίαση ιστών (cobwebing)



Εικόνα 4.10: Παρουσίαση ιστών (cobwebing)



Εικόνα 4.11: Σκέβρωση στο ένα άκρο του δοκιμίου. Ο φακός δεν μπορεί να εστιάσει πλήρως στο επίπεδο της εξωτερικής επιφάνειας, καθώς το υλικό στο σημείο αυτό δεν ακολουθεί ισοεπίπεδη κατανομή και παρουσιάζονται ανωμαλίες στην επιφάνεια.

4.2 Δοκιμή Εφελκυσμού

Αφού έγιναν επιτυχώς όλες οι δοκιμές εφελκυσμού, ελήφθησαν συγκεκριμένα δεδομένα για το φορτίο και την επιμήκυνση. Από μόνα τους, τα δεδομένα αυτά, δεν μπορούν να δώσουν πλήρη εικόνα για τις μηχανικές ιδιότητες που διερευνούνται. Χρειάστηκε, δηλαδή, να γίνουν πολλαπλοί υπολογισμοί σε στάδια, έτσι ώστε από τα δεδομένα αυτά, να ληφθούν οι επιθυμητές τιμές. Τα στάδια αυτά ακολουθήθηκαν για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά και αναλύονται παρακάτω:

1. Αρχικώς υπολογίστηκαν τα εμβαδά διατομής κάθε δοκιμίου με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου:

$$A = 2(\alpha_1\alpha_2) + 0,5[(\alpha_3 - 2\alpha_2)\alpha_2]$$

, όπου α_1 το πάχος των εξωτερικών κελύφων

α_2 το πάχος του δοκιμίου

α_3 το μήκος του λαιμού του δοκιμίου

Αντίστοιχα υπολογίστηκε και το αντίστοιχο σφάλμα:

$$\delta A = \sum_{i=1}^3 \sqrt{\left(\frac{\theta A}{\theta \alpha_i} * \delta \alpha_i\right)}$$

Τα εμβαδά διατομής είναι απαραίτητα για την επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται απευθείας από τη δοκιμή εφελκυσμού. Πιο συγκεκριμένα, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, με την τιμή του εμβαδού διατομής είναι δυνατή η μετατροπή της τιμής της δύναμης που ασκεί η μηχανή εφελκυσμού στο δοκίμιο σε τάσεις. Κατά συνέπεια, μπορεί έπειτα να σχεδιαστεί και η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης.

Έτσι καταλήξαμε αρχικώς στις παρακάτω τιμές για τα εμβαδά διατομής:

Πίνακας 4.1: Εμβαδά διατομής και σφάλμα για τα δοκίμια από PLA

PLA	
A (mm ²)	Error (mm ²)
11,077	0,421
10,455	0,408
10,995	0,413
13,965	0,463
13,965	0,463
14,043	0,466
14,405	0,473
14,783	0,498
15,078	0,503

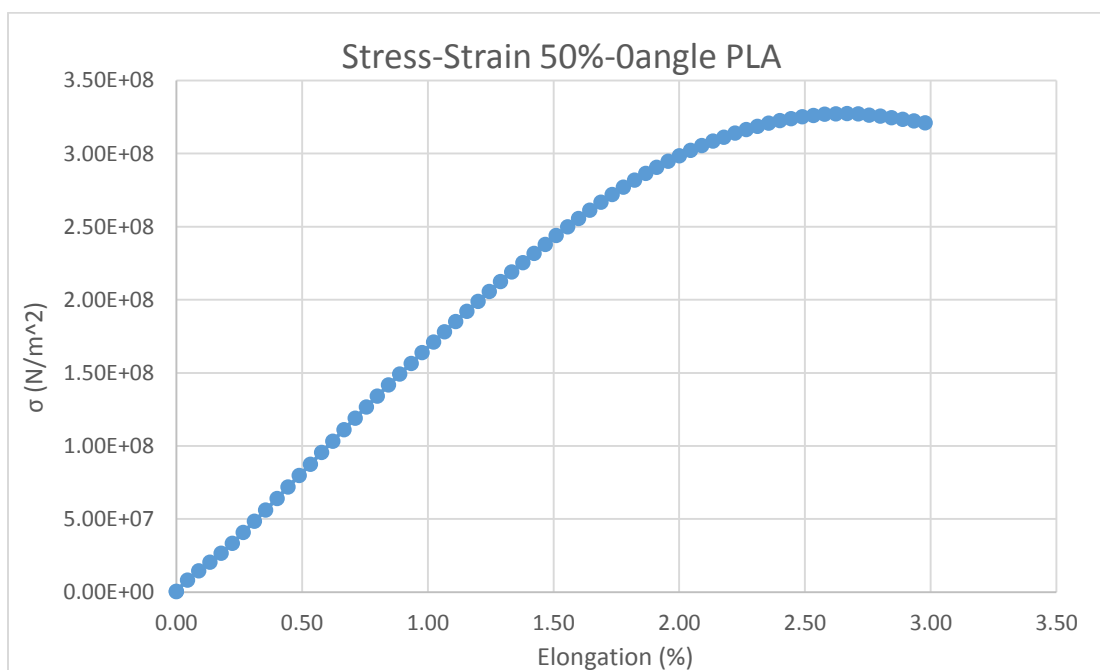
Πίνακας 4.2: Εμβαδά διατομής και σφάλμα για τα δοκίμια από Carbonfil™

Carbonfil™	
A (mm ²)	Error
10,955	0,407
12,365	0,423
10,475	0,418
10,965	0,453
12,125	0,484
13,125	0,464
11,975	0,469
13,525	0,502
14,865	0,508

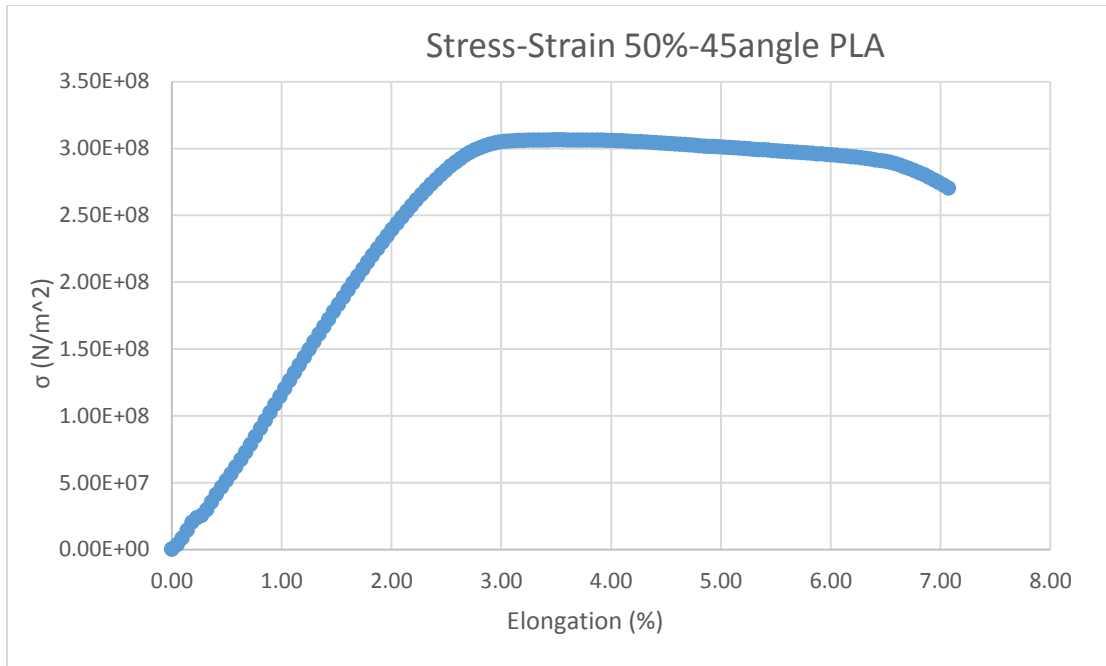
2. Έπειτα, έχοντας από τον Η/Υ της διάταξης της μηχανής εφελκυσμού το επιβαλλόμενο φορτίο (Load N/m) και την παραμόρφωση καθώς και τα εμβαδά διατομής, υπολογίστηκαν οι τάσεις σ , ως εξής:

$$\sigma = \frac{\text{Load} \left(\frac{N}{m}\right)}{A \text{ (mm}^2\text{)}}$$

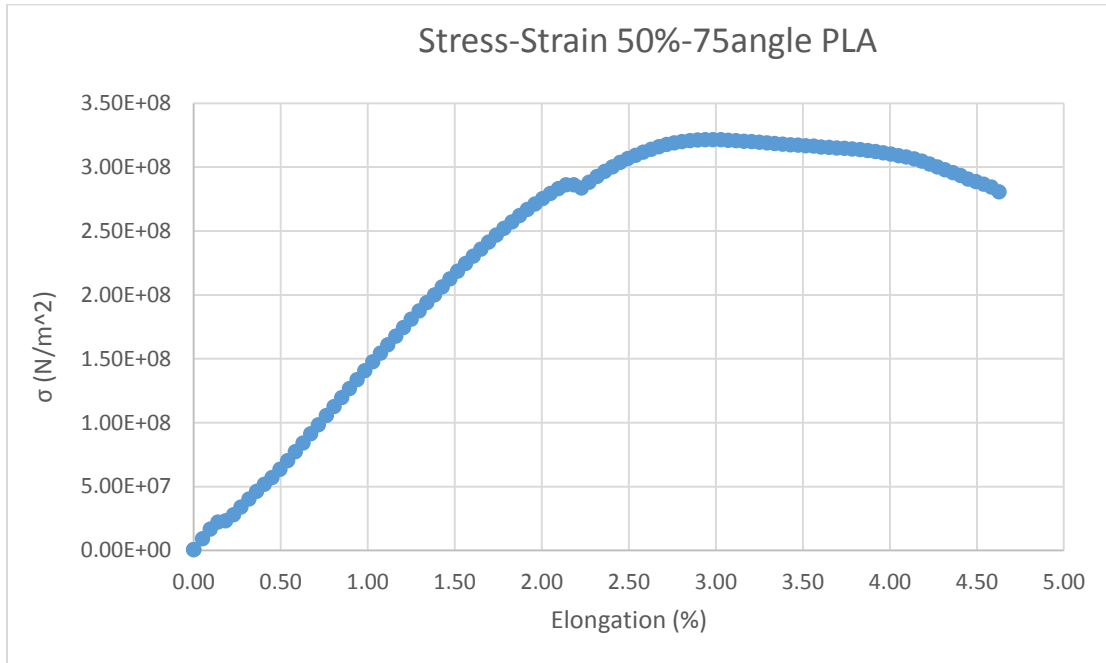
Έτσι, έχοντας παράλληλα και τις παραμορφώσεις απευθείας από τον Η/Υ, δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Excel της Microsoft οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω:



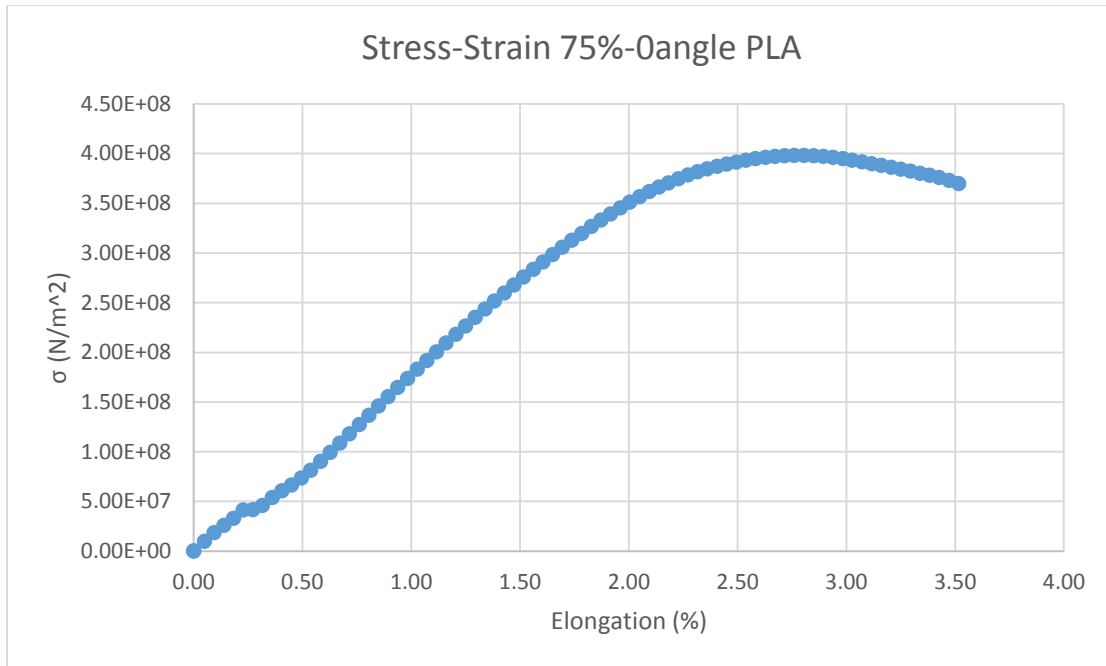
Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με PLA με 50% ποσοστό πλήρωσης και 0° γωνία εκτύπωσης



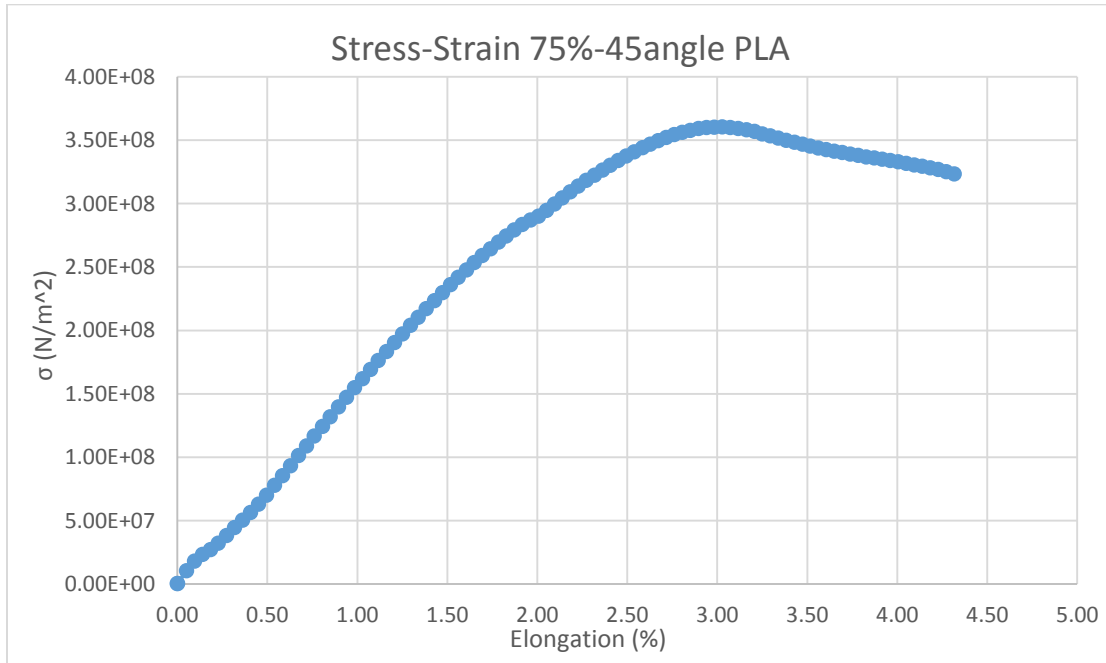
Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με PLA με 50% ποσοστό πλήρωσης και 45° γωνία εκτύπωσης



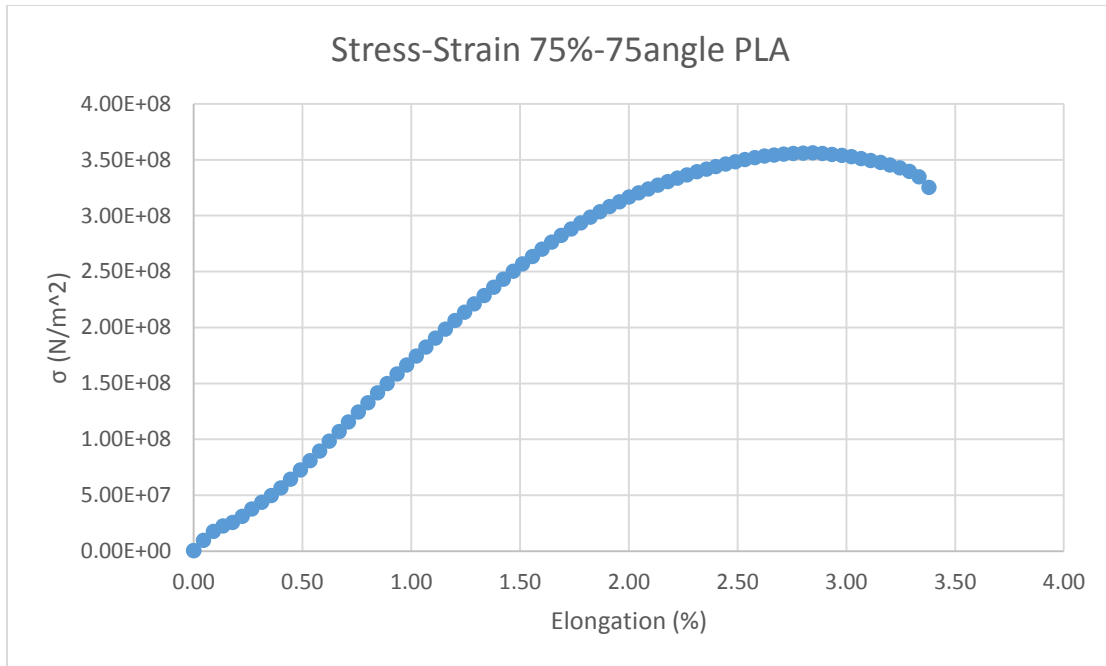
Διάγραμμα 4.3: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με PLA με 50% ποσοστό πλήρωσης και 75° γωνία εκτύπωσης



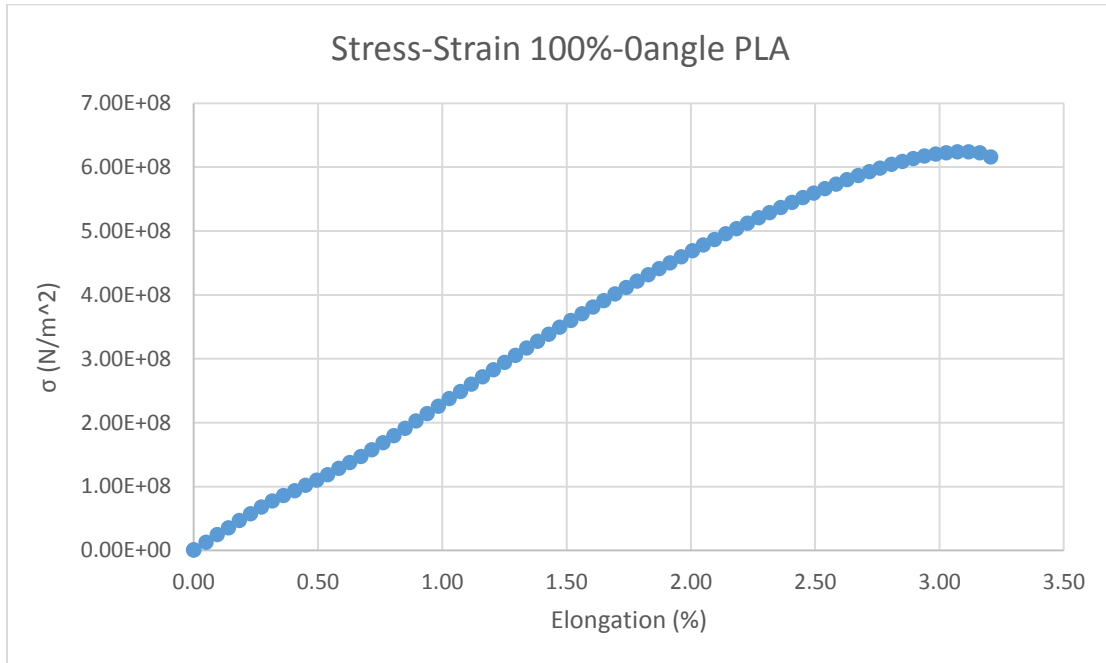
Διάγραμμα 4.4: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με PLA με 75% ποσοστό πλήρωσης και 0° γωνία εκτύπωσης



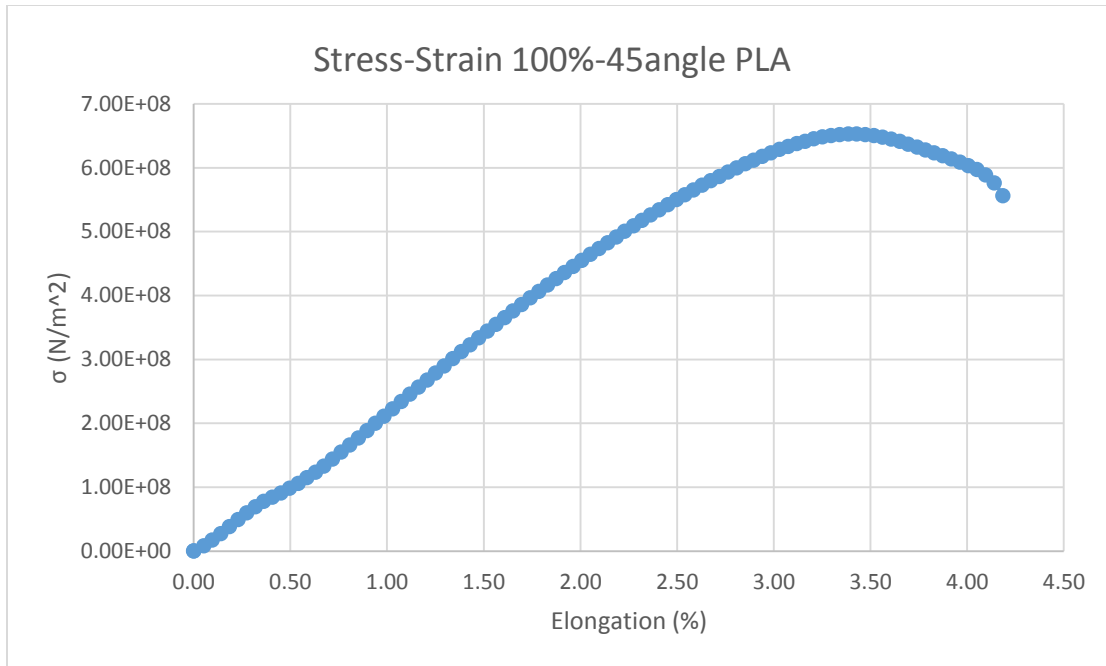
Διάγραμμα 4.5: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με PLA με 75% ποσοστό πλήρωσης και 45° γωνία εκτύπωσης



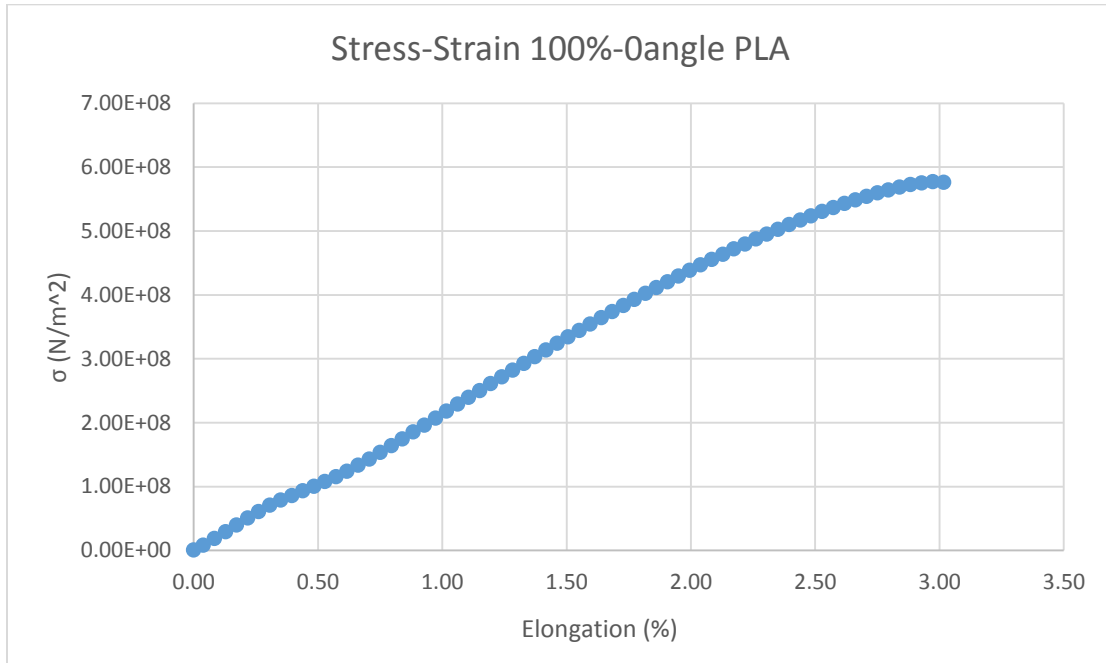
Διάγραμμα 4.6: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με PLA με 75% ποσοστό πλήρωσης και 75° γωνία εκτύπωσης



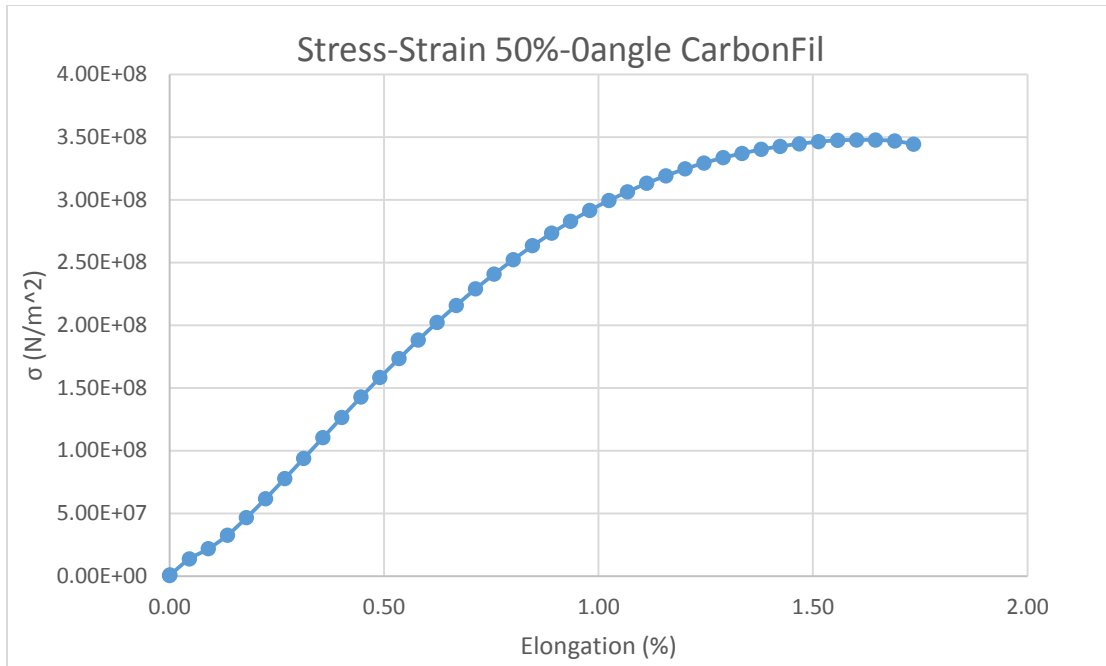
Διάγραμμα 4.7: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με PLA με 100% ποσοστό πλήρωσης και 0° γωνία εκτύπωσης



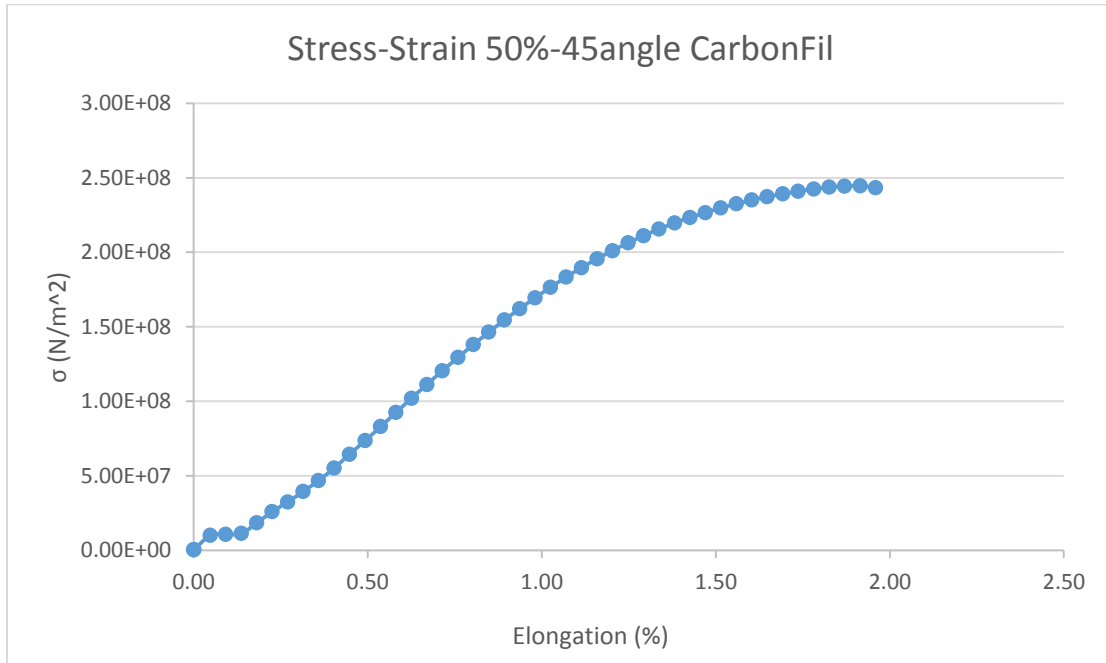
Διάγραμμα 4.8: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με PLA με 100% ποσοστό πλήρωσης και 45° γωνία εκτύπωσης



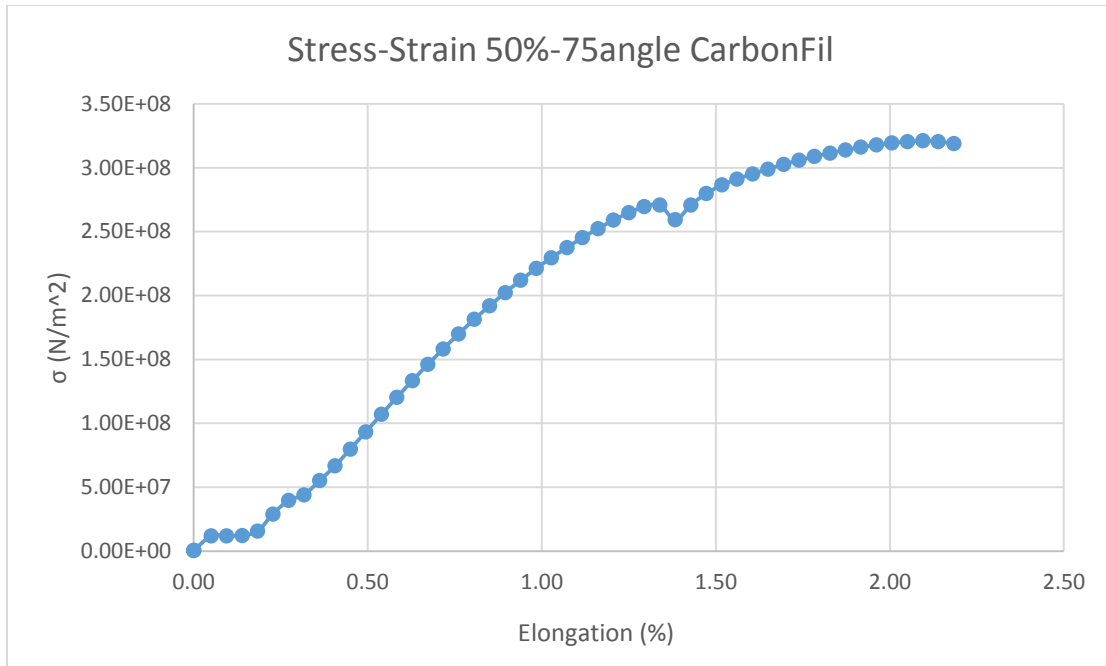
Διάγραμμα 4.9: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με PLA με 100% ποσοστό πλήρωσης και 75° γωνία εκτύπωσης



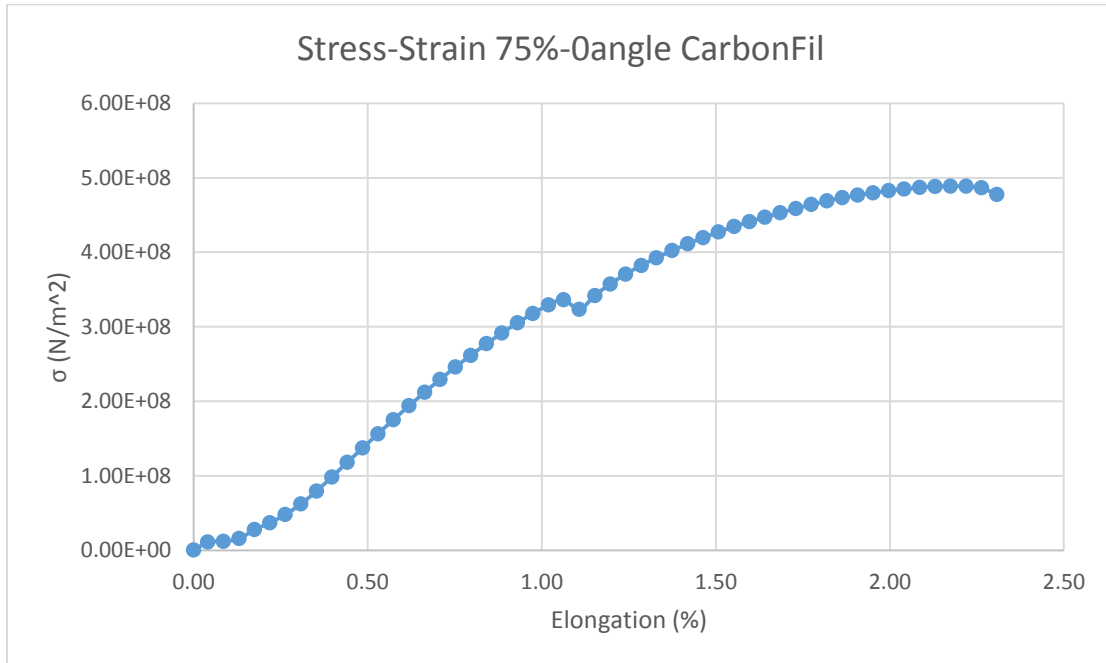
Διάγραμμα 4.10: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με Carbonfil™ με 50% ποσοστό πλήρωσης και 0° γωνία εκτύπωσης



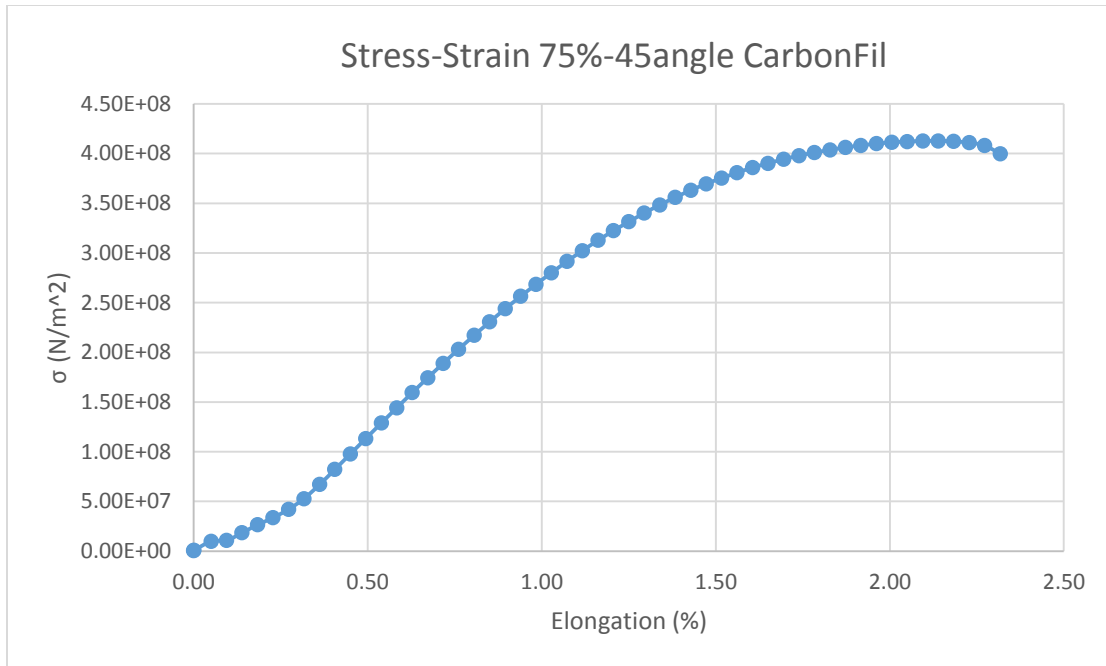
Διάγραμμα 4.11: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με Carbonfil™ με 50% ποσοστό πλήρωσης και 45° γωνία εκτύπωσης



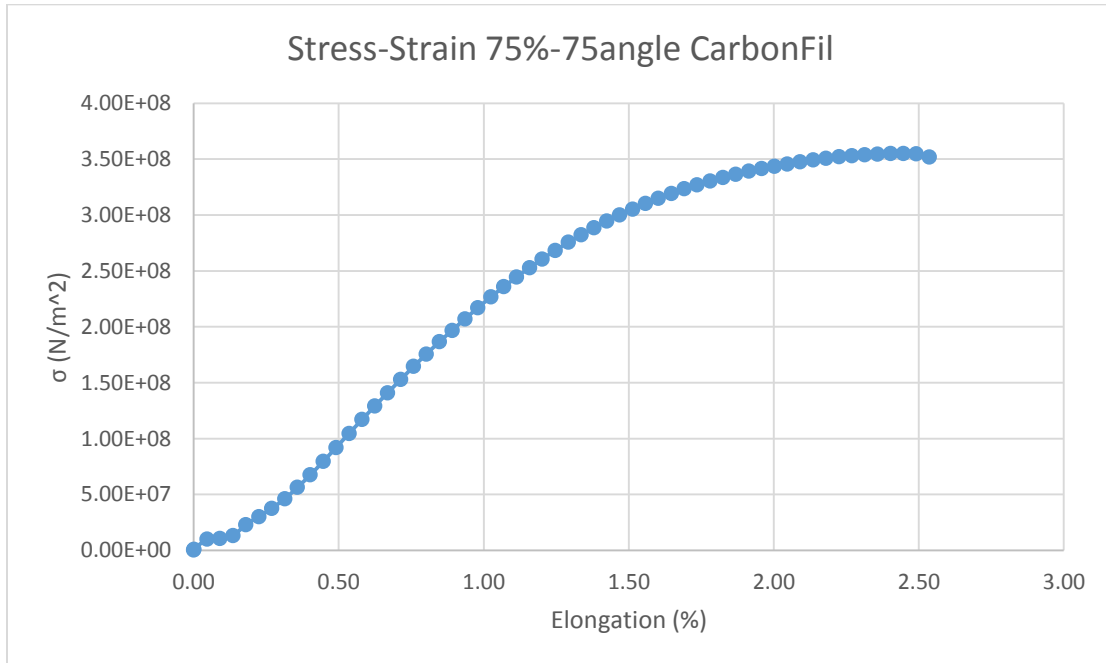
Διάγραμμα 4.12: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με Carbonfil™ με 50% ποσοστό πλήρωσης και 75° γωνία εκτύπωσης



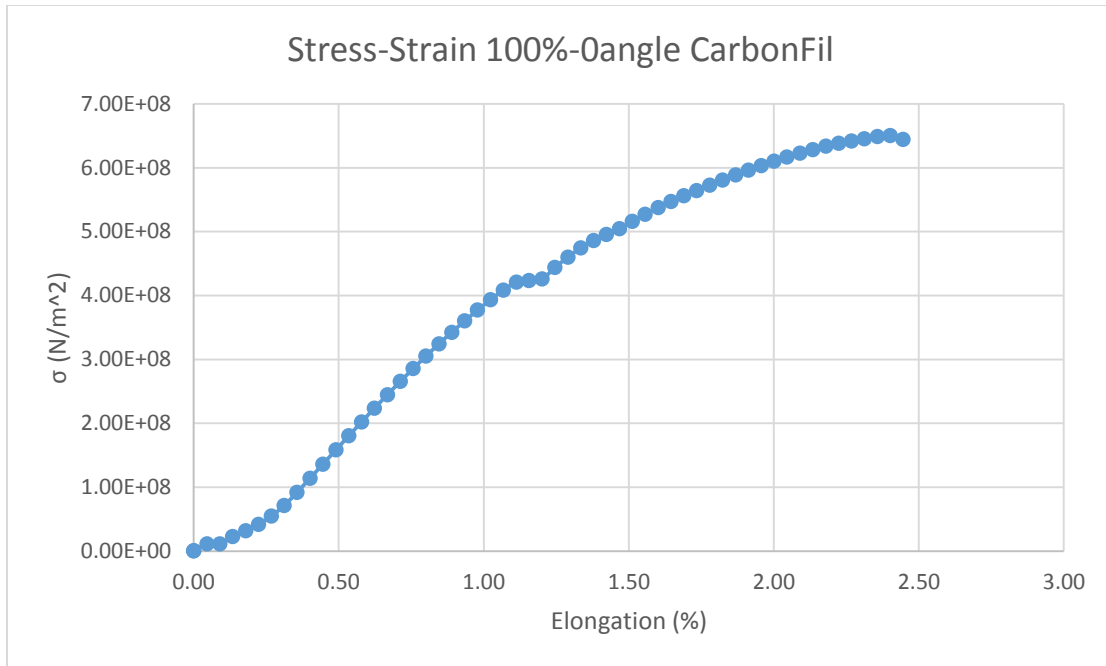
Διάγραμμα 4.13: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με Carbonfil™ με 75% ποσοστό πλήρωσης και 0° γωνία εκτύπωσης



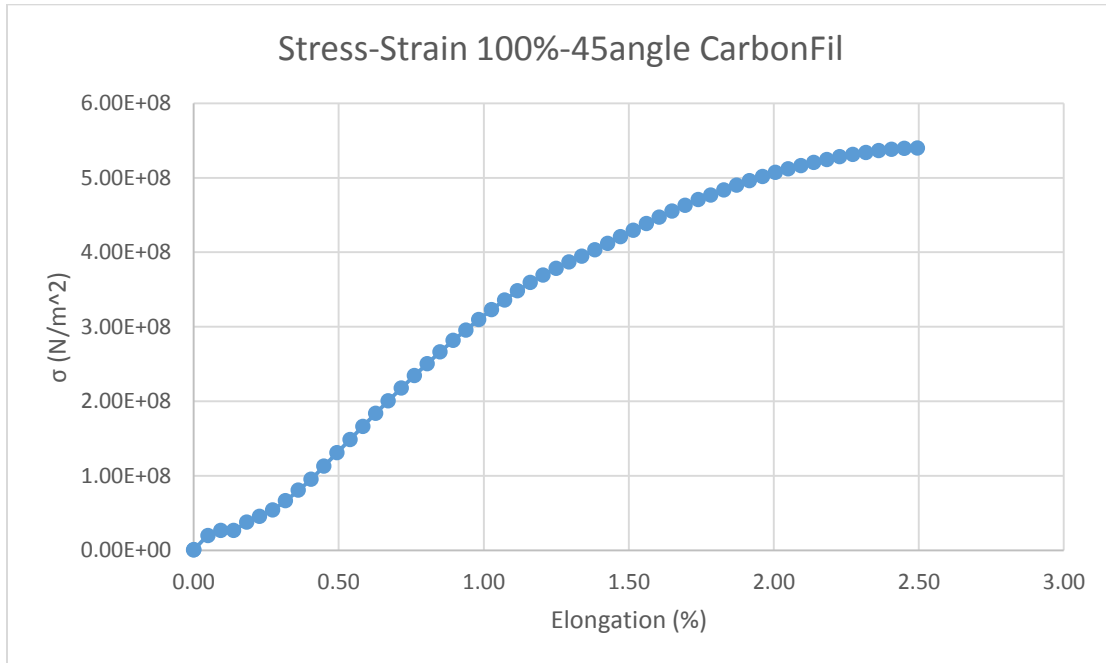
Διάγραμμα 4.14: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με Carbonfil™ με 75% ποσοστό πλήρωσης και 45° γωνία εκτύπωσης



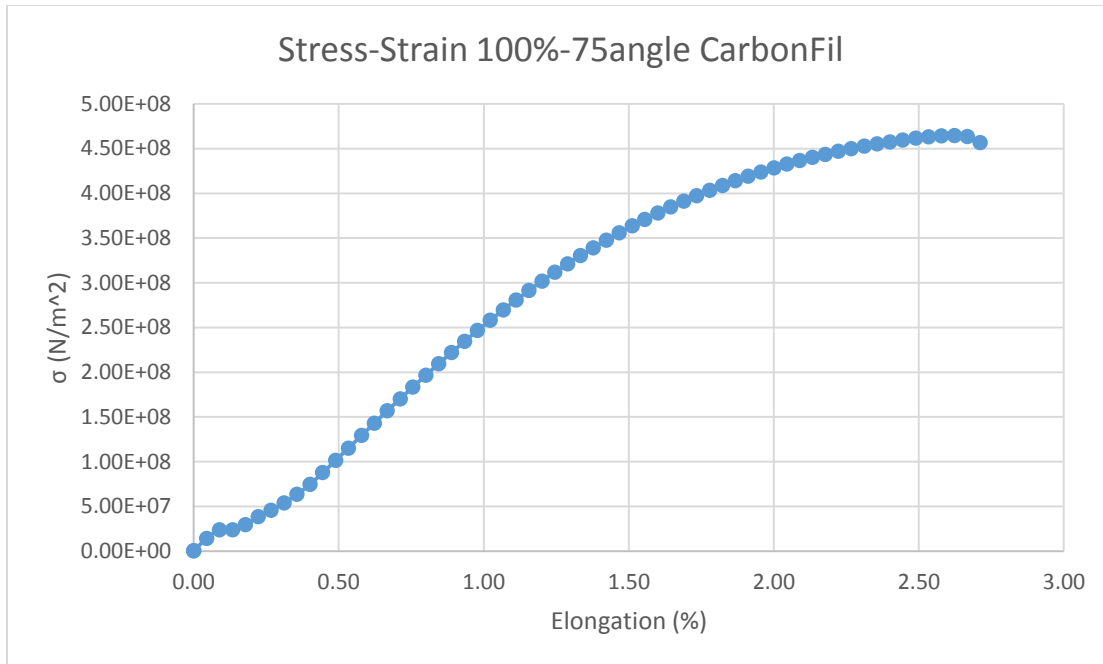
Διάγραμμα 4.15: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με Carbonfil™ με 75% ποσοστό πλήρωσης και 75° γωνία εκτύπωσης



Διάγραμμα 4.16: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με Carbonfil™ με 100% ποσοστό πλήρωσης και 0° γωνία εκτύπωσης



Διάγραμμα 4.17: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με Carbonfil™ με 100% ποσοστό πλήρωσης και 45° γωνία εκτύπωσης



Διάγραμμα 4.18: Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο με Carbonfil™ με 100% ποσοστό πλήρωσης και 75° γωνία εκτύπωσης

- Αφού δημιουργήθηκαν οι καμπύλες τάσεις-παραμόρφωσης, το επόμενο βήμα ήταν η «μελέτη» τους για τον προσδιορισμό των διαφόρων μηχανικών ιδιοτήτων που εξετάστηκαν.

Αρχικώς, το «Yield Strength» δεν μπορούσε να υπολογιστεί. Αυτό φαίνεται και στις παραπάνω καμπύλες, όπου στην πλειονότητά τους, δεν είναι ξεκάθαρο το σημείο αυτό, στο οποίο αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση. Όπως θα εξηγηθεί αναλυτικότερα και στα συμπεράσματα της παρούσης εργασίας, αυτό πιθανώς να οφείλεται στην έλλειψη προτύπων δοκιμών εφελκυσμού για τριδιάστα εκτυπωμένα δοκίμια. Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο D638_I κατά ASTM, το οποίο ενδείκνυται για όλα τα θερμοπλαστικά. Παρόλ' αυτά όμως, απαιτείται η περαιτέρω διερεύνηση ως προς τα τριδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται η δημιουργία ενός πρωτότυπου δοκιμίου εφελκυσμού για δοκίμια κατασκευασμένα από τριδιάστατους εκτυπωτές, καθώς αυτά έχουν σημαντικές δομικές διαφορές σε σύγκριση με τα «κανονικά». Επίσης, πέραν της έλλειψης προτύπων για εκτυπωμένα δοκίμια, ένας άλλος λόγος για τη δυσκολία εύρεσης του «Yield point» στα παραπάνω διαγράμματα, είναι πιθανώς η μικρή αλλαγή συμπεριφοράς του υλικού ως προς την παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, από τη στιγμή που δεν είναι ξεκάθαρο το «Yield point», οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως η ελαστική με την πλαστική περιοχή παραμόρφωσης είναι δυσδιάκριτες. Αυτό μπορεί κατά συνέπεια να σημαίνει πως το

δοκίμιο παραμορφώνεται αρχικώς ελαστικά και έπειτα οδηγείται σε πλαστική παραμόρφωση πολύ «αργά» και όχι απότομα.

Το Young's Modulus υπολογίστηκε από την κλίση της νοητής ευθείας κάθε καμπύλης στην καθαρά ελαστική περιοχή:

$$\text{Young's Modulus} = \frac{\text{Rise}}{\text{Run}}$$

Η μέγιστη τάση σε εφελκυσμό (Max Stress) υπολογίστηκε απευθείας από τις τιμές τάσης που βρήκαμε αρχικά ως το μέγιστο του συνόλου αυτού.

Η μέγιστη ποσοστιαία παραμόρφωση (Max Elongation %) υπολογίστηκε επίσης από τις ήδη γνωστές τιμές. Πρέπει εδώ να τονιστεί, πως συχνά η μέγιστη ποσοστιαία παραμόρφωση συγχέεται με την μέγιστη παραμόρφωση μέχρι τη θραύση (Max elongation at Fracture). Στην παρούσα εργασία, μεγάλου ενδιαφέροντος για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών, ήταν η μέγιστη παραμόρφωση στο σημείο μέγιστης τάσης (Max Elongation at Ultimate Stress). Στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης οι τιμές της μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό (Max Stress) και μέγιστης παραμόρφωσης (Max Elongation %) ταυτίζονται, καθώς βρίσκονται και οι δύο στο ίδιο σημείο του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Ο λόγος υπολογισμού και εξέτασης της μέγιστης παραμόρφωσης στο σημείο μέγιστης τάσης (Max Elongation at Ultimate Stress) και όχι της μέγιστης παραμόρφωσης σε θραύση (Max elongation at Fracture) είναι απλός: Το υλικό ακριβώς μετά το μέγιστο της τάσης, αρχίζει και εμφανίζει απροσδιόριστη συμπεριφορά ως προς την παραμόρφωση. Αυτό που έχει μεγαλύτερη σημασία είναι να εξετάσει κανείς πόσο μπορεί να παραμορφωθεί το υλικό μέχρι ένα «ασφαλές» σημείο και όχι μέχρι να σπάσει τελείως. Άρα καθαρά για εξέταση της παραμόρφωσης του υλικού και του κατά πόσο ένα υλικό ενδείκνυται για κατασκευές που απαιτούν ασφάλεια, μεγαλύτερη σημασία έχει η μέγιστη παραμόρφωση στο σημείο μέγιστης τάσης (Max Elongation at Ultimate Stress) και όχι η μέγιστη παραμόρφωση μέχρι τη θραύση (Max elongation at Fracture).

Τέλος, όσον αφορά τη μέγιστη τάση που μπορεί να ασκηθεί μέχρι να θραύσει τελείως το δοκίμιο (Max Stress at Fracture), αυτή υπολογίστηκε εύκολα ως εξής: Μετά από το σημείο μέγιστης τάσης, η τάση αρχίζει και μειώνεται με σχεδόν σταθερό ρυθμό (έτσι εξηγείται άλλωστε και η φθίνουσα καμπύλη πέραν του σημείου αυτού) μέχρι ένα σημείο. Το σημείο αυτό λέγεται σημείο θραύσης και είναι εύκολα ορατό στο διάγραμμα, καθώς μετά από το σημείο θραύσης, παρατηρείται μία απότομη –σχεδόν κάθετη και ευθεία- πτώση της καμπύλης προς μηδενικές τιμές τάσης.

Στους παρακάτω πίνακες αποτυπώνονται οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που προαναφέρθηκαν, όπως υπολογίσθηκαν για κάθε υλικό ξεχωριστά.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διάφορες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών PLA:

Πίνακας 4.3: Τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών PLA

Infill %	Infill Angle	max Stress (N/m ²)	max ε%	Young's Modulus (N/m ²)	Stress at Fracture (N/m ²)	A (mm ²)	Error
50	0 °	3,27E+08	2,755455677	1,76E+10	3,21E+08	11,077	0,421
50	45 °	3,07E+08	3,261992075	1,29E+10	2,70E+08	10,455	0,408
50	75 °	3,21E+08	3,117208043	1,58E+10	2,80E+08	10,995	0,413
75	0 °	3,98E+08	2,850045352	2,05E+10	3,70E+08	13,965	0,463
75	45 °	3,60E+08	3,072570219	1,75E+10	3,23E+08	13,965	0,463
75	75 °	3,56E+08	2,890963357	1,94E+10	3,25E+08	14,043	0,465
100	0 °	6,24E+08	3,117208043	2,51E+10	6,15E+08	14,405	0,473
100	45 °	6,13E+08	3,329141408	2,50E+08	5,56E+08	14,783	0,498
100	75 °	5,77E+08	2,972666517	2,41E+10	5,76E+08	15,078	0,503

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διάφορες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών Carbonfil™:

Πίνακας 4.4: Τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών Carbonfil

Infill %	Infill Angle	max Stress (N/m ²)	max ε%	Young's Modulus (N/m ²)	Stress at Fracture (N/m ²)	A (mm ²)	Error
50	0 °	3,48E+08	1,646153	3,65E+10	3,44E+08	10,955	0,407
50	45 °	2,45E+08	1,914777	2,05E+10	2,43E+08	12,365	0,423
50	75 °	3,21E+08	2,138763	2,97E+10	3,19E+08	10,475	0,418
75	0 °	4,89E+08	2,174367	4,26E+10	4,77E+08	10,965	0,453
75	45 °	4,13E+08	2,139294	3,49E+10	4,00E+08	12,125	0,484
75	75 °	3,55E+08	2,491216	2,73E+10	3,52E+08	13,125	0,464
100	0 °	6,51E+08	2,401409	4,90E+10	6,45E+08	11,975	0,469
100	45 °	5,40E+08	2,495201	3,95E+10	5,40E+08	13,525	0,502
100	75 °	4,65E+08	2,323269	3,08E+10	4,57E+08	14,865	0,508

Όπως φαίνεται και στους παραπάνω πίνακες, οι βέλτιστες τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες Max Stress, Young's Modulus, Stress at Fracture βρέθηκαν και για τα δύο υλικά για τιμές παραμέτρων ποσοτού πλήρωσης και γωνίας εκτύπωσης 100% και 0° αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά όσον αφορά τη μέγιστη ποσοστιαία επιμήκυνση, αυτή βρέθηκε και για τα δύο υλικά στο συνδυασμό 100% και 45°.

Πίνακας 4.5: Βέλτιστες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων για τα δύο υλικά

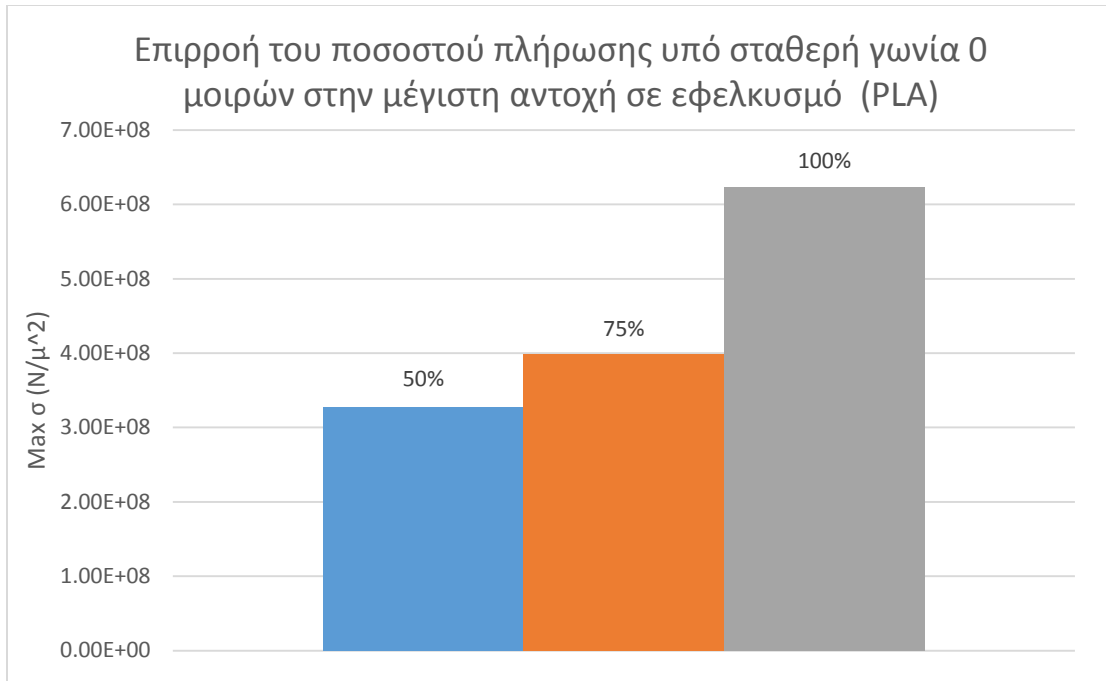
Υλικό	Max Stress (N/m ²)	max ε%	Young's Modulus (N/m ²)	Stress at Fracture (N/m ²)
PLA	6,24E+08	3,329141	2,51E+10	6,15E+08
Carbonfil™	6,51E+08	2,495201	4,90E+10	6,45E+08

Συζήτηση Αποτελεσμάτων

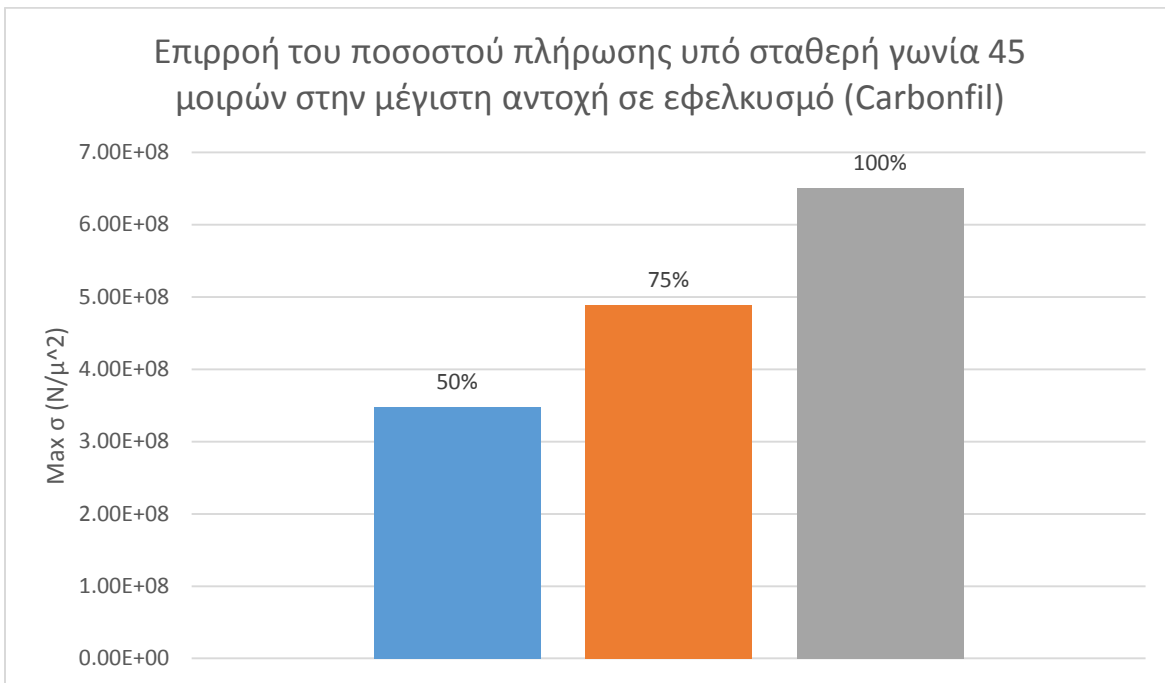
Κατά τη δοκιμή εφελκυσμού, παρουσιάστηκαν ομοιότητες στη συμπεριφορά των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών μεταξύ των δύο υλικών, PLA και Carbonfil™. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Όσο αυξανόταν το ποσοστό πλήρωσης (Infill %), τόσο αυξανόταν και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Max Stress).
- Για σταθερή γωνία εκτύπωσης, όσο αυξανόταν το ποσοστό πλήρωσης, οι τιμές της επιμήκυνσης και του Young's Modulus παρουσίαζαν επίσης αύξηση για το Carbonfil, ενώ για το PLA η επιμήκυνση παρουσίαζε διακυμάνσεις.
- Για σταθερό ποσοστό πλήρωσης, όσο αυξανόταν η γωνία εκτύπωσης, τόσο μειώνονταν η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και το Young's Modulus.
- Με αύξηση της γωνίας εκτύπωσης υπό σταθερό ποσοστό πλήρωσης, παρατηρήθηκε αύξηση και της επιμήκυνσης μέχρι και τις 45° για το PLA και μέχρι τις 75° για το Carbonfil™.
- Το Carbonfil™ παρουσίασε υψηλότερες τιμές σε όλες τις μηχανικές ιδιότητες εκτός από την μέγιστη επιμήκυνση, όπου το PLA έδωσε πολύ μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά.
- Το «Yield Strength» τελικά δεν μπόρεσε να υπολογιστεί, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικά παρακάτω.

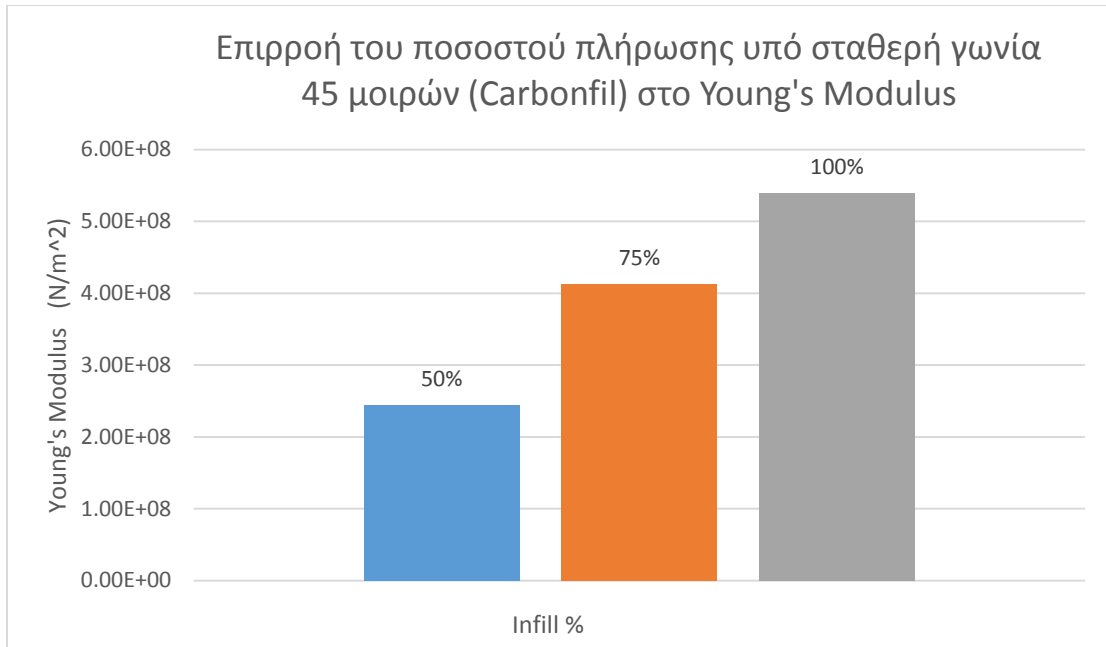
Οι παραπάνω παρατηρήσεις, αποτυπώνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



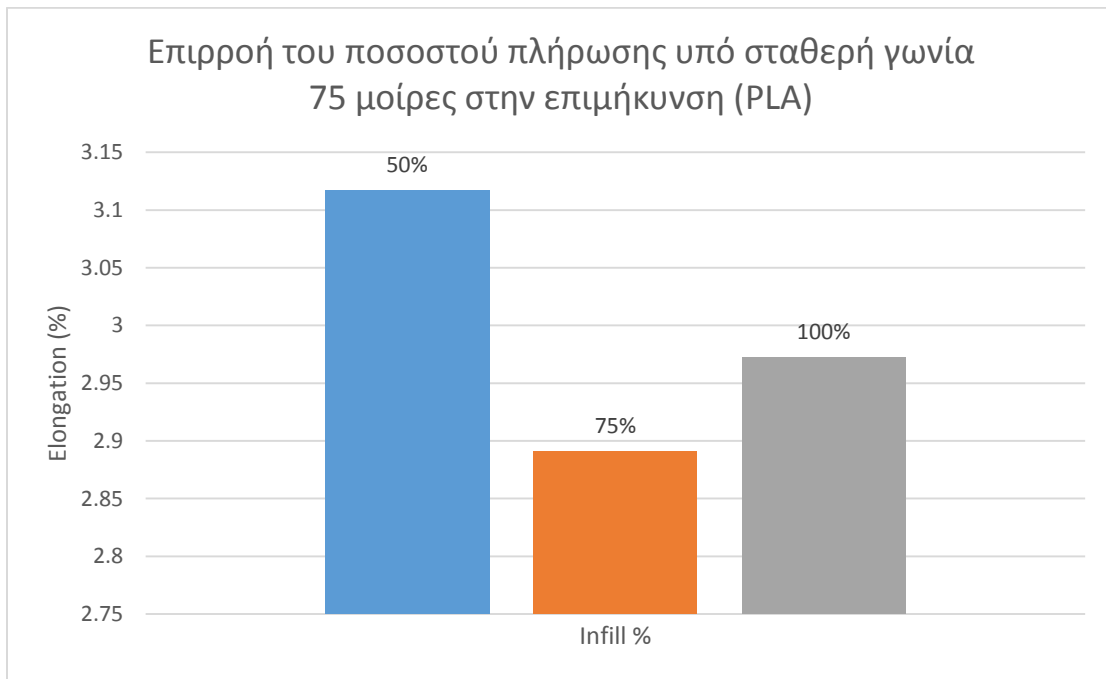
Διάγραμμα 4.19: Επιρροή του ποσοστού πλήρωσης υπό σταθερή γωνία 0 μοιρών στην μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (PLA)



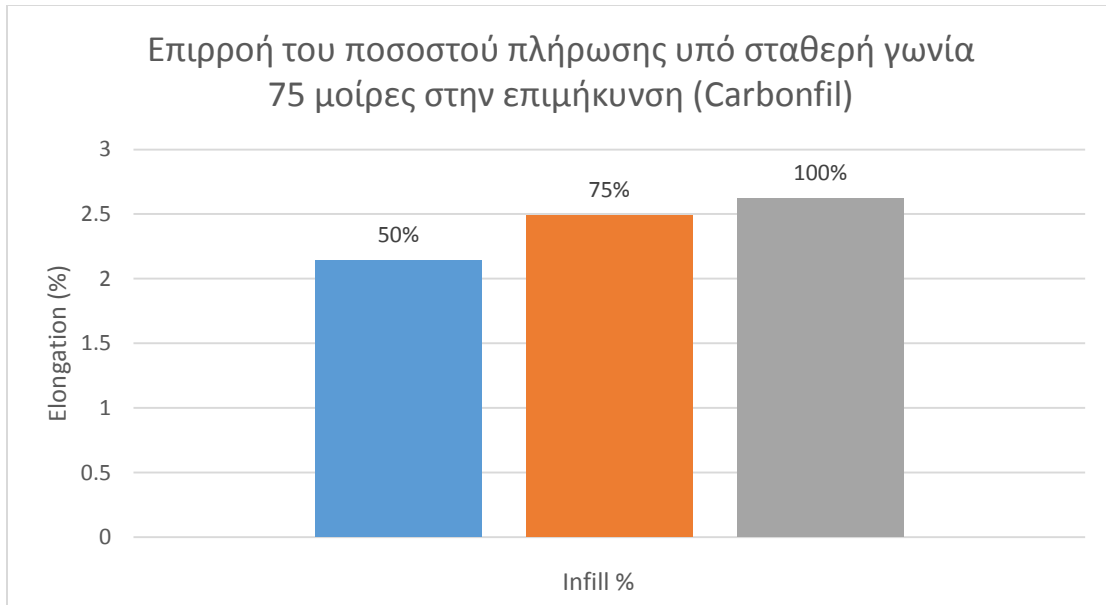
Διάγραμμα 4.20: Επιρροή του ποσοστού πλήρωσης υπό σταθερή γωνία 45 μοιρών στην μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Carbonfil)



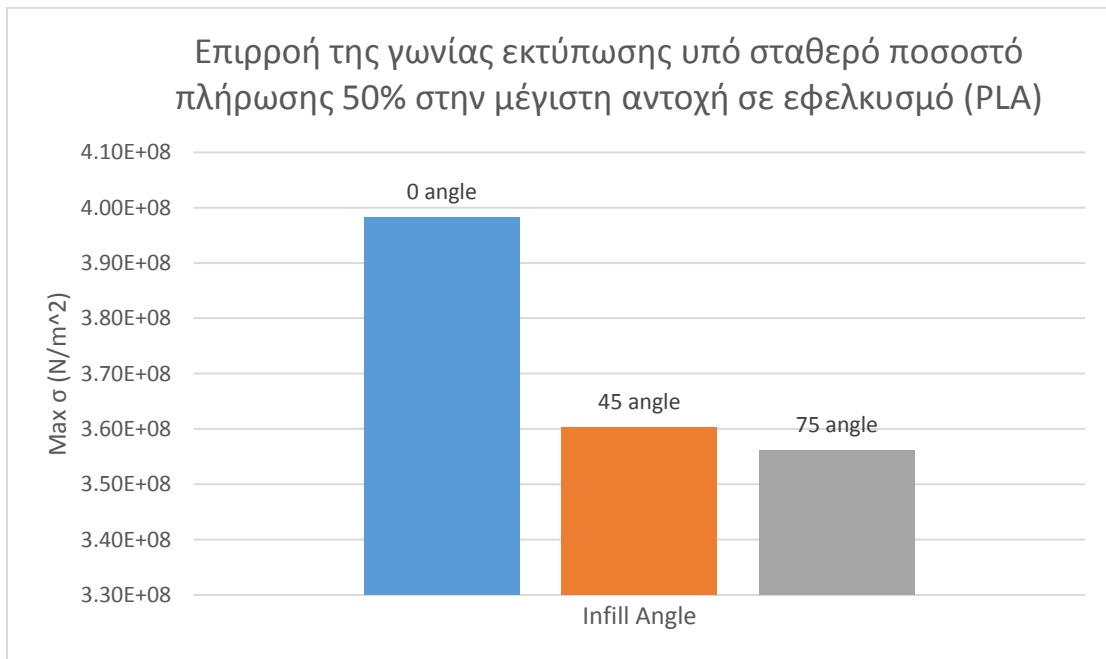
Διάγραμμα 4.21: Επιρροή του ποσοστού πλήρωσης υπό σταθερή γωνία 45 μοιρών (Carbonfil) στο Young's Modulus



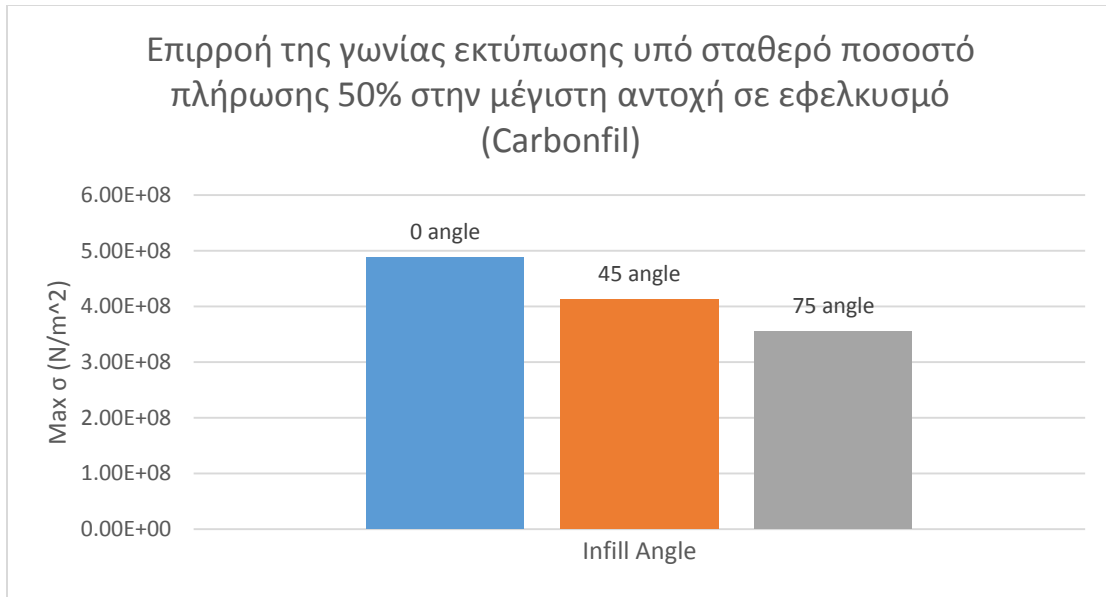
Διάγραμμα 4.22: Επιρροή του ποσοστού πλήρωσης υπό σταθερή γωνία 75 μοίρες στην επιμήκυνση (PLA)



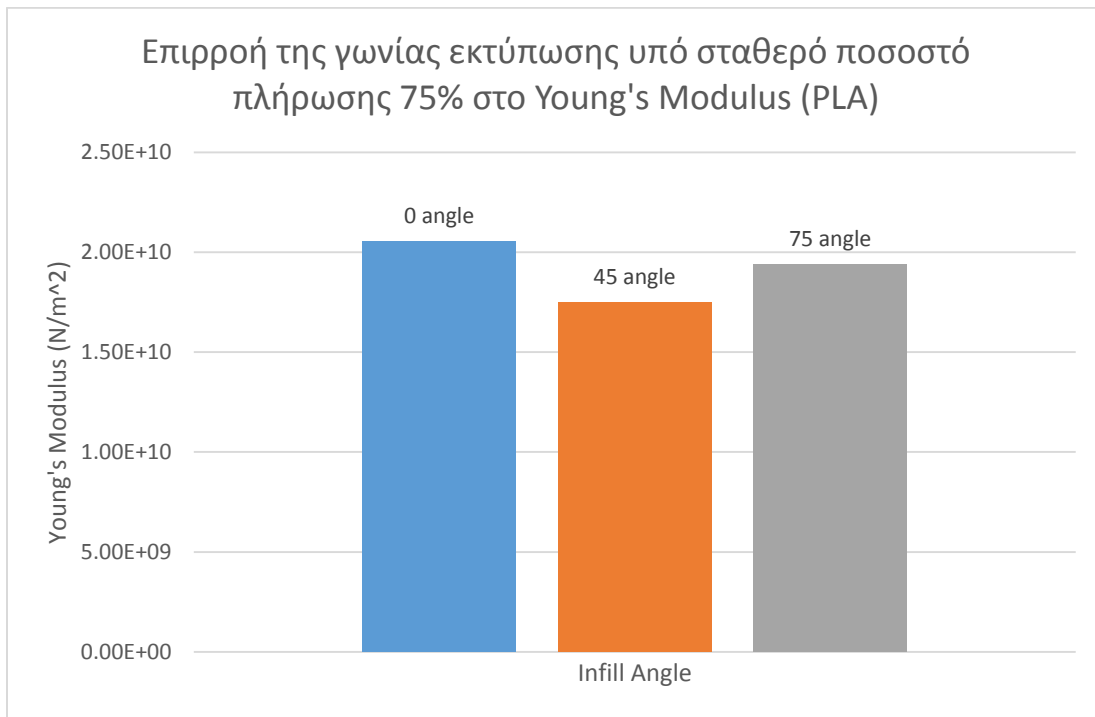
Διάγραμμα 4.23: Επιρροή του ποσοστού πλήρωσης υπό σταθερή γωνία 75 μοίρες στην επιμήκυνση (Carbonfil)



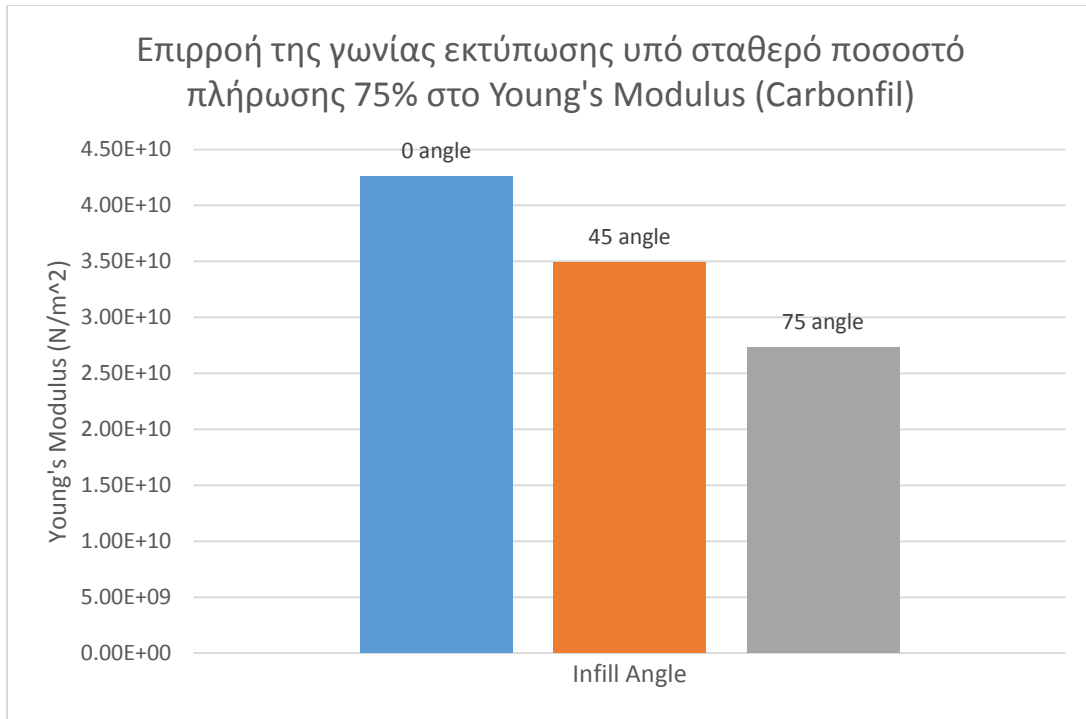
Διάγραμμα 4.24: Επιρροή της γωνίας εκτύπωσης υπό σταθερό ποσοστό πλήρωσης 50% στην μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (PLA)



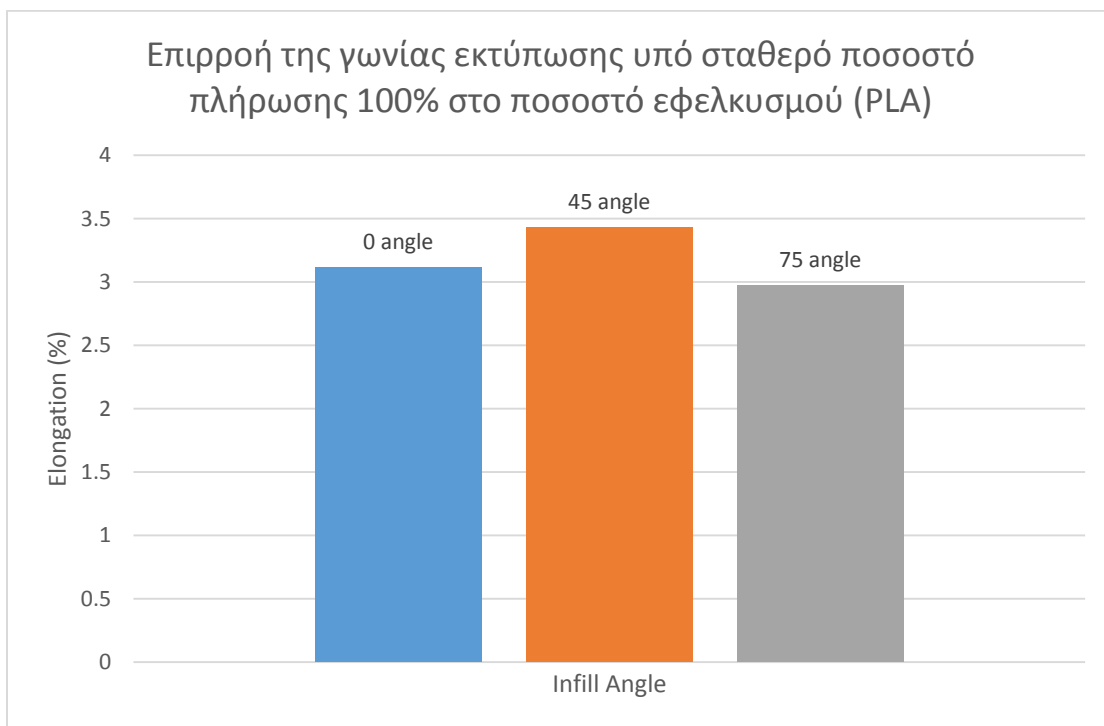
Διάγραμμα 4.25: Επιρροή της γωνίας εκτύπωσης υπό σταθερό ποσοστό πλήρωσης 50% στην μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Carbonfil)



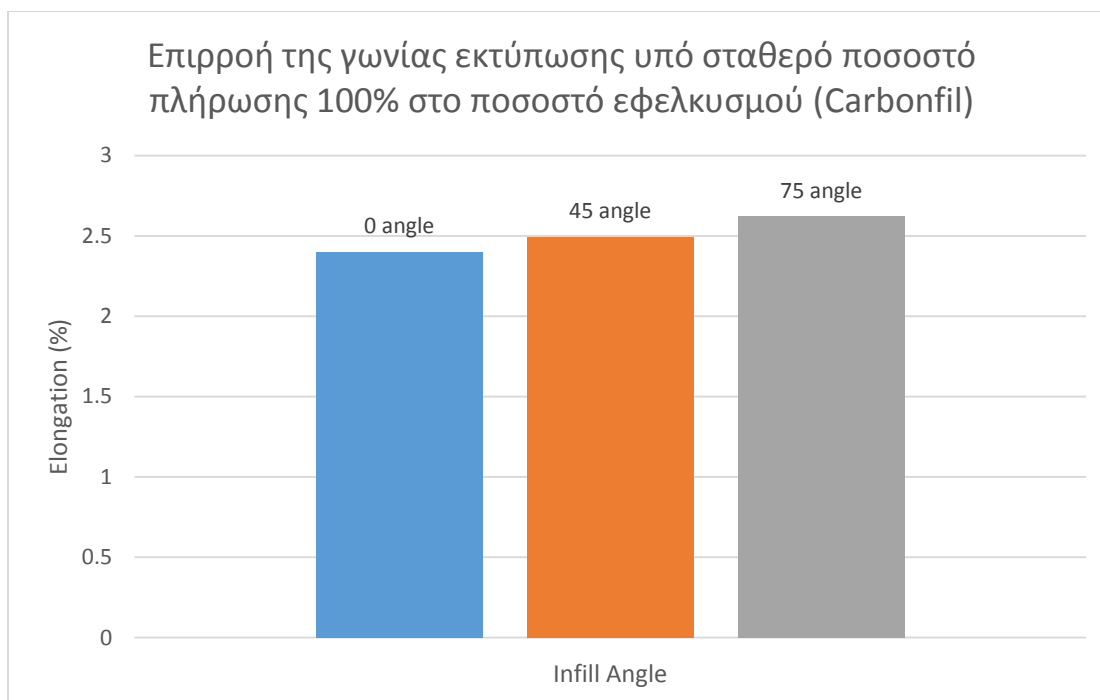
Διάγραμμα 4.26: Επιρροή της γωνίας εκτύπωσης υπό σταθερό ποσοστό πλήρωσης 75% στο Young's Modulus (PLA)



Διάγραμμα 4.27: Επιρροή της γωνίας εκτύπωσης υπό σταθερό ποσοστό πλήρωσης 75% στο Young's Modulus (Carbonfil)



Διάγραμμα 4.28: Επιρροή της γωνίας εκτύπωσης υπό σταθερό ποσοστό πλήρωσης 100% στο ποσοστό εφελκυσμού (PLA)



Διάγραμμα 4.29: Επιρροή της γωνίας εκτύπωσης υπό σταθερό ποσοστό πλήρωσης 100% στο ποσοστό εφελκυσμού (Carbonfil)

Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων PLA και Carbonfil™

Παρατίθενται αρχικώς στον παρακάτω πίνακα οι βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες για τα δύο υλικά ξεχωριστά:

Πίνακας 4.6: Βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες για τα δύο υλικά

Υλικό	Max Stress (N/m ²)	max ε%	Young's Modulus (N/m ²)	Stress at Fracture (N/m ²)
PLA	6,24E+08	3,329141	2,51E+10	6,15E+08
Carbonfil™	6,51E+08	2,495201	4,90E+10	6,45E+08

Παρατηρούμε πως οι μηχανικές ιδιότητες του Carbonfil™ υπερτερούν έναντι αυτών του PLA πλην όμως της ποσοστιαίας επιμήκυνσης, όπου το PLA έδωσε τιμή σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του Carbonfil™. Επίσης, σημαντικό είναι να υπενθυμιστεί πως οι βέλτιστες ιδιότητες και για τα δύο υλικά βρέθηκαν για τιμές των παραμέτρων 100% ποσοστό πλήρωσης και 0° γωνία εκτύπωσης πλην της ποσοστιαίας επιμήκυνσης. Και για τα δύο υλικά, η μέγιστη τιμή της ποσοστιαίας επιμήκυνσης βρέθηκε στις 45° γωνία εκτύπωσης και 100% ποσοστό πλήρωσης.

Συμπερασματικά, το Carbonfil™ δίνει τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με το PLA εκτός από την ποσοστιαία επιμήκυνση. Πώς μπορούν όμως να εξηγηθούν τα παραπάνω;

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το Carbonfil™ είναι ενισχυμένο PETG με ίνες άνθρακα. Καταλαβαίνει κανείς λοιπόν, πως συγκρίνοντας τα δύο υλικά που μας απασχόλησαν στην παρούσα εργασία, το PLA δεν έχει υποστεί κάποια κατεργασία για ενίσχυση σε αντίθεση με το Carbonfil™. Αυτό παίζει τεράστιο ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες, καθώς η ενίσχυση που έχει υποστεί το Carbonfil™ έγινε κατασκευαστικά από την εταιρία FormFutura για αυτόν ακριβώς το λόγο: την ενίσχυση της μηχανικής αντοχής του υλικού σε θραύση, εφελκυσμό κλπ. Πλην τις άλλους, επιβεβαιώθηκε δηλαδή μέσω των πειραμάτων μας η απόφαση της εν λόγω εταιρείας να ερευνήσει και να κυκλοφορήσει το προϊόν Carbonfil™ και να το διαθέσει ως ένα «πιο ενισχυμένο και πιο ισχυρό από μηχανικής άποψης PLA». Οι ίνες άνθρακα που περιέχει το Carbonfil™ επιφέρουν μεγαλύτερη αντοχή σε θραύση σε σύγκριση με το απλό PLA για λόγους που εξηγήθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το καθιστούν δηλαδή πιο ανοχικό σε τάσεις που ασκούνται κατά τον εφελκυσμό ή άλλες μηχανικές δοκιμές. Όλα τα παραπάνω αποτελούν μία εξήγηση της υπεροχής του Carbonfil™ έναντι του PLA στη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Max Stress), στο Young's Modulus και στη μέγιστη αντοχή σε θραύση (Max Stress at Fracture).

Όσον αφορά όμως τη βέλτιστη ποσοστιαία επιμήκυνση (Max Elongation %), βλέπουμε πως το PLA υπερτερεί σημαντικά έναντι του Carbonfil™. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί πολύ απλά για δύο λόγους:

- Το Carbonfil™ είναι σαν προϊόν πολύ πιο τραχύ στην υφή σε αντίθεση με το PLA που είναι σκληρό. Όπως θα δούμε και παρακάτω, η θραύση των δοκιμών του Carbonfil™ ήταν πολύ ψαθυρή, ενώ η θραύση των δοκιμών από PLA έγινε πιο σταδιακά. Η ψαθυρότητα αυτή παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιμήκυνση: Όσο πιο ψαθυρό είναι ένα οποιοδήποτε αντικείμενο, τόσο πιο μικρή αναμένεται να είναι η επιμήκυνση του.
- Η δεύτερη εξήγηση έγκειται στην παρουσία ινών άνθρακα στο εσωτερικό του Carbonfil™. Οι ίνες άνθρακα τόσο μορφολογικά όσο και μικρομοριακά έχουν ασθενέστερους δεσμούς μεταξύ τους συγκριτικά με το πιο συμπαγές PLA. Αυτό επιτρέπει την ευκολότερη απόσπαση ή αποκοπή κομματιών από αυτές και κατ'επέκταση την ευκολότερη -από άποψη επιβολής τάσης- και πιο απότομη θραύση τους. Αυτό φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.12: Η θραύση ενός δοκιμίου από Carbonfil™

Άρα, συμπερασματικά καταλήγουμε στο εξής: Το Carbonfil™ έχει σαφώς καλύτερες μηχανικές ιδιότητες όσον αφορά την αντοχή του σε επιβολή φορτίου (Max Stress, Max Stress at Fracture, Young's Modulus) συγκριτικά με το PLA και άρα θα πρέπει να προτιμάται σε κατασκευές που απαιτούν αντοχή σε δυνάμεις και τάσεις. Από την άλλη πλευρά όμως, όταν απαιτούμενο είναι η μεγάλη επιμήκυνση (Max Elongation %) σε μία κατασκευή, τότε το PLA υπερτερεί.

4.3 Scanning Electron Microscopy-Fractography analysis

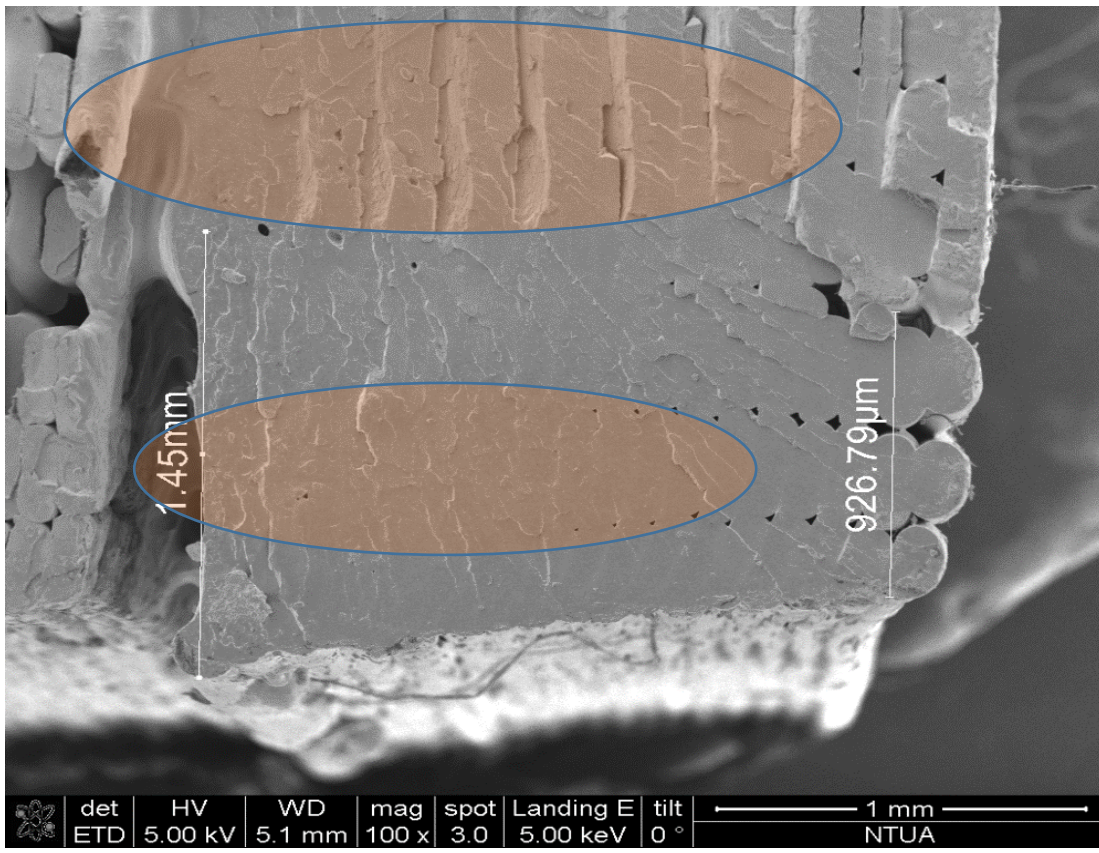
Όπως προαναφέρθηκε, το SEM αποτέλεσε ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τους σκοπούς της παρούσης εργασίας, καθώς βοήθησε σημαντικά στην κατανόηση του μηχανισμού θραύσης των δοκιμίων μας και στην περαιτέρω παρατήρηση των μικροδομών τους. Από το σύνολο των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε «SEM Fractography» εξάχθηκαν συνοπτικά τα εξής συμπεράσματα, τα οποία θα αναλυθούν διεξοδικά στις αναρτημένες εικόνες από το SEM αργότερα στο παρόν κεφάλαιο:

- Για τα δοκίμια από Carbonfil™ παρατηρήθηκε σχεδόν εξ' ολοκλήρου ψαθυρή θραύση, κάτι που φάνηκε και από την δοκιμή εφελκυσμού κατευθείαν.
- Επιπροσθέτως, για το υλικό Carbonfil™, παρατηρήθηκε διαφορά στο βάθος των ρωγμών. Η θραύση δηλαδή διαδώθηκε σε διαφορετικά επίπεδα. Η διάδοση της θραύσης ήταν μη ομαλή, καθώς τα επίπεδα των σειρών των ινών στην εξωτερική επιφάνεια δεν ήταν ίδια.
- Αντίθετα, για τα δοκίμια από PLA η θραύση ήταν πιο ομαλή, καθώς κάθε ίνα σπάει μεμονωμένα και η διάδοση είναι ομαλή, καθώς δεν παρουσιάστηκαν σχεδόν καθόλου διαφορές στα επίπεδα της θραύσης.
- Και για τα δύο υλικά, η διάδοση της θραύσης ξεκίνησε από τα άκρα και επεκτάθηκε σε όλο το μήκος της θραύσης με την εμφάνιση ρωγμών. Παρ' όλα αυτά, οι ρωγμές για το υλικό PLA ήταν πολύ λιγότερες και λιγότερο εμφανείς συγκριτικά με το Carbonfil™.
- Στα δοκίμια από Carbonfil™, παρατηρήθηκαν τα λεγόμενα «pullouts». Πρόκειται για κενά στην εξωτερική επιφάνεια της θραύσης. Οι ίνες αποσπώνται ουσιαστικά από το κυρίως σώμα του δοκιμίου, λόγω της μη μεταφοράς φορτίου από τη μήτρα σε αυτές. Αυτό οφείλεται σε κακή συνάφεια στο εσωτερικό του υλικού και κατ' επέκταση σε πολύ ασθενείς δεσμούς μεταξύ εγκλεισμάτων-πολυμερικής μήτρας. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι τα δοκίμια από Carbonfil™ είχαν σχετικά κακή συγκόλληση.
- Για τα δοκίμια από PLA, η συγκόλληση θεωρείται πολύ καλή, καθώς η διασπορά ήταν ομοιόμορφη και δεν παρατηρήθηκε οποιαδήποτε συσσωμάτωση υλικού.
- Και για τα δύο υλικά, παρατηρήσαμε πως με αύξηση του ποσοστού πλήρωσης (Infill %) αυξάνεται και η συγκόλληση των στρώσεων και των ινών μεταξύ τους.

Άρα συμπερασματικά μπορούμε να καταλήξουμε στο εξής: Τα δοκίμια από PLA είχαν την καλύτερη συγκόλληση μεταξύ των στρώσεων και παρουσίασαν μία ομαλή διάδοση της θραύσης. Αντίθετα, τα δοκίμια από Carbonfil™ παρουσίασαν μη ομαλή - μη χαρακτηριστική - θραύση. Οι μεμονωμένες ίνες των εν λόγω δοκιμίων είχαν πολύ ψαθυρή επιφάνεια και για αυτό άλλωστε μπορούμε να πούμε ότι η θραύση των δοκιμίων αυτών είναι «ψαθυρή».

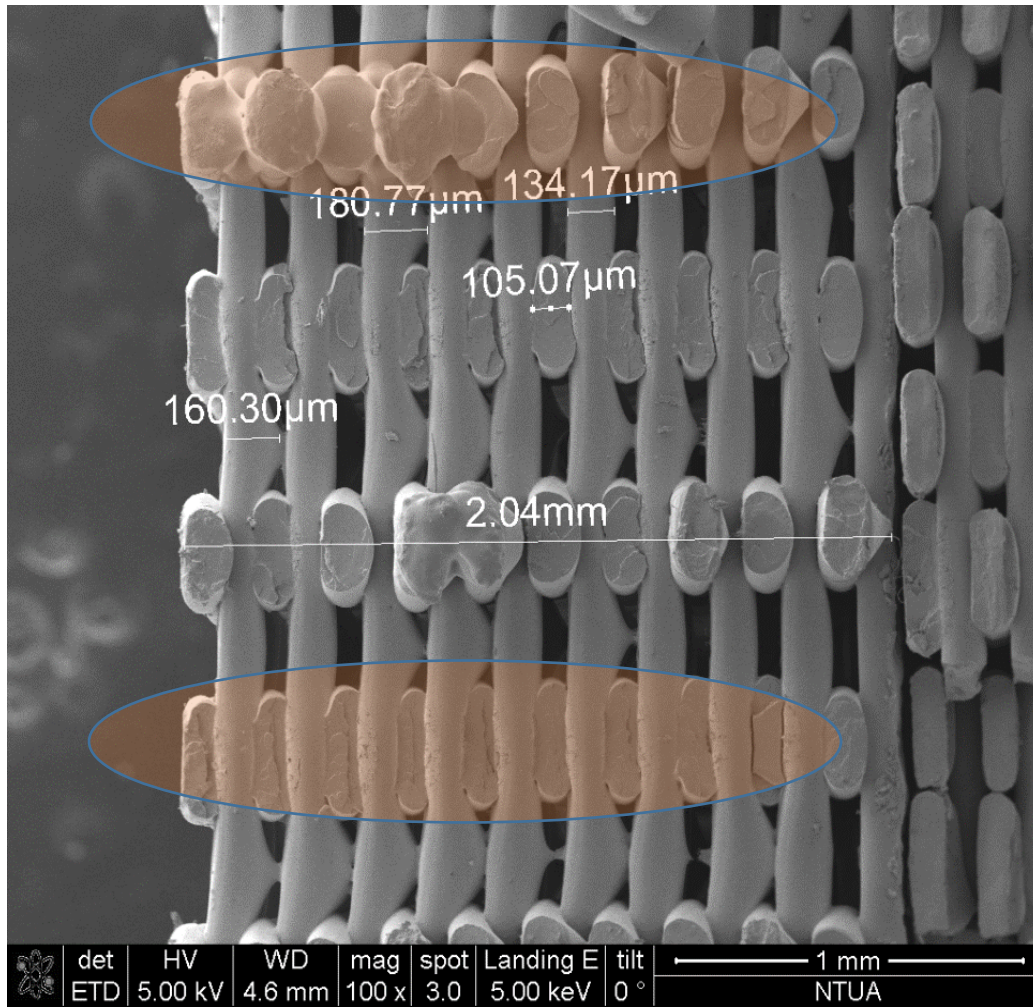
Παρακάτω παρατίθενται επιλεγμένες εικόνες SEM που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και εξηγούνται περαιτέρω τα διάφορα συμπεράσματα που εξήχθησαν από αυτές:

Για το PLA



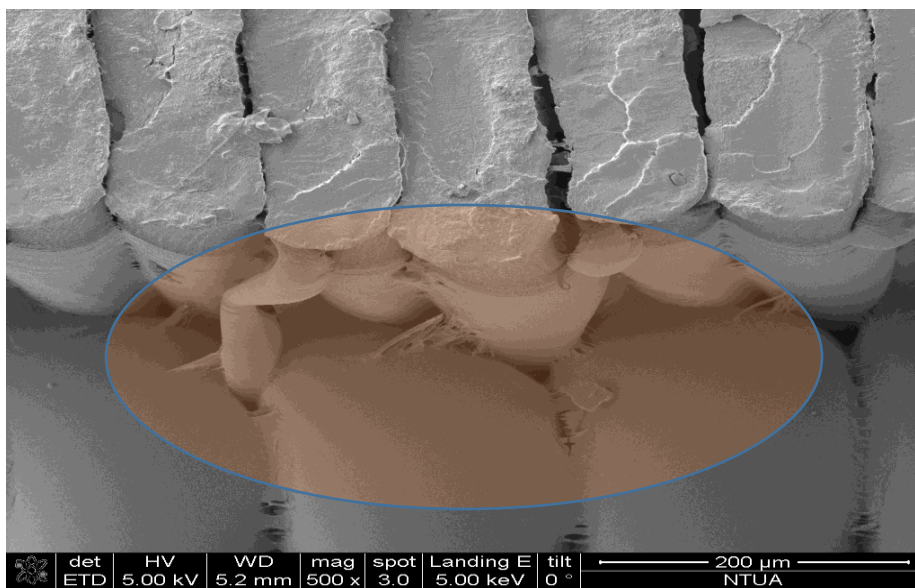
Εικόνα 4.13: Εικόνα της κάθετης τομής της επιφάνειας θράυσης δοκιμίου PLA από το SEM

Στην εικόνα 4.13 φαίνεται η «ομαλή» διάδοση της θράυσης μεταξύ των ινών στο κάτω μέρος, πράγμα που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στο σημείο αυτό έγινε καλή συγκόλληση. Αντίθετα, στο πάνω μέρος έχουμε μία πιο ανώμαλη διάδοση της θράυσης. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, παρατηρούμε εναλλαγές στο επίπεδο του υλικού και τραχεία επιφάνεια. Έτσι, μπορούμε να πούμε πως στο πάνω μέρος είχαμε κακή συγκόλληση συγκριτικά με το κάτω μέρος, κάτι που οφείλεται καθαρά και μόνο στη διαδικασία της εκτύπωσης.



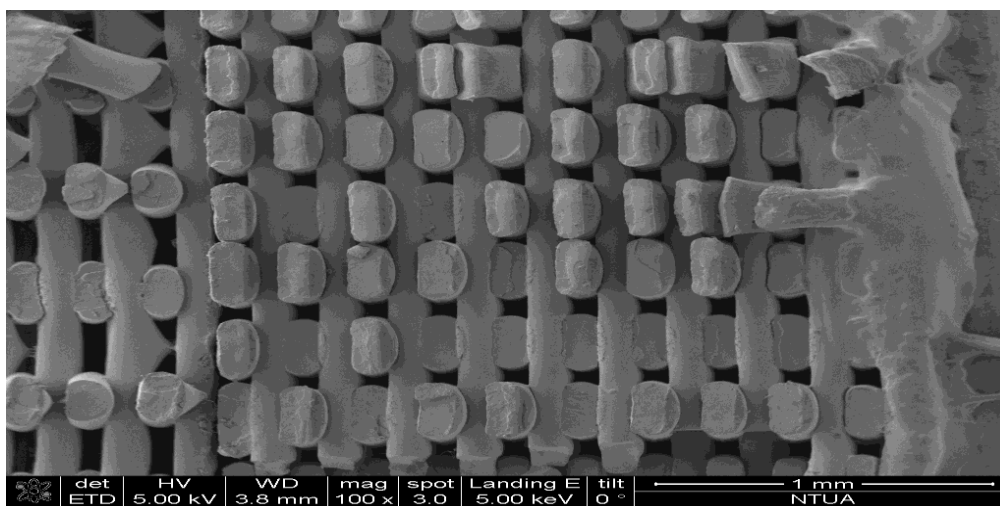
Εικόνα 4.14: Εικόνα της κάθετης τομής της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου PLA από το SEM

Στην εικόνα 4.14 βλέπουμε το εξωτερικό κέλυφος σε κάποιο σημείο της θραύσης. Παρατηρούμε ότι σχεδόν κάθε σειρά ινών έχει ξεχωριστά ισοεπίπεδη θραύση. Μεταξύ τους όμως, οι σειρές, παρουσιάζουν διαφορές στο επίπεδο. Γενικώς, όπως είδαμε και σε προηγούμενη εικόνα, παρατηρείται καλύτερη συγκόλληση στις κάτω στρώσεις, κάτι που αποτυπώνεται πρακτικά στην ομαλότερη διάδοση της θραύσης από άποψη ισοεπίπεδης θέσης των «σπασμένων» ινών. Αντίθετα, στην πιο πάνω σειρά, παρ'όλο που και εκεί η θραύση θεωρείται σχετικά ισοεπίπεδη, βλέπουμε μεγαλύτερη ανομοιογένεια στην εξωτερική επιφάνεια των ινών της σειράς καθώς επίσης και πιο τραχείς επιφάνειες και ρωγμές.



Εικόνα 4.15: Εικόνα της κάθετης τομής της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου PLA από το SEM

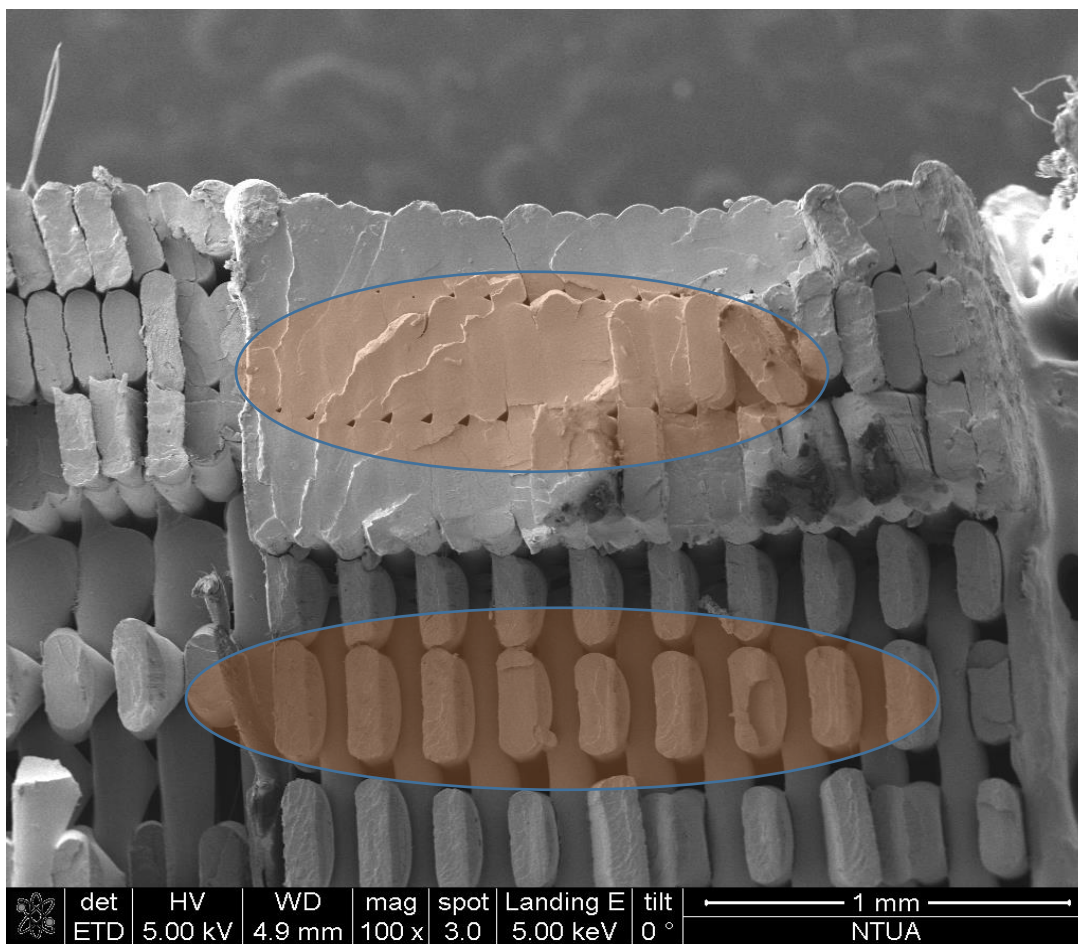
Στην εικόνα 4.15 παρατηρείται το φαινόμενο της ανισοεπίπεδης θραύσης του δοκιμίου, καθώς υπαρχειανομοιογένεια στην εξωτερική επιφάνεια των ινών της σειράς καθώς επίσης και πιο τραχείς επιφάνειες και ρωγμές.



Εικόνα 4.16: Εικόνα της κάθετης τομής της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου PLA από το SEM

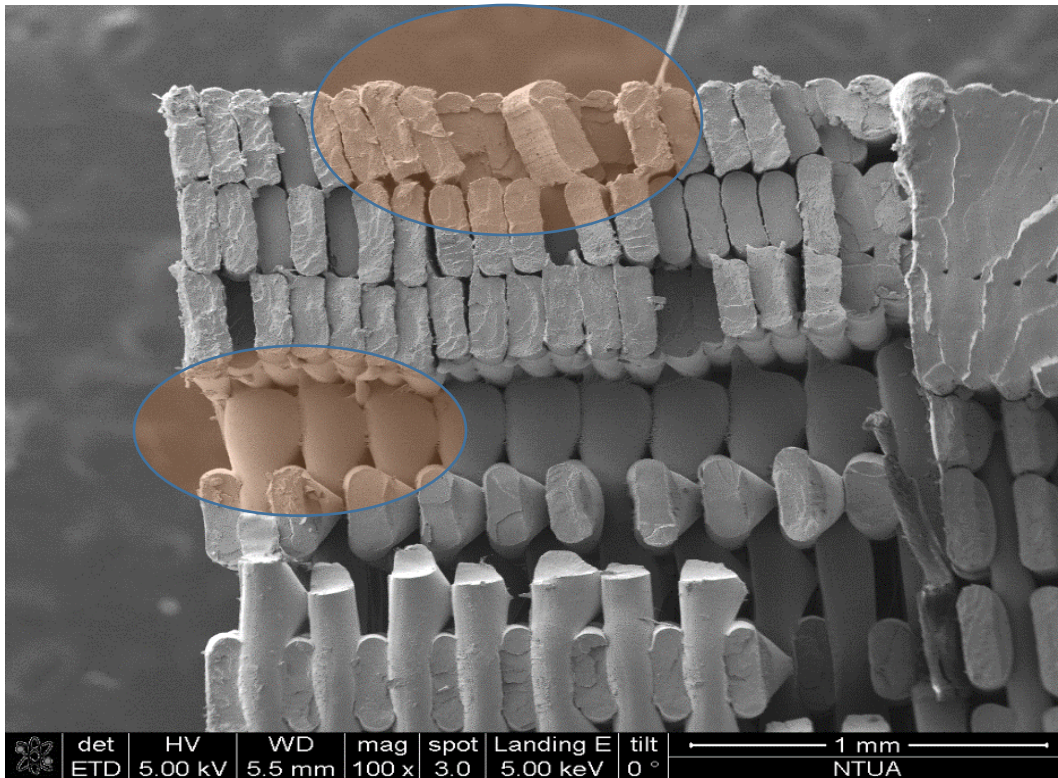
Από την εικόνα 4.16 συμπεραίνουμε μία πολύ καλή συγκόλληση, κάτι που εξηγείται από την εμφανώς ομαλή διάδοση της θραύσης. Επίσης παρατηρείται πως κάθε ίνα σπάει μεμονωμένα,

πράγμα που παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στην ομαλή διάδοση της θραύσης. Η θραύση στο δοκίμιο αυτό δεν είναι συμμετρική ούτε ομαλή λόγω της παρατηρούμενης διαφοράς στα επίπεδα των ινών τόσο στην επιφάνεια κάθε ίνας ξεχωριστά όσο και μεταξύ των διάφορων ινών.



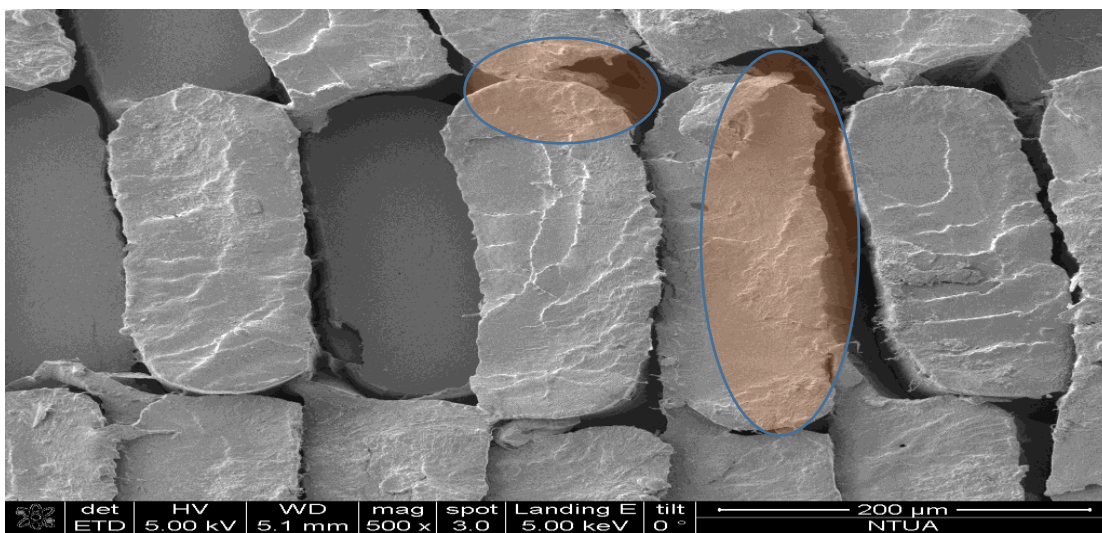
Εικόνα 4.17: Εικόνα της κάθετης τομής της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου PLA από το SEM

Στην εικόνα 4.17 επιβεβαιώνεται πάλι η καλή συγκόλληση στο κάτω μέρος και η χειρότερη συγκριτικά στο πάνω μέρος. Κάτω έχουμε ομαλή διάδοση της θραύσης κατά μήκος των ινών, ενώ στο πάνω μέρος παρατηρείται σαφώς μεγαλύτερη ανομοιογένεια στην εξωτερική επιφάνεια των ινών της σειράς καθώς επίσης και πιο τραχείς επιφάνειες και ρωγμές. Τέλος, εμφανίζονται διάφορα κενά, τα οποία υποδηλώνουν πως έχουν αποσπαστεί κομμάτια υλικού κατά τη θραύση.



Εικόνα 4.18: Εικόνα της κάθετης τομής της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου PLA από το SEM

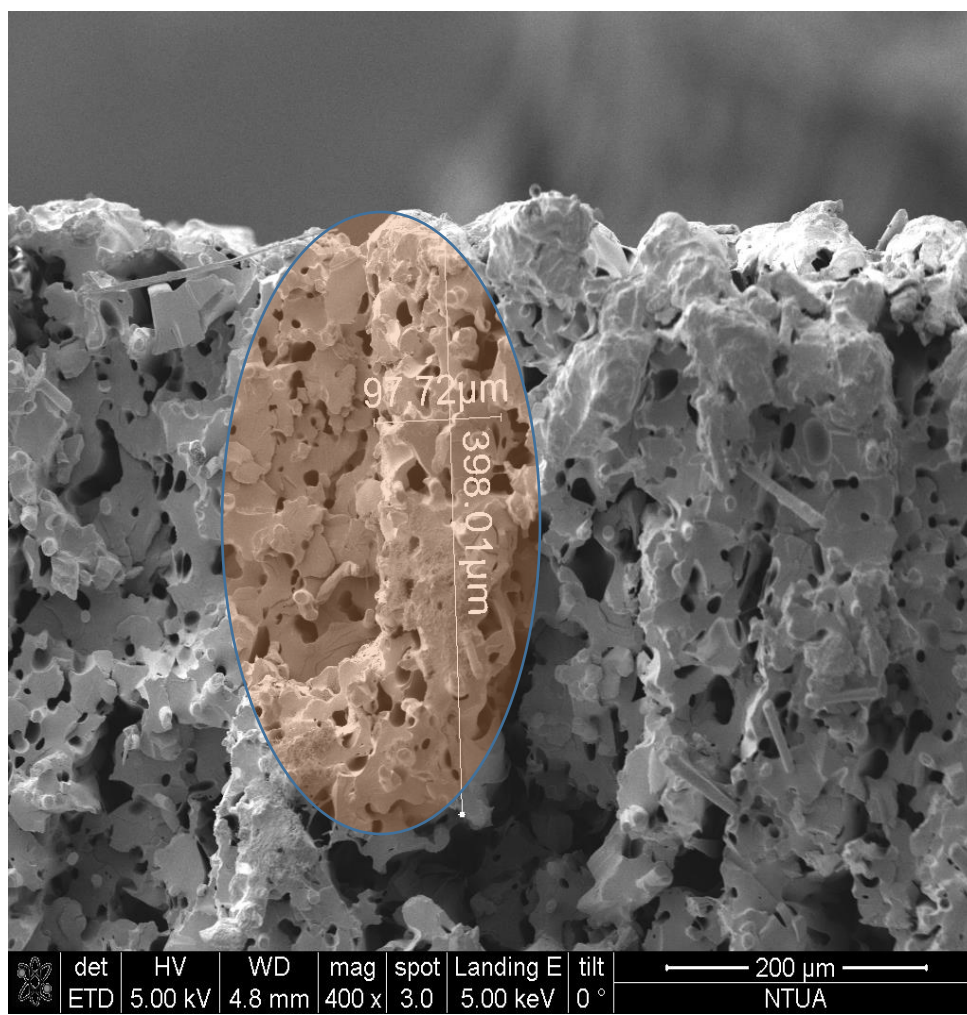
Στην εικόνα 4.18 παρατηρούμε πολύ κακή συγκόλληση μεταξύ των ινών, καθώς η θραύση έχει διαδωθεί ανάμεσα στα όρια των ινών και όχι κατά μήκος. Επίσης, στο άνω χρωματισμένο μέρος της εικόνας βλέπουμε καθαρά την έλλειψη δύο κομματιών. Στα σημεία αυτά έγινε ανώμαλη διάδοση της θραύσης, μη χαρακτηρισίμη, κάτι που οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό στη συνολική κακή συγκόλληση των ινών.



Εικόνα 4.19: Εικόνα της κάθετης τομής της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου PLA από το SEM

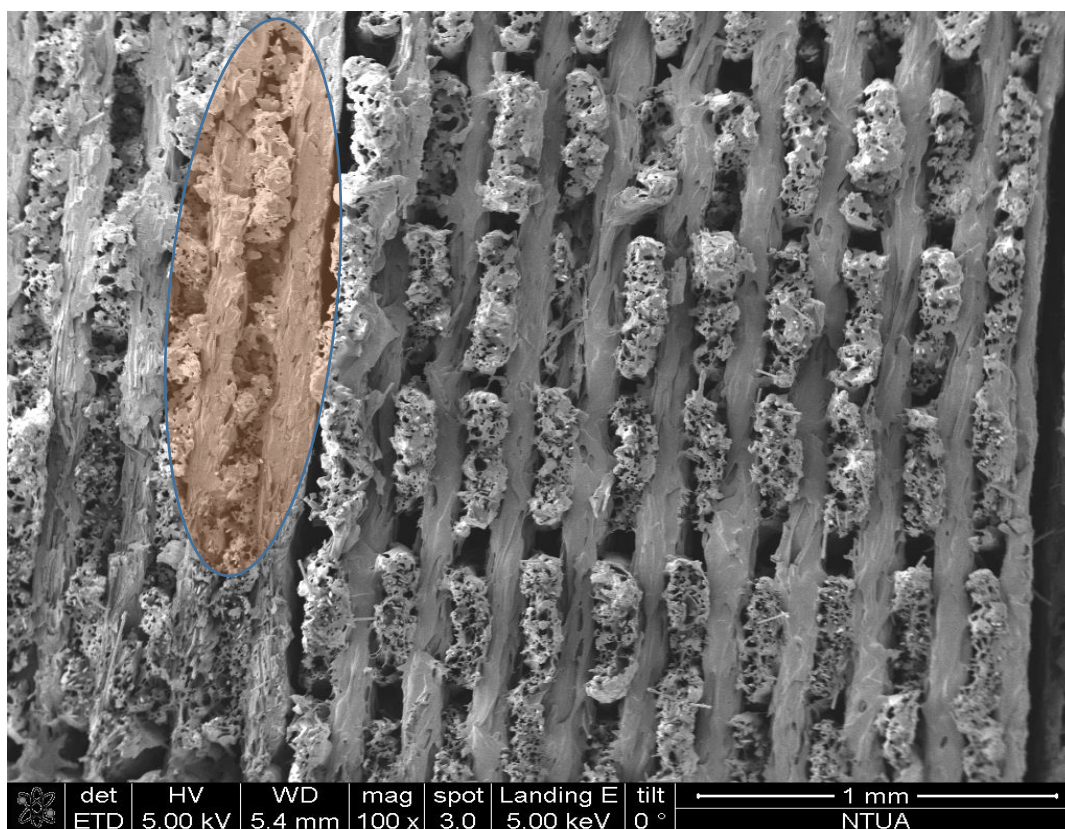
Στην εικόνα 4.19 είναι εμφανής η παρουσία πολλών κενών μεταξύ των ινών. Τα κενά αυτά δημιουργήθηκαν μεν κατά τη θραύση του δοκιμίου, αλλά οφείλονται στην κακή συγκόλληση μεταξύ τους από την εκτύπωση. Επίσης, παρατηρούμε και εδώ την διαφορά στα επίπεδα των ινών τόσο στην επιφάνεια κάθε ίνας ξεχωριστά όσο και μεταξύ των διάφορων ινών. Όλα τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τις διάφορες ρωγμές σε κάθε ίνα και την ψαθυρότητα που παρατηρείται επίσης, μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως η θραύση στα δοκίμιά μας δεν είναι ομαλή και συμμετρική.

Για το Carbonfil™



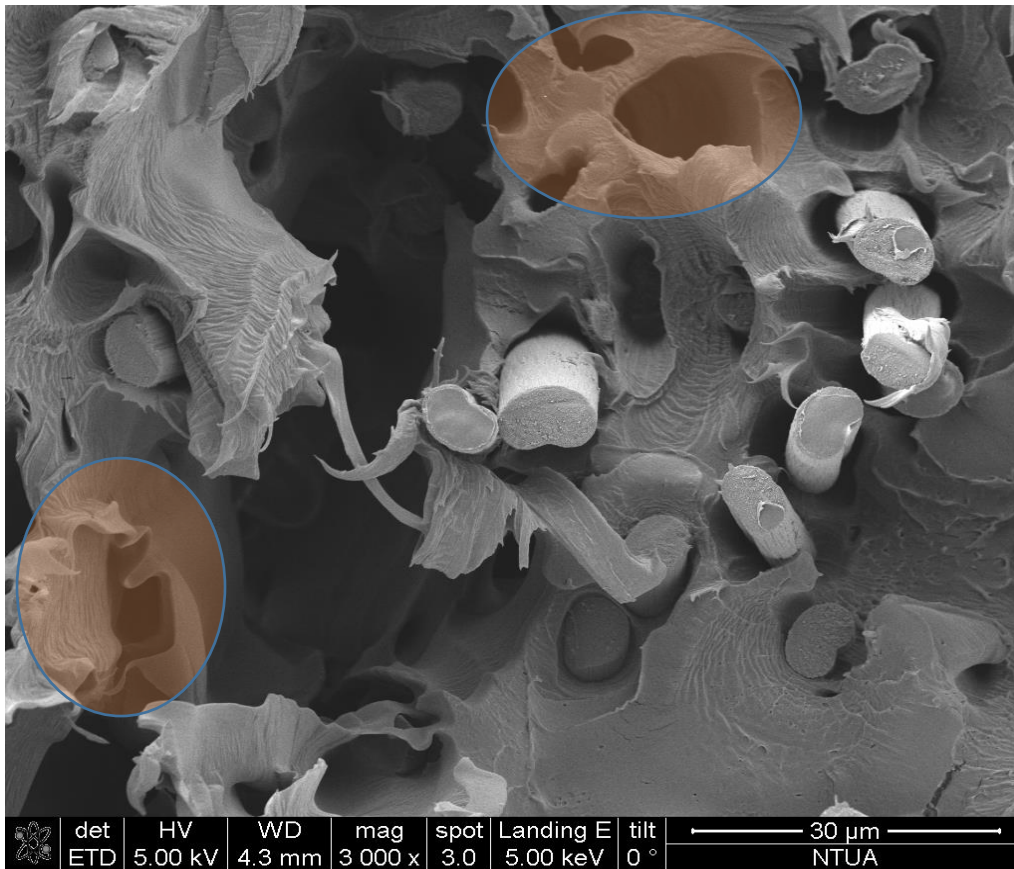
Εικόνα 4.20: Εικόνα της κάθετης τομής της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου Carbonfil™ από το SEM

Με τη βοήθεια του SEM έγινε ένας επιπλέον έλεγχος στις διαστάσεις διάφορων μεγεθών, για την επιβεβαίωση των θεωρητικών τιμών σύμφωνα με τον εκτυπωτή και των πραγματικών. Πράγματι, στην εικόνα 4.20 αποτυπώνονται οι πραγματικές διαστάσεις των ινών. Κάθε ίνα, θεωρητικά, σύμφωνα με τις παραμέτρους της εκτύπωσης θα πρέπει να έχει διαστάσεις 400x100 μm. Όπως φαίνεται εδώ, η θεωρητική αυτή τιμή δεν απέχει πολύ από την πραγματική, η οποία μετρήθηκε με τη χρήση του SEM και είναι ίση με 398x98 μm.



Εικόνα 4.21: Εικόνα της κάθετης τομής της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου Carbonfil™ από το SEM

Στην εικόνα 4.21 παρατηρούμε ανομοιόμορφη διασπορά και μη ομαλή διάδοση της θραύσης. Δεν έχει επιτευχθεί καλή συγκόλληση και έτσι εμφανίζεται συσσωμάτωση υλικού σε διάφορα σημεία. Αυτό οφείλεται στα λεγόμενα «pullouts». Πιο συγκεκριμένα: Το φορτίο δε μεταφέρεται από τη μήτρα στην ίνα λόγω των κενών στην επιφάνεια (έλλειψη ινών).



Εικόνα 4.22: Εικόνα της κάθετης τομής της επιφάνειας θραύσης δοκιμίου Carbonfil™ από το SEM

Στην εικόνα 4.22 βλέπουμε καλύτερα τα εν λόγω «pullouts». Το φορτίο μεταφέρεται ανομοιόμορφα από την εσωτερική μήτρα στην ίνα, και αυτό οδηγεί στην απόσπαση κάποιων ινών από το κυρίως σώμα του δοκιμίου. Το φαινόμενο αυτό της εμφάνισης κενών σε διάφορα σημεία για τους παραπάνω λόγους ονομάζεται «pullouts».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

5.1 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία αποτίμηση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις δοκιμές εφελκυσμού και την επεξεργασία των μετρήσεων. Αρχικώς, θα γίνει εκτενής αναφορά σε κάποια γενικά συμπεράσματα σχετικά με την τριδιάστατη εκτύπωση δοκιμίων εφελκυσμού. Έπειτα θα αναλυθούν περαιτέρω οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων και ο τρόπος που αυτές επηρεάζονται από τις εξεταζόμενες μεταβλητές (Infill %, Infill Angle).

5.1.1 Γενικά Συμπεράσματα

Παρόλο που σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η πρόβλεψη και η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων τριδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων συναρτήσει δύο συγκεκριμένων μεταβλητών της τριδιάστατης εκτύπωσης, τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν δεν αφορούν μόνο τις μηχανικές ιδιότητες. Αντίθετα, καταλήξαμε και σε πιο γενικά -αλλά ταυτόχρονα χρήσιμα- συμπεράσματα σχετικά με την ομοιογένεια του τελικού υλικού, το κόστος εκτύπωσης, το μηχανισμό θραύσης κλπ. συναρτήσει πάντα των εξεταζόμενων μεταβλητών.

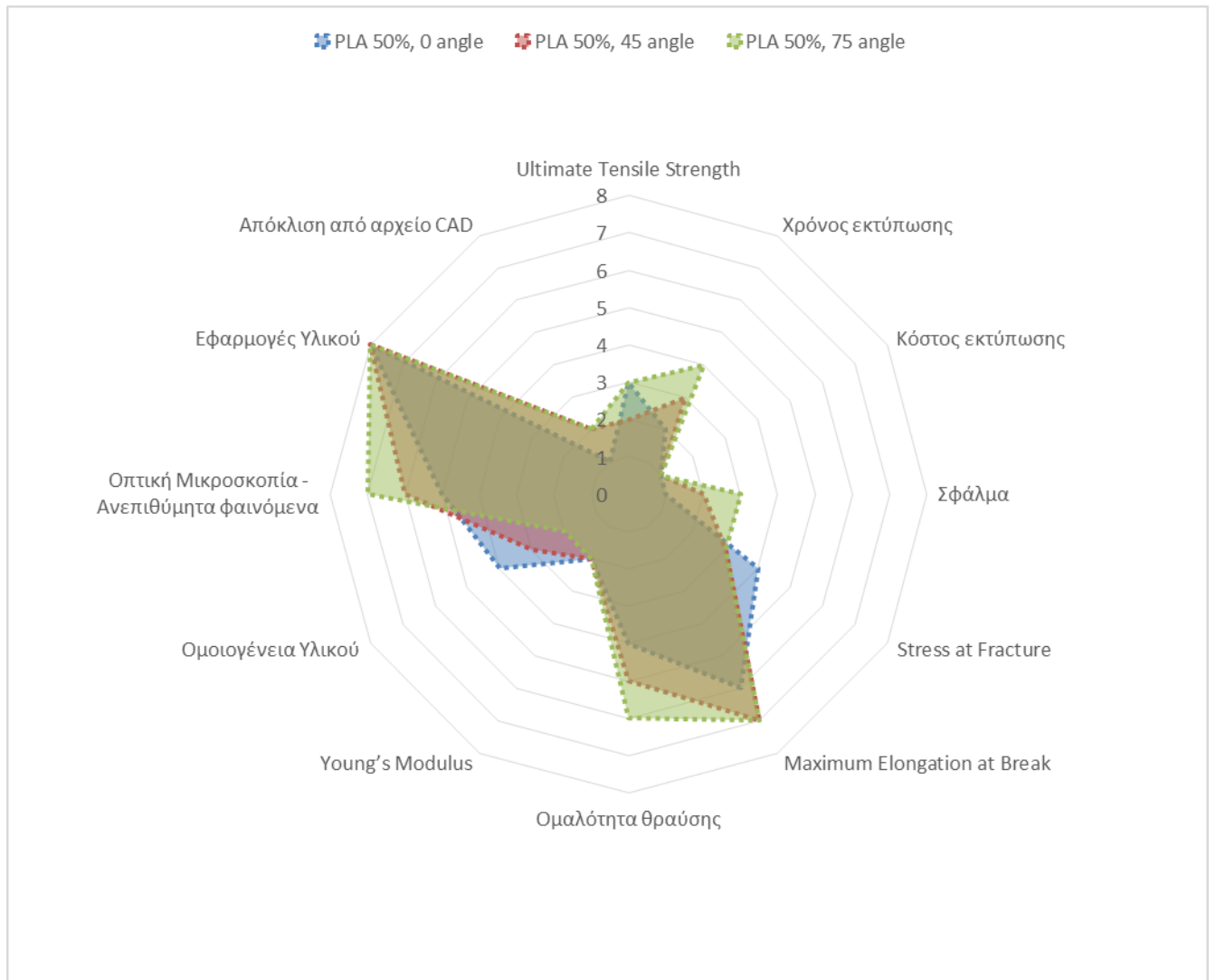
Όπως θα εξηγηθεί αναλυτικότερα στο υποκεφάλαιο 5.1.2, ένα πολύ χρήσιμο αρχικό συμπέρασμα είναι πως το ποσοστό πλήρωσης (Infill %) παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες και τις επηρεάζει πολύ πιο άμεσα σε σχέση με τη γωνία εκτύπωσης (Infill Angle). Ακριβώς το ίδιο ισχύει και για τις περισσότερες άλλες ιδιότητες των δοκιμίων, οι οποίες βέβαια δεν έχουν άμεση σχέση με τις μηχανικές ιδιότητες αλλά είναι σημαντικό να αναφερθούν.

Έτσι για το σκοπό αυτό, δημιουργήθηκαν τα παρακάτω διαγράμματα «Radar Charts», τα οποία απεικονίζουν τις διαφορές μεταξύ των τιμών σε συγκεκριμένες ιδιότητες για το ίδιο υλικό, το ίδιο ποσοστό πλήρωσης αλλά για διαφορετική γωνία εκτύπωσης. Τα διαγράμματα αυτά βοήθησαν σημαντικά στην εξαγωγή των παρακάτω γενικών συμπερασμάτων και για τα δύο υλικά:

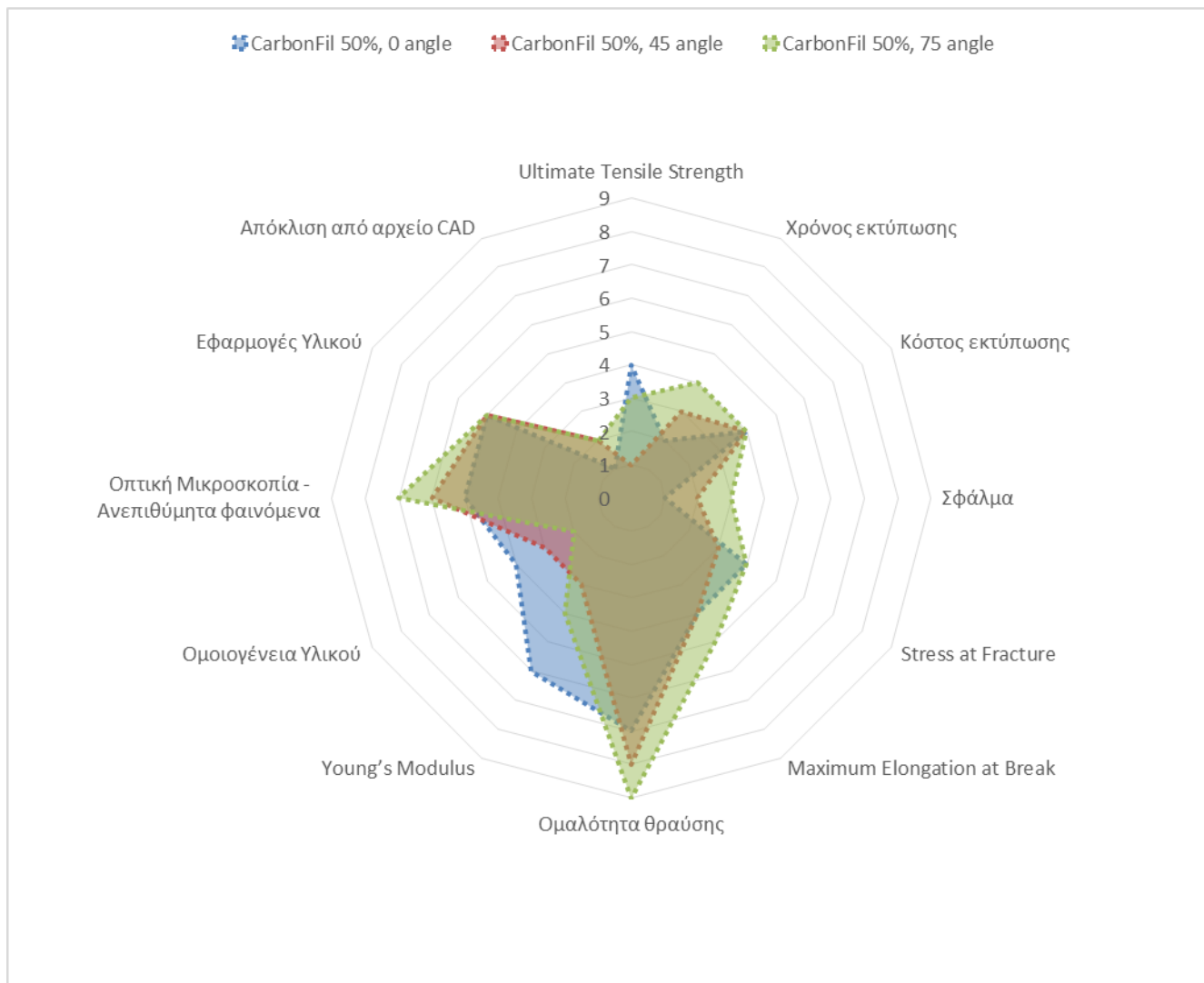
- Ο χρόνος εκτύπωσης μειώνεται σημαντικά (από 10 έως 50 λεπτά) για διαφορετικό ποσοστό πλήρωσης. Όσο πιο πολύ αυξήσουμε το ποσοστό πλήρωσης, τόσο πιο χρονοβόρα θα είναι η εκτύπωση.
- Αντίθετα, η γωνία εκτύπωσης φαίνεται να μην επηρεάζει καθόλου το χρόνο εκτύπωσης για σταθερό ποσοστό πλήρωσης.
- Το κόστος της εκτύπωσης αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού πλήρωσης. Χαρακτηριστικά, για σταθερή γωνία εκτύπωσης, η διαφορά στο μήκος του νήματος υλικού που απαιτείται για την εκτύπωση ενός δοκιμίου με ποσοστό πλήρωσης 50% και ενός δοκιμίου με ποσοστό πλήρωσης 100%, μπορεί να φτάσει έως και το 1 μέτρο. Εύκολα συμπεραίνουμε πως σε πιο μεγάλη κλίμακα εκτυπώσεων (βιομηχανική π.χ.), το ποσοστό πλήρωσης παίζει σημαντικό παράγοντα κόστους που πρέπει να μελετάται.

- Αντίθετα, η γωνία εκτύπωσης επηρεάζει ελάχιστα έως και καθόλου το κόστος της εκτύπωσης, καθώς το μήκος νήματος που απαιτείται για δύο εκτυπώσεις δοκιμίων ίδιου ποσοστού πλήρωσης αλλά διαφορετικής γωνίας εκτύπωσης είναι σχεδόν το ίδιο.
- Η απόκλιση των διαστάσεων του τελικού εκτυπωμένου δοκιμίου από τις διαστάσεις του αρχείου CAD είναι σχετικά μικρή έως και αμελητέα για σχεδόν όλες τις εκτυπώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Παρόλ' αυτά όμως, παρατηρήθηκε πως για πιο «περίπλοκες» γωνίες εκτύπωσης, υπήρχε ελαφρώς μεγαλύτερη απόκλιση στις διαστάσεις. Έτσι, τα δοκίμια που είχαν γωνία εκτύπωσης 45 ή 75° είχαν μεγαλύτερη απόκλιση στις διαστάσεις τους από αυτές των αντίστοιχων αρχείων CAD. Αντίθετα, για γωνία εκτύπωσης 0°, παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια σχεδόν μηδενική απόκλιση.
- Η ομοιογένεια του δοκιμίου φαίνεται να μην επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τη γωνία εκτύπωσης, αλλά εξαρτάται σημαντικά από το ποσοστό πλήρωσης. Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του ποσοστού πλήρωσης, τόσο πιο συμπαγές και ομοιογενές είναι το δοκίμιο. Χαρακτηριστικά, το δοκίμιο για το υλικό PLA με γωνία εκτύπωσης 45° και ποσοστό πλήρωσης 100% είναι πολύ πιο ομοιογενές σαν αντικείμενο συγκριτικά με το δοκίμιο PLA με την ίδια γωνία εκτύπωσης αλλά με ποσοστό πλήρωσης 50%.
- Παράλληλα, με την αύξηση της γωνίας εκτύπωσης, παρατηρήθηκε μέσω της οπτικής μικροσκοπίας αύξηση ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως π.χ. το «cobwebbing» ή το «warpage», που σχετίζονται με τη διακύμανση της ογκομετρικής παροχής και την δημιουργία παραμενουσών τάσεων λόγω ανομοιόμορφης ψύξης του υλικού. Μπορούμε δηλαδή να συμπεράνουμε, πως για πιο «περίπλοκες» γωνίες εκτύπωσης παρουσιάζονται περισσότερα ανεπιθύμητα φαινόμενα της τριδιάστατης εκτύπωσης.
- Το ποσοστό πλήρωσης φαίνεται να επηρεάζει την εμφάνιση τέτοιων φαινομένων. Για μεγάλες τιμές της παραμέτρου αυτής, έχουμε εντονότερη εμφάνιση σκέβρωσης και ιστών.
- Όσον αφορά τη θραύση, τα δοκίμια από Carbonfil™ παρουσίασαν ιδιαίτερα ανομοιόμορφη επιφάνεια θραύσης σε σχέση με τα δοκίμια από PLA.
- Οι εξεταζόμενες μεταβλητές δε φαίνεται να επηρεάζουν τους μηχανισμούς θραύσης σε μικροσκοπικό επίπεδο, καθορίζουν όμως τη μακροσκοπική μηχανική συμπεριφορά.

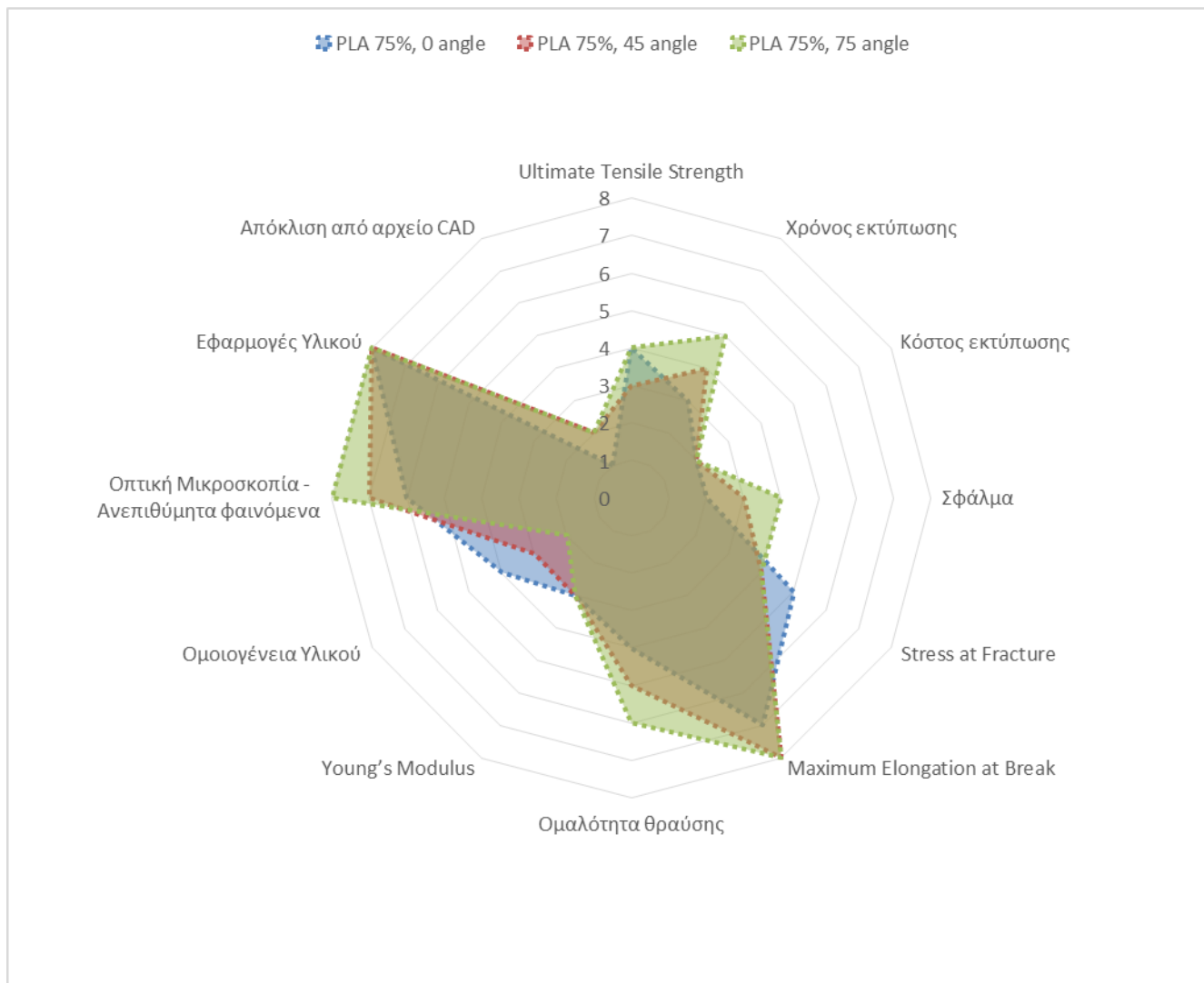
Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα «Radar Charts», τα οποία απεικονίζουν τις διαφορές μεταξύ των τιμών σε συγκεκριμένες ιδιότητες για το ίδιο υλικό, το ίδιο ποσοστό πλήρωσης και διαφορετική γωνία εκτύπωσης:



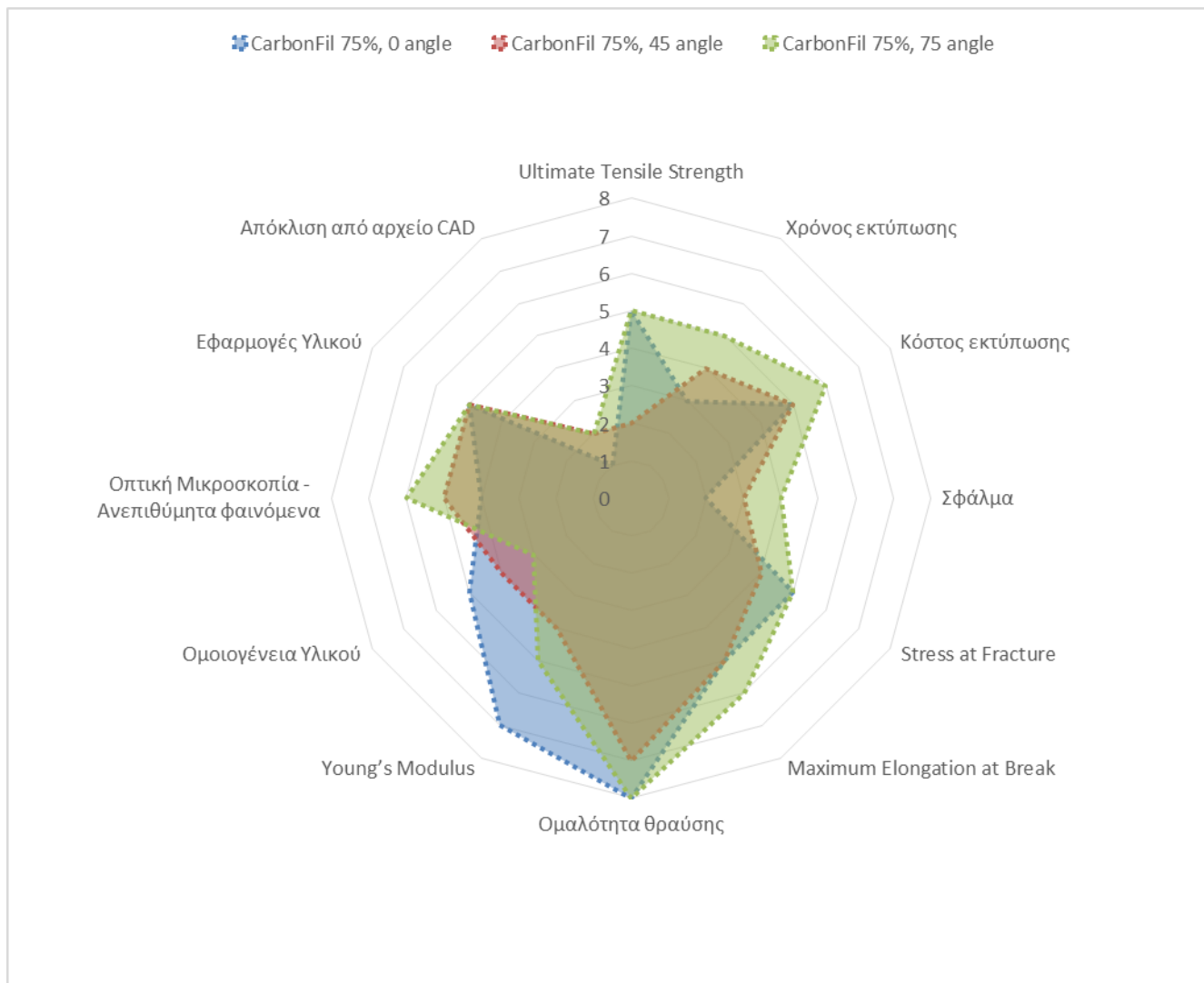
Διάγραμμα 5.1: Σύγκριση δοκιμών PLA με 50% ποσοστό πλήρωσης για διαφορετικές γωνίες εκτύπωσης



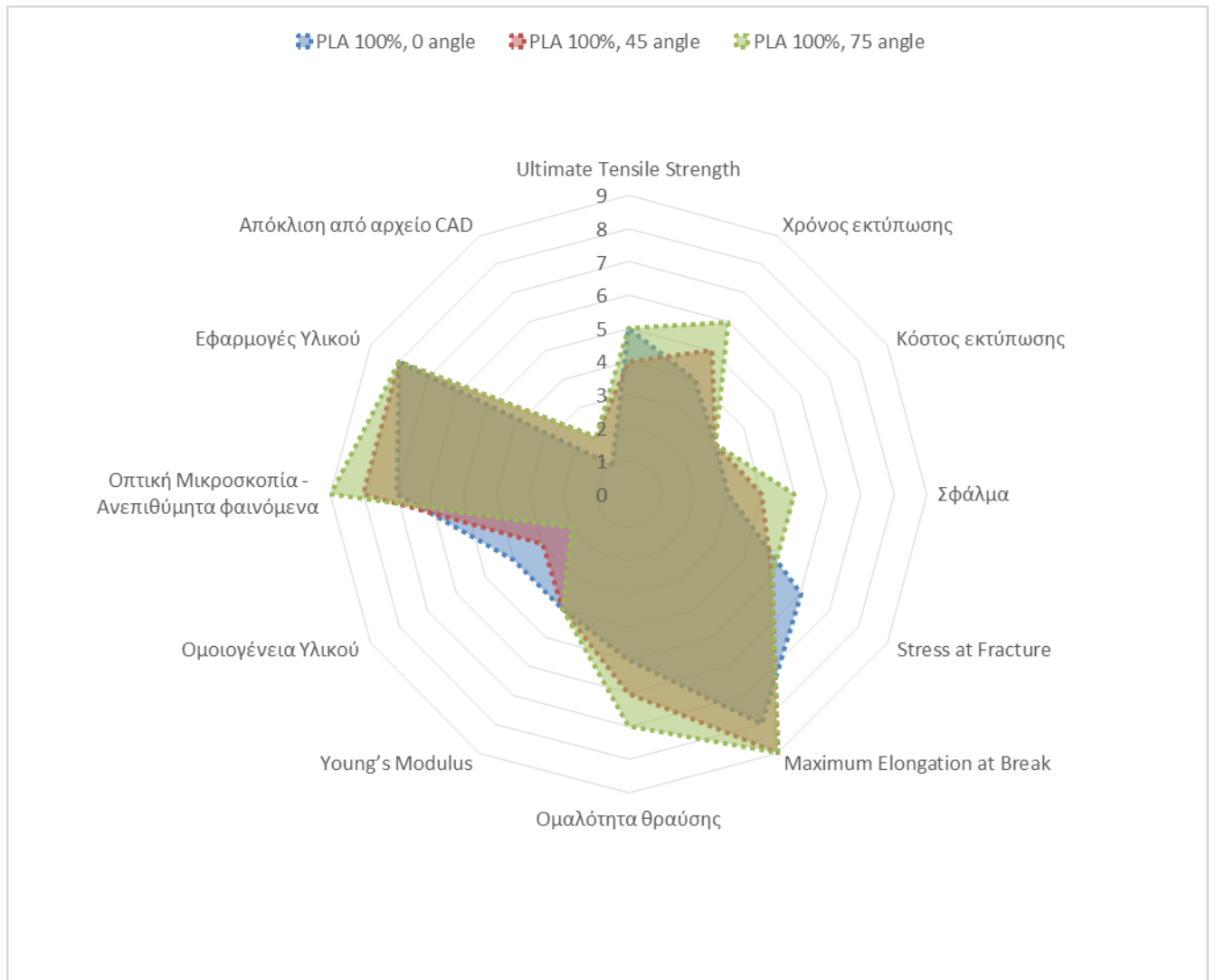
Διάγραμμα 5.2: Σύγκριση δοκιμών CarbonFil™ με 50% ποσοστό πλήρωσης για διαφορετικές γωνίες εκτύπωσης



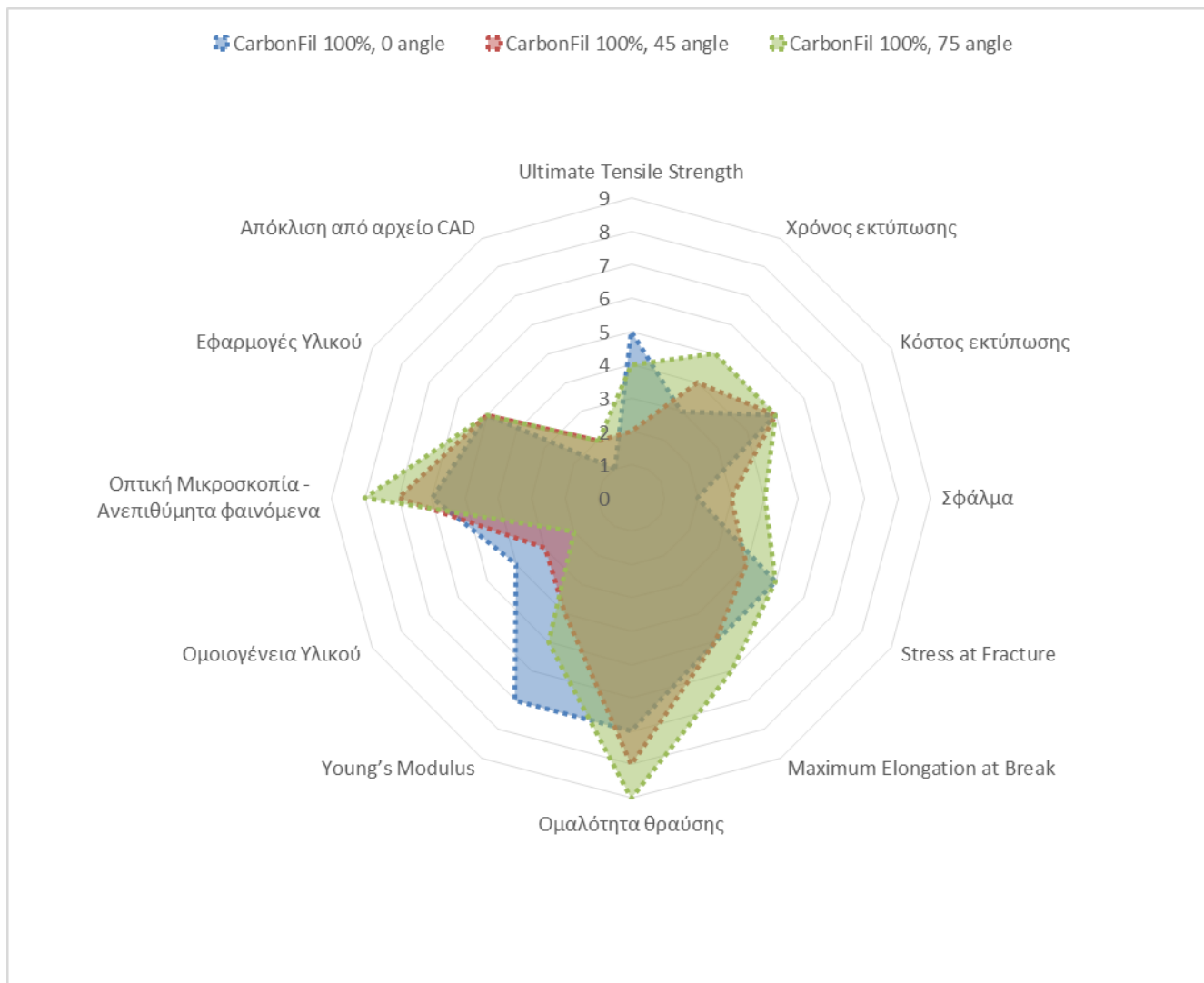
Διάγραμμα 5.3: Σύγκριση δοκιμών PLA με 75% ποσοστό πλήρωσης για διαφορετικές γωνίες εκτύπωσης



Διάγραμμα 5.4: Σύγκριση δοκιμών CarbonFil™ με 75% ποσοστό πλήρωσης για διαφορετικές γωνίες εκτύπωσης



Διάγραμμα 5.5: Σύγκριση δοκιμών PLA με 100% ποσοστό πλήρωσης για διαφορετικές γωνίες εκτύπωσης



Διάγραμμα 5.6: Σύγκριση δοκιμών CarbonFil™ με 100% ποσοστό πλήρωσης για διαφορετικές γωνίες εκτύπωσης

5.1.2 Συμπεράσματα για την επιρροή των εξεταζόμενων παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες

Κατά την αποτίμηση των αποτελεσμάτων από τη δοκιμή εφελκυσμού για τα δύο υλικά καταλήξαμε σε αρκετά συμπεράσματα σχετικά με τον τρόπο που επηρεάζει κάθε μία από τις εξεταζόμενες παραμέτρους τις μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου μας. Η σχετική συζήτηση αναπτύχθηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Για την εξήγηση και κατανόηση των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της δοκιμής εφελκυσμού, παρατίθενται οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων για τα δύο υλικά, για τις διάφορες τιμές των εξεταζόμενων παραμέτρων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών PLA:

Πίνακας 5.1: Τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών PLA

Infill %	Infill Angle	max Stress (N/m ²)	max ε%	Young's Modulus (N/m ²)	Stress at Fracture (N/m ²)
50	0 °	3,27E+08	2,755455677	1,76E+10	3,21E+08
50	45 °	3,07E+08	3,261992075	1,29E+10	2,70E+08
50	75 °	3,21E+08	3,117208043	1,58E+10	2,80E+08
75	0 °	3,98E+08	2,850045352	2,05E+10	3,70E+08
75	45 °	3,60E+08	3,072570219	1,75E+10	3,23E+08
75	75 °	3,56E+08	2,890963357	1,94E+10	3,25E+08
100	0 °	6,24E+08	3,117208043	2,51E+10	6,15E+08
100	45 °	6,13E+08	3,329141408	2,50E+08	5,56E+08
100	75 °	5,77E+08	2,972666517	2,41E+10	5,76E+08

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών Carbonfil™:

Πίνακας 5.2: Τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών Carbonfil

Infill %	Infill Angle	max Stress (N/m ²)	max ε%	Young's Modulus (N/m ²)	Stress at Fracture (N/m ²)
50	0 °	3,48E+08	1,646153	3,65E+10	3,44E+08
50	45 °	2,45E+08	1,914777	2,05E+10	2,43E+08
50	75 °	3,21E+08	2,138763	2,97E+10	3,19E+08
75	0 °	4,89E+08	2,174367	4,26E+10	4,77E+08
75	45 °	4,13E+08	2,139294	3,49E+10	4,00E+08
75	75 °	3,55E+08	2,491216	2,73E+10	3,52E+08
100	0 °	6,51E+08	2,401409	4,90E+10	6,45E+08
100	45 °	5,40E+08	2,495201	3,95E+10	5,40E+08
100	75 °	4,65E+08	2,323269	3,08E+10	4,57E+08

Η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Max Stress) επηρεάζεται πολύ περισσότερο από την τιμή του ποσοστού πλήρωσης (Infill %) παρά από τη γωνία εκτύπωσης. Όπως αποτυπώνεται και στα διαγράμματα του κεφαλαίου 4.2, όσο αυξάνεται το ποσοστό πλήρωσης τόσο αυξάνεται και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της εν λόγω ιδιότητας παρατηρήθηκε για ποσοστό πλήρωσης 100% και για τα δύο υλικά, σε γωνία εκτύπωσης (Infill Angle) 0°. Παρατηρούμε επίσης για τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Max Stress) ότι αν κρατήσουμε σταθερό το ποσοστό πλήρωσης, τότε η ανώτατη τιμή της αντοχής βρίσκεται και για τα δύο υλικά στην χαμηλότερη δυνατή γωνία εκτύπωσης, δηλαδή τις 0°.

Για το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus) τα συμπεράσματα είναι ίδια με αυτά για τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό. Αναλυτικότερα, το Young's Modulus παίρνει την ανώτατη τιμή του και για τα δύο υλικά για ποσοστό πλήρωσης 100% και 0° γωνία εκτύπωσης. Αντίστοιχα με πριν, κρατώντας σταθερό το ποσοστό πλήρωσης, η γωνία εκτύπωσης δίνει αντίστροφα αποτελέσματα: για σταθερό ποσοστό πλήρωσης (50%, 75%, ή 100%), η μέγιστη τιμή του Young's Modulus συναντάται για γωνία εκτύπωσης 0°. Ακριβώς στα ίδια συμπεράσματα καταλήξαμε για τη μέγιστη τάση που μπορεί να δεχθεί το υλικό προτού σπάσει (Max Stress at Fracture).

Όσον αφορά την ποσοστιαία επιμήκυνση (Max Elongation), τα συμπεράσματα διαφέρουν. Η μέγιστη ποσοστιαία επιμήκυνση συναντάται και για τα δύο υλικά για ποσοστό πλήρωσης 100% (όπως και για τις άλλες μηχανικές ιδιότητες), αλλά για γωνία εκτύπωσης 45°. Άρα η τιμή της ποσοστιαίας επιμήκυνσης αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του ποσοστού πλήρωσης, κάτι που όμως δεν ισχύει και για τη γωνία εκτύπωσης. Οι πολλές και διαφορετικές διακυμάνσεις στις τιμές της επιμήκυνσης για σταθερό ποσοστό πλήρωσης, δεν μπορούν να μας βοηθήσουν να καταλήξουμε σε ασφαλές συμπέρασμα σχετικά με το πώς μεταβάλλεται η τιμή της από την επιρροή της γωνίας εκτύπωσης. Το μόνο συμπέρασμα που μπορεί κανείς να εκφράσει με σιγουριά είναι πως η μέγιστη ποσοστιαία επιμήκυνση συναντάται στις 45° και για τα δύο υλικά, σε συνδυασμό με ποσοστό πλήρωσης 100%.

Όπως φαίνεται και στους παρακάτω πίνακες, οι βέλτιστες τιμές για τις μηχανικές ιδιότητες Max Stress, Young's Modulus, Stress at Fracture βρέθηκαν και για τα δύο υλικά για τιμές παραμέτρων ποσοστού πλήρωσης και γωνίας εκτύπωσης 100% και 0° αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά όσον αφορά τη μέγιστη δυνατή ποσοστιαία επιμήκυνση, αυτή βρέθηκε και για τα δύο υλικά στο συνδυασμό 100% και 45°.

Πίνακας 5.3: Βέλτιστες τιμές για τα δύο υλικά

Υλικό	Max Stress (N/m ²)	max ε%	Young's Modulus (N/m ²)	Stress at Fracture (N/m ²)
PLA	6,24E+08	3,329141	2,51E+10	6,15E+08
Carbonfil™	6,51E+08	2,495201	4,90E+10	6,45E+08

Τα συμπεράσματα συνοψίζονται παρακάτω:

- Όσο αυξάνεται το ποσοστό πλήρωσης (Infill %), τόσο αυξάνεται και η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Max Stress).
- Για σταθερή γωνία εκτύπωσης, όσο αυξάνεται το ποσοστό πλήρωσης, οι τιμές της επιμήκυνσης και του Young's Modulus παρουσίαζαν επίσης αύξηση για το Carbonfil, ενώ για το PLA η επιμήκυνση παρουσίασε διακυμάνσεις.
- Για σταθερό ποσοστό πλήρωσης, όσο αυξάνεται η γωνία εκτύπωσης, τόσο μειώνεται η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και το Young's Modulus.
- Με αύξηση της γωνίας εκτύπωσης υπό σταθερό ποσοστό πλήρωσης, παρατηρήθηκε αύξηση και της επιμήκυνσης μέχρι και τις 45° για το PLA και μέχρι τις 75° για το Carbonfil™.
- Το Carbonfil™ παρουσίασε υψηλότερες τιμές σε όλες τις μηχανικές ιδιότητες εκτός από την μέγιστη επιμήκυνση, όπου το PLA έδωσε πολύ μεγαλύτερες τιμές.
- Το ποσοστό πλήρωσης φαίνεται να παίζει πολύ πιο σημαντικό ρόλο στις τιμές που θα λάβουν οι μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τη γωνία εκτύπωσης.

5.1.3 Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων PLA και Carbonfil™

Παρατίθενται αρχικώς στον παρακάτω πίνακα οι βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες για τα δύο υλικά ξεχωριστά:

Πίνακας 5.4: Βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες για τα δύο υλικά

Υλικό	Max Stress (N/m ²)	max ε%	Young's Modulus (N/m ²)	Stress at Fracture (N/m ²)
PLA	6,24E+08	3,329141	2,51E+10	6,15E+08
Carbonfil™	6,51E+08	2,495201	4,90E+10	6,45E+08

Παρατηρούμε πως οι μηχανικές ιδιότητες του Carbonfil™ υπερτερούν έναντι αυτών του PLA πλην της ποσοστιαίας επιμήκυνσης, όπου το PLA έδωσε τιμή σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή του Carbonfil™. Όπως αναφέρθηκε, οι βέλτιστες ιδιότητες και για τα δύο υλικά βρέθηκαν για τιμές των παραμέτρων 100% ποσοστό πλήρωσης και 0° γωνία εκτύπωσης εκτός από την ποσοστιαία επιμήκυνση που βρέθηκε στις 45° γωνία εκτύπωσης και 100% ποσοστό πλήρωσης. Συμπερασματικά, το Carbonfil™ δίνει τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με το PLA εκτός από την ποσοστιαία επιμήκυνση. Πώς μπορούν όμως να εξηγηθούν τα παραπάνω;

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το Carbonfil™ είναι ενισχυμένο Glycol-Modified Polyethylene Terephthalate (PETG) με ίνες άνθρακα. Καταλαβαίνει κανείς λοιπόν, πως συγκρίνοντας τα δύο υλικά που μας απασχόλησαν στην παρούσα εργασία, το PLA δεν περιέχει ενισχυτικά εγκλείσματα, σε αντίθεση με το Carbonfil™. Οι ίνες άνθρακα που περιέχει το Carbonfil™ επιφέρουν μεγαλύτερη αντοχή σε θραύση σε σύγκριση με το απλό PLA για λόγους που εξηγήθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το καθιστούν δηλαδή πιο ανοχικό σε τάσεις που ασκούνται κατά τον εφελκυσμό ή άλλες μηχανικές δοκιμές. Όλα τα παραπάνω αποτελούν μία εξήγηση της υπεροχής του Carbonfil™ έναντι του PLA στη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Max Stress), στο Young's Modulus και στη μέγιστη αντοχή σε θραύση (Max Stress at Fracture).

Όσον αφορά όμως τη βέλτιστη ποσοστιαία επιμήκυνση (Max Elongation %), βλέπουμε πως το PLA υπερτερεί σημαντικά έναντι του Carbonfil™. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί πολύ απλά για δύο λόγους:

- Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η θραύση των δοκιμών του Carbonfil™ ήταν πολύ ψαθυρή, ενώ η θραύση των δοκιμών από PLA έγινε πιο σταδιακά. Η ψαθυρότητα αυτή παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιμήκυνση: Όσο πιο ψαθυρό είναι ένα οποιοδήποτε αντικείμενο, τόσο πιο μικρή αναμένεται να είναι η επιμήκυνση του.

- Η δεύτερη εξήγηση έγκειται στην παρουσία ινών άνθρακα στο εσωτερικό του Carbonfil™. Όπως φαίνεται από τις εικόνες της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, υπάρχει έντονη αποκόλληση των ινών από την πολυμερική μήτρα, ενδεικτική της κακής συνάφειας που αυτές αναπτύσσουν με την πολυμερική μήτρα. Αυτό επιτρέπει την ευκολότερη απόσπαση ή αποκοπή κομματιών από αυτές και κατ' επέκταση την ευκολότερη -από άποψη επιβολής τάσης- και πιο απότομη θραύση τους.

Συμπερασματικά καταλήγουμε στο εξής: Το Carbonfil™ έχει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες όσον αφορά την αντοχή του σε επιβολή φορτίου (Max Stress, Max Stress at Fracture, Young's Modulus) συγκριτικά με το PLA και άρα θα πρέπει να προτιμάται σε κατασκευές που απαιτούν αντοχή σε δυνάμεις και τάσεις. Από την άλλη πλευρά όμως, όταν απαιτούμενο είναι η μεγάλη επιμήκυνση (Max Elongation %) σε μία κατασκευή, τότε το PLA υπερτερεί.

5.1.4 Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων τριδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων εφελκυσμού και δοκιμίων εφελκυσμού κατασκευασμένων με κανονικές μεθόδους

Είναι αρκετά σημαντικό να γίνει επίσης μία απλή σύγκριση των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων των τριδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων που βρέθηκαν κατά τις δοκιμές εφελκυσμού με τις βιβλιογραφικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων για τα δύο υλικά, όταν οι δοκιμές εφελκυσμού έχουν γίνει σε δοκίμια που έχουν κατασκευαστεί με συμβατικές μεθόδους μορφοποίησης. Η σύγκριση αυτή θα βοηθήσει να κατανοήσουμε τη διαφορά των κανονικών κατασκευών σε σύγκριση με τις 3d κατασκευές. Κάτι τέτοιο είναι πολύ σημαντικό για τις περισσότερες εφαρμογές του τριδιάστατου εκτυπωτή όπου απαιτούνται καλές μηχανικές ιδιότητες, όπως αντοχή σε τάσεις, επιμήκυνση κλπ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η κατασκευή γεφυρών με τη χρήση τριδιάστατων εκτυπωτών μεγάλης κλίμακας σε χώρες όπως η Ολλανδία και το Βέλγιο, όπου προφανώς απαιτείται η γνώση και η πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται κατά την τριδιάστατη εκτύπωση των επιμέρους μερών της γέφυρας.

Έτσι, στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι βέλτιστες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που βρήκαμε για τα δύο υλικά καθώς και οι βιβλιογραφικές τιμές των αντίστοιχων ιδιοτήτων:

Πίνακας 5.5: Βέλτιστες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων για τα δύο υλικά και οι βιβλιογραφικές τιμές των αντίστοιχων ιδιοτήτων

Υλικό	Max Stress (N/m ²)	Elongation (%)	Young's Modulus (N/m ²)	Stress at Fracture (N/m ²)
PLA	6.55 *10 ⁸	10	3.54*10 ¹⁰	5.61*10 ⁸
3d PLA	6.24*10 ⁸	3.32	2.51*10 ¹⁰	6.15*10 ⁸
Carbonfil™	-	5	-	5.25*10 ⁸
3d Carbonfil™	-	2.49	-	6.45*10 ⁸

Για το υλικό Carbonfil™ δε βρέθηκαν βιβλιογραφικές τιμές για τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό (Max Stress) και για το Young's Modulus. Επίσης είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί, πως συγκρίναμε τις βιβλιογραφικές τιμές με αυτές των δοκιμίων με 100% ποσοστό πλήρωσης, καθώς έτσι εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της σύγκρισης. Πιο συγκεκριμένα, όλα τα δοκίμια που υποβάλλονται σε δοκιμές εφελκυσμού σύμφωνα με τις βασικές μεθόδους της Επιστήμης των Υλικών (όχι εκτυπωμένα δηλαδή) είναι συμπαγή με ελάχιστους πόρους. Έτσι κρίνεται σωστό για τους σκοπούς της σύγκρισης, να εξεταστούν τα δοκίμια με ποσοστό πλήρωσης 100%, καθώς αυτά είναι πιο κοντά από άποψης δομής στα κανονικά δοκίμια που χρησιμοποιούνται για τον εφελκυσμό.

Παρατηρούμε λοιπόν πως και για τα δύο υλικά, οι βιβλιογραφικές τιμές για την ποσοστιαία επιμήκυνση κατά τον εφελκυσμό είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που βρέθηκαν κατά τις δοκιμές εφελκυσμού των τριδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμών. Οι τιμές για τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό για το υλικό PLA δε διαφέρουν σημαντικά, ενώ για την μέγιστη αντοχή σε θραύση παρατηρείται μία ελαφρώς μεγαλύτερη τιμή για τα τριδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια. Τέλος, σημαντική διαφορά παρουσιάζεται για το υλικό PLA στην τιμή του Young's Modulus, όπου τα τριδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια φαίνεται να έχουν από 35% έως 50% χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με τα δοκίμια.

Συνεπώς μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα και μοναδικό συμπέρασμα, καθώς σε τρεις μηχανικές ιδιότητες (Max Stress, Elongation, Young's Modulus) τα τριδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια υστερούν σημαντικά έναντι των κατασκευασμένων ενώ στην μέγιστη αντοχή σε θραύση (Stress at Fracture) υπερτερεί ελάχιστα. Έτσι, το μόνο ασφαλές συμπέρασμα είναι πως το PLA αλλά και το Carbonfil™ που χρησιμοποιήθηκαν από το εργαστήριο του τομέα της Επιστήμης των Υλικών για τριδιάστατη εκτύπωση για τις συγκεκριμένες παραμέτρους που επιλέχθηκαν υστερούν αρκετά στην μεγάλης σημασίας μηχανική ιδιότητα της επιμήκυνσης και ελαφρώς στην μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό και άρα για κατασκευές με θερμοπλαστικά υλικά που απαιτούν αντοχή και ασφάλεια θα πρέπει να γίνεται προσεκτική ρύθμιση των παραμέτρων εκτύπωσης είτε να προτιμώνται συμβατικές μέθοδοι μορφοποίησης συμπαγών αντικειμένων.

Το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει μόνο για την περίπτωση των τριδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων από τα υλικά αυτά στις συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν. Σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να γενικευτεί το συμπέρασμα αυτό. Αντίθετα, αποτελεί ίσως πρόκληση για μελλοντική έρευνα η διερεύνηση και εξέταση πολλαπλών τιμών και παραμέτρων, κάτι που θα δώσει πολύ πιο ασφαλή στοιχεία για την εν λόγω σύγκριση.

5.2 Μελλοντική Έρευνα

5.2.1 Προτυποποίηση δοκιμής εφελκυσμού για τριδιάστατα εκτυπωμένα δοκίμια

Η εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών για τριδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μία πολύ σημαντική διαδικασία στο χώρο των κατασκευών γενικότερα. Η ανάγκη για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων αυτών θα αυξάνεται όλο και περισσότερο στο μέλλον καθώς η τριδιάστατη εκτύπωση λαμβάνει ολοένα και περισσότερες εφαρμογές στη βιομηχανία. Όπως σε όλες τις κατασκευές που απαιτούν ασφάλεια για τον άνθρωπο και το περιβάλλον, έτσι και εδώ, ο Μηχανικός θα πρέπει να γνωρίζει εκ των προτέρων ποια θα είναι η αντοχή του υλικού που πρόκειται να χρησιμοποιήσει για μία κατασκευή ευρείας κλίμακας.

Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα, πως η διαδικασία της δοκιμής εφελκυσμού τριδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων αλλά και όλες οι υπόλοιπες δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων της Επιστήμης των Υλικών θα πρέπει να προτυποποιηθούν συγκεκριμένα για υλικά που προορίζονται αποκλειστικά για τριδιάστατη εκτύπωση. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο κατά ASTM D_638 Type IV, το οποίο αφορά γενικότερα τα δοκίμια από θερμοπλαστικά. Η δομή όμως των τριδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων έχει μεγάλη διαφορά από αυτήν των κανονικά κατασκευασμένων δοκιμίων και αυτό δεν μπορεί να θεωρείται αμελητέο. Για ασφαλέστερα συμπεράσματα και πιο αξιόπιστες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα πρότυπο για δοκιμές εφελκυσμού αποκλειστικά για υλικά προς τριδιάστατη εκτύπωση.

Η μελλοντική έρευνα πάνω στο κομμάτι της Αντοχής των Υλικών στην τριδιάστατη εκτύπωση θα πρέπει να στραφεί πάνω σε αυτή την προτυποποίηση, καθώς έτσι θα σφραγιστεί η αξιοπιστία των τριδιάστατων εκτυπώσεων όσον αφορά την ασφάλεια των ανθρώπων και την αντοχή των κατασκευών. Ακολουθώντας τις κατάλληλες πρότυπες διαδικασίες, η Επιστήμη των Υλικών θα πρέπει να καλύψει το κενό αυτό που υπάρχει μέχρι στιγμής. Η πιθανή αυτή μελλοντική έρευνα αποτελεί παράλληλα πρόκληση για τους ενδιαφερόμενους ερευνητές και επιστήμονες που θέλουν να ασχοληθούν με την καινοτόμα τεχνική της τριδιάστατης εκτύπωσης, αφήνοντας παράλληλα ένα πολύ σημαντικό έργο και εγχειρίδιο για τους επόμενους αλλά και για την ίδια την Επιστήμη των Υλικών.

5.2.2 Διερεύνηση της επιρροής πολλαπλών παραμέτρων πολλαπλών τιμών στις μηχανικές ιδιότητες με στατιστικό σχεδιασμό πειράματος

Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκε η επιρροή δύο μόνο παραμέτρων (Infill %, Infill Angle) στις μηχανικές ιδιότητες τριδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων. Σαφώς, οι εν λόγω παράμετροι παίζουν όπως προαναφέρθηκε τεράστιο ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες ενός εκτυπωμένου αντικειμένου. Παρόλ' αυτά όμως, υπάρχει πληθώρα άλλων επίσης σημαντικών παραμέτρων της τριδιάστατης εκτύπωσης, οι οποίες επηρεάζουν τη δομή και άρα τη μηχανική συμπεριφορά των κατασκευών ενός τριδιάστατου εκτυπωτή. Όσον αφορά λοιπόν την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων τριδιάστατα εκτυπωμένων αντικειμένων ή τη βελτιστοποίηση αυτών, θα ήταν πολύ σημαντική μία πιθανή διερεύνηση και των υπολοίπων παραμέτρων. Έτσι, θα υπάρχει μία πιο σφαιρική και ολοκληρωμένη άποψη για τον τρόπο που επηρεάζουν οι παράμετροι τη μηχανική συμπεριφορά. Άρα, μία πιθανή μελλοντική έρευνα σχετική με την παρούσα εργασία, θα είναι η εξέταση όλων ή πολλαπλών παραμέτρων μεταβαλλόμενων τιμών και η επιρροή τους στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων. Παράλληλα, με τη βοήθεια της Στατιστικής, όπως π.χ. με τη χρήση προγραμμάτων ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA), θα είναι δυνατή και η βελτιστοποίηση των παραμέτρων αυτών καθώς και η εύρεση των επιθυμητών τιμών κάθε μίας από αυτές ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες που θέλουμε να πετύχουμε.

Τέλος, μία επίσης σημαντική έρευνα θα ήταν και η διερεύνηση της επιρροής των διαφόρων παραμέτρων και σε άλλες μηχανικές ιδιότητες. Για να χαρακτηρίσει κανείς τη μηχανική συμπεριφορά ενός υλικού, δεν αρκεί μονάχα η δοκιμή εφελκυσμού αλλά και άλλες εξίσου σημαντικές μηχανικές δοκιμές. Συνοψίζοντας τη σκέψη αυτή, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να στραφεί σε μία πιο ευρεία έκταση, όπου όχι μονάχα θα εξετάζονταν όσο το δυνατόν περισσότερες παράμετροι της τριδιάστατης εκτύπωσης, αλλά παράλληλα θα γινόταν στατιστικός σχεδιασμός του πειράματος αλλά και χαρακτηρισμός των μηχανικών ιδιοτήτων μέσω άλλων μεθόδων, όπως η δοκιμή εφελκυσμού, η δοκιμή σκληρότητας, η δοκιμή κρούσης, η δοκιμή κόπωσης και η δοκιμή ερπυσμού. Προφανώς μία τέτοια πρωτοπόρα έρευνα απαιτεί χρόνο και ανθρώπινο δυναμικό, κοστίζει και ξεφεύγει από τα πλαίσια μίας διπλωματικής εργασίας.

Συνοπτικά, οι παράμετροι της τριδιάστατης εκτύπωσης που χρήζουν διερεύνησης είναι:

- Αριθμός εξωτερικών κελύφων (Number of Shells)
- Ύψος στρώσης (Layer Height)
- Πάχος γραμμών (path width)
- Θερμοκρασία εκβολέα (Extruder Temperature)
- Ταχύτητα εκτύπωσης (Printing Speed)
- Ταχύτητα κίνησης (Movement Speed)

Κεφάλαιο 6ο: Βιβλιογραφία

1. Bird, J. (2012). Exploring the 3D printing opportunity. *The Financial Times*.
2. Kodama, H. (November 1981). Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments, Vol. 52, No. 11, 1770–1773*.
3. Amato, I. (2003, November). *INSTANT MANUFACTURING*. Ανάκτηση από Technology Review: <https://www.technologyreview.com/s/402232/instant-manufacturing/>
4. Παπαθανάσης Ηλίας, Οκτώβριος 2005, Η Τεχνολογία της Τριδιάστατης Εκτύπωσης, Περισκόπιο της Επιστήμης, Τεύχος 297
5. Palermo, E. (November 11, 2015). How Robots Are Building a 3D-Printed Metal Bridge in Amsterdam. *Livescience*.
6. Chee Kai Chua, K. F. (2003). Rapid Prototyping. *World Scientific, 124*.
7. *Stratasys company history*. (2010). Ανάκτηση από Funding Universe: <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/stratasys-inc-history/>
8. *Tutorials*. (2015). Ανάκτηση από Voxelizer Official Page: <http://voxelizer.com/tutorials/configuring-print-settings/>
9. Astrid Juliana Rincon Lasprilla, G. A. (2014). Synthesis and Characterization of Poly (Lactic Acid) for Use in Biomedical Field. *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, VOL. 38*.
10. *Sulzer PLA Technology*. (2011). Ανάκτηση από Sulzer Chemtech.: https://www.sulzer.com/hu/-/media/Documents/ProductsAndServices/Process_Technology/Polymer_Production_Technology/Brochures/Sulzer_PLA_Technology.pdf
11. L.-T. Lima, R. A. (6 June 2007). Processing technologies for poly(lactic acid). *Progress in Polymer Science 33*.
12. Lin Xiao, B. W. (2012). Poly(Lactic Acid)-Based Biomaterials: Synthesis, Modification and Applications. *Biomedical Science, Engineering and Technology*.
13. Θ. Μαντούργλιας, Α. Σ. (2009, ΙΟΥΝΙΟΣ 3-5). 7ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΧΗΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ. *ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΙΣΗΜΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΓΑΚΛΑΚΤΙΚΟ ΟΞΥ*. ΠΑΤΡΑ: Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών/Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής.
14. Lee Tin Sin, A. R. (2012). *Poly(lactic Acid): PLA Biopolymer Technology and Applications*. Oxford: Elsevier.
15. Smith, R. (2015). *Biodegradable polymers for industrial applications*. Cambridge: Woodhead Pub.
16. Steinbuchel, Y. D. (2002). Biopolymers. Στο Y. D. Steinbuchel, *Polyesters III - Applications and Commercial Products, Volume 4*. Wiley-Blackwell.

17. Ind., F. (n.d.). *CarbonFil Technical Data Sheet* . Ανάκτηση από FormFutura Official Page: <http://www.formfutura.com/formfutura-175mm-carbonfil-black.html>, <https://static.webshopapp.com/shops/021593/files/045088834/tds-carbonfil.pdf>
18. *Transplant jaw made by 3D printer claimed as first*. (2012, March 8). Ανάκτηση από BBC NEWS: <http://www.bbc.com/news/technology-16907104>
19. Mark, L. (2014 , November 25). *Foster pioneers 3D concrete printing with contractor*. Ανάκτηση από The Architect's Journal: <http://www.architectsjournal.co.uk/news/foster-pioneers-3d-concrete-printing-with-contractor/8673110.fullarticle>
20. *ZMorph 2.0 S User-Manual*. (2015). Ανάκτηση από Zmorph Official Page: <https://support.zmorph3d.com/hc/en-us/articles/206477069-ZMorph-2-0-S-User-Manual>
21. *ASTM Official Page* . (n.d.). Ανάκτηση από Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics: <https://www.astm.org/Standards/D638.htm>
22. Dieter, G. (1986). *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill.
23. Wright, D. R. (2006). *The science and engineering of materials* . Στο D. R. Wright, *5th edition* (σσ. 130-202). Cengage Learning.
24. 3DPrinterOS. (2015, March 10). *What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints?* Ανάκτηση από My3dMatter: <https://www.3dprinter0s.com/what-is-the-influence-of-infill-layer-height-and-infill-pattern-on-my-3d-prints/>
25. Wenzheng Wu, P. G. (2015). *Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. Materials, Issue 8.*
26. Wenzheng Wu, P. G. (2015). *Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. Materials, Issue 8.*
27. Horst Czichos, T. S. (13 April 2007). *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*. Berlin Heidelberg,: Springer .
28. Shmaefsky, B. (October 30 2006). *Biotechnology, Issue 101, 171.*
29. Hooke, R. (1665). *Micrographia: Or Some Physiological Descriptions of Minute Bodies Made by Magnifying Glasses, with Observations and Inquiries Thereupon*. Στο R. Hooke. Courier Dover Publications.
30. Stephen G. Lipson, A. L. (n.d.). *Optical Physics 4th Edition*. Cambridge: Cambridge University Press.
31. International, A. (2004). *Introduction to Tensile Testing, Chapter 1*. ASM International.
32. Λόκκας, Γ. (2003). *Αρχές και Μέθοδοι στην Αντοχή των Υλικών*. ΤΕΙ Λάρισας.
33. Τσαμασφύρος, Γ. (1990). *Μηχανική παραμορφώσιμων σωμάτων Τόμος I και II*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

34. Davis, J. R. (2004). *Tensile Testing, 2nd Edition*. ASM International.
35. W.F. Hosford, P. H. (1992). Overview of Tensile Testing. Στο P. H. W.F. Hosford, *Tensile Testing* (σσ. 1–24). ASM International.
36. Möser, M. (n.d.). *Fractography with the SEM (Failure Analysis), Chapter 15, Materials Science Monographs 40: Electron Microscopy in Solid State Physics*.
37. The Official page of RepRap, http://reprap.org/wiki/Fused_filament_fabrication
38. Types of 3d printers or 3d printing technologies, <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>
39. How 3d printed prosthetic hands are changing these kids' lives, The National Geographic, <http://www.dailymotion.com/video/x3j7hvk>
40. The Mx3d project, <http://mx3d.com/projects/bridge/>
41. <http://buttons4crafts.com/47454-astm-d790-test-specimen-dimensions-crafts.html>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τεχνικό Φυλλάδιο Carbonfil™ (Technical Data Sheet)

Properties	Typical value	Test Method	Test condition
Physical			
Specific gravity	1.19 g/cc	ASTM D792	-
Melt flow rate	-	-	-
Water absorption	-	-	-
Moisture absorption	± 0.13%	-	-
Mechanical			
Impact strength	7.9 KJ/m ²	ASTM D256	Izod Notched @23° C (73° F)
Tensile strength	52.5 Mpa	ISO 527	@Yield 50mm/min (2 inch/min)
Tensile modulus	3800 Mpa	ISO 527	1mm/min
Elongation at break	8%	ISO 527	@ Break 50mm/min (2 inch/min)
Flexural strength	-	-	-
Flexural modulus	± 4600 Mpa	-	-
Hardness	109	ASTM D785	Rockwell R-scale
Thermal			
Print temperature	± 230 - 265° C	-	-
Melting temperature	-	-	-
Viscat softening temp.	± 85° C	ASTM D648	@ 0.455 Mpa (66psi)
Optical			
Haze	-	-	-
Transmittance	-	-	-
Gloss	-	-	-

Product details, certifications and compliance		Diameter	Tolerance	Roundness
HS Code	39169090	1.75mm	± 0.05mm	≥ 95%
REACH compliant	Yes	2.85mm	± 0.10mm	≥ 95%
RoHS certified	Yes			
FDA compliant	No			

Formfutura VOF	CoC: 55502105	Tel: +31 (0)85 002 0881
Groenestraat 215	VAT: NL851741083B01	Email: info@formfutura.com
6531 HH Nijmegen	EORI: NL851741083	Website: www.formfutura.com
The Netherlands		

