



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΜΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Βελτιστοποίηση μηχανικών ιδιοτήτων SLA δοκιμίων  
προσθετικών κατασκευών. Έλεγχος σε στρέψη.**

**ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ:** Πέππας Ιωάννης

**ΑΜ:** 272017068

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:**

Στεργίου Κωνσταντίνος

Σαγιάς Βασίλειος

**ΑΘΗΝΑ 2023**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
SCHOOL OF ENGINEERING  
MECHANICAL ENGINEERING**

**DIPLOMA THESIS**

**Mechanical properties optimization of SLA Additive  
Manufacturing specimens. Torsion testing**

**STUDENT'S NAME:** Peppas Ioannis

**AM:** 272017068

**SUPERVISORS TEACHERS:**

Stergiou Konstantinos

Sagias Vasilios

**ATHENS 2023**

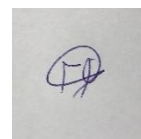
## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Πέππας Ιωάννης του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 272017068 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 ανάκληση του πτυχίου μου»

Ο δηλών



**Η τριμελής εξεταστική επιτροπή**

ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ	
ΜΠΕΣΕΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ	
ΣΑΓΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ	

## Ευχαριστίες

Για την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω καταρχάς τον επιβλέποντα καθηγητή μου Σαγία Βασίλειο για την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου παρείχε έτσι ώστε να φέρω εις πέρας το έργο μου αυτό. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Δημήτριο και Μαρία και τον αδερφό μου Άγγελο, που ήταν δίπλα μου και με υποστήριξαν στον μέγιστο βαθμό με τον κάθε δυνατό τρόπο σε όλη μου της προσπάθεια για την ολοκλήρωση της διπλωματικής αλλά και του συνόλου των σπουδών μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή και φίλο Πράσινο Σωτήρη για την στήριξη και την αλληλοβοήθεια σε όλη την προπτυχιακή φοιτητική μας πορεία.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη .....	8
<b>1.Τεχνολογίες Additive Manufacturing (A.M.) .....</b>	<b>9</b>
1.1. Γενικά .....	9
1.2 Μέθοδοι (τύποι) A.M. ....	12
1.2.1 FDM .....	13
1.2.2 LOM.....	14
1.2.3 LENS .....	14
1.2.4 SDL .....	15
1.2.5 SLS .....	16
1.2.6 SLA .....	17
1.3 Υλικά .....	18
1.3.1 Μέταλλα, κράματα και σύνθετα υλικά .....	18
1.3.2 Κεραμικά .....	19
1.3.3 Πολυμερή και σύνθετα υλικά .....	20
1.3.4 Βιολικά .....	21
1.4 Εφαρμογές (Applications) .....	21
1.4.1 Ιατρική.....	21
1.4.2 Αυτοκινητοβιομηχανία .....	22
1.4.3 Αεροδιαστημική .....	23
1.4.4 Ενέργεια .....	24
1.4.5 Αρχιτεκτονική .....	24
1.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί .....	25
1.6 Μελλοντική εξέλιξη .....	26
<b>2 Θεωρία Στρέψης .....</b>	<b>28</b>
2.1 Γενικά .....	28
2.2 Ιδιομορφία της στρέψης - διατομές .....	29

<b>3 Μεθοδολογία εργασίας</b> .....	<b>32</b>
<b>4 Πειραματικό μέρος.</b> .....	<b>33</b>
4.1 Το δοκίμιο – Διαστάσεις και σχεδιασμός .....	33
4.2 Διαδικασία εκτύπωσης ανά περίπτωση .....	35
4.3 Δοκιμή σε στρέψη ανά περίπτωση και αποτελέσματα .....	45
4.3.1 Χ άξονας .....	47
4.3.2 Υ άξονας .....	52
4.3.3 Ζ άξονας .....	56
<b>5 Ανασκόπηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.</b> .....	<b>60</b>
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>64</b>

## Περίληψη

Η προσθετική κατασκευή είναι μια τεχνική κατασκευής που τείνει να μετασχηματίσει κατασκευαστικές βιομηχανίες. Λόγω των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων της, η προσθετική κατασκευή έχει γίνει μια δημοφιλής τάση στις κατασκευαστικές διαδικασίες. Ορίζεται ως η μέθοδος κατασκευής εξαρτημάτων μέσω εναπόθεσης στρώμα προς στρώμα. Η χρήση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης έχει μειώσει τις επιπλέον δαπάνες που συνδέονται με την ανάπτυξη προϊόντων. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, από την άλλη πλευρά, έχει μόλις πρόσφατα γίνει δημοφιλής σε μια σειρά από παραγωγικές διαδικασίες, από τα πρότυπα έως τα τελικά προϊόντα. Έχει αποτελέσει, πλέον ελκυστική προοπτική για τις βιομηχανίες λόγω των σύνθετων γεωμετριών που κατασκευάζονται μέσω των εκτυπώσεων. Τέτοιες γεωμετρίες είναι σχεδόν αδύνατον να κατασκευαστούν με τις συμβατικές κατεργασίες.

Λόγω του γρήγορου ρυθμού που επικρατεί στον βιομηχανικό τομέα και παρατηρώντας την ανάγκη για νέες πιο ελκυστικές μεθόδους παραγωγής, σε αυτή την εργασία θα μελετηθούν τις δυνατότητες των αντικειμένων που μπορούν να παραχθούν με τις μεθόδους εκτύπωσης στερεολιθογραφίας (SLA), κάνοντας δοκιμές καταπόνησης σε στρέψη, των δοκιμίων που θα έχουν επιμεληθεί από τον συγγραφέα της διπλωματικής για την εκτύπωση – παραγωγή τους.

Οι παραπάνω διαδικασίες, θα επιφέρουν σημαντικά συμπεράσματα που έχουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον και την εξέλιξη της βιομηχανίας και κυρίως του κλάδου της μηχανολογίας.



# *1. Τεχνολογίες Additive Manufacturing (A.M.)*

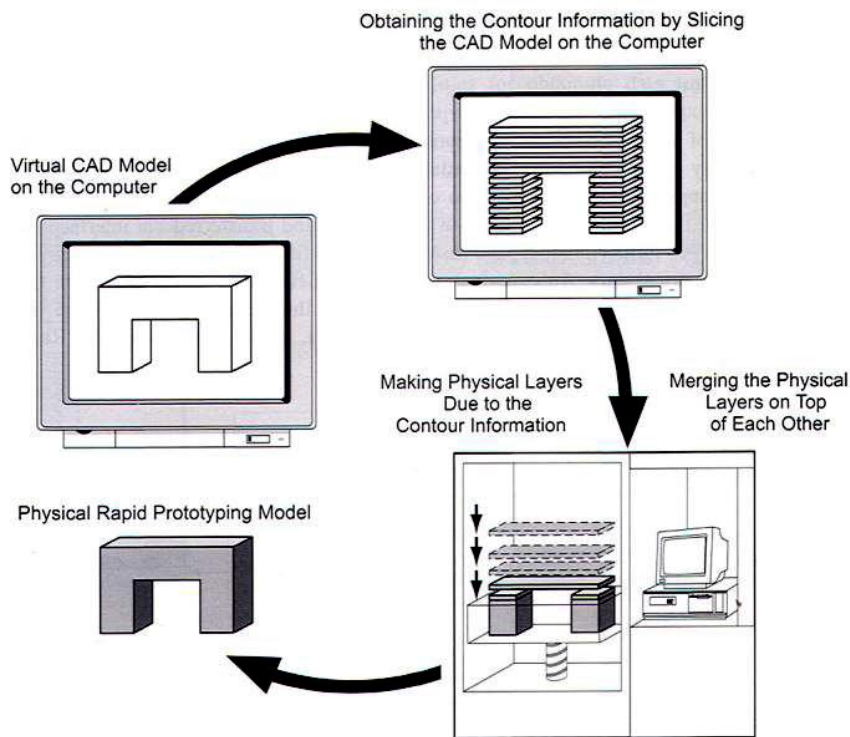
## *1.1 Γενικά*

Η προσθετική κατασκευή (Additive Manufacturing – A.M.), συχνά γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing), είναι ένας τύπος τεχνικής ψηφιακής κατασκευής που δημιουργεί φυσικά στοιχεία (αντικείμενα) από ένα γεωμετρικό μοντέλο μέσω της προσθήκης υλικών (layer by layer). Ο τομέας της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι ένας που επεκτείνεται ραγδαία. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια κοινή πρακτική σε όλο τον κόσμο τα τελευταία χρόνια (Aniket Jadhav, Vijay S. Jadhav, 2022). Τα κύρια πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης ή της προσθετικής κατασκευής (AM) είναι η ελευθερία σχεδιασμού, ο όγκος προσαρμογής, η ικανότητα κατασκευής περίπλοκων συγκροτημάτων, καθώς και ταχεία πρωτοτυποποίηση (rapid prototyping). Προσφέρει ευεργετική ικανότητα κατασκευής εξαρτημάτων με γεωμετρικά και υλικά πολυπλοκότητας που δεν θα μπορούσαν να δημιουργηθούν από αφαιρετικές διαδικασίες παραγωγής, όπως ο τόρνος και η φρέζα. Η τρισδιάστατη εκτύπωση, η οποία χρησιμοποιεί ένα ευρύ φάσμα τεχνικών, υλικών και συσκευών, έχει προχωρήσει κατά την περίοδο και έχει τη δυνατότητα να αλλάξει βιομηχανικά και logistics. Η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική και η ιατρική είναι μερικές μόνο από τις επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν A.M. Οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές έχουν αρχίσει να γίνονται πιο προσιτοί ως αποτέλεσμα πρόσφατων βελτιώσεων, που τους επιτρέπουν να χρησιμοποιούνται σε επιπλέον χώρους όπως εργαστήρια, βιβλιοθήκες, σπίτια και σχολεία (Praveena B.A, 2021).

Η προσθετική κατασκευή (AM) είναι μια ομάδα σύγχρονων τεχνολογιών κατασκευής που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τρισδιάστατων πρωτοτύπων από αναπαραστάσεις CAD. Αυτές οι μέθοδοι είναι γενικά παρόμοιες μεταξύ τους ως προς το ότι προσθέτουν και συγκολλούν υλικά με στρωματοποιημένο τρόπο για να σχηματίσουν αντικείμενα. Οι τεχνικές αυτές αναφέρονται επίσης ως πολυεπίπεδες τεχνικές κατασκευής. Στις συμβατικές διαδικασίες, χρησιμοποιούνται μοντέλα 2D, ενώ στη διαδικασία AM χρησιμοποιούνται πλήρη τρισδιάστατα μοντέλα. Αυτά τα τρισδιάστατα γεωμετρικά δεδομένα από το CAD διαιρούνται σε δεδομένα στρώματος και τα στρώματα κατασκευάζονται απευθείας με τη βοήθεια του υπολογιστή και των αντίστοιχων προγραμμάτων για το κάθε είδος εκτυπωτή.

Η ταχεία πρωτοτυποποίηση (Rapid prototyping RP) είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες αυτοματοποιημένης κατασκευής με την ικανότητα να προχωρήσει απευθείας από μοντέλα CAD σε τελικά εξαρτήματα. Αν και η προσθετική κατασκευή (AM) εφευρέθηκε για την ταχεία παραγωγή πρωτοτύπων, η τεχνολογία έχει

τη δυνατότητα να απελευθερώσει το σχεδιασμό και κατασκευαστικούς περιορισμούς για τη δημιουργία καινοτόμων προϊόντων με μεγάλη γεωμετρική πολυπλοκότητα. Η AM ανήκει σε μια κατηγορία καινοτομιών που μπορούν να αναπτύξουν αυτόματα συγκεκριμένα φυσικά μοντέλα από πληροφορίες σχεδίασης με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Οι RP διαδικασίες, σε γενικές γραμμές, ξεκινούν με ένα τρισδιάστατο μοντέλο υπολογιστή του εξαρτήματος που πρόκειται να κατασκευαστεί. Αυτή η ψηφιακή αναπαράσταση του τεμαχίου τεμαχίζεται σε εικονικά στρώματα από λογισμικό υπολογιστή. Κάθε στρώμα, που αντιπροσωπεύει μια διατομή του επιθυμητού τεμαχίου, αποστέλλεται στη μηχανή RP όπου χτίζεται πάνω στο προηγούμενο στρώμα. Αυτή η διαδικασία, η κατασκευή δηλαδή του τεμαχίου στρώμα προς στρώμα από το μηδέν, επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθεί το εξάρτημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Τα συστήματα RP μπορούν παράγουν μοντέλα από δεδομένα 3D CAD, αξονικές και μαγνητικές τομογραφίες, καθώς και από συστήματα 3D ψηφιοποίησης. Χρησιμοποιώντας μια προσθετική προσέγγιση, τα συστήματα RP ενώνουν υλικά σε υγρή μορφή, σκόνη ή φύλλα για να σχηματίσουν φυσικά αντικείμενα στρώμα προς στρώμα. RP μηχανήματα επεξεργάζονται πλαστικά, χάρτινα, κεραμικά, μεταλλικά και σύνθετα υλικά από λεπτές, οριζόντιες διατομές μοντέλα υπολογιστών.



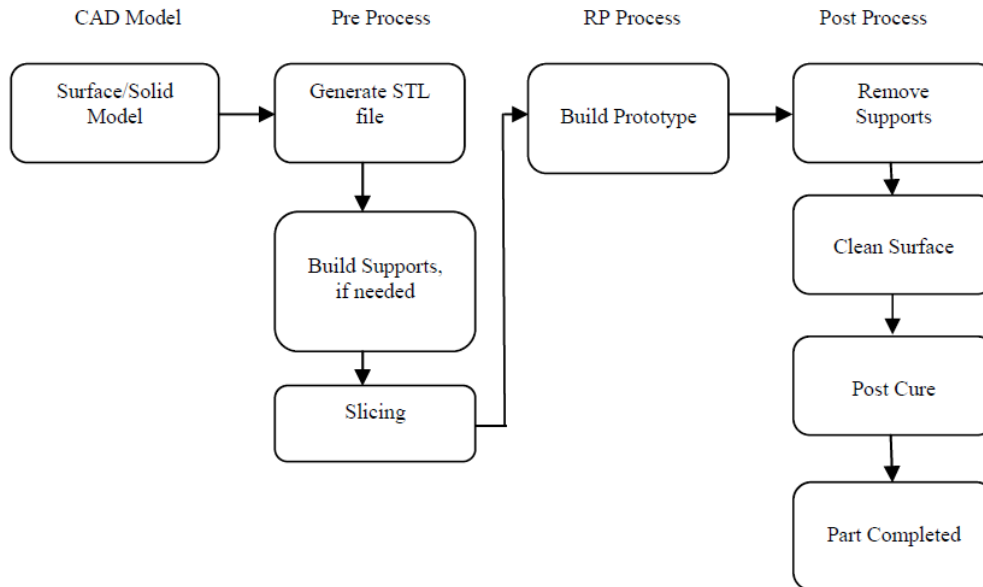
**Σχήμα 1:** Αρχή της ταχείας πρωτοτυποποίησης - Rapid prototyping principle (K.Satish Prakasha, 2018)

Με σχεδόν τέσσερις δεκαετίες καινοτόμου έρευνα και ανάπτυξη, η ΑΜ έχει θεμελιωδώς και αξιοσημείωτα προχωρήσει σε πολλές πτυχές, συμπεριλαμβανομένης της μεθοδολογίας σχεδιασμού, της ποικιλίας υλικών, επεξεργασία και εξοπλισμό. Έχει εισέλθει σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές για να φέρει επανάσταση στις επιδόσεις του κύκλου ζωής των προϊόντων, από την ευέλικτη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού έως τη λειτουργική βελτίωση.

Κατά τα τελευταία 30 χρόνια, η χρήση της τεχνολογίας ΑΜ έχει επίσης υποστεί μετασχηματισμό. Οι πρώτες εφαρμογές ΑΜ επικεντρώθηκαν σε μοντέλα και πρωτότυπα. Καθώς η τεχνολογία ωρίμαζε, η ΑΜ έπαιξε σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ταχέων και μαλακών εργαλείων (π.χ. καλούπια χύτευσης υπό κενό και σιλικόνης). Σήμερα χρησιμοποιείται επίσης για την παραγωγή εξαρτημάτων και προϊόντων τελικής χρήσης. Εκτιμάται ότι η αγορά των εξαρτημάτων τελικής χρήσης ΑΜ είχε αξία 1,748 δισεκατομμυρίων δολαρίων το 2014 - αυξημένη κατά 66% σε σχέση με το προηγούμενο έτος. Η ισχυρή διψήφια ανάπτυξη σε αυτό το τομέα αναμένεται να συνεχιστεί για τα επόμενα αρκετά χρόνια. Η αξιοποίηση των γεωμετρικών και υλικών ελευθεριών της ΑΜ για εξαρτήματα τελικής χρήσης δημιουργεί έναν κόσμο ευκαιριών. Ωστόσο, δεν είναι για όλα τα μέρη δυνατόν ή οικονομικά αποδοτικό να παραχθούν με χρήση ΑΜ. Αυτό καθιστά αναγκαία την καλύτερη κατανόηση του πότε, γιατί και πώς να (επανα)σχεδιαστούν για τις ευκαιρίες και τους περιορισμούς που σχετίζονται με αυτές τις τεχνολογίες (Mary Kathryn Thompson a, 2016).

Η τεχνολογία ΑΜ αποτελείται από πέντε βασικά βήματα:

1. Αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό τρισδιάστατο στερεό μοντέλο.
2. Μετατρέπεται σε μια τυποποιημένη μορφή αρχείου ΑΜ, όπως η παραδοσιακή τυποποιημένη μορφή γλώσσας ψηφιδωτής διαμόρφωσης ή την πρόσφατη μορφή αρχείου προσθετικής κατασκευής.
3. Το αρχείο αποστέλλεται σε μια μηχανή ΑΜ όπου γίνεται χειρισμός του, π.χ. αλλαγή της θέσης και του προσανατολισμού του τεμαχίου ή η κλιμάκωση του τεμαχίου.
4. Το τεμάχιο κατασκευάζεται στρώμα προς στρώμα στη μηχανή ΑΜ.
5. Καθαρισμός και φινίρισμα του μοντέλου.



**Σχήμα 2:** Ροή εργασιών της διαδικασίας AM (K.Satish Prakasha, 2018).

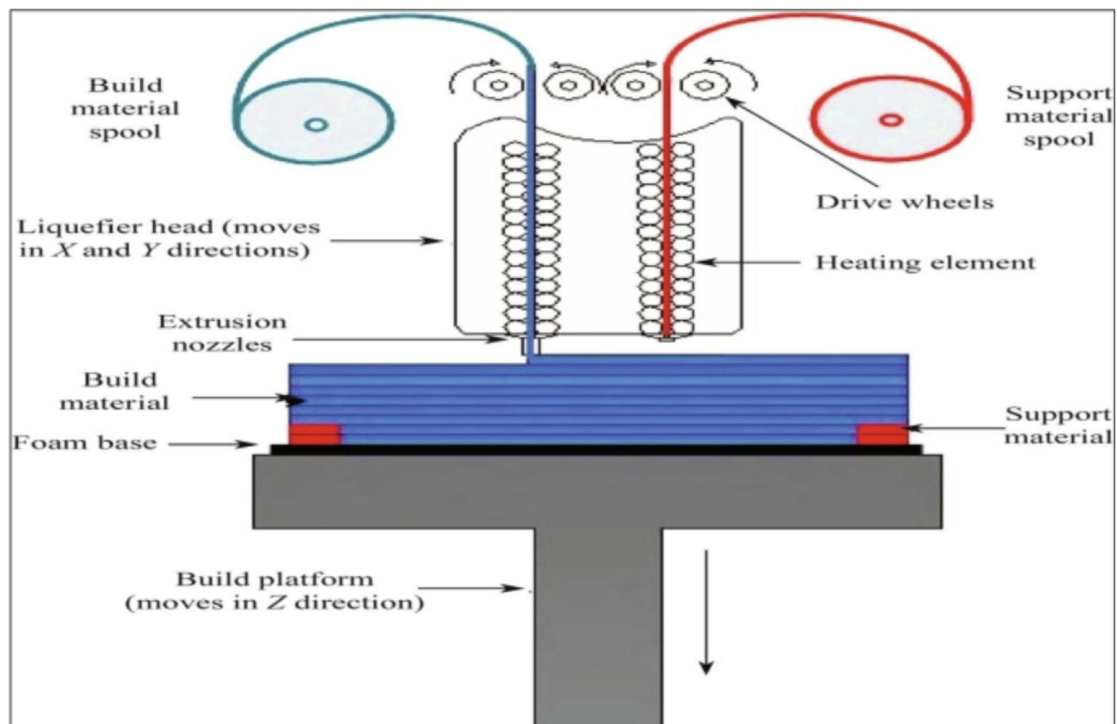
Η πρόβλεψη βασικών μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων (μεταβαλλόμενες ή ομοιόμορφες) ενός ολόκληρου αντικειμένου είναι λίγο δύσκολο έργο στις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Ωστόσο, οι τεχνικές AM επιτρέπουν το σχεδιασμό και η κατασκευαστική ομάδα να εναποθέσει με ακρίβεια διαφορετικά υλικά τροφοδοσίας και συνθέσεις με ποικίλες ιδιότητες που επιτρέπουν την ακριβή πρόβλεψη των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των αντικειμένων. Αυτά τα χαρακτηριστικά ανεβάζουν τη βιωσιμότητα των τεχνικών AM μετά από πολλές ερευνητικές και αναπτυξιακές έρευνες της κοινότητας της μεταποιητικής και βιοϊατρικής βιομηχανίας.

### 1.2 Μέθοδοι (τύποι) A.M.

Διαφορετικές διεργασίες AM δημιουργούν και εδραιώνουν στρώματα με διαφορετικούς τρόπους. Ορισμένες διεργασίες χρησιμοποιούν θερμική ενέργεια από ακτίνες λέιζερ ή ηλεκτρονίων, η οποία κατευθύνεται μέσω οπτικών για να λιώσει ή να συσσωματωθεί (να σχηματίσει μια συνεκτική μάζα χωρίς να λιώσει) μέταλλο ή πλαστική σκόνη μαζί. Άλλες διεργασίες χρησιμοποιούν κεφαλές εκτύπωσης τύπου inkjet για τον ακριβή ψεκασμό συνδετικού υλικού ή διαλύτη πάνω σε κεραμικό ή πολυμερές σε σκόνη. Ακολουθούν οι διάφοροι μέθοδοι AM, με βαθύτερη ανάλυση στην μέθοδο SLA, με την οποία θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

### 1.2.1 FDM

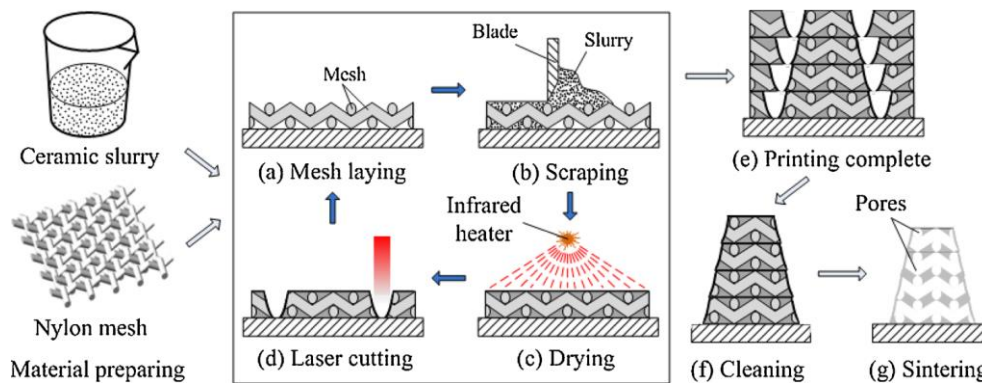
Το FDM (Fused deposition modeling) είναι μια διαδικασία 3d printing κατά την οποία ένα λεπτό στρώμα θερμοπλαστικού νήματος σύρματος εξέρχεται από την μηχανή όπου μια κεφαλή εκτύπωσης το λιώνει και το ωθεί σε πάχος συνήθως 0,20 mm. Υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία είναι το πολυκαρβονικό (PC), το ακρυλονιτρίλιο βουταδιενίου στυρενίου (ABS). Το υλικό θερμαίνεται περίπου 2 °C πάνω από το σημείο τήξης του, ώστε να στερεοποιείται σχεδόν αμέσως μετά την εκφόρτωση και συγκολλάται εν ψυχρώ με τα προηγούμενα στρώματα. Τα χρησιμοποιούμενα υλικά έχουν έκτοτε επεκταθεί και περιλαμβάνουν τη χύτευση με επένδυση κερί, μέταλλα και κεραμικά. Έχουν επίσης αναπτυχθεί μηχανές με δύο ακροφύσια, ένα για το υλικό του μέρους και το άλλο για το υλικό στήριξης που είναι φθηνότερο και αποσπάται από το τεμάχιο χωρίς να αλλοιώνει την επιφάνειά του. Μια καλή ποικιλία υλικών μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο FDM και η ακρίβεια του τεμαχίου μπορεί να φθάσει τα  $\pm 0,08$  mm. Ο εξοπλισμός FDM έχει συμπαγή μέγεθος και το κόστος συντήρησης είναι χαμηλό. Ένα από τα μειονεκτήματα είναι όταν η ανάλυση στον άξονα z είναι πάντα χαμηλή σε σύγκριση με τους άλλους άξονες (0,20 mm) (Ravikumar Patel a, 2022). Λόγω της δυνατότητας παραγωγής σύνθετων γεωμετρικών εξαρτημάτων σε ένα φιλικό και ασφαλές περιβάλλον, η FDM είναι η περισσότερο διαδεδομένη από τις τεχνικές AM (additive manufacturing) που παρέχουν λειτουργικά πρωτότυπα σε διάφορα θερμοπλαστικά υλικά.



**Σχήμα 3:** Η λειτουργία του FDM εκτυπωτή (Ravikumar Patel a, 2022).

### 1.2.2 LOM

Η κατασκευή πλαστικοποιημένων αντικειμένων (LOM) είναι μια μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης που βασίζεται σε φύλλα. Συνδυάζει δηλαδή προσθετικές και αφαιρετικές διεργασίες για να κατασκευάσει ένα κομμάτι στρώμα πάνω σε ένα άλλο στρώμα. Τα στρώματα συγκολλούνται μεταξύ τους με την εφαρμογή πίεσης και θερμότητας και με τη χρήση θερμικής συγκολλητικής επίστρωσης (Geng Zhang a, 2021). Λείζερ που κόβει το υλικό στο σχήμα κάθε στρώματος δίνει τις πληροφορίες του τρισδιάστατου μοντέλου από το αρχείο CAD και STL. Η διαδικασία κοπής περιγράμματος που υιοθετείται στην LOM δεν αλλάζει την αρχική απόδοση του υλικού. Ως εκ τούτου, η κατασκευή πορωδών κεραμικών μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προσθήκη θυσιαστικών προτύπων στο φύλλο. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας είναι το χαμηλό κόστος, ότι αυτή η διαδικασία δεν έχει μεταγενέστερη επεξεργασία, υποστηρικτικές δομές δεν απαιτούνται, η μη παραμόρφωση ή αλλαγή φάσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας και η δυνατότητα κατασκευής μεγάλων τεμαχίων. Τα μειονεκτήματα είναι το χαμηλό επιφανειακό φινίρισμα, η χαμηλή ακρίβεια, και οι πολύπλοκες εσωτερικές κοιλότητες που είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν. Χαρτιά, σύνθετα υλικά και μέταλλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτού του είδους τα μοντέλα σε αυτή τη διαδικασία.



**Σχήμα 4:** Διάγραμμα των βημάτων κατασκευής μέσω της διαδικασίας LOM (Geng Zhang a, 2021).

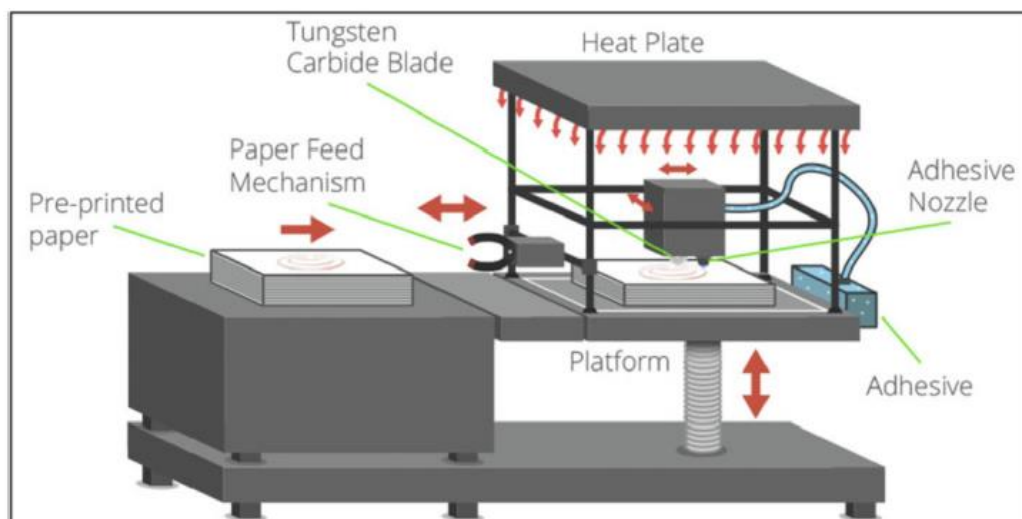
### 1.2.3 LENS

Σε αυτή τη διαδικασία προσθετικής κατασκευής, ένα τμήμα επεξεργάζεται υγροποιώντας μεταλλική σκόνη που εγχέεται σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Γίνεται ρευστή με τη χρήση μιας ισχυρής μπάρας λέιζερ. Το υλικό στερεοποιείται όταν ψύχεται. Η διαδικασία συμβαίνει σε κλειστό θάλαμο με αέριο αργό. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τη χρήση μιας ποικιλίας μετάλλων και μείγμα αυτών, όπως ανοξείδωτος χάλυβας, συνδυασμοί με βάση το νικέλιο, τιτάνιο, βανάδιο, εργαλεία χάλυβα, χαλκό κ.λπ. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί αλουμίνια. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται επιπλέον για την επισκευή εξαρτημάτων που από διαφορετικές διαδικασίες θα ήταν

αδύνατο ή πιο δαπανηρό να γίνει. Ένα ζήτημα σε αυτή τη διαδικασία μπορεί να είναι οι υπολειμματικές τάσεις από ανομοιόμορφες μορφές θέρμανσης και ψύξης, οι οποίες μπορεί να είναι τεράστιες σε διαδικασίες υψηλής ακρίβειας, όπως η επισκευή πτερυγίων στροβίλων (Zhuangzhuang Mao a, 2022). Η διαδικασία LENS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επισκευή εξαρτημάτων και επιπλέον για τη δημιουργία νέων εξαρτημάτων. Ωστόσο, η LENS εξακολουθεί να χρειάζεται διαδικασία μετά την παραγωγή και το εξάρτημα πρέπει να κοπεί από το υπόστρωμα κατασκευής. Έχει επιπλέον ανομοιόμορφο φινιρίσμα επιφάνειας, το οποίο μπορεί να απαιτεί κατεργασία ή καθαρισμό.

#### 1.2.4 SDL

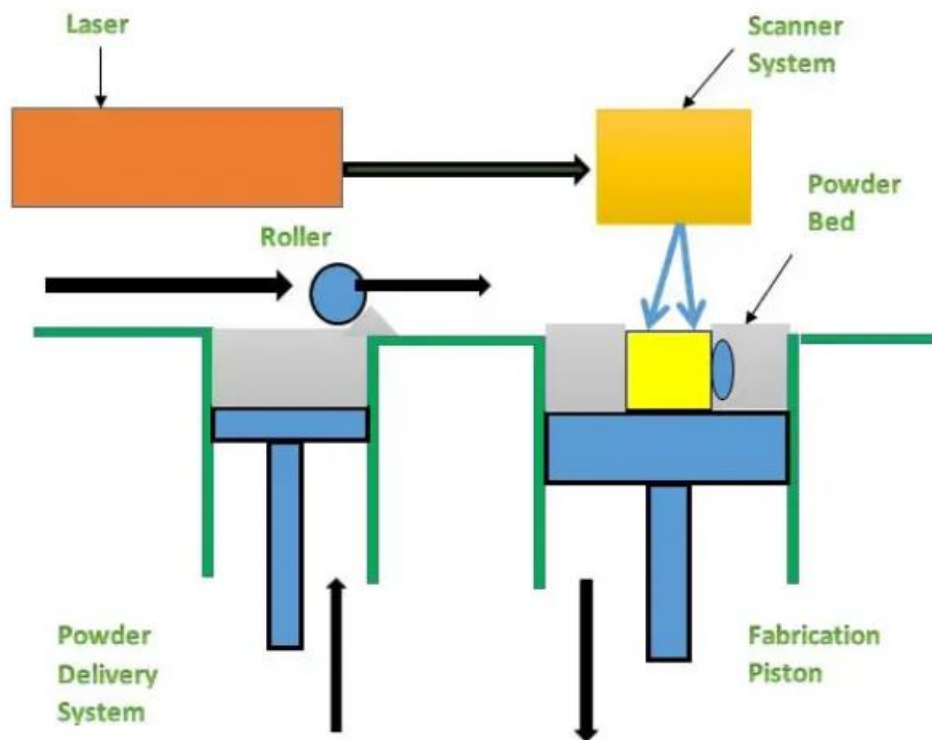
Ένα φύλλο χαρτί απλώνεται στην πλατφόρμα στην αρχή της διαδικασίας. Για να διασφαλιστεί ότι το στήριγμα μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα, κόλλα ψεκάζεται επιλεκτικά στο χαρτί, με μεγαλύτερη συγκέντρωση στην περιοχή εργασίας και με μικρότερη συγκέντρωση στην περιοχή στήριξης, αντίστοιχα. Ένας μηχανισμός τροφοδοσίας χαρτιού τοποθετεί ένα νέο φύλλο πάνω από το πρόσφατα κολλημένο στο επόμενο στάδιο. Η κατασκευασμένη πλάκα τώρα σπρώχνεται πιο κοντά στη θερμαινόμενη πλάκα και εφαρμόζεται για να εξασφαλιστεί μια ομοιόμορφη συγκόλληση. Το ύψος κατασκευής επιτυγχάνεται και στη συνέχεια ένα εργαλείο με αιχμηρή άκρη κόβει ένα φύλλο χαρτιού σύμφωνα με τα δεδομένα σχεδιασμού και παράγει την άκρη του τεμαχίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Καθώς τελειώνει το αρχικό φύλλο, το επόμενο φύλλο εναποτίθεται αμέσως μέχρι να ολοκληρωθεί το εξάρτημα (Aniket Jadhav, Vijay S. Jadhav, 2022).



**ΣΧΗΜΑ 5:** Λειτουργία της διαδικασίας πλαστικοποίησης με επιλεκτική εναπόθεση SDL (Πηγή: [www.makepartsfast.com](http://www.makepartsfast.com)).

### 1.2.5 SLS

Η επιλεκτική πυροσυσσώματωση με λέιζερ (SLS) είναι ένα σύστημα 3D που βασίζεται σε σκόνη. Αυτή η τεχνολογία εκτύπωσης έχει γίνει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη, στην προσθετική κατασκευή, τεχνολογία παραγωγής λόγω της απλής λειτουργίας της, του χαμηλού κόστους και της ευελιξία σχεδιασμού. Η πορώδης δομή και η μηχανική αντοχή των κατασκευασμένων εξαρτημάτων μπορούν να ελεγχθούν σε ένα βαθμό με την αλλαγή των παραμέτρων εκτύπωσης (π.χ. ισχύς λέιζερ, ταχύτητα σάρωσης, βήμα σάρωσης κ.λπ.). Θερμοσκληρυνόμενα φαινολικά ρητίνης είναι ένα κοινό συνδετικό υλικό που χρησιμοποιείται στη SLS και ο μουλλίτης είναι ένα καλό κυματοδιαφανές κεραμικό υλικό και μπορεί να βελτιώσει τόσο την προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης και τη δομική αντοχή του σύνθετου υλικού (Kaixin Deng a, 2023). Ωστόσο, η λειτουργία της SLS είναι περίπλοκη, καθώς πρέπει να αποφασιστούν πολλές μεταβλητές κατασκευής. Το επιτεύξιμο επιφανειακό φινίρισμα δεν είναι τόσο καλό όσο εκείνο της SLA και η αλλαγή υλικού είναι δύσκολη.

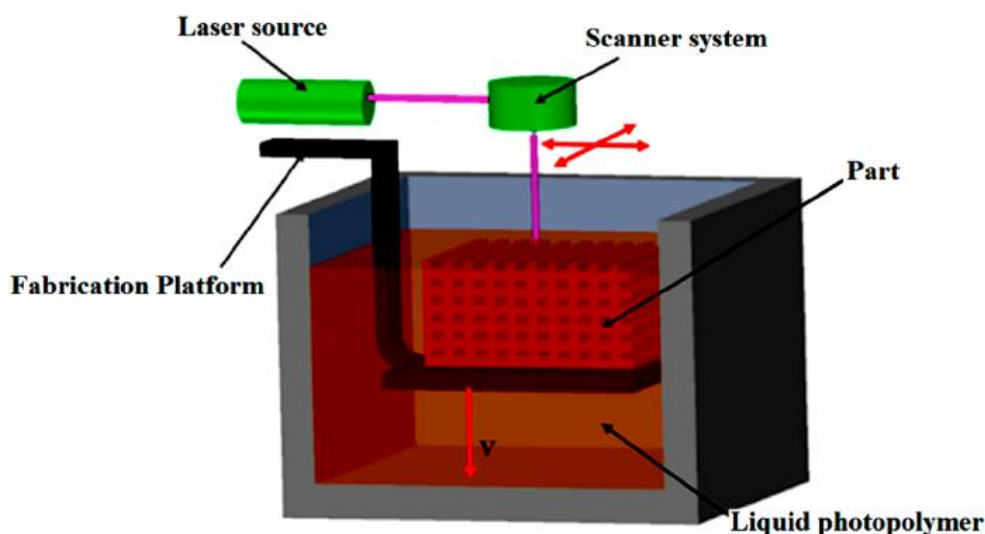


**ΣΧΗΜΑ 6:** Διαγραμματική απεικόνιση της λειτουργίας της τεχνολογίας εκλεκτικής πυροσυσσώματωσης με λέιζερ (Πηγή: [www.manufactor3d.com](http://www.manufactor3d.com)).



### 1.2.6 SLA

Η στερεολιθογραφία είναι μία από τις παλαιότερες τεχνικές που εισήχθησαν από τον Charles Hull το έτος 1986. Η SLA χρησιμοποιεί φωτοπολυμερή - φωτοανθεκτικές ρητίνες ως υλικά εργασίας για την κατασκευή. Η ικανότητά τους να σκληραίνονται υπό υπεριώδες φως ή λέιζερ χρησιμοποιείται για την κατασκευή τρισδιάστατων τμημάτων πολύπλοκων σχημάτων. Ακριβώς κατευθυνόμενο και στοχευμένο υπεριώδες φως στην φωτοπολυμερές ρητίνη δημιουργεί ένα στερεό στρώμα του επιθυμητού σχήματος με φωτοπολυμερισμό. Μετά τη δημιουργία ενός πρώτου στρώματος, η πλατφόρμα ή το τραπέζι κατασκευής χαμηλώνει σε ύψος ισοδύναμο με το πάχος του στρώματος, και η μη σκληρυμένη ρητίνη απλώνεται πάνω από το αρχικά δημιουργηθέν στρώμα (M Bhuvanesh Kumar \*, 2021). Η επανάληψη του πολυμερισμού για επόμενα στρώματα του επιθυμητού σχήματος δημιουργεί ένα τρισδιάστατο εξάρτημα στο τραπέζι δόμησης. Μετά την εκτύπωση, τα μη σκληρυμένα πολυμερή/ ρητίνες σκουπίζονται για να προκύψει το τελικό εξάρτημα, το οποίο έχει σκληρυνθεί μόνο κατά 95%. Για να ολοκληρωθεί η όλη διαδικασία σκλήρυνσης, το εξάρτημα υφίσταται περαιτέρω θερμική επεξεργασία σε ένα φούρνο ή σε διαδικασία φωτοσκλήρυνσης για την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων. Η σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας SLA παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.



**Σχήμα 7:** Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας SLA (M Bhuvanesh Kumar \*, 2021).

Η ανακρίβεια των διαστάσεων και η στρέβλωση των εκτυπωμένων εξαρτημάτων είναι σημαντικά σφάλματα στη διαδικασία SLA. Τα σφάλματα αυτά προκαλούνται λόγω συρρίκνωση των ρητινών με βάση το ακρυλικό κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Υπάρχουν δύο είδη συρρίκνωσης που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού.

Η πρώτη είναι ο σχηματισμός του πολυμερικού δεσμού μεταξύ υψηλής πυκνότητας στερεού πολυμερούς (μετά τον φωτοπολυμερισμό) και του λιγότερο πυκνού υγρού πολυμερούς. Η δεύτερη είναι μια χημική αντίδραση (εξώθερμη) κατά τον φωτοπολυμερισμό, λόγω της οποίας δημιουργούνται ορισμένες διαστολές του πολυμερούς με την αύξηση της θερμοκρασίας. Κατά την ψύξη, παρατηρείται αξιοσημείωτη συρρίκνωση που προκαλεί ανακρίβεια διαστάσεων. Αυτές οι δύο μορφές αιτιών μαζί δημιουργούν εσωτερικές τάσεις που οδηγούν σε σφάλμα στρέβλωσης (Aniket Jadhav, Vijay S. Jadhav, 2022). Απαιτείται ένα προσεκτικό βήμα μετα-επεξεργασίας για να λάβουμε με ακρίβεια τελειωμένα εξαρτήματα για την αποφυγή σφαλμάτων και τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Η θέρμανση και η φωτοσκλήρυνση μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τεχνικές μετεπεξεργασίας για SLA εκτυπωμένα μέρη. Η εκτύπωση εξαρτημάτων με υψηλότερη ανάλυση τόσο ακρίβεια όσο 10 μm μπορεί να αποτελέσει μεγάλο πλεονέκτημα. Παρόλα αυτά, ορισμένοι περιορισμοί σχετίζονται με τις διαδικασίες SLA, όπως η χαμηλή ταχύτητα εκτύπωσης, η συγκριτικά ακριβή διαδικασία και σχετικά περιορισμένο φάσμα υλικών εργασίας. Δεδομένου ότι ο έλεγχος της ενέργειας του φωτός και της έκθεσης μπορεί να επηρεάσει με ακρίβεια το πάχος του στρώματος, οι εφαρμογές SLA μπορούν να επεκταθούν στην κατασκευή νανοσύνθετων εξαρτημάτων.

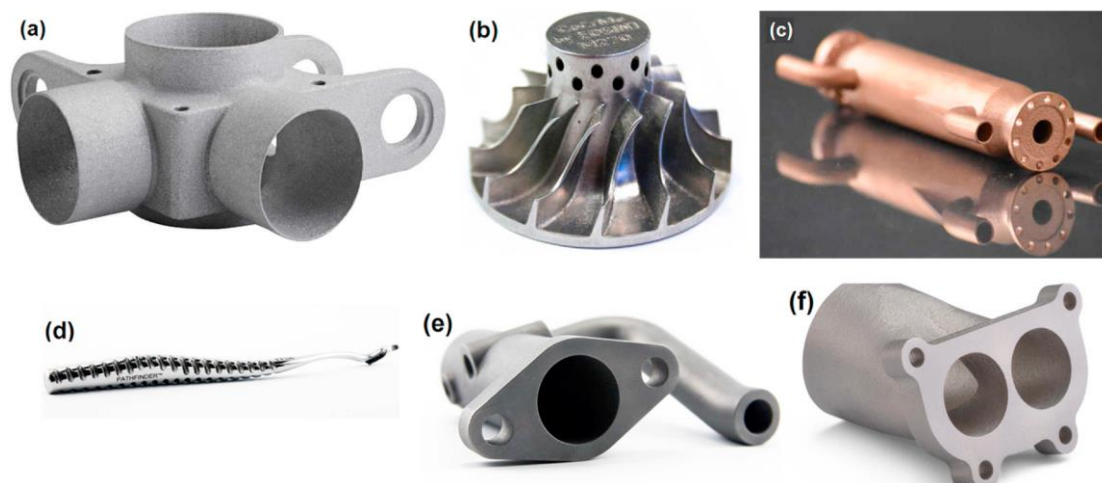
### *1.3 Υλικά*

Οι τεχνικές AM χρησιμοποιούν μια ποικιλία υλικών για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τα υλικά που υπάρχουν σε μείζονες κατηγορίες όπως μέταλλα, κράματα, κεραμικά, πολυμερή, σύνθετα υλικά και βιοϋλικά παρουσιάζονται στην συνέχεια, μαζί με τις εφαρμογές τους.

#### *1.3.1 Μέταλλα, κράματα και σύνθετα υλικά*

Λόγω της ανώτερης αντοχής τους, της σταθερότητάς τους, και των εκτεταμένων εφαρμογών, τα προϊόντα εκτύπωσης μετάλλων αποτελούν πλέον το πρωταρχικό μέλημα των κατασκευαστών μηχανών AM. Σύμφωνα με δεδομένα, οι μηχανές εκτύπωσης μετάλλων αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο ποσοστό (47,8%) στο τμήμα των κατασκευαστών υλικού και το 27,3% του συνόλου των μηχανών AM κατασκευαστικού τοπίου. Οι τεχνικές εκτύπωσης μετάλλων κυρίως χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα, στις αεροδιαστημικές εφαρμογές και κυρίως στην έρευνα οργανισμών για την ανάπτυξη νέων υλικών. Η εκτύπωση προσαρμοσμένων μεταλλικών προϊόντων χρησιμοποιείται αποτελεσματικά και από βιοϊατρικές εφαρμογές, π.χ., ανθρώπινα εμφυτεύματα. Μία από τις δυσκολίες που σχετίζονται με την συμβατική διαδικασία κατασκευής είναι η ανάπτυξη λειτουργικών μεταλλικών εξαρτημάτων. Οι τεχνικές εκτύπωσης μετάλλων προσφέρουν ελευθερία στην κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων με ευκολία (P. Durai Murugan a). Πολυάριθμα μεταλλικά υλικά μπορούν

να χρησιμοποιηθούν σε τεχνικές AM όπως χάλυβες, Al και κράματα μαγνησίου (Mg), Ti και τα κράματά του, και κράματα με βάση το Ni. Τα διάφορα μεταλλικά μέρη που παράγονται με AM παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.



**Σχήμα 8:** Μεταλλικά υλικά εκτυπωμένα με τεχνικές AM (a) AlSi10Mg, (b) κοβαλτιοχρώμιο CoCrMo, (c) χαλκός C18150, (d) κράμα Ni 718, (e) SS 316 L και (f) Ti64.

Η AM με λέιζερ είναι πολύ αποτελεσματική στην παραγωγή μεταλλικών εξαρτημάτων. Τα μεταλλικά μέρη που παράγονται με τεχνικές AM διαθέτουν λεπτή μικροδομή και συγκριτικά πυκνότερη από τα συμβατικά κατασκευασμένα μέρη και διαθέτουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, όπως τα όρια αντοχής και διαρροής.

### 1.3.2 Κεραμικά

Λόγω των ειδικών απαιτήσεων των υλικών υψηλής απόδοσης, τα κεραμικά έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των αυτοκινήτων, αεροδιαστημική, βιοϊατρική, ενέργεια, ηλεκτρικά, ηλεκτρονικά, περιβαλλοντικά, κ.ο.κ. . Η κατασκευή των υψηλής απόδοσης σύνθετων κεραμικών εξαρτημάτων είναι μια πρόκληση και μερικές φορές είναι αδύνατο με τις συμβατικές μεθόδους. Υπάρχουν μερικές σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με την κατασκευή κεραμικών εξαρτημάτων, όπως η δυσκολία στο χειρισμό η εγγενής ευθραυστότητα, η ανάγκη ακριβών εργαλείων για μετεπεξεργασία, και είναι χρονοβόρες. Ως εκ τούτου, η άμεση κατασκευή κεραμικών εξαρτημάτων υψηλής απόδοσης είναι περιορισμένη, σε αντίθεση με την εναπόθεση με λέιζερ διαδικασίες. Σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής, η AM είναι ιδιαίτερα ικανές για την παραγωγή πολύπλοκων κεραμικών εξαρτημάτων. Αρχικά, οι τεχνικές AM χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή πράσινων κεραμικών εξαρτημάτων και αργότερα

πυροσυσσωματώθηκαν με συμβατικές μεθόδους για να αποκτήσουν τα επιθυμητές ιδιότητες.

### *1.3.3 Πολυμερή και σύνθετα υλικά*

Τα πολυμερή και τα σύνθετα υλικά τους έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε πολλές εφαρμογές, από οικιακές συσκευές έως βιομηχανικές ανάγκες. Οι εφαρμογές τους ξεκινούν από μικροσκοπικές μικρορευστομηχανές έως μεγάλες συσκευές αποθήκευσης δεξαμενές, σωλήνες, βιοϊατρικές εφαρμογές και ούτω καθεξής. Τα πολυμερή υλικά είναι ελαφριά και ισχυρά- ως εκ τούτου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές που φέρουν φορτία. Λόγω της ποικιλομορφίας τους και της εύκολης δυνατότητα επεξεργασίας, είναι τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται στις AM επεξεργασίες. Η προσαρμοστικότητα των πολυμερών στις τεχνολογίες AM κατέστησαν δυνατή την παραγωγή πολλών πολύπλοκων προϊόντων με χαμηλό κόστος για ένα τεράστιο αριθμό εφαρμογών από την αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία, την ιατρική, αρχιτεκτονική, παιχνίδια και πολλά άλλα. Το πλεονέκτημα της επεξεργασίας μέσω τεχνικών AM είναι το υψηλό επίπεδο ακρίβειας και η εξάλειψη της πλειοψηφίας των βημάτων μεταεπεξεργασίας, τα οποία είναι οικονομικά αποδοτικότερα από άλλες παραδοσιακές μεθόδους όπως η χύτευση, η διαμόρφωση και η εξώθηση. Επιπλέον, η κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων των τυπωμένων πολυμερών είναι ζωτικής σημασίας για τη χρήση τους σε πραγματικές εφαρμογές. Μέρη εκτυπωμένα με AM τεχνικές θα πρέπει να αντικαταστήσουν τα συμβατικά κατασκευασμένα αντίστοιχα σε μηχανικές ιδιότητες. Όμως, οι αυξανόμενες απαιτήσεις επιδόσεων ωθούν προς τα πάνω την προώθηση των πολυμερικών υλικών προσθέτοντας πρόσθετα ή την ενίσχυσή τους αντί της χρήσης καθαρών πολυμερικών υλικών. Από την άλλη πλευρά, οι θερμομηχανικές ιδιότητες των πολυμερών που βασίζονται σε συστατικά, εξακολουθούν να αμφισβητούνται. Διαφορετικοί τύποι τεχνικών AM χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία διαφορετικών τύπων πολυμερών, όπως θερμοπλαστικά, θερμοσκληρυνόμενα, μίγματα πολυμερών, υδρογέλες, βιολογικές ενώσεις, ελαστομερή και σύνθετα πολυμερή. Τα υλικά με τα μεγαλύτερα έσοδα στον τομέα της AM είναι πολυμερή, όπου η πλειονότητα των τύπων πολυμερών είναι τα φωτοπολυμερή. Η τεχνική του φωτοπολυμερισμού χρησιμοποιεί κυρίως διαδικασίες SLA στις οποίες ο μοριακός προσανατολισμός του εκτυπωμένου τμήματος εξαρτάται από το πάχος του στρώματος που αποφασίζεται από την ένταση του υπεριώδους φωτός. Η δεύτερη κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούμενη τεχνική είναι η SLS, η οποία χρησιμοποιεί στις περισσότερες περιπτώσεις πολυστυρένιο, τα θερμοπλαστικά ελαστομερή και τα πολυαμίδια. Τέσσερις μορφές πολυμερών πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται κυρίως στις τεχνικές AM είναι τα υγρά πολυμερή, οι πολυμερικές σκόνες, το πολυμερές νήμα και οι πολυμερείς μεμβράνες.

#### 1.3.4 Βιοϋλικά

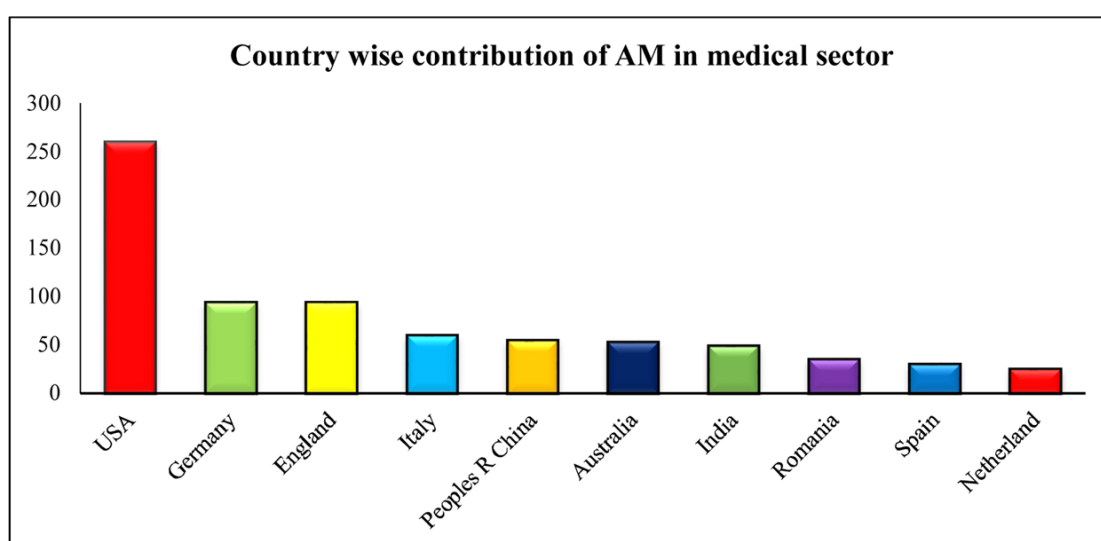
Ο τομέας της βιοϊατρικής είναι ένας από τους τομείς αιχμής για την εξέλιξη των τεχνικών AM, δεδομένου ότι υπάρχουν μοναδικές απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν από μεθόδους κατασκευής. Η υψηλή πολυπλοκότητα είναι μια κρίσιμη πρόκληση που σχετίζεται με τις βιοϊατρικές εφαρμογές, όπως η ανάπτυξη τρισδιάστατων μοντέλων και οργανοειδών, μοναδικών εμφυτευμάτων, ρυθμιζόμενων συστημάτων χορήγησης φαρμάκων, εμφυτευμάτων- ιστών διεπαφή, οδοντιατρική, ορθοπεδική, και μηχανικοί ιστοί και όργανα. Οι ειδικές για τον ασθενή απαιτήσεις ωθούν στην προσαρμογή των βιοϊατρικών εμφυτευμάτων, προσθέσεων και άλλων εφαρμογών. Οι μικρές ποσότητες παραγωγής χαρακτηρίζουν τις βιοϊατρικές βιομηχανίες λόγω του ειδικού για τον ασθενή χαρακτήρα της. Συμβατικές μέθοδοι κατασκευής είναι πολύ δαπανηρές για την παραγωγή μικρών παραγγελθέντων ποσοτήτων προσαρμοσμένων εμφυτευμάτων δεδομένου ότι συνεπάγεται πολλά στάδια προεπεξεργασίας, όπως η κατασκευή εργαλείων. Αλλά οι AM τεχνικές μπορούν να επεξεργαστούν γρηγορότερα και φθηνότερα από τις συμβατικές μεθόδους κατασκευής στην κατασκευή μικρών ποσοτήτων προσαρμοσμένων μέρη. Επίσης, τα δεδομένα CAD μπορούν να μοιραστούν με τους ερευνητές για να αναπαράγουν και να διερευνήσουν. Οι τεχνικές AM είναι εξαιρετικά δυναμικές για κατασκευή πολύ σύνθετων εσωτερικών μικροδομών με τα απαιτούμενα μηχανικά, φυσικά και βιολογικά χαρακτηριστικά. Διαφορετικοί τύποι υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί στον βιοϊατρικό τομέα, όπως μέταλλα, πολυμερή, κεραμικά, SMAs, βιογυαλί και βιοϋλικά. Επιπλέον, μια ουσιαστική πρόοδος στις τεχνικές AM είναι η εκτύπωση πορωδών βιοδιασπώμενων υλικών, τα οποία βοηθούν στην αναγέννηση των ιστών.

#### 1.4 Εφαρμογές (Applications)

Η βελτίωση των καινοτόμων, εξελιγμένων τεχνικών AM έχει προχωρήσει σημαντικά, αποδίδοντας πιο εκτεταμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Σε σύγκριση με τις αφαιρετικές διαδικασίες, το AM είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την παραγωγή μικρών ποσοτήτων προϊόντων, ιδίως για εξαρτήματα με πολύπλοκες γεωμετρίες. Οι διαδικασίες AM προσφέρουν υψηλές δυνατότητες προσαρμογής, όπως η κατασκευή, προσαρμοσμένων ενθέτων για αντικαταστάσεις ισχίου και γόνατος. Παρακάτω εξετάζονται οι εφαρμογές AM στους τομείς της αεροδιαστημικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας, της βιοϊατρικής και της ενέργειας κ.α.

### 1.4.1 Ιατρική

Διάφοροι ερευνητές χρησιμοποίησαν διαφορετικές διαδικασίες πρόσθετης κατασκευής σε διαφορετικούς τομείς του ιατρικού τομέα. Σύμφωνα με την Αμερικανική Professional Association Report η προσθετική κατασκευή εκτιμάται ότι θα αυξηθεί κατά 9,7 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2027 στην οδοντιατρική εφαρμογή (αύξηση 35% ετησίως). Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης αυξάνεται επίσης μέρα με τη μέρα, ιδίως στην ιατρικό τομέα. Η μελέτη αποκαλύπτει ότι περίπου το 11% των εσόδων των ιατρικών βιομηχανιών προέρχεται από τρισδιάστατα εκτυπωμένα εξαρτήματα, είτε πρόκειται για ιατρικές συσκευές ή εμφυτεύματα. Η αυξανόμενη ανάγκη της προσθετικής κατασκευής οφείλεται στις υψηλές απαιτήσεις ιατρικών εξαρτημάτων (Rakesh Kumar, 2021). Επιπλέον, η ερευνητική συνεισφορά ανά χώρα στην προσθετική κατασκευή στις ιατρικές εφαρμογές απεικονίζεται στο Σχήμα 8. Μεταξύ των δέκα πρώτων χωρών, οι ΗΠΑ έχουν τη μέγιστη συνεισφορά.



**Σχήμα 8:** Εφαρμογές της AM στον ιατρικό τομέα: συνεισφορά ανά χώρα (Πηγή: Web of Science)

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία AM, καθώς και στα βιοϋλικά, τις βιολογικές επιστήμες και τη βιοϊατρική, έχουν διεθρύνει την εφαρμογή των τεχνικών AM στον τομέα της βιοϊατρικής σε προϊόντα όπως τα ορθοπεδικά εμφυτεύματα, κριώματα ιστών, τεχνητά όργανα, ιατρικές συσκευές, δίκτυα μικροαγγείων και βιολογικά τσιπ. (που παράγονται με εκτύπωση/διαμόρφωση κυττάρων και πρωτεϊνών).

### 1.4.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

Η ανάπτυξη νέων προϊόντων είναι ζωτικής σημασίας για την αυτοκινητοβιομηχανία, αλλά η ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος είναι συχνά μια πολύ δαπανηρή και χρονοβόρα

διαδικασία. Η αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιεί την τεχνολογία AM ως σημαντικό εργαλείο στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη εξαρτημάτων της αυτοκινητοβιομηχανίας, επειδή μπορεί να συντομεύσει τον κύκλο ανάπτυξης και να μειώσει το κόστος κατασκευής και το κόστος του προϊόντος. Οι διαδικασίες AM έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μικρών ποσοτήτων δομικών και λειτουργικών εξαρτημάτων, όπως εξατμίσεις κινητήρων, άξονες μετάδοσης κίνησης, εξαρτήματα κιβωτίων ταχυτήτων και συστήματα πέδησης για πολυτελή, χαμηλού όγκου οχήματα (M.I.M. Sargini, 2021). Σε αντίθεση με τα επιβατικά αυτοκίνητα, τα οχήματα για τον μηχανοκίνητο αθλητισμό χρησιμοποιούν συνήθως ελαφριά κράματα (π.χ. τιτάνιο) και έχουν ιδιαίτερα πολύπλοκες δομές και χαμηλούς όγκους παραγωγής. Οι εταιρείες και τα ερευνητικά ινστιτούτα έχουν επίσης εφαρμόσει με επιτυχία τεχνικές AM για την κατασκευή λειτουργικών εξαρτημάτων για αγωνιστικά οχήματα.

Το 2014, η Local Motor, δημιούργησε το πρώτο τρισδιάστατα εκτυπωμένο ηλεκτρικό όχημα στον κόσμο. Η Local Motors δεν κατασκευάζει μόνο οχήματα, αλλά και ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο λεωφορείο γνωστό ως OLLI, επεκτείνοντας το εύρος των εφαρμογών της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

#### *1.4.3 Αεροδιαστημική*

Στο σχεδιασμό εξαρτημάτων και κατασκευών, η τεχνολογία 3D εκτύπωσης επιτρέπει απaráμιλλη ελευθερία. Η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης στον αεροδιαστημικό τομέα βοηθά για την παραγωγή ελαφρών εξαρτημάτων με καλά και πολύπλοκα περιγράμματα, ρίχνοντας τις ενεργειακές ανάγκες πρώτων υλών. Τα αεροδιαστημικά εξαρτήματα έχουν συχνά πολύπλοκες γεωμετρίες και κατασκευάζονται συνήθως από προηγμένα υλικά, όπως κράματα τιτανίου, υπερκράματα νικελίου, ειδικοί χάλυβες ή κεραμικά υπερυψηλής θερμοκρασίας, τα οποία είναι δύσκολα, δαπανηρά και χρονοβόρα για την κατασκευή τους (Byron Blakey-Milner, 2021). Επιπλέον, οι σειρές παραγωγής της αεροδιαστημικής είναι συνήθως μικρές, περιοριζόμενες σε ένα μέγιστο μερικών χιλιάδων τεμαχίων. Ως εκ τούτου, η τεχνολογία AM είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για αεροδιαστημικές εφαρμογές.



**Εικόνα 1:** Παραδείγματα συγκροτημάτων θαλάμου ώσης πλήρως κατασκευασμένα με AM που δοκιμάστηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες στη NASA (Πηγή: NASA).

#### 1.4.4 Ενέργεια

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (π.χ. ηλιακή ενέργεια, αιολική ενέργεια) και η καθαρή ενέργεια (π.χ. ενέργεια υδρογόνου) είναι πολλά υποσχόμενες λύσεις για τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και της εξάρτησης από την ορυκτή ενέργεια. Ως μία από τις "πράσινες" ενεργειακές συσκευές, οι κυψέλες καυσίμου παρέχουν μεγάλα πλεονεκτήματα, όπως υψηλή απόδοση, υψηλή πυκνότητα ισχύος και χαμηλές εκπομπές. Ωστόσο, το υψηλό κόστος και η χαμηλή αντοχή εμποδίζουν την ευρεία εφαρμογή των κυψελών καυσίμου.

#### 1.4.5 Αρχιτεκτονική

Το AM είναι πολύ χρήσιμο για τους αρχιτέκτονες, διότι όταν οι αρχιτέκτονες σχεδιάζουν ένα κτίριο, το κάνουν συνήθως με ένα σχέδιο ή ένα πλάνο. Λόγω σύνθετης φύσης τους, ένας απλός άνθρωπος δεν μπορεί να κατανοήσει αυτά τα σχέδια. Αρκετά συχνά, οι αρχιτέκτονες δεν μπορούν να εκφράσουν τις ιδέες τους με σαφήνεια και πρέπει να κάνουν απεικονίσεις που είναι χρονοβόρες. Το AM τα αλλάζει όλα αυτά. Τα μοντέλα είναι άμεσες κλιμακωτές εκδόσεις των σχεδίων και ζωντανεύουν τα όμορφα σχέδια. Μπορεί να είναι μια προσθήκη αξίας για ένα έργο ή να κάνει την παρουσίαση πιο επιτυχημένη.



### *1.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί*

Εκτός από την τεράστια εξοικονόμηση χρόνου και κόστους, η AM έχει πολλά πλεονεκτήματα:

1. Ένα φυσικό μοντέλο που μπορεί να παραδοθεί γρήγορα από έγγραφο CAD, μπορεί να επιτρέψει τη μορφή, την εφαρμογή και την πραγματοποίηση δοκιμών πολύ νωρίτερα στον κύκλο σχεδιασμού.
2. Τα σφάλματα από λανθασμένη ερμηνεία του σχεδίου μειώνονται.
3. Είναι δυνατό να περάσουμε από ένα μοντέλο CAD σε ένα πρωτότυπο χωρίς να χρησιμοποιήσουμε έναν εξειδικευμένο μηχανουργό, έναν σχεδιαστή εξαρτημάτων ή προγραμματιστή NC.
4. Εκτός από την άμεση παραγωγή πλαστικών πρωτότυπων μοντέλων, ορισμένα από τα παραγόμενα μέρη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπα για χύτευση με επένδυση ή χύτευση με άμμο, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία.
5. Για την παραγωγή μήτρων και καλουπιών απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος παράδοσης. Με την τεχνολογία AM, μπορούν να παραχθούν εργαλεία σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Αυτό συμβάλλει στη διάθεση των προϊόντων στην αγορά σε μικρότερο χρονικό διάστημα.
6. Σε αντίθεση με τη συμβατική αφαιρετική κατασκευή, όπου πρέπει να αφαιρεθεί μεγάλη ποσότητα υλικών, η AM χρησιμοποιεί πρώτες ύλες αποτελεσματικά με την κατασκευή εξαρτημάτων στρώμα προς στρώμα. Τα εναπομείναντα υλικά μπορούν συχνά να επαναχρησιμοποιηθούν με ελάχιστη επεξεργασία.
7. Οι συμβατικές διαδικασίες κατασκευής απαιτούν βοηθητικούς πόρους, όπως διατάξεις, εξαρτήματα, κοπτικά εργαλεία και ψυκτικά μέσα εκτός από την κύρια εργαλειομηχανή. Η AM δεν απαιτεί αυτούς τους πρόσθετους πόρους. Ως αποτέλεσμα, τα εξαρτήματα μπορούν να κατασκευαστούν από μικρούς κατασκευαστές που βρίσκονται κοντά στους πελάτες. Αυτό αποτελεί ευκαιρία για τη βελτίωση της αλυσίδας εφοδιασμού.
8. Επειδή δεν υπάρχουν περιορισμοί στα εργαλεία, τα εξαρτήματα με πολύπλοκα χαρακτηριστικά μπορούν να κατασκευαστούν σε ένα μόνο κομμάτι. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει ανάγκη να θυσιάζεται η λειτουργικότητα του εξαρτήματος για την ευκολία της κατασκευής. Επιπλέον, είναι δυνατή η κατασκευή ενός ενιαίου τεμάχιο με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (εύκαμπτο σε ένα τεμάχιο και πιο άκαμπτο σε ένα άλλο τεμάχιο). Αυτό ανοίγει ευκαιρίες για σχεδιαστική καινοτομία.
9. Οι μηχανές AM δεν απαιτούν δαπανηρές ρυθμίσεις και ως εκ τούτου είναι οικονομικές για την παραγωγή μικρών παρτίδων. Η ποιότητα των οποίων εξαρτώνται

από τη διαδικασία και όχι από τις δεξιότητες του χειριστή. Ως εκ τούτου, η παραγωγή μπορεί εύκολα να συγχρονιστεί με τη ζήτηση των πελατών.

Ωστόσο, η τεχνολογία AM εξακολουθεί να μην μπορεί να ανταγωνιστεί πλήρως τη συμβατική κατασκευή, ιδίως στο τομέα της μαζικής παραγωγής λόγω των ακόλουθων περιορισμών:

1. Οι διεργασίες AM χρησιμοποιούν συχνά υγρά πολυμερή ή σκόνη που αποτελείται από ρητίνη ή γύψο για την κατασκευή στρωμάτων αντικειμένων. Αυτά τα υλικά καθιστούν την AM ανέικνη να παράγει αντικείμενα μεγάλου μεγέθους λόγω έλλειψης αντοχής του υλικού. Επίσης, αντικείμενα μεγάλου μεγέθους είναι συχνά ανεφάρμοστα λόγω του εκτεταμένου χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας κατασκευής.
2. Τα εξαρτήματα που παράγονται με διαδικασίες AM έχουν συχνά τραχύ και ραβδωτό φινίρισμα επιφάνειας. Αυτή η εμφάνιση οφείλεται σε πλαστικά σφαιρίδια ή σωματίδια σκόνης μεγάλου μεγέθους που στοιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο, δίνοντας στο τελικό προϊόν μια ημιτελή εμφάνιση.
3. Ο εξοπλισμός AM θεωρείται ακριβή επένδυση. Οι 3D εκτυπωτές εισαγωγικού επιπέδου έχουν μέσο όρο περίπου 3.000 ευρώ και μπορεί να φθάσουν τα 30.000 ευρώ για μοντέλα υψηλότερης ποιότητας, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το κόστος των αξεσουάρ και των ρητινών ή άλλων λειτουργικών υλικών.

### *1.6 Μελλοντική εξέλιξη*

Η εν λόγω ανασκόπηση επεσήμανε τις δυνατότητες της προσθετικής κατασκευής η οποία είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την παραγωγή πολύπλοκων γεωμετριών. Η περαιτέρω έρευνα μπορεί να επικεντρωθεί στα ακόλουθα:

1. Οι ταχύτεροι υπολογιστές, τα πολύπλοκα συστήματα ελέγχου και τα βελτιωμένα υλικά θα αποτελέσουν το μέλλον των συστημάτων AM για να μείωση του χρόνου κατασκευής.
2. Η ακρίβεια των τεμαχίων και το φινίρισμα της επιφάνειας μπορούν να βελτιωθούν και μπορούν να επιτευχθούν με την κατασκευή καλύτερων οπτικών λέιζερ και ελέγχου της μηχανής.
3. Εισαγωγή στα μη πολυμερή υλικά, συμπεριλαμβανομένων των μετάλλων, των κεραμικών και επιπλέον των σύνθετων υλικών καταδεικνύει τις πολυαναμενόμενες εξελίξεις στο AM. Επιπλέον, τα μέταλλα και τα σύνθετα υλικά θα επεκτείνουν σημαντικά το πεδίο εφαρμογής των προϊόντων που μπορούν να κατασκευαστούν με AM.

4. Επί του παρόντος οι περισσότερες μηχανές AM περιορίζονται σε αντικείμενα 0,125 κυβικών μέτρων ή λιγότερο και στοχεύουν να την άμεση κατασκευή μεγάλων μεταλλικών εξαρτημάτων με τη χρήση ρομποτικά καθοδηγούμενων λέιζερ.
5. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας στην AM βρέθηκε να είναι περιορισμένη και πρέπει να βρεθεί η κατάλληλη τεχνική βελτιστοποίησης για βελτιστοποίησης των παραμέτρων της διαδικασίας για την απόκτηση λεπτής δομής, λιγότερο πορώδες και βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.
6. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες ήπιας υπολογιστικής για τον προσδιορισμό της ποιότητας του τεμαχίου που κατασκευάζεται με προσθετική κατασκευή.

## 2. Θεωρία Στρέψης

### 2.1 Γενικά

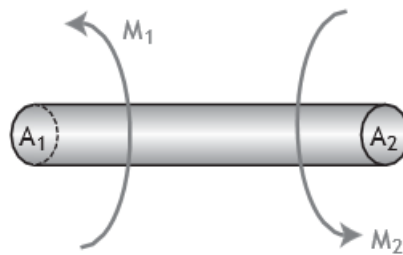
Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η καταπόνηση της στρέψεως. Συγκεκριμένα, δίνεται ο ορισμός της, παρουσιάζεται ξεχωριστά οι περιπτώσεις της στρέψεως σε δοκό κυκλικής και μη κυκλικής διατομής, όπως η ορθογωνική που είναι περισσότερο ενδιαφέρουσα στην παρούσα εργασία.

Ας θεωρηθεί η ράβδος του σχήματος 9. Στη διατομή  $A_1$  της ράβδου ενεργεί ροπή  $M_1$ , ενώ στη διατομή  $A_2$  ροπή  $M_2$  και μάλιστα η ροπή  $M_2$  είναι ίση με τη  $M_1$ , αλλά αντίθετης φοράς. Η ροπή  $M_1$  τείνει να περιστρέψει τη διατομή  $A_1$  της ράβδου κατά τη φορά που δείχνει το σχετικό βέλος στο σχήμα, ενώ η ροπή  $M_2$  τείνει να περιστρέψει τη διατομή  $A_2$  της ράβδου κατά την αντίθετη φορά. Στην κατάσταση αυτή η ράβδος λέμε ότι καταπονείται σε στρέψη.

Γενικότερα, ένα στερεό σώμα λέμε ότι καταπονείται σε στρέψη όταν σε δύο διατομές κάθετες στον άξονα του σώματος ενεργούν δύο ροπές ίσες αλλά αντίθετης φοράς.

Η καταπόνηση της στρέψεως παρατηρείται σε πάρα πολλές περιπτώσεις στην καθημερινή μας ζωή. Χαρακτηριστικά παραδείγματα στερεών σωμάτων που καταπονούνται σε στρέψη είναι τα ημιαξόνια των αυτοκινήτων, ο κορμός του κατσαβιδιού κατά την περιστροφή μιας βίδας, ο άξονας ενός ηλεκτροκινητήρα κ.λπ..

Επίσης, στην καθημερινή μας ζωή η καταπόνηση της στρέψεως εμφανίζεται πολλές φορές ταυτοχρόνως με άλλες καταπονήσεις, όπως με κάμψη, θλίψη ή εφελκυσμό. Χαρακτηριστικά αναφέρομε το παράδειγμα των δύο ατράκτων με γρανάζια.



**Σχήμα 9:** Ράβδος που καταπονείται σε στρέψη (Νικολάου Δ. Γαλιατσατου, 2016).

Απλό παράδειγμα στρέψης έχουμε όταν γίνεται προσπάθεια με ένα κατσαβίδι να βιδωθεί μια βίδα. Αν φανταστούμε ότι η βίδα δεν “στρίβει” (π.χ. επειδή έχει “τερματίσει”, έχει φθάσει στο τέλος της) αλλά εμείς καταβάλλουμε προσπάθεια να στρίψουμε τη λαβή του κατσαβιδιού, τότε στην πραγματικότητα καταπονείται όλο το κατσαβίδι σε στρέψη (το ίδιο συμβαίνει και όταν η βίδα στρίβει σχετικά δύσκολα, με

μόνη διαφορά ότι η ροπή στρέψης που επιβάλλουμε είναι μικρότερη απ' ότι στην περίπτωση που το άκρο του κατσαβιδιού δεν στρίβει).

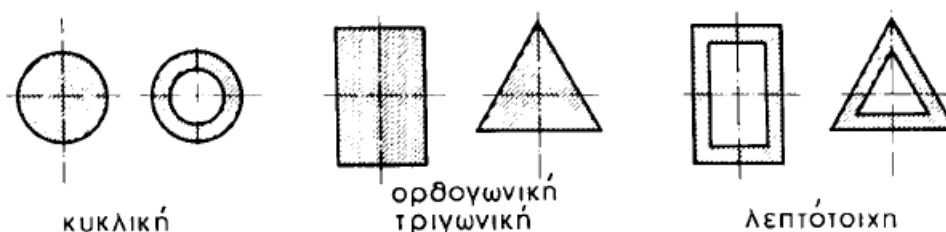
• Επειδή η πραγματική κατανομή των τάσεων υπό την επίδραση ενός δεδομένου φορτίου είναι υπερστατική και συνεπώς η ανάλυση είναι πολύπλοκη μία απλή θεωρία βασίζεται στις εξής απλές παραδοχές:

1. Το υλικό είναι ομογενές και γραμμικά ελαστικό
2. Οι κυκλικές διατομές παραμένουν κυκλικές κατά την στρέψη
3. Οι κυκλικές διατομές παραμένουν επίπεδες κατά την στρέψη
4. Οι κυκλικές διατομές περιστρέφονται σαν στερεοί δίσκοι.

Οι παραδοχές αυτές επαληθεύονται πειραματικά όχι για άξονες με τυχαία διατομή αλλά μόνο για άξονες με κυκλική διατομή.

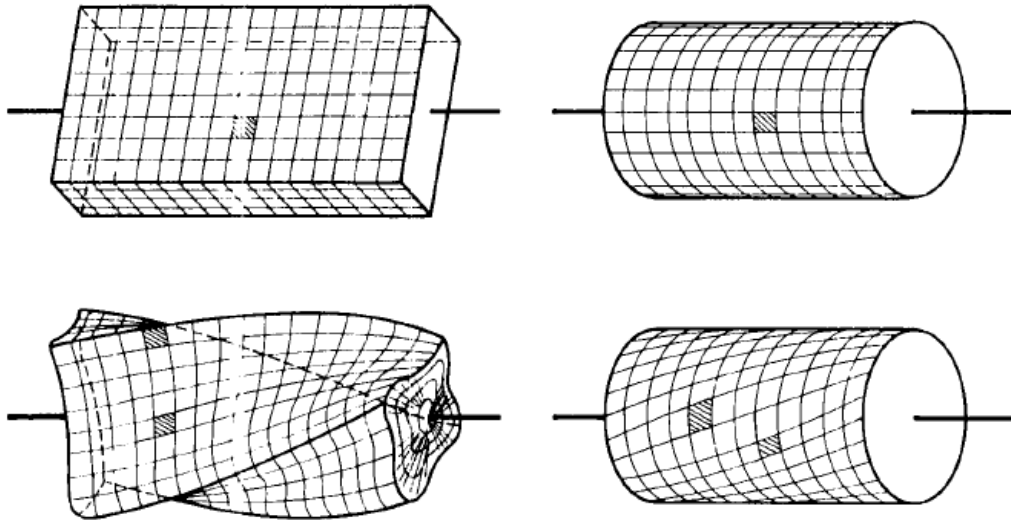
## 2.2 Ιδιομορφία της στρέψης – Διατομές

Τα προβλήματα της στρέψεως δεν είναι τόσο απλά στην επίλυση τους, σε σχέση με τις καταπονήσεις εφελκυσμού, θλίψεως, κάμψης, τμήσης και διάτμησης. Η διαφορά της στρέψης με τις υπόλοιπες καταπονήσεις, είναι το γεγονός πως οι τύποι που καθορίζουν τις τάσεις και τις παραμορφώσεις δεν είναι ανεξάρτητοι από την μορφή της διατομής. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να βλέπουμε χωριστά τις ακόλουθες περιπτώσεις διατομών, δηλαδή την κυκλική, την ορθογωνική - τριγωνική και την λεπτότοιχη (Σχήμα 10).



**Σχήμα 10:** Τα τρία βασικά είδη διατομών που μελετούνται σε στρέψη.

Η διάκριση αυτή είναι αναγκαία, διότι μόνο οι κυκλικές ή δακτυλιοειδής διατομές στρεφόμενων ράβδων μένουν επίπεδες, δηλαδή όλα τα σημεία τους κινούνται κατά την τη στροφή της ράβδου σε κύκλους κάθετους στον άξονα στροφής. Αντίθετα στις ορθογωνικές διατομές τα σημεία τους κινούνται όχι μόνο κάθετα, αλλά και παράλληλα στον άξονα της ράβδου (Σχήμα 11).



**Σχήμα 11:** Η κίνηση των σημείων της ράβδου ανάλογα την μορφή της διατομής (Γκρος, 2002).

Στην δική μας περίπτωση που θα μελετηθεί η ορθογωνική διατομή, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες σχέσεις:

- $$\tau = \frac{T}{c_1 ab^2} \quad (1)$$

- $$\gamma = \frac{C_2 b \phi}{C_1 L} \quad (2)$$

όπου,  $T$  είναι το μέγεθος της εφαρμοζόμενης ροπής (Nm),  $a$  είναι το μέτρο της μεγαλύτερης πλευράς του ορθογώνιου δοκιμίου σε μέτρα (m),  $b$  είναι το μέτρο της στενότερης πλευράς του διατομής σε μέτρα (m),  $L$  είναι το μήκος του δοκιμίου (m) και  $C_1$  και  $C_2$  είναι ο συντελεστές που σχετίζονται με τον λόγο  $a/b$  που προκύπτει από τον πίνακα 1 και  $\phi$  είναι το γωνία συστροφής.

$a/b$	$c_1$	$c_2$
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
$\infty$	0.333	0.333

**Πίνακας 1:** Συντελεστές για ορθογώνιες ράβδους σε στρέψη (Cesar Omar Balderrama-Armendariz, 2018).

### 3. Μεθοδολογία εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, σύμφωνα με την καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή μου, πραγματοποιήθηκε ενδεδειγμένη έρευνα ανάμεσα σε εκατοντάδες επιστημονικά άρθρα και έρευνες, έτσι ώστε να ανακαλυφθούν πιθανά κενά ή ελείψεις στην μελέτη των προσθετικών κατασκευών και στις μηχανικές ιδιότητες αυτών. Ύστερα από την απαιτητική αυτή διαδικασία, έγινε αντιληπτό πως ελάχιστα ως και καθόλου δεν έχει μελετηθεί η δοκιμή σε στρέψη, δοκιμίων κατασκευασμένα σύμφωνα με την μέθοδο SLA προσθετικής κατασκευής.

Εν συνεχεία, επιτακτική ήταν η ανάγκη για την εύρεση των κατάλληλων προτύπων κατά ASTM ή ISO, ικανά για να οδηγήσουν στην ορθή και εμπειριστατωμένη πραγματοποίηση των αναγκαίων πειραματικών διαδικασιών, όπως η σχεδίαση, η εκτύπωση και η δοκιμή σε στρέψη των τελικών δοκιμίων. Το στάδιο αυτό της έρευνας ήταν ίσως από τα δυσκολότερα, λόγω της μη ικανοποιητικής επιστημονικής μελέτης στα θέματα των προσθετικών κατασκευών, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα το να μην υπάρχουν πρότυπα που θα περιγράφουν πλήρως όλα όσα προαναφέραμε.

Εφόσον ολοκληρώθηκε η εύρεση προτύπων, με την βοήθεια των μεθόδων Taguchi πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός πειραμάτων, σύμφωνα με τον οποίο, αφού πρώτα σχεδιάστηκαν, στην συνέχεια εκτυπώθηκαν και επεξεργάστηκαν τα δοκίμια. Στην διαδικασία αυτή υπήρξαν και κάποιες αποτυχημένες προσπάθειες εκτύπωσης, όπου εφόσον έγινε αντιληπτό σύντομα το λάθος, δεν προέκυψε κάποια αστοχία στην συνέχεια των εκτυπώσεων. Τα SLA δοκίμια μας χρειάστηκαν και μια περαιτέρω επεξεργασία σε ειδικό UV curing, όπου ο χρόνος που θα παρέμεναν σε αυτό, καθορίστηκαν από τον σχεδιασμό πειραμάτων που προαναφέρθηκε.

Μετά το πέρας των εκτυπώσεων, τα δοκίμια οδηγήθηκαν στην αίθουσα του εργαστηρίου της αντοχής υλικών. Εκεί με την επίβλεψη και την καθοδήγηση του κυρίου Παπαγεωργίου Δημήτριου, τοποθετήθηκαν και τα 27 δοκίμια στην μηχανή της στρέψης. Δοκιμάζοντας τα σε στρέψη, πάρθηκαν μετρήσεις, σύμφωνα με τις οποίες θα εξαχθούν συμπεράσματα στο τέλος της διπλωματικής εργασίας. Η διαδικασία αυτή κύλισε ομαλά, χωρίς τυχόν αστοχίες.

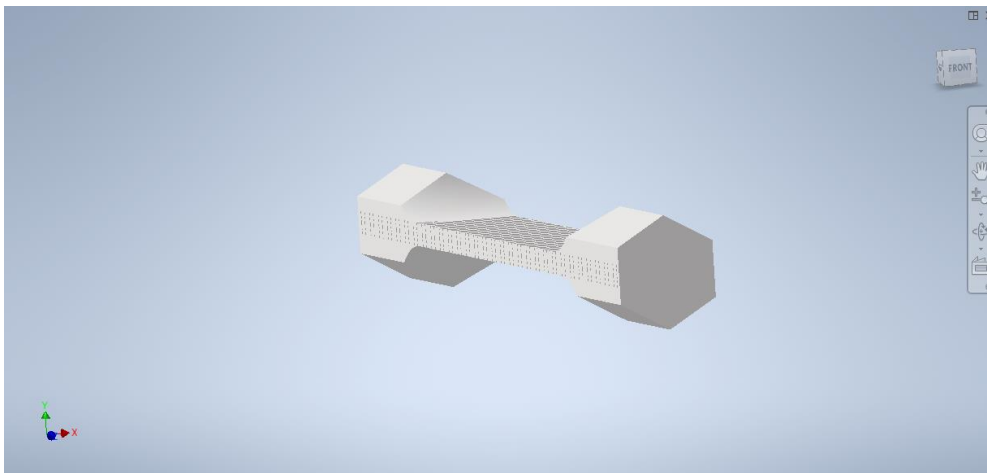


## 4. Πειραματικό Μέρος

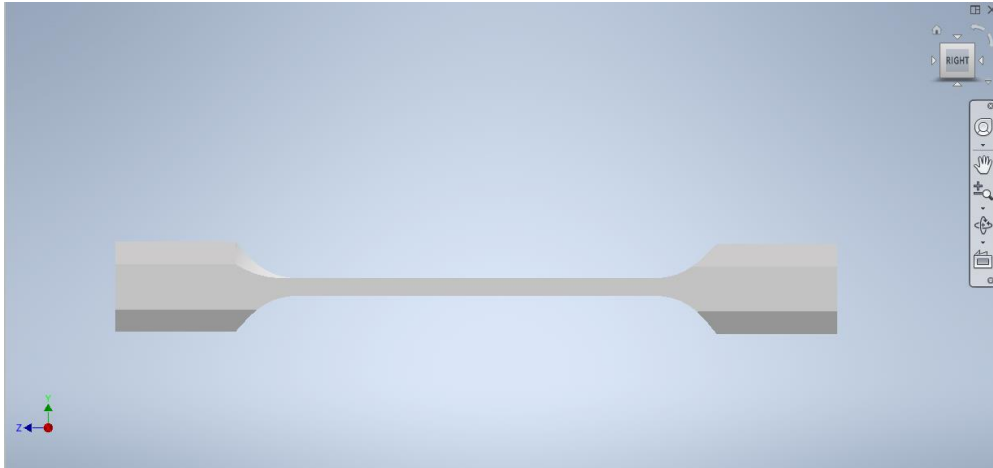
### 4.1 Το δοκίμιο – Διαστάσεις και σχεδιασμός

Μετά από μακρά έρευνα σε επιστημονικά άρθρα περιοδικών, υπήρξε τελική επιλογή προτύπων που θα αποτελέσουν την βάση για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής. Τα **πρότυπα** που θα χρησιμοποιήσουμε, είναι το ASTM D-5279-1 και το ISO 18338-2015-6. Από το πρώτο πρότυπο κατά ASTM θα χρησιμοποιηθούν οι διαστάσεις για το ορθογωνικό μας δοκίμιο αλλά και οι συνθήκες κατά τις οποίες θα προσαρμοστεί το δοκίμιο πάνω στην μηχανή στρέψης, όπως για παράδειγμα οι εξαγωνικές λαβές στις οποίες θα εισέλθει και θα συγκρατηθεί. Σε αυτό συμπεριλαμβάνονται οι απαραίτητες ρυθμίσεις της μηχανής στρέψης, οι συνθήκες του περιβάλλοντος αλλά και ο τρόπος φόρτισης και άσκησης των δυνάμεων πάνω στο δοκίμιο. Από το δεύτερο πρότυπο κατά ISO θα χρησιμοποιηθεί το τυπολόγιο για τους αναγκαίους υπολογισμούς μετά το πέρας των δοκιμών στρέψης, έτσι ώστε να εξαχθούν τα αναγκαία συμπεράσματα.

Σύμφωνα με τα δεδομένα από τα πρότυπα, ξεκίνησε ο **σχεδιασμός** του δοκιμίου με την βοήθεια του Autodesk Inventor.



**Εικόνα 2:** Σχεδιασμός και απεικόνιση του δοκιμίου σε περιβάλλον Autodesk Inventor.



**Εικόνα 3:** Σχεδιασμός και απεικόνιση του δοκιμίου σε περιβάλλον Autodesk Inventor.

Στη συνέχεια, το CAD αρχείο μας μπορεί να εξαχθεί σε μορφή STL και, στη συνέχεια, να περάσει από έναν αναλυτή που το "τεμαχίζει" για να δημιουργήσει, για παράδειγμα, έναν GCode που είναι κατανοητό από 3D εκτυπωτή και έτσι ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν οι στρώσεις μέχρι να ολοκληρωθεί το κομμάτι. Γενικά, **αρχείο STL** είναι ένα αρχείο που χρειάζεται το πρόγραμμα οδήγησης του τρισδιάστατου εκτυπωτή, δηλαδή για να μπορεί το υλικό του εκτυπωτή να εκτυπώσει το επιθυμητό σχήμα, με άλλα λόγια, επιτρέπει την κωδικοποίηση της γεωμετρίας της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου.

Έχοντας έτοιμο το δοκίμιο, σχεδιασμένο και ικανό να εκτυπωθεί, έπρεπε να πραγματοποιηθεί ο **σχεδιασμός των πειραμάτων**. Για να μην χρειαστεί να φτιαχτούν εκατοντάδες δοκίμια για όλες τις περιπτώσεις που πρέπει να μελετηθούν, θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος **Taguchi Orthogonal Array**, έτσι ώστε να γίνουν τα αναγκαία και ικανά, για να βγουν συμπεράσματα, πειράματα. Η μέθοδος χρησιμοποιεί μια ορθογώνια συστοιχία η οποία αποδεδειγμένα μειώνει τον αριθμό των δοκιμαστικών συνθηκών που πρέπει να δοκιμαστούν για να προσδιοριστεί η καλύτερη συνδυασμός των ρυθμίσεων των παραμέτρων (M. Rajesh, 2021). Η μελέτη θα γίνει όσον αφορά, την κατεύθυνση εκτύπωσης του δοκιμίου, τον χρόνο και την ένταση του «ψησίματος» μέσα στον ειδικό φούρνο. Ο ακόλουθος πίνακας οδήγησε στα πειράματα που έγιναν:

N/A	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Πάχος Layer (mm)
1	X	UV1	UT1	0,1
2	X	UV2	UT2	0,1
3	X	UV3	UT3	0,1
4	Y	UV1	UT2	0,1
5	Y	UV2	UT3	0,1
6	Y	UV3	UT1	0,1
7	Z	UV1	UT3	0,1
8	Z	UV2	UT1	0,1
9	Z	UV3	UT2	0,1

**Πίνακας 2:** Σχεδιασμός πειραμάτων.

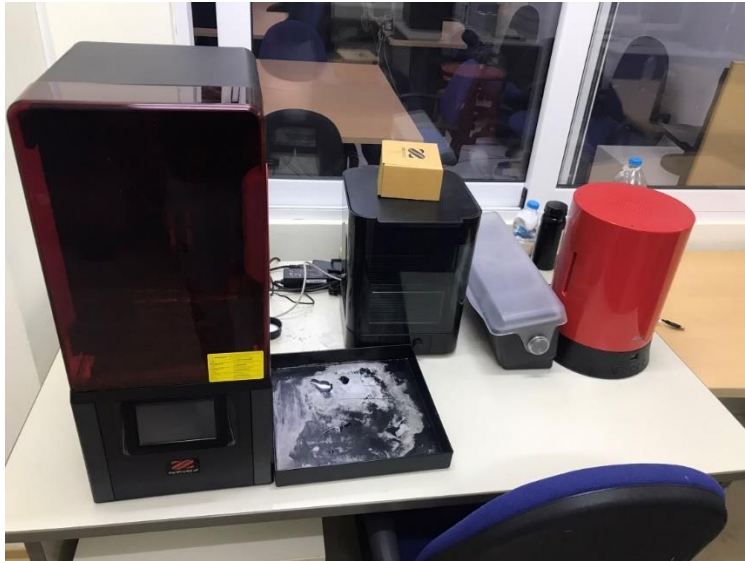
Όπου:

- Factor1 είναι οι διεύθυνση εκτύπωσης των δοκιμίων.
- Factor2 είναι ο χρόνος (time) που θα μείνει το δοκίμιο μέσα στον φούρνο με UV1=5min , UV2=10min και UV3=15min.
- Factor3 είναι η ένταση (power) του φούρνου με UT1=1 , UT2=2, UT3=3.

#### 4.2 Διαδικασία εκτύπωσης ανά περίπτωση

##### Ο εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός αποτελείται από τον εκτυπωτή XYZ Part pro 150xp (στα αριστερά της εικόνας 4), το UV curing (δεξιά της εικόνας 4) όπου τα δοκίμια δεχόντουσαν θερμική επεξεργασία ακριβώς μετά το τέλος της εκτύπωσης, αφού πρώτα έχουν καθαριστεί σχολαστικά με ισοπροπυλική αλκοόλη (εικόνα 6). Η ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε είναι η ProBasic CLR της XYZ (εικόνα 7). Η ρητίνη ProBasic είναι ένα προσιτό, τυποποιημένο υλικό, κατάλληλο για γενική χρήση. Λόγω της μέτριας σκληρότητάς της, η ρητίνη αυτή χρησιμοποιείται συχνά για μηχανολογικά πρωτότυπα, παραγωγή μοντέλων κ.λπ. Υπάρχει μια ποικιλία χρωμάτων για να ικανοποιήσει τις διαφορετικές ανάγκες των εφαρμογών, αλλά σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η CLR (διαφανή). Όσον αφορά τον εκτυπωτή, ο PartPro150 xP είναι ένας προσιτός SLA 3D printer γραφείου ο οποίος παράγει υψηλής ποιότητας κομμάτια, χρησιμοποιώντας μια ευρεία γκάμα υλικών. Με μέγιστη επιφάνεια εκτύπωσης 150 x 150 x 200 mm και ανάλυση 130 μικρών στους άξονες X/Y, ο PartPro150 xP, είναι ένας SLA εκτυπωτής ιδανικός για την παραγωγή κομματιών τα οποία απαιτούν υψηλή ακρίβεια και λείες επιφάνειες



**Εικόνα 4:** Ο 3D εκτυπωτής (αριστερά), το δοχείο καθαρισμού του δοκιμίου (δίπλα στην εκτυπωτή) και το UV curing (αριστερά).



**Εικόνα 5:** Το εσωτερικό του 3D εκτυπωτή. Χαμηλά βρίσκεται το δοχείο όπου εισέρχεται η αναγκαία ποσότητα από το μπουκάλι της ρητίνης (δεξιά στο βάθος του εκτυπωτή). Ψηλά βρίσκεται η πλάκα εκτύπωσης όπου δημιουργούνται τα δοκίμια.

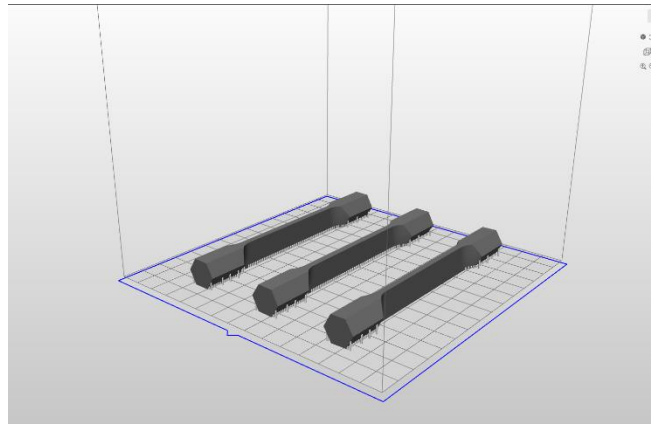


**Εικόνα 6:** Η ισοπροπυλική αλκοόλη.



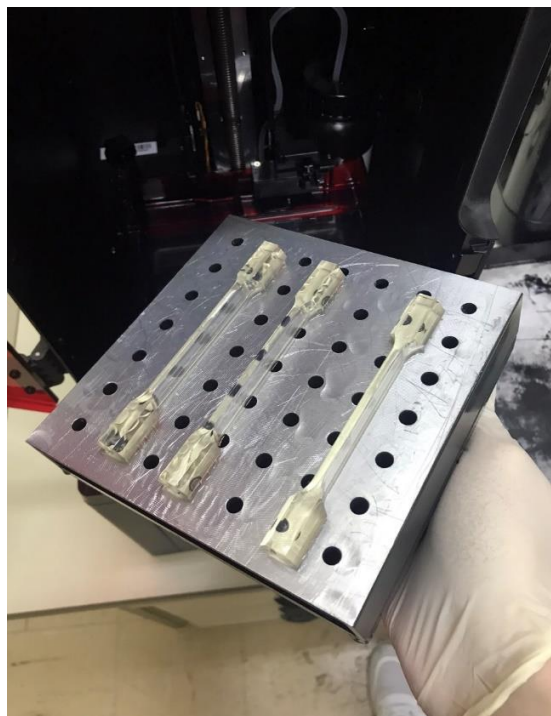
**Εικόνα 7:** Το μπουκάλι όπου περιέχεται η ρητίνη από τον κατασκευαστή.

Σε αυτό το σημείο θα προβληθούν τα προσχέδια των εκτυπώσεων μέσω του προγράμματος 3d εκτύπωσης XYZprint AMUV αλλά και από τα τελικά αποτελέσματα των δοκιμών.

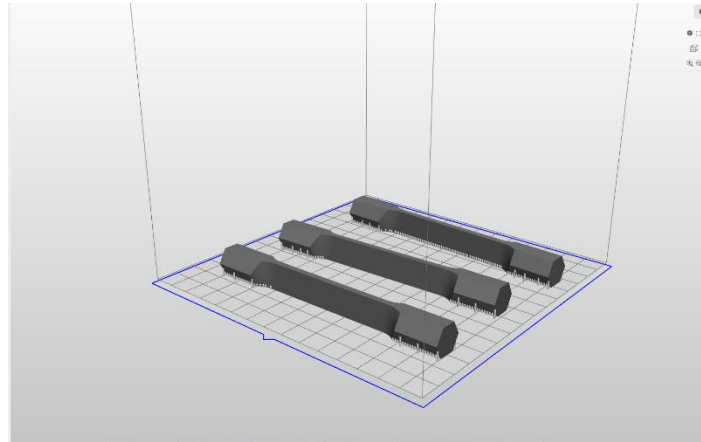


**Εικόνα 8:** Τα δοκίμια τοποθετημένα κατά τον άξονα x.

Στο παραπάνω στιγμιότυπο από του περιβάλλοντος XYZ print AMUV παρατηρούνται τις αναγκαίες στηρίξεις μεταξύ δοκιμίου και επιφάνειας εκτύπωσης.



**Εικόνα 9:** Τα δοκίμια εκτυπωμένα κατά τον άξονα x.

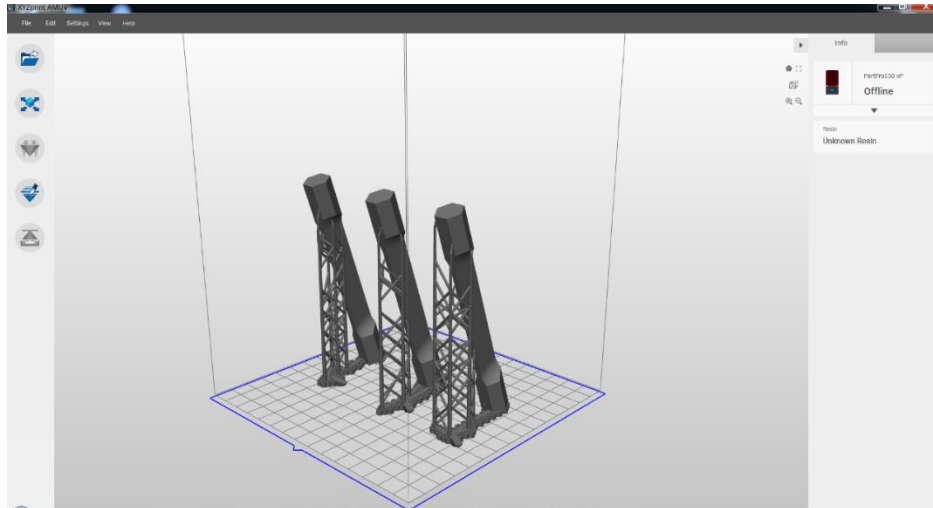


**Εικόνα 10:** Τα δοκίμια τοποθετημένα κατά τον άξονα  $y$ .

Ομοίως με πριν, παρατηρούνται οι αναγκαίες στηρίξεις μεταξύ δοκιμίου και επιφάνειας εκτύπωσης.

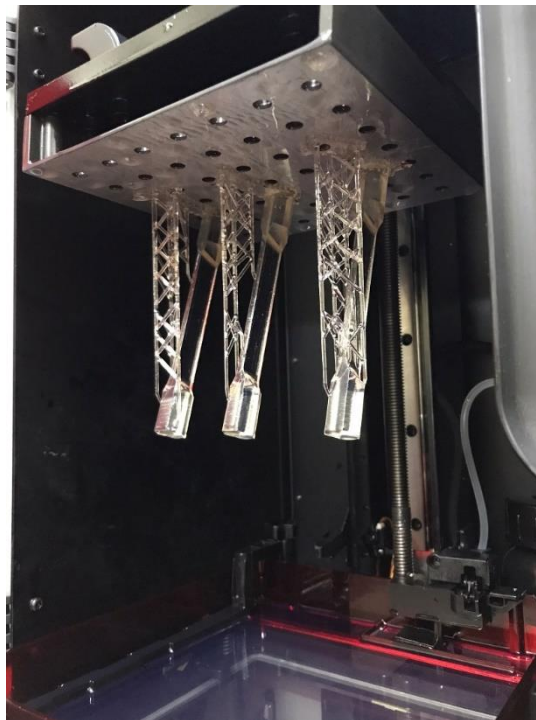


**Εικόνα 11:** Δοκίμιο εκτυπωμένο κατά τον άξονα  $y$ .



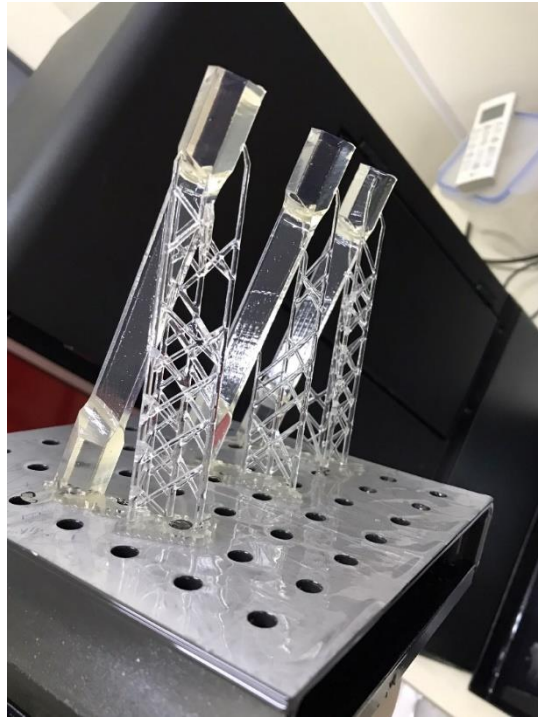
**Εικόνα 12:** Τα δοκίμια τοποθετημένα κατά τον άξονα z.

Παρατηρείται ότι τα παραπάνω δοκίμια τοποθετήθηκαν κατά μία μικρή κλίση, και όχι ακριβώς κατά τον άξονα z, διότι πέραν από το γεγονός πως οι εκτυπώσεις θα ήταν αρκετά πιο χρονοβόρες (8-9 ώρες ανά εκτύπωση), επιπλέον τα δοκίμια δεν θα είχαν ασφαλή και ισχυρή στήριξη πάνω στην πλάκα. Το γεγονός αυτό θα έφερνε την καταστροφή της εκτύπωσης.



**Εικόνα 13:** Τα δοκίμια μας εκτυπωμένα κατά τον άξονα z.





**Εικόνα 14:** Τα δοκίμια μας εκτυπωμένα κατά τον άξονα z.



**Εικόνα 15:** Δοκίμιο εκτυπωμένο κατά τον άξονα z.

Στο παραπάνω δοκίμιο παρατηρούνται υπολείμματα από τις στηρίξεις πάνω στην πλάκα εκτύπωσης που θα χρειαστούν να καθαριστούν με μία λίμα. Αξίζει να σημειωθεί πως οι στηρίξεις στις εκτυπώσεις στους άλλους άξονες δεν έφεραν υπολείμματα καθώς ήταν λεπτότερες και αποσπάστηκαν με ευκολία.

Τα δοκίμια, ανά τριάδες (ανά εκτύπωση) έμπαιναν στον φούρνο (UV curing), σύμφωνα με τον πίνακα 2 (μέθοδος Taguchi), δηλαδή για προκαθορισμένο χρόνο και ένταση.

Στην συνέχεια, εφόσον τα δοκίμια ολοκληρώθηκαν πλήρως, ακολούθησαν οι κατάλληλες μετρήσεις για να παρατηρηθεί το κατά πόσο πέτυχε η όλη διαδικασία. Μια διαδικασία χρονοβόρα αλλά αρκετά σημαντική για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Στην συνέχεια υπάρχουν 9 πίνακες (ένας για κάθε εκτύπωση), με τους αριθμούς 1,2,3 είναι η απόσταση της κάθε πλευράς του εξάγωνου με την απέναντι παράλληλη, με τους αριθμούς 4,5,6 είναι η απόσταση κάθε γωνίας του εξάγωνου με την αντίστοιχη της απέναντι και με τα γράμματα I, II, III είναι το κάθε δοκίμιο της αντίστοιχης εκτύπωσης.



**Εικόνα 16:** Το ιδιωτικό ψηφιακό παχύμετρο.

EKT. No 1	1	2	3	4	5	6	Πλάτος	Μήκος
I	13,03	13	13,07	14,97	15,1	15,05	119,93	3,02
II	12,96	13,08	13,02	14,98	15,03	14,98	120,06	3,01
III	12,95	12,98	12,96	15,05	15,01	15,04	120,04	3,06
Σύνολο	38,94	39,06	39,05	45	45,14	45,07	360,03	9,09
$\bar{x}$	12,98	13,02	13,01667	15	15,04667	15,02333	120,01	3,03
$(\bar{x} - x_i)^2$	0,0038	0,0056	0,006067	0,0038	0,004467	0,002867	0,0098	0,0014
$\pm\sigma(\bar{x})$	0,025166115	0,030551	0,031798	0,025166	0,027285	0,021858	0,040415	0,015275

**Πίνακας 3:** Πίνακας μετρήσεων διαστάσεων δοκιμίων εκτύπωσης no1.

EKT. No 2	1	2	3	4	5	6	Πλάτος	Μήκος
I	13,01	13	13,05	14,95	15,09	15,04	120,7	3,03
II	12,95	13,08	13,02	15,02	15,05	15	120,2	3,08
III	13,03	13,02	12,97	15,05	15,03	15,05	120,2	3,07
Σύνολο	38,99	39,1	39,04	45,02	45,17	45,09	361,1	9,18
$\bar{x}$	12,99666667	13,03333	13,01333	15,00667	15,05667	15,03	120,3667	3,06
$(\bar{x} - x_i)^2$	0,003466667	0,003467	0,003267	0,005267	0,001867	0,0014	0,166667	0,0014
$\pm\sigma(\bar{x})$	0,024037009	0,024037	0,023333	0,029627	0,017638	0,015275	0,166667	0,015275

**Πίνακας 4:** Πίνακας μετρήσεων διαστάσεων δοκιμίων εκτύπωσης no2.

EKT. No 3	1	2	3	4	5	6	Πλάτος	Μήκος
I	13,02	13,04	13	14,98	15,1	15,05	119,98	3,01
II	12,98	13,1	13,05	15,02	15,03	15,07	120,8	3,05
III	12,95	13,02	12,98	15,05	15,05	15,01	120,4	3,02
Σύνολο	38,95	39,16	39,03	45,05	45,18	45,13	361,18	9,08
$\bar{x}$	12,98333333	13,05333	13,01	15,01667	15,06	15,04333	120,3933	3,026667
$(\bar{x} - x_i)^2$	0,002466667	0,003467	0,0026	0,002467	0,0026	0,001867	0,336267	0,000867
$\pm\sigma(\bar{x})$	0,020275875	0,024037	0,020817	0,020276	0,020817	0,017638	0,236737	0,012019

**Πίνακας 5:** Πίνακας μετρήσεων διαστάσεων δοκιμίων εκτύπωσης no3.

EKT. No 4	1	2	3	4	5	6	Πλάτος	Μήκος
I	13,03	13	13,03	14,97	15,08	15,09	119,97	3,01
II	12,95	13,09	13,01	15	15,01	15,05	119,95	3,02
III	12,99	13,02	12,96	15,04	15,05	15,03	120	2,98
Σύνολο	38,97	39,11	39	45,01	45,14	45,17	359,92	9,01
$\bar{x}$	12,99	13,03667	13	15,00333	15,04667	15,05667	119,9733	3,003333
$(\bar{x} - x_i)^2$	0,0032	0,004467	0,0026	0,002467	0,002467	0,001867	0,001267	0,000867
$\pm\sigma(\bar{x})$	0,023094011	0,027285	0,020817	0,020276	0,020276	0,017638	0,01453	0,012019

**Πίνακας 6:** Πίνακας μετρήσεων διαστάσεων δοκιμίων εκτύπωσης no4.

EKT. No 5	1	2	3	4	5	6	Πλάτος	Μήκος
I	13,04	12,98	13,03	15,1	15,09	15,11	120,01	2,97
II	12,98	13,02	13	15,03	15,04	15,01	120,07	3,01
III	12,95	13,02	12,97	15,01	15,05	15,03	119,97	3,02
Σύνολο	38,97	39,02	39	45,14	45,18	45,15	360,05	9
$\bar{x}$	12,99	13,00667	13	15,04667	15,06	15,05	120,0167	3
$(\bar{x} - x_i)^2$	0,0042	0,001067	0,0018	0,004467	0,0014	0,0056	0,005067	0,0014
$\pm\sigma(\bar{x})$	0,026457513	0,013333	0,017321	0,027285	0,015275	0,030551	0,029059	0,015275

**Πίνακας 7:** Πίνακας μετρήσεων διαστάσεων δοκιμίων εκτύπωσης no5.

EKT. No 6	1	2	3	4	5	6	Πλάτος	Μήκος
I	13,03	13	13,08	15,09	14,97	15,05	119,98	3,03
II	12,98	13,08	13	15,05	14,98	14,99	120,11	3
III	12,97	12,98	12,95	15,03	15,05	15,05	119,99	3,01
Σύνολο	38,98	39,06	39,03	45,17	45	45,09	360,08	9,04
$\bar{x}$	12,99333333	13,02	13,01	15,05667	15	15,03	120,0267	3,013333
$(\bar{x} - x_i)^2$	0,002066667	0,0056	0,0086	0,001867	0,0038	0,0024	0,010467	0,000467
$\pm\sigma(\bar{x})$	0,018559215	0,030551	0,037859	0,017638	0,025166	0,02	0,041767	0,008819

**Πίνακας 8:** Πίνακας μετρήσεων διαστάσεων δοκιμίων εκτύπωσης πο6.

EKT. No 7	1	2	3	4	5	6	Πλάτος	Μήκος
I	13,1	13,01	13,02	14,95	15,05	15,04	119,92	3,1
II	13,02	13,08	12,95	15	14,98	15,1	119,9	3,15
III	12,96	13,04	13,03	15,05	15,04	15,03	119,95	3,1
Σύνολο	39,08	39,13	39	45	45,07	45,17	359,77	9,35
$\bar{x}$	13,02666667	13,04333	13	15	15,02333	15,05667	119,9233	3,116667
$(\bar{x} - x_i)^2$	0,009866667	0,002467	0,0038	0,005	0,002867	0,002867	0,001267	0,001667
$\pm\sigma(\bar{x})$	0,04055175	0,020276	0,025166	0,028868	0,021858	0,021858	0,01453	0,016667

**Πίνακας 9:** Πίνακας μετρήσεων διαστάσεων δοκιμίων εκτύπωσης πο7.

EKT. No 8	1	2	3	4	5	6	Πλάτος	Μήκος
I	13,04	12,98	13,03	14,95	15,12	14,94	119,93	3,11
II	12,98	13,06	13	15,01	15,06	15	120,06	3,02
III	12,95	13,01	12,94	15,03	15,05	15,04	120,04	3,09
Σύνολο	38,97	39,05	38,97	44,99	45,23	44,98	360,03	9,22
$\bar{x}$	12,99	13,01667	12,99	14,99667	15,07667	14,99333	120,01	3,073333
$(\bar{x} - x_i)^2$	0,0042	0,003267	0,0042	0,003467	0,002867	0,005067	0,0098	0,004467
$\pm\sigma(\bar{x})$	0,026457513	0,023333	0,026458	0,024037	0,021858	0,029059	0,040415	0,027285

**Πίνακας 10:** Πίνακας μετρήσεων διαστάσεων δοκιμίων εκτύπωσης πο8.

EKT. No 9	1	2	3	4	5	6	Πλάτος	Μήκος
I	13,02	13,01	13,1	15,04	15,1	14,97	119,93	3,02
II	12,98	12,95	13,02	15	15,05	14,98	120,04	3,06
III	12,95	13,03	12,97	15,05	15,02	15,05	120,07	2,98
Σύνολο	38,95	38,99	39,09	45,09	45,17	45	360,04	9,06
$\bar{x}$	12,98333333	12,99667	13,03	15,03	15,05667	15	120,0133	3,02
$(\bar{x} - x_i)^2$	0,002466667	0,003467	0,0086	0,0014	0,003267	0,0038	0,010867	0,0032
$\pm\sigma(\bar{x})$	0,020275875	0,024037	0,037859	0,015275	0,023333	0,025166	0,042557	0,023094

### **Πίνακας 11:** Πίνακας μετρήσεων διαστάσεων δοκιμίων εκτύπωσης no9.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, γίνεται αντιληπτό πως στο σύνολο των δοκιμίων, οι αποκλίσεις των μετρήσεων από τις επιθυμητές τιμές διαστάσεων είναι 0,01-0,04mm. Αυτό σημαίνει πως οι εκτυπώσεις είχαν ακρίβεια στα όρια του ανεκτού. Σε δύο μόνο περιπτώσεις υπάρχει απόκλιση της τάξεως του 0,1mm, το οποίο ίσως οφείλεται σε κάποιο αποτυχημένο φινίρισμα της επιφάνειας του δοκιμίου. Το πρόβλημα του φινιρίσματος της επιφάνειας είναι γνωστό για την μέθοδο SLA εκτύπωσης και μελλοντικός στόχος της επιστήμης των υλικών είναι η εξάλειψη του προβλήματος αυτού.

Για τους υπολογισμούς μας χρησιμοποιήσαμε τις ακόλουθες σχέσεις:

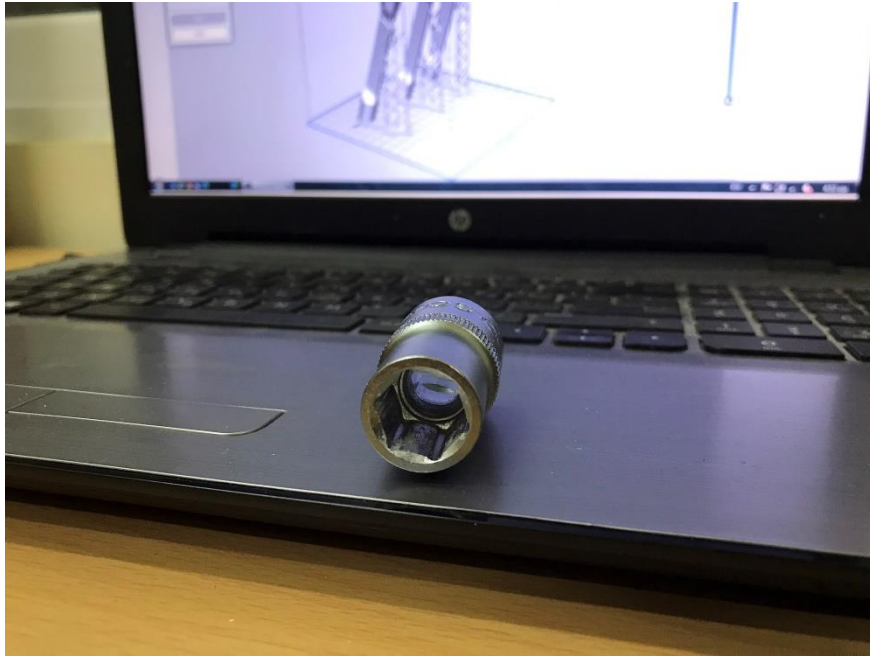
$$\bullet \quad \bar{x} = \frac{\sum xi}{v} \quad (3)$$

$$\bullet \quad \sigma(\bar{X}) = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x}-xi)^2}{v(v-1)}} \quad (4)$$

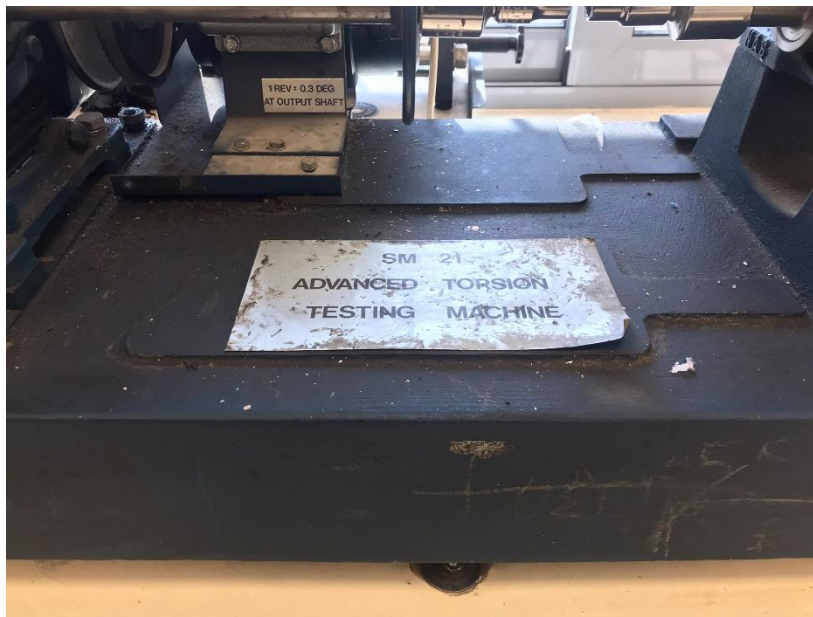
όπου  $v$  είναι ο αριθμός των δοκιμίων της κάθε εκτύπωσης.

#### *4.3 Δοκιμή σε στρέψη ανά περίπτωση και αποτελέσματα*

Το επόμενο και τελικό στάδιο είναι αυτό της δοκιμής των δοκιμίων σε στρέψη. Η μηχανή στρέψης που χρησιμοποιήσαμε είναι της εταιρίας TecQuipment με Serial Number 026 (εικόνα 18 και 19). Το εξαγωνικό καριδάκι που χρησιμοποιήθηκε για την συγκράτηση του δοκιμίου στην μηχανή είναι των 13mm της εικόνας 17.



**Εικόνα 17:** Το καρδιάκι συγκράτησης των 13mm.



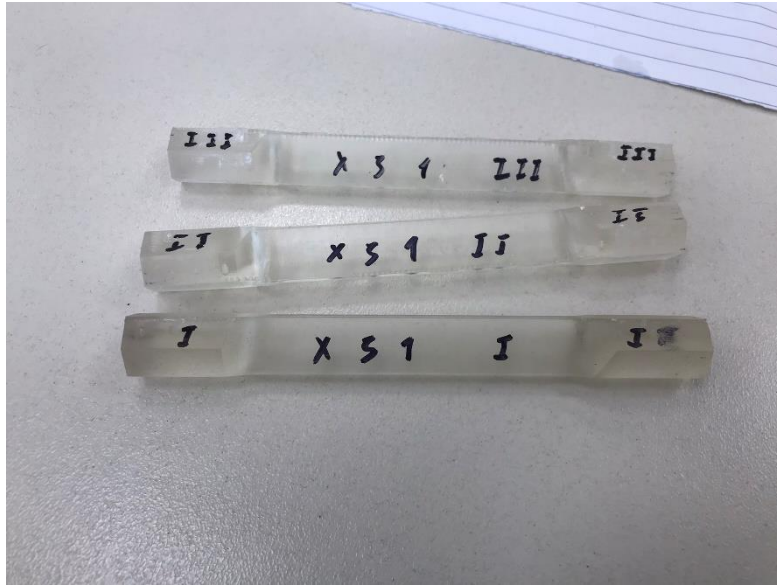
**Εικόνα 18:** Η μηχανή στρέψης.



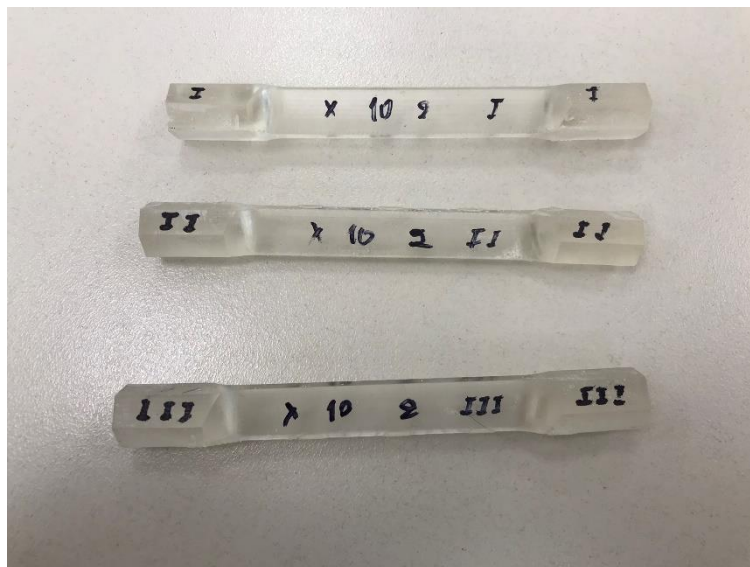
**Εικόνα 19:** Η μηχανή στρέψης.

#### *4.3.1 X άξονας*

Στο σημείο αυτό θα παρατεθούν εικόνες από τα δοκίμια κάθε εκτύπωσης (από την N/A 1 έως 9) πριν και μετά την θραύση τους. Ακόμα θα ακολουθήσουν διαγράμματα και σχολιασμοί από τις δοκιμές της στρέψης όλων των δοκιμίων.

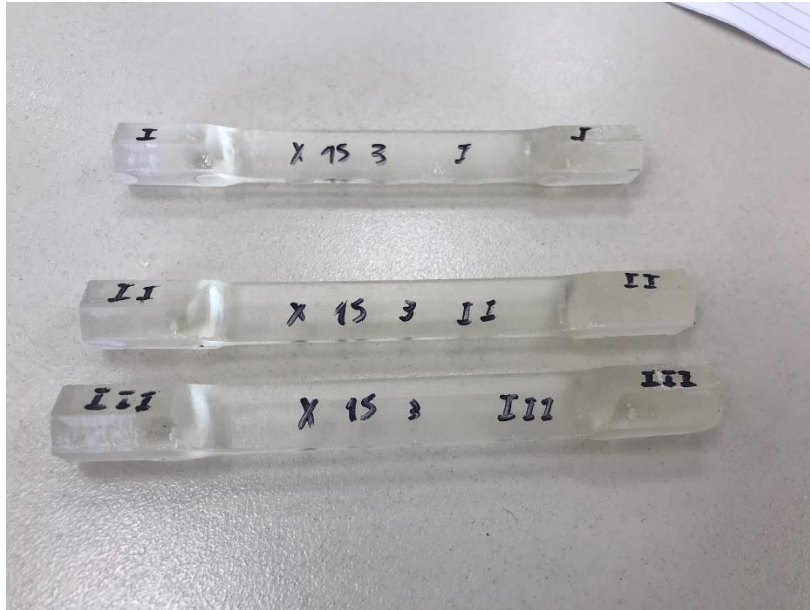


**Εικόνα 20:** Δοκίμια εκτύπωσης N/A:1



**Εικόνα 21:** Δοκίμια εκτύπωσης N/A:2

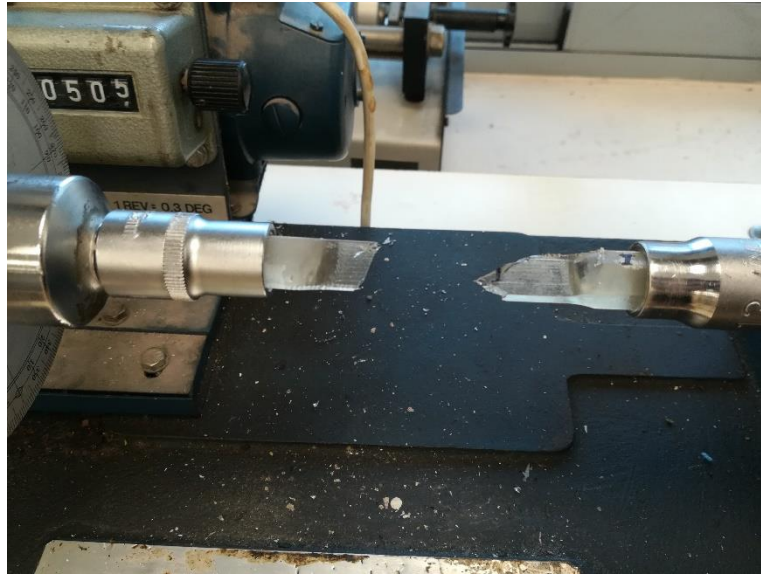




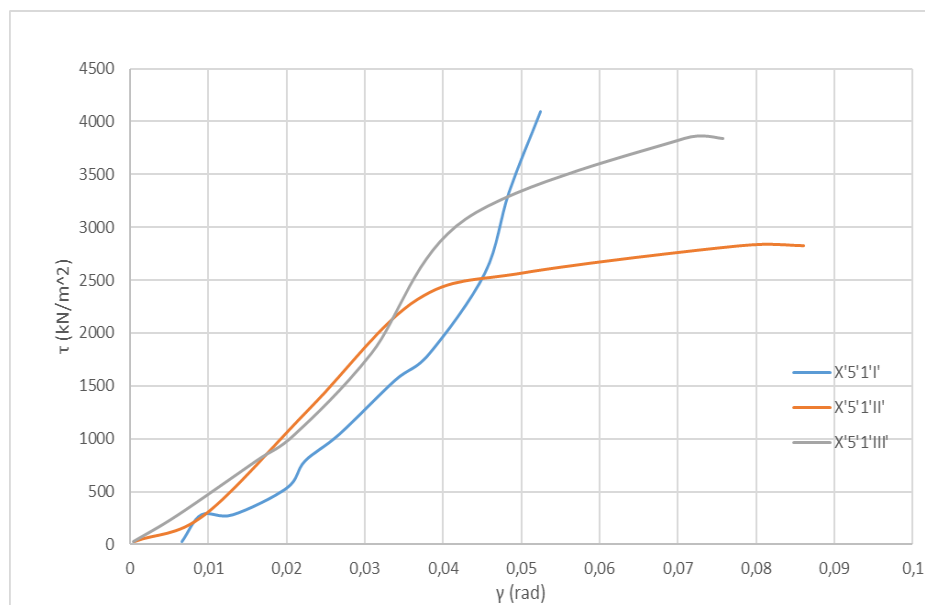
**Εικόνα 22:** Δοκίμια εκτύπωσης N/A:3



**Εικόνα 23:** Θραύση δοκιμίου.

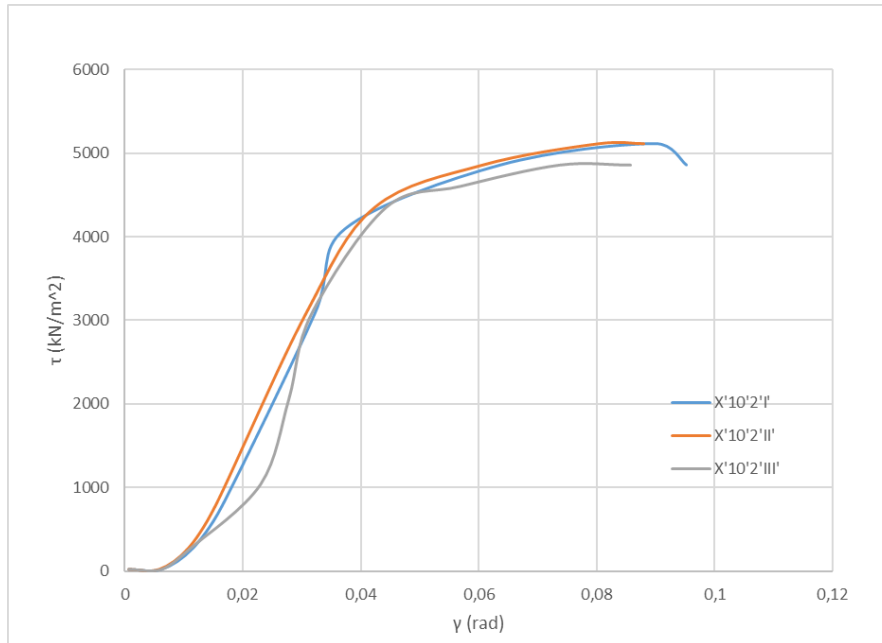


**Εικόνα 24:** Θραύση δοκιμίου.



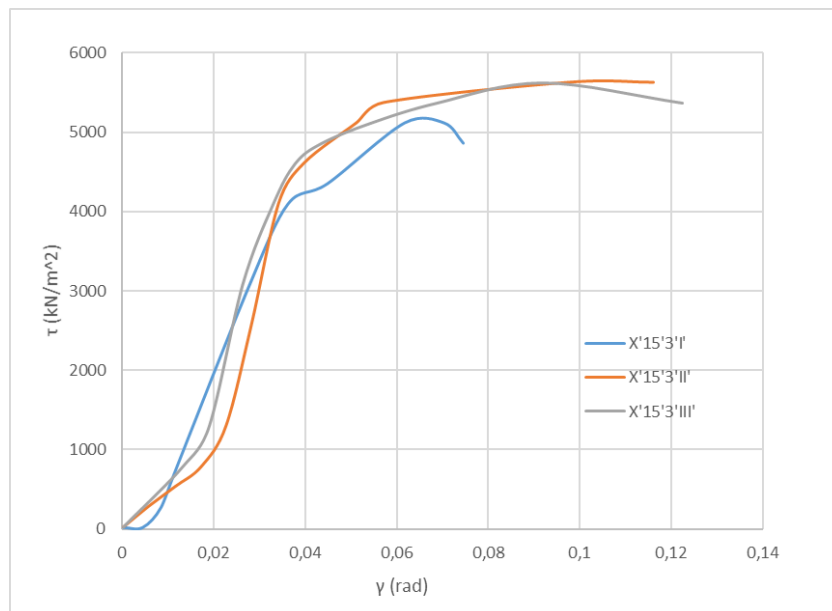
**Διάγραμμα 1:** Διάγραμμα τάσης  $\tau$  και γωνίας  $\gamma$  δοκιμίων εκτύπωσης N/A:1

Το δοκίμιο 'I' στο διάγραμμα 1, παρατηρείται πως είναι το λιγότερο όλκιμο σε σχέση με τα άλλα δυο δοκίμια της εκτύπωσης. Ακόμα, η θραύση του φαίνεται να επήλθε ακαριαία, χωρίς να υπάρξει μια σταθεροποίηση της τάσης πριν την στιγμή αυτή. Το δοκίμιο 'III' μπορεί να 'έσπασε' σε μεγαλύτερες τιμές τάσεως, αλλά αυτό έγινε σε λιγότερα rad σε σχέση με το δοκίμιο 'II', της τάξεως των 0,076 rad σε αντίθεση με τα 0,087 rad.



**Διάγραμμα 2:** Διάγραμμα τάσης  $\tau$  και γωνίας  $\gamma$  δοκιμίων εκτύπωσης N/A:2

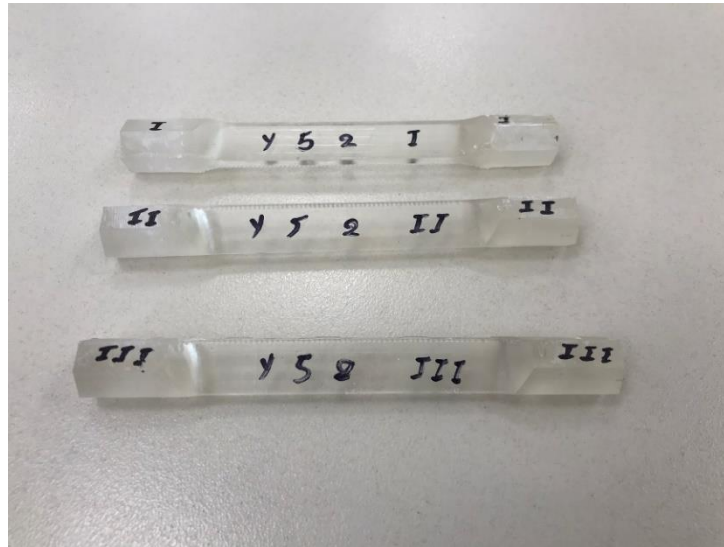
Στο παραπάνω διάγραμμα 2, παρατηρείται μια σχεδόν 'τέλεια' ταύτιση των καμπυλών και των τριών δοκιμίων. Η μόνη διαφορά που μπορεί να διακριθεί, είναι πως το δοκίμιο 'I' είναι οριακά πιο όλκιμο, διότι η θραύση έρχεται περίπου 0,009 rad αργότερα, στο ίδιο διάστημα τάσεων.



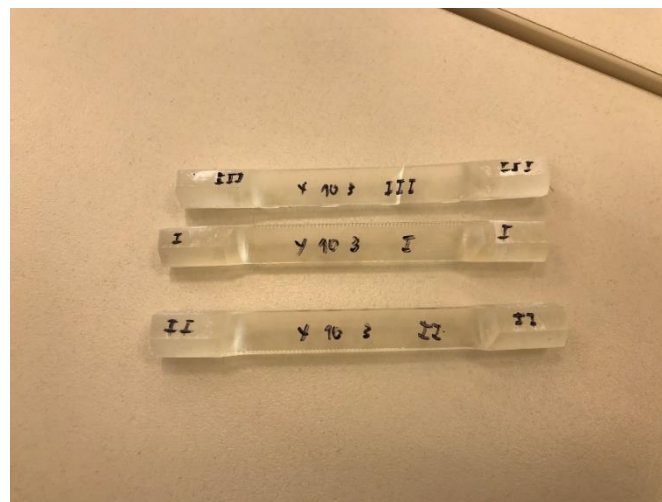
**Διάγραμμα 3:** Διάγραμμα τάσης  $\tau$  και γωνίας  $\gamma$  δοκιμίων εκτύπωσης N/A:3

Στο παραπάνω διάγραμμα 3 παρατηρείται ότι, τα δοκίμια 'II' και 'III' φτάνουν εξίσου σε τάση θραύσης της τάξεως των 5,5 MN/m<sup>2</sup> σε γωνία 0,118-0,122 rad. Το δοκίμιο 'I' μπορεί να φτάνει σε κοντινές τάσεις θραύσεως (0,5 MN/m<sup>2</sup> λιγότερο) άλλα η θραύση επήλθε σε πολύ μικρότερη γωνία (σχεδόν στα μισά rad), πράγμα που σημαίνει πως ήταν πιο ψαθηρό.

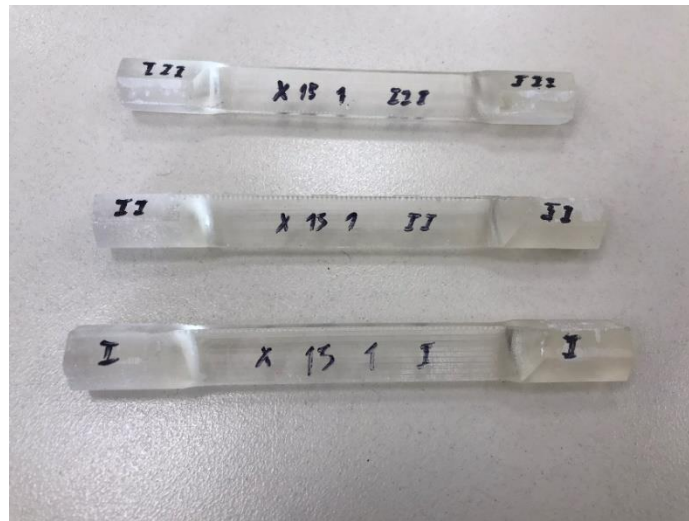
#### 4.3.2 Υ άξονας



Εικόνα 25: Δοκίμια εκτύπωσης N/A:4



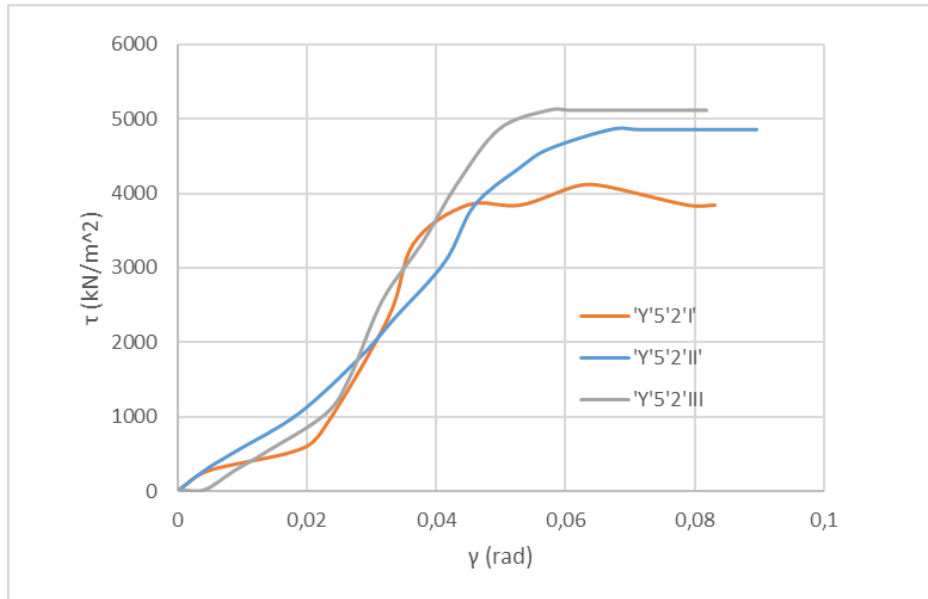
Εικόνα 26: Δοκίμια εκτύπωσης N/A:5



**Εικόνα 27:** Δοκίμια εκτύπωσης N/A:6

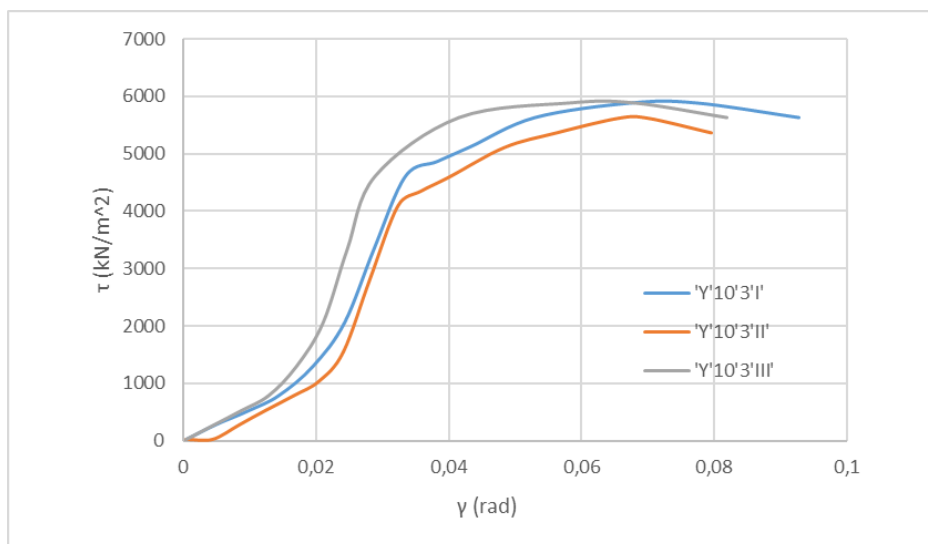


**Εικόνα 28:** Θραύση δοκιμίου.



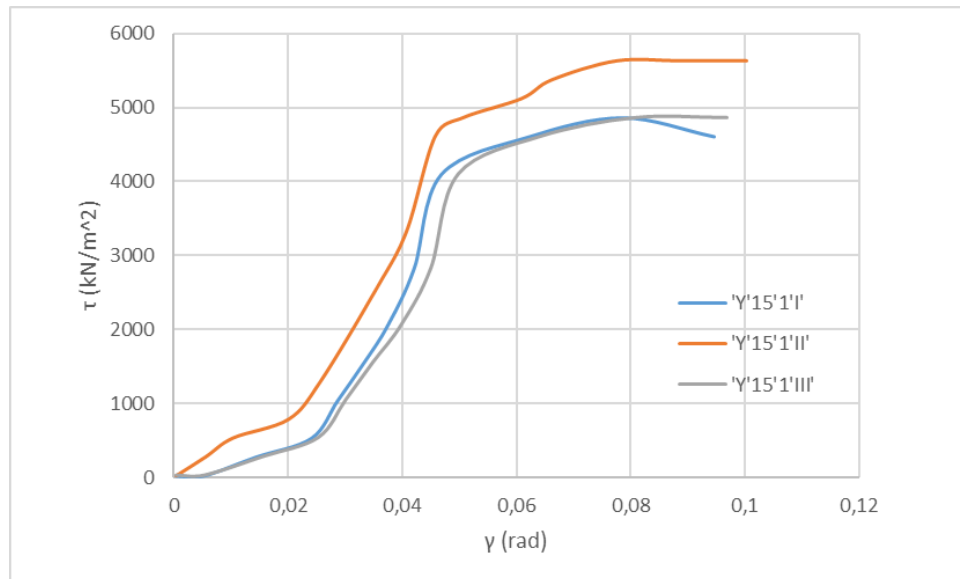
**Διάγραμμα 4:** Διάγραμμα τάσης  $\tau$  και γωνίας  $\gamma$  δοκιμίων εκτύπωσης N/A:4

Στο παραπάνω διάγραμμα 4, παρατηρείται ότι, τα δοκίμια 'II' και 'III' φτάνουν εξίσου σε τάση θραύσης της τάξεως των 5 MN/m<sup>2</sup> σε γωνία 0,081-0,09 rad. Το δοκίμιο 'I' φτάνει σε τάσεις θραύσεως 1 MN/m<sup>2</sup> λιγότερο και η θραύση επήλθε σε ίδιες γωνίες σχεδόν και για τα τρία δοκίμια. Συνεπώς το πρώτο δοκίμιο έχει μικρότερες αντοχές σε υψηλές τάσεις.



**Διάγραμμα 5:** Διάγραμμα τάσης  $\tau$  και γωνίας  $\gamma$  δοκιμίων εκτύπωσης N/A:5

Στο διάγραμμα 5, παρατηρείται ότι οι καμπύλες των τριών δοκιμίων έχουν ίδια ακριβώς μορφή με ελάχιστες διαφορές, πράγμα που σημαίνει πως τα δοκίμια είχαν παρόμοια συμπεριφορά. Τα δοκίμια 'I' και 'III' έχουν τάση θραύσεως στα 5,7 MN/m<sup>2</sup> και το δοκίμιο 'II' στα 5,4 MN/m<sup>2</sup>. Το 'II' και 'III' 'σπάνε' στα 0,08 rad ενώ το 'I' λίγο αργότερα στα 0,92 rad. Συνεπώς, με μικρές και όχι τόσο σημαντικές διαφορές, γίνεται αντιληπτό πως τα δοκίμια είναι εξίσου όλκιμα.



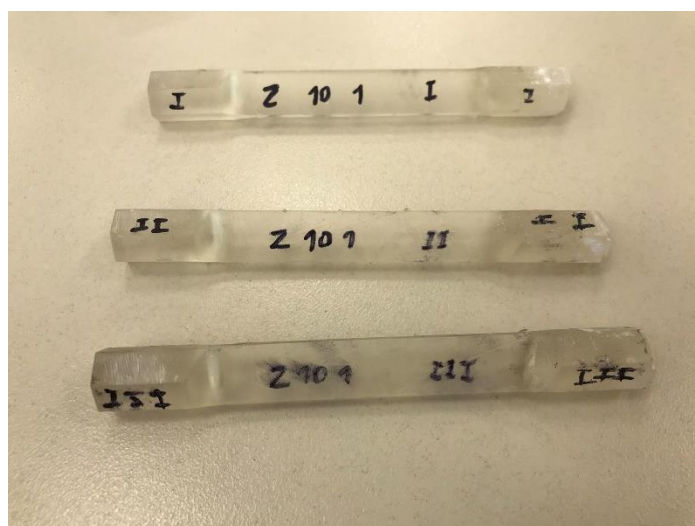
**Διάγραμμα 6:** Διάγραμμα τάσης τ και γωνίας γ δοκιμίων εκτύπωσης N/A:6

Και σε αυτό το διάγραμμα (διάγραμμα 6), παρατηρείται ότι οι καμπύλες των τριών δοκιμίων έχουν ίδια ακριβώς μορφή με ελάχιστες διαφορές, πράγμα που σημαίνει πως τα δοκίμια είχαν παρόμοια συμπεριφορά. Στα δοκίμια 'I' και 'III' γίνεται αντιληπτό πως οι καμπύλες τους σχεδόν ταυτίζονται, ενώ η θραύση τους επήλθε στην ίδια τάση (περίπου 0,1 MN/m<sup>2</sup> διαφορά), και στην ίδια γωνία. Το δοκίμιο 'II' έχει σαφώς μεγαλύτερες αντοχές σε φορτίσεις, 1MN/m<sup>2</sup> περισσότερο από τα άλλα δυο δοκίμια. Η θραύση του έγινε στα 0,1 rad, ελάχιστα περισσότερο από τα άλλα δύο δοκίμια (0,002 rad πιο μετά).

### 4.3.3 Ζ άξονας

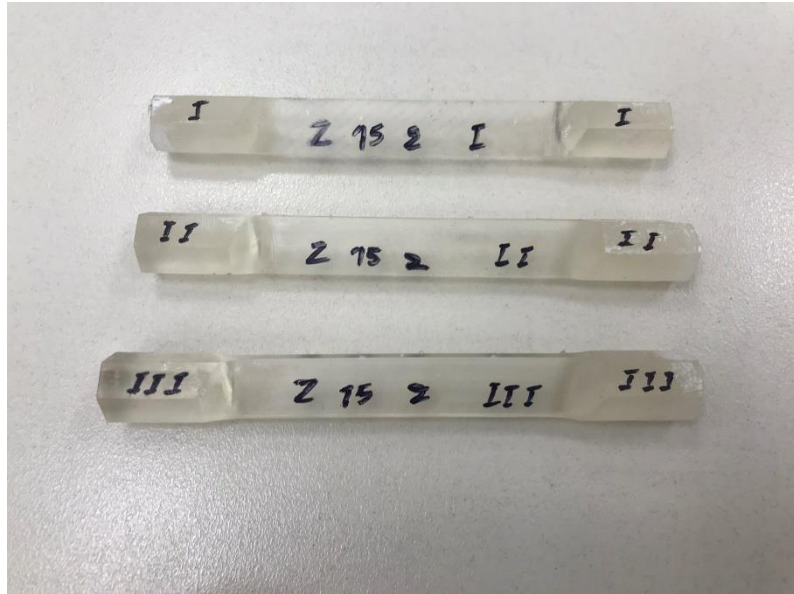


Εικόνα 29: Δοκίμα εκτύπωσης N/A:7



Εικόνα 30: Δοκίμα εκτύπωσης N/A:8

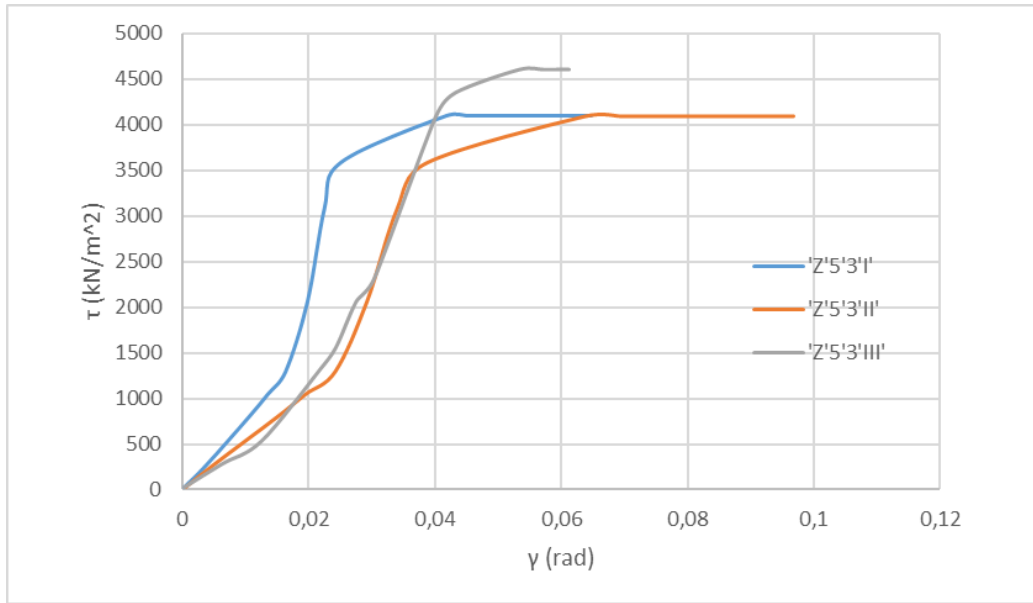




**Εικόνα 31:** Δοκίμια εκτύπωσης N/A:9

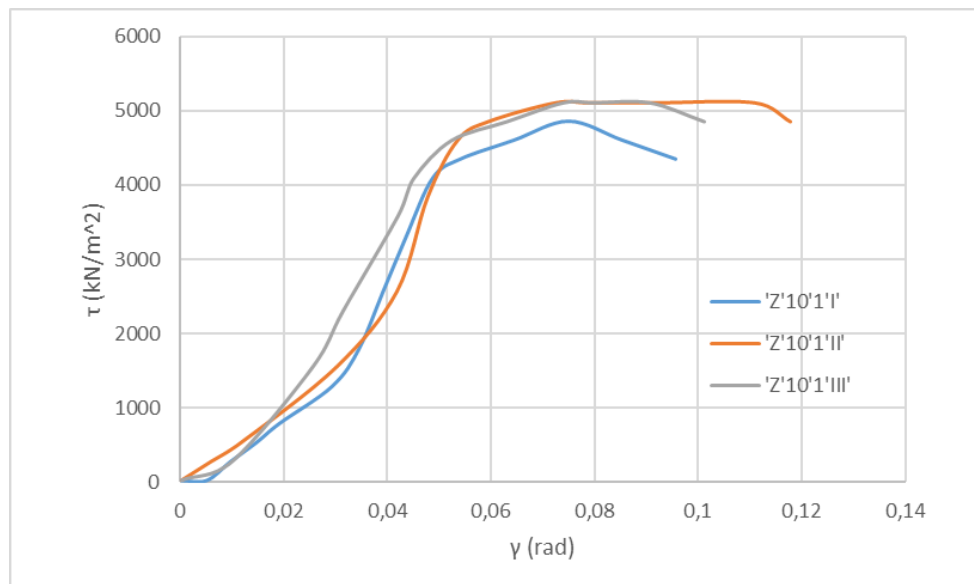


**Εικόνα 32:** Θραύση δοκιμίου.



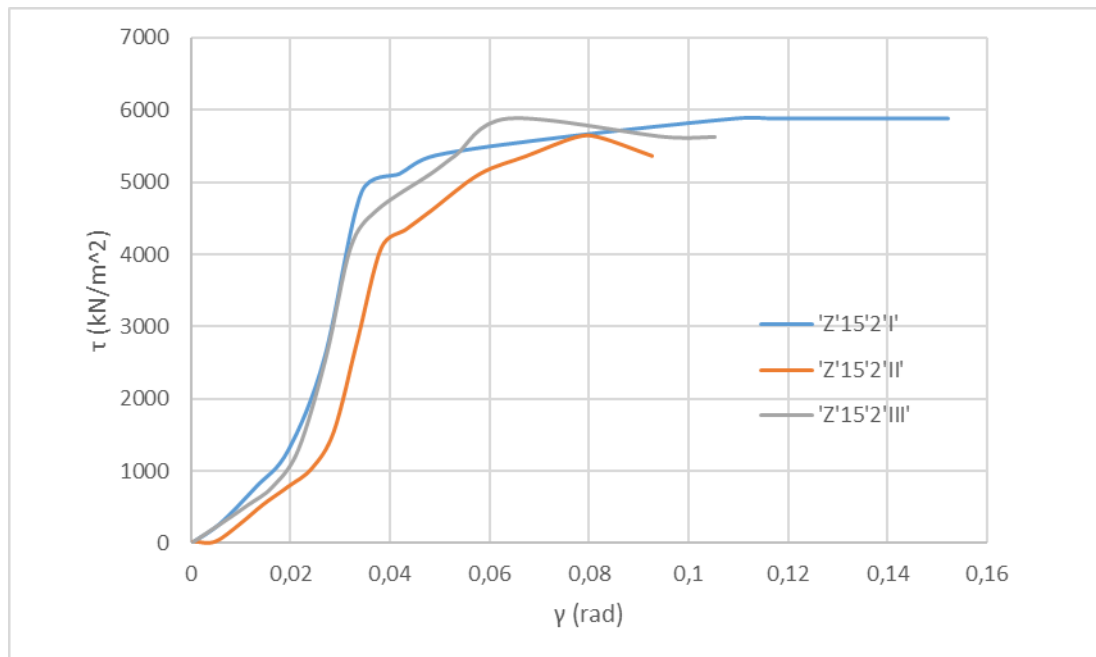
**Διάγραμμα 7:** Διάγραμμα τάσης  $\tau$  και γωνίας  $\gamma$  δοκιμίων εκτύπωσης N/A:7

Στο παραπάνω διάγραμμα 7, παρατηρείται πως τα δοκίμια 'I' και 'II' φτάνουν μέχρι μια μέγιστη τάση, και στην συνέχεια παραμένουν σε αυτή για ένα μεγάλο διάστημα αύξησης της γωνίας στρέψης, ως ότου να επέλθει η θραύση. Στο δεύτερο δοκίμιο όμως, χρειάστηκαν παραπάνω 0,03 rad για να γίνει η θραύση, γεγονός που δηλώνει την μεγαλύτερη ολκιμότητα του δοκιμίου αυτού. Το δοκίμιο 'III', μπορεί να έφτασε σε τιμές τάσεως 0,5 MN/m<sup>2</sup> μεγαλύτερη από τα άλλα δύο δοκίμια αλλά η θραύση επήλθε στα ίδια rad με το δοκίμιο 'I'.



**Διάγραμμα 8:** Διάγραμμα τάσης  $\tau$  και γωνίας  $\gamma$  δοκιμίων εκτύπωσης N/A:8

Στο διάγραμμα 8, παρατηρείται τρία δοκίμια με κοντινές τιμές μέγιστης τάσεως στρέψης, αλλά με μικρές αποκλίσεις στην γωνία στρέψης. Το δοκίμιο 'I' φτάνει σε τιμές τάσεως  $0,3 \text{ MN/m}^2$  μικρότερη από τα άλλα δύο δοκίμια και γίνεται η θραύση σε  $0,005 \text{ rad}$  νωρίτερα. Το πιο όλκιμο δοκίμιο είναι εμφανώς το δεύτερο δοκίμιο, με διαφορά  $0,018 \text{ rad}$  σε σχέση με το τρίτο δοκίμιο.



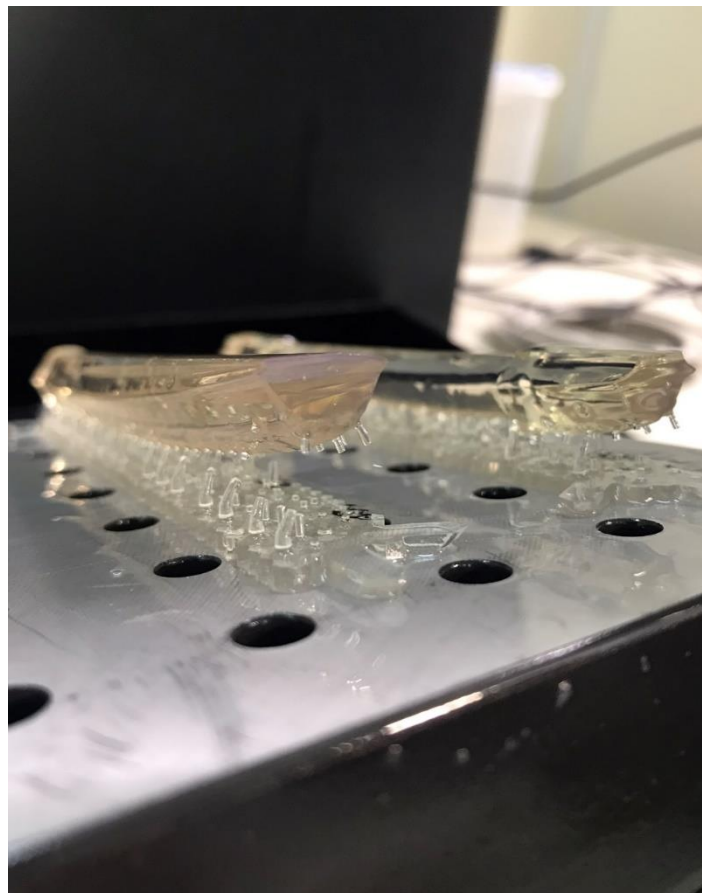
**Διάγραμμα 9:** Διάγραμμα τάσης  $\tau$  και γωνίας  $\gamma$  δοκιμίων εκτύπωσης N/A:9

Στο διάγραμμα 9, παρατηρείται ότι οι καμπύλες των τριών δοκιμίων έχουν ίδια σχεδόν μορφή με ελάχιστες διαφορές. Η πιο εμφανής διαφορά, είναι το μεγαλύτερο διάστημα στροφών που χρειάστηκε το δοκίμιο 'I',  $0,02 \text{ rad}$  περισσότερο από τρίτο δοκίμιο, χωρίς όμως να λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές στρέψης. Αξίζει να σημειωθεί, πως για μεγάλο διάστημα στροφών, περίπου  $0,02 \text{ rad}$ , το πρώτο δοκίμιο κρατά την μέγιστη τάση σταθερή ως ότου να γίνει η θραύση. Αυτό δηλώνει πως το δοκίμιο αυτό ήταν πολύ πιο όλκιμο από τα άλλα δύο.

## 5. Ανασκόπηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε αναλυτική μελέτη όσον αφορά τις επιδώσεις, τις αντοχές και τις προοπτικές δοκιμίων που κατασκευάστηκαν με 3d εκτύπωση τύπου SLA (Στερεολιθογραφία βλέπε ενότητα 1.2.6) με υλικό υγρή ρητίνη. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν όλες τις πιθανές θέσεις εκτύπωσης κατά X,Y,Z άξονα αλλά και όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των μετέπειτα επεξεργασιών, όπως είναι ο χρόνος και η ένταση που θα κρατηθούν τα εκτυπωμένα μας δοκίμια μέσα στον ειδικό φούρνο.

Πριν αποφασιστεί η διατομή των δοκιμίων που θα εκτυπωθούν, πραγματοποιήθηκαν σε δοκιμαστικές εκτυπώσεις όπου επιλέχθηκε μια κυκλική, μια εξαγωνική και την ορθογωνική διατομή. Σε αυτές τις πρώτες δοκιμές έγινε αντιληπτό το τι είδους στηρίξεις θα μπουν στα δοκίμια μας αλλά και τον τρόπο που θα τοποθετηθούν. Αυτά τα συμπεράσματα φυσικά προήλθαν μετά από αποτυχημένες προσπάθειες, όπου όμως μετά από αρκετή σκέψη και μελέτη οδήγησαν γρήγορα στην απόφαση των ιδανικών παραμέτρων που θα ακολουθηθούν.



**Εικόνα 33:** Αποτυχημένη δοκιμαστική εκτύπωση.

Στην παραπάνω εικόνα 33, βρίσκεται μια αποτυχημένη εκτύπωση, όπου είχε επιλεχθεί να μπει μια επιπλέον βάση κάτω από τις στηρίξεις, πράγμα που αποδείχθηκε λάθος, καθώς η επιφάνεια πιθανότατα βρέθηκε αρκετό χρονικό διάστημα μέσα στο δοχείο της ρητίνης και σε συνδυασμό με τις αυξημένες εσωτερικά θερμοκρασίες, κατά την μετακίνηση της πλάκας υπήρξε 'βίαιη' αποκόλληση των δοκιμίων. Τις στιγμές εκείνες της αποκόλλησης, υπήρξε ένας μικρός 'κρότος', ο οποίος όμως δεν έγινε αντιληπτός λόγω της μέχρι τότε απειρίας του συγγραφέα της διπλωματικής με το όλο αντικείμενο.



**Εικόνα 34:** Αποτυχημένη δοκιμαστική εκτύπωση.

Όταν αποφασίστηκε η χρήση της ορθογωνικής διατομής, ακολούθησε ξανά δοκιμαστική εκτύπωση, έτσι ώστε να βρεθεί ο σωστός τρόπος τοποθέτησης του δοκιμίου πάνω στην πλάκα (επιφάνεια) εκτύπωσης. Αυτό που έγινε αντιληπτό, ήταν το γεγονός πως θα έπρεπε να εφάπτεται πάνω στην πλάκα η μικρή επιφάνεια του ορθογωνίου, η οποία και προέκταση της πλευράς του εξάγωνου. Σε άλλη περίπτωση, το ορθογώνιο θα ήταν στον αέρα και θα εφάπτόταν μόνο οι πλευρές του εξάγωνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη δημιουργίας περισσότερων στηρίξεων, οι οποίες κατά την αποκόλληση τους από τον χειριστή, στο τέλος της εκτύπωσης, δημιούργησαν ρωγμές και θραύση στα δοκίμια (βλέπε εικόνα 34).

Μετά τα παραπάνω συμπεράσματα, ακολούθησαν οι εκτυπώσεις χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Ήταν χρονοβόρες και δεν χρειάστηκαν κάποια επιπλέον μη

προβλεπόμενη επεξεργασία (όπως είδαμε στις μετρήσεις των διαστάσεων. Ιδιαίτερο ρόλο σε αυτό το θετικό αποτέλεσμα είχε η λεπτομερής καθαριότητα της μηχανής εκτύπωσης και των περιφερειακών αυτής μετά από κάθε εκτύπωση.

Σε συνέχεια των εκτυπώσεων, ακολούθησε η διαδικασία της δοκιμής σε στρέψη των εκτυπωμένων μας δοκιμίων. Στο στάδιο αυτό δεν αντιμετωπίστηκε κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα, καθώς έγιναν προσεκτικές και ακριβείς κινήσεις προκυμμένου να μην υπάρξουν αποτυχημένες ενέργειες. Από τις δοκιμές αυτές εξήχθη το συμπέρασμα, πως τα δοκίμια, στο σύνολο τους, είχαν συμπεριφορά ψαθυρού υλικού, διότι τα δοκίμια έσπασαν υπό γωνία με τραχεία επιφάνεια (βλέπε εικόνες 23,24,28,32,35) και με σχετικά μικρή γωνία στρέψης, της τάξεως των 0,9 rad μέγιστο.



**Εικόνα 35:** Θραύση δοκιμίου.

Την ψαθυρότητα των δοκιμίων επιβεβαιώνει και η μεγάλη διασπορά τους σε πολύ μικρότερα κομμάτια. Αξίζει να σημειωθεί πως σε κάποιες περιπτώσεις, το ορθογωνικό 'σώμα' του δοκιμίου διαλύθηκε πλήρως και το μόνο που έμεινε ήταν τα εξαγωνικά κομμάτια που ήταν πακτωμένα (εικόνα 26).



**Εικόνα 36:** Θραύση δοκιμίου.

Από τις μετρήσεις που έγιναν και από τα μετέπειτα διαγράμματα, παρατηρείται πως στο σύνολο των υλικών, η μέγιστη τάση (τάση θραύσεως) κυμαινόταν από 5 ως 6  $\text{MN/m}^2$  και η γωνία που επήλθε η θραύση ήταν από 0,08 ως 0,09 rad. Ελάχιστες ήταν οι περιπτώσεις δοκιμίων που ήταν εξαιρεση στον παραπάνω κανόνα αλλά ακόμα και αυτά τα δοκίμια δεν ήταν όλα από την ίδια θέση πάνω στην πλάκα εκτύπωσης, ούτε και από την ίδια εκτύπωση. Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, θα μιλούσαμε για κάποιο επαναλαμβανόμενο συγκεκριμένο σφάλμα που θα έπρεπε να ερευνηθεί. Σε κάποια από αυτές τις περιπτώσεις δεν αποκλείεται να φέρει ευθύνη η μηχανή στρέψης στον τρόπο φόρτισης του δοκιμίου.

Με το πέρας της διπλωματικής εργασίας αυτής, δίνεται τροφή για σκέψη, για νέες εργασίες και μελέτες στο μέλλον, που θα εστιάζουν στην σύγκριση δοκιμίων ίδιας διατομής, αλλά εκτυπωμένων με άλλη μέθοδο πέραν της SLA. Δοκίμια λοιπόν, εκτυπωμένα από διάφορες μεθόδους, θα μπορούν να δοκιμαστούν σε στρέψη και τα αποτελέσματά τους να είναι ικανά να χαρακτηρίσουν τις δυνατότητες της κάθε μεθόδου εκτύπωσης.

## Βιβλιογραφία

- Aniket Jadhav, Vijay S. Jadhav. (2022). A review on 3D printing: An additive manufacturing technology. *Materials Today: Proceedings*.
- Byron Blakey-Milner, P. G. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design* 209.
- Cesar Omar Balderrama-Armendariz, E. M.-S. (2018). Torsion analysis of the anisotropic behavior of FDM technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, σσ. 307–317.
- Geng Zhang α, J. G. (2021). Organic mesh template-based laminated object manufacturing to fabricate. *Journal of the European Ceramic Society* 41, σσ. 2790–2795.
- K.Satish Prakasha, T. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -. *Materials Today: Proceedings* 5, σσ. 3873–3882.
- Kaixin Deng α, H. W. (2023). The resin-ceramic-based Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphite composites rapidly fabricated by selective laser sintering for integration of structural-bearing and. *Journal of Alloys and Compounds* 943.
- M Bhuvanesh Kumar \*, P. S. (2021). Methods and materials for additive manufacturing: A critical review on advancements and challenges. *Thin-Walled Structures* 159.
- M. Rajesh, M. P. (2021). Optimization of workplace parameters using Taguchi's orthogonal array approach to enhance the worker productivity. *Materials Today: Proceedings*, σσ. 2516–2519.
- M.I.M. Sargini, S. M. (2021). Additive manufacturing of an automotive brake pedal by metal fused deposition modelling. *Materials Today: Proceedings* 45, σσ. 4601–4605.
- Mary Kathryn Thompson α, \*. G. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations,. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, σσ. 737–760.
- P. Durai Murugan α, S. V. (n.d.). A current state of metal additive manufacturing methods: A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Praveena B.A, L. N. (2021). A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential. *Materials Today: Proceedings*.



- Rakesh Kumar, M. K. (2021). The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review. *Journal of Manufacturing Processes* 64, σσ. 828–850.
- Ravikumar Patel α, C. D. (2022). A review article on FDM process parameters in 3D printing for composite. *Materials Today: Proceedings*, σσ. 2162–2166.
- Zhuangzhuang Mao α, W. F. (2022). Simulation and experimental analysis of melt pool evolution in laser. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*.
- Γκρος, Γ. Ρ. (2002). *Αντοχή Υλικών*. Αθήνα.
- Νικολάου Δ. Γαλιατσάτου, Γ. Σ. (2016). *Αντοχή Υλικών*. Αθήνα.
- [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)
- ASTM D5279-13 (2013) Standard practice for conditioning plastics for testing. ASTM International, West Conshohocken
- ISO 18338 (2015) Metallic materials — Torsion test at ambient temperature