

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ
ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΠΑΠΑΔΗΜΑΣ

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ
ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΠΑΠΑΔΗΜΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:

Δρ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Abstract

Στην παρούσα πτυχιακή, αφού παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εξέλιξης της προσθετικής κατεργασίας (additive manufacturing ή 3D-printing) και οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, κατασκευάζονται και εφελκύνονται 9 δοκίμια με διαφορετικές παραμέτρους εκτύπωσης το καθένα, κι ελέγχεται εάν και κατά πόσο επηρεάζει η κάθε παράμετρος εκτύπωσης τον εφελκυσμό των δοκιμίων. Χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Autodesk Inventor και η μεθοδολογία Taguchi ενώ από υλικά μέσα ο εκτυπωτής Cube Pro Duo της εταιρείας 3D Systems με θερμοπλαστικό ABS καθώς και το μηχάνημα εφελκυσμού Galdabani Quasar 100. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως τα πιο μικρά πάχη στρώματος, το στυλ εκτύπωσης "hoenycomb", η «δύναμη» εκτύπωσης "solid" και η τοποθέτηση στην πλάκα σε 45⁰ γωνία έχουν ως αποτέλεσμα το δοκίμιο με την υψηλότερη τάση θραύσης.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....σελ 6
2. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....σελ 7
3. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣσελ 7
4. ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕ ΣΤΗΝ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ.....σελ 8
5. ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....σελ 10
6. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....σελ 13
7. ΜΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ.....σελ 17
8. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....σελ 18
9. ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....σελ 21
10. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....σελ 22
- ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΑΣ.....σελ 23
- ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΚΚΟΥ.....σελ 26
- ΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....σελ 27
- ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....σελ 29
11. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....σελ 29
-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....σελ 29

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

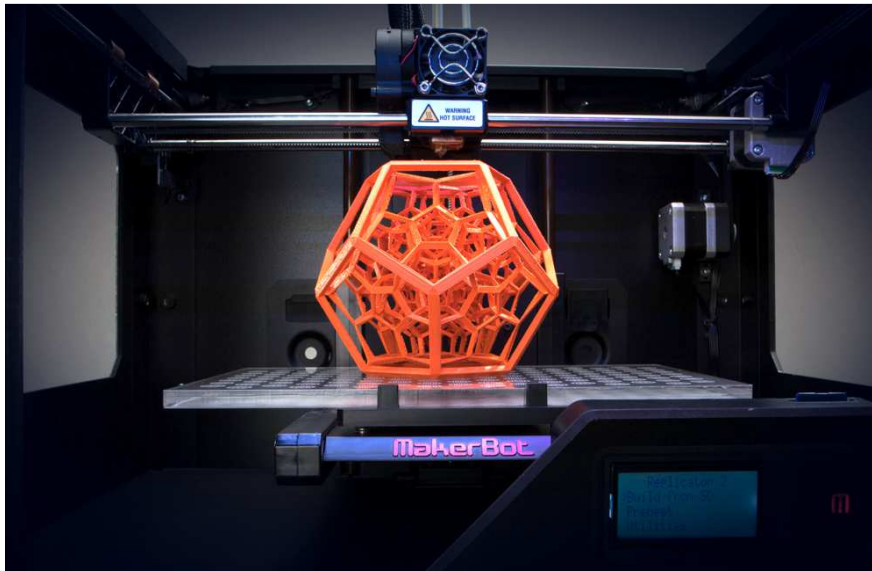
-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΣΕ ΘΛΙΨΗ.....σελ 33	σελ 33
-ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....σελ 33	σελ 33
-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ.....σελ 34	σελ 34
-ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΤΡΙΒΗ.....σελ 35	σελ 35
12. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....σελ 36	σελ 36
13. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....σελ 36	σελ 36
14. ΥΛΙΚΟ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....σελ 43	σελ 43
15. ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....σελ 45	σελ 45
16. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ TAGUCHI ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MINITAB.....σελ 45	σελ 45
17. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ (FACTORS) ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ.....σελ 46	σελ 46
18. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....σελ 52	σελ 52
19. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....σελ 54	σελ 54
20. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....σελ 55	σελ 55
21. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (APPENDIX).....σελ 57	σελ 57

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο additive manufacturing ή 3D-printing εννοούμε τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων με τη διαδοχική εναπόθεση στρωμάτων υλικού χρησιμοποιώντας σχεδιασμό σε Η/Υ. (Strivatsan, Sudarshan, 2016). Τα πρώτα βήματα στην επαναστατική αυτή νέα τεχνολογία έγιναν το 1980 σε ερευνητικά κέντρα του εξωτερικού και σήμερα η τρισδιάστατη εκτύπωση (additive manufacturing πιο σωστά) γνωρίζει μεγάλη άνθηση και έχει πολλές υποσχόμενες προοπτικές.

Η καινοτομία στην τεχνολογία αυτή είναι πως καθίσταται δυνατόν να κατασκευαστούν πολύπλοκες λεπτομερείς κατασκευές σε προσιτό κόστος, κάτι που με τον παραδοσιακό τρόπο (χύτευση καλουπιού) μέχρι σήμερα ήταν απαγορευτικό τόσο λόγω πολυπλοκότητας όσο και λόγω κόστους. Αυτό περιορίζει πολύ το κόστος κατασκευής από περίπλοκα καλούπια και εργαλεία. Δε θα ήταν υπερβολή να πούμε πως ο μόνος περιορισμός στην κατασκευή είναι όχι κάποιο εργαλείο αλλά η φαντασία του σχεδιαστή. (Bandyobadhyay, Susmit, Amit_Bose) Προοπτικές στο μέλλον είναι κάθε νοικοκυριό να έχει οικιακό 3D εκτυπωτή και να παράγει μόνο του προϊόντα για χρήση απόλυτα προσαρμοσμένα στις ανάγκες του ιδιοκτήτη, ενώ οι μελλοντικές ιατρικές εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας στην ιατρική και τη βιολογία αγγίζουν τα όρια της επιστημονικής φαντασίας με τα σημερινά δεδομένα.



(Φωτό : Genesis Nanotechnology Inc)

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



-Το πρώτο μηχάνημα 3D εκτύπωσης από τον Hull, που ίδρυσε την 3d Systems (Φωτό: Gibson, Rosen, Stucker)

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η 3D εκτύπωση 9 δοκιμών με διαφορετικές παραμέτρους και κατόπιν ο εφελκυσμός τους μέχρι τη θραύση τους με σκοπό τη μελέτη του πως επηρεάζει η κάθε παράμετρος τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ ΤΡΙΣΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (3D PRINTING)

Κάθε τρισδιάστατο μοντέλο που δημιουργείται ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδικασία 6 βημάτων. (Gibson, Rosen, Stucke, 2015)

- 1) Δημιουργία CAD σχεδίου είτε από την αρχή είτε με σκανάρισμα
- 2) Μετατροπή του CAD σχεδίου σε αρχείο μορφής STL
- 3) Καθορισμός των παραμέτρων εκτύπωσης του 3D εκτυπωτή (ακροφύσια, πάχος υλικού, στυλ εκτύπωσης)
- 4) Κατασκευή (εκτύπωση του αντικειμένου)
- 5) Αφαίρεση της κατασκευής εφόσον μειωθούν οι θερμοκρασίες στον θάλαμο εκτύπωσης

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

6) Τελικός καθαρισμός και φινίρισμα του αντικειμένου που κατασκευάστηκε (προαιρετικό) (Gibson, Rosen, Stuckert, 2015)

ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΗΝ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗ

Αξίζει να αναφερθούν σε συντομία τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται για την 3D εκτύπωση. Αυτά είναι τα α) θερμοπλαστικά και β) τα μέταλλα γ) άλλα υλικά

ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ

Γενικά τα θερμοπλαστικά είναι πολύ καλά υλικά για τη διαδικασία του 3D printing κι αυτό γιατί έχουν σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες τήξης, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (Gibson, Rosen, Stuckert) .Είναι τα πιο διαδεδομένα για τις οικιακές και μη-βιομηχανικές εφαρμογές. Τα πιο γνωστά είναι τα εξής :

A) *Το ABS.*Είναι το υλικό που χρησιμοποιούμε στην παρούσα πτυχιακή. Πρόκειται για ένα πολυμερές με αντοχή σε κρούση και θερμότητα και αρκετά ρευστό. Είναι το πλαστικό των κύβων lego και είναι το πιο διαδομένο ως σήμερα. Αποτελείται από 15%-35% ακρυλονιτρίλιο, 5%-30% βουταδιένιο και 40%-60% στυρένιο.

B)*Το PLA* ή αλλιώς πολυγαλακτικό οξύ, βιοπολυμερές και λιγότερο ρευστό, πιο σκληρό αλλά και εύθραυστο από το ABS κερδίζει σε δημοφιλία μεταξύ των υλικών συνεχώς.

Γ) *Το πολυπροπυλένιο*, υλικό με βάση το πλαστικό, άοσμο και άχρωμο με μεγάλη μηχανική και θερμική αντοχή και σε ακτινοβολία UV.

ΜΕΤΑΛΛΑ

Ιστορικά, διάφορες μέταλλα σε σκόνη (κυρίως κράματα) είχαν αναπτυχθεί προτού καταλήξουμε στα σημερινά υλικά (Gibson, Rosen, Stuckert, 2015).

Τα βασικά μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας, το τιτάνιο, το χρυσό ή/και το ασήμι. Επίσης και κράματα μεταξύ των μετάλλων χρησιμοποιούνται σαν πρώτη ύλη.

ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΚΑΙ ΚΕΡΑΜΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ

Τα κεραμικά χαρακτηρίζονται σαν οξειδία μετάλλων, καρβίδια, νιτρίδια και συνδυασμός τους. Η 3D Systems προσφέρει ένα υλικό που ονομάζεται cermet και είναι μεταλλικό-κεραμικό

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

σύνθετο. Επίσης και βιοδιασπώμενα κεραμικά έχουν αναπτυχθεί. (Gibson, Rosen, Stuckert, 2015)

ΆΛΛΑ ΥΛΙΚΑ

-*Βιοιατρικό υλικό.* Μια φοβερή εξέλιξη στην ιατρική και την βιοτεχνολογία. Η 3D εκτύπωση χρησιμοποιείται στην αναγεννητική ιατρική όπου δημιουργείται νέος ιστός και ενδεχόμενα νέα όργανα. Με πρώτη ύλη το βιογενετικό υλικό «τυπώνεται» με τον 3d εκτυπωτή ο νέος ιστός. (Strivatsan, Sudarshan p27), (<https://www.theguardian.com/science/2014/jul/04/3d-printed-organs-step-closer>), (Munaz et al, (2016), *Three dimensional printing of biological matters*)

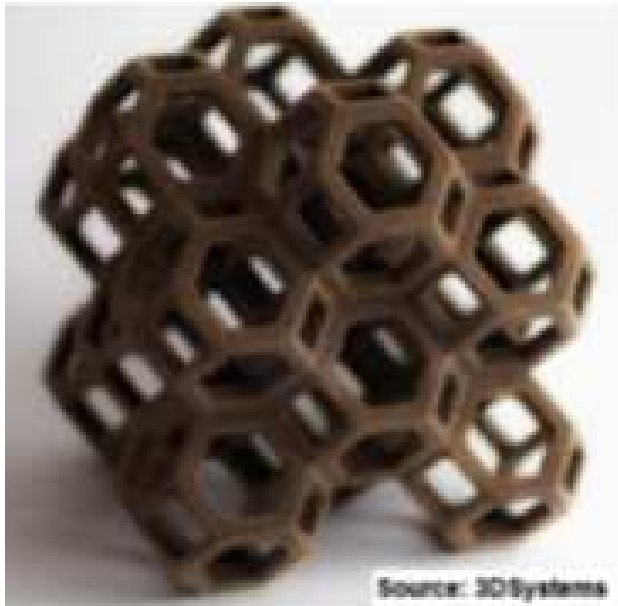


(Φωτό : <http://www.abc.net.au/catalyst/stories/3871078.htm>)

-*Γυαλί.* Σε ερευνητικά προγράμματα του εξωτερικού έχουν γίνει τα πρώτα βήματα για την «εκτύπωση» αντικειμένων από γυαλί.

-*Σοκολάτα.* Έχουν ήδη κάνουν την εμφάνιση τους οι πρώτες εκτυπώσεις με βρώσιμα υλικά όπως σοκολάτα και τραβάνε τα φώτα της δημοσιότητας (<https://www.3dsystems.com/culinary>)

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



-3D εκτυπωμένη σοκολάτα

(Φωτό : *3d printing technologies applied for food design*, Journal of Food Engineering)

ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Οι βασικές μέθοδοι 3d εκτύπωσης είναι οι παρακάτω:

- Στερεολιθογραφία (SLA)
- SLS
- FUSED DISPOSITION MODELLING (FDM)
- LOM
- EBM

Παρουσιάζουμε την καθεμία μέθοδο συνοπτικά

1. Στερεολιθογραφία (SLA).

Η στερεολιθογραφία είναι η παλαιότερη μέθοδος που κατοχυρώθηκε το 1986 από τον Chuck Hull και σαν διαδικασία περιλαμβάνει τον *φωτοπολυμερισμό*. Είναι μια διαδικασία δηλαδή πού φωτοευαίσθητα πολυμερή στερεοποιούνται όταν εκτεθούν σε υπεριώδη

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ακτινοβολία (Strivatsan, Sudarshan). Τα πρώτα χρόνια της στερεολιθγραφίας τα αντικείμενα που κατασκευάζονταν παρουσίαζαν προβλήματα όπως ότι ήταν εύθραυστα και στρέβλωναν ή παραμορφωνόταν εύκολα, όμως με την πάροδο του χρόνου τα προβλήματα αυτά λύθηκαν. Πλέον τα αντικείμενα που κατασκευάζονται με τη μέθοδο αυτή παρουσιάζουν αντοχή ώστε να μπορούν να επεξεργαστούν με εργαλειομηχανή CNC. Αξίζει να σημειωθεί πως οι 3D εκτυπωτές που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο είναι αρκετά ακριβοί (μπορούν να αγγίξουν και τις 100,000 δολάρια) και η πιο συμφέρουσα μέθοδος είναι να αγοράσει κανείς τις υπηρεσίες μιας εταιρίας που διαθέτει τέτοιους εκτυπωτές (μια ώρα εκτύπωσης μπορεί να κοστίζει περίπου 50 δολάρια).

2. SLS (Selective Laser Sintering)

Πρόκειται για μια μέθοδο που δημιουργήθηκε το 1989 όπου μια ακτίνα λέιζερ λιώνει και στερεοποιεί διάφορα υλικά που είναι σε μορφή σκόνης (υλικά όπως νάιλον, ελαστομερή, κεραμικά ή μέταλλα) (Strivatsan, Sudarshan) αλλά προς το παρόν κυρίως χρησιμοποιείται για πλαστικά. Ένας κύλινδρος «στρώνει» τη σκόνη του εν λόγω υλικού συγκεκριμένου πάχους πάνω σε μια επιφάνεια και μια κεφαλή λέιζερ διαγράφει το σχήμα της πρώτης διατομής λιώνοντας και στερεοποιώντας επιλεκτικά τη σκόνη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση της κατασκευής του αντικειμένου. Το υλικό που περισσεύει μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ώστε να περιοριστεί το κόστος. Είναι απαραίτητο να γίνεται εν κενώ για να αποφεύγεται η οξείδωση και η διαδικασία πρέπει να λαμβάνει μέρος σε θερμοκρασία κοντά στο σημείο τήξης της πρώτης ύλης. (Strivatsan, Sudarshan). Εμπορεύονται τέτοιους 3D εκτυπωτές οι εταιρίες 3D Systems, Rockhill, SC από τις ΗΠΑ και η Eos GmbH από το Μόναχο, Γερμανία. (Gerbhardt)

4. Fused Disposition Modelling (FDM) Εναπόθεση – σύντηξη διαδοχικών στρώσεων

Είναι μια μέθοδος που έχει κατοχυρωθεί από την εταιρεία Stratosys, ΗΠΑ το 1992 (Strivatsan, Sudarshan). Στη μέθοδο αυτή, που είναι χωρίς laser, θερμαίνεται ο χώρος στους 80° C και ίνες πλαστικού υλικού εγχύονται από μια κεφαλή/ακροφύσιο. Το πλαστικό (συνήθως ABS ή PLA) θερμαίνεται λίγο πάνω από το σημείο τήξης και μόλις βγει από το ακροφύσιο στερεοποιείται. Χαρακτηριστικό των εξαρτημάτων που παράγονται είναι η μεγάλη αντοχή τους, η σχετικά καλή ακρίβεια, το γεγονός ότι δεν χρειάζονται καθαρισμό-φινίρισμα μετά αλλά και η εξοικονόμηση

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

πρώτων υλών, αφού δεν υπάρχουν υπολείμματα που περισσεύουν (Strivatsan, Sudarshan). Είναι δυνατή η χρήση τους σε συνθήκες γραφείου.

5. Συγκόλληση Λεπτών Φύλλων (Laminated Object Manufacturing, LOM)

Η τεχνική αυτή που αναπτύχθηκε από την εταιρεία Helisys – που είναι τώρα η Cubic Technologies- με την πατέντα να δίνεται το 1988 (Strivatsan, Sudarshan) πρόκειται για τη συγκόλληση λεπτών φύλλων (με τη μορφή ρολών χαρτιού) που έχουν επίστρωση θερμοκολλητικής ουσίας. Το υλικό αρχικά ήταν χαρτί αλλά αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και άλλα υλικά (αδιάβροχο χαρτί, πλαστικά και λεπτά φύλλα κεραμικού υλικού. Η βασική αρχή λειτουργίας της μεθόδου LOM είναι η ακόλουθη : Μια διάταξη τοποθετεί το πρώτο φύλλο χαρτιού πάνω σε μια επιφάνεια-βάση και ένας κύλινδρος την πιέζει ώστε να κολλήσει σε αυτή. Στη συνέχεια μια κεφαλή λέιζερ «κόβει» το σχήμα της διατομής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές μέχρι τη δημιουργία του αντικειμένου ενώ το πάχος του χαρτιού δεν είναι σταθερό σε όλες τις επαναλήψεις. Τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας αυτής είναι το χαμηλό κόστος, τα απλά υλικά κατεργασίας, τα μεγάλα κομμάτια που μπορούμε να κατασκευάσουμε χωρίς περιορισμούς στην πολυπλοκότητα. Μειονέκτημα είναι η μειωμένη ακρίβεια των εξαρτημάτων που κατασκευάζονται σε σχέση με τις άλλες μεθόδους και το ότι δημιουργούνται υπολείμματα που πρέπει να απορριφθούν και αυξάνουν το συνολικό κόστος (Strivatsan, Sudarshan). Αξιοσημείωτο είναι πως η εταιρεία Helisys που ανέπτυξε αυτή τη μέθοδο έχει πάψει να λειτουργεί από το 2001.

6. ELECTRONIC BEAM MELTING (EBM)

Στη μέθοδο αυτή, που αναπτύχθηκε από το Chalmers University of Technology, Σουηδία, και εκμεταλλεύθηκε εμπορικά η Σουηδική εταιρία Arcam το 2001 (Gibson, Rosen, Stucker), και που είναι παρόμοια με την SLS, μια δεσμίδα λέιζερ παραγόμενη από ηλεκτρική τάση 30-60kV λιώνει τη σκόνη. Για να αποφευχθούν οι οξειδώσεις όταν παράγουμε μεταλλικά αντικείμενα, η διαδικασία αυτή γίνεται εν κενώ. Χρησιμοποιείται εκτενώς σαν μέθοδος για μεταλλικά μέρη. (Strivatsan- Sudarshan).

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ (ADDITIVE MANUFACTURING)

Βασικό πλεονέκτημα της 3D εκτύπωσης είναι η σχεδιαστική ελευθερία που δίνει για παραγωγή εξαρτημάτων/αντικειμένων που με συμβατικούς τρόπους δεν ήταν δυνατόν, όπως για παράδειγμα σωλήνες με πολλές καμπύλες και γωνίες (Gibson, Rosen, Stuckert, 2015). Επίσης υπάρχει η δυνατότητα για εξατομίκευση της παραγωγής με βάση τις επιλογές ή την αρεσκεία του πελάτη., κάτι που πριν ήταν οικονομικά ασύμφορο και αδύνατο. Είναι δυνατόν δηλαδή να τυπωθεί με χαμηλό κόστος εξαρτήματα σε μικρό αριθμό ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις, κάτι που με την κλασική γραμμή παραγωγής ήταν αδύνατον. Επίσης μηδενίζονται τα υλικά που πετάει ο κατασκευαστής είτε ως υποπροϊόν επεξεργασίας είτε ως υπολείμματα .(Bandyobadhyay, Susmit, Amit_Bose). Η εξέλιξη στα σχεδιαστικά CAD που είναι ραγδαία τα τελευταία χρόνια βοηθάει προς αυτήν την κατεύθυνση και στην φιλικότητα προς το χρήστη.

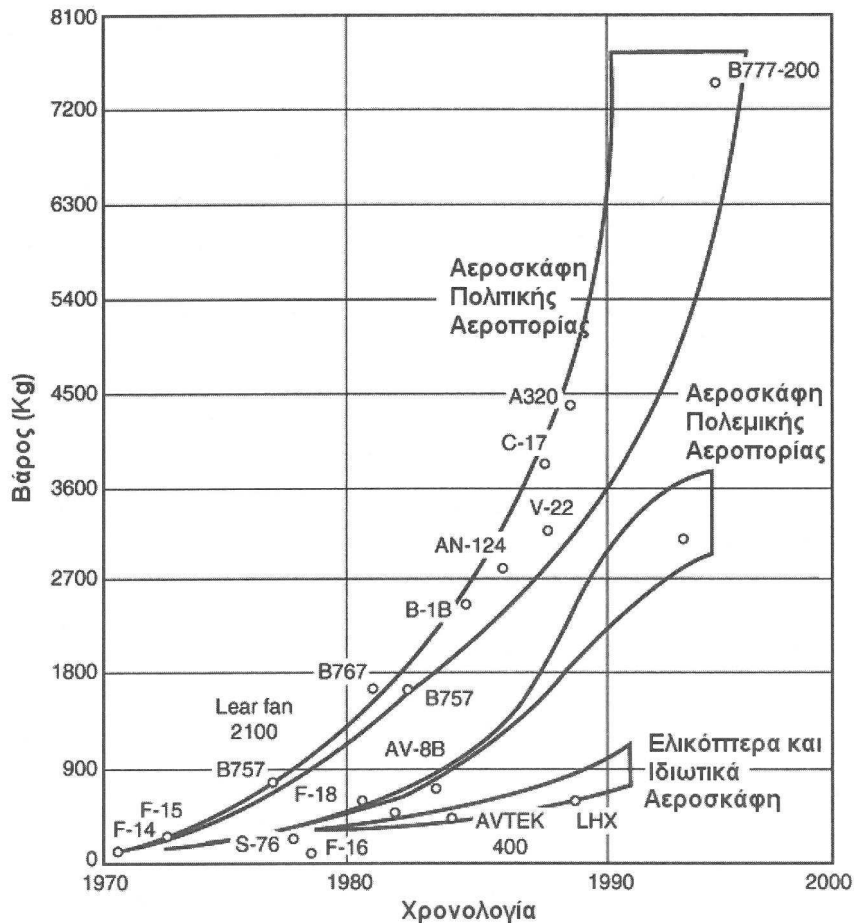
Επίσης πλεονεκτήματα της τρισδιάστατης εκτύπωσης, είναι πως απλουστεύεται η διαδικασία παραγωγής, και είναι εύκολη η μεταφορά της παραγωγής σε οποιοδήποτε μέρος του πλανήτη αφού με τους τρισδιάστατους εκτυπωτές δεν απαιτούνται CNC μηχανήματα και υγρά κοπής που επιβαρύνουν το περιβάλλον. Αυτό σημαίνει πως μπορεί να μεταφερθεί η παραγωγή με οικονομικό τρόπο σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη, κοντά στη ζήτηση/κατανάλωση απλουστεύοντας και κάνοντας πιο οικονομική την γραμμή logistics και δεν χρειάζονται ακριβά CNC μηχανήματα και υγρά κοπής. Ταυτόχρονα παράγονται ελαφρύτερα εξαρτήματα και μειώνεται το αποτύπωμα CO₂, γεγονός πολύ σημαντικό σε τομείς όπως η αεροπορική βιομηχανία αφού αυτό μεταφράζεται σε οικονομία καυσίμων και υψηλότερες επιδόσεις (Sabramanian, Muthu, Savalani).

Ένα ακόμα πλεονέκτημα που δίνει η 3D εκτύπωση είναι η οικονομία σε πρώτες ύλες και εργαλεία, αφού όσον αφορά τις πρώτες ύλες χρησιμοποιείται ακριβώς όση ύλη χρειάζεται για την κατασκευή του αντικειμένου είτε το υλικό που περισσεύει ανακυκλώνεται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί, ενώ ταυτόχρονα δεν χρειάζονται υγρά καθαρισμού και εργαλεία όσο σύνθετη και να είναι η κατασκευή. (Strivatsan, Sudarshan)

Επίσης χάρη στη 3D εκτύπωση μπορούν να τυπώνονται τρισδιάστατα μοντέλα ενός εξαρτήματος σε πραγματικές διαστάσεις πριν αυτό μπει στην γραμμή παραγωγής ώστε να εξετάζεται η εφαρμογή τους και οι λεπτομέρειες τους και άρα να μειώνονται λάθη στο τελικό εξαρτήματα και την εφαρμογή του με τα υπόλοιπα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το περιστατικό στην παραγωγή του Boeing 787 όπου τα διάφορα μέρη του αεροσκάφους τυπώνονται σε διαφορετικά σημεία του πλανήτη. Έχει συμβεί μετά από τη συγκέντρωση των εξαρτημάτων με σκοπό τη συναρμολόγησή τους, ένα μέρος του αεροσκάφους (π.χ. το

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

πτερύγιο) που είχε παραχθεί να μην είχε καλή εφαρμογή, γεγονός που δημιούργησε μεγάλα προβλήματα στη γραμμή παραγωγής. Με τη χρήση της τεχνολογίας 3D εκτύπωσης υπάρχει η δυνατότητα να σταλούν τα CAD σχέδια στην τοποθεσία εκτύπωσης και να παραχθεί ακριβές μοντέλο με βάση τις σχεδιαστικές απαιτήσεις, πριν ξεκινήσει η παραγωγή και άρα να αποφευχθούν τέτοια κοστοβόρα λάθη.

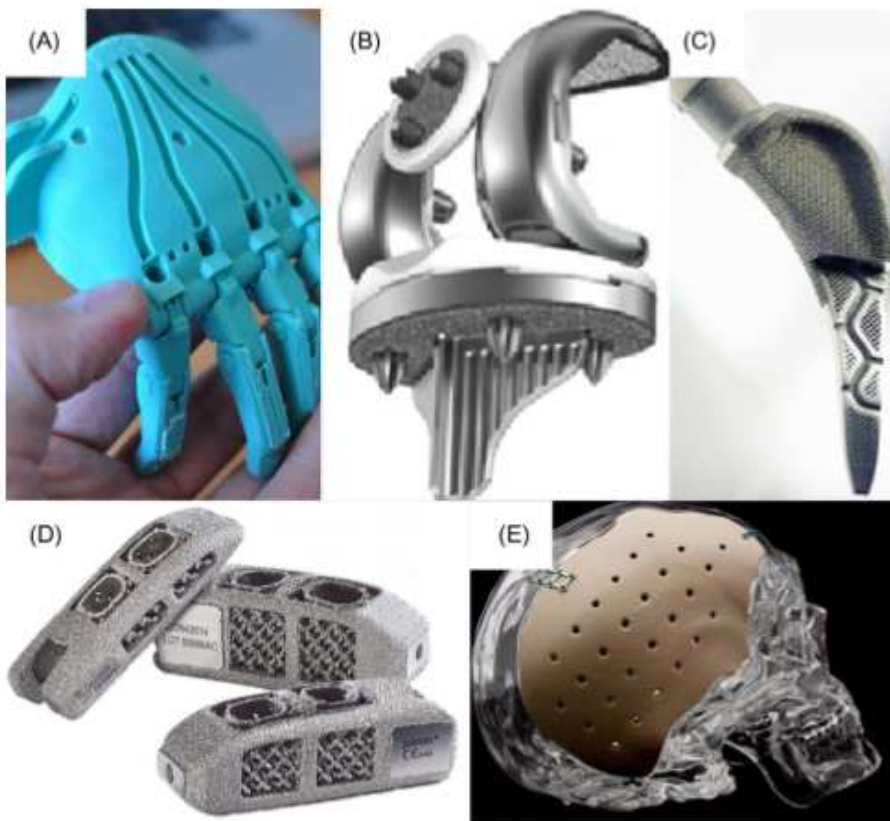


Φωτό : Εξέλιξη της χρήσης σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών στην αεροναυπηγική (Παντελής, μη μεταλλικά τεχνικά υλικά,1996)

Επίσης η δυνατότητα αποστολής των CAD σχεδίων δίνει μεγάλες δυνατότητες στην ιατρική και συγκεκριμένα την εκτύπωση προσθετικών μελών ή εμφυτευμάτων με πολύ μεγάλη ακρίβεια όσον αφορά τις διαστάσεις και την προσαρμογή τους στο σώμα του ασθενούς-λήπτη. Οι εταιρίες παραγωγής των εμφυτευμάτων και των προσθετικών μελών έχουν κάποια βασικές

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

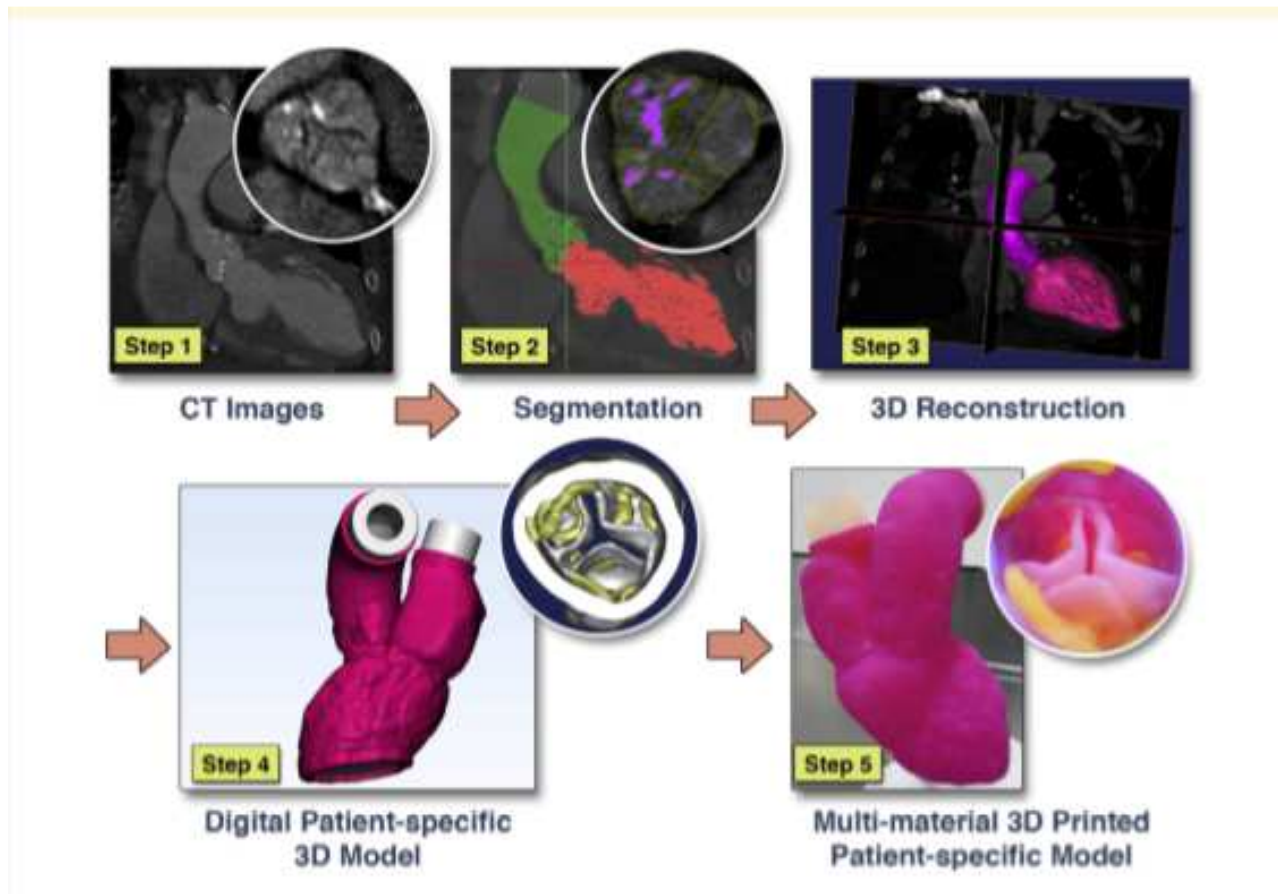
λεπτομερείς διαστάσεις για τα προσθετικά μέλη που παράγουν. Χαρακτηριστικό είναι το κεφάλαιο *Materials for 3d printing in Medicine : Metals, polymers, ceramics, hydrogels* των Poolagasundarampillai και Nommeots-Nomm στο βιβλίο «3D printing in Medicine» (2017) όπου περιγράφει υλικά που χρησιμοποιούνται για εμφυτεύματα. Το να κατασκευάσουν ένα μέλος ή εμφύτευμα αποκλειστικά για τις διαστάσεις ενός ασθενούς (custom) θα ήταν ασύμφορο οικονομικά και άρα αδύνατον να το υποστηρίξει ο ασθενής ή τα ασφαλιστικά ταμεία. Ωστόσο με την 3D εκτύπωση δίνεται η δυνατότητα να παραχθεί ένα μοναδικό ως προς τις διαστάσεις του ασθενούς εμφύτευμα. Η διαδικασία είναι πως από μία ακτινογραφία του ασθενή-λήπτη λαμβάνονται οι ακριβείς διαστάσεις και με βάση αυτές τυπώνεται 3διάστατα με μεγάλη ακρίβεια το εμφύτευμα και παράγεται το προσθετικό μέλος. (Bandyopadhyay, Amit_Bose, Susmita, 2016).



-Εμφυτεύματα τυπωμένα με 3d printing

(Φωτό : 3D printing in Medicine, Goowishan Poolagasundarampillai, Amy Nommeots-Nomm)

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



-Παράδειγμα κατασκευής τεχνητής καρδιάς με 3D printing από CT εικόνα (scan)

(Πηγή : Cardiac 3D Printing and its Future Directions, American College of Cardiology Foundation)

Επιπρόσθετα στο μέλλον η 3D εκτύπωση θα είναι μόνιμο μέρος του νοικοκυριού αφού θα μπορεί ο καθένας να τυπώσει οποιοδήποτε εξάρτημα χρειάζεται για οικιακή χρήση, όπως για παράδειγμα ένα βραχίονα μιας καρέκλας που έχει σπάσει. Δεν είναι υπερβολή να πει κανείς πως τα μαστορέματα του μέλλοντος θα περιλαμβάνουν 3D εκτυπωτές (Bandyopadhyay, Amit_Bose, Susmita, 2016)

Τέλος η 3D εκτύπωση δίνει για πρώτη φορά στην ανθρωπότητα τη δυνατότητα για παραγωγή αντικειμένων σε άλλο πλανήτη και αυτό είναι ένα project που “τρέχει” η NASA (Amit-Bose, Samsita) .Η απλούστευση της παραγωγής που δεν χρειάζεται εξαρτήματα και η αποστολή των σχεδίων μπορεί να γίνει εύκολα παντού, ακόμα και στο διάστημα ή σε έναν άλλο πλανήτη (δυσνητικά στο μέλλον) και άρα οι μελλοντικοί κάτοικοι του Άρη (?) αντί να περιμένουν να τους στέλνουν με μεγάλο κόστος σε χρόνο και χρήμα τα εξαρτήματα που χρειάζονται από τη Γη θα

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

μπορούν να τα παράγουν εύκολα και γρήγορα οι ίδιοι, βοηθώντας στην απεξάρτηση του νέου πλανήτη από τη Γη. (Bandyopadhyay, Amit_Bose, Susmita, 2016)

Επίσης να αναφέρουμε τη δραστική μείωση της τιμής των 3D εκτυπωτών τα τελευταία χρόνια (πριν από μια δεκαετία οι εκτυπωτές κόστιζαν μέχρι και 100,000 δολάρια ο ένας αλλά οι τιμές έχουν πέσει σημαντικά), η αύξηση της αξιοπιστίας και της ποιότητας εκτύπωσης, η συνεχής ανάπτυξη της αγοράς των 3D εκτυπωτών (Το 2012 ήταν μια αγορά της τάξης των USD1.85 δις και το 2017 αναμένεται να είναι περίπου η διπλάσια, της τάξης των USD 3.475 δις). (Bandyopadhyay, Amit_Bose, Susmita, 2016)

Ωστόσο όπως κάθε τεχνολογία που αναπτύσσεται έχει και αρνητικά συμπαρομαρτούντα, πτυχές της τεχνολογικής αυτής καινοτομίας που επιδέχονται σημαντική βελτίωση ακόμα.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ 3D ΕΚΤΥΠΩΣΗΣ

Ένα βασικό χαρακτηριστικό και ταυτόχρονα μειονέκτημα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι πως ο χρήστης είναι απαραίτητο να γνωρίζει CAD σχεδιασμό, δηλαδή σχεδιασμό σε Η/Υ. Τα σχέδια που δημιουργούνται και κατόπιν μετατρέπονται/επεξεργάζονται σε STL μορφή είναι αποκλειστικά σχεδιασμένα σε εφαρμογή CAD. Σε βιομηχανικές εφαρμογές αυτό δεν είναι πρόβλημα αφού οι αρμόδιοι εργαζόμενοι αναμένεται να έχουν τη σχετική κατάρτιση, ωστόσο στον καθημερινό χρήστη ή στον χομπίστα η γνώση σχεδιασμού CAD δεν πρέπει να θεωρείται δεδομένη.

Επίσης σημαντικό μειονέκτημα της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι πως η διαδικασία των διαδοχικών εναποθέσεων υλικού είναι χρονοβόρα, μπορεί να πάρει ώρες ή και μέρες για τη δημιουργία του τελικού αντικειμένου. Σε βιομηχανικό επίπεδο η στη μαζική παραγωγή αυτό δεν είναι αποδεκτό και άρα είναι σημαντικό στο μέλλον η συνολική διαδικασία να διαρκεί μερικά λεπτά προκειμένου να είναι εκμεταλλεύσιμο σε μαζική παραγωγή

Επιπρόσθετα, με την 3D κατεργασία δεν είναι εύκολη η κατασκευή πολύ μεγάλων κομματιών/εξαρτημάτων. Κι αυτό γιατί απαιτούνται αντίστοιχα πολύ μεγάλοι εκτυπωτές και τα κομμάτια που θα προέκυπταν ενδεχόμενα θα είχαν θέματα αντοχής. (Strivatsan, Sudarshan).

Ακόμα ένα σημαντικό αρνητικό που καταλογίζεται στη νέα αυτή τεχνολογία είναι πως υπάρχει ακόμα νομοθετικό κενό σε πολλές παραμέτρους της. Για παράδειγμα τι γίνεται στην περίπτωση που κάποιος χομπίστας ιδιώτης χρησιμοποιήσει τον 3D εκτυπωτή για να τυπώσει

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

όπλα ή μαχαίρια. Δίνεται η δυνατότητα δηλαδή με τη λάθος χρήση σε λάθος χέρια η τεχνολογία αυτή να είναι επιζήμια η/και παράνομη.

Επιπρόσθετα η τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης αυξάνει την εξάρτηση της παραγωγής από το πλαστικό, αφού οι πιο δημοφιλείς και φθηνές διαδικασίες εκτύπωσης χρησιμοποιούν πλαστικό νήμα σαν πρώτη ύλη, όπως για παράδειγμα το ABS. Στον αντίλογο ωστόσο το PLA είναι βιοαποικοδομήσιμο (Strivatsan, Sudarshan).

Τέλος παρότι η τεχνολογία αυτή εξελίσσεται συνεχώς και οι τιμές των 3D εκτυπωτών μειώνονται συνεχώς, οι εξεζητημένοι εκτυπωτές έχουν ακόμα υψηλό κόστος. Είναι φυσικό όμως πως με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο της τεχνολογίας οι τιμές συνολικά σταδιακά θα μειωθούν σε όλο το εύρος των εκτυπωτών.

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Τα σύνθετα υλικά είναι τεχνητά παραγόμενα πολυφασικά υλικά, ένας μακροσκοπικός συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών με αλληλεπίδραση μεταξύ τους, που έχουν ένα συνδυασμό από επιθυμητές ιδιότητες ανώτερες από το καθένα ξεχωριστά (Barbero) – αν και ο ορισμός είναι δύσκολος δεδομένη την πληθώρα των συνδυασμών και εφαρμογών τους. Είναι γνωστά για τις ηλεκτρολογικές, θερμικές, τριβολογικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές τους (Davis, Siemantín). Ιστορικά η πρώτη φάση της ανάπτυξής τους ήταν κατά το 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο με αφορμή τις ανάγκες της αεροπορίας, λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων και του χαμηλού βάρους. Επίσης μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξή τους δόθηκε κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου, πάλι για τις ανάγκες της πολεμικής αεροπορίας (Davis, Siemantín). Χρονικά από το 1950 μέχρι το 1980 στην αεροναυπηγική έχουν χρησιμοποιηθεί σύνθετα ως δευτερεύουσες κατασκευές αεροπλάνων, έπειτα προωθητήρες κι εκτοξευτήρες ρουκετών, πτερύγια και μηχανικά μέρη (Παντελής, μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996). Η ανάπτυξη τους και η μελέτη των ιδιοτήτων έχει αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια κι αυτό συμβαίνει τόσο γιατί τα συμβατικά υλικά και οι ιδιότητές τους έχουν μελετηθεί εξαντλητικά τις τελευταίες δεκαετίες, όσο γιατί τα σύνθετα υλικά συνδυάζουν μοναδικά επιθυμητές ιδιότητες (αντοχή, χαμηλό βάρος, υψηλή αντοχή στην κόπωση, βελτιωμένο μέτρο ελαστικότητας E, υψηλή τιμή που όμως συνεχώς μειώνεται κλπ) που τα κάνει να υπερτερούν σε σχέση με πολλά συμβατικά υλικά όπως ο χάλυβας και το αλουμίνιο. Και το γεγονός αυτό αποκτάει ιδιαίτερη

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

αξία τα τελευταία στις μεταφορές δεδομένης της αύξησης της τιμής των καυσίμων και της ανάγκης για ελαφρύτερα υλικά (Callister, Rethwisch).

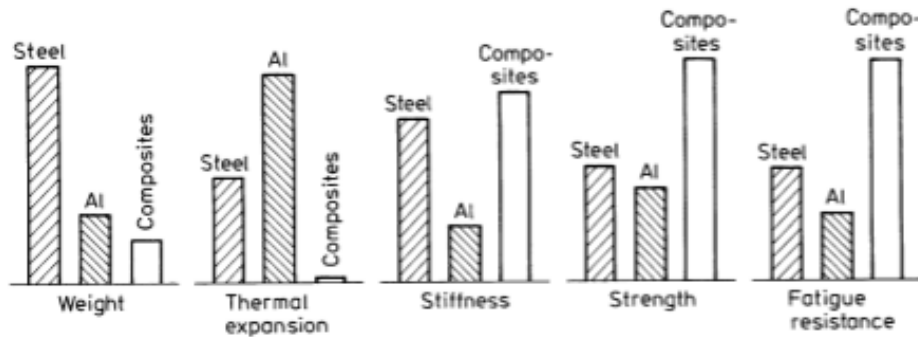


Fig. 1.1. Comparison between conventional monolithic materials and composite materials. [From Deutsch (1978), used with permission.]

-Σύγκριση μεταξύ σύνθετων και απλών υλικών (Φωτό : Krishan. K. Chawla, Composite Materials Science and Engineering)

Είναι σημαντικό πως σύνθετα υλικά συναντώνται στη φύση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το ξύλο που αποτελείται από ανθεκτικές και εύκαμπτες ίνες κυτταρίνης οι οποίες περιβάλλονται και συγκρατούνται από το δύσκαμπτο υλικό λιγνίνη {Callister, Rethwisch}.

Επίσης η έννοια των σύνθετων υλικών υπάρχει από αρχαίων χρόνων, με την έννοια ότι πολυφασικά υλικά όπως το τούβλα που αποτελούνται από πηλό ενισχυμένο με άχυρο, το ατσάλι είναι γνωστά για χιλιάδες χρόνια {Callister, Rethwisch} ωστόσο η πραγματική ανάπτυξη του των σύνθετων υλικών ήρθε κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα με σκοπό να κατασκευαστούν πιο ελαφρά και πιο ανθεκτικά υλικά για τις ανάγκες της αλματώδως αναπτυσσόμενης βιομηχανίας και τεχνολογίας (πχ. Αεροναυπηγική, αεροδιαστημική τεχνολογία, εμβιομηχανική), ανάγκες που δεν ικανοποιούνταν από τα συμβατικά υλικά.

Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως από όλα τα ινώδη σύνθετα υλικά οι ίνες άνθρακα έχουν την υψηλότερη ειδική αντοχή και διατηρούν τα καλά χαρακτηριστικά (υψηλά μέτρα ελαστικότητας σε εφελκυσμό) ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Το κόστος τους δε, έχει μειωθεί τα τελευταία χρόνια, χάρη στην ανάπτυξη νέων μεθόδων παραγωγής. Οι εφαρμογές τους δε εκτείνονται από τα αθλήματα αναψυχής (τένις, γκολφ), τον μηχανοκίνητο αθλητισμό (Formula 1) έως και την αεροδιαστημική.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



(Φωτό :www.Tao-bo.gr)



(Φωτό: www.formula1.com)

Για να κατανοήσει κανείς τις βελτιωμένες ιδιότητες των σύνθετων υλικών σε σχέση με τα απλά υλικά (εποξειδική ρητίνη) παρατίθεται πίνακας με το αυξημένο μέτρο Ελαστικότητας αλλά και το κόστος διάφορων σύνθετων υλικών

Υλικά	Μετρο Ελαστικότητας (GPa)	Κόστος (\$/Kg)
Υαλονήματα	72.5	2.10
Ίνες άνθρακα (κανονικό E)	230	60.00
Ίνες άνθρακα (μέσο E)	285	95.00
Ίνες άνθρακα (υψηλό E)	400	250.00
Εποξειδική ρητίνη	2.4	6.00

(Δ.Ι.Παντελής, Μη μεταλλικά υλικά, 1996)

Επίσης χαρακτηριστικά παρατίθεται πίνακας όπου φαίνεται η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετου υλικού και ειδικότερα ενισχυμένης και μη ενισχυμένης πολυκαρβονικής μήτρας με τυχαίως προσανατολισμένες ίνες γυαλιού.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Ιδιότητα	Μη ενισχυμένο	Ινώδη ενίσχυση (% κατ' όγκο)		
		20	30	40
Ειδικό βάρος	1.19-1.22	1.35	1.43	1.52
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	59-62	110	131	159
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	2.24-2.345	5.93	8.62	11.6
Παραμόρφωση (%)	90-115	4-6	3-5	3-5
Αντοχή κρούσης, τύπου Izod (N/cm)	12-16	2.0	2.0	2.5

Πηγή: Τα πιο πάνω στοιχεία έχουν ληφθεί από το Materials Engineering's *Materials Selector*, copyright © Penton/IPC.

(Πηγή: Materials Engineering's Materials Sector, Penton/IPC)

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Το σύνθετο υλικό έχει μέτρο ελαστικότητας που κινείται μεταξύ του άνω και του κάτω ορίου όπου

Το άνω όριο του μέτρου ελαστικότητας δίνεται από την έκφραση

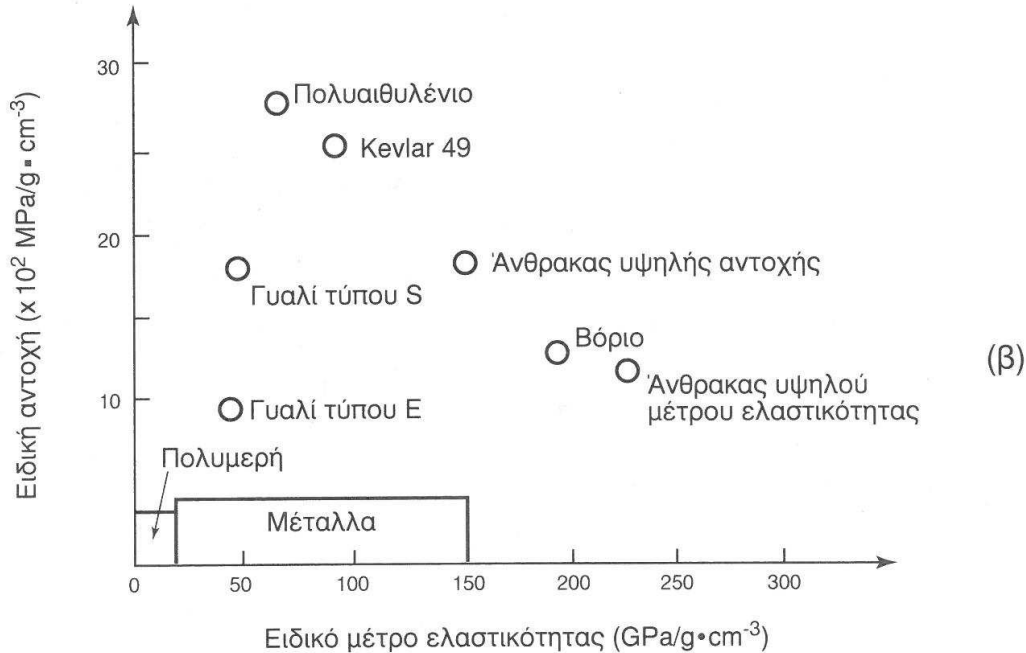
$$E_c = E_m V_m + E_p V_p$$

ενώ το κάτω όριο του μέτρου ελαστικότητας δίνεται από τον τύπο

$$E_c = E_m E_p / V_m E_p + V_p E_m$$

Όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας, V το κλάσμα του όγκου, ενώ οι δείκτες c,m,p αναφέρονται στο σύνθετο υλικό, στη μήτρα και στις κοκκώδεις φάσεις αντίστοιχα.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



ΣΧΗΜΑ III.11. (α) Καμπύλες εφελκυσμού (τάσεων-παραμορφώσεων) χαρακτηριστικών τύπων ενισχυτικών ινών. (β) Σύγκριση διαφόρων ινών ως προς την ειδική αντοχή και το ειδικό μέτρο ελαστικότητάς τους.

-Φωτό : Σύγκριση διαφόρων ινών ως προς την ειδική αντοχή και το ειδικό μέτρο ελαστικότητάς τους.

(Copyright ASTM, ASTM Proceedings, Vol63, 1916 Race Street)

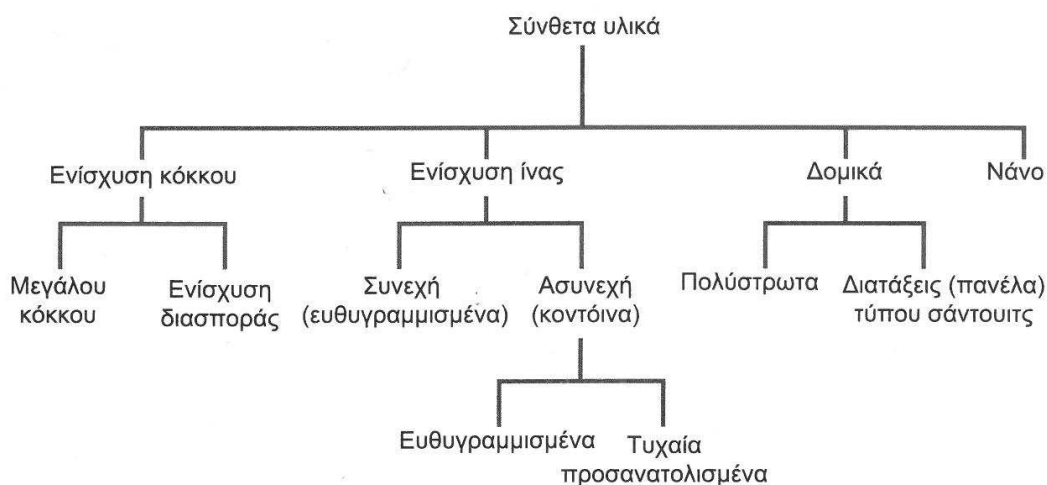
ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Πολλά σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις. Η μία από αυτές ονομάζεται *μήτρα*, είναι συνεχής και περιβάλλει ολοκληρωτικά την άλλη φάση που ονομάζεται *διεσπαρμένη* φάση. Η μήτρα είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης (Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996) Γενικά, τα μέταλλα και τα πολυμερή χρησιμοποιούνται ως μητρικά υλικά γιατί είναι

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

επιθυμητός κάποιος βαθμός ολκιμότητας (Callister, Rethwish, 2016). Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες

1. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (fibrous composites)
2. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (particulate composites)
3. Στρωματικά σύνθετα υλικά (laminar composites)



(Φωτό : Callister, Rethwish, Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών)

Πρέπει να σημειωθεί πως η μηχανική αντοχή των σύνθετων υλικών δεν ισούται με το μέσο όρο των αντοχών των δύο συστατικών εξαρτάται από το υλικό της ενίσχυσης, το υλικό της μήτρας, τη μηχανική συμπεριφορά των δύο αλλά και τη μεταξύ τους «συμβατότητα» (Δ.Ι.Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996).

• ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΑΣ

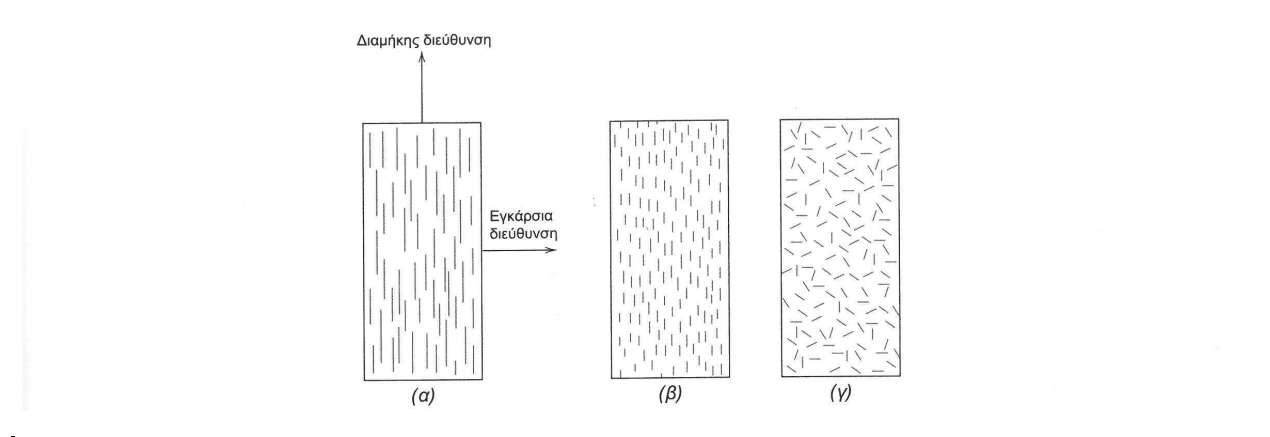
Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από τις ίνες και τη μήτρα. Οι ίνες μπορεί να είναι προσανατολισμένες είτε παράλληλα είτε τυχαία και ο προσανατολισμός τους επηρεάζει το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού. Αξίζει να σημειωθεί πως η μήτρα έχει όλκιμη συμπεριφορά ενώ η ίνα έχει ψαθυρή συμπεριφορά. Αν ο λόγος μήκος/διάμετρο είναι >100 οι

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ίνες λέγονται μακριές ή συνεχείς. Αν ισχύει μήκος/διάμετρο <100 οι ίνες λέγονται κοντές ή ασυνεχείς.

Ως ίνες επιλέγονται υλικά που παρουσιάζουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή τιμή θραύσης και μικρή πυκνότητα (Παντελής). Επίσης οι ίνες προτιμούνται γιατί είναι ελαφριές, πιο δυνατές από το κυρίως υλικό (bulk material) του υλικού από το οποίο έχουν κατασκευαστεί. Αυτό συμβαίνει γιατί έχουν λιγότερες ατέλειες στο μήκος τους και από τον προσανατολισμό των μορίων κατά μήκος την ίνας (Barbero). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ως ίνες μπορούν να είναι ίνες γυαλιού, άνθρακα, κεραμικές, μεταλλικές, πολυμερούς ή τριχίτες (whiskers). Άλλη ταξινόμηση είναι με βάση το μήκος τους (κοντές, μεσαίες, μακριές) και οργανικές-ανόργανες (Barbero). Αντίστοιχα ως μήτρα θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία και υψηλό σημείο τήξης (Παντελής). Αντίστοιχα οι μήτρες μπορούν να είναι οργανικές (θερμοπλαστικές ή θερμοσκληρυνόμενες), μεταλλικές κεραμικές ή μήτρες άνθρακα.

Τα σύνθετα υλικά δεν είναι ισότροπα υλικά, δηλαδή οι ιδιότητες τους εξαρτώνται από τη διεύθυνση που γίνεται η εφαρμογή της τάσης. Εξάιρεση σε αυτό αποτελούν οι ίνες γυαλιού, οι οποίες είναι ισότροπες, δηλαδή ο αριθμός του Young είναι ίδιος τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια στις ίνες (Hull, 1981).

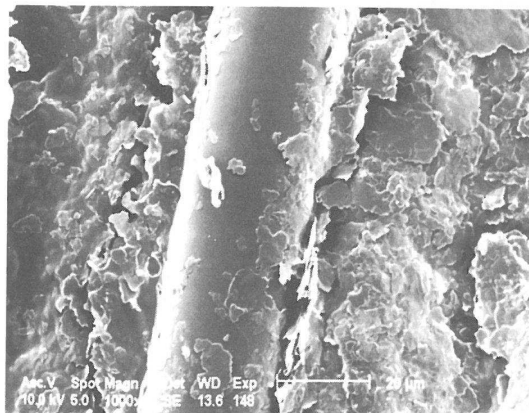
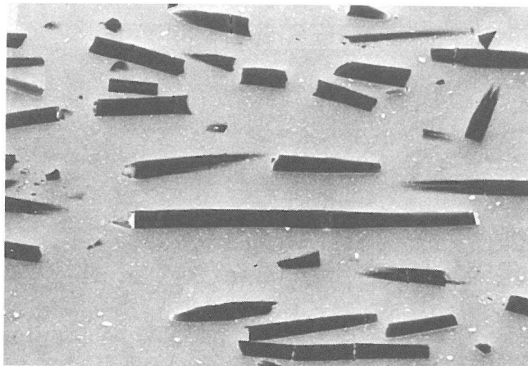
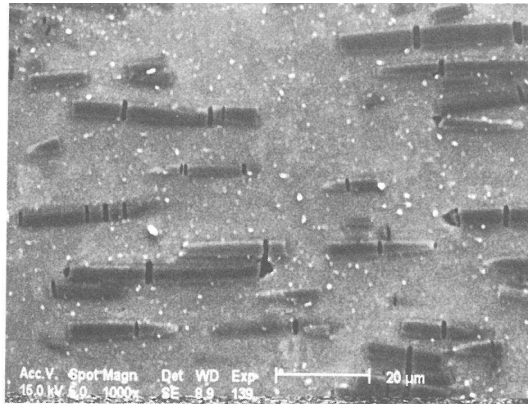


-Σχηματική αναπαράσταση α) συνεχών και ευθυγραμμισμένων ινών β) ασυνεχών και ευθυγραμμισμένων ινών και γ) ασυνεχών και τυχαία προσανατολισμένων σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες

(Φωτό : Callister, Rethwish, Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών)

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Επίσης έχουν αναπτυχθεί υλικά με ίνα και μήτρα άνθρακα (υλικό άνθρακα-άνθρακα) με χαρακτηριστικό την διατήρηση των επιθυμητών ιδιοτήτων (υψηλό μέτρο ελαστικότητας) ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του υψηλού κόστους –που οφείλεται στις σύνθετες μεθόδους παραγωγής- τους έχουν περιορισμένες εφαρμογές προς το παρόν με κύριο πεδίο την αεροδιαστημική.



-Ηλεκτρονικές μικρογραφίες χαρακτηριστικών σύνθετων α) Ίνες Al₂O₃ σε μήτρα αλουμινίου β) Ίνες άνθρακα σε μήτρα αλουμινίου γ) Ίνες γυαλιού σε μήτρα εποξειδικής ρητίνης

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

(Φωτό : Δ.Ι. Παντελής, Μη Μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

• ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΚΚΟΥ

Χαρακτηριστικό παράδειγμα σύνθετου υλικού με μεγάλους κόκκους είναι το σκύροδεμα. Αποτελείται από το τσιμέντο (τη μήτρα), άμμο και χαλίκι (οι κόκκοι) (Callister, Rethwish). Το μέτρο ελαστικότητας των διφασικών σύνθετων υλικών δίνεται από τον κανόνα των μειγμάτων που προβλέπει ότι το μέτρο ελαστικότητας πρέπει να βρίσκεται μεταξύ ενός άνω ορίου και ενός κάτω ορίου.

Το άνω όριο περιγράφεται από

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p$$

Ενώ το κάτω όριο περιγράφεται από

$$E_c = E_m E_p / V_m E_p + V_p E_p$$

Όπου E και V δηλώνουν το μέτρο ελαστικότητας και το κλάσμα όγκου αντίστοιχα ενώ οι δείκτες c, m και p αναφέρονται στο σύνθετο υλικό, στη μήτρα και στις κοκκώδεις φάσεις.

Για τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκου ισχύει το εξής: Η μήτρα φέρει το μεγαλύτερο μέρος του εφαρμοζόμενου φορτίου, οι διεσπαρμένοι κόκκοι εμποδίζουν ή δυσχεραίνουν την κίνηση των εξαναγκασμών και με τον τρόπο αυτό η πλαστική παραμόρφωση εμποδίζεται και άρα η αντοχή σε διαρροή και σε εφελκυσμό όπως και η σκληρότητα βελτιώνονται {Callister, Rethwisch}.

Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων χωρίζονται σε ενίσχυση με *μεγάλα* σωματίδια και σε ενίσχυση με *μικρά* σωματίδια σε διασπορά. Γενικά τα σύνθετα με ενίσχυση σωματιδίων είναι λιγότερο ανθεκτικά από τα σύνθετα με ενίσχυση ινών, διότι η συμβολή των σωματιδίων είναι μικρότερη αυτής των ινών. (Δ.Ι. Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

Εφαρμογές τους είναι ηλεκτρικές επαφές υλικών, αεροπορικές και πυρηνικές εφαρμογές, πλέγματα μπαταριών, μέρη κινητήρων μηχανών, αντιτριβικές εφαρμογές, κοπτικά εργαλεία.

Κατά τον εφελκυσμό τους συμπεριφέρονται όπως τα σύνθετα με ενίσχυση ινών (όταν η εφελκυστική τάση είναι κάθετη στη διεύθυνση των ινών) αλλά η πιο σημαντική ίσως εφαρμογή τους είναι η χρήση τους για αντιτριβική προστασία. Αυτό συμβαίνει όταν τα

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

σωματίδια ενίσχυσης είναι μαλακά και μικρά γιατί η αύξηση της διαμέτρου των σωματιδίων προκαλεί πλαστική παραμόρφωση της μήτρας και φαινόμενα εκρίζωσης, ενώ όταν τα σωματίδια είναι μικρά παρουσιάζεται κοπή, απόξεση και ρωγμάτωση του σύνθετου. (Δ.Ι.Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

- **ΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

Στρωματικά υλικά χρησιμοποιούνται όταν είναι ασύμφορη η κατασκευή ολόκληρου του αντικειμένου από το υλικό επίστρωσης, ή όταν απαιτούνται διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες της «καρδιάς» από την επιφάνεια.

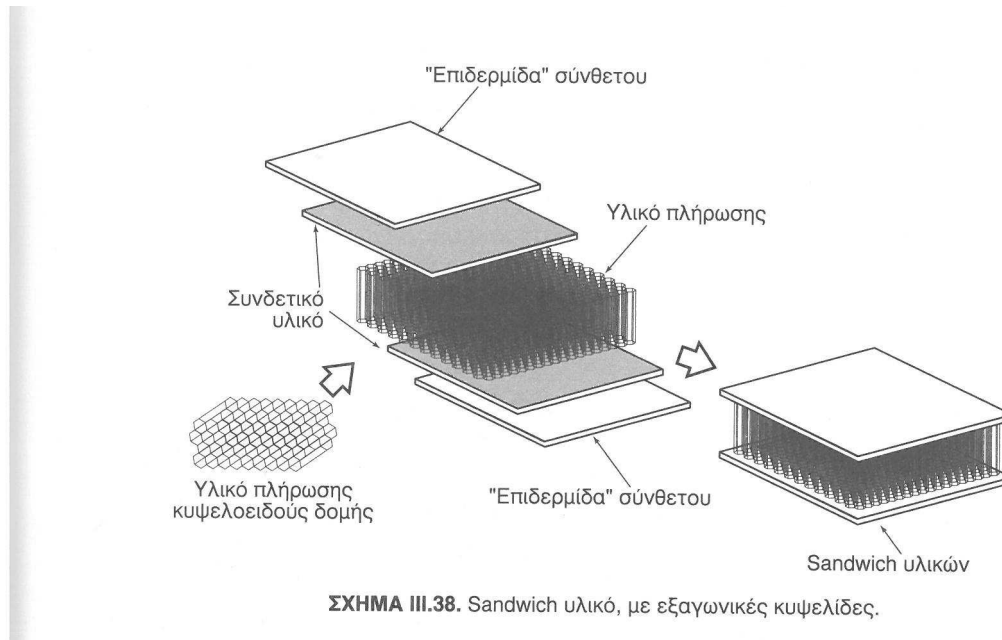
Οι τρεις βασικές κατηγορίες υλικών είναι τα *υλικά μικρού και μεγάλου μήκους*, τα *διμεταλλικά* και τα *πολυστρωματικά*.

ΕΠΙΣΤΡΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ : Χρησιμοποιούνται για δημιουργία επιστρωμάτων που είναι είτε *αντιδιαβρωτικά* είτε *αντιτριβικά* είτε *λεπτά*.

ΔΙΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΛΙΚΑ : Χρησιμοποιούνται κυρίως για μέτρηση ή έλεγχο της θερμοκρασίας.

ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ SANDWICH ΥΛΙΚΑ :Εξαιτίας του συνδυασμού υλικών παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, ενώ το sandwich υλικό δημιουργείται από τη σύνδεση, κόλληση ή συγκόλληση δύο λεπτών επιδερμίδων υλικού. Η επιστρωμάτωση μπορεί να γίνει είτε με εμβάπτιση είτε με ηλεκτρολυτική απόθεση, ενώ είναι απαραίτητος ο καλός καθαρισμός της επιφάνειας πριν την επιστρωμάτωση

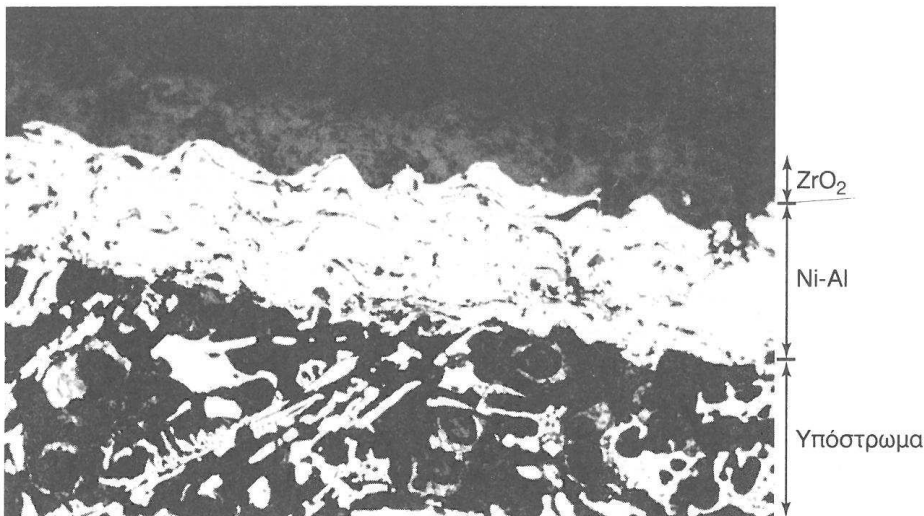
ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



Sandwich υλικό με εξαγωνικές κυψελίδες

(Φωτό: Callister, Rethwish, Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών)

Τα επιστρώματα χρησιμοποιούνται με κύριες εφαρμογές τα α) αντιδιαβρωτικά επιστρώματα β) αντιτριβικά επιστρώματα γ) λεπτά επιστρώματα



ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

-Οπτική μικρογραφία επιστρώματος ψεκασμού ατμοσφαιρικού πλέγματος Ζιρκόνια σε υπόστρωμα χυτοσίδηρου σφαιροειδούς γραφίτη με ενδιάμεσο συνδετικό στρώμα Ni-Al

(Φωτο: Δ.Ι.Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά)

- **ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

Τα νανοσύνθετα υλικά αποτελούνται από σωματίδια μεγέθους νάνο (ή νανοσωματίδια) τα οποία είναι ενσωματωμένα στο μητρικό υλικό. Τα υλικά αυτά χάρη στα νανοσωματίδια έχουν μηχανικές, ηλεκτρικές, μαγνητικές θερμικές και βιολογικές ιδιότητες ανώτερες από τα συμβατικά υλικά με ενισχυτικά μέσα. (Callister, Rethwish, 2016). Τις ιδιότητες αυτές τις προσδίδει το μικρό μέγεθος του σωματιδίου. Διάφορες εφαρμογές των νανοσύνθετων υλικών είναι υμένα γραφής αερίων (για προϊόντα σε ράφια σουπερμάρκετ), οδοντικές αποκαταστάσεις, σε μπαταρίες ιόντων λιθίου, και σε περιπτώσεις που χρειάζεται να αυξηθεί η μηχανική αντοχή (πτερύγια ανεμογεννητριών, μπαστούνια του μπέιζμπολ, γκολφ κλπ).

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Η εφαρμογή τάσης μπορεί να είναι κατά το διαμήκη άξονα σε σχέση με τις ίνες ή κατά τον εγκάρσιο άξονα. Η μεγαλύτερη αύξηση στην αντοχή του σύνθετου υλικού παρουσιάζεται όταν η τάση εφαρμόζεται κατά το διαμήκη άξονα σε σχέση με τις ίνες, κατά τον εγκάρσιο άξονα η αύξηση στην αντοχή είναι σχεδόν μηδαμινή.

Έχουμε δύο κατηγορίες, με ίνες μονοδιευθυντικές και με τυχαίως προσανατολισμένες ίνες.

1.Συνεχείς μονοδιευθυντικές ίνες

Χαρακτηριστικό είναι πως για να υπάρχει σημαντική βελτίωση της αντοχής του υλικού, είναι απαραίτητο οι ίνες που μεταφέρουν την εφαρμοζόμενη τάση από τη μήτρα στις ίνες, είναι οι ίνες να είναι συνεχείς. (Δ.Ι.Παντελής, μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Όταν δύο υλικά με γραμμική ελαστική συμπεριφορά και με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας αναμειγνύονται, το προκύπτον υλικό θα έχει επίσης γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Η συνολική δύναμη που ασκείται στο σύνθετο δοκίμιο ισούται με το άθροισμα των δυνάμεων που αναλαμβάνουν η μήτρα και οι ίνες, (Παντελής, μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

Ειδικότερα, στην περίπτωση του εφελκυσμού παράλληλου προς τη διεύθυνση των ενισχυτικών ινών (στη διαμήκη διεύθυνση), βάση του νόμου του Hooke, ισχύει

$$\sigma = E\varepsilon$$

και το μέτρο ελαστικότητας (E) θα δίνεται από το γραμμικό συνδυασμό των μέτρων ελαστικότητας των ινών και της μήτρας σύμφωνα με τη σχέση

$$E = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$

Όπου E_f και E_m είναι τα μέτρα ελαστικότητας των ινών και της μήτρας αντίστοιχα οι δείκτες f και m αναφέρονται στις ίνες και τη μήτρα αντίστοιχα.

Στην περίπτωση που ο εφελκυσμός πραγματοποιείται κάθετα στη διεύθυνση των ινών, το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου (E_c) δίνεται από τη σχέση

$$E_c = [V_f/E_f + (1 - V_f)/E_m]^{-1}$$

Πρέπει να σημειωθεί πως επειδή οι αντοχές των συνεχών και μονοαξονικών ινωδών σύνθετων υλικών είναι άκρως ανισότροπες και αυτού του είδους τα υλικά σχεδιάζονται ώστε να φορτίζονται κατά μήκος της διαμήκου διεύθυνσης, η εγκάρσια αντοχή είναι πολύ χαμηλή – μερικές φορές μικρότερη από την εφελκυστική αντοχή της μήτρας (Callister, Rethwish).

2. Τυχαίως προσανατολισμένες ίνες

Στην περίπτωση σύνθετου υλικού με τυχαίως προσανατολισμένης ίνες το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου δίνεται από τον τύπο

$$E_c = K E_f V_f + E_m V_m$$

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Όπου K είναι η παράμετρος αποτελεσματικότητας της ίνας που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.1 και 0.6.

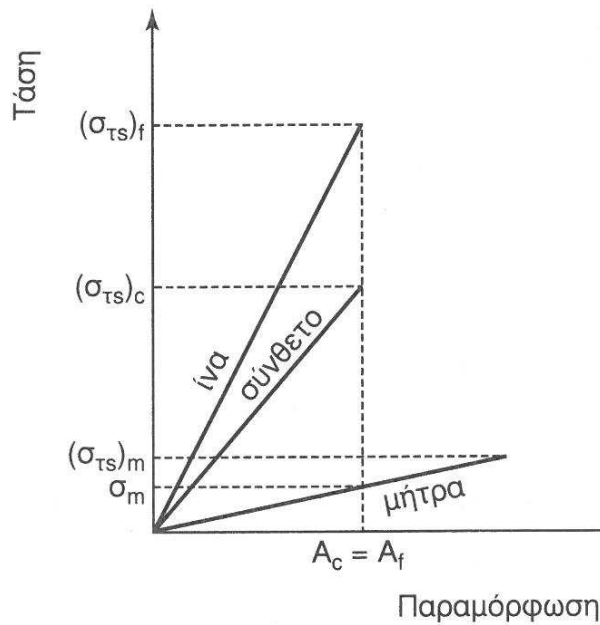
Αξίζει να σημειωθεί πως για να παρουσιάζει το σύνθετο υλικό καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τη μήτρα, θα πρέπει το κατ'όγκο ποσοστό των ινών να υπερβαίνει μια κάποια κρίσιμη τιμή. Πράγματι, μικρό ποσοστό ινών περιεχόμενων ινών δεν βελτιώνει τη μηχανική αντοχή της μήτρας αφού η εφαρμοζόμενη τάση αναλαμβάνεται από την όλκιμη μήτρα η οποία συνεχίζει να παραμορφώνεται και οι ίνες θραύονται. Επομένως η αντοχή σε εφελκυσμό είναι ίση με την αντοχή σε εφελκυσμό της μήτρας (στην περίπτωση αυτή)

Υλικό	Εφελκυστική διαμήκης αντοχή (MPa)	Εγκάρσια εφελκυστική αντοχή (MPa)
Γυαλί-Πολυεστέρας	700	20
Άνθρακας (Υψηλού μέτρου ελαστικότητας)	1000	35
Εποξειδική ρητίνη		
Kevlar-Εποξειδική ρητίνη	1200	20

Τυπικές διαμήκεις και εγκάρσιες εφελκυστικές αντοχές για τρία μονοαξονικά σύνθετα υλικά με ίνες

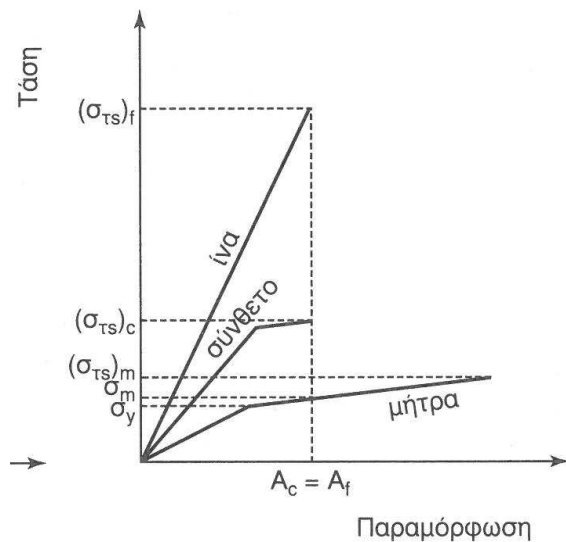
(Φωτό : Δ.Ι.Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά – πηγή D.Hull και T.W. Clyne, An introduction to Composite Materials, 2nd edition, Cambridge University Press, 1996)

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



-Εφελκυσμός όλκιμου σύνθετου (Φωτό : Δ.Ι. Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ ΨΑΘΥΡΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ



B) Εφελκυσμός ψαθυρού σύνθετου (Φωτό : Δ. Ι. Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

-Σχηματικά διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων κατά τον εφελκυσμό σύνθετου υλικού όλκιμης (α) και ψαθυρής (β) μήτρας

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες σε εφελκυσμό αλλά μειωμένες σε θλίψη (σε αντίθεση με τα κεραμικά υλικά). Αυτό συμβαίνει γιατί με την εφαρμογή των θλιπτικών τάσεων παρουσιάζονται φαινόμενα κύρτωσης, αναδίπλωσης και συστροφής των ινών (buckling) (Παντελής, μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ (TOUGHNESS) ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Χαρακτηριστικό μέγεθος της δυσθραυστότητας (toughness) αποτελεί το ποσό της ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, το οποίο απορροφάται κατά τη θραύση του υλικού. Γενικά ο κανόνας των μιγμάτων δεν ισχύει για τον υπολογισμό της δυσθραυστότητας των σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών.

Ως γνωστόν, το μήκος των ινών είναι καθοριστικός παράγοντας του μηχανισμού αστοχίας του σύνθετου. Αν ο συντελεστής σχήματος των ινών είναι μικρότερος μιας κρίσιμης τιμής (s^*) δεν προκαλείται θραύση των ινών αλλά, κατά τη διάδοση της ρωγμής (crack propagation), οι ίνες αποκολλώνται από τη μήτρα, απορροφώντας ένα μέρος της ενέργειας θραύσης. Η προκαλούμενη με τον τρόπο αυτό αύξηση του G , έχει σαν αποτέλεσμα την *αύξηση* της δυσθραυστότητας του σύνθετου. (Δ.Ι.Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

Αύξηση του ποσοστού ινών συμβάλλει επίσης στην αύξηση της δυσθραυστότητας (πίνακας). Αν ο συντελεστής σχήματος των ινών είναι μεγαλύτερος της κρίσιμης τιμής του, τότε η θραύση του σύνθετου επέρχεται με τη θραύση των ινών.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΜΗΤΡΑ	ΤΡΙΧΙΤΕΣ SiC (% κ.ο.)	ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ (MPa.m ^{-1/2})
Si ₃ N ₄	0	5-7
	10	6,5-9,5
	30	7,5-10
Al ₂ O ₃	0	4,5
	10	7,1
	20	7,5-9,0

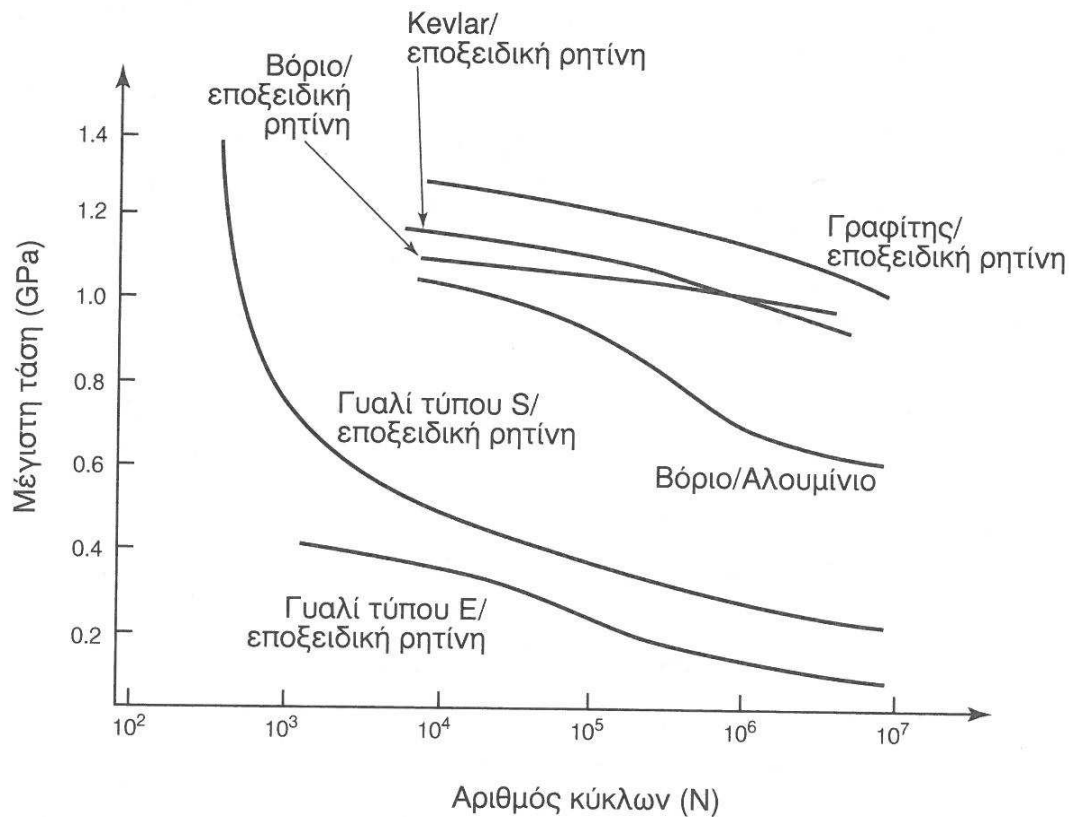
-Αύξηση της δυσθραυστότητας κεραμικής μήτρας σύνθετων υλικών με την αύξηση του ποσοστού των περιεχομένων τριχιτών SiC

(Φωτό : Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Γενικά, η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε κόπωση είναι δύσκολο να προβλεφθεί, αφού δεν ισχύει στην περίπτωση αυτή ο κανόνας των μιγμάτων, αλλά απαιτούνται συστηματικές πειραματικές δοκιμές για κάθε συγκεκριμένο σύνθετο υλικό. Ενδεικτικά παρουσιάζονται διάγραμμα κύκλων-Μέγιστης Τάσης για διάφορα σύνθετα υλικά.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



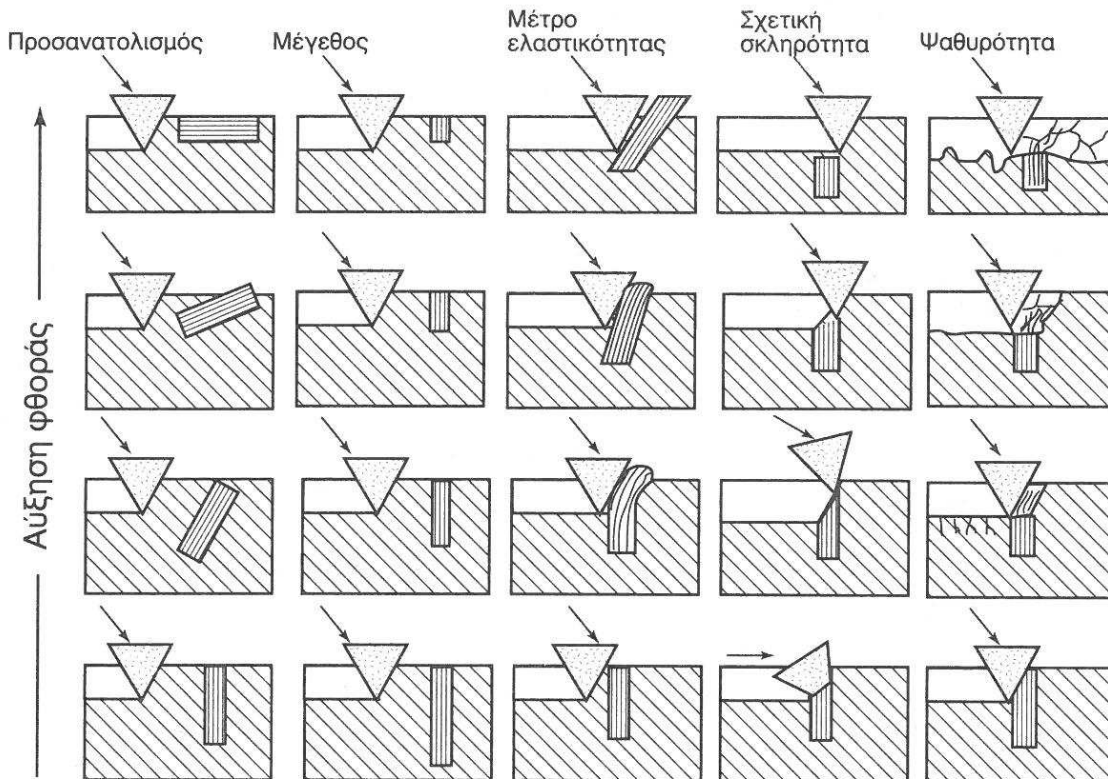
-Αντοχή σε κόπωση διάφορων σύνθετων υλικών

(Φωτό: Παντελής, Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΤΡΙΒΗ

Όταν σύνθετο υλικό με ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών υποβάλλεται σε τριβή (abrasion), ο ρυθμός φθοράς του (wear) εξαρτάται από το μήκος, τον προσανατολισμό και τις μηχανικές ιδιότητες των ινών. Τη μικρότερη φθορά παρουσιάζει το σύνθετο με μακριές ίνες κάθετες στη διεύθυνση της τριβής. Επίσης έχει βρεθεί στο άρθρο Myint et al (2013) με τίτλο *Friction and wear durability studies on the 3D negative fingerprint and honeycomb textured SU-8 surfaces* στο περιοδικό *Tribology International* πως η αντοχή σε τριβή είναι μεγαλύτερη για την εκτύπωση Honeycomb (σε σχέση με την fingerprint εκτύπωση).

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



-Επίδραση των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των ινών στο ρυθμό φθοράς του υλικού (Φωτό : Δ.Ι.Παντελής, μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 1996)

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Δημιουργήθηκαν 9 δοκίμια με την εξής διαδικασία:

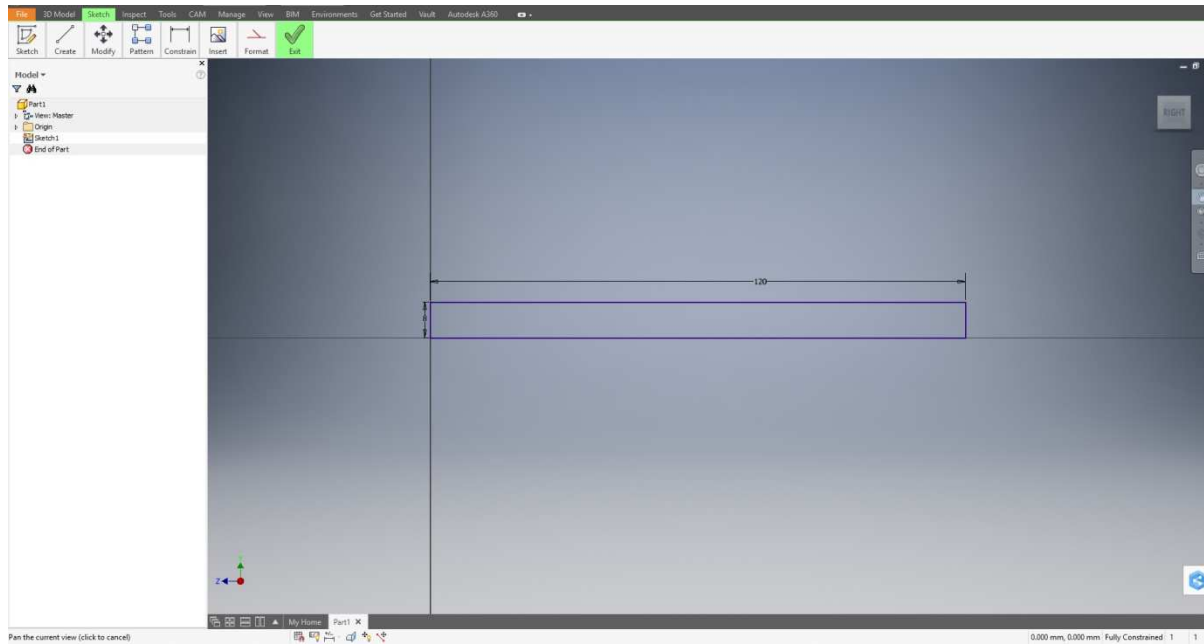
Δημιουργήθηκε στο Autodesk Inventor σχέδιο για 1 δοκίμιο με τις εξής διαστάσεις:

Διατομή 8mm*8mm και μήκος 120mm. Το ωφέλιμο μήκος (gauge) υπολογίστηκε να είναι 80mm οπότε κάθε αρπάγη υπολογίστηκε να πιάνει 20mm από το δοκίμιο (20mm από την άνω μεριά και 20mm από την κάτω μεριά)

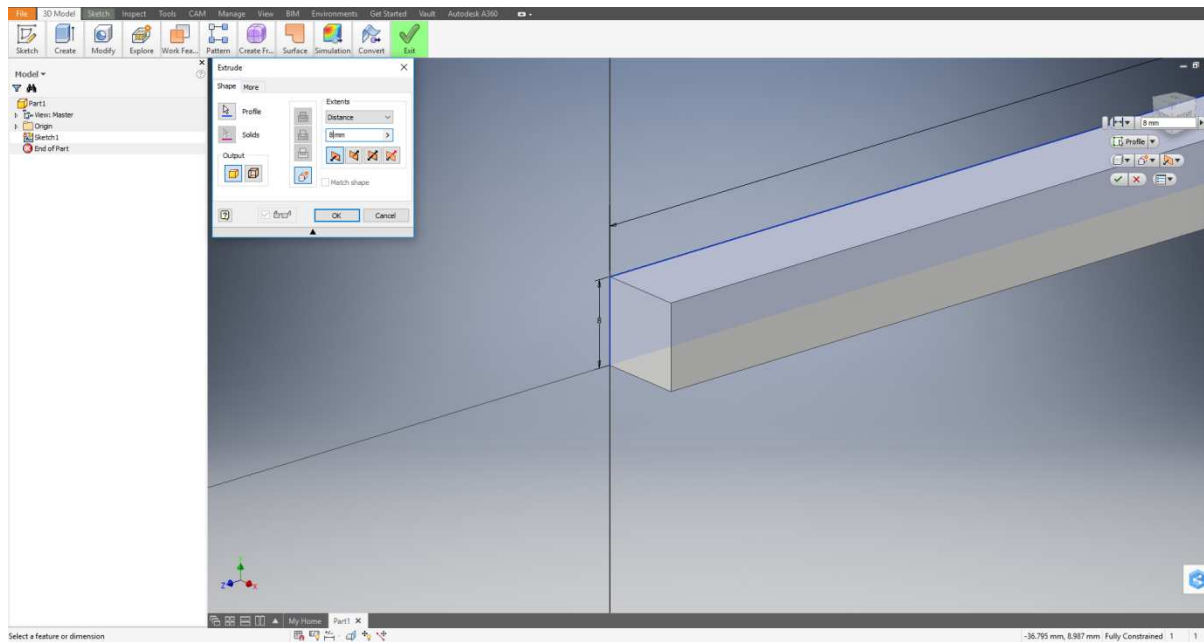
Πάμε να δούμε αναλυτικά τη διαδικασία σχεδιασμού των δοκιμών

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Σχεδιάστηκε στο Autodesk Inventor ένα ορθογώνιο με ύψος 8mm και μήκος 120mm

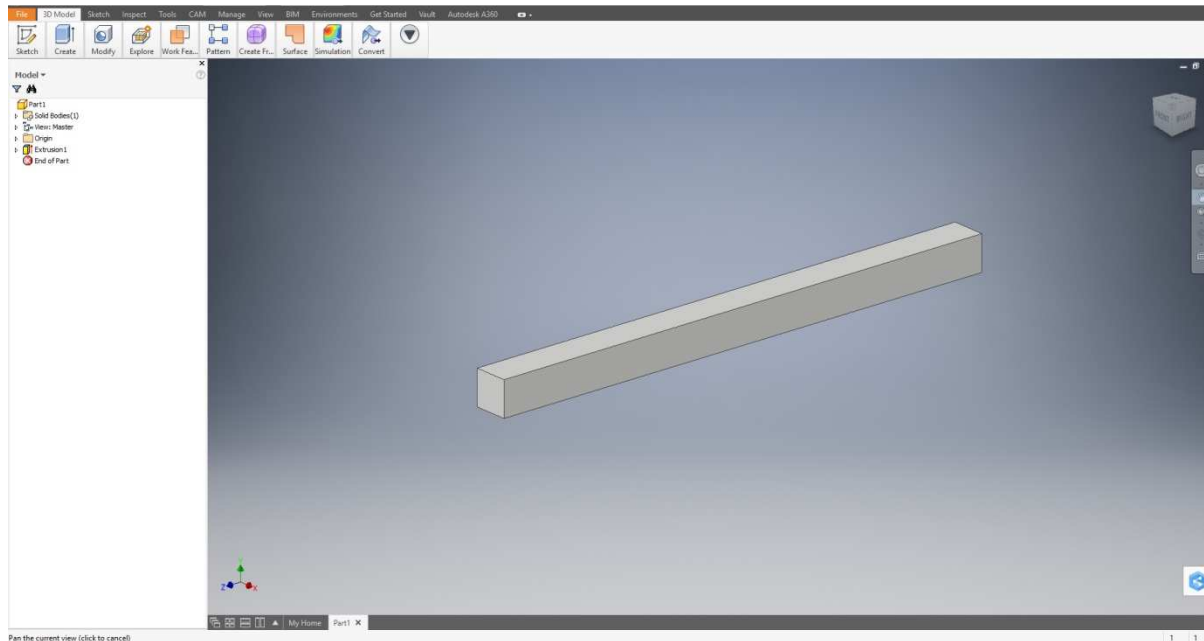


Και στη συνέχεια έγινε extrude με ύψος 8mm από τη μία μεριά μόνο



ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Και άρα δημιουργήθηκε το δοκίμιο με διαστάσεις 8mm*8mm*120mm

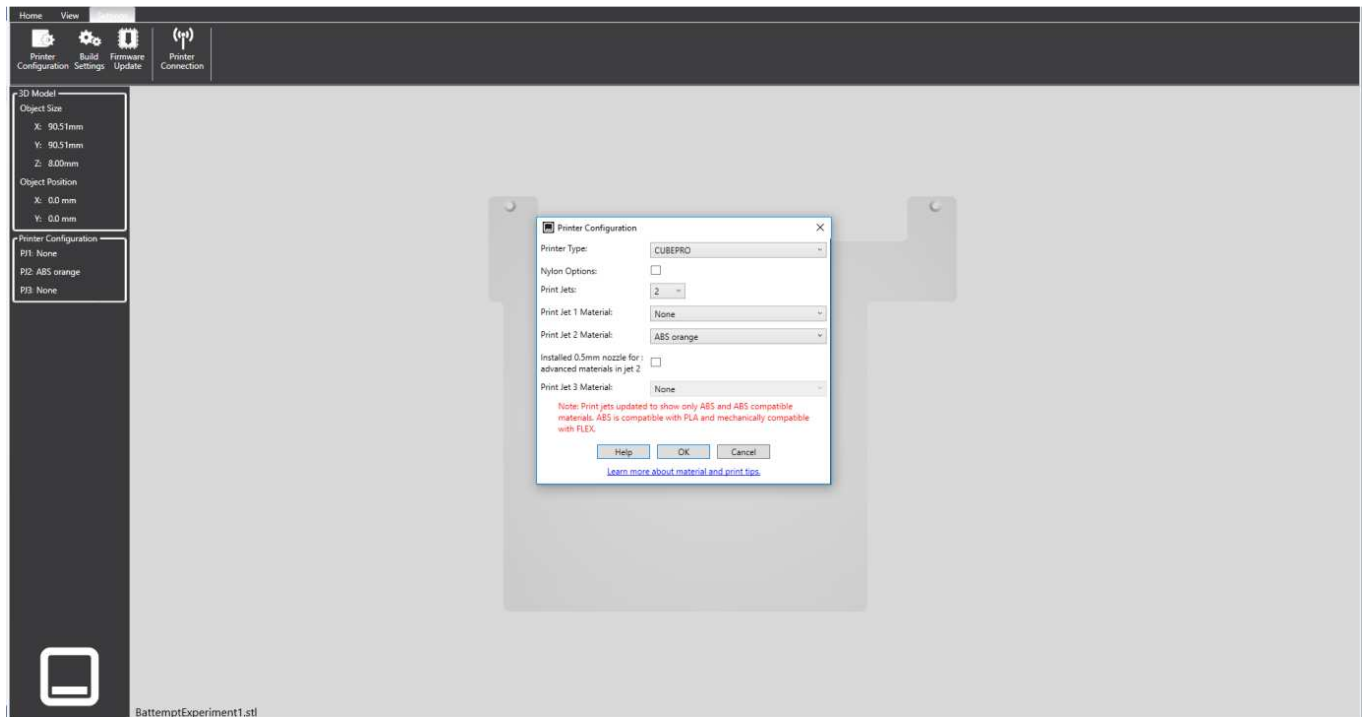


Στη συνέχεια αποθηκεύθηκε σαν «.stl» αρχείο μέσω του menu File=>export του Inventor.

Κατόπιν ανοίξαμε το πρόγραμμα CubePro (που έρχεται μαζί με τον 3D εκτυπωτή από τον κατασκευαστή) και ανοίξαμε-φορτώσαμε το συγκεκριμένο αρχείο.

Αρχικά θέσαμε στον εκτυπωτή στο Printer Settings ότι μόνο ο 2^{ος} εκτυπωτής θα τυπώσει και αυτό έγινε μέσω της επιλογής Printer 1 : None, Printer 2: ABS Orange , Printer 3: None

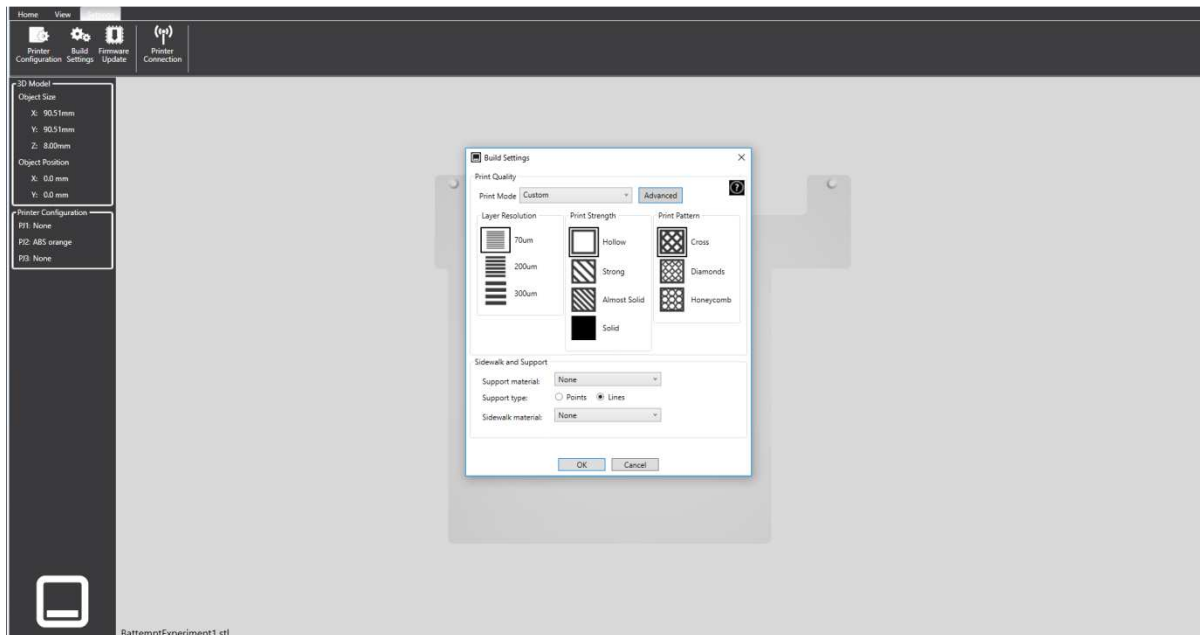
ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



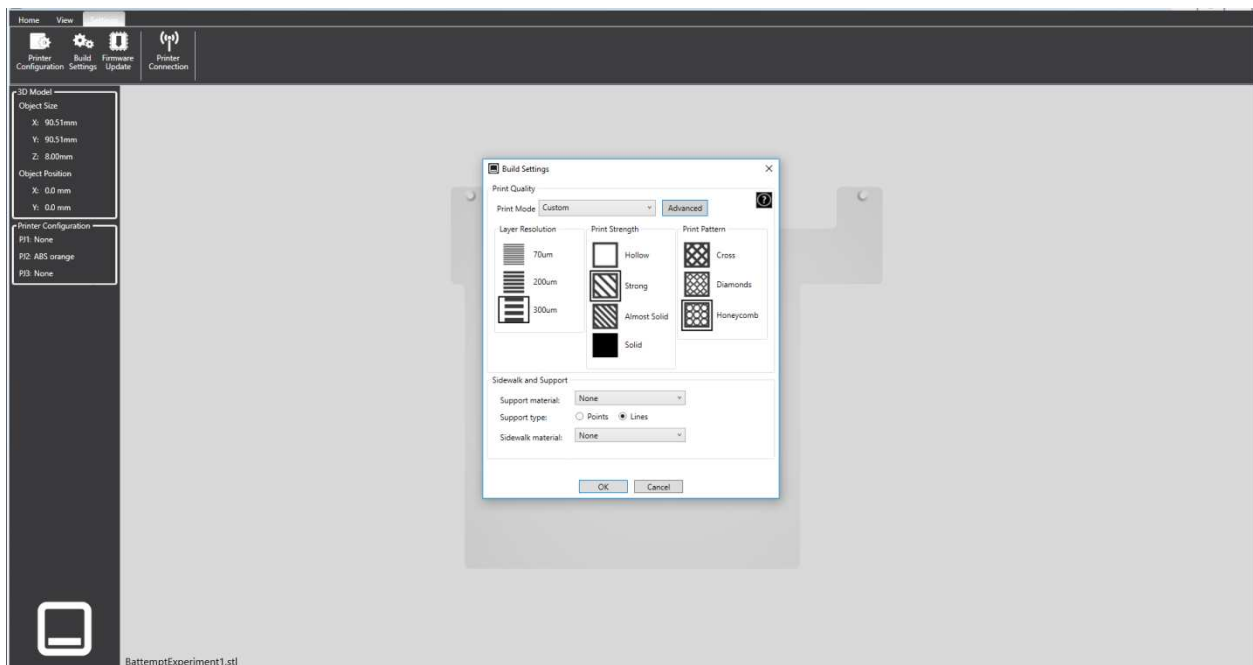
Να σημειωθεί στο σημείο αυτό πως επιλέχθηκε sidewalk material “None” δηλαδή δεν δημιουργήθηκε πλαίσιο κατά την εκτύπωση για να υποστηρίξει το δοκίμιο – κάτι τέτοιο θα ήταν περιττό στη συγκεκριμένη περίπτωση-

Εδώ παρατίθενται οι επιλογές για το 1^ο δοκίμιο

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



Κι εδώ οι επιλογές για το 9ο δοκίμιο

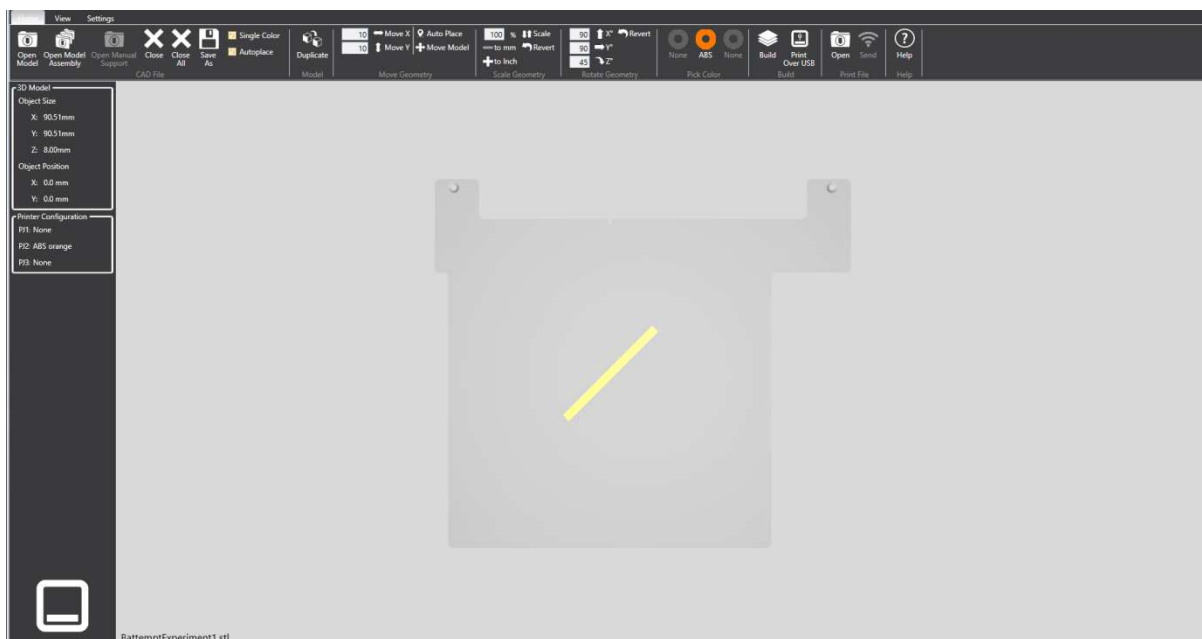
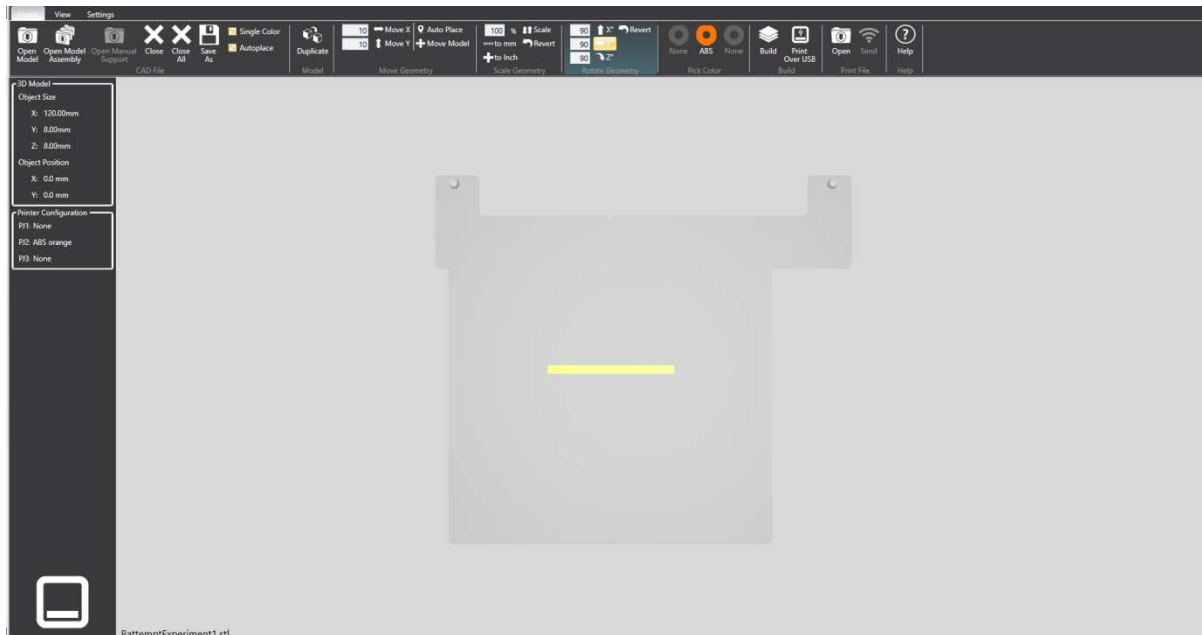


Οι 9 διαφορετικοί συνδυασμοί δίνονται αναλυτικά στον L9 Orthogonal Array πίνακα παρακάτω στην πτυχιακή.

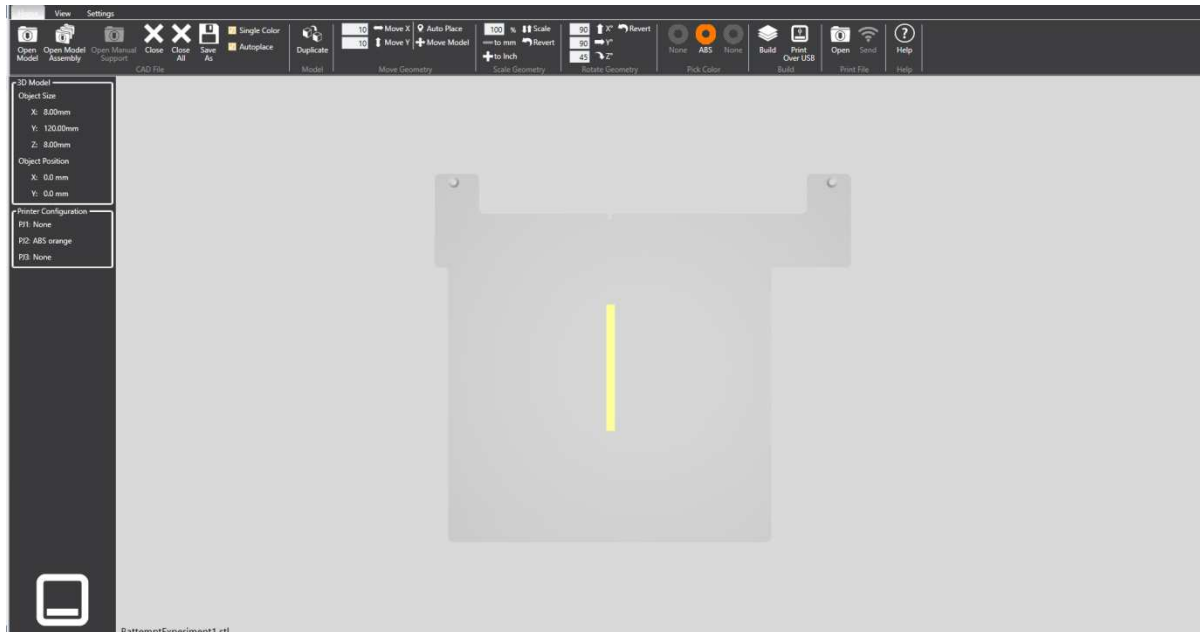
ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Επίσης στις επιλογές είναι η τοποθέτηση του δοκιμίου οριζόντια, κάθετα ή σε γωνία 45° .

Αυτό γίνεται με την επιλογή περιστροφής γύρω από τους άξονες X, Y, Z στο πάνω μέρος της οθόνης. Παρατίθεται η τοποθέτηση του δοκιμίου οριζόντια, σε γωνία 45° και κάθετα



ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



Κατόπιν κάναμε build και μας έβγαλε το χρόνο κατασκευής και αποθηκεύσαμε το αρχείο σε ένα στικάκι ώστε να μεταφερθεί στον 3D εκτυπωτή, (το αρχείο μας είναι έτοιμο).

Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε 9 φορές, με τις παραμέτρους του κάθε δοκιμίου κάθε φορά, κι έτσι δημιουργήθηκαν τα 9 δοκίμια.

Ο 3D εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο CubePro Duo της 3D Systems, ο οποίος είναι κατάλληλος τόσο για επαγγελματικές εφαρμογές όσο και για τον χομπίστα του σαββατοκύριακου.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



(Φωτό : <https://www.3dsystems.com/shop/cubepro>)

ΥΛΙΚΟ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Χρησιμοποιήσαμε το υλικό ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) που παρέχει η εταιρία 3Dsystems και βγαίνει σε κόκκινο και πορτοκαλί χρωματισμό.

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Στη συνέχεια τα 9 δοκίμια εφελκύσθηκαν με φόρτιση 1mm/min και προέκυψαν οι μετρήσεις σε Nt και mm παραμόρφωσης. Το μηχάνημα εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκε είναι το Galdabini Quasar 100.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

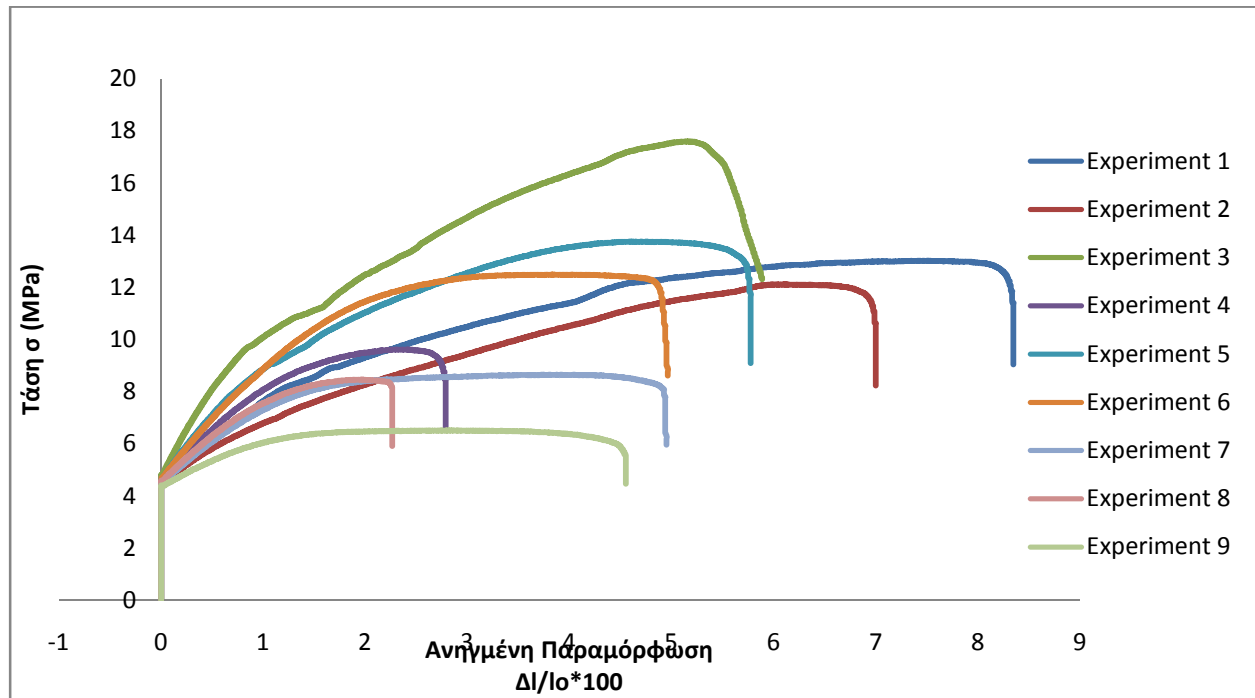


(Φωτό:

<http://www.spectrographic.co.uk/product-category/equipment/mechanical-testing/>)

Οι μετρήσεις που μας έδωσε η εφελκυστική μηχανή είναι σε Nt και mm επιμήκυνσης. Επεξεργάστηκαν ώστε να δώσουν Τάση «σ» και Ανηγμένη Παραμόρφωση. (Αναλυτικότερα οι μετρήσεις της δύναμης σε Nt διαιρέθηκαν με τη διατομή του δοκιμίου $64 \cdot 10^{-6} \text{m}^2$ και η επιμήκυνση διαιρέθηκε με το ωφέλιμο μήκος (gauge) και επί τοις εκατό (gauge) 80mm *100 και προέκυψε το παρακάτω συγκεντρωτικό διάγραμμα.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



Από το διάγραμμα αυτό βλέπουμε πως τα πειράματα διαφέρουν σε Μέγιστη Τάση και Ανηγγμένη Παραμόρφωση όπως διαφέρουν και στις παραμέτρους εκτύπωσης. Το πείραμα που θραύεται στη μέγιστη τάση είναι το 3^ο πείραμα ενώ το πείραμα που θραύεται στην μικρότερη τάση είναι το 9^ο πείραμα. Το πείραμα με τη μέγιστη παραμόρφωση είναι το 1^ο πείραμα ενώ το πείραμα με τη μικρότερη παραμόρφωση είναι το 4^ο πείραμα. Ας δούμε την επεξεργασία των μετρήσεων.

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ TAGUCHI ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ MINITAB

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ TAGUCHI

Ο Taguchi Ιάπωνας μηχανικός και στατιστικός δημιούργησε την ομώνυμη μέθοδο με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ποιότητας των προϊόντων. Η μέθοδος είχε σκοπό για την βελτιστοποίηση της ποιότητας ενός προϊόντος πριν από την παραγωγή του κατά το σχεδιασμό του και όχι έπειτα κατά τον έλεγχο του. Δημιούργησε μια καμπύλη απώλειας (loss function curve) που όριζε μια συγκεκριμένη τιμή και μια 2^{ου} βαθμού εξίσωση που την περιγράφει με διακύμανση την βέλτιστη τιμή (Ranjit Roy).

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Όσο μικρότερη είναι η διακύμανση (variance) της συνάρτησης από τη συγκεκριμένη τιμή, τόσο καλύτερη η ποιότητα του προϊόντος και ταυτόχρονα τόσο μεγαλύτερο το όφελος για την κοινωνία. Έχει πολλές εφαρμογές κυρίως στη χημική και φαρμακευτική βιομηχανία. (Ranjit Roy).

Μεθοδολογία Taguchi

Η μεθοδολογία Taguchi έχει τα εξής βήματα :

- 1) Καθορισμός της διαδικασίας που σκοπό έχει την επίτευξη της βέλτιστης τιμής μιας παραμέτρου (π.χ. θερμοκρασία). Η απόκλιση από τη βέλτιστη τιμή μας δίνει την καμπύλη απώλειας (loss function curve) που σκοπός είναι η ελαχιστοποίησή της.
- 2) Καθορισμός των παραμέτρων που καθορίζουν/επηρεάζουν τη βέλτιστη τιμή (π.χ. πίεση)
- 3) Δημιουργία του L πίνακα με τις παραμέτρους αυτές. (π.χ .L9 orthogonal array)
- 4) Πραγματοποίηση των πειραμάτων που περιγράφει ο L πίνακας και συλλογή των αποτελεσμάτων
- 5) Επεξεργασία των αποτελεσμάτων με σκοπό τη διερεύνηση του βαθμού επιρροής της κάθε παραμέτρου στη βέλτιστη τιμή (στην πτυχιακή αυτή με το πρόγραμμα Minitab)

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Έχουμε 4 παράγοντες (factors) με τον καθένα να παίρνει 3 διαφορετικές τιμές (3 levels) στα πειράματά μας. Οι παράγοντες είναι

- 1) **Το πάχος στρώματος.** Πρόκειται για το πάχος του κάθε στρώματος που εναποθέτει το ακροφύσιο. Παίρνει 3 διαφορετικές τιμές 70um, 200um και 300um
- 2) **Στυλ εκτύπωσης.** Αναφέρεται στο «σχέδιο» που κάνει το ακροφύσιο καθώς τυπώνει και παίρνει 3 διαφορετικές τιμές : cross, diamond και honeycomb.
- 3) **«Δύναμη» εκτύπωσης (Print strength)** Είναι στην ουσία μία έκφραση για το πόσο «πυκνό» είναι το τύπωμα και παίρνει 3 τιμές: hollow, strong και solid.
- 4) **Τοποθέτηση στην πλάκα.** Είναι πώς τοποθετείται στην πλάκα καθώς τυπώνεται το δοκίμιο και παίρνει 3 τιμές: οριζόντια, κάθετα και σε γωνία 45⁰.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Οπότε ο L9 Orthogonal Array γίνεται

	Πάχος εκτύπωσης (um)	Στυλ εκτύπωσης	«Δύναμη» εκτύπωσης (Print strength)	Τοποθέτηση στην πλάκα
experiment 1	70	cross	hollow	οριζόντια
experiment 2	70	diamond	strong	κάθετα
experiment 3	70	honeycomb	solid	45 ⁰
experiment 4	200	cross	strong	45 ⁰
experiment 5	200	diamond	solid	οριζόντια
experiment 6	200	honeycomb	hollow	κάθετα
experiment 7	300	cross	solid	κάθετα
experiment 8	300	diamond	hollow	45 ⁰
experiment 9	300	honeycomb	strong	οριζόντια

Οι μετρήσεις επεξεργάστηκαν ώστε να καθοριστεί ποια παράμετρος επηρεάζει τη μέγιστη τάση θραύσης, ποιό είναι το πιο ανθεκτικό δοκίμιο δηλαδή.

Για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία Taguchi ώστε να κερδίσουμε σε επαναληψιμότητα. Δηλαδή με τη χρήση της μεθοδολογίας Taguchi είχαμε αποτελέσματα σαν να κάναμε όχι μόνο 9 άλλα 81 (3⁴) πειράματα .

Χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πρόγραμμα Minitab. Κάναμε επεξεργασία με 3-level και 4-factors με 9 πειράματα.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

16/05/2017 10:16:01

Welcome to Minitab, press F1 for help.

Taguchi Design

Taguchi Orthogonal Array Design

L9(3⁴)

Factors: 4
Runs: 9

Columns of L9(3⁴) Array

1 2 3 4

Worksheet 1 ***

↓	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	A	B	C	D	max stress	max e			
1	1	1	1	1	13.0234	8.3500			
2	1	2	2	2	12.1172	7.0000			
3	1	3	3	3	17.6094	5.8875			
4	2	1	2	3	9.6250	2.7875			
5	2	2	3	1	13.7656	5.7750			
6	2	3	1	2	12.5000	4.9625			
7	3	1	3	2	8.6563	4.9500			
8	3	2	1	3	8.4609	2.2625			
9	3	3	2	1	6.5234	4.5500			
10									

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Τα αποτελέσματα που μας έδωσε είναι τα εξής :

Taguchi Analysis: max stress versus A, B, C, D

Response Table for Signal to Noise Ratios
Larger is better

Level	A	B	C	D
1	22.96	20.24	20.93	20.45
2	21.46	21.00	19.21	20.78
3	17.86	21.05	22.15	21.05
Delta	5.09	0.81	2.94	0.59
Rank	1	3	2	4

Response Table for Means

Level	A	B	C	D
1	14.250	10.435	11.331	11.104
2	11.964	11.451	9.422	11.091
3	7.883	12.211	13.344	11.901
Delta	6.367	1.776	3.922	0.810
Rank	1	3	2	4

Όπου A - Πάχος στρώματος
 B - Στυλ εκτύπωσης
 C - «Δύναμη» εκτύπωσης (Print strength)
 D - Τοποθέτηση στην πλάκα

Παρατίθεται ο L9 πίνακας που χρησιμοποιείται στην περίπτωση 9 πειραμάτων.

A - Πάχος στρώματος	B – Στυλ εκτύπωσης	C – «Δύναμη» εκτύπωσης	D – Τοποθέτηση στην πλάκα
1	70um	1 cross	1 οριζόντια
1	70um	2 diamond	2 κάθετα
1	70um	3 honeycomb	3 45 ⁰
2	200um	1 cross	2 45 ⁰
2	200um	2 diamond	3 οριζόντια
2	200um	3 honeycomb	1 κάθετα
3	300um	1 cross	2 κάθετα
3	300um	2 diamond	3 45 ⁰
3	300um	3 honeycomb	1 οριζόντια

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

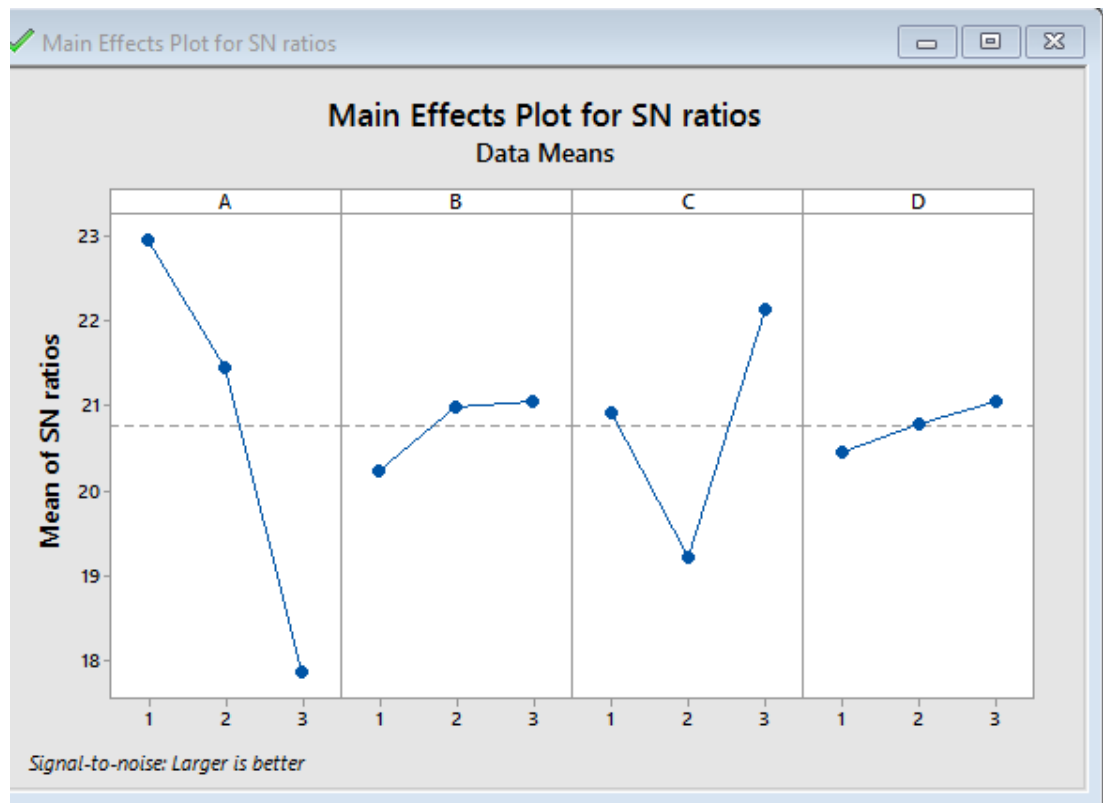
Τα οποία συνοδεύονται από τα διαγράμματα (που είναι μια απεικόνιση των αποτελεσμάτων)

Το S/N ratio (Signal to Noise ratio) εκφράζει τη διασπορά γύρω από μία συγκεκριμένη τιμή. Όσο μεγαλύτερο είναι το κλάσμα, τόσο μικρότερη η διασπορά (Ranjit Roy). Άρα θέλουμε να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη η τιμή του κλάσματος S/N.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει για τους 4 παράγοντες **A) πάχος στρώματος B) στυλ εκτύπωσης γ) «Δύναμη» εκτύπωσης δ) τοποθέτηση στην πλάκα** οι μεγαλύτερες τιμές του S/N κλάσματος που άρα δίνουν την μικρότερη διασπορά είναι οι εξής.

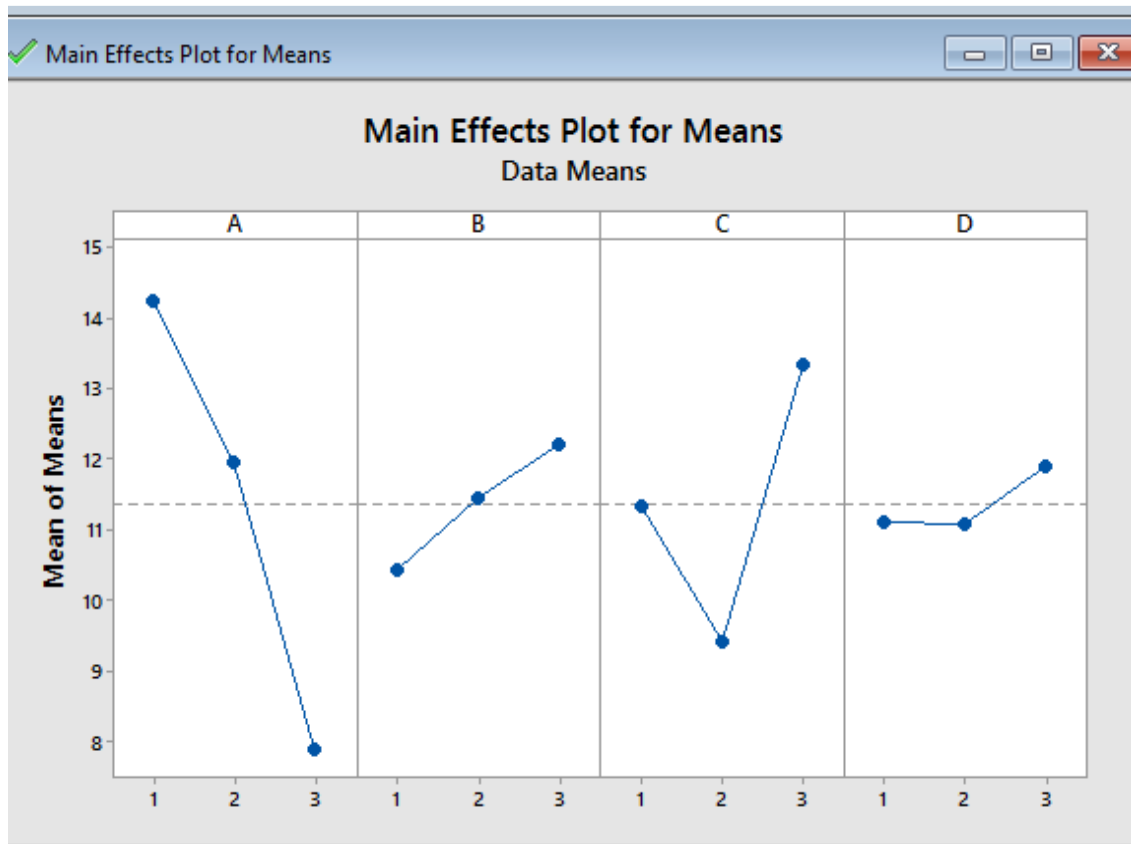
Για τον παράγοντα **A) πάχος στρώματος βέλτιστη τιμή είναι η 1^η τα 70um** για τον παράγοντα **B) στυλ εκτύπωσης βέλτιστη τιμή είναι η 3^η honeycomb** για τον παράγοντα **Γ) «δύναμη» εκτύπωσης βέλτιστη τιμή είναι η 3^η solid** και για τον παράγοντα **Δ) τοποθέτηση στην πλάκα βέλτιστη τιμή είναι η 3^η τιμή 45^ο γωνία**.

Ο αριθμός Delta δίνει την κλίση της ευθείας και το Rank δίνει την κατάταξη (σειρά) με την οποία επηρεάζουν οι 4 παράμετροι την μέγιστη τάση



ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

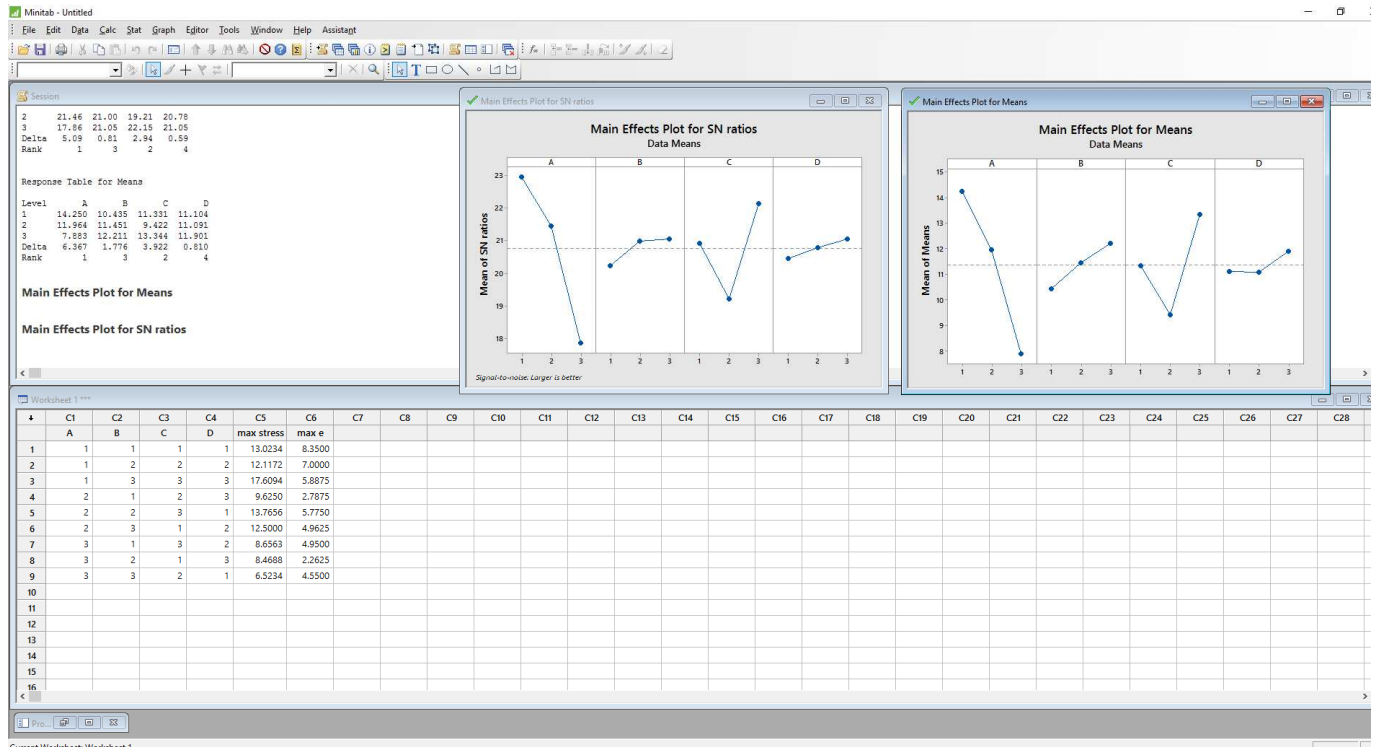
-Στην εικόνα αυτή βλέπουμε στον γ-άξονα τις μέσες τιμές για το S/N κλάσμα και στον x-άξονα τις 3 τιμές (levels) για κάθε παράμετρο (factor).



-Στην εικόνα αυτή βλέπουμε τις μέσες τιμές των μέσων που επιβεβαιώνει τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα.

(Συγκεντρωτικά εμφανίζονται σε μια οθόνη όπως παρακάτω:)

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αυτό που προκύπτει από τα αποτελέσματα φαίνεται και διαγραμματικά, το οποίο και σχολιάζεται εδώ.

1. Το 1^ο συμπέρασμα είναι πως στα πειράματα αυτά πιο πολύ επηρεάζει τη μέγιστη τάση το πάχος στρώματος (layer thickness), και μάλιστα με μεγάλη διαφορά σε σχέση με τους υπόλοιπους factors (παράγοντες). (Αυτό φαίνεται από την τιμή 22.96 του level1 factor A rank1). **Μάλιστα το πιο λεπτό στρώμα (70μm) δίνει υψηλότερη τάση θραύσης, για δεδομένη διατομή, δηλαδή μεγαλύτερη ανθεκτικότητα.** Ας δούμε πως αντιμετωπίζεται το αποτέλεσμα αυτό από τη διεθνή αρθρογραφία. Οι **Vaezi** και **Chua** (2010) στο άρθρο τους "Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process" (Springer Verlag) βρήκαν ότι μια αύξηση του πάχους εκτύπωσης από 0.087mm σε 0.1mm οδηγεί σε μείωση στη μέγιστη τάση εφελκυσμού (αλλά και σε χειρότερη ποιότητα επιφάνειας). Επίσης ως επιβεβαίωση του ίδιου αποτελέσματος, οι **Basaah et al** (2016) στο άρθρο τους "On the influence of sintering protocols and layer

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

thickness on the physical and mechanical properties of additive manufactured titanium porous bio-structures” βρήκαν ότι για τις θερμοκρασίες 1400⁰, 1200⁰, 1000⁰, 800⁰, το μέτρο του Young αυξάνει όσο μειώνεται το πάχος στρώματος από 175um σε 65um. Επίσης οι **Chacon et al** (2017) στο άρθρο τους «*Additive manufacturing of PLA structures using fused disposition modeling: Effects of process parameters on mechanical properties and their optimal selection*» βρήκαν ότι η ολκιμότητα (ductility) μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος στρώματος.

Ωστόσο οι **Fazardi et al** (2014) στο άρθρο τους “*Effect of layer thickness and printing orientation on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous samples for bone tissue engineering*” βρήκαν πως μεταξύ πάχους στρώματος 0.0875mm, 0.1mm, 0.1125mm και 0.125mm και 3 διαφορετικούς προσανατολισμούς X,Y,Z ο καλύτερος συνδυασμός που δίνει τις ανώτερες τιμές για σκληρότητα, μέτρο του Young, είναι το πάχος 0.1125mm τυπωμένο κατά την X- διεύθυνση. Η εξήγηση που δίνουν για τις ανώτερες αυτές τιμές είναι οι μειωμένες διατμητικές δυνάμεις στο συγκεκριμένο πάχος.

2. Ο παράγοντας που αμέσως μετά επηρεάζει τη μέγιστη τάση είναι η **«δύναμη» εκτύπωσης (Print Strength)** (αυτό φαίνεται από την τιμή 22.15 του Level 3 factor C rank 2) **με τη μέγιστη τάση να δίνει η επιλογή solid**. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ότι μεταξύ της «συμπαγούς» εκτύπωσης (solid) και της «κούφιας» (hollow) είναι αναμενόμενο η **solid** να έχει μεγαλύτερη αντοχή στον εφελκυσμό.
3. Αμέσως μετά ο **3^ς παράγοντας που επηρεάζει τη μέγιστη τάση είναι το στυλ εκτύπωσης** (αυτό φαίνεται από την τιμή 21.05 του level 3 factor B rank 3), **με τη μέγιστη τάση να δίνει η επιλογή honeycomb**. Το ίδιο αποτέλεσμα, πως δηλαδή την μέγιστη τάση στον εφελκυσμό δίνει η εκτύπωση “Honeycomb” επιβεβαιώνεται και στο άρθρο των **Tomislav Galeta et al**, (2016) με τίτλο «*Influence of Structure on mechanical properties of 3D objects*. Συγκεκριμένα, τύπωσαν 3 διαφορετικούς τύπους δοκιμών, Honeycomb, Drills και Stripes, έκαναν 6 διαφορετικές επαναλήψεις και κατέληξαν πως τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή δίνει η εκτύπωση **Honeycomb**.
4. Το αμέσως συνακόλουθο **4^ο συμπέρασμα είναι πως ο παράγοντας που επηρεάζει τη μέγιστη τάση είναι η τοποθέτηση στην πλάκα**. Συγκεκριμένα βρέθηκε πως η βέλτιστη τοποθέτηση στην πλάκα είναι οι 45^ο. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το άρθρο των **Fazardi et al** “*Effect of layer thickness and printing orientation on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous samples for bone tissue engineering*” όπου βρήκαν ότι η τοποθέτηση στην πλάκα που δίνει τη μέγιστη τιμή για σκληρότητα και μέτρο του Young είναι η τοποθέτηση στην X-διάσταση, Η εξήγηση που δίνουν είναι

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ότι το πιθανότερο ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η σύμπτωση της φοράς κίνησης της κεφαλής με τον άξονα X.

Η σειρά που επηρεάζουν την μέγιστη τάση οι παράγοντες είναι

Πάχος στρώματος > «Δύναμη» εκτύπωσης (print strength) > στυλ εκτύπωσης > τοποθέτηση στην πλάκα

(A>C>B>D)

Το δοκίμιο με την μέγιστη αντοχή στην τάση είναι αυτό με τις ακόλουθες επιλογές

Πάχος στρώματος : 70um

Στυλ εκτύπωσης : Honeycomb

«Δύναμη» εκτύπωσης (print strength) : solid

Τοποθέτηση στην πλάκα : 45⁰

Και συγκεκριμένα είναι το **3^ο δοκίμιο-πείραμα**, που δίνει **Μέγιστη Τάση 17.6094 MPa**

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ – ΕΡΕΥΝΑ

Θέματα για περαιτέρω έρευνα/προβληματισμό θα μπορούσε να αποτελέσει η εύρεση των επιλογών για μέγιστη παραμόρφωση και η αντίστοιχη τάση, ενδεχόμενα και με μεγαλύτερο αριθμό πειραμάτων. Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχει μια «ανταλλαγή - ισορροπία» μεταξύ τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης- όσο αυξάνεται η μέγιστη τάση μειώνεται η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση και το αντίστροφο (ποσά αντιστρόφως ανάλογα). Επίσης σαν αντικείμενο έρευνας θα μπορούσε κάποιος να θέσει συγκεκριμένες προδιαγραφές για τάση-παραμόρφωση και να αναζητήσει τις παραμέτρους εκείνες που δίνουν το βέλτιστο επιθυμητό αποτέλεσμα για τον επιθυμητό συνδυασμό τάσης-παραμόρφωσης.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ- ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Gu, Dongdong. *Laser Additive Manufacturing Of High-Performance Materials*. 1st ed. Springer, 2015.
- Gebhardt, Andreas. *Understanding Additive Manufacturing Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing*. 1st ed. Munich: Hanser Publication, 2011.
- Bandybadhay, Amit, and Susmita Bose. *Additive Manufacturing*. 1st ed. London New York: CRC Press, 2016
- Gibson, Ian, David Rosen, and Brent Stucker. *Additive Manufacturing Technologies*. 1st ed. New York: Springer Verlag, 2015.
- Strivatsan, T. S., and T. S. Sudarshan. *Additive Manufacturing Innovations Advances And Applications*. 1st ed. CRC Press, 2016.
- D. Callister Jr, William, and David G. Rethwish. *Επιστήμη Και Τεχνολογία Των Υλικών*. 9th ed. Wiley, 2014.
- Παντελής, Δ.Ι. *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*. 2nd ed. Αθήνα: Παπασωτηρίου, 1996. Print.
- Davis, J.R., and S.L. Siemantin. *ASM Handbook, Vol 21 Composites*. 1st ed. ASM International, 2001.
- Print-Mallik, P.K. *Fiber-Reinforced Composite Materials, Production And Design*. 3rd ed. CRC Press, 2007.
- Beukers, A. et al. *Composite Materials A Vision For The Future*. 1st ed. Springer, 2011. Print.
- Hull, Dereck. *An Introduction To Composite Materials*. 1st ed. Cambridge University Press, 1981.
- A Pilato, Dr. Louis, and Michael J Michno. *Advanced Composite Materials*. 1st ed. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2014.
- Barbero, Ever J. *Introduction To Composite Materials Design, Second Edition*. 1st ed. Hoboken: CRC Press, 2010.

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

- Poologasundarampillai, G. and Nommeots-Nomm, A. (2017). *3D printing in medicine*. 1st ed. Elsevier, pp.43-71
- K. Roy, Ranjit. *A Primer On The Taguchi Method (Competitive Manufacturing Series)*. 1st ed. Society of Manufacturing Engineers, 1990.
- Vaezi, M. and Chua, C. (2010). Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1-4), pp.275-284.
- Basalah, A., Esmaeili, S. and Toyserkani, E. (2016). On the influence of sintering protocols and layer thickness on the physical and mechanical properties of additive manufactured titanium porous bio-structures. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, pp.341-351.
- Chacón, J., Caminero, M., García-Plaza, E. and Núñez, P. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, pp.143-157
- Farzadi, A., Solati-Hashjin, M., Asadi-Eydivand, M. and Abu Osman, N. (2014). Effect of Layer Thickness and Printing Orientation on Mechanical Properties and Dimensional Accuracy of 3D Printed Porous Samples for Bone Tissue Engineering. *PLoS ONE*, 9(9), p.e108252.
- Galeta, T., Raos, P., Stojšić, J. and Pakšić, I. (2016). Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects. *Procedia Engineering*, 149, pp.100-104
- Myint, S., Minn, M., Yaping, R., Satyanarayana, N., Sinha, S. and Bhatia, C. (2013). Friction and wear durability studies on the 3D negative fingerprint and honeycomb textured SU-8 surfaces. *Tribology International*, 60, pp.187-197.
- Munaz, A., Vadivelu, R., St. John, J., Barton, M., Kamble, H. and Nguyen, N. (2016). Three-dimensional printing of biological matters. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1(1), pp.1-17

ΜΕΛΕΤΗ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΗΜΑ 3-D PRINTING ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (APPENDIX)

1. Μετρήσεις Δύναμης- παραμόρφωσης από την εφελκυστική μηχανή Galdabani Quasar 100
2. Επεξεργασμένες μετρήσεις Τάσης- Ανηγμένης Παραμόρφωσης σε excel
3. Αρχείο σχεδίου από Autodesk Inventor (δοκίμιο)
4. Ανάλυση Minitab σε ηλεκτρονική μορφή