



**Πανεπιστήμιο Δυτική Αττικής  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
UNIVERSITY OF WEST ATTICA



ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΔΙΠΛΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

MECHANICAL PROPERTIES OF AM SPECIMENS

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μηχανολόγων Μηχανικών

Επιβλέπων: ΣΑΓΙΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

Επιβλέπων: ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΚΑΜΑΔΕΛΗΣ ΡΗΓΑΣ

Ακαδημαϊκό Έτος: 2021-2022



ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΠΡΟΣΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΔΙΠΛΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

MECHANICAL PROPERTIES OF AM SPECIMENS

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

Στεργίου Κωνσταντίνος	Ρώσσης Κυριάκος	Σαγιάς Βασίλειος



## Contents

Εισαγωγή.....	3
Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	4
Τι είναι οι προσθετικές κατασκευές .....	4
Τεχνολογίες Προσθετικών Κατασκευών.....	4
Εφαρμογές στην βιομηχανία .....	9
Επίδραση του στο περιβάλλον .....	13
Μαζική παραγωγή- Εφοδιαστική αλυσίδα.....	16
FDM.....	20
Dual-Material .....	24
Μεθοδολογία.....	26
Πειράματα .....	28
Αποτελέσματα .....	32
Συμπεράσματα.....	46
Έργα που αναφέρονται.....	48

## Εισαγωγή

Η τεχνολογίες τρισδιάστατων κατασκευών γνωρίζουν ταχεία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι ένας σχετικά νέος τρόπος παραγωγής καθώς κατοχυρώθηκε πρώτη φορά ως τρόπος παραγωγής την δεκαετία του 1980. Παρόλα αυτά υπάρχει μεγάλη συζήτηση τα τελευταία χρόνια για το πως μπορεί να επιδράσει στην παραγωγή δεδομένης της ψηφιοποίησης αυτής και τις επιπλέον δυνατότητες που δίνονται μέσω αυτού στην τρισδιάστατη εκτύπωση, στην προστασία του περιβάλλοντος και στην βελτίωση των logistics.

Για τους μηχανικούς η τρισδιάστατη εκτύπωση αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα καθώς δίνει την δυνατότητα παραγωγής κατασκευών ιδιαίτερης γεωμετρίας αλλά και ταυτόχρονα σύγχρονων υλικών. Λόγω της φύσης της τεχνολογίας όμως δεν μπορούμε να γνωρίζουμε ή να υπολογίσουμε τις μηχανικές ιδιότητες των κατασκευών καθώς εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους της κατεργασίας.

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται σχεδιασμός πειραμάτων και εξετάζονται οι μηχανικές ιδιότητες τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων κάμψης διπλού υλικού (PLA Polylactic acid, ABS pro Acrylonitrile Butadiene Styrene) τα οποία υποβάλλονται σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με πολυστρωματικού μοντέλου επιφανείας πεπερασμένων στοιχείων.

## Βιβλιογραφική ανασκόπηση

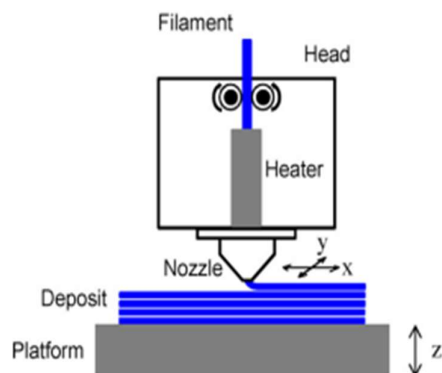
### Τι είναι οι προσθετικές κατασκευές

Προσθετικές κατασκευές ή τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) όπως συχνά αναφέρεται είναι μια τεχνολογία παραγωγής όπου δημιουργείται ένα τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο (CAD) όπου μεταφέρεται στον εκτυπωτή και με βάση αυτό, επίπεδο το επίπεδο (layer by layer) διαμορφώνεται το τελικό προϊόν. Οι προσθετικές κατασκευές εμφανίστηκαν το 1986 με την τεχνολογία SLA από τον Charles Hull (1), (2), όμως από τότε έχουν προκύψει νέες τεχνολογίες αλλά και πληθώρα υλικών που χρησιμοποιούνται στις προσθετικές κατασκευές.

### Τεχνολογίες Προσθετικών Κατασκευών

#### Fused Filament Fabrication (FFF)

Στις FFF τεχνολογία χρησιμοποιείται συνεχές νήμα πολυμερούς θερμοπλαστικού για να εκτυπωθούν τα επίπεδα υλικού τα οποία συνθέτουν το τελικό προϊόν. Το νήμα θερμαίνεται στο ακροφύσιο μέχρι να φτάσει μια ημίρρευστη κατάσταση και τότε εξωθείται στην επιφάνεια εκτύπωσης ή στα προηγουμένως εκτυπωμένα επίπεδα. Η θερμοπλαστική ιδιότητα των πολυμερών είναι κομβική για αυτή την τεχνολογία, καθώς επιτρέπει την ανάμιξη των νημάτων κατά την διάρκεια της εκτύπωσης και ύστερα την στερεοποίηση αυτών στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 1: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας τεχνολογίας FDM

Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (3):

Materials, properties, and applications in FDM method.

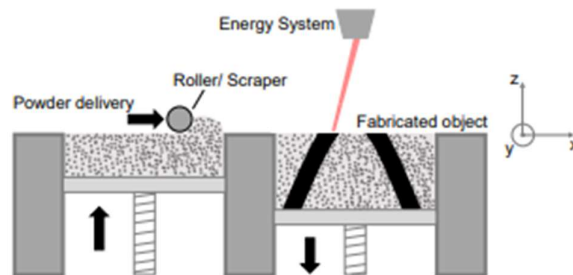
Material class	Materials	Properties	Applications
Thermoplastic Polymer	Polylactic acid (PLA), Acrylonitrile butadiene styrene (ABS), ABSi, High Density Polyethylene (HDPE), Polyphenylsulfone (PPSF), Polycarbonates (PC), Polyethylene terephthalate glycol-modified (PETG), Ultem 9085, Polytetrafluoroethylene (PTFE), Polyether Ether Ketone (PEEK), Recycled Plastics, Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA), Nylon 12, etc.[16]	Properties associated with this include toughness and strength, UV stability, good chemical resistance, and high fatigue resistance along with the high impact strength. They possess high tensile and flexural strength etc.[16]	Because of their great thermal resistance properties, they are suitable for aerospace and aerodynamics application.
Polymer Matrix Composites	Glass Fiber Reinforced plastic (GFRP), Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP).[17]	Compatibility with toughness, ductility, yield strength, etc.	Constructional applications.
Ceramic Slurries and Clay	Alumina, Zirconia, Kaolin.[18]	Chemical and physical stability, heat resistance, and compatible thermal conductivity, strength and hardness.	General purpose uses along with the applications in dental field as well.
Green Ceramic/ Binder Mixture	Zirconia, Calcium phosphate.[19]	Resistance to chemicals and corrosion, great compatibility with respect to fracture toughness, hardness, wear-resistance, and thermal resistance good frictional behavior, lower electrical and thermal conductivity and non-magnetic in nature etc.[20]	Structures suitable for bone substitute scaffolds[19], and for making piezoelectric components.
Green Metal/ Binder Mixture	Stainless steel, Titanium, Inconel.[21]	Providing binder viscosity, flowability, greater sintered density, leads to the homogeneous microstructure of parts.[21] Results in strong, light and corrosion resistant properties etc.	For the manufacturing of mechanical parts used in tooling and fixtures etc.
Food pastes	Sugars and Chocolates	Flowability	Cooking
Biological Materials	Bioink [23]	Easy to print, with desired mechanical properties, can be easily biodegraded, and we can easily install modifiable functional groups on the surface, the better ability of post-printing maturation, biologically compatible and capable of retaining the 3D printed structure after it is printed.[24]	Bioprinted organs and scaffolds.

Εικόνα 2: Υλικά που χρησιμοποιούνται στην FDM τεχνολογία

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται όπως αποτυπώνονται και στον παραπάνω πίνακα χαρακτηρίζονται από αντοχή στις UV ακτινοβολίες, σκληρότητα και την βιο-συμβατότητα τους. Για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους πολλές φορές γίνεται προσθήκη στο νήμα υλικών μεταλλικών ή κεραμικών σε μορφή κόκκων.

### Powder Bed Fusion

Στην τεχνολογία Powder Bed Fusion η διαδικασία αποτελείται από λεπτά επίπεδα πολύ λεπτής σκόνης, τα οποία απλώνονται και συμπιέζονται στην επιφάνεια εκτύπωσης. Η σκόνη στο κάθε επίπεδο αναμειγνύεται με την βοήθεια μιας δέσμης laser ή binder. Μεταγενέστερα επίπεδα σκόνης τοποθετούνται πάνω στα προηγούμενα και αναμειγνύονται μέχρι να κατασκευαστεί το τελικό προϊόν. Η μη χρησιμοποιούμενη σκόνη ύστερα απομακρύνεται με την χρήση σκούπας και αν χρειαστεί συνεχίζεται η επεξεργασία.



Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (3):

**Table 4**  
Materials, properties, and applications in SLS method.

Laser	Materials	Properties	Applications
CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	Polymers including Polyamides [26], Polycarbonates, Polystyrene (PS), Thermoplastic Elastomer (TPE), Polyaryletherketone (PAEK)	Characterized by an ideal sintering behavior like a semi-crystalline thermoplastic [26], high toughness, thermal stability, etc.	Prototype making in the early design process, automobile parts, hardware, etc.
Nd:YAG	Ceramics	Great hardenability, mechanical strength, better thermal and chemical stability, and usable thermal, electrical, optical, and magnetic characteristics.[27]	Aeronautics, biomedical, metallurgical application.[28]
Yb-Fiber	Glasses such as fused Silica, Borosilicate Glasses.[29] Metals	Chemical resistance, thermal stability, etc.[29]  Good thermal conductivity hence, used in case of selective laser melting	Glass filters, medical and chemical field.[29]  Varied applications in various industries.

**Table 5**  
Materials, properties and applications in SLM method.

Materials	Properties	Applications
Titanium (Ti )	Resistance to Corrosion and thermal expansion with great biological compatibility, along with the high strength and lower density.	Its applications are included in but not limited to design, medical, automotive, aerospace, marine industry, and jewelry industries, etc.
Stainless Steel	Increased resistance to wear and tear, corrosion, along with compatible ductility, hardness, and hardenability.	These materials have extensive application in automotive industry, maritime and medical technology, toolmaking and in varied areas of mechanical engineering.
Aluminium (Al)	Light metal with lower density and better electrical conductivity along with alloying properties and easy to process abilities.	These components are used in aerospace engineering, automotive industry, in the area of prototype construction, marked with complicated geometries.
Cobalt-Chrome	Biologically compatible, with increased hardness, corrosion resistance with comparable strength and ductility.	In the medical and dental field, and industries requiring greater thermal resistant properties for example in jet engines.
Nickel based alloys	Great weldability and hardenability along with the resistance to corrosion and outstanding mechanical strength.	Used in aerospace engineering and fields requiring thermal resistant properties also have applications in tool making.

**Table 6**  
Materials, properties and applications in EBM method.

Materials	Properties	Applications
Titanium	Resistance to Corrosion and thermal expansion with great biological compatibility, along with high strength and lower density.	Building of prototypes for aerospace and racing fields, in the marine, chemical industry and also used in medical applications such as orthopedic implants and prosthesis.
Cobalt- Chrome	Increased strength and wear resistance, biologically compatible, with thermal capabilities.	In power generation, orthopedics, aerospace and dental fields.

Εικόνα 4: Πίνακες υλικών που χρησιμοποιούνται στην Powder bed Fusion τεχνολογία.

Η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλογα με την πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται χρησιμοποιούνται και διαφορετικά υλικά. Με την χρήση δέσμης laser για την πυροσυσσωμάτωση χρησιμοποιούνται πολυμερή, θερμοπλαστικά πολυμερή που χαρακτηρίζονται από ακαμψία και θερμική σταθερότητα, ακόμα χρησιμοποιούνται κεραμικά που χαρακτηρίζονται από σκληρότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες και χρήσιμες θερμικές, οπτικές, ηλεκτρικές ιδιότητες. Με την χρήση δέσμης laser μέχρι την τήξη χρησιμοποιούνται το Τιτάνιο, ανοξείδωτος χάλυβας, αλουμίνιο, κοβάλτιο-χρώμιο και κράματα νικελίου παράγοντας κατασκευές με διαφορετικές μηχανικές, θερμικές, ηλεκτρικές ιδιότητες ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται. Τέλος με την χρήση ως πηγή ενέργειας δέσμης ηλεκτρονίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά όπως το τιτάνιο και το κοβάλτιο-χρώμιο που χαρακτηρίζονται από αντοχή στην διάβρωση, βιολογική συμβατότητα, μικρή πυκνότητα σε

συνδυασμό με καλή αντοχή και αντοχή στην φθορά, βιολογική συμβατότητα και θερμικές δυνατότητες αντίστοιχα.

#### Inkjet printing and contour crafting

Στην τεχνολογία Inkjet printing ένα σταθερό κεραμικό εναιώρημα αντλείται και τοποθετείται σε μορφή σταγόνων μέσα από το ακροφύσιο μέσα σε ένα υπόστρωμα. Ύστερα οι σταγόνες διαμορφώνουν ένα συνεχές μοτίβο το οποίο στερεοποιείται έτσι ώστε να συγκρατήσει τα επίπεδα του εκτυπωμένου υλικού. Παρόμοια τεχνολογία είναι και το contour crafting το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή μεγάλων κτισμάτων.

#### Stereolithography (SLA)

Στην τεχνολογία SLA χρησιμοποιείται μια δεξαμενή με υγρό, μια κινητή τράπεζα και ένα UV laser. Κατά την διάρκεια της εκτύπωσης η κινητή τράπεζα έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του υγρού μόλις έρθει σε επαφή ενεργείται το UV laser και άμεσα στερεοποιείται το υγρό που είναι σε επαφή με την τράπεζα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται με το επόμενο επίπεδο να έρχεται σε επαφή μέχρι να διαμορφωθεί το τελικό προϊόν. Ύστερα το προϊόν της εκτύπωσης τοποθετείται σε φούρνο UV για σκλήρυνση.

Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (3):

**Table 2**  
Materials, properties and applications in SL method.

Materials	Properties	Applications/ Industries
DC 100	Lesser shrinkage with higher accuracy.	Used for the casting of patterns for pieces of jewelry.
DC 500	Like wax in nature and can easily burn out.	For the making of precise and thinner wire patterns of jewellery which can't be easily copied using methods for molding rubber.
DL 350	Highly flexible and resistant to fatigue and chemicals etc. Similar to polypropylene.	Used to produce parts for industrial as well as general purposes.
DL 360	Strong and transparent in nature.	Produces parts for general purposes and industrial uses which require transparent properties.
AB 001	Provides good strength and stiffness and electrical characteristics.	Used for producing parts that are strong and smooth in nature.
GM 08	Highly flexible, strong and elastic, along with transparency comprises its nature.	Produces parts that don't require further finishing operations.
DM 210	Great surface qualities and including ceramic-type properties.	Used for jewellery patterns that require liquid silicone that can be extracted quite easily from rubber.

*Εικόνα 5: Πίνακες υλικών που χρησιμοποιούνται στην Stereolithography (SLA) τεχνολογία.*



Στην τεχνολογία SLA χρησιμοποιούνται φωτο-πολυμερές ρητίνες. Ανάλογα με την εφαρμογή μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα αντίστοιχα υλικά με τις ιδιότητες του όπως παραδείγματος χάριν υψηλή ελαστικότητα, αντοχή σε διάτμηση, μεγάλη ακαμψία και ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά καθώς υπάρχουν και υλικά με παρόμοιες ιδιότητες με τα κεραμικά.

### Direct energy deposition

Στην τεχνολογία Direct energy deposition χρησιμοποιείται μια μορφή ενέργειας είτε laser είτε δέσμη ηλεκτρονίων και μια πρώτη ύλη η οποία τήκεται. Το τηγμένο υλικό εναποτίθεται και αναμειγνύεται και στερεοποιείται μετά από την απομάκρυνση της πηγής ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να συνδυαστεί με της συμβατικές μεθόδους κατασκευής για την ολοκλήρωση της κατασκευής του προϊόντος.

Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (3):

Materials, properties and applications in DED method.

Materials	Properties	Applications
Titanium	Resistance to corrosion and thermal expansion with great biological compatibility, along with high strength and lower density.	Used for repairing works in the automation and aerospace industry.
Aluminium	Light metal with lower density and better electrical conductivity with alloying properties and easy to process abilities.	Filling of cracks and refitting of manufactured parts.
Stainless steel	Resistant to heat and corrosion with greater tensile strength.	Repairing of turbine engines, and other such complex applications.
Copper	Malleable, ductile, and better surface finish.	Industrial applications.
Inconel, Ceramics	Good mechanical properties and greater density.	Aerospace, biomedical applications.

Εικόνα 6: Πίνακες υλικών που χρησιμοποιούνται στην Direct energy deposition τεχνολογία.

Στην παρούσα μέθοδο χρησιμοποιούνται μεταλλικά υλικά και κεραμικά με διαφορετικές ιδιότητες. Εφόσον η παρούσα μέθοδος χρησιμοποιείται για την επισκευή κατασκευών, τα υλικά που χρησιμοποιούνται και οι ιδιότητες τους καθορίζονται με βάση το υλικό της κατασκευής προς επισκευή.

### Laminated object manufacturing

Στην τεχνολογία Laminated object manufacturing χρησιμοποιούνται φύλλα ή ρολά από ένα υλικό τα οποία κόβονται επίπεδο το επίπεδο έτσι ώστε να διαμορφώσουν το τελικό προϊόν. Ύστερα γίνεται συγκόλληση των επιπέδων, το επιπλέον υλικό που προκύπτει ύστερά από την κοπή αφαιρείται και μπορεί να ανακυκλωθεί.

Τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (3):

**Table 9**  
Materials, properties and applications in LOM method.

Materials	Properties	Applications
Polymer	Good thermal conductivity, adhesive bonding.	Paper industry.
Composites	High modulus, low density, excellent resistance to fatigue, etc.	Paper industry etc.
Ceramics	Chemical and physical stability, resistance to heat, and compatible thermal conductivity, strength, and hardness.	Foundry and forging industries.
Paper	Good conductor of electricity.	Electronics industry.
Metal Filles Tapes, Metal Rolls	Better mechanical properties.	Applicable in smart structures.

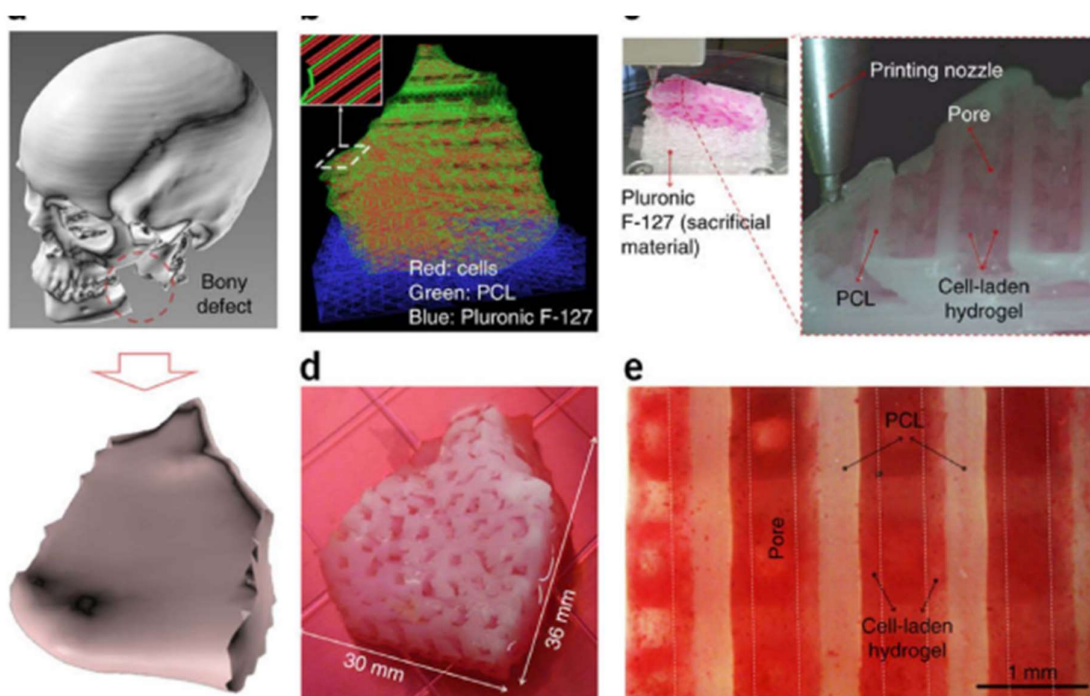
*Εικόνα 7 Πίνακες υλικών που χρησιμοποιούνται στην Powder bed Fusion τεχνολογία.*

## Εφαρμογές στην βιομηχανία

Η τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα όσον αφορά τις προσθετικές κατασκευές παρά τα λίγα χρόνια σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής έχουν βρει αρκετές εφαρμογές και δώσει λύσεις σε πολλά ζητήματα μηχανικής και άλλων επιστημονικών αντικειμένων χωρίς όμως να έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα να κυριαρχήσουν στην μαζική παραγωγή προϊόντων-κατασκευών. Ερευνητές βέβαιοι έχουν διατυπώσει την άποψη ότι ίσως και από την φύση των τεχνολογιών δεν θα μπορέσουν ποτέ με βάση την σημερινή τεχνολογική στάθμιση, να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής σε επίπεδο μαζικής παραγωγής αλλά θα αντικαταστήσουν τις συμβατικές μεθόδους σε προβλήματα εξατομίκευσης των προϊόντων-κατασκευών (4). Παρόλα αυτά έχουν επιτευχθεί αρκετές εφαρμογές σε διάφορες βιομηχανίες και ακολουθούν μερικά παραδείγματα:

### Βιο- συμβατά υλικά

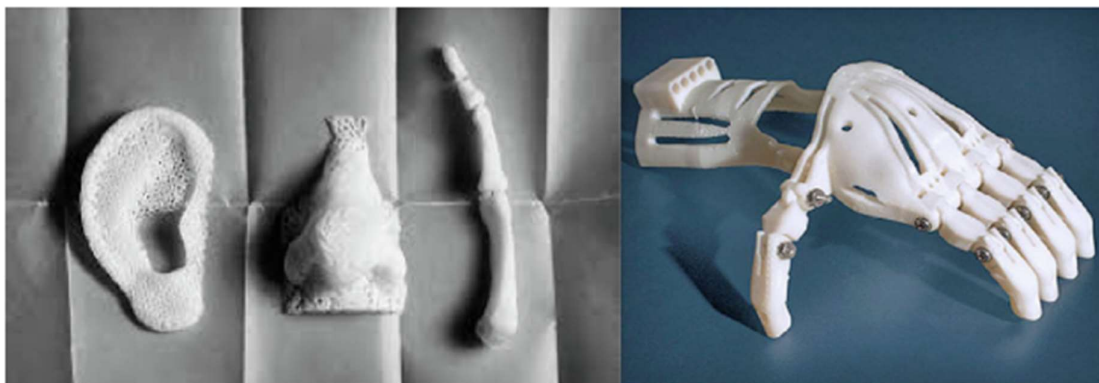
Οι τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών δίνουν την δυνατότητα της κατασκευής χόνδρων αρθρώσεων, βαλβίδων αορτής, αγγειακά δένδρα με πολλές διακλαδώσεις και βιοαπορροφήσιμου νάρθηκα του τράχηλου. Η κατασκευή απευθείας πάνω στο σώμα ιστών για την θεραπεία ιστών και οργάνων είναι που ήδη έχει επιτευχθεί για το δέρμα, οστά και χόνδρους. Συγκεκριμένα οι εκτυπώσεις λειτουργούν ως υποστηρικτικές κατασκευές όπου εκεί πέρα θα δημιουργηθεί ή θα επαναδημιουργηθεί ο ιστός. Συγκεκριμένα η χρήση πάνω σε αυτών των υποστηρικτικών εκτυπώσεων για την ανάπλαση βιολογικού υλικού από τον ασθενή είναι γεγονός που μειώνει την πιθανότητα της απόρριψης του δημιουργημένου οργάνου ή ιστού. Ταυτόχρονα η δυνατότητα στην ιατρική για ψηφιακή απεικόνιση οστών, οργάνων, αγγείων δίνει ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες για την ακριβή σχεδίαση μοντέλων εξατομικευμένων για τον κάθε ασθενή.



Εικόνα 8: Εικόνες από εφαρμογές των προσθετικών κατασκευών στην Ιατρική. (2)

Εξέλιξη υπάρχει παράλληλα και στον τομέα της φαρμακευτικής όπου με την χρήση των προσθετικών κατασκευών δημιουργούνται συστήματα μετάδοσης των φαρμάκων στον οργανισμό. Με την χρήση των τεχνολογιών μπορεί να ελεγχθεί το σύστημα απελευθέρωσης του φαρμάκου στον οργανισμό ελέγχοντας το σχήμα του φαρμάκου, την μικρο-αρχιτεκτονική του, καθώς και την θέση των ενεργών ουσιών.

Τέλος μεγάλη ανάπτυξη των τεχνολογιών προσθετικών κατασκευών υπάρχει στην δημιουργία εμφυτευμάτων. Η μελέτη τόσο των υλικών για την κάθε εξειδικευμένη περίπτωση ασθενή, όσο και η ελευθερία στην κατασκευή της μορφολογίας του εμφυτεύματος αλλάζουν δραματικά τον τομέα των εμφυτευμάτων. Παρόλο που μέχρι σήμερα έχουν γίνει μόνο πειραματικές δοκιμές με την συγκατάθεση του ασθενούς, γίνονται ήδη μελέτες για το πως συγκεκριμένη γεωμετρία μπορεί να μειώσει τις δυνάμεις που ασκεί το εμφύτευμα στο υπάρχον οστό όσο και πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν βιο-συμβατά σπογγώδες υλικά για να αναπτυχθούν επάνω σε αυτά οστά.



Εικόνα 9: Εικόνες από προϊόντα προσθετικών κατασκευών που χρησιμοποιούνται ως εμφυτεύματα. (5)

### Αεροδιαστημική

Η χρήση των τεχνολογιών προσθετικών κατασκευών στην αεροδιαστημική είναι ιδανική λόγω των ιδιαίτερων γεωμετριών που χρησιμοποιούνται, των δύσκολα κατεργάσιμων υλικών που χρησιμοποιούνται, των ιδιαίτερων προϊόντων που απαιτούνται σε μικρές ποσότητες καθώς και η παραγωγή προϊόντων κατά παραγγελία και τέλος η κατασκευή υψηλής απόδοσης και μικρού βάρους εξαρτημάτων.

Τόσο μεταλλικά όσο και μη μεταλλικά υλικά χρησιμοποιούνται από της αεροδιαστημική βιομηχανία για την κατασκευή ή επιδιόρθωση εξαρτημάτων όπως εξαρτήματα κινητήρων, πτερωτές τουρμπινών και εναλλάκτες θερμότητας. Οι τεχνολογίες stereolithography, multi-jet modelling και FDM χρησιμοποιούνται για την γρήγορη παραγωγή και κατασκευή επιδιορθώσεων και εσωτερικών εξαρτημάτων από πλαστικό, κεραμικά και σύνθετα υλικά.



Εικόνα 10: Απεικόνιση εξαρτημάτων, πτερωτών και τουρμπινών κατασκευασμένων με προσθετικές κατασκευές. (5)

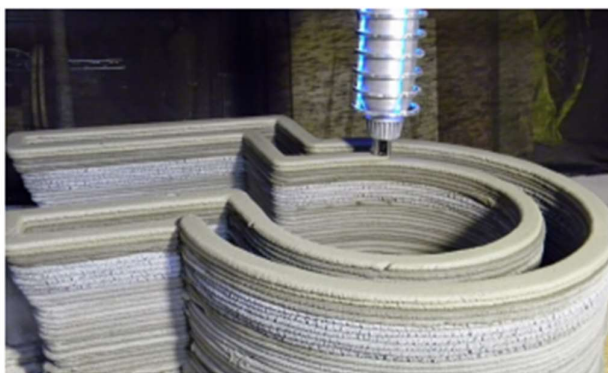
Η DED τεχνολογία χρησιμοποιείται για την κατασκευή μεγαλύτερων εξαρτημάτων. Η χρήση αυτής της μεθόδου οδήγησε στην μείωση του κόστους κατασκευής του Boeing 787 Dreamliner \$2-\$3 εκατ. ανά αεροσκάφος.

Τέλος τα εξαρτήματα υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική καταπονούνται από διάβρωση, κρούση, επαναλαμβανόμενες μηχανικές φορτίσεις και θερμικό φορτίο, όλα τα παραπάνω μπορούν να δημιουργήσουν παραμορφώσεις ή και ρηγματώσεις. Καθώς το κόστος αυτών των εξαρτημάτων είναι πολύ μεγάλο είναι προτιμότερη η επισκευή τους με τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών από την αντικατάστασή τους, αφού αυτή μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια και μικρή θερμική επιβάρυνση των εξαρτημάτων σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους συγκόλλησης.

### Κατασκευή Κτηρίων

Το πρώτο εκτυπωμένο κτήριο κατασκευάστηκε το 2014 στο Άμστερνταμ με την χρήση της FDM τεχνολογίας, αντίστοιχα της ίδια χρονιά στην Σανγκάη έγινε μαζική παραγωγή κατοικιών τρισδιάστατα εκτυπωμένων. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνολογίες για την ανέγερση κτηρίων με την χρήση προσθετικών κατασκευών.

Συγκεκριμένα η off-site κατασκευή και η χρήση μεταλλικών πλαισίων και βάσης D- σχήματος εκτυπώσεων τσιμέντου. Μια άλλη τεχνολογία η contour crafting τεχνολογία που γίνεται στο πεδίο εγκατάστασης του κτηρίου και για την εφαρμογή της χρησιμοποιούνται γερανοί ή ρομπότ. Σημαντική μπορεί να γίνει και η χρήση των προσθετικών κατασκευών στην αναπαραγωγή ενός μέρους ενός ιστορικού κτηρίου. Με την ταυτόχρονη χρήση 3D Scanning τεχνολογιών σαρώνεται το μέρος προς κατασκευή του κτηρίου και με την χρήση τεχνολογιών προσθετικών κατασκευών μπορεί να κατασκευαστεί το ζητούμενο μέρος, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την χρήση λιγότερου εργατικού δυναμικού και ταυτόχρονα λιγότερα βαρέως τύπου μηχανήματα.



Εικόνα 11: Εικόνα κατασκευής τσιμεντένιου τοιχίου με την χρήση προσθετικών κατασκευών. (5)

## Επίδραση του στο περιβάλλον

Σήμερα δεδομένης της μεγάλης περιβαλλοντικής επιβάρυνσης του πλανήτη από τον άνθρωπο ένα καίριο ζήτημα για την εφαρμογή μιας τεχνολογίας είναι η επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Σε αυτή την βάση απασχολεί και το ζήτημα αν οι τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών είναι ενεργειακά αποδοτικότερες αλλά και συνολικά σε επίπεδο κύκλου ζωής των προϊόντων παραγόμενων από τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών είναι αποδοτικότερες από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής προϊόντων. Η πραγματικότητα είναι ότι ακριβώς επειδή και για άλλες παραμέτρους δεν έχει υιοθετηθεί τις τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών μαζικά στην παραγωγή, αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι παρότι μπορούν να βγουν συμπεράσματα για την περιβαλλοντική επιβάρυνση της τεχνολογίας χρειάζονται περισσότερα δεδομένα για να ερευνηθεί πιο ολοκληρωμένα το ζήτημα του αποτυπώματος των τεχνολογιών προσθετικών κατασκευών στο περιβάλλον (6). Οι Mohammad Reza Khosravanani et al. (6) παρατήρησαν ότι παρότι σε αρκετές εφαρμογές έχει υιοθετηθεί η παραγωγή με τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών δεν έχουν δημιουργηθεί όμως οι απαραίτητες μέθοδοι μετρήσεις της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και με βάση αυτό προκύπτουν από διαφορετικές μελέτες αντικρουόμενα αποτελέσματα. Στην μελέτη που διενέργησαν χρησιμοποίησαν τρεις βασικές παραμέτρους 1) κατανάλωση ενέργειας, 2) διαχείριση αποβλήτων, 3) ρύπανση του αέρα.

### Περιβαλλοντικές παράμετροι κατά την φάση της παραγωγής με την χρήση προσθετικών κατασκευών.

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας είναι η κυριότερη παράμετρος που αυξάνει την επιβάρυνση των προσθετικών κατασκευών στο περιβάλλοντος. Η κατανάλωση ενέργειας εξαρτάται από αρκετές παραμέτρους. Στις τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών χρησιμοποιούνται αρκετά υλικά με διαφορετικές θερμοκρασίες παραγωγής, πυκνότητα και γενικότερα ενέργεια για την παραγωγή προϊόντων, επομένως η χρήση υλικών με χαμηλή θερμοκρασία εκτύπωσης μπορούν σημαντικά να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση.

Ο όγκος εκτύπωσης είναι μια σημαντική παράμετρος καθώς εκτυπωτές με μεγαλύτερο όγκο εκτύπωσης που έχουν και την δυνατότητα παράλληλα να εκτυπώνουν πολλά προϊόντα χαρακτηρίζονται από μεγάλη ενεργειακή αποδοτικότητα.

Μια ακόμα σημαντική παράμετρος είναι το πάχος επιπέδου. Η χρήση μεγάλου πάχους οδηγεί σε μικρότερες ταχύτητες εκτύπωσης και κατά συνέπεια πιο χρονοβόρες με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, αντίστοιχα η χρήση μικρού πάχους οδηγεί στην εκτύπωση περισσότερων επιπέδων που και αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας καθώς αυξάνονται κατά



πολύ οι επαναλήψεις και ο συνολικός χρόνος παραγωγής σε σχέση με την χρήση μεγαλύτερου πάχους επιπέδου.

Τέλος η ταχύτητα εκτύπωσης είναι μια παράμετρος που επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας, καθώς λιγότερο χρονοβόρες εκτυπώσεις οδηγούν σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Όμως η ταχύτητα εκτύπωσης είναι μια εξαρτημένη παράμετρος από πολλές άλλες παραμέτρους όπως το χρησιμοποιούμενο υλικό όπως και το πάχος όπως προαναφέρθηκε επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ταχύτητα εκτύπωσης.

Συνολικά η καταναλισκόμενη ενέργεια μπορεί να χωριστεί σε τρεις κύριες φάσεις. Την φάση της προθέρμανσης, της διαδικασίας εκτύπωσης και της διαδικασίας της ψύξης. Με την χρήση πιο σύγχρονης τεχνολογίας σε αυτές τις τρεις φάσεις μπορεί να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση, όμως η έλλειψη δεδομένων σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας αποτελεί τροχοπέδη στην ανάπτυξη αυτού του πεδίου. Έχει αναφερθεί ότι κρίσιμη φάση είναι η κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα ψύξης, επομένως η χρήση καναλιών ψύξης στην συσκευή μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη ενεργειακή απόδοση.

#### Διαχείριση αποβλήτων.

Για την διαχείριση των αποβλήτων οι συγγραφείς του άρθρου ξεχωρίζουν δύο κατηγορίες την χρήση ανακυκλωμένων υλικών για την παραγωγή και την ανακύκλωση των αποβλήτων της παραγωγής. Και οι δύο αυτές κατηγορίες μπορούν σημαντικά να μειώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των προσθετικών κατασκευών. Η ανακύκλωση των υλικών γίνεται σε δύο βήματα, αρχικά κόβεται σε μικρά κομμάτια και σε δεύτερη φάση τήκεται και εξωθείται με την χρήση της κατάλληλης διάταξης. Η τήξη των αποβλήτων όπως σημειώνουν οι συγγραφείς οδηγεί σε μείωση των ατομικών δεσμών στα θερμοπλαστικά για αυτό το λόγω αναμειγνύονται με καινούργια έτσι ώστε να προκύπτουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες στα ανακυκλωμένα υλικά. Μια ακόμα σημαντική πλευρά που σημειώνεται είναι το γεγονός ότι για την ανακύκλωση μεγάλων αντικειμένων απαιτείται βιομηχανικού τύπου διάταξη τεμαχισμού η οποία είναι κοστοβόρα, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη των προτύπων και της κατηγοριοποίησης των υλικών για να μπορέσει να αναπτυχθούν παραπάνω οι τεχνολογίες ανακύκλωσής των υλικών.

### Ατμοσφαιρική ρύπανση.

Τέλος η ρύπανση του αέρα ως ρυπογόνα παράμετρος έχει δύο βασικές πτυχές, την ρύπανση της ατμόσφαιρας και την έκλυση επικίνδυνων για τον άνθρωπο αερίων κατά την διάρκεια της παραγωγής.

Βάση μελέτης έχει παρατηρηθεί ότι η τεχνολογία FDM μπορεί να γίνει επιβλαβείς λόγω της μεγάλης συγκεντρώσεις μικροσωματιδίων και αλδεϋδών. Η χρήση συνολικότερα για την παραγωγή μέσω προσθετικών κατασκευών υλικών που είναι μη τοξικά όπως και βιο-υλικών που γνωρίζουν μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια μπορεί σημαντικά να αποτρέψει την επικινδυνότητα των τεχνολογιών αυτών για τον άνθρωπο.

Όσον αφορά την επιβάρυνση της ατμόσφαιρας καθώς ένα μεγάλο ποσοστό της ρύπανσης της προκύπτει από τον κλάδο των μεταφορών, η περαιτέρω υιοθέτηση τεχνολογιών προσθετικών κατασκευών μπορεί να μειώσει την απόσταση παραγωγού- καταναλωτή όποτε να έχει και σημαντική επίδραση στην μείωση της ρύπανσης λόγω μεταφορών εμπορευμάτων. Ακόμα η τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών συνδέονται άμεσα με την ανάπτυξη προϊόντων μικρού βάρους και προηγμένης τεχνολογίας υλικών και σύνθετης γεωμετρίας κατά συνέπεια μπορούν να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση καυσίμων των μέσων μεταφοράς.

Ταυτόχρονα οι Mohd Shuaib et al. σε βιβλιογραφική ανασκόπηση (7) που έκανα κατέληξαν ότι οι τεχνολογίες προσθετικών κατασκευών μπορούν να αποτελέσουν καλύτερη εναλλακτική για την παραγωγή πιο σύνθετων αντικειμένων καθώς μειώνει την υποβάθμιση του περιβάλλοντος και τα απόβλητα, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και ο χρόνος παραγωγής, όμως καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια. Ενώ ταυτόχρονα η χρήση αφαιρετικών κατεργασιών είναι καλύτερη εναλλακτική για την παραγωγή αντικειμένων που χρειάζονται επιφανειακές κατεργασίες καθώς υπάρχουν λιγότερα απόβλητα, ο χρόνος κατασκευής είναι μικρότερος και η κατανάλωση ενέργειας είναι παρόμοια με αυτή των προσθετικών κατασκευών.

Τέλος αυτό που παρατηρείται από το σύνολο των άρθρων είναι ότι το ενεργειακό αποτύπωμα των προσθετικών κατασκευών σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής δεν είναι δεδομένα μικρότερο ή μεγαλύτερο. Αλλά έχει σχέση με την τεχνολογία εκτύπωσης, τον σκοπό εκτύπωσης, αν δηλαδή αποτελεί κάποια εξατομικευμένη παραγωγή μικρής ποσότητας προϊόντων ή μαζική παραγωγή, την γεωμετρία του αντικειμένου αλλά και τις παραμέτρους που απαιτούνται για την επίτευξη της απαιτούμενης ποιότητας και χαρακτηριστικών του προϊόντος.



## Μαζική παραγωγή- Εφοδιαστική αλυσίδα

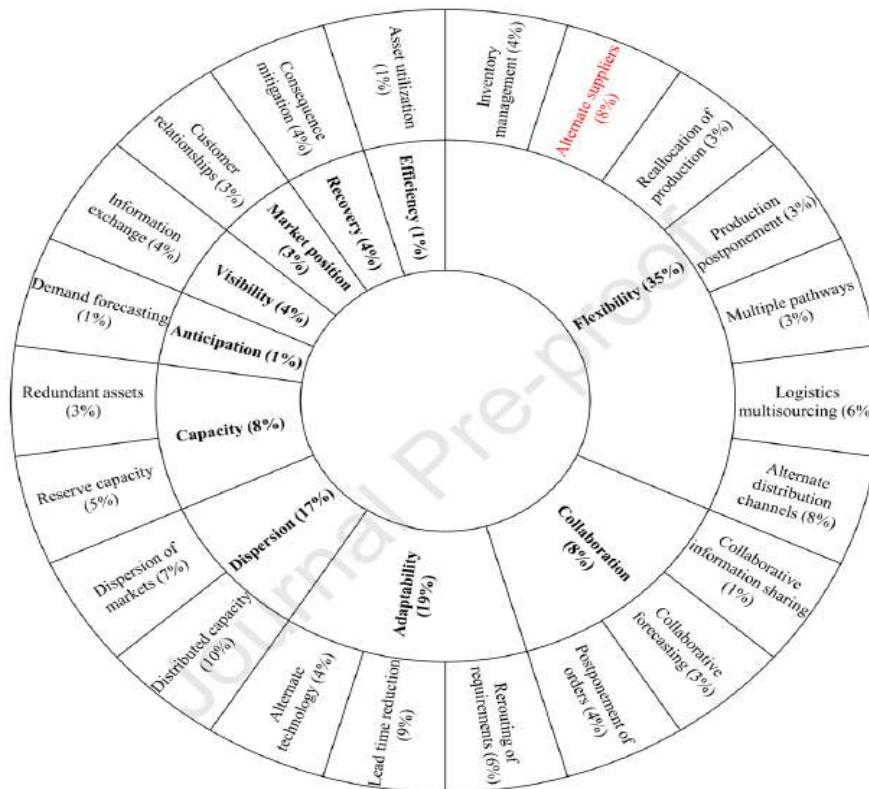
Η ανάπτυξη των προσθετικών κατασκευών – 3D Printing μπορεί λόγω των χαρακτηριστικών του να αλλάξει τα μέχρι τώρα δεδομένα που γνωρίζουμε στην παραγωγή και την εφοδιαστική αλυσίδα προϊόντων.

Όπως σχολιάζουν οι Hing Kai Chan et al. (8) η επίδραση των τεχνολογιών προσθετικών κατασκευών και η παραγωγή με βάση την παραγγελία (make-to-order) μπορεί να μειώσει δραματικά τα αποθέματα που υπάρχουν σε μια εφοδιαστική αλυσίδα. Σύμφωνα με τους συγγραφείς η δυνατότητα για προσαρμογή της παραγωγής ακόμα και μοναδικών προϊόντων κατά παραγγελία, θα επιτρέπει την παραγωγή μικρότερων ποσοτήτων προϊόντων από τους παραγωγούς και μεγαλύτερη δυνατότητα για διαφορετικότητα στην παραγωγή προϊόντων σε σχέση με τις σημερινές εφοδιαστικές αλυσίδες.

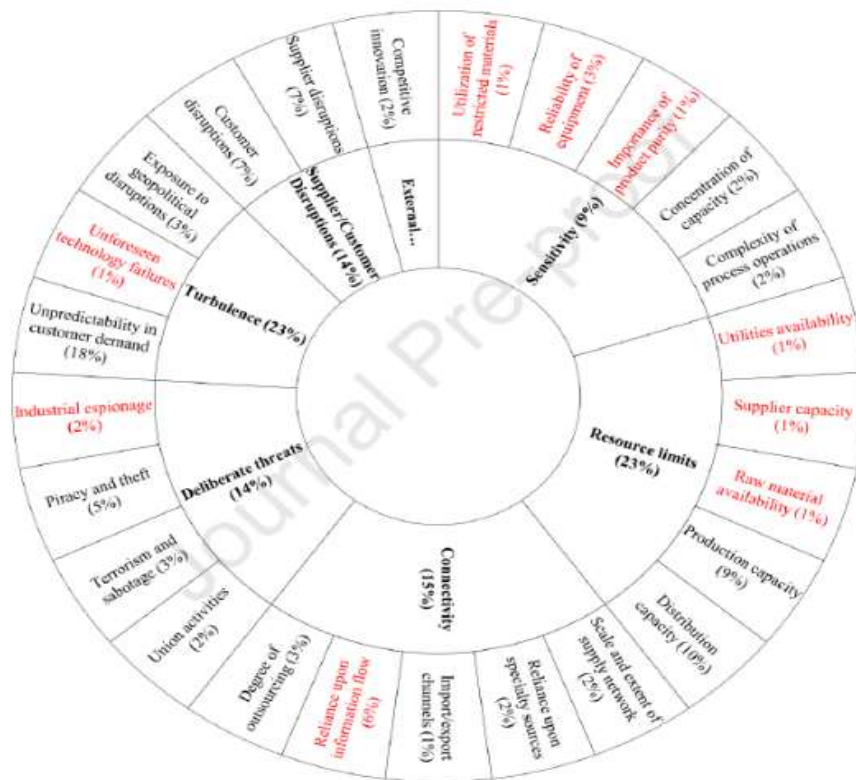
Η υιοθέτηση των προσθετικών κατασκευών σε μια εφοδιαστική αλυσίδα (Supply Chain) σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται να έχει θετική επίδραση στην κατάσταση της εφοδιαστικής αλυσίδας με βάση τα δεδομένα (9). Συγκεκριμένα η υιοθέτηση των προσθετικών κατασκευών φαίνεται να έχει πάντα θετικό αντίκτυπο στην προσαρμοστικότητα του προγράμματος παραγωγής, ενώ με βάση τα ίδια αποτελέσματα φαίνεται ότι η υιοθέτηση προσθετικών κατασκευών επηρεάζει αρνητικά τις διαθέσιμες εναλλακτικές για προμήθεια πρώτων υλών παρόλα αυτά είναι η λιγότερο επηρεαζόμενη μεταβλητή στην κατάσταση μιας εφοδιαστικής αλυσίδας από την υιοθέτηση προσθετικών κατασκευών.

Πιο ολοκληρωμένα φαίνεται η επίδραση των προσθετικών κατασκευών στην εφοδιαστική αλυσίδα από την μελέτη της προσαρμοστικότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας ( Supply Chain Resilience) δεδομένου ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβλητών.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η επίδραση των προσθετικών κατασκευών στις δυνατότητες και στους περιορισμούς της εφοδιαστικής αλυσίδας (9):



Εικόνα 12: Δυνατότητες των προσθετικών κατασκευών στην εφοδιαστική αλυσίδα



Εικόνα 13: Περιορισμοί των προσθετικών κατασκευών στην εφοδιαστική αλυσίδα

Από το πρώτο διάγραμμα που δείχνει την επίδραση στις δυνατότητες της εφοδιαστικής αλυσίδας φαίνεται να ενισχύει σημαντικά στην παράμετρο Flexibility της εφοδιαστικής αλυσίδας με σημαντική επίδραση στην παράμετρο Flexibility να έχουν οι μεταβλητές Inventory management, Reallocation of production, multiple pathways, logistics multisourcing, production postponement, alternative suppliers. Ενώ αρνητική επίδραση έχουν εναλλακτικές προμήθειες. Στο σύνολο φαίνονται η θετική των υπόλοιπων μεταβλητών στις δυνατότητες της εφοδιαστικής αλυσίδας με την παράμετρο Flexibility να καταλαμβάνει το μεγάλο ποσοστό του 35%, της παράμετρο Adaptability να καταλαμβάνει το 19%, την παράμετρο Dispersion να καταλαμβάνει το 17%, η παράμετρος Capacity και Collaboration να καταλαμβάνουν 8% η κάθε μία και τέλος οι υπόλοιπες μεταβλητές (Efficiency, Recovery, Market position, Visibility, Anticipation) να καταλαμβάνουν το 13%.

Στο δεύτερο διάγραμμα φαίνεται ότι την μεγαλύτερη επίδραση στην ευπάθεια της εφοδιαστικής αλυσίδας έχει η παράμετρος Resource limits και η παράμετρος Turbulence με ποσοστά 23% το καθένα. Η υιοθέτηση των προσθετικών κατασκευών φαίνεται να αυξάνει την μεταβλητή Resource limits καθώς μετριάζει την παράμετρο Production capacity και την παράμετρο Distribution capacity.

Πόσο μάλλον η επίδραση της μεταβλητής Raw material availability στην μεταβλητή Production capacity τείνει να αυξάνεται λόγω των εμποδίων λόγω προμήθειας υλικών προσθετικών κατασκευών.

Όσον αφορά την παράμετρο Turbulence μόνο σε δύο περιπτώσεις φαίνεται η υιοθέτηση των προσθετικών κατασκευών να αυξάνει την ευπάθεια της εφοδιαστικής αλυσίδας. Κυρίως οι προσθετικές κατασκευές μειώνουν την διαταραχή βελτιώνοντας την μεταβλητή Unpredictability in customer demand.

Τέλος όσον αφορά την παράμετρο Deliberate threats η υιοθέτηση προσθετικών κατασκευών φαίνεται να μειώνει αυτή την ευπάθεια στις περισσότερες περιπτώσεις. Όμως λόγω της αυξημένης ροής πληροφοριών αυξάνεται σημαντικά η μεταβλητή της βιομηχανικής κατασκοπείας. Ακόμα η υιοθέτηση προσθετικών κατασκευών μπορεί να αυξήσει την ευαισθησία στην ακεραιότητα της παραγωγής και του προϊόντος λόγω των μεταβλητών αξιοπιστία του εξοπλισμού, χρήση περιορισμένων υλικών, σημαντικότητα της καθαρότητας της παραγωγής, που όμως μπορούν να βελτιωθούν με τον καιρό αντιμετωπίζοντας την αστάθεια στις κατεργασίες προσθετικών κατασκευών, περιορισμοί των υλικών των προσθετικών κατασκευών και της έλλειψη τυποποίησης των υλικών των προσθετικών κατασκευών.

Παράλληλα επισημαίνεται η επίδραση των προσθετικών κατασκευών σε μια τοπική ολοκληρωμένη δομή παραγωγής- αποθέματος- μεταφοράς (10). Συγκεκριμένα η υιοθέτηση προσθετικών κατασκευών μπορεί να οδηγήσει σε πιο τοπικές, παγκόσμια συνδεδεμένες και πιο αποδοτικές εφοδιαστικές αλυσίδες, δεδομένου ότι ο κάθε καταναλωτής μπορεί να γίνει μικρο-παραγωγός. Κατά συνέπεια ενσωματώνοντας προσθετικές κατασκευές και εφοδιαστικές αλυσίδες έχει δείξει προοπτικές για μείωση του αποθέματος και του κόστους μεταφορών καθώς και αλλαγή του κύκλου παραγωγής από make-to-order σε make-on-demand.

## FDM

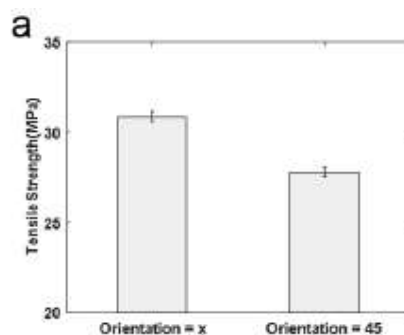
Στην τεχνολογία FDM (FUSED DEPOSITION MODELLING) ή FFF (FUSED FILAMENT FABRICATION) χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικά πολυμερή ως αναλώσιμα. Το αναλώσιμο νήμα προωθείται μέσα σε ένα ακροφύσιο το οποίο βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Το υλικό που βγαίνει από το ακροφύσιο τοποθετείται επίπεδο το επίπεδο μέχρι να διαμορφωθεί το τελικό προϊόν της εκτύπωσης. Η διαδικασία ξεκινάει με την δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου (CAD), το οποίο ύστερα με την χρήση λογισμικού Slicer το οποίο με την ρύθμιση των κατάλληλων παραμέτρων για την εκτύπωση εξάγει ένα αρχείο G-code. Το αρχείο αυτό μεταφέρεται στον εκτυπωτή και χάρις αυτό κάνει τις απαραίτητες κινήσεις και ρυθμίσεις του εκτυπωτή.

Από την παραπάνω διαδικασία φαίνεται ότι υπάρχουν αρκετές παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα της εκτύπωσης όπως τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν τις ιδιότητες του εκτυπωμένου δοκιμίου είναι το πάχος του επιπέδου ( Layer resolution), θερμοκρασία, γωνία εκτύπωσης του νήματος (raster angle), κενό αέρα (11).

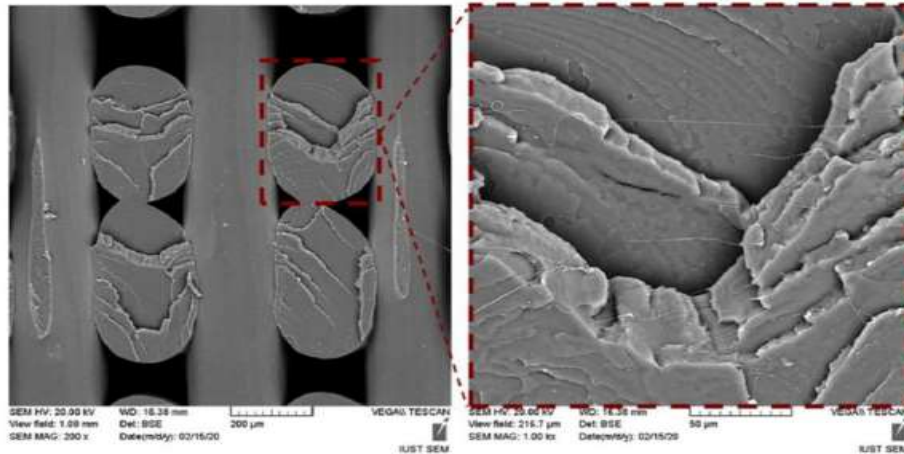
Συγκεκριμένα για αυτές τις παραμέτρους εκτύπωσης έχει παρατηρηθεί μέσω πειραμάτων ότι όσο αυξάνεται το πάχος των επιπέδων ταυτόχρονα με την ταχύτητα εκτύπωσης παρατηρείται μείωση στις εφελκυστικές και καμπτηκές μέγιστες τάσεις των δοκιμίων.

Αντίστοιχα όσον αφορά το προσανατολισμό των δοκιμίων στην τράπεζα εκτύπωσης ότι στην γωνία των  $45^\circ$  τα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής υπό κυκλικά φορτία κόπωσης. Ενώ σε άλλο πείραμα έχει παρατηρηθεί ότι η γωνία  $0^\circ$  εμφανίζει καλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό όσον αφορά τον προσανατολισμό των δοκιμίων (12).

Καθώς και ότι η γωνία του νήματος μεταξύ των επιπέδων για τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες είναι οι  $0^\circ/90^\circ$



Εικόνα 14: Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με την γωνία εκτύπωσης



Εικόνα 15: Απεικόνιση αστοχίας δοκιμίου με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

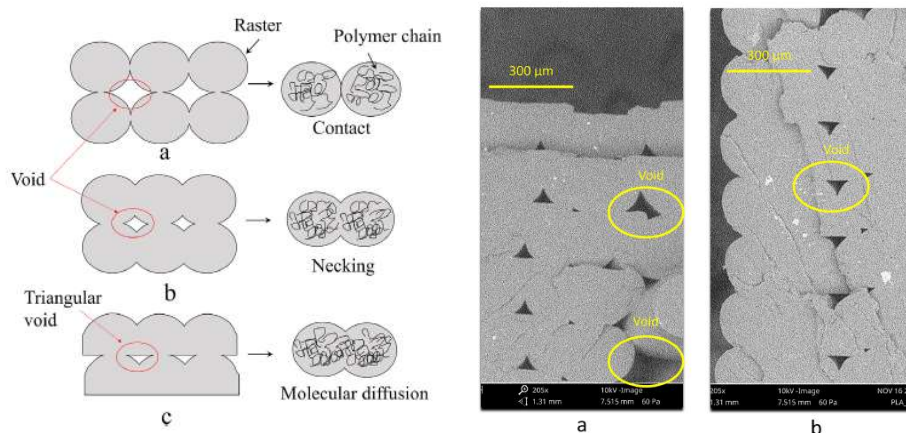
Στην παραπάνω φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο φαίνεται για τις γωνίες νήματος  $0^{\circ}/90^{\circ}$  η διάδοση των ρωγμών που σύμφωνα με την βιβλιογραφία (13) είναι μικρότερη σε σχέση με τις άλλες σχέσεις γωνιών νήματος. Άμεσα συνδεδεμένη παράμετρος με την γωνία εκτύπωσης είναι και το κενό αέρα ανάμεσα στα νήματα κατά την εκτύπωση. Με την διαμόρφωση μικρών κενών αέρα βοήθησε να δημιουργηθεί ανάμεσα των δύο γωνιών του νήματος ισχυρός δεσμός με αποτέλεσμα να βελτιωθεί η συνολική αντοχή των προϊόντων σε εφελκυστική τάση.

Σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε (14) για την εξέταση των βέλτιστων μηχανικών ιδιοτήτων προϊόντων παραγόμενων από την FDM τεχνολογία κατασκευάστηκαν 3 τύποι δοκιμίων από PLA και έγινε αντίστοιχα δοκιμή σε εφελκυσμό, κάμψη και κρούση. Παράμετροι που ορίστηκαν προς μελέτη ήταν ο προσανατολισμός των δοκιμίων στην επιφάνεια εκτύπωσης, το πάχος του επιπέδου, η γωνία εκτύπωσης του νήματος, το πλάτος εκτύπωσης του νήματος και το κενό αέρα μεταξύ των νημάτων. Από τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει ότι για τον εφελκυσμό ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων εκτύπωσης είναι προσανατολισμός  $0^{\circ}$ , πάχος επιπέδου 0,3 mm, γωνία εκτύπωσης νήματος  $0^{\circ}$ , πάχος εκτύπωσης νήματος 0,5 mm και κενό αέρα μεταξύ των νημάτων -0,1. Για την κάμψη ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων εκτύπωσης είναι προσανατολισμός  $0^{\circ}$ , πάχος επιπέδου 0,1 mm, γωνία εκτύπωσης νήματος  $0^{\circ}$ , πάχος εκτύπωσης νήματος 0,5 mm και κενό αέρα μεταξύ των νημάτων -0,1. Ενώ για την κρούση ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων εκτύπωσης είναι προσανατολισμός  $0^{\circ}$ , πάχος επιπέδου 0,3 mm, γωνία εκτύπωσης νήματος  $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ , πάχος εκτύπωσης νήματος 0,5 mm και κενό αέρα μεταξύ των νημάτων -0,1.

Από την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή των βέλτιστων αποτελεσμάτων μεταξύ όλων των καταπονήσεων, εφελκυσμός, κάμψη και κρούση, καθώς όπως αναφέρεται τα προϊόντα πολλές φορές καταπονούνται συνδυαστικά και όχι μόνο με μια μορφή καταπόνησης

προέκυψαν ότι οι βέλτιστες παράμετροι για την εκτύπωση είναι προσανατολισμός  $0^\circ$ , πάχος επιπέδου 0,3 mm, γωνία εκτύπωσης νήματος  $+45/-45$ , πάχος εκτύπωσης νήματος 0,5 mm και κενό αέρα μεταξύ των νημάτων  $0^\circ$ .

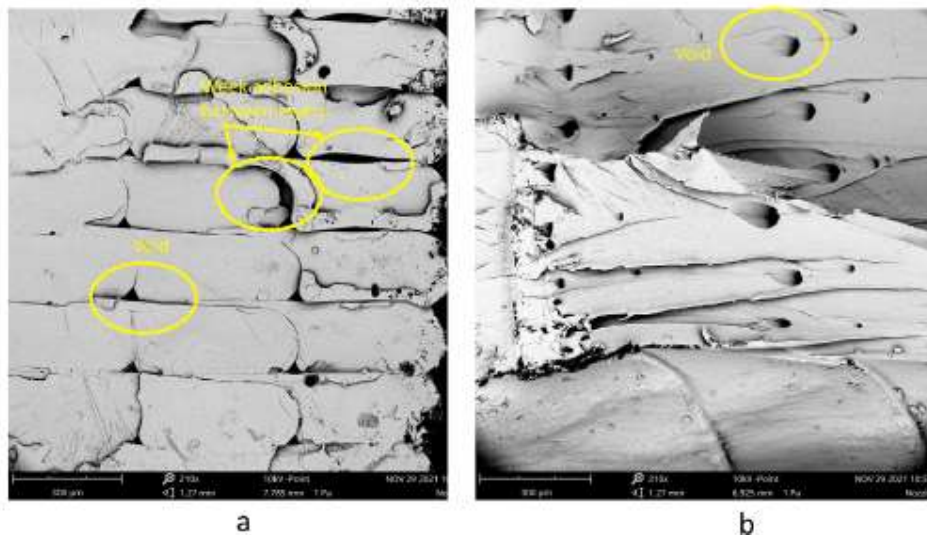
Αντίστοιχα μελετώντας τις παραμέτρους των εξωτερικών τοιχωμάτων, διάμετρος του ακροφύσιου, θερμοκρασία εκτύπωσης, ποσοστό γεμίματος και μοτίβο γεμίματος σε σχέση με την αντοχή και τον χρόνο εκτύπωσης παρατηρήθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα (15). Ο σημαντικότερος παράγοντας όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών είναι τα εξωτερικά τοιχώματα καθώς αυξάνουν σημαντικά την αντοχή των δοκιμών. Ακολουθεί το ποσοστό γεμίματος των δοκιμών το οποίο σε χαμηλό αριθμό εξωτερικών τοιχωμάτων έχει μεγάλη επίδραση, όμως σε μεγαλύτερο αριθμό εξωτερικών τοιχωμάτων δεν έχει μεγάλη επίδραση στην συνολική αντοχή των δοκιμών. Ακόμα η χρήση ακροφυσίου μεγαλύτερης διαμέτρου καθώς και το γυροειδές μοτίβο βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών ανεξαρτήτως των υπόλοιπων παραμέτρων. Τέλος όσον αφορά τον χρόνο εκτύπωσης παρατηρήθηκε ότι με την χρήση περισσότερων εξωτερικών τοιχωμάτων και την μείωση του γεμίματος από το 40% σε 10% μειώνεται σημαντικά ο χρόνος εκτύπωσης χωρίς να επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών. Στην ίδια μελέτη παρατηρήθηκε ότι η χρήση μεγαλύτερων θερμοκρασιών για την εκτύπωση βελτιώνει δραστικά τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών καθώς δημιουργούνται μικρότερα κενά αέρα μεταξύ των νημάτων και των επιπέδων καθώς αυτό συμβάλει και στην δημιουργία μοριακών δεσμών μεταξύ των νημάτων και των επιπέδων όπως παρατηρείται και στις ακόλουθες φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και στο αντίστοιχο διάγραμμα.



Εικόνα 16: Σχέδιο και απεικόνιση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου κενών αέρα μεταξύ των νημάτων.

Στην καλύτερη σύνδεση μεταξύ των επιπέδων όπως επίσης παρατηρήθηκε συμβάλει και η διάμετρος του ακροφυσίου με την χρήση μεγαλύτερης διαμέτρου ακροφύσιο να συμβάλει στο να μένουν λιγότερα κενά ανάμεσα στα νήματα και τα επίπεδα εκτύπωσης. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω

εικόνα με την αριστερή φωτογραφία από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο να αντιστοιχεί σε διάμετρο ακροφυσίου 0,4mm και την δεξιά να αντιστοιχεί σε διάμετρο ακροφυσίου 6mm.



Εικόνα 17: Απεικόνιση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Εκτός από την μηχανική συμπεριφορά των δοκιμών σημαντική παράμετρος που αφορά την υιοθέτηση της τεχνολογίας FDM είναι και ο χρόνος εκτύπωσης, η ποιότητα της επιφάνειας καθώς και το ποσό των χρησιμοποιούμενων υλικών. Σε αντίστοιχο πείραμα (16) που εξετάζονται η τραχύτητα επιφανείας, χρόνος εκτύπωσης και το μήκος χρησιμοποιούμενο αναλώσιμου παρατηρήθηκε ότι την μεγαλύτερη επίδραση από τις παραμέτρους που ορίστηκαν για το πείραμα είχε το ποσοστό του γεμίσματος του δοκιμίου (infill%) καθώς μαζί και με το πάχος του επιπέδου αποτελούν τις παραμέτρους με την μεγαλύτερη επίδραση στις υπό εξέταση επιπτώσεις στις διαδικασίες τις εκτύπωσης με τεχνολογία FDM.

Επομένως προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο σχεδιασμός και η επιλογή των απαραίτητων ρυθμίσεων και παραμέτρων για την πραγματοποίηση μιας τρισδιάστατης εκτύπωσης με βέλτιστες μηχανικές ιδιότητες είναι αρκετά μεταβλητή σε σχέση με τα υλικά που χρησιμοποιούνται και την γεωμετρία των εκτυπωμένων προϊόντων. Σημαντική παρατήρηση είναι και η αλληλεπίδραση μεταξύ των διάφορων παραμέτρων που σε συνδυασμό μπορεί να αυξάνουν ή και να μειώνουν τις μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων της εκτύπωσης παραδείγματος χάριν έχει παρατηρηθεί ότι ο συνδυασμό του πάχους του επιπέδου και της γωνίας εκτύπωσης νήματος σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό του δοκιμίου στην τράπεζα εκτυπώσεις έχουν αρνητική συσχέτιση με μεταξύ τους όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος (17).



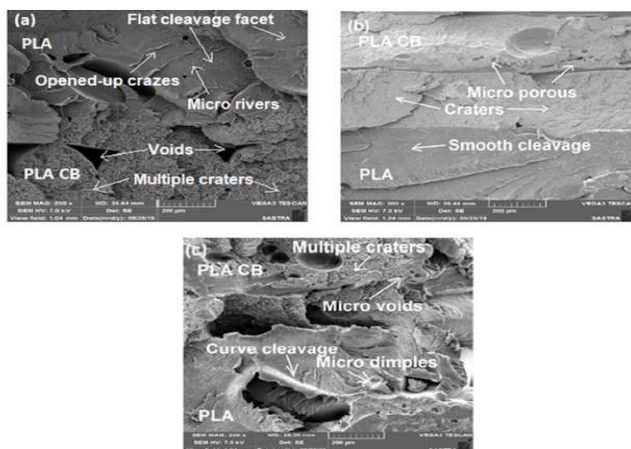
## Dual-Material

Σημαντική δυνατότητα στην βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των προϊόντων τρισδιάστατης εκτύπωσης με την τεχνολογία FDM μπορεί να έχει η εκτύπωση με την χρήση δύο υλικών. Σήμερα υπάρχουν εκτυπωτές με δύο ακροφύσια ενσωματωμένα σε μια κεφαλή ή και με δύο κεφαλές εκτύπωσης που δίνουν την δυνατότητα παραγωγής τέτοιων προϊόντων.

Το βασικό ζήτημα που αντιμετωπίζουν οι εκτυπώσεις πολλαπλών υλικών είναι οι μοριακοί δεσμοί μεταξύ των υλικών. Ακριβώς επειδή είναι αδύναμοι οι χημικοί δεσμοί μεταξύ των διαφορετικών υλικών προτείνεται πολλές φορές να δημιουργείται και μηχανικός δεσμός μεταξύ των υλικών (18). Επίσης κατασκευές που αποτελούνται από μια επαναλαμβανόμενη βαθμίδα τείνουν να έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από αυτά που αποτελούνται από ξεχωριστά τμήματα διαφορετικών υλικών.

Πειράματα με πολυστρωματική δομή δύο υλικών (PLA, PLA CB) εμφανίζουν μεγαλύτερη ακαμψία όταν οι γωνία εκτύπωσης νήματος είναι  $0^{\circ}/90^{\circ}$ , ενώ ταυτόχρονα έχουν την μικρότερη τιμή UTS (Ultimate Tensile Strength). Ακόμα τα μοντέλα με γωνία εκτύπωσης νήματος  $+45^{\circ}/-45^{\circ}$  παρουσιάζουν καλύτερη παραμόρφωση αστοχίας από όλα τα υπόλοιπα μοντέλα (γωνία εκτύπωσης νήματος  $0^{\circ}$ ,  $0^{\circ}/90^{\circ}$ ,  $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ ) (19).

Εφόσον όπως αναφέρεται παραπάνω οι μηχανικές ιδιότητες των τρισδιάστατα εκτυπωμένων κατασκευών επηρεάζονται άμεσα από τις παραμέτρους εκτύπωσης, στην περίπτωση των κατασκευών πολλών υλικών μεγάλη επίδραση έχουν και στις μηχανικές ιδιότητες και η δυνατότητα των υλικών να διαμορφώνουν μεταξύ τους χημικούς δεσμούς που και αυτό σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από τις παραμέτρους εκτύπωσης.



Εικόνα 18:Απεικόνιση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου- μηχανισμοί αστοχίας

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω φωτογραφία (19) η γωνία εκτύπωσης νήματος έχει σημαντική επίδραση στην διαμόρφωση της κατασκευής με την πρώτη φωτογραφία να αντιστοιχεί σε γωνία εκτύπωσης  $0^\circ$  όπου εμφανίζονται πόροι στις επιφάνειες σύνδεσης των δύο υλικών. Στην δεύτερη φωτογραφία που αντιστοιχεί στην γωνία εκτύπωσης νήματος  $0^\circ / 90^\circ$  εμφανίζονται μικρό-πόροι και ομαλές ρωγμές, ενώ στην τρίτη φωτογραφία που αντιστοιχεί σε γωνία εκτύπωσης  $+45^\circ / -45^\circ$  όπου εμφανίζονται μικρό-πόροι καθώς και καμπύλες ρωγμές.

Επομένως μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι οι μηχανικές ιδιότητες μιας κατασκευής ή ενός δοκιμίου, προϊόν προσθετικών κατασκευών, είναι άμεσα εξαρτημένες από τις παραμέτρους εκτύπωσης, με την κάθε μία ανάλογα και με την μορφή καταπόνησης (εφελκυσμός, κάμψη, θλίψη, κρούση) να έχει σχετικά θετική ή αρνητική συμβολή στην διαμόρφωση των ιδιοτήτων της κατασκευής. Δεδομένου αυτού έχει μεγάλη σημασία η μελέτη της οριοθέτησης των επιπτώσεων των διαφορετικών παραμέτρων αλλά και στον συνδυασμό αυτών στην τελική μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής, καθώς με τα σημερινά δεδομένα δεν μπορούμε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων τις μηχανικές ιδιότητες των κατασκευών. Πρέπει να σημειωθεί ότι μεγάλη συμβολή σε αυτό το γνωστικό κενό έχει και η έλλειψη τυποποίησης των υλικών που χρησιμοποιούνται, αν και όσο αναφέρεται στην βιβλιογραφία, οι παράμετροι εκτύπωσης έχουν μεγαλύτερη συμβολή στην διαμόρφωση των τελικών μηχανικών ιδιοτήτων των κατασκευών. Ειδικότερα υπάρχει συζήτηση από την επιστημονική κοινότητα κατά πόσο μπορεί η χρήση δύο ή και περισσότερων υλικών για την κατασκευή προϊόντων προσθετικών κατασκευών να βελτιώσει τις μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις κατασκευές μονού υλικού ή και σύνθετων υλικών.

## Μεθοδολογία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση για να προσδιορισθούν οι κύριες κατευθύνσεις στις μελέτες και καθώς και τα ερευνητικά κενά που υπάρχουν σήμερα. Στην βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετήθηκαν η τρέχουσα τεχνολογική στάθμιση των τεχνολογιών προσθετικών κατασκευών, η επίδραση αυτών στο περιβάλλον, τις μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων προσθετικών κατασκευών μονού υλικού, σύνθετων υλικών και τέλος προϊόντων διπλού υλικού. Για την βιβλιογραφική ανασκόπηση χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω λέξεις κλειδιά: AM processes, AM mechanical Properties, AM environmental impact, AM and Supply chains, AM impact on Supply chains, Dual material AM, Multilateral AM στις βάσεις ScienceDirect, Scopus, ResearchGate καθώς και στην μηχανή αναζήτησης GoogleScholar. Ακολούθως διαπιστώθηκε το γνωστικό κενό για τις μηχανικές ιδιότητες των κατασκευών από τεχνολογίες προσθετικών υλικών διπλού υλικού. Ιδιαίτερη περίπτωση και κενό διαπιστώθηκε στον συνδυασμό υλικών PLA και Nylon.

Επομένως έγιναν μελέτη της δυνατότητας εκτύπωσης δοκιμών διπλού υλικού (PLA,Nylon) και διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μεγάλη αδυναμία προσκόλλησης των δύο υλικών μεταξύ τους ιδιαίτερα στα επίπεδα εναλλαγής υλικών καθώς και εμφανιζόταν έντονα το φαινόμενο παραμόρφωσης λόγω της μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας κρυσταλλοποίησης των δύο υλικών.

Καθώς τόσο από την βιβλιογραφική ανασκόπηση όσο και από τα φυλλάδια με σχετικές πληροφορίες εταιριών παραγωγής νημάτων, αναφερόταν η μεγάλη αδυναμία δημιουργίας χημικών δεσμών μεταξύ των δύο υλικών λόγω των χημικών τους ιδιοτήτων, των θερμικών τους ιδιοτήτων που επηρεάζουν άμεσα τις θερμοκρασίες εκτύπωσης και την ρεολογική τους συμπεριφορά.

Με βάση τα παραπάνω απορρίφθηκε η συγκεκριμένη επιλογή υλικών και επιλέχθηκαν σαν υλικά το PLA και το ABS pro.

Ακολούθως Έγινε σχεδιασμός πειραμάτων για την διενέργεια δοκιμής κάμψης. Συγκεκριμένα ακολουθήθηκε η μεθοδολογία L4 Taguchi ή ορθογωνικού πίνακα.

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία για την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών διπλού υλικού έπρεπε να κατασκευαστούν 4 μοντέλα. Δεδομένης της αναφοράς που γίνεται στην βιβλιογραφική ανασκόπηση για την επίδραση του ύψους επιπέδου στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών επιλέχθηκε να επαναληφθούν τα πειράματα για δύο ύψη επιπέδου 0,2mm και 0,35mm.

Ακολούθως σχεδιάστηκε τρισδιάστατο μοντέλο CAD στο πρόγραμμα Inventor AutoDesk. Εφόσον οι μεταβλητές με βάση τον σχεδιασμό του πειράματος δεν επηρεάζουν την γεωμετρία του, καθώς αυτή εξαρτάται αυτοτελώς από το πρότυπο διεξαγωγής των πειραμάτων, σχεδιάστηκε μόνο ένα μοντέλο CAD. Με βάση την απαιτούμενη διαστασιολόγηση των δοκιμών το τρισδιάστατο μοντέλο διαιρέθηκε σε 9 μέρη. Ένα ενδιάμεσο που είχε το διπλάσιο πάχος από τα υπόλοιπα και 8 ίσα μέρη. Αυτή η επιλογή έγινε έτσι ώστε με βάση τον σχεδιασμό πειραμάτων να μπορεί να ελεγχθεί το ποσοστό του υλικού.

Ακολούθως για να μπορέσει να γίνει πραγματοποιηθεί η κατασκευή των δοκιμών θα έπρεπε να εξαχθεί το μοντέλο σε αρχείο .STL και να γίνει επεξεργασία αυτού από πρόγραμμα παράγωγής G-code. Για να μπορέσουν να ελεγχθούν οι υπόλοιπες μεταβλητές της διεργασίας, από το μοντέλο CAD έγινε εξαγωγή δύο αρχείων .STL, ένα που αντιστοιχούσε στο 40% του όγκου και ένα που αντιστοιχούσε στο 60% του όγκου του μοντέλου.

Τέλος για την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών κάμψης τριών σημείων δημιουργήθηκε μοντέλο για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο πρόγραμμα Solidworks. Επιλέχθηκε να γίνει μοντέλο επιφανειών καθώς μέσω του εργαλείου Composites του προγράμματος δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης του μοντέλου με βάση την μεθοδολογία Classical Laminate Theory (CLT) που έχει πολύ μικρή απόκλιση από την πραγματική συμπεριφορά των μηχανικών ιδιοτήτων πολυστρωματικών ορθοτροπικών κατασκευών. Τέλος το ίδιο μοντέλο δημιουργήθηκε και στο Inventor Nastran για την εξαγωγή των πινάκων ADB της μεθοδολογίας CLT και να πραγματοποιηθεί θεωρητικός υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμών.

## Πειράματα

Με βάση την μεθοδολογία Taguchi L4 επιλέχθηκαν 3 μεταβλητές και 2 επίπεδα για την κάθε μία μεταβλητή όπου θα γίνουν 4 πειράματα του πειράματος, όπως παρουσιάζεται και στον παρακάτω Πίνακα 1:

Πείραμα	Μεταβλητές		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Πίνακας 1. Σχεδιασμός πειράματος Taguchi L4

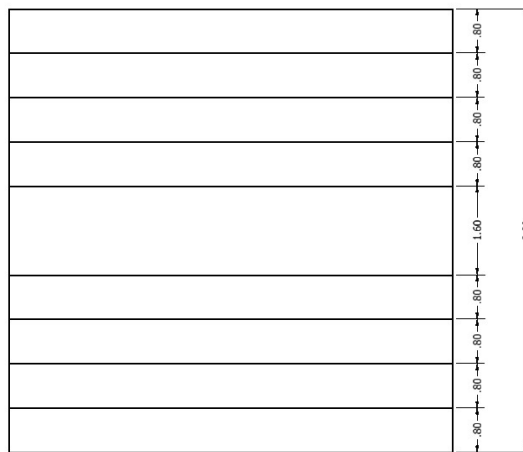
Σε κάθε ένα από το κελιά εμφανίζεται το επίπεδο της κάθε μεταβλητής ανά αριθμό πειράματος. Για παράδειγμα στο δεύτερο πείραμα κατασκευάζεται πείραμα όπου για την μεταβλητή 1 επιλέγεται το επίπεδο 1, για την μεταβλητή 2 επιλέγεται το επίπεδο 2 και για την μεταβλητή 3 το επίπεδο 2. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναγνωρίζει ότι δεν μπορούν να ελεγχθούν όλες οι μεταβλητές που επηρεάζουν το αποτέλεσμα ενός πειράματος. Στην μεθοδολογία οι μεταβλητές που δεν ελέγχουμε την επίδραση τους στο αποτέλεσμα ονομάζονται μεταβλητές θορύβου. Ο σχεδιασμός πειραμάτων με την μέθοδο Taguchi προσπαθεί να βρει τις μεταβλητές ελέγχου που μειώνουν την επίδραση των μεταβλητών θορύβου στο τελικό αποτέλεσμα του πειράματος. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει ένα αποτέλεσμα από το πείραμα έτσι ώστε μια διαδικασία να έχει επαναληψιμότητα. Με την χρήση ορθογώνιων πινάκων γίνεται η παραδοχή ότι ο σχεδιασμός είναι ισορροπημένος και το κάθε επίπεδο μεταβλητής έχει την ίδια βαρύτητα, εξαιτίας αυτού κάθε μεταβλητή μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη και ότι δεν έχει επίδραση στον προσδιορισμό των άλλων μεταβλητών.

Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν στην μεθοδολογία είναι η ποσότητα ανά όγκο των δύο υλικών σε ποσοστά , η γωνία εκτύπωσης νήματος (raster angle) , και η εναλλαγή της γωνίας νήματος (Πίνακας 2).

Πείραμα	Γωνία εκτύπωσης νήματος	Εναλλαγή γωνία εκτύπωσης νήματος	Ποσοστό υλικού
1	0,90	Per Block	60% PLA - 40% ABS
2	0,90	Per Layer	60% ABS - 40% PLA
3	45, -45	Per Block	60% ABS - 40% PLA
4	45, -45	Per Layer	60% PLA - 40% ABS

Πίνακας 2: Σχεδιασμός πειραμάτων.

Για την υλοποίηση των δοκιμών κάμψης επιλέχθηκε το πρότυπο **ASTM D3039**. Αρχικά δημιουργήθηκε το τρισδιάστατο μοντέλο (CAD), επομένως στην δυσδιάστατη σχεδίαση, σχεδιάστηκε ένα τετράγωνο το οποίο διαιρέθηκε όπως αναφέρεται παραπάνω σε 9 μέρη με ευθείες στις ανάλογες διαστάσεις. Μεταβαίνοντας στην καρτέλα τρισδιάστατης σχεδίασης του προγράμματος, επιλέχθηκαν οι επιφάνειες που αντιστοιχούν στο 60% του όγκου του υπό υλοποίηση μοντέλου και με την εντολή extrude δημιουργήθηκε το μοντέλο όγκου, αντίστοιχα με την ίδια διαδικασία δημιουργήθηκε ως νέο στερεό και το μοντέλο όγκου που αντιστοιχεί στο 40% του όγκου του μοντέλου, έτσι ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν ξεχωριστά αρχεία .STL .



Εικόνα 19: Σχέδιο διαίρεσης των δοκιμών ανά block υλικού.

Για την παραγωγή του G-code χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Cura της εταιρίας Ultimaker. Καθώς ο εκτυπωτής δεν είναι συμβατός με το συγκεκριμένο πρόγραμμα έπρεπε να γίνει η απαραίτητη ρύθμιση του προγράμματος έτσι ώστε να παράγει G-code συμβατό με τον εκτυπωτή που χρησιμοποιήθηκε. Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκε προφίλ για τον συγκεκριμένο εκτυπωτή. Μέσα από το αντίστοιχο περιβάλλον του προγράμματος έγινε εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων ( διαστάσεις τράπεζας εκτύπωσης, χρήση θερμαινόμενης τράπεζας εκτύπωσης, start/end G-code, G-code για την εναλλαγή κεφαλής εκτύπωσης).

Ύστερα έγινε εισαγωγή των δύο αρχείων .STL και συγχώνευση αυτών για να δημιουργηθεί ένα ενιαίο μοντέλο και επιλογή των δύο κεφαλών, μια για το κάθε υλικό. Ακολούθως έγιναν για την κάθε ξεχωριστή κατασκευή ,με βάση τον σχεδιασμό πειραμάτων, οι απαραίτητες ρυθμίσεις. Η κατασκευή των δοκιμών έγινε στον εκτυπωτή FlashForge Creator 3 Pro .

Τέλος για την πραγματοποίηση των πειραμάτων κάμψης χρησιμοποιήθηκε η μηχανή κάμψης Galdabini του εργαστηρίου Αντοχής υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών. Με βάση το πρότυπο η απόσταση μεταξύ των σημείων στήριξης ήταν 80mm και ο ρυθμός αύξησης της δύναμης ήταν 0,1mm/sec.



Εικόνα 20: Φωτογραφίες της μηχανής δοκιμής κάμψης του εργαστηρίου.

### CAE

Για την δημιουργία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SolidWorks. Δημιουργήθηκε μια επιφάνεια στις απαραίτητες διαστάσεις που ορίζονται από το πρότυπο καθώς και 3 κυλινδρικές επιφάνειες όπου προσομοιώνουν τα σημεία στήριξης των δοκιμίων. Και ύστερα μεταβαίνοντας στην επέκταση Simulation, Στατική ανάλυση του προγράμματος γίνεται η ολοκλήρωση του μοντέλου. Αρχικά ορίστηκαν τα σημεία στήριξης (3 κύλινδροι) ως συμπαγή με υλικό κοινός ανθρακούχος χάλυβας ( παραδοχή που βεβαιώνει ότι η μηχανική τους αντοχή είναι επιπέδου τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από το υπό εξέταση δοκίμιο). Ύστερα ορίστηκε η επιφάνεια που αντιστοιχεί στο δοκίμιο ως σύνθετο υλικό και δημιουργήθηκε η λίστα με τα χαρακτηριστικά (γωνία εκτύπωσης νήματος, υλικό, πάχος) του κάθε δοκιμίου ανά επίπεδο. Για τα υλικά

δημιουργήθηκαν δύο υλικά ορθοτροπικά με ιδιότητες, ABS Μέτρο Ελαστικότητας  $E1=1790$  και  $E2=1150$  και πυκνότητα  $1.04e-9$  και PLA Μέτρο Ελαστικότητας  $E1=3120$  και  $E2=2800$  και πυκνότητα  $1,25e-9$ .

Επομένως για την ολοκλήρωση του μοντέλου προσομοίωσης τοποθετούνται πακτώσεις στους δύο κυλίνδρους στήριξης που βρίσκονται στην κάτω πλευρά του κυλίνδρου, ενώ στον τρίτο κύλινδρο που βρίσκεται στην άνω πλευρά του δοκιμίου τοποθετούνται στηρίξεις που του επιτρέπουν μόνο την κατακόρυφη κίνηση. Όσον αφορά τις στηρίξεις του δοκιμίου αντίστοιχα τοποθετούνται δυνάμεις που του επιτρέπουν μονάχα την κίνηση στον κατακόρυφο άξονα.

Τέλος γίνεται η δημιουργία του πλέγματος και αντίστοιχα γίνεται «τρέξιμο» της προσομοίωσης.

Ακόμα αντίστοιχο μοντέλο δημιουργήθηκε και στο πρόγραμμα Inventor Nastran για τον υπολογισμό των πινάκων ABD της μεθοδολογίας Classic Laminate Theory. Ταυτόχρονα προστέθηκαν οι αντίστοιχες στηρίξεις και δυνάμεις με την προσομοίωση στο πρόγραμμα Solidworks, όμως δεν υπολογίστηκε ποτέ το μοντέλο καθώς εμφανιζόταν πρόβλημα μοναδικότητας κατά την διάρκεια υπολογισμού από το πρόγραμμα. Όπως αναφέρεται στην ιστοσελίδα του προγράμματος μια από τις πιθανές αιτίες που εμφανίζεται το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η διαμόρφωση τού πλέγματος, ύστερα από διάφορες δοκιμές πύκνωσης του πλέγματος αλλά και αραιώσης του δεν επιτεύχθηκε η επίλυση του προβλήματος.



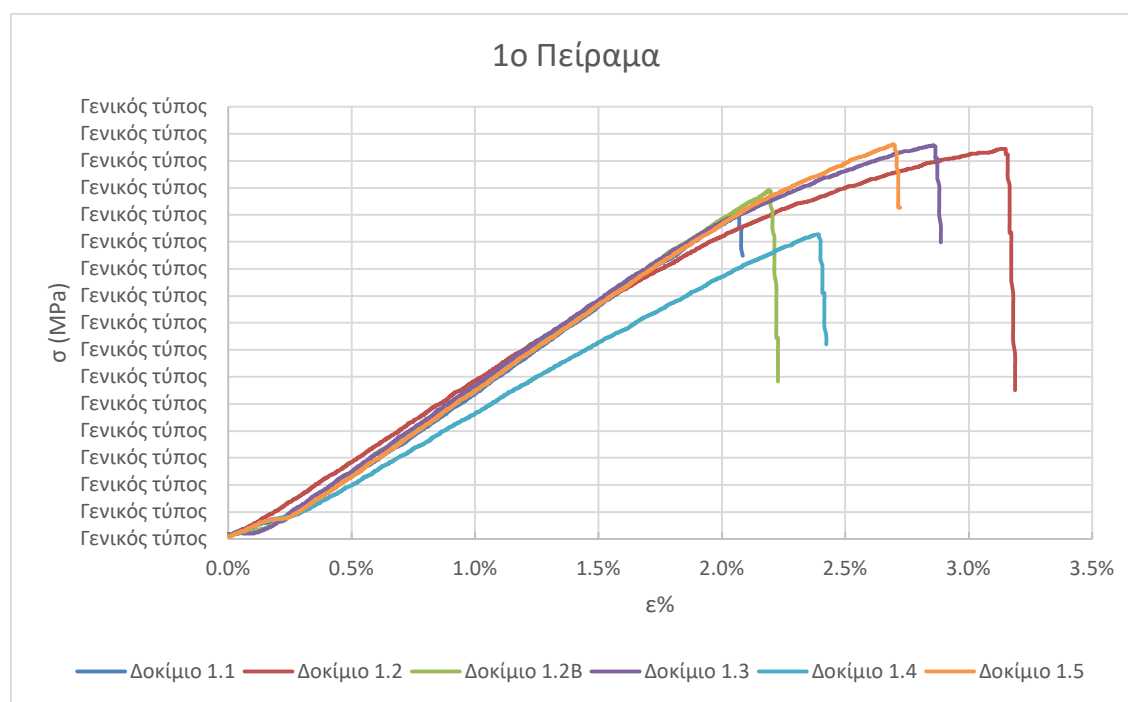
## Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας που παρουσιάζονται παρακάτω είναι: τα διαγράμματα Τάσης -Παραμόρφωσης για το κάθε πείραμα με βάση τον σχεδιασμό πειραμάτων όπου παρουσιάζονται και τα πέντε δοκίμια για το κάθε πείραμα όσο και η μέση καμπύλη. Ακολούθως παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα για τις μέσες τιμές μεταξύ των τεσσάρων πειραμάτων. Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν τόσο την πειραματική διαδικασία για πάχος επιπέδου 0,35mm όσο και για πάχος επιπέδου 0,2mm.

Για την δημιουργία των διαγραμμάτων έγινε ο υπολογισμός της Τάσης ( $\sigma$ ) και της Παραμόρφωσης ( $\epsilon\%$ ) αντίστοιχα, με βάση την μεθοδολογία που προτείνεται στο πρότυπο D709 αφού τα πρωτόλεια δεδομένα είναι δύναμη και μήκος μετατόπισης.

### Πείραμα με πάχος επιπέδου 0,35mm

#### 1<sup>ο</sup> Πείραμα

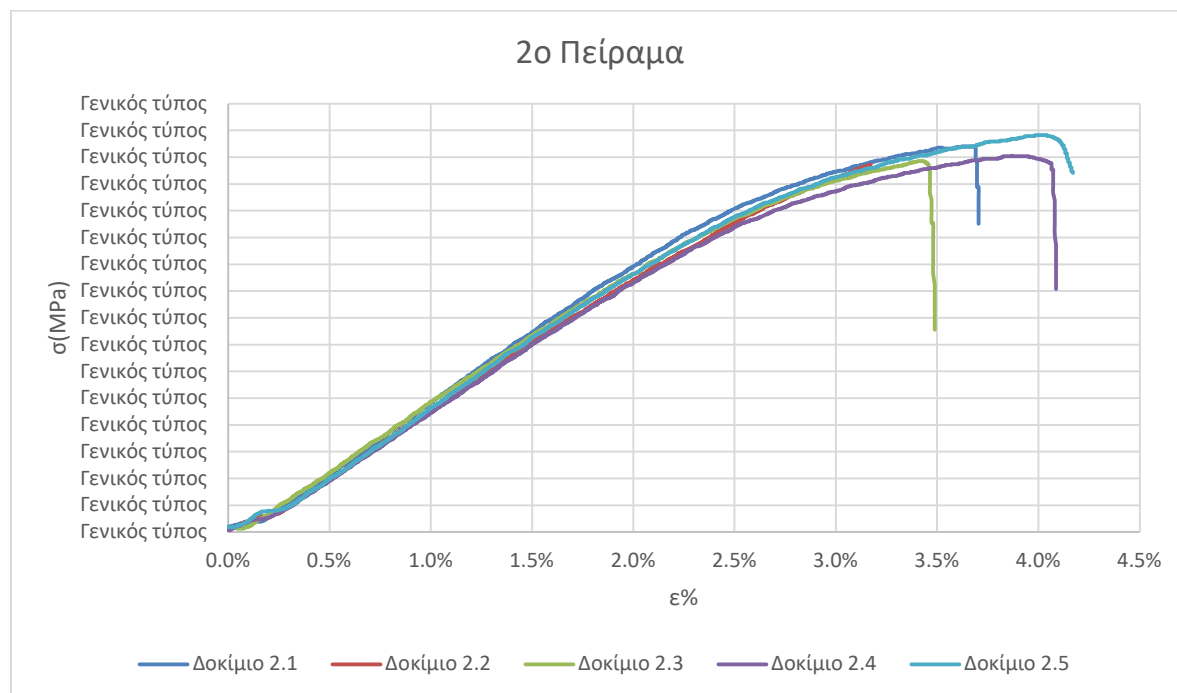


Γράφημα 1: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για το πρώτο πείραμα-0,35mm

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρείται καλή ομοιογένεια των καμπυλών Τάσης-Παραμόρφωσης μεταξύ των 6 δοκιμών όπου υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης. Η κλίση των καμπυλών είναι αρκετά παρόμοια για όλα τα δοκίμια 2246-2524 MPa εκτός από την περίπτωση του δοκιμίου 1.4 που είναι

2064,4 MPa. Διαφοροποιήσεις εμφανίζονται επίσης και στο UTS μεταξύ των δοκιμών με την τυπική απόκλιση να είναι 5.98. Αντίστοιχα με βάση την κλίση των καμπυλών υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας με την μέση τιμή αυτού να είναι 2391.31 MPa.

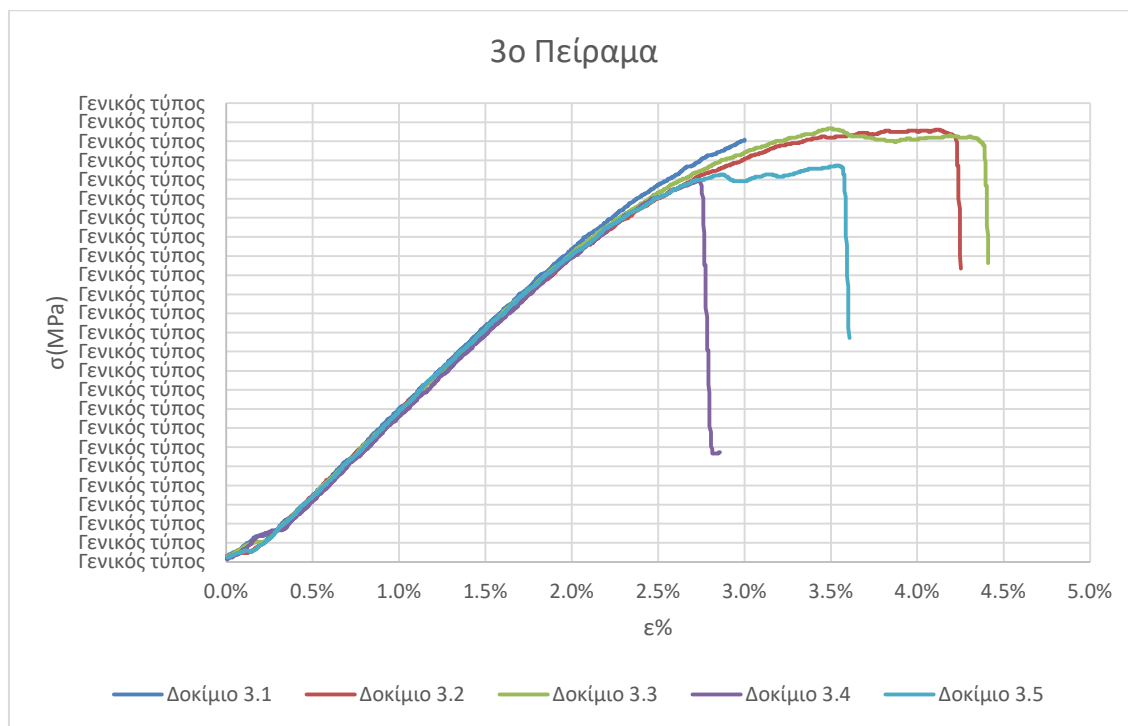
## 2<sup>ο</sup> Πείραμα



Γράφημα 2: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για το δεύτερο πείραμα-0,35mm

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται καλή ομοιογένεια μεταξύ των πέντε καμπυλών Τάσης-Παραμόρφωσης που αντιστοιχούν στα δοκίμια για το δεύτερο πείραμα 1799,6-1884,7. Μικρές διαφοροποιήσεις εμφανίζονται στο UTS μεταξύ των πέντε δοκιμών με την μέση τιμή να είναι 56,6 MPa και την τυπική απόκλιση 1.62. Αντίστοιχα για την τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας το μέσο όρο των πέντε δοκιμών όπως προκύπτει από την κλίση των καμπυλών Τάσης-Παραμόρφωσης είναι 1837.47 MPa.

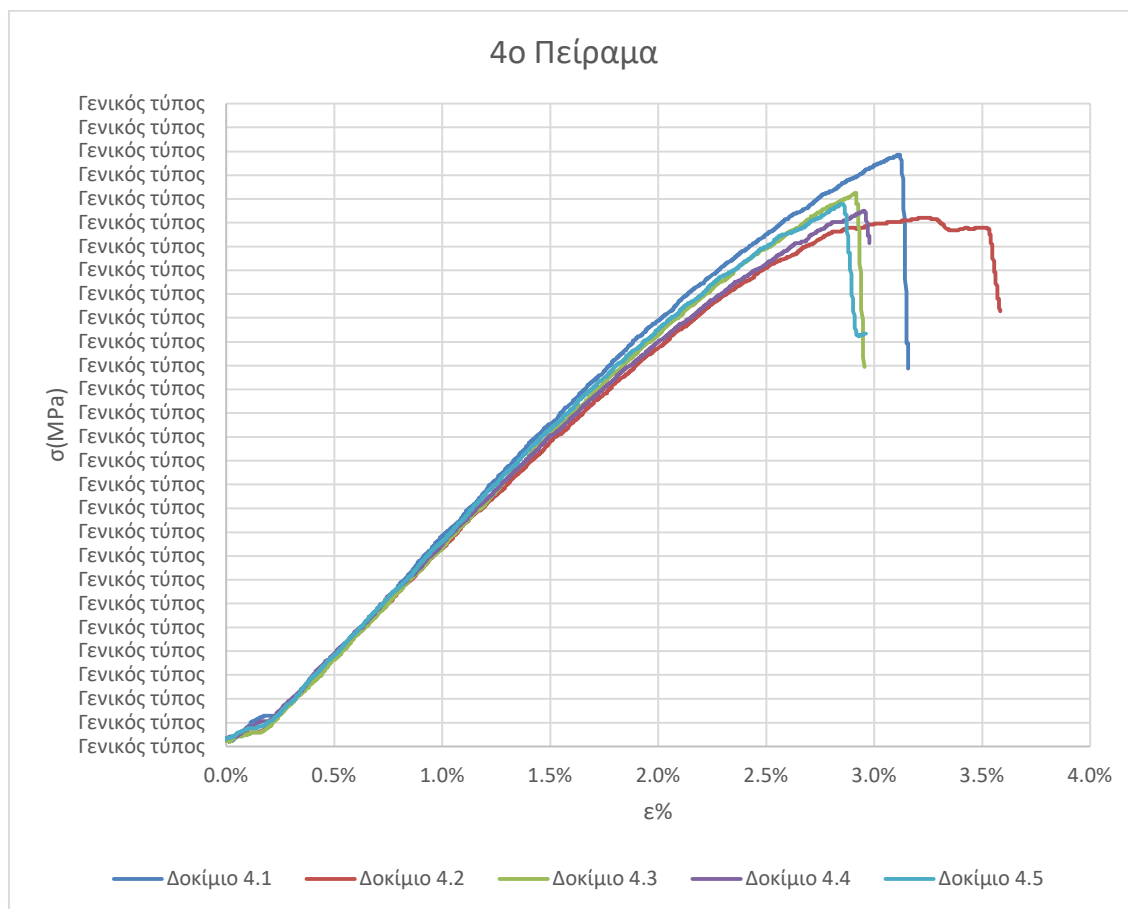
### 3<sup>ο</sup> Πείραμα



Γράφημα 3: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για το τρίτο πείραμα-0,35mm

Στο παραπάνω διάγραμμα που αντιστοιχεί στο 3<sup>ο</sup> πείραμα παρατηρείται καλή ομοιογένεια μεταξύ των καμπυλών. Η κλίση των καμπυλών Τάσης-Παραμόρφωσης είναι παρόμοια σε όλες τις περιπτώσεις (1663,6-1724,3). Διαφοροποιήσεις εμφανίζονται στο Δοκίμιο 5 (ε%:2,75%-3,52%) και Δοκίμιο 3 (ε%:3,5%-4,25%), αυτές μπορεί να οφείλονται στον τρόπο αστοχίας και πιθανότατα στην αποκόλληση κάποιας στρώσης διαφορετικού υλικού. Η πιθανή αστοχία δεν εμπόδισε όμως την συνέχεια της καταπόνησης του δοκιμίου μέχρι την αστοχία λόγω υλικού σε μεγαλύτερη παραμόρφωση. Το μέσο Μέτρο Ελαστικότητας υπολογίστηκε 1703.1 MPa και το μέσο UTS για τα πέντε δοκίμια και η τυπική απόκλιση υπολογίστηκαν 43,16 MPa και 1,97 αντίστοιχα.

#### 4<sup>ο</sup> Πείραμα

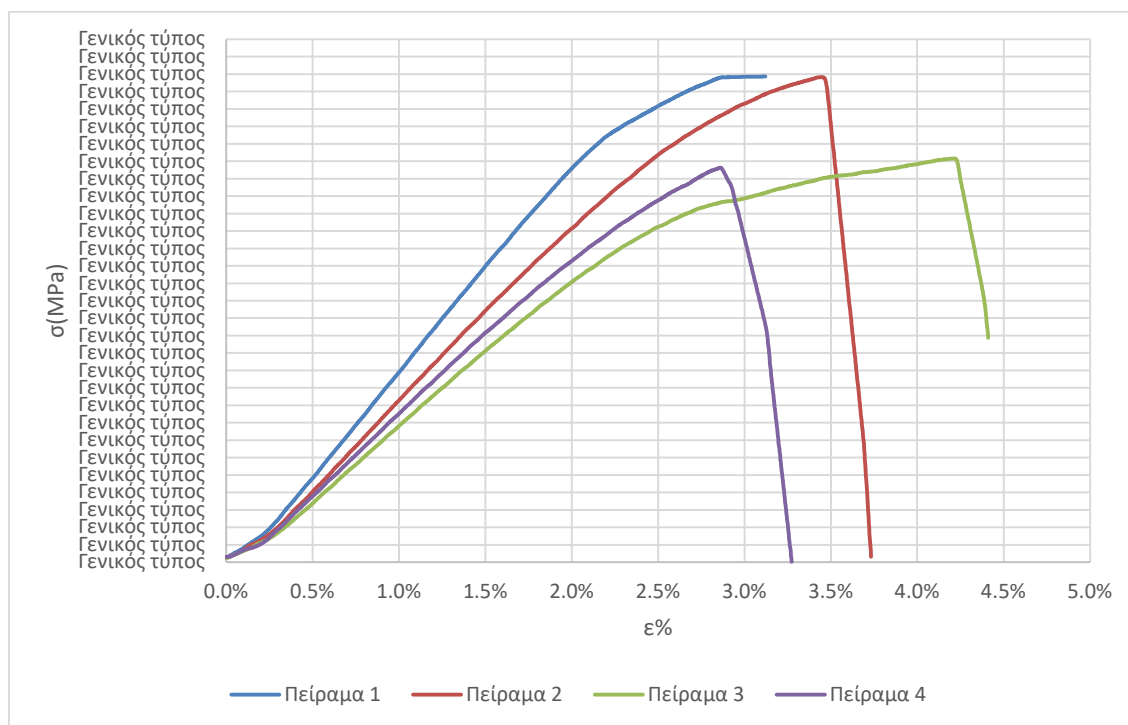


Γράφημα 4: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για το τέταρτο πείραμα-0,35mm

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρείται καλή ομοιογένεια μεταξύ των καμπυλών Τάσης-Παραμόρφωσης που αφορούν την 4<sup>ο</sup> πείραμα. Διαφοροποιήσεις στην κλίση των καμπυλών εμφανίζονται για παραμόρφωση μεγαλύτερη 1.5% της τάξης του 13%. Το μέσο Μέτρο Ελαστικότητας των δοκιμών υπολογίστηκε 1746.8 MPa, ενώ αντίστοιχα το μέσο UTS για τα πέντε δοκίμια και η διακύμανση του υπολογίστηκαν 46,3 MPa και 2 αντίστοιχα.

### Σύγκριση μεταξύ των πειραμάτων

Από τις πέντε καμπύλες Τάσης-Παραμόρφωσης για τα τέσσερα πειράματα που αντιστοιχούν για το κάθε πείραμα ξεχωριστά προέκυψε μία μέση καμπύλη. Για την σύγκριση των ξεχωριστών πειραμάτων και την επίδραση της κάθε παραμέτρου στις τελικές μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών δημιουργήθηκε το ακόλουθο γράφημα όπου παρουσιάζονται οι μέσες καμπύλες Τάσης-Παραμόρφωσης για το κάθε πείραμα.

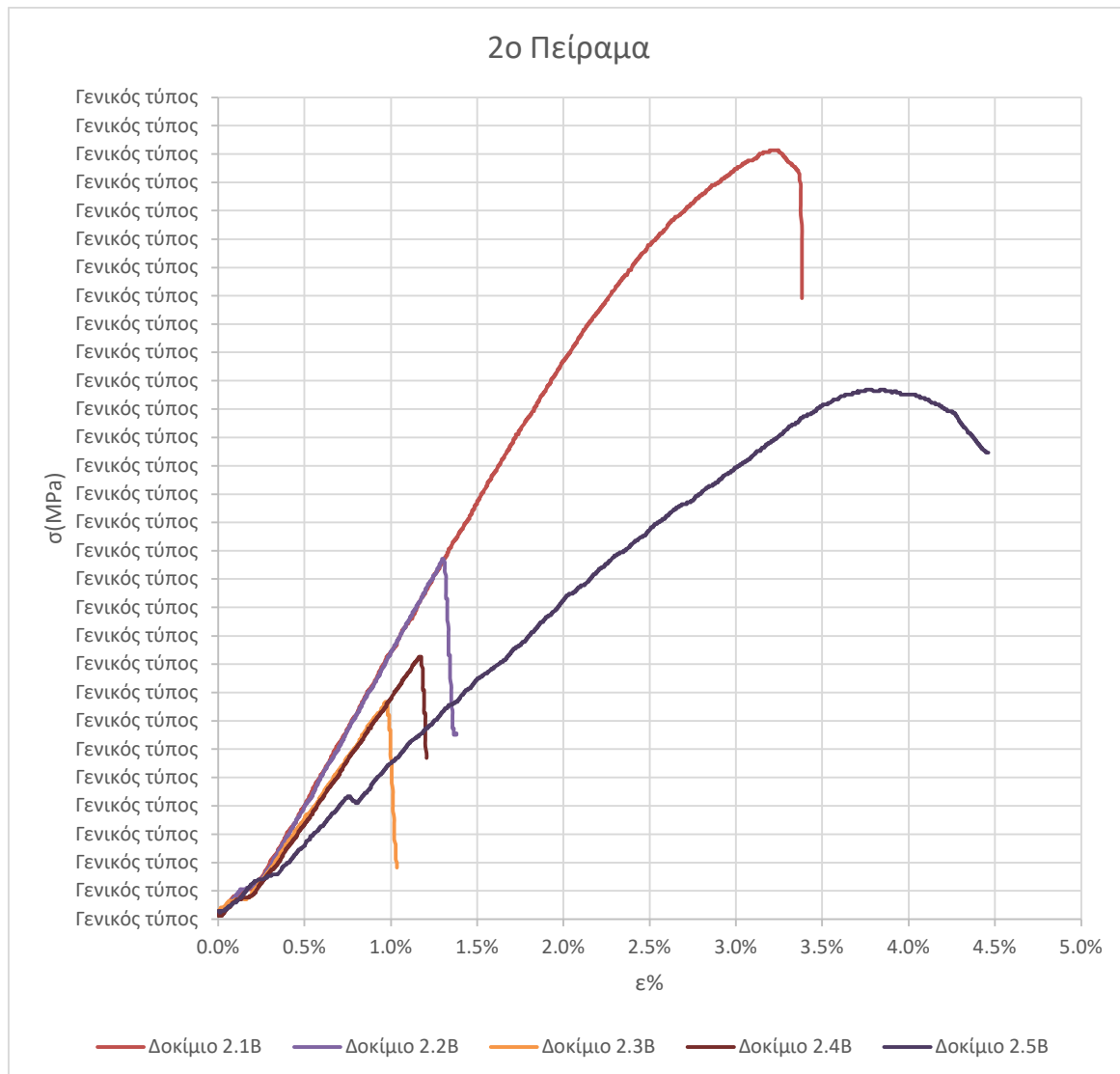


Γράφημα 5: Συγκριτικό γράφημα μέσω καμπυλών Τάσης-Παραμόρφωσης για τα τέσσερα πειράματα-0,35mm

Παρατηρείται από το γράφημα ότι υπάρχει διαφορά στην κλίση των καμπυλών που οδηγεί σε διαφοροποίηση στο μέτρο ελαστικότητας της κάθε περίπτωσης-πειράματος της τάξης του 3.5% από το μέγιστο. Μεγαλύτερο Μέτρο Ελαστικότητας παρατηρείται στο 1<sup>ο</sup> πείραμα 2039,31 MPa. Ενώ παρατηρείται να υπάρχει ομοιότητα στην κλίση και κατά συνέπεια και στο Μέτρο Ελαστικότητας στο πείραμα 3 (1703.1) και στο πείραμα 4 (1746). Ακόμα από το γράφημα παρατηρείται παρότι υπάρχει διαφορά στην κλίση-Μέτρο Ελαστικότητα στο 1<sup>ο</sup> πείραμα (2391.31) και στο 2<sup>ο</sup> πείραμα (1837.5) εμφανίζουν πολύ κοντινά UTS 52.5 MPa και 56,6 MPa αντίστοιχα. Αντίστοιχα παρατηρείται και στο 3<sup>ο</sup> πείραμα και στο 4<sup>ο</sup> πείραμα πολύ κοντινές τιμές στο UTS 43,16 MPa και 42.84 MPa αντίστοιχα. Αυτό πιθανότατα εμφανίζεται καθώς το 1<sup>ο</sup> -2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup>-4<sup>ο</sup> πείραμα μοιράζονται την ίδια γωνία εκτύπωσης νήματος.



## 2<sup>ο</sup> Πείραμα

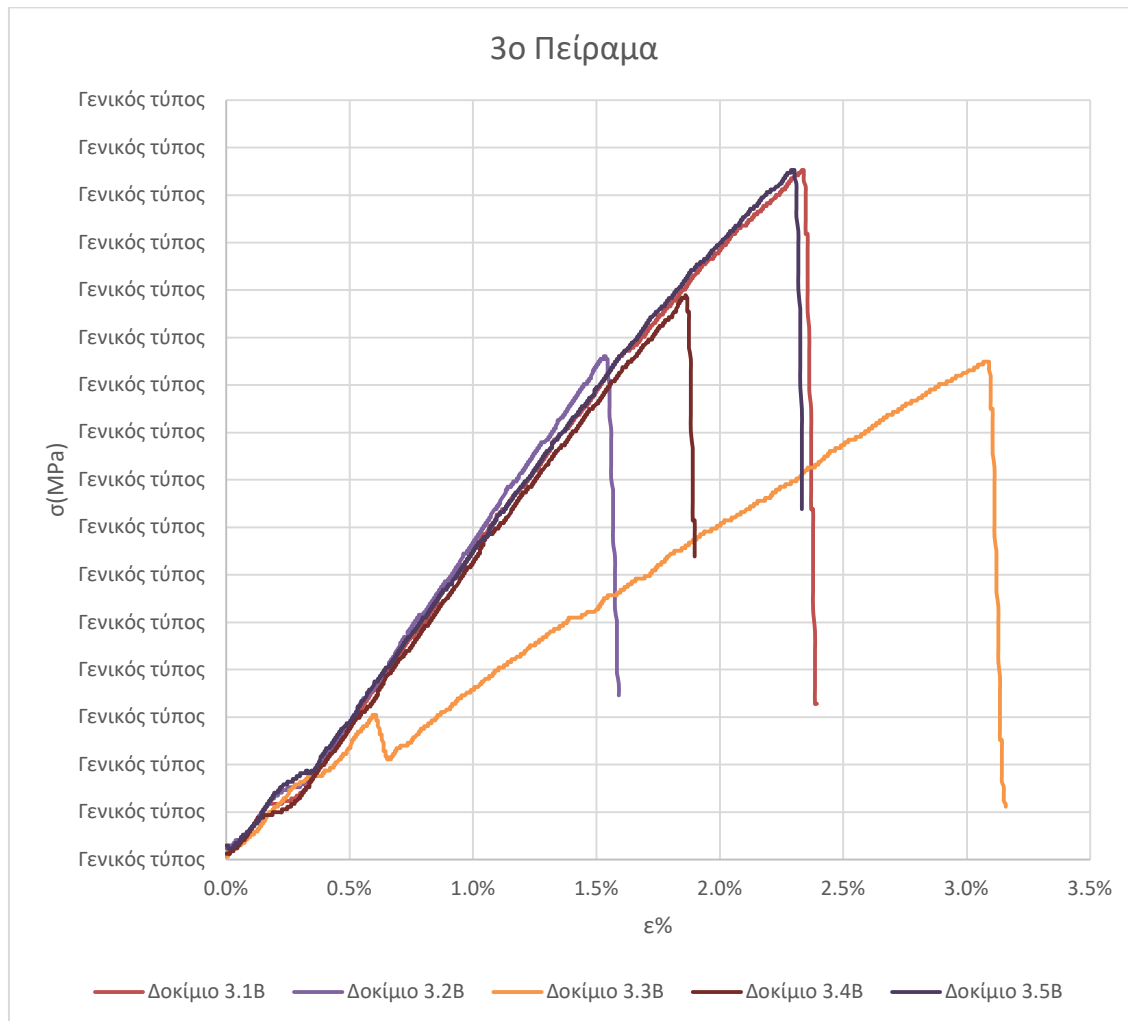


Γράφημα 7: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για το δεύτερο πείραμα-0,2mm

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζονται οι καμπύλες Τάσης-Παραμόρφωσης για το 2<sup>ο</sup> πείραμα στην περίπτωση πάχους επιπέδου 0,2mm. Παρατηρείται μεγάλη ανομοιογένεια μεταξύ των αποτελεσμάτων τόσο όσον αφορά τις κλίσεις των καμπυλών και κατά συνέπεια του Μέτρου Ελαστικότητας 1080.8-2175.8 όσο και του UTS των Δοκιμίων 15-59.2 MPa. Όπως φαίνεται και στο γράφημα τα Δοκίμια 2.1B και 2.2B έχουν σχεδόν ίδια κλίση αντίστοιχα και τα Δοκίμια 2.3B και 2.4B, ταυτόχρονα όμως ανά ζευγών εμφανίζουν και αρκετά μεγάλη διαφορά στο UTS. Όσον αφορά το Δοκίμιο 2.5B στην αρχή της καμπύλης εμφανίζει πτώση της Τάσης, αυτό πιθανών όπως και στην περίπτωση των Δοκιμίων 3.3 και 3.5 πάχους επιπέδου 0,35mm λόγω σε αποκόλληση των στρώσεων

διαφορετικού υλικού. Τέλος υπολογίστηκαν το μέσο Μέτρο Ελαστικότητας : 1730 MPa και το μέσο UTS 31.34 MPa με τυπική απόκλιση 16,1.

### 3<sup>ο</sup> Πείραμα

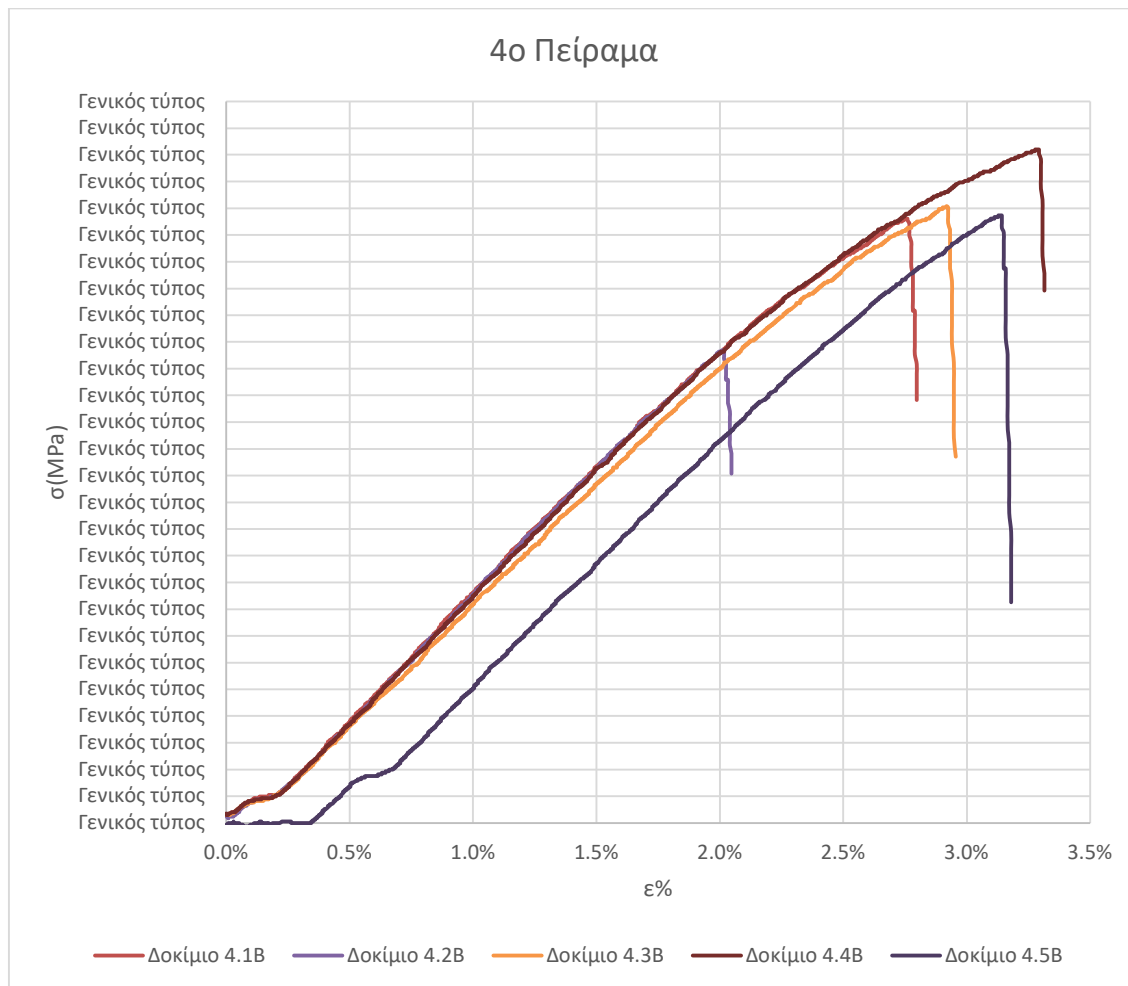


Γράφημα 8: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για το τρίτο πείραμα-0,2mm

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζονται οι καμπύλες Τάσης-Παραμόρφωσης για το 3<sup>ο</sup> πείραμα στην περίπτωση πάχους επιπέδου 0,2mm. Στο γράφημα παρατηρείται καλή ομοιογένεια μεταξύ των κλίσεων των καμπυλών Τάσης-Παραμόρφωσης και κατά συνέπεια και των Μέτρων Ελαστικότητας των δοκιμίων με τυπική απόκλιση 68,75. Διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στην κλίση του Δοκιμίου 3.3B, στην αρχή φαίνεται να ακολουθεί την συμπεριφορά και των υπόλοιπων Δοκιμίων, όμως όπως προαναφέρεται και σε άλλες περιπτώσεις πιθανότατα να οφείλεται σε αποκόλληση των στρωμάτων διαφορετικού υλικού. Το μέσο Μέτρο Ελαστικότητας υπολογίστηκε 1258 MPa και το μέσο UTS και η τυπική απόκλιση του UTS των Δοκιμίων υπολογίστηκαν 25,8 MPa και 3,9 αντίστοιχα.



#### 4<sup>ο</sup> Πείραμα

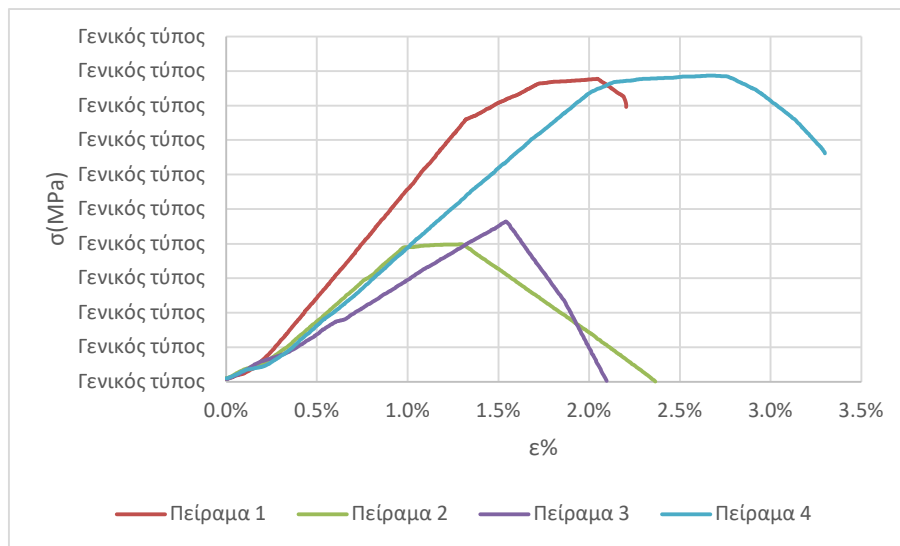


Γράφημα 9: Διάγραμμα Τάσης-Παραμόρφωσης για το τέταρτο πείραμα-0,2mm

Στο παραπάνω γράφημα παρουσιάζονται οι καμπύλες Τάσης-Παραμόρφωσης για το 3<sup>ο</sup> πείραμα στην περίπτωση πάχους επιπέδου 0,2mm. Παρατηρείται καλή ομοιογένεια στις κλίσεις των καμπυλών της Τάσης-Παραμόρφωσης των Δοκιμίων και κατά συνέπεια των Μέτρων Ελαστικότητας με τυπική απόκλιση 61,03 , με εξαίρεση το Δοκίμιο 4.5B 1926,1 MPa όταν τα μέτρα ελαστικότητας των υπόλοιπων δοκιμίων κυμαίνονται στις τιμές 1741,1-1799,4 MPa . Επίσης στο γράφημα παρατηρείται και σχετικά μικρή απόκλιση των UTS των Δοκιμίων με εξαίρεση το Δοκίμιο 4.2B 35.5 MPa όταν οι τιμές των υπόλοιπων δοκιμίων κυμαίνονται στις τιμές 45-50.5 MPa. Το μέσο Μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε 1760 MPa και αντίστοιχα το μέσο UTS και η τυπική απόκλιση των UTS των Δοκιμίων υπολογίστηκαν 42,3 MPa και 5,8 αντίστοιχα.

### Σύγκριση μεταξύ των Πειραμάτων

Από τις πέντε καμπύλες Τάσης-Παραμόρφωσης για τα τέσσερα πειράματα που αντιστοιχούν για το κάθε πείραμα ξεχωριστά προέκυψε μία μέση καμπύλη. Για την σύγκριση των ξεχωριστών πειραμάτων και την επίδραση της κάθε παραμέτρου στις τελικές μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών δημιουργήθηκε το ακόλουθο γράφημα όπου παρουσιάζονται οι μέσες καμπύλες Τάσης-Παραμόρφωσης για το κάθε πείραμα.

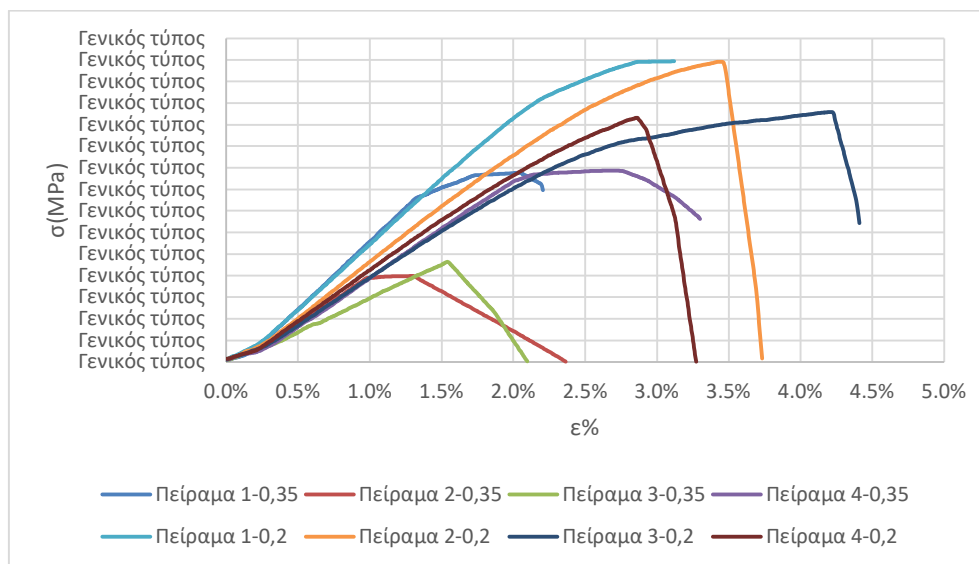


Γράφημα 10: Συγκριτικό γράφημα μέσων καμπυλών Τάσης-Παραμόρφωσης για τα τέσσερα πειράματα-0,2mm

Από το γράφημα παρατηρείται διαφοροποίηση μεταξύ των Μέτρων Ελαστικότητας των πειραμάτων 1 με 2,3 και 4. Το πείραμα 1 εμφανίζει διακριτά μεγαλύτερη κλίση και κατά συνέπεια μεγαλύτερο Μέτρο Ελαστικότητας 2515.9 MPa, ενώ τα πειράματα 2 και 4 παρατηρείται να έχουν παρόμοια Μέτρα Ελαστικότητας 1730 MPa και 1796 MPa αντίστοιχα. Παράλληλα τα πειράματα 2 και 3 έχουν αρκετά κοντινές τιμές UTS 16 MPa και 18 MPa αντίστοιχα, παρά την διαφοροποίηση στο Μέτρο Ελαστικότητας. Αντίστοιχα εντοπίζεται από το διάγραμμα ότι τα πειράματα 1 και 4 παρά την διαφοροποίηση τους στο Μέτρο Ελαστικότητας 2515,9 MPa και 1796 MPa αντίστοιχα εμφανίζουν σχεδόν ίδια τιμή UTS 42.8 MPa και 44.5MPa αντίστοιχα.

### Σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων πάχους νήματος 0,2mm και 0.35mm

Τέλος για την σύγκριση των δύο πειραμάτων για πάχος επιπέδου 0,2mm και 0.35mm δημιουργήθηκε το ακόλουθο γράφημα για της σύγκριση των καμπυλών Τάσης-Παραμόρφωσης μεταξύ των πειραμάτων με βάση τον σχεδιασμό πειραμάτων για την κάθε περίπτωση.

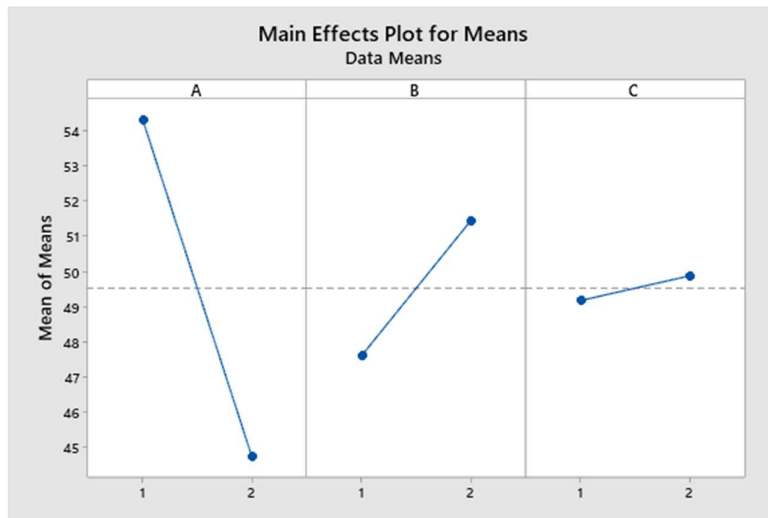


Γράφημα 11: Συγκριτικό γράφημα μέσω των καμπυλών Τάσης-Παραμόρφωσης για τις δύο περιπτώσεις πάχους επιπέδου 0,2mm και 0,35mm

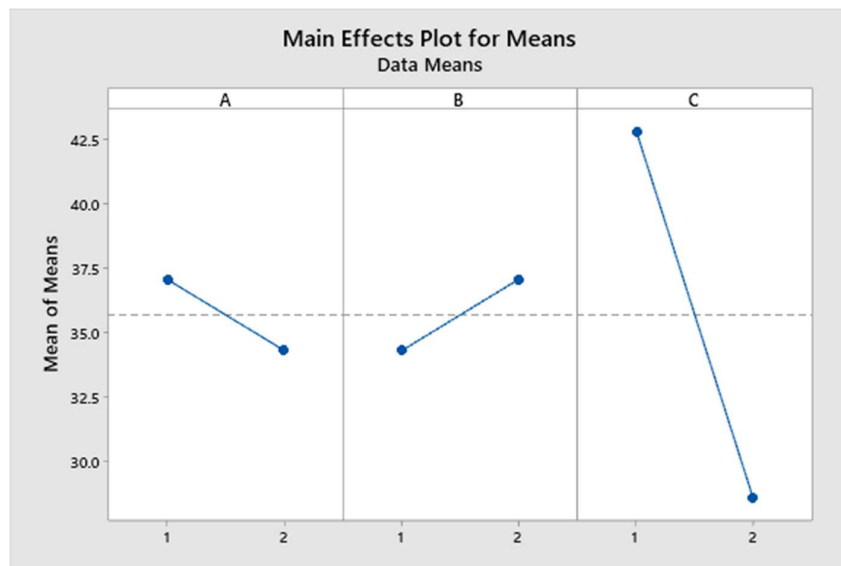
Στο γράφημα παρατηρείται ότι υπάρχει σχετική ομοιογένεια στις κλίσεις των καμπυλών ανά ζεύγος πειραμάτων για την κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα για οι καμπύλες που αντιστοιχούν στο πείραμα 1-0,35 και πείραμα 1-0,2 εμφανίζουν σχεδόν την ίδια κλίση και κατά συνέπεια σχεδόν το ίδιο Μέτρο Ελαστικότητας, ενώ ταυτόχρονα εμφανίζουν διαφορά στο UTS 52,05 MPa και 42,8 MPa αντίστοιχα. Για το πείραμα 2-0,35 και πείραμα 2-0,2 εμφανίζουν μεγαλύτερη απόκλιση από το πείραμα 1 στην κλίση τους 1837,5 MPa και 1730 MPa όμως εμφανίζουν μικρότερη διαφοροποίηση στο UTS 56,6 MPa και 31,34 MPa. Στο πείραμα 3 εμφανίζεται μεγάλη διαφοροποίηση τόσο στην κλίση- Μέτρο Ελαστικότητας 1703 MPa και 1258 MPa όσο και στις τιμές UTS, 43,16 MPa και 25,8 MPa. Τέλος για το πείραμα 4 παρατηρείται στο γράφημα ότι η κλίση των καμπυλών εμφανίζει μικρή απόκλιση και κατά συνέπεια και το Μέτρο Ελαστικότητας των δυο περιπτώσεων 0,35mm και 0.2mm πάχος επιπέδου 1746,8 MPa και 1796 MPa, ενώ υπάρχει μικρή απόκλιση στο UTS 46,3 MPa και 44,5 MPa. Δεδομένου ότι τα κοινά επίπεδα στα πειράματα 1 και 3 είναι ότι η εναλλαγή της γωνίας εκτύπωσης γίνεται ανά block υλικού προκύπτει

ότι το πάχος επιπέδου έχει επίδραση στην αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων όταν γίνεται εναλλαγή της γωνίας εκτύπωσης νήματος ανά block υλικού.

Από τον σχεδιασμό πειραμάτων Taguchi προκύπτει ότι η για τα πειράματα με πάχος επιπέδου 0,35mm η υπό εξέταση μεταβλητή που είχε την μεγαλύτερη επίδραση στην τελική αντοχή των δοκιμών σε κάμψη ήταν αυτή της γωνίας εκτύπωσης νήματος, ενώ για το πείραμα με πάχος επιπέδου 0,2mm η παράμετρος που είχε την μεγαλύτερη επίδραση ήταν αυτή του ποσοστού ανά όγκο υλικού όπως φαίνεται και στα παρακάτω γραφήματα.



Εικόνα 21: Βαρύτητα των υπό εξέταση μεταβλητών στο UTS των δοκιμών για το πείραμα με πάχος επιπέδου 0,35mm



Εικόνα 22 Βαρύτητα των υπό εξέταση μεταβλητών στο UTS των δοκιμών για το πείραμα με πάχος επιπέδου 0,2mm

Ακόμα από την ανάλυση του σχεδιασμού πειραμάτων προκύπτει ότι ο προτεινόμενος βέλτιστος συνδυασμός των μεταβλητών για το πείραμα πάχους επιπέδου 0,35mm είναι το υλοποιημένο πείραμα 2 (0/90 εναλλαγή γωνίας νήματος, by Layer, 60% ABS/40% PLA) με εκτιμώμενη μέγιστη τάση UTS 56.6 MPa. Αντίστοιχα για το πείραμα με πάχος επιπέδου 0,2mm ο προτεινόμενος

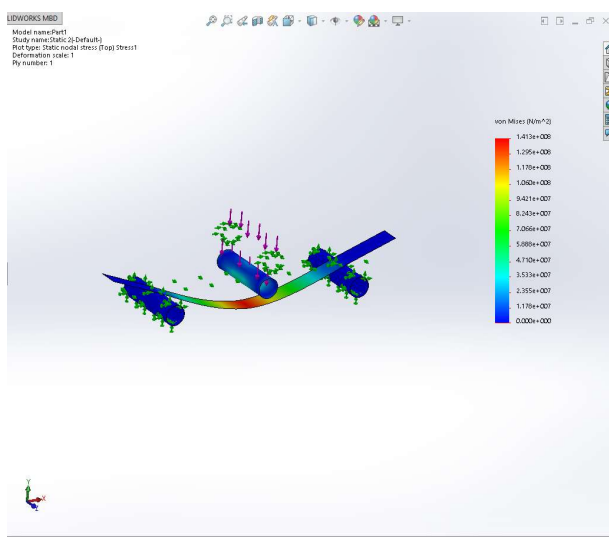
βέλτιστος συνδυασμός μεταβλητών είναι 0/90 εναλλαγή γωνίας νήματος, by Layer, 60% PLA/40% ABS και η εκτιμώμενη μέγιστη τάση UTS είναι 45,585 MPa.

### **Αποτελέσματα Πεπερασμένων στοιχείων και πίνακες ABD του Classic Laminate Theory**

Στα πλαίσια τις εργασίας επίσης έγινε μοντελοποίηση των πειραμάτων σε δύο προγράμματα το Solidworks Simulation και το Inventor Nastran. Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

#### **Solidworks**

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την 1<sup>η</sup> Περίπτωση- 0,35mm πάχος επιπέδου και το πείραμα 1.



Για το κάθε πείραμα διαμορφώθηκε στο αντίστοιχη καρτέλα του Simulation η σύνθεση του πολυστρωματικού υλικού για το κάθε επίπεδο. Αντίστοιχα οι συγκεκριμένοι πίνακες διαμορφώθηκαν και για τις δύο Περιπτώσεις 0,2mm πάχος επιπέδου και 0.35mm πάχος επιπέδου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι οι τάσεις Von Misses. Τέλος λόγω έλλειψης χρόνου δεν επιτεύχθηκε η συσχέτιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με αυτά της πειραματικής διαδικασίας.

#### **Inventor Nastran**

Η ίδια μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε και στο πρόγραμμα Inventor Nastran όπου όμως δεν πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί καθώς κατά την διάρκεια των υπολογισμών από το πρόγραμμα εμφανιζόταν πρόβλημα μοναδικότητας. Από την μοντελοποίηση αντλήθηκαν οι πίνακες ABD του

θεωρήματος CLT, έτσι ώστε να υπολογιστούν τα μέτρα ελαστικότητας των δοκιμίων. Ο πίνακας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα η οποία αντλήθηκε από το πρόγραμμα.

**Laminate**

Name: Laminate 1

Ply Option: Add, Material, Global Ply, Up, Down, Sym, Anti-Sym, Undo, Redo, Delete, Cut, Copy, Paste, Import, Export

Repeat: 1, Use Global Ply: , --Bottom of Layup--

Ply ID	Material	Thickness (mm)	Angle (deg)	Stress/Strain
1	pla-fdm	0.2	0	ON
2	pla-fdm	0.2	0	ON
3	pla-fdm	0.2	0	ON
4	pla-fdm	0.2	0	ON
5	abs-fdm	0.2	90	ON
6	abs-fdm	0.2	90	ON
7	abs-fdm	0.2	90	ON
8	abs-fdm	0.2	90	ON
9	pla-fdm	0.2	0	ON
10	pla-fdm	0.2	0	ON
11	pla-fdm	0.2	0	ON

Laminate Properties

LaminateOptions: SYM, GE

Failure Theory: Max. Stres, NSM

Strength Ratio  $P$ : OFF,  $T_{REF}$ : 8

Allowable Bond Shear Stress (MPa):

Bottom Fiber Distance (mm): -4

OK Cancel

**Laminate Equivalent Properties [ABD]**

Number of plies = 40, Total Thickness = 8.000000000000000

**A Matrix:**

1.323E+04	1.319E+04	5.878E+19
1.319E+04	1.373E+04	-5.678E+19
5.878E+19	-5.878E+19	-1.2E+36

**B Matrix:**

2.092E-11	1.876E-11	6.963E+04
1.921E-11	1.955E-11	-6.963E+04
6.963E+04	-6.963E+04	-1.217E+21

**D Matrix:**

7.969E+04	6.698E+04	2.759E+20
6.698E+04	8.024E+04	-2.759E+20
2.759E+20	-2.759E+20	-6.4E+36

## Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε σχεδιασμός πειραμάτων για την μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων πολυστρωματικών δοκιμίων διπλού υλικού σε δοκιμή κάμψης, κατά συνέπεια εκτυπώθηκαν 40 δοκίμια, 20 δοκίμια με πάχος επιπέδου 0,35mm και 20 δοκίμια με πάχος επιπέδου 0.2mm. Ακολούθως έγινε δοκιμή αντοχής σε κάμψη στο εργαστήριο Αντοχής των Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών. Στην συνέχεια έγινε επεξεργασία μετρήσεων για να υπολογιστεί η Τάση και η Παραμόρφωση και δημιουργήθηκαν γραφήματα Τάσης-Παραμόρφωσης τόσο για κάθε πείραμα όσο και συγκεντρωτικά με την μέση καμπύλη που προέκυψε από τα δοκίμια του κάθε πειράματος για την σύγκριση της επίπτωσης των παραμέτρων του κάθε πειράματος που είχαν οριστεί από τον σχεδιασμό πειραμάτων Taguchi L4. Από τα γραφήματα υπολογίστηκαν το Μέτρο Ελαστικότητας καθώς και οι τιμές μέγιστης Τάσης (UTS) και η τυπική απόκλιση των δοκιμίων για το κάθε πείραμα.

Ακόμα πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση του πειράματος σε δυο προγράμματα Πεπερασμένων στοιχείων για την σύγκριση των αποτελεσμάτων του πειράματος με τον αναλυτικό υπολογισμό μέσω των προγραμμάτων.

Από το Γράφημα 11 παρατηρείται ότι η περίπτωση με το μεγαλύτερο Μέτρο Ελαστικότητας είναι το πείραμα 1 και για το πάχος επιπέδου 0,2mm 2515,9 MPa και για το πάχος επιπέδου 0,35mm 2391.3 MPa ενώ ειδικότερα στην περίπτωση του πειράματος 2 εμφανίζεται και η μέγιστη Τάση (UTS) 56.6 MPa.

Ακόμα παρατηρείται ότι υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις μεταξύ των περιπτώσεων πάχους επιπέδου 0,35mm και 0,2mm για το κάθε πείραμα και τις παραμέτρους εκτύπωσης των δοκιμίων όπως ορίστηκαν από τον σχεδιασμό πειραμάτων ( Πίνακας 2).

Ακολούθως παρουσιάζονται οι πίνακες με τα Μέτρα Ελαστικότητας και τις μέγιστες Τάσεις που υπολογίστηκαν από τα Γραφήματα.

Πείραμα	1	2	3	4
	UTS (MPa)			
Πάχος Επιπέδου 0.35mm	52.05	56.6	43.16	46.3
Πάχος Επιπέδου 0.2mm	42.8	16	18	42.83333
	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)			
Πάχος Επιπέδου 0.35mm	2391.3	1837.5	1703	1746.8
Πάχος Επιπέδου 0.2mm	2515.9	1730	1258	1796

Στην διαδικασία υλοποίησης της εργασίας αντιμετωπίστηκαν συγκεκριμένα προβλήματα:

- Ο αρχικός σχεδιασμός ήταν η δημιουργία δοκιμίου διπλού υλικού αποτελούμενα από Nylon και PLA, κατά την διάρκεια της εκτύπωσης υπήρχε αδυναμία προσκόλλησης του ενός υλικού με το άλλο. Ακόμα και όταν αυτό πραγματοποιούνταν η προσκόλληση των δύο υλικών ήταν αδύναμη και λόγο της μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας κρυσταλλοποίησης- εκτύπωσης των δύο υλικών δημιουργούνταν παραμόρφωση των δοκιμίων.
- Κατά την διάρκεια της προετοιμασίας του πειράματος και των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για τις βέλτιστες παραμέτρους εκτύπωσης όσον αφορά την θερμοκρασία και την ταχύτητα, το ακροφύσιο της κεφαλής του εκτυπωτή που χρησιμοποιούσε το ABS λόγω υψηλής θερμοκρασία (ανώτατο προτεινόμενο όριο από τον προμηθευτή του νήματος) έφραξε μερικώς. Το αποτέλεσμα ήταν το ράουλο που εξωθούσε το νήμα να φθείρει το νήμα αντί να το προωθεί στο ακροφύσιο. Ακολούθως έγινε καθαρισμός της κεφαλής και να μειωθεί η θερμοκρασία εκτύπωσης της κεφαλής.
- Κατά την προσομοίωση του πειράματος στο πρόγραμμα Inventor Nastran εμφανιζόταν πρόβλημα μοναδικότητας. Ο λόγος εμφάνισης του προβλήματος είχε σχέση με την δημιουργία του πλέγματος από το πρόγραμμα και εμφανιζόταν σε σημείο επαφής του κυλίνδρου πίεσης με το δοκίμιο. Για την επίλυση του προβλήματος προτείνεται η δημιουργία καταλληλότερου πλέγματος.

Τέλος τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και χρίζουν περαιτέρω διερεύνησης και για την επίδραση και άλλων παραμέτρων της εκτύπωσης δοκιμίων στην τελική αντοχή σε κάμψη των δοκιμίων. Ιδιαίτερα το ποσοστό γεμίσματος καθώς και να επαναληφθούν τα πειράματα χωρίς εξωτερικά τοιχώματα. Ακόμα ενδιαφέρον έχει και η δημιουργία μηχανικών δεσμών μεταξύ των υλικών πόσο βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων.



## Έργα που αναφέρονται

1. **Hull, Charles W.** *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography.* US4575330A US, 1986.
2. **Tuan D. Ngo, Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen, David Hui.** Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites.* 2018, σσ. 172-196.
3. **Anketa Jandyal, Ikshita Chaturvedi, Ishika Wazir, Ankush Raina, PhD, Mir Irfan Ul Haq, PhD.** 3D printing –A review of processes, materials and applications in industry 4.0. *Sustainable Operations and Computers.* 3, 2022.
4. **Hing Kai Chan, James Griffin, Jia Jia Lim, Fangli Zeng, Anthony S.F. Chiu.** The impact of 3D Printing Technology on the supply chain: Manufacturing. *International Journal of Production Economics.* 205, 2018.
5. **Bolugoddu Sandeep, T.T.M. Kannan, J. Chandradass, M. Ganesan, A. John Rajan.** Scope of 3D printing in manufacturing industries-A review. *Materials Today: Proceedings.* 2020.
6. **Mohammad Reza Khosravani, Tamara Reinicke.** On the environmental impacts of 3D printing technology. *Applied Materials Today.* 20, 2020.
7. **Mohd Shuaib, Abid Haleem, Sanjay Kumar, Mohd Javaid.** Impact of 3D Printing on the environment: a literature-based study. *Sustainable Operations and Computers.* 2021.
8. **Hing Kai Chana, James Griffin, Jia Jia Lim, Fangli Zeng, Anthony S.F. Chiu.** The impact of 3D Printing Technology on the supply chain: Manufacturing. *International Journal of Production Economics.* 205, 2018.
9. **Bardia Naghshineh, Helena Carvalho.** The implications of additive manufacturing technology adoption for supply chain. *International Journal of Production Economics.* 2022.
10. **Weiwei Cui, Yiran Yang, Lei Di, Fadwa Dababneh.** Additive manufacturing-enabled supply chain: Modeling and case studies on local, integrated production-inventory-transportation structure. *Additive manufacturing.* 2021.
11. **Saifuddin Khan, Ketan Joshi, Samadhan Deshmukh.** A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts. *Materials Today: Proceedings.* 2021.

12. **Heechang Kim, Eunju Park, Suhyun Kim, Bumsoo Park, Namhun Kim, and Seungchul Lee.** Experimental Study on Mechanical Properties of Single- and Dual-Material 3D Printed Products. *Procedia Manufacturing*. 2017.
13. **Majid R. Ayatollahi, A. Nabavi-Kivi, Bahador Bahrami, M. Yazid Yahya,.** The influence of in-plane raster angle on tensile and fracture strengths of 3D-printed PLA specimens. *Eng. Fract. Mech.* 2020.
14. **Hu, Xinhua Liu & Mingshan Zhang & Shengpeng Li & Lei Si & Junquan Peng & Yuan.** Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method. *Int J Adv Manuf Technol*. 2017.
15. **Long Le, Mitchel A. Rabsatt , Hamid Eisazadeh , Mona Torabizadeh.** Reducing print time while minimizing loss in mechanical properties in consumer FDM parts. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2022.
16. **Pooja Patil, Dharmendra Singh , Sunil J. Raykar, Jaiprakash Bhamu.** Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components. *Materials Today: Proceedings*. 2021.
17. **Lokesh N., Praveena B.A., Sudheer Reddy J., Vikram Kedambadi Vasu, Vijaykumar S.** Evaluation on effect of printing process parameter through Taguchi approach on mechanical properties of 3D printed PLA specimens using FDM at constant printing temperature. *Materials Today: Proceedings*. 2022.
18. **A. García-Collado, J.M. Blanco , Munish Kumar Gupta ,1, R. Dorado-Vicente.** Advances in polymers based Multi-Material Additive-Manufacturing Techniques: State-of-art review on properties and applications. *Additive Manufacturing*. 2022.
19. **Pradeep Kumar Mishra, Senthil P.** Prediction of in-plane stiffness of multi-material 3D printed laminate parts fabricated by FDM process using CLT and its mechanical behaviour under tensile load. *Materials Today Communications*. 2020.