



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ FFF ΔΟΚΙΜΙΩΝ
ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΔΙΠΛΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ
ΣΤΡΕΨΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πράσινος Σωτήριος

AM 272017019

Επιβλέποντες καθηγητές

Στεργίου Κωνσταντίνος

Σαγιάς Βασίλειος

ΑΘΗΝΑ, Φεβρουάριος 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING

**Mechanical properties optimization of FFF Additive
Manufacturing dual material specimens. Torsion testing**

Prasinos Sotirios

AM 272017019

SUPERVISING TEACHERS

Stergiou Konstantinos

Sagias Vasilios

ATHENS, FEBRUARY 2023

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Πράσινος Σωτήριος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 272017019 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών





Η τριμελής εξεταστική επιτροπή

ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ	
ΜΠΕΣΕΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ	
ΣΑΓΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ	



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την δημιουργία της διπλωματικής εργασίας, η οποία υλοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου τον κ. Σαγιά Βασίλειο, τον πατέρα μου Πράσινο Γεώργιο και τη μητέρα μου Μουντζουρίδου Νίνα, για την μεγάλη υποστήριξη που μου παρείχαν, τον φίλο και συμφοιτητή Πέππα Ιωάννη, με τον οποίο περάσαμε μαζί τις δυσκολίες που προέκυψαν, τον φίλο μου Αγγελιδάκη Δημήτριο για την ιδιαίτερα σημαντική βοήθεια που μου παρείχε και την κοπέλα μου Ιωαννίδου Αικατερίνη-Άννα, για την ψυχολογική υποστήριξή της στις δυσκολίες που αντιμετώπισα όλη αυτή την περίοδο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	8
ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	8
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ	13
ΕΚΤΥΠΩΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	Error! Bookmark not defined.
ΥΛΙΚΑ	Error! Bookmark not defined.
ΠΑΡΑΜΕΤΟΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ	15
ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ	Error! Bookmark not defined.
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	17
ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	22
ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	Error! Bookmark not defined.
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ CAD ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ	19
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ PLA	Error! Bookmark not defined.
ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ ΔΙΠΛΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	49
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΑ	18
ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	25
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	27
ΣΤΡΕΨΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	35
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	Error! Bookmark not defined.
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	43
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	55

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση, αποτελεί μία μέθοδο προσθετικής κατασκευής αντικειμένων. Αυτό επιτυγχάνεται με την εναλλασσόμενη προσθήκη συνεχόμενων στρώσεων υλικού. Η συγκεκριμένη μέθοδος πρωτοεμφανίστηκε κοντά στο 1980 από τον Chuck Hull και με τη πάροδο των δεκαετιών άκμασε ραγδαία, με εφαρμογές στην βιομηχανία, την αεροναυπηγική ακόμα και τη formula 1, δημιουργώντας εξαρτήματα υψηλών επιδόσεων ελαχιστοποιώντας τη μάζα τους και αυξάνοντας τις μηχανικές τους ιδιότητες, με τη χρήση σύνθετων υλικών μέχρι και κράμα ρευστού μετάλλου.

(Langnau, 2020)



Εικόνα 1: Εκτυπωμένα δοκίμια



Εικόνα 2: Εκτυπωμένη δαγκάνα φρένου από την Bugatti, κατασκευασμένη από τιτάνιο, (Colombo-Pulgarín, 2022).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ



Εικόνα 3: Τρισδιάστατος εκτυπωτής

Για πρώτη φορά στην ιστορία η ιδέα και η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης διατυπώθηκε το 1945 από τον Murray Leinster, ενώ το 1971 ο Johannes F Gottward κατοχύρωσε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το liquid metal recorder που είναι μια συσκευή συνεχούς inkjet μεταλλικό υλικό για το σχηματισμό μιας αφαιρούμενης μεταλλικής κατασκευής. Το 1980 έγινε η ανάπτυξη του εξοπλισμού και των υλικών στον τομέα της προσθετικής κατασκευής με τον Hideo Kodama να δημιουργεί τρισδιάστατα πλαστικά μοντέλα. Το 1984 οι Alain Le Méhauté, Olivier de Witte, and Jean Claude André κατοχύρωσαν την πατέντα για την πρώτη διαδικασία παραγωγής με τεχνολογία stereolithography (SLA), η οποία εφαρμόστηκε από την τότε Γαλλική εταιρεία general electric. Το 2006 έκανε την επίσημη εμφάνισή του ένας εκτυπωτής τρισδιάστατων αντικειμένων πολλαπλών υλικών, ενώ η πρώτη FDM τεχνολογία εμφανίστηκε το 2009 με χρήση στην βιομηχανία (Kalpakjian, 2022).

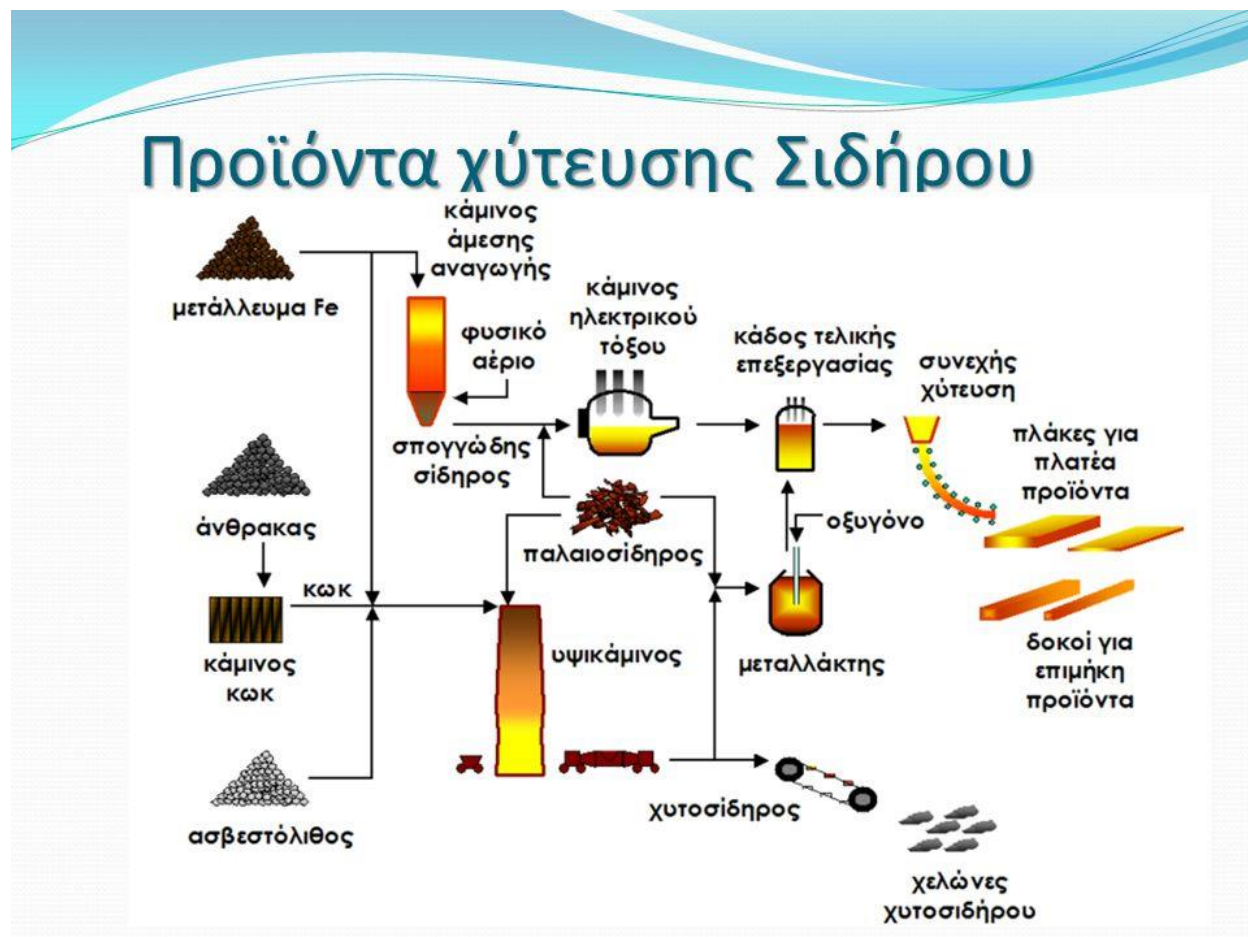


Εικόνα 4: Τεμάχιο εκτυπωμένο με δύο υλικά

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι πως με τη μέθοδο αυτή μπορούν να δημιουργηθούν ασυνήθιστα πολύπλοκες διατομές αντικειμένων, που είναι αδύνατον να παραχθούν με τις παραδοσιακές μεθόδους, όπως τη χύτευση και την διέλαση. Αυτές, όπως και

η τρισδιάστατη εκτύπωση, ανήκουν στη μέθοδο προσθετικής κατασκευής και έχουν μεγάλη εφαρμογή στην βιομηχανία.

Η χύτευση αποτελεί μια παραδοσιακή μέθοδο προσθετικής κατασκευής. Στην παρακάτω εικόνα (βλέπε εικόνα 5) βλέπουμε αναλυτικά την διαδικασία που εφαρμόζεται για την χύτευση.



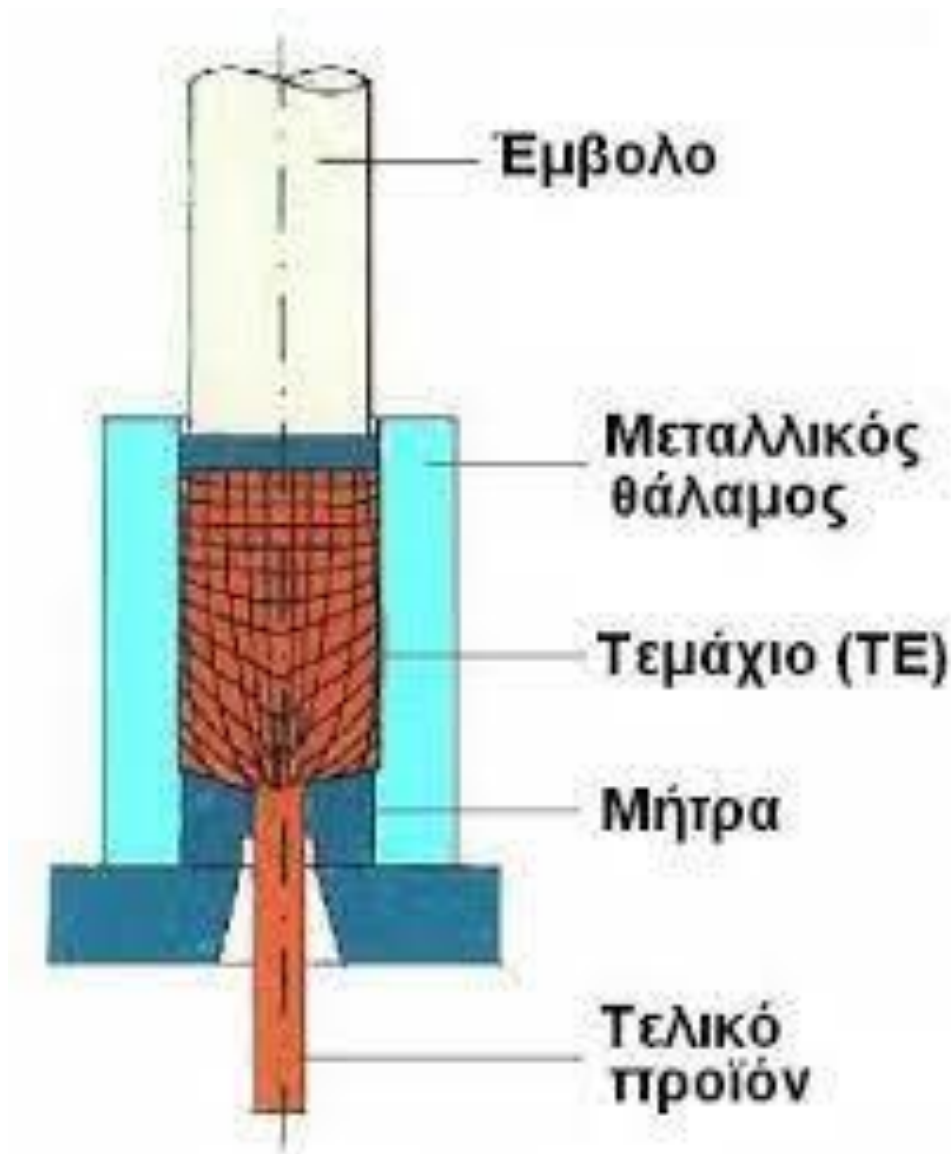
Εικόνα 5: Διαδικασία χύτευσης μετάλλου

Αρχικά τοποθετούνται τα κύρια υλικά στην προθερμασμένη υψικάμνη. Να αναφερθεί ότι στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι απαραίτητη η ανάπτυξη πολύ υψηλών θερμοκρασιών και συγκεκριμένα περισσότερο από την θερμοκρασία τήξης του σιδήρου, στη περίπτωση μεταλλικών τεμαχίων, που είναι οι 1550°C. Στη συνέχεια, το τηγμένο μέταλλο ρέει από τον μεταλλάκτη και τοποθετείται σε ειδικά καλούπια-μήτρες, μέσα στα οποία το ρευστό θα πάρει το σχήμα τους με το πέρας της στερεοποίησης-ψύξης του. (NTUA, n.d.)

Η συγκεκριμένη μέθοδος ενδείκνυται για εφαρμογή σύνθετων ή πολύπλοκων εξαρτημάτων με πολύπλοκο σχήμα και για μεγάλη παραγωγή τεμαχίων, λόγω της απαίτησης πολύ υψηλών θερμοκρασιών του συστήματος, το οποίο απαιτεί και χρόνο και κόστος. Παράλληλα, ένα

επιπλέον μειωνέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι το μεγάλο κόστος και ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή των καλουπιών ή μητρών. Τέλος, κατά τη στερεοποίηση του χυτού, εμφανίζονται αναπτύσσονται προβλήματα στη δομή του, όπως η ανάπτυξη πόρων, με αποτέλεσμα να επηρεάζουν την αντοχή του.

Η άλλη μέθοδος προσθετικής κατασκευής είναι η διέλαση. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται τα βήματα που εφαρμόζονται για την διέλαση ενός υλικού.

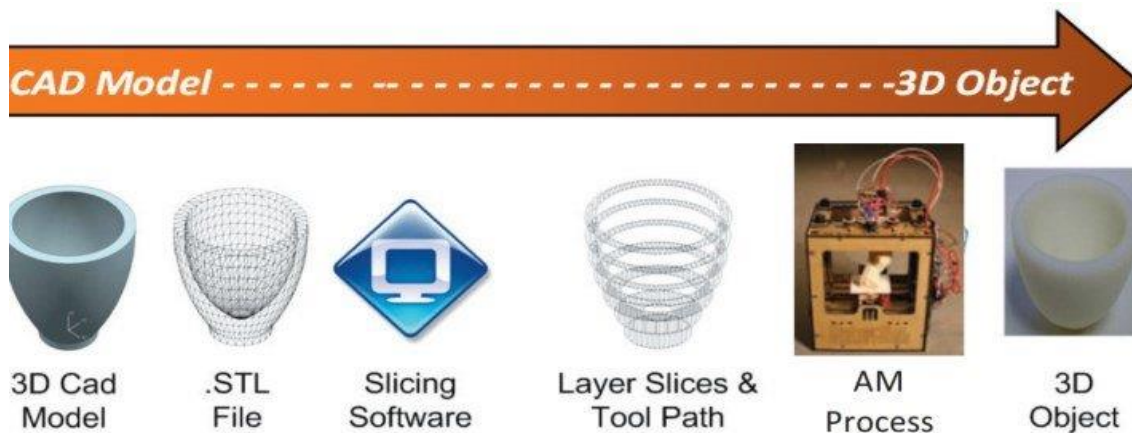


Εικόνα 6: διέλαση

Ομοίως με την χύτευση, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός και η χρήση ενός καλουπιού ή μήτρας, εντός του οποίου θα γίνει ο τελικός σχεδιασμός του τεμαχίου που μας ενδιαφέρει. Στη συγκεκριμένη μέθοδο δεν είναι απαραίτητη η ανάπτυξη τόσο υψηλών θερμοκρασιών όπως της χύτευσης, αλλά χρειάζεται κόστος για την απαιτούμενη ενέργεια, που εφαρμόζεται στο

έμβολο προκειμένου να μπορέσει να ωθήσει επιτυχώς το αρχικό τεμάχιο, εντός του μεταλλικού θαλάμου και μέσω της μήτρας να δημιουργηθεί το τελικό προϊόν. Λόγω της ανάγκης σχεδιασμού και κατασκευής μήτρας, η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται για την παραγωγή τεμαχίων μεγάλης ποσότητας. Τέλος, δεν είναι εφικτή η δημιουργία προϊόντων με ιδιαίτερα σύνθετες διατομές.

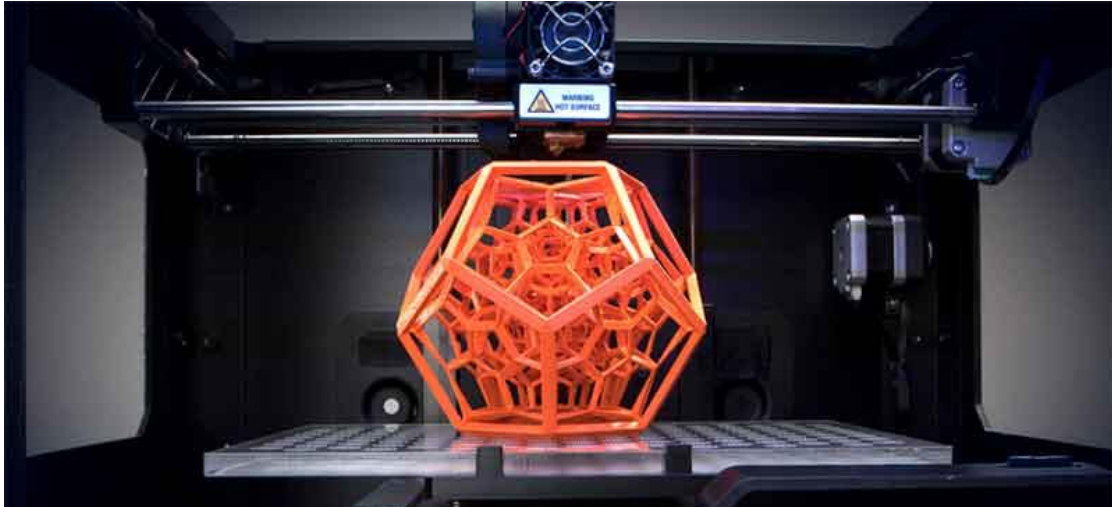
Σχετικά με την τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής όπως η χύτευση και η διέλαση, αλλά δεν αποτελεί μία παραδοσιακή μέθοδο, μιας και έχει εισαχθεί τις τελευταίες δεκαετίες στην βιομηχανία. Να σημειωθεί όμως ότι στις μέρες μας εφαρμόζεται εκτενώς.



Εικόνα 6.1: Διαδικασία εκτύπωσης

Για να πραγματοποιηθεί μια τρισδιάστατη εκτύπωση, υπάρχει μια ακολουθία βημάτων (βλέπε εικόνα 6.1). Πρώτο βήμα είναι να γίνει η μοντελοποίηση του ψηφιακού αντικειμένου σε CAD (Computer Aided Design) πρόγραμμα, σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Από το πρόγραμμα αυτό, εξάγουμε το CAD μοντέλο σε STL αρχείο. Με την εξαγωγή STL αρχείου, μετατρέπεται το ψηφιακό μοντέλο σε εντολές g-code, προκειμένου να είναι διαχειρίσιμο από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Να σημειωθεί ότι ο εκτυπωτής αναγνωρίζει μόνο τον g-code. Στη συνέχεια μέσω άλλου λογισμικού που ονομάζεται slicer (slicing software), εισάγεται το STL αρχείο και μας δίνεται η δυνατότητα εντός του συγκεκριμένου προγράμματος να καθορίσουμε όλη την διεργασία της εκτύπωσης του αντικειμένου. Κατά μία έννοια τεμαχίζουμε το αντικείμενο σε πολύ λεπτές διατομές ελάχιστου πάχους εντός του slicer. Τελευταίο βήμα, είναι η πραγματική δημιουργία του τελικού αντικειμένου, μέσα στον εκτυπωτή. (Παπαθανάσης, 2005).

Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει ορισμένα αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων. Μας δίνεται η δυνατότητα ιδιαίτερα πολύπλοκων διατομών και σχημάτων (βλέπε εικόνα 6.2), τόσο πολύπλοκα που είναι αδύνατον να δημιουργηθούν ακόμα και με την μέθοδο της χύτευσης.



Εικόνα 6.2: Σύνθετη κατασκευή δοκιμίου

Επειδή δεν χρειάζεται ο σχεδιασμός και η χρήση μήτρας ή καλουπιού, η μέθοδος αυτή είναι ικανή να εφαρμοστεί και για την παραγωγή ελαχίστων τεμαχίων, έναντι των άλλων μεθόδων που εφαρμόζονται μόνο για μαζική παραγωγή αντικειμένων. Η δημιουργία πολύπλοκων διατομών, εκτός από την βιομηχανία γενικότερα, βρίσκει τεράστια εφαρμογή στην αεροναυπηγική, με την κατασκευή εξαρτημάτων σε αεροσκάφη μέχρι και σε διαστημόπλοια και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η Γερμανική εταιρεία Mahle κατασκευάζει εξαρτήματα κινητήρων διαφόρων εφαρμογών και υψηλών επιδόσεων. Τα τελευταία έτη, εφαρμόζει την τεχνολογία προσθετική κατασκευής και έκανε μία παρουσίαση στην οποία κατασκεύασε αλουμινένια έμβολα με τρισδιάστατη εκτύπωση και τα σύγκρινε με αυτά που παράγει με τους παραδοσιακούς τρόπους. Το αποτέλεσμα είναι πως αυξήθηκε η απόδοση του κινητήρα και ήταν ελαφρύτερα κατά 20%, ενώ τους έγινε δοκιμή αντοχής 200 ώρες, κάτω από τις πιο δύσκολες συνθήκες. Εκ των αποτελεσμάτων ανοίγει ένας νέος δρόμος για την παραγωγή εξαρτημάτων στη βιομηχανία.



Εικόνα 6.3: Έμβολα τρισδιάστατης εκτύπωσης

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι με την μέθοδο της προσθετικής παραγωγής μπορούν να κατασκευασθούν αντικείμενα με γεωμετρίες και λεπτομέρειες που είναι αδύνατον να επιτευχθούν με τις άλλες συμβατικές τεχνολογίες, όπως απεικονίζεται παρακάτω (Mahle, 2023)

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Υπάρχουν και εφαρμόζονται διάφορες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης αντικειμένων. Η τεχνολογία **SLA**(Stereolithography), η οποία βασίζεται στη χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας ώστε να στερεοποιήσει το ρευστό υλικό και να κατασκευαστεί το επιθυμητό αντικείμενο. Συνήθως υπάρχει δοχείο με ρητίνη και η δέσμη στερεοποιεί μια στρώση κάθε φορά. Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται είναι κυρίως ρητινούχα. (spot, 2023)

Πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι πως τα τελικά αντικείμενα έχουν φινίρισμα υψηλής ποιότητας και λεπτομέρειας. Υπάρχει και η δυνατότητα εκτύπωσης πολλαπλών υλικών, διαφορετικών ιδιοτήτων.

Μειονέκτημα είναι πως απαιτείται η χρήση χημικών, η αναγκία επιπρόσθετη σκλήρυνση του αντικειμένου στο τέλος της εργασίας. Τέλος η υποχρεωτική ύπαρξη στηρίξεων κατά την εκτύπωση, αφήνουν σημάδια στην εκάστοτε επιφάνεια του αντικειμένου.

Η **SLS**(Selective Laser Sintering) χρησιμοποιεί υλικό σε μορφή πούδρας και υπάρχει ένα laser το οποίο τήκει τα σωματίδια. Πρώτα ένα στρώμα πούδρας επικολλάται στο θάλαμο εκτύπωσης, όπου με τη βοήθεια του laser τα σωματίδια της πούδρας λιώνουν στα επιθυμητά σημεία και στη συνέχεια ο θάλαμος εκτύπωσης κατεβαίνει και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Αξιοσημείωτο πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής, είναι πως οι προεξοχές και τα δύσκολα σημεία αντικειμένων δεν χρειάζονται υποστηρικτικό υλικό, επειδή η πούδρα περιβάλλει το τρισδιάστατο κομμάτι μέχρι να εκτυπωθεί, παρέχοντάς του την απαιτούμενη υποστήριξη προτού το εναπομένο υλικό σκουπιστεί για να ξαναχρησιμοποιηθεί. Δίδεται και η δυνατότητα να εκτυπωθούν περισσότερα από δύο αντικείμενα ανά εκτύπωση, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό τον χρόνο εκτύπωσης. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη τεχνολογία είναι κυρίως το πολυαμίδιο, το οποίο μπορεί και να αναμιχθεί με αλουμίνιο ή ανθρακονήματα. Πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι το γεγονός ότι στα τελικά αντικείμενα δεν υπάρχουν ορατά στρώματα πάνω τις επιφάνειές τους. Επίσης τα τεμάχια έχουν μεγάλες μηχανικές ιδιότητες. Σημαντικό μειονέκτημα είναι πως ο εξοπλισμός είναι μεγάλος, υπάρχει η επικινδυνότητα εισπνοής της πρώτης ύλης, επειδή είναι σε μορφή σκόνης και τα αναλώσιμα υλικά όπως και ο εξοπλισμός έχουν μεγάλο κόστος, έναντι των άλλων μεθόδων. (ANIMA, 2023)

Η **FDM** (Fused Deposition Modeling) ή **FFF** (Fused Filament Fabrication), είναι η τεχνολογία με (hub, 2023) την μεγαλύτερη εφαρμογή, λόγω της ευκολίας χρήσης της, επειδή δεν απαιτείται χρήση χημικών ουσιών. Αρχικά χρησιμοποιείται ένα στρώμα πρώτης ύλης, το οποίο αναφέρεται ως νήμα. Αυτό έχει σταθερό πλάτος 1,75 mm ή 2,85 mm και είναι συνήθως ένα θερμοπλαστικό που παραδίδεται από ένα καρούλι. Στη συνέχεια εξωθεί το νήμα μέσω ενός

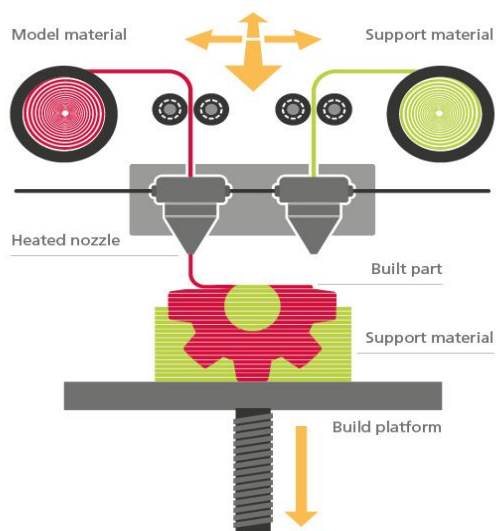
θερμαινόμενου ακροφυσίου, το οποίο είναι τοποθετημένο σε ένα σύστημα κίνησης που το μετακινεί γύρω από το σημείο στήριξής του. Το τηγμένο νήμα από το ακροφύσιο εναποτίθεται πάνω στη πλάκα κατασκευής, όπου ψύχεται και στερεοποιείται για να σχηματίσει ένα στρώμα. Στη συνέχεια, η πλάκα κατασκευής κινείται προς τα κάτω προκειμένου να ξεκινήσει ένα νέο στρώμα. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να σχηματιστεί το πλήρες αντικείμενο. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως θερμοπλαστικά και πολυμερή, ενώ είναι δυνατή και η χρήση κεραμικών υλικών. (spot, 2023)

Βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους εκτύπωσης είναι πως η διαδικασία είναι περισσότερο καθαρή λόγω απουσίας χημικών ουσιών, ο εξοπλισμός είναι πιο οικονομικός και σχετικά απλός στην λειτουργία και συντήρησή του. Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί μεγαλύτερη γκάμα υλικών προς εκτύπωση. (hub, 2023)

Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι το τελικό τεμάχιο δεν έχει τόσο καλής ποιότητας επιφάνειες, όπως στις άλλες μεθόδους.

Στη μέθοδο αυτή, εκτός από την απλή μέθοδο εκτύπωσης αντικειμένων με ένα υλικό, υπάρχει και η δυνατότητα να εκτυπωθούν αντικείμενα από διαφορετικό υλικό. Η χρησιμότητα που έχει αυτή η εφαρμογή των πολλαπλών υλικών σε ένα τεμάχιο, είναι κυρίως δύο. Στη πρώτη περίπτωση για να δημιουργείται κάποιο αντικείμενο με πολλούς χρωματισμούς, είτε για ομορφιά στη περίπτωση που αναφερόμαστε σε κάποιο μοντέλο ή φιρούρα, αλλά και για εκπαιδευτικούς λόγους, όπου μας δίδεται η δυνατότητα παρουσίασης μιας σύνθετης κατασκευής. Ο δεύτερος λόγος είναι για να αλλάξουν οι ιδιότητές του αντικειμένου. Ο συνδυασμός των υλικών μπορεί να αυξήσει την αντοχή του υλικού, αλλάζοντας τη μικροδομή του. (Ricoh, 2022)

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διαδικασία με την οποία πραγματοποιείται η τρισδιάστατη εκτύπωση και με δύο κεφαλές, έχοντας με τον τρόπο αυτό τη δυνατότητα χρήσης δεύτερου υλικού (Γκάρτζου, 2016).



Εικόνα 7: Διαδικασία εκτύπωσης FDM τεχνολογίας

ΠΑΡΑΜΕΤΟΙ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Η τρισδιάστατη εκτύπωση εαποτελεί μία πολυπαραμετρική διαδικασία. Οι παράμετροι εκτύπωσης είναι ο προσανατολισμός εκτύπωσης, το πάχος στρώσης, η θερμοκρασία του τηγμένου υλικού ή θερμοκρασία εξώθησης, η ταχύτητα εκτύπωσης και η θερμοκρασία της πλάκας εκτύπωσης. Αναλυτικότερα, ο προσανατολισμός εκτύπωσης μετρούμενος σε μοίρες, είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο τεμάχιο και στους τρεις άξονες του καρτεσιανού συστήματος (xyz), πάνω στο τραπέζι εκτύπωσης.

Το πάχος κάθε στρώσης είναι το πάχος του υλικού που εναποθέτει το ακροφύσιο, σε κάθε πέρασμά του. Αυτό κυμαίνεται από 0.1 μέχρι 0.6 mm στην μέθοδο FDM και έχει άμεση επίδραση στον χρόνο εκτύπωσης και στην τελική ποιότητα επιφανείας του αντικειμένου. (Anon., n.d.)

Η θερμοκρασία εξώθησης ή τηγμένου υλικού, είναι η θερμοκρασία στην οποία θα θερμανθεί το ακροφύσιο, μέσω του οποίου διαρρέει το υλικό σε ρευστή μορφή. Αυτή είναι μια παράμετρος η οποία επηρεάζει άμεσα τον χρόνο που θα χρειαστεί ένα υλικό για να κρυώσει, αλλά και την ποιότητα επιφανείας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η θερμοκρασία εξώθησης προσεγγίζει την θερμοκρασία τήξης του υλικού. Το εύρος τιμών της θερμοκρασίας δίδεται από τον κάθε κατασκευαστή του υλικού (Vaibhav Bhosale, 2022).

Σχετικά με την ταχύτητα εκτύπωσης, η οποία μετράται σε (mm/s), αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία κινείται η κεφαλή η οποία φέρει το ακροφύσιο. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα αυτή,

τόσο μειώνεται ο χρόνος εκτύπωσης ,θυσιάζοντας την ποιότητα.Με την μείωση της ταχύτητας συμβαίνει το αντίθετο. (Paolo Minetola, 2022).

Η θερμοκρασία της πλάκας εκτύπωσης είναι ιδιαίτερα σημαντική σαν παράμετρος και αυτό επειδή επηρεάζει άμεσα την προσκόλληση του υλικού πάνω σε αυτή.Με καλή επικόλληση υλικού, δημιουργείται μια πολύ ισχυρή βάση στην οποία μπορεί το αντικείμενο να δημιουργηθεί επιτυχώς.Στην περίπτωση που δεν συμβαίνει αυτό είναι αδύνατη η εκτύπωση του αντικειμένου, λόγω αποκόλλησης από την πλάκα εκτύπωσης.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική αναζήτηση προκειμένου να προσδιοριστούν λεπτομερώς όλες οι εφαρμογές γυρω από το συγκεκριμένο θέμα.Από την αναζήτηση αυτή προέκυψαν ερωτήματα τα οποία δεν είχαν απαντηθεί και με σκοπό την επίλυσή τους, δημιουργήθηκε η εργασία αυτή.Επιπροσθέτως, έγινε βιβλιογραφική έρευνα για τις μεθόδους προσθετικής κατασκευής αντικειμένων και η μεταξύ τους σύγκριση, οι τεχνολογίες των τρισδιάστατων εκτυπώσεων με τα υλικά που εφαρμόζονται από την κάθε μία, τα πλεονεκτήματα και μειωνεκτήματά τους και τέλος για τις παραμέτρους εκτύπωσης τεμαχίων.Επειδή η τρισδιάστατη εκτύπωση και η μηχανική καταπόνηση σε στρέψη αποτελούν ένα πολυπαραγοντικό πρόβλημα, βάσει της έρευνας που έγινε,καταλήγουμε στην ανάγκη εκτέλεσης πειράματος για τους υπολογισμούς των στρεπτικών τάσεων και της γωνιάς στρέψης.Το πειραματικό μέρος αρχικά επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό των πειραμάτων, εν συνεχεία ακολουθεί η διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας μαζί με τα συμπεράσματα που απορρέουν από αυτή.

Στην εκτύπωση με τη μέθοδο FDM, στην οποία βασίζεται η διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας εργασίας, πολύ σημαντικό ρόλο λαμβάνει ο παράγοντας της θερμοκρασίας εξώθησης.Ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση ενός αντικειμένου, η θερμοκρασία με την οποία πρέπει αυτο να θερμανθεί προκειμένου να περάσει μέσα από κάποιο ανοιγμα για να πάρει την αντίστοιχη μορφή, διαφέρει ανάμεσα στα υλικά όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα.Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η θερμοκρασία εξώθησης προσεγγίζει την θερμοκρασία τήξης του υλικού (Matterthings, 2022).

Για τη δημιουργία των δοκιμών θα χρησιμοποιηθούν τα υλικά PLA και ABS και στη συνέχεια παρουσιάζονται πίνακες με ορισμένα χαρακτηριστικά στοιχεία, από τον ίδιο τον κατασκευαστή των συγκεκριμένων υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές εκτυπώσεις της παρούσας εργασίας.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Από την βιβλιογραφική έρευνα που έγινε καταλήγουμε στο ότι θα γίνει η δοκιμή των αντικειμένων σε στρέψη. Η δοκιμή αυτή όπως και η εκτύπωση των αντικειμένων, καθορίζονται από πρότυπα. Τα πρότυπα που εφαρμόστηκαν για τη δημιουργία του δοκιμίου και για την δοκιμή των αντικειμένων σε στρέψη, είναι το ASTM D-5279-1 και το ISO-18338-2015-6. Το πρώτο αφορά την πειραματική διαδικασία. Καθορίζονται, οι μαθηματικοί τύποι και τα μεγέθη που θα προκύψουν από τα πειράματα στρέψης, που αφορούν την διατμητική τάση και την γωνία στρέψης του δοκιμίου. Η προετοιμασία της μηχανής στρέψης, ο τρόπος με τον οποίο θα εφαρμοστούν τα φορτία κατά την στρέψη, δηλαδή ο ρυθμός φόρτισης, το μέγεθος και η διάρκεια αυτής. Το δεύτερο αφορά την διαστασιολόγηση του δοκιμίου που θα εκτυπωθεί και τον αριθμό τους ανα σειρά εκτύπωσης.

Σχετικά με τους υπολογισμούς που θα γίνουν για την δημιουργία των διαγραμμάτων από τα αποτελέσματα των δοκιμών στρέψης, από το πρότυπο δίδονται οι τύποι της διατμητικής τάσης και της γωνίας στρέψης.

$$\text{Διατμητική τάση : } \tau = \frac{T (Nm)}{C1 \cdot a \cdot b^2 (m)} , (N/m^2)$$

$$\text{Γωνία στρέψης : } \gamma = \frac{C2 \cdot b (m) \cdot \varphi (rad)}{C1 \cdot L (m)} , (rad)$$

Όπου, με **T** συμβολίζεται η ροπή (από πειραματικές μετρήσεις) σε N/m, με **φ** η γωνία συστροφής (από πειραματικές μετρήσεις) σε rad. Με **a** συμβολίζεται η απόσταση της μεγάλης πλευράς ενώ με **b** η απόσταση της μικρής πλευράς της ορθογωνικής διατομής του δοκιμίου και με **L** το ενεργό μήκος δοκιμίου. Τέλος με **C1, C2** συμβολίζονται οι συντελεστές που προκύπτουν από τον πίνακα 18 που ακολουθεί.

Πίνακας συντελεστών

a/b	C1	C2
1	0.208	0.1406
1.2	0.219	0.1661
1.5	0.231	0.1958
2	0.246	0.229
2.5	0.258	0.249
3	0.267	0.263
4	0.282	0.281
5	0.291	0.291
10	0.312	0.312
∞	0.333	0.333

Πίνακας 1: συντελεστές C1, C2 (Cesar Omar Balderrama-Armendariz, 2018)

Η κίτρινη γραμμή του πίνακα αφορά τους υπολογισμούς της εργασίας και προέκυψε από τις διαστάσεις του δοκιμίου.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Ο σχεδιασμός πειραμάτων γίνεται σε προβλήματα με περισσότερους από δύο παράγοντες με σκοπό την βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων. Από την βιβλιογραφία καταλήγουμε στον σχεδιασμό πειραμάτων με τη μεθοδολογία Taguchi. Αυτή έχει σκοπό στην βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας και των αντίστοιχων δεικτών μέσα από τον προσδιορισμό των κατάλληλων παραγόντων που ελαχιστοποιούν τη μεταβλητότητα επιτυγχάνοντας παράλληλα την προδιαγραφόμενη απόδοση. Η μέθοδος Taguchi L4 γίνεται με την εφαρμογή ορθογώνιων πινάκων. Ο πίνακας αποτελείται από κελιά και κάθε κελί περιέχει το επίπεδο της μεταβλητής, ανά πείραμα. (ΚΑΣΤΑΝΟΣ, 2018)

ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

M1	Γωνία εκτύπωσης νήματος
M2	Εναλλαγή γωνίας νήματος
M3	Κατά όγκο περιεκτικότητα υλικών

Πίνακας 2: Πίνακας μεταβλητών

Στην συγκεκριμένη μέθοδο δε μπορούν να ελεγχθούν όλες οι μεταβλητές, οι οποίες επηρεάζουν το αποτέλεσμα κάθε πειράματος. Οι ανέλεκτες μεταβλητές ονομάζονται θόρυβος και ο σκοπός της παραπάνω μεθόδου είναι να τις εντοπίσει, προκειμένου να είναι επαναλήψιμο το αποτέλεσμα του πειράματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ TAGUCHI

Επίπεδα	M1	M2	M3
E1	0/90	BY BLOCK	60%PLA
E2	45/-45	BY LAYER	60%ABS

Πίνακας 3: πίνακας Taguchi

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Αριθμός πειραμάτων	M1	M2	M3
1	E1	E1	E1
2	E1	E2	E2
3	E2	E1	E2
4	E2	E2	E1

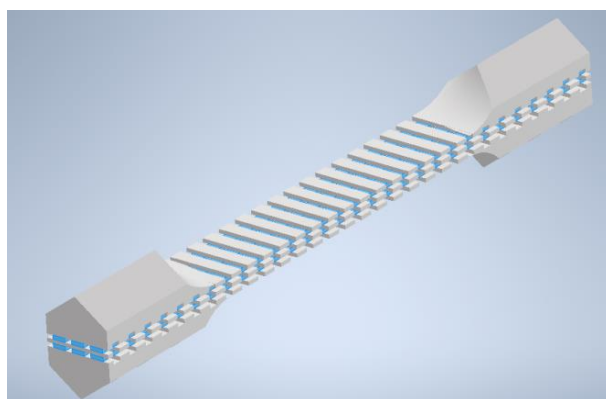
Πίνακας 4: Πίνακας σχεδιασμού πειραμάτων

Καταλήγοντας, σχηματίζεται ο πίνακας του σχεδιασού των πειραμάτων (βλέπε πίνακα 4), ο οποίος προκύπτει από τους δύο πίνακες (βλέπε πίνακες 2 και 3), τον πίνακα μεταβλητών και τον πίνακα Taguchi.

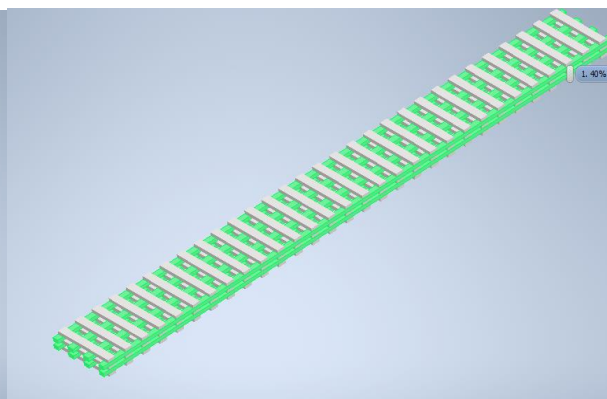
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ CAD ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ

Από τον σχεδιασμό των πειραμάτων, προκύπτει η μοντελοποίηση των δοκιμών. Πριν εκτυπωθεί ένα αντικείμενο, πρέπει να σχεδιαστεί σε CAD πρόγραμμα. Ομοίως έγινε και με τα δοκίμια τα οποία πριν εκτυπωθούν σχεδιάστηκαν σε CAD με τις διαστάσεις που έλεγε το επιλεγμένο πρότυπο που ακολουθήθηκε.

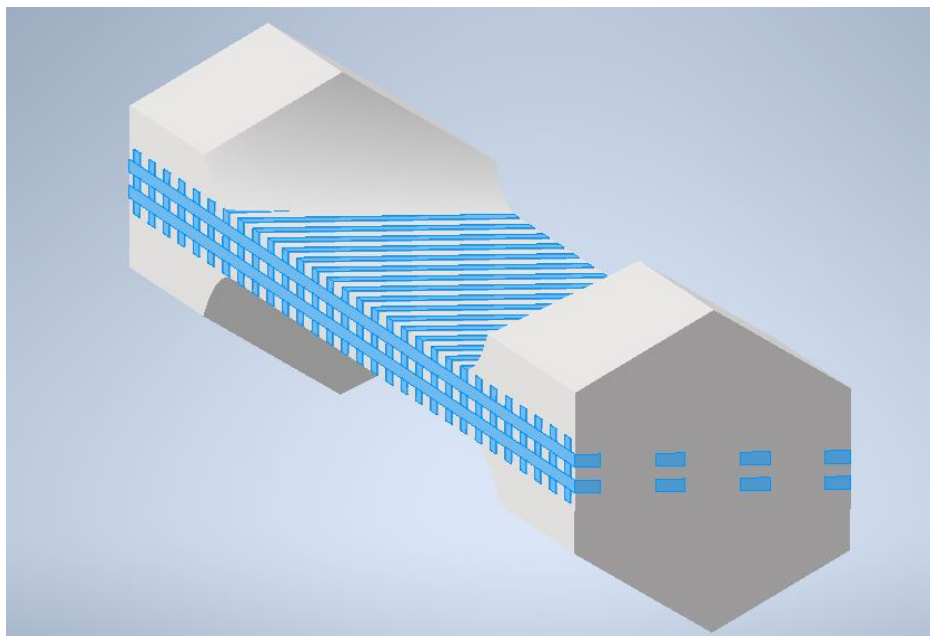
Πείραμα 1



Εικόνα 8: assembly 60%

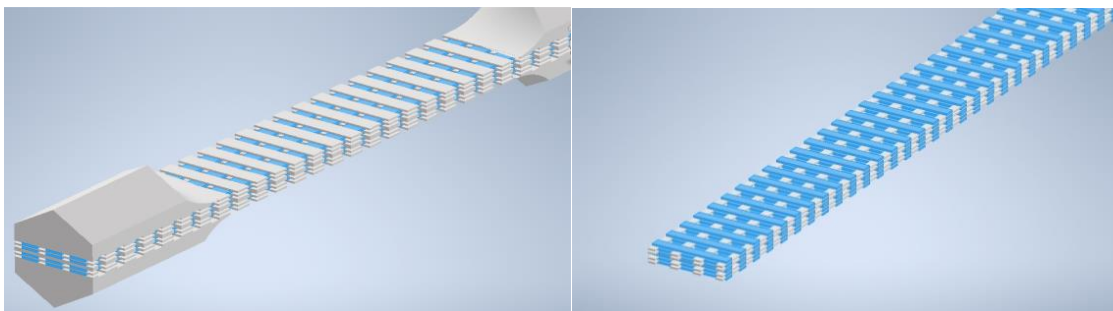


Εικόνα 8.1: assembly 40%



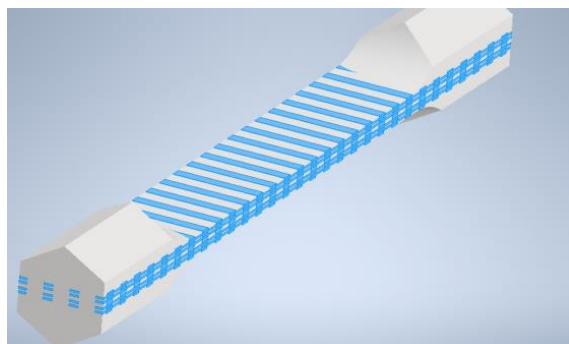
Εικόνα 8.2: full assembly 0/90 by block

Πείραμα 2



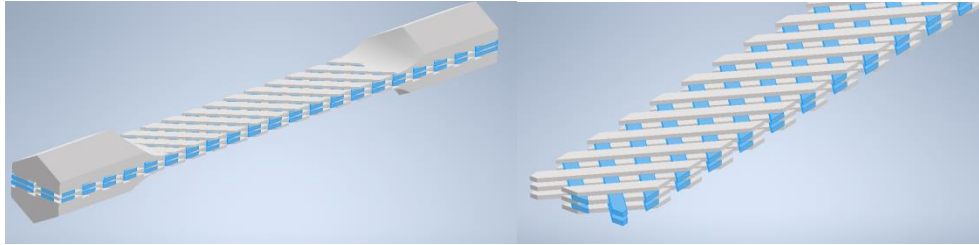
Εικόνα 8.3: 60% assembly

Εικόνα 8.4: assembly 40%



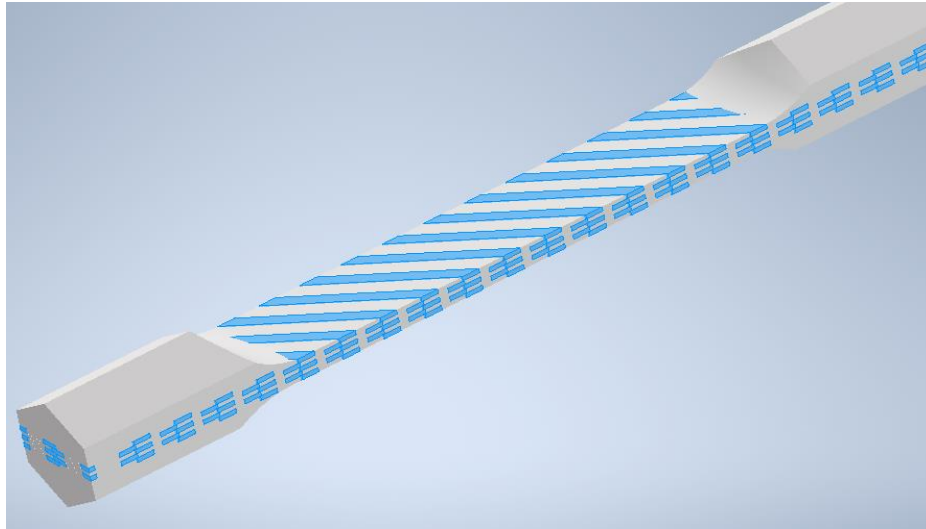
Εικόνα 8.5: full assembly 0/90 by layer

Πείραμα 3



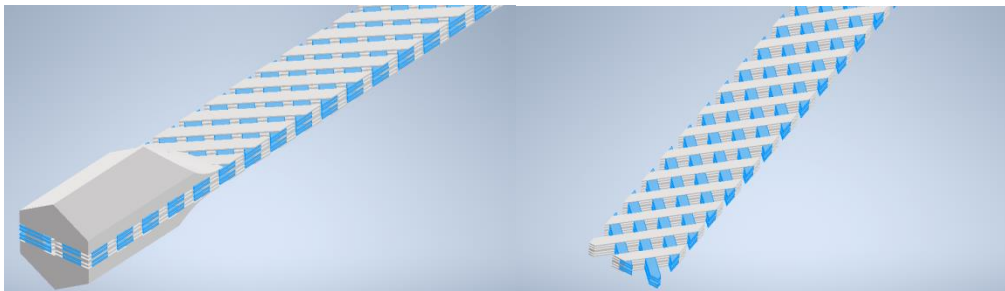
Εικόνα 8.6: assembly 60%

Εικόνα 8.7: assembly 40%



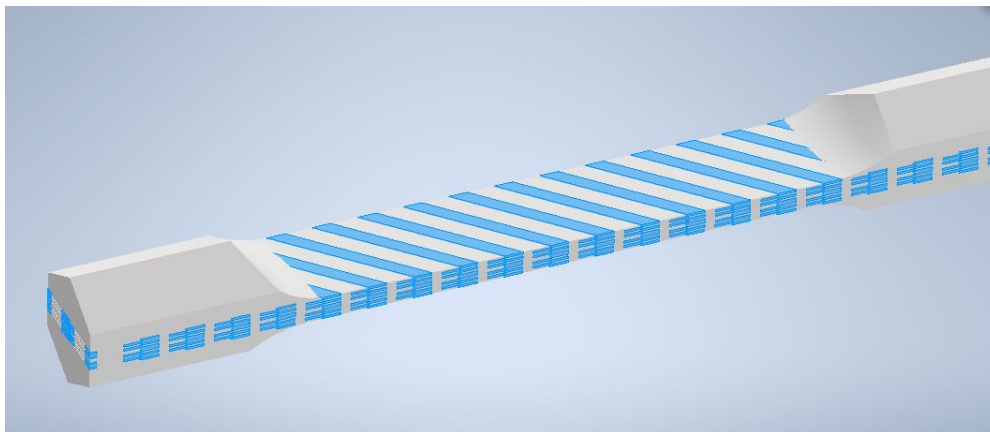
Εικόνα 8.8: full assembly 45/-45 by block

Πείραμα 4



Εικόνα 8.9: assembly 60%

Εικόνα 8.10: assembly 40%

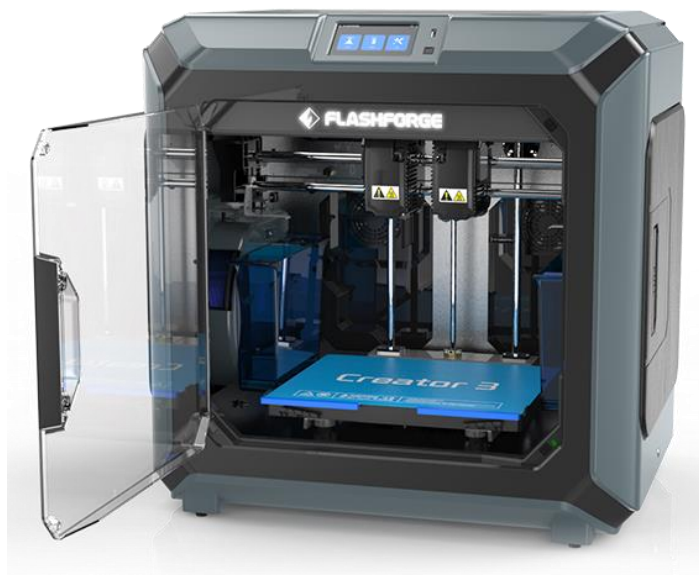


Εικόνα 8.11:full assembly 45/-45 by layer

ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Η εκτύπωση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στην εργαστηριακή αίθουσα του ΠΑΔΑ την Γ030. Ο σχεδιασμός των CAD μοντέλων αλλά και η χρήση του προγράμματος slicer έγιναν σε προσωπικό υπολογιστή στον οποίον έχουν εγκατασταθεί τα προγράμματα. Το πρόγραμμα σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε είναι το Inventor Professional 2020 της autodesk και του slicer είναι το Ultimaker Cura 5.

Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή των δοκιμών είναι ο **Flashforge creator 3** και διαθέτει δύο κεφαλές με δυνατότητα εκτύπωσης δύο αντικειμένων ταυτόχρονα ή τη χρήση διαφορετικών υλικών στο ίδιο τεμάχιο, όπως θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των πειραματικών δοκιμών της εργασίας (Zhejiang Flashforge 3D Technology Co., 2023).



Εικόνα 9: Εκτυπωτής Flashforge creator 3

Τα χαρακτηριστικά του εκτυπωτή στον οποίο έγιναν οι εκτυπώσεις των δοκιμών είναι η θερμοκρασία εξώθησης του υλικού στους 300 °C, η θερμοκρασία βάσης εκτύπωσης στους 120 °C, τα υλικά που μπορεί να διαχειριστεί ABS, PLA, PC. Επιπροσθέτως, έχει τη δυνατότητα για ταυτόχρονη δημιουργία δύο τεμαχίων, επειδή διαθέτει δύο κεφαλές εκτύπωσης. Από αυτό συνεπάγεται ότι εκτός από ταυτόχρονη εκτύπωση τεμαχίων, μπορεί να κάνει και καθρεφτισμό του ίδιου, αλλά και να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικά υλικά ακόμα και στο ίδιο τεμάχιο. Οι διαστάσεις εκτύπωσης είναι 300*250*200mm, η διάμετρος εξώθησης υλικού είναι 0,4mm και η ταχύτητα εκτύπωσης είναι 10-150mm/sec.

Για τη λήψη μετρήσεων όλων των διαστάσεων κάθε δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκε παχύμετρο της I.T.E. Η διακριτική ικανότητα ή διακριτότητα της κλίμακας του βερνιέρου είναι 0.05mm.

Έγινε χρήση λίμας για τον καθαρισμό του κάθε δοκιμίου, από το υλικό που δημιούργησε ο εκτυπωτής ως βάση στήριξης.

Τέλος χρειάστηκε το κουτί τοποθέτησης δοκιμών προς μέτρηση αυτών.

Μέσα στο κουτί αυτό τοποθετήθηκαν τα δοκίμια, δίπλα σε μετρητικό κανόνα και μετρήθηκε το μήκος τους.



Εικόνα 10: κουτί τοποθέτησης δοκιμίων προς μέτρηση

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτύπωση των δοκιμίων είναι το PLA και το ABS. Από τον κατασκευαστή των υλικών δίδονται οι ιδιότητες κατεργασίας για κάθε υλικό. Πιο συγκεκριμένα, μια ιδιότητα είναι η θερμοκρασία εξώθησης υλικού, και δηλώνει τη θερμοκρασία στην οποία θερμαίνεται το προς εκτύπωση υλικό. Άλλη μία ιδιότητα είναι η θερμοκρασία κρεβατιού εκτύπωσης, η οποία εκφράζει την θερμοκρασία στην οποία θα προθερμανθεί η συγκεκριμένη βάση, για την επιθυμητή επικόλληση του υλικού πάνω σε αυτή. (Kordo, 2023)

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ PLA

Ιδιότητες	Τυπικές τιμές	Μονάδες μέτρησης
Θερμοκρασία εξώθησης	180 – 220	°C
Θερμοκρασία κρεβατιού	50 – 70	°C

Πίνακας 5: Ιδιότητες κατεργασίας PLA (Kordo, 2023)

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ABS

Ιδιότητες	Τυπικές τιμές	Μονάδες μέτρησης
Θερμοκρασία εξώθησης	220 – 245	°C
Θερμοκρασία κρεβατιού	90 – 110	°C

Πίνακας 6: Ιδιότητες κατεργασίας ABS (Kordo, 2023)

ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

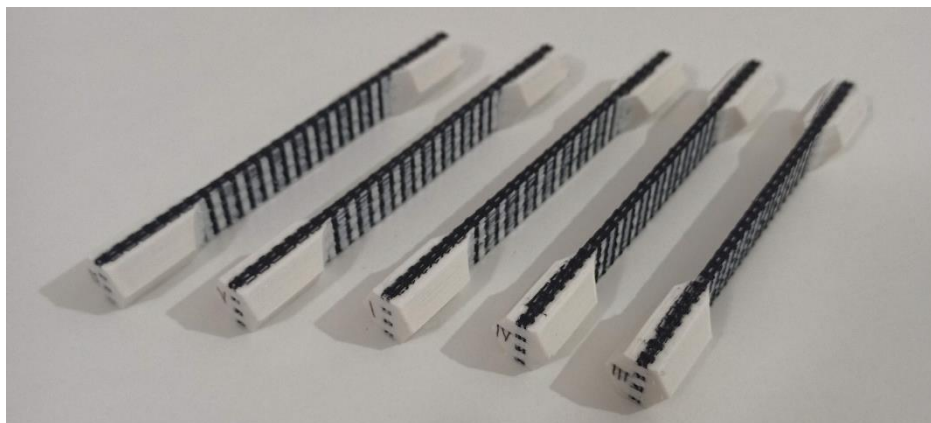
Από τον σχεδιασμό πειραμάτων που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα και από τη σειρά δοκιμαστικών εκτυπώσεων με σκοπό την βέλτιστη ποιότητα εκτύπωσης, ακολουθούν εικόνες των εκτυπωμένων δοκιμών. Κάθε πεντάδα που απεικονίζεται αντιστοιχεί σε ένα πείραμα. Να σημειωθεί πως όλα τα πειράματα εκτυπώθηκαν με τις ίδιες ρυθμίσεις παραμέτρων τύπωσης. Αναλυτικότερα, οι θερμοκρασίες των ακροφυσίων ήταν ρυθμισμένες στους 240 °C για το ABS και στους 210 °C για το PLA. Η θερμοκρασία του κρεβατιού ήταν στους 100 °C, για καλύτερη επικόλληση του ABS στο κρεβάτι του εκτυπωτή. Η ταχύτητα εκτύπωσης ήταν ρυθμισμένη στα 40 mm/s. Το πάχος στρώσης υλικού είναι 0.3mm. Οι προηγούμενες τιμές είναι οι βέλτιστες μετά από μια σειρά αστοχιών, κατά τις δοκιμαστικές εκτυπώσεις που έγιναν. Επίσης κατά την διεξαγωγή των εκτυπώσεων δεν υπήρχαν εξωτερικοί παράγοντες που να επηρέαζαν το πείραμα, όπως ξαφνικές ή έντονες μεταβολές τις θερμοκρασίας περιβάλλοντος, ή κάποιος δυνατός άνεμος για παράδειγμα, όπου θα επηρέαζε υποθετικά τις θερμοκρασίες εκτύπωσης σε περίπτωση που συνέβαινε κάτι αντίστοιχο. Επιπροσθέτως, το εξωτερικό κέλυφος του εκτυπωτή υπάρχει για τους συγκεκριμένους λόγους και να εξαλείφονται τέτοιου είδους εξωτερικοί παράγοντες.

- **Πείραμα 1:** Τα δοκίμια αυτού του πειράματος έχουν κατασκευαστεί από 60% PLA και 40% ABS, με γωνίες 0/90 μοίρες ανά μπλοκ.



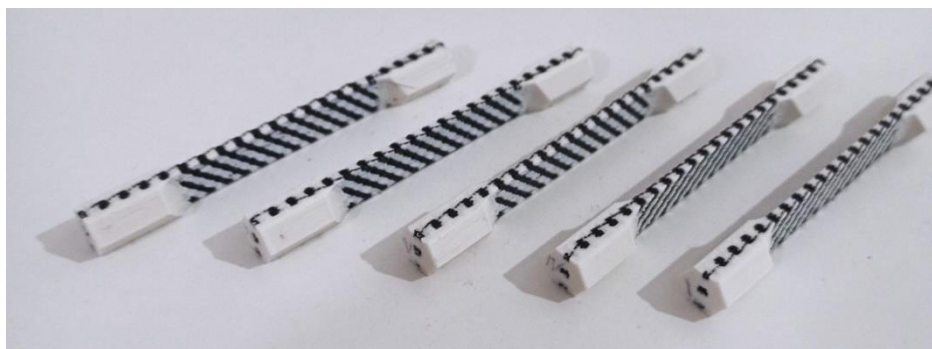
Εικόνα 11: πεντάδα δοκιμίων πειράματος 1

- **Πείραμα 2:** Τα δοκίμια αυτού του πειράματος έχουν κατασκευαστεί από 60% ABS και 40% PLA, με γωνίες 0/90 μοίρες ανά στρώση υλικού.



Εικόνα 12: πεντάδα δοκιμίων πειράματος 2

- **Πείραμα 3:** Τα δοκίμια αυτού του πειράματος έχουν κατασκευαστεί από 60% ABS και 40% PLA, με γωνίες 45/-45 μοίρες ανά μπλοκ.



Εικόνα 13: πεντάδα δοκιμίων πειράματος 3

- **Πείραμα 4:** Τα δοκίμια αυτού του πειράματος έχουν κατασκευαστεί από 60% PLA και 40% ABS, με γωνίες 45/-45 μοίρες ανά στρώση υλικού.



Εικόνα 14: πεντάδα δοκιμίων πειράματος 4

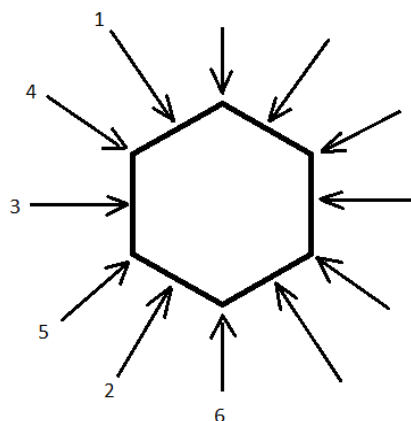
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Μετά την επιτυχή ολοκλήρωση των εκτυπώσεων όλων των πειραμάτων, ακολουθεί η μέτρηση των βασικότερων διαστάσεων για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά. Τα δοκίμια έχουν έναν λατινικό αριθμό στα άκρα τους για να προσδιορίζεται και η θέση με την οποία εκτυπώθηκε πάνω στην πλάκα εκτύπωσης και για να συγκρίνουμε τις μεταξύ τους αποκλίσεις στις διαστάσεις τους. Σε μορφή πίνακα θα παρουσιαστούν για κάθε πείραμα και δοκίμιο οι τιμές των διαστάσεών του. Όλες οι μετρήσεις είναι σε mm.



Εικόνα 15:αρίθμηση δοκιμίων στις πλευρές τους με λατινικούς χαρακτήρες

Αξίζει να σημειωθεί πως η αρίθμηση των δοκιμών είναι η ίδια για κάθε πείραμα. Συγκεκριμένα, στα τέσσερα πειράματα που διεξήχθησαν, κάθε δοκίμιο σημειώθηκε με το πέρας της εκτύπωσή του με ένα γράμμα (I,II,III,IV,V) που αναγράφεται στις πλευρές του, δηλαδή σε κάθε εξαγώνό του. Η αρίθμηση αντιστοιχεί στη θέση που βρισκόταν το κάθε δοκίμιο της πεντάδας του εκάστοτε πειράματος, πάνω στην πλάκα εκτύπωσης. Οπότε το δοκίμιο με τον αριθμό I, για κάθε πείραμα είναι αυτό που βρισκόταν κοντά στην πόρτα του εκτυπωτή, το δοκίμιο με τον αριθμό V αντίστοιχα είναι αυτό που βρίσκεται τελευταίο εσωτερικά στο βάθος του εκτυπωτή και το δοκίμιο με τον αριθμό III, είναι τοποθετημένο στο κέντρο της πεντάδας πάνω στην πλάκα εκτύπωσης. Και στα τέσσερα πειράματα οι θέσεις των δοκιμών ήταν ακριβώς οι ίδιες για να υπάρχουν περιορισμένες παράμετροι αστοχίας και να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους τα δοκίμια ανά σειρά εκτύπωση. Αυτός είναι και ο λόγος που καταγράφεται η θέση που βρισκόταν το εκάστοτε δοκίμιο ενώ εκτυπωνόταν.



Εικόνα 16: απεικόνιση μετρούμενων σημείων εξαγώνου

ΚΑΡΥΔΑΚΙ

1	2	3	4	5	6
13,05mm	13,05mm	13,1mm	15,05mm	15,1mm	15,05mm

Πίνακας 7: εξαγώνο καρυδάκι

ΠΕΙΡΑΜΑ 1

	1	2	3	4	5	6	Μήκος	Πλάτος
I	13.15	12.9	12.95	15.05	14.95	14.9	119.9	3.35
II	12.85	12.9	12.95	14.9	14.95	14.85	119.9	3.35
III	13.15	13.1	13.1	15.1	14.9	14.85	119.9	3.4
IV	12.9	13.1	12.85	15.15	14.9	15.15	119.95	3.35
V	12.8	12.9	12.85	14.85	14.9	15.1	120.1	3.4
Σύνολο	64.85	64.9	64.7	75.05	74.6	74.85	599.75	16.85
\bar{x}	12.97	12.98	12.94	15.01	14.92	14.97	119.95	3.37
Σύνολο $(\bar{x} - x_i)^2$	0.113	0.048	0.042	0.067	0.003	0.083	0.03	0.003
$\pm \sigma(\bar{x})$	0.08	0.05	0.05	0.06	0.01	0.06	0.04	0.01

Πίνακας 8: μετρήσεις πειράματος 1(mm)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Τα παραδείγματα των πράξεων πραγματοποιήθηκαν για τη μέτρηση 1 από το δοκίμιο I του πειράματος 1. Στους υπολογισμούς προσδιορίζεται η αβεβαιότητα κάθε μέτρησης στα δοκίμια κάθε πειράματος. Δηλαδή στο πείραμα 1, στη πρώτη μέτρηση, αναλύονται και τα πέντε δοκίμια. Ομοίως και με τις υπόλοιπες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες όπου κάθε ένας τους, αντιστοιχεί σε κάθε πείραμα διαδοχικά (Μ.Πηλακούτα, 2012).

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{v} \Rightarrow \bar{x} = \frac{13.15+12.85+13.15+12.9+12.8}{5} = 12.97 \text{ mm}$$

$$\sigma(\bar{X}) = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{v(v-1)}} \Rightarrow \sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{v(v-1)}} = \sqrt{\frac{0.113}{20}} = 0.08 \text{ mm}$$

$$\bar{x} \pm \sigma(\bar{x}) = 12.97 \pm 0.08 \text{ mm}$$

Στους υπολογισμούς που προηγήθηκαν με v συμβολίζεται το πλήθος των μετρήσεων, με x_i το αποτέλεσμα της κάθε μέτρησης, με \bar{x} η μέση τιμή και με $\sigma(\bar{x})$ το διάστημα γύρω από τη μέση τιμή.

ΠΕΙΡΑΜΑ 2

	1	2	3	4	5	6	Μήκος	Πλάτος
I	13.1	13.15	12.95	14.9	15.05	15.1	120.05	3.25
II	13.15	13.15	13.05	15.05	14.9	15.1	120.05	3.25
III	13.1	13.15	13.05	15.05	15.05	14.9	120.05	3.25
IV	13.05	13.05	13.05	15.1	14.9	15.05	120.1	3.3
V	13.05	13.1	13.15	15.05	14.95	15.15	120.1	3.25
Σύνολο	65.45	65.6	65.15	75.15	74.85	75.3	600.35	16.3
\bar{x}	13.09	13.12	13.05	15.03	14.97	15.06	120.07	3.26
Σύνολο $(\bar{x} - xi)^2$	0.007	0.008	0.02	0.023	0.023	0.023	0.003	0.002
$\pm \sigma(\bar{x})$	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01

Πίνακας 9: μετρήσεις πειράματος 2

ΠΕΙΡΑΜΑ 3

	1	2	3	4	5	6	Μήκος	Πλάτος
I	12.95	13.15	13.05	15.05	15.15	14.95	120.05	3.2
II	13.05	13.05	12.95	15.05	15.1	14.95	120.1	3.3
III	12.9	13.05	13.1	14.95	14.95	15.1	120.05	3.2
IV	12.95	13.1	13.05	14.95	15.05	15.1	120.05	3.2
V	13.1	12.95	13.1	15.1	15.05	15.1	120.1	3.35
Σύνολο	64.95	65.3	65.25	75.1	75.3	75.2	600.35	16.25
\bar{x}	12.99	13.06	13.05	15.02	15.06	15.04	120.07	3.25
Σύνολο $(\bar{x} - xi)^2$	0.027	0.022	0.015	0.018	0.022	0.027	0.003	0.01
$\pm \sigma(\bar{x})$	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.01	0.02

Πίνακας 10: μετρήσεις πειράματος 3

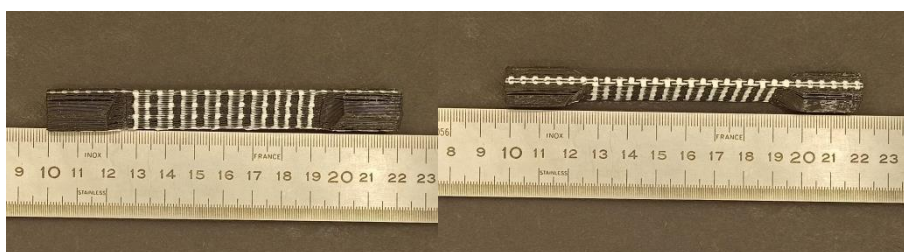
ΠΕΙΡΑΜΑ 4

	1	2	3	4	5	6	Μήκος	Πλάτος
I	13.15	12.85	12.95	15.1	14.95	14.95	119.9	3.4
II	12.8	13.15	12.9	14.9	14.95	14.95	119.95	3.35
III	13.15	13.15	12.9	15.15	14.95	14.9	119.9	3.35
IV	12.9	13.1	12.85	15.15	14.9	15.15	119.9	3.45
V	12.85	13.1	12.9	14.9	14.9	15.15	119.95	3.3
Σύνολο	64.85	65.35	64.5	75.2	74.65	75.1	599.6	16.85
\bar{x}	12.97	13.07	12.9	15.04	14.93	15.02	119.92	3.37
Σύνολο $(\bar{x} - x_i)^2$	0.1145	0.063	0.005	0.067	0.003	0.058	0.003	0.013
$\pm \sigma(\bar{x})$	0.08	0.06	0.02	0.06	0.01	0.05	0.01	0.03

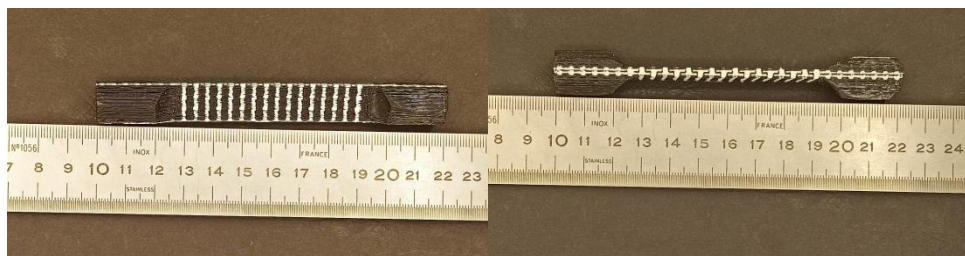
Πίνακας 11: μετρήσεις πειράματος 4

Παρακάτω ακολουθούν φωτογραφίες όλων των δοκιμών κατά σειρά, τοποθετημένα δίπλα σε μετρητικό κανόνα, προκειμένου να εξακριβωθεί η συνολική τους διάσταση. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν στο Εργαστήριο Ποιοτικού Ελέγχου και Τεχνολογίας Υλικών Π.Ε.Τ.Υ.Λ. και βρίσκονται στην αίθουσα Β216. Το μέγιστο μήκος των δοκιμών είναι 120mm όπως φαίνεται στις φωτογραφίες, με την αρχή της κλίμακας στα 10mm έως τα 220mm.

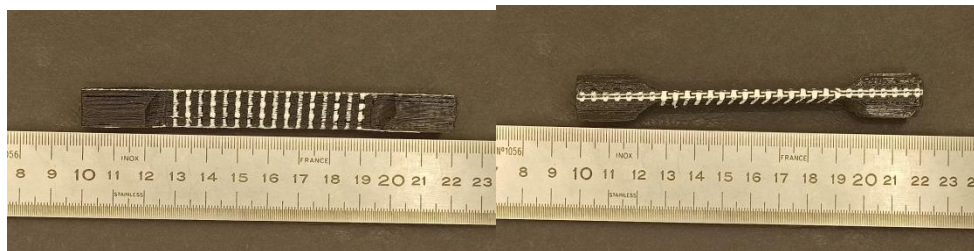
➤ Πείραμα 1



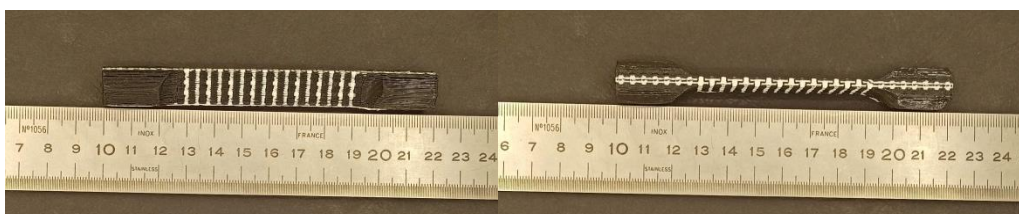
Εικόνα 17: δοκίμιο I



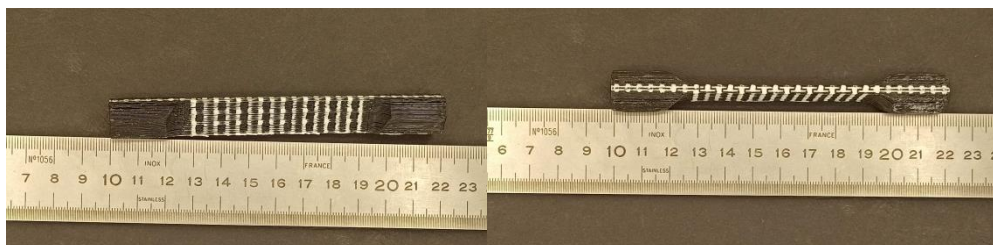
Εικόνα 18: δοκίμιο II



Εικόνα 19: δοκίμιο III

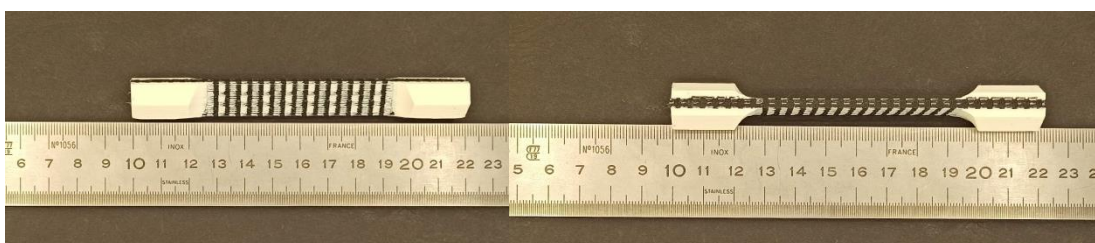


Εικόνα 20: δοκίμιο IV

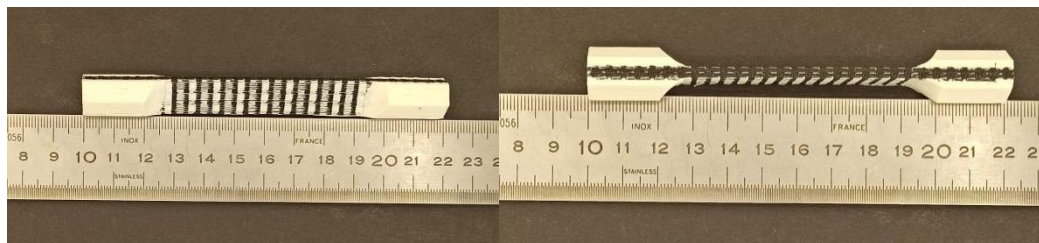


Εικόνα 21: δοκίμιο V

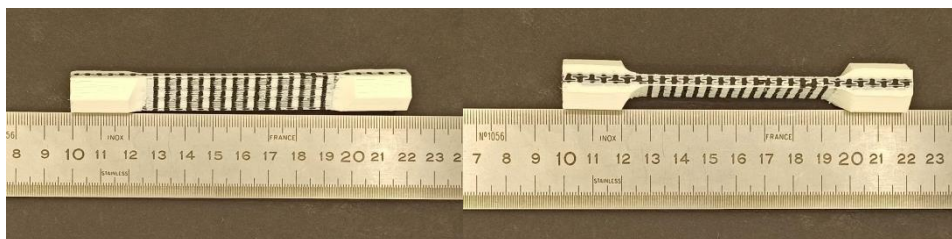
➤ Πείραμα 2



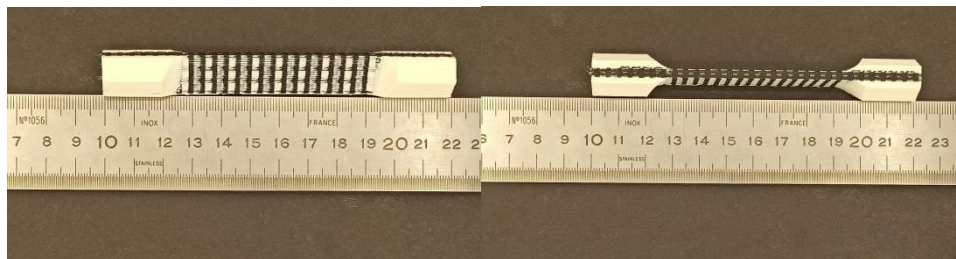
Εικόνα 22: δοκίμιο I



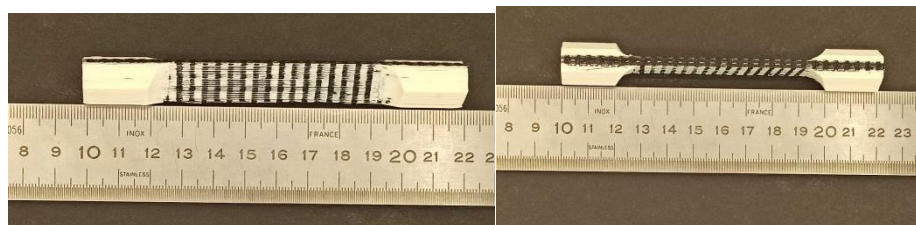
Εικόνα 23: δοκίμιο II



Εικόνα 24: δοκίμιο III

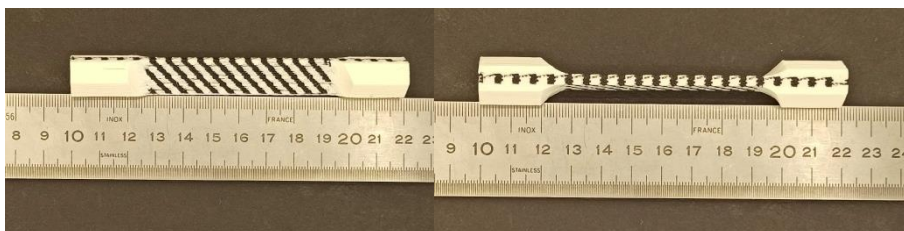


Εικόνα 25: δοκίμιο IV

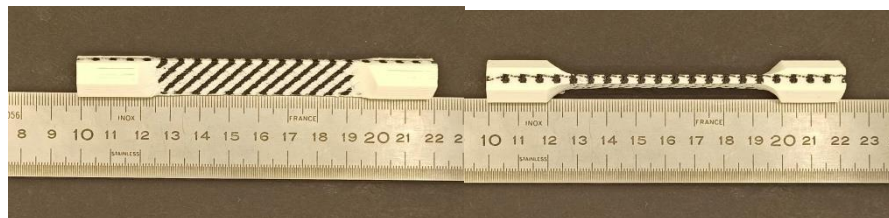


Εικόνα 26: δοκίμιο V

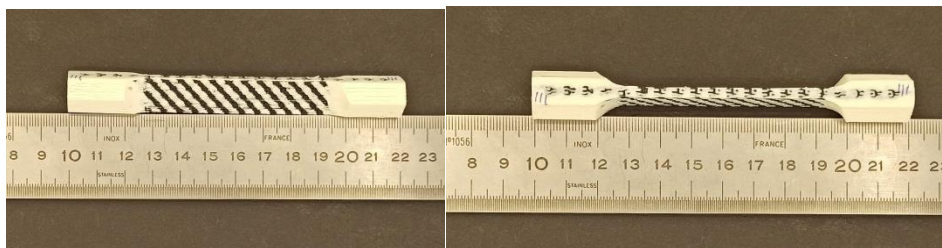
➤ Πείραμα 3



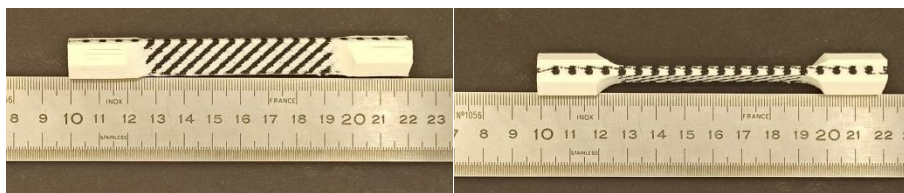
Εικόνα 27: δοκίμιο I



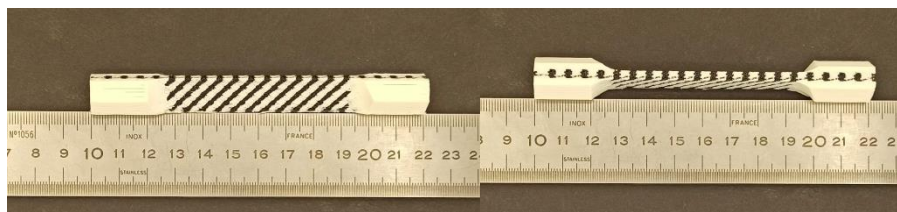
Εικόνα 28: δοκίμιο II



Εικόνα 29: δοκίμιο III

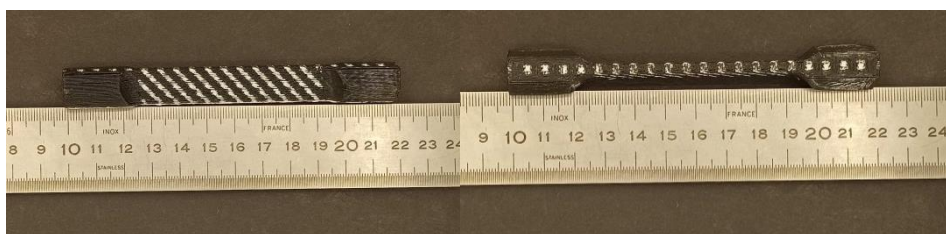


Εικόνα 30: δοκίμιο IV



Εικόνα 31: δοκίμιο V

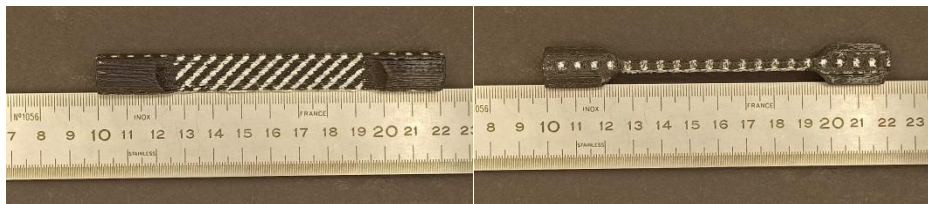
➤ Πείραμα 4



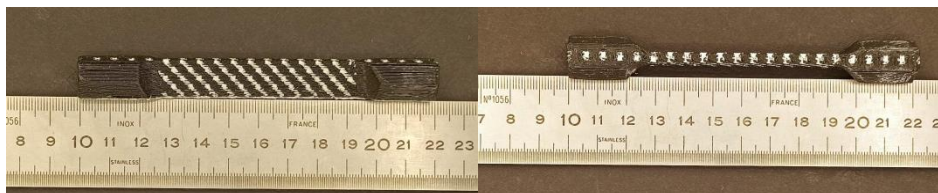
Εικόνα 32: δοκίμιο I



Εικόνα 33: δοκίμιο II



Εικόνα 34: δοκίμιο III



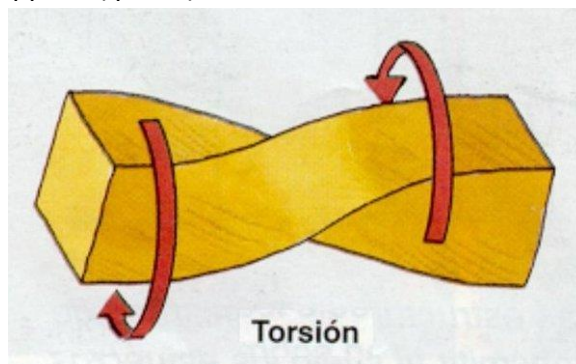
Εικόνα 35: δοκίμιο IV



Εικόνα 36: δοκίμιο V

ΣΤΡΕΨΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Μετά την εκτύπωση των δοκιμίων ακολουθεί η δοκιμή τους σε στρέψη, προκειμένου να προσδιορίσουμε την αντοχή τους. Καταπόνηση αντικειμένου σε στρέψη έχουμε όταν σε δύο διακεκριμένες διατομές, των οποίων τα επίπεδά τους είναι κάθετα στον κεντροβαρικό του άξονα δρουν ίσες και αντίρροπες ροπές M_t .



Εικόνα 37: παράδειγμα στρέψης τεμαχίου

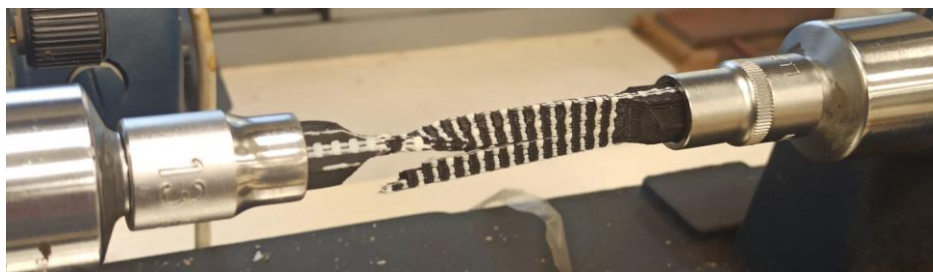
Η μηχανή στρέψης βρίσκεται στην αίθουσα Β013 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΙΙ (ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ), υπό την επίβλεψη του κ Παπαγεωργίου, στην οποία πραγματοποιήθηκαν και τα πειράματα στρέψης των δοκιμίων. Τα πειράματα έγιναν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C.



Εικόνα 38: μηχανή στρέψης

Η μηχανή στρέψης είναι της εταιρείας TecQuipment και έχει σειριακό αριθμό 026.

➤ Πείραμα 1



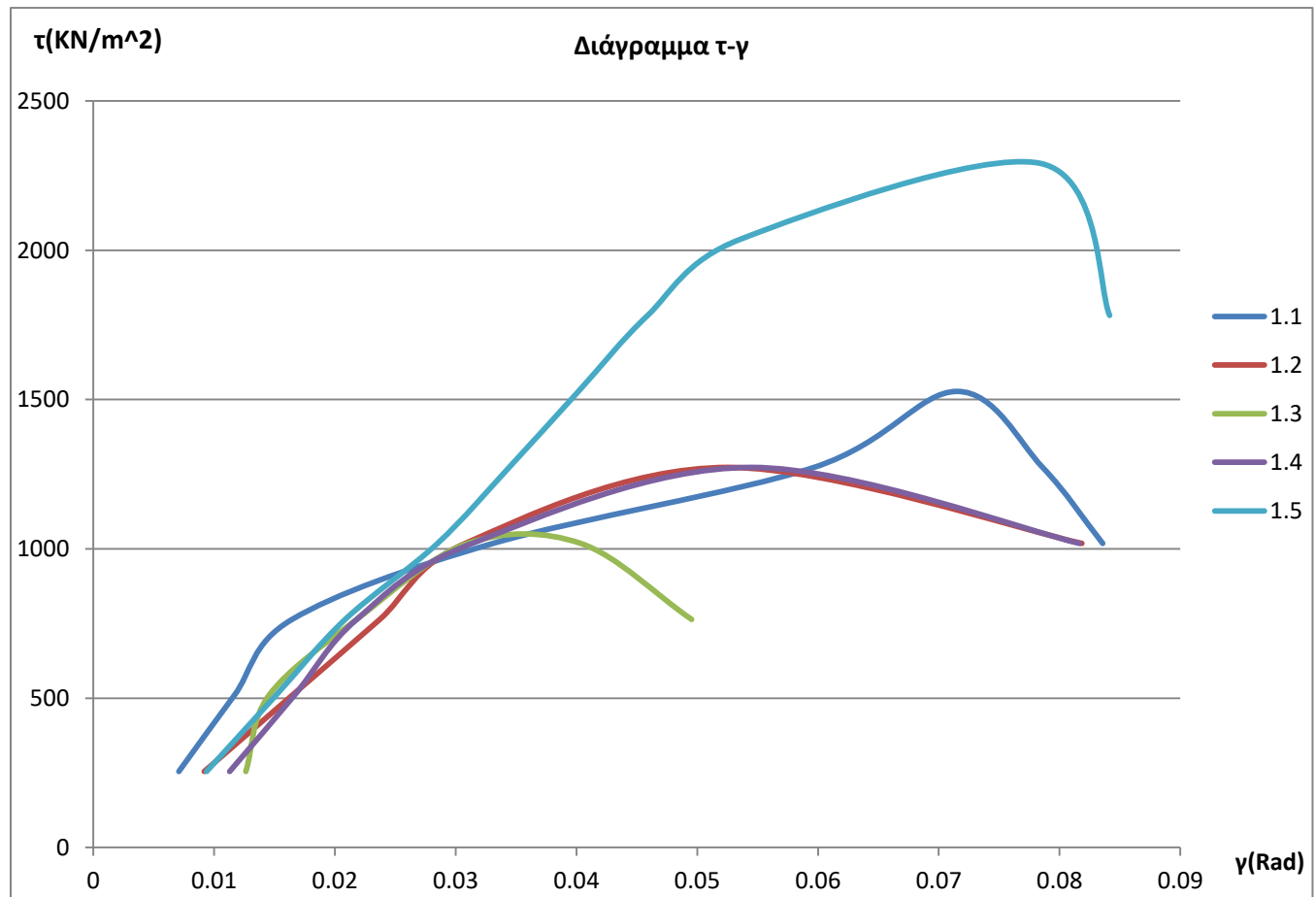
Εικόνα 39: θραύση δοκιμίου



Εικόνα 40: θραύση δοκιμίου



Εικόνα 41: Θραύση δοκιμίου



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα τ-γ

Στο διάγραμμα του πειράματος 1 (βλέπε διάγραμμα 1) οι καμπύλες των τεσσάρων δοκιμών αναπτύσσονται κοντά και έχουν όμοια συμπεριφορά, στα 0.04 rad η διατμητική τάση τ είναι 1 MN/m^2 , ενώ στα 0.06 rad η τάση προσεγγίζει τα 1.3 MN/m^2 , με μέγιστο σημείο στρέψης στα 0.07 rad, όπου και ξεκίνησε η θραύση των δοκιμών. Το δοκίμιο 1.3 αστόχησε, ενώ το 1.5 είχε ομοίως μεγάλη διαφορά από τα υπόλοιπα, με τη διαφορά ότι

είχε παραπάνω αντοχή, φτάνοντας τα 2.3 MN/m^2 . Να σημειωθεί ότι το δοκίμιο 1.3 ήταν τοποθετημένο στο κέντρο της πλάκας εκτύπωσης κατά τη δημιουργία του και το 1.5 ήταν στο εσωτερικό της μηχανής πάνω στη πλάκα εκτύπωσης

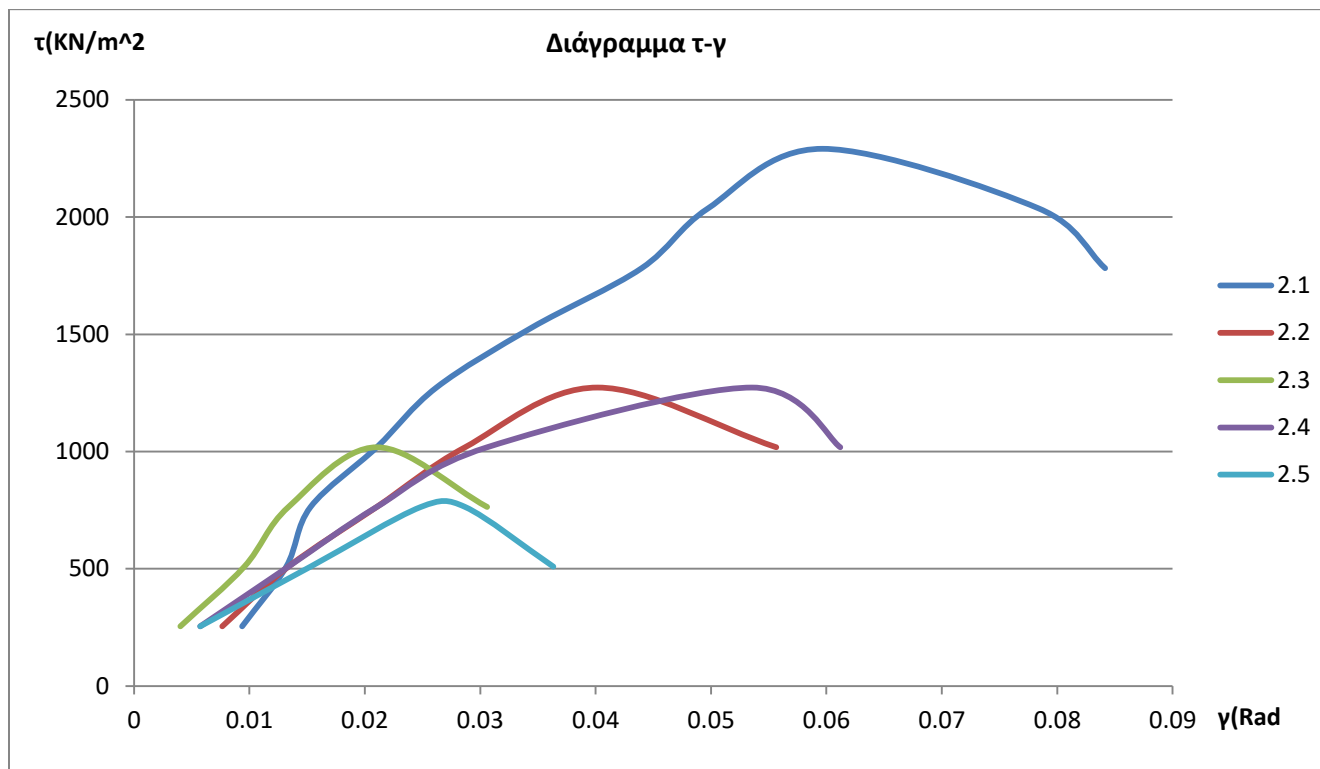
➤ Πείραμα 2



Εικόνα 42: Θραύση δοκιμίου



Εικόνα 43: Θραύση δοκιμίου



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα τ-γ

Στο διάγραμμα του πειράματος 2 (βλέπε διάγραμμα 2) παρατηρείται η καμπύλη του δοκιμίου 2.1 να αναπτύσσει πολύ μεγάλες τάσεις, γτάνοντας τα 2.3 MN/m^2 , με την εκκίνηση της θραύσεώς του να ξεκινάει στα 0.06 rad . Τα υπόλοιπα δοκίμια όμως, παρουσίασαν χαμηλότερη αντοχή συγκριτικά με το 1^ο πείραμα. Οι μέγιστες τιμές της εφαπτομενικής τάσης του πειράματος αυτού προσεγγίζουν το 1 MN/m^2 για γωνίες μικρότερες των 0.06 rad .

➤ Πείραμα 3



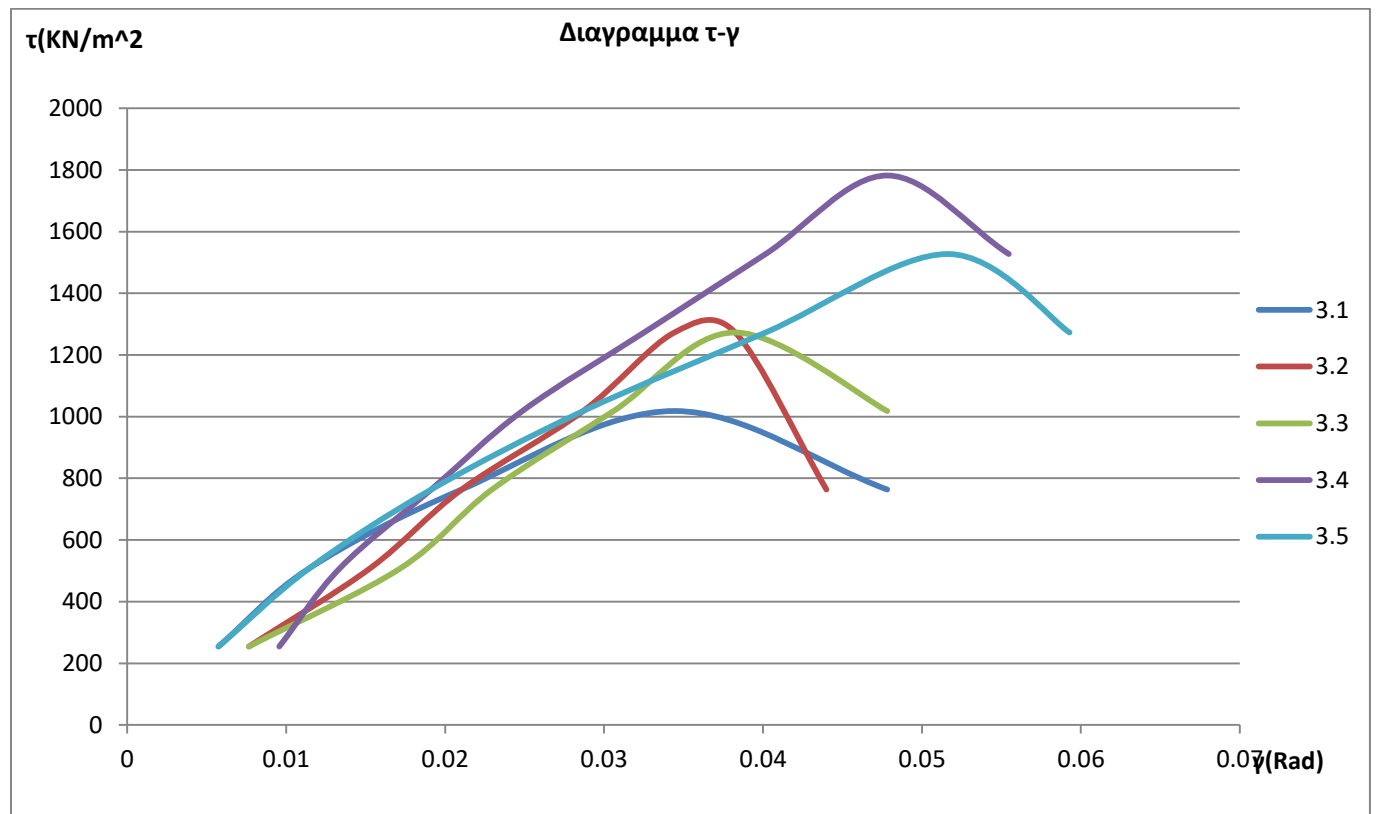
Εικόνα 44: Θραύση δοκιμίου



Εικόνα 45: Θραύση δοκιμίου



Εικόνα 46: Θραύση δοκιμίου



Διάγραμμα 3: Διάγραμμα τ-γ

Στο διάγραμμα του πειράματος 3 (βλ. διάγραμμα 3), παρατηρείται πως τα δοκίμια παρουσιάζουν πιο ψαθυρή συμπεριφορά επειδή πολύ γρήγορα ανέπτυξαν μεγάλες εφαπτομενικές τάσεις, αλλά αστόχησαν σε σημαντικά μικρότερη γωνία στρέψης, συγκρινόμενα με τα προηγούμενα και με ελάχιστη προειδοποίηση από το υλικό. Στα 0.02 rad η εφαπτομενική τάση είναι από 0.6 MN/m² έως 0.8 MN/m². Το σημείο θραύσης ξεκινάει μεταξύ των 0.04 και 0.05 rad με εφαπτομενική τάση από 1.2 MN/m² ως τα 1.5 MN/m².

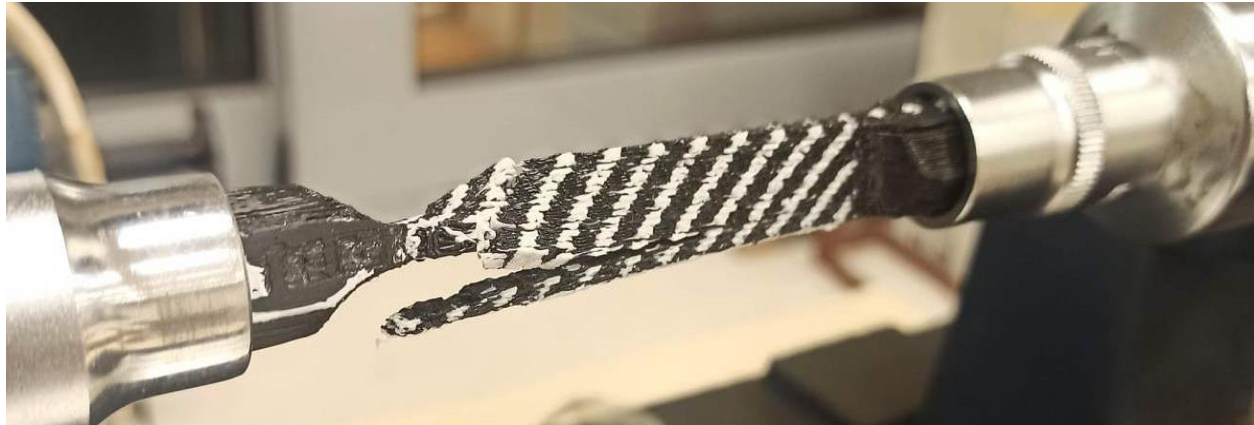
➤ Πείραμα4



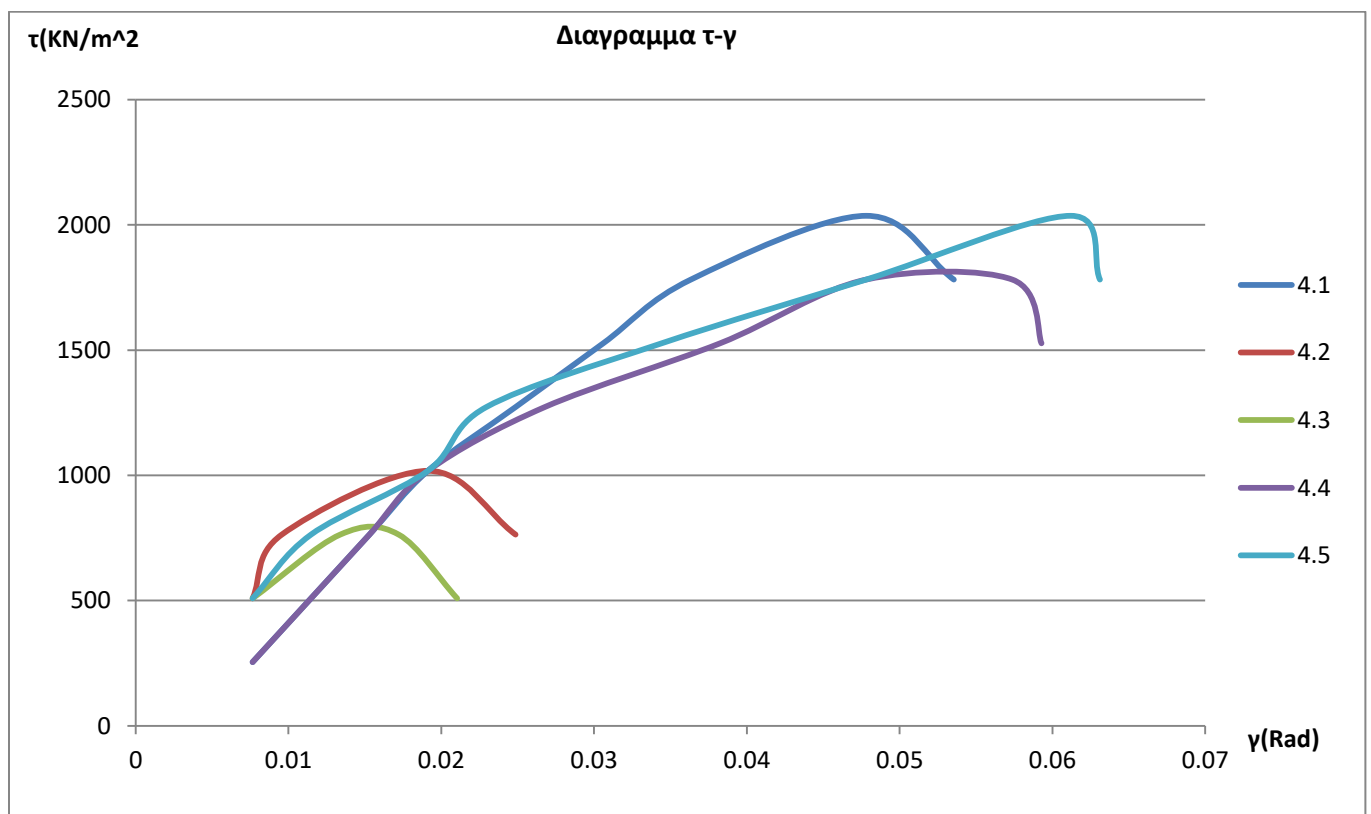
Εικόνα 47: Θραύση δοκιμίου



Εικόνα 48: Θραύση δοκιμίου



Εικόνα 49: Θραύση δοκιμίου



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα τ-γ

Στο διάγραμμα που αφορά το πείραμα 4 (βλέπε διάγραμμα 4), καταγράφηκαν οι μέγιστες τιμές εφαπτομενικής τάσης για μεγάλες γωνίες στρέψης, από 1.7 MN/m^2 για 0.04 rad , μέχρι 2 MN/m^2 στα 0.06 rad . Τα δοκίμια 4.2 και 4.3 αστόχησαν από τα 0.02 rad .

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε βιβλιογραφική έρευνα και μελετήθηκε η μηχανική ιδιότητα των δοκιμών διπλού υλικού μετά από την καταπόνησή τους σε στρέψη.

Μετά από πολλές δοκιμαστικές εκτυπώσεις που έγιναν, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μετά τη λήξη κάθε πολύωρης και επίπονης εκτύπωσης, όσων αφορά τις καταπονήσεις κατά τη διάρκειά της, λόγω των ασκούμενων φορτίων από τις κεφαλές εκτύπωσης σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες, είναι απαραίτητη η ευθυγράμμιση της βάσης εκτύπωσης. Εκτύπωση χωρίς ευθυγράμμιση είχε σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία τελικών τεμαχίων με έντονες αστοχίες έως και πλήρη αστοχίες σε ορισμένες περιπτώσεις. Επιπροσθέτως, μετά από την ολοκλήρωση κάθε εκτύπωσης, η βάση αφαιρείται από τον εκτυπωτή για να αφαιρεθούν τα δοκίμια και για να καθαριστεί. Με τη διαδικασία αυτή ασκούνται φορτία πάνω στη πλάκα, που σημαίνει ότι είναι απαραίτητη η ευθυγράμμισή της με την επανατοποθέτησή της στον εκτυπωτή.

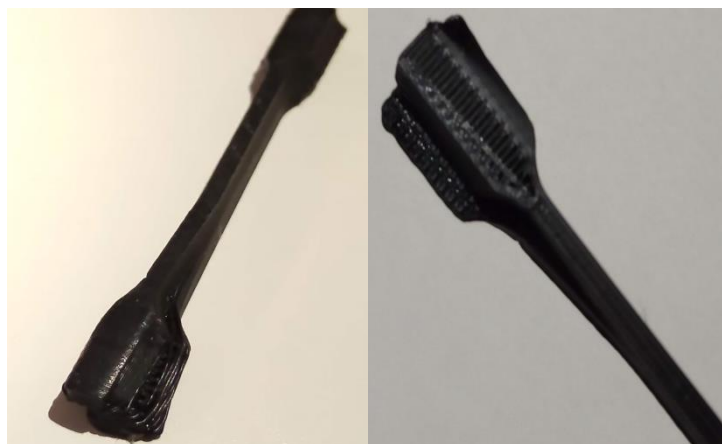
Από τις δοκιμαστικές εκτυπώσεις και μετά από ακολουθία αποτυχιών, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία της βάσης εκτύπωσης ήταν ρυθμισμένη στους 100°C, έναντι των 70°C που έγινε η πρώτη δοκιμαστική εκτύπωση. Η υψηλότερη θερμοκρασία της βάσης, είναι απαραίτητη για την σωστή επικόλληση του ABS πάνω σε αυτή, προκειμένου να αποφευχθούν αποκολλήσεις υλικού από αυτή, κάτι το οποίο οδηγεί σε βέβαιη αστοχία. Με μονό υλικό εκτύπωσης το PLA η θερμοκρασία μπορεί να είναι χαμηλότερη, λόγω ευκολότερης επικόλλησης και χαμηλότερης θερμοκρασίας τήξεως του συγκεκριμένου υλικού (Gurcan Atakok, 2022).

Αναλυτικότερα, έγιναν 7 εκτυπώσεις δοκιμών από υλικό PLA και καταγράφηκαν οι παράμετροι εκτύπωσής τους. Στη συνέχεια φωτογραφήθηκαν και παρουσιάζονται παρακάτω με την σειρά που πραγματοποιήθηκαν. Κάτω από την περιγραφή κάθε εικόνας πειραματικού δοκιμίου, θα περιγράφονται τα στοιχεία των παραμέτρων κατά την εκτύπωσή του. Πρέπει να σημειωθεί πως τα πρώτα 6 δοκίμια έκτυπώθηκαν σε κλίμακα 1:2 ενώ το τελευταίο σε πραγματικό μέγεθος. Οι παράμετροι που καταγράφηκαν είναι:

- η ταχύτητα εκτύπωσης σε (mm/sec)
- η θερμοκρασία εξώθησης υλικού σε (°C)
- Η θερμοκρασία του κρεβτιού σε (°C)



Εικόνα 50: Τα 7 εκτυπωμένα δοκίμια



Εικόνα 51: Δοκίμιο 1 Εικόνα 52: Δοκίμιο 1

Για το πρώτο δοκίμιο χρειάστηκαν 3 εικόνες για να φανεί η αστοχία του. Ταχύτητα: 30 mm/s, θερμοκρασία εξώθησης: 200°C, θερμοκρασία κρεβατιού: 60 °C (Hamzah, 2019). Με τις τιμές αυτές, παρατηρούμε πως το υλικό είχε μεγάλη ροή κατά την εκτύπωσή του και αποκολλήθηκε από την αξονική του. Παράλληλα, δεν υπήρχε καμία προσέγγιση στις επιθυμητές διαστάσεις του δοκιμίου.

Στην δεξιά εικόνα παρατηρούμε σε μεγένθυση την στένωση που σχηματίζεται στο μέσο της ενεργού διατομής, όπως επίσης και την αδυναμία του σχηματισμού του εξαγώνου, που απεικονίζεται πολύ καλύτερα στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 53: Δοκίμιο 1

Η συγκεκριμένη εικόνα τοποθετήθηκε με σκοπό να φανεί η τεράστια απόκλιση στον σχηματισμό και στις τελικές διαστάσεις του εξαγώνου. Να σημειωθεί ότι το δοκίμιο απορρίφθηκε χωρίς να πραγματοποιηθεί κάποια μέτρηση διαστάσεων, αλλά από τον οπτικό έλεγχο, όπως φαίνεται και στην εικόνα.



Εικόνα 54: Δοκίμιο 2

Στο δεύτερο δοκίμιο με τιμές, ταχύτητα: 40 mm/s, θερμοκρασία εξώθησης: 210°C, θερμοκρασία κρεβατιού: 70 °C, τα αποτελέσματα ήταν πολύ καλύτερα σε σχέση με το πρώτο, αλλά και πάλι υπήρχε μεγάλη απόκλιση από τις επιθυμητές διαστάσεις και τις εξωτερικές λεπτομέρειες στην επιφάνειά του.



Εικόνα 55: Δοκίμιο 3

Το τρίτο δοκίμιο παρουσίασε αστάθεια στη δημιουργία του σχήματός του όπως φαίνεται και στην εικόνα, με αποτέλεσμα να απορρίπτονται οι ακόλουθες τιμές των παραμέτρων. Ταχύτητα: 50mm/s, θερμοκρασία εξώθησης: 220°C, θερμοκρασία κρεβατιού: 70 °C.



Εικόνα 56: Δοκίμιο 4

Στο τέταρτο δοκίμιο οι τιμές είναι, ταχύτητα: 20 mm/s, θερμοκρασία εξώθησης: 220°C, θερμοκρασία κρεβατιού: 70 °C. Το αποτέλεσμα είναι κάπως καλύτερο από τις προηγούμενες προσπάθειες, αλλά και πάλι δεν είναι αποδεκτό, οπότε απορρίπτονται.



Εικόνα 57: Δοκίμιο 5

Στη πέμπτη δοκιμή παρατηρείται μια στρέβλωση κατά τον διαμήκη άξονα του τεμαχίου. Τιμές παραμέτρων εκτύπωσης, ταχύτητα: 10 mm/s, θερμοκρασία εξώθησης: 220°C, θερμοκρασία κρεβατιού: 70 °C.



Εικόνα 58: Δοκίμιο 6

Το έκτο δοκίμιο εκτυπώθηκε με ταχύτητα: 30 mm/s, θερμοκρασία εξώθησης: 220°C, θερμοκρασία κρεβατιού: 70 °C. Το αποτέλεσμα με τις συγκεκριμένες τιμές είναι πολύ καλό και οι μετρήσεις των διαστάσεων είχαν ελάχιστη διαφορά από το επιθυμητό, με τη μέγιστη να είναι 0.4mm. Εφόσον βρέθηκε η βέλτιστη λύση, στην συνέχεια εκτυπώθηκε το έβδομο δοκίμιο, με τις ίδιες τιμές, αλλά σε πραγματική κλίμακα. Αυτός είναι και ο λόγος που έγινε αποδεκτή η μέγιστη διαφορά των 0.4mm σε μία διάσταση, επειδή το τεμάχιο τυπωνόταν υπό κλίμακα, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να επιτευχθούν οι λεπτομέρειες, ιδιαίτερα στις περιοχές των εξαγώνων.



Εικόνα 59: Δοκίμιο 7

Το έβδομο δοκίμιο εκτυπώθηκε σε πραγματική κλίμακα, όπως προαναφέρθηκε, εφόσον πρώτα βρέθηκαν οι τιμές των παραμέτρων που έδιναν το βέλτιστο αποτέλεσμα. Εκ του αποτελέσματος παρατηρείται πως τα προβλήματα που υπήρχαν στο υπό κλίμακα δοκίμιο, εξαλήφθηκαν και οι διαστάσεις του όπως και οι εξωτερικές του λεπτομέρειες είναι αποδεκτές. Αξίζει να σημειωθεί, πως η ελάχιστη διαφορά στη διάσταση, ήταν στα εξάγωνα που και όχι στη κρίσιμη διατομή του προς εξέταση δοκιμίου. Τα εξάγωνα δεν ανοίκουν στην ενεργό διατομή και γι αυτό το τεμάχιο είναι παντελώς αποδεκτό.



Εικόνα 60: Δοκίμιο 7

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τις λεπτομέρειες των γωνιών και των στρογγυλεμάτων στις επιφάνειές του.

Επιπροσθέτως, οι διαστάσεις στην ενεργό διατομή και ιδιαίτερα στο μέσον αυτής, ήταν οι επιθυμητές και όπως φαίνεται και στην εικόνα, παρόλο που οι διαστάσεις του τεμαχίου διπλασιάστηκαν, δεν υπήρξε η παραμικρή στρέβλωση κατά μήκος της αξονικής γραμμής του.



Εικόνα 61: Δοκίμιο 7

Στη τελευταία εικόνα παρατηρούμε από διαφορετική γωνία τις ακριβείς λεπτομέρειες στο εκτυπωμένο δοκίμιο. Μπορούμε να δούμε λεπτομερώς το πλήρη σχηματισμό του εξαγώνου, των ακμών, των ευθειών και των στρογγυλεμάτων του. Οι τιμές των παραμέτρων είναι, ταχύτητα: 30 mm/s, θερμοκρασία εξώθησης: 220°C, θερμοκρασία κρεβατιού: 70°C.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας με όλες τις τιμές των παραμέτρων για κάθε δοκίμιο.

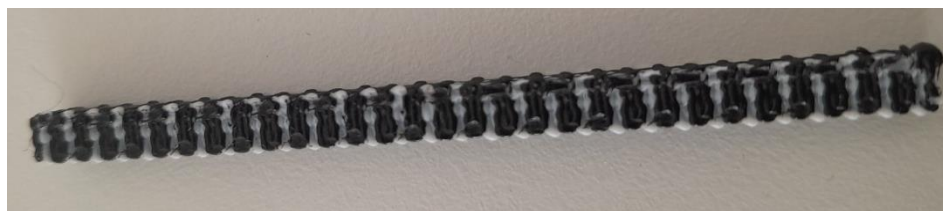
ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Δοκίμιο	Ταχύτητα (mm/s)	Θερμοκρασία εξώθησης (°C)	Θερμοκρασία κρεβατιού (°C)
1	30	200	60
2	40	210	70
3	50	220	70
4	20	220	70
5	10	220	70
6	30	220	70
7	30	220	70

Πίνακας 12: Πίνακας με τις παραμέτρους των δοκιμών

ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΕΚΤΥΠΩΣΕΙΣ ΔΙΠΛΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Στις ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται ορισμένα δοκιμαστικά τεμάχια, τα οποία εκτυπώθηκαν και με τα δύο υλικά. Τα δοκιμαστικά έγιναν προκειμένου να βρεθούν οι καλύτερες συνθήκες και τιμές παραμέτρων εκτύπωσης για το βέλτιστο αποτέλεσμα των δοκιμών.



Εικόνα 62: κάτοψη δοκιμαστικού τεμαχίου



Εικόνα 63: άνοψη δοκιμαστικού τεμαχίου

Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζονται η κάτοψη και η άνοψη μιας δοκιμαστικής εκτύπωσης ενός τεμαχίου από διπλό υλικό. Παρατηρήθηκε πως τα δύο υλικά και το PLA και το ABS, έλιωναν κατά την εκτύπωση, όπως φαίνεται και στην αντίστοιχη εικόνα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ακανόνιστο τελικό σχήμα, έναντι του επιθυμητού που είχε σχεδιαστεί αρχικά. Ιδιαίτερα μεγάλη είναι η παραμόρφωση στα άκρα του. Στην άνοψη, εμφανίστηκε το ίδιο πρόβλημα, το οποίο είναι πιο ευδιάκριτο στην συγκεκριμένη όψη. Όπως φαίνεται στο μισό τεμάχιο δεν είναι εμφανές καθόλου το ένα υλικό. Επίσης, αναφερόμενος στην ίδια όψη, παρατηρείται επιπλέον τήξη των υλικών, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας της βάσης εκτύπωσης. Η πειραματική εκτύπωση απορρίφθηκε και έγινε με θερμοκρασίες 200°C για το PLA και 220°C για το ABS και 80°C για την βάση εκτύπωσης (Forster, 2021).



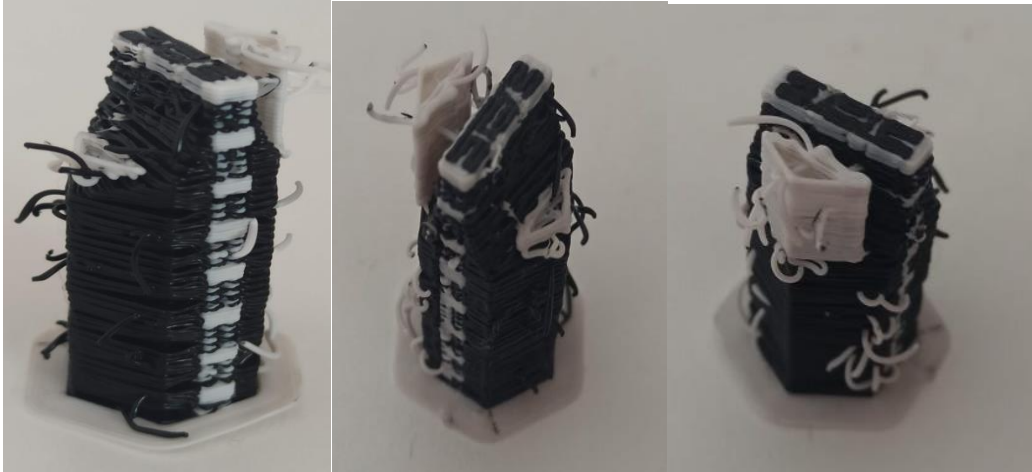
Εικόνα 64: πειραματική εκτύπωση σε όρθια θέση



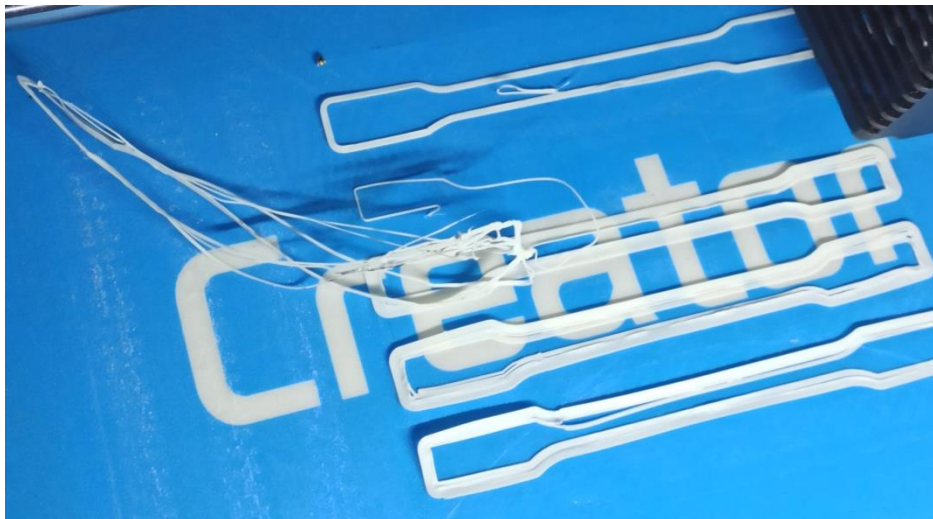
Εικόνα 65: δεύτερη πειραματική εκτύπωση σε όρθια θέση

Στη συνέχεια έγιναν δύο εκτυπώσεις στις οποίες το δοκίμιο ήταν τοποθετημένο όρθιο. Στη πρώτη περίπτωση οι θερμοκρασίες ήταν 190°C και 210°C για PLA και ABS αντίστοιχα και 90 °C της βάσης. Στη δεύτερη, αυξήθηκαν οι θερμοκρασίες κατά 10°C εκτός της βάσης όπου παρέμεινε ίδια με πριν. Το αποτέλεσμα και στις δύο περιπτώσεις απορρίφθηκε, επειδή ήταν αδύνατον να εκτυπωθεί. Παρόλο που τοποθετήθηκαν στηρίγματα για να μπορέσει να

εκτυπωθεί το κάθε δοκίμιο,το ακροφύσιο τράβαγε μαζί του και ολόκληρο το τεμάχιο,μιάς και ήταν αδύνατον να στηριχτεί μηχανικά και πρακτικά.



Εικόνες 66, 67, 68, :απεικόνιση όρθιου δοκιμίου με τα πλευρικά στηρίγματα
Χρειάστηκε να μπουν βάσεις στήριξης στις δύο πλευρές του κάθε δοκιμίου,καθ' όλο το μήκος του που θα ήταν και χρονοβόρο αν δούλευε,υποθετικά ,αλλά και δύσκολο στο να αποκολληθεί η κάθε βάση στήριξης ,επιτυχώς, απ το κάθε δοκίμιο.Συμπληρωματικά, η τελικές εκτυπώσεις χρειάστηκαν από 9 έως 11 ώρες μέχρι την ολοκλήρωσή τους,με την βέλτιστη και ελάχιστη χρήση στηριγμάτων,χωρίς να συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος προετοιμασίας της κάθε εκτύπωσης,καθαρισμός και ευθυγράμμιση βάσης,προθέρμανση ακροφυσίων και βάσης κλπ.Στις περιπτώσεις των εκτυπώσεων με τοποθέτηση του τεμαχίου σε όρθια θέση και με τις απαραίτητες στηρίξεις, ο χρόνος εκτύπωσης ξεκινούσε από τις 12 ώρες και αυξανόταν, με τεράστια πιθανότητα αστοχίας.Επειδή ερχόταν σε επαφή με μεγάλη επιφάνεια των πλευρών, η αποκόλληση των στηρίξεων μετά την εκτύπωση, θα οδηγούσε πάλι σε αστοχία του δοκιμίου.Να σημειωθεί πως χρειάζεται επαναληψιμότητα στα πειράματα ,που σημαίνει πως πρέπει να υπάρχει απόλυτη σιγουριά στην ακρίβεια και την επιτυχία κάθε εκτύπωσης.



Εικόνα 69:δοκιμαστικά προσκόλλησης ABS

Από τα προηγούμενα δοκιμαστικά,βγήκε το συμπέρασμα πως τον σημαντικότερο ρόλο για την σωστή εκτύπωση,τον λαμβάνει η καλή επικόλληση των υλικών στη βάση εκτύπωσης και ιδιαίτερα του ABS το οποίο έχει υψηλότερη θερμοκρασία τήξης έναντι του PLA.Αυτός είναι και ο κυριότερος λόγος που έγινε δοκιμαστικό επικόλλησης πάνω στη βάση εκτύπωσης ,με μονό υλικό το ABS.Παρατηρούμε πως κανένα τεμάχιο δεν προσκολλήθηκε επιτυχώς πάνω στη βάση,όπως το κατώτερο της εικόνας,του οποίου φαίνεται και η σκιά του στο άνω άκρο του επειδή έχει παραμείνει ξεκολλημένο. Κάποια τα παρέσυρε η ίδια η κεφαλή.Θερμοκρασίες εκτύπωσης 220°C για το ακροφύσιο και 90°C για την βάση.

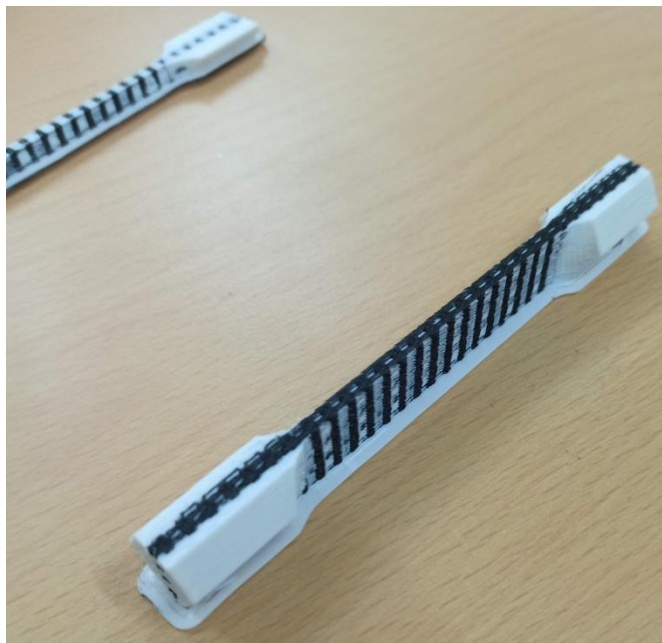


Εικόνα 70:δοκιμαστική εκτύπωση

Εικόνα 71: άλλη όψη δοκιμαστικής εκτύπωσης



Εικόνα 72: αρχικό στάδιο δημιουργίας δοκιμίων



Εικόνα 73: Πρώτο ολοκληρωμένο δοκίμιο

Σχετικά με τις θερμοκρασίες εξώθησης υλικού των ακροφυσίων, για το PLA οι θερμοκρασίες διατηρήθηκαν ίδιες με τα δοκιμαστικά του μονό υλικού που πραγματοποιήθηκαν στην αρχή και ήταν στους 210-220°C. Για το ABS δεν ισχύει το ίδιο και αυξήθηκε σημαντικά η θερμοκρασία του στους 230-240 °C για δύο λόγους:

- 1) Για να μην γίνεται αποκόλληση του υλικού από τη βάση εκτύπωσης
- 2) Για να μην στερεοποιείται το υλικό κατά τη ροή του μέσα από το ακροφύσιο

Με αυτό τον τρόπο, το δοκίμιο έκανε πολύ ισχυρή επικόλληση πάνω στη βάση εκτύπωσης χωρίς να εμφανίζονται φαινόμενα αστάθειας και το τηγμένο υλικό είχε πολύ καλή ροή χωρίς στερεοποιημένα κομμάτια, δημιουργώντας πολύ καλές συνθήκες επικόλλησης σε κάθε στρώμα με σταθερής ποιότητας επιφάνειες. Το σταθερό αποτέλεσμα στην ποιότητα επιφανείας και γενικά σε όλα τα στάδια δημιουργίας κάθε δοκιμίου, λαμβάνουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο για την ορθότητα και εγκυρότητα των πειραμάτων και των μετρήσεων που θα λάβουμε από αυτά.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με διάφορες ταχύτητες εκτύπωσης, από 30 μέχρι 60 mm/s, καταλήγοντας στα 45 mm/s κατοχυρώνοντας την βέλτιστη επιλογή στην ποιότητα επιφανειών και στον χρόνο δημιουργίας των δοκιμίων. Επίσης, πάνω από την ταχύτητα των 45 mm/s, εμφανιζόντουσαν προβλήματα τραβήγματος υλικού πάνω σε ορισμένα στρώματα και στο εσωτερικό της πλέξης του δοκιμίου. Τα 30 με 45 mm/s δεν εμφάνιζαν κάποια διαφορά παρά μόνο στον χρόνο εκτύπωσης.

Μεταξύ των δύο υλικών, τα δοκίμια που είναι κατασκευασμένα από ABS 60% είχαν πολύ μικρότερη απόκλιση στις διαστάσεις τους από του ιδανικού CAD αντικειμένου σε σχέση με αυτά από PLA. Συγκεκριμένα αυτά με ABS είχαν αποκλίσεις στις μετρούμενες διαστάσεις από 0.05-0.15 mm και αυτά από PLA 60% είχαν 0.1-0.3 mm.

Από την στατιστική ανάλυση της μέτρησης των διαστάσεων των δοκιμών προκύπτει ότι είναι όλα αποδεκτά εφόσον η τυπική αβεβαιότητα για όλες τις μετρήσεις ήταν αποδεκτές και εντός ορίων. Σημειώθηκαν δύο μέγιστες τιμές τυπικής αβεβαιότητας με ± 0.08 mm με υλικό 60% PLA. Επαναλαμβάνεται ότι οι μετρήσεις των διαστάσεων των δοκιμών από 60% PLA εμφάνισαν μεγαλύτερες αποκλίσεις από αυτά με το ABS 60%. Παρόλο που αυτές οι δύο ήταν οι μέγιστες τιμές που σημειώθηκαν από όλα τα δοκίμια, να συμπληρωθεί ότι αφορούν πλευρά εξαγώνου και στις δύο περιπτώσεις, που σημαίνει ότι δεν είναι στην ενεργό διατομή. Αυτή είχε σε κάθε περίπτωση ακόμα πιο μικρή αβεβαιότητα, επαληθεύοντας την ορθότητα των διαστάσεων των εκτυπωμένων δοκιμών.

Κατά την στρέψη των δοκιμών, παρατηρήθηκε ότι αυτά που ήταν από PLA 60% είχαν σημαντικά μεγαλύτερη ευκαμψία μέχρι να επέλθει η θραύση του πρώτου σημείου πάνω στην επιφάνειά του. Αυτό φαίνεται και στις μετρήσεις, στις οποίες παρατηρούμε ότι αναφερόμενοι στο ίδιο υλικό ποσόστωσης χρειάστηκαν πολλοί περισσότεροι κύκλοι μέχρι αυτά να αστοχήσουν.

Επιπροσθέτως στη δοκιμή στρέψης παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια έσπασαν σχεδόν κάθετα σε πολύ κοντινή απόσταση κατά ύψος της πλευράς της ενεργού διατομής. Στα πειράματα αυτά τα δοκίμια, ανεξαρτήτου από την ποσόστωση του υλικού τους, είναι εκτυπωμένα με γωνίες 45/-45.

Καταλήγοντας, στο τελευταίο πείραμα, παρατηρήθηκε πως είναι αυτό με τα καλύτερα αποτελέσματα, με τις μεγαλύτερες τιμές εφαπτομενικής τάσης από μικρές γωνίες στρέψης και με αργή θραύση των δοκιμών. Αναλυτικότερα, στα 0.02 rad η εφαπτομενική τάση ήταν 1-1.2 (MN/m²), ενώ στα 0.05 rad, η τάση ήταν 1.8- 2 (MN/m²). Συγκριτικά τα άλλα πειράματα για γωνία 0.02 rad, η τιμή εφαπτομενικής τάσης ήταν 0.5-1 (MN/m²) και για 0.05 rad η τάση ήταν 1.5- 1.8 (MN/m²).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Anon., n.d. *Wikipedia*. [Online] Available at:

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%84%CE%B7_%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%8D%CF%80%CF%89%CF%83%CE%B7.

Cesar Omar Balderrama-Armendariz, E.M.D.E.D.C.-S.R.W.&.A.M.-M., 2018. *Torsion analysis of the anisotropic behavior of FDM technology*. [Online] Available at:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-1602-0> [Accessed 12 February 2023].

Colombo-Pulgarín, J.C., 2022. *All3dp: Titanium 3D Printing – The Ultimate Guide*. [Online] Available at:

<https://all3dp.com/1/3d-printing-titanium-methods-printers-applications/> [Accessed 8 October 2022].

Forster, A.M., 2021. *EduTech: 3D printer filament*. [Online] Available at:

https://edutechwiki.unige.ch/en/3D_printer_filament [Accessed 20 January 2023].

Gurcan Atakok, M.K.H.B.K., 2022. *Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation*. [Online] Elsevier Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785422003192> [Accessed 2 February 2023].

Hamzah, K.A., 2019. *Tensile strength and hardness property of ABS filled CuO prepared via 3D printing approach*. [Online] Elsevier Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785319312829> [Accessed 29 January 2023].

Kalpajian, S.a.S.R.S., 2022. *Wikipedia: Stereolithography*. [Online] Available at:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography> [Accessed 16 November 2022].

KORDO, 3., 2023. *Everfil*. [Online] Available at: <https://3dkordo.pl/filament-everfil-pla/everfilpla-typ-pla-n-01/> [Accessed 17 January 2023].

Kordo, 2023. *Technical specification*. [Online] 3dkordo Available at: <https://3dkordo.pl/wp-content/uploads/2018/07/TDS-Everfil-PLA-N.01.pdf> [Accessed 9 January 2023].

Langnau, L., 2020. *makepartsfast*. [Online] Available at: <https://www.makepartsfast.com/how-to-work-with-transparent-3d-printing-materials/> [Accessed 20 November 2022].

Μ.Πηλακούτα, 2012. *Μετρήσεις-Αβεβαιότητες μετρήσεων*. [Online] Available at:

http://ikaros.teipir.gr/phyche/Subjects/Varsamis/ergastiria/askisi_1.pdf [Accessed 23 January 2023].

Mahle, 2023. *MAHLE produces high-performance aluminum pistons using 3D printing for the first time*.

[Online] Available at: <https://www.mahle.com/en/news-and-press/press-releases/mahle-produces->

[high-performance-aluminum-pistons-using-3d-printing-for-the-first-time-76416](#) [Accessed 13 January 2023].

Matterthings, 2022. *Matterthings:3D Printing Materials Comparison*. [Online] Available at: <https://www.matterthings.com/pages/material-comparison> [Accessed 9 January 2023].

Paolo Minetola, L.I.S.R.M.S.K.V.S., 2022. *Materialstoday*. [Online] Elsevier Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322006484?via%3Dihub> [Accessed 22 November 2023].

Ricoh, 2022. *Ricoh:Fused Deposition Modelling*. [Online] Available at: <https://rapidfab.ricoh-europe.com/technologies/fused-deposition-modelling/> [Accessed 10 December 2022].

Vaibhav Bhosale, P.G.S.D.C.S.S.J.R., 2022. *Analysis of process parameters of 3D printing for surface finish, printing time and tensile strength*. [Online] Elsevier Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322002413?via%3Dihub> [Accessed 18 January 2023].

Zhejiang Flashforge 3D Technology Co., L., 2023. *Flashforge 3D Technology*. [Online] Available at: <https://www.flashforge.com/product-detail/flashforge-creator-3-fdm-3d-printer> [Accessed 13 January 2023].

Γκάρτζου, Ε.Ε., 2016. *Νέα υλικά για τεχνολογία 3d εκτύπωσης*. [Online] Available at: <https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjh1Obgo4v9AhXZ-LsIHaP8AGgQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fdspace.lib.ntua.gr%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F44415%2F%25CE%259D%25CE%25B5%25CE%25B1%2520%25CF%2585%25CE%25B%2> [Accessed 15 September 2022].

Παπαθανάσης, Η., 2005. *Η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης*. [Online] Περισκόπιο της επιστήμης (297) Available at: <http://www.digident.gr/files/3D-Printing.pdf> [Accessed 9 October 2022].

